

第41次南極地域観測隊における 航空機による大気観測

猪原 哲¹, 和田 誠², 芝 治也³

Aerological and aerosol observations in the lower atmosphere using aircraft by the 41st Japanese Antarctic Research Expedition

By

Satoshi IHARA, Makoto WADA and Haruya SHIBA

Abstract: Continuous observations of aerosol number density, temperature and water vapor were carried out from 17 February 2000 to 19 January 2001 using aircraft around Syowa Station and along tracks of oversnow vehicle between Syowa Station and MD 210 point. 9 flights of Pilatus PC-6 aircraft were done around Syowa Station. 16 flights of Pilatus PC-6 aircraft and 18 flights of Cessna A185F aircraft were done between Syowa Station and Mizuho Station, only one flight of Pilatus PC-6 aircraft was done between Syowa Station and MD 210 point.

1. はじめに

第41次南極地域観測隊では、2000年2月～2001年1月までの期間、気水圏系大気グループの第5期5ヶ年計画「南極大気・物質循環観測」の一環として、航空機による南極上空の大気観測が実施された。「南極大気・物質循環観測」では、南極における大気循環場の変動と大気中の微量物質の挙動、及びその関連を明らかにすることを目的としている[1, 2]。第38次隊において、大気中のエアロゾルの高度プロファイル、大気場の状態を知るための観測、微量成分の採取などが行われた[3, 6]。第38次隊夏期および第39次隊夏期では、昭和基地での回収気球実験により成層圏までの微量気体の採取が行われた[7, 8]。昭和基地では長期の気象定常部門による大気場の観測(例として、Japan Meteorological Agency, 1996, Antarct. Meteorol. Data, 36, 356 p.)、気水圏系による微量気体、エアロゾルの観測が

平成13年11月1日受理

1 佐賀大学理工学部電気電子工学科, School of Science and Engineering, Department of Electrical and Electronic Engineering, Saga University, 1, Honjo-machi, Saga, 840-8502.

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

3 高知工業高等専門学校, Kochi National College of Technology, 1, Mononobe 200, Nangoku shi, Kochi 783-8508.

行われている[9]。また昭和基地での衛星データの取得による広範囲の大気状態(特に、雲、水蒸気)の解析が行われている[10]。第41次隊ではこれらのデータを参考にしながら、点から線への大気データの取得(高度方向を含めた)を、航空機を用いて目指した。

当初、みずほ基地付近までの観測飛行の実施を週1回で計画していたが、天候等の制約から2000年2月、3月、4月、8月、9月、11月、12月、2001年1月の昭和基地みずほ基地間の月平均約2回の観測飛行、2000年11月21日の昭和基地から内陸500km付近までの1回の観測飛行が実施された。

今回の観測の主な目的は以下の通りである。

- (1) 内陸域の水蒸気量は沿岸域(昭和基地)の水蒸気量と比較してどのように違うのか。
- (2) 上空のエアロゾルは内陸域に行くにつれてどのように変化するのか。
- (3) 季節による変化は内陸域と沿岸域とで異なるのか。
- (4) $0.01\mu\text{m}$ 以上の粒径のエアロゾル数濃度と $0.3\mu\text{m}$ 以上の粒径のエアロゾル数濃度の変動は異なるのか。
- (5) 水蒸気量の変動とエアロゾル数濃度の変動は関連しているのか。

この報告では、どのような観測を行い、どのようなデータが得られているかについて紹介する。

2. 観測飛行の経過

2000年2月17日にテストを兼ねた観測飛行が、ピラタス機(PC6)によって昭和基地周辺で実施された。以後4月27日に極夜期前の最終観測飛行が行われるまで、内陸飛行、昭和基地上空飛行(大気微量成分の高度分布観測)が実施された。5月、6月、7月は天候不良と極夜の条件下であったため飛行はできなかった。8月4日に極夜期後の初観測飛行がピラタス機によって実施された。この飛行では昭和基地上空で、2台の温湿度計、2台のエアロゾルパーティクルカウンターの比較観測を実施した。その後内陸飛行、昭和基地上空飛行が2001年1月19日まで行われた。この間9月25日から11月27日までみずほ基地に4名滞在中飛行場を開設し、みずほ基地より内陸の飛行を計画した。しかし、天候不良等により、みずほ基地着陸観測飛行は11月19日から21日までの連続3日間のみであった。この内の11月21日には内陸地点(MD210:みずほ基地から約230km内陸)までの往復観測飛行を実施した。内陸飛行は通常セスナ、ピラタス2機で、昭和基地上空飛行はピラタス機のみで行われた。

3. 観測方法

41次隊で内陸飛行は定高度飛行とした。この報告の中で使用している定高度というものは、使用した飛行機は気圧から高度に換算した高度計で運航しているため、気圧高度一定であることを意味する。また第41次隊ではピラタス、セスナ2機による観測が可能であり、ピラタス機では往路及び復路で6000m、4500mの2定高度飛行、セスナ機では往路及び復路で2400m、3000mの2定高度飛行を原則とした。みずほ基地の標高が約2200mなので定高度飛行の最低高度を2400mとした。この方法で、地上から6000mまでのほぼ1500m間隔の4高度のデータが取得できる。飛行航路(図1を参照)は昭和基地からS16地点を經由してみずほ基地までの通常の地上ルートに沿った。この航路ではピラタス機は、航続距離の制約により、通常Z40地点までの往復飛行となった。セスナ機は通常みずほ基地までの往復としたが、みずほ基地より内陸の飛行が予定より少なかったため12月半ばからみずほ基地より約60km内陸のMD60地点までの往復飛行とした。またみずほ基地に着陸した飛行を除けば、飛行開始から飛行終了までの時間は長い飛行で約4時間であり、データを解釈するとき、大気状態の時間変動は通常無視できると考えられる。

内陸飛行時の搭載機器について述べる(表1)。ピラタス機の観測用機器は、Vaisala社のHMP235温湿度計およびPT202気圧計、Buck Research社のCR2露

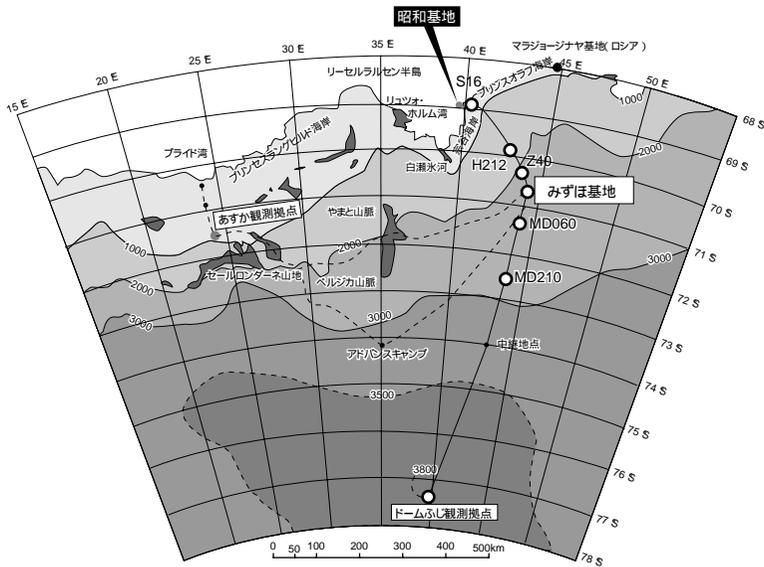


図1 観測飛行ルート及び関連地点。

表1 内陸観測時のピラタス，セスナ機搭載機器．

機体	機器名	メーカー	型名
ピラタス	温湿度計	Vaisala	HMP235
	気圧計	Vaisala	PT202
	露点計	Buck Research	CR 2
	パーティクルカウンター	シグマテック	TD200
	凝縮粒子カウンター	TSI	3010CPC
	GPS	SPA システムプロデューサーソシエイツ	ジュピター
	インパクト -	PIXE International	Inertial Impactor Model I-1
セスナ	温湿度計	Vaisala	HMP235
	気圧計	Vaisala	PT210
	露点計	Buck Research	1011B
	パーティクルカウンター	シグマテック	TD100
	GPS	日本電素	GPSR-5200
	インパクト	PIXE International	Inertial Impactor Model I-1

点計，シグマテック社の TD200パーティクルカウンター，TSI 社の3010凝縮粒子カウンターである．また位置情報取得のために GPS を搭載した．更に月1回は Vaisala 社の AVAPS ドロップゾンデシステム(Hock and Franklin, 1999) を搭載した観測，月1回から2回は電子顕微鏡用メッシュ上にエアロゾルを採取する PIXE International 社のインパクト (Inertial Impactor Model I 1) を搭載した観測を実施した．セスナ機の観測用機器は，Vaisala 社の HMP235温湿度計および PT 210気圧計，Buck Research 社の1011B 露点計，シグマテック社の TD100パーティクルカウンターである．また位置情報取得のために GPS を搭載した．更に月1回から2回は電子顕微鏡用メッシュ上にエアロゾルを採取する同上のインパクトを搭載した観測を実施した．

観測用機器のうち，温湿度計のセンサー部，露点計の空気取り入れ口，は両機とも，左側の窓板を，専用のアルミ板に，交換して取り付けした．またパーティクルカウンター，凝縮粒子カウンターおよびインパクト用の空気は，左翼の支柱の上端付近に固定した取り入れ口から，直径約30mmのシリコンタイゴンチューブを用いて，上記のアルミ板を通して機内に取り入れた．機内にある空気の流速を調整するためのバッファ容器へこのチューブをつなぎ，そこから各機器へ引き込んだ．各機器はそれぞれ独自に吸引ポンプがあり必要流量を吸引した．更にバッファ容器には余った空気を逃がす出口がある．図2に空気取り入れ

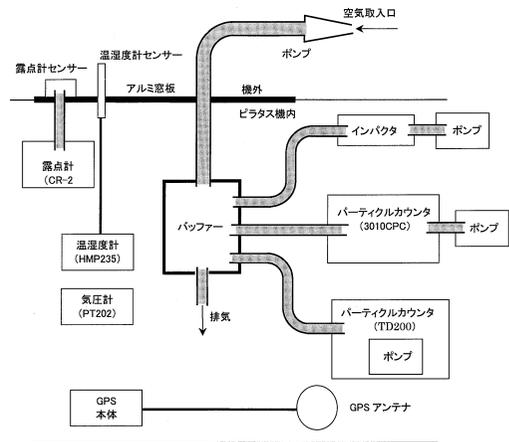


図2 通常観測用機器，インパクトの配管及び配線の概略図．影のある線は空気用チューブ．黒い線はケーブル．

口から観測機器までの配管の概略図を示す．

通常観測用機器は両機とも1枚のハニカムパネル上に固定されている．このパネルを機内の床に固定した．パネルには温湿度計変換部，気圧計，露点計本体，各カウンター，バッファ容器を固定した．ピラタス機搭載の凝縮粒子カウンターは吸引ポンプを内蔵していないため，別に吸引ポンプが必要であるが，これもこのパネルに取り付けた．更に取り外しが簡単な固定方法で，データ収録用パーソナルコンピュータ2台を取り付けた．GPSのアンテナは気体の金属部の影響を受けないように副操縦席の上部の日よけの上に取り付

けた。

インパクターは、粒径を4つに分け採取するものと2つに分け採取するものの2種類があり、どちらも流量計を介して、1台のポンプで空気を吸引し、エアロゾルを採取した。吸引時間は約30分間とし、ほぼ同じ気圧高度での採取とした。このインパクターによるエアロゾル採取観測は6回行われた。

4. データ収録と処理

搭載機器の内、気圧計、温湿度計、パーティクルカウンターデータのデータはRS232Cデータとして出力される。また露点計データのアナログ出力はA/D変換、RS232Cデータへの変換が行われる。これらのデータを6チャンネルのマルチプレクサーに入力し各チャンネルをスキャンしながら決められたタイミングで1台のパソコンに出力する。パソコンではリアルタイムのグラフ表示、ハードディスクへの書き込みを行う。それぞれのデータは独立のファイルに時刻データとともに書き込まれる。マルチプレクサーのチャンネルスキャンは早くないため、それぞれのデータの収録時刻は数秒ずれる。またカウンターのデータは約60秒に1回出力される。

一方GPS、CR2露点計（ピラタス機のみ）のデータは上記のパソコンとは別のもう1台のパソコンに出力される（CR2のデータは上記のパソコンとこのパソコン両方に出力される）。GPSからはRS232Cを通して収録時刻、1秒前のデータから緯度経度データを計算しているかの有無、計算された緯度経度・高度・移動速度などのデータを1秒ごとに出力し、このデータはハードディスクに収録される。CR2からのデータはA/D変換後パソコンに取り込まれ、収録時刻とともに0.5秒ごとに、グラフ表示、ハードディスクへの書き込みが行われる。

2台のパソコンの時刻、GPSの時刻を利用するため、これらの時刻を同時刻に合わせなければいけないが、観測当日の朝に時刻あわせを行った。

得られたデータは同時刻のデータでないため、これらのデータを同時刻のデータとする必要がある。このため気圧計、温湿度計、露点計、GPSの生データはそれぞれ10秒間の平均のデータを作成し、それを同時刻データとして解析に利用した。またパーティクルカウンターのデータを他のデータと比較するために、上記データ、カウンターデータすべての2分間平均のデータを作成し、同時刻データとして用いた。以下の

解析で使用したデータは同時刻データになおしたデータを使用している。

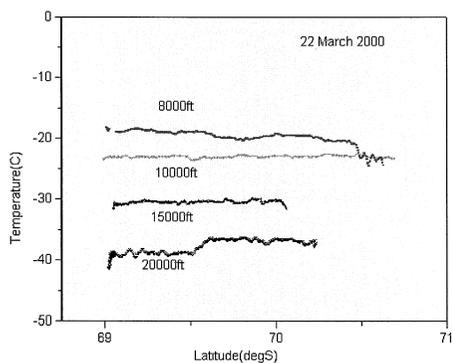
5. 観測結果と考察

まず、2000年3月22日の気温、水蒸気量、エアロゾル数濃度のデータを図3に示した。横軸は緯度である。沿岸から内陸に向かっている。2400mの気温以外はほぼ一定である（図3a）。6000mの気温は69度30分から40分の所で急に上昇しているが、これは6000m（450hPa）に雲があり高度を少し下げたため（450から480hPa）であり、その後はほぼ一定である。2400mの気温はばらつきはあるがみずほ基地に近づくにつれて緩やかに下がっている。みずほ基地の少し手前から急に下がり、その後あがりたり下がったりしている。みずほ基地は約2220mにあり2400mの高度で飛行すると雪面の影響を徐々に受け、みずほ基地の手前から接地境界層の影響を強く受けていることを示している。

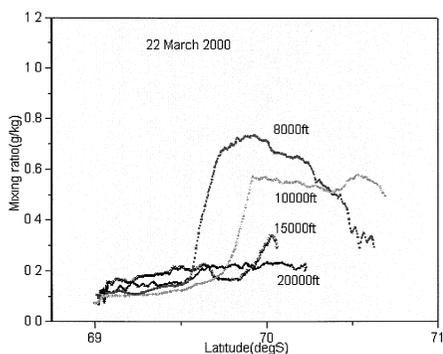
水蒸気については図3bから判るが、水蒸気量は気温に比べて、表面からもっと高い高度まで接地境界層の影響がある。2400mを見ると69度30分地点から急激に増加している。70度付近からは減少となる。夏のケースでは表面近くの水蒸気量は表面に近づくにつれて急激な増加であったが、冬のケースでは、表面に近づくにつれて減少であるため、70度付近から減少している。冬は相対的にカタバ風が強く地吹雪量も多い。このため地表面起源の水蒸気は高い高度まで混合により輸送されると考えられる。このケースでは69度50分付近から4500mで水蒸気量が増加しているが、地表面の水蒸気が影響しているのではないかと考えられる。一方どの高度においても69度30分より沿岸側では水蒸気量が少なく場所による変化もほとんどない。

図3cにエアロゾル数濃度を示した $0.01\mu\text{m}$ 以上の粒子の数は70度付近から内陸で増加しているが、それまでは高度に関係なくほぼ一定である。また $0.3\mu\text{m}$ 以上の粒子については6000m、4500mでは所々で逆相関になっている。またこの粒径でも70度付近から内陸で増加している。一方2400m、3000mの $0.3\mu\text{m}$ 以上の粒径の増減を見ると、69度30分より内陸側で、変動量は少ないが図3bの水蒸気量の変化に似ていることが判る。

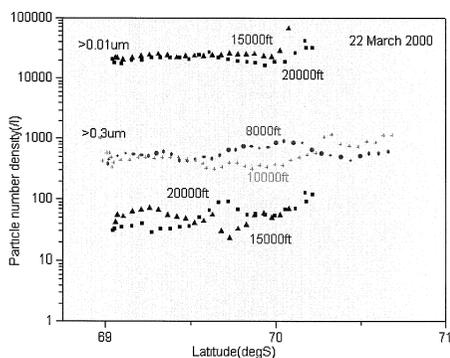
次に8月18日の気温、水蒸気量を図4に示した。2400mの飛行で、みずほ基地付近で3月20日と同様接地逆転層に侵入している。このために気温も、水蒸気量も急激な変動をしている。その他の高度の気温につ



(a)

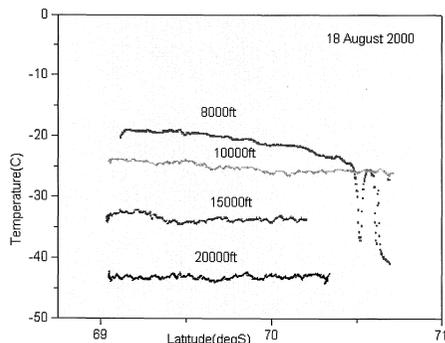


(b)

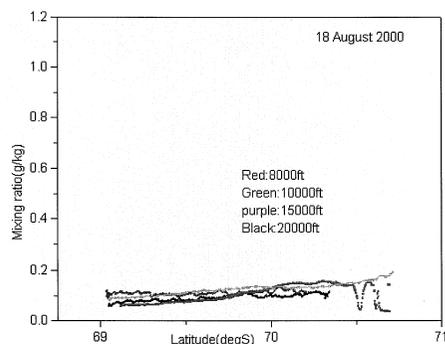


(c)

図3 2000年3月22日の飛行機観測で得られた気温(a), 水蒸気量(b), $0.01\mu\text{m}$ 以上(3010CPC)と $0.3\mu\text{m}$ 以上(TD100 and TD200)のエアロゾル数濃度(c), の沿岸内陸間のデータ. 図9cの四角は6000m, 三角は4500m, プラスは3000m, 丸は2400m高度のデータである. 実際には6000mの飛行中, 高度を, 南緯69度30分から40分の所で, 450hPa から480hPa に下げた.



(a)



(b)

図4 2000年8月18日の飛行機観測で得られた気温(a), 水蒸気量(b)の沿岸内陸間のデータ.

いてはほぼ一定である. どの高度でも水蒸気量は 2 g / kg 以下で少ないが, 2400m, 3000mでは沿岸から内陸に向かって緩やかに上昇している. 特に2400mでは69度45分位から上昇が大きくなっている. 地表面の影響により上昇していると考えられる. 第38次隊での観測では, 3800mの定高度飛行を行っている. この観測ではこれらのケースと同様に, 内陸に向かって水蒸気量が上昇してことが多い. 3800m高度でもみずほ基地付近では地表面からの水蒸気の影響があるため, みずほ基地に近づくにつれて水蒸気量が増加しているのであろう. しかし3月22日と8月18日のケースどちらも水蒸気量が内陸に行くにつれて増加をしているが, 変化は全く異なっている. 地吹雪の強さ, 境界層内に沿岸からもたらされる水蒸気量などがこの異なる原因と考えられる.

最後に12月31日のエアロゾル数濃度, 相対湿度を図5に示した. 図5aには6000m, 4500mの $0.01\mu\text{m}$ 以上

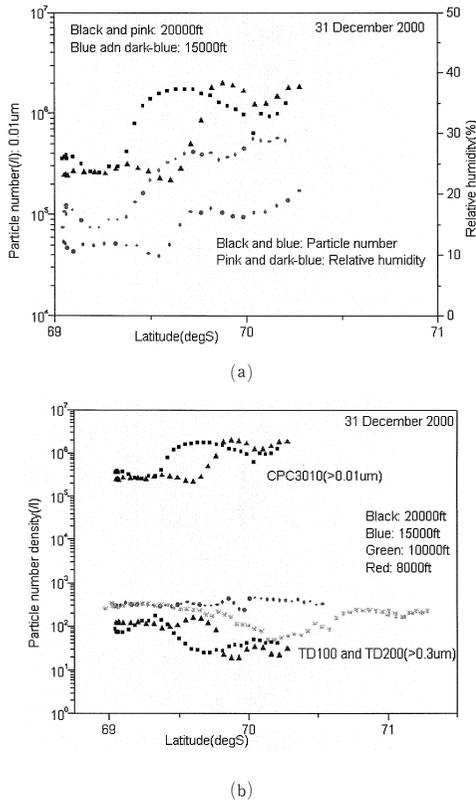


図5 2000年12月31日の飛行機観測で得られた $0.01\mu\text{m}$ 以上(3010CPC)のエアロゾル数濃度と相対湿度の沿岸内陸間のデータ(a), および $0.01\mu\text{m}$ 以上(3010CPC)と $0.3\mu\text{m}$ 以上(TD100 and TD200)のエアロゾル数濃度の沿岸内陸間のデータ(b). どちらの図も四角は6000m, 三角は4500m, プラスは3000m, 丸は2400mのデータである. また図11aの中抜きの四角と三角は相対湿度のデータを示す.

の粒径のエアロゾル数濃度と水蒸気量を示した. 6000mのエアロゾル数濃度は約69度25分から増加を始める. 約69度40分でピークとなり, その後減少している. 一方4500mのエアロゾル数濃度は約69度40分から増加を始め約69度50分でピークとなる. 2つの高度で変化がこのように異なっている. 相対湿度を見ると6000m, 4500mそれぞれエアロゾル数濃度とよく似た変化を示していることが判る. 相対湿度の代わりに水蒸気量を用いてもほぼ同じ変化が見られるが, 形から判断すると相対湿度で比べた方がよりよい相関にあるように見える. 4500m, 6000mでの現象であり地表面の影響はほとんどないと見られるので, 6000mでは約69度25分から4500mでは約69度40分から内陸側と沿岸側で気塊

が異なっているのであろう. このケースは夏のケースであり, 低緯度側からの水蒸気やエアロゾルを沢山含んだ気塊が内陸まで侵入することは十分考えられる. グラフから6000m高度の水蒸気量が4500mに比べ先に増加を始めている. この現象を説明するためには, 気塊の内陸への侵入の経路について考える必要がありそうである. 沿岸に達した水蒸気は, 下層は陸にぶつかり内陸への移動が遅くなる. 一方上層はそのままの早さで移動するため上層で先に水蒸気量が増加する可能性がある.

図5bには6000m, 4500mの $0.01\mu\text{m}$ 以上と4高度の $0.3\mu\text{m}$ 以上の粒径のエアロゾル数濃度を示した. $0.3\mu\text{m}$ 以上の数濃度では, 2400m, 3000mの濃度は4500m, 6000mの濃度より高いことが判る. 同じ飛行機(6000m, 4500mはピラタス機, 3000m, 2400mはセスナ機)での測定でないので断定はできないが, 下層のエアロゾル濃度が高いと言うことは妥当であろう. 同じ空気採取をしている $0.01\mu\text{m}$ 以上の数濃度と, $0.3\mu\text{m}$ 以上の数濃度を6000m, 4500mで比較すると, $0.01\mu\text{m}$ 以上の数濃度は6000m, 4500mで変化が異なっている. $0.3\mu\text{m}$ 以上についても同様に両高度で異なった変化が見られる. 例えば6000mの $0.01\mu\text{m}$ 以上の数濃度は約69度25分から増加し始めているが, $0.3\mu\text{m}$ 以上は約69度25分から減少を始めている. すなわち良い逆相関が見られるのである. 4500mについての両粒径の関係も逆相関がみられる. 相対湿度, $0.01\mu\text{m}$ 以上の粒径の数濃度, $0.3\mu\text{m}$ 以上の粒径の数濃度の3種の要素の関係はこれらを輸送する気塊について考えるとき面白い現象である.

6.まとめ

2000年2月17日から2001年1月19日までの気水圏系大気グループによる航空機観測について, 観測内容, また得られた結果の数例を示した. 沿岸域と内陸域との水蒸気量, エアロゾル数濃度の比較, 水蒸気量, $0.01\mu\text{m}$ 以上のエアロゾル数濃度, $0.3\mu\text{m}$ 以上のエアロゾル数濃度の関係, について簡単に紹介した.

謝辞

第41次観測隊航空隊員小谷野和幸, 鈴木雄一パイロット, 宮城寿之整備士3名による南極の厳しい自然の中での航空機オペレーションの実施に感謝いたします. 渡辺研太郎越冬隊長以下, 通信隊員, 気象定常隊員他ほとんど全員の方に航空機観測のための準備, 飛

行中の監視等手助けをいただきました。事故無く観測ができたことはひとえに関係皆様の援助に追っています。また機器の準備を含め、観測のための国内準備では、国立極地研究所山内恭博士を始め多くの関係者にご協力いただきました。厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- [1] 山内恭・平沢尚彦・林政彦(1999):「南極大気・物質循環観測」の開始。天気, 46, 157-162.
- [2] Yamanouchi, T., Hirasawa, N. and Hayashi, M. (1999) Report of observation project on "Atmospheric Circulation and Material Cycle in the Antarctic" by JARE-38. Polar Meteorol. Glaciol., 13, 157-162.
- [3] 林政彦(1999):ドームふじ観測拠点におけるエアロゾル・微量成分の観測。天気, 46, 153-156.
- [4] 平沢尚彦(1999):ドームふじ観測拠点における高層気象・放射・雲の観測。天気, 46, 147-152.
- [5] Hirasawa, N., Hayashi, M., Kaneto, S. and Yamanouchi, T.(1999) Data of project on atmospheric circulation and material cycle in the Antarctic. Part 1. Aerological sounding data at Dome Fuji Station in 1997. JARE Data Rep., 238 (Meteorol 32), 183p.
- [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. Geophys. Res. Lett., 27, 1911-1914.
- [7] Honda, H., Yajima, N., Yamagami, T., Izutsu, N., Aoki S., Hashida, G., Machida, T., Morimoto, S., Okano S., Yamanouchi T. and Nakazawa T.(1999) Stratospheric air sampling experiment at Syowa Station, Antarctica. Proc. 14th ESA Symp. on European Rocket and Ballon Programmes and Related Research, Potsdam, Germany, 31 May- 3 June 1999, 161-166.
- [8] Honda, H., Yajima, N., Yamagami T., Aoki, S., Hashida, G., Machida, T. and Morimoto S.(2000) Balloon operation for stratospheric air sampling at Antarctica. Adv. Space Rev. 26, 1369-1372.
- [9] Aoki, S., Nakazawa, T., Morimoto, S., Hashida, G., Shiobara, M. and Yamanouchi, T.(2000) Atmospheric CO₂ concentration observed at Syowa Station from 1984 to 1992. JARE Data Rep., 251 (Meteorol. 34), 55p.
- [10] Hirasawa, N. and Yamanouchi, T.(2000) Data of project on atmospheric circulation and material cycle in the Antarctic. Part 2. NOAA AVHRR images received at Syowa Station, Antarctica in 1997. JARE Data Rep., 248 (Meteorol. 33), 216p.