

宇宙塵の研究*

菊池 順**・宮島 光 弘†・大矢根 剛†
岡本 肇†・小林 紘 一†・島村 匡†
野上 謙 一†・柴村 英 道†・森下 和 三††
西山 純 弘††

1. 序

宇宙塵 (cosmic dust) あるいは interstellar grain と呼ばれるものが、星の生成、太陽系の形成、更には銀河の形成に非常に重要な役割を演じているということは、確かであろう。また天体の観測面ではふく射線の extinction, reddening, 等に関連して、宇宙塵の物性的性質を知ることが、非常に大きな問題になってきている。

現在われわれの手にする宇宙塵と思われるものが、今までに人間が手にしている地球外物質 - 隕石、月の岩石 - と違った新しい情報をもたらし、上の問題を解く鍵を与えてくれることが期待される。地球近傍において宇宙塵、あるいは grain と呼ばれる物質が存在することは、黄道光、対日照、夜光雲などの観測から確証が得られている [1][2][3][4]。宇宙塵は隕石と違って物理的、化学的、鉱物学的にその実体が明らかにされていないうえ、そのサイズが非常に小さいので分析、観測がむずかしく地球起源の塵と区別することが非常に困難な問題となっている。それゆえ現在まで宇宙塵を同定する方法は確立していない。このため主として定性的な考察からの外見上の区別、粒度分布の区別、組成上の区別などから始めて、宇宙線生成核種の放射線測定、消滅核種の検出、塵一個一個について質量分析計を用いての同位体比測定、年代測定等々あらゆる方面からの分析を行なって地球起源の塵と区別しなければならぬ。

次に地球上にどの程度宇宙塵が降下しているか、ということが問題となる。これは宇宙塵を用いて天体物理の研究を行なおうとする場合に常に基礎的な量として重要である。1960年代より、ロケット、人工衛星による採集観測、気球による採集、黄道光の観測 [5] など、非常に多くのデータが出てきているが、それぞれの値に6けた~7けたにも及ぶ大きな開きがありいずれが真の値に近いかが決定しがたい状態となっている。われわれはこの値を求めるために前述の宇宙線生成核種 (Co-56) の放射線測定、高空 (20 km~30 km) での気球による集塵を行なった。気球による採集は非常に有効ではあるが残念ながら地球起源の塵との本質的区別が現在できないので、汚染の程度を見積ることがむずかしく降下量の上限を与えるのみである。更に海底土の堆積率既知の泥から宇宙塵と思われる球状粒子について、また海面

* 宇宙研特別事業費による研究論文

** 早稲田大学理工学研究所

† 早稲田大学理工学研究科

†† 早稲田大学理工学部

上で採集した球状粒子についても降下量を求めたが、気球の場合と同様に汚染の程度を見積るのにはむずかしい。われわれはこれらの各種データから地球上への塵の粒度別積分フラックスを算出し、地上からの高度別のフラックスの変化、外見上の区別による変化を比較し、地球起源の塵の混入の程度を各試料について検討した。

この論文では将来の宇宙塵研究へのステップとして、塵の粒度別積分フラックスの算出(含、放射線測定)を主とし、それにX線マイクロアナライザによる若干の化学分析の結果、塵の降下速度の計算などの基礎的データを示す。

2. 塵の採集方法

地球に降下する宇宙塵の採集方法には、その目的によりいくつかのものが考えられている。まず問題となるのが採集したサンプル中の宇宙塵の量と地球起源の塵との比率であるが、着眼点の違いによりどちらに重点を置くかが決まってくる。宇宙線生成核種、消滅核種の測定により、地球への降下量を求めようとする場合は、多少の地球物質の混入には目をつぶり、宇宙塵の絶対量の多いと考えられるサンプルを選ぶ。このためには高山の雪を大量に処理する方法や、海底につもる泥のうち堆積率の少ないものの中からある目的とする核種を含む元素だけを化学的に抽出する方法などがとられている[6][7]。

また採集した塵を一つ一つ分析し、その元素分布、物性的性質などから、宇宙塵そのものの確証を得るためには地球物質の汚染の少ないサンプルを集めることが是非とも必要である。このためには、地球起源の塵の少なくなると考えられている上空 30 km 以上での気球による採集や、陸のちりの影響の少ない海上、孤島の空気の流れなどが行なわれている[8][9]

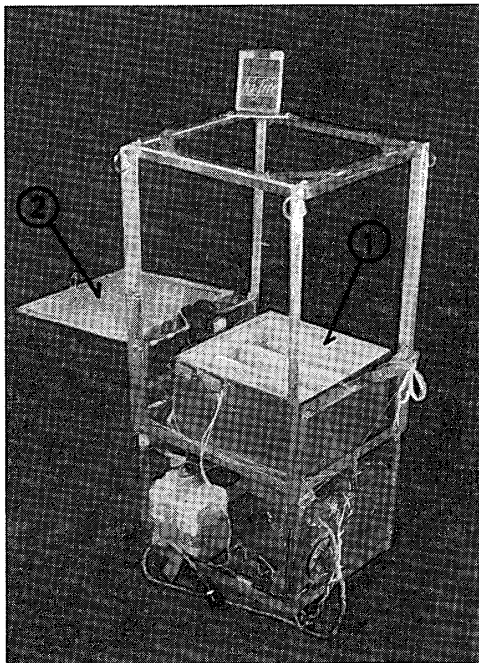


写真1 1969, 集塵器

- ① フィルタ
- ② ふたとその表に張ったシート

3. サンプルの種類

i) 気球による集塵

われわれは気球による集塵を1968年と1969年の2年間行なった。1968年には茨城県館野の高層気象台より、ゴム気球を用いて集塵器を飛揚させた。集塵の方法にはブローアで引いた空気をフィルタでろ過するものと、上空でシリコンオイルを塗布したシートを広げて、それに付着させて集める二つの方式をとり、それぞれ10機ずつ上げた。このうち回収されたものはブローア9機、シート6機であったが、ゾンデ、リモコン無しの盲目飛行のものもあり塵のフラックスのデータを出せるものは2機であった。ゴム気球の場合水平飛行は困難で飛行時間も多くの場合1時間程度である。しかしながら中には10時間も飛んでいたものもあった。集塵高度は15 km 以上である。集塵

器はあらかじめすべて無塵室で超音波洗浄し外装，ロープなどには，地上で付着した塵が集塵中にフィルタの方へ入らないようシリコンオイルを塗付してある．ろ過した空気の量は 30 m^3 ，フィルタの集塵効率は数 μ 以上の塵に対しては約 60%，シートの大きさは $80\text{ cm} \times 90\text{ cm}$ である．シートの方はシールドに多少問題があったが，大面積で多量に採集することを目的とした．1969 年は，前年の欠点を補うことと，高度を更に上げ，きれいなサンプルを集めることを目的とした．飛揚は 8 月に原町より行ない，3 機のうち 2 機回収された．採集方式はブローで空気を引くものと，上空で開くフィルタ保護ふたの上面にオイルを塗布したシートを広げる方式を併用した．フィルタは 2μ 以上の粒子に対し，効率 98% のフレドフィルタを用いた．ろ過した空気の量は No. 1 では 473 m^3 ，No. 2 では 525 m^3 であったが，No. 2 の方は後の分析結果からみてふたが開かなかったことが考えられる．シートは $20\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ で，高粘度のシリコンオイルを塗布してある．組立て時の洗浄などは 1968 年と同じように行ない，地上での汚染が非常に少ないことが確認された．また気球に付着している塵を避けるため，気球と集塵器を 100 m ほど離れた．

ii) 乗鞍山頂での集塵

1965 年より乗鞍宇宙線観測所（海拔 2770 m ）で始めた集塵計画は，地表が雪でおおわれ，ちりの立たなくなった冬期に行なわれた．おもな採集方法は，貯水槽の底にたまった泥の中からの採集と，雪を溶かし，その水をフィルタでろ過するものを行なった．初期の頃の実験はおもに隕鉄組成の金属球を見い出す目的で行なわれ同時に，全金属球のサイズ分布も求めることが行なわれていた [10]．フラックスのデータを算出する目的で行なった実験は，1968 年に 10 ton ，1969 年に 100 ton の雪を溶かしその中から得られた塵で宇宙線生成核種である Co-56 の測定を行なった．雪の中からの採集には，強風下での降雪量，氷晶核となる塵の動きなど不明な点があるがフラックスの上限値を求める場合に有効である．

iii) 海面上での集塵

球状の塵の高度分布，および地上の塵の様子を調べる目的で，1969 年 4 月～5 月に海洋研の白鳳丸で金華山沖 200 km で集塵を行なった．集塵方法は，オイルを塗った 1000 cm^2 のビニールシート 4 枚を甲板に広げ，平均 10 時間ほど露出した．問題点は風の強い船上での塵のシートへの付着率がはっきりしない点，また塩の結晶がかなり混ざる点であるが，これは，後に水で洗い，取除くことができる．

iv) 海泥

海の底には川から流れ込んだ泥や海底火山の灰がわずかずつ降りつもっている．そのうちで大陸からも離れ堆積率の少ない海泥がある．そしてその中にはかなりの比率の宇宙塵が含まれていると考えられる．そのため，その中から宇宙線生成核種を見い出そうとする研究はいろいろなされてきた．われわれは海泥中にある球状の塵に注目して，そのサイズ分布，フラックスなどを求めた．海泥は，日本海北東中央近くの北緯 37 度 02 分，東経 135 度 57 分で採集したもので， I_0/Th 法で測定した堆積率が $5\text{ mm}/1000$ 年のものである．

4. 分析方法

採集した塵より期待される物理量とその分析方法は，いまだ確立しておらず，あらゆる方

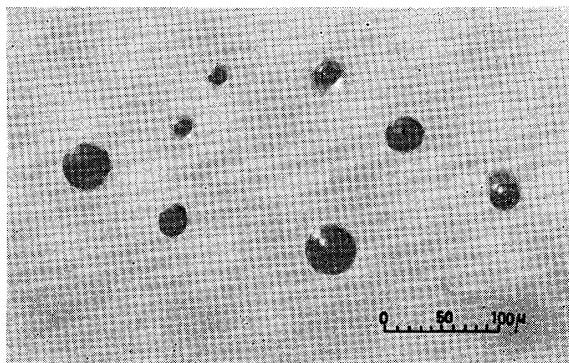


写真 2 球状塵 黒色，なめらかなもの

表面状態，大きさなどの分類を行なった。色のついたものでは，青，赤，茶などがあり，そのなかには透明のものもかなりある。黒球は，金属光沢を有したものと，表面のあらいものに分類される。直径 10μ 以下のものは，顕微鏡での観察が困難になることや，集塵効率が落ちると考えられるので個数が減っている。しかし実際の分布は小さいものほど多くなっているものと思われる。また，不規則形状のものの中にも地球外からくるものが含まれているだろうが，今のところその判別はむずかしい。ブローアで集めた場合には，空間での粒子密度が得られる。これをフラックスに直す場合の塵の速度としては，ストークスの法則により塵の平均比重を 2.5 と仮定し高度 20 km 付近での速度は， $v=1 \times 10^2 d^2 \text{ cm/sec}$ (d は塵の平均直径である。) として算出した。一方，シートを広げるタイプのもは，粒子が平均的に一様に降下しているとして，集塵時間と広げた面積との積で採集した粒子の数を割ることによりフラックスを算出した。

ii) 元素分析

10μ 程度の元素分析には X 線マイクロアナライザー (XMA) が適している。これはサンプルに直径 1μ 程度の電子線を当て，出てくる特性 X 線よりサンプル中の元素を検出するものである。これによりわれわれは主として球状粒子について分析を行なった。

XMA はわずか $\sim 1\mu$ (直径) 程度の面積の組成が分析されるので，試料の大きさがきわめて小さい場合，組成の分析などを求めるのに適している。

iii) 放射線による測定

地球外物質 (宇宙塵) の確認に用いられる方法として，宇宙線生成核種，消滅核種の放射線を測定することが考えられる。この方法の利点は，目的とする核種が地球上に存在しないということで，地球物質の影響を受けない点であるが，放射能が非常に弱いため宇宙塵の含有量，絶対量の多いサンプルが必要であり，低バックグラウンドの測定器を用いなければならない。われわれは乗鞍の雪の中から集めたサンプルについて，低バックグラウンドの γ 線測定器で Co-56 (宇宙線生成核種) を測定した。

次にサンプルごとの測定方法を表にしておく。

1968 年の気球による集塵はゴム気球によるもので，水平飛行をしていないことと，流量に多少の誤差が考えられるためにフラックスに直した場合にも誤差が入ってくる。また，集塵高度が 15 km 以上と比較的低く，地上の塵が多く含まれている可能性がある。また，シ

面からの追求がなされている。われわれの行なっている分析方法は次のようなものである。

i) 外見上による分類

われわれは，まず採集した塵の中にある，一度熱変成を受けたと思われる球形のものに着目し，そのサイズ分布，地球上への降下フラックスの計算を行なった。実際には 120 倍実体顕微鏡下で，細いガラス棒を用い，球形のものを拾い出し，色，

第 1 表

サンプルの集塵場所	分類 サイズ分布	フラックス	XMA	コバルト 56
15~20 km 上空 (1968年の気球による)	○	○	○	
~26 km 上空 (1969年の気球による)	○	○	△	
乗鞍山頂の貯水槽	○		○	
” の 積 雪		○*		○
海面上 (太平洋)	○	○	△	
海泥 (日本海)	○	○	△	

○ 分析結果の出ているもの

△ 統計量の少ないもの

* mass flux からの推定値

ートで集塵する場合、シールドを完全にすることがむずかしく、地球塵の混入も考えられるが、集塵面積が大きいという利点がある。

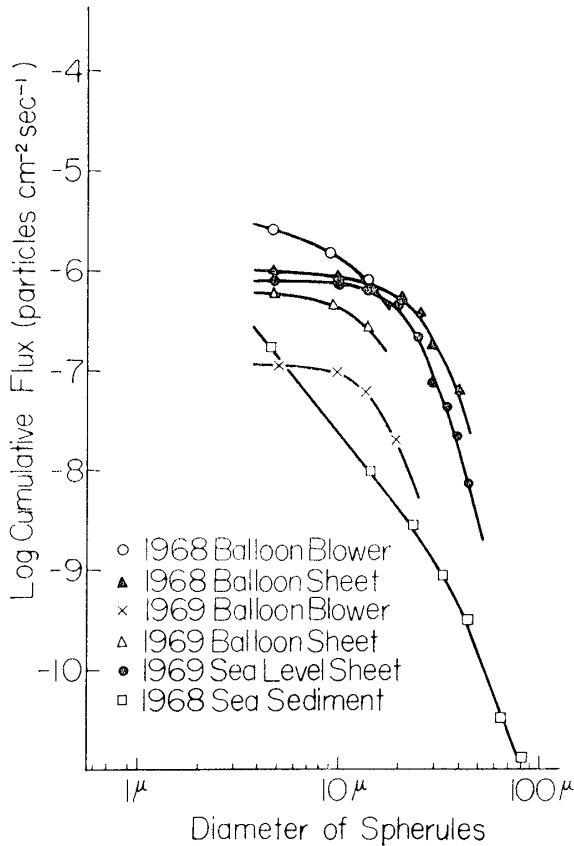
5. 分 析 結 果

宇宙塵の降下量の測定を一つの大きな目的としているわれわれの実験では、採集した塵の中で、降下量を正確に反映している塵はどのようなものであるかを推定することは非常に大切な問題である。まずわれわれが着目している球状粒子の全体についてその積分フラックスを求めてみると第 1 図のようになっている。

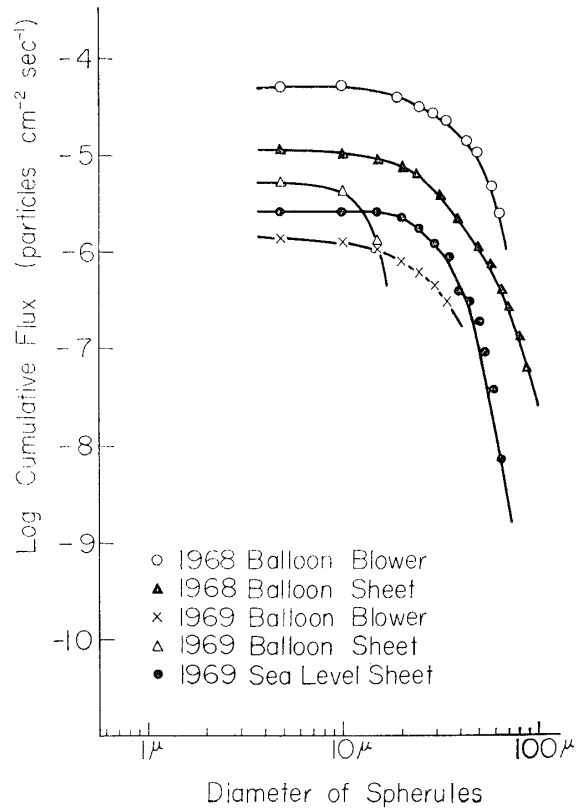
1969 年の気球実験で得られたデータより 1968 年の値の方が、全体として大きく出ているが、これは 1968 年の場合の集塵高度が 15~20 km で 1969 年の場合の約 26 km よりかなり低く、地上からの塵の舞上りの影響をかなり受けているものと思われる。このため採集高度の高い 1969 年のフラックスのデータが信頼度が高い。

ブローアで集めた塵の量は空気が粘性流である場合はその高度での塵の空間密度を反映している。しかし高度が上につれ空気の密度がさがり、塵に対して空気の流れはサイズの小さい塵から順に分子流的になって行く。直径 10μ 程度の球状粒子に対して高度 22~23 km, 1μ の粒子に対して 5 km 付近を境とし、それより上層では分子流的、それより下層では粘性流的にふるまう。(この計算は境界の高度を $\lambda/d=1$, λ : 空気の平均自由行程, d : 塵の直径, として求めた。高度による降下速度の変化の様子は付録の第 4 図を参照) したがって厳密に言えば、1968 年および、1969 年のブローアより算出した塵のフラックスの形は互いに異なってくるはずであるが、第 1 図に見られるようにその差ははっきり出していない。

後述するように球状粒子が宇宙塵である可能性は大きいですが、球状塵がすべて地球外のものであるという訳ではもちろんなく、火山、工場の煙、その他地上起源の粒子が上空に舞上っていることも考えられる。そこで球状粒子のうち金属質、ガラス質 (透明)、光沢の有無、といった外見上の特徴によって分類し、全球状粒子に対するその比を求めてみる。それが地球外起源の塵であれば、上空ほどその比率が大きくなっているはずであろう。第 2 図は黒くならぬ球状塵のフラックスである。第 2 表は、球状塵をさらに細かく分類したものの個



第 1 図 全球状粒子の積分フラックス



第 2 図 黒滑球状粒子の積分フラックス

第 2 表

	'68 ブロアー		'68 シート		'69 ブロアー		'69 シート		海上集塵	
全球状塵	152 個		150 個		235 個		32 個		374 個	
黒滑球	17個	11.2%	14個	9.3%	44個	18.7%	4個	12.5%	110個	29.4%
黒粗球	98	64.5	99	66.0	144	61.3	6	18.8	147	39.3
色付球	32	21.1	37	24.7	46	19.6	22	68.8	117	31.3

右欄は、全球状塵に対する百分率 (10 μ 以上)

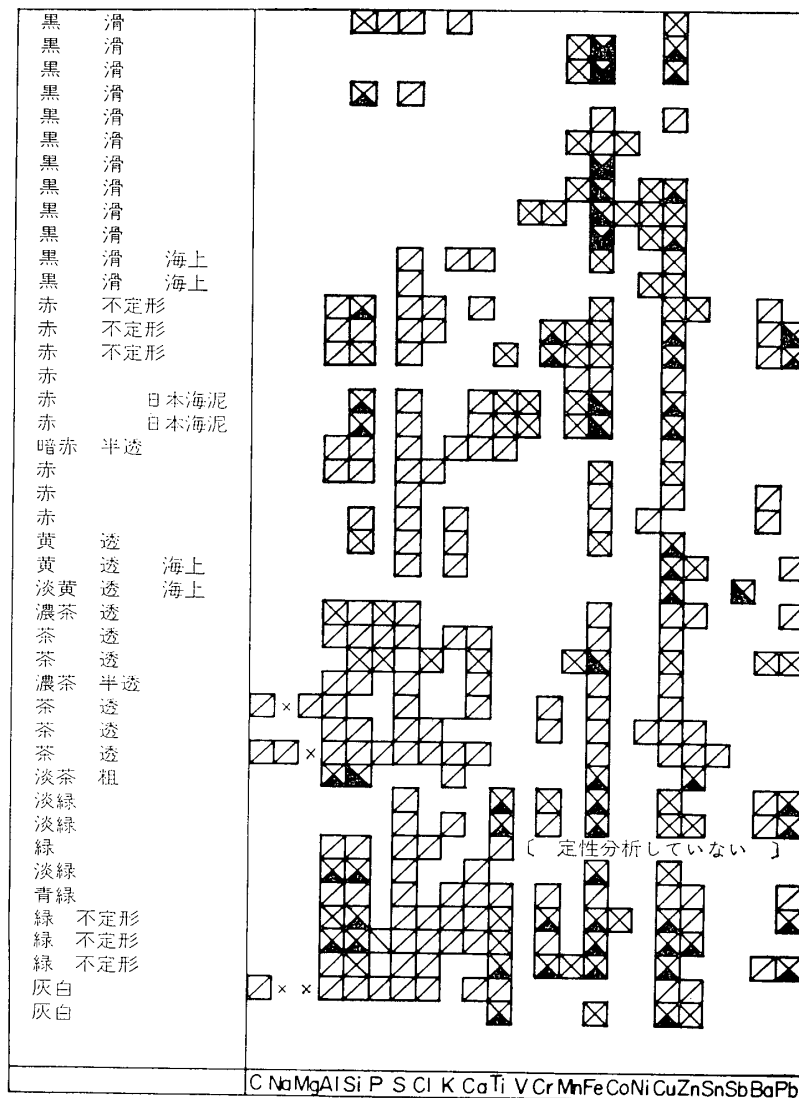
数と比率を表わしている。

黒滑球の球状粒子全体に対する比が、1968 年のブロアーでは 11.2%、1969 年では 18.7% と、多少増えていることは、これが地球外のものであることを暗示しているようである。1969 年のシートは、塵の絶対量が少なく、正確な比較には用いられない。

バックグラウンドに含まれる塵と、上空で採集した塵を比較すると、1969 年の実験の場合、上空で採集したものの方がほぼ一けた球状粒子の含有量が多い。これは上空では比較的球状粒子が多く、これが宇宙塵であることのサポートとなり得る。地球外からも当然不定形のものが入ってくるであろうが、その区別の方法は今のところない。

海底土から拾い出した球状塵には、色のついたものや表面のあらいものはあまり見当ら

第 3 表 X線マイクロアナライザーによる元素分析



■ 50%~75% ▨ 25%~50% ▩ 1%~25%
 □ 0.1~1% □ 定量していないもの
 Mg以下で記号のないものは、定性していない (×は検出限界以下)
 場所を書いていないものは気球によるもの

ず、多くのものがなめらかな黒い球であった。海水中での塵の腐蝕の様子などの不明な点があるが、四万年程度以前の古い海底土なので、工場の煙や、原爆の灰などを考慮しないでよい利点がある。この黒い球が地球外のものだとは断定できれば、堆積率から、かなり正確なフラックスを求めることができると思われる。

第3表は XMA による元素分析の結果である。特徴的には、ほとんどの塵に相当量の Fe が含まれていることである。特に黒いものについてみれば、かなりの量 (~数十パーセント) の Fe が入っており、更に Mn, Co, Ni など特徴的に含まれているものがある。また

Cu も多くの塵に含まれているが、この多くは試料支持台からのバックグラウンドの寄与である。黒以外の塵は、かなり多くの種類の元素を含んでおり、そのうち特に S は、ほとんどの塵に含まれていて、その含有率はかなり多いが標準サンプルが整っていなかったため定量できていない。色付のものに Sn, Sb, Ba, Pb などの重元素を含んだものがあり、その起源を考える際に重要な指針となるであろうと思われる。Pb を含む塵に関しては同位体比の測定により、塵の年齢を決定することができよう。それにより塵の起源を明らかにすることができると思われる。日本海泥中の塵はまだ他にも分析したがほとんど表中の組成に類似しており、量的に多くをまとめて S^{32}/S^{34} 比を測定することにより隕石起源の塵であるか否かを論ずることができる。茶色透明球の塵の中で Mg の検出されているものが一つある。これは 1968 年の試料でおよそ直径 100μ を有する完全な球状の塵である。いままで分析された (他の研究者によるものも含む) 塵の中から Mg が検出されているものはほとんど無く。コンドライト組成 (Cosmic Abundance) の宇宙塵が降下しているとすれば、他の塵に比べてこの塵が宇宙塵である可能性が最も強い。Na, O, C などの元素はアナライザーの分光結晶の不備のため多くの塵について結果を得ることができなかったが、C, N, O などの軽元素に関する情報は彗星起源の塵や星間空間の塵のモデルにかかわる重要な知識を提供するであろうと思われ、今後この種の分析も注意して行なわれねばならない。

6. 検 討

分析方法のところでもふれたように、われわれは球形の塵が不規則形の塵に比して起源的に特徴があり、また分類もしやすいために、より識別しやすい宇宙塵として球状のものを注意深く分析したが、不規則形の塵も宇宙塵として採集されている報告もある [11]。しかしながらこの塵は非常に小さいサイズ (約 1μ) で、より大きな $10 \sim 100 \mu$ の塵に関しては大気圏降下中に大気分子との衝突によりその温度を上昇させ、熔融する可能性を考えねばなるまい。この点に関しては非常に簡単なモデル計算がある [10][12]。それによると塵の大気圏突入速度を v_0 、塵の融点を T_m とすれば、その塵が融ける場合の臨界の大きさ d_c は塵の形状因子 $\gamma = \text{断面積 } S / \text{表面積 } S_0$ 、および塵の密度 ρ によって

$$d_c = 6 \times 10^2 T_m^4 / \gamma \rho v_0^3 (\text{cm})$$

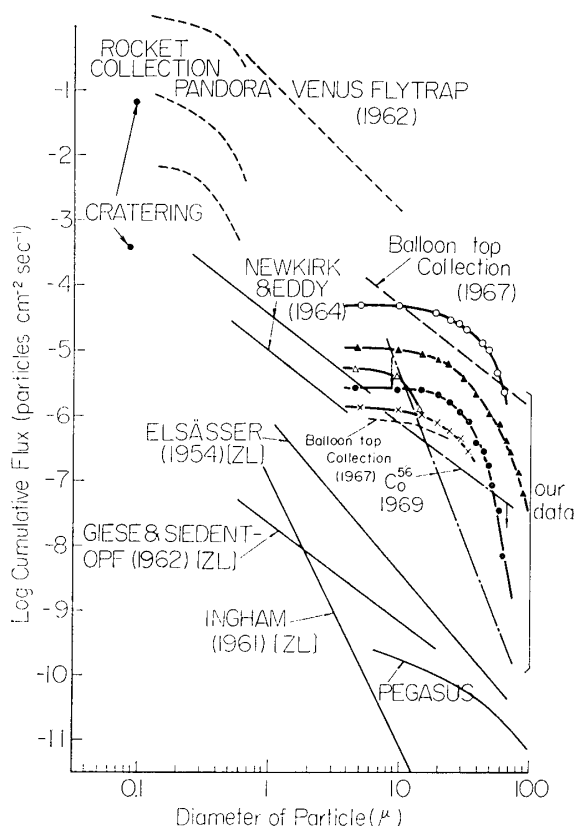
と表わされる。

したがって、鉄質の球を考えた場合 ($\rho \sim 8$, $\gamma \sim 1/4$, $T_m \sim 1.8 \times 10^3$), $v_0 = 10 \text{ km/sec}$ なら $d_c = 30 \mu$ で、流星塵の突入速度 [13] を考えると非球形 (たとえば, $\gamma \sim 1/10$ ぐらい) とし、われわれが着目している鉄質の塵はほとんど熔融してしまうことになる。

この臨界直径は、硅酸塩質の場合 ($T_m \sim 1.8 \times 10^3$, $\rho \sim 3$, $\gamma \sim 1/4$) は、 $v_0 = 10 \text{ km/sec}$ で $d_c = 100 \mu$, $v_0 = 20 \text{ km/sec}$ で $d_c = \text{数 } \mu$ となる。したがって γ の小さいもの、つまり非球状のものは、場合によって (v_0 が 20 km/sec 以下で入ってくる場合) 熔融せずに落下してくる塵もあろう。

この問題はどれくらいの大きさの塵まで非球状で降下してくるかにかかわる重要な問題で、今後のより詳しい検討を要するものである。

第 3 図にわれわれのデータと他のデータとの比較を載せておく。プロットの付いているも



第3図 他の積分フラックスとの比較

のは、われわれの全球状粒子についてのものである。高いフラックスを出しているものの方から行くと、ロケットで集めたもの、VENUS FLYTRAPがあり、次に NEWKIRK & EDDY のコロナグラフによる高空での塵の散乱光の観測より出したものがある。下の方には黄道光 (Zodiacal Light) の観測より出したものがある。PEGASUS というデータは、人工衛星によるもので、薄膜への貫通の孔よりフラックスを出してある。

Co 56 よりのデータは、1969年に乗鞍で集めた 100 ton の雪中の塵より Co 56 の γ 線の測定で出したもので、二つの傾きを仮定し、おのおのものに対して、そのフラックスの上限値が与えられる。

第3図の各データの間にはかなりの開きがあるが、われわれのデータおよび他のバルーン・データは中央に集中している。またわれわれのデータでは小さいサイズの方でカーブが寝るが、これは集塵、分析過程で損失する量が多いためであろう。

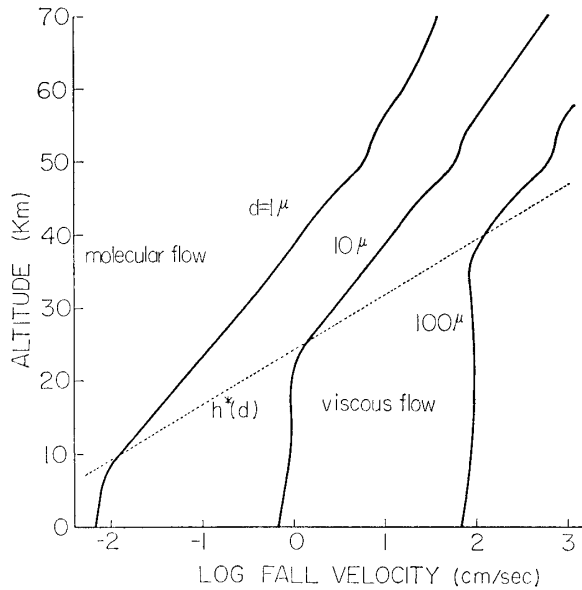
PEGASUS の値はわれわれの値より 2~4 けた低い。これは薄膜に粒子を貫通させ、粒子の速度を仮定して、その孔の大きさからフラックス・サイズ分布を求めたもので、誤差が大きくなることが考えられる。[ZL] (黄道光) のデータも相当低いフラックスを与えているが、これは塵の光学的性質の仮定を含み、また空間分布より地球への突入量の算出に誤差が含まれると思われる。

バルーン・トップ・コレクションの値は、われわれの値とほぼ一致しているといえる。更に Co 56 より求めたフラックスの上限値も考慮すると、実際の降下量は Co 56 より求めた降下量より若干少ない程度と考えるのが妥当であろう。(他のデータは [5] による。)

付 録

微小物体の大気圏降下速度

大気圏内での宇宙塵降下率の測定に際して、微小物体がそのサイズによってどれくらいの速度で降下してくるかを推定しておく必要がある。筆者らは、以前にこの種の速度計算を行なったが [10]、ここに以前の計算を補正すると共に、宇宙塵の降下率測定に関する問題点に触れておく。



第 4 図

1. 降下速度

質量 m なる物体が $v_0 \approx 10 \sim$ 数 10 km/sec の初速度で大気圏 (高度 $\approx 100 \text{ km}$) に突入した場合, その後の速度 v は

$$v = v_0 \exp(-\Gamma S P_a / mg \cos z) \quad (1)$$

で表わされる. S は物体の断面積, Γ はその物体の drag 係数, z は入射物体の天頂角, P_a は大気圧力, g は重力加速度である.

衝突する空気分子の全質量が m と同程度になると (このときの速度 v は m によらず一定), 物体は分子流体内を自由落下し始め,

$$v = mg / \Gamma S \rho_a v_T \quad (2)$$

なる速度で落下するようになる. ρ_a は空

気の密度, v_T は空気分子の熱速度.

空気分子の平均自由行程 $\lambda \approx$ 物体のサイズ d となる頃から, 物体は流体内の運動としてふるまうようになり,

$$v = mg / 3\pi d\eta \quad (3)$$

なる速度となる.

η は粘性係数で空気分子の直径を a , 質量を m_a とすれば,

$$\eta = \rho_a v_T \lambda / 2 = (m_a k T)^{1/2} / \pi^{3/2} a^2$$

で表わされる. k はボルツマン定数である.

この値は高度によってあまり大きく変らないが, $v_T \propto T^{1/2}$ および $a = a(T)$ を通じて大気温度 T の高度による変化の影響を若干受ける [14].

自由落下 (分子流) 域および粘性流領域での速度を図示すると第 4 図のようになる. (物体の形状は球, 密度は 2.5 として計算されている. あとの議論もこの仮定で行なわれている.)

2. 気球高度での宇宙塵採集に関する問題点

宇宙塵の採集方法としては, 採集高度での宇宙塵の運動が気体分子運動論的か流体内部運動的かによって, おもに, オイルを塗ったシート上に自由落下してくる宇宙塵を採集する自由落下方式と, 空気を吸引ろ過し, フィルタに宇宙塵を捕えるブローア方式とがある.

しかしながら, $25 \sim 35 \text{ km}$ くらいの気球高度においては 100μ の塵は Stokes 的であるが, 1μ の塵はまだ非流体的運動をしている. したがって, これらの高度において, いずれか一方の方法で採集した宇宙塵の 1μ から 100μ までにわたる範囲でのサイズ別による降下 flux を求める際には, 誤差が伴うことになる.

つまり, ブローア方式の場合には, 小さなサイズの方で少な目に出, 逆に自由落下方式の場合には, 大きな塵の flux が実際より少な目に出ることが起こるのであろう.

早大グループが1968, 1969年に行なった気球による宇宙塵採集実験はいずれも高度26 km以下で, 10μ 以上の塵に関しては, Stokes的に取扱ってよいだろう.

1970年2月5日

参考文献

- [1] Van de Hulst: Ap. J. **105**, 471 (1947)
- [2] Ingham, M. F.: Space Sci. Rev. **1**, 576 (1962)
- [3] Tanabe, H.: Publ. Astr. Soc., Japan **17**, 339 (1965)
- [4] Hemenway, C. L. *et al.*: Geochim. et Cosmochim. Acta. **27**, 241 (1963)
- [5] Hemenway, C. L. *et al.*: Space Research VIII, Noth Holland 521 (1968)
- [6] Petterson, H. *et al.*: Nature **166**, 308 (1950)
- [7] Tanaka, S. *et al.*: Science **160**, 1348 (1968)
- [8] Parkin, *et al.*: Geochim. et Cosmochim. Acta. **31**, 1311 (1967)
- [9] Schedlovsky, J. P. and K. Fredriksson: Tellus **18**, 2 499 (1966)
- [10] 藤本陽一, 崎村雅彦, 大矢根 剛, 小林紘一: 早稲田大学理工学研究所報告 **36**, 83 (1966)
- [11] Hemenway, C. L. & Soberman, R. K.: Astron. J. **67**, 256 (1962)
- [12] Whipple, F. L. & Hawkins, G. S.: Hand Buch der Physik **52**, 591 (1959)
- [13] Millman, P. M. & Mckinley, W. R.: The Moon, Meteorites and Comets: Chicago Univ. 674 (1963)
- [14] 上田良二: 真空技術 (岩波全書) (1961)