

南極内陸氷床上へ降下・堆積する物質について

神山孝吉*・渡辺興亜*

Substances Deposited on an Inland Plateau, Antarctica

Kokichi KAMIYAMA* and Okitsugu WATANABE*

Abstract: Various substances are transported over the inland plateau of Antarctica through the atmosphere, and deposited onto the snow surface. The chemical composition of the snow will reflect the transportation process and the amounts of the substances present in the atmospheric environment. Concentrations of some substances show an increasing trend due to interior continental snowfall, suggesting that the interior of the Antarctic continent is under a unique sedimentation environment. This is because the inland plateau, a large continuous snow area, is a long way from the area where the substances in the atmosphere are originating, and there is no simple explanation for the increase in concentration of some of the substances in the falling snow.

In this report, the investigations on the snow chemistry on the inland plateau, Antarctica, are briefly reviewed. The concentrations of some substances in snow, for example tritium, have increased on the inland plateau. This was produced both by the local effect over the inland plateau, caused by the extremely low temperature air mass, and by the global circulation through the stratosphere, which transports substances directly from remote areas. By considering the special chemical features of the accumulated snow in the interior of the Antarctic continent, we can more effectively interpret ice and snow cores in our study of the global atmospheric environment.

要旨:さまざまな物質が南極内陸部上空に運ばれ、雪面上に蓄積している。内陸部の降雪・積雪の化学組成は、大気中の内陸部への物質輸送過程と内陸部大気中の物質の存在量を反映している。いくつかの物質濃度は内陸部の降雪で増加傾向にあり、南極内陸部は特異な堆積環境の下にあることを示唆している。なぜなら広大な雪面の続く内陸は、物質の供給源から隔たっており、降雪中の一部物質濃度の増加は単純には説明できないからである。

本報告では、南極氷床内陸部に堆積する降雪・積雪の化学組成についての研究を概観し、内陸積雪の化学的性質の特異性を指摘する。すなわち積雪中のトリチウムなどに代表されるようにいくつかの物質濃度が内陸内部で増加している。南極内陸部では大気が著しい低温を示すという地域的な要因に、成層圏を通して遠隔地域からの物質輸送過程が存在し地球規模での物質循環過程を反映するという要因が加わって、内陸部の特異性を生みだしていると考えられる。南極内陸部の積雪の化学的特異性を考慮することによって、雪氷コアを通して地球環境を探る研究はさらに有効になると思われる。

* 国立極地研究所, National Institute of Polar Research, 9-10, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173.

1. はじめに

物質は、降雪やドライフォールアウトを通して氷床上に運び込まれる。したがって降雪中の化学成分は、その地域の大気環境を反映していると考えられている。ここでは主に東南極内陸ドーム周辺部から採取した降雪試料解析を中心として、その化学組成と大気環境について留意しながら今までの成果について議論してみたい。そして現在実施されている南極氷床ドーム深層掘削計画での大きな目的であるドーム頂上にて掘削採取されることとなるボーリング試料の解析また積雪・降雪試料の解析への一助としたい。

南極地域において、我々は雪上車を利用し移動しながら観測を続けている。この間、東

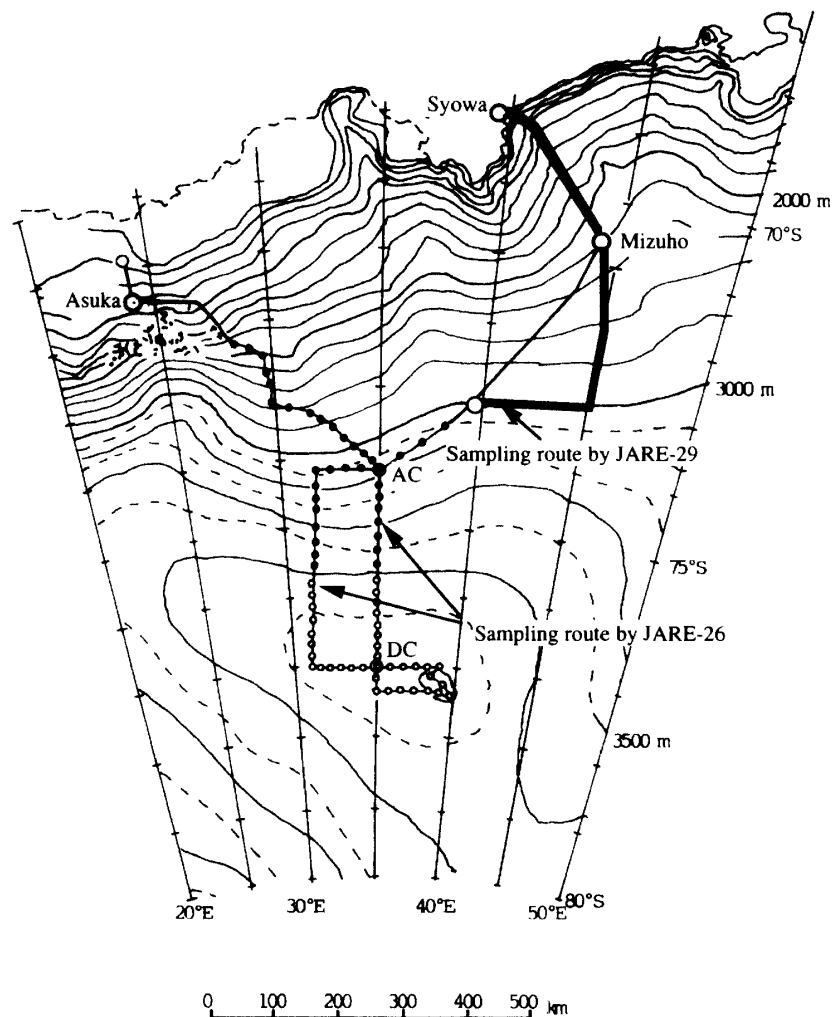


図1 本調査領域と旅行ルート図。図中細実線は26次観測隊の調査ルート、太実線は29次観測隊の調査ルートを示す。

Fig. 1. Investigation area and traverse routes. The routes traced by JARE-26 are represented by thin lines, and by JARE-29 heavy ones.

南極ドーム周辺部の降雪や積雪を採取する機会に恵まれてきた。実際には降雪といっても単純ではなく雪面上を移動している地吹雪と区別しにくい。また未だ雪面に固定されていない積雪は、地吹雪となって移動している。しかし、一般的には降雪は降雪時の、堆積している積雪は堆積時の大気中に存在している物質を取り込んでおり、それぞれ当時の大気環境を反映しているものと考えられる。また、現在一部の物質については堆積後の変態が注目されているが (STAFFELBACH *et al.*, 1991), 大気環境情報を有する降雪が氷床表面に蓄積後、その地点の堆積環境に反応したものととらえることができる。したがって積雪は、大気環境・雪氷環境の複合した情報を有していると考えられる。

南極氷床ドーム深層掘削計画に先駆けて、第26次南極地域観測隊では1985年春から1986年夏にかけて昭和基地からみずほ基地を経て前進拠点、内陸ドーム頂上域を探索し、あすか観測拠点へと調査・観測旅行を実施した。さらに第29次観測隊では1988年春に、昭和基地、前進拠点間の調査・観測旅行を行った。前者では主に内陸ドーム周辺を中心とした内陸地域、後者では内陸から沿岸部までの地域を対象として積雪の採取を行った。これらの旅行ルートを図1に示す。旅行期間に採取した積雪を国内に持ち帰りその化学的性質を調査分析した結果、東南極内陸部ドーム周辺部の降雪や積雪は南極域においても特異な性質を示していることが判明した。ここでは特にこの化学成分の特異性と、さらにはそれをもたらしている大気環境、氷床上への物質輸送過程について総括するとともに考察を加えたい。

2. 環境放射能の分布

1950年以後活発に行われた核実験は、地球上に環境放射能の増大をもたらした。この影響は特に発生源に近い北半球に顕著であり、1963年には各地で降水中の環境放射能の極大が報告されている。このような極大値を含む堆積の歴史は、雪氷圏では順序よく堆積した積雪層中に保存されて今日まで存在していることが多い。我々はこれまでこのような環境放射能を積雪中のグロスベータ値やトリチウム値として検出し、最近の40年程度の堆積速度の算定に利用してきた。

トリチウム (T) というのは水素 (H) の同位体の一つで、水素原子として大気中の水素ガスや水蒸気を構成している。大気中の水素ガス中のトリチウム (HT) の比率は大気上層から下層までほぼ一様である。一方水蒸気中のトリチウム (HTO) の比率は大気上層部で増大していることが知られている (MASON and OSTLUND, 1976)。実際大気中ではHTOは約96%が成層圏に偏在しているが、HTは均質に混合されている。例えば1977年には大気圏のHTOは5.3 kg存在し、そのうち5.1 kgが成層圏に集中していた (MASON and OSTLUND, 1979)。もちろん積雪中のトリチウムは水蒸気を構成しているHTOが凝結・降下したものである。

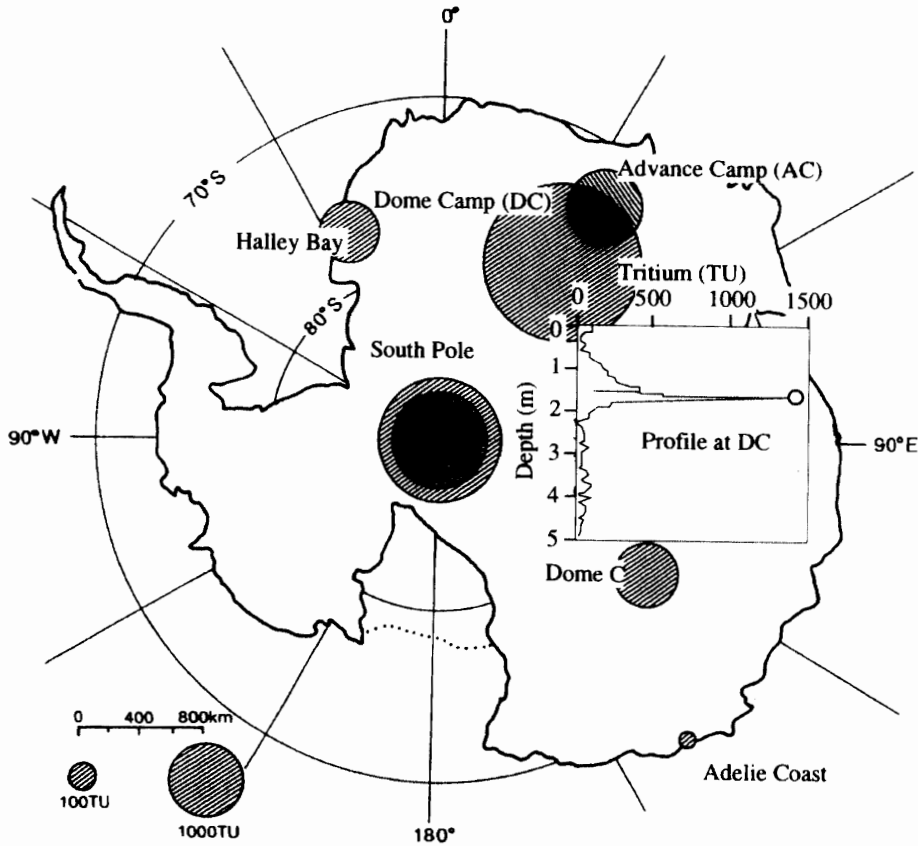


図2 南極各地域におけるトリチウム濃度の極大値とドーム周辺部での積雪層中のトリチウムプロファイル。トリチウム値はTUで表示し、丸印の大ききで表示した。なお値は、トリチウムの半減期を考慮し堆積時の値に換算したものである。最大値は東南極内陸ドームのピットから得られた値であり、そのプロファイルを採取時（1985年）の実測値として同時に示した。

Fig. 2. Tritium maxima in the snow at various sites in Antarctica as well as vertical profile in the pit wall at Dome camp (DC). Tritium content is denoted by tritium unit (TU) and values are normalized at the period of their sedimentation taking the radioactive decay into consideration. The highest value was obtained in the pit wall of DC. The vertical profile at DC is shown as the values in 1985 when the samples were obtained.

南極氷床ではその積雪断面からトリチウム降下量の歴史が読み取れる（図2参照）。またその極大値は、1963年に北半球に出現した極大値が南極域に拡散してきた時期の降雪に対応している。南極地域において報告されているトリチウム濃度の極大値を図2に示した。データ及びその出典はKAMIYAMA *et al.* (1989) に表として示してある。ただしハーレー基地での値については積雪断面のものではなく月別の降水実測値の極大値である。興味深いことに、南極内陸部の積雪層に高濃度のトリチウムが出現していることが理解できる。

1963年当時に降水中のトリチウム濃度が増加し、その値は全世界的に詳しく報告され

ている。高濃度のトリチウムを含む降水は核実験場所に近い北アメリカ大陸内陸部で出現した (STEWART and FARNSWORTH, 1968)。南極大陸の内陸部には北アメリカ大陸内陸部に匹敵するトリチウム濃度が出現していることになる。単純な発生源からの移流・拡散作用ではこの現象は説明できない。すなわち成層圏に蓄積したトリチウムは成層圏の水蒸気が低温下で凝結・沈降する過程で降雪として氷床表面に輸送されるのであろう。南極大陸内陸部では、HTO を多く含んだ成層圏からの水蒸気の流入が、降雪の水蒸気供給の多くを占めているといえよう。もちろんこの議論は濃度であるので、内陸部積雪の水蒸気供給には対流圏に比べて相対的に成層圏の寄与が大きいということであり、成層圏からの水蒸気供給が盛んであるというわけではない。

3. 降雪中の化学成分

3.1. ドーム周辺部の特徴

次に降雪中の化学成分の地域的な差異について、南極内陸部に焦点を当てて議論してみたい。第26次観測隊では、内陸旅行中に降雪を採取・融解し電気伝導度の測定を行った。降雪の融解電気伝導度とは、溶液中のイオン濃度の指標である。東南極内陸部（ここでは標高2200 m以上）では、内陸に行くほど電気伝導度が高くpHが低くなり両者に負の相関があることが観測された (KAMIYAMA *et al.*, 1989)。一般的には降水の電気伝導度とpHには地域環境に対応した関係が存在している (KAMIYAMA *et al.*, 1990)。

内陸部で採取された積雪試料のpHの値を測定した全試料、標高3600 m以下、標高3600 m以上で採取された試料に区分して表1に、またその出現頻度の確率分布を図3に示す（対象とした試料採取地点は図1の白丸・黒丸に対応する）。測定値は全体としてはpH 5.2付近を中心とした正規分布を取っている。しかし標高3600 m以下と以上では明らかに異なった正規分布を示し、標高の高いドーム周辺部の降雪に低いpH値が出現する頻度が大きい。過去の積雪中のトリチウム濃度については上に述べたが、現在の降雪中のトリチウム濃度についても標高3600 m以上で著しく増加する (KAMIYAMA *et al.*, 1989)。標高3600 mとは、旅行ルート上の氷床表面形態にカタバ風の影響がなくなる標高に対応している (AGETA *et al.*, 1989)。

表1 東南極内陸域の積雪のpH値

Table 1. pH values on snow samples in the interior region of East Antarctica.

地域	試料数	平均値	最小値	最大値	標準偏差
内陸全域	68	5.14	4.60	6.05	0.25
3,600 m 以上	34	5.02	4.60	5.43	0.17
3,600 m 以下	34	5.25	4.78	6.05	0.26

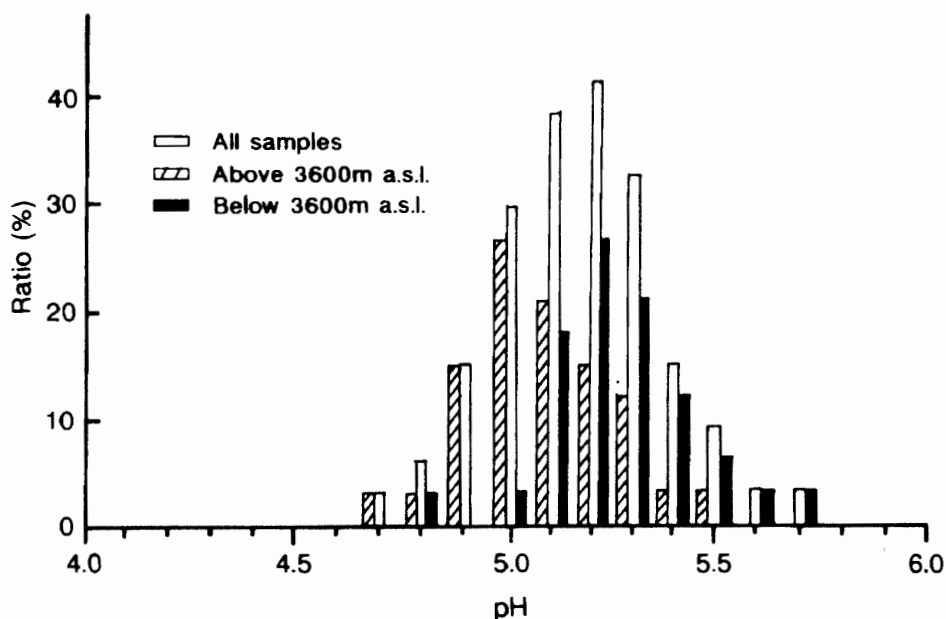


図3 東南極内陸域の積雪のpHの頻度確率分布。対象とした試料の採取地点は図1に丸印で示した。

Fig. 3. Frequency distribution diagram of pH in snow in the inland high region around the dome in East Antarctica. The sampling points are shown with open and closed circles in Fig. 1.

南極内陸部であるドームC(標高3000m)の積雪層中においても、電気伝導度とpHでの負の相関関係の存在が報告されている(DELMAS *et al.*, 1982)。東南極内陸部の降雪は、ドームCと同様な相関関係にあるが、さらに高い電気伝導度、低いpHという特色を持っている。したがって内陸の積雪化学的特性は、ドームCに比べて東南極ドーム域ではさらに顕著であるといえる(KAMIYAMA *et al.*, 1989)。

3.2. 沿岸部から内陸にかけての変動特性

第29次観測隊では、内陸部から海岸部にかけての旅行ルート上で降雪試料の化学特性を調査した。すなわち内陸部から海岸部にかけての降雪中の各種化学成分を詳しく解析した(ただしこれは海岸部から600km、標高約3000m地点までの領域に対応している)。ナトリウムイオン、塩化物イオン濃度共に海岸部から減少していること、硫酸イオン濃度は、海岸部で若干高くその後直ちに減少し、再び内陸部に行くと増加して行くこと、硝酸イオン、アンモニウムイオン濃度共に内陸部で急激に増加することなどが報告されている(渡辺, 1991)。

ここではさらに内陸部の積雪の化学的特性を議論すべく、第29次観測隊によって得られた1988年の海岸部から内陸部にかけての積雪試料の分析値に加えて、第26次観測隊によって1985年に採取された東南極ドーム域の積雪試料の分析値を合わせて考察した。採

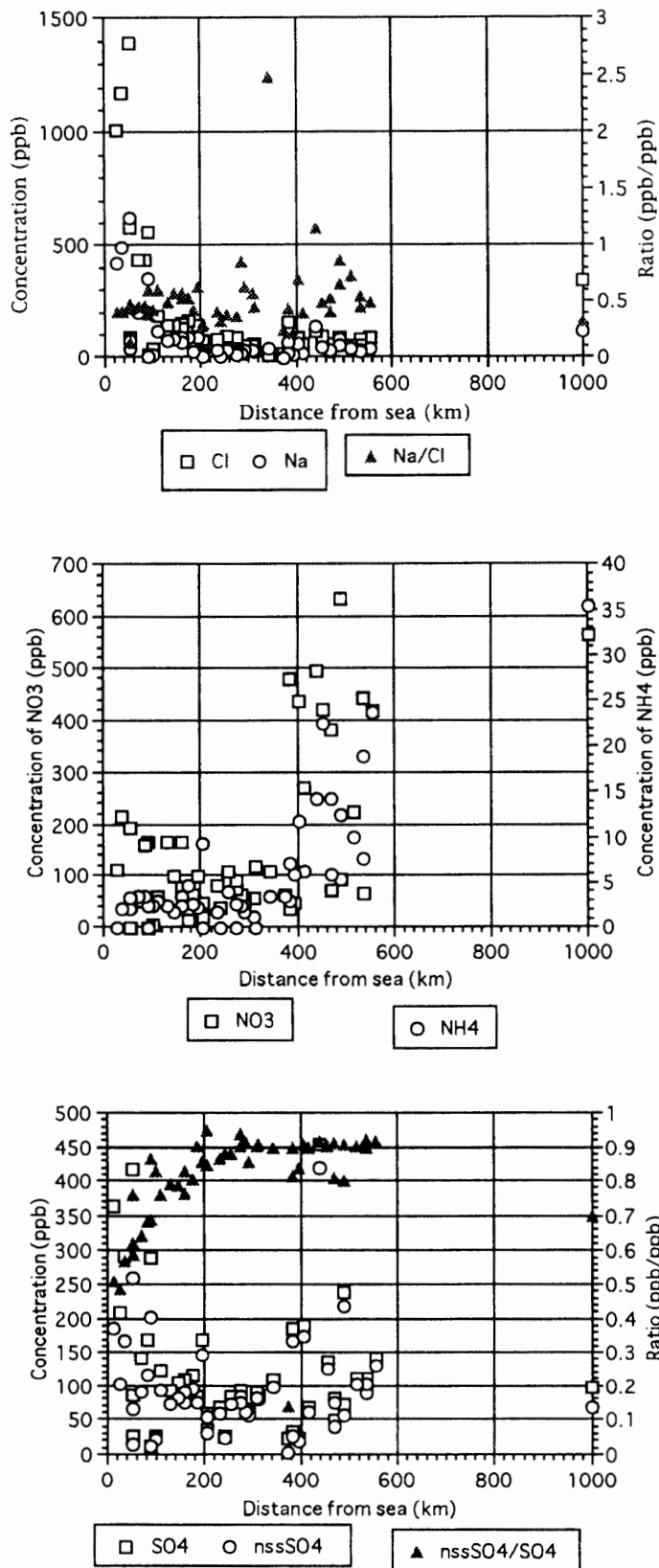


図4 海岸部から内陸部にかけての降雪中の各種化学成分濃度 (ナトリウムイオンと塩化物イオン及び両者の比, 硝酸イオンとアンモニウムイオン, 硫酸イオンと過剰硫酸イオン及び両者の比)

Fig. 4. Concentration of some substances in snow from the coastal to the interior region (Na^+ , Cl^- , Na^+/Cl^- ; NO_3^- , NH_4^+ ; SO_4^- , nssSO_4^- , $\text{SO}_4^-/\text{nssSO}_4^-$)

取地点の海岸からの距離と試料中の化学成分濃度との関係を図4に示した。なお内陸部積雪の化学的特性に明確にするため、1985年の試料については標高約3800mのドーム周辺部（先の議論で標高約3600m以上の地域）の積雪の化学成分の平均値を海岸から約1000km離れた地点の積雪化学成分であるとした。ナトリウムイオン、塩化物イオン濃度共に海洋から供給され内陸で徐々に低濃度となるが、ドーム周辺部では特に塩化物イオンの増加が見られる。逆に硝酸イオン、アンモニウムイオンはドーム周辺部を含めて内陸部で一様に増加している。硫酸イオンは内陸部で増加する傾向にあるが、ドーム周辺部まですべて増加傾向が維持されているわけではない。東南極内陸ドーム周辺部で高濃度の水素イオンが生じるのは、硫酸よりもむしろ硝酸や塩酸の増大に起因していると思われる。以上の議論は試料の採取時期も違うので普遍化できないが、今後の観測計画の参考となろう。

4. 氷床上への物質の起源

これまで降雪中の環境放射能や化学成分濃度の空間的な変動を氷床上の物質輸送過程を考慮しながら議論してきた。降雪中の化学成分は、一般的には南極氷床上にその発生源が存在しないことを考えると、氷床の外部から流入したことになる。単純に考えれば、氷床外部から輸送されてきた物質は氷床上で徐々に降雪によって大気中から除去され氷床上に蓄積されていく。そのため対流圏における物質輸送では、氷床の中央部には物質は供給されにくいことになる。しかし上記のように水蒸気の構成成分であるトリチウムは内陸部に高濃度で存在しており、ドーム周辺部に直接流入するプロセスの存在を示唆している。内陸部の積雪に高濃度に存在する水素イオンなども内陸部に直接流入する物質であると考えられる。もちろん南極内陸部には雪の堆積量が少ないので、大気中の物質が降雪中に濃縮されることも考慮されよう。しかしながらこの考え方では、水蒸気の一部を構成しているトリチウム濃度の増大は説明できない。さらには、内陸部でその降雪中の化学成分組成が変化し増加するものと減少するものがあるという事実も、上記の流入するプロセスの違いを支持している。

ここでは氷床上への物質の輸送過程についてその物質の起源に着目しながら考察を加える。

4.1. 海洋の影響

大気中への物質の起源として地球上の約2/3を占める海洋が挙げられる。実際南極大陸はその周辺部を海洋で囲まれている。海洋からは絶えず大気中に海塩粒子が供給されており、その一部は降雪中に含まれ氷床上に堆積する。沿岸部の降雪中には海塩粒子起源の物質が多量に含まれているが、海岸線から内陸部に入るにつれて急激に減少していく。これはナトリウムイオンや塩化物イオンに見られる現象である（図4）。また海洋中の生物作用によって生成され大気中に放出されたジメチルサルファイド（DMS）は、大気中の

OH ラジカルによる酸化作用によってメチルスルホン酸 (MSA) や二酸化硫黄 (SO_2) へと変化し, MSA はそのまま, SO_2 はさらに硫酸塩 (SO_4^{2-}) へと変化して氷床上に蓄積する. 例えば降雪中には海洋起源の SO_4^{2-} が含まれているが, それには海塩粒子から直接供給されるものと海洋の生物起源のものが酸化されて供給されるものがある. ナトリウムイオンの起源が海塩粒子であり, 海塩粒子起源の SO_4^{2-} はナトリウムイオンとイオンペアを構成して挙動すると考えると, 海塩起源以外の過剰硫酸 (nssSO_4) を定義できる. nssSO_4 は上記の海洋生物起源あるいは火山活動などに由来するものと考えられる. 当然両者の移動過程には違いが見られる. SO_4^{2-} は沿岸部と内陸部で増加しているが, SO_4^{2-} のうち nssSO_4 の占める比率は内陸部ほど増加していく. nssSO_4 の一部は硝酸やアンモニウムと同様に内陸部ほど増加し, 沿岸部を経由することなく大気上層部から直接氷床内陸部に輸送されていると考えるべきであろう. さらに以上に述べたようにドーム周辺部の強い酸性度を示す降雪については, nssSO_4 の増加よりもむしろ硝酸や塩酸の増大が大きな影響を及ぼしていると考えられる. この原因としては, 硝酸や塩酸がさらに大気上層部である成層圏付近で極端に冷やされドーム周辺に降水として直接沈降してくることも考慮する必要がある.

4.2. 大陸の影響

氷床中にはもちろん大陸起源の物質も存在している. 地殻に最も多量に含まれているアルミニウムを利用し, 降雪中のアルミニウムに対する比率から大陸起源物質の流入量を推定する場合も多い. コア試料中にもアルミニウムは存在し, コア深度と共に変動している. 海洋生物の活動を鉄の供給が支配しているとの仮説から, 鉄の海洋への供給量変動の歴史をコア中のアルミニウム変動から間接的に推定し, 海洋生物活性と地球環境変動の関係なども議論されている (MARTIN *et al.*, 1989). さらに過去の地球上の火山活動なども, コア試料中にその影響が明瞭に現れている. 今まで述べてきた核実験起源のトリチウムについても, その起源は大陸上にあると考えるべきであろう. したがってトリチウム同様どのようなプロセスを経て大陸起源の物質が内陸部に持ち込まれているかに十分な注意を払う必要がある. また ^{210}Pb の半減期を利用して 100 年スケールの雪氷コアの年代決定を行う場合にも発生源である地殻からの輸送過程とその変動に留意すべきであろう (NIJAMPURKAR and CLAUSEN, 1990).

4.3. その他

海洋や大陸起源物質のほかに, 地球外の物質も氷床上には供給されている. コア中の宇宙塵などはこのカテゴリーに分類される. さらに宇宙線が地球大気に衝突して生成される, ^{14}C , ^7Be , ^{10}Be なども氷床中に保存されている (RAISBECK and YIOU, 1985; LAL,

1987)。これらが、南極内陸部で実際にどのような空間的・時間的変動を示しているかは、大気中での物質輸送過程に支配されているはずである (SANAK *et al.*, 1985)が、決して十分な観測データが存在しているわけではない (MAENHAUT *et al.*, 1979)。

5. おわりに

ドーム周辺部の積雪中の化学成分の特異性について、その起源に考察を加えながら議論してきた。しかしながらいまだデータも不十分であり、十分に結論付けられる段階ではない。もちろん大気中の物質輸送過程の影響を受けて、積雪中の化学成分は空間的にも時間的にも変動するが、ここでは主に空間変動のみを取り扱った。すなわち沿岸部から内陸部へと沿岸部からの距離と共に、ナトリウムイオンに代表される海塩粒子は積雪中の濃度が急激に減少する。逆に内陸部に近づくにつれて硝酸や nssSO_4 の相対濃度が増大する。さらに内陸部では、硝酸に加えて塩酸の相対濃度が増加する。また降水中の H の同位体 T が増大していく。このような地域に応じた大気中の固有の物質輸送過程が推定される。特にドーム周辺部では、上層大気中の水蒸気などを下層に運搬させる物質移動過程の存在が示唆される。またドームを中心とした地域は、積雪表面形態にも特徴を有しており、物質輸送と合わせてドーム周辺部の総合的な特異性を形成していると考えられる。

成層圏から地表面に沈降してくる可能性のある物質として過酸化水素、硝酸、塩酸が指摘されている (BRASSEUR and VERSTRAETE, 1989) が、内陸部の積雪層中では高濃度の過酸化水素も検出されることが報告されている (KAMIYAMA *et al.*, 1992)。したがって以上の可能性のある物質はすべてドーム周辺部で積雪中に高濃度と存在していることが実証された。

今後極渦の内部・境界部・外部でそれぞれの物質がどのような挙動を示すかなど大気情報も含めて、時間的にも空間的にも連続的に採取した積雪試料から物質輸送過程を議論すべきであろう。さらに実際の物質循環には積雪中の濃度のみならず、降水量が大きく影響している。今後積雪層を利用して堆積量変動と合わせて積雪の化学組成の研究を進め、それぞれの物質の地球上の循環過程を明らかにしていく必要がある。現在の物質循環像を踏まえコア試料から過去の環境を推定していくことが、地球の過去・現在・未来を論じる場合には必要不可欠である。

文 献

- AGETA, Y., KAMIYAMA, K., OKUHIRA, F. and FUJII, Y. (1989): Geomorphological and glaciological aspects around the highest dome in Queen Maud Land, Antarctica. Proc. NIPR Symp. Polar Meteorol. Glaciol., **2**, 88-96.
- BRASSEUR, G. and VERSTRAETE, M.M. (1989): Atmospheric chemistry—climate interactions. Climate and Geo-Sciences; A Change for Science and Society in the 21st Century, ed. by A. BERGER *et al.* Dordrecht, Kluwer Academic, 279-302.

- DELMAS, R., BRIAT, M. and LEGRAND, M. (1982): Chemistry of south polar snow. *J. Geophys. Res.*, **87**, 4314-4318.
- KAMIYAMA, K., AGETA, Y. and FUJII, Y. (1989): Atmospheric and depositional environments traced from unique chemical compositions of the snow over an inland high plateau, Antarctica. *J. Geophys. Res.*, **94**, 18515-18519.
- KAMIYAMA, K., FUJII, Y., WATANABE, O. and YAMADA, T. (1990): Electrical conductivity and pH in snow and ice samples from various glacier areas. *Nankyoku Shiryô (Antarct. Rec.)*, **34**, 119-129.
- KAMIYAMA, K., WATANABE, O. and NAKAYAMA, E. (1992): Atmospheric conditions reflected in chemical components in snow over East Queen Maud Land, Antarctica. *Proc. NIPR Symp. Polar Meteorol. Glaciol.*, **6**, 88-98.
- LAL, D. (1987): ^{10}Be in polar ice: Data reflect changes in cosmic ray flux or polar meteorology. *Geophys. Res. Lett.*, **14**, 785-788.
- MAENHAUT, W., ZOLLER, W. H. and COLES, D. G. (1979): Radionuclides in the South Pole atmosphere. *J. Geophys. Res.*, **84**, 3131-3138.
- MARTIN, J. H., GORDON, R. M., FITZWATER, S. E. and BROENKOW, W. W. (1989): VERTEX: Phytoplankton/iron studies in the Gulf of Alaska. *Deep Sea Res.*, **36**, 649-680.
- MASON, A. S. and ÖSTLUND, H. G. (1976): Atmospheric HT and HTO, 3. Vertical transport of water in the stratosphere. *J. Geophys. Res.*, **81**, 5349-5352.
- MASON, A. S. and ÖSTLUND, H. G. (1979): Atmospheric HT and HTO, V. Distribution and large-scale circulation. Behaviour of Tritium in the Environment, Proc. Symposium San Francisco, 1978. Vienna, IAEA, 3-16.
- NIJAMPURKAR, V. N. and CLAUSEN, H. B. (1990): A century old record of Pb-210 fallout on the Greenland ice sheet. *Tellus*, **42B**, 29-38.
- RAISBECK, G. M. and YIOU, F. (1985): ^{10}Be in polar ice and atmospheres. *Ann. Glaciol.*, **7**, 138-140.
- SANAK, J., LAMBERT, G. and ARDOUIN, B. (1985): Measurement of stratosphere-to-troposphere exchange in Antarctica by using short-lived cosmonuclides. *Tellus*, **37B**, 109-115.
- STAFFELBACH, T., NEFTEL, A., STAUFFER, B. and JACOB, D. (1991): A record of the atmospheric methane sink from formaldehyde in polar ice cores. *Nature*, **349**, 603-605.
- STEWART, G. L. and FARNSWORTH, R. K. (1968): United States tritium rainout and its hydrologic implications. *Water Resour. Res.*, **4**, 273-289.
- 渡辺興亜 (1991): 氷床コア中の気候・環境シグナルはどのように形成されるのか. *地学雑誌*, **100**, 988-1006.

(1994年6月27日受付；1994年8月11日改訂稿受理)