

流跡線解析を用いた南極氷床への大気・水蒸気輸送

鈴木 香寿恵

総合研究大学院大学

複合科学研究科

極域科学専攻

2006

要旨

地球が太陽から受け取った熱エネルギーは赤道域から極域側へ大気と海洋によって輸送され、地球全体の熱バランスが保たれている。南極氷床は地球上の大きな冷源であり、貯水量は地球上の多年性雪氷総量の90%以上を占める。その質量収支は、地球温暖化などの気温の変化によって海面高度に大きな影響を与えることがわかっている。しかし、氷床の広大さや、遠隔地である点に加え現地観測や衛星観測のみでは情報が足りず、その全容が明らかにされていない。南極氷床を涵養する降雪は主に低気圧によるものだとされており、南極域周辺の低気圧経路は衛星データや流跡線解析を用いて既に得られている。しかしながら内陸部への総観規模擾乱による大気の侵入については低気圧経路では説明出来ておらず、沿岸部と内陸部に水蒸気をもたらす大気輸送についてその違いについての議論は進んでいない。

本研究は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、さらに降雪時の水蒸気輸送経路の推定を行った。本研究の特色は、沿岸部と内陸部での大気輸送の違いに着目した点と、地上気象観測データを用いた降雪時の選別手法にある。大気輸送経路の算出にはNIPR流跡線モデルを用い、ECMWF現業解析データとERA-40再解析データを入力データとした。気象観測データは天気概況による雲量、現在天気とレーウィンゾンデによる温度、気圧、相対湿度を用い、それぞれ天候データと可降水量を算出した。また、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、中層の代表として500hPa、下層は850hPaに到達する空気塊について調べた。ドームふじ基地については500hPaへの大気輸送について調べた。

まず、南極沿岸域への大気輸送を明らかにするため、1997年の昭和基地に到達する空気塊について、対流圏中層と下層における輸送の特長や季節変化について調べた。対流圏中層へ到達する空気塊は大半が大西洋上を移動していた。輸送経路長は1月に極小があり、その後ゆるやかに増加して冬季に最長となり、夏季にまた短くなっていた。1月には、多くの空気塊は鉛直方向に移動しないが、インド洋上の対流圏下層を通過して中緯度側から到達する空気塊も見られた。冬季にはほとんどの空気塊は中緯度側から対流圏下層を通過して到達していた。対流圏下層へ到達する空気塊は1年を通じて、東沿岸や南極内陸部から、大陸表面に沿って下降流となり内陸

側から到達する空気塊がほとんどであり、夏季は東側の大陸沿岸からの数が多くなっていた。対流圏中層ではほとんどが大西洋側から大気が輸送されていたのに対し、対流圏下層では中層と比べて輸送される場合が減っていた。

昭和基地周辺において対流圏下層には準定常的に低圧部が存在していることから、東からの大気輸送が卓越していた。対流圏中層では、下層と同じ状況は夏季にみられ、同時期では大陸やインド洋側からの大気輸送が多くなっていた。対流圏中層と下層において大気輸送経路の違いは、背景となる大気循環場の季節変化に伴って生じていた。

次に、対流圏大気の南極氷床への輸送経路および起源の季節変化について、沿岸部と内陸部、また沿岸部における対流圏の中層と下層での違いを明らかにするため、5日前の空気塊の位置を起源として、海領域ごとの季節変化を調べた。昭和基地上空500hPaに到達する一年通じて空気塊は海起源が約8割を占め、大陸起源は2割となっていた。海起源の中では、中緯度から偏西風帯を横切る際に上昇し、その後大西洋上を南東方向へ移動する大西洋起源の空気塊が約7割となっていた。太平洋側から偏西風帯域を東向きに長距離輸送される空気塊は、高度方向の運動は少なく、インド洋側から移動してきて大陸沿岸近くで急激に上昇した空気塊は、沿岸伝いに西向きに輸送されていた。昭和基地上空850hPaへ到達する空気塊は、海起源と陸起源の割合はほぼ等しく、中層に到達する空気塊よりもインド洋側・内陸側から西向きの輸送が多くなっていた。対流圏中層では下層の約2倍の速度で風が吹いているため、長距離を輸送された経路が比較的多くみられたが、下層ではほとんどみられなかった。

ドームふじ基地上空500hPaへ到達する空気塊の経路には、海起源と陸起源の割合は昭和基地の対流圏下層と同様に半々であるが季節変化がみられた。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が増加する事で海起源が優勢となっている。大西洋、インド洋側から偏西風帯を横切る際に上昇し、その後も内陸部へ上昇しながら到達する空気塊と、ロス海側から南極点付近を通過して、中層域から下降して到達している空気塊がみられた。

昭和基地へ東向きに海上から大気が輸送されるのは、昭和基地の西側に低圧部がある場合であり、西向きに沿岸伝いに下降して大気が輸送されるのは昭和基地付近に高圧部、インド洋側に低圧部が発達する場合であった。ドームふじ基地へ大西洋

およびインド洋上から大気が輸送される場合は、ドームふじ基地周辺が高圧部となっている場合であった。太平洋上から南極点側を通過する大気の流入や南極氷床上からの大気が輸送される時は、ドームふじ基地周辺が低圧領域になって北西方向へ大気が輸送される状況になっていた。

さらに、地上気象観測データを用いて天候ごとの対流圏中層・下層における大気輸送経路の特徴を調べ、水蒸気輸送の推定を行った。天候別に平均した可降水量の季節変化は、全ての天候において気温に依存していた。その値は降雪時に全体の平均値よりも高く、快晴時の約2倍になっていた。降雪時には昭和基地周辺に水蒸気を多く含んだ大気が輸送されていることが示された。

降雪時、水蒸気が多く含まれる大気が大西洋上の偏西風帯からプラネタリー波の蛇行によって転向され、到達直前に上昇して直接昭和基地に輸送されていた。曇天の場合においては、降雪時と同様に海上起源の輸送が多いが、直接昭和基地へ到達するのは対流圏中層の冬季に限ったものであり、到達2日前付近で緩やかな上昇をして到達していた。曇天の場合の対流圏下層と、快晴・晴天の場合の対流圏中層における大気輸送の特徴には、大陸上に一旦侵入してから昭和基地へ到達する傾向がみられた。快晴・晴天の対流圏下層の空気塊は、海上からの流入は少なく、沿岸部を西向きに地形に沿って移動していたが、全体的に輸送距離が短かった。水蒸気を多く含む大気は、偏西風帯から蛇行して輸送され直接昭和基地へ到達しており、総観規模擾乱に伴う移流によるものであると考えられた。

ドームふじ基地における降雪時の大気輸送経路の特徴は、プラネタリー波の蛇行によって生じたドームふじ基地の上空に侵入したリッジと西側に発達したトラフにより、水蒸気を多く含んだ大気が内陸部まで直接流入していた。また、ウェッデル海側からも大気が流入しやすい状況になっていた。平均的な比湿の値は他の天候の2倍程度になっており、中緯度側から水蒸気を多く含んだ大気が到達していた。降雪時以外の天候の場合の大気輸送経路は、輸送経路によらず比湿の値は小さいままドームふじ基地に到達していた。

沿岸部の昭和基地では一定方向からの大気輸送が卓越している故、天候によって輸送経路の特徴が明確であるのに対し、内陸部のドームふじ基地においては様々な方向から大気輸送がされており、天候による大気輸送経路別の起源や到達する方向の特徴は明確には得られなかった。そこで積雪量の多い降雪をもたらす大気輸送経

路について着目し、内陸氷床を涵養する総観規模擾乱の輸送経路の特徴を得る試みを行った。

1997年のドームふじ基地における現地気象観測データおよび雪尺データから特に降雪量が多いブリザード時を選別し、その大気輸送経路の特徴について調べた。水平輸送経路はほとんどが大西洋上を大きく蛇行しており、風向を変えてドーム基地のある内陸部へ侵入していた。到達2日前には50°Sから60°Sの間に収束し、その後1日ごと、緯度にして約10度程度移動しており、1日前では2000m以下の対流圏下層部にあった大気が1日で2000m以上上昇する様子がみられ、到着直前まで空気塊は比較的水蒸気を多く含んでいた。中緯度側から気温の高い大気が偏西風帯を通過して発達した総観規模擾乱により移流され、大陸上へ短時間で侵入することで、内陸部に降雪をもたらすことが示された。本研究の結果は1997年のみに限っているため、一般性については言及できないが、ドームふじ基地周辺の涵養に影響を与える水蒸気輸送経路の一片を示すことが出来たと考えられた。

本研究では1990年から1999年における客観解析気象データを用いた大気輸送経路について、南極沿岸部と内陸部における違いについて調べ、さらに降雪時の大気輸送経路から降雪中の水蒸気起源の推定を行った。南極氷床を涵養する積雪は、沿岸部には主に低気圧性の擾乱によって、内陸部には高気圧性の擾乱が侵入することによってもたらされてることに着目し、その水蒸気輸送経路と起源を推定する試みがされた。

目次

第1章 序論	
1-1. 南極域の大気循環	1
1-2. 南極氷床を形成する水蒸気	2
1-3. 流跡線解析を用いた大気輸送経路の気候値の推定	4
1-4. 目的	6
第2章 流跡線解析	
2-1. 流跡線解析	8
2-2. 国立極地研究所流跡線モデル	9
第3章 データ	
3-1. 全球客観解析データ	11
3-1-1 ECMWF現業解析データ	11
3-1-2 ERA-40客観解析データ	11
3-2. 地上気象観測データ	12
第4章 昭和基地における1997年の対流圏大気輸送	
4-1. 対流圏中層に到達する大気輸送の季節変化	
4-1-1. 流跡線解析結果	16
4-1-2. 500hPaにおける大気循環場	17
4-2. 対流圏下層に到達する大気輸送の季節変化	
4-2-1. 流跡線解析結果	18
4-2-2. 850hPaにおける大気循環場	19
4-3. プラネタリー波による輸送経路の変化	
4-3-1. 春季の準定在波	20
4-3-2. 6月に発生したブロッキング現象	21
4-4. まとめ	22
第5章 昭和基地及びドームふじ基地における対流圏大気輸送と起源	
5-1. 海領域区分	39
5-2. 昭和基地上空対流圏中層に到達する大気輸送経路と起源の季節変化	
5-2-1. 大気輸送経路	40
5-2-2. 大気輸送起源	41
5-3. 昭和基地上空対流圏下層に到達する大気輸送経路と起源の季節変化	
5-3-1. 大気輸送経路	42
5-3-2. 大気輸送起源	44
5-4. ドームふじ基地上空対流圏中層に到達する大気輸送経路と起源の季節変化	
5-4-1. 大気輸送経路	45
5-4-2. 大気輸送起源	46
5-5. 考察・まとめ	

5-5-1.	大気循環場の特徴	47
5-5-2.	大気輸送経路の特徴	49
第6章 昭和基地及びドームふじ基地における降雪時の大気輸送経路と起源		
6-1.	昭和基地における水蒸気量の季節変化	
6-1-1.	可降水量	70
6-1-2.	天候による水蒸気量の違い	72
6-2.	昭和基地における降雪時の大気輸送経路とその起源	
6-2-1.	天候別の大気輸送経路の特徴	73
6-2-2.	大気循環場の特徴	76
6-3.	ドームふじ基地における降雪時の大気輸送経路と起源	
6-2-1.	天候別の大気輸送経路の特徴	77
6-2-2.	大気循環場の特徴	79
6-4.	まとめ	80
第7章 水蒸気輸送に関する考察		
7-1.	水蒸気輸送起源の推定	
7-1-1.	昭和基地における水蒸気輸送	99
7-1-2.	ドームふじ基地における水蒸気輸送	101
7-2.	本解析手法の限界および今後の課題	103
第8章 結論		
		109
謝辞		
		112
参考文献		
		113

第1章 序論

1-1. 南極域の大気循環

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、外的な影響が少ない場所である。したがって、南極氷床で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たオゾンホールが発見がされ (Crutzen, 1974; Molina and Rowland, 1974; 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(Nakazawa et al., 1991; Morimoto et al., 2003)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、流跡線解析による南半球における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・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(Trenberth, 1991)の再統計が取られている。これらの気候値によると、昭和基地周辺は多くの低気圧が大西洋側から通過していることが示されており、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°Sから60°Sの辺りを中心に発達している(Hartmann and Lo, 1998)。偏西風域には低気圧が発生しやすく、その擾乱が氷床に接近した際に降雪が氷床沿岸部にもたらされる。南極氷床の高度は沿岸部では急勾配になっており、内陸部では高度4000メートルを超えているため、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の擾乱や高気圧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40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、佐藤(2004)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。

1-2. 南極氷床を形成する水蒸気

南極氷床は、地球上の多年性雪氷総量の9割以上を占めている。その質量収支は、海面高度の変動に大きな影響を与える事もあるため、関心が高まっている。氷床を涵養する水蒸気の供給源は、低気圧がもたらす降雪と考えられているが、大陸の冷たい積雪斜面では、冷やされ重くなった空気が地面をほうのように滑り降りてくる、カタバ風とよばれる風が卓越している。このカタバ風によって地吹雪が起こり、飛雪によって積雪が広域に再配分されている。

TOVSなどのセンサーを搭載した衛星による観測が開始された1980年代から南極域の水蒸気フラックス収支を求める研究が盛んになった。Yamazaki (1992)はNMC (National Meteorological Center)客観解析データを1986年から1990年の5年間分使用し、南極域における水蒸気フラックスの気候値を求めた。昭和基地におけるレーウィンゾンデから得られた可降水量との比較も行われている。大陸沿岸部周辺では西向きの水蒸気フラックスが卓越するのに対し、南大洋上では東向きの水蒸気フラックスが卓越している。水蒸気フラックスの収支は海洋上および沿岸部では正、内陸部では負となっている。さらにOshima and Yamazaki (2004) は昭和基地付近の水蒸気フラックスの季節変化は、特に夏から秋にかけて西向きが卓越し、冬には弱まる傾向があることを示した。水蒸気フラックスは、風の影響を受けるため、偏西風帯では東向きになっており、昭和基地周辺東側に低圧部が存在する事から、西向きのフラックスが卓越すると指摘されている。南極氷床沿岸部と内陸部では水蒸気輸送は異なっているが、水蒸気起源という観点からの氷床内外における違いについてはまだあまりよく知られていない。

1990年代に昭和基地ではエアロゾル観測が開始され、現在に至る連続した大気中エアロゾルのデータが蓄積されている。また、1997年から98年にはドームふじ基地でも同様なエアロゾル観測が行われた。Hara et al. (2004)は、沿岸部にある昭和基地と内陸部にあるドームふじ基地で観測された海塩粒子 (Naイオン) の季節変化から大気による海塩の輸送経路や供給源を推定している。昭和基地においてNaイオンは夏季に減少し、冬季増加するが、冬季に現れるピーク時は、気圧が低く、気温が高い状況下にあった。低気圧によるブリザードを含む降雪時がこのピークと一致しており、低気圧による降雪（もしくは低気圧によって輸送される水蒸気）と海塩粒子の輸送が何らかの関係があると考えられる。したがって、沿岸部における昭和基地で観測されたエアロゾルデータの解釈に、降雪時の大気輸送経路の代表的なパターンやその起源の情報は重要である。

近年、氷床を涵養する積雪をサンプリングし、大気中の酸素同位体を測定してその降雪の水蒸気起源を推定する研究も、特に長期間の地上気象・雪氷観測が行われている観測基地 (Bromwich and Weaver, 1983; Schwarz et al., 1996; Hensen et

al., 2005) や、氷床コア掘削地点周辺 (Schlosser et al., 2005; Broeke et al., 2006)で活発になっている。

日本の氷床コア掘削地点であるドームふじ基地では、2006年1月に世界最深長の一つである、3000メートルを越える氷床コアが掘削された。現在氷床コアデータ分析が進められており、過去数十万年スケールの古気候の再現が期待されている。たとえば、南極氷床上にあるドームC基地で掘削された氷床コアの分析結果は気温変動の再現を可能とし、200年前の大気循環場の推測がされている(Delmonte et al., 2005)。このような古気候を再現する際に、一般に氷床コア中の酸素安定同位体比を気温の指標として用いることが多い。ドームふじ基地ではこの同位体比が現実的に気温の指標になりうるか、検証が進められている。Motoyama et al. (2005) と Fujita and Abe (2006)は、それぞれ1997年と2003年にドームふじ基地における降雪サンプリングを行い、得られた大気安定同位体比から、降雪中の同位体比の季節変化は気温の変化に依存していると示した。このような研究は近年盛んになりつつあるが、氷床コアを涵養する大気中の水蒸気輸送について未だ情報は少なく、輸送経路や起源の理解が求められている。

1-3. 流跡線解析を用いた大気輸送経路の気候値の推定

近年、ある地点を通る、空気塊の輸送経路の気候値を流跡線解析により求める研究が盛んになってきている。この背景には、観測網の拡充やデータ同化手法の改良により、長期間に渡って均質かつ高精度な全球気象データを得られるようになってきた、ということがまず挙げられる。例えば、ケニアへの大気輸送経路の算出 (Gatebe et al., 1999) や、南極点への大気の輸送自体に着目した研究 (Harris, 1992)では、到達する空気塊の輸送経路の特徴や季節変化を示している。また、大気微量成分の変動に着目した、北極域にあるスバルバルやフィンランドへの二酸化炭素の輸送経路の気候値(Eneroth et al., 2003; Eneroth et al., 2005)や、汚染物質のアメリカ大陸からヨーロッパへの輸送経路(Stohl et al., 2003)、南極ではGeorg-von-Neumayer基地に到達するラドンの輸送経路の特徴や季節変化(Wyputta, 1997)などが得られている。

流跡線の経路の分類には主にクラスター分析が用いられ、クラスターごとの流跡線の特徴やそのバックグラウンドとなる大気循環場の特徴が述べられているが、輸送経路の類似性による分類が輸送経路全体の特徴を十分に示すことが出来ているのかについての議論は少ない。一方、経度60度ごとの領域における、36時間後、72時間後、120時間後の空気塊の位置について共分散を計算し、空気塊の位置の確率分布を示す手法 (Kottmeier and Fay, 1998; Helsen et al., 2006) なども用いられている。クラスター分析や共分散による確率分布などは、統計学的に正確であっても、輸送経路の本質的な特徴を見落とす可能性があると考えられる。本研究では昭和基地・ドームふじ基地への水蒸気輸送空気塊に着目するため、空気塊のもつ水蒸気量（陸起源か海起源か）、および昭和基地・ドームふじ基地への輸送を引き起こす擾乱（ストームトラックのある海域か否か）を意識した分類を行う。

近年、氷床コアの掘削が南極大陸やグリーンランド氷床で盛んに行われ、掘削コアの分析結果を解釈する際にその地点に至る大気輸送経路の把握が必要とされていることから、南極域の氷床コア掘削点における大気粒子輸送経路の研究が各国で進められている。Reijmer et al. (2002) は南極氷床上のドームふじ基地を含む4つのコア掘削地点に至る空気塊の流跡線解析を行い、それぞれの地点への大気輸送経路の気候値と、客観解析の降雪データを用いて判別した降雪時の大気輸送経路を、海領域区分を用いて定量的に示している。ドームふじ基地に降雪をもたらす大気輸送経路はインド洋起源が半数以上を占めていることが示されている。Schlosser et al. (2005) は、昭和基地と同様に沿岸部にあるGeorg-von-Neumayer基地への大気輸送経路の気候値と積雪中の同位体比の観測から、降雪時の大気輸送経路と起源は、大西洋上にあることを示している。Helsen et al. (2006) は、Dronning Maud Land基地周辺4地点のAWS観測データを用いてERA-40 (ECMWF 40 Years Re-Analysis) 降雪データの精度を検証した上で、客観解析による降雪データを使用した降雪時の流跡線経路の分類を行った。その結果、沿岸部における降雪の水蒸気起源は南極半島付近の近海であるが、内陸部における降雪の水蒸気起源は偏西風域である50°Sから60°S付近にあり、内陸部へ到達する暖かい大気がより遠くから流入している事を推測している。

いずれもAWSなどの自動観測データを利用した検証を行った上で客観解析による降雪データを用いた結果であり、現地で人による観測で得られた降雪データを取り入れた報告は皆無である。擾乱性の降水量の多い降雪時には客観解析による再現がある程度期待出来るが、局所的な循環場による降雪の再現に関して確証は得られていない。したがって、現地における地上気象観測による天候の記録による降雪時の選別は、これらの疑問を解決するに当たり重要な手法として挙げられる。

対流圏における流跡線解析を用いた大気輸送経路の研究では、主に5日間の後方流跡線を使用する。対流圏においては5日間の空気塊の移流によって生じる計算誤差が水平スケール1000 km程度と見積もられている(Kahl et al., 1989; Stohl et al., 1995)。また一般的に、対流圏における総観規模擾乱の時間スケールは3日~7日である。主に総観規模擾乱に伴う移流によって沿岸部にある昭和基地へ水蒸気が輸送されていると考え、本研究では5日間の後方流跡線を算出し、5日前の空気塊の位置を起源とした。流跡線解析を用いる際に5日前の空気塊の位置を調べることは、特に窒素や二酸化炭素などの温暖化物質や、エアロゾル粒子の起源を得るために行われている (Eneroth et al., 2003, Hara et al., 2004)。Reijmer and Van Den Broeke (2001) は、ECMWF現業解析による降雪データを用い、Dronning Maud Land 基地への降雪時の流跡線を算出している。降雪時の空気塊の輸送経路中の潜熱フラックスが極小を持ち、その後増大することから、4日前を水蒸気の起源と考えている。本研究では、ドームふじ基地が Dronning Maud Land 基地よりも内陸部にあることから、ドームふじ基地に降雪をもたらす可能性を持つ、偏西風域に発生し南極大陸周辺で消滅する総観規模擾乱による大気輸送を主に調べるために、5日前の位置を起源として考える。

1-4. 目的

本研究では、南極昭和基地およびドームふじ基地における大気輸送経路について、その季節変化や気候値を導くと共に、南極氷床を涵養する水蒸気の輸送経路を推定することを目的とする。昭和基地への大気輸送経路とその起源について、特徴と季節変化を調べることは、沿岸部に影響を与える大気循環場の季節変動や、擾乱に伴う水蒸気輸送を理解するために重要であると考えられる。またオゾンや二酸化炭素、エアロゾルなど、地球環境に影響を及ぼす大気化学物質の輸送を把握する上

でも重要な情報となる。ドームふじ基地に到達する大気輸送について季節変化、年々変動を得る事で、現在の大気だけでなく、氷床掘削コアデータから得られた過去の大気成分の解析による地球規模の物質循環の解明にも有効な情報を提供する可能性がある。

第2章 流跡線解析

2-1. 流跡線解析

流跡線解析とは、一般に異なる場所や時刻に取得された観測データを関連付け、その経路上で何が起こったかを理解するために用いられる。ある時刻・位置に置いた仮想的な粒子を、風速場によって移流させ、各時刻の粒子の位置を求める手法である。

ある時刻の粒子の位置 \bar{X} は、各時刻の粒子の位置における風速ベクトル(\bar{v})を時間積分することで得られ、次式で表される。

$$\bar{X}(t) = \bar{X}(t_0) + \int_{t_0}^t \bar{v} dt$$

流跡線解析は高度決定法によって主に二種類に分類される。一つは、三次元の風速場を用いて粒子を移流させる三次元流跡線解析、もう一つは二次元(水平)風速場を用いて等温位面上で粒子を移流させる等温位流跡線解析である。前者は、メソスケールの対流活動による輸送のような非断熱過程にも適用可能で、対流圏における流跡線の計算に適している。欠点としては粒子の運動が風速データ(特に鉛直風)の精度・時間分解能に影響を受けやすいことが挙げられる (Tomikawa and Sato, 2005)。これに対して後者では、断熱過程を仮定し、温位の高度分布から高度を決定するため、断熱の仮定が良く成り立つ成層圏の流跡線計算に適している。しかしながら、対流や凝結過程に伴う非断熱過程が卓越する対流圏の流跡線計算には適さない。本研究では、対流圏における空気塊の輸送を取り扱うため、三次元流跡線を用いるのが適当であると考えられる。

また、流跡線解析では、前方流跡線(forward trajectory)と、後方流跡線(backward trajectory)の使い分けがされている。前方流跡線は、ある地点における森林火災や工業活動によって放出される汚染物質の拡散・輸送を計算する際に用いられることが多く、後方流跡線は、ある地点で観測された大気物質の起源を調べるために

利用されている。例えば、Kim et al. (2005) は、森林火災から発生するBlack Carbonを含むエアロゾルの北極海の海水やアラスカ氷河の氷の融解に与える影響を見積もるために、発生域からの大気粒子の前方輸送経路を算出している。またHara et al. (2005) は、昭和基地で観測されたエアロゾル中のClイオン濃度の変化の原因を調べるために、そのエアロゾルを含む大気粒子の後方輸送経路を算出している。

2-2. 国立極地研究所流跡線モデル

流跡線解析モデルは、気象・気候研究を行う研究所や大学等において個々に開発されており、利用方法は多様化している。アメリカ合衆国のNational Oceanic & Atmospheric Administration (NOAA) でweb化された流跡線解析プログラムが公開されている他、日本国内では国立環境研究所地球環境研究センター (NIES/CGER) で開発されたMETEXが、web上で利用可能となっている。これらのweb化された流跡線モデルは、主に観測された微量成分の分布を解釈する際に、その観測された時刻・場所における粒子の前方・後方流跡線を得るツールとして利用されている。

METEXは、web利用以外にプログラムの配布も行っており、使用出来る気象データも幅広いため、大気化学に携わる多くの研究者に利用されている。このMETEXと同等以上の計算精度を有し、南極氷床を含む南極域における流跡線の計算にも対応したモデルとして国立極地研究所流跡線モデル(以下NIPRモデル)が近年開発された。表2-1にMETEXとNIPRモデルで使用されているスキームの比較(Tomikawa and Sato, 2005)を示す。

Tomikawa and Sato (2005) では、NIPRモデルとMETEXのそれぞれによって算出した流跡線を比較し、時間積分のタイムステップや補間方法が異なるにも関わらず、両者の結果はよく一致することを示している。本研究では主に南極域における流跡線解析を行うため、極域においても信頼性の高いNIPRモデルを使用する。

表2-1 流跡線モデルの概要比較 [Tomikawa and Sato (2005) より]

Model	NIPR	METEX
水平座標	緯度/経度	緯度/経度
鉛直座標	気圧	気圧・ σ
補間スキーム	4次のルンゲ・クッタ	Petterssen (2004) のスキーム
タイムステップ	60分	60分未満で可変
水平補間	線形補間	線形補間
鉛直補間	気圧高度	ジオポテンシャルハイト
時間補間	三次スプライン	線形補間

第3章 データ

本研究では、2章で述べた流跡線解析を用いて、昭和基地およびドームふじ基地への大気輸送経路を算出する。計算には、一般に公開・配布されている再解析データと、購入した現業解析データの2種類を用いた。同じ気象センターから発行された再解析データと現業解析データをそれぞれ用いることは、個々のデータ特性や現実大気の再現の度合いなどを理解する上で役立つ。また、水蒸気輸送経路を推定する際に、本研究では地上気象観測で得られた天気概況を用いて天候データを作成し、天候別の大気輸送経路を分類する。昭和基地におけるレーウィンゾンデの計測値により、可降水量の計算を行い、昭和基地における大気中の水蒸気量を算出し、水蒸気量の指標として用いる。ドームふじ基地における雪尺データおよび日本南極地域観測隊報告に記載されているブリザードの記録から、降雪量の多いブリザードの日時をまとめた。以下、それぞれのデータについて詳細を述べる。

3-1. 全球客観解析データ

3-1-1. ECMWF現業解析データ

全球客観解析気象データとしては、主にECMWF (European Centre for Medium-range Weather Forecasts) で発行しているECMWF客観解析データ、NCEP (The National Centers for Environmental Prediction) / NCAR (The National Center for Atmospheric Research)で発行されているNCEP/NCAR客観解析データ、気象庁全球客観解析データなどがある。特に極域に関しては、様々な手法によるデータ精度の比較が行われているが(Bromwich et al., 1995, Cullather et al., 1997)、ECMWF客観解析データが最もゾンデ・AWS観測データとよく一致することが報告されている。国立極地研究所に所蔵されているECMWF現業解析データは、TOGA (Tropical Ocean and Global Atmosphere) Level IIIデータセットであり、水平分解能は緯度・経度ともに2.5度グリッド、時間間隔は6時間、1000hPaから10hPaまで鉛直15層の気圧面で与えられている。

3-1-2. ERA-40再解析データ

通常の現業解析データは、数値予報に利用するために、遅れて届く電報はデータ同化サイクルに取り込むことができない。一方再解析データは、遅れたり修正された変更電報を取り込むことができる。特に、成層圏データの電報は遅延が多いという報告もあり、品質の大幅な向上が期待できる。予報モデルやデータ同化の手法は、しばしば更新されるため、現業解析のデータを用いると、データの時間的連続性が失われてしまう。一方、再解析では全期間に渡って同一の予報モデル・データ同化手法を用いるため、データ品質が変化せず、特に経年変動の解析に適している。

前節で述べたECMWFでは、初の再解析である、ERA-15再解析データが発行されている。このデータは期間が1979-93年となっており、近年のデータは含まれていない。また、南極域の標高データが正確ではないこと(Genthon and Braun, 1995)、東南極では現業解析に比べて観測データとの対応が悪いこと等(Bromwich et al., 2000) が報告されており、昭和基地付近の流跡線解析には適さない。

近年公開されたERA-40 (ECMWF 40 Years Re-Analysis) 再解析データは、上記の問題点を改善した1957-2002年のデータセットである。特に、ドームふじ基地で集中ラジオゾンデ観測が行われた1997年を含んでおり、1980年以降についてはTOVSなどの衛星データにより南極域におけるデータ精度も改善されていると報告されている (Bromwich and Fogt, 2004)。以上から、昭和基地とドームふじ基地の流跡線解析に用いるデータとしてERA-40再解析データが適当であると考えられる。解析に使用したERA-40再解析データは、水平分解能が緯度・経度ともに2.5度、時間間隔は6時間、1000hPaから1hPaまで鉛直23層の気圧面で与えられる。

3-2. 地上気象観測データ

昭和基地における地上気象観測は、国際地球観測年にあたる1957年に、第一次日本南極地域観測隊によって始められた。その後、越冬不成立や基地閉鎖の期間を除く40年以上のデータが蓄積されている。本研究では、降雪時の大気輸送経路を明らかにするため、湿度の代わりに、測器の交換や低温状態における精度の低下に影響されないデータである1990年から1999年までの昭和基地の3時間おきの雲量・現在天気を用いて天候データを作成した。表3-1に現在天気の一覧を示す。

レーウィンゾンデは1日のうち0UTCと12UTCに放球されており、気圧、気温、相対湿度、風速のデータを利用した。この気圧と気温、相対湿度の値から昭和基地における可降水量を算出し、ERA-40の可降水量、降雪との比較を行った。詳細については7章にて示す。

ドームふじ観測拠点(現・ドームふじ基地)は1995年に建設され、1997年1月から1998年1月まで第38次越冬隊によって集中気象観測が行われた。ラジオゾンデは1～5日に1回放球され、天気概況は3～6時間おきに記録がされている (Hirasawa et al., 1999) 。この1997年1月から1998年1月までの雲量・現在天気を用いて1997年の天候の判別を行った。ドームふじ基地では晴天時にしばしばダイヤモンドダストが観測されるが、本研究においては閾値を雲量8.5以上とすることで、晴天時の降雪を除外している。

また、ドームふじ基地では半月に1度、雪尺で積雪深の測定を行っており、降雪量の目安として、雪尺データ (Motoyama et al., 1999) を用いた。ここでの積雪深とは、36本の正方形に等間隔に設置された雪尺の測定値を平均したものをさす。

表3-1.

天気と地上実況気象通報式との対応(地上気象観測指針より引用)

※通報式では、8分雲量で示されている。

表 11.6 天気と地上実況気象通報式との対応

天 気	記号	地上実況気象通報式との対応		
		ww	N	VV
快 晴	○	00~16	0・1	≥ 10 (≥ 1 km) (ww = 40、41 の場合を除く)
晴	①	18~32	2~6	
薄 曇	②	36~38	7・8	
曇	◎	40・41、76		
煙 霧	∞	04~06	9	< 10 (< 1 km)
砂じんあらし	☼	30~35		
高い地ふぶき	✚	38・39		
霧	≡	42~49		
霧 雨	☉	50~57		
雨	●	58~67、80~82、91、92		
みぞれ	⊙	68・69、83・84、93・94		
雪	✱	70~75、77・78、85・86 93・94		
あられ	△	79、87・88、93・94		
ひょう	▲	89・90、93・94		
雷	⚡	17、95~99		

第4章 昭和基地上空対流圏に到達する大気輸送の1997年における季節変化

1997年6月に、ブロッキング現象が東南極大陸上空で観測され (Hirasawa et al., 2000; Hatsushika and Yamazaki, 2000)、南極内陸部まで大量の水蒸気を含んだ大気が流入し、昭和基地・ドームふじ基地に激しい降雪をもたらした。このような大規模な大気現象は多くの研究者の関心事である南極氷床を涵養する水蒸気の蓄積過程になんらかの寄与を持つと考えられる。また、内陸部ではしばしば晴天時に気温の逆転層によるダイヤモンドダストなどによる降雪もあり、氷床形成に対する大気を与える影響を調べることは重要である。南極氷床への大気による水蒸気輸送を明らかにするために、一般的な大気輸送について本章では着目する。

ドームふじ基地では気候値を得ることが可能な長期気象観測が行われていないが、沿岸部にある昭和基地は40年以上のデータの蓄積もあり、WMO(The World Meteorological Organization)に観測基地として登録されているため、様々な客観解析データの入力データを提供している。このため、ECMWF現業解析データにおいても、昭和基地のデータが入力されている。したがって、昭和基地付近においてはECMWF現業解析データが現実大気と比較的一致していると考えられる。

図4-1は、南極域におけるストームトラックの分布を示しており、昭和基地付近とアメリー棚氷付近はそれぞれ低気圧が通過しやすい場所である (Trenberth, 1991; Jones and Simmonds, 1993)。アメリー棚氷付近のストームトラック領域の、昭和基地周辺に直接的な影響は位置関係から大きなものではないと考えられるが、これらの低気圧経路の影響や周辺の大気循環の特徴を理解することは、南極氷床への大気輸送を明らかにする上で重要である。

以上から、本研究では、南極大陸への大気輸送を理解することを目的として、1997年の昭和基地上空対流圏に到達する空気塊の輸送経路について、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。さらに、総観規模擾乱ではなく、惑星規模の大気循環場の変化が、客観解析データでどのように再現されているのか、また流跡線はどのような流線となるのか、という観点に基づく解析も行った。解析手法としては、100hPaから850hPaまでの50hPaごと16層の基点から毎日

12UTC時から5日間の後方流跡線解析を行った。また対流圏中層の代表として500hPa、対流圏下層の代表として850hPaをそれぞれ基点として選別した。

4-1. 対流圏中層に到達する大気輸送の季節変化

4-1-1. 流跡線解析結果

図4-2は、昭和基地上空500hPaを基点とした5日間の後方流跡線を、(a)では水平分布を月ごとに、(b)では1月と7月の高度-緯度分布を示している。(c)は1月と7月の経度40度における温位の月平均値を気圧-緯度断面で示している。1月では、ほとんどの空気塊の起源が大西洋の60°S以南に分布している。図4-3は空気塊の輸送経路長を、500hPaと850hPaについてそれぞれ示している。どちらも1年を通して、1月が最も輸送経路長が短くなっている。2月から6月にかけて、水平流跡線は大西洋上の40°Sから60°Sの領域に集中しており、輸送経路長はゆるやかに増加している。7月から11月にかけては、主に大西洋上を空気塊が通過している。

6月には、インド洋上の40°S以北を起源とし、その後南極内陸部を通過して到達する空気塊が見られる。これらの輸送経路は、Hirasawa et al. (2000) が示したブロッキング現象に影響を受けている。7月にも、南極域において発達した総観規模擾乱に影響を受けてインド洋を通過する空気塊が見られる。

9月から11月には、多くの空気塊が南極大陸上を蛇行して通過しており、経路長は9月から12月にかけて段々短くなっている。12月には、内陸を通過してきた空気塊も、南極海のインド洋側を通過してきた空気塊も、どちらも東側から昭和基地上空に到達している。

1月には、多くの空気塊は鉛直方向に移動しないが、インド洋上の対流圏下層を通過して中緯度側から到達する空気塊も見られる。反対に、7月にはほとんどの空気塊は中緯度側から対流圏下層を通過して到達している。この7月の輸送経路の特徴は、輸送中の空気塊の高度的な違いはあるが、2月から11月まで同様に見られる。

温位面の季節変化に着目すると、1月と7月では等温位面の勾配が異なっている(図4-2(c))。1月は高度500hPa付近では穏やかな勾配になっており、7月には偏西風帯が発達する50°S~60°S付近で強い勾配がみられる。夏季には下層から到達する

空気塊が少ないのに対し、冬季には下層からの輸送が増加することは、空気塊が等温位面に沿って輸送されることを示している。

4-1-2. 500hPaにおける大気循環場

空気塊の輸送経路の分布から、大気循環場の顕著なパターンを考察するために、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4-4aは、1月と7月の500hPa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は沿岸域では低く、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（図4-2a）、鉛直方向にはほとんど移動していない（図4-2b）。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4-4bは0°から90°Eを平均したZ500と東西風の緯度 - 時間断面図を示している。大陸の沿岸部である60° - 70°の領域において12月から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月から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月から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月から11月の期間は、極域においてZ500は増加し、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月から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(図4-2a)。この流跡線の増加は、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。同様な南北方向の輸送が6月にもあったことから、この期間の大気循環場と流跡線との関係について、さらに別の節にて調べることにする。

4-2. 対流圏下層に到達する大気輸送の季節変化

4-2-1. 流跡線解析結果

この節では、自由大気と大気境界層の境目付近に相当する、850hPaに到達する空気塊の輸送経路について調べる。図4-5は、図4-2と同様に、昭和基地上空850hPaを基点とした5日間の後方流跡線を月ごとに示している。850hPaに到達する空気塊は次の3領域から到達すると分類された。昭和基地よりも南極大陸側(Continental Interior)、東側の沿岸地域(East Coast)、大西洋の南側にあたる南極海(Southern Ocean)のそれぞれの領域である(図4-6a)。本研究では、昭和基地に到達する空気塊の2日前の位置をこの領域に当てはめて、それぞれ分類した。この分類は、空気塊の到達する方向であって、起源を議論するものではない。図4-6bは月ごと領域ごとの空気塊の総数を示している。

1年を通じて、Continental Interior から到達する空気塊がほとんどであり、1月と12月は East Coast からの数が多くなっている。1月と7月には、ほとんどの空気塊が東沿岸や南極内陸部から、大陸表面に沿って下降流となり昭和基地へ到達している(図4-5b)。これは、昭和基地上空の対流圏下層では南極大陸外部への流れ、すなわちカタバ風との関係を示唆している。Southern Oceanから到達する空気塊の相対的な数は、East Coast からの空気塊より多くなる3月と6月を除いた、1年のほとんどにおいて少なくなっている。

4-2-2. 850hPaにおける大気循環場

500hPaに到達する空気塊の輸送経路の季節変化を解釈するために、等圧面高度と東西風の月平均値を算出したが、ここでは同様に850hPaの等圧面高度と東西風の月平均値を用いる。図4-7aは、1月と7月の850hPaにおける等圧面高度（以後Z850）と東西風の月平均値である。南極大陸は標高が高く、沿岸部を除いて850hPa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°Sから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500hPa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、中緯度では西風が卓越し、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4-7bは0°から90°Eを平均したZ850の緯度 - 時間断面を示している。年間通じて60°Sから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は小さく、昭和基地付近の東風が弱いことを示している。

3月から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過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4-1において、冬季において偏西風域の季節による位置の変化に伴って、低気圧経路が沿岸部により近づき、気圧勾配が強化されている。冬季は夏季よりも cyclone system density は低くなっており、低気圧が通過する頻度が少ない。夏季において低気圧は沿岸より中緯度側を通過する頻度が高いが、冬季において昭和基地周辺を通過する頻度が下がる。このような背景から、冬季後半では、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。

4-3. プラネタリー波による輸送経路の変化

4-3-1. 春季の準定在波

空気塊が内陸を通過して昭和基地に到達するケースが多く見られた春季について、そのバックグラウンドとなる昭和基地周辺の大気循環場の特徴についてさらに詳しく調べた。ここでいう春季とは、9月から11月を指している。前述の特徴を持つ空気塊の割合を見積もるために70°Sから90°Sまでの極を中心とした円領域を内陸と仮定し、その領域に120時間中、何時間滞留したのか割合を求めた。図4-8は昭和基地上空に到達する空気塊のうち、300hPaから600hPaまでを対流圏中層（実線）、650hPaから850hPaまでを対流圏下層（波線）として月平均した滞留時間の割合を示している。対流圏中層の場合の滞留時間の割合は、2月から8月まで約15~20%であるが、9月から11月にかけて約30%と大きく増加する。対流圏下層の場合、内陸上の滞留時間は、対流圏中層と似た季節変化をしているが、概して内陸上に滞留する割合は多い。対流圏中層の約2倍であり、冬季は約30~40%、春季は約50%となっている。12月には、内陸上の滞留時間は大幅な減少をして、約30%となる。

図4-9は9月の500hPaにおける等圧面高度の月平均値であり、30°W、90°E、150°W付近が低圧となっている波数3型の構造になっており、このプラネタリー波の構造は対流圏を通して順圧的になっていた。このような波数3型のプラネタリー波は1月も7月にも優位ではなく、特徴的なものであると考えられた。図4-10は500hPa面の等圧面高度を55°Sから65°Sまで帯状平均からの偏差を算出し、さらに31日移動平均した値を時間-緯度断面で示している。年間を通じて波数1型のプラネタリー波がこの領域内で優勢となっているが、特に9月から11月にかけて波数3型の準定常プラネタリー波の増大がみられる。波数1型のプラネタリー波は、南極を中心に同心円的に気圧勾配が生じることから、南半球における卓越した循環場であることは既に知られている。(Mo and Van Loon,1984)。Randel (1998) は、成層圏において波数1型のプラネタリー波が定常的にあるが、9月から10月には波数2型、3型の準定常波があること、さらに準定常波は対流圏から伝搬されたことを示している。したがっ

て図4-9および図9-10に示されたような波数3型のプラネタリー波が、9月に対流圏および成層圏に卓越しやすいと考えられる。

大気は等温位面に沿って移流されているが、総観規模擾乱に伴う移流には、等圧線をまたがるような空気塊の混合を引き起こす可能性がある。空気塊の輸送と波数3型のプラネタリー波に起因する移流との関係をさらに詳しく調べることで、南極大陸内陸部へ流入する大気輸送について理解が深まる。例として波数3型のプラネタリー波が明瞭に見られた9月19日の内陸を通過して到達した空気塊の輸送経路について示す。図4-11aは30°W、60°Eから90°E、そして150°Wから170°W付近に低圧部を持つ波数3型のプラネタリー波を示している。この波数3型のプラネタリー波の構造は9月15日から19日まで全ての日において現れていた。図4-11aの流跡線の軌跡によると、空気塊は60°Eから90°Eにあるトラフの東側の縁から内陸部へ進入し、さらにまた同じトラフの西側の縁を通過して昭和基地に到達している。波数3型の準定在プラネタリー波によって形成された、30°W付近にあるトラフの東側の縁を通過して大陸内部へ進入して到達する空気塊も存在していたが、多くの空気塊は、60°Eから90°Eにあるトラフの西側の縁を通過して昭和基地に到達していた。

4-3-2. 6月に発生したブロッキング現象

昭和基地上空に6月17日から数日間に渡って発生したブロッキング現象は、到達する空気塊の輸送経路を大きく変更している（図4-11b）。空気塊は偏西風帯から出発し、昭和基地付近を南西方向へ通過し、内陸部へ侵入したブロッキングしている高気圧の西側から大陸内陸部へ進入し、最後に高気圧の東側から弧を描いて昭和基地へ到達している。Hirasawa et al. (2000) は、ブロッキング時に内陸部まで侵入した高気圧は、中緯度からプラネタリー波の伝搬によって移流されてきたと示しているが、図4-11bにおける気圧配置からも波形が大きく蛇行したプラネタリー波がみられる。昭和基地の西側にリッジがあり、東側にトラフがあることで、海上から直接内陸部まで大気が流入されやすくなっている。

このような波数3型のプラネタリー波やブロッキングの状況において、昭和基地の西側にトラフ（リッジ）、東側にリッジ（トラフ）が発達していたことは、昭和基地に対するトラフとリッジの位置関係が到達する空気塊の輸送経路に大きく影響を

及ぼすことが示唆される。このトラフの位置と海上から大陸への大気の流れの関係にも着目し、5章において南極氷床への大気輸送経路を導いていく。

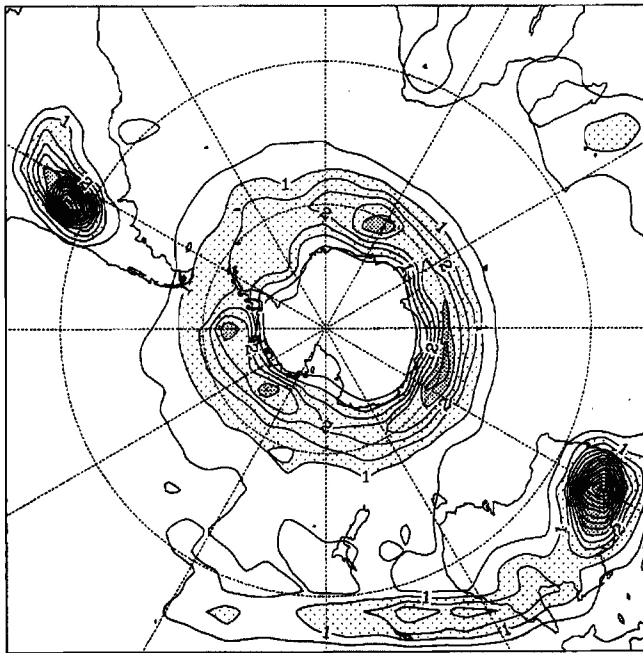
4-4. まとめ

本章では、南極氷床への大気輸送を明らかにするため、1997年の昭和基地に到達する空気塊について、対流圏中層と下層における輸送の特長や季節変化について調べた。対流圏中層へ到達する空気塊は大半が大西洋上を移動していた。輸送経路長は1月に極小があり、その後ゆるやかに増加して、夏季にまた短くなっていた。1月には、多くの空気塊は鉛直方向に移動しないが、インド洋上の対流圏下層を通過して中緯度側から到達する空気塊も見られた。冬季にはほとんどの空気塊は中緯度側から対流圏下層を通過して到達していた。

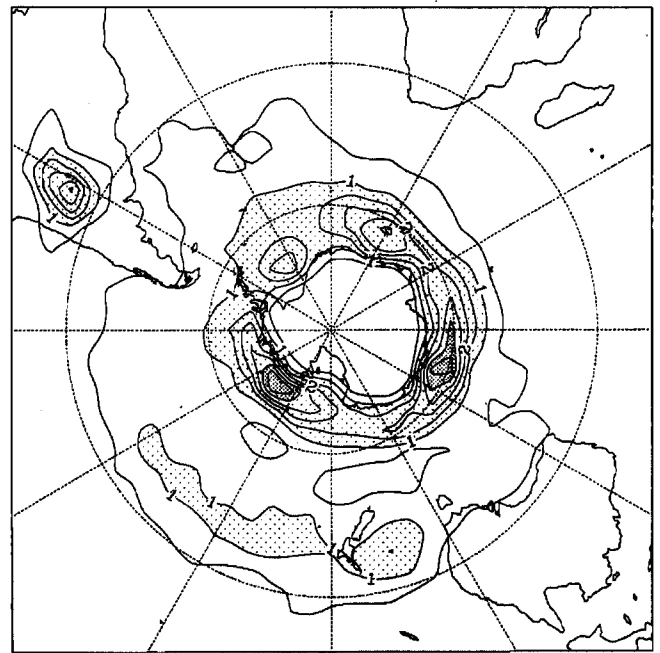
対流圏下層へ到達する空気塊は1年を通じて、内陸側から到達する空気塊がほとんどであり、夏季は東沿岸部からの数が多くなっていた。ほとんどの空気塊が東沿岸や南極内陸部から、大陸表面に沿って下降流となり昭和基地へ到達していた。大西洋上から到達する空気塊の相対的な数が、東沿岸部からの空気塊より多くなる3月と6月を除いた、1年のほとんどにおいて少なくなっていた。対流圏中層ではほとんどが大西洋側から大気が輸送されていたのに対し、対流圏下層へはあまり行われていなかった。

昭和基地周辺において対流圏下層には1年を通じて低圧部が存在していることから、東からの大気輸送が卓越していた。対流圏中層では、下層と同じ状況は夏季にみられ、同時期では大陸やインド洋側からの大気輸送が多くなっていた。対流圏中層と下層において大気輸送経路の違いは、背景となる大気循環場の季節変化に伴って生じていた。

波数3型のプラネタリー波が卓越し、昭和基地の西側にリッジが発達した場合に、プラネタリー波の蛇行に伴って大気が内陸部へ侵入する状況が示された。



a



b

図4-1.

cyclone system densityの水平分布をコンターで示している。aは夏季、bは冬季である。

コンターは $1^\circ \times 1^\circ$ グリッドにおける低気圧の個数を 0.5×10^{-3} ごとに示している。

網掛けは薄い部分が 1.0×10^{-3} 個、 3.0×10^{-3} 個である。

(James and Simmonds, 1993より引用)

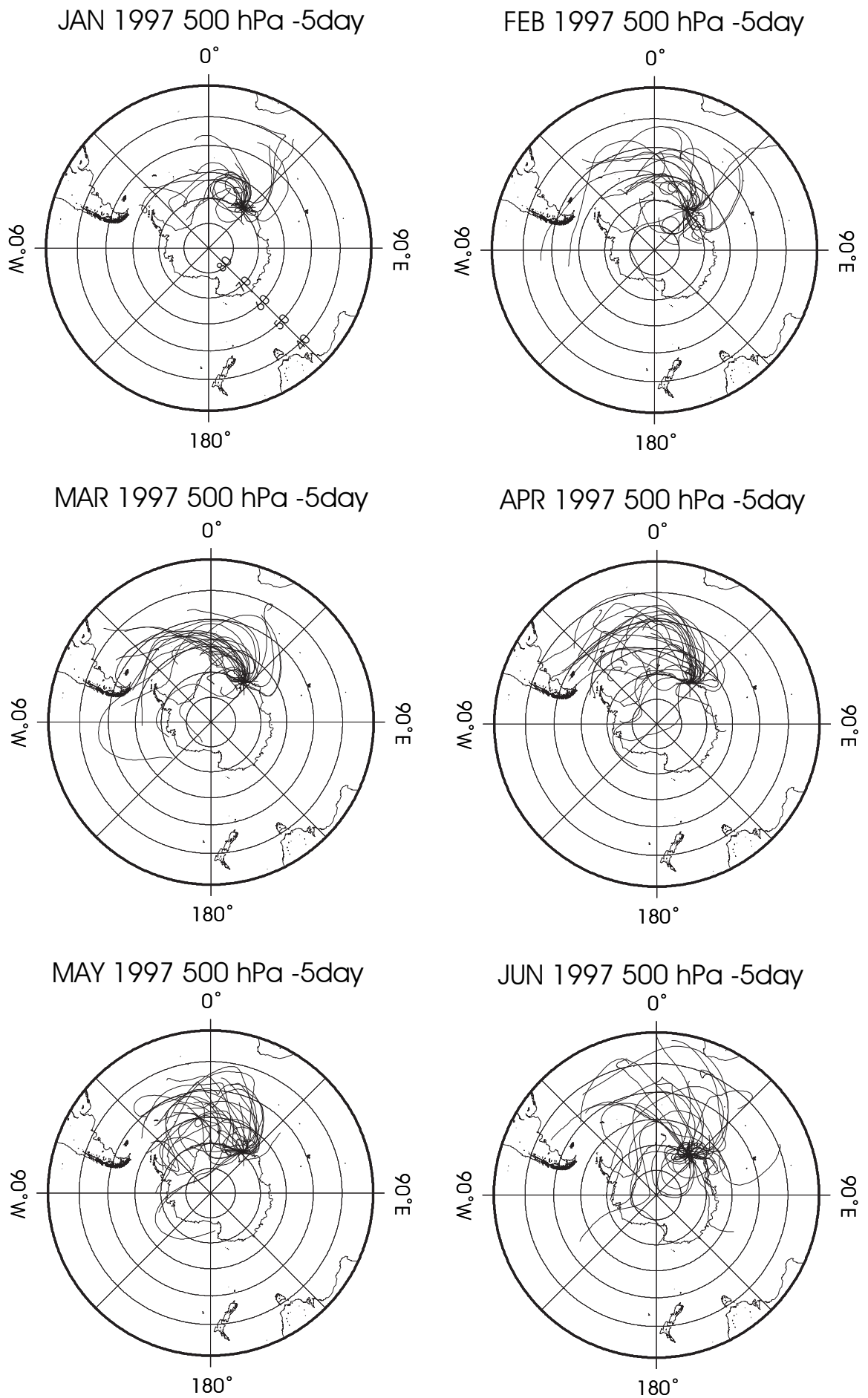


図4-2. (a)
 1997年における昭和基地上空500hPaに到達する空気塊の水平輸送経路を月ごとに示している。
 経路は5日間で、地表面にぶつかった場合は計算は終了している。

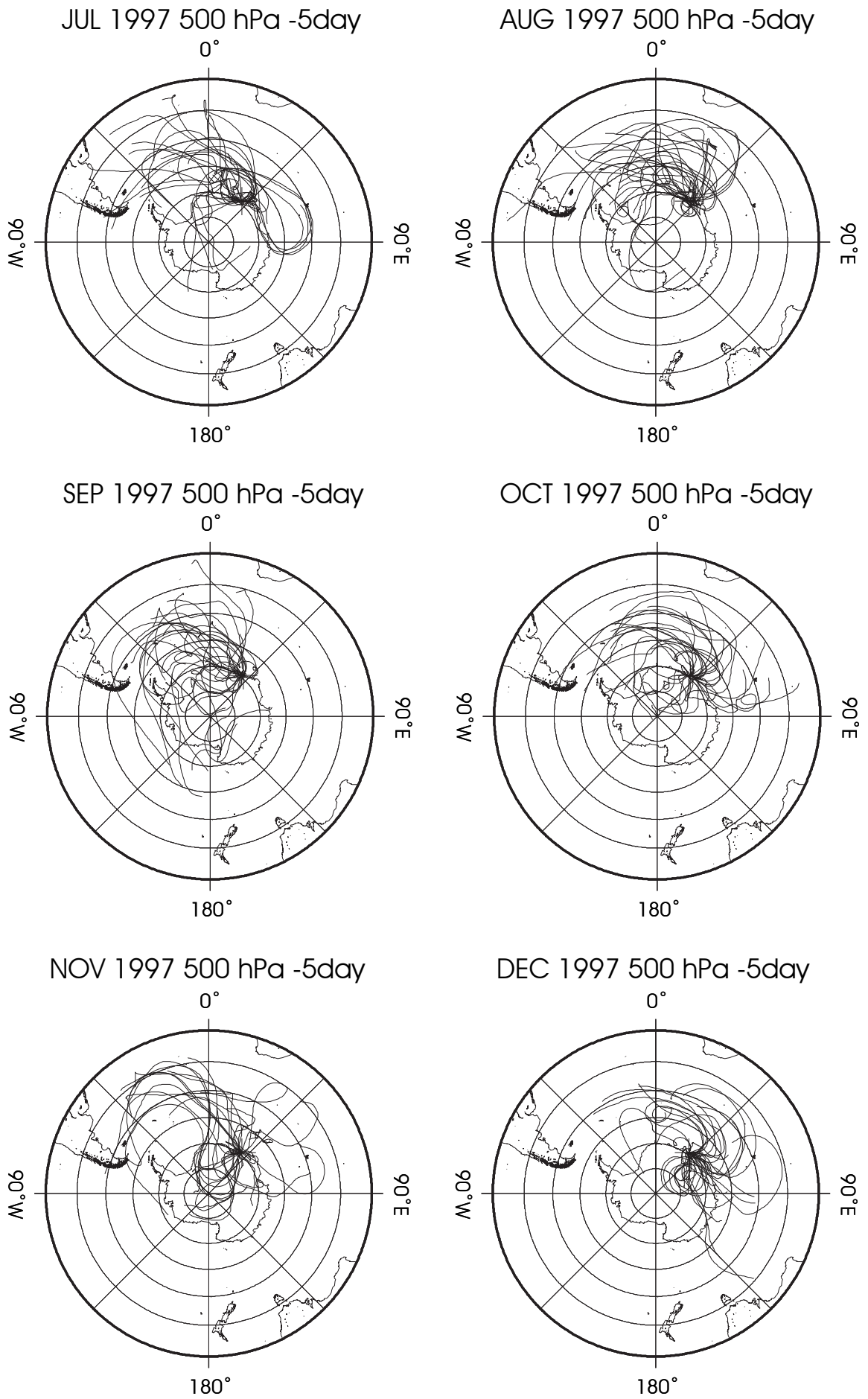
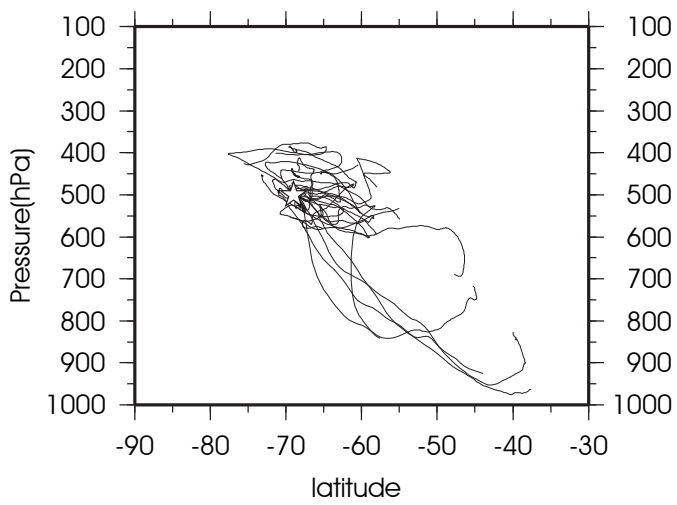


図4-2. (a)
1997年における昭和基地上空500hPaに到達する空気塊の水平輸送経路を月ごとに示している。
経路は5日間で、地表面にぶつかった場合は計算は終了している。

JAN 1997 500 hPa -5day



JUL 1997 500 hPa -5day

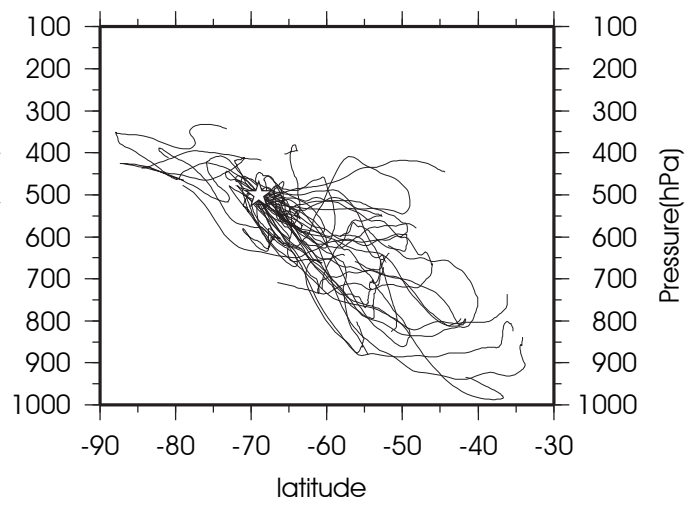


図4-2. (b)

1997年における昭和基地上空500hPaに到達する空気塊の鉛直輸送経路を1月(左)と7月(右)について示している。経路は5日間で、地表面にぶつかった場合は計算は終了している。

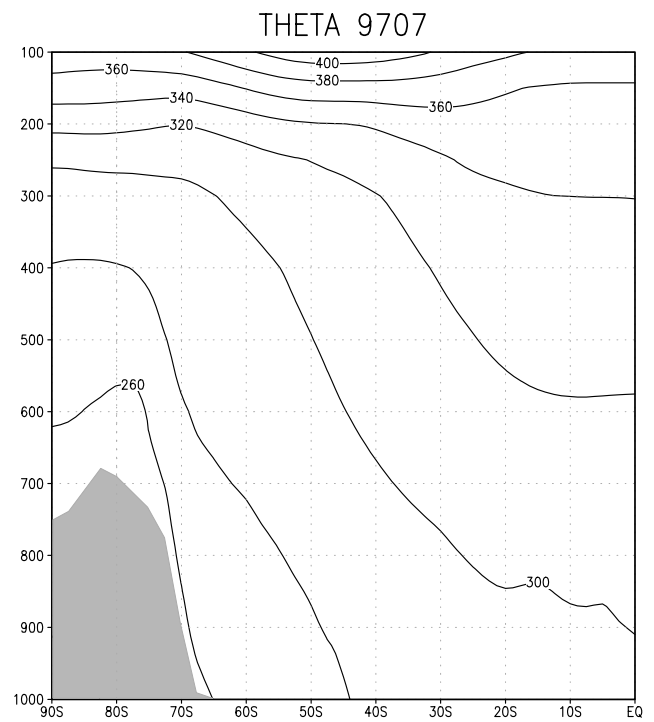
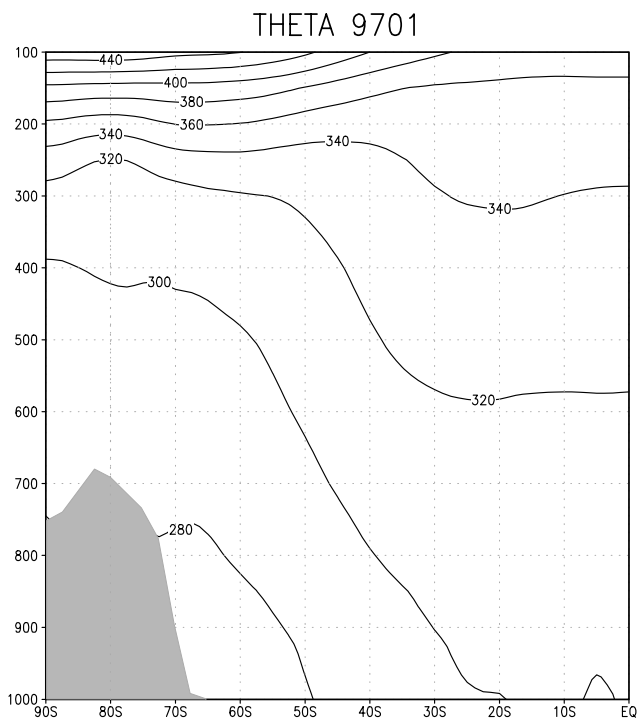


図4-2. (c)

1997年1月(左)と7月(右)について東経40度における温位の緯度高度断面図を示す。

縦軸は気圧、横軸は緯度を示している。

塗りつぶした部分は経度40度における南極氷床を示している。

Distances of transport routes

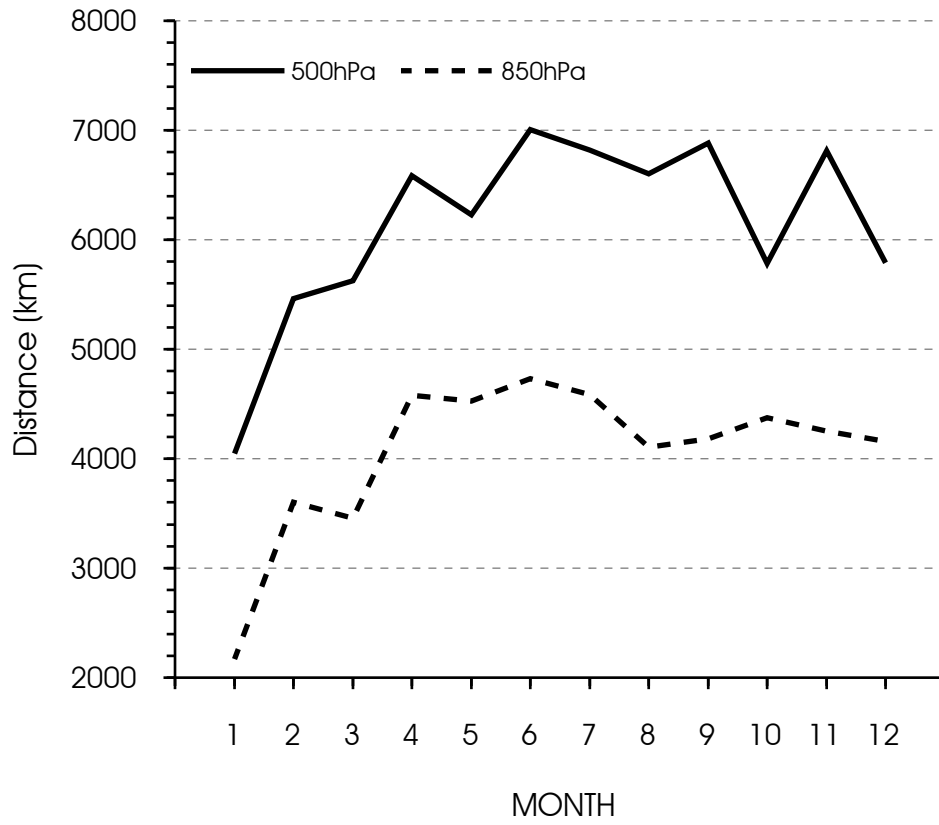
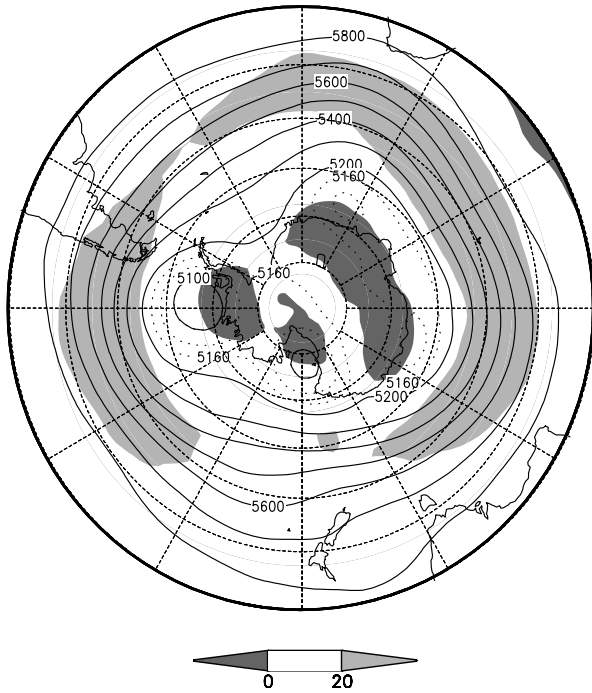


図 4-3.

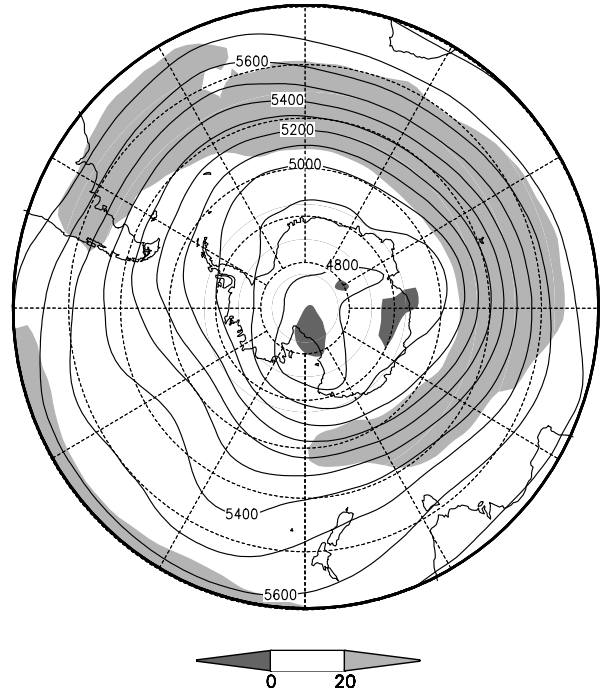
5日間の空気塊の輸送経路長の月平均値を示す。
実線は500hPa、点線は850hPaである。

(a)

1997 JAN Mean Geopotential Height (hPa)
and U-wind (m/s) Z500



1997 JUL Mean Geopotential Height (hPa)
and U-wind (m/s) Z500



(b)

1997 Mean Geopotential Height (hPa) and U-wind (m/s) Z500 at 0–90E

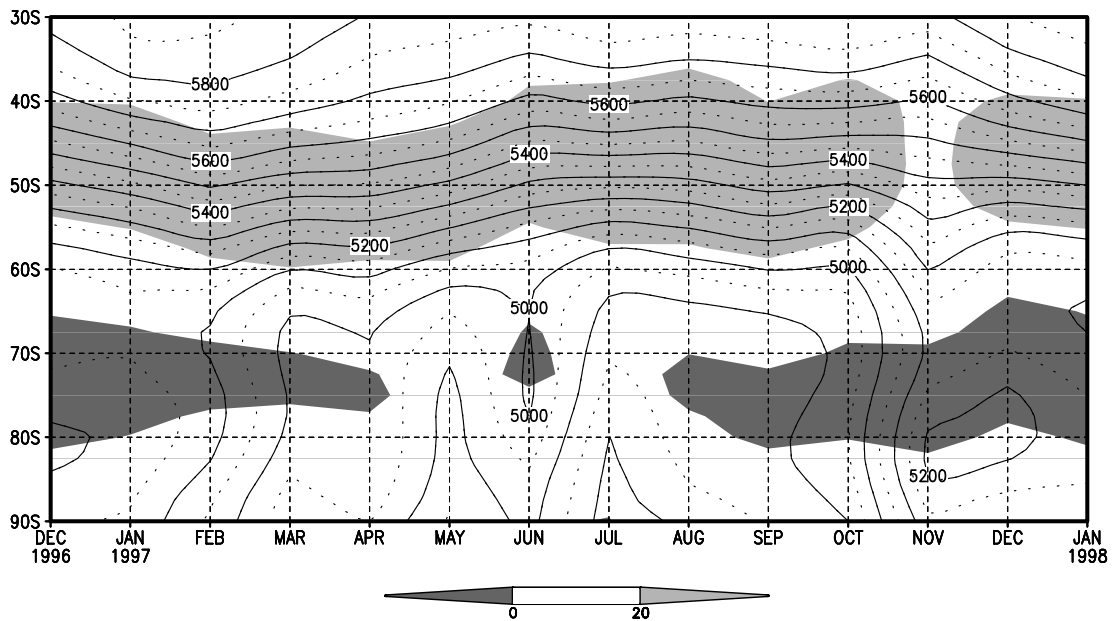


図4-4.

(a) 500hPa平面におけるジオポテンシャルハイト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100mで、点線は5130mと5160m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。

(b) 1997年における500hPa平面におけるジオポテンシャルハイトと東西風の0°から90°Eまでの月平均値を時間-緯度断面で示した。コンターの実線は100mごと、点線は50mごとである。網掛けは(a)と同じである。

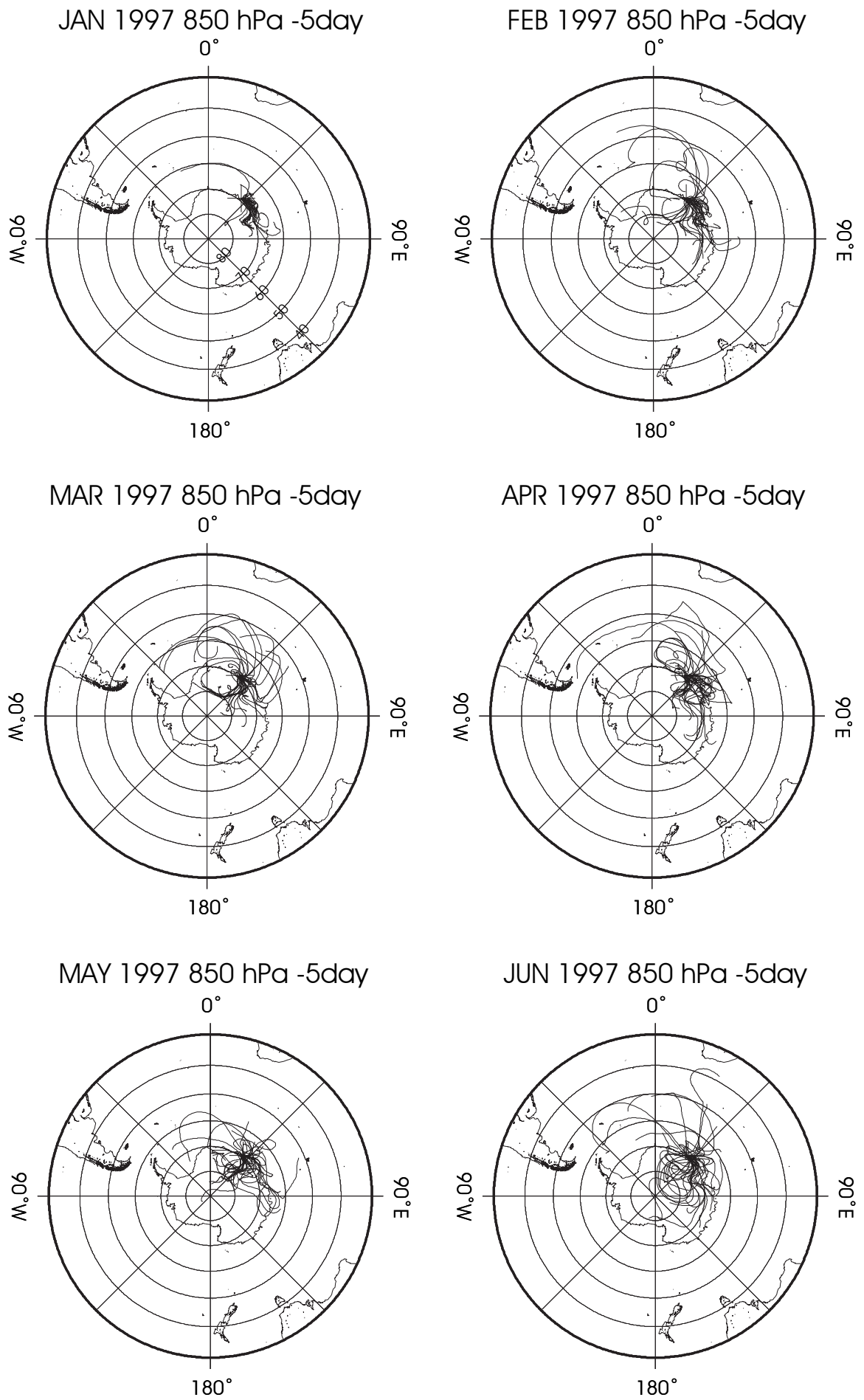


図4-5. (a)
 1997年における昭和基地上空850hPaに到達する空気塊の水平輸送経路を月ごとに示している。
 経路は5日間で、地表面にぶつかった場合は計算は終了している。

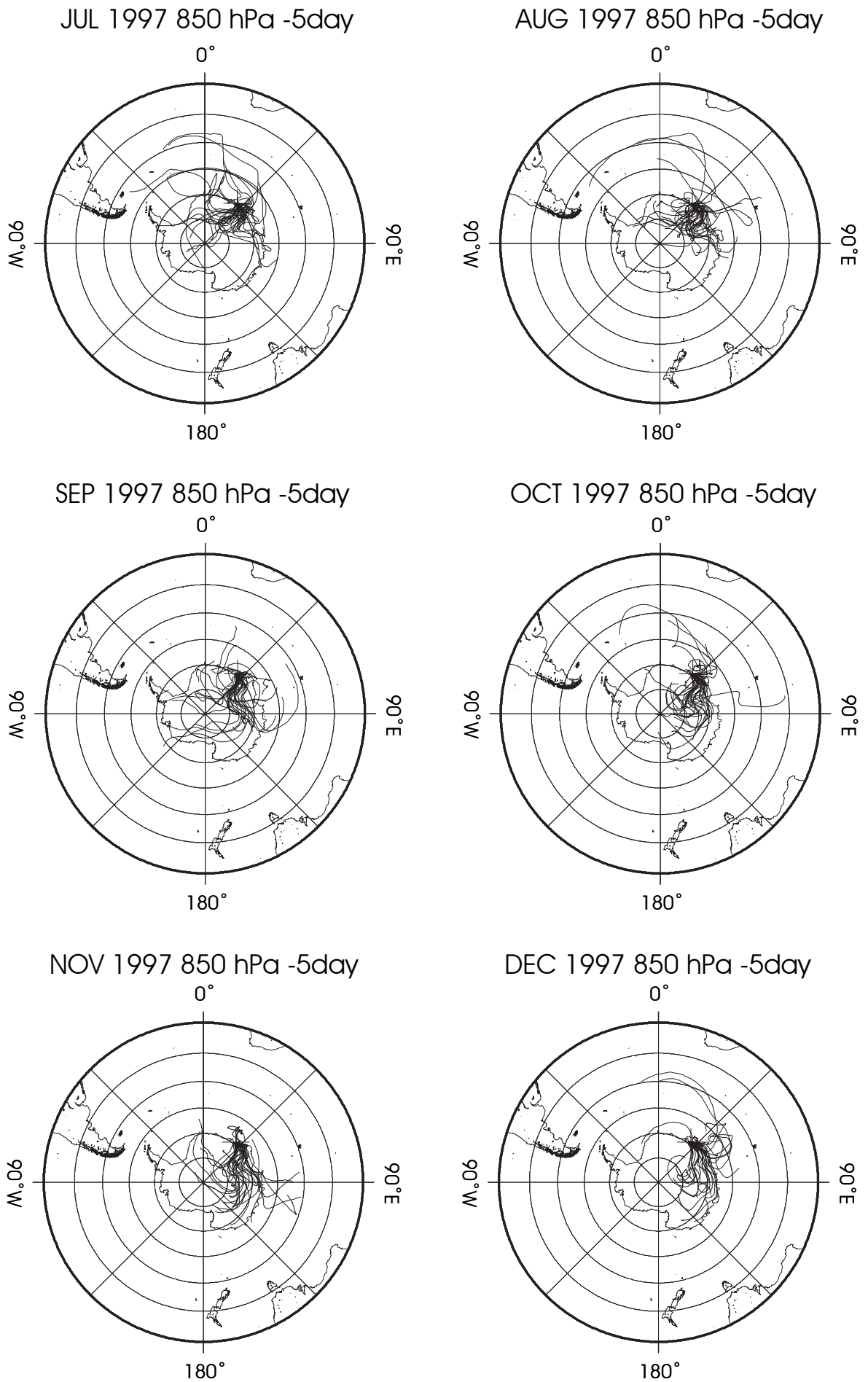
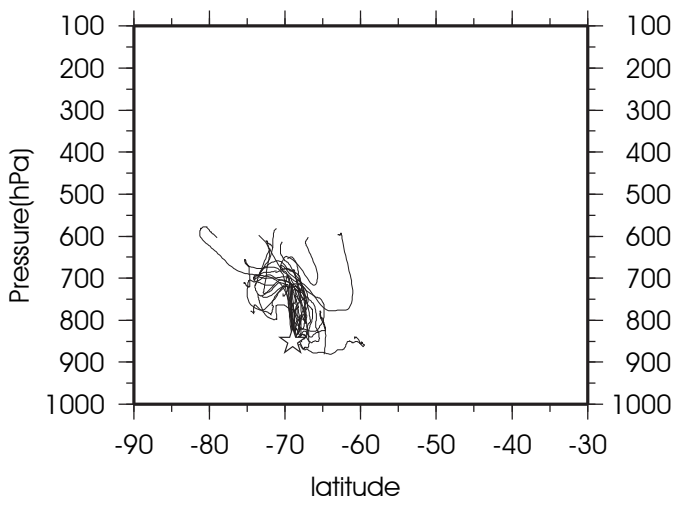


図4-5. (a)
 1997年における昭和基地上空850hPaに到達する空気塊の水平輸送経路を月ごとに示している。
 経路は5日間で、地表面にぶつかった場合は計算は終了している。

JAN 1997 850 hPa -5day



JUL 1997 850 hPa -5day

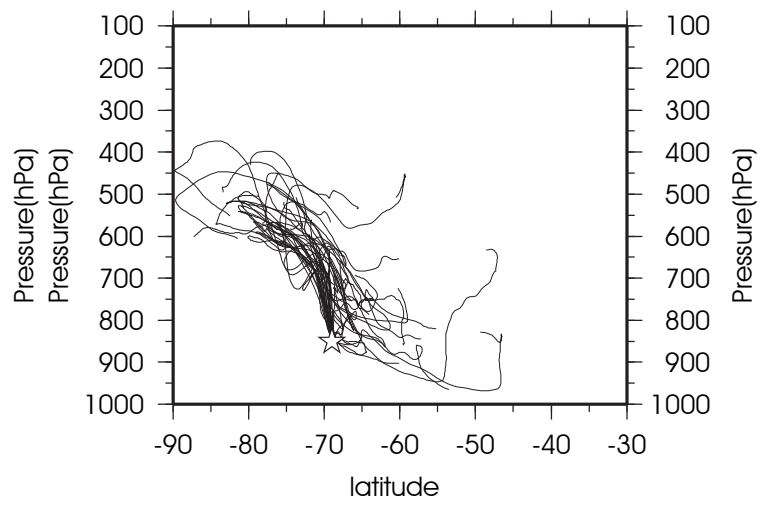
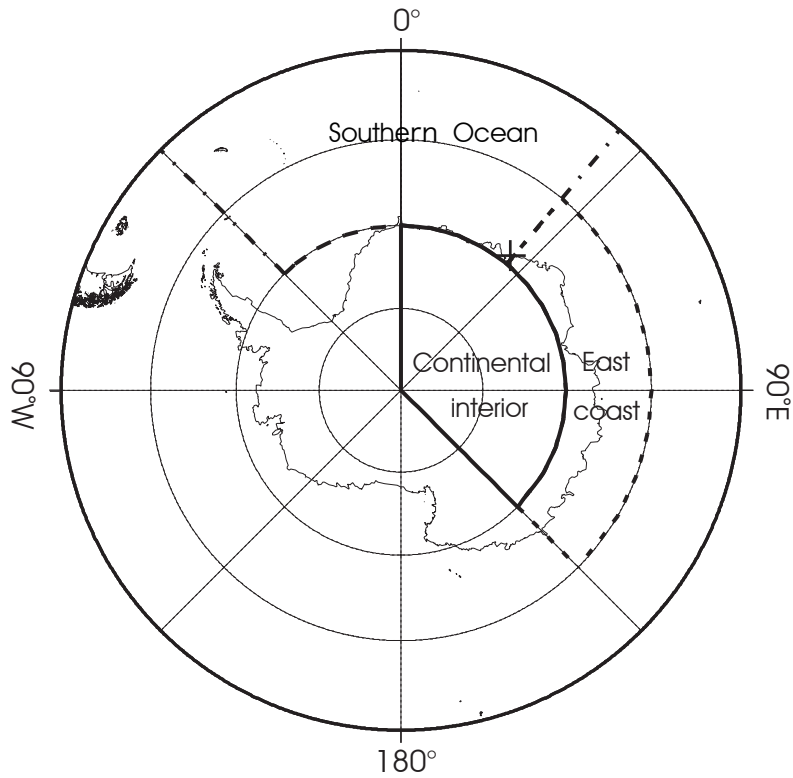


図4-5. (b)

1997年における昭和基地上空500hPaに到達する空気塊の鉛直輸送経路を1月(左)と7月(右)について示している。経路は5日間で、地表面にぶつかった場合は計算は終了している。

(a)

Pattern Map at 850 hPa -48 hours



(b)

Patterns of trajectories -48hours at 850 hPa

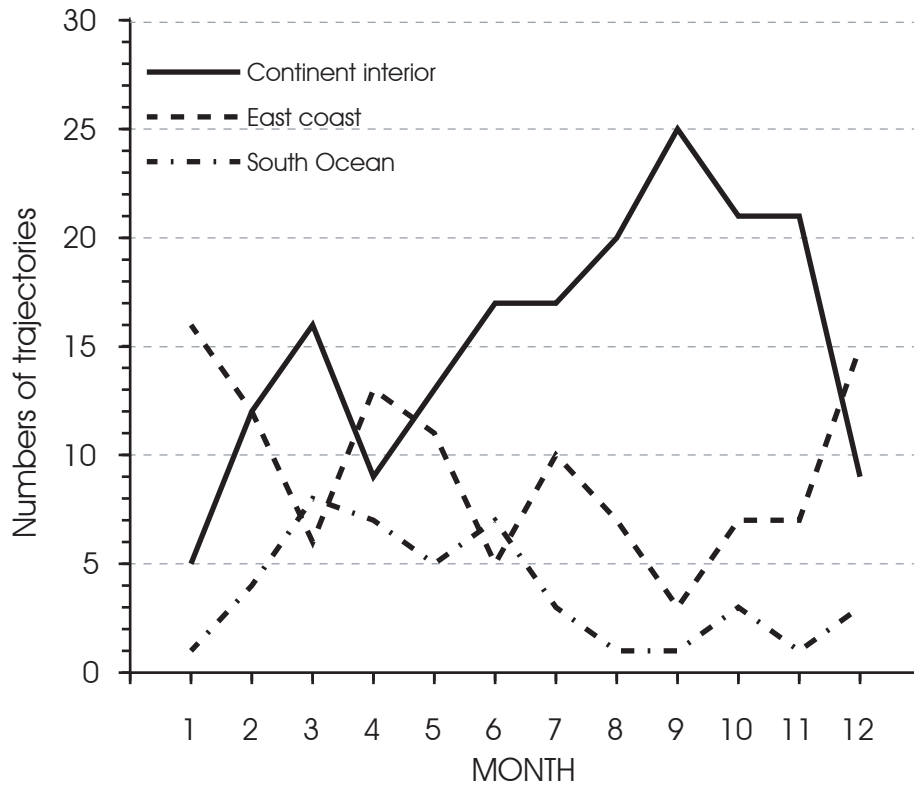


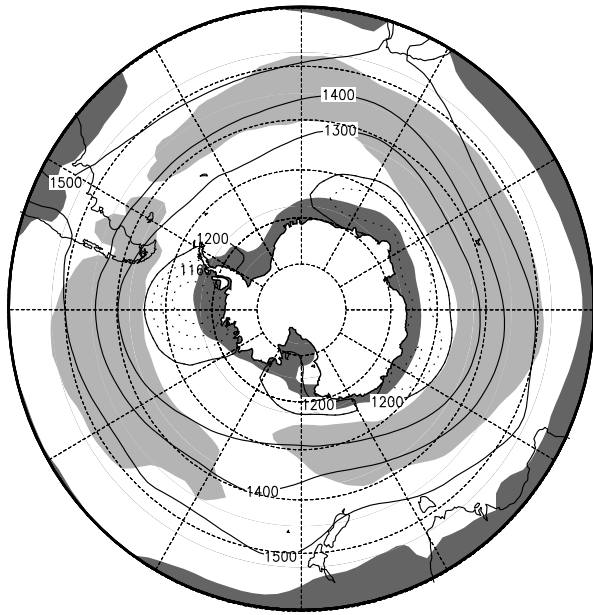
図4-6.

(a) 昭和基地に到達する空気塊の到着2日前の位置を3つの領域、Continental interior(70°-90°S,0°-135°E)、east coast(60°-70°S, 40°-135°E)、Southern Ocean(50°-70°S, 45°W-40°E)に分類した。

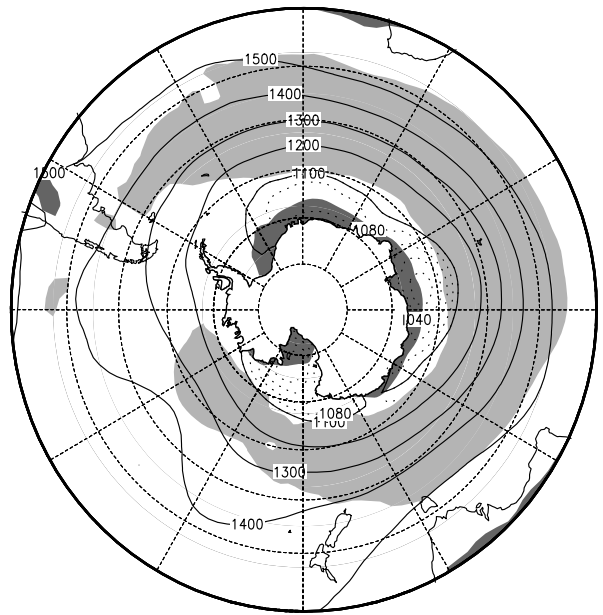
(b) 昭和基地に到達する空気塊の到着2日前の位置を3つに分類し、それぞれの月ごとの個数を示している。直線はContinental interior、波線はeast coast、一点鎖線はSouthern Oceanである。

(a)

1997 JAN Mean Geopotential Height (hPa)
and U-wind (m/s) Z850



1997 JUL Mean Geopotential Height(hPa)
and U-wind (m/s) Z850



(b)

1997 Mean Geopotential Height (hPa) and U-wind (m/s) Z850 at 0–90E

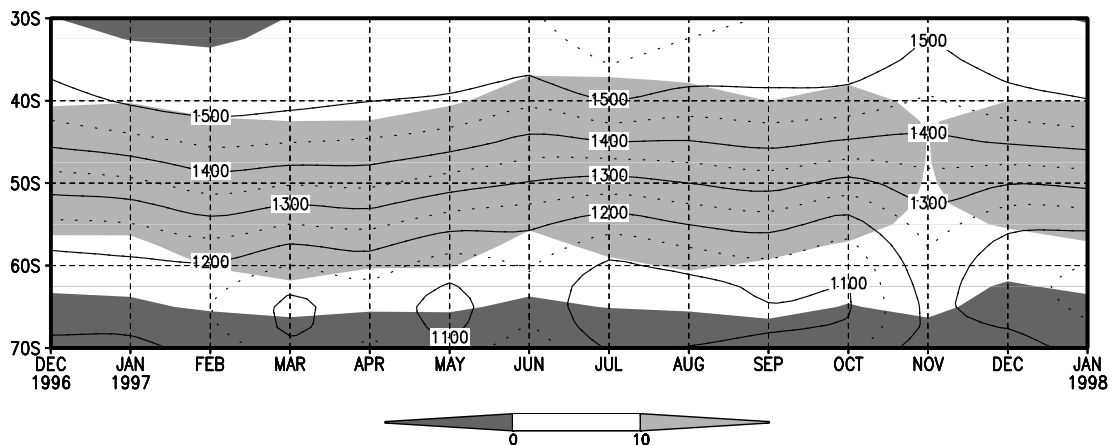


図4-7.

(a) 850hPa平面におけるジオポテンシャルハイト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100mで、1月における1200m以下と7月における1100m以下は、点線で20m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。

(b) 1997年における850hPa平面におけるジオポテンシャルハイトと東西風を0°から90°Eまで月平均値を時間-緯度断面で示した。コンターの実線は100mごと、点線は50mごとである。網掛けは(a)と同じである。

Residence times 90-70S average

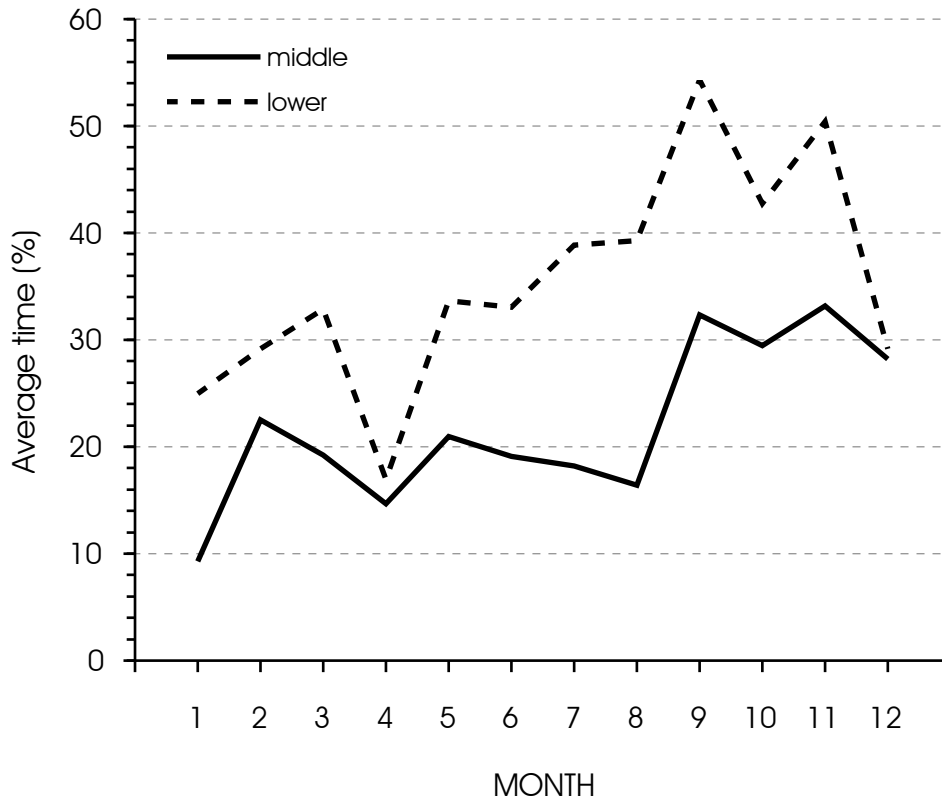


図4-8.
昭和基地上空に到達する空気塊について、上空300-600hPaまで(対流圏中層)に到達する空気塊と650-850hPaまで(対流圏下層)に到達する空気塊の、70°-90°Sの領域における滞留時間の割合をそれぞれ月平均値で示した。
実線は対流圏中層、点線は対流圏下層である。

1997 SEP Geopotential Height Z500

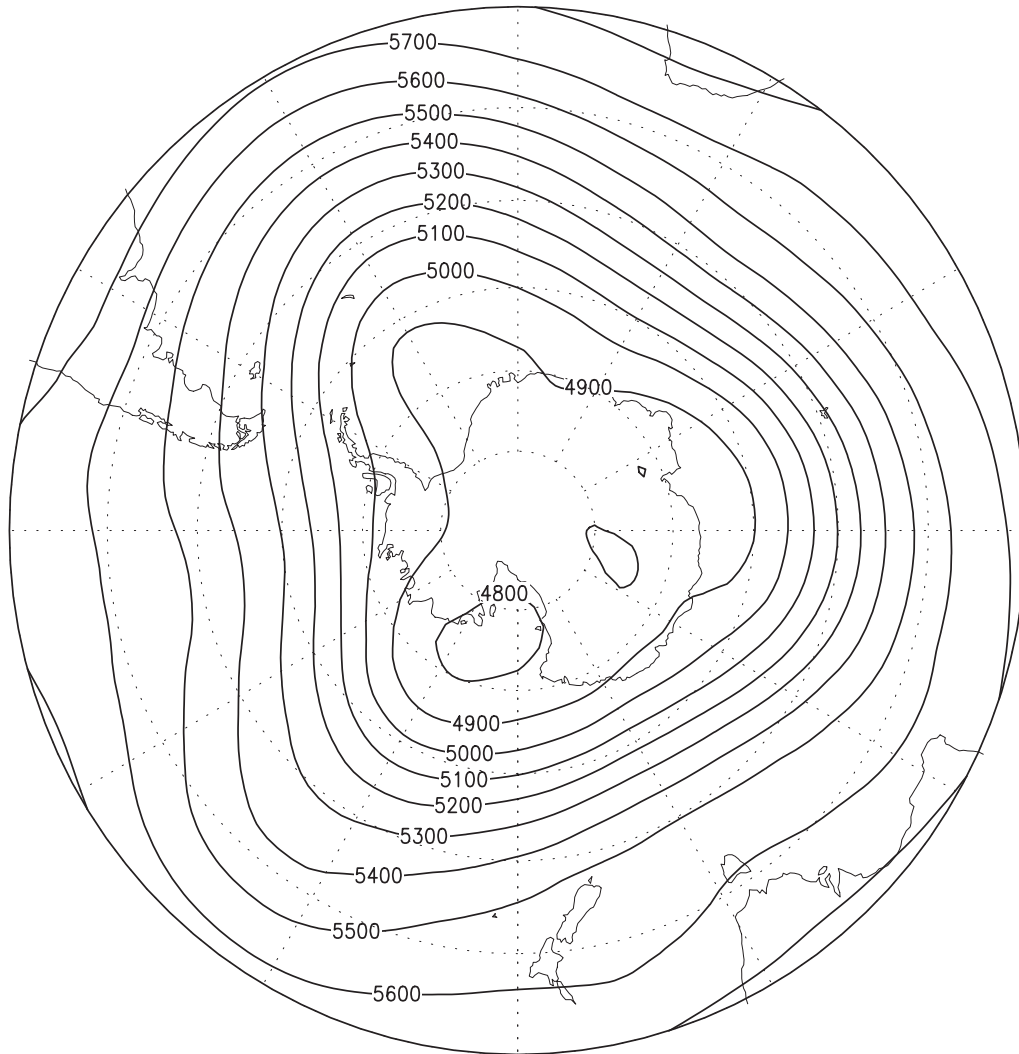


図4-9.
1997年9月におけるジオポテンシャルハイト500hPa平面における平均値を
コンターで示している。波数3型のプラネタリー波が卓越し、低圧部が30°W付近、
90°E付近、150°W付近にそれぞれみられる。

97 55-65S Z500 31d-anom(-zm)

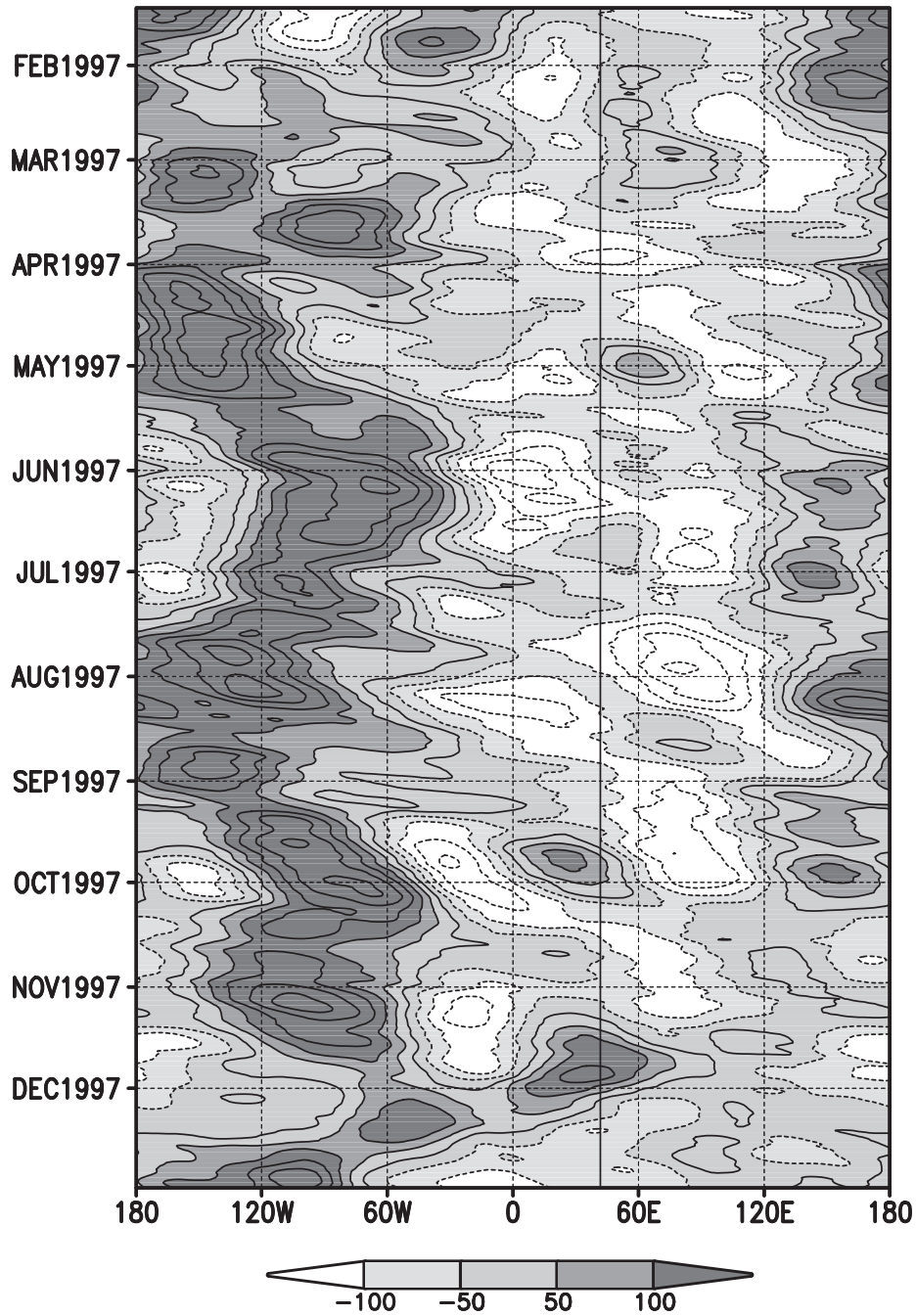
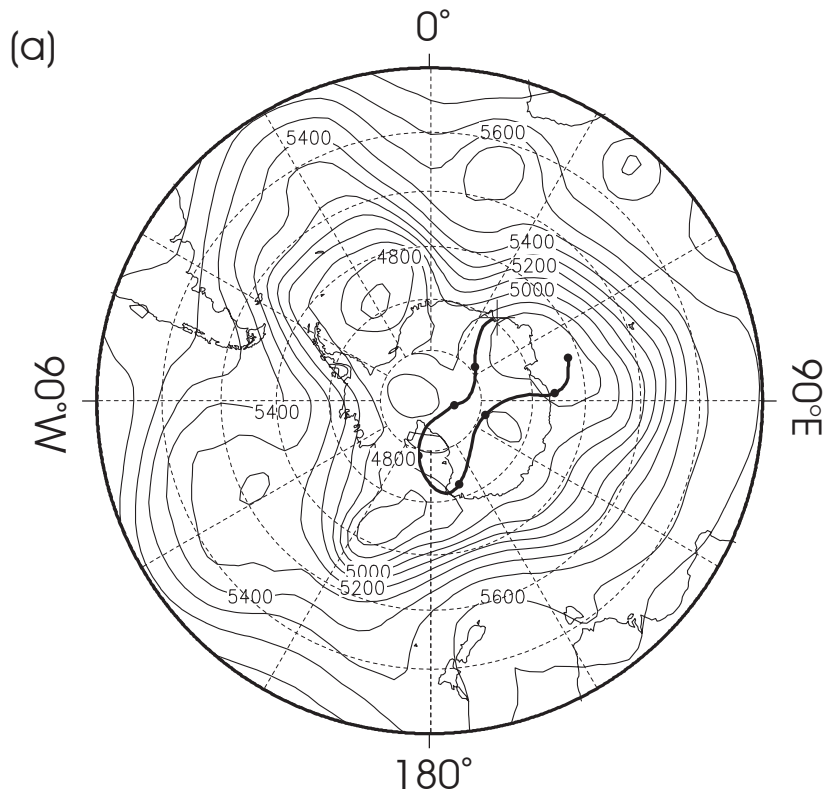


図4-10.
1997年における500hPa平面における55°-60°S間の帯状平均からの偏差を31日移動平均した
経度-時間断面図である。実線は正、点線は負を示している。
昭和基地のある東経40度を黒実線で示している、

1997 SEP 19 12UTC at 500hPa -7day



1997 JUN 20 12UTC at 500hPa -7day

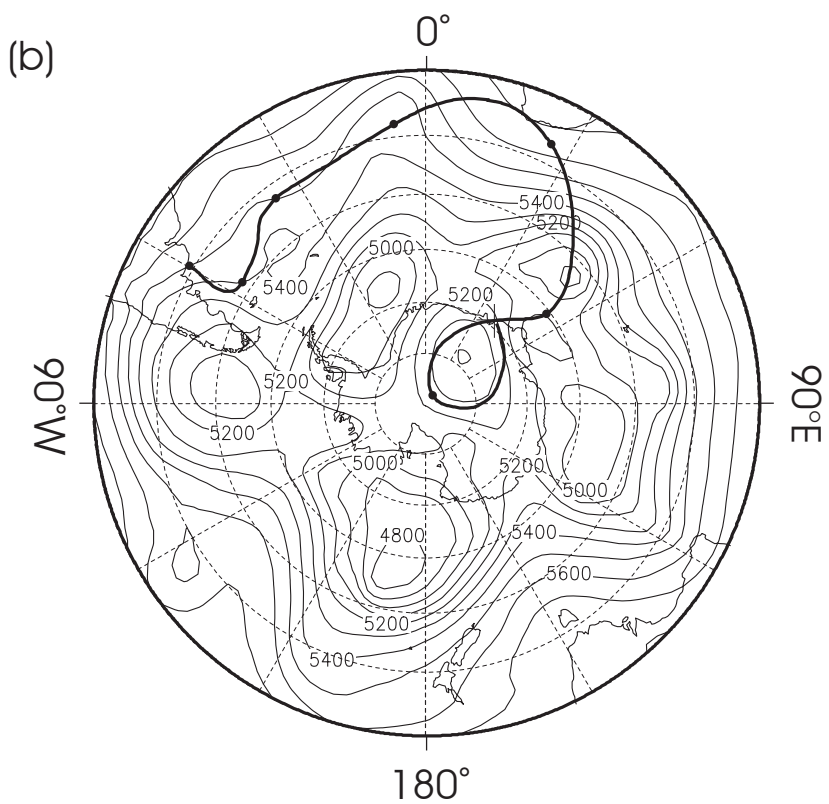


図4-11.

(a) 1997年9月19日12UTC時における7日間の500hPaにおける後方流跡線と、500hPa平面におけるジオポテンシャルハイトをコンターで示す。流跡線は毎日12UTC時を黒丸で示している。

(b) 1997年6月20日12UTC時における流跡線とジオポテンシャルハイトを(a)と同様に示す。

第5章 昭和基地及びドームふじ基地における対流圏大気輸送と起源

前章では、特に昭和基地に到達する空気塊の輸送経路や、到達する方向の季節変化について、大気循環場の観点から主に考察を行った。これをふまえて、本章では1990年から99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、調べることにする。4章で示された、昭和基地上空に到達する空気塊の輸送経路の季節変化は、一般性を持つものなのか、それとも年によって違った変化をするかを比較する。また、沿岸部の代表として昭和基地、内陸部の代表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る。

5-1. 海領域区分

図5 - 1は、南極域を3つの海と内陸という、4つの領域に区分した図である。昭和基地 (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。空気塊の5日前の位置をそれぞれの領域に当てはめ、起源として考える。詳細な緯度経度は次の通りである。

- ・大西洋 (大西洋) 60°W - 40°E, ~70°S
- ・インド洋 (インド洋) 40°E - 160°E, ~65°S
- ・太平洋 (太平洋) 160°E - 60°W, ~75°S

本章において、本研究の目的である水蒸気輸送経路と起源を導くために、水蒸気を多く含んだ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。

5-2. 昭和基地上空対流圏中層に到達する大気輸送経路と起源の季節変化

5-2-1. 大気輸送経路

昭和基地上空500hPaに到達する空気塊の5日前の位置について、図5-1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10hPa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5-2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。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°Sから70°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の特徴について調べるために、東西風と等圧面高度をそれぞれの5日前の位置で分類した起源ごとに、到達時についてコンポジットし10年平均値を示した(図5-3)。大西洋起源となる場合の等圧面高度は南極大陸を中心に波数3型になっており、昭和基地の西側にトラフが海洋上に張り出している。偏西風帯の40°E付近には東向きの極大域がみられるが、昭和基地周辺の沿岸部は弱い東風領域になっている。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っている。太平洋起源となる場合の特徴は、波数3型の等圧面高度は大西洋起源の場合と似ているが、偏西風帯の東向きの極大域の位置が0°付近にあり、40°E付近で等圧線が蛇行している。太平洋起源をもつ空気塊は偏西風帯を長距離移動し、0°付近で南東方向に方向転換して昭和基地に到達しており、高度方向に移流されることが少なくなっている。

インド洋起源となる時は、前述の場合と異なり昭和基地付近は低圧部に覆われている。偏西風帯の極大域はインド洋上80°E付近にあり、隣接する大陸の沿岸部および周辺海域には低圧部が存在するため、比較的強い東風が吹いている。この低圧部のインド洋海上への張り出しが、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を担っていると考えられる。内陸から大気が輸送される場合、インド洋起源と似た大気循環場が形成されている。しかしながら、東南極大陸沿岸に形成されていた低圧部は内陸上空のみに現れている。このため、海上からの大気の流入が起り難く、主に氷床上を西向きに大気が輸送される状況になっている。

以上から、波数3型のプラネタリー波が発達し、昭和基地の西側にトラフが存在する場合に、偏西風帯を東向きに移動してきた空気塊がトラフ付近で上昇して昭和基地上空に到達している。またインド洋上の沿岸に近い海域において総観規模擾乱などの影響を受けて、南極氷床沿岸部から海上にかけて低圧部が発生する。この低圧部が海上から沿岸部にかけて発達するため、インド洋上から氷床上へ大気が流入しやすくなっている。低圧部があまり発達しない場合は内陸上を漂う大気が昭和基地に西向きに輸送されている。

5-2-2. 大気輸送起源

図5-4は、昭和基地上空500hPaに到達する空気塊の5日前の位置について、図5-1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（上図）、海ごとの比較（下図）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は、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。

これらの輸送起源の季節変化をもたらすバックグラウンドを理解するため、対流圏中層における東西風について調べた。図5-5は、東経40度に沿った500hPaにおける東西風の10年平均値の緯度 - 時間断面図である。一年を通して45°S - 55°S付近に強い偏西風帯が見られるが、冬の期間である6月と夏季である12月から1月にかけて、低緯度方向へその中心部がずれている。佐藤 (2004)はvan Loon (1972)と同様、気圧場に半年振動が見られるのは極環低圧帯が夏と冬に弱り、低緯度に移動することと対応していると言及している。この気圧の半年周期変動は、カタバ風と南極大陸上の放射冷却による上層での大気の流れがバランスを取ることによって生じている (Parish and Bromwich, 1997)。気圧の変動と風系の変動は連動すると考えられるため、図5-5に見られる東西風の半年振動も極環低圧帯の季節変化に伴っていると考えられる。

昭和基地付近では、3月から5月を除くと、弱い東風領域となっている。また11月から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、西風にの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月から5月、8月から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月から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。

5-3. 昭和基地上空対流圏下層に到達する大気輸送経路と起源の季節変化

5-3-1. 大気輸送経路

図5-6は図5-2と同様に昭和基地上空850hPaに到達する空気塊の経路について集計し、海領域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500hPaとよく似ている。4章で示した通り輸送経路長は高度によって異なっており、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っている。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も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、図4-2(c)で示された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考えられる。

図5-7は図5-3と同様に、昭和基地上空下層に到着する空気塊の輸送起源ごとの大気循環場について10年平均値をそれぞれ示した。太平洋起源については、総個数が25個（約2%）と少ないため、示していない。大西洋起源の背景となる大気循環場の特徴は、中層と同じく波数3型のプラネタリー波の構造がみられ、昭和基地の西側にトラフがある。沿岸部は弱い東風領域となっているが、西風と東風の境界が、南極大陸側に寄っている。したがって昭和基地周辺では東向きの風系が西向きに転向する場所と考えられ、偏西風帯を東向きに移動してきた大気が、昭和基地付近の海上で転向し、昭和基地へ西向きに到達する空気塊が多いことを裏付けている。インド洋起源と内陸起源となる等圧面高度の分布は、中層と同様、昭和基地側ではなく、80°E付近に偏西風域に極大がある。両者の違いについても、中層と同じくインド洋に面した沿岸域に発達する低圧部が海上まで張り出すかによる。（つまり、インド洋における擾乱の規模によってインド洋上を西向きに偏西風に沿って移動してしてきた空気塊が、大陸へ流入するかは擾乱による気圧勾配の深まりと、それに対応する低圧部の発達に起因していると考えられる。）

5-3-2. 大気輸送起源

図5-8は、昭和基地上空850hPaに到達する空気塊の5日前の位置について、図5-4と同様に海・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。前節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4-7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。4-2節では、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東向きの輸送が減少し、西向きの輸送が増加することを示している。

さらに対流圏下層における大気循環場の季節変化の特徴を調べるために、図5-5と同様、850hPaにおける東西風の10年平均値を示した（図5-9）。昭和基地付近は年間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。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月～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付近では東風が通年卓越している。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年通じて優勢となっている。

5-4. ドームふじ基地上空対流圏中層に到達する大気輸送経路と起源の季節変化

5-4-1. 大気輸送経路

図5-10は図5-3と同様にドームふじ基地上空500hPa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上昇流に伴った流入後、大陸上での高度方向の運動はほとんどみられない。ドームふじ基地へ到達する場合、インド洋上から流入時により急激に上昇している。空気塊の流入しやすい場所が二地点あり、一つはアメリー棚氷、もう一つは図5-2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大気の流れは起こりやすく、その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、極点付近を通過して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到達する場合がある点である。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ていない。

内陸起源となる空気塊は、昭和基地500hPa（図5 - 2）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。図4 - 2(c)で示され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。

図5-11は図5-3と同様に、ドームふじ基地上空500hPaに到着する空気塊の輸送起源ごとの大気循環場について10年平均値をそれぞれ示した。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°Eから140°E付近で大きく婉曲している。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沿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50m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っ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。

5-4-2. 大気輸送起源

図5-12は、ドームふじ基地上空500hPaに到達する空気塊の5日前の位置について、図5-4と同様に海・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入が起り難くなっている。冬季には、中緯度で偏西風が卓越し南極域の内外での大気交換は行われ難いと予想されるが、逆に総観規模擾乱が沿岸部周辺を頻繁に通過することで、大陸上へ大気が流入しやすくなっていると考えられる（Seko et al., 1991）。

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月～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5-5）、東向きが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は西向き、冬季は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る。

5-5. 考察・まとめ

5-5-1. 大気循環場の特徴

前節までは、海領域区分を用いて昭和基地・ドームふじ基地へ到達する空気塊の5日前の位置を起源とした時の空気塊の輸送経路の特徴とその区分ごとの空気塊の割合について季節変化を調べた。本節では、その大気輸送の背景となる大気循環場について等圧面高度の偏差を用いて詳細な特徴を記述する。図5-13(a)(b)（昭和基地500hPa）、図5-14（昭和基地850hPa）、図5-15(a)(b)（ドームふじ基地500hPa）は、それぞれの起源ごとに、20年間における日々の等圧面高度の平均からの偏差および起源ごとの等圧面高度の平均について水平分布を示している。

図5-13(a)は、空気塊が到達した時間におけるそれぞれの場を示している。大西洋起源の場合、偏差は最小であり、大西洋起源となる空気塊が輸送がされる場合は、平均場に近い状況となっていることから、一般的な大気輸送が大西洋起源である。逆に、最も偏差の勾配が大きいのはインド洋起源である。海陸の境界付近を境として、インド洋上に強い負の領域、内陸上に強い正の領域がある。逆に氷床上に強い負の領域、海上に正の領域が太平洋起源の場合にみられる。これらの偏差場の特徴は、Antarctic Oscillation (AAO) Index がそれぞれ負と正の場合の等圧面高度分布と類似している。AAO-Index は3月～5月に正が極大、夏季には負が卓越する

(Thompson and Wallace, 2000) が、海起源ごとに輸送個数の季節変化（図5-4）と比較すると、太平洋起源が増加する時期にAAOが正、インド洋起源が増加する時期にAAOが負となっており、南極域全体の大気循環場の季節変化が大気輸送経路に反映されている。インド洋起源の場合と、輸送経路自体の特徴や気圧配置の特徴は似ている内陸起源の偏差場は、昭和基地の西側に正、東南極大陸上に弱い負の領域が広がっている。インド洋起源の場合は、インド洋側に総観規模擾乱などに伴う移

流が海上から沿岸部へ流入し、西向きに転向して昭和基地へ到達している。領域別の偏差場によると、昭和基地の西側に負の偏差が有る場合は海上から東向きの移流が到達しやすく、西側に正の偏差がある場合は内陸・沿岸部から西向きの移流が到達しやすくなっている。

大西洋起源の場合、等圧面高度分布によると昭和基地の西側にトラフが発達し、周辺に負の偏差がみられることから、昭和基地の西側に低気圧が存在していると考えられる。この低気圧によって、大西洋から大気が移流されている様子を調べるために、図5-13(b)では、大西洋起源とした空気塊の到達時から1日ごとに、1日前、2日前と順に5日前までの等圧面高度の平均値と20年間における日々の平均値からの偏差を示している。平均された等圧面高度の特徴は5日間あまり変化がみられないが、正と負の偏差の位置が西から東へ移動している。低気圧が偏西風帯を移動する状況が示され、大西洋起源の大気は主に低気圧によって移流されていると考えられる。

図5-14は図5-13(a)と同様、空気塊到達時の等圧面高度と偏差場をそれぞれ示している。昭和基地における対流圏下層への大気輸送のうち、内陸起源の場合に偏差が最小になっており平均的な構造に近い。一般的に大気輸送が内陸に起源をもつ傾向がある。絶対数が少ないため、太平洋起源の場合は示していない。インド洋起源となる時にインド洋と大陸間の偏差は、中層よりも小さい。大西洋起源となる場合の偏差の分布は中層と同様であり、海上からの西向きの移流が昭和基地に到達する場合は、昭和基地の西側に負の領域が存在している。

図5-15(a)は図5-13(a)と同様、空気塊到達時の等圧面高度と偏差場をそれぞれ示している。大西洋起源およびインド洋起源の場合、ドームふじ基地周辺は正の領域である。大西洋起源の場合は、昭和基地と同様に西側沿岸部にトラフが発達している領域が負の偏差となっており、ドームふじ基地の西側沿岸部に低気圧の存在が示唆される。インド洋起源の場合の偏差場は、図5-13(a)と同様、AAO-Indexが負の時のパターンと類似している。また太平洋起源では、ドームふじ基地の東側に負、西側から南極点側まで覆う正の領域があり、ロス海側からの大気の流入が起りやすい状況になっている。内陸起源になる場合は、ドームふじ基地周辺は負、ロス海から南極点側に正の領域が広がっている。東南極大陸上に等圧線が内陸部側に大きく蛇行しているが、このリッジが強化され、氷床上で反時計回りの輸送が卓越する。

以上から、昭和基地においては、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、西側に高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いては、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）からの大気が流入していた。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リッジによる反時計回りの大気輸送が卓越していた。

5-5-2. 大気輸送経路の特徴

本章では、対流圏大気の南極氷床への輸送経路および起源の季節変化について、沿岸部と内陸部、また沿岸部における対流圏の中層と下層での違いについて調べた。

図5-16は各基地・高度における海・陸起源別の大気輸送経路の気候値をそれぞれ示している。昭和基地上空500hPaに到達する空気塊は、一年通じて海起源が約8割を占め、海起源の中では大西洋起源が約7割となっている。中緯度から偏西風帯を横切る際に上昇し、その後大西洋上を南東方向へ移動する空気塊が多い。太平洋起源となる空気塊は偏西風帯域を東向きに長距離輸送されることが多く、高度方向の運動は少ない。インド洋起源となる空気塊は、インド洋上から急激に上昇した後、沿岸伝いに西向きに輸送されている。内陸起源となる空気塊は、氷床の地形に沿って到達している。

昭和基地上空850hPaへ到達する空気塊は、海起源と陸起源の割合はほぼ半分となっている。海起源の中では、大西洋起源が優勢ではあるが、インド洋起源の影響が500hPaよりも大きくなっている。内陸起源とインド洋起源の輸送経路は、沿岸伝いに西向きに下降する特徴がある。対流圏中層では下層の約2倍の速度で風が吹いているため、太平洋起源の輸送の割合は比較的高かったが、下層へ到達する太平洋起源の空気塊数は僅かとなっている。

ドームふじ基地上空500hPaへ到達する空気塊は、海起源と陸起源の割合は昭和基地の850hPaと同様、1：1となっている。夏季は大陸を覆う高気圧に影響を受けるために外部からの大気流入が乏しく内陸起源が優勢となるが、冬季には総観規模擾乱

などによって、沿岸部へ大気の流れが頻繁に行われるために、海起源が優勢となっている。海起源別の割合は、昭和基地と同様大西洋起源が優勢であるが、インド洋起源の割合も多い。大西洋およびインド洋起源となる空気塊は、偏西風帯を横切る際に上昇し、その後も内陸部へ上昇しながらドームふじ基地へ到達している。太平洋起源の空気塊は昭和基地と異なり、ロス海側から南極点付近を通過して、中層域から下降して到達している場合が多い。

昭和基地へ東向きに海上から大気が輸送されるのは、昭和基地の西側に低圧部がある場合であり、西向きに沿岸伝いに下降して大気が輸送されるのは昭和基地付近に高圧部、インド洋側に低圧部が発達する場合であった。

ドームふじ基地へ大西洋およびインド洋上から大気が輸送される場合は、ドームふじ基地周辺が高圧部となっている場合であった。太平洋上から南極点側を通過する大気の流れや南極氷床からの大気が輸送されるときは、ドームふじ基地周辺が低圧領域になって北西方向へ大気が輸送される状況になっていた。

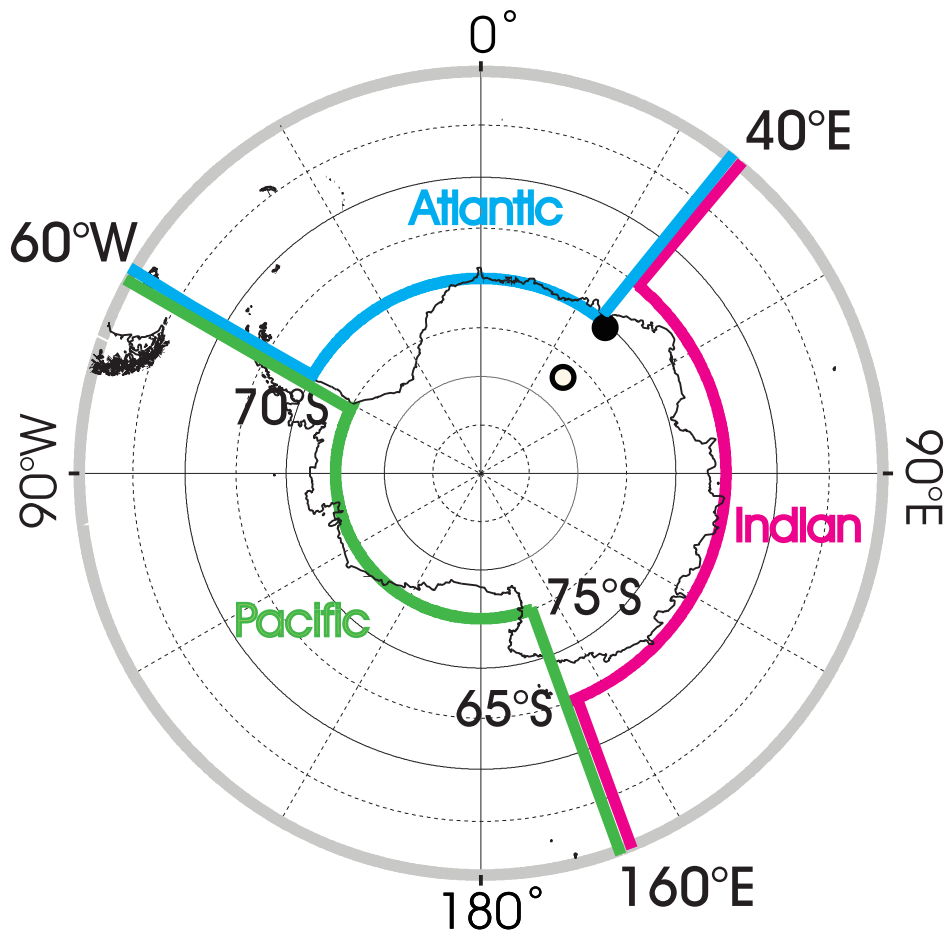


図5-1.

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

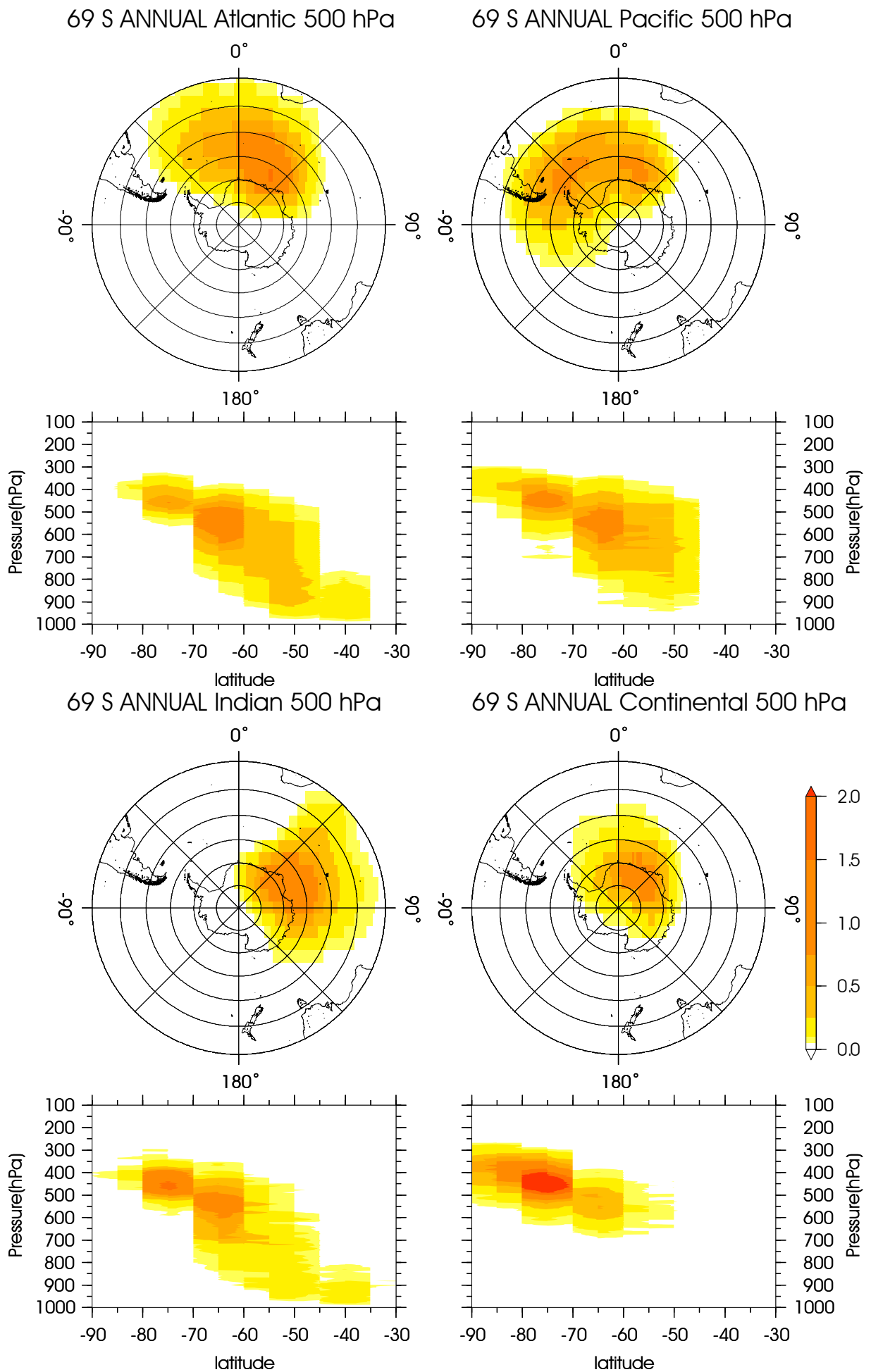
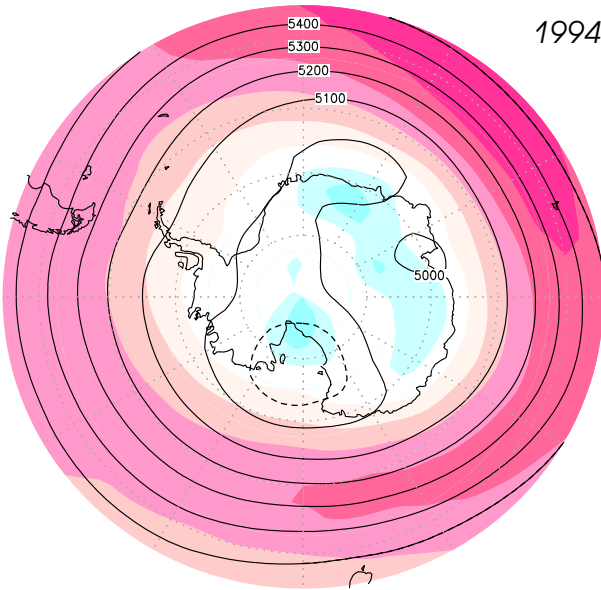
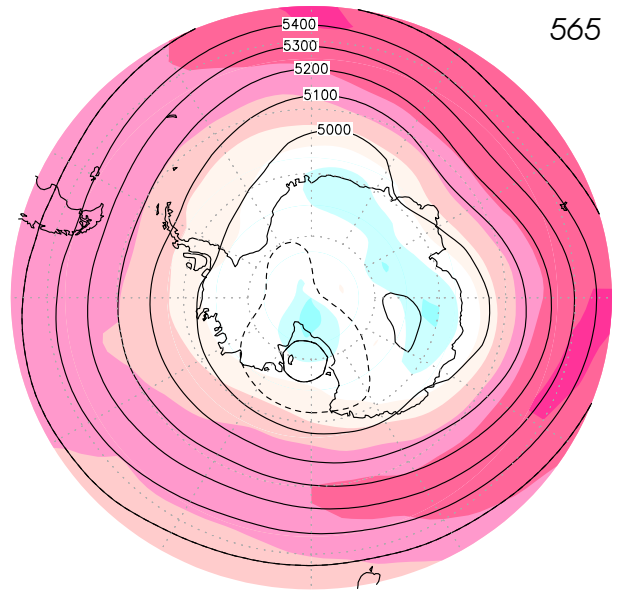


図5-2. 昭和基地上空500hPaに到達する空気塊の輸送経路について、5日前の位置によって分類を行い、5日間の輸送についてそれぞれ水平方向に経度緯度2.5度グリッド、鉛直方向に緯度2.5度高度10hPaの格子ごとに頻度を集計し、10年平均値を得た。左上からAtlantic起源、Pacific起源、左下からIndian起源、内陸起源、上は水平分、下は高度分布であり、格子ごとの個数の割合を示している。

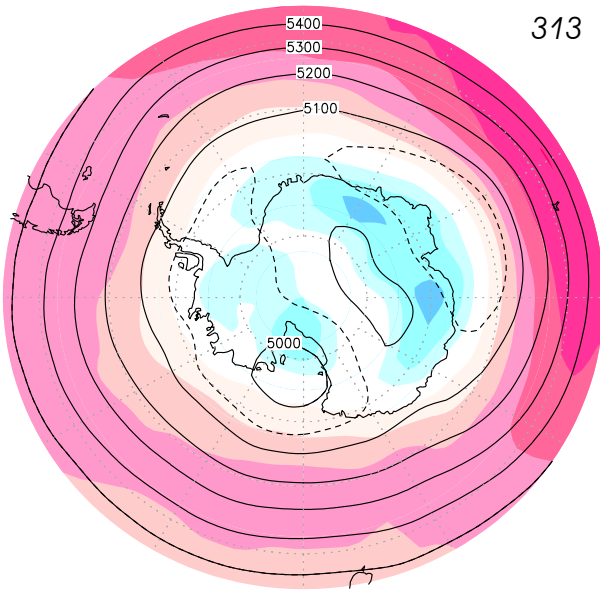
69S average Atlantic GPH 500 hPa -0d
1994



69S average Pacific GPH 500 hPa -0d
565



69S average Indian GPH 500 hPa -0d
313



69S average Continental GPH 500 hPa -0d
800

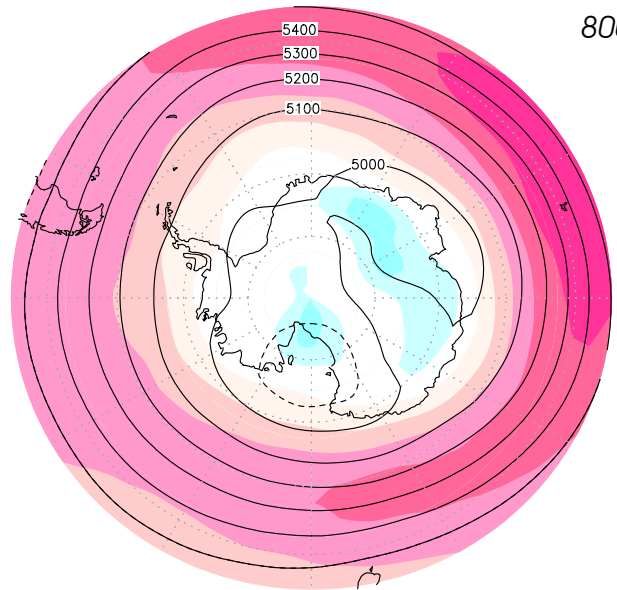


図5-3. 昭和基地上空500hPaに到達する空気塊の5日前の位置について、
図5-1の海領域ごとに集計し、海起源ごとのジオポテンシャルハイトと東西風をそれぞれ10年分平均した。
上段左からAtlantic、Pacific、下段左からIndian、内陸起源の場合である。
ジオポテンシャルハイトはコンター(実線は100mごと、波線は50mごと)、東西風は色によって表示している。
それぞれの右上の数値は全該当事例個数を示している。

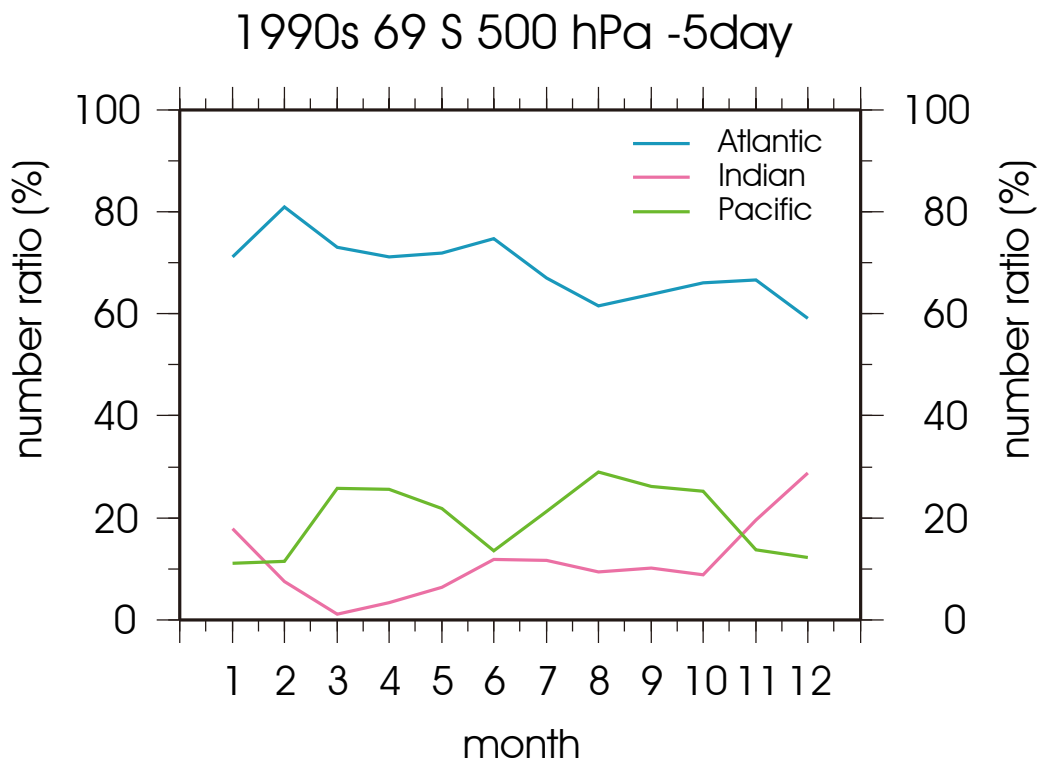
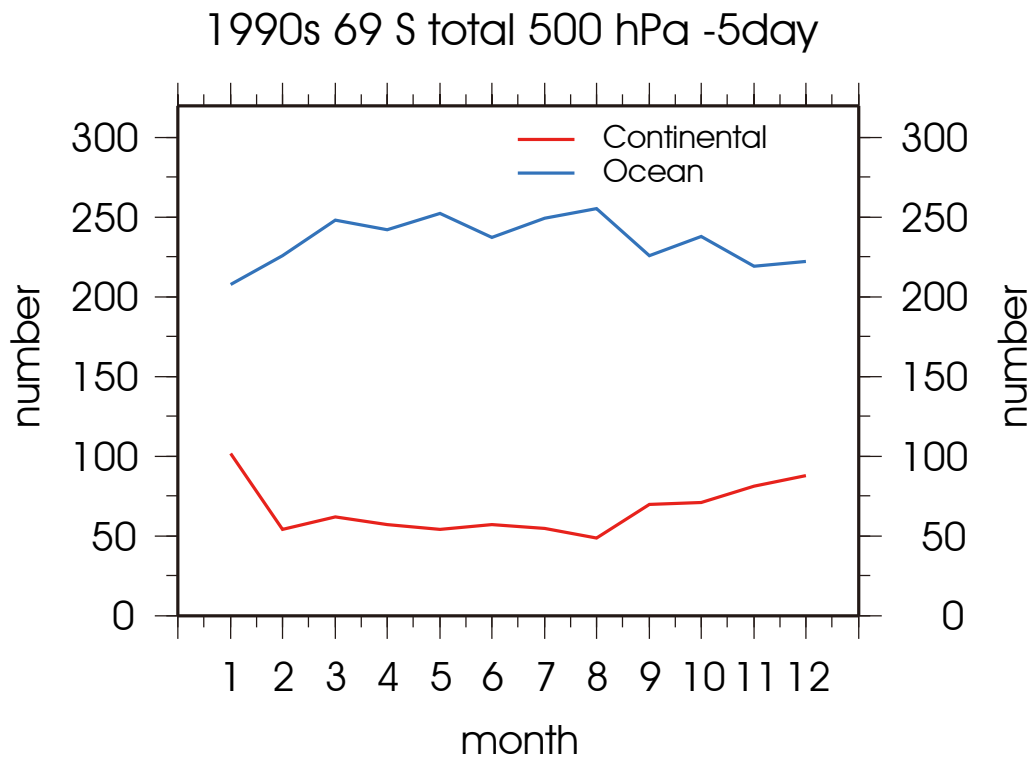


図 5-4.

上：昭和基地上空 500hPa 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かれている。

下：上図の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。

1990S 40E monthly U-WIND(m/s) Z500

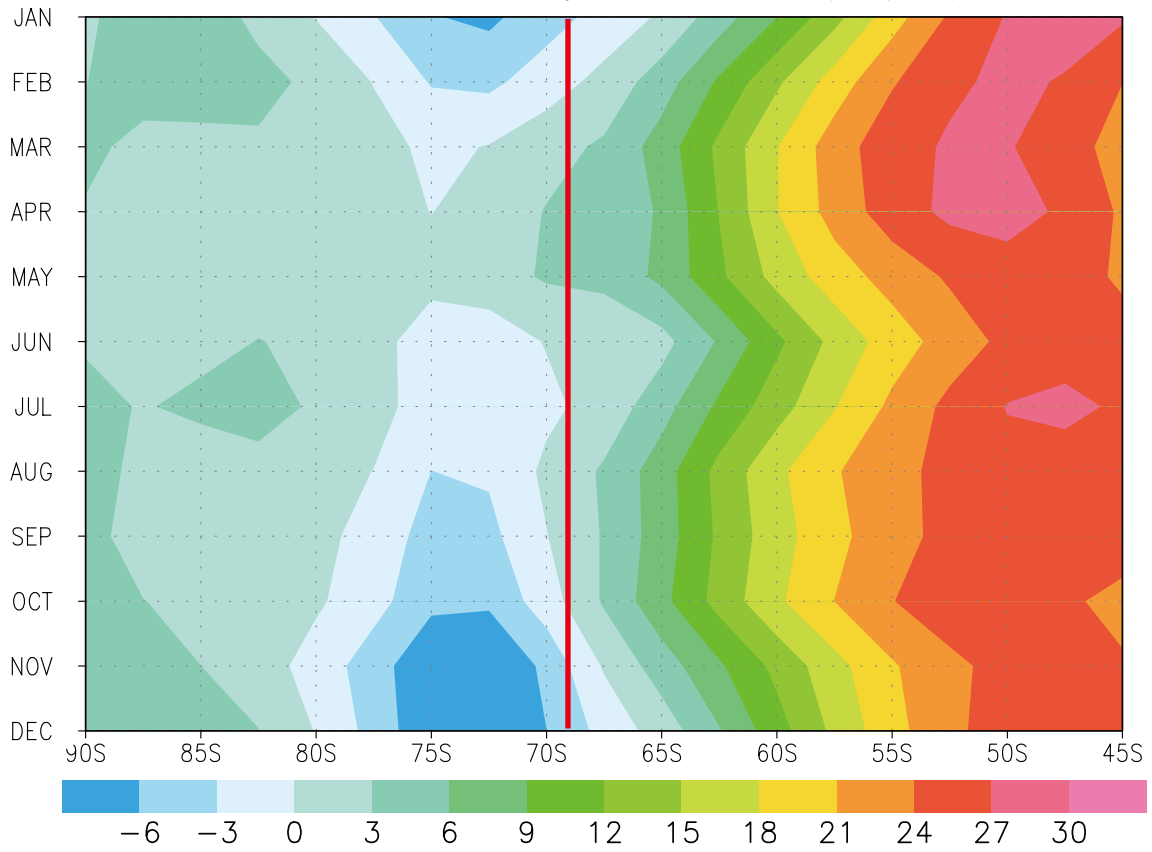


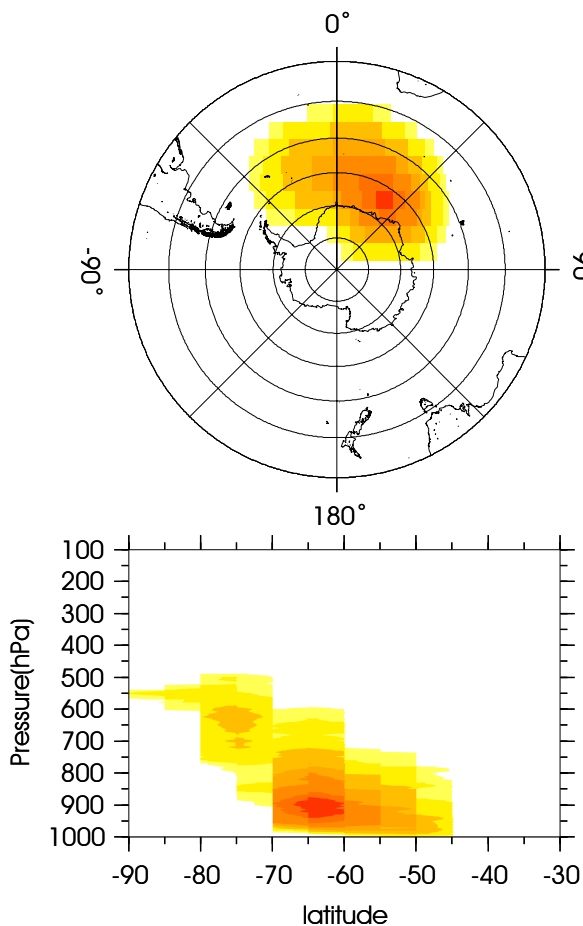
図5-5.

東経40° に沿った、500hPaにおける東西風の10年間の月平均値を示す。

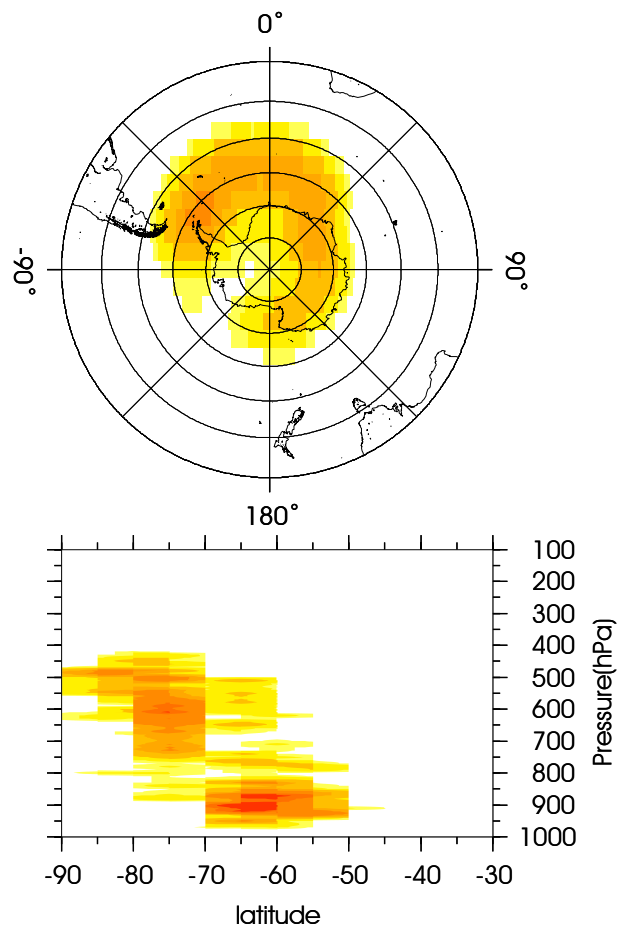
縦軸は月、横軸は緯度、単位はm/sである。

昭和基地のある南緯69度を赤実線を示している。

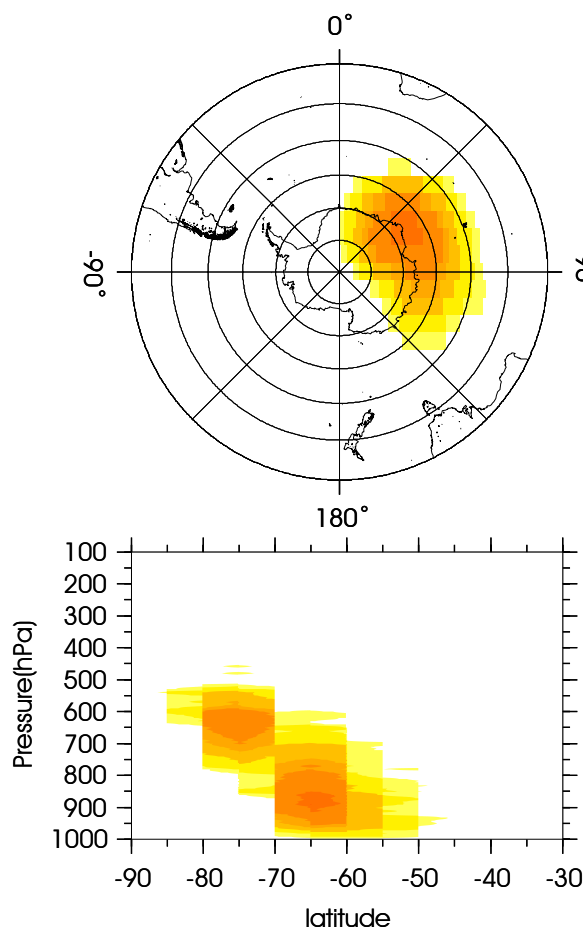
69 S ANNUAL Atlantic 850 hPa



69 S ANNUAL Pacific 850 hPa



69 S ANNUAL Indian 850 hPa



69 S ANNUAL Continental 850 hPa

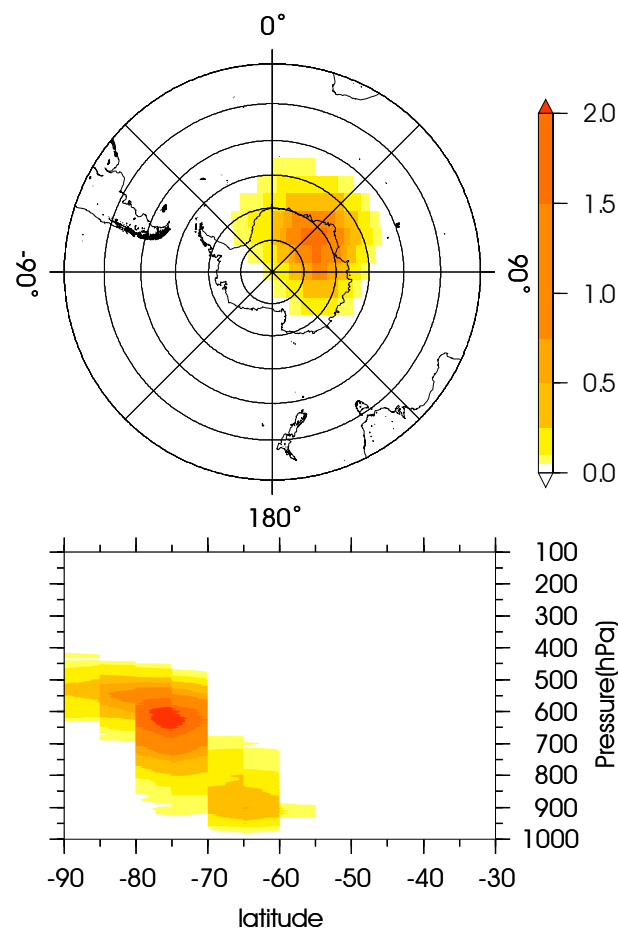
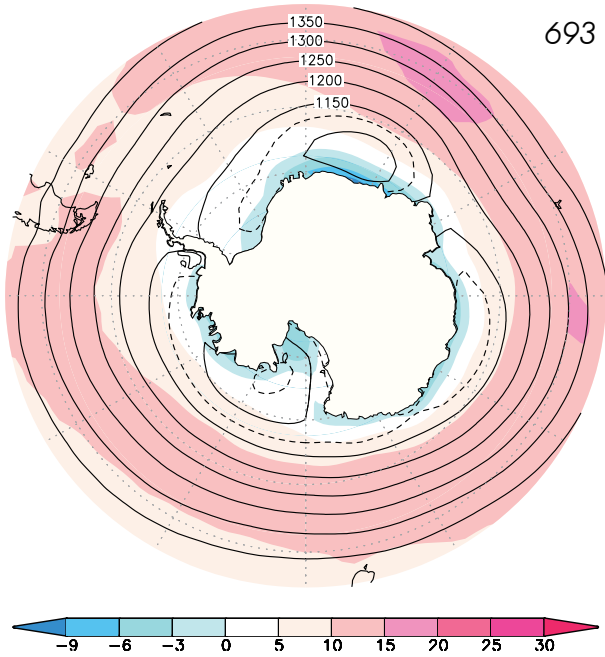
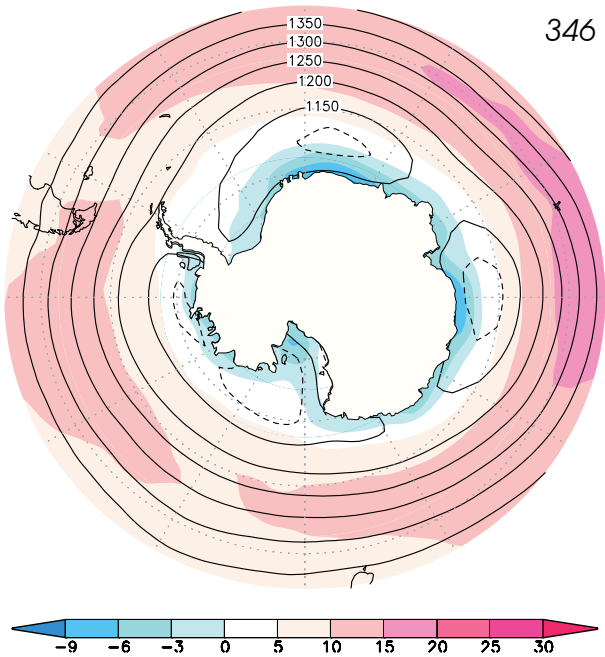


図5-6. 昭和基地上空850hPaに到達する空気塊の輸送経路について、5日前の位置によって分類を行い、5日間の輸送についてそれぞれ水平方向に経度緯度2.5度グリッド、鉛直方向に緯度2.5度高度10hPaの格子ごとに頻度を集計し、10年平均値を得た。左上からAtlantic起源、Pacific起源、左下からIndian起源、内陸起源、上は水平分、下は高度分布であり、格子ごとの個数の割合を示している。

69S average Atlantic GPH 850 hPa -0d



69S average Indian GPH 850 hPa -0d



69S average Continental GPH 850 hPa -0d

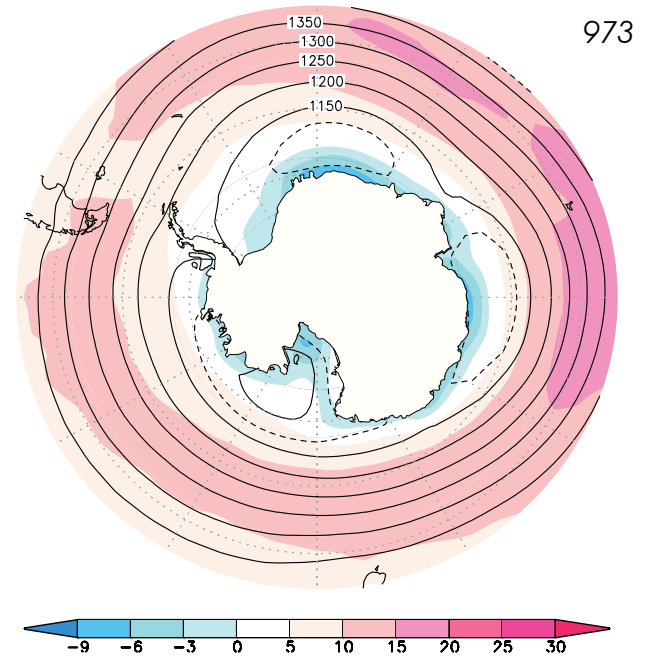


図5-7. 昭和基地上空850hPaに到達する空気塊の5日前の位置について、図5-1の海領域ごとに集計し、海起源ごとにジオポテンシャルハイトと東西風をそれぞれ10年分平均した。
 左からAtlantic、Indian、内陸起源の場合である。
 ジオポテンシャルハイトはコンター(実線は50mごと、波線は30mごと)、東西風は色によって表示している。
 南極大陸上は、850hPaよりも高い領域が多いため、大陸上の値は表示してない。
 それぞれの右上の数値は全該当事例個数を示している。

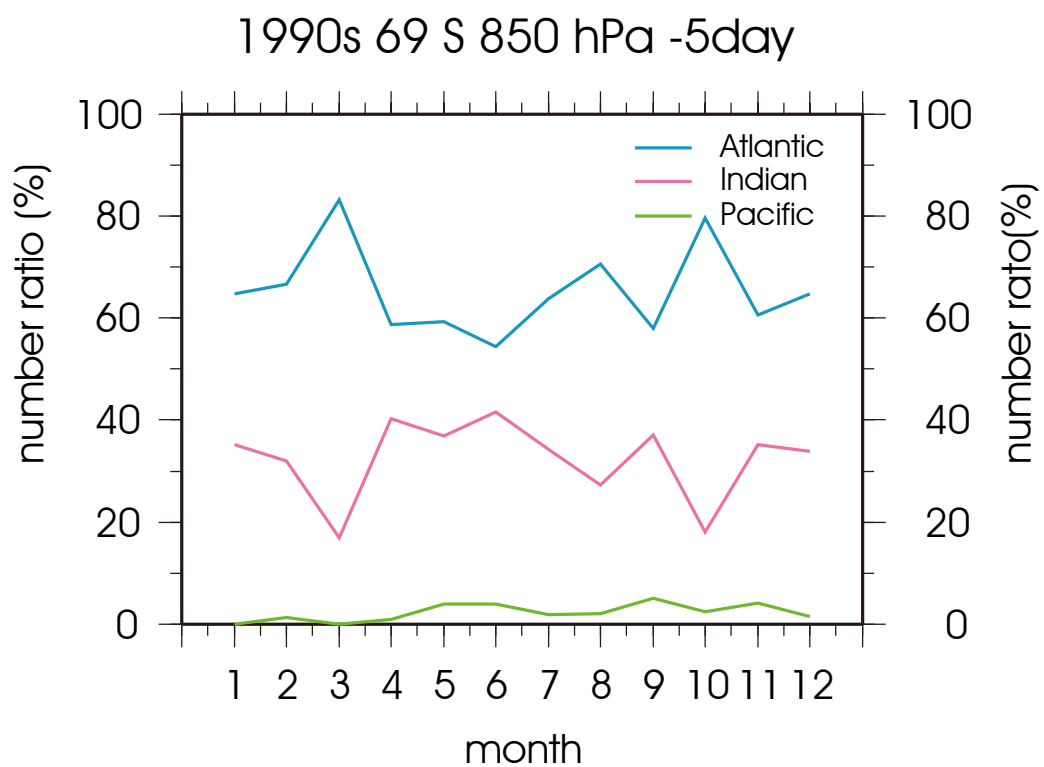
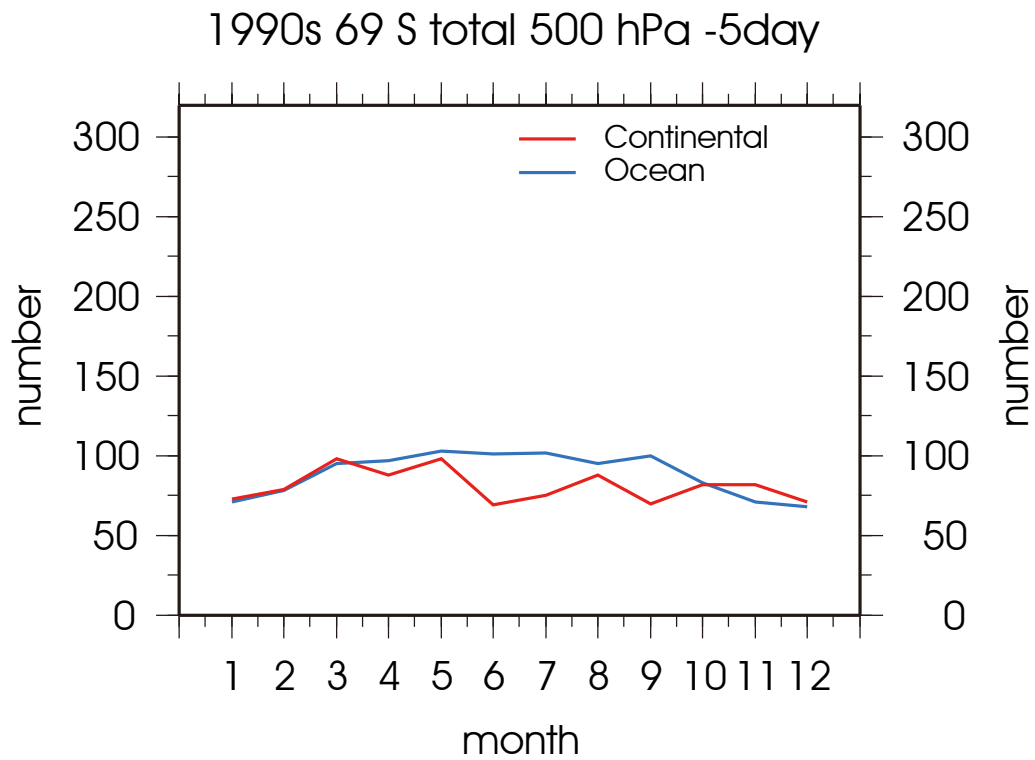


図 5-8.

上：昭和基地上空 850hPa 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かれている。

下：上図の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。

1990S 40E monthly U-WIND(m/s) Z850

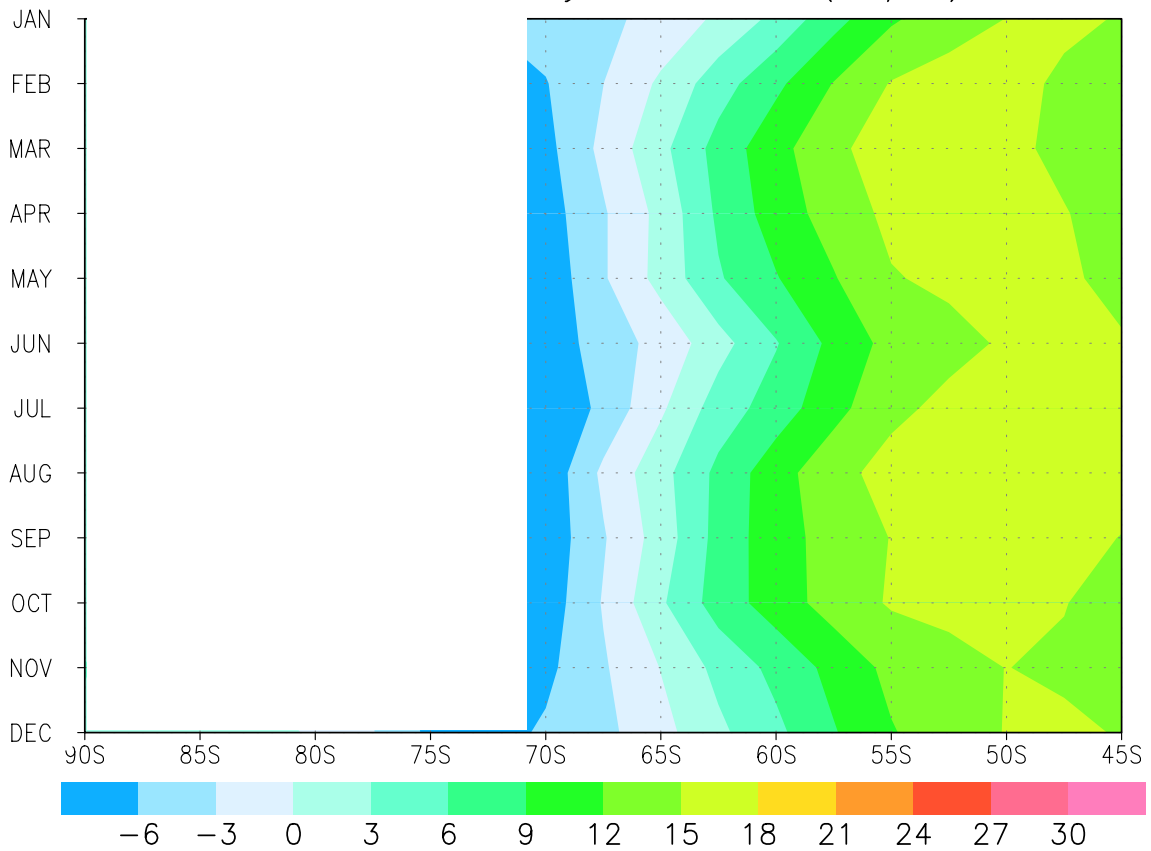


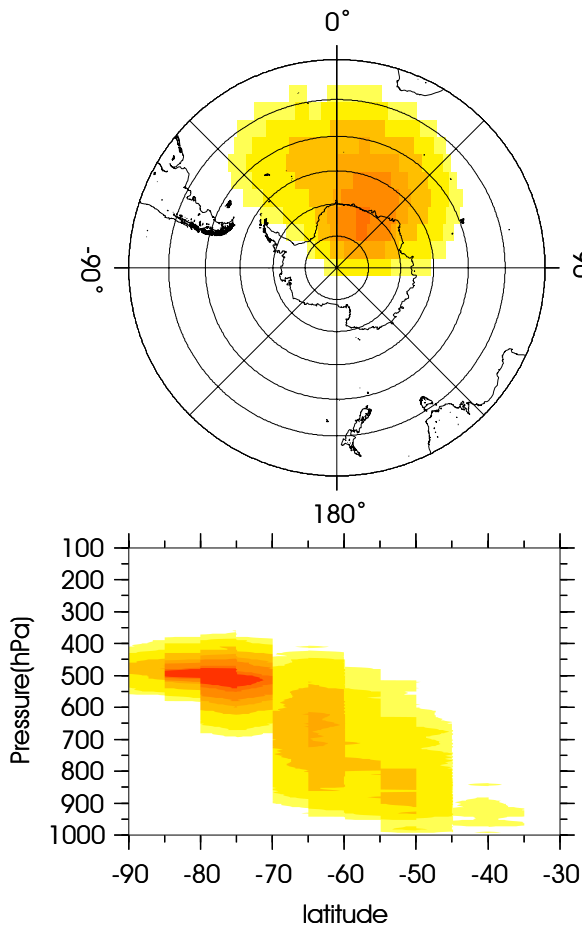
図5-9.

東経40° に沿った、850hPaにおける東西風の10年間の月平均値を示す。

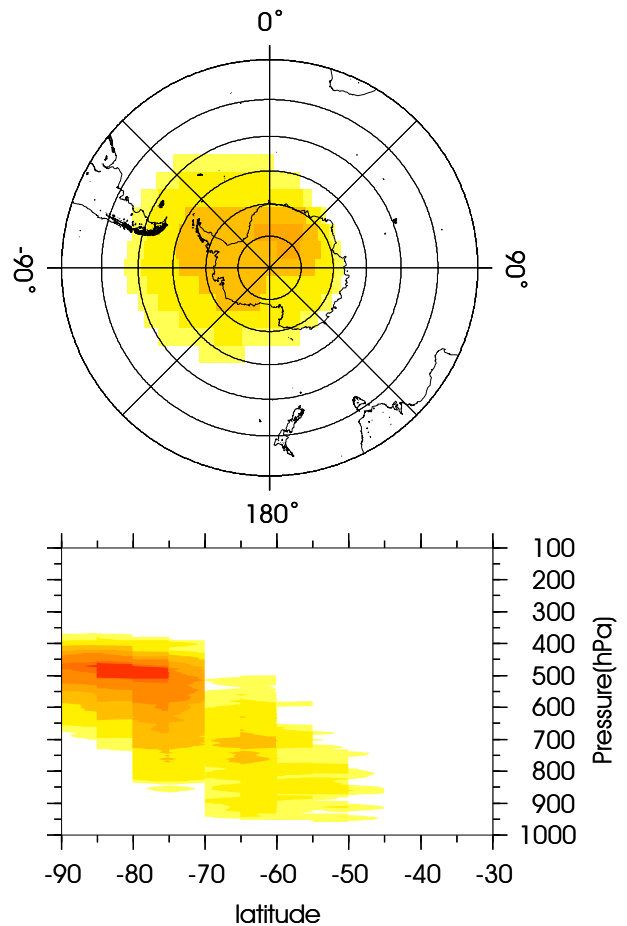
縦軸は月、横軸は緯度、単位はm/sである。

南極氷床の大部分は850hPa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。

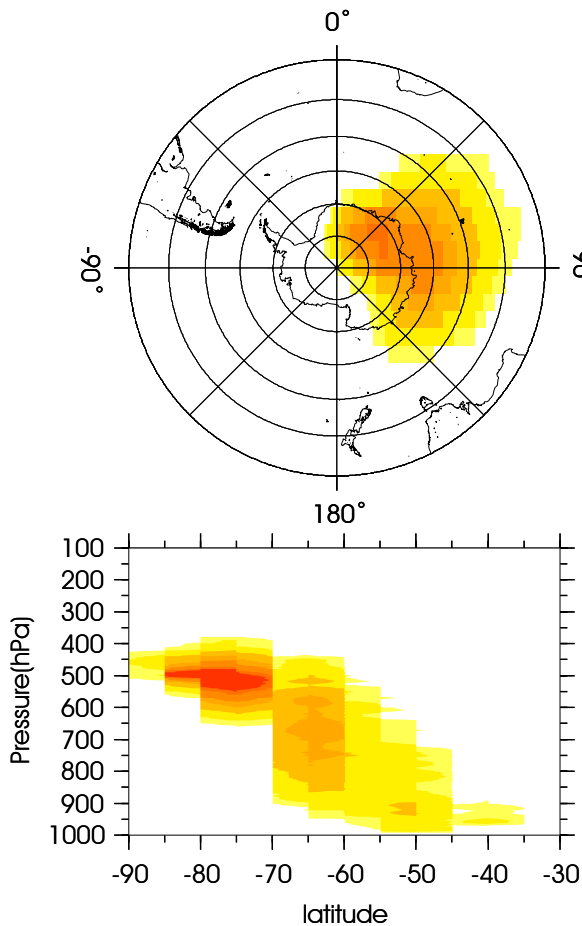
77 S ANNUAL Atlantic 500 hPa



77 S ANNUAL Pacific 500 hPa



77 S ANNUAL Indian 500 hPa



77 S ANNUAL Continental 500 hPa

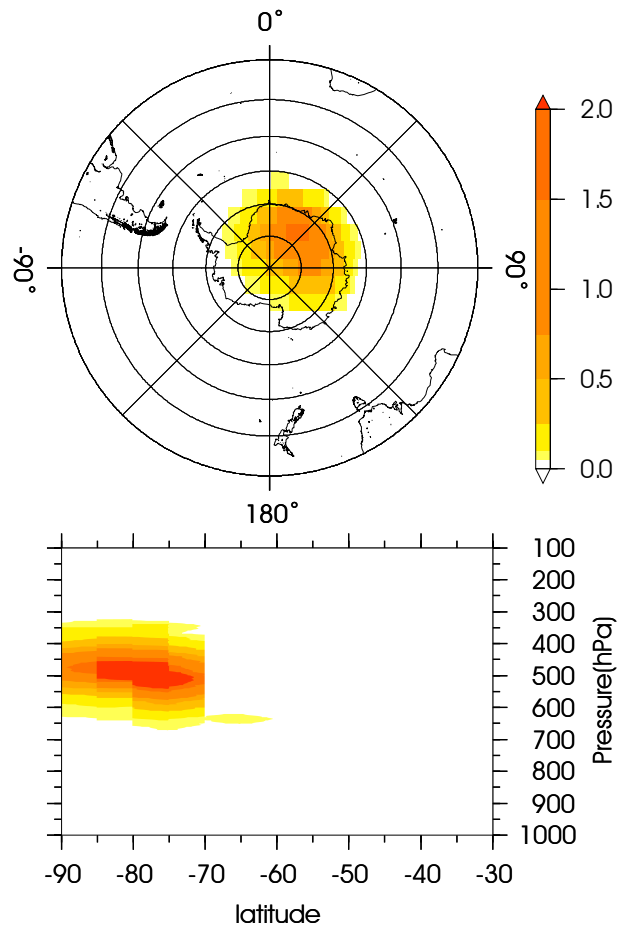
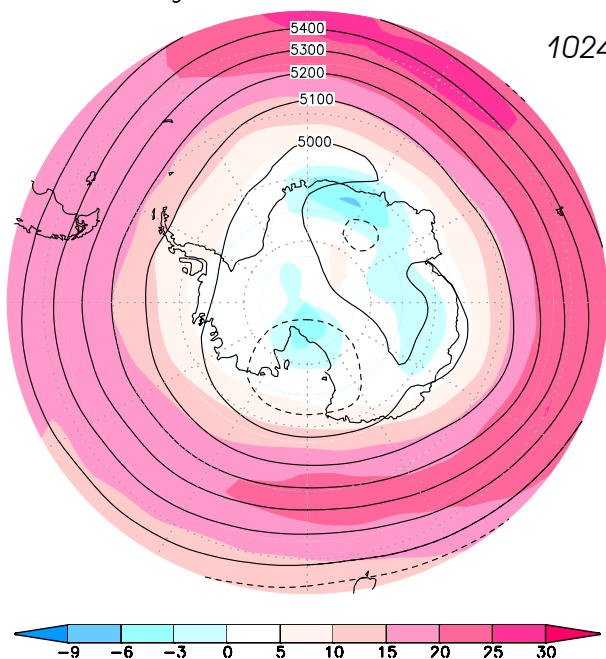


図5-10.ドームふじ基地上空500hPaに到達する空気塊の輸送経路について、5日前の位置によって分類を行い、5日間の輸送についてそれぞれ水平方向に経度緯度2.5度グリッド、鉛直方向に緯度2.5度高度10 hPaの格子ごとに頻度を集計し、10年平均値を得た。左上からAtlantic起源、Pacific起源、左下からIndian起源、内陸起源、上は水平分、下は高度分布であり、格子ごとの個数の割合を示している。

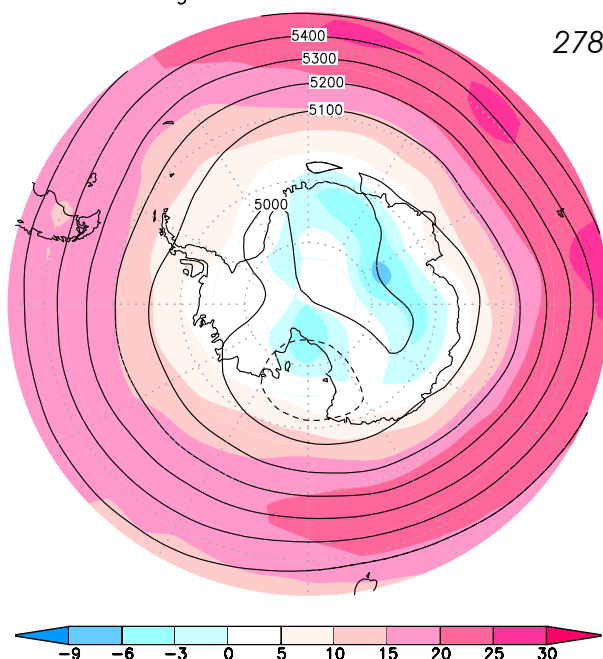
77S average Atlantic GPH 500 hPa -0d

1024



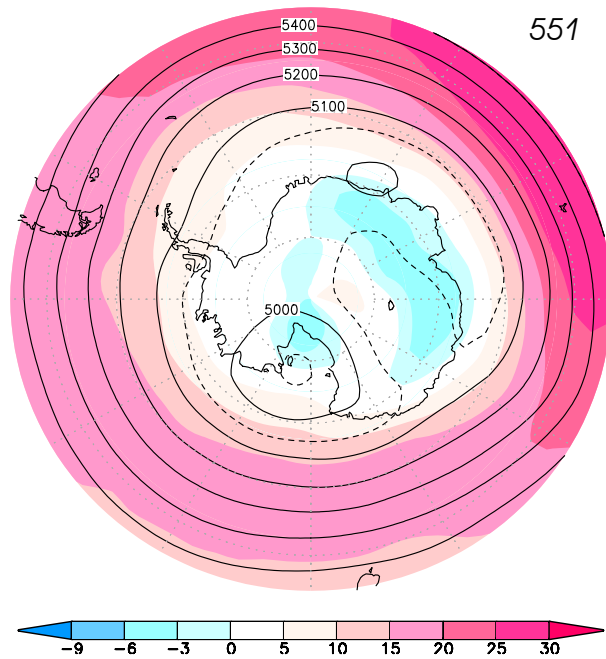
77S average Pacific GPH 500 hPa -0d

278



77S average Indian GPH 500 hPa -0d

551



77S average Continental GPH 500 hPa -0d

1751

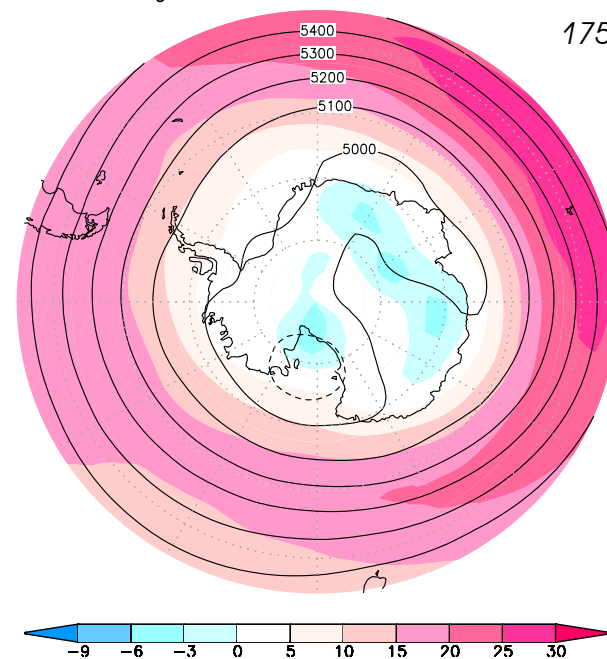
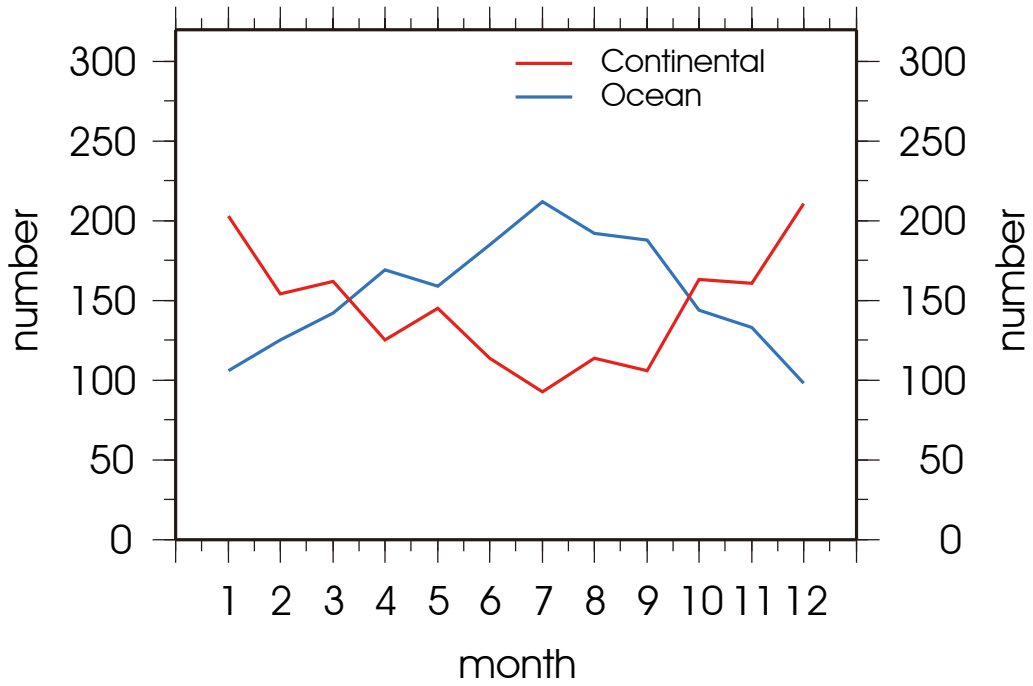


図5-11. ドームふじ基地上空500hPaに到達する空気塊の5日前の位置について、
 図5-1の海領域ごとに集計し、海起源ごとにジオポテンシャルハイトと東西風をそれぞれ10年平均した。
 上段左からAtlantic、Pacific、下段左からIndian、内陸起源の場合である。
 ジオポテンシャルハイトはコンター(実線は100mごと、波線は50mごと)、東西風は色によって表示している。
 それぞれの右上の数値は全該当事例個数を示している。

1990s 69 S total 500 hPa -5day



1990s 77 S 500 hPa -5day

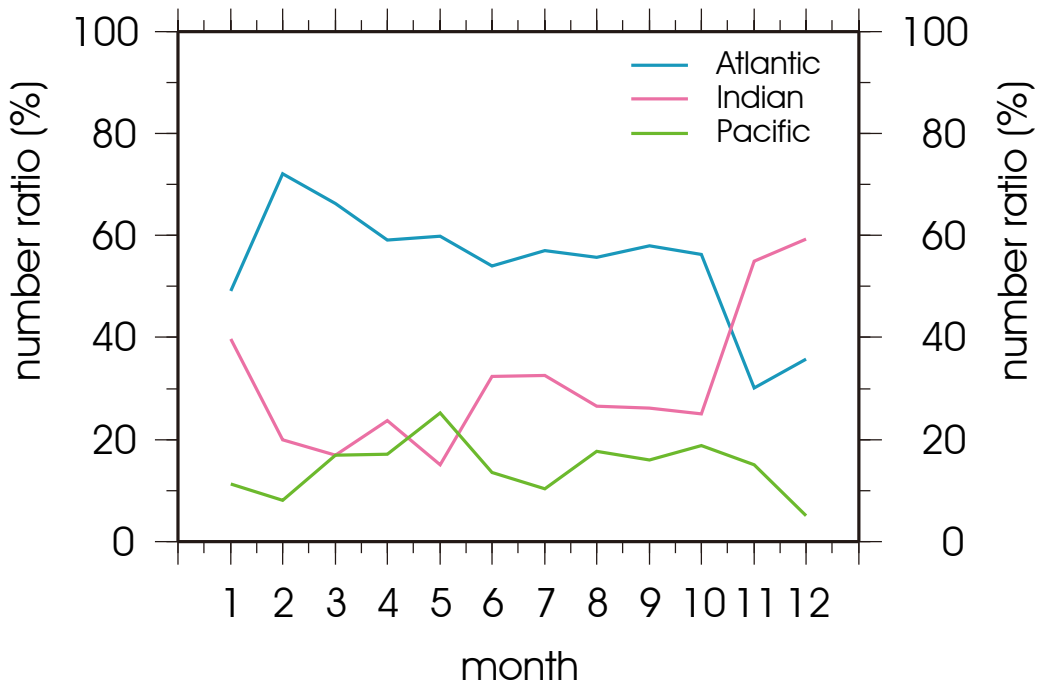


図 5-12.

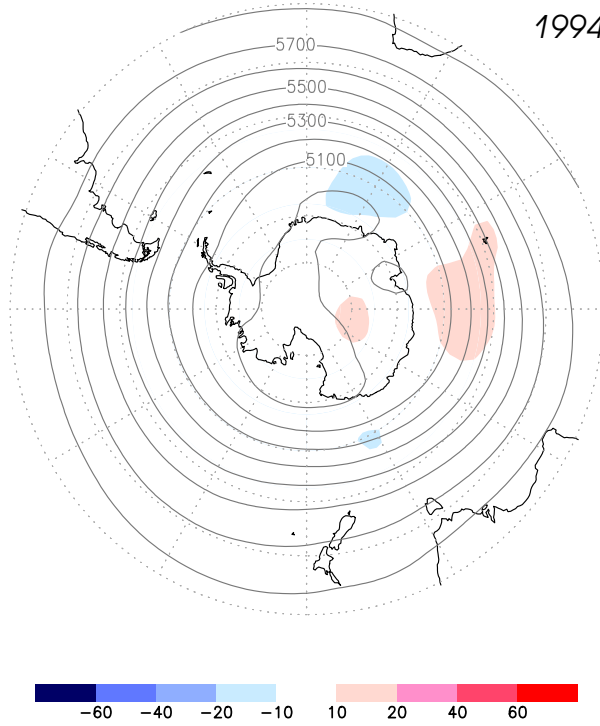
上：ドームふじ基地上空 500hPa に到達する空気塊の 5 日前の位置について海・陸起源比を 10 年間の月平均値を用いて示す。

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かれている。

下：上図の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。

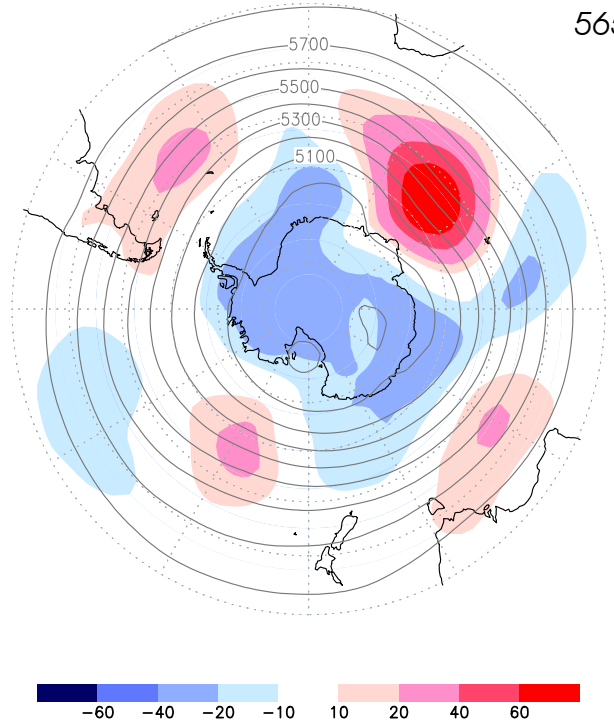
69S Atlantic GPH 500 hPa -0d

1994



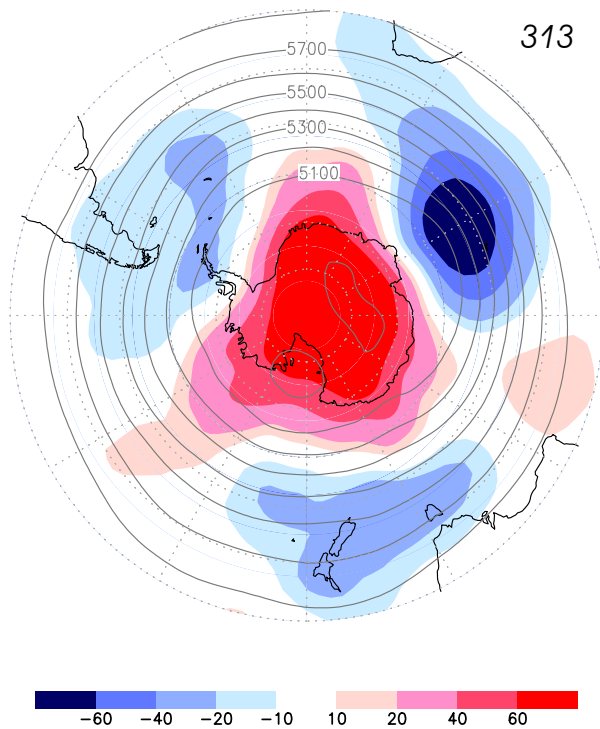
69S Pacific GPH 500 hPa -0d

565



69S Indian GPH 500 hPa -0d

313



69S Continental GPH 500 hPa -0d

800

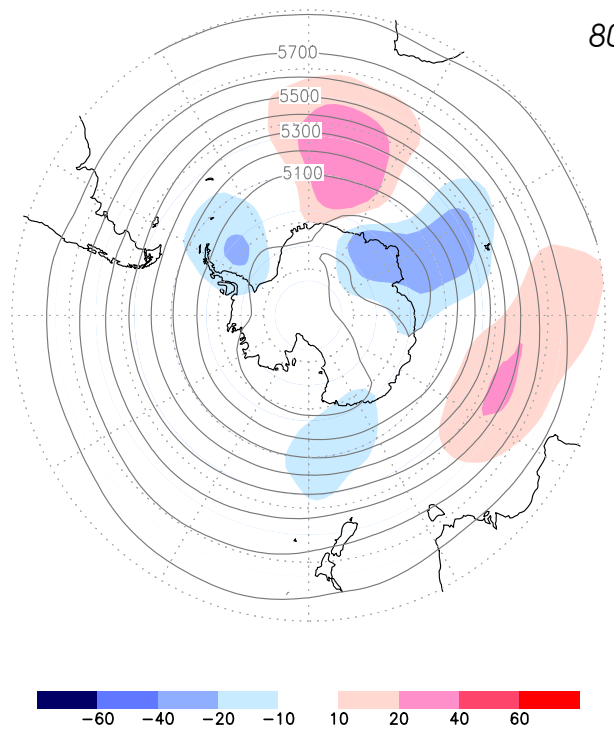


図5-13a.

昭和基地上空500hPaに到達する空気塊の5日前の位置について、図5-1の海領域ごとに集計し、海起源ごとに分類した。到達時のジオポテンシャルハイトの平均値をコンター(実線100mごと、波線30mごと)で、20年間の日々の平均値からの偏差をカラーバーで示している。

上段左からAtlantic、Pacific、下段左からIndian、内陸起源の場合である。

それぞれの右上の数値は全該当事例個数を示している。

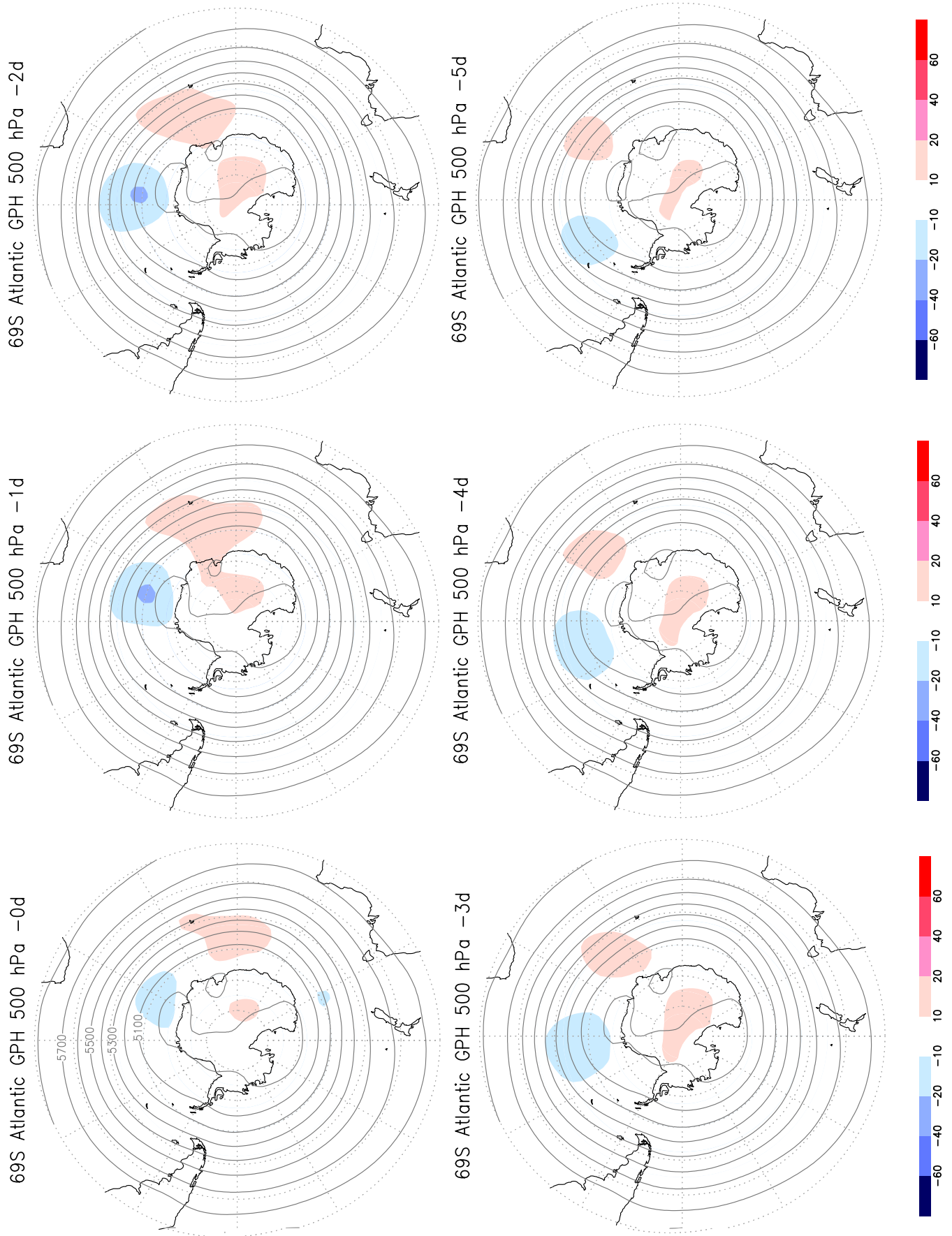
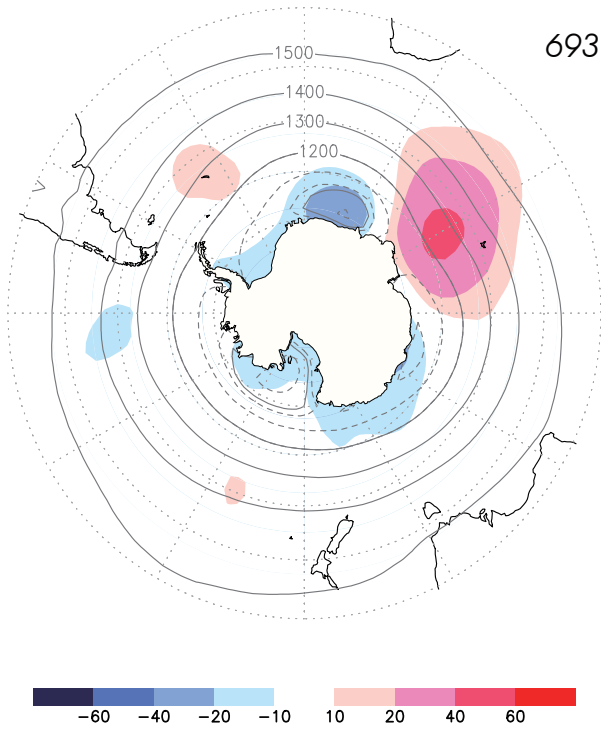


図5-13b.

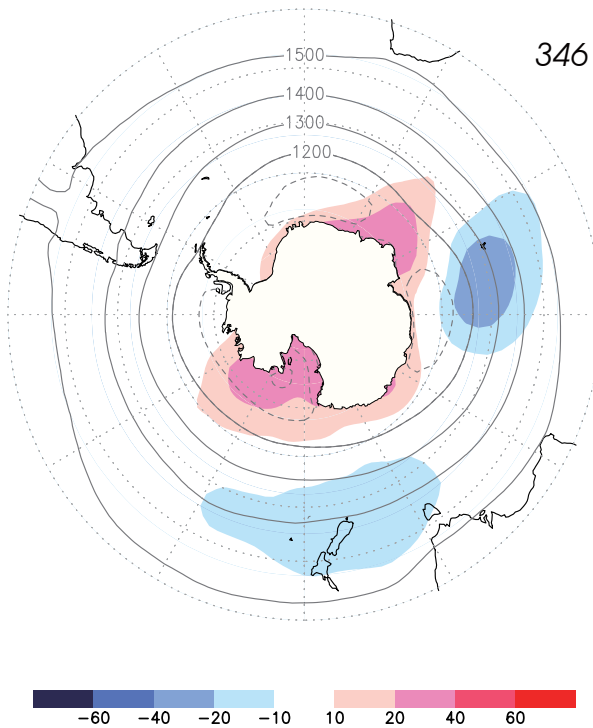
昭和基地上空500hPaに到達する空気塊の5日前の位置について、図5-1の海領域ごとに集計し、海起源ごとに分類した。到達時から5日前までのそれぞれのジオポテンシャルハイトの平均値をコンター(実線100mごと、波線30mごと)で、20年間の日々の平均値からの偏差をカラーバーで示している。

上段左からAtlantic、Pacific、下段左からIndian、内陸起源の場合である。

69S Atlantic GPH 850 hPa -0d



69S Indian GPH 850 hPa -0d



69S Continental GPH 850 hPa -0d

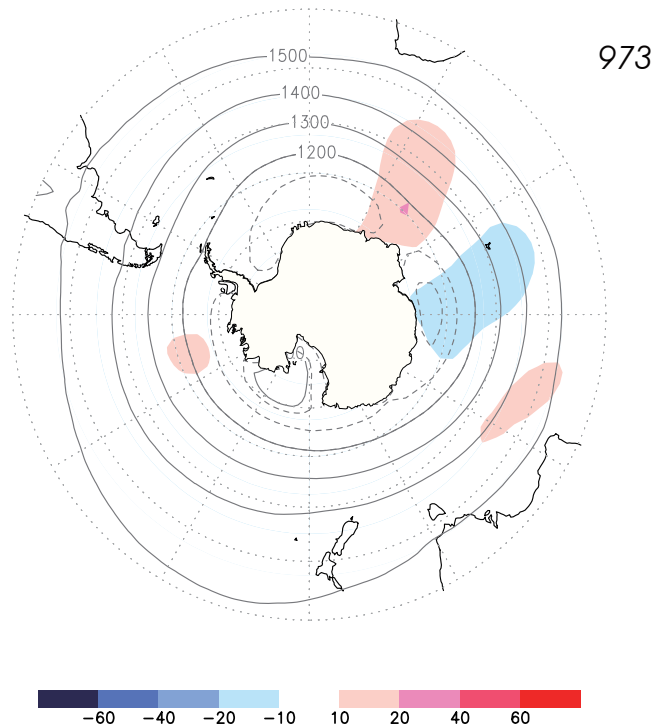


図5-14.

昭和基地上空850hPaに到達する空気塊の5日前の位置について、図5-1の海領域ごとに集計し、海起源ごとに到達時のジオポテンシャルハイトの平均値をコンター(実線100mごと、波線30mごと)で、20年間の日々の平均値からの偏差をカラーバーで示している。

上段左からAtlantic、下段左からIndian、内陸起源の場合である。Pacificは絶対数が少ないため、省略している。それぞれの右上の数値は全該当事例個数を示している。

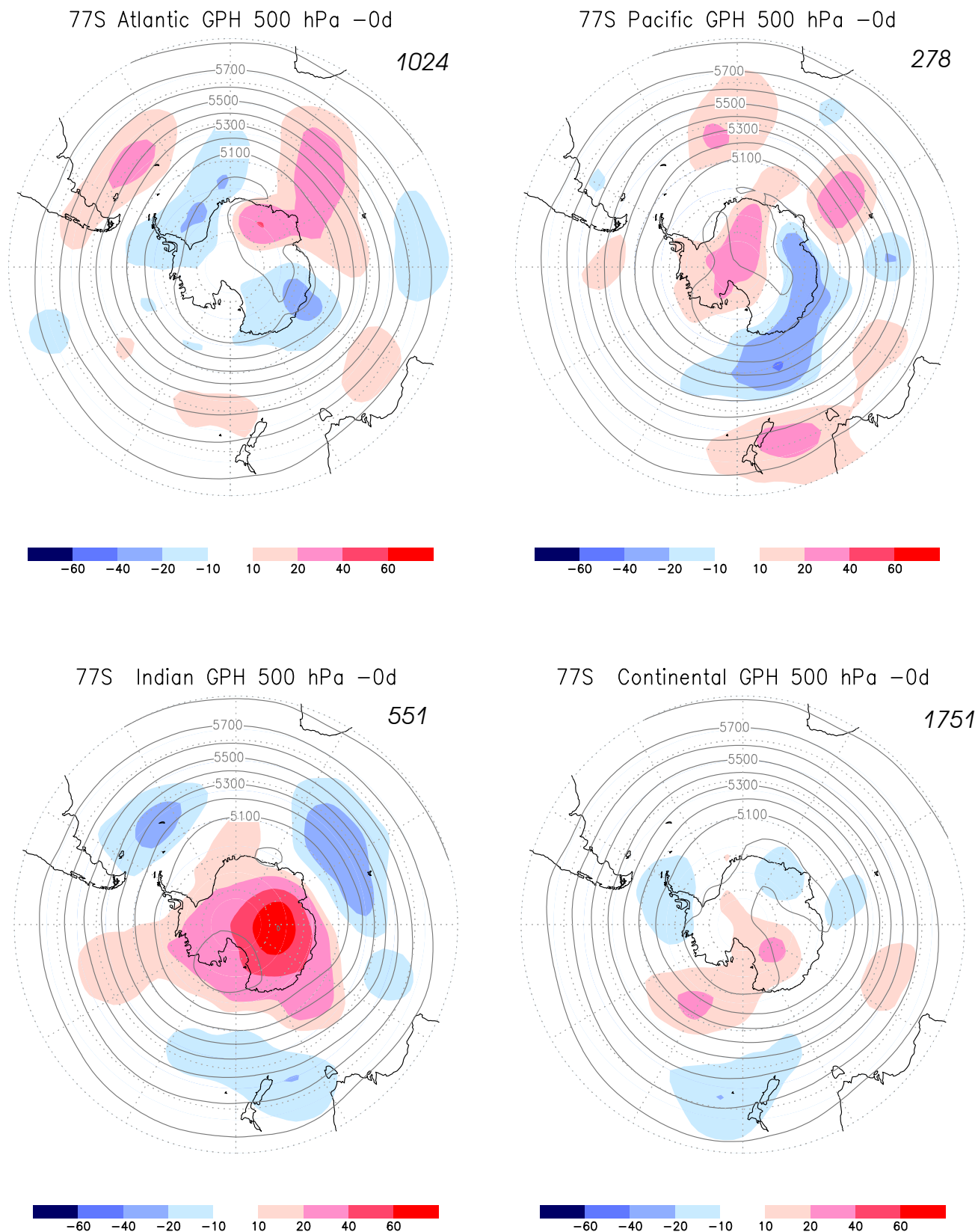


図5-15a.

ドームふじ基地上空500hPaに到達する空気塊の5日前の位置について、図5-1の海領域ごとに集計し、海起源ごとに分類した。到達時のジオポテンシャルハイトの平均値をコンター(実線100mごと)で、20年間の日々の平均値からの偏差をカラーバーで示している。

上段左からAtlantic、Pacific、下段左からIndian、内陸起源の場合である。

それぞれの右上の数値は全該当事例個数を示している。

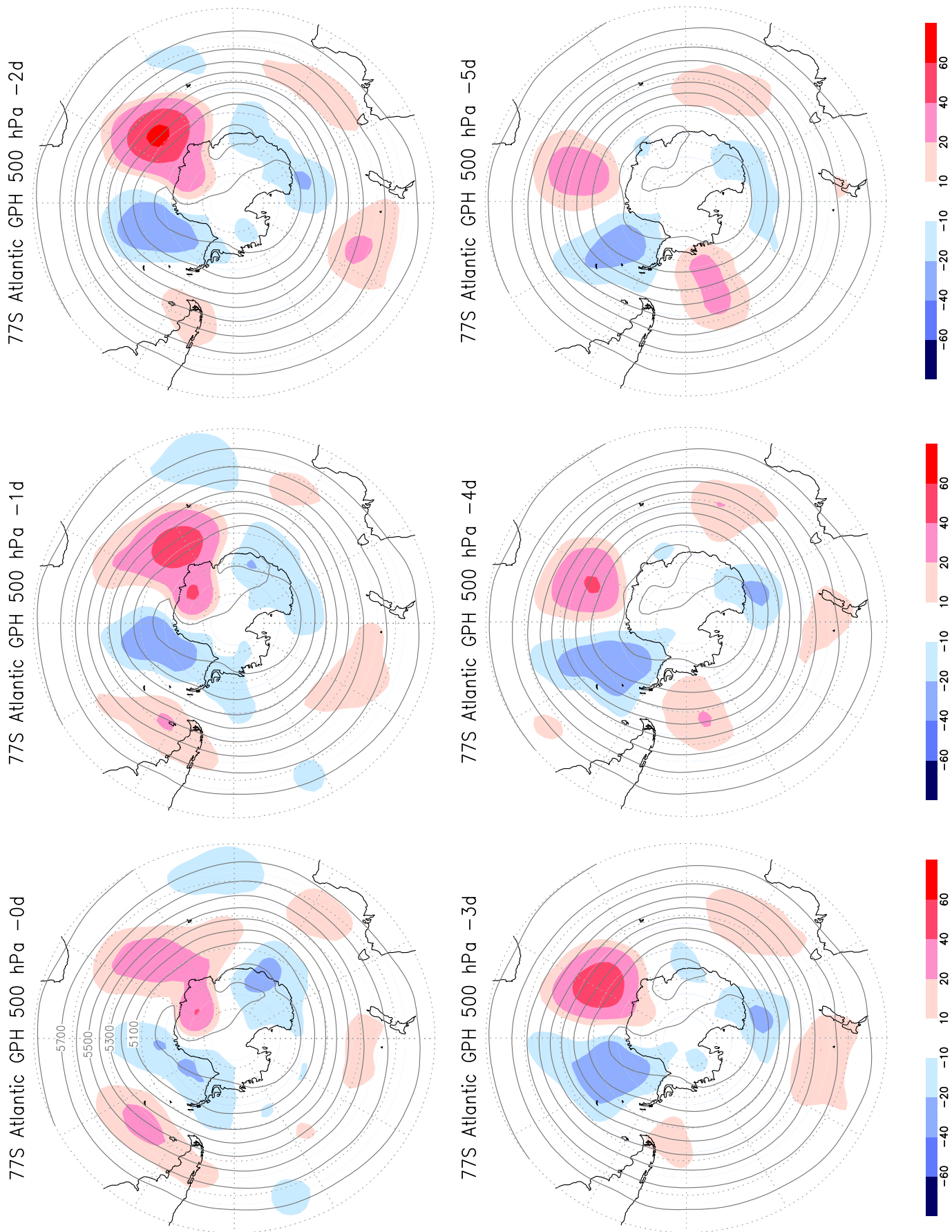


図5-15b.

ドームふじ基地上空500hPaに到達する空気塊の5日前の位置について、図5-1の海領域ごとに集計し、海起源ごとに分類した。到達時から5日前までのそれぞれのジオポテンシャルハイトの平均値をコンター(実線100mごと、波線30mごと)で、20年間の日々の平均値からの偏差をカラーバーで示している。上段左からAtlantic、Pacific、下段左からIndian、内陸起源の場合である。

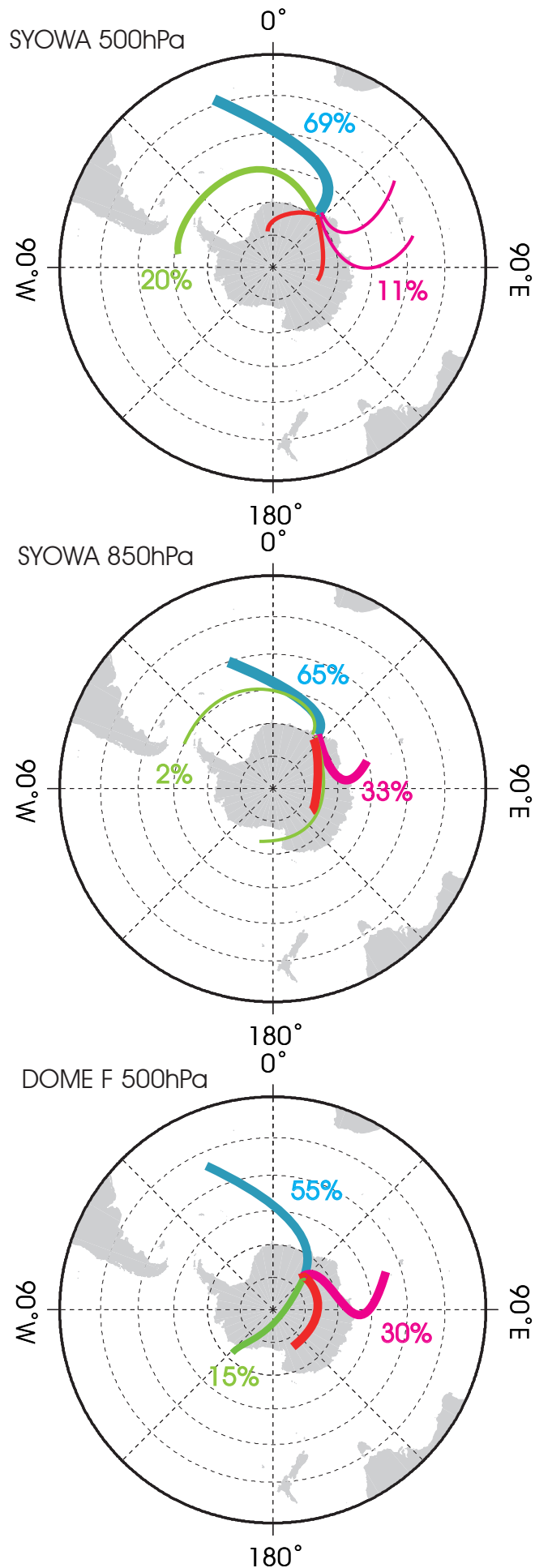


図5-16. 昭和基地およびドームふじ基地における海起源の大気輸送経路の気候値をそれぞれ3つの海別に示す。パーセンテージは海全体に占める割合である。輸送経路は頻度分布の極大値をトレースしている。上から昭和基地500hPa、850hPa、ドームふじ基地500hPa上空に到達する空気塊について、青はAtlantic起源、桃はIndian起源、緑はPacific起源、赤は内陸起源の輸送を示している。

第6章 昭和基地及びドームふじ基地における降雪時の大気輸送経路と起源

4章では昭和基地に到達する空気塊の輸送経路について1997年の詳細な季節変化を、5章では昭和基地およびドームふじ基地について1997年を含む1990～1999年の10年間における大気輸送経路を海領域区分を用いて大気起源ごとの輸送経路の特徴や、起源別の頻度の季節変化について議論した。本章では、得られた大気輸送経路の気候値を元に、地上気象観測データを用いた両基地への水蒸気輸送について、その経路の特徴や起源について推定する。

大気による水循環の解明は氷床コアデータを解釈する雪氷の研究者にとっても、氷床自体を涵養する降雪をもたらす水蒸気輸送を理解する上で重要な課題である。各国のコア掘削地点を中心に、氷床への水蒸気輸送経路に関する研究が行われている。Reijmer et al. (2002) は、ドームふじ基地を含む内陸部にあるコア掘削地点について、ERA-15客観解析データを用いた15年間のそれぞれの輸送経路の気候値と、降雪時の大気輸送経路の比較を行っている。その結果では、ドームふじ基地への大気輸送起源は主に内陸にあるが、水蒸気起源はインド洋上にあると示されている。AWS (Automatic Weather Station) による観測値と、ERA-40客観解析の降雪データを比較し、両者の位相が一致しているという見解から、客観解析による降雪データを用いて降雪時の大気輸送経路をDronning Maud Land基地への水蒸気輸送経路として見積もり (Reijmer and van den Broeke, 2001)、同経路を入力した同位体モデルによる水蒸気起源の推定も行われている (Helsen et al., 2006)。本研究ではドームふじ基地における現地気象観測データを使用した水蒸気輸送経路や起源について比較することで、既出の客観解析による降雪データを用いた水蒸気輸送の推定に関する検証も行う。

Schlosser et al. (2005) は、昭和基地と同じく沿岸部にあるNeumayer基地へ到達する850hPaにおける大気輸送経路を6つのグループに分けそれぞれの輸送経路と割合を示している。大西洋上を偏西風に沿って移動して基地へ到達する大気や沿岸部を西向きに輸送された大気が到達する事が多いが、50°S以北から南南西方向に輸送される大気経路となる場合に、同基地で採取された降雪サンプリングから得られた水

素酸素同位体比の値が他の場合より小さくなっていることを示している。最初の蒸発が起こった場所が低中緯度であり、長距離輸送された大気が到達していることを裏付けている。

地上気象観測が長期間に渡って行われている昭和基地について、水蒸気輸送に関する上記のような報告は少ない。本研究はコア掘削地点であるドームふじ基地への水蒸気輸送だけではなく、長期間にわたる気象観測を行っている昭和基地への水蒸気輸送について着目する。氷床沿岸部と内陸部における降雪の特徴や、その輸送経路を導き、体系的な南極氷床への水蒸気輸送の気候値を推定することを目的としている。

6-1. 昭和基地における水蒸気量の季節変化

6-1-1. 可降水量

可降水量とは、地上の単位面積に鉛直気柱を立て、その気柱内全体に含まれる水蒸気量をさす。昭和基地におけるレーウィンゾンデによる高層気象観測では、気圧 p と気温 T と相対湿度 R_h が観測され、高度 z も計算されている。この気圧 p と気温 T と相対湿度 R_h から、比湿 q を氷に対する係数を用いたティーテンスの近似式と飽和水蒸気圧と温度の関係式を用いて算出した。したがって、可降水量 PW は、静水圧平衡の式から、次式で表される。

$$PW = \int_0^{\infty} \rho_w dz = \frac{1}{g} \int_0^{p_s} q dp \quad (6.1)$$

ただし ρ は空気密度、 p_s は地上気圧、 $g (=9.80665\text{m/s}^2)$ は重力加速度である。レーウィンゾンデの観測地を用いる際は次式を用いて計算する。

$$PW = \frac{100}{g} \times [q_{01}(p_s - p_1) + q_{12}(p_1 - p_2) + \dots] \quad (6.2)$$

ここで p_s 、 p_1 、 p_2 、... は各観測高度の気圧、 q_{01} は $p_s \sim p_1$ 間の比湿の平均値、 q_{12} は $p_1 \sim p_2$ 間の平均値であり、係数100は、 $1\text{hPa}=100\text{Pa}$ の換算分である。可降水量は、大気中の水蒸気をすべて降って落とした場合の降水量と等しい。

本研究では、昭和基地で1日2回放球されているレーウィンゾンデの観測値から上記の式を用いて1日2回の可降水量を算出した。南極氷床上空は、気温が著しく低下するため相対湿度が途中から計測不能になることが多い。一般に対流圏には大気全体の水蒸気の大部分が含まれているが、大気柱中の水蒸気について高度方向の分布を調べた。まず、観測エラーとなりやすい500hPaより上の部分は全て飽和していると仮定し、比湿を算出した。500hPaより上空については飽和させた比湿を用いて地表面から大気上端まで積分した可降水量と、地表面から500hPaまでの比湿を積分した可降水量を比較した。その結果、ほとんど両者の値の違いはみられず、500hPaより上の対流圏、成層圏に含まれる水蒸気は微量であると考えられ、今回は地表面から500hPaまでの大気柱に含まれる水蒸気量を可降水量として用いる。また、対流圏の下層と中層に含まれる水蒸気量の違いについても調べた。対流圏下層を地表面から850hPaまでとし、中層を850hPaから500hPaまでとした。以上の区間について、6-2式を用いてそれぞれ積分し、水蒸気量を算出した結果、対流圏下層と中層には、1：1で（冬には中層側に比重が増える）が、水蒸気がそれぞれ含まれていた(表6-1)。

図6-1にレーウィンゾンデの観測値から得られた地表面から500hPaまでの積分値である可降水量の10年月平均値を示す。可降水量は1月に極大が、8月9月に極小があり、気温に依存した季節変化をしている。地球上の平均可降水量は約30mmといわれていることから、低温下にある南極氷床は著しく水蒸気量の少ない場所である。

表6-1 昭和基地における10年間における可降水量の平均値.

	pw_all	pw_u850	all-u850	850/all(%)
1	5.96	2.92	3.04	49.03
2	5.64	2.57	3.07	45.62
3	4.99	2.22	2.77	44.55
4	3.97	1.77	2.19	44.71
5	3.23	1.36	1.87	42.04
6	2.67	1.10	1.56	41.40
7	2.52	1.05	1.47	41.62
8	2.04	0.82	1.21	40.35
9	2.02	0.84	1.18	41.41
10	2.78	1.20	1.57	43.33
11	3.71	1.80	1.91	48.53
12	5.29	2.63	2.66	49.77
AVE	3.73	1.69	2.04	45.30

pw_all: 地上気圧から500hPaまでを積分した値

pw_u850: 地上気圧から850hPaまでを積分した値

all-u850: pw_all-pw_u850の値

850/all: pw_u850/pw_allの割合

6-1-2. 天候による水蒸気量の違い

昭和基地における地上気象観測による天気概況から、雲量と現在天気を用いてその日時の天候を決定し、天候によって可降水量にどのような違いがみられるのか調べた。天候の詳細は表6-2に示す。降雪時に雲量を8.5以上としたのは、晴天降水（ダイヤモンドダスト）などの局地的に生成される降雪ではなく、擾乱などに伴って移流された水蒸気について着目するためである。

表6-2 天気概況を用いた天候区分.

	雲量 (N)	現在天気 (ww)
快晴	0	降雪以外 (ww<70)
晴天	1以上8.5未満	降雪以外 (ww<70)
曇天	8.5以上	降雪以外 (ww<70)
降雪	8.5以上	降雪 (ww>=70)

(雲量と現在天気の条件をどちらも満たす場合のみを抽出する)

この分類によって得られた天候データを用いて、可降水量をそれぞれの天候時について10年月平均を示した(図6-2)。すべての天候において平均値と同様な季節変化をしており、夏季は比較的可降水量が多く、冬季は少ない。平均に近い値となっている曇天時は、天候全体に対しても約41%を占めており、昭和基地では曇っていることが多い。晴天時の可降水量は、曇天時と快晴時の間となっており、雲による水蒸気量の増加が表現されている。また、降雪時の可降水量は曇天時(つまり平均値)よりも1~2mm多い。雲が昭和基地上空を覆った状況下において、降雪が起こる場合は大気中に含まれる水蒸気量が多くなっている。降雪時の可降水量は快晴時と比較すると季節を問わず値が約2倍になっている。したがって、降雪時には水蒸気が多く含まれた大気が輸送されてきており、反対に快晴時には水蒸気量の少ない大気が輸送されていると予想される。次節では、流跡線解析によって得られた大気輸送経路を天候ごとに分類し、その特徴を調べることで、水蒸気輸送経路を推定する。

6-2. 昭和基地における降雪時の大気輸送経路

6-2-1. 天候別の大気輸送経路の特徴

表6-2の天候区分を用いて、ここでは昭和基地における10年間の12UTC時の天気概況から、天候データを作成した(表6-3)。前節で述べた通り、昭和基地における

天候の特徴は、曇天の日が多いことである。平均雲量は6.7であり、上空に雲がある状況になりやすいといえる。

表6-3 昭和基地における10年間月ごとの天候データの内訳（12UTC時）.

	CLEAR	SNOW	FINE	CLOUD
1	36	50	71	138
2	27	79	47	120
3	53	45	53	150
4	29	75	79	139
5	40	82	70	132
6	28	100	70	117
7	47	34	58	136
8	19	40	57	112
9	39	34	77	101
10	67	85	101	112
11	59	83	48	130
12	52	87	94	122
Ratio	13.7	21.9	22.8	41.6

図6-3は、昭和基地において快晴時の対流圏中層（500hPa）における大気輸送経路を10年分重ねて、上から水平輸送経路、高度-時間、比湿-時間断面、比湿の緯度断面をそれぞれ夏季と冬季の代表として1月と7月について示している。どちらの月の水平輸送経路も偏西風帯を通過してきた空気塊が昭和基地の東側で婉曲し、西向きに昭和基地に到達する傾向があり、輸送経路自体の季節変化は乏しい。昭和基地に到達する2日前から到着までは、高度方向の運動は少なく、比湿の変化もみられない。起源としては偏西風帯の北端である45°S辺りが限界となっており、輸送経路長は比較的短い。図6-4は、対流圏下層（850hPa）における快晴時の大気輸送経路を同様に示している。中層と同じく水平輸送経路の大きな季節変化はみられず、主に沿岸伝いの西向きの輸送となっている。冬季には、高度方向の移動が増え、空気塊が地形に沿って移動している様子が記述されている。輸送経路長も短く、風による移流が少ないと考えられる。中層、下層を通じては快晴時は、輸送距離が短く、比湿の値も比較的小さい。

図6-5は、晴天時の500hPaにおける大気輸送経路を図6-3と同様に示している。水平輸送経路の特徴は、第5章で示された大気輸送の季節変化に伴った変化をしている（冬には太平洋や大西洋起源が卓越し、夏にはインド洋起源が増加する）。海上を長時間移動してきた空気塊は到着2日前までは比湿が比較的多いが、その後緩やかに上昇するにつれ比湿の値は減少し、沿岸部の大陸上を通過して比湿の少ない状態で到達する傾向がみられる。図6-6は、晴天時の850hPaにおける大気輸送経路を同様に示している。水平輸送経路・高度輸送経路ともに快晴時と傾向が似ているが、海上から移動してきた空気塊が一旦大陸上へ流入して、沿岸部を通過して到達している。また、比湿の値は全体的に変化に乏しい。

図6-7は、曇天時の場合の500hPaにおける大気輸送経路を図6-3と同様に示している。快晴、晴天時の輸送経路とは水平輸送経路長が大きく異なり、空気塊が長距離輸送されていることが季節問わず示されている。空気塊がなだらかな上昇をする期間が、昭和基地に到達する直前に寄ってきている。また比湿の時間変化も異なり、到着する1日前、2日前にも1~2g/kg前後の値になっている。冬季の水平輸送経路に着目すると、空気塊の到達時から1日前までの間に通過する領域が昭和基地から北にある海上にみられ、海上から直接昭和基地に到達することが多くなっている。しかしながら夏季には、到達する1日~2日前は沿岸から内陸部にかけての領域に空気塊が集中している。図6-8は、曇天時の850hPaにおける大気輸送経路を同様に示している。中層同様、輸送経路が長くなり、海上からの輸送が増加している。また、海上からの場合は晴天時ではインド洋起源が多かったのに対し、大西洋起源の空気塊が多くなっている。空気塊の高度-時間変化では、1日前位から上昇する傾向がみられる。冬季の比湿の値は晴天時の約2倍となっており、雲を伴う擾乱による移流を表現できていると考えられる。

図6-9は降雪の場合の500hPaにおける大気輸送経路を図6-3と同様に示している。水平輸送経路は、全体的に大西洋起源であり、偏西風帯を通過していた空気塊がプラネタリー波による等圧線の蛇行によって南東方向へ転向し、その後海上から直接昭和基地に到達することが多い。特に冬季の高度変化においては、到着1日前に急激な上昇をする空気塊が約4割を占めている。比湿の時間変化では、到着する12時間~1日前に1~2g/kg、1日~2日前には2~4g/kgの水蒸気がある場合が同程度占めてい

る。図6-10は降雪の場合の850hPaにおける大気輸送経路を同様に示している。水平輸送経路に他の天候とは異なり、大西洋起源の空気塊の輸送が顕著である。夏季の平均比湿は2g/kg、冬季は1g/kgとなっており、比湿の高い状態の空気塊が到達している。また海面近くを移動してきた空気塊が到達から12時間前に上昇をして、海上から直接到達している。

降雪時には、対流圏中層・下層において季節を問わず昭和基地付近の海上に到達直前の空気塊が通過する領域がある。これは曇天時の対流圏中層冬季の特徴と似ているが、降雪時は全ての場合にこのような特徴がみられる。他の天候の場合、空気塊が海上を通過して昭和基地に到達する場合は、一度大陸上へ進入し、その後昭和基地へ向かっている。そのため、1日前から到達する時には、大陸上を通過するため比湿の値が下がっている。降雪時の空気塊は海上から直接、比湿が大きい状態のまま到達しているため、昭和基地上空の水蒸気が多くなりやすいと考えられる。

6-2-2. 大気循環場の特徴

天候による大気輸送経路について前節で調べたが、これらの水蒸気輸送をもたらす背景として、5-5と同様に等圧面高度の偏差を用いて大気循環場の特徴を調べる。特に、水蒸気が多い場合（降雪時）と、水蒸気が少ない場合（快晴時）を比較する。図6-11-1は、昭和基地における天気概況を用いて降雪時と快晴時とした場合の等圧面高度の、10年平均値からの偏差について示している。500hPaと850hPaにおける降雪時と快晴時の等圧面高度からの偏差を比較すると、どちらも高度によらず同じような傾向がみられるため、ここでは500hPaの特徴について述べる。さらに、時間変化について着目するため、到達時1日前から5日前までの同様な偏差について500hPaの場合について図6-11-2に示す。

降雪時は、昭和基地の西側に強い負の偏差が海上へ張り出しており、東側には正の偏差が対峙している。したがって、大西洋上から偏西風帯を通過した大気が大きく転向され、昭和基地に南南東方向へ移流される状況になっている。この偏差場は5章で示された500hPaにおける太平洋起源の場合と850hPaにおける大西洋起源の場合と似ており、波数3型のプラネタリー波が発達して、水蒸気を多く含む中緯度側から昭和基地へ直接大気が流入しやすい状況となっている。さらに、時間変化につい

て着目すると、昭和基地の西側にある負の偏差が西から移動してきた様子がみられ、3日前までは0度付近で南北方向に偏差が広がっている。以上より、短いライフサイクルをもつ低気圧性の総観規模擾乱が0度以西で発達し昭和基地周辺へ移動してきたことにより昭和基地へ降雪がもたらされたといえる。

快晴時は、降雪時と逆の偏差場になっている。昭和基地の西側に海側に張り出す正の領域と、東側に強い負の領域が有り、さらにその東側には正の領域がある。水蒸気の少ない場合はインド洋側から大陸へ流入した大気が西向きに移流されやすくなっており、内陸側にある大気も昭和基地側へ北方向に移動しやすい状況になっている。南極氷床には水蒸気は非常に乏しく、大陸上を移動する大気は水蒸気量が少ない。したがって、昭和基地において快晴時には乾燥した内陸や沿岸部を輸送された大気が到達していると考えられる。ここで降雪時と同様、時間変化に着目すると、昭和基地の東側にある負の偏差および低圧部が時間とともに発達しながら西側から東側に移動するとともに、昭和基地付近の気圧が高くなっている。昭和基地の東側では発達した低圧部がみられるが、降雪はもたらされていない。これは昭和基地が低圧部の西側にあり、東側で降雪などのイベントにより水蒸気を減らした大気が到達するためである。したがって主に昭和基地の西側から発達した低気圧が到達する場合に降雪がもたらされていると考えられる。

6-3. ドームふじ基地における降雪時の大気輸送経路と起源

6-3-1. 天候別の大気輸送経路の特徴

1997年、ドームふじ基地で越冬した第38次南極観測隊によって、地上気象観測が連続的に行われて、天気概況は1日3時間おきに6回程度記録されている。このような内陸の基地における観測結果が報告された例は他になく、南極氷床内陸部における貴重な連続気象観測データの一つである。この天気概況から表6-2による分類を用いて天候データを作成した（表6-4）。快晴が最も多く4割以上を占めている。降雪時は全体の3割となっているが、12月に卓越しているのは、ダイヤモンドダストなどの局地循環による降雪が多かったと考えられる。

昭和基地において、天候による大気輸送経路の特徴における季節変化は、4章で示されたように季節による輸送経路長の変化はみられるが、経路の傾向は似ている。

ドームふじ基地における天候による大気輸送経路の違いについては、季節による輸送経路長の変化はあるが、経路の特徴は似通うと予想できることから、季節変化ではなく年間通じた概要を調べる。特に水蒸気量の多い場合であると考えられる降雪時と、少ない場合である快晴時について示し、比較する。表示には12UTC時の輸送経路に絞っているが、統計には全事例を用いている。

快晴時にドームふじ基地に到達する大気は、様々な方角からの輸送がされ、起源も一定していないが、1日前から到着時までには比湿の値が0に近く、水蒸気が少ない状況になっている（図6-12）。全体的には海上からの流入も多く、高気圧的な反時計回りの輸送になっている。空気塊は緯度方向の動きが少なく、海上からの流入後は内陸上を移動していることが多く、大陸上の滞留時間が長くなっている。

表6-4 ドームふじ基地における1997年の月ごとの天候データの内訳(事例数).

	CLEAR	SNOW	FINE	CLOUD
1	12	3	74	4
2	61	23	39	24
3	56	16	15	7
4	55	19	16	8
5	64	12	4	1
6	11	18	11	4
7	19	39	3	4
8	44	26	3	11
9	39	23	19	8
10	76	51	13	10
11	77	42	10	7
12	37	99	16	25
Ratio	43.8	29.5	17.7	9.0

降雪時の輸送経路は、多くの大気が海上を出発して内陸部まで到達しており、中低緯度側（40°S以北）からの流入もみられる。快晴時と比較して、海上の滞留時間が長くなっている。輸送経路は大きく蛇行しており、波数3型のプラネタリー波の発

達による移流が考えられる。また、比湿は5日前から到達する間、平均的に他の約2倍程度の値になっている。到達12時間～1日前に上昇してドームふじ基地へ到達する空気塊も多く、海上から内陸部へ急激な流入をする状況になっていると考えられる。したがって、ドームふじ基地へ海上から急激に流入した水蒸気量の多い大気によって、降雪がもたらされていることが示唆されるが、その流入する方向は一定ではなく、様々な方向から総観規模擾乱などによる大気の流入が起こっていると考えられる。

6-3-2. 大気循環場の特徴

天候による大気輸送経路の特徴について前節で調べたが、その輸送をもたらす大気循環場の特徴を調べるために、快晴時と降雪時における等圧面高度の平均場からの偏差を網掛けで、それぞれの平均値をコンターで示す（図6-13-1, 図6-13-2）。快晴時の大気循環場は、ドームふじ基地の西側に正の偏差があり、大陸上を反時計回りに大気が移動される状況になっている。また東側の負の偏差がみられることからインド洋側100°E付近やアメリー棚氷付近から流入した大気そのままドームふじ基地へ到達しやすくなっている。到達時から5日前までの気圧および偏差の時間変化は少なく、大陸上を移動した大気が到達しやすい状況がしばらく続いている。

降雪時の大気循環場は、プラネタリー波の蛇行により発達したリッジがドームふじ基地周辺の内陸奥深くまで侵入し、強い正の偏差の領域が海上側から基地上空まで覆っている。インド洋上から内陸部への、高気圧性の大気の侵入経路が表現されていると考えられる。また、大西洋では発達したトラフを境に、正と負の偏差場がみられ、Dronning Maud Land 基地のあるウェッデル海側からの流入した大気が、その後負-正の偏差場が発達する内陸部で加速されドームふじ基地へ到達していると考えられる。また快晴時とは異なり、発達した正の偏差は西から東へ移動している様子がみられる。大西洋上のトラフと、インド洋側のリッジ、さらにインド洋側の低圧部が発達することにより、海上の大気がドームふじ基地付近まで到達しやすい場を作っている。正の偏差の領域が西から東へ移動していることとリッジが内陸上空に発達していることから、主に高気圧性の総観規模擾乱が中緯度の海上から大陸上へ侵入し、降雪をもたらす湿った空気が内陸部へ到達していると考えられる。

Reijmer et al. (2002) は、降雪時の大気輸送経路において気温が平均よりも 4°C 高いことから、温度の高い、つまり湿潤な大気が侵入することで、内陸部に降雪がもたらされることを示している。等圧面高度の偏差における強い正の領域が、沿岸から内陸部まで広がった状況は、高気圧性の総観規模擾乱の存在を示唆しており、ドームふじ基地に降雪をもたらす水蒸気が輸送される大気循環場の特徴を得られたと考えられる。しかしながら降雪時と快晴時の大気輸送経路は、昭和基地と比較すればあまり明瞭な違いがみられない。5章で得られたドームふじ基地への大気輸送は様々な方向から輸送されていることが特徴として示されており、天候による大気輸送経路の特徴も同様で、一定方向からの輸送ではないことが本章において示された。

6-4. まとめ

昭和基地における降雪時の大気輸送経路から、水蒸気が多く含まれる大気は大西洋上の偏西風帯からプラネタリー波の蛇行によって転向され、到達する12時間~1日前に上昇して直接昭和基地に輸送されていた。輸送経路長は長く、長距離を輸送されている。曇天の場合においても海上起源の輸送が多いが、直接昭和基地へ到達するのは対流圏中層の冬季に限ったものであり、2日前付近で緩やかな上昇をして到達していた。曇天の場合の対流圏下層と、快晴・晴天の場合の対流圏中層における大気輸送の特徴には、大陸上に一旦侵入してから昭和基地へ到達する傾向がみられた。快晴・晴天の対流圏下層の空気塊は、海上からの流入は少なく、沿岸部を西向きに地形に沿って移動していたが、全体的に輸送距離が短かった。

以上から、水蒸気が昭和基地に多く輸送される場合は、偏西風帯から蛇行して輸送された水蒸気を多く含んだ大気が直接昭和基地へ到達しており、輸送経路は総観規模擾乱に伴う移流を表している。水蒸気の少ない天気の良い日には、対流圏中層における大気は海上から大陸へ一度進入し、沿岸部を輸送されている。対流圏下層においては大気は沿岸伝いに西向きに輸送される場合が多く、昭和基地周辺を含む東側にある低圧部の影響を受けていると考えられる。

ドームふじ基地における降雪時の大気輸送経路から、水蒸気が多く含まれる大気はプラネタリー波の蛇行によって生じたドームふじ基地上空に発達したリッジにより比較的気圧の高い状態で内陸部まで直接流入していた。また、ウェッデル海側か

らも大気が流入し、Dronning Maud Land基地側を通過しそのままドームふじ基地へ到達しやすい状況にもなっていた。平均的な比湿の値は他の天候の2倍程度になっており、中緯度側から水蒸気量の多い場所を通過してきた大気が水蒸気を多く含んだ状態を保ったまま到達していた。降雪時以外の天候の場合の大気輸送経路は、海上から流入した後、到着1日前から到着するまでの比湿の値は0に近く、輸送経路によらず乾燥した大陸上を移動してドームふじ基地に到達していた。インド洋側から流入した大気が内陸部へそのまま進入する場合や、大陸上を反時計回りに輸送された大気がドームふじ基地へ到達するケースが多かった。

沿岸部の昭和基地では一定方向からの大気輸送が卓越している故、天候によって輸送経路の特徴が明確であるのに対し、内陸部のドームふじ基地においては様々な方向から大気輸送がされており、天候による大気輸送経路別の起源や到達する方向の特徴は得られなかった。

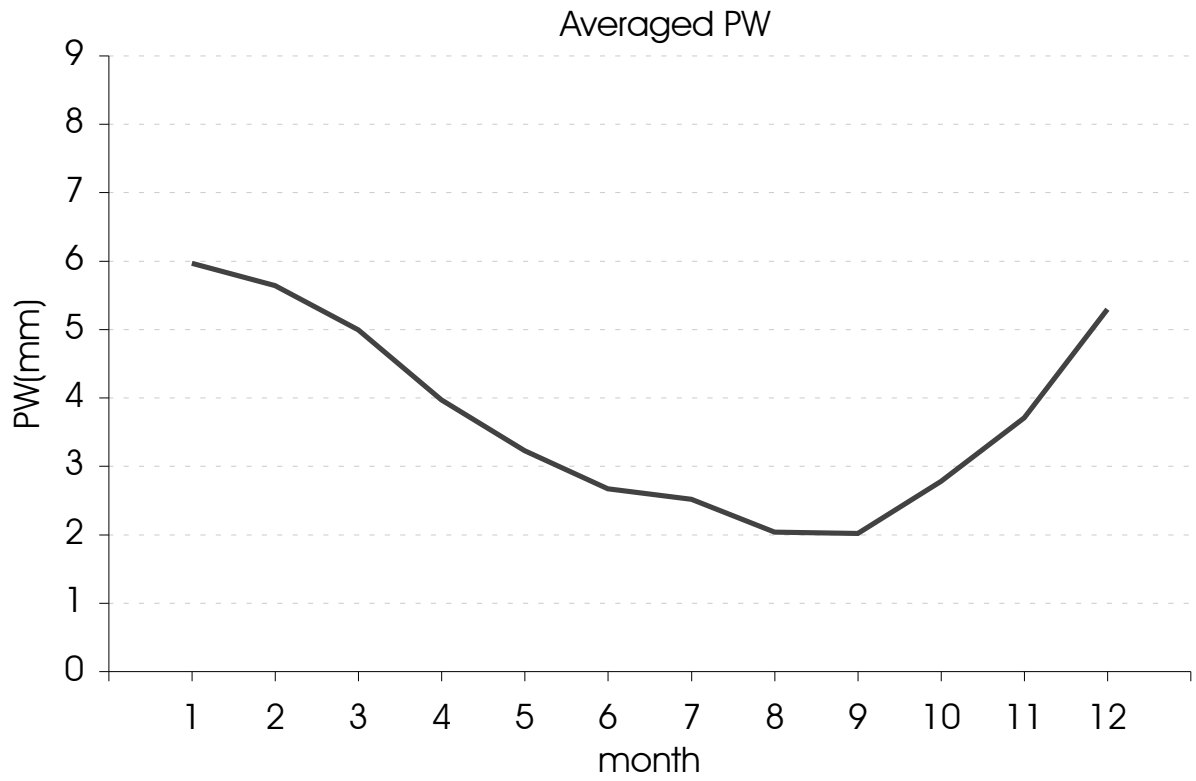


図6-1.
昭和基地におけるレーウィンゾンデの観測値から、10年間の可降水量を
月平均値として求めた。単位はmmである。
可降水量は地表面から500hPaまで積分した値である。

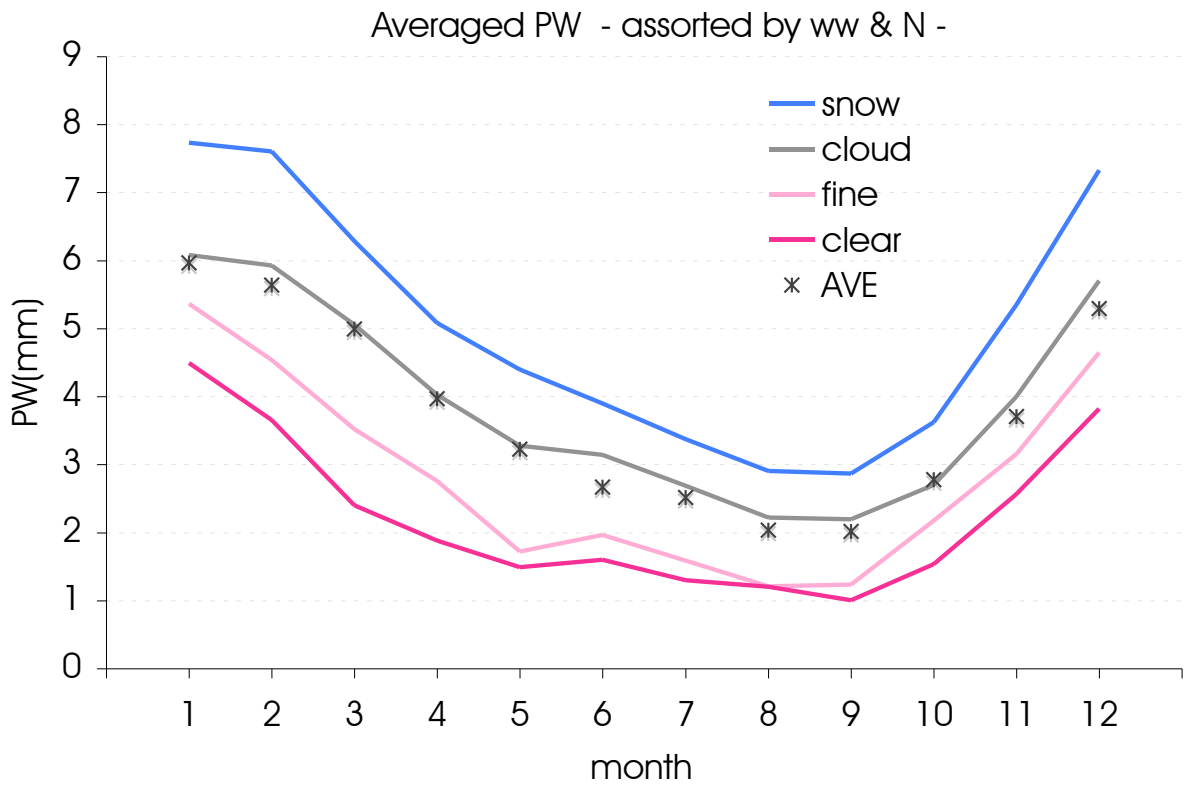


図6-2.

昭和基地におけるレーウィンゾンデの観測地を用いて算出した可降水量を、表6-1で示した天候区分ごとに10年月平均値として示した。

単位はmm、青は降雪、灰色は曇り、薄桃は晴れ、桃は快晴時であり、※は図6-1と同様の平均値を示している。

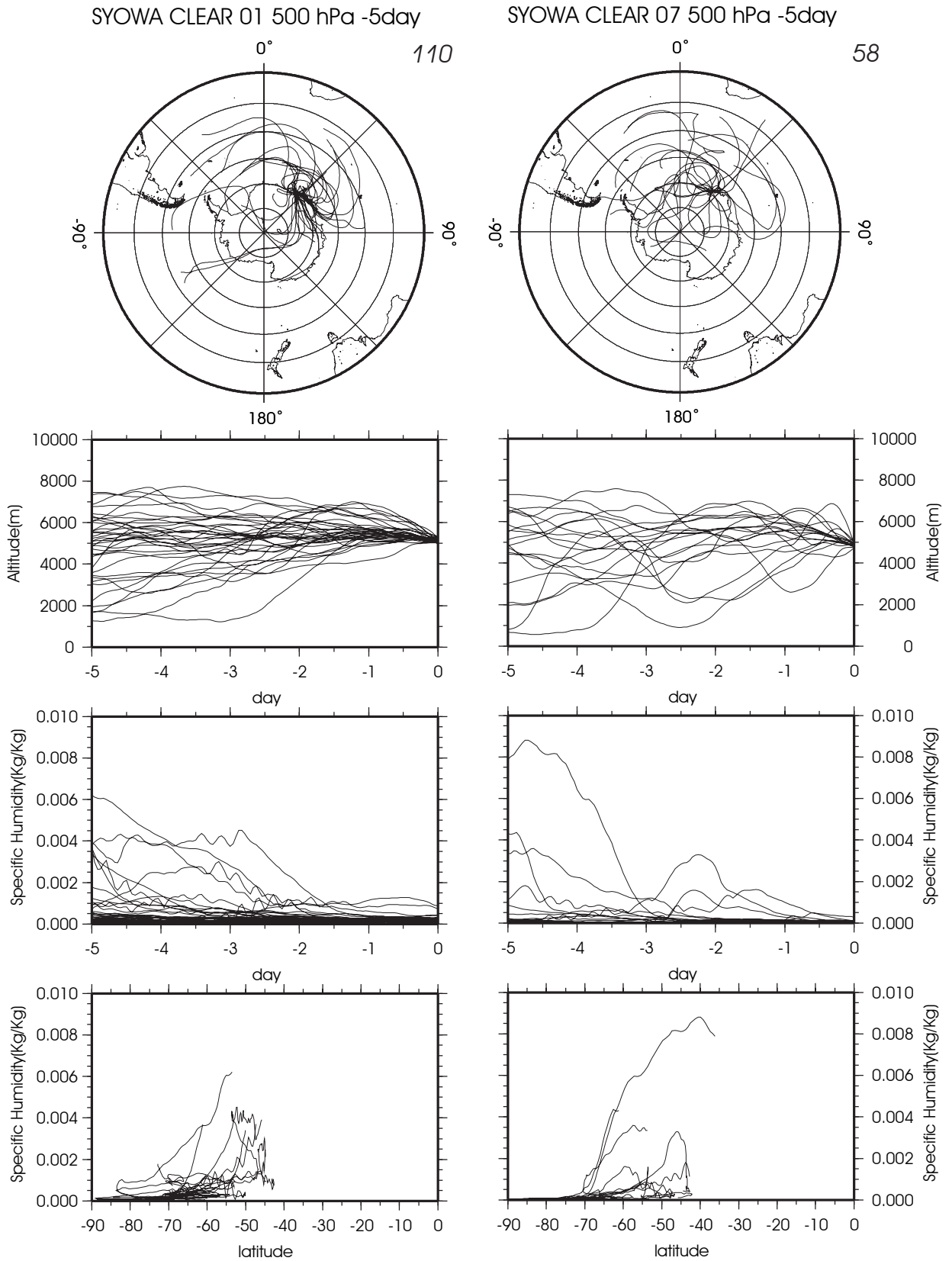


Fig6-3.

昭和基地における天候区分による快晴時の大気輸送経路 (500hPa) についてそれぞれ水平断面、時間 - 高度断面、時間 - 比湿断面、緯度 - 比湿断面として示した。右上の数字は総事例数である。

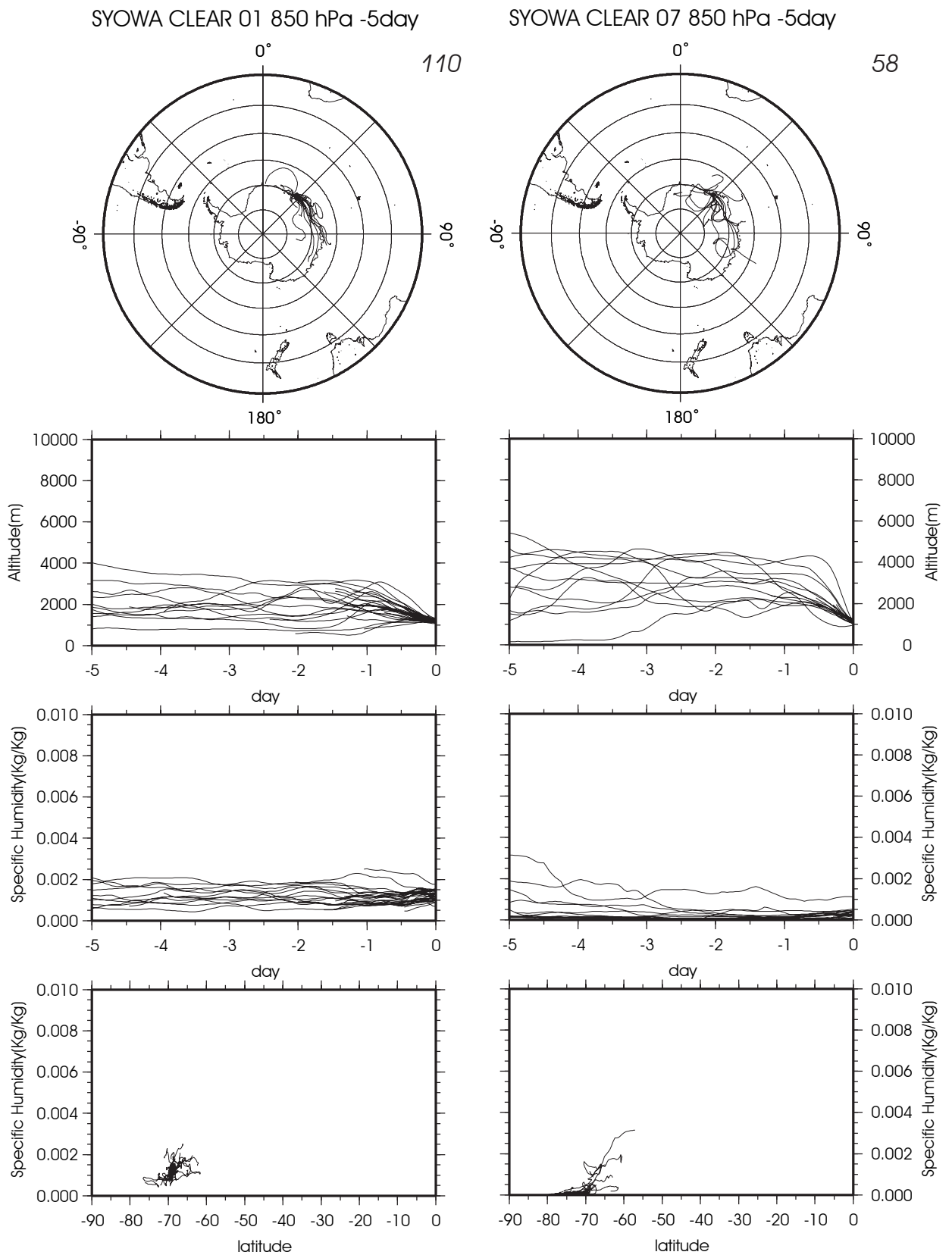


Fig6-4.

昭和基地における天候区分による快晴時の大気輸送経路(850hPa)についてそれぞれ水平断面、時間-高度断面、時間-比湿断面、緯度-比湿断面として示した。右上の数字は総事例数である。

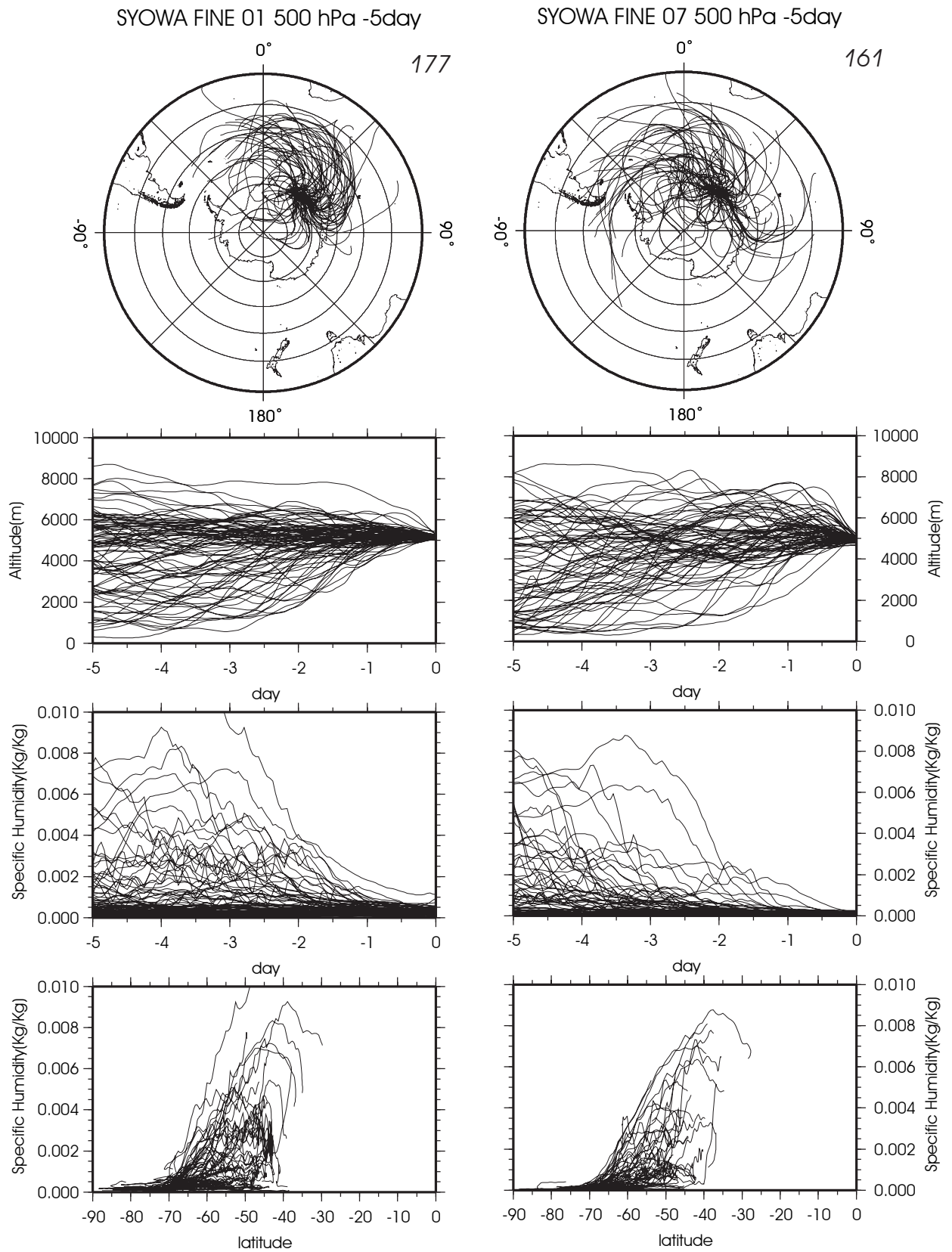


Fig6-5.

昭和基地における天候区分による晴天時の大気輸送経路 (500hPa) についてそれぞれ水平断面、時間 - 高度断面、時間 - 比湿断面、緯度 - 比湿断面として示した。右上の数字は総事例数である。

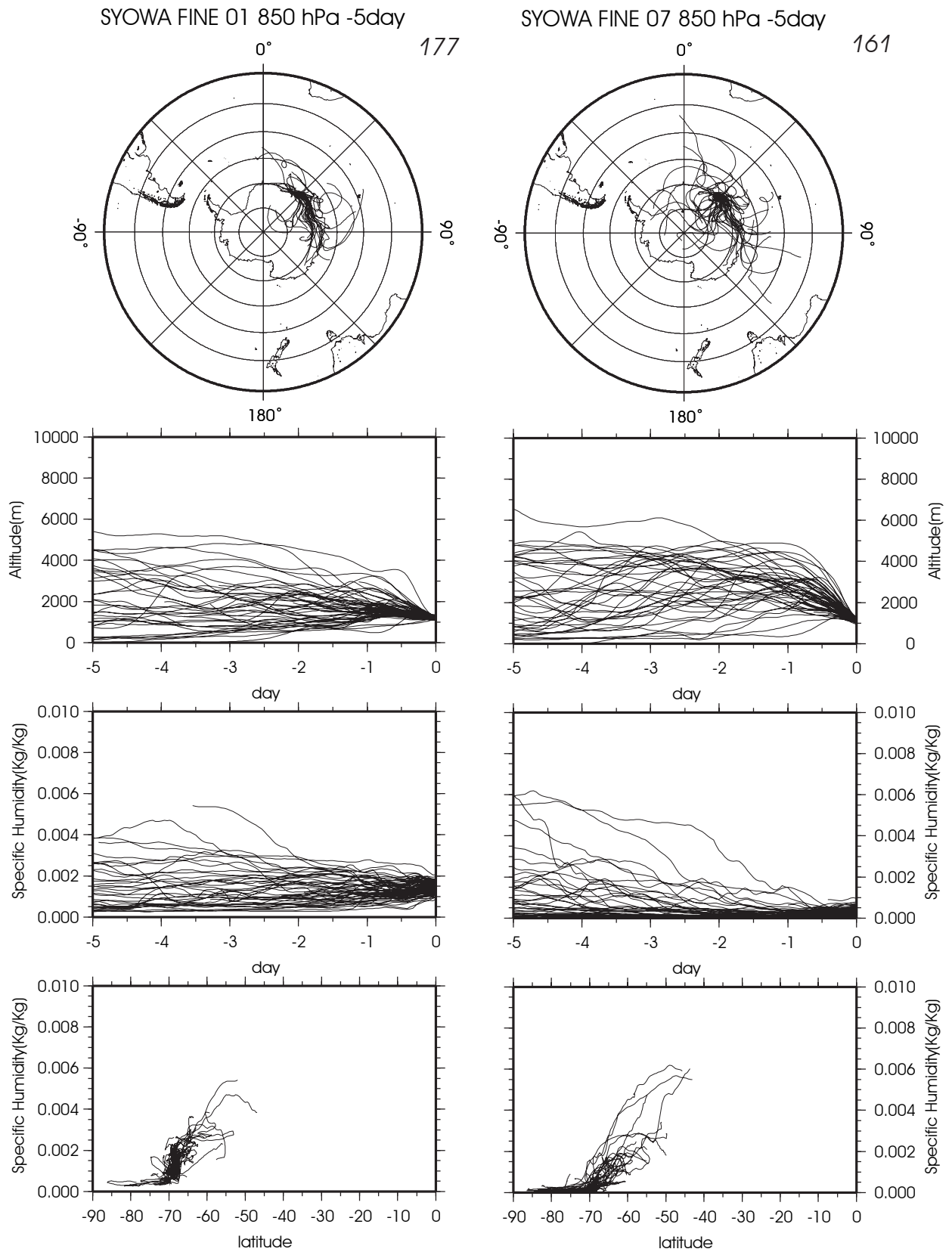


Fig6-6.

昭和基地における天候区分による晴天時の大気輸送経路 (850hPa) についてそれぞれ水平断面、時間 - 高度断面、時間 - 比湿断面、緯度 - 比湿断面として示した。右上の数字は総事例数である。

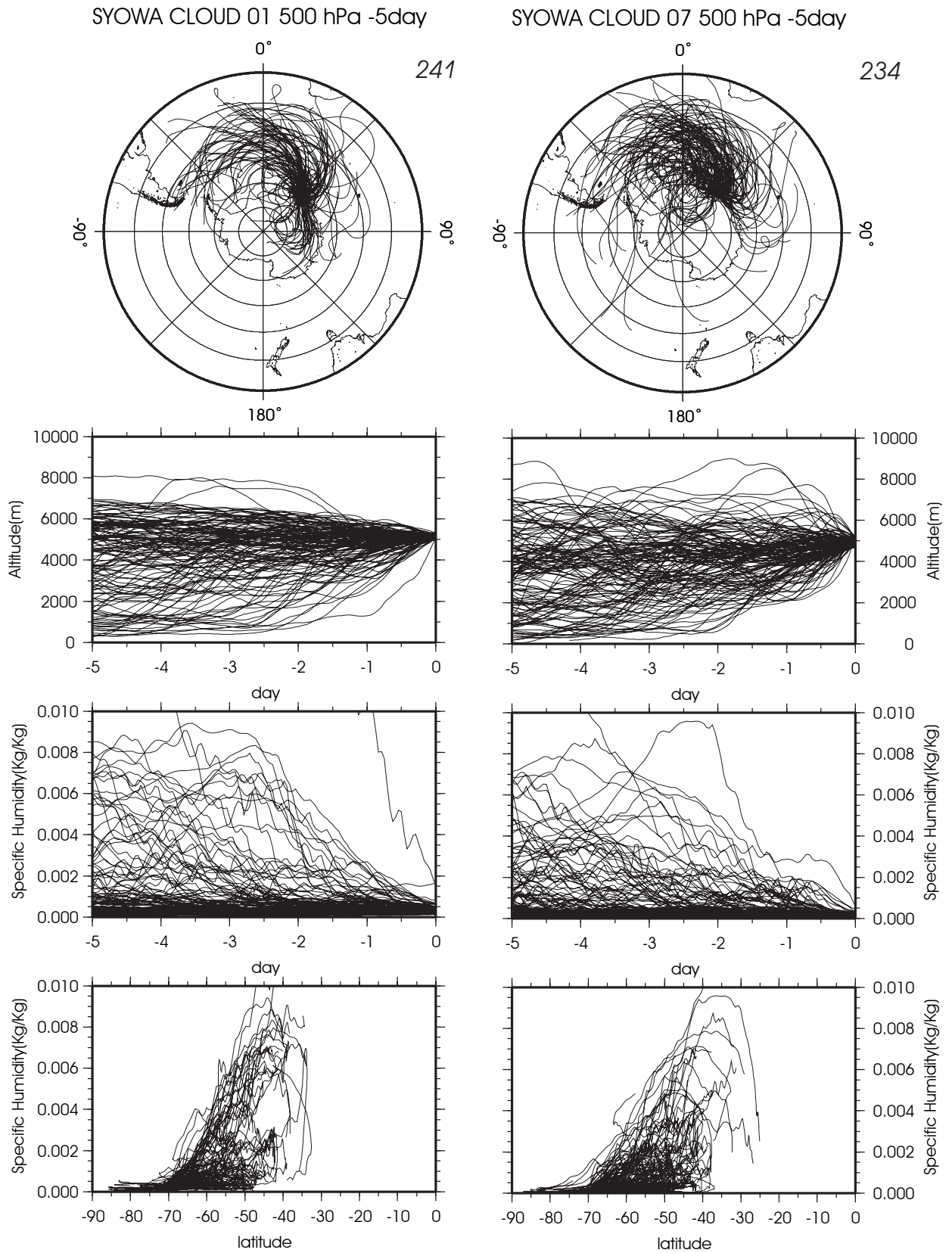


Fig6-7.

昭和基地における天候区分による雲りの時の大気輸送経路 (500hPa) についてそれぞれ水平断面、時間 - 高度断面、時間 - 比湿断面、緯度 - 比湿断面として示した。右上の数字は総事例数である。

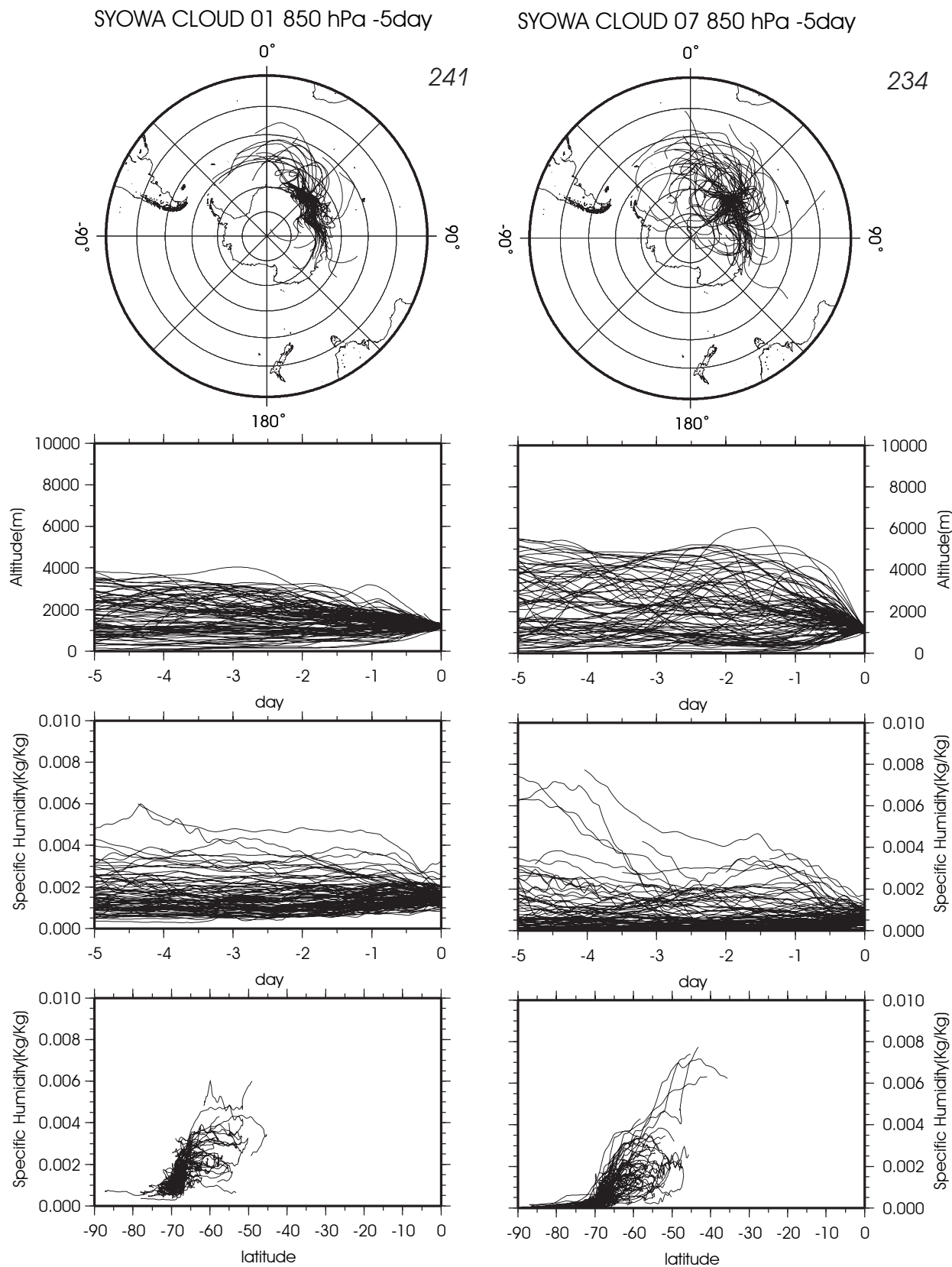


Fig6-8.

昭和基地における天候区分による曇天時の大気輸送経路 (850hPa) についてそれぞれ水平断面、時間 - 高度断面、時間 - 比湿断面、緯度 - 比湿断面として示した。右上の数字は総事例数である。

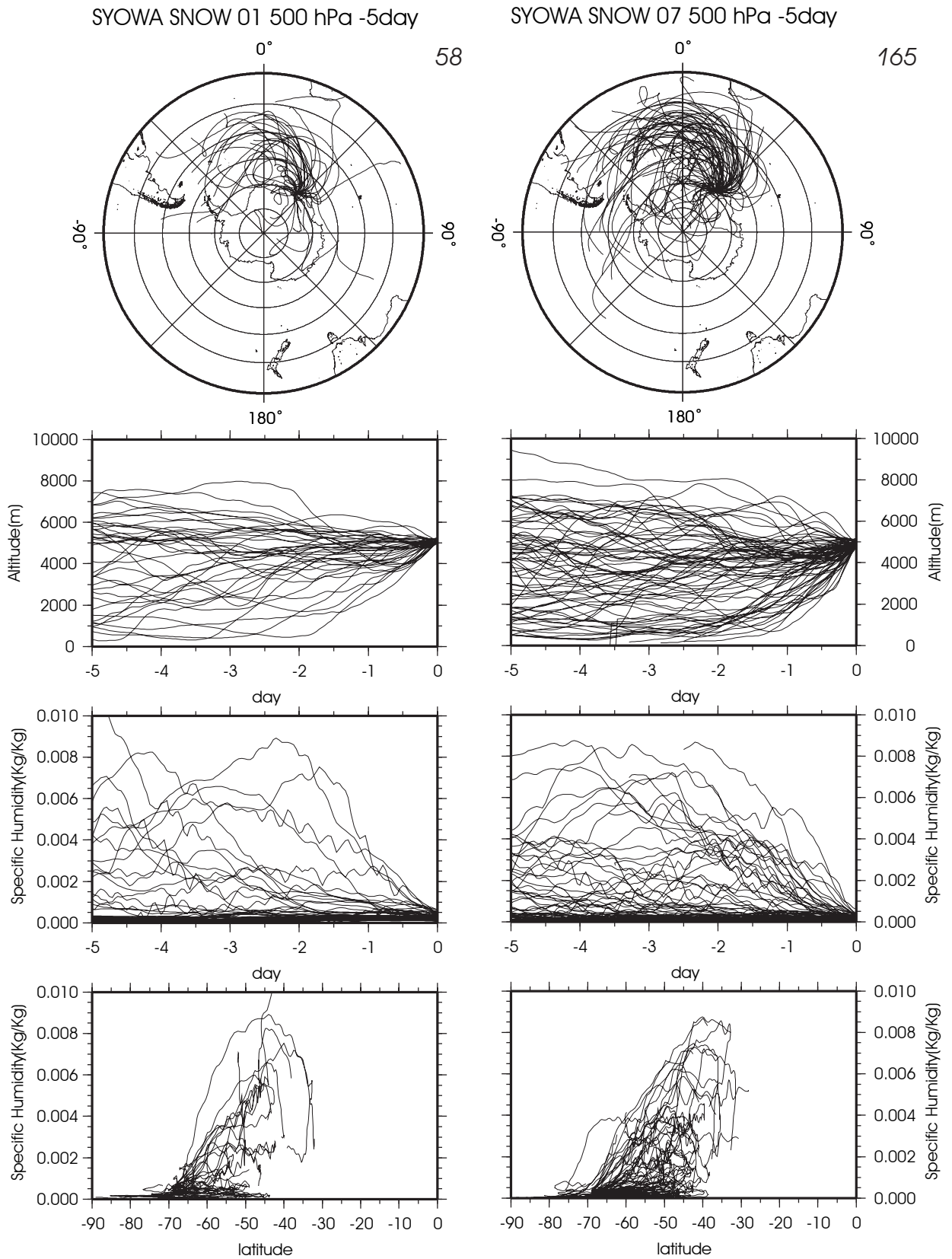


Fig6-9.
 昭和基地における天候区分による降雪時の大気輸送経路 (500hPa) について
 それぞれ水平断面、時間 - 高度断面、時間 - 比湿断面、緯度 - 比湿断面として示した。
 右上の数字は総事例数である。

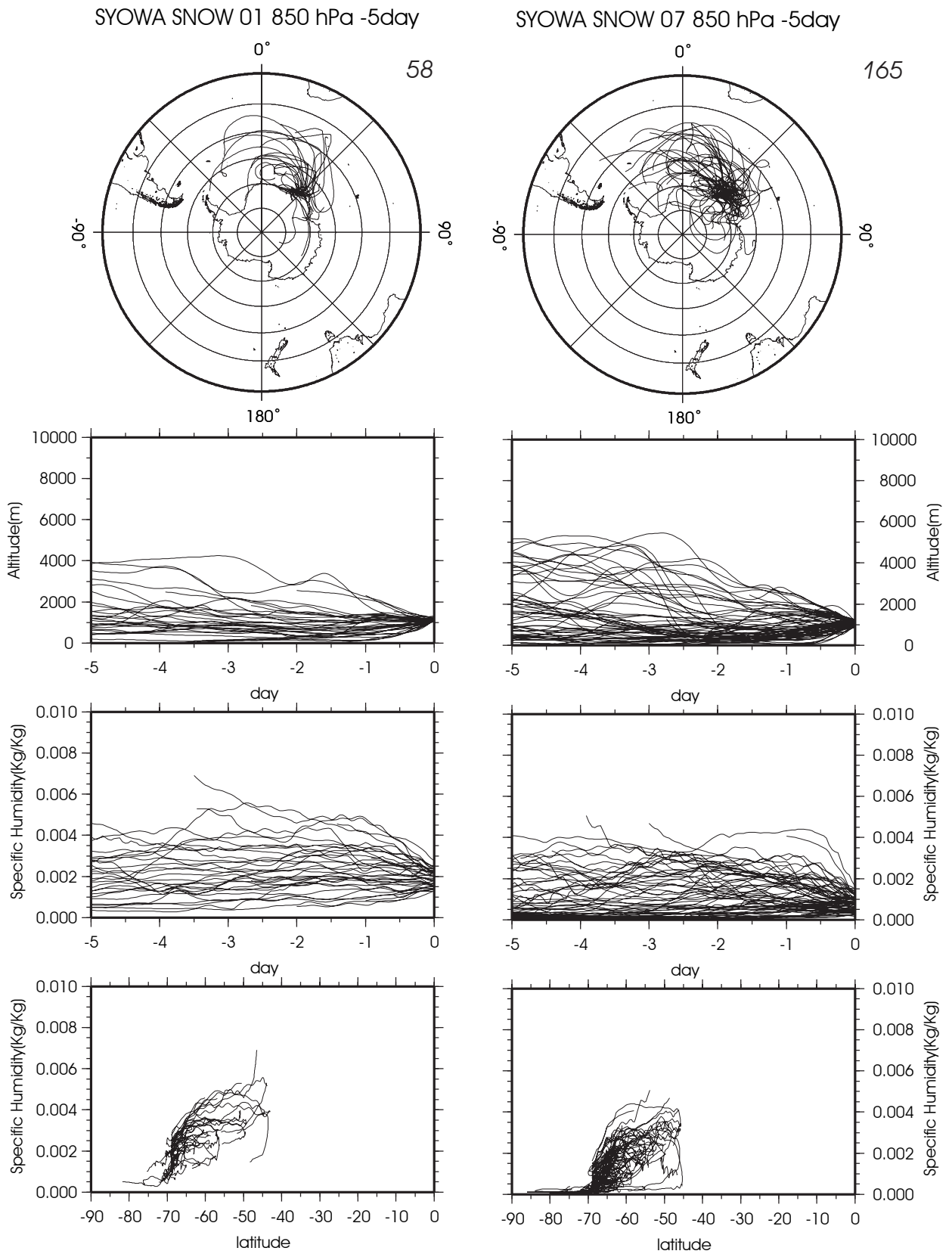


Fig6-10.

昭和基地における天候区分による降雪時の大気輸送経路 (850hPa) についてそれぞれ水平断面、時間 - 高度断面、時間 - 比湿断面、緯度 - 比湿断面として示した。右上の数字は総事例数である。

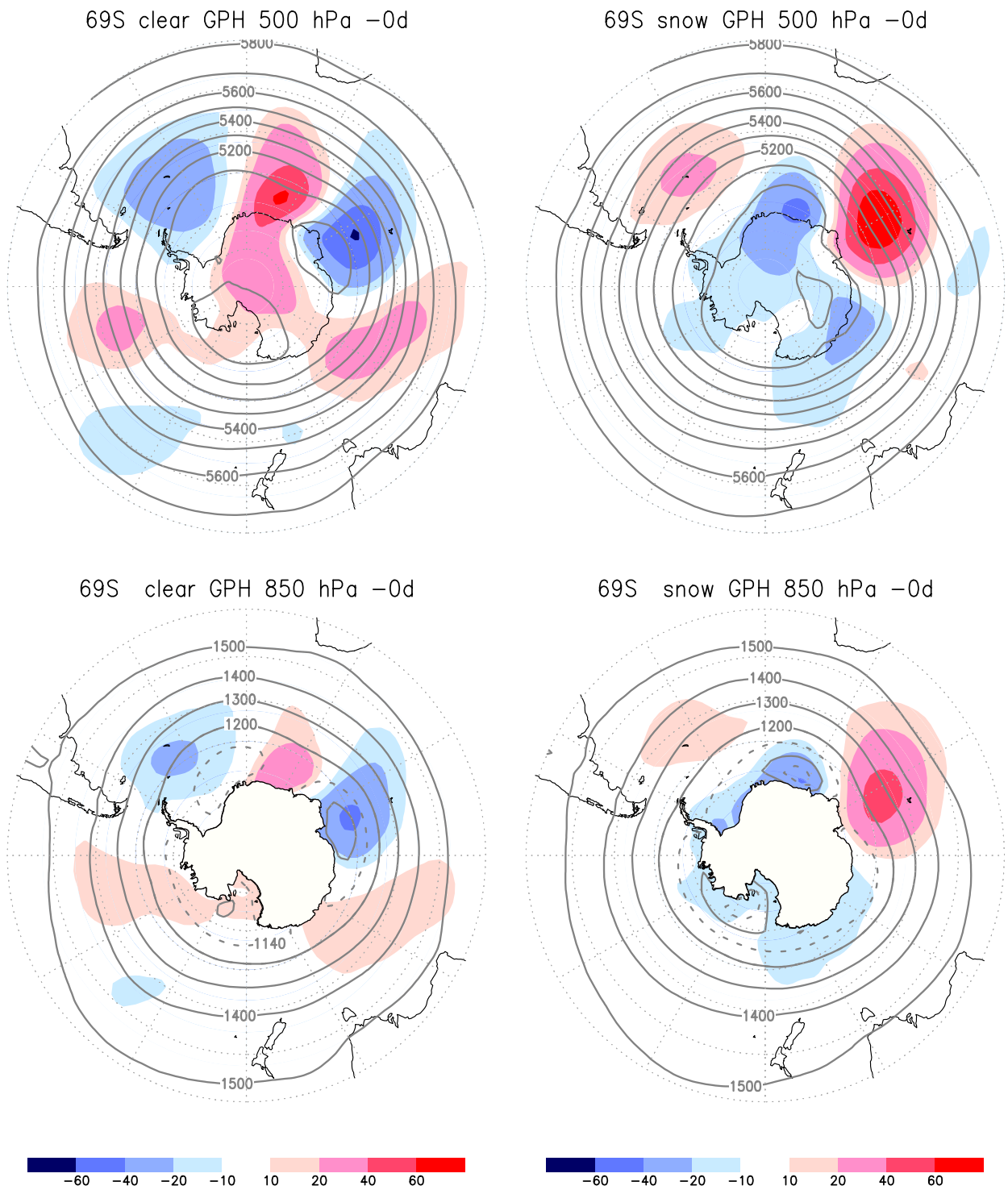
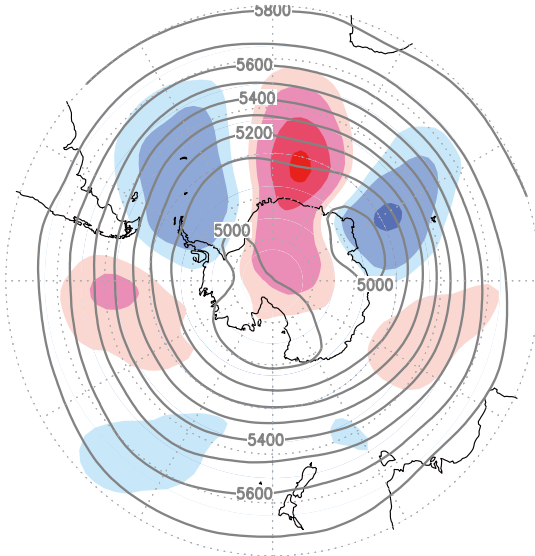
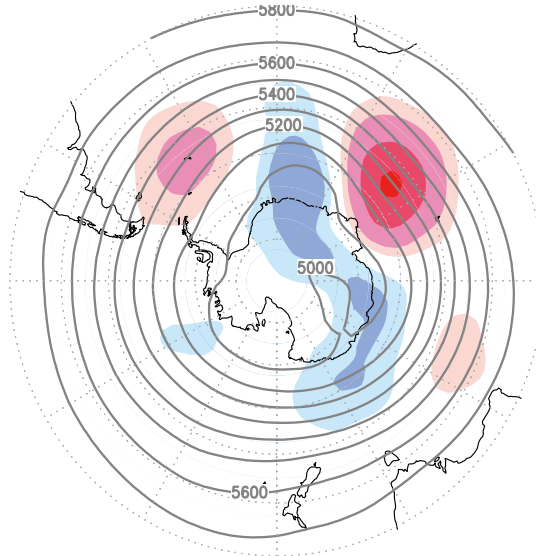


図6-11-1. 昭和基地における地上気象観測データから表6-2により分類した天候において快晴時と降雪時の等圧面高度について、到達時の等圧面高度をコンターで、20年間の平均値からの偏差をカラーバーで示している。
 上図は500hPa平面、下図は850hPa平面で、左が降雪時、右が快晴時を示している。
 実線は100mごと、点線は40mごとに示されている。

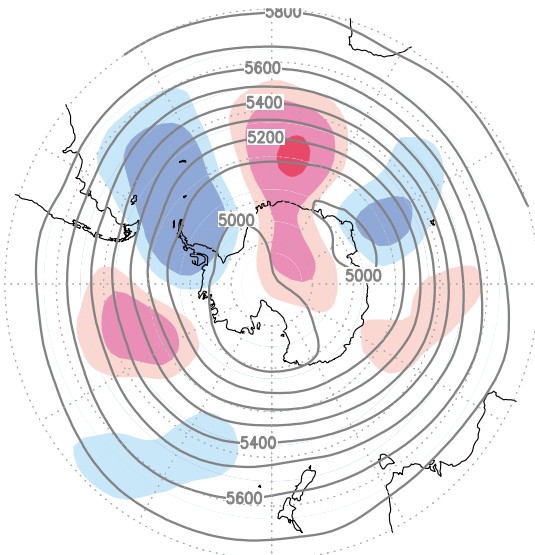
(a) 69S clear GPH 500 hPa -1d



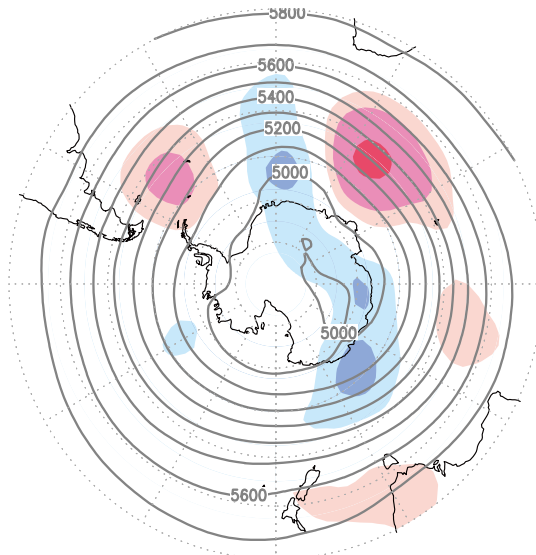
69S snow GPH 500 hPa -1d



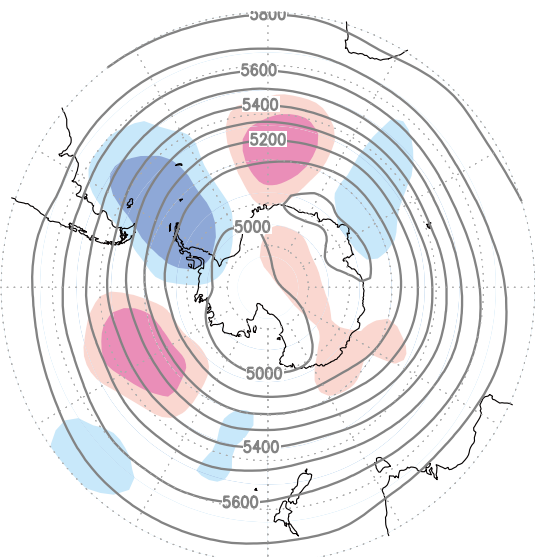
(b) 69S clear GPH 500 hPa -2d



69S snow GPH 500 hPa -2d



(c) 69S clear GPH 500 hPa -3d



69S snow GPH 500 hPa -3d

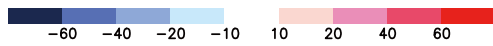
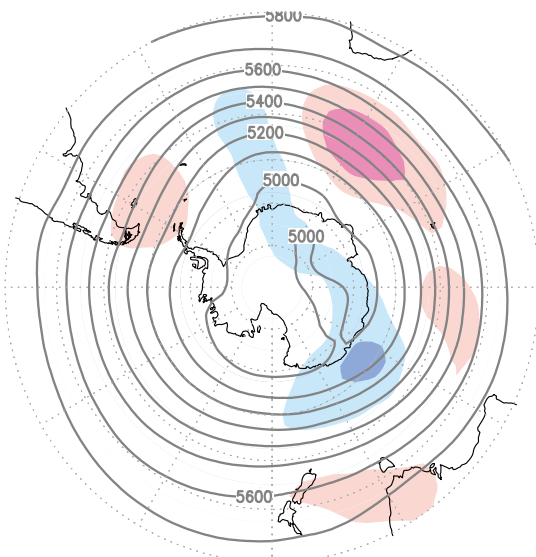
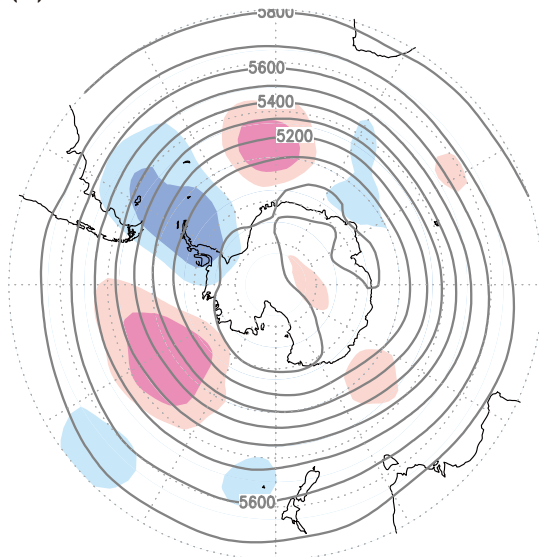
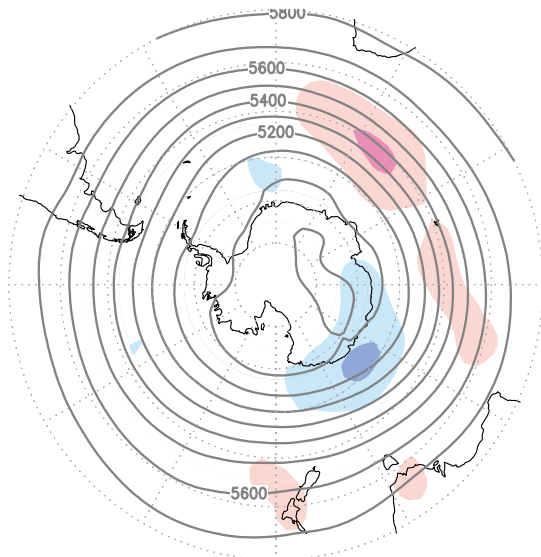


图6-11-2 (1).

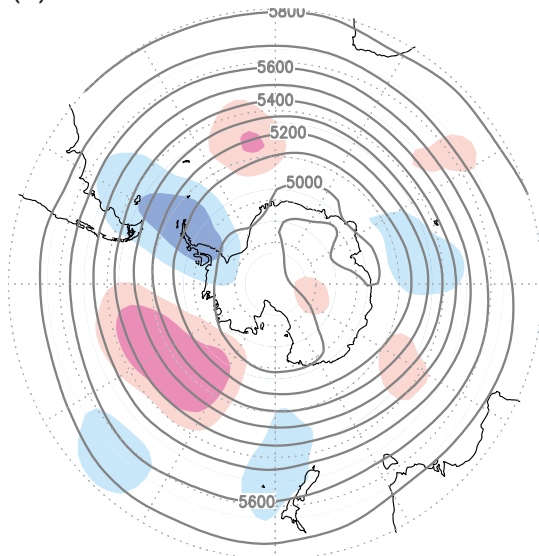
(d) 69S clear GPH 500 hPa -4d



69S snow GPH 500 hPa -4d



(e) 69S clear GPH 500 hPa -5d



69S snow GPH 500 hPa -5d

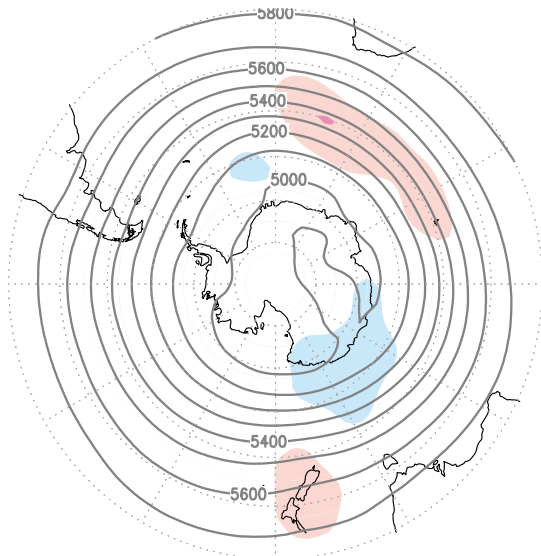


図6-11-2 (2).

昭和基地における地上気象観測データから表6-2により分類した天候において快晴時と降雪時の、到達時から1日前、2日前、3日前、4日前、5日前の等圧面高度について、それぞれ(a)~(e)として等圧面高度をコンターで、20年間の平均値からの偏差をカラーバーで示している。上図は500hPa平面、下図は850hPa平面で、左が降雪時、右が快晴時を示している。実線は100mごと、点線は40mごとに示されている。

DOMEF CLEAR 500 hPa 12UTC -5day

DOMEF SNOW 500 hPa 12UTC -5day

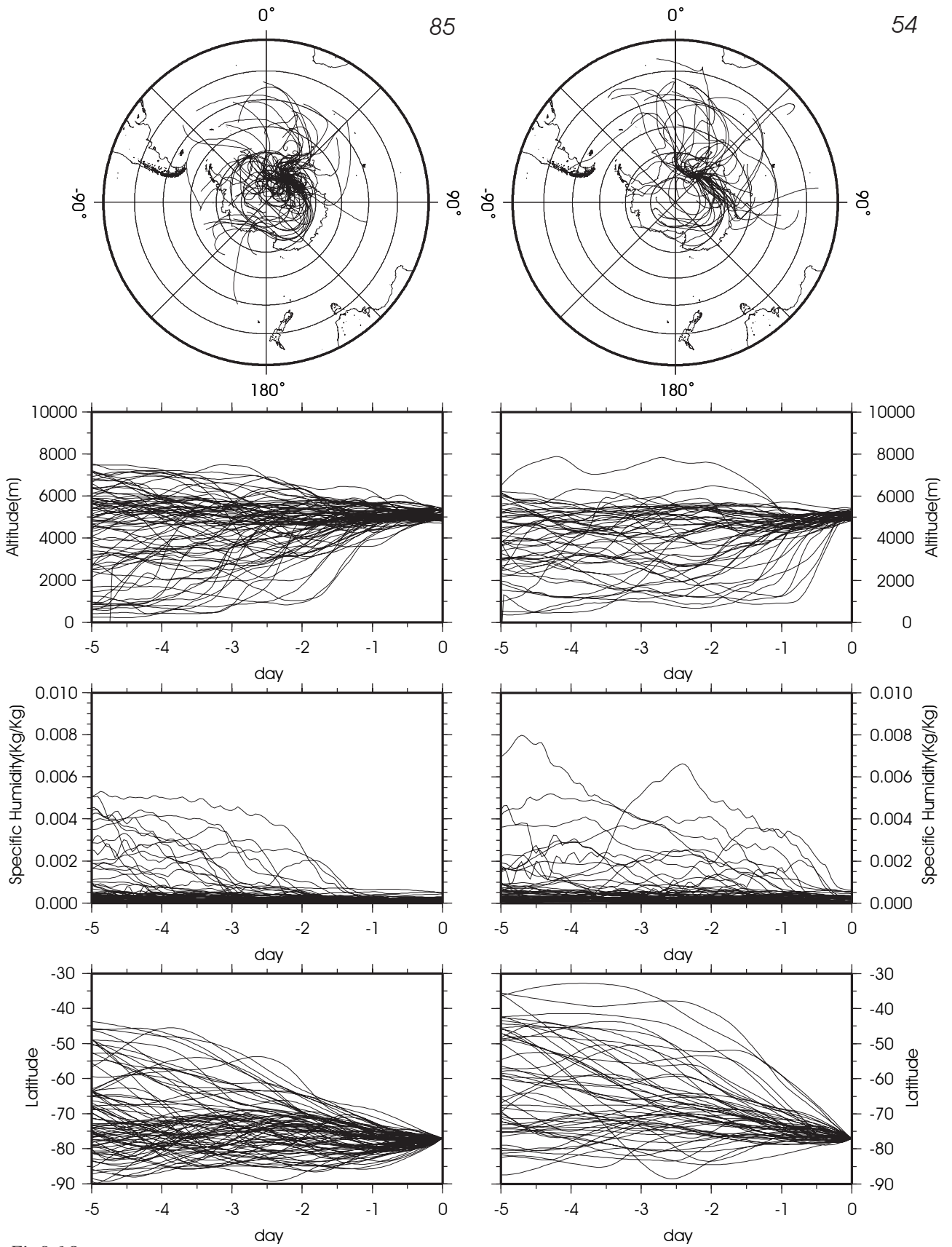


Fig6-12.

ドームふじ基地における天候区分による快晴時(左)と降雪時(右)のうち、12UTCの大気輸送経路(500hPa)についてそれぞれ水平断面、時間-高度断面、時間-比湿断面、時間-緯度断面として示した。右上の数字は総事例数である。

77S clear GPH 500 hPa -0d

77S snow GPH 500 hPa -0d

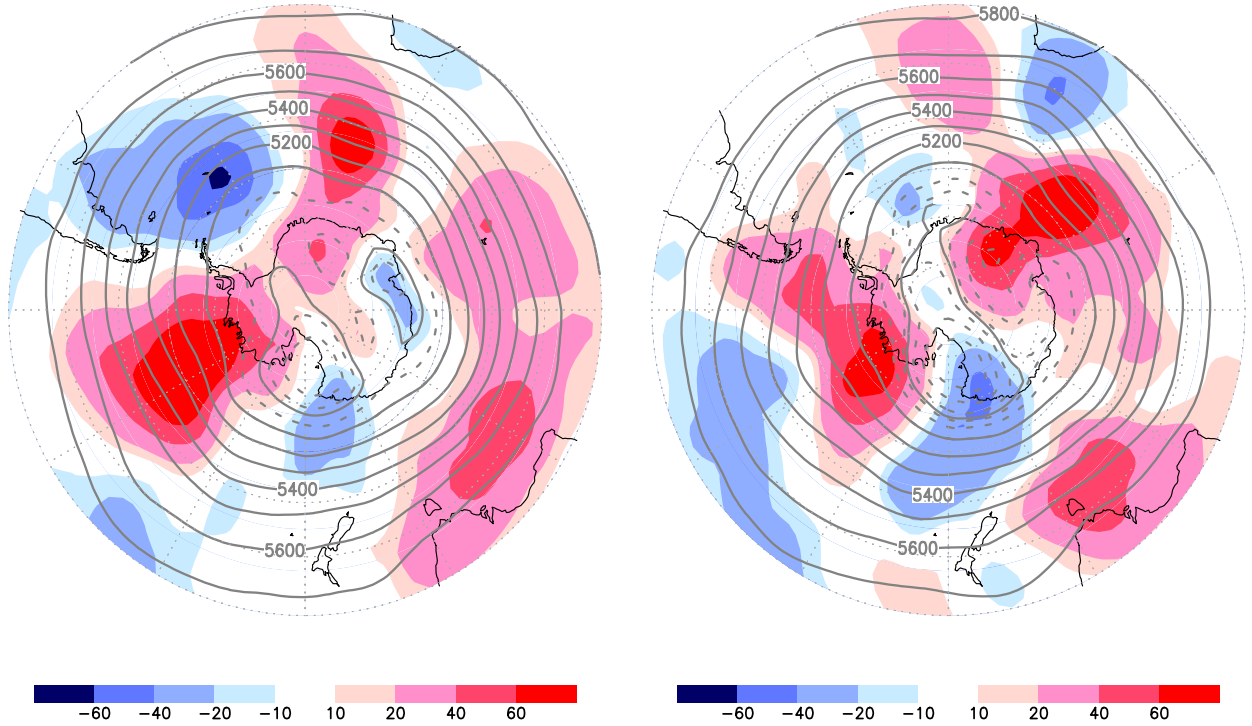
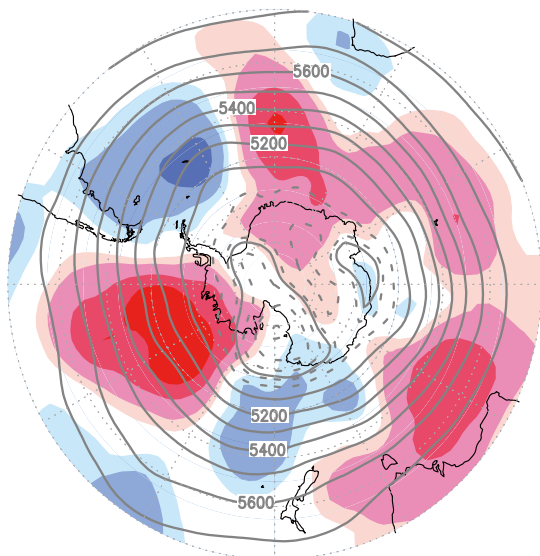


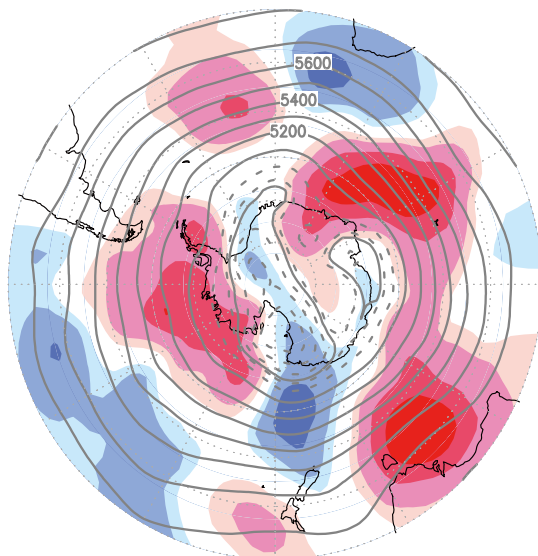
図6-13-1.

ドームふじ基地における地上気象観測データから表6-2により分類した天候において降雪時と快晴時のジオポテンシャルハイトについて、500hPa面における平均値をコンター(実線は100mごと、点線は30mごと)で、さらに20年平均からの偏差をカラーバーで示している。左が快晴時、右が降雪時を示している。

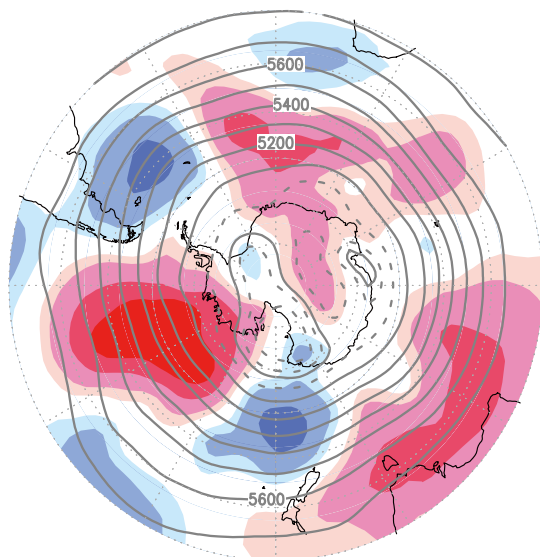
(a) 77S clear GPH 500 hPa -1d



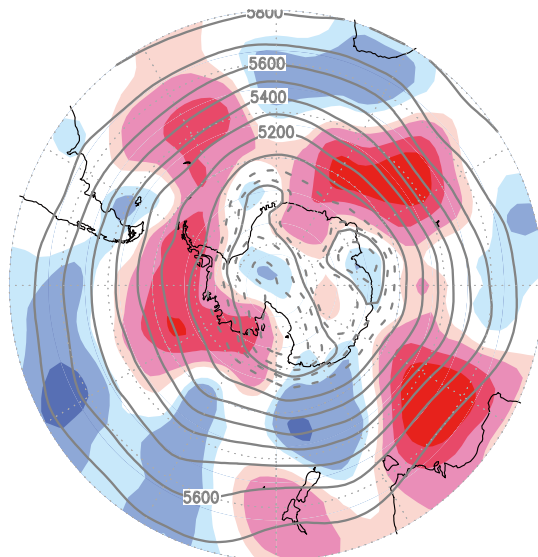
77S snow GPH 500 hPa -1d



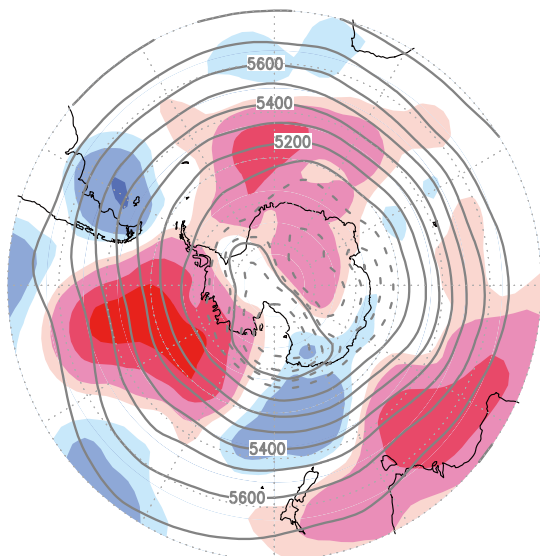
(b) 77S clear GPH 500 hPa -2d



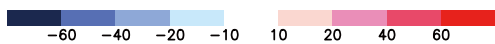
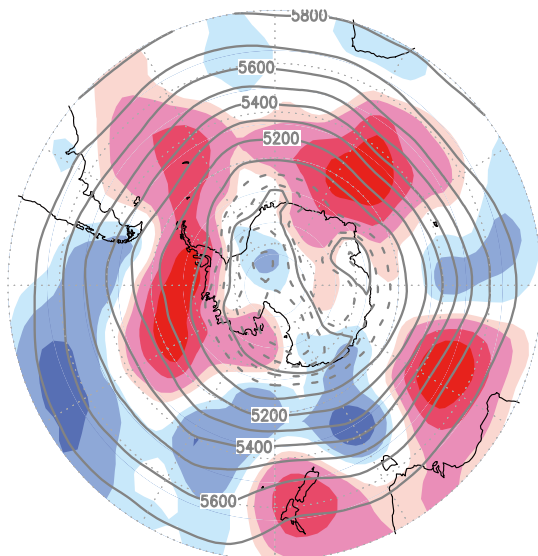
77S snow GPH 500 hPa -2d



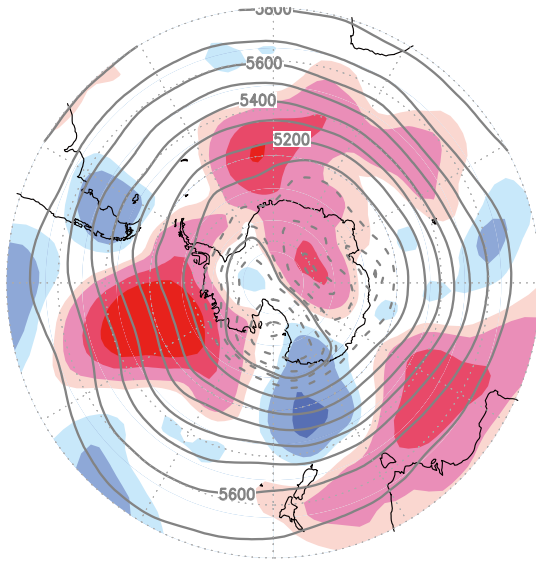
(c) 77S clear GPH 500 hPa -3d



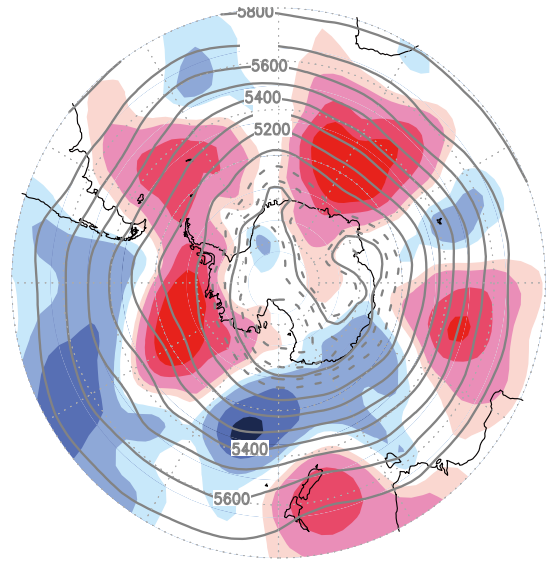
77S snow GPH 500 hPa -3d



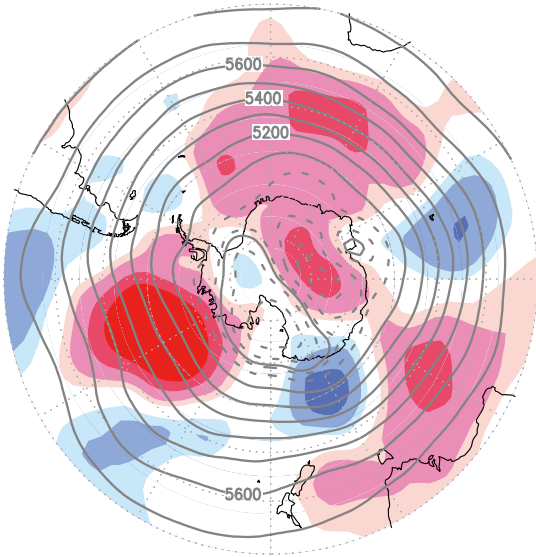
(d) 77S clear GPH 500 hPa -4d



77S snow GPH 500 hPa -4d



(e) 77S clear GPH 500 hPa -5d



77S snow GPH 500 hPa -5d

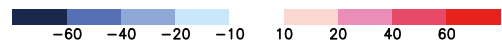
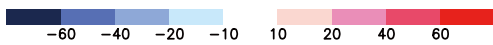
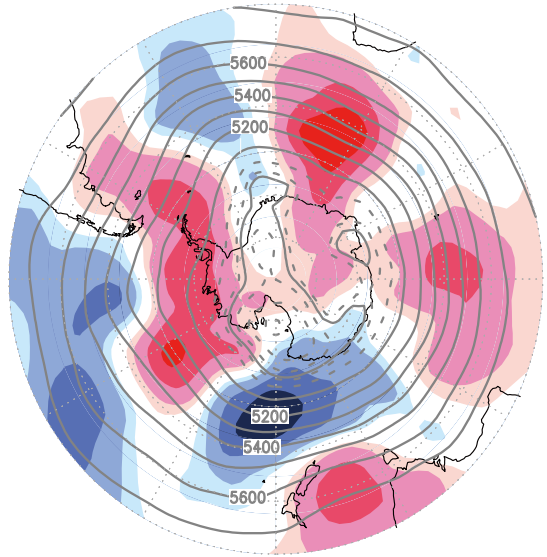


図6-13-2 (2).

ドームふじ基地における地上気象観測データから表6-2により分類した天候において快晴時と降雪時の、到達時から1日前、2日前、3日前、4日前、5日前の等圧面高度について、それぞれ(a)～(e)として等圧面高度をコンターで、20年間の平均値からの偏差をカラーバーで示している。

実線は100mごと、点線は30mごとに示されている。

第7章 水蒸気輸送に関する考察

6章では昭和基地とドームふじ基地における天気概況を用いた天候の違いによる水蒸気輸送経路と起源について調べたが、本章ではそれぞれの基地における地上気象・雪氷観測データを用いて考察を行う。昭和基地における10年間の大気輸送起源と可降水量から、昭和基地における水蒸気輸送の特徴について考察する。また、ドームふじ基地においてダイヤモンドダストなどの局所循環による降雪と、大陸外から流入した移流に伴う降雪を判別して、大陸氷床を涵養する水蒸気輸送起源を推定する。

7-1. 水蒸気輸送起源の推定

7-1-1. 昭和基地における水蒸気輸送

6章では降雪時、大西洋上を出発し偏西風帯を通過してきた空気塊が蛇行したプラネタリー波によって南東方向に転向され、昭和基地へ直接到達する傾向が示された。晴天時には対流圏下層においてインド洋および内陸部から西向きに水蒸気の少ない大気が輸送されていた。湿潤な海上から大気が直接到達する場合には水蒸気量が多く、乾燥した大陸上を移動してきた大気が到達する場合は水蒸気量が少なくなる。5章で得られた海起源別の大気輸送経路で水蒸気量の違いが表現出来ているのからを検証するため、図5-1で示した海領域区分からそれぞれの海起源別に、地表面から500hPaまで積分した可降水量を10年月平均値として示す（図7-1）。

500hPaの海起源別に積分した可降水量は、大西洋および太平洋起源が平均値より上回ることが多く、インド洋および内陸起源は平均値を下回っている。特に水蒸気量の少ない大陸上を通過してきた内陸起源の場合は平均値より0.5～1mm程度小さい値となっており、インド洋起源の大気は海上から流入した後に沿岸伝いに西向きに輸送されていることから、他の海起源の場合よりも水蒸気の少ない大気が到達していると考えられる。

850hPaの海起源別に積分した可降水量の特徴は、内陸起源の輸送経路が全体の半数を占めるため、内陸起源の可降水量の値が平均値に近づいている点であるが、平均値を上回ることにはなかった。Atlantic起源の可降水量は平均値より1mm程度多

く、昭和基地の西側から輸送されてきた大気には水蒸気が多く含まれていることが示唆される。

図7-2に、昭和基地における降雪時と快晴時の850hPaに到達する輸送経路の起源についてそれぞれの割合を10年平均値として示す。降雪時は大西洋起源が全体の70%を占めている。大西洋起源と太平洋起源を西側からの輸送とすれば、71%となり、インド洋起源と内陸起源は29%となるため、降雪時には7割方、西側から輸送されてきた大気が海上から直接昭和基地へ到達している。快晴時には逆に内陸起源が62%となっており、インド洋起源と合わせて東側からの輸送とすれば81%となり、東側から大陸沿いに大気が輸送される状況が卓越している。Schlosser et al. (2005)は降雪時の水蒸気輸送経路は、降雪直前と途中における低気圧の接近前のカタバ風と、低圧部とトラフによる移流の組み合わせを示しているが、流跡線の計算の開始直後や終わり頃に急激な擾乱の発達がある場合、計算精度が悪くなるため、必ずしも擾乱による移流を表現しているとは限らないとしている。本研究では昭和基地へ西側から近づいてきた総観規模擾乱が昭和基地を通り越し、東側へ進んでいくにつれて西向き輸送経路へ切り替わる状況が考えられる。流跡線解析の計算精度について本研究では検証を行っていないが、降雪時にも擾乱の移動によって、昭和基地との位置関係から内陸起源の大気輸送経路となる可能性がある。全ての降雪が海上起源の総観規模擾乱による移流によってもたらされているとはいえないが、多くの輸送経路は総観規模擾乱の影響を受けたものであると考えられる。

沿岸部にある昭和基地へ輸送される海塩粒子（Naイオン）の季節変化は、夏季に少なく冬季増加する傾向がみられる。冬季におけるNaイオンのピーク時には気圧が低く、高温・強風状況下にあることから、移動性擾乱によってNaイオンが輸送されていることが示唆されている（Hara et al., 2004）。移動性擾乱に伴う移流によって、西から東向きに進んできた大気が、昭和基地の東側で旋回して西向きに昭和基地へ到達する輸送経路を示し、海塩粒子の起源を推測している。図6-9で示された降雪時の大気輸送経路の特徴は、この海塩粒子がピークとなる場合の輸送経路と似ており、水蒸気が多く場合である降雪時の輸送経路は海塩粒子が多く輸送される場合も示していると考えられる。本研究で得られた大気および水蒸気輸送経路と観測に

よるエアロゾルデータとの比較は行っていないが、今後その関係を検証することでエアロゾル起源やその輸送についての議論に役立つ情報が得られると期待出来る。

7-1-2. ドームふじ基地における水蒸気輸送

客観解析による降雪データを用いた、氷床上の基地における降雪時の流跡線解析による輸送起源の推定は既に行われている。Reijmer and Van den Broeke (2001) は、ドームふじ基地よりも沿岸に近いDronning Maud Land基地における降雪時の大気輸送経路と起源を本手法と同様、流跡線解析を用いて示している。1日ごとの空気塊の位置の統計値によると、5日前には内陸上にある空気塊は無く、大西洋、太平洋、南大洋のいずれかに分布している。全体を通じてインド洋上を通過する輸送経路はほとんどなく、南大洋を経て大西洋を起源とする空気塊が多い。Reijmer et al. (2002) は、先のDronning Maud Land基地とドームふじ基地を含む氷床コア掘削地点4ヶ所における大気輸送経路の気候値と降雪時の輸送経路を算出している。海領域の区分は、それぞれ経度90°ごとに切り分け、本研究で用いた図5-1の区分よりもインド洋領域が広く、大西洋領域が狭い。ドームふじ基地上空625hPaに到達する空気塊は、降雪時の4日前において約半数がインド洋上にあり、平均すると50°Sから60°Sの間に集中している。内陸起源は約20%となっている。

6章で算出したドームふじ基地における降雪時と快晴時の5日前の大気輸送起源別の割合を示す(図7-3)。降雪時は海：陸起源の割合は6:4になっており、5章で示された海：陸起源比(5:5)よりも、海が優勢になっている。快晴時は海：陸起源比は4:6になっており、降雪時と逆になっている。降雪時には海から流入した大気が多く到達し、快晴時には内陸起源の大陸上を移動してきた大気が多くなっている。

本研究では起源を5日前にしているが、降雪時の内陸起源の割合は4日前を起源としたReijmer et al. (2002) で示された値の約2倍となっている。海領域区分が異なるため、本研究の結果では大西洋起源が最も卓越しており、3割を超えている。両者の水平輸送経路を比較する際、500hPaと625hPaという基点の高度差を考慮しなければならないが輸送経路自体の特徴は似ている。偏西風帯を東向きに進んできた空気塊が転向し、アデリー棚氷周辺から内陸部へ流入して到達している。本研究とReijmer et al. (2002) の結果における大きな違いは、太平洋起源と内陸起源の割合が本研究の場合2倍近く多くなっている点である。この違いを明らかにすること

で、客観解析による降雪データの特徴や、先行研究によって得られている水蒸気輸送経路の妥当性を理解することができ、今後の水蒸気輸送経路の推定に必要な情報が得られると考えられる。

本研究では地上気象観測値から降雪時を選別しているため、擾乱に伴う降雪だけでなく客観解析データでは再現出来ていない可能性のある局所的に生じる降雪も含んだ水蒸気輸送経路も示している場合もある。南極内陸部では気温の逆転層が発達し、局地的な水蒸気の凝結が起こって降雪が生じている。昭和基地における地上気象観測で降雪が観測された日時のERA-40再解析による可降水量および降雪データを検証した結果、降雪量が多い時は対応関係が良いが、それ以外の場合は悪かった。同時にレーウィンゾンデから算出した可降水量の検証を行ったが、降雪時に対応して可降水量が増加しており、現地観測データの信頼性が高いことが確認された。以上から、外部からの擾乱などによる大気の流れによって大量の雪が降る場合と、降雪量は少なく、地表面で昇華してしまう降雪の場合を区分し、ここでは特にドームふじ基地周辺に涵養する可能性の高い降雪をもたらす輸送経路を推定する。これは氷床コアの水蒸気輸送起源を推定する手がかりになると考えられる。

1997年にドームふじ基地では積雪サンプリングにより降雪量や採取時の天気の記録、雪尺による涵養量の測定が行われている (Motoyama et al. 2005)。ここで降雪量が比較的多いブリザードに着目し、観測報告からブリザードの日時データを作成した。事例数は 5回、8日である。ブリザードによっては降雪量が少ない場合もあることから、2週間ごとの雪尺データを用いて降雪量について調べた。年間の積雪尺の平均は0.3mm以下であり、大半がマイナスを含む0.2mm以下の降雪しか残っていないが、ブリザードなどにより大きく涵養された場合は1mm以上の積雪が残っている。本研究では平均値より多い 0.4mm以上の積雪が存在する場合を、特に降雪量が多いブリザード時と選別した。その大気輸送経路を図7-4に示す。水平輸送経路は大きく分けると、輸送起源は大西洋側とインド洋側にみられるが、ほとんどが大西洋側である。どの経路も大きく蛇行しており、急激な転向を伴っている。中緯度側から直接南方向に移流され、ドーム基地のある内陸部へ侵入するケースもみられる。時間-高度における輸送経路は、1日前では2000m以下の対流圏下層部にあった大気が1日で2000m以上上昇して到達している。大気輸送経路中の比湿は5日前から

1日前の間、4g/kg前後の値である。到達1日前から比湿は減少し始めるが、到着直前まで空気塊は比較的水蒸気量の多く含んだまま到達している。時間-緯度における輸送経路は、5日前の位置は70°Sから中緯度にあたる40°S付近までばらつきがあるが、2日前には50°Sから60°Sの間に収束し、その後1日ごと、緯度にして約10度程度移動してドームふじ基地に到達している。中緯度側から気温の高い大気が偏西風帯を通過して強い擾乱により移流され大陸上へ急激に侵入して、内陸部においても降雪をもたらすことが示されている。

個々の輸送経路に着目すると、大西洋上からDronning Maud Land基地周辺を通過してドームふじ基地に到達するケースが半数を占めている。Reijmer et al. (2001)は、図7-4に示されたDronning Maud Land基地を通過して到達する輸送経路と同様な経路を同基地への水蒸気輸送経路として示している。Dronning Maud Land基地へ降雪をもたらした擾乱が、12時間～1日程度の時間で移動し、ドームふじ基地へ到達して、降雪が記録されたと考えられる。また、同じ大西洋起源であるが、インド洋側から侵入する空気塊が約半数あり、昭和基地周辺を通過した擾乱による降雪がドームふじ基地にもたらされていると考えられる。

氷床上では、日々局地的な水蒸気の凝結・昇華が発生しているが、それらの氷床の涵養への影響には現在も多く雪氷に関わる研究者たちの関心が寄せられている。降雪時の水蒸気量の少ない大陸上を反時計回りに移動してきた内陸起源の大気輸送経路が、他の研究結果よりもその割合が多かったことは、局地的な降雪状況を反映している可能性がある。また、一つの大きな擾乱が内陸部へ侵入すると沿岸から内陸奥深くまで広範囲において降雪がもたらされ、南極氷床の涵養に大きく影響を及ぼす事が示唆される。本研究の結果は1997年のみに限っているため、一般性については言及できないが、ドームふじ基地周辺の涵養に影響を与える水蒸気輸送経路の一片を示すことが出来たと考えられる。

7-2. 本解析手法の限界および今後の課題

本研究では、終始流跡線解析を用いて、大気輸送経路や水蒸気輸送経路の推定を行っている。厳密に言えば三次元の風速場と気温と気圧から、空気塊がどう移動するか、を追跡しているだけであり、その空気塊における水蒸気の入りに関しては全く考慮していない。輸送経路上の比湿の値に着目し、水蒸気が多い空気塊の輸送

経路を水蒸気輸送経路としているが、必ずしも水蒸気量の変化や水蒸気起源を示しているとは限らない。輸送中の空気塊における水蒸気の入りによって、その空気塊の水蒸気起源が決まるため、本来の水蒸気起源とは異なった起源を本研究ではみている可能性が有る。

水蒸気輸送を導く手法として南極域においては本研究と同様な流跡線解析を用いることが主流ではあるが、他の地域ではGCM中の空気塊にタグをつけてその空気塊の移流を追って大気輸送経路を推定するものや、同位体を組み込んだ同位体AGCMを用いて、大気の移動に伴う同位体の変化を同時に算出するものがある。Helsen et al. (2006) は流跡線解析によって得られた大気輸送経路を同位体モデルに入力し、Dronning Maud Land基地へ到達する空気塊中の同位体比と積雪サンプルによって得られた同位体比の比較を検証している。今後氷床コア掘削地点において、同地点へ輸送される水素酸素同位体比による水蒸気起源を推定することは、コアデータの解釈の上で重要であり、ドームふじ基地においても同様な水蒸気起源の推定が必要であると考えられる。本研究で取り扱った1997年のドームふじ基地における積雪サンプリングでは、Helsen et al. (2006) と同様な解析を行うためのデータが得られていないが、2003年に越冬観測が行われ、積雪サンプリングによる酸素水素同位体比データが得られている (Fujita and Abe, 2006) 。このデータを有効活用し、今後のドームふじ基地へ輸送される水蒸気起源についての議論を深めることが今後の課題であると考えられる。

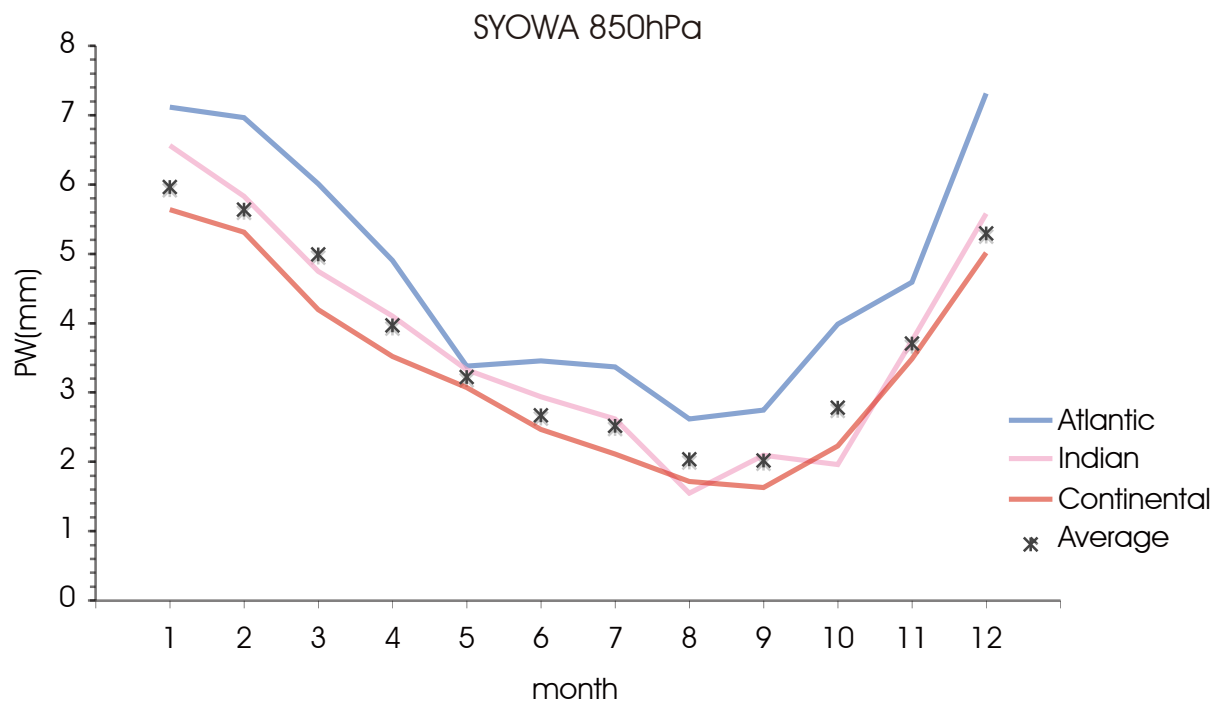
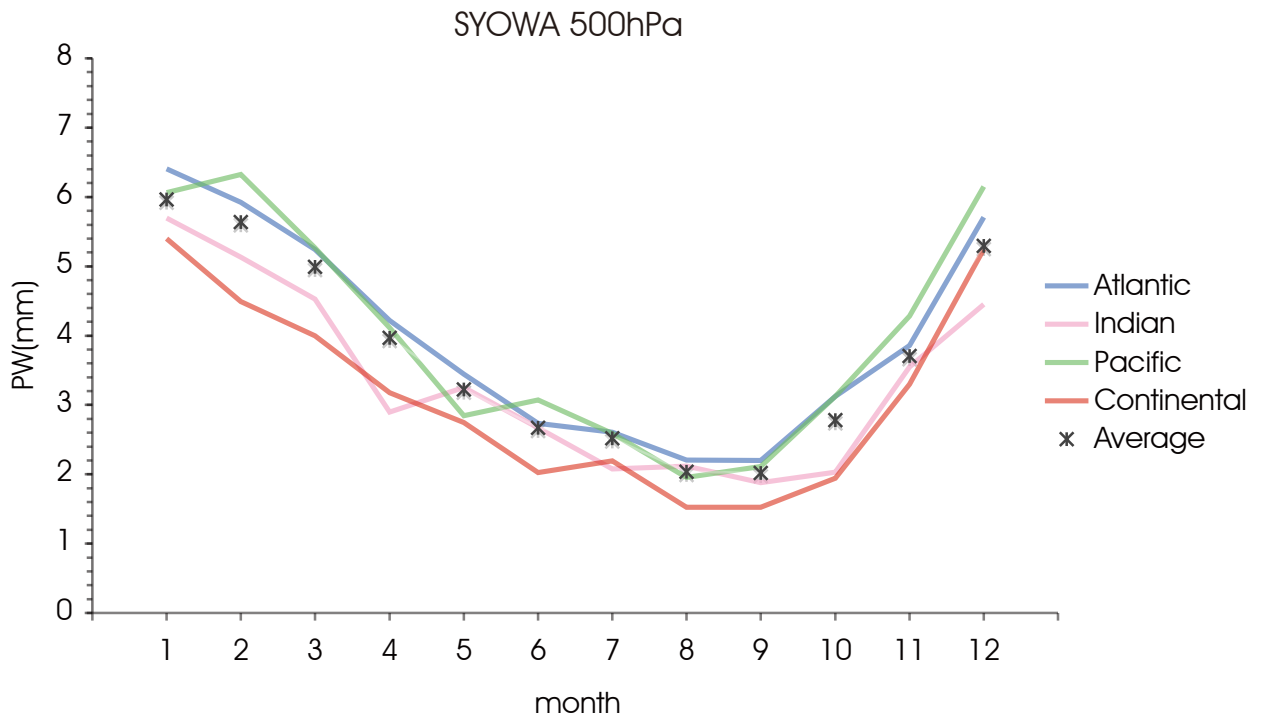
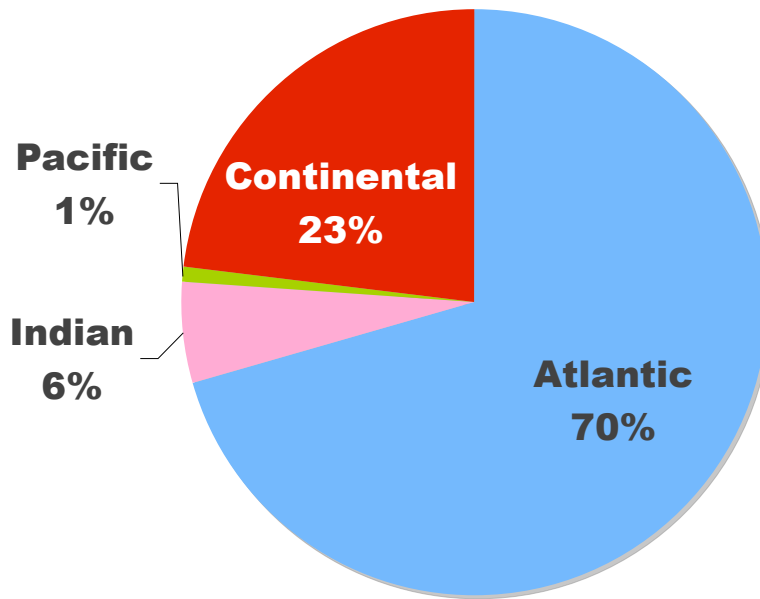


図7-1.
 昭和基地における10年間における流跡線解析結果を5日前の位置で海別領域に区分し海起源ごとにそれぞれ10年月平均した可降水量を示している。
 上図は500hPa、下図は850hPaであり、平均値は※で示されている。
 青はAtlantid起源、黄緑はPacific起源、薄桃はIndian起源。赤は内陸起源である。
 単位はmm。

1990-99 SYOWA SNOW total percentages



1990-99 SYOWA CLEAR total percentages

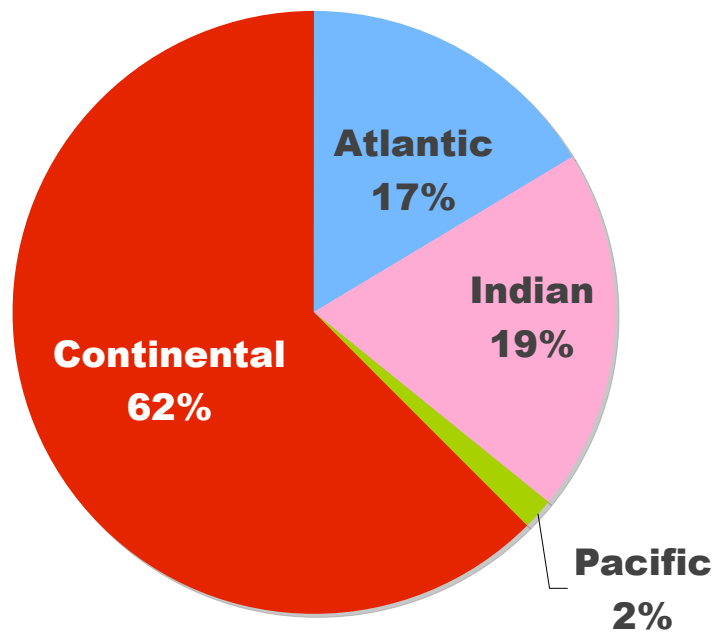
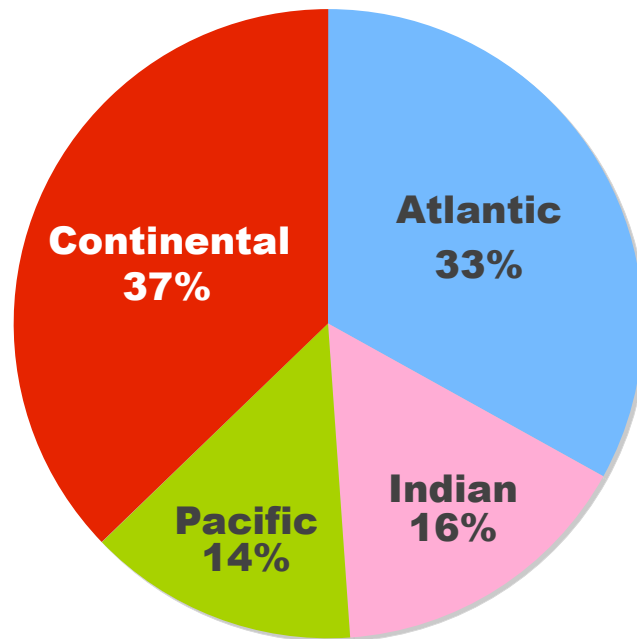


図7-2.
昭和基地における降雪時と快晴時における850hPa面に到達する大気輸送経路の5日前の位置について、
図5-1の海領域区分を用いてそれぞれの領域を起源とする輸送経路の割合を示した。
上図は降雪時、下図は快晴時を示している。

1997 Dome F SNOW total percentages



1997 Dome F CLEAR total percentages

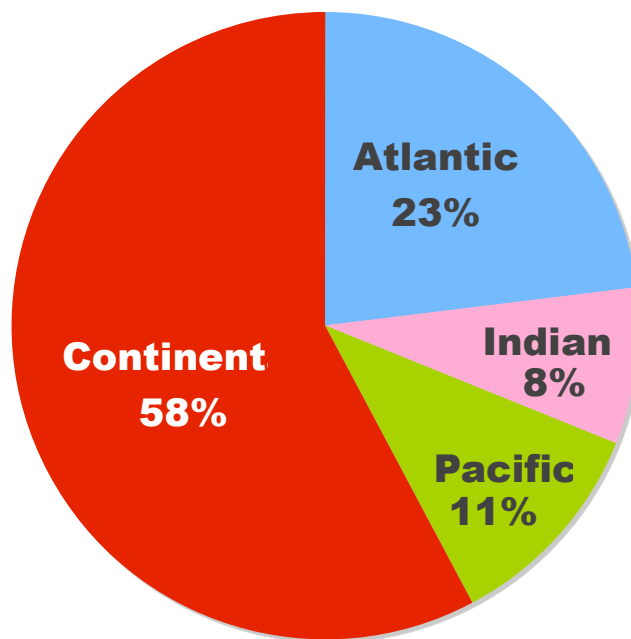


図7-3.
ドームふじ基地における降雪時と快晴時における500hPa面に到達する大気輸送経路の5日前の位置について、図5-1の海領域区分を用いてそれぞれの領域を起源とする輸送経路の割合を示した。上図は降雪時、下図は快晴時を示している。

DOMEF BLIZZARD SNOW 500 hPa

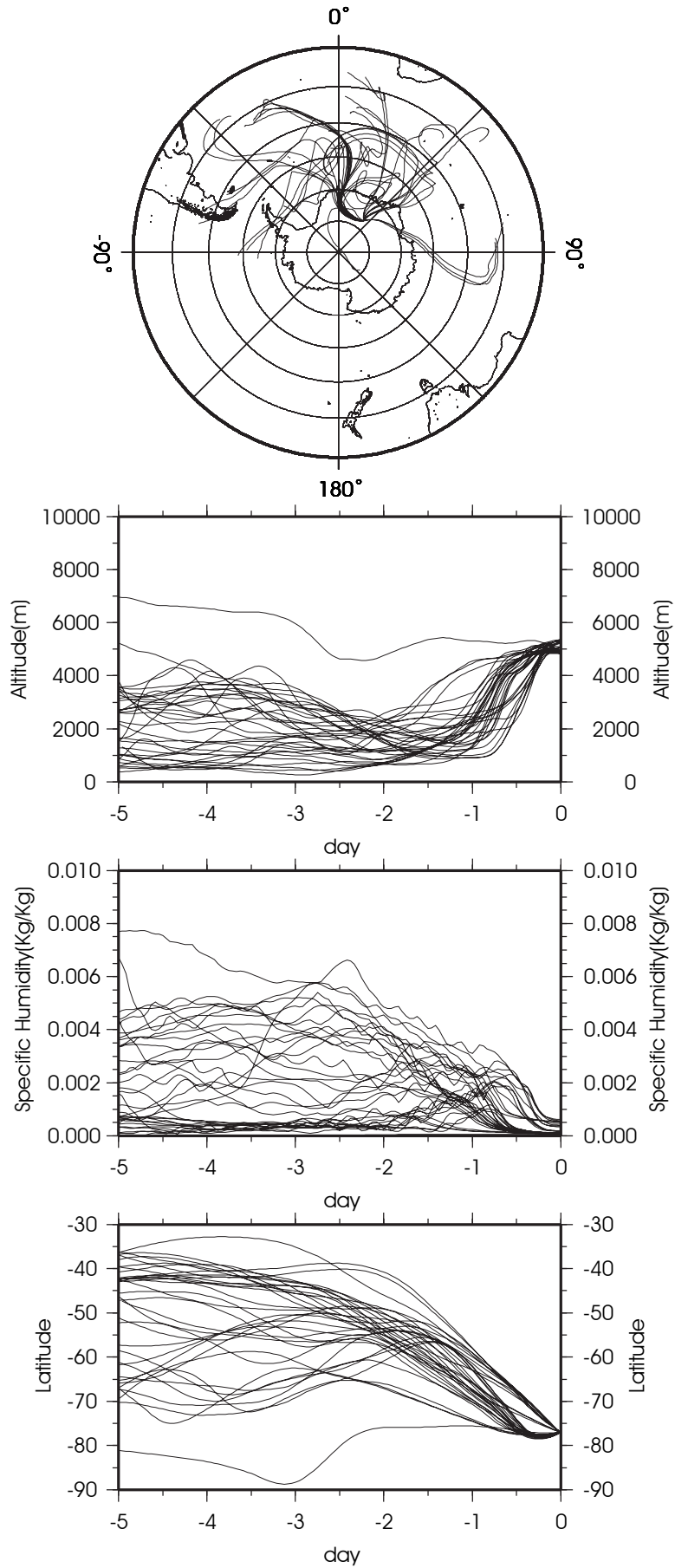


Fig7-4
 1997年におけるドームふじ基地における降雪量の多いブリザード時の大気輸送経路についてそれぞれ水平断面、時間-高度断面、時間-比湿断面、時間-緯度断面として示した。

第8章 結論

本研究では、南極昭和基地およびドームふじ基地における大気輸送経路について、その季節変化や気候値を導くと共に、南極氷床を涵養する水蒸気の輸送経路を推定した。

1. 1997年の昭和基地に到達する空気塊について、対流圏中層と下層における輸送の特長や季節変化について次のような点を明らかにした。

対流圏中層へ到達する空気塊は大半が大西洋上を移動しており、輸送経路長は風速の季節変化に依存していた。夏季には多くの空気塊は鉛直方向の移動が少なく、低圧部の影響から東側からの到達が増えているが、冬季にはほとんどの空気塊は偏西風帯側から対流圏下層を通過して到達していた。

対流圏下層へ到達する空気塊は1年を通じて低圧部が存在しているため、東沿岸や南極内陸部から大陸表面に沿って下降流となり、内陸側から到達する空気塊が大半で、夏季は東大陸沿岸からの数が多くなっていた。

2. 対流圏大気の南極氷床への輸送経路および起源の季節変化について、次のことが明らかになった。

昭和基地において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が、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。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）からの大気が流入していた。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リッジによる反時計回りの大気輸送が卓越していた。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・下層には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到達していることが表現された。

3. 南極氷床への降雪時の水蒸気輸送経路の推定について、以下のことが明らかになった。

昭和基地における降雪時には、水蒸気が多く含まれる大気は大西洋上の偏西風帯からプラネタリー波の蛇行によって転向され、到達直前に上昇して直接昭和基地に輸送されていた。他の天候時は直接海上から到達せず一旦大陸上に流入してから到達しており、降雪をもたらす大気輸送経路の特徴が得られた。

ドームふじ基地における降雪時には、中緯度側から水蒸気量の多い場所を通過してきた大気が水蒸気量の多い状態を保ったまま、内陸部まで侵入したトラフやプラネタリー波の蛇行に沿って流入していた。他の天候においては到着時に水蒸気量が少ない大気が輸送されていた。

沿岸部の昭和基地では一定方向からの大気輸送が卓越している故、天候によって分類された輸送経路の特徴が明確であるのに対し、内陸部のドームふじ基地においては様々な方向から大気輸送がされており、天候による大気輸送経路別の起源や到達する方向の特徴は明確に得られなかった。

ドームふじ基地における降雪量が多いブリザード時の大気輸送経路から、主に大西洋、インド洋起源の中緯度からの大気の流れが表され、内陸部を涵養する降雪起源を推定する事ができた。客観解析による降雪データでは、局地的な凝結・昇華過程を含む降雪は表現がされておらず、本研究では降雪量の多い擾乱性の降雪と局地的な降雪を地上気象観測データから分類し、それぞれの特徴を得る事が出来た。今後、掘削コアデータの解釈をするためにも、客観解析データ等を用いて算出される

水蒸気輸送経路・起源の推定は求められており、その上で重要な情報を得られたと考えられる。

本研究では1990年から1999年における客観解析気象データを用いた大気輸送経路について、南極沿岸部と内陸部における違いについて調べた。現地気象観測値から天候データを作成し、天候別の大気輸送経路から降雪時の水蒸気輸送経路と起源の推定を行った。南極氷床を涵養する積雪は、内陸部には発達した総観規模擾乱が侵入することによってもたらされてることに着目し、その水蒸気輸送経路と起源を推定する試みがされた。

謝辞

本研究を進めるにあたって、本学入学以来、主任指導教員として山内恭教授（総合研究大学院大学 / 国立極地研究所）には終始ご指導、貴重なご助言をしていただきました。ここに深謝します。同研究所、平沢尚彦助手には研究内容の議論、ご指導だけでなく研究に対する姿勢を含め多くのアドバイスを賜りました。同研究所、和田誠教授には現地観測に関する情報、体験を始め、国立極地研究所ならではのご享受、論文作成のご助言をして頂きました。

山崎孝治教授（北海道大学大学院）には、大気力学を始めとする本研究の考察について重要なご助言を多々していただきました。藤田耕史助教授（名古屋大学大学院）には、現地観測データの提供および論文作成のアドバイスをしていただきました。東久美子助教授（国立極地研究所）には本研究の考察および論文作成に関してご助言をしていただきました。

富川喜弘博士（国立極地研究所）にはデータの加工・プログラムの作成、および大気力学に関するご指導、議論をしていただきました。同研究所、本山秀明教授には現地観測データの提供およびデータ解釈のご指導を賜りました。原圭一郎助手（福岡大学）には現地観測データの解釈を始めとする様々なご助言をいただきました。澁谷和雄教授（国立極地研究所）、藤田実希子研究員（地球観測フロンティア）にはGPSデータの解析に多大なご協力をしていただきました。

国立極地研究所気水圏グループの皆様にはゼミ等を通じて様々なご助言、励ましの言葉をいただきました。総合研究大学院大学の諸先輩方、後輩の方々には在学中大変お世話になりました。気象学会において、多くのご指摘、議論をしていただき、本研究を発展させることが出来ました。ここに、感謝の意を表します。

最後に、支えてくれた父と母に心より感謝します。

参考文献

- Bromwich D. H. and Weaver, C. J. (1983): Latitudinal displacement from main moisture source controls $\delta^{18}\text{O}$ of snow in coastal Antarctica, *Nature*, 301, 13, 145-147.
- Bromwich, D. H., Robasky, F. M., Cullather, R. I. and Van Woert, M. L. (1995): The atmospheric hydrologic cycle over the Southern Ocean and Antarctica from operational numerical analyses, *Mon. Wea. Rev.* 123, 3518-3538.
- Bromwich, D. H., Rogers, A. N. Kallberg, P., Cullather, R. I., White, J. W. C. and Kreutz, K. J. (2000): ECMWF analyses and reanalyses depiction of ENSO signal in Antarctic precipitation. *J. Climate*, 13, 8, 1406-1420
- Bromwich, D. H., and Fogt, R. L. (2004): Strong trends in the skill of the ERA-40 and NCEP/NCAR Reanalyses in the high and middle latitudes of the Southern Hemisphere, 1958-2001. *J. Climate*, 17, 4603-4619.
- Cullather, R. I., Bromwich, D. H. and Grumbine, R. W. (1997): Validation of operational numerical analyses in Antarctic latitudes, *J. Geophys. Res.*, 102, 13861-13784.
- Delmonte, B., Petit J. R., Krinner G., Maggi V., Jouzel J. and Udisti R. (2005): Ice core evidence for secular variability and 200-year dipolar oscillations in atmospheric circulation over East Antarctica during the Holocene. *Climate Dynamics*, DOI 10.1007/s00382-005-0012-9.
- Eneroeth, K., Aalto, T., Hatakka, J., Holmen, K., Laurila, T. and Viisanen, Y. (2005): Atmospheric transport of carbon dioxide to a baseline monitoring station in northern Finland. *Tellus*, 57B, 5, 366-374.
- Eneroeth, K., Kjellstrom, E. and Holmen, K. (2003): Interannual and seasonal variations in transport to a measuring site in western Siberia and their impact on the observed atmospheric CO₂ mixing ratio. *J. Geophys. Res.*, D108, 21, ACH 3-1 - ACH 3-18.
- Fujita, K. and Abe, O.
(2006): Stable isotopes in daily precipitation at Dome Fuji, East Antarctica. *Geophys.*

Res. Lett., 33(18), L18503, doi:10.1029/2006GL026936.

Giovinetto, M. B., Yamazaki, K., Wendler, G. and Bromwich D. H. (1997): Atmospheric net transport of water vapor and latent heat across 60S, *J. Geophys. Res.*, D10, 102, 11171-11179.

Gatebe, C. K., Tyson, P. D., Annegarn, H., Piketh, S. and Helas, G. (1999): A seasonal air transport climatology for Kenya, *J. Geophys. Res.*, 104, D12, 14,237–14,244.

Genthon, C., and Braun, A. (1995): ECMWF analyses and predictions of the surface climate of Greenland and Antarctica. *J. Climate*, 8, 2324–2332.

Hara, K., Osada, K., Kido, M., Matsunaga, K., Iwasaka, Y., Hashida, G. and Yamanouchi, T (2004): Variations of constituents of individual sea-salt particles at Syowa Station, Antarctica. *Tellus*, 57B, 230-246.

Harris, J. M. (1992): An analysis of 5-day midtropospheric flow patterns for the South Pole: 1985-1989. *Tellus*, 44B, 409-421.

Hartmann, D. L. and Lo, F. (1998): Wave-Driven Zonal Flow Vacillation in the Southern Hemisphere, *J. Atmos. Sci.*, 55, 1303-1315.

Helsen, M. M., van den Wal, R. S. W., van den Broeke, M. R., Masson-Delmotte, V., Meijer, H. A. J., Scheele, M. P. and Werner, M. (2006). "Modeling the isotopic composition of Antarctic snow using backward trajectories: Simulation of snow pit records." *J. Geophys. Res.*,111(D15109): 2005JD006524.

Hirasawa, N., Hayashi, M., Kaneto, S. and Yamanouchi, T. (1999): Data Project on Atmospheric Circulation and Material Cycle in the Antarctic, Par1. Aerological Sounding Data at Dome Fuji Station 1997. JARE Data Report, 238 (Meteorology 32), 1-6.

Hirasawa, N., Nakamura, H. and Yamanouchi, T. (2000): Abrupt changes in meteorological conditions observed at an inland Antarctic station in association with wintertime blocking. *Geo. Res. Lett.*, 27, 13, 1911-1914.

- Jones, D. A. and I. Simmonds, 1993: A climatology of Southern Hemisphere extratropical cyclones. *Climate Dynamics*, 9, 131-145.
- Kahl, J. D., Harris, J. M., Herbert, G. A. and Olson, M. P. (1989): Intercomparison of three long-range trajectory models applied to Arctic haze. *Tellus*, 41B, 524-536.
- Kida, H. (1983): General Circulation of Air Parcels and Transport Characteristics Derived from a Hemispheric GCM Part2. Very Long-Term Motions of Air Parcels in the Troposphere and Stratosphere. *J. Met. Soc. J.*, 61, 4, 510-523.
- Kim, Y., H. Hatsushika, R. R. Muskett, and K. Yamazaki (2005): Possible effect of boreal wildfire soot on Arctic sea ice and Alaska glaciers, *Atmos. Env.*, 39, 3513-3520, doi: 10.1016/j.atmosenv.2005.02.050, 2005.
- Kottmeier, C. and Fay, B. (1998). Trajectories in the Antarctic lower troposphere. *J. Geophys. Res.*, D 103(D9): 10009-10020.
- Morimoto, S., Nakazawa, T., Aoki, S., Hashida, G. and Yamanouchi, T. (2003): Concentration variations of atmospheric CO₂ observed at Syowa Station, Antarctica from 1984 to 2000. *Tellus*, 55B, 170-177.
- Motoyama, H., Kawamura, Y., Kanao, M., Hirasawa, N., Kaneto, S. and Yamanouchi, T. (1999): Glaciological Data Collected by the 38th Japanese Antarctic Research Expedition during 1997-1998. *JARE Data Report*, 239 (Glaciology 28), 1-74.
- Motoyama, H., Hirasawa, N., Satow, K., and Watanabe, O. (2005): Seasonal variations in oxygen isotope ratios of daily collected precipitation and wind drift samples and in the final snow cover at Dome Fuji Station, Antarctica. *J. Geophys. Res.*, 110, D11106, 10.1029/2004JD004953.
- Oshima, K., and Yamazaki, K. (2004): Seasonal variation of moisture transport in the polar regions and the relation with annular modes. *Polar Meteorol. Glaciol.*, 18, 30-53.
- Parish, T. R. and Bromwich, D. H. (1997): On the forcing of seasonal changes in surface

pressure over Antarctica *J. Geophys. Res.*, 102, D12, 13785-13792.

Randel W. J. (1988): The seasonal evolution of planetary waves in the Southern Hemisphere stratosphere and troposphere. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 114, 1385–1409

Renwick, J. A. and Revell, M. J. (1999): Blocking over the South Pacific and Rossby Wave Propagation, *Mon. Weath. Rev.*, 127, 2233-2247.

Reijmer, C. H. and van den Broeke, M. R. (2001): Moisture source of precipitation in Western Dronning Maud Land, Antarctica. *Antarctic Science* 13(2): 210-220.

Reijmer, C. H., van den Broeke, M. R., and Scheele, M. P. (2002): Air Parcel Trajectories and Snowfall Reated Five Deep Drilling Locations in Antarctica Based on the ERA-15 Dataset. *J. Climate*, 15, 1957-1968.

Schlosser, E., Reijmer, C., Oerter, H. and Graf, W. (2005). The influence of precipitation origin on the $\delta^{18}\text{O}$ - T relationship at Neumayer station, Ekstromisen, Antarctica." *Annals of Glaciology* 39: 41-48.

Schwarz, G., Kowski, P., Kaneto, S., Gernandt, H. (1996): Stable Isotopic Composition of Antarctic Air Moisture and Precipitation, *Antarctic Record*, 40, 2, 169-178.

Seko, K. (1991): PRELIMINARY STUDY OF KATABATIC WIND BY USING NOAA AVHRR DATA. *Proceedings of the NIPR Symposium on Polar Meteorol. Glaciol*, 5, 167-173.

Stohl, A., Forster, C., Eckhardt, S., Spichtinger, N., Huntrieser, H., Heland, J., Schlager, H., Wilhelm, S., Arnold, F. and Cooper, O. (2003): A backward modeling study of intercontinental pollution transport using aircraft measurements. *J. Geophys. Res.*, 108D, 12 : ACH 8-1 - ACH 8-18.

Stohl, A., Wotawa, G., Seibert, P. and Kromp-Kolb, H. (1995): Interpolation errors in wind fields as a function of spatial and temporal resolution and their impact on different types of kinematic trajectories. *J. App. Meteorol.*, 34(10): 2149-2165.

- Thompson, D. W. J. and J. M. Wallace, Annular Modes in the extratropical circulation. Part I: Month-to-month variability, *J. Climate*, 13, 1000-1016, 2000.
- Tomikawa, Y. and Sato, K. (2005): Design of the NIPR trajectory model, *Polar Meteorol. Glaciol.*, 19, 120-137.
- van den Broeke, M., van de Berg, W. J., van Meijgaard, E. (2006) : Snowfall in coastal West Antarctica much greater than preciously assumed, *Geo., Res., Let.*, 33, L02505.
- van Loon, H. and J. C. Rogers (1984): Interannual variations in the half-yearly cycle of pressure gradients and zonal wind at sea level on the Southern Hemisphere. *Tellus*, 36 A, 76-86.
- van Loon, H. (1972) : Temperature, pressure, and wind in the Southern Hemisphere. *Meteorology of the Southern Hemisphere. Meteorological Monographs, Volume 18 no. 35*, C. W. Newton, editor, American Meteorol. Soc., Boston, 25-100.
- Wyputta, U. (1997): On the transport of trace elements into Antarctica using measurements at the Georg-von-Neumayer station. *Tellus*, 49B, 93-111.
- Yamazaki, K. (1986): Preliminary Calculation of Trajectory Analysis in the Lower Stratosphere of the Southern Hemisphere. *Geophys. Res. Lett.*, 13, 1312-1315.
- Yamazaki, K. (1992): Moisture budget in the Antarctic atmosphere. *Proc. NIPR Symp. Polar Meteorol. Glaciol.*, 6, 36-45.
- 佐藤 薫 (2004): 南極昭和基地の気象. *天気*, 51, 869-879.
- 地上気象観測指針 (2002): 気象庁.