

最終氷期の宇宙塵の降下量

矢田 達¹, 中村智樹², 高岡宣雄², 野口高明³, 寺田健太郎⁴,
矢野 創⁵, 小島秀康⁶

1. 地球に降下する宇宙塵

[我々の住んでいるこの地球上には今現在も絶えることなく、宇宙からの使者が舞い降りてきている。と書くとき、なにやら怪しいB級SFのエンディングのようではあるが、これは紛れもない事実である。ここで言う宇宙からの使者とは、宇宙塵のことを言っているのである。宇宙塵とは、サイズが1mm以下の宇宙物質を指す。夜空を時折横切る流星は、サイズが大きめの宇宙塵が大気との摩擦により加熱・蒸発している際のプラズマ発光である。地球には現在、年間40000±20000トンの宇宙塵が流入してきていると見積もられる[1]。この値は、LDEF(Long Duration Exposure Facility)とよばれる、その名の通り地球低軌道上に長期に渡って滞在した衛星の表面の、高速衝突による微小クレーターの密度から見積もられている。この量は地球上に降下する宇宙物質の99%以上を占め、宇宙塵は地表に最も普遍的に存在している宇宙物質であるといえよう。

地球への宇宙塵の流入量は惑星間空間に分布する塵(惑星間塵)の増減を反映して変化していると考えられる。惑星間塵の増減は発生量と喪失量の収支によって左右されると考えられる。発生源は主には小惑星での衝突と彗星の氷の昇華によるダストの放出で、ともに突発的イベントである。これに対して、ダストの喪失の原因は、主にポインティング・ロバートソン効果による太陽方向への軌道の落ち込みと太陽放射圧の作

用による太陽系外へのダストの散逸であり、これは恒常的に働いている。よって、小惑星帯で大きな衝突があったり短周期彗星が多かったりした時期の惑星間空間はダスト密度が高まっていたはずで、当然地球への惑星間塵の流入も増えたはずである。このように、過去の惑星間環境を推定する上で、過去の宇宙塵の地表への降下量は興味深いデータである。ちなみに、惑星間塵の観測・物理については、過去の遊星人で特集が組まれており、詳しくはそちらをご覧ください[2]。

地球大気圏に突入した宇宙塵は、大気上層80~100km付近で大気分子との摩擦によって生じる加熱を経験した後、蒸発を免れたものについては地表に降下してくる。現在の宇宙塵の地球への流入量は人工衛星の表面のクレーター密度から求めることが出来るが、過去の宇宙塵の降下量は、これら地表に降下した宇宙塵の量を極地の氷床、深海底堆積物中の含有量から見積もる以外に方法がない。このうち、極地の氷床からは、深海底堆積物の場合と比較して、宇宙塵自体がより効率的に、水質変質の影響の少ない状態で回収でき、物質科学的研究においてもメリットが大きい。我々は南極氷床から採集された宇宙塵の量を元に、その氷床の元となった雪の降った最終氷期における宇宙塵の降下量を見積もった。

2. 南極で行われた宇宙塵採集

今回研究に用いた試料は、第39次日本南極地域観測隊によって、1998年10月から1999年2月にかけて実

1九州大学大学院理学府地球惑星科学専攻

2九州大学大学院理学研究院地球惑星科学部門

3茨城大学大学院理学研究科自然機能科学専攻

4広島大学大学院理学研究科地球惑星システム学専攻

5宇宙科学研究所惑星研究系

6国立極研究所南極隕石研究センター

施されたやまと・ベルジカ山脈隕石・宇宙塵探査旅行により採集されたものである[3]。この探査は日本が南極で行ったものとしては初めての本格的な宇宙塵探査だった。日本隊が1957年に建設した昭和基地は東経39度35分24秒 南緯69度00分22秒、アフリカの東南端にあるマダガスカル島の南5700kmの南極大陸の海岸沿いの小島上にある(図1 (a))。その昭和基地から直線距離でおよそ300km南極大陸の内陸に入った、高度2000mの雪原にやまと山脈は忽然と姿を現す(図1 (b))。南北50kmにわたって雪面からの標高差500~1000mの岩山の群が点在しており、その周辺に総面積4000km²に及ぶ裸氷帯(雪面から大陸氷床が剥き出しになった地帯)が分布している。採集はこの裸氷帯の3地域で行った(図2)。採集を行った地域は南北に30~50kmずつ離れているおり、南からそれぞれ、「南やまと」、「くわがた山」、「JARE IVヌナターク」とここでは呼ぶ。ちなみに、ヌナタークとは、氷原から

図1

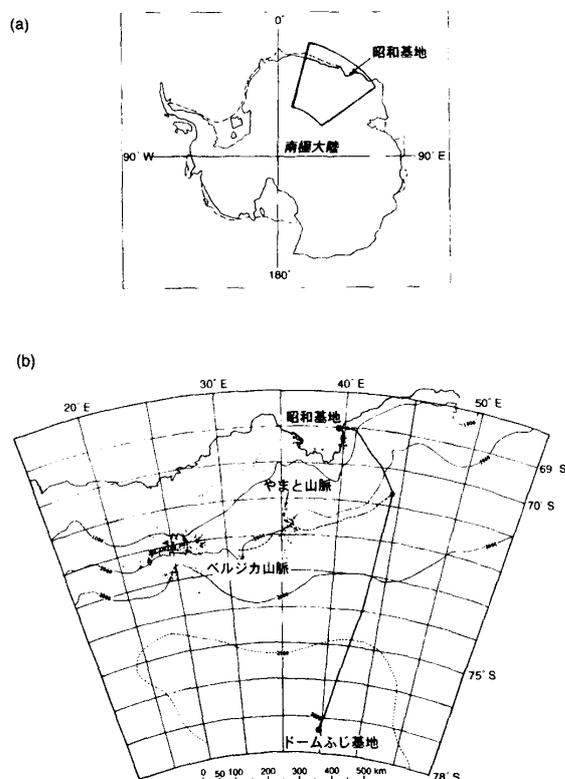


図1：(a) 南極大陸全図と、その一部を拡大した (b) 昭和基地周辺地図。昭和基地からルート沿いに行くと、やまと山脈まではおよそ600kmの道のりである。

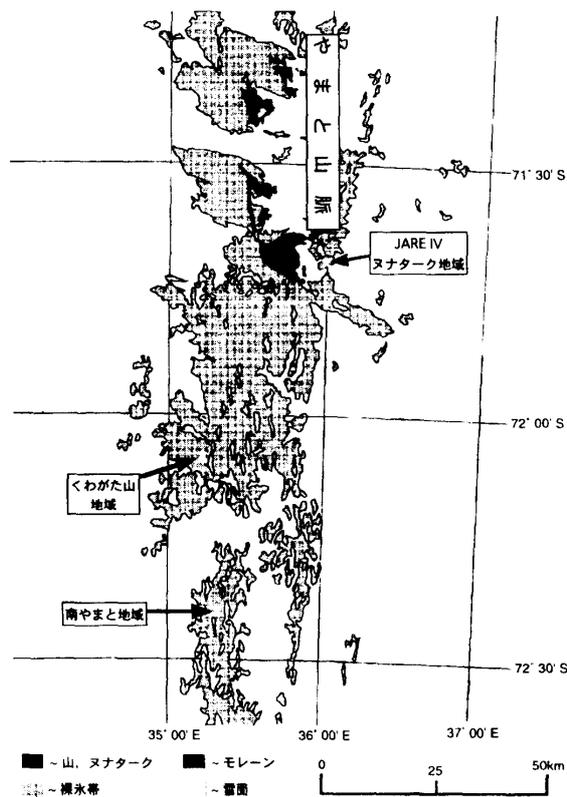


図2：やまと山脈及び周辺裸氷域の分布を表す地域図。宇宙塵採集を行ったのは地図上に記される3地域である。

露出している小規模な山塊のことである。これらの地域の裸氷については、その年代の推定があり、くわがた山で3万年程度、JARE IVヌナタークで5~6万年となっている。南やまとについては他の2地域より若いと考えられるが、いずれにせよ3地域の氷は最終氷期(1万年前~7万年前)のものであると考えられる。採集方法は、その場で裸氷の水を融かし、融けた水をフィルターで濾過し、氷の中に含まれていた固体微粒子を採集する、と言うものである(図3)。これらの作業に必要な器具が1台の幌付きの櫛の中に収まっており、風速20m/s程度の地吹雪が吹いていても作業は行えた。1回の作業で、5~10時間かけて1~2トンの水を融かし、1時間かけて融けた水の底に沈む粒子を238, 100, 40, 10 μ mのメッシュのフィルターで濾過する。この作業を以上に挙げた3地域の計24地点で行い、融かした水の量は計36トン、採集された固体微粒子の総重量は1.15gに達した。

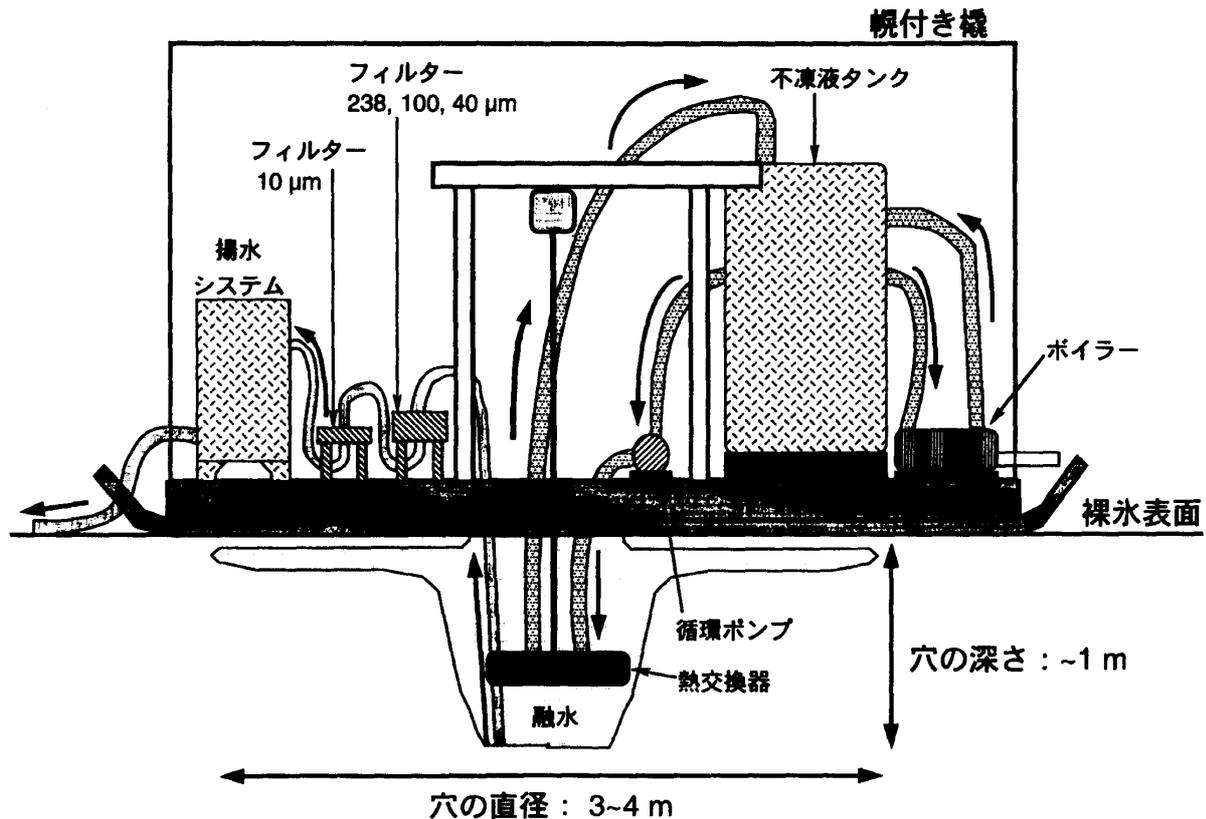


図3：1998-1999年の探査の際使用された宇宙塵採集システムの概略図。基本的には氷を温めて融かし、その水を濾過する、と言うシンプルなシステムである。ボイラーで温められた不凍液の循環する熱交換器によって融かされて出来る氷の池は、帽子を逆さまにしたような形になる。

3. 試料の処理・分析

冷凍された状態で日本の国立極地研究所まで持ち帰られた試料はまず、フィルターからシャーレに移された。この状態では宇宙塵と思われる粒子の他に地球起源の珪酸塩粒子、明らかに人工物だと思われる混入物なども多数含まれる。この中から宇宙塵だけを選別する必要がある。このシャーレから、実体顕微鏡下で拾い出しを行い、その粒子が宇宙塵かどうかと同定するために、電子顕微鏡の定性分析を行った。同定にあたっては、不定形の珪酸塩の粒子、および珪酸塩質の球状粒子(スフェール)については、元素のスペクトルがコンドライト的であること、鉄質スフェールについては鉄、酸素、ニッケル以外に%オーダーの元素を含まないことを条件とした。図4(a), (b)に不定形の宇宙塵の分析例を示す。ここでは宇宙塵の物質科学については詳しく述べないが、他学会

誌になるが、それについての特集が組まれているので、興味をお持ちの方はそちらを参照していただきたい[4]。この拾い出しは、初期分類のために日本の宇宙塵研究グループにより24地点分の試料の内5地点分(南やまと3, くわがた山2, くわがた山11, JARE IVヌナターク9, JARE IVヌナターク10)について行われた。5地点の試料について行った拾い出しの結果をまとめたものが表1である。なお、この5地点の名称は以後、M03, K02, K11, J09, J10と略す。5地点から拾い出された宇宙塵の総計は1000個ほどになった。これらの粒子の全ての電子顕微鏡写真と元素スペクトルは、南極宇宙塵研究グループ、特に学習院大学計算機センターの村上登志男助手の努力により<http://dust.cc.gakushuin.ac.jp/dust/index.html>にまとめられている。我々は、更に拾い残した宇宙塵の量を見積もるために、拾い出しを行った残りの粒子の希ガス質量分析を行った。この希ガス質量分析は九州大学

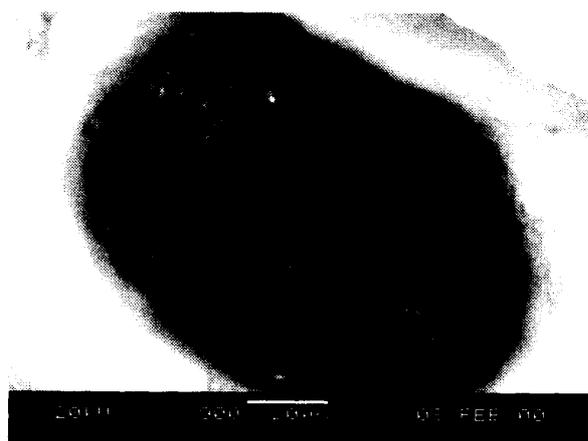


図4：(a) 非溶融の宇宙塵の電子顕微鏡写真。後方散乱電子像で撮影されているので、明るい部分ほど平均原子番号が大きい。

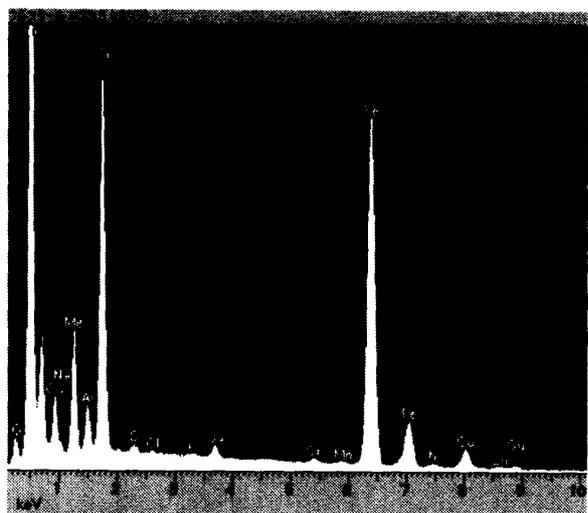


図4：(b) 定性分析によって得られた元素スペクトル。コンドライト隕石のスペクトルと似た組成を示す。なお、スペクトル中のCuのピークは宇宙塵を置いている銅板からの寄与である。

希ガス質量分析計MM5400をもちい、一試料を除き1700℃の全溶融でのガス抽出後、精製を経て分析管に導入した。この希ガス分析は5地点の試料の内、宇宙塵を多産した238~100 μm, 100~40 μmのサイズフラクションについて行った。

4. 宇宙塵の年間降下量

4.1 希ガス分析結果・宇宙塵総重量の見積もり

図3に見るように、採集を行った領域は直径1~4mと幅があるが、ここで便宜上1m²の水から採集を行ったとする。氷床中の宇宙塵の重量から宇宙塵の年間降下量は以下の式から求められる。

$$F = A_e \cdot \frac{m_c}{M_i / f_s} \quad (1)$$

この式で、 A_e は地球の表面積($5.1 \times 10^{14} \text{m}^2$)、 m_c は1m²の領域の水に含まれる宇宙塵の重量、 M_i は1m²の採集領域で融かされた氷の重量、 f_s はその氷と元となった雪が降った時点での1m²あたりの年間積雪の重量を表す。

まずは、拾い出して同定された宇宙塵については、サイズと比重から重量を求めた。具体的には、電子顕微鏡写真から長径、短径を求め、その平均をその粒子の平均直径とし、それらが球であると仮定し、体積を求めた。溶融した宇宙塵についてはその形が球状であるので、珪酸塩質ものについては3.0g/cm³、鉄の酸化物のものについては5.0g/cm³を密度に適用して重量を求めた。問題は非溶融の宇宙塵で、形が不定型である上、空隙に富み、上記の方法で求めた体積も現実とはかけ離れており、密度も珪酸塩鉱物の値よりかなり軽くなると思われる。ここでは見かけの体積が求められた非溶融の宇宙塵を、15~30個まとめて秤量し、見かけの体積に対応した見かけの密度1.0g/cm³を求めた。こうして求められた、拾い出された宇宙塵の重量は表3に示すとおりである。

宇宙塵は長期間塵のサイズとして惑星間空間を軌道運動している際、常に太陽風に曝されている。故に、非溶融の宇宙塵の希ガス分析を行うと、大量の太陽風起源の希ガスが検出される(たとえば[5])。宇宙塵1つ1つの希ガス分析から宇宙塵に含まれる希ガスの濃度も分かっており、拾い出しを行った試料の残りの粒子について希ガス質量分析を行い、この太陽風起源の希ガスの量を求めることで、拾い残した宇宙塵の量が推定できる。希ガスの分析の結果のネオンのガス量を表2、同位体比($^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ — $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$)を図5(a), (b)に示す。このグラフで、全般的に分析値は太陽起源の成分(太陽風成分, 太陽エネルギー粒子成分)に富んでいることが見て取れる。その他に主要な成分としては宇宙線生成核種の成分と地球大気の混入成分である。とくに太陽エネルギー粒子成分に

近い傾向は、より高いエネルギーで宇宙塵内部に打ち込まれた太陽風の成分が大気圏突入時の加熱による脱ガスを免れているため、と解釈される。このネオンの同位体比から成分分けを行い、もとめられた太陽起源の ^{20}Ne のガス量が表2に示すとおりである。このガス量を宇宙塵の ^{20}Ne ガス濃度で割れば、拾い残した宇宙塵の重量が求められる。宇宙塵の希ガスの濃度は体積と表面積の関係に依存しており、その粒

径と反比例する傾向にある。文献値から $238\sim 100\mu\text{m}$ のサイズフラクションの計算に用いる ^{20}Ne 濃度は $1.66\times 10^5\text{cm}^3\text{STP/g}$ とする。 $100\sim 40\mu\text{m}$ のサイズについては、直接このサイズの宇宙塵の希ガス分析を行ったデータがなかったので、 $238\sim 100\mu\text{m}$ のサイズのデータと $20\mu\text{m}$ 程度の成層圏で採集される宇宙塵の希ガスのデータから内挿して $3.59\times 10^5\text{cm}^3\text{STP/g}$ と求められた。この ^{20}Ne 濃度から求められた拾い残した宇宙塵の重量は表2に示すとおりである。

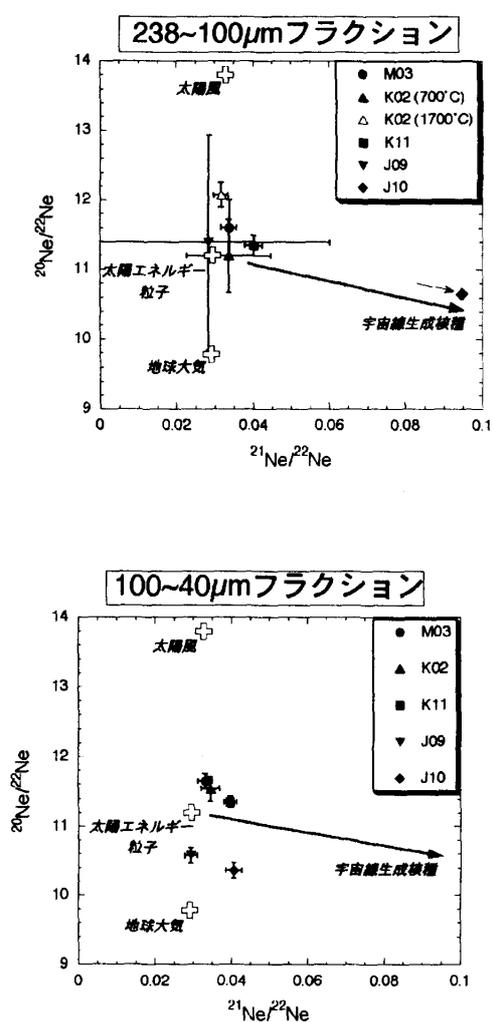


図5:それぞれ、(a) $238\sim 100\mu\text{m}$, (b) $100\sim 40\mu\text{m}$ のサイズフラクションにおける5地点の試料の宇宙塵拾い出しを行った後の粒子のネオン同位体比。(a)のJ10のプロットはグラフの領域外になるので、その方向を矢印で表している。J10の $238\sim 100\mu\text{m}$ フラクションを除くほとんどが太陽起源の成分(太陽風成分と太陽エネルギー粒子成分の混合成分)を多く含んでいることが分かる。

4.2. 宇宙塵の年間降下量とその解釈

以上の章で宇宙塵の総重量 mc は求められたが、宇宙塵の年間降下量を導き出すに必要な、式(1)のパラメータは、あと、採集ポイントで融かした水の量(M_i)と、水の元となった雪が降った当時の年間降雪量(f_s)である。このうち M_i については表3に示すとおりである。 f_s についてはやまと山脈周辺の裸氷についての直接のデータはないが、現在の氷床の上流域での積雪量から $4.4\pm 2.4\text{g/cm}^2/\text{a}$ の範囲に収まると推定される。

これらのデータから求められる、各採集ポイントでの宇宙塵の年間降下量は表3に示すとおり、南やまと3で $12000\pm 7600\text{ t/a}$ 、くわがた山2で $12000\pm 6500\text{ t/a}$ 、くわがた山11で $8100\pm 4500\text{ t/a}$ 、JARE IVヌナターク9で $4000\pm 2300\text{ t/a}$ 、JARE IVヌナターク9で $7200\pm 4100\text{ t/a}$ となった[6]。この値のうちJARE IVヌナタークについては表3をご覧頂くと分かる通り、希ガス分析により求められた拾い残した宇宙塵の量が他の2地域の試料より少なくなっている。この地域の試料のネオン同位体比(図5(a), (b))を見ると、他の地域の試料より大気の混入成分が多く、太陽起源の成分に乏しい。また、これらの地域の試料から選別された宇宙塵は表面にジャロサイトという、氷床中で成長したと考えられる二次鉱物の成長が顕著に見られる。このことから、JARE IVヌナターク地域の宇宙塵は、氷床中の変質により元々持っていた太陽起源の希ガスがある程度失っており、その結果、拾い残しの粒子に含まれる宇宙塵の量が実際より低く見積もられている可

能性が考えられる。よって、ここで求められたJARE IVヌナターク9, 10の値については下限値とする。この研究によって求められた最終氷期の宇宙塵の平均年間降下量は、JARE IVヌナターク9, 10の値を除いた平均、11000 t/aとした。

今回の研究によって求められた宇宙塵の降下量を文献に見られる値と比較してみる(表4)。同様の方法、すなわち、極地氷床中の宇宙塵を選別し、降下量を見積もった例は少なく、Maurette et al. (1987)による4600 t/aと言う値と[7]、Taylor et al. (1998)による 2700 ± 1400 t/aという値があるだけである[8]。前者の見積もりはグリーンランドの氷上にある池から採集された宇宙塵の量から見積もられた値で、拾い出しを行った後、我々の行ったような希ガス分析での拾い残した宇宙塵の量の見積もりは行っていない。従って、我々の結果と同程度、つまり拾い出した量とほぼ等量の宇宙塵が残されているとすると、降下量は9000 t/a強ということになり、これは我々の見積もりの平均値とさほど変わらない。この試料は、周囲の2000年前の年代の氷が融けだしたことで出てきた微粒子が、氷上の池の底に堆積していたものなので、宇宙塵の降下年代は2000年前と推定されている。このことは最終氷期と2000年前では宇宙塵の降下量は殆ど変わっていないことを示唆している。一方、後者の 2700 ± 1400 t/aという見積もりは、南極点基地にある雪氷中に掘られた飲料水用井戸の底の堆積物中から選別された宇宙塵の量に基づいている。この雪氷は西暦1000～1500年の年代のものであり、正確に言うと、そこからスフェールのみを選別し、その量に過去に求められていた非溶融宇宙塵とスフェールの比から、非溶融宇宙塵の量を推定し、宇宙塵全体の降下量を算出したものである。仮にこのデータに我々の今回の研究の非溶融宇宙塵とスフェールの比を適用してみると、値は4000 t/aとなる。50%の誤差を考慮に入れると、この値も我々の値から大きくは変わらず、現在の宇宙塵降下量と言えるこの値と、最終氷期の宇宙塵の降下量は大きくは変わっていないと考えられる。

前述したように、現在の地球への宇宙塵の流入量は 40000 ± 20000 t/aである。地表、すなわち極地氷床中の宇宙塵の濃度から見積もった宇宙塵降下量はこの4分の1程度である。この差は、宇宙塵が地球大気に突入した際、大気分子との摩擦により加熱され蒸発して失われた分だと考えられる。成層圏のエアロゾルの分析に基づいて、実際に大気上層部で蒸発している宇宙塵の量が見積もられており、それによると4000～19000 t/aとなっている[9]。この蒸発している宇宙塵の値の平均と我々の求めた降下量の平均を足し合わせると、23000 t/aとなり、この値は誤差の範囲内で現在の地球への宇宙塵の流入量に達する。若干少な目ではあるが、大気圏突入時の加熱を生き残った宇宙塵について、重量でみて主要な部分は今回の採集で氷床の中から回収できたことになる。また、地表への宇宙塵降下量は深海底堆積物中のIr, Os同位体組成からも見積もられていて、これによると最近8000万年で 30000 ± 15000 t/aとなっている[10]。この値はだいたい宇宙塵の地球への流入量と一致しており、氷床の場合と対照的に、深海底堆積物中には宇宙塵の大気圏突入時に蒸発した分まで入っていることを示唆する。宇宙塵の蒸発分は、深海底に達するのならば極地の雪面にも同様に降下しているはずで、極地の氷床から採集する際に、それらは回収できていないようだ。このことから、宇宙塵の蒸発分は非常に細かい($<10 \mu\text{m}$)粒子か、水に溶ける化学状態で地表に降下していると推定される。

5. 終わりに

以上のように、南極の氷の中の宇宙塵の量から、新たに最終氷期の宇宙塵の降下量を見積もることが出来た。降下量を求める手法としては、本研究ではハンドピッキングと希ガス分析を組み合わせることにより、かなりの改善がなされた、といえるだろう。過去の値ではあるが、我々の求めた年間11000トンという値から換算すると、1年間に1平方メートル当たり150

μm 程度の宇宙塵が20個程度降ってきていることになる。この宇宙からの使者を待ち受けていて見つける、というのは難しいかも知れないが、それらが知らず知らずのうちに皆さんの肩や頭に舞い降りている可能性はある、といえよう。

今後のこのテーマの研究の課題をあげるなら、氷床学の分野とタイアップして、年代・年間積雪量についてより精度よく求められている裸氷から時系列順に試料を採集し、降下量を求めることである。これにより我々は過去の惑星間空間の環境の変遷を推定する鍵を手にするようになる。さらに、宇宙塵の蒸発分が深海底堆積物中に至る過程について、地球化学の観点から取り組むことで新たな発展も考えられる。また、この蒸発した宇宙塵の一部が大気上層でE_s層と呼ばれる電離層の形成の一端を担っていると考えられおり[11]、一方深海底に堆積した宇宙塵は沈み込み帯から海洋地殻と一緒にマントルに取り込まれ、マントルの希ガスの同位体比に影響を与えている、という説もある[12]。このように地球システム科学の観点から、地球に流入する年間数万トンもの地球外物質がどのように地球環境に取り込まれていっているかは研究されており、我々の求めた宇宙塵の降下量はこの方面でも有用な基礎データとなる。この宇宙塵の降下量と言うテーマを今後より深く掘り下げるためには、多方面との連帯が必要になるだろう。

最後にはなりましたが、宇宙塵の採集に関しては第39次南極地域観測隊の皆様に、宇宙塵の処理・拾い

出しでは南極宇宙塵研究グループの皆様に貴重なご助力を戴きました。ここに御礼申し上げます。

参考文献

- [1] Love, S.G. and Brownlee, D. E., 1993, *Icarus* 89, 26.
- [2] 遊星人 Vol.6 No.4, 1997.
- [3] Yada, T. and Kojima, H., 2000, *Antarct. Meteorite Res.* 13, 9.
- [4] 地球化学, Vol.32 No.4, 1998.
- [5] Osawa, T. et al., 2000, *Antarct. Meteorite Res.* 13, 322
- [6] Yada, T. et al., submitted to *EPSL*.
- [7] Maurette, M. et al., 1987, *Nature*, 328, 699.
- [8] Taylor, S. R. et al., 1998, *Nature*, 392, 899.
- [9] Cziczo, D. J. et al., 2001, *Science*, 291, 1772.
- [10] Peucker-Ehrenbrink, B. and Ravissa, G., 2000, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 64, 1965.
- [11] Carter, L.N. and Forbes, J.M., 1999, *Ann. Geophys.-Atm. Hydr. Space Sci.* 17,190.
- [12] Anderson, D.L., 1993, *Science* 261, 170.

表1 5地点の試料から拾い出した宇宙塵の総数とその内訳.

| 地点名 | 宇宙塵総数 | 宇宙塵 | | スフェルール | | |
|-------|-------|--------|--------|--------|------|------|
| | | 非溶融宇宙塵 | スフェルール | Sタイプ | Gタイプ | Iタイプ |
| M03 | 168 | 98 | 70 | 21 | 30 | 19 |
| K02 | 255 | 152 | 103 | 44 | 49 | 10 |
| K11 | 265 | 173 | 92 | 45 | 35 | 12 |
| J09 | 138 | 81 | 57 | 33 | 17 | 7 |
| J10 | 160 | 87 | 73 | 40 | 22 | 11 |
| Total | 986 | 591 | 395 | 183 | 153 | 59 |

表2 5地点の試料の拾い残し粒子のNe 同位体組成と見積もられた宇宙塵の重量.

| 試料名 | ^{20}Ne ($\times 10^{-10}\text{cm}^3\text{STP}$) | $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ | $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ | 太陽起源 ^{20}Ne ($\times 10^{-10}\text{cm}^3\text{STP}$) | 拾い残しAMMs ($\times 10^{-5}\text{g}$) |
|--|--|---------------------------------|---------------------------------|---|--|
| M03, 238 \sim 100 μm | 3.96 \pm 0.077 | 11.60 \pm 0.39 | 0.0339 \pm 0.002 | 3.95 \pm 0.219 | 7.44 \pm 0.65 |
| M03, 100 \sim 40 μm | 17.8 \pm 0.083 | 11.64 \pm 0.10 | 0.0333 \pm 0.002 | 17.8 \pm 0.254 | 17.4 \pm 0.73 |
| K02, 238 \sim 100 μm , 700 $^{\circ}\text{C}$ | 0.219 \pm 0.002 | 11.19 \pm 0.53 | 0.0338 \pm 0.011 | 0.218 \pm 0.016 | 2.85 \pm 0.10 |
| K02, 238 \sim 100 μm , 1700 $^{\circ}\text{C}$ | 3.28 \pm 0.022 | 12.07 \pm 0.18 | 0.0317 \pm 0.002 | 3.27 \pm 0.080 | |
| K02, 100 \sim 40 μm | 12.7 \pm 0.058 | 11.53 \pm 0.17 | 0.0346 \pm 0.003 | 12.6 \pm 0.300 | 16.6 \pm 0.64 |
| K11, 238 \sim 100 μm | 1.56 \pm 0.009 | 11.34 \pm 0.15 | 0.0402 \pm 0.002 | 1.54 \pm 0.033 | 2.68 \pm 0.21 |
| K11, 100 \sim 40 μm | 24.7 \pm 0.097 | 11.35 \pm 0.08 | 0.0398 \pm 0.002 | 24.4 \pm 0.295 | 29.6 \pm 3.88 |
| J09, 238 \sim 100 μm | 0.047 \pm 0.002 | 11.39 \pm 1.55 | 0.0285 \pm 0.032 | 0.047 \pm 0.002 | 0.093 \pm 0.005 |
| J09, 100 \sim 40 μm | 13.4 \pm 0.061 | 10.57 \pm 0.11 | 0.0294 \pm 0.002 | 7.45 \pm 0.138 | 6.3 \pm 0.19 |
| J10, 238 \sim 100 μm | 1.38 \pm 0.007 | 6.97 \pm 0.08 | 0.3892 \pm 0.017 | 0.807 \pm 0.032 | 2.02 \pm 0.12 |
| J10, 100 \sim 40 μm | 8.79 \pm 0.033 | 10.36 \pm 0.12 | 0.0406 \pm 0.002 | 4.28 \pm 0.775 | 3.21 \pm 0.59 |
| 地球大気 | | 9.78 | 0.0292 | | |
| 太陽風 | | 13.8 | 0.0328 | | |
| 太陽エネルギー粒子 | | 11.2 | 0.0295 | | |
| 宇宙線生成核種 | | 0.8 | 0.9 | | |

表3 5地点での融かした氷の重量, 試料中に含まれる宇宙塵の総重量, 見積もられた宇宙塵の降下量.

| 地点名 | M03 | K02 | K11 | J09 | J10 |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 融かした氷 (ton) | 0.94 | 0.92 | 1.93 | 1.15 | 1.04 |
| 採集された粒子 (mg) | 13.8 | 11.3 | 8.17 | 10.4 | 6.06 |
| 拾い出された宇宙塵 (mg) | 0.258 | 0.283 | 0.377 | 0.141 | 0.282 |
| 拾い残された宇宙塵 (mg) | 0.248 | 0.194 | 0.323 | 0.064 | 0.052 |
| 宇宙塵降下量 (t/a) | 12000 | 12000 | 8100 | 4000 | 7100 |
| 見積もり誤差 | 6700 | 6500 | 4500 | 2300 | 4200 |

表4 宇宙塵の地球への流入量, 地表への降下量, 大気圏突入時の蒸発量の見積もり.

| 著者名 | 宇宙塵の集積量(t/a) | 試料採集場所 | 分析方法 | 備考 |
|--|-------------------|-------------|--------------|-----|
| 矢田ほか (2001) | 11000 | 南極氷床 | ハンドピック+希ガス分析 | 降下量 |
| Taylor et al. (1998) | 2700 \pm 1400 | 南極雪氷 | ハンドピック | 降下量 |
| Maurette et al. (1987) | \sim 4600 | グリーンランド氷床 | ハンドピック | 降下量 |
| Love & Brownlee (1993) | 40000 \pm 20000 | 人工衛星(地球低軌道) | クレーター数カウント | 流入量 |
| Cziczo et al. (2001) | 4000 \sim 19000 | 成層圏 | 質量分析(その場) | 蒸発分 |
| Peucker-Ehrenbrink & Ravissa (2000) | 30000 \pm 15000 | 深海底堆積物 | Ir, Os同位体分析 | 降下量 |