

## 特集 「新世紀の宇宙塵研究」

# 微粒子の生成・凝縮実験と シミュレーション

中村良介<sup>1</sup>、墻内千尋<sup>2</sup>、杉浦直治<sup>3</sup>

## 1. はじめに

固体惑星の材料物質である重元素は、比較的質量の大きな星の内部で形成される。これらの物質は、赤色巨星の大気や超新星の放出物の中で凝縮しサブミクロンサイズの微粒子(ダスト)となって、水素やヘリウムのガスと共に星間空間を漂っていると考えられている。こうした星間物質の密度が高い部分が、自己重力によって収縮し原始星となっていく過程で、その周囲には原始惑星系円盤が形成される。現在の「標準的」な惑星形成モデルにおいては、微小なダストからキロメートルサイズの微惑星をつくるためのメカニズムとして、「重力不安定説」が多くの研究者の支持を集めている。これは、原始惑星系円盤中の乱流がある時点でおさまり、その結果円盤の赤道面へと沈降したダスト層の密度が高くなり、自己重力によって微惑星へと集積するという説である。しかし、近年このメカニズムに関する、いくつかの深刻な問題点が指摘されている[1, 2]

Weidenschilling [3]は、ダストの合体成長が重力不安定に代わる微惑星形成メカニズムとなりうるかどうかを検討した。その結果、原始惑星系円盤内でのガスとダストの質量比が1程度になれば、動径・接線方向の速度差によってダストが微惑星にまで成長できることが示された。また最近、乱流中に恒常的に存在する渦の中で、ダストを微惑星サ

イズにまで成長させるというモデルも提唱されている[4]。

重力不安定説に対するこれらの説の最大の問題点は、ダスト間の衝突が本当に合体につながるかどうかにあると言えるだろう。サブミクロンからキロメートルサイズに至るには、必ずミリメートルから数十メートルといった我々の日常に関わるスケールを通過する。しかし、空中で衝突した岩や氷の塊が合体する光景を目にしたことのある人はいないだろう。ダストが本当に衝突後、合体し成長できるのか?という疑問に答えるためには、まずダストがどのように形成され、星間空間でどのように進化していくのかを考えなければならない。

## 2. ダスト生成実験と星間塵の進化

### 2.1 日本における微粒子生成実験の歴史

久保効果に刺激されて、固体粒子の創製が日本でスタートした。ガス状態から $1\mu\text{m}$ 以下の粒子を創製する方法(ガス中蒸発法)は、最近、少数多体系の問題として再び脚光を浴びつつある。特にナノ構造物質の創製と機能材料構築を目指した研究の展開が指向されつつあるが、ミクロと異なる独特の物性が見られ新学問分野となりつつある。ガスから固体を得る状況は宇宙での状態と類似性があり、この分野の方々にも強い関心が持たれてきた。日本で創製され天文の分野で関心の高い物質

<sup>1</sup>神戸大学総合情報処理センター, <sup>2</sup>立命館大学理工学部, <sup>3</sup>東京大学大学院理学系研究科

として，坂田グループ(電通大)のプラズマ状態からの固体生成物QCC[5]がある．上記の実験のポイントと今後の展開に向けての問題点を示す．

## 2.2 ガス中蒸発法による粒子創製のポイント

1~20kPaのガス中で物質を蒸発させると，蒸気の平均自由行程は数 $\mu\text{m}$ 以下であるためガスとの衝突で冷やされて固体の粒子を生成する．加熱によりガスの流れ(対流)が生じ，生成した粒子がこの対流にのり上昇する．したがって，煙が立ち昇るように見える．この煙の中を調べてみると，1 $\mu\text{m}$ 以下の固体粒子となっている．このようなガス中蒸発法で粒子の成長を考える際の最大の難問は対流の影響である．このような粒子創製の発祥の地，名古屋のグループは無重力実験を指向し，京都グループ(長谷川博一先生命名)は対流を積極的に利用して，煙の物理を明らかにしてきた．名古屋グループによる金属微粒子の形態を中心にした研究の集大成は上田の著書[6,7]，京都グループ成果の一部は堀内の本[8]に紹介されている．京都グループの実験は化合物粒子の生成を主としており，惑星科学物質創製へと指向した内容も含まれている．

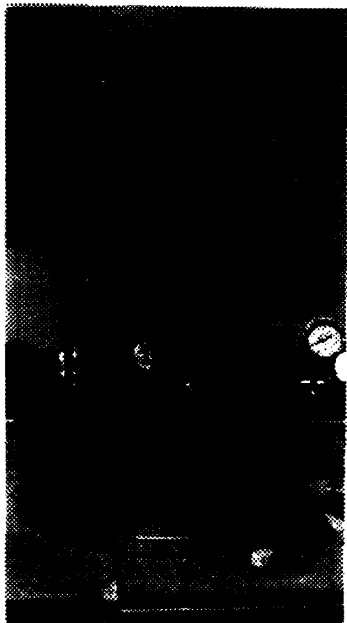


図1. 粒子創製装置.

手軽に微粒子を作るには，真空蒸着装置にガスを導入できるようにすれば良い．我々は図1に示すように高さ約30cm，内径17cmのガラス製容器を使用している．この方法では上部の蓋に加熱端子，粒子採集装置等を組み込み，煙の状況を目で見ながら粒子創製をおこなっている．煙の中の様子を模式的に示すと図2のようになる．蒸発した原子・分子はガスとの衝突でヒーターのごく近くで(1mm以内)でクラスターを形成し，接合成長により，球状粒子から物質固有の形態をもつ粒子に変化する．したがって接合成長が重要な役割を演じている．類似の現象は真空蒸着膜の形成過程でもみられる．このような粒子の成長は $dr/dt = mk/4\pi\rho$ と表せる．ここで $r$ は粒子の半径， $t$ は時間， $m$ は粒子の質量密度， $k$ は温度に依存する接合確率， $\rho$ は物質の密度である．ガス圧や蒸発源の温度を変化させることにより， $m$ や $k$ が変化し粒子サイズをコントロー

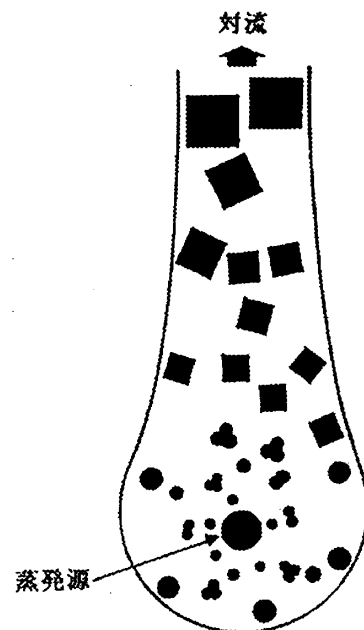


図2. 煙の中での粒子生成の様子.

ルすることができる。粒子のサイズ、構造、形態を制御する際のポイントの一つに温度分布がある。図3は細い線ヒーターを1400°Cに加熱したときの雰囲気温度分布と、タングステンバスケットヒーターを1350°Cに加熱したときの雰囲気温度分布を示している。ヒーターの大きさ、形により温度分布が著しく異なることがよく分かる。真空中の温度分布は容器の構造(金属製、ガラス製)、大きさに

よっても変化する。(a)は点光源に近い分布となっている。ガスを導入することにより、対流が生じ、ヒーターの熱はガスにより、上方に運ばれる。そのため、ガスの導入によりヒーターの温度は低くなる。するとガス中での蒸発は起こらなくなる。粒子を作るには電源のパワーアップが必要となる。粒子が生成するときのヒーター上での蒸発物質の蒸気圧は0.1kPaあればよい。パワーアップして、ヒ

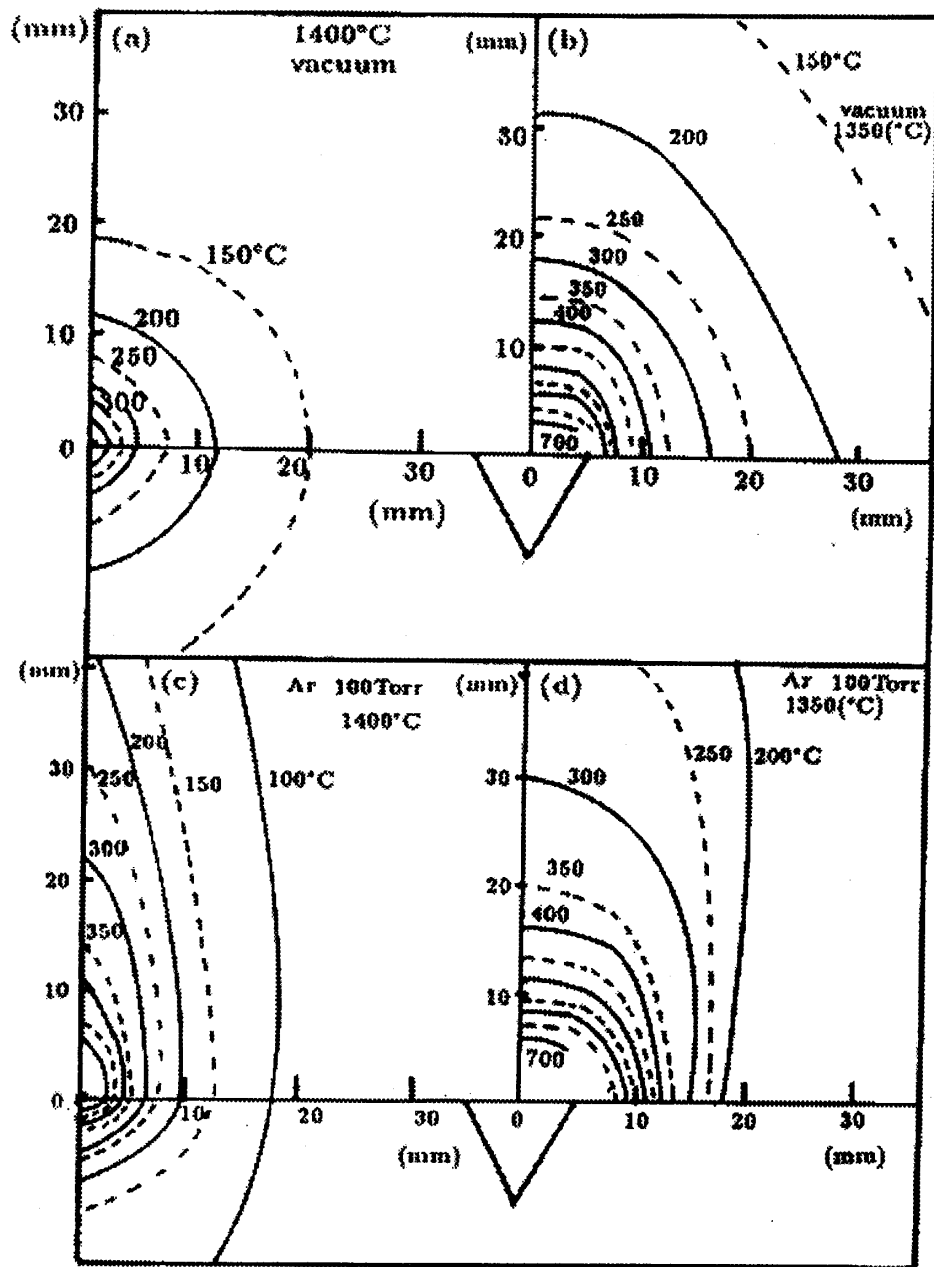


図3. 雰囲気温度分布曲線：(a, c) 線ヒーター、(b, d) タングステンバスケットヒーター。

ーターの温度を真空中と同じ温度にした時の雰囲気温度分布を図3の下段に示してある。この温度分布は対流の様子を反映したものとなっている。目的にそって粒子の創製を行うには蒸発方法，蒸発源の大きさ，ガスの種類，ガス圧，対流，雰囲気温度分布が重要になる。特に反応性のガス中での物質粒子創製となると蒸発方法が重要になる。金属粒子はほとんどすべての元素について得られることより，金属煙中に酸素ガスを導入することにより酸化物粒子に瞬時に変換する方法 [9]や接合成長を押さえてクラスターを捕らえる方法[10]を提案している。

### 2.3 QCCの創製法

炭素質星間塵は赤外未同定バンド (Unidentified infrared emission band, UIR) や220 nm にみられる星間減光のコブ (217 nm hump) などを引き起こすと言われており，様々な物質が候補物質として上げられてきた。特に電気通信大グループが創製したQCC物質がスペクトルを良く説明するモデル物質として注目を浴びてきた[11]。PAHをはじめとして他の候補物質は構造がわかっているがスペクトルの細かいところの一致は得られていない。QCCについては逆に構造が分かっていない。これには創製した物質が非晶質構造であることが起因してい

る。最近我々のグループもこの物質構造決定に加わり，基本構造の解析を始めた。1~2年以内に公表できるものと思われる。メタンガスを原料としてマイクロ波でプラズマを作り，図4に示すようにノズルを通して真空中に放出させる。ノズルの対面に置いた基板と管壁においた基板では堆積率も膜の性質も異なる。それぞれに名前があり，茶色及び黒色の固体 (Dark QCC, Granular QCC)，膜状物質 (Filmy QCC) とよばれている。QCCはプラズマ状態からの急冷炭素質 (Quenched Carbonaceous Composite) を意味している。Dark QCCは星間塵のしめす220 nm減光に似た吸収ピークを示す。Filmy QCCは反射星雲で見られる赤い輻射に似た赤色蛍光を示す。また，Filmy QCCは真空加熱すると，弱い220 nm吸収ピークとUIRに似た3.3及び4-11.2  $\mu\text{m}$ 吸収バンドを示す。Filmy QCCの電子回折像は非晶質パターンを示した。構造解析も含めた幅広い研究が望まれる。

## 3. ダスト凝集実験

つぎのステップは，こうしたダストが衝突した後合体することができるかどうかを実験的に調べることである。杉浦らは，微粒子の合体確率を求めめるために常温・常圧の空气中で以下のようなダストの凝集実験を行った[12, 13]。

- ・ YAGレーザーでマグネシウムのサンプルを蒸発させてMgO微粒子を生成
- ・ この微粒子を，チェンバー内部で沈降・熱運動によって成長させる
- ・ He-Neレーザーを光源にして，凝集体の前方散乱強度を測定
- ・ 散乱強度の凝集体サイズ依存性を計算し，実験データのインバージョンで凝集体サイズ分布の時間発展を得る

この実験によって，ある程度の特徴的な時間凝

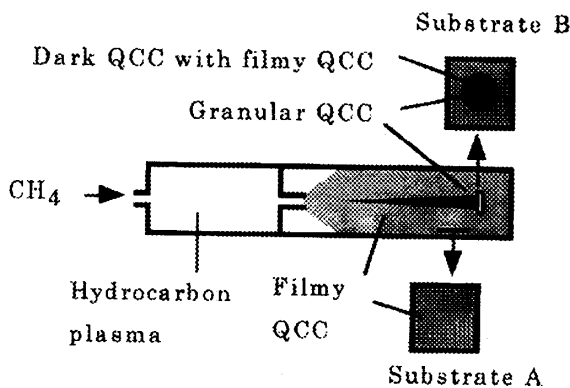


図4. QCCの製法の模式図。

集体の成長を観察することで、合体確率を求められるということが示された(図5)。しかし、凝集体による散乱特性や散乱強度からのサイズ分布のインバージョンなどに不定性が伴うため、データの解釈はユニークではない。また、個々の粒子あるいは凝集体の衝突成長の現場を直接的に調べることはできなかった。

一方Blumらは、Microscopeと1秒間に150フレームという高い時間分解能を持つCCDカメラを用いて、衝突合体の現場を観測することに成功した[14, 15]。この実験ではチェンバー内部の圧力は非常に

低いために、ダストの大きさはガスの平均自由行程に比べて小さい。このような低圧ではダストはすぐに落下してしまうので、下からガスを吹きつけてダストを観測装置の前に浮かべている。この実験の結果、0.001 m/sec~0.01 m/secという低い相対速度ではあるが、ミクロンサイズのダストが実際に合体によって成長することが証明されたのである。しかし、杉浦らの実験が多数の衝突の結果を統計的に扱っているのに対して、Blumらの実験では観測された衝突合体現象はわずか28例であり、系全体の振舞いを調べるという意味で十分と

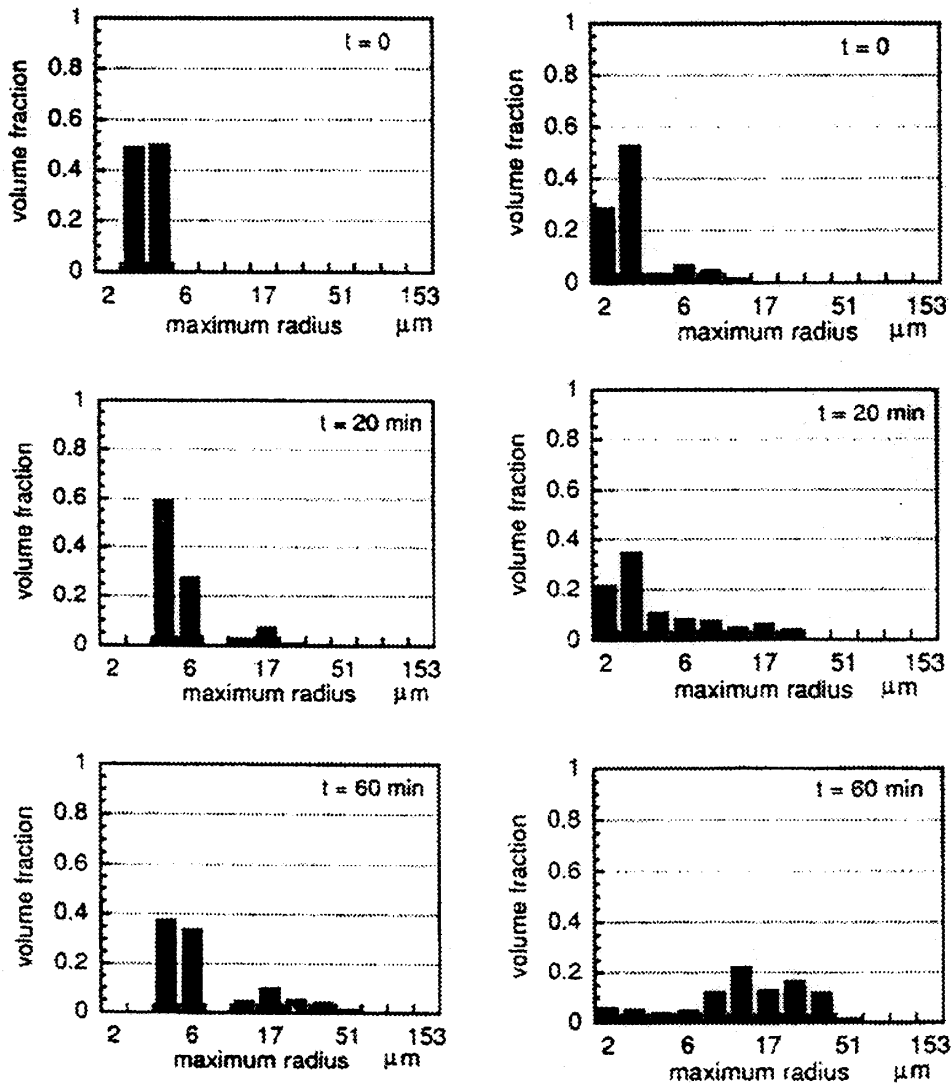


図5. MgO粒子サイズ分布の時間発展。上から順に実験開始直後、20分後、1時間後のサイズ分布を示している。左側の図は、散乱強度からインバージョンによって求められたサイズ分布を、右側

の図はチェンバーの底部で実際に集めた凝集体のサイズ分布を示している[12]。

は言い難い。

#### 4. ダスト凝集の数値シミュレーション

前項では、ミクロンサイズのダストが実際に合体成長することが実験的に明らかにされた。しかし、速度が大きくなれば、あるいは凝集体のサイズが大きくなれば、衝突の結果は合体から、反跳・コンパクト化・破壊へと変わっていくと考えるのが自然である。もちろん実験技術の進歩は目覚しいが、実験室レベルで再現できる状況には限界がある。どれくらいの速度で、どのくらいの大きさの塊が衝突したら合体するかを、より一般的に調べるためには理論的アプローチが欠かせない。そもそもダストはなぜくっつくのだろう？衝突後2つの粒子が結合するためには、2つの粒子が衝突前に持っていた運動エネルギーを、なんらかの方法で散逸させる必要がある。ダストの合体成長を調べるといことは、この散逸のメカニズムを調べるといことである。

NASA エームス研究所のTielensのグループでは、この問題を精力的に調べている。彼らは、まず球形粒子が正面から衝突した場合に、弾性波がどのように励起され、運動エネルギーがこの弾性波にどのくらいの効率で移行するかを理論的に調べた[16]。ついで、ミクロンサイズの球形粒子の表面での摩擦をモデル化し、微粒子がおたがいの表面を転がることで、どのようにエネルギーを散逸させていくかを計算した[17]。最近Dominik and Tielens [18]はこうした球形粒子同士の付着に関する計算を拡張し凝集体同士の衝突のシミュレーションを行なった。その結果は非常に興味深いものである。例えば0.1  $\mu\text{m}$ の氷の粒子40個で形成された凝集体どうしの衝突をシミュレートすると、なんと 相対速度が10m/secでも合体することが示されたのであ

る。彼らの計算は、2次元で行なわれており、凝集体のサイズも小さなものに限られている。それでも、衝突の結果が合体・反跳・コンパクト化・破壊のいずれになるかを、ダストの相対速度とサイズの間数として定量的に予言することができる。いままでのところ、合体臨界速度、コンパクト化臨界速度、表面での摩擦力に関しては上述したBlumらの実験結果をうまく再現できているが、今後さらに詳細に実験結果とモデルを比較することで、サブミクロンスケールでの摩擦をモデル化するためになされた仮定の正当性を確立していく必要があるだろう。

彼らの結果の中で次に注目すべきは、凝集体を破壊するのに必要なエネルギーはその質量に比例するという点にある。凝集体を構成している粒子はそれぞれ隣にあるいくつかの粒子と接触している。凝集体を破壊するには、この接触点を引き離すためのエネルギーが必要になることを考えると、上記の結果はある意味当然であろう。従来は、乱流中でのダストの成長には限界があると考えられていた。これは、乱流中では熱運動の場合と逆に、大きなダストほど速度が早くなるために、ある大きさに達すると合体よりもむしろ破壊のほうが支配的になると予測されていたからである。しかし、ダストの運動エネルギーと破壊のために必要なエネルギーが、どちらも質量に比例しており、しかも乱流中でのダスト間の相対速度の最大値が、せいぜい最も大きな乱流の速度程度であることを考えると、単純に大きなダストだからといって破壊されるとは限らないことがわかる。乱流の中で衝突合体によって1メートルサイズにまで成長すれば、ダストは(この大きさになると、もはやダストと呼ぶべきでないかもしれないが)乱流の影響を受けなくなり、原始惑星系円盤内でダストの空間密度の高いサブディスクを形成するだろう。このサブディスクの中で、ダストは合体成長だけで微惑星に

まで達するかもしれないし、このサブディスクがさらに沈降し重力不安定に至るのかもしれない[19].

いったん合体した後の凝集体の強度も、微惑星から惑星へと至る過程を考える上で非常に重要である。シューメーカー・レヴィ第9彗星が、木星の潮汐力で分裂したことから示唆されるように[20], 彗星核や微惑星は自己重力でくっついている非常に脆い天体である。こうした天体が衝突した場合、衝突が成長につながるのか、それとも破壊されてしまうのかは、これからの惑星形成論に残された最も重要な課題のひとつである。

## 5. 凝集した塵をつかまえる!!

実験・理論・シミュレーションに付け加わるべきもうひとつのアプローチは、実際に凝集体構造を持ったダストのサンプルを得ることである。成層圏から採取された惑星間塵のうちCP(Chondritic Porous)型と呼ばれるダストはサブミクロンサイズの基本粒子が集まった凝集体構造を持ち、その起源は彗星にあると考えられている。多量の揮発性物質を含む彗星や、そこから放出されたダストは、惑星起源の物質に比べて熱による変性の影響がずっと少ない。こうした始源的なダストを調べることで、原始惑星系円盤の初期状態についての新たな情報が得られるだろう。近い将来NASAのディスカバリー計画のひとつである“Stardust” missionでは、彗星塵・星間塵の直接のサンプリングが行なわれる予定である。この計画ではエアロジェルを用いて秒速数kmから数十kmという高速でダストを捕獲する。これほど高速の衝突では、衝突以前の形状を詳細に調べることは、ほぼ不可能である。しかし、ダストが凝集体構造をしているか、それとも単独の粒子であるのかはエアロジェル中のダストの散らばり方から判断できると思われる。一

方日本では、南極からの宇宙塵採集計画が進行中である。宇宙での直接採集に比べれば、地球の大気を通過してきたというバイアスがかかっているものの、高速度衝突を経験していない多量のサンプルを手に入れることの意味は大きい。

## 6. そして新しい世紀へ

Dominikらの予測に基づいて、中村[21]は、熱運動・乱流によって生じる凝集過程のシミュレーションを行った。この計算は、形成される凝集体の形状だけでなく、サイズ分布の時間変化をも追跡できる。しかし、残念ながらいまのところ実験データとの直接の比較ができない。その理由を簡単に説明しよう。

Blumらの実験のように、原始惑星系円盤の環境に近づけるためにガスを薄くすると、大きなダストはすぐに落下してしまう。このため個々の衝突の現場を観測することはできても、系全体のサイズ分布の時間発展を追うことは困難である。一方杉浦らのように、常圧下で実験を行った場合、ダストの落下タイムスケールはずっと長くなるが、クヌーゼン数(ダストサイズ/ガス分子の平均自由行程)が大きいため原始惑星系円盤の状態を再現しているとは言い難い。また、ガスの対流運動が複雑なためダスト間の衝突確率を見積もりも正確にはできない。

こういった困難の解決のための道筋が、微小重力環境下での実験に向かうことは必然であろう。実際BlumたちのグループはCODAG(COSmic Dust AGgregation experiment)という、スペースシャトルでの凝集実験計画を進行させている[22]。まもなく、日本も宇宙ステーションにJEM(Japan Experiment Module)と呼ばれる実験設備を持つ。この施設を利用した、CODAG並みの、あるいはそれ以上の計画をすすめることが強く期待される。も

もちろん, たとえ宇宙での実験が可能になったとしても, それだけですべての問題が解決するわけではない. サイズ分布の時間発展を光学的にモニタリングするための技術の確立, 熱運動以外のダストの相対速度を生じさせるメカニズムをどう再現するか? などなど難しい課題が山積みである.

惑星形成論の歴史において, 20世紀最後の数年は, 観測によって他の恒星の周囲の惑星が発見された時代として位置づけられるだろう[23]. 21世紀初頭は, 無重量実験によって惑星形成過程が実験的に明らかにされた時代となるだろうか?

## 参考文献

- [1] Weidenschilling, S. J. and Cuzzi, .N., 1993: in *Protostars and Planets III* (E. H. Levy and J.I. Lunine, Eds.), University Arizona Press, 333.
- [2] Weidenschilling, S. J., 1995: *Icarus* **116**, 433.
- [3] Weidenschilling, S. J., 1988: in *Meteorites and the Early Solar System* (J. F. Kerridge et al., Eds.), University Arizona Press, 348.
- [4] Tanga, P., Babiano, A., Dubrulle, B. and Provenzale, A., 1996: *Icarus* **121**, 158.
- [5] Sakata, A., Wada, S., Okutsu, Y., Shintani, H., and Nakada, Y., 1983: *Nature* **301**, 493.
- [6] Uyeda, R., 1987: *Morphology of Crystals, Part B* (Sunagawa, I., Ed.), Terra, 369.
- [7] Uyeda, R., 1991: *Prog. Material Sci.* **35**, 1.
- [8] 堀内千尋, 1991: 『煙の秘密・超微粒子の生成』, 共立出版.
- [9] Kaito, C., Shiba, N., Sakagami, A., Kimura, S., Suzuki, N., Tsuda, N., Koike, C., and Saito, Y., 1996: *Jpn. J. Appl. Phys.* **35**, 4736.
- [10] Kaito, C., Sakamoto, T., Ban, D., Izuta, T., Kitano, Y., and Saito, Y., 1996, *J. Crystal Growth* **167**, 580.
- [11] Sakata, A., Wada, S., Tokunaga, A.T., Narisawa, T., Nakagawa, H., and Ono, H., 1994: *Astrophys. J.* **430**, 311.
- [12] Sugiura, N., Higuchi, Y. and Sakaguchi, T., 1995: *Proc. of NIPR Sym. Antarct. Meteorites* **8**, 325.
- [13] Sakaguchi, T., 1995: Master Thesis, Univeristy of Tokyo, Tokyo, Japan.
- [14] Blum, J., 1997: in *From Stardust to Planetesimals* (Pendleton, Y. J. and Tielens, A. G. G. M., Eds.), A.S.P. Conf. Ser., 122, 295.
- [15] Wurm, G. and Blum, J., 1997: *Icarus*, in press.
- [16] Choksi, A., Tielens, A. G. G. M., and Hohenbach, D., 1993: *Astrophys. J.* **407**, 806.
- [17] Dominik, C. and Tielens, A. G. G. M., 1996: *Philos. Mag. A* **73**, 1279.
- [18] Dominik, C. and Tielens, A.G. G. M., 1997: *Astrophys. J.* **480**, 647.
- [19] Dubrulle, B., Morfill, G., and Sterzik, M., 1995: *Icarus* **114**, 237.
- [20] Greenberg, J. M., Mizutani, H., and Yamamoto, T., 1995: *Astron. Astrophys.* **295**, L35.
- [21] Nakamura, R., 1996: in *From Stardust to Planetesimals*, NASA CP-3343, 159.
- [22] Keller, H. U., Blum, J., Donn, B., El Goresy, A., Fechtig, H., Feuerbacher, B. P., Gruen, E., Ip, W. H., Kochan, H., Mann, I., Markiewicz, W. J., Metzler, K., Morfill, G. E., Ratke, L., Rott, M., Schwehm, G., and Weidenschilling, S. J., 1993: *Adv. Space. Res.* **13**, 73.
- [23] Butler, R. P. and Marcy, G. W., 1997: *Astrophys. J.* **474**, L115.