

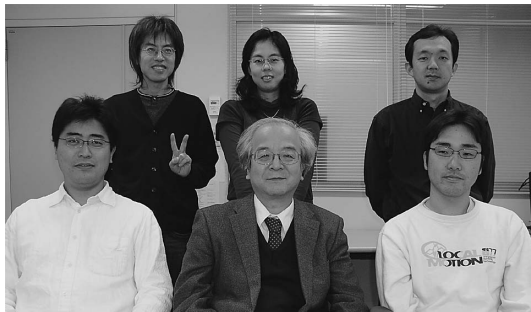
惑星系円盤ダストの物理過程

山本哲生, 和田浩二,
小林浩, 木村宏,
田中今日子, 田中秀和

〈北海道大学 低温科学研究所

〒060-0819 札幌市北区北19条西8丁目〉

e-mail: ty@lowtem.hokudai.ac.jp



ダストアグリゲイト（微粒子集合体）の衝突数値シミュレーション、低温結晶化、アグリゲイトの赤外線スペクトルについての筆者らの最近の研究を紹介する。衝突シミュレーションからは、従来想定されていたよりずっと低密度の微惑星が形成されることが示唆される。また、 $0.1\ \mu\text{m}$ サイズの氷粒子からなるアグリゲイトは、数十 m s^{-1} の高速衝突でも成長できることを示す。多様な天体で結晶シリケートダストが観測されている。結晶ダストは非晶質ダストが星の近傍などで $1,000\ \text{K}$ 以上に加熱された結果、生成されると信じられてきた。これに対してずっと低温で結晶化するメカニズムを紹介する。観測から円盤ダストの成長を知るうえで、そのスペクトルの解析が鍵となる。衝突シミュレーションから期待される空隙に富むアグリゲイトを考えると、その吸収（または放射）スペクトルはコンパクトな球粒子とは大きく異なることを例示し、観測の解釈における注意を喚起する。

1. はじめに

近年の原始惑星系円盤の観測の発展や多数の太陽系外惑星系の発見とそれに伴う惑星形成論の発展により、系外惑星研究は大きく進展しつつある。多くの観測から、原始惑星系円盤から残骸円盤に至る赤外放射スペクトルや輝度・偏光分布は、極めて多様性に富むことが明らかになった。この多様性はサブミクロンサイズのダストから惑星への成長過程、円盤の温度・密度分布構造、および円盤内での惑星系形成過程の多様性を反映している。

ダストは惑星の原物質であるとともに、惑星形成の現場である原始惑星系円盤における種々の物理過程において重要な役割を演じる。ダストが散乱または放射する電磁波には、原始惑星系円盤か

ら残骸円盤に至る惑星形成過程を解明する鍵となる情報が含まれている。観測結果を読み解き、ダストから惑星系形成に至る進化過程の実証的描像を確立するためには、円盤の各進化段階における物理状態やそこでの諸過程を明確にせねばならない。

本稿では筆者らが研究を進めてきた惑星系円盤におけるダストの衝突進化と熱進化の素過程、観測結果を読み解くうえで重要な光学に関する研究のうち、ダストアグリゲイトの衝突による構造進化数値シミュレーションと微惑星形成への示唆、従来考えられてきたよりずっと低温でダストが結晶化する結晶化メカニズム、およびアグリゲイトの赤外スペクトルに関する研究を紹介する。

2. ダストアグリゲイトの衝突数値シミュレーション

惑星形成論によれば原始惑星系円盤内において μm 以下のサイズのダスト粒子が付着成長し、やがて数 km サイズの微惑星が形成され、さらに微惑星が集積することで惑星が形成される。しかしダストからいかに微惑星が形成されるかは解明されておらず、惑星形成論の大きな問題点となっている。ダストが微惑星にまで成長する過程では、その密度や断面積といったダストの構造が円盤中でガス抵抗や衝突速度などに影響し、ダストが付着成長できるかどうかを左右する。ダスト成長の最初の段階では、ダストの運動は円盤ガスに強く影響を受けるため、衝突の相対速度が小さい ($< 1 \text{ mm s}^{-1}$)。そのため、同じサイズのダスト同士がその構造を保ったまま変形せずに付着成長していく。その結果、非常に空隙に富んだフラクタル次元が2以下の構造のアグリゲイトが形成される^{1)~4)}。そのようなアグリゲイトは成長に伴って運動エネルギーが増すため、やがては変形・圧縮され密な構造になり、速度の大きい衝突では破壊されてしまうだろう。微惑星形成を論じるためにはこのようなダスト成長過程において、いつ、どのように圧縮および破壊されるのか、を定量的に明らかにする必要がある。

Dominik & Tielens⁵⁾ はアグリゲイトを構成する粒子間相互作用を考慮し個々の構成粒子の運動を計算することによって、アグリゲイトの圧縮または破壊が起こる条件を見いだしている。しかし、彼らのシミュレーションは限られた条件（2次元正面衝突、アグリゲイトの構成粒子数はたった40個、アグリゲイトの初期構造は1種類のみ）で行われたものであるため、原始惑星系円盤におけるダストの成長に適用するには限界がある。さらにアグリゲイトの圧縮状態などについて定量的な記述に欠けている。実際のダストは3次元であり、構成粒子数も億を超える。したがって、ダストの

構造進化過程を明らかにするためには、多数の粒子からなる3次元アグリゲイト同士の衝突の数値シミュレーションを行い、その構造変化の粒子数依存性や物性依存性などを明らかにする必要がある。

われわれは彼らの研究をもとに高精度な数値シミュレーションコードを新たに開発し、2次元および3次元のダストアグリゲイトの衝突シミュレーションを行ってきた^{6)~8)}。ここでその結果の一端を紹介する。

シミュレーションにおいては、半径 $0.1 \mu\text{m}$ の石英または水粒子からなるアグリゲイト同士の衝突を考える。シミュレーション手法は Dominik & Tielens⁵⁾ と同様に、分子動力学的に個々の粒子の運動を逐一計算する。構成粒子は弾性球であり、2粒子は分子間力による付着力のため有限な面積で接触している。構成粒子の運動の自由度は接触面の法線方向の運動、接触粒子表面でのすべり、転がり、および接触面を通じてのねじれの4種類である。用いた粒子間相互作用モデルについては Wada ら^{6), 7)} に詳しい。

シミュレーションの初期構造として、2種類の BCCA (Ballistic Cluster-Cluster Aggregation) および BPCA (Ballistic Particle-Cluster Aggregation) で生成されたアグリゲイトを用意した。BCC アグリゲイトは、同じサイズのアグリゲイト同士がその構造を保ったまま変形せずに付着成長させて作った空隙に富むふわふわなアグリゲイトである。そのフラクタル次元は2またはそれ以下である。一方、BPC アグリゲイトは粒子を1個ずつ付着させて作られ、フラクタル次元が3のコンパクトな構造をもつ。

われわれはまず空隙に富むふわふわなダストアグリゲイトが圧縮される過程を見るべく、3次元 BCC アグリゲイトの衝突シミュレーションを行った。512, 2,048, または 8,192 個の粒子からなる BCC アグリゲイトを用意し最大 50 m s^{-1} まで衝突速度を振って正面衝突させた。図 1 (a), (b),

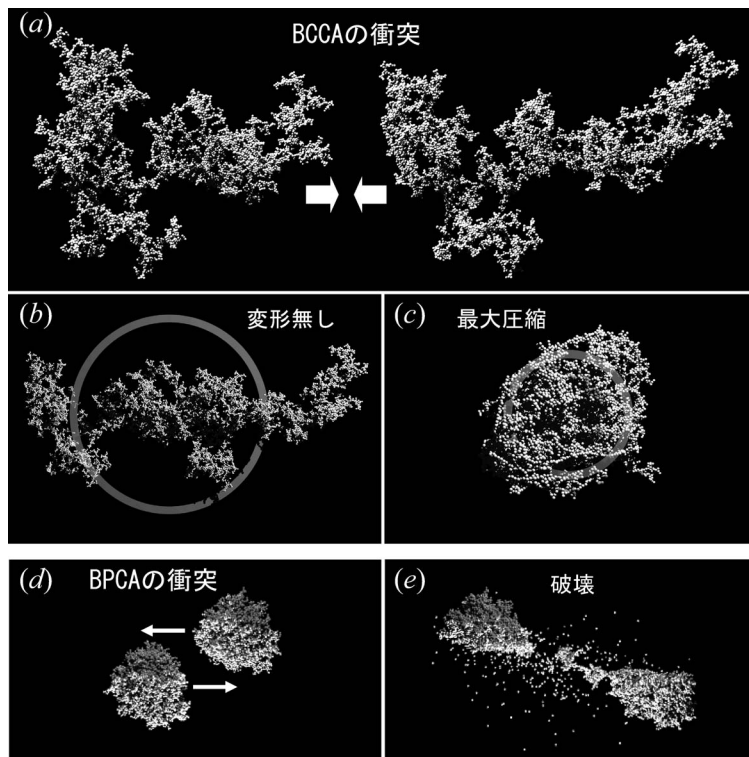


図1 【上・中段】：8,192個の水粒子からなるBCCアグリゲイト同士の衝突例。(a)初期構造 (b)変形なしに付着（衝突速度：0.024 m s⁻¹） (c)最大圧縮（衝突速度：13 m s⁻¹）。図中のリングはアグリゲイトの回転半径を表す。【下段】8,000個の水粒子からなるBPCアグリゲイト同士の衝突例。(d)初期構造 (e)破壊（衝突速度：70 m s⁻¹）。

(c)にシミュレーション結果の1例を示した。BCCアグリゲイトでは衝突エネルギーが大きくなるにつれ、アグリゲイトの変形が始まり、やがて最も圧縮された構造になる（図1c）。次に、コンパクトな3次元BPCアグリゲイト（構成粒子数は500, 2000, または8,000個）の衝突をシミュレートした。図1(d), (e)は8,000個の水粒子からなるBPCアグリゲイトが高速衝突によって破壊される様子を示す。破壊が生じる速度で衝突する際にはダストはコンパクトになっていると考えられるため、BPCアグリゲイト同士の衝突によって、ダストの破壊過程を調べることが可能となる。この場合、衝突速度は最大300 m s⁻¹まで振り、また衝突方向もさまざまに振って斜め衝突の効果も考慮している。

アグリゲイトの圧縮度合いを見るために、アグリゲイトのサイズの目安として、

$$r_g = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i (\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_G)^2}$$

で定義される回転半径 r_g を用いる。ここで、 N はアグリゲイトの構成粒子数、 \mathbf{x}_i は粒子 i の中心の位置ベクトル、 \mathbf{x}_G はアグリゲイトの重心の位置ベクトルである。

図2に衝突エネルギーと衝突の結果生じたアグリゲイトの回転半径との関係を示した。衝突エネルギーの増大とともに回転半径は減少し、アグリゲイトが圧縮されていく様子がわかる。付着している粒子を表面上で一定角度転がすのに必要なエネルギーを E_{roll} とすると、圧縮が開始する衝突エネルギーは E_{roll} 程度、また最大圧縮されるとき

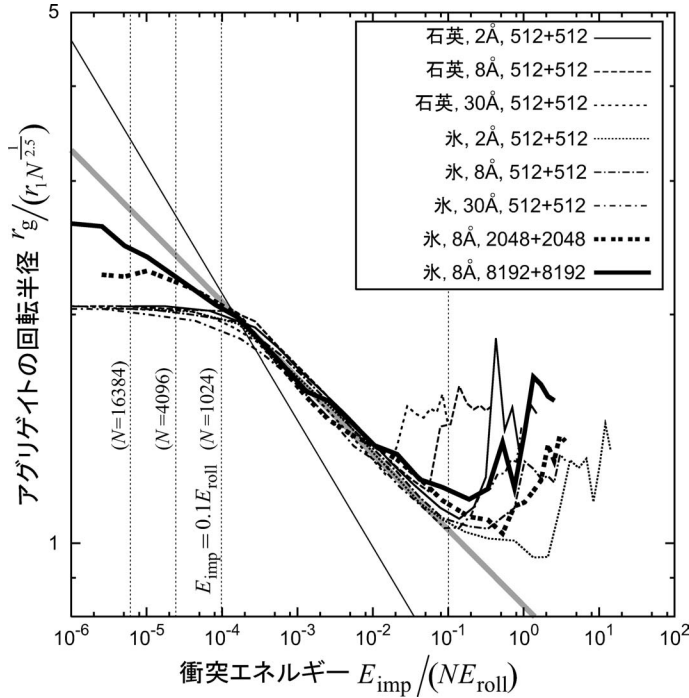


図2 衝突エネルギー E_{imp} とアグリゲイトの回転半径 r_g との関係。 r_g は $r_1 N^{1/2.5}$ (r_1 : 構成粒子の半径, N : 構成粒子数) で, E_{imp} は転がりに要するエネルギー E_{roll} の N 倍で規格化してある。様々な衝突条件のもとでの BCC アグリゲイト衝突の結果をまとめて表示した。例えば「氷, 8 Å, 8192+8192」は転がり限界変位が 8 Å の氷粒子 8,192 個からなるアグリゲイト同士の衝突を意味する。太い灰色線は, 結果にフィットしたべき乗則: $r_g / (r_1 N^{1/2.5}) = [E_{\text{imp}} / (0.15 NE_{\text{roll}})]^{-0.10}$ 。縦の破線は $E_{\text{imp}} = 0.1 E_{\text{roll}}$ および $E_{\text{imp}} = 0.1 NE_{\text{roll}}$ の位置を示している。細い実線は圧縮されたアグリゲイトのフラクタル次元を 3 とした場合のべき (-1/6) をもつ線を示す。

の衝突エネルギーは NE_{roll} 程度であることが図からわかる。一対の粒子ペアにおいて有意な転がりが可能なエネルギー E_{roll} が与えられた時点で圧縮が開始し, 全粒子ペアで転がりが可能なエネルギー NE_{roll} が与えられれば最も圧縮されることから, これはもっともな結果である。また Dominik & Tielens⁵⁾とも調和的な結果であり, 粒子間の転がりによって圧縮が駆動されていることがわかる。

回転半径を $r_1 N^{1/2.5}$ で規格化することによって, 結果が見事にスケールングされることは注目値する (図2)。このことは, 圧縮されたアグリゲイトのフラクタル次元がおおよそ 2.5 であることに由来する。実際, 衝突の結果生じたアグリゲイトの

フラクタル次元を測ってみるとほぼ 2.5 であることが確かめられた。最大圧縮時においてさえアグリゲイトのフラクタル次元はコンパクト粒子のその値 3 より小さい。すなわちアグリゲイトは衝突によってあまり圧縮されない。実際, 図2に見られるように, 計算結果はフラクタル次元を 3 とした場合に比べて圧縮されていない。最近 Suyama ら⁸⁾が行った連続衝突によるダストアグリゲイトの成長シミュレーションにおいても, 形成されるアグリゲイトのフラクタル次元はほぼ 2.5 であった。このように, 衝突によって成長するアグリゲイトの密度は小さく, Suyama ら⁸⁾は $10^{-4} \text{ g cm}^{-3}$ 以下という超低密度 (空気より軽い!) の微惑星が形成されることを示唆している。

衝突エネルギーが大きくなるにつれて破壊が顕著になってくる。アグリゲイトの破壊の程度は、衝突の結果生じた最大破片の構成粒子数と全粒子数との比＝成長効率で評価できる。成長効率が1ならアグリゲイトは全く壊れないことを意味し、0.5より大きいと、もとのアグリゲイトより大きくなったということで正味成長したことを意味する。したがって、成長効率が0.5となる衝突速度はアグリゲイトが衝突によって成長できるかどうかの境となる臨界速度である。BPC アグリゲイトの高速衝突シミュレーションから、氷アグリゲイトの場合には、臨界衝突速度は 60 m s^{-1} という結果が得られた。しかも臨界速度には粒子数依存性はほとんど見られない。このことは 60 m s^{-1} という臨界速度がシミュレーションで扱ったアグリゲイトよりもっと大きなアグリゲイトに対しても適用できることを示唆している。一方いくつかの衝突実験から、この臨界速度はさらに1桁大きくなりうることも示唆されている^{9)–11)}。実験とシミュレーションとの差が生じる原因の解明は今後の研究を待たねばならないが、いずれにせよアグリゲイトは相当な衝突速度でも破壊を免れて成長できることになる。原始惑星系円盤内でのダストの衝突速度は数十 m s^{-1} 以下であるから、ダストアグリゲイト、特に氷アグリゲイトは衝突によって直接合体成長できる可能性が示唆される。

3. 低温結晶化

結晶シリケートダストは1986年のハレー彗星回帰の際の赤外観測で初めて観測されて以来、前主系列星から若い主系列星に至る進化の初期段階にある星の周りのダスト、太陽系では黄道光ダスト、またポストAGB星のような進化の進んだ星の周りのダストなど、これまで種々の天体で観測されてきた¹²⁾。最近では年齢が 10^5 年程度の原始星初期段階においても結晶シリケートが観測されている。一方、分子雲内のダストや星間ダストでは結晶ダストは検出されていない。星間シリケイ

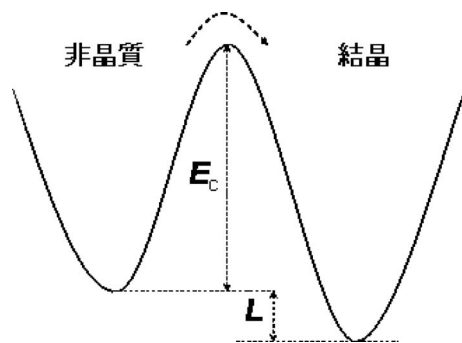


図3 結晶化の模式図。結晶のほうが非晶質と比べて内部エネルギーが低い。結晶化の際には E_c のエネルギー・バリアー（活性化エネルギー）を超さねばならない。非晶質と結晶のエネルギー差は結晶化の際に潜熱 L として開放される。図では非晶質物質のエネルギーを一つだけ示したが実際には原子配置の違いによって多数の内部エネルギーをもちうる。しかしいずれにせよ結晶の内部エネルギーよりは大きい。

トダストの結晶化度は5%以下と見積もられている。

結晶シリケートダストは主として、中間赤外線（ $10 \mu\text{m}$ バンド）や遠赤外線波長域におけるシリケートの吸収バンドの観測からその存在がわかる。非晶質（アモルファス）ダストの吸収バンドはローレンツ型の滑らかな吸収（観測では放射）スペクトルを示すのに対して、結晶ダストは滑らかな吸収バンドに加えて結晶構造を反映した微細構造が現れる。これまでの観測とその解析から、天体の多様性にかかわらず類似のスペクトルを示し、シリケートダストは Mg_2SiO_4 のようなマグネシウムに富む組成をもつことが知られている。

結晶化は要するに固体内に不規則に配置されていた原子が「しかるべき位置」に再配置する過程である。しかるべき位置とは結晶の格子点であり、その配置では固体の内部エネルギーが最小となる。しかし再配置の際には数 eV（電子ボルト）のエネルギー・バリアーを超さねばならない（図3参照）。ダストを加熱するとき熱エネルギーの揺らぎがバリアーを超すためのエネルギーとして使

われる。結晶化時間は温度が高まるにつれて急速に短くなる。円盤環境では約 1,000 K 以上に加熱すると結晶化が起こる。しかしバリアーを越すためのエネルギーは必ずしも加熱に限る必要はない。実際、電子やヘリウムイオンなどの粒子線照射によっても結晶化が起こることが確かめられている¹³⁾。

筆者らはダスト表面を覆っている有機物に着目し、そこでの化学反応で開放されるエネルギーによる結晶化という全く新しい結晶化メカニズムを提唱した^{14), 15)}。これによると従来想定されてきた 1,000 K 以上の加熱は必要なく、常温でもシリケートの結晶化が起こりうる。以下でこのメカニズムを説明しよう。

原始惑星系円盤の低温領域のダストは彗星ダストで代表できる。彗星ダストは、非晶質シリケート粒子の表面を有機物層と水層が覆う 3 層構造をもつ 0.1 μm 程度の粒子からなるアグリゲイトであると考えられている^{16), 17)}。有機物は円盤の前段階である星間分子雲内で、シリケート粒子表面で生成された水 (H, C, N, O ほかの元素からなる) が紫外線などの照射を受けて高分子化した結果生成される。低温の分子雲内で生成された有機物には反応性に富むラジカル分子が凍結されている。水層の組成は分子雲ダスト表面の水の組成をよく保っている。実際、彗星の水が蒸発して生じた彗星大気で観測されるガス組成は分子雲水の組成をよく反映している。

このようなダストが例えば 300 K 程度に加熱されたとしよう (図 4 参照)。この温度は太陽から 1 AU の距離にある彗星ダストの温度と同程度である。この温度ではダスト最外層の水は極めて短時間で蒸発する。しかしコアのシリケート粒子を結晶化させるには温度が低すぎる。一方、有機物層内の分子の拡散速度は加熱によって増加し、凍結されていたラジカルと他の分子との反応が可能となる。反応熱は分子拡散をさらに促進し、ラジカル密度がある値以上のとき有機物層内で連鎖反

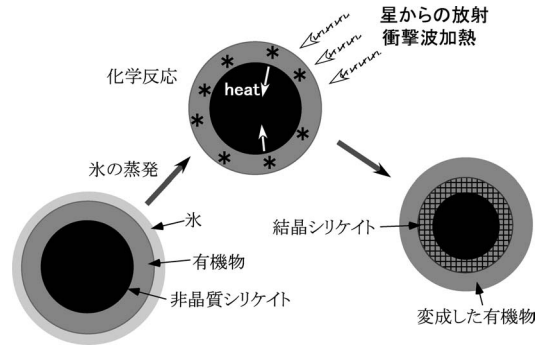


図 4 低温結晶化のモデル。有機物層で覆われた粒子が適度 (> 100 K) に加熱されると、層内で化学反応が生じ反応熱によって下層の非晶質シリケートの表面付近が結晶化する。水層は瞬間的に蒸発する。加熱源は任意であり、円盤環境では中心星からの光の吸収、衝撃波などが考えられる。

応を起こす。連鎖反応で生じた熱はシリケート粒子を加熱し、その表面から中心に向かって結晶化を引き起こす。このアイデアを定量化してシリケート粒子の結晶度を計算すると、ラジカル濃度が 1-10% に応じて結晶領域の体積比は 0.4-20% と見積もられる。結晶領域は粒子表面付近であることから、その赤外スペクトルには結晶のスペクトルが顕著に現れる。

この理論的な予言は堀内らの実験によって実証された^{18), 19)}。堀内らは実験室で非晶質シリケート粒子を非晶質炭素でコートした粒子を生成し加熱した。その結果、900 K 以下でシリケートの結晶化が起こることを見いだした¹⁸⁾。さらに非晶質炭素のコーティングをメタンガス雰囲気中で行い、その後空気にさらすと、常温でシリケート表面付近が結晶化することを見いだした¹⁹⁾。常温結晶化は、炭素層に取り込まれていたメタンが空気中の酸素と反応し、その反応熱が炭素の結晶化 (グラファイト化) を誘導し、グラファイト化の潜熱がさらにシリケートの結晶化を促進したことによる。

従来、原始惑星系円盤におけるシリケートの結晶化は、円盤の動径方向の物質循環に伴う中心星

付近での加熱や衝撃波加熱によって生じると想定されてきた。このような加熱による結晶化では1,000 K以上の温度が必要である。これに対して反応熱による結晶化では、もっとマイルドな加熱で結晶化が可能である。その結果、より広い領域で結晶シリケートが生成される。また従来、結晶シリケートが存在しないと考えられてきたより広範囲の天体での結晶化が可能である。反応熱による結晶化は、彗星における結晶シリケートと分子雲組成の水との共存というジレンマの解決も与える。結晶シリケートの生成では1,000 K以上の加熱が必要であるのに対して、分子雲氷は100 Kよりずっと低温でなければ保存できない。このジレンマを逃れるため、加熱説では高温にさらされたダストと低温領域にとどまっていたダストとの混合を唱えている。すなわち、円盤の動径方向の物質循環に伴って中心星付近で結晶化したシリケートが中心星の放射圧や星風で外側の低温領域に飛ばされ、そこにある分子雲組成を保ったダストと混じり、この混合ダストが集積して彗星核が形成されたとしている。これに対して、ここで述べた反応熱による結晶化では混合は不要である。彗星核内のシリケート粒子は非晶質であったとしても、太陽に彗星が近づいたときに放出されたダストが彗星大気中で上述のメカニズムで結晶化したと考えればよい。ダストの水成分は極めて短時間で蒸発して分子雲組成のガスを実現し、残されたシリケートはその表面の有機物層内の反応熱で結晶化する。

4. アグリゲイトの光学

円盤内のダストの成長を推定するうえで、観測から得られたスペクトル、偏光などの種々のデータを解析するツールは必須である。従来、ダストによる光散乱、熱放射、偏光計算では簡単のためミー理論が多用されてきた。ミー理論によると吸収バンドの波長より大きい半径の粒子では、そのスペクトルにおいてバンドに特有な吸収（または

放射）プロファイルは消え滑らかなスペクトルとなる。この事実をもとに、円盤進化のある段階でのプロファイルの消失から成長しつつある粒子サイズなどが見積もられてきた。しかしミー理論はコンパクトな球粒子にのみ適用できる。一方、2節で述べたように、円盤ダストは不定形アグリゲイトであるため、ミー理論に基づいて観測からダストの成長を議論することは誤った結果を導きかねない。

任意の形状や内部構造をもった粒子による光散乱を近似的に扱う方法の一つとして離散双極子近似(DDA)がある。DDAでは散乱体を散乱される光の波長と比べて十分小さい粒子の集まりとしてモデル化する。構成粒子は散乱体の形状と構造を再現するように配置される。DDAでは複雑な形状、構造をもった粒子による光散乱を微小な粒子群による光散乱で置き換える。微小粒子による光散乱はよく知られている。DDAではこれら微小粒子を電気双極子で置き換え、入射波に対して互いに相互作用しつつ呼応する双極子群からの放射の干渉的重ね合わせとして散乱波を記述する。

コンパクトな球粒子と不定形アグリゲイトの赤外線スペクトルの差異の一例を図5に示した^{20), 21)}。この図はサイズ $a_v=100\ \mu\text{m}$ のアグリゲイトの波長 $10\ \mu\text{m}$ 帯のスペクトルを示している。ここでのサイズ a_v とはアグリゲイトを緊密な球に圧縮したときの球半径である(等価体積半径)。 D はアグリゲイトのフラクタル次元である。BCCAの低速衝突で生成される空隙率の高いアグリゲイトでは $D=2$ 、衝突によって最も圧縮されたアグリゲイトでは $D=2.5$ である(2節参照)。 $D=3$ はコンパクトBPCアグリゲイトである。 $D<3$ ではアグリゲイトの見かけの大きさは a_v より大きいことに注意しよう。アグリゲイトを構成する粒子は半径 $0.1\ \mu\text{m}$ で、前節で述べたメカニズムによる結晶化の結果として非晶質シリケート(Mg_2SiO_4)コア、結晶シリケート層、および一部が炭化した有機物外層からなる3層構造をもつと

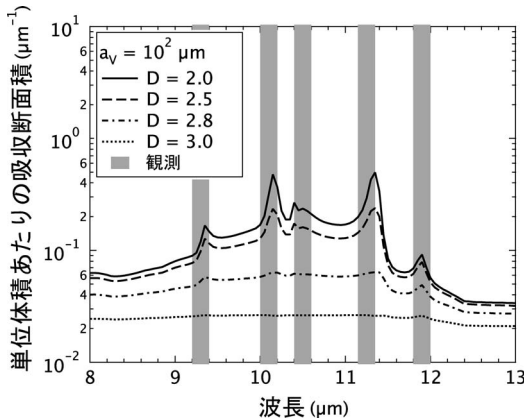


図5 ダスタアグリゲイトの赤外線スペクトル。赤外線スペクトルは単位体積あたりの吸収断面積で表してある。アグリゲイトの等価体積半径は $100\ \mu\text{m}$ とした。 D はアグリゲイトのフラクタル次元で $D=3$ はコンパクト BPC アグリゲイトである。 D が小さいほど空隙に富むアグリゲイトを表す。 $D=2$ は BCCA (2 節参照) で成長したアグリゲイトに対応する。縦帯は円盤ダストや彗星ダストで観測されている吸収 (放射) 帯を示している。

した。

図5 からコンパクト BPC アグリゲイトでは半径 $100\ \mu\text{m}$ になると Mg_2SiO_4 シリケートに特有な吸収が見えなくなるのに対して、フラクタル次元が小さく空隙に富むアグリゲイトでは $a_v=100\ \mu\text{m}$ まで成長しても Mg_2SiO_4 の吸収バンドが観測されることがわかる。これは、空隙に富むアグリゲイトでは波長に比べて小さい個々の構成粒子の光学特性が保存されるためである。アグリゲイトがさらに成長しても空隙に富む構造を保持している限り吸収バンドは観測される。吸収バンドの消失はアグリゲイトの成長を意味するのではなく、それが圧縮されてコンパクトな構造になったことを意味することをこの結果は示している。

アグリゲイトの光学は赤外スペクトルからダストの結晶構造を議論する宇宙鉱物学に対しても重要な示唆を与える。図で縦の帯は円盤ダストや彗星ダストでこれまで観測されている吸収 (放射) バンドを表す。従来 $9.3\ \mu\text{m}$ の吸収バンドは

MgSiO_3 シリケート結晶に起因すると考えられてきたが、フラクタル次元の小さいアグリゲイトを考えると Mg_2SiO_4 結晶によっても再現できる。 Mg_2SiO_4 結晶は図に示したすべての吸収バンドを説明できる。

ダスタアグリゲイトの光学は観測結果を正しく解釈するうえで欠くことはできない。しかし現状ではアグリゲイトのサイズが大きくなるにつれて膨大な計算メモリが必要となり、扱えるサイズに限界がある。DDA の新しいアルゴリズムの開発や有効媒質理論の適用限界の拡張などによって、さらに大きいアグリゲイトによる光散乱・吸収を扱える計算手法の開発を行う必要がある。

5. 今後に向けて

本稿では筆者らが展開してきた円盤ダストの素過程の研究を中心に紹介した。これらの結果がもたらす微惑星形成の新しい描像については田中らが研究を進めつつある。また残骸円盤 (debris disk) におけるダストの力学進化とダスト集積帯の生成については小林や湊らが中心になって研究を展開してきた^{22)–25)}。偏光観測に関連しては Zubko らによる直線負偏光のモデルの展開、福江翼らによるストークスパラメーターの輸送コード開発とそれを用いた観測のモデル化などが行われてきた。これらの研究の紹介は別の機会にゆずりたい。

円盤ダストはこれまで、ダストが関与する個別の現象の中で研究されてきた。これらの研究で設定されているダストモデルは整合性を欠いている。またダストをコンパクト球で近似するといった過大な単純化が行われてきたが、観測の発展によってより現実的なダストモデルが必要な段階に達している。今後の精密観測を踏まえ、それを解読するうえでの基礎となる整合的かつ統一的なダストモデルの構築を進めていかねばならない。必然的にこれは観測から最大限の情報を抽出するツール群の開発にもつながっている。この研究を

通じて観測，惑星形成論，惑星物質科学との連携を図り，ダストから惑星形成に至る進化過程の総合的な描像の確立に寄与したいと考えている。

謝 辞

本稿で紹介した研究や関連する研究の展開において多数の方々との議論や協力をいただきました。本研究は科学研究費特定領域研究「太陽系外惑星科学の展開」の支援を受けました。ここに謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Meakin P., 1991, *Rev. Geophys.* 29, 317
- 2) Mukai T., Ishimoto H., Kozasa T., Blum J., Greenberg J. M., 1992, *A&A* 262, 315
- 3) Krause M., Blum J., 2004, *Phys. Rev. Lett.* 93, 021103
- 4) Paszun D., Dominik C., 2006, *Icarus* 182, 274
- 5) Dominik C., Tielens A. G. G. M., 1997, *ApJ* 480, 647
- 6) Wada K., Tanaka H., Suyama T., Kimura H., Yamamoto T., 2007, *ApJ* 661, 320
- 7) Wada K., Tanaka H., Suyama T., Kimura H., Yamamoto T., 2008, *ApJ* 677, 1296
- 8) Suyama T., Wada K., Tanaka H., 2008, *ApJ* 684, 1310
- 9) Poppe T., Blum J., Henning T., 2000, *ApJ* 533, 472
- 10) Blum J., Wurm G., 2000, *Icarus* 143, 138
- 11) Wurm G., Paraskov G., Krauss O., 2005, *Icarus* 178, 253
- 12) Hanner M. S., 1999, *Space Sci. Rev.* 90, 99
- 13) Carrez P., Demyk K., Leroux H., Cordier P., Jones A. P. d'Hendecourt L., 2002, *Meteorit. Planet. Sci.* 37, 1615
- 14) Yamamoto T., Chigai T., 2005, *Highlights Astron.* 13, 522
- 15) Yamamoto T., Chigai T., Kimura H., Tanaka K. K., 2008, *Earth Planet. Space*, in press
- 16) Greenberg J. M., 1982, in *Comets*, ed. Wilkening L. L. (Univ. Arizona Press, Tucson) p. 131
- 17) Jessberger E. K., Christoforidis A., Kissel J., 1988, *Nature* 332, 691
- 18) Kaito C., Sasaki S., Miyazaki Y., Kumamoto A., Kurumada M., Yokoyama K., Saito M., Kimura Y., Suzuki H., 2006, *Adv. Geosci.* 7, 125
- 19) Kaito C., Miyazaki Y., Kumamoto A., Kimura Y., 2007, *ApJ* 666, L57.
- 20) Kimura H., Chigai T., Yamamoto T., 2008, *A&A* 482, 305
- 21) Kimura H., Chigai T., Yamamoto T., 2009, *ApJ* 690, in press
- 22) Minato T., Köhler M., Kimura H., Mann I., Yamamoto T., 2004, *A&A* 424, L13
- 23) Minato T., Köhler M., Kimura H., Mann I., Yamamoto T., 2006, *A&A* 452, 701
- 24) Kobayashi H., Watanabe S., Kimura H., Yamamoto T., 2008a, *Icarus* 195, 871
- 25) Kobayashi H., Watanabe S., Kimura H., Yamamoto T., 2008b, *Icarus*, submitted

Collisional Evolution, Low Temperature Crystallization, and Infrared Spectra of Dust Aggregates in Protoplanetary Disks

Tetsuo YAMAMOTO, Koji WADA, Hiroshi KOBAYASHI, Hiroshi KIMURA, Kyoko K. TANAKA, and Hidekazu TANAKA

Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, Sapporo 060-0819, Japan

Abstract: We discuss three topics on the physics of dust aggregates in protoplanetary disks, that is, structural evolution of dust aggregates by their collisions, a nonthermal crystallization mechanism of amorphous silicate dust, and infrared emission spectra of the aggregates. We demonstrate that dust aggregates exhibit unexpected and interesting behaviors in collisions and in infrared spectra. We propose a new mechanism of crystallization of amorphous silicate dust, which works at temperatures well below the temperatures of the crystallization due to annealing.