

特集 「新世紀の宇宙塵研究」

流星天文学：歴史と展望

渡邊 堯¹、長沢 工²

$$M = A(m/\rho_m)^{2/3} \rho_a V_d \quad (1)$$

1. 流星観測の意義

流星は惑星間空間を漂う小さな粒子(流星物質, meteoroid)が地球大気に飛び込んで発光する現象である。これまで流星は眼視, 写真, 電波といった天文観測的手段によって観測されているが, このような観測手段によって検出される流星物質の質量は 10^{-6} g以上であることが知られている。一方人工衛星やロケットなどで直接採取されている流星物質は, これよりも小さいmicrometeoroidと呼ばれるものである。これは質量の大きい粒子ほど数が少なくなることから, 人工衛星などの小断面積の採取装置に, 大質量の粒子が飛び込む確率が極めて低いことによる。従って, 比較的質量の大きい流星物質の研究においては, 広い範囲の領域を連続的に観測できる地上観測は重要である。そこでこの稿では流星現象のプロセス, 観測法, そして流星観測によって得られた主な成果などについて概説することとする。

2. 大気中における流星の振る舞い

流星物質が高速で地球大気に突入すると, 流星物質と地球大気原子・分子との衝突によって減速される(詳しくは[1], [2]等を参照)。時間 dt の間に地球中心に対する速度 V の流星が遭遇する物質の総質量 M は

によって与えられるが, ここで A は流星物質の形状によって決まるファクターであり, m は流星物質の質量, ρ_m 流星物質の密度, ρ_a は空気の密度である。 $A(m/\rho_m)^{2/3}$ は流星物質の断面積に相当し, 球状の流星物質の場合 A の値は1.2である。流星物質との衝突によってはね飛ばされる空気分子が単位時間当たり獲得する運動量は $\Gamma A(m/\rho_m)^{2/3} \rho_a V^2$ と表すことができる。ここで, Γ は無次元の抵抗係数(drag coefficient, 0.5-1.0の値をとる)である。この量は流星物質が単位時間に失う運動量 mdV/dt に等しいので, 以下の関係式が得られる。

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\Gamma A \rho_a V^2}{m^{1/3} \rho_m^{2/3}} \quad (\text{cm/sec}^2) \quad (2)$$

さて, 流星物質が失う運動エネルギーの大部分は熱に変換されて流星物質の表面を溶解する。流星現象は希薄な超高層大気中で起きるため, 電離や光の発生に消費される運動エネルギーの割合は遥かに小さい。溶解した流星物質の表面からは, 原子が流星の表面から蒸発していく。この一連の現象は英語でablationと呼ばれるが, 訳語としては「溶けて蒸発する」という意味で, あまりポピュラーではないが「溶発」を採用することとする。溶発により流星物質が質量を失う割合は, 流星物質の運動エネルギーが衝突する大気分子に移って行く割合に比例し, 次のように表される。

¹茨城大学理学部, ²国立天文台

$$\frac{dm}{dt} = -\frac{\Lambda A m^{2/3} \rho_a V^3}{2 \zeta \rho_m^{2/3}} \quad (3)$$

ここで ζ は溶発して行く流星物質が運ぶ熱量($0.2-1.0 \times 10^{10}$ erg/g), Λ は熱伝導係数(無次元, 0.1-0.6)であり, 運動エネルギーから熱エネルギーへの変換効率を示す.

一方溶発して流星から離れていく物質の速度には, 流星物質の軌道速度がベクトル的に加わり, これを運動エネルギーに換算すると約200eVとなる. これは流星物質から溶発してきた原子や, 空気中の原子を電離させるのに十分な大きさであり, その結果流星物質の移動とともに, 直径数m, 長さ10km程度のイオンの柱(電離柱と呼ぶ)が大気中に形成される. 電離柱の中の励起された原子やイオンは可視光領域のスペクトル線を放射し, それが流星の光として我々の眼に入るのである.

次に, 流星の電波観測データの解析を行う上で知っておかなければならない, 流星による大気中の電離について議論する. 流星の経路に沿った単位長さ当たりの電子線密度を α , 電離される原子の平均的電離ポテンシャルを η とすると, 流星物質の溶発によって供給されるエネルギーのうち, 電離に費やされるエネルギーの単位時間当たりの量は次式で与えられる.

$$\alpha V \eta = -\frac{1}{2} \tau_\alpha \frac{dm}{dt} V^2 \quad (\text{erg/sec}) \quad (4)$$

ここで τ_α は電離の効率を表すファクターである. (3)式によりこの式は以下のように変形される.

$$\alpha = \frac{\tau_\alpha \Lambda A}{4 \zeta \eta} \left(\frac{m}{\rho_m} \right)^{2/3} \rho_a V^4 \quad (\text{cm}^{-1}) \quad (5)$$

即ち, 流星によって形成される電離柱の電子線密度は, 流星の速度の4乗に比例するという基本的な概念が導れる. しかし以上の議論は流星物質の

分裂が考慮されていないことに注意しておく必要がある [3]. 以上のような予備知識のもとに, 以下の各章で流星の観測法やそれによって得られた結果などを議論することにする.

3. 流星の観測法

3.1 眼視観測

文字通り肉眼で流星を観測する方法であり, 初期の流星観測データは, 熟練した肉眼観測者によって得られたものである. 肉眼で見える流星は3等級よりも明るいものが多い. 流星の経路の観測は, 流星の発光点と消滅点を星図上に書き込むことによって行われる. 流星の経路をいくつか記録して, それぞれの経路を星図上で逆方向に延長してみると, ほぼ一点で交差する場合があります, これを輻射点(又は放射点)とよぶ. これは一群の流星が輻射点の方向から飛んできたことを示す. このように共通の輻射点を持った流星のグループを「流星群」とよび, 輻射点が属する星座の名前を取って, 例えば「しし座流星群」というふうには呼ばれることが多い. 流星群に属している流星は「群流星」とよばれ, そうでない流星は, 「散在流星」とよばれている. 眼視観測のデータにしばしば現れるHRという量は流星の1時間当たりの出現数(Hourly Rate)であり, 流星発生数の目安として用いられる. 観測データからHRを決定するためには, 空の状態(雲量など), 月明の有無, 観測者の個人差などの補正が必要である. また, 輻射点の高度の時間変化を補正して, 輻射点为天頂にあった場合に観測されるであろう流星数に換算することが行われている. 詳細については[4]を見られたい.

3.2 写真観測

写真観測の利点は流星の経路が正確に求められることにあり、回転シャッターを用いて流星の角速度を測定することも可能である。2地点で同時に写真観測を行えば流星の軌道が決定できるため、感光材の進歩とともに、世界各国で観測が行われるようになった。高感度感光材を使用すると、4等級までの流星を記録することができる。通常の写真観測では広い視野を得ることが困難だが、この欠点はスーパー・シュミットカメラ($f/0.8$, 視野の直径55度)の出現により大いに改善された。この観測装置を用いてホイップル達が1950年代に行った観測により、多くの流星の軌道が決定された。その結果、眼視観測者の間で約150年間にわたり論争が続いていた、どの位の流星が太陽系外起源を示す放物線軌道や双曲線軌道を持っているかという問題に対しては、そのような軌道を持つ流星が存在するとしても全流星の1%以下であり、しかも積極的な証拠では無いという解答を与えたのは有名である[5]。この問題のその後の発展については、本文4.5節を見られたい。

3.3 ビデオ観測

最近では前述の写真観測に代わり、流星のビデオ観測が広く行われるようになった。高感度のビデオ観測によると、大体9等までの流星を観測することが可能であり、 $13^\circ \times 16^\circ$ の視野の場合、平均して1時間当たり約180個の流星をキャッチできる。ビデオ観測によると、 $1/25$ - $1/30$ 秒くらいの高い時間分解能で流星の追跡が可能となる[1]。また2ヶ所でビデオ観測を行うことにより、高さによる流星の明るさの変化などを詳細に追跡することができるだけでなく、間欠的な撮像が行われるため、回転シャッターを使わなくても速度の測定ができる。この方法による観測から流星の溶発や分裂過程について、貴重なデータが得られている。

3.4 分光観測

流星の軌跡の見かけの幅は非常に狭いため、プリズムまたは回折格子を対物レンズの前面に装着すれば、スリットを用いなくても流星の分光観測が可能である。典型的な流星のスペクトルは、電離ポテンシャルが1.9~13.9Vにあるイオンの発する低励起スペクトルであり、温度に換算すると1630~4800Kに相当する。また、流星によって生成される励起状態の原子の総数は 10^{15} ~ 10^{17} 個と見積もられている。これまでにスペクトル観測によって検出された元素は、中性原子としてはFe I, Mg I, Na I, Ca I, Mn I, Cr I, Al I, Ni I, H I, O I, N I, 1次電離イオンとしてはCa II, Mg II, Si II, Fe II, N II, O IIなどがある(注: 原子記号に付けたローマ数字は何価のイオンであるかを示し, Iは中性, IIは1価のイオンを示す)。図1に流星スペクトルの例を示す

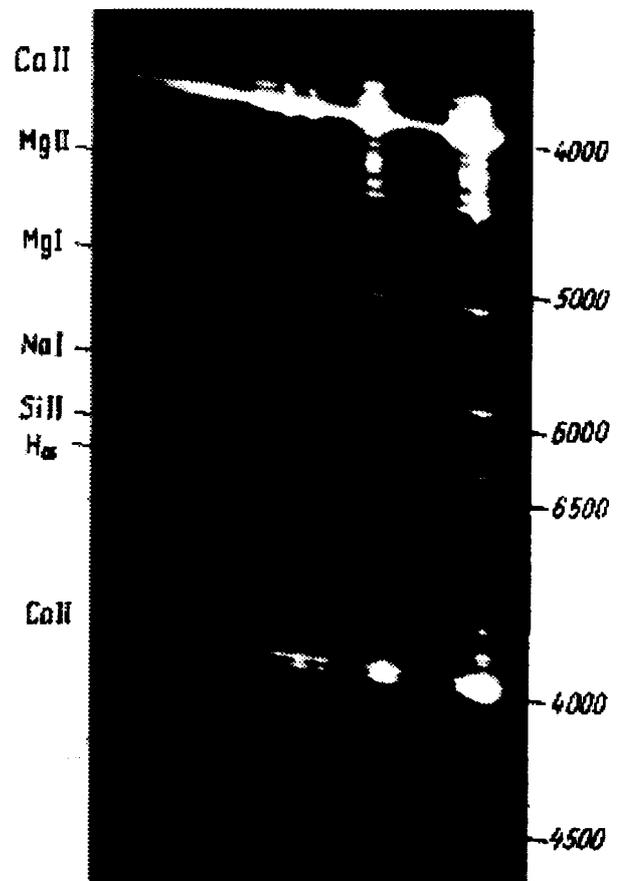


図1. 明るい流星のスペクトル([2]の167ページ, 図55から引用).

[2]. 流星のスペクトルは粒子の速度や流星の明るさによって現れ方が異なり，高速の流星の場合Ca IIのH, K線が目立つようになり，低速の流星ではNa I, Mg I, Fe Iのスペクトル線が主となる．また， N_2 , FeO, MgO, CaO, CN, C_2 , CO, CO^+ などの分子スペクトル線が見られることがある．流星のスペクトルの解析から元素の存在比を決めることができる．流星物質の元素の存在比は炭素質コンドライト系の隕石に近いことが示されているが[6]，スペクトル線の解析にあたって電離・再結合過程の詳細が不明のため，問題が残っている．

3.5 流星の電波観測

第二次大戦後，戦時中に発展したレーダー技術を応用して流星を観測することが，1950-1960年代に米国，英国，カナダなどで始められた [7]．流星のレーダー観測に使われる電波の波長は，電離柱の幅よりも長いことが必要であるが，これは波長が短い場合に電離柱の前面と後面から反射された電波がお互いに干渉を起こして，反射電波の強度が減少するためである．従って流星レーダー観測は，通常50 MHzあたりの電波を用いて行われる．詳しい議論は[1, [7]にある．

流星観測では，後方散乱(backscatter)レーダが用いられることが多い．これは同一の地点に置かれた送信機と受信機によって，電離柱から反射されて戻ってくる電波を観測するものである．この方法によると，反射点付近における電離柱に含まれる電子の線密度(流星痕の単位長さ当たりの電子数)に関するデータが得られる．流星による反射電波強度の時間変化の様子がエコーの継続時間によってどのような形で現れるかを図2に示す[1]．電離柱の電子線密度が $2.4 \times 10^{12}/\text{cm}$ より十分小さい場合は underdense とよばれ，このとき受信電波強度の時間変化は，電波強度の急激な上昇と，それに引き続く指数関数的な減衰を示す(図2上段)．これに対し

て電子線密度が上述の値より十分大きい場合は overdense とよばれ，継続時間が数秒間から数10秒間にわたってほぼ一定強度ののエコーが観測される(図2中段)．長時間継続するエコーには大きな強弱の変化が現れるが，これは電離柱の複数の場所で反射された電波が干渉を起こるためである(図2下段)．アンテナのビームの中を流星が移動するのに伴って，受信電波強度が周期的に変動すること

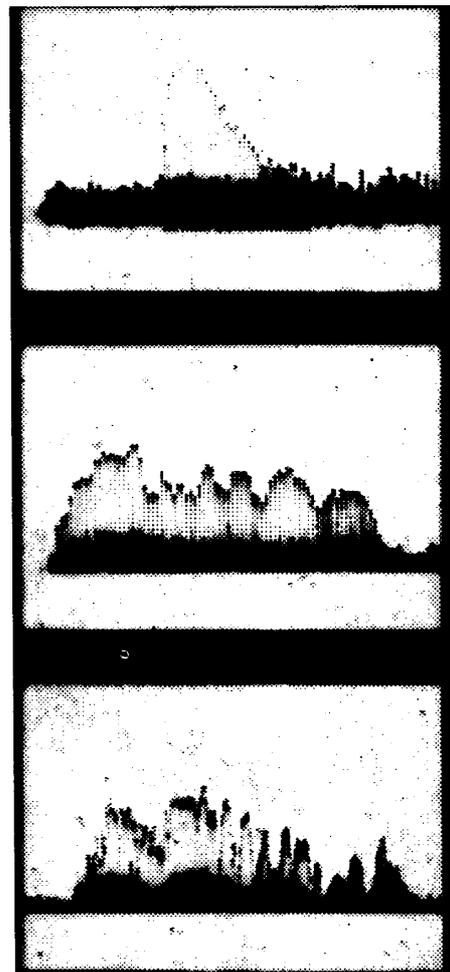


図2. 後方散乱レーダーによる受信電波強度の時間変化の例．観測周波数は16.6 MHz．パルス間隔は20 msec．上段：underdenseの場合．エコーの継続時間は0.3 sec．中段：overdenseの場合．エコーの継続時間の代表値は1.6 sec．下段：overdenseで継続時間の長いエコー(この場合は14.4 sec)．流星痕の変形により顕著な電波強度変化を示す([1]の138ページ，図8より引用)．

があるが(図2中段), これはフレネル効果によって作られる干渉パターンの移動によるものである。そこでこの観測から流星の速度を求めることができる [7]。また, 流星の頭部からの反射波の波長の変化を観測して, 直接に流星の速度が測定できる。速度測定の精度は, $\pm 5 \text{ km/sec}$ 程度である [1]。

多くの流星は時間とともに減速を受けるが, 大気中での流星の運動を記述する drag equation に減速効果を加えることにより, 線密度の高さによる変化, 最大線密度, 電離柱の中に存在する電子の総数などが求まる。こうして求めた電離度の高さによる変化から, 熱伝導率や電離効率などを考慮して, 大気層突入前の流星物質の質量が決定できる。また, 減速に対する質量損失の割合である溶発係数もこの観測から求めることができるが, この量は流星物質の化学組成や物性物理的構造に密接に関係している [1]。

このように流星のレーダー観測は, 眼視観測や写真観測と比べてはるかに多くの情報を提供することができるが, それなりの限界はある。一般に高速の流星は検出されやすく, 低速度の流星は観測されにくい。また, 観測限界は電離柱の拡散時間にも依存する。ここで問題にしている数十MHz帯においては, 高度が100 kmより高いところでは拡散が効くため, 高速の流星であっても検出しに

くくなるし, 低速度で低質量の流星であっても, 低高度では拡散が緩やかであるため, 逆に検出しやすくなる。流星レーダー観測の解析を行うとき, 後述のようにこれらの「選択効果」の補正が重要となる [3]。

4. 流星観測によって得られた結果

この章では, これまでの流星観測によって得られた主な結果について述べるが, 全体をカバーすることは不可能であるので, 詳細については [1], [2], [4] を見られたい。

4.1 流星群

眼視観測によって得られた2等級よりも明るい流星のHR値が, 1年の間に変化する様子を図3に示す [1]。この図に見られるいくつかの顕著なピークが流星群に相当し, その輻射点が存在する星座の名前から○○座流星群, といった名前で呼ばれている。代表的なものは8月のペルセウス座流星群(P), 10月のオリオン座流星群(O), 12月のふたご座流星群(G)などがある。代表的な流星群について, 輻射点の位置, 極大日, 出現期間などが, 例えば理科年表などに掲げてある。しかしこれらのパラメータは流星の等級によって若干異なる場合があ

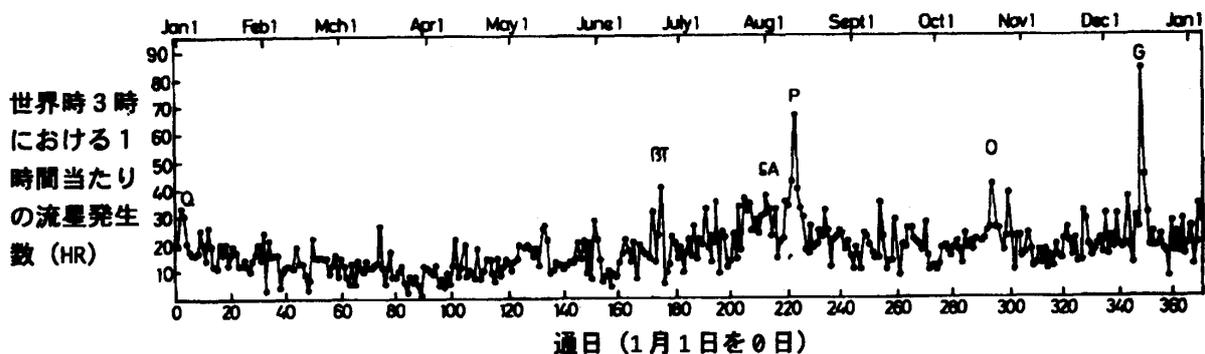


図3. 世界時3時における, 2等級よりも明るい眼視流星の1時間当たりの出現数の変化を1年間にわたって示す。代表的な流星群はしぶんぎ座(Q), おうし座 β (BT), ペルセウス座(P), オリオ

ン座(O), ふたご座(G)各流星群がある([1]の131ページ, 図4より引用)。

り，輻射点の位置は木星による摂動などによって，年とともに変化する．流星の出現数も年によって変化し，かなりはっきりした周期的変化を示すものもある．例えばペルセウス座流星群は約120年周期で増減しており，しし座流星群には33.25年の周期があるといわれている [1]．この流星群については，前回の大出現(「流星雨」，と呼ばれることがある)が1966年に発生したため，今回は1998-1999年に発生して，HRが5000程度に達することが期待されている [8]．流星群は夜間だけでなく，当然のことながら昼間にも出現し，昼間群と呼ばれる．これらの流星群の存在は電波観測によって初めて確

認されたもので，主な昼間群としては，6月8日をピークとして5月22日から7月5日頃まで出現が見られる，おひつじ座流星群がある [7]．

4.2 流星物質のフラックス

単位面積，単位時間当たり流入する流星物質の，ある一定の値よりも大きい質量を持つ粒子の総数を累積フラックスと呼ぶ．図4に眼視，電波観測から求めた累積フラックスを，等級，電子線密度の関数として表したものを示す [1]．この図は多くの流星を平均したものであるが，累積フラックスの形は流星群によって異なり，流星群の年齢，母彗

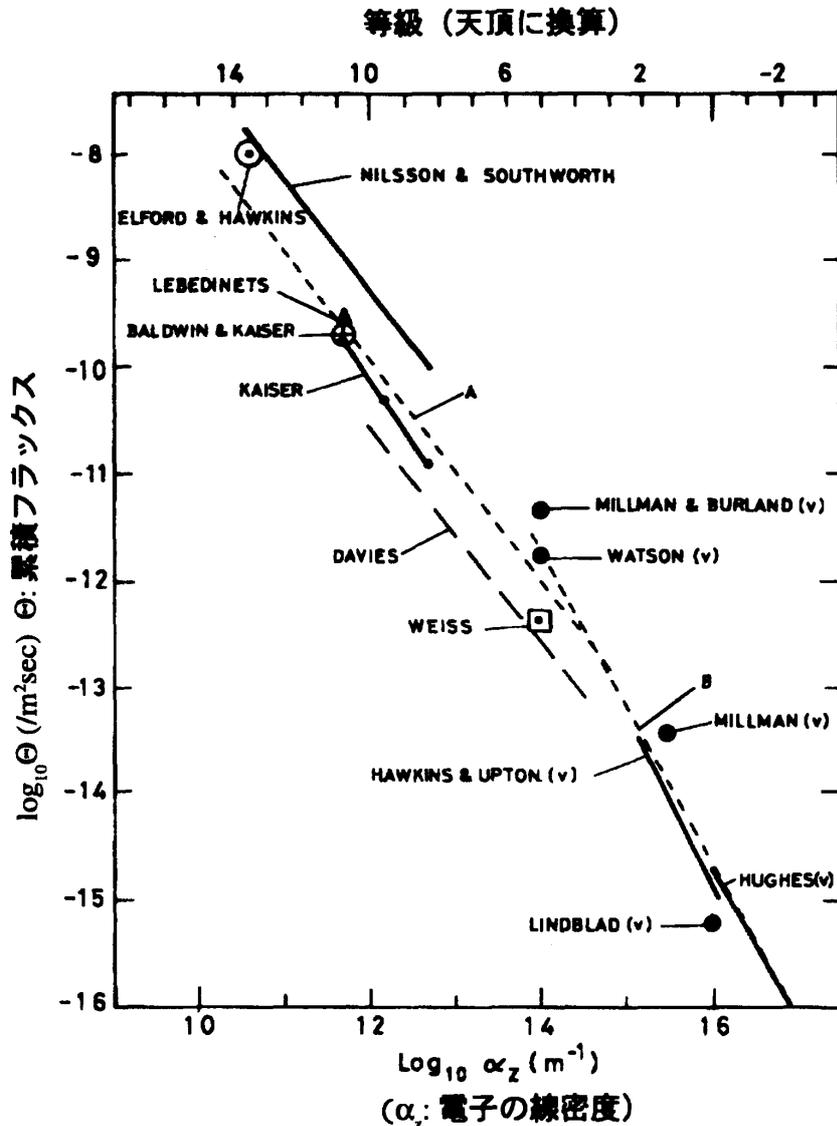


図4. 流星の累積フラックスを天頂に換算した等級(上の目盛)と電子の線密度の対数(下の目盛)に対して示したものの。破線Aはレーダー観測から，破線Bは眼視観測から求めた最適直線 ([1]の149ページ，図14より引用)。

星の性質などに依存することが予想される。

4.3 流星物質の軌道

これまでに写真観測、レーダー観測によって決定された約69000個の流星の軌道データが、スウェーデン・ルンド天文台にある国際天文学連合の流星データセンターに保存されているが、前述のように観測方法によって検出される流星の性質に偏りがあるため、軌道要素にも偏りが現れる。写真流星は3つのグループに分類され、72%は短周期彗星と似た軌道を持ち、18%は長周期彗星、残り10%は小惑星に似た軌道を持つ[5]。レーダー観測では、もっと質量の小さい流星が検出できるため、これとは少し様子が異なるが、観測の選択効果や、流星物質の分裂によって、高速度の流星が観測される割合が減ることの補正に問題はあるものの、多くの電波流星は主に彗星に起源をもつことが推定されている。また、写真流星も電波流星も、軌道の近日点距離が0.1天文単位より小さいものはほとんど見られない[1]。

4.4 流星の速度分布

流星の速度の下限は大気圏外からの自由落下の速度に相当し、これは11.2 km/secである。上限は地球軌道において取りうる軌道速度の最大値(42 km/sec)と、地球の平均軌道速度(30 km/sec)との和の、72 km/secとなる。これらの「臨界速度」を念頭に置いて観測値を見ると、スーパー・シュミットカメラによって観測された約2等級の流星の地心速度は18 km/secあたりにピークを持ち、65 km/secのところには2次的なピークが現れる[9]。電波観測の場合は、選択効果や流星物質の分裂による効果の補正に問題があり、従来言われてきた値よりも少し低めの、25.3 km/secという平均速度が得られている[10]。そこでほとんどの流星の起源は太陽系内にあると思われていたが、1990年から1991年にか

けて、ニュージーランドのAMORレーダー観測によると、軌道が決められたすべての流星のうち、0.9%が100 km/sec以上の地心速度を持っていることが示された[11]。そして高速度流星の出現数の季節変化から、近くにあるA型星やB型星の星団が、そのような太陽系外物質の発生源となっている可能性が示唆されている。

4.5 流星の密度

Babadzhanov [12]は流星物質の分裂を考慮してレーダー観測の解析を行い、流星物質の密度の平均値は3.3 g/cm³であり、中には石質隕石や鉄隕石に匹敵する密度を持つものもあることを示した。この値はこれまで広く認められていた、分裂を考慮しない場合の平均密度0.8 g/cm³[13]よりもかなり大きい。また散在流星の平均密度は2.4 g/cm³であるのに対し、群流星は少し大き目の平均密度を示す傾向がある。しかし現時点ではこの線に沿って解析された流星の数が圧倒的に少ないため、統計的有意性には問題が残されている。いずれにせよ、流星物質はこれまで言われてきたような、ふわふわした塵の集まりのようなものから、鉄隕石、石質隕石の破片のようなものまで様々な形態を持っており、その起源も多様であることが示唆される。

5. 流星観測の今後

以上で見てきたように、地上からの流星観測はロケットや人工衛星では検出できない比較的大型の流星物質の研究の手段として有用である。また飛翔体による短期間の観測と異なり、数十年以上にわたる長期間の観測データの蓄積が可能である特徴を生かし、例えば流星群の年齢、母彗星の大きさや構造、軌道要素などによって流星群の特性がどのように変化するか、といった未解決の問題の解明や、太陽系外からの流星物質の研究などが

今後も行われるであろう。また、流星物質の分裂など、大気中における流星物質の振舞いについてもまだ検討の余地があり、これまでに行われた解析の見直しが必要となる可能性もある。しかし、新しいアイデアに基づく解析を行おうとしても、それに必要な基礎データが保存されていないケースも多く、場合によっては新規に観測をやり直す必要性が生じるかも知れない。また、1998-1999年に大出現が予想されるしし座流星群については、国際的にも天候に左右されない航空機観測など、多様な観測計画が立案されており、新技術を駆使した観測によって、流星研究に新しい局面が開けることが期待される。

謝辞

本稿をまとめるに当たり、編集者、査読者から貴重なコメントをいただいたことを感謝します。

参考文献

- [1] Hughes, D. W., 1978: *Meteors*. in *Cosmic Dust* (McDonnell, J. A. M., Ed.), John Wiley & Sons, Chichester, 123-185.
- [2] Bronshten, V. A., 1981: *Physics of Meteoric Phenomena*. D. Reidel, Pub. Co., Dordrecht.
- [3] Thomas, R. M., Whitham, P. S., and Elford, W. G., 1986: Frequency Dependence of Radio Meteor Echo Rates. *Proc. Astron. Soc. Australia* **6**, 303-306.
- [4] 長沢 工, 1997: 『流星と流星群』, 地人書館.
- [5] Whipple, F. L., 1943: *Meteors and the Earth's Upper Atmosphere*. *Rev. Mod. Phys.* **15**, 246-264.
- [6] Harvey, G. A., 1974: *Elemental Abundance Determination for Meteors by Spectroscopy*. *J. Geophys. Res.* **78**, 3913-3926.
- [7] McKinley, D. W. R., 1961: *Meteor Science and Engineering*. McGraw-Hill, New York.
- [8] Mason, J. W., 1995: The Leonid Meteors and Comet 55P/Tempel-Tuttle. *J. Br. Astron. Assoc.* **105**, 219-235.
- [9] Whipple, F. L., 1954: *Photographic Meteor Orbits and Their Distribution in Space*. *Astron. J.* **59**, 201-217.
- [10] Hawkins, G. S. and Southworth, R. B., 1958: The Statistics of Meteors in the Earth's Atmosphere. *Smithson. Contr. Astrophys.* **2**, 349-364.
- [11] Taylor, A. D., Baggaley, W. G., and Steel, D. I., 1996: Discovery of Interstellar Dust Entering the Earth's Atmosphere. *Nature* **380**, 323-325.
- [12] Babadzhanyan, P. B., 1994: Density of Meteoroids and Mass Influx on the Earth. in *Asteroids, Comets, Meteors 1993*. (Milani, A., Di Martino, M., and Cellino, A., Eds.), Kluwer Academic Pub., 45-54.
- [13] Verniani, F., 1973: An Analysis of the Physical Parameters of 5759 Faint Radio Meteors. *J. Geophys. Res.* **78**, 8429-8462.