

特集 「新世紀の宇宙塵研究」

レビュー：宇宙塵研究の歴史と現状

向井 正¹

1. 塵研究の流れ

こういう題目でまとめを書くとなると、どうしても「書き手も年をとったものだ」という枕言葉を使ってしまう。短いつもりが、4半世紀も宇宙塵に係わってくると、このようなタイトルを与えられても断われなくなる。その間に宇宙塵の研究は、大きく様変りをした。塵に関心を持つ研究者も増えた。そのすべての変遷を、まとめてお話しすることは私にはできない。この短いまとめは、私の狭い視野から眺めた、惑星間塵研究の歴史と現状である。

古代、天の川の所どころに見える黒い部分は、天に空いた穴だと思われていた。これが、どうやら星の光を遮る物質の塊らしいと考えられるようになったのは、近代的な科学の始まりの頃である。1930年代になって、波長によって星の光の減光の様子が異なることが判り、その原因として、星間空間にミクロン・サイズの固体微粒子(塵)が存在することが予言された。ここで、星の光を遮る物質として、宇宙の塵が登場した。その後の天文観測は、紫外から赤外、サブミクロンへと波長を拡大しつつ、宇宙の様々な領域で塵を発見した。現在では、原子、分子といったガス成分と、それらの電離プラズマと共に、塵が宇宙の主要構成要素となっている。個々の天体現象においても、塵の関与は重要とみなされる。最近、次々と発見され

ている恒星の周りの円盤状の塵雲が、惑星系誕生の母体となることを疑う人はいない。地球周辺の塵と、これら天文学的遠方の塵との類似性と異質性の検証は、現代においても、古くて新しい研究課題である。

ここでは、我々が手にすることのできる宇宙塵を話しの対象とする。「手にする」という意味には、直接採集されるもの以外に、惑星間空間に送り出した塵測定器へ衝突してくる塵も含める。宇宙塵の直接衝突測定は、「その場」測定と呼ばれる。「その場」測定は、この30年間をざっと見ても、ほぼ切れ目無く続いている。その結果、星間塵の流入の発見や、木星起源の塵流の同定が報告されたのは記憶に新しい。我が国も、宇宙科学研究所(ISAS)の「ひてん」衛星による月周回軌道上での惑星間塵の測定によって、塵の直接測定に貢献している。こうした飛翔体による塵の測定も含めて、宇宙塵を研究する様々な手段についても紹介し、本特集の後に続く一連の解説記事を理解するための一助としたい。

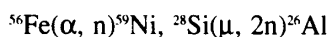
2. 宇宙塵とは？

地球上において、宇宙からやってくる固体微粒子(塵)の発見は、19世紀中葉に3年半の長期に渡って世界一周の航海を行い、海洋科学を开花させたイギリスのチャレンジャー号の研究成果である。深海底の堆積物中から採集された球状の微粒子が、

¹神戸大学理学部

宇宙からの塵と呼ばれた[1]。この後、同様の深海底泥からの宇宙塵の採集は、我が国でも1960年代に東大・海洋研の白鳳丸によって続けられた。球状のスフェールと呼ばれるきれいな固体微粒子が、深海底の泥の中から多量に採集された[2]。一方、陸上に落下する宇宙塵の採集のために、雨粒や雪片を大きなシートに集めて丸い粒を探すことが、各地の学校の地学クラブで取り上げられたのも、この頃である。

地上で回収されたこの丸い粒が、地球外からやってきたことを証明することは難しい。宇宙からやってくる塵は、地球大気に突入した際に、融解して丸くなるだろう。だから、丸い粒を探せばよい。というのが、チャレンジャー号以来の宇宙からの塵の簡易識別法であった。一方、より精度の高い宇宙起源の証明として、宇宙空間で塵が太陽からの高エネルギー粒子に直撃された痕跡を探すことが試みられた。塵の中の鉄やケイ素は、高エネルギーの α 、 μ 粒子を浴びて



という反応によって放射性核種(半減期は、 ${}^{59}\text{Ni}$ が7万5千年、 ${}^{26}\text{Al}$ が74万年)を作る。これらの核種を、スフェールから検出すれば、これらのスフェールが、太陽系空間を漂っていたことが確かになる。1960年代の初めに発足した京都大学・長谷川研究室の最初のプロジェクトは、宇宙塵に含まれる放射性核種の同定と、深海底泥の年代毎のコアサンプルから放射性核種の量を測り、これを基に、太陽高エネルギー粒子(宇宙線)の時間変動を調べることであった。この研究の成果として、スフェールから ${}^{26}\text{Al}$ を検出したことが挙げられる。その当時は、測定器の感度が悪く、スフェールの一粒一粒の元素組成や放射性核種の定量的な測定はできなかった。そのため、コアサンプルをまとめて

放射性核種の測定をしていた。

南極の氷を溶かして、その中に閉じ込められている宇宙塵を採集する計画が、1997年の秋に出発する南極観測隊で取り組まれる。これは、従来の地上における宇宙塵採集計画を発展させたものである。採集サンプルの室内分析機器の精度は、90年代に入って飛躍的に向上し、かつ隕石サンプルの微量分析で培われた分析者の熟練度は高い。南極の宇宙塵の解析から、大きな成果が期待される。宇宙からやってきた塵は、深海の泥の中にみつかるまでに、様々な変成作用を受ける。地球大気への高速突入(秒速11~72km)に伴う熱変成や、大気中・水中における水質変成等が考えられる。こうした変成作用による塵の変質は、宇宙の塵固有の特質を隠してしまう。宇宙に存在していたままの塵の特質を調べるためには、宇宙空間で塵を採集したい。そのために、まず大気上空で塵を回収する試みが行われた。アメリカのヘメンウェイ(Hemenway, C. L.)達がロケットに回収装置(パンドラと名付けられた)を付けて、高度100kmまで打ち上げたのは60年代の始めである[3]。早稲田大学の藤本研究室のグループが、バルーンを使った塵回収に取り組んだのもこの頃であった。その後、上空での塵の採集は、アメリカのブラウンリー(Brownlee, D. E.)達が、NASAの飛行機に塵採集器を積んで、70年代中頃から精力的に取り組んだ[3]。彼等は、塵採集を進めると共に、地上の実験室での微量成分分析精度の向上に努めた。その結果、室内の測定器で、個々の採集塵の特性X線スペクトルが測れるようになり、また、塵の大きさ、形状、透明度、色、輝きに基づいて塵を一粒毎に分類できるようになった。上空で採集された塵のなかで、地球起源とは異なる特性X線スペクトルを示すものは、一時、ブラウンリー粒子と呼ばれていたが、ブラウンリー自身がこの呼び方を嫌って Interplanetary Dust Particles というものだから、今

ではこれを略してIDPsと言う。

IDPsの化学組成や鉱物組成・構造については、『地球化学』の特集号に詳しいので、ここでは、ひとつだけその特徴を述べておく。宇宙の塵の形状については、チャレンジャー号による採集以降、丸い粒という概念が定着していた。しかし、多量の海底泥からサンプルを効率的に採すために、丸い粒だけを選択的に選び出した、ということをおぼえてはいけない。大気上層(28 km付近)で採集されたIDPsの多くは、不規則な形状でかつ不均質な組成から成り立っている。これらの形状には、「ぶどうの房」のようなという表現がよく使われている(図1a参照)。現在では、宇宙の塵の形状と構造を均質球とすることは、「粗い近似」と考えられている。塵が不規則で不均質であるということが、太陽系内での不規則形状塵の運動や、光散乱の研究を促し、原始太陽系星雲中での固体微粒子生成過程の研究を活気づける直接の原因となった。

宇宙空間に固体微粒子が存在し、それらが星の光を減光させたり、偏光させたりすることがわかったのは1930年、トランプラー(Trumpler, R. J.)が星の色変化(color excess)を基に推定したのが始まりとされる[4]。その後、観測された星の減光スペ



図1a. 上層大気中で採集された塵。大きさ 20ミクロン([9]より引用)。

クトルから、微粒子の大きさや構成鉱物についての推測が行われた。このモデル計算では、光を散乱する微粒子は、球として扱われた。これは、当時、モデル計算に使われたミー(Mie)理論が、金属微粒子の光散乱を扱うもので、そこでは散乱体を均質な球と仮定していたためである。宇宙の塵の形状について、こうした簡略化を許した背景には、非球形の光散乱を扱う理論がなかった事と、チャレンジャー号の丸い採集塵(スフェール)の存在があった。

宇宙の塵を、不規則形状体として扱うべきだという主張は、地球上層大気中でのIDPsサンプルの採集例の増加に伴って強まっていく。不規則形状塵の光散乱特性を調べるために、マイクロ波やレーザー光を用いた室内散乱実験が行われた。一方、様々な近似手法を用いた理論計算の開発も進められた。星の光の偏光を扱うには、塵が球形では都合が悪いことは古くから指摘されていた。このため、細長い円柱(針状)にミー理論を拡張することが試みられた。また、不均質塵のモデルとして、中心核とそれを取り囲む殻という二重構造を持った塵モデルを扱う手法が開発された。これらの試みが盛んに行われたのは、60年代前半である。一方、

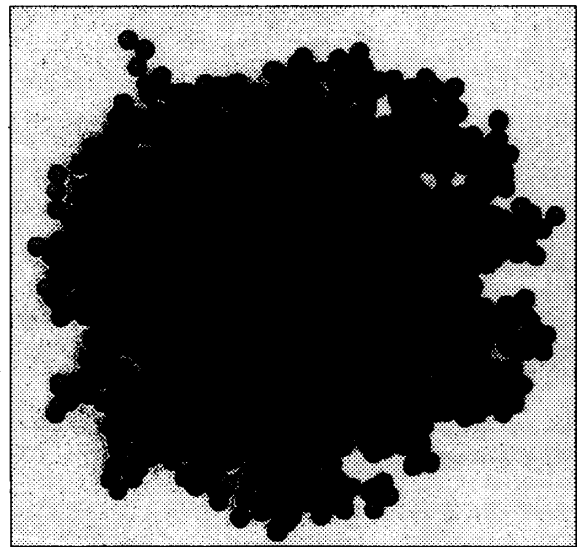


図1b. 計算機シミュレーションで作られたフラクタル塵モデル(1024個の基本粒子からなる)([10]より引用)。

波動方程式の境界値問題を解析的に解く試みから、非球形粒子の光散乱を扱う努力も行われていた。この方面では、楕円関数を使って回転楕円体の光散乱を解析的に解いた1975年の東北大学の浅野・山本の仕事[5]が有名である。1979年6月にアメリカのオルバニーでひらかれた「Light Scattering by Irregularly Shaped Particles」研究会の収録[6]が、当時の非球形体の散乱事象への取り組み状況をよく示している。この研究会のオーガナイザーであったシュアマン(Schuerman, D. W.)が1982年に38歳の若さで交通事故で亡くなり、また、室内実験と惑星間塵雲モデルにおいて中心的役割を果たしていたドイツ・ルール大学のギーゼ(Giese, R. H.)が1988年に57歳で亡くなったことは、この分野の大きな損失であった。

最近では、離散双極子近似(Discrete Dipole Approximation (DDA))を適用して、任意形状の散

乱体の散乱特性を計算できるようになった。計算機の処理能力の向上に連れて、複雑な形状の散乱体の散乱特性が、手軽により良い近似で求められるようになった。不規則形状塵のシミュレーション・モデルとしては、フラクタル集合塵がよく用いられる(図1b参照)。最新の光散乱の扱いについては、本特集の岡本らの項に詳しい。「Light Scattering by Nonspherical Particles: Theory, Measurements, and Applications」という研究会が、ミシェンコ(Mishchenko, M. I.)とトラビス(Travis, L. D.)によってニューヨークで1998年9月29日から開かれる。この研究会は、不規則形状体による光散乱の取り組みのひとつの区切りとなるだろう。

すこしわき道にそれたが、宇宙の塵の形状についての理解の変遷を述べた。それでは、塵の大きさや空間分布についてはどのような事柄が判ってきたのだろうか。

表1. 探査機による塵測定

探査機名称(打ち上げ時期)	測定領域(AU)	測定可能な最小質量(g)	測定器の有効面積(m ²) (衝突速度20 km/s)
エクスポローラー16(1962年12月)	1	8×10^9	1
エクスポローラー23(1964年11月)	1	8×10^9	0.7
ペガサス1, 2, 3(1965年2, 5, 7月)	1	$1 \times 10^9, 2 \times 10^7, 1 \times 10^6$	7.5, 16, 171
パイオニア8(1967年12月)	0.97-1.09	2×10^{15}	0.0094
パイオニア9(1968年11月)	0.75-0.99	2×10^{15}	0.0074
プロスペロ(1971年12月)	1	7×10^{16}	0.002
ヒオス2(1972年2月)	1	2×10^{16}	0.01
パイオニア10(1972年3月)	1-18	2×10^9	0.26
パイオニア11(1973年4月)	1-10	1×10^8	0.26
ヘリオス1(1974年12月),2(1976年1月)	0.3-	9×10^{15}	0.012
ガリレオ(1989年10月)	0.7-5.2	1×10^{15}	0.1
ひてん(1990年1月)	1	1×10^{15}	0.01
ユリシーズ(1990年10月)	1-5.2	1×10^{15}	0.1

(黄道面外 < 2.9 AU)

([11]より引用)

3. 宇宙塵の「その場」測定

3.1. 惑星間空間

ロケットを使った塵採集装置「パンドラ」については既に述べた。パンドラの箱から取り出された「希望」が、その後の塵測定を導いてきたようだ。塵探査に利用する飛翔体は、ロケットから地球周りの衛星へと進んでいった。表1には、1962年12月に打ち上げられたエクスプローラー16以降の飛翔体に搭載された塵測定器がまとめられている。時代に連れて、測定器の有効面積が下がったのは、測定原理の変化を反映している。初期の塵測定器には、高圧ガスを詰めた微小ユニットを、蜂の巣状にしたものが用いられた。塵の衝突でユニットの壁が破れると、ガスが抜けて、これを信号として記録する。壁を通過できたことから塵の最小質量が判り、衝突頻度から塵の空間分布が推定された。このような蜂の巣はいくらでも大きくできるので、初期の塵測定器の有効面積は大きい。その後、衝突で電離した塵のプラズマを電極に集め、そのパルスの立ち上がりや、波形から衝突した塵の質量を求める装置が主流となった。このため、測定器の有効面積は下がったが、衝突した個々の塵の質量が明らかとなり、同時により小さな塵まで測定できるようになった[7]。

また、惑星間飛翔体で塵測定を行うことによって、地球軌道周辺以外の空間でも塵の直接測定ができるようになった。現在では、太陽からの距離にして0.3AUから18AUまでの黄道面内と、それにほぼ垂直な面内で黄緯 -79° から $+79^{\circ}$ までの領域を塵測定器を積んだ探査機が通過している。しかし、この広い空間内で、探査機が通過した通路が占める領域は、気が遠くなるほど小さい。塵による太陽光の散乱光(黄道光)や塵の熱放射の測定を行うと、グローバルな塵の空間分布を調べることができる。残念なことに、黄道光を測定する装置は、へ

リオス以降、探査機に搭載されていない。ユリシーズは、当初2台の探査機が、黄道面の北と南に向かう予定であった。北行きの便が、アメリカの予算削減のあおりを受けて中止となり、搭載予定だった黄道光測定器が消えてしまったことは、かえすがえすも残念でならない。衝突塵の測定器と、黄道光測定装置を共に積んだ惑星間飛翔体の実現が待たれる。

これ以外にも、宇宙空間に曝露された後で、地上に回収された衛星本体の塵衝突痕跡の分析による塵測定が行われてきた。この例としては、1984年4月から90年1月にかけて、チャレンジャー号の事故により回収が遅れたために、予期せぬ長期間を宇宙空間で過ごしたLDEFや、1995年3月から10ヶ月を地球周りの軌道上で過ごした我が国初の回収型衛星SFUがある(これについては、本特集の大橋らの項に詳しい)。

これらの「その場」測定で得られた惑星間塵の軌道特性、サイズおよび空間分布特性をまとめる。(1)地球軌道と同じ方向にケプラー運動する大きな α 型流星体(α meteoroids)と、太陽方向から来るように見える小さい β 型流星体(β meteoroids)の発見、(2)地球近傍の塵のサイズ分布が半径1ミクロン付近で折れ曲がる、(3)塵の数密度は太陽からの距離の一乗で減少するが、2-3AU付近で増加に転じるように見える。しかし、これらの結果は、数百個の塵の衝突事象からのまとめであって、その統計精度については、まだまだ低い。例えば、 β 型流星体の起源については、太陽近傍で昇華作用か、または相互衝突で小さくなった塵が、太陽放射圧を受けて飛び出してきたといわれているが、確証はない。 β 型流星体の鉱物組成が判れば、その起源に迫れるだろう。塵の軌道特性や、サイズ/空間密度は、塵の起源と、塵の惑星間空間での軌道の力学進化を反映している(これについては、本特集の石元の項に詳しい解説がある)。

3.2. 彗星の塵

塵の「その場」観測では、1986～87年に行われたハレー彗星探査が特筆される。地球近傍で見つかる宇宙塵の三分の一は彗星起源だという。月試料の表面に残っている衝突痕の口径と深さの比から、衝突してきた塵の「かたさ」を推定すると、彗星起源の「やわらかい」塵の衝突頻度がおよそ三分の一という。残りの大部分は、惑星間塵のもうひとつの供給源である小惑星からの「かたい」岩石細片と思われている。定量的な推測については、まだまだ疑問も多いが、小惑星と彗星が、惑星間塵のほとんどを賄っていることは間違いない。小惑星帯付近に塵の熱放射の帯びがみついている。また、彗星が塵を放出していることは明らかであり、赤外線による観測から、彗星軌道に沿って熱放射体がまとまって存在することも見つかっている。

惑星間の塵は、太陽光の斜め入射(光行差現象)によって引き起こされるポインティング・ロバートソン効果を受けて、螺旋軌道を描きつつゆっくりと太陽に落ち込む。地球軌道付近の1ミクロン程度の塵で、およそ1万年で太陽に近づいて昇華消滅してしまう。惑星が生まれ、晴れ上がった惑星間空間に取り残されていたすべての塵は、ポインティング・ロバートソン効果を受けて、30億年を越える時の経過によって、すべて太陽に落ち込む。このため、現在我々がみている惑星間の塵は、比較的最近に、惑星間空間に供給されたものである。

ハレー彗星の塵探査では、「その場」観測としては初めての塵の質量分析に成功した[8]。それによると、(1)塵の元素組成は、隕石のそれよりもより始原的である。彗星の塵とガスを合わせた揮発成分C, N, Oの存在比は、炭素質コンドライトの元素比よりも、太陽系の元素比に近い。(2)主要成分であるFe, Mg, Siは、地球上層大気中で採集されるIDPsの無水鉱物的な塵に近い。Mg/Siに比べてFe/Si

の分散が大きいことから、彗星の塵の固化が、FeがSiO₂に溶け込む温度(500K)以前に系が開いたところで生じたことを示唆する。(3)¹²C/¹³C～5000という塵がみつかった事は、彗星の内部に他の星(¹³Cの少ない若い星)の周りで生まれた塵が混在することを明らかにした(太陽系では¹²C/¹³C～90)。

3.3. 「その場」測定の近未来

1997年秋にNASAが打ち上げる土星探査機カッシーニと、1998年夏にISASが打ち上げる火星探査機Planet-Bに、塵の「その場」測定器が搭載される。また、1999年にNASAが打ち上げる彗星P/Wild 2の塵回収ミッション(Stardust)では、彗星から放出された塵を「その場」で捕獲するための測定器が搭載される。こうしてみると、2000年代の始め頃までは、塵の「その場」測定の機会が続いていく。

塵の「その場」測定のほとんどは、衝突で生まれた塵の電離プラズマ量の測定に基づいてきた。ここでは、測定器の開口方向から、衝突してきた塵の運動量(質量と速度)と飛来方向が求められた。その後、塵衝突で発生した電離プラズマ粒子が、電極間を飛行するのに要する時間の差から、塵の構成要素の質量分析を行うことが可能になった。今後は、非破壊捕獲・試料回収、「その場」での塵形状・表面電荷量の測定等、塵の未知の物理量を測定するための新しい原理を応用した機器の開発が急がれる。

4. 塵研究の将来

宇宙の様々なところで、固体微粒子(塵)がみついている。これらは、星や惑星を生む素材となる。また、星雲内での高分子生成のための媒体としても、塵は重要な役割を果たす。塵は、様々な天体現象に関与すると共に、各種の天体の重要な構成

員である。また一方では、数百オングストロームの固体微粒子は、高分子クラスターと固体バルクの境界領域にある物質として、その物理的・化学的特性に興味を持たれている。塵と光との相互作用(吸収・反射・熱放射, 光電効果, 光解離など), 塵の熱伝導, 電気伝導, 比熱, 物質強度等, 塵の小さいサイズが引き起こす物理・化学特性の独自性は、興味深い研究対象である。

リモートセンシングとしての塵研究手段は、空間分解能と波長分解能をより高めた広域電磁波測定と、室内における模擬実験へと進んでいる。一方、採集塵については、採集手段の多岐化(上空, 南極等)がはかられ、その一環として宇宙空間からのサンプルリターン計画が始まっている。彗星の塵探査Stardust計画が、採集した彗星の塵を地球に持ち還るのは2006年である。くしくもこの年には、宇宙科学研究所のMUSES-C計画が、小惑星表面から表面物質のサンプルを持ち還る。それらを契機として、宇宙塵を含む始原天体の物質科学が更に大きく前進するだろう。

参考文献

- [1] 西村三郎, 1992: 『チャレンジャー号探検』, 中公新書1101.
- [2] 山越和雄, 1984: 『惑星間塵』, 地人書館
- [3] Brownlee, D. E. 1978: Microparticle Studies by Sampling Techniques. in *Cosmic Dust* (McDonnell, J. A. M., Ed.), John Wiley & Sons, Ltd., Chapter. 5.; 留岡和重, 1991: 惑星間塵の鉱物学. 鉱物雑誌 **20**, 105.
- [4] Trumpler, R. J. 1930: *Lick Obs. Bull.* **14**,154; Greenberg, J. M. 1968: Interstellar Grains. in *Nebulae and Interstellar Matter* (Middlehurst, B. M. and Aller, L. H., Eds.), Chicago Press, Chapter 6.
- [5] Asano, S. and Yamamoto, G. 1975: Light Scattering by a Spheroidal Particle. *Appl. Opt.* **14**, 29.
- [6] Schuerman, D. W., 1980: *Light Scattering by Irregularly Shaped Particles*. Plenum Press
- [7] Fechtig, H., Grün, E., Kissel, J., 1978: in *Laboratory Simulation. Cosmic Dust* (McDonnell, J. A. M., Ed.), John Wiley & Sons, Ltd., Chapter. 9.
- [8] Newburn, Jr., R. L., et al., 1991: *Comets in the Post-Halley Era*. Kluwer Academic Publ., Section VI: Cometary Dust.
- [9] *Cosmic Dust Catalog* **12**, 71, 1991.
- [10] Blum, J. et al. 1994: *IFIP Trans. A, Comput. Sci. Technol.*, A-41, 47.
- [11] Landolt-Börnstein, Group VI, vol.2a, 1981: Grün E. et al. 1991: *IAU.Col.*126, 21; Grün E. et al. 1992: *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **92**, 411.