

特集 「原始惑星系円盤」

原始太陽系星雲内のダストの振る舞い

関谷実¹, 中村智樹¹

太陽系の母体となった星間分子雲のコア（密度の高い部分）において磁場が抜けていくに従って、重力に対抗する力が弱まり、中心部に原始星が形成される。角運動量を多く持っているガスは直接原始星に落下することができずに周りに円盤状に集まった後徐々に原始星に落下していったと考えられる。この円盤を原始惑星系円盤という（詳しくは中本氏と中川氏の解説参照）。我が太陽系の場合には特に原始太陽系星雲という。太陽系の惑星、衛星、小惑星、彗星や隕石などすべての構成メンバーは原始太陽系星雲を母体として生まれたと考えられている[1]。

星間分子雲中にはミクロンサイズのダストが浮遊している。このダストがどのような過程を経て、地球型惑星や外惑星の核、その他の小天体などの固体物質に変遷していったかを明らかにすることが、太陽系形成論の重要課題と考えられ、多くの研究がなされてきた。ここでは、太陽系形成論および隕石から得られる情報をもとに、今何が問題で今後どのような課題に取り組んでいかねばならないかを整理してみたいと思う。

1. 太陽系形成論におけるダストの振る舞い

まずは現時点で太陽系形成のストーリーにおいてダストはどのように振る舞うと考えられているかについて述べる。この星雲中にはダストは初期には一様に分布していたはずである。原始太陽系

星雲が層流状態にあったのか、乱流状態にあったのかで、その後のダストの振る舞いは大きく異なる。残念ながら現時点では原始太陽系星雲がどのような状態であったかを明らかにする決め手はない。従って二通りの可能性の下で計算が行われている。

層流状態の場合は問題は比較的簡単である[2]。ダストは太陽重力と遠心力、ガス抵抗力から決まる終速度で運動する。ダストの大きさや密度・形状により終速度は異なるので、相対速度を持って、互いに衝突する。衝突速度が十分に小さいと、ファンデルワールス力により付着成長する。終速度の星雲の赤道面に対して垂直な成分により、ダストは赤道面に向かって沈殿することになる。そうすると赤道面付近のダストの密度は次第に増大していく。太陽系星雲は赤道面付近のダストの質量密度がガスの質量密度より大きい領域（ダスト層と言う）と、それ以外の領域（ガス層と言う）に分かれる。赤道面におけるダスト層の密度が臨界密度を超えると重力的に不安定になり、ダスト層は分裂をして最初の天体である微惑星が形成される。Sekiya [3]によると

$$\begin{aligned} & \text{臨界密度} \\ & = 0.6 \times (\text{太陽質量}) / (\text{太陽からの距離の3乗}) \\ & \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

である。

乱流の場合も臨界質量には変わりはないが、ダストの運動は乱流の渦による拡散のためはかなり

¹九州大学理学部地球惑星科学科

複雑になる[4]。太陽系星雲に乱流を引き起こす原因としては熱的な対流[5]や流体力学的不安定性[6]、磁気流体力学的不安定性[7]、ダスト層とガス層の境界層の不安定性[8]などが考えられている。乱流の原因により、渦の空間分布やスペクトル分布などが異なるであろう。ダスト粒子は乱流運動に引きずられる。引きずられ方はダストのサイズや密度・形状に依存するので、この場合も互いに相対速度を持ち、衝突する。衝突速度が大きすぎるとファンデルワールス力では合体できず、むしろ破碎される場合もある。乱流によるダストの拡散の特徴的な時間がダストの沈殿の特徴的な時間より短い場合、ダストは沈殿せずに星雲全体に様に分布し続ける。乱流の原因が熱対流である場合、ダストの付着成長に伴い星雲の透明度が良くなり、乱流は次第におさまってくると考えられる。それとともにダスト層の赤道面に垂直方向の厚みが上記の二つの特徴時間が一致するまで減少し、ついには臨界密度に達して微惑星が形成されるものと考えられる。乱流の原因が、熱対流以外の場合は乱流が次第に治まる原因が考えにくい。特に境界層の不安定性はダスト層が薄くなるほど強まるであろう。ある程度以上の強さの乱流がずっと継続すると永遠にダスト層は重力的には不安定にならない。この場合は、ダストのファンデルワールス力のみで微惑星サイズまで成長しなければならない[9]。はたしてこのようなことが可能なのかどうかはまだよく判っていない。

別の問題点はダストの塊の密度と形状である。ファンデルワールス力により付着成長するダストの塊は、球状とは限らないし岩石のように密ではない。このような場合、一般にガス抵抗力が大きくなり、沈殿速度は減少する。どの程度ダストの塊がふわふわであったかは熱的な履歴にも依存することを指摘しておこう。後で述べるコンドリュール形成に関連しているが、太陽系星雲中では何

度かダストの塊が加熱される出来事があったはずである。この際、ダストの塊は焼きを入れられて、密になったはずである。このような出来事が星雲のどの部分でいつ起きたかは今のところほとんど判っていないので、沈殿過程を正確にシミュレートすることは難しい。

次にダストと磁場の関係について考えてみる。原始惑星系円盤の進化には磁場が重要な影響を与えていると考えられている。磁場が太陽からの距離に応じてどの程度効くかは、電離度に強く依存する[10]。太陽に近い領域（約 0.1 天文単位以内）では温度が高いため熱電離しているであろう。それより太陽から遠い領域では、宇宙線による電離が主に効く。一方ダストは荷電粒子の再結合に重要な役割を果たす。ダスト粒子が合体成長することにより、単位体積あたりに含まれるダスト粒子の表面積の和が減少するので、電離度が上昇する[11]。また、ダストが赤道面に向かって沈殿することにより、赤道面から離れた領域の電離度が上昇する[12]。電離度の上昇とともに星雲ガスと磁力線とのカップリングが強くなり、磁場の効果が効きやすくなる。この場合もダストがどの程度ふわふわであるかによって結果が左右される。

2. 隕石から得られる情報

2.1 ダストの起源

太陽系星雲に含まれていたダストは、太陽や太陽系星雲のもとになった星間分子雲中に含まれていたもの（星間塵）、及び太陽系星雲形成時に星間塵が一度蒸発した後再凝結したものなどがあったと考えられる。星間塵は超新星、新星、巨星などの放出したガスが冷却するとともに凝結した成分である。最近では隕石中のどのダストがどのような星からやって来たかが判るようになってきた[13]。星間塵が生き残っているということは、星間分子雲が降り積もって太陽系星雲を形成したときに、

少なくともある領域はそれほど高温を経験しなかったことを意味する。

2.2 コンドリュールから得られる情報

隕石には、コンドリュールと呼ばれる直径1 mm程度の球状の粒子が含まれているものがあり、コンドライトと呼ばれる。コンドリュールは太陽系星雲中でダスト粒子がいったん溶けて表面張力で丸くなった後に冷却して再び固化したものと考えられる。コンドリュールが高温で溶けていた時間は、実験室でのコンドリュールの再生実験[14]や、ナトリウムのような揮発性元素が蒸発してしまわない条件[15]などから、100から1,000秒程度であると考えられている。コンドリュールには内部に溶け残り（レリクト・グレインという）が残っているものがある[16]。このことからコンドリュールは内部の熱源により溶けたのではなく、外部からあぶられたのだと判る。熱源が何であったのかについてはまだ統一的理解がなされていない。雷によるという説[17]や、衝撃波によるという説[18]、さらに磁力線のリコネクションによるという説[19]など、さまざまな説が提出されている。コンドリュールの冷却時間が自由空間における輻射放出による冷却時間

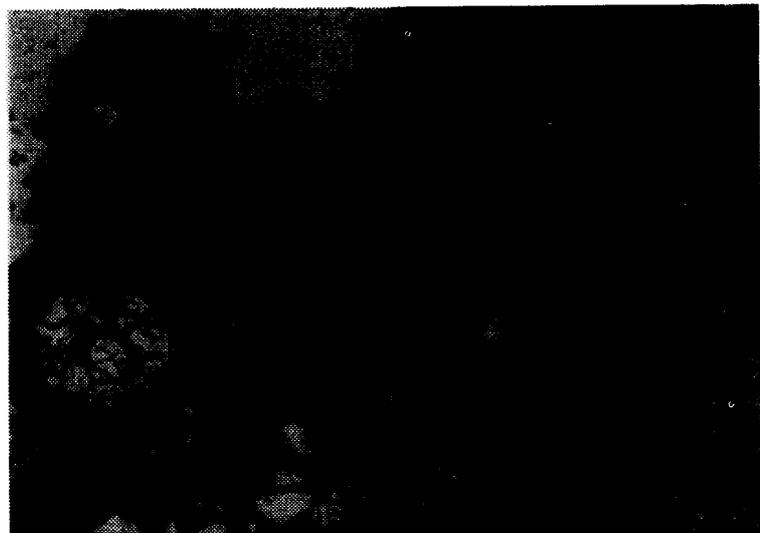
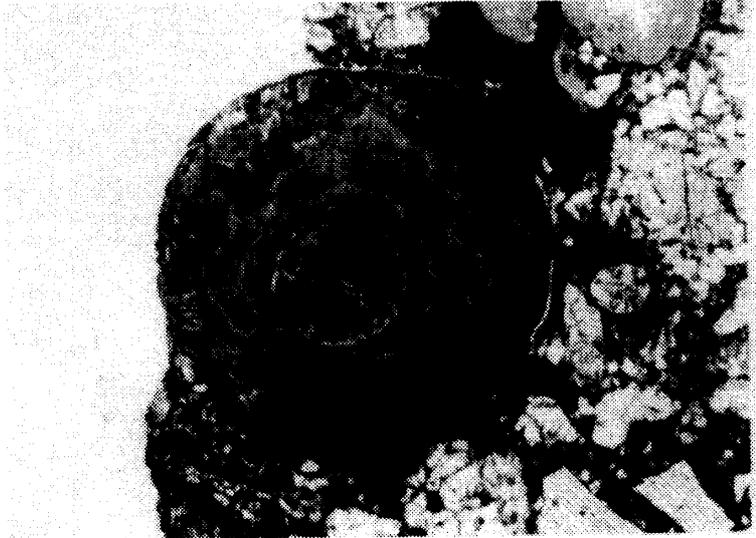


図1. コンパウンド・コンドリュールの光学顕微鏡写真。3枚とも横幅2 mm。

(a)細粒の輝石からなるコンドリュールの内部に、小さなコンドリュールが取り込まれている。

(b)棒状カンラン石コンドリュールの表面に三日月形をした棒状コンドリュールが付着し（大きな矢印）、さらにその上に細粒の輝石からなる半月状のコンドリュールが3つ（小さな矢印）付着している。

(c)斑状カンラン石-輝石コンドリュール（左側）と棒状カンラン石コンドリュールが付着したも

(秒のオーダー) よりはるかに長いことや、コンドリュールの形成環境の酸素分圧は太陽系星雲モデルで予想される値よりずっと高いと考えられていることなどから、コンドリュール形成はダストが赤道面付近にかなり濃集して、不透明度や酸素分圧があがった後に起こったと考えられる。

2.3 コンパウンド・コンドリュールから得られる情報

コンドリュールをよく観察すると、図1のようになんらかのコンドリュールがくっついてできたような構造のものがある。これをコンパウンド・コンドリュールという。コンパウンド・コンドリュールができるためには、コンドリュールがまだ高温で柔らかかった間に、衝突合体する必要がある。この時間に衝突するための条件より、コンドリュールの単位体積中の個数とランダム速度の代表値の積の値が求まる。一方、コンドリュールのサイズや密度を用いると、単位体積中の個数と単位体積中の質量(質量密度)の関係がでてくる。コンドリュールが太陽系星雲中に浮かんでいるためには、質量密度は(1)式の値よりは大きくなってはならない(大きければダスト層は分裂して微惑星になってしまう)。したがって、単位体積中の個数には上限があることになる。これらのことから、コンパウンド・コンドリュールができたときのコンドリュールのランダム速度の下限がでてくる。コンドリュールが太陽から2天文単位の距離でできたとする、この値は3m/secとなる[20]。このような速い速度でぶつかって、はたしてうまく合体するだろうか? もしも出来ないとする、上記の議論のどこかに誤りがあることになる。一つの可能性としてコンドリュールは太陽からの距離が2天文単位よりずっと内側でできた可能性がある。そのときは(1)式から判るように臨界密度は大きくなるので、速度の下限は小さくなる。

3 今後の展望

ダストの付着成長については理論的研究だけでなく、実験をもっと行っていく必要がある。単に常温下での実験だけでなく、高温を経験したときにどうなるかなど、詳しく調べていくべきであろう。重力不安定性については、非軸対称性などを含めたさらに詳しい解析が必要である。これは理論的にやるしかない。ダスト層とガス層の境界層不安定性についてもさらに理論的研究を発展していく必要がある。

コンパウンド・コンドリュール形成に関しては観察主体の研究より一歩踏み出して、形成実験を行う必要がある。一つは衝突実験であり、はたして観察されているようなコンパウンドコンドリュールが出来るかどうか、出来るならばどのような条件下においてか、などを調べる。もう一つはWassonら[21]がいうようにコンドリュールの周りに付着したダスト(リム)を溶かすことにより、コンパウンド・コンドリュールの再生が出来るかどうかである。

最も重要なコンドリュールの雷説については雷の実験、理論など未知の分野を攻める必要がある。地球大気中の雷ですらまだ十分には理解されていないので、これはかなり厄介な問題である。

参考文献

- [1] Hayashi, C., Nakazawa, K., and Nakagawa, Y., 1985: Formation of the solar system. In *Protostars and Planets II* (Balck, D. C., and Matthews, M. S. Eds.), pp. 1100-1153.
- [2] Nakagawa, Y., Sekiya, M., and Hayashi, C., 1986: Settling and growth of dust particles in a laminar phase of a low-mass solar nebula. *Icarus* **67**, 375-390.
- [3] Sekiya, M., 1983: Gravitational instabilities in

- a dust-gas layer and formation of planetesimals in the solar nebula. *Progr. Theor. Phys.* **69**, 1116-1130.
- [4] Dubrulle, B., Morfill, G., and Sterzik, M., 1995: The dust subdisk in the protoplanetary nebula. *Icarus* **114**, 237-246.
- [5] Lin, D. N. C., and Papaloizou, J. C. B., 1980: On the structure and evolution of the primordial solar nebula. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **191**, 37-48.
- [6] Sekiya, M., Miyama, S. M., and Nakagawa, Y., 1993: Shear instability of the solar nebula. In *Primitive Solar Nebula and Origin of Planets* (H. Oya Ed.), pp. 79-88.
- [7] Balbus, S. A. and Hawley, J. F., 1991: A powerful local shear instability in weakly magnetized disks. I. Linear analysis. *Astrophys. J.*, **376**, 214-222.
- [8] Cuzzi, J. N., Dobrovolskis, A. R., and Champney, J. M., 1993: Particle-gasdynamics in the midplane of a protoplanetary nebula. *Icarus*, **106**, 102-134.
- [9] Weidenschilling, S. J., 1995: Can gravitational instability form planetesimals? *Icarus*, **116**, 433-435.
- [10] Umebayashi, T., and Nakano, T., 1988: Ionization state and magnetic fields in the solar nebula. *Progr. Theor. Phys. Suppl.* **96**, 151-160.
- [11] Nishi, R., Nakano, T., and Umebayashi, T., 1991: Magnetic flux loss from interstellar clouds with various grain-size distributions. *Astrophys. J.*, **368**, 181-194.
- [12] Umebayashi, T., and Nakano, T., 1995: Growth and decay of magnetic fields in the protoplanetary gaseous disks I. Low temperature regions of the disks. Submitted to *Icarus*.
- [13] Anders, E., and Zinner, E., 1993: Interstellar grains in primitive meteorites: diamond, silicon carbide, and graphite. *Meteoritics*, **28**, 490-514.
- [14] Tsuchiyama, A., Nagahara, H., and Kushiro, I., 1980: Experimental reproduction of textures of chondrules. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **48**, 155-165.
- [15] Tsuchiyama, A., Nagahara, H., and Kushiro, I., 1981: Volatilization of sodium from silicate melt spheres and its application to the formation of chondrules. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **45**, 1357-1367.
- [16] Nagahara, H., 1981: Evidence for secondary origin of chondrules. *Nature*, **292**, 135-136.
- [17] Whipple, F. L., 1966: Chondrules: Suggestions concerning the origin. *Science*, **153**, 54-56.
- [18] Hood, L. L., and Horanyi, M., 1993: The nebular shock wave model for chondrule formation: one-dimensional calculations. *Icarus*, **106**, 179-189.
- [19] Levy, E. H., and Araki, S., 1989: Magnetic reconnection flares in the protoplanetary nebula and the possible origin of meteorite chondrules. *Icarus*, **81**, 74-91.
- [20] Sekiya, M., and Nakamura, T., 1995: Which occurred earlier, the settling of dust particles and the formation of chondrules in the solar nebula? - Implication from compound chondrules. *Papers presented to the 20th Symposium on Antarctic Meteorites*, **225-227**.
- [21] Wasson, J. T., Alexander, N. K., Lee, M. S. and Rubin, A. E., 1995: Compound chondrules. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **59**, 1847-1869.