

## 「南極大気・物質循環観測」の開始\*

山内 恭<sup>\*1</sup>・平沢 尚彦<sup>\*2</sup>・林 政彦<sup>\*3</sup>

## 1. はじめに

第38次日本南極地域観測隊により、1997年の越冬から、第V期5か年計画の大気科学関係プロジェクト研究観測として「南極大気・物質循環観測」が始められた。これは、南極域における大気循環場の変動と大気中の微量物質の挙動、およびその関連を明らかにすることを目的としたものである。放射活性な温室効果気体やオゾン、関連物質、エアロゾル等の微量成分、さらには水蒸気等が、低緯度から高緯度に、南極沿岸から内陸へ、成層圏から対流圏へ、さらに大気圏から氷床にどのように輸送され、変質していくかという“物質循環”を、大気の流れ、大気循環場との関連で捕えていこうという計画である。

本計画に先だっては、「南極大気化学観測計画」(第33~37次; 1992年~96年)や「南極域における気候変動に関する総合研究(ACR)」(第28~32次; 1987年~91年)(山内, 1990; 和田ほか, 1990等)、さらには「南極中層大気」の総合研究計画(MAP)」(第23~26次; 1982年~85年)が実施されている。これらの中で、例えば大気中二酸化炭素濃度等の精密な測定が昭和基地で継続され、その結果、北半球中緯度と似たような経年変化で増加傾向を示すが、数年の遅れを伴っていること、明瞭な季節変化はあるものの、位相、振幅とも際だった違いがあること、経年変化傾向には年々の変動が顕著であることなどが明らかになってきた。

では何がこのような変化をもたらしているのか、将来はどのようになるのか、これらを明らかにするため

には、発生源の少ない南極域では輸送機構の解明がまず求められている。南極域は、微量物質のグローバルな変動を調べるのに大変都合の良い場所だということは分かってきたが、これまでの昭和基地(69°00'S, 39°35'E)のみによる地上一点観測では、これ以上のメカニズム解明は難しい。輸送機構の解明には、鉛直高度分布や広域の水平分布を調べることが必須である。1980年代に顕著になってきてグローバルにも影響が始めようとしている南極成層圏のオゾンホール現象の解明には、関連成分特に成層圏のエアロゾルの挙動を明らかにする必要がある、極渦内外の観測が必須である。さらには、極渦内での鉛直輸送が大気下端の雪氷面にも及び、積雪中の物質変動にも寄与している可能性もいわれるようになってきた。内陸のドームふじ観測拠点(77°19'S, 39°42'E, 海拔3810 m)では、一方では雪氷研究者を中心に氷床の深層掘削が深さ2500 mまで進んでおり(「氷床ドーム深層掘削観測計画」; 渡辺, 1996など)得られた氷床コアの解析結果の解釈にも、内陸域での、あるいは内陸域への物質の輸送過程の把握が重要になっている。また、時折発生するブロッキング現象の際に、低気圧は内陸まで進入し、雲も多くなり、気温が急上昇することが見られており(Enomoto *et al.*, 1998)、このような際の熱のみならず物質輸送への寄与がどのくらいあるかも興味あるところであった。なお、本計画は、集中的な観測ではあっても比較的短期間の観測となるものが多く、昭和基地を中心として、長期的に精密な観測を継続するためには、同時に「大気微量成分モニタリング」という課題を別途、推進している。

第38次観測隊では、ドームふじ観測拠点での越冬最終年、越冬観測最後の機会ということで、本観測も内陸を代表してドームでの観測を中心とし(第1図)、ライダーやゾンデ等の観測を実施した。これらと同期して、沿岸の昭和基地でも地上での観測、ゾンデによる

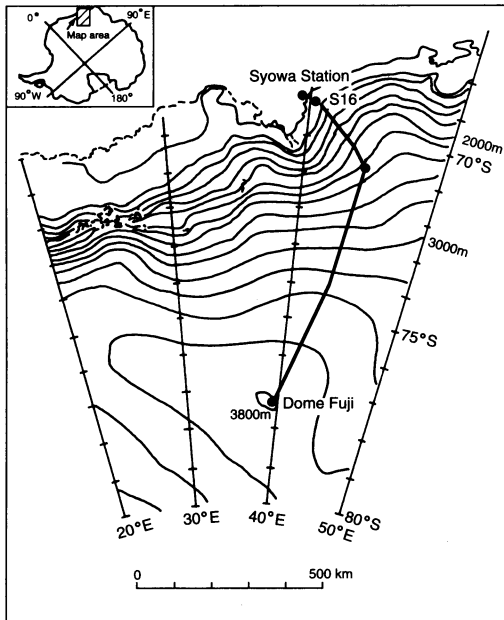
\* Observation Project on Atmospheric Circulation and Material Cycle in the Antarctic.

\*1 Takashi Yamanouchi, 国立極地研究所.

\*2 Naohiko Hirasawa, 国立極地研究所.

\*3 Masahiko Hayashi, 名古屋大学太陽地球環境研究所, 現在福岡大学理学部.

© 1999 日本気象学会



第1図 昭和基地とドームふじ観測拠点。

観測を実施した他、航空機による観測や大気サンプリング等を行った。38次夏期（1997年1月）には、回収気球予備実験を実施し、成層圏大気の採集に成功した。さらに、39次夏期計画では、回収気球実験の本番を実施、1998年1月3日大型のB30気球によりクライオジェニックサンプラーを飛揚、無事しらせによりサンプラーを回収した。これら多岐にわたる観測を通じて、いわば沿岸から内陸までの子午面断面図を描くことを目指している。本稿では、1998年1月頃までの、38次隊および39次夏隊による、これら観測の概況を報告する。

本観測を担当した隊員は、38次越冬隊では気水圏系隊員5名のうちの3名で、2名がドームふじ観測拠点にて越冬して専属、1名が昭和基地にて越冬して兼務という体制であった。昭和基地では、さらに定常気象担当隊員5名が加わったほか、隊長も口を出した。ドームふじ観測拠点では、副隊長が地上気象観測を担ったほか、越冬9名の内ほとんど全ての隊員が支援として関った。表1に関係者名を記す。さらに越冬最後に実施された回収気球実験は39次観測隊の計画であり、これには39次夏隊員の2名および越冬隊員1名が中心になって担当し、定常気象隊員ほか多くの協力を得た。

## 2. 長期計画

5か年の南極大気・物質循環観測の計画は以下の通りである。

38次：ドームふじ観測拠点での越冬観測を中心に、昭和基地でも同期した観測を実施する。夏期には回収気球予備実験やしらせ船上での観測も行う。

39次：夏期の回収気球実験を含め、昭和基地での観測を中心とし、エアロゾルに関して地上、ゾンデによる観測を継続するほか、海洋と大気との間の交換に焦点をあてた観測、大気-雪氷間交換にも注目する。定着氷下の海水中の溶存炭酸物質の季節変動の測定、ボーリング孔を利用した積雪中の大気-フィルンエア-サンプリングによる、微量気体の大気から雪氷への取り込まれ方の測定等。

40次：昭和基地での観測を継続する。オーリオールメータによる大気の光学的厚さ観測など。

41次：昭和基地での観測に加えて、航空機を使った内陸までの観測に重点をおく。内陸に（みずほ基地等）航空拠点を設け、沿岸からドームふじまで1000 kmの内、2/3をカバーすることを目指す。水蒸気、エアロゾル、ドロップゾンデによる観測などを行う。

42次：昭和基地での観測を継続する。

これら現地観測にあわせ、衛星データの解析等を進める。

本計画は、国立極地研究所の気水圏専門委員会にて提案・審議されたものであるが、その萌芽は日本気象学会の中の「極域研究連絡会」（現、極域寒冷域研究連絡会）でも再三にわたって議論され提唱された方向であった。「内陸への輸送過程」「内陸における流れの観測」「内陸ドーム域での下降流」「成層圏起源物質の雪面への取り込み」「内陸の雲とエネルギー収支」「沿岸から内陸までの子午面断面図」「成層圏-対流圏交換」「年間を通じたPSCsの挙動」「大気-海洋間交換」と言ったキーワードで表される方向が指向されており、これに答えるべく計画案が練られた。

さらに、同時期に、やはり第V期5か年計画の中の気水圏関連として、「氷床変動システムの研究観測」、「南極季節海水域の大気-海洋相互作用」を開始し、また長期にわたって継続するモニタリング研究観測も行なわれている。

本計画は、従前の計画のような国際的な協同研究との一対一の対応はなく出発しているが、WCRP/GEWEXやIGBP/IGAC、あるいは南極研究科学委員会(SCAR)/地球規模変動南極研究計画(GLO-

第1表 南極大気・物質循環観測担当隊員.

部門	氏名	所属 (当時)	所在
(38次)			
気水圏	平沢尚彦	国立極地研究所	ドームふじ越冬
	林 政彦	名大太陽地球環境研究所	〃
気象	深津 徹	東海電波監理局	昭和越冬
	江崎雄治	気象庁観測部	昭和越冬
	栗田邦明	〃	〃
	松島 功	〃	〃
	木津暢彦	〃	〃
	中嶋哲二	〃	〃
副隊長	金戸 進	気象庁観測部	ドームふじ越冬
隊長	山内 恭	国立極地研究所	昭和越冬
(39次)			
気水圏	青木周司	東北大学理学部	昭和夏
	町田暢敏	国立環境研究所地球環境	〃
	橋田 元	国立極地研究所	昭和越冬

CHANT) などの提唱する課題と密接に関連しており、今後協力関係を強める必要がある。なお、南極域の大気循環を明らかにし、気象の解析/数値予報の精度を向上させようという、SCARの大気物理・化学作業委員会(PACA)が企画したFROST(First Regional Observing Study of the Troposphere)計画は、1994年から95年1月にかけて現場観測の強化、解析が実施されている(Turner *et al.*, 1996)。

### 3. ドームふじ観測拠点における観測

38次観測隊での本計画の中心的課題として、ドームふじ観測拠点にて観測を実施した。これまで、36次、37次隊の越冬中には、氷床掘削に併せて地上気象観測等は行われてきたが、大規模な大気観測は初の試みであった。昭和基地から1000 kmとはるか遠く、標高は3800 mと高く、気圧も低く、かつ最低気温 $-79.7^{\circ}\text{C}$ という極めて低い気温で特徴付けられる場所での観測ということで、多くの困難が予想された。

高層気象観測として、GPSゾンデによる観測を1年間に約180回行った。2日ないし1週間に1回の観測を基本に、ブロッキング高気圧侵入時等には最高頻度で6時間毎の強化観測を行った。その他、強い接地逆転に特徴付けられる境界層をより詳しく調べるべくゾンデを係留した観測も実施した。

広域の大気循環場や、雲の影響を調べるため、放射観測を実施した。項目は下向き、上向き短波放射量、波長約 $0.7\ \mu\text{m}$ 以下の上向き短波放射量、下向き、上向き長波放射量の5項目である。同じく地上から雲分布を観測するため、赤外面像カメラによる測定、全天カ

メラによる撮影を行った。衛星からの雲観測の地上検証にも役立つ予定である。

大気中の微量成分については、エアロゾルを中心に、鉛直分布観測、地上連続観測、地上サンプリングを行った。鉛直分布については、小型のライダーによる観測を3月から12月にかけて行い、またエアロゾルゾンデによる観測をオゾンゾンデ観測と併せておよそ月1回の頻度で行った。対流圏から成層圏のエアロゾル、特に極成層圏雲の発達期から衰退期まで、極渦やオゾンホールとの関連も含め、一連の盛衰を捉えることができた。

地上では、光散乱式パーティクルカウンターや凝縮粒子カウンターにより、エアロゾル濃度の粒径分布連続観測が行われた。さらに、化学分析用エアロゾルサンプリング、酸性、アルカリ性ガスサンプリング、マイクロプローブ分析用サンプリング等が行われた。その他、地上オゾンやラドン濃度の連続観測も続けられた。

こうして、大気の循環場の特徴と、その中での、微量成分の挙動が明らかになるデータが得られたものと期待している。困難の中で得られた、興味ある成果については、別稿(平沢, 1999; 林, 1999)を参照されたい。

## 4. 昭和基地における観測

### 4.1 地上観測

エアロゾル濃度粒径分布連続観測のため2台の光散乱式パーティクルカウンター、凝縮粒子カウンターにより、粒子濃度を測定した(岩坂ほか, 1997)。

分析用エアロゾルサンプリングは、ハイボリュームエアースンプラーやメディアムボリュームインパクターにて、また酸性、アルカリ性ガスサンプリングも実施した。さらに、マイクロプローブ分析用エアロゾルサンプリングをローボリュームサンプラーにより実施した。

同位体比測定用に液体窒素を利用して、二酸化炭素を分離抽出サンプリングした。大気中の二酸化炭素を構成する炭素や酸素原子の同位体比を測定することで、二酸化炭素の発生源を推定するのに役立つというものである。

#### 4.2 航空機観測

上空の二酸化炭素はじめ温室効果気体濃度の高度分布を調べるべく、大気サンプリングが行なわれてきた。38次隊では、航空機はセスナ A185F スカイワゴン1機の運用であったため、地上約1 km から5 km ないし6.5 km の高さまで1 km 毎に、5～6 高度、昭和基地近傍の海水上で大気の採集を行った。

南極大陸沿岸から内陸までの鉛直分布を明らかにしようという水蒸気・エアロゾル粒子濃度観測を行った。ドームふじ観測拠点と昭和基地の間を埋める第一歩として、セスナ機で往復可能な範囲として昭和基地から約300 km のみずほ基地まで、ルートに沿った観測を実施した。昭和基地近傍海水上でドームふじ観測拠点の高度である3800 m まで上昇し鉛直プロファイルを取得した上、その高度で水平飛行し、みずほ基地付近で降下し、雪面上を斜面に沿って対地300ないし500 m の高度で戻る飛行コースとした。温・湿度計、気圧計の他、露点温度計、光散乱式パーティクルカウンター2台(上記4.1の地上で使用したもの)を搭載し、延べ7回の飛行を行った。

#### 4.3 エアロゾルゾンデ観測

定常気象部門と気水圏部門共同で、ドームふじでの観測と呼応しつつ6機のエアロゾルゾンデを飛揚し、粒径別のエアロゾル粒子濃度鉛直分布を測定した。6回の飛揚を行ったが、8月の結果では、昭和基地のこれまでの観測では例を見ない発達した極成層圏雲が捕えられた。オゾン量も少なくなっており、南半球高度場の図を見ても極渦の中心近くにあったものと考えられる。

#### 4.4 回収気球実験

上空大気中の安定微量気体成分の濃度やその同位体比を測定するための大気試料を気球によって採集しようというもので、極地研究所とともに、東北大学理学

部および宇宙科学研究所が積極的に進めてきた計画である。1998年1月3日、大気球 B30に、液体ヘリウムによって凝固採集するクライオジェニックサンプラーのゴンドラをつり下げ、飛揚した。高度10 km から30 km まで、11高度で大気を採集、パラシュートにより開水面に着水、途中ヘリコプターにより場所を確認しつつ、6日夕刻、観測船しらせにより無事回収した。

これに先立ち、予備実験として、1997年1月にはグラブサンプラーを搭載した小型ゴム気球を3機飛揚、しらせ搭載のヘリコプターにより海水上や大陸氷床から回収し、1996年1月に引き続き成層圏大気の採集に成功した。これは、上記大気球による回収気球実験が極めて難しいオペレーションを伴うため、気球の飛揚、ヘリコプターによる搜索、回収の予行演習を目的に実施したものであるが、比較的簡便な大気採集方法として、独自の意義も認められる(Honda *et al.*, 1996)。

#### 4.5 大気微量成分モニタリング

非分散赤外分析計による大気中二酸化炭素濃度の連続観測(青木・中澤, 1997)、ガスクロマトグラフによるメタン濃度の連続観測、紫外吸収法によるグシビオン計による地上オゾン濃度の連続観測を10年ないしそれ以上にわたって継続しており、ローカルな汚染の影響を受けない、グローバルな変動を知るのに最適な質の高いデータを提供し続けている。これらを支え、また比較、補充する意味で、国内外の機関の担当する大気のサンプリングを実施している。上記の温室効果気体の比較分析のためのみならず、CO、N<sub>2</sub>O、酸素、同位体比、ハロカーボン等の分析が行なわれるほか、現在は問題意識や分析技術の点から分析されていない成分について、将来的に必要な時点で利用すべく保存するという貴重な試料も含まれている。

成層圏成分として、可視分光器を用いたオゾン、NO<sub>2</sub>の観測を実施している(近藤・小池, 1997)。これは日の出、日の入り時の天頂散乱光を分光観測することで、気柱量を推定するものである。

この観測は、「モニタリング研究観測」と位置づけることになった。従って、今後も、長年にわたって貴重なデータを提供するものであるが、その維持継続には、並々ならぬ努力が必要で、そのためにも、極地研究所だけでなく、定常気象隊員の協力をあおいで観測を続けている。

なお、その他関連して、南極に往復する観測船しらせ船上においても、表層海洋中の二酸化炭素分圧や地

上オゾン、エアロゾルの観測などが行なわれている。北半球中緯度から南半球高緯度までの広い緯度範囲を定期的にカバーするプラットフォームとして、しらせは貴重な場となっており、かつて3年間にわたりオゾンゾンデによる緯度分布観測も行っている。

#### 4.6 衛星受信—NOAA衛星データ解析

新しいデータ受信・処理装置（Sea Space社製）を導入し、NOAA衛星の自動受信処理を開始した。これは、以前、1980年以来受信し1987年より現場処理も行ってきたところ、装置の老朽化等で、1991年で中止を余儀なくされていたものの再開である。NOAA 12と14の昭和基地近傍のパスを毎日4パス以上受信した。未だに、雪氷面上の雲識別には不確定性があり（Murata and Yamanouchi, 1997）、定量的な結果を導いてはいないが、リアルタイムでデータを見ることができ、海水の分布や雲の分布など、特に低気圧の渦の進展、内陸への進入などを見分けるのに大変参考になった。

#### 4.7 定常気象観測

気象庁の担当で、定常気象および関連の観測が行われている。

地上気象観測は、気圧、気温、露点温度、風向、風速、全日射量、日照時間について、連続自動観測を行っているほか、雲、視程、天気については3時間毎に目視観測を、大気現象については随時観測を行なっている。

高層気象観測は、上空約30 kmまでの気圧、気温、風向、風速、湿度の観測を、レーウィンゾンデにより行っている。

オゾン全量観測は、ドブソン分光光度計により実施している。極夜期は月光による観測を行った。1997年春期のオゾン量は、8月後半から目立ってきたが、9月には極渦の歪みが大きく、昭和基地がその内側に入るか、周辺になるかでオゾン全量の変動が大きいことで特徴付けられた。10月は安定して低い値が続き、最低値は10月12日の137DU (m atm-cm; 暫定値)であった。

オゾン濃度の鉛直分布をオゾンゾンデを用いて測定している。週1回の飛揚を原則とし、オゾンホール発達期の9～11月は週2回に増強したほか、ADEOS衛

星搭載大気周縁赤外分光計 (ILAS) の検証観測として (衛星故障発生後も継続)、冬期を中心に強化観測を行った。

放射観測は基準地上放射観測網 (BSRN: WMO-WCRP) の一環として、全日射量、直達日射量、散乱日射量、全放射量、長波長放射量、B領域紫外域日射量を連続測定している。そのほか、プリューフ分光光度計により紫外線スペクトルの測定、サンフォトメータによる6波長での大気混濁度の測定を実施した。併せて、ドイツ、アルフレッド・ウェーゲナー極地海洋研究所 (AWI) のサンフォトメータによる大気混濁度測定も実施し、こちらは月光による観測も行った。

上向き、下向き長波長放射量の鉛直分布を測定する輻射ゾンデを4月から10月の夜間、計20機飛揚した。快晴日および全天を上層雲あるいは中・下層雲の覆う条件下で実施した。

#### 5. おわりに

以上現在までの概況を南極からの帰路、しらせの船上で執筆した。各観測とも、解析、分析はこれから行なわれるが、結果のデータは極地研究所からデータレポートとして発表されるほか、各種学術雑誌に論文として発表される予定である。定常気象観測のデータについては、気象庁から発表される (JMA, 1999)。本計画は、これからもまだまだ続くものであり、皆さんの積極的な参加を期待する。同時に、取得したデータに興味ある方々も、共同研究を共に進めていくべく、声を上げていただきたい。

#### 参考文献

- 青木周司, 中澤高清, 1997: 昭和基地における大気中の二酸化炭素濃度の連続観測, 南極資料, 41, 161-176f.
- Enomoto, H., H. Motoyama, T. Shiraiwa, T. Saito, T. Kameda, T. Furukawa, S. Takahashi, Y. Kodama and O. Watanabe, 1998: Winter warming over Dome Fuji, East Antarctica and semiannual oscillation in the atmospheric circulation, J. Geophys. Res., 103, 23103-23111.
- Honda, H., S. Morimoto, H. Akiyama, G. Hashida, S. Aoki, H. Ui, T. Nakazawa, N. Yajima and T. Yamanouchi, 1996: A newly developed grab sampling system for collecting stratospheric air over Antarctica, Antarct. Rec. 40, 156-168.
- 岩坂泰信, 長田和雄, 林政彦, 宇井啓高, 1997: 南極昭

† 多くの参考となる文献を収録した「南極資料 vol. 41, No. 1, 南極域における気候変動に関する総合研究 (ACR) 報告集」は残部があるので、入手希望者は国立極地研究所気水圏グループに連絡。

- 和基地で観測されたエアロゾル粒子サイズ-数濃度の変動, 第20回極域気水圏シンポジウム講演予稿集, 61-62.
- Japan Meteorological Agency, 1999: Meteorological data at the Syowa Station in 1997, Antarctic Meteorological Data, (38), to be published.
- 国立極地研究所, 1998: 日本南極地域観測隊第38次隊報告, 589pp.
- 近藤豊, 小池真, 1997: 南極成層圏の窒素酸化物の化学, 南極資料, 41, 271-283.
- Murata, A. and T. Yamanouchi, 1997: Distribution characteristics of clouds over East Antarctica in 1987 obtained from AVHRR, J. Meteor. Soc. Japan, 75, 81-93.
- 村山昌平, 中澤高清, 青木周司, 1997: 南極上空におけるCO<sub>2</sub>濃度の変化, 南極資料, 41, 191-201.
- Turner, J., D. Bromwich, S. Conwell, S. Dixon, T. Gibson, T. Hart, G. Heinemann, H. Hutchinson, K. Jacka, S. Leonard, M. Lieder, L. Marsh, S. Pendlebury, H. Phillpot, M. Pook and I. Simmonds, 1996: The Antarctic First Regional Observing Study of the Troposphere (FROST) Project, Bull. Amer. Meteor. Soc., 77, 2007-2032.
- 和田 誠, 青木周司, 青木輝夫, 瀬古勝基, 1990: 第29次南極地域観測隊気水圏部門越冬報告1988, 南極資料, 34, 46-75.
- 山内 恭, 1990: 「南極域における気候変動に関する研究」経過報告, 天気, 37, 641-657.
- 渡辺興亜, 1996: 東南極大陸の頂, ドームふじ基地で越冬観測始まる, 天気, 43, 423-427.

### 新刊図書案内

表 題	編 著 者	出 版 者	出版年月	定 価	ISBN	備 考
松本の気象百年	松本測候所	日本気象協会 長野センター	1998.10	¥3,334		日本気象協会 長野センター Tel.026-235-1533
カミナリはここに落ちる: 雷から身を守る新しい常識	岡野大祐	オーム社	1998.12	¥1,700	4-274-02384-2	
わかりやすい天気予報の知識と技術	古川武彦	オーム社	1998.12	¥2,300	4-274-02385-0	
気象研究ノート193: つくば域降雨観測実験	吉崎正憲 中村 一 中村健治	日本気象学会	1999.01	¥3,310		日本気象学会事務局 Tel. 03-3212-8341 内2546 Fax.03-3216-4401 定価は個人会員の場合
わたしたちの生きている地球-調べ学習にやくだつ環境の本2: 天気がへんだ: 地球温暖化がわかる本	桐生広人 山岡寛人 多田ヒロシ 村沢英治	童心社	1999.01	¥2,800	4-494-01192-4	
わたしたちの生きている地球-調べ学習にやくだつ環境の本3: オゾンホールのおぞ: 大気汚染がわかる本	桐生広人 山岡寛人 多田ヒロシ 村沢英治	童心社	1999.01	¥2,800	4-494-01193-2	

注: 表中で定価はすべて本体価格です。