

極域研究連絡会 1992 年春季研究会

「南極域の物質循環」報告*

神 沢 博**・安 成 哲 三***

1992年日本気象学会春季大会の前日（5月25日）午後（14：30～17：30）に、気象学会大会C会場（工業技術院共用講堂、つくば）で、極域研究連絡会主催の標記研究会を開催した。参加者は約30名弱、司会は大畑哲夫氏（名大水圏研）であった。

大気中の物質循環問題は以下のように定義されよう：

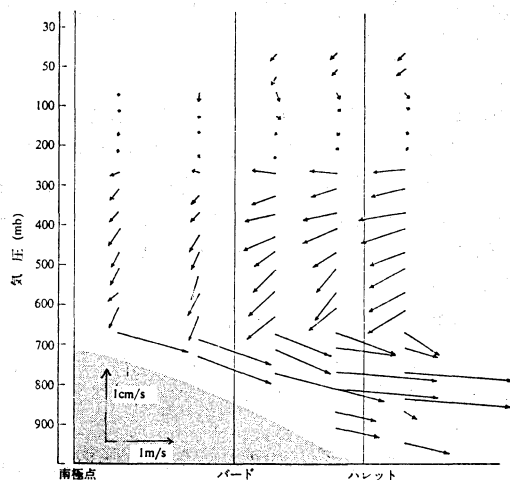
(1) 大気中に存在する物質が、どこでどのように生成し、あるいは、大気圏以外からどのようにして大気に取り込まれ、(2) 大気の運動によってどのように輸送され、その輸送途中でどのような変質を受け、(3) どこでどのように消滅する、あるいは、大気圏外へと取り出されるか？ この問題は、大気力学と大気化学を専門とする研究者との共同で解かれる性質の新しい問題である。

最初に、今回の話題提供者のほとんど全ての人が講演の中で使用した図を掲げる（第1図）。この図を掲載した本の編集をした神沢は、この図が含まれている章の執筆担当者であった故井上治郎氏（存命であれば、この研究会でも主役を演じたであろう）と議論しながら、この図の改作を行ったことを思い出す。

1. 趣旨説明

神 沢 博（極地研）

今回のテーマ「南極域の物質循環」は、雪氷学研究者を中心として現在進行中の「氷床ドーム深層掘削観測計画」にも深く関連し、かつ、「地球大気化学国際共同研究計画（IGAC）」の下で進められている南極大気化学研究計画等にも関連のあるテーマである。今回は、主に大気力学の観点からこの問題を議論する。また、その観点



第1図 放射冷却量から見積られた冬の平均子午面循環。

南極点（90°S）、バード（80°S、120°E）、ハレット（72°S、170°E）での放射ゾンデ観測（1959～1963年の6～7月）から、赤外放射による大気の冷却量および温度の時間変化を求め、その差が大気の鉛直流によるものとして、鉛直流速を見積った。南北流速は、その鉛直流速を使い、質量保存の式を満たすよう求めた。White and Bryson（1967, WMO Tech. Note, 87, 199-224）による図に風速のスケールを加えてある。国立極地研究所編（1988：南極の科学3 気象、古今書院）の図3.15より。

から今後の南極観測計画を議論し、この研究会を、その計画を煮詰めてゆく第一歩としたいと考える。今回の研究会以後も、このテーマの下で、主に大気化学の観点からの研究会、水循環をテーマとした研究会、大気力学および大気化学の総合的視点からの研究会、南極観測計画を詰める研究会等を開いてゆく予定だ。

* Report on the Workshop of Polar Research Committee (仮称), Spring 1992, "Material Circulation in the Antarctic".

** Hiroshi Kanzawa, 国立極地研究所.

*** Tetsuzo Yasunari, 筑波大学・地球科学系.

2. シンポジウム「地球気候における南極氷床の役割」 (1990年5月22日)のレビュー

安成哲三(筑波大・地球科学)

標記シンポジウム(プロシーディングスは「気象研究ノート」の一冊として編集)中の議論を参考に述べる。現在実施中の二つの観測研究プロジェクトと本日のテーマは深く関連している。一つは、「氷床ドーム計画からみた南極域の物質循環」であり、重要な問題の例として、「成層圏を含む氷期/間氷期の気候・環境変化」が挙げられる。もう一つは「IGACからみた南極域の物質循環」であり、例えば、「オゾンホールは南極に固有のものか」といった問題がある。この二つの問題を結ぶものとして、「PSCs (Polar Stratospheric Clouds: 極域成層圏雲)の氷期における活動度は?」といったテーマがある。氷床ドーム計画の深層掘削から得られるであろう氷床コアを分析した結果検出されるであろう物質は、(1)どこからやってきたか? (2)どのように変化したか? (3)どのようにばらまかれたものか? といった問題を考える際に、南極域の大気中の物質循環の研究が必要になってくる。

研究課題をまとめると、以下のようになる。 (1) 中層大気を含むモデルによる氷床の大気大循環に果たす役割, (2) 氷期と間氷期における物質循環の比較, (3) 大気-氷床モデルの確立。

氷床上積雪のトリチウム濃度は内陸ほど大きいことから、ドーム域の積雪、氷床コアの中の物質は、成層圏から入ってくるものをみている可能性が大きい。また、氷床コアに太陽活動の変動の名残が残っている可能性もある。冬には PSCs の active sedimentation が起こる可能性がある。物質の堆積の素過程が大事である: ドームで何がどの程度落ちてきているか? 南極大陸斜面を吹き下ろすカタバ風の気候循環に果たす役割も重要だ。カタバ風が発達すると気圧勾配を弱め、極うずの発達を止めてしまう。カタバ風強(弱)のとき極うず弱(強)という多重平衡解が存在する可能性がある。

3. 内陸域での気象観測の展開

榎本浩之(北見工大)

今年(1992年)出発する第34次南極地域観測隊(主観測年=1993年)で、ドーム F (77°S, 40°E; 3,800m) 基地および昭和基地(69°S, 40°E)からドームに雪上車で向かうルート上での地上気象観測を、榎本が中心になって行う。Automatic Weather Station (AWS) の展

開を米国が行っているが、ドーム F 域は空白地帯である。ドーム域と昭和の間の観測で、カタバ風の吹き出し域からカタバ風域までの実態を明らかにできることとなる。高度 3,600 m を境に積雪内の物質が大きく変化する。South Pole の気温、ドーム上の地域に近いプラトールでの地上気温をみると、数週間の時間スケールの大きな変動がある。ドームは雪氷ばかりでなく大気の観点からみても面白い場所である。

安成: ドーム基地での気象ゾンデ観測の計画は?

榎本: 1995または1996頃となろう。ゾンデ観測をするためのヘリウムガスポンプ等の輸送よりもドーム掘削計画のための物資輸送が今のところ優先する。34次隊では無人気象観測を実施する。大気成分の観測は榎本以外の隊員が行う。

大畑: ルート上よりもカタバ風の流線に沿っての観測、鉛直風を測れるような観測等、目的に沿った計画を作る余裕があることが望ましい。

安成: カタバ風の source 域から沿岸までを観測する。大気成分観測との組み合わせで面白い観測ができる。

廣田(京大理): カタバ風の時間変動のスケールはどのくらいか?

安成/榎本: 数十日のタイムスケールの変動が顕著。

廣田: そうであれば、榎本さんの観測でカタバ風を捉えることができるだろう。

田中(筑波大): 北極域でも気温の大きな変動がある。鉛直風をウインドプロファイラーで測るといい。

4. 南極域での大気および水蒸気の循環

山崎孝治(気象研)

トラジェクトリー解析と水蒸気輸送の話をする。

昭和基地上空 350~850 mb の空気の起源を NMC 客観解析データを使い、ラグランジュ的にさかのぼったトラジェクトリー解析を一日おきにはほぼ2年分、行った。ほぼ等温位面に沿って空気粒子が動くことがわかる。冬は対流圏上部・中部では上昇流で主に低緯度からやってくる。対流圏下部では下降流で南極大陸上からくるものが多い。これは、カタバ風に伴う循環で、冬の方が強い。夏は低緯度下層からもかなりくる。カタバ風が対流圏の循環を大きく規定しているようだ(e.g., Parish and Bromwich, 1991; J. Climate, 4, 135-146)。

冬に30日間さかのぼると成層圏からくるものがあるが、主に、中低緯度からきており、極渦の中での下降流はあまり見られない。対流圏の中・上層に成層圏からや

ってくる割合は冬より夏の方が多い。

水蒸気輸送を NMC データで調べた (Yamazaki, 1992; Proc. NIPR Symp. Polar Meteorol. Glaciol., 6, 36-45). ウェッデル海および昭和基地付近は水蒸気の南極大陸への入り道となっている。水蒸気フラックス収束は沿岸で大きな正 (1 mm/day 程度) であり、内陸部では負の領域もあるが、平均すると正となる。収束の値は南極域全体の平均では冬の方が大きい。

5. 大気微量成分から見た南極域での物質循環

村山昌平 (資環研)

30次隊 (主観測年=1989年) に参加し、CO₂、CH₄、対流圏 O₃ の観測を地上および航空機で行った。東北大学院で、その観測データを中心に、学位論文をまとめた。その一部を述べる。

対流圏一成層圏間の交換を O₃ データから調べたことがわかった。1989年3月下旬および9月中旬に高度6 km 以上で O₃ 濃度増加。この際の圏界面高度はそれぞれ約6 km および9 km。9月のケースは、高緯度側の成層圏起源の O₃ が対流圏にやってきたと考えられる。

また、物質循環の季節変動を CO₂ データで調べた。CO₂ の濃度 および その季節変化は、南半球では中緯度の方が高緯度より小さい。昭和基地では年間のほとんどの期間を通してわずかに上空ほど、濃度が高い。これらの事実は、南半球において CO₂ が高緯度へ運ばれるルートは対流圏下部ではなく、対流圏上部であることを示唆する。

微量気体の変動は大気輸送過程の影響を大きく受けることがこれらの観測からわかった。

牛丸 (沼津高専): 9月と3月の違いは? 圏界面の高さと下降流の関係はどう考えたらよいか?

神沢: 温度の鉛直分布は、放射冷却と大気の下流による断熱圧縮加熱のバランスで決まっている。3月の場合、下降流が十分強く、WMOで定義されている圏界面が6 km 程度とずいぶん低かった。9月の場合、それほど下降流が強くなかった、ということかもしれない。

廣田: 北半球からの輸送の効果と海との交換の効果を切り分けられるか?

村山: $\delta^{13}\text{C}$ の分析から、冬は主に北半球の生物圏との交換あるいは化石燃料消費の影響を受けた大気 (CO₂ 濃度変化に対する $\delta^{13}\text{C}$ の変化大)、夏は海との交換の影響を受けた南半球の大気 (CO₂ 濃度変化に対する $\delta^{13}\text{C}$ の変化小) が昭和基地にやってくるのではないかと推

察される。詳しくは今回の学会で発表をする。

廣田: 非常に興味深い研究だ。

山崎: 我々の大気循環モデルによる実験でも、大気輸送のトレーサーとして CO₂ は非常に面白いことがわかっていて。

6. 南極域での大気中の物質循環観測計画について

神沢 博 (極地研)

極域での物質循環問題の面白さを成層圏での水を例に挙げて述べ、次に、将来の観測計画について述べる。

南極オゾンホール形成にとって本質的と考えられる PSCs の主成分は水蒸気である。以下の二つの点が物質循環の問題として面白い。(1) 赤道対流圏界面の“Cold Trap”を生き延びた水蒸気が輸送によって極域に運ばれてくる。南極の冬の下部成層圏のように、赤道圏界面の温度以下になるような低温条件の下において、この水蒸気が他の大気微量成分とともに PSCs を作ると考えられている。(2) PSCs の粒子が重力落下する程度に大きく成長すれば、水と大気微量成分を含む粒子は成層圏から対流圏へ落ちてしまう可能性がある (e.g., Iwasaka and Hayashi, 1990; Proc NIPR Symp. Polar Meteorol. Glaciol., 3, 23-35)。そのような過程で南極大陸地表面に運ばれてきたと推測しうる硝酸、塩酸が、南極大陸内陸部の表面積雪中に見いだされている (e.g., Kamiyama *et al.*, 1989; J. Geophys. Res., 94, 18515-18519)。

氷床ドーム計画が、ここ数年、気水圏ばかりでなく、極地研全体としても、人的および予算的に大きなプロジェクトである。今のところ36次 (1995年)、37次 (1996年) 隊で、ドームでの氷床コアボーリングおよびコアの現場解析が予定されており、38次 (1997年) あたりにドームでの大気集中観測が行える可能性がある。また、39次隊 (1998年) 以降の観測計画もおいおい練ってゆかねばならない。IGACに呼応した大気化学関係の観測として、地上 CO₂、CH₄、O₃ 観測、O₃、NO₂ のコラム量観測という半定常的な観測を行いながら、34次隊では大気中エアロゾルの硫黄成分 (海洋生物起源のものが多いいわゆる DMS 等) の観測、35次隊 (主観測年=1994年) 以降では、レーザーヘテロダイン赤外分光計による O₃、N₂O、CH₄ 等の鉛直分布の観測、回収気球システムによる対流圏、成層圏の CO₂、フロンガス、エアロゾル等の観測等が候補に上がっている。以下、神沢の考えを述べる。

測定高度領域が 0.5~17 km のウインドプロファイラ

一を、南極大陸上の子午面に沿って数点設置し、風の3成分を計ることを計画しつつある(Kanzawa, 1992; Proc. NIPR Symp. Polar Meteorol. Glaciol, 5, 29-38)。風の鉛直成分を計れるということが、ウインドプロファイラーの画期的な特長である。南極大陸上の大気は、強い放射冷却に晒され、それを補うべく、断熱圧縮下降流が起こっていると想像されている(第1図参照)が、その流れを南極大陸上で直接計った例はこれまででない。問題意識は以下のとおり。極域の対流圏界面(高度約10 km)での成層圏と対流圏の空気交換の実態は?地表付近は強い放射冷却によりカタバ風が流れているが、このカタバ風が励起する子午面の流れがどの位の高度まで浸透しているのか?

1996年2月に打ち上げ予定の ADEOS 衛星搭載センサーの一つである ILAS (Improved Limb Atmospheric Spectrometer) は、極域(56-70°N, 65-86°S)の主に成層圏(高度10~60 km)の O_3 , NO_2 , HNO_3 , N_2O , CH_4 , H_2O , CFC-11, エアロゾル, 温度, 気圧を測定する。ILAS 観測と極域観測(検証実験を含む)を組み合わせるにより、中層大気の物質循環の研究が進むだろう。

7. カタバ風について

児玉裕二(北大・低温研)

主要な問題点は、安成、榎本氏によってすでに議論されたので、カタバ風研究の今後の課題についてのみ述べる。簡単にまとめると、(1) 斜面方向の変化、(2) 上層風あるいは大循環との関係、の二つが今後の重要な課題であると思われる。(1)については、Parish 達の流線図のカタバ風で解明された感を与えるが、内陸の傾斜が緩いところや海岸付近の複雑地形における記述は十分でない。また、摩擦の問題も残っていて、特に表面粗度に関係する氷床の表面形態や吹雪の問題、上層の風と関係する Entrainment の知識が十分でない。(2)については、安成氏らが提唱している風速の“30~50日周期変動”と大気大循環との関係に代表されるように、上層風との相

互作用の問題が重要である。これは成層圏からの微量物質の降下の研究にとっても重要である。

これらの問題を解決するには、衛星データの活用、多点同時プロファイル観測、AWS の充実、大気化学者との協力等が重要な要素と考えられる。極域研究の場合、とかく data limited ということでお茶を濁すことが多い。それを解消するような観測の充実をはかるとともに、idea limited にならないよう心がけなければならない。

8. 総合討論

廣田：水蒸気以外に雲の形で水は内陸に入ってくるはずだ。その程度はどのくらいか?

和田(極地研)：海の上の雲水量は衛星のマイクロ波データから評価できる。大陸の上での雲水量の評価は難しい。

神沢：この問題の重要さは極地研の者も認識しており、和田さんが29次隊でレーダ観測と NOAA 衛星データの受信を行い、評価を試みつつあるところだ。

田中：Greenland では、雲の形で入ってくる量が水蒸気が入ってくる量に比べ無視できないことが知られている。

廣田：熱帯ではどうか?

安成：不明である。まさにこれからやろうとしている GEWEX の中心テーマだ。

神沢：水循環問題については、この研究会の枠でも議論してゆくつもりだ。

[補足。山内恭氏によれば、以下の通り。大気中の H_2O は、地球全体で考えれば、気体(水蒸気)の状態で存在するものが圧倒的に多く、液体(水)あるいは固体(氷)で存在するものよりも2桁多い。南極の場合は、水蒸気の割合が地球全体の平均に比べると少ないが、それでも他の状態に比べると1桁は多い。従って南極への H_2O の輸送の大部分は、水蒸気 の形で行われると予想される。ただし、きちんとした評価は今後の課題である。]