特集「物質科学的研究・観測的研究で探る惑星系の誕生と進化」 中間赤外線分光観測で探るHerbig Ae/Be型 星星周シリケイトダスト

藤原 英明¹

(要旨) 我々は、すばる望遠鏡COMICSで独自に観測した11天体を含む計58天体のHerbig Ae/Be型星について中 間赤外線Nバンド(8-13µm)のスペクトルを集め、ダストフィーチャーからダスト成分分解を行い、シリケイト ダストのサイズ・結晶性について調べた。その結果、星周シリケイトダストのサイズ分布は中心星の質量光度お よび年齢と相関があることが分かった。サブミクロンサイズの小さなダストが豊富な大質量・高光度の天体が欠 落しているという観測的傾向は、原始惑星系円盤の表層におけるダストサイズ分布が、中心星からの放射圧に影 響される可能性があることを示唆する。一方、シリケイトの結晶性については中心星のパラメーターとの相関は 見られなかった。年齢の観点で見れば、中心星の年齢が0.5Myr(=0.5×10⁶年)よりも若い天体でもすでに数10%の 結晶化度を示すものが見られた。これは、ダストの結晶化プロセスがより若い段階で進んでいることを示唆する。

原始惑星系円盤におけるシリ ケイトダスト

年齢が1Myr程度の若い星の周囲には、ガスとダス トからなる円盤状の構造があることが知られている. そしてこれが惑星誕生の現場になると考えられるため、 円盤は原始惑星系円盤と呼ばれる.ダストは大きさが ミクロン程度の固体微粒子であるが、惑星系形成過程 においては、このダストが原始惑星系円盤の中で重要 な役割を果たす.現在考えられている惑星系形成のシ ナリオでは、原始惑星系円盤の中でダストが合体成長 することにより微惑星になり、そしてそれらは最終的 には木星型惑星のコアや地球型惑星になるとされてい る.すなわち、ダストは惑星系形成過程の"出発点" に位置する物質なのである.したがって、原始惑星系 円盤中におけるダストの進化過程を探ることは、惑星 形成過程を考える上で大変重要である.

近年,原始惑星系円盤の観測が進みつつあり,円盤 内におけるダストの分布や性質が探られてきた.特に

1. 東京大学大学院理学系研究科天文学専攻

中間赤外線では、ダストの温度が数100K程度の領域 の原始惑星系円盤の表層をトレースするが、この領域 は、中心星から距離では数~数10AUに対応し、いわ ゆる惑星形成領域に相当する. しかも中間赤外線の波 長域には、さまざまなダストの放射・吸収バンドが存 在し, そのバンドフィーチャーは, ダストの組成やサ イズ、形状などによって、強度や形、ピーク位置など が変化することが知られている、したがって、若い星 周囲に付随するダストを中間赤外線で観測することは, 惑星形成領域における惑星の原材料の性質を探るた めの有効な手段であると言える。1995年に打ち上げら れた赤外線宇宙天文台ISOは、質量が2-8太陽質量程 度の若い星であるHerbig Ae/Be型星の周りに,結晶 質のシリケイト(ケイ酸塩鉱物) ダストが存在すること を突き止めた(e.g. [1]). 以来, 原始惑星系円盤中のダ ストの研究は大きく進展し,いわゆる「宇宙鉱物学」 が切り開かれた. さらに最近では、すばる望遠鏡や Spitzer宇宙望遠鏡の観測により、太陽質量程度の若い 星であるT Tau型星の周囲にも結晶質シリケイトが検 出されるようになってきた(e.g. [2, 3]).

若い星の星周環境においてバラエティに富むシリケイ トフィーチャーが見られるようになった今、次に行う べきことは、原始惑星系円盤に存在するダストの組成 やサイズ、結晶状態などを観測データから統計的に議 論し、ダストの進化の過程を解明することである.近 年,T Tau型星やHerbig Ae/Be型星の中間赤外線ス ペクトルに対してスペクトルモデルを適用し、シリケ イトダストのサイズ分布や結晶性に制限をつける試み がなされている。[4]は、主に南天に位置する24天体 のHerbig Ae/Be型星をNバンド(波長10µm帯)で分光 観測し,シリケイトダストが10µm付近に示すフィー チャーの形状からダストの成分分解を行った. その結 果, Herbig Ae/Be型星星周シリケイトについて, 質 量が大きい星ほど高い結晶化度を示すという観測的傾 向を報告している. また, [2]は, 30天体のT Tau型星 をNバンドで観測し、「4]と同じ解析手法を用いて、シ リケイトダストのサイズ分布や結晶性の評価を行った. その結果、ダストサイズの指標であると考えられるシ リケイトフィーチャー強度と、中心星のHα輝線光度 との間に相関が見られることが分かった. Ηα輝線は, 円盤からの降着物質が中心星に落下・衝突する際に生 じるショックによって発生するとされているため、そ の強度は円盤における物質の降着活動性の指標になる と考えられている[5]. すなわち, [2] の結果は, 降着 活動によって引き起こされる乱流の状態が原始惑星系 円盤におけるダストサイズ成長に重要な役割を果たし ている、ということを示唆している. 円盤内の乱流状 態とダストサイズ分布との間には、鉛直・動径方向の ダスト輸送、ダストの合体成長、衝突破壊などといっ たプロセスが介在している可能性が考えられるが、そ れでは具体的にどのプロセスがどれだけ効くのかとい う点については、まだ詳しくは解明されていない.

以上に述べたように、中間赤外線域において若い星 をサーベイ的に分光観測し、得られたスペクトルから、 原始惑星系円盤のシリケイトダストの組成やサイズ、 結晶状態などを探る試みは、少しずつではあるが進展 してきている.しかしこれまでの研究では、扱ってい るサンプルの数が十分ではなく, 観測的傾向を統計的 に議論することが厳しいのが現状である. そこで,本 研究では, [4] でとられた手法を踏襲しつつ,扱うサ ンプルの数を大幅に増やし,Herbig Ae/Be型星周囲 におけるシリケイトダストのサイズと結晶化の度合い について,より厳密な議論を試みる.

2. 観測概要とダスト成分分解

我々は,米国ハワイ島マウナケア山山頂のすばる望 遠鏡に搭載された赤外線観測装置COMICS [6] を用い て、11天体のHerbig Ae/Be型星をNバンドの低分散 分光観測モードで観測し、スペクトルを得た. 波長分 解能は $R=\lambda/\Delta \lambda \sim 250$ である. これに, Spitzer宇宙 望遠鏡搭載のIRSおよびISO搭載のSWSで取得されて いるHerbig Ae/Be型星のスペクトル[7] のうち、現時 点で入手可能なものを抽出し加えた. サンプル数はそ れぞれ, 17天体, 30天体である. なお, COMICSで 観測されたサンプルとあわせて議論するために、7.7 -13.4 µmの波長範囲のみを扱った. また, 波長分解 能はそれぞれR~50.250である。以上3装置による スペクトルを集めることにより、本研究で取り扱う Herbig Ae/Be型星のサンプル数は58天体になり、[4] で扱っているサンプルの数の2倍以上になった. なお, 今回の観測天体は、すべて[8] にリストされているも のである。[8]では、HR図における各天体の位置と前 主系列星の進化トラックとの比較から、各天体の年齢 や質量といった物理パラメータを統一的に導出してい る. そのため、後にダスト成分分解の結果を中心星の 性質に照らして議論する際に、不定性を少なくできる

表1 フィッティングで導入したシリケイト系のダスト種.

ダスト種	化学式	出典
非晶質オリビン	$[Mg_{0.5}, Fe_{0.5}]_2SiO_4$	[9]
非晶質パイロキシン	$[Mg_{0.5}, Fe_{0.5}]_1SiO_3$	[9]
結晶質フォルステライト	$\mathrm{Mg}_{2}\mathrm{SiO}_{4}$	[10]
結晶質エンスタタイト	MgSiO_3	[11]
非晶質シリカ	SiO_2	[12]



図1:得られたスペクトルと最小二乗フィッティングによ るダスト成分分解の結果の例(V586 Ori).観測スペク トルを"+"点で、フィッティングによるベストフィッ トのモデルスペクトルと連続成分の寄与を実線で示 している.これに加えて、各ダスト成分の寄与も示 してある.上から非晶質オリビン、非晶質パイロキ シン、結晶質フォルステライト、結晶質エンスタタ イト、非晶質シリカであり、それぞれ実線が0.1 µm サイズ、破線が1.5 µm サイズ成分である.なおこの 天体には、PAH 放射の寄与は見られなかった.

というというメリットがある.

得られたHerbig Ae/Be型星のNバンドスペクトル に対して, [4] により開発され[2] などでも用いられて いるスペクトルモデルを使って, ダスト種の成分分解 を最小二乗フィットにより行った. フィッティングの 式は,

$$F_{\nu}(\lambda) = B_{\nu}(T,\lambda) \left[a_0 + \sum_{i=1}^5 \sum_{j=0.1,1.5 \ \mu \text{m}} \left[a_{i,j} \kappa_{i,j}(\lambda) \right] \right]$$

 $+ a_{\rm PAH} F_{\nu}^{\rm PAH}(\lambda),$ (1)

である. ここで、 $B_{\nu}(T, \lambda)$ はプランク関数、Tはダス ト温度、 a_0 はグラファイトダストやサイズが10 μ m程 度以上の大きなダストなどが担っていると考えられる フィーチャーレスな連続成分の寄与を示すファクター、 $\kappa_{i,j}(\lambda)$ は各シリケイトダストの質量吸収係数, $a_{i,j}$ は それらのスケーリングファクター, $F_{\nu}^{\text{PAH}}(\lambda)$ は炭素 系ダストであるPAH放射のスペクトルテンプレート である. このうち, $T, a_0, a_{i,j}$ がフリーパラメータであ り, $a_{i,j}$ が各ダスト種の質量に比例する.考慮したシ リケイト系のダスト種を,表1に示した[9,10,11,12]. それぞれのダスト種に対して, 0.1μ mと1.5 μ mサイ ズのものを導入している.

図1に、Spitzer宇宙望遠鏡搭載のIRSで観測された V586 OriというHerbig Ae型星のスペクトルと、最小 二乗フィッティングによって得られたダスト成分分解 の結果を例として示す.ベストフィットによって導出 したモデルスペクトルが、観測をうまく再現している ことが分かる.

このようなダスト成分分解を全天体のスペクトルに 対して行い、さらにその結果から、ダスト進化の指標 として次の2つの量を導出した。1つは、ダストサイズ の指標となる"Large Grain Fraction"であり、シリ ケイト全体に対する1.5µmサイズシリケイトの質量 比で定義される量である。もう1つは、結晶化の度合 いの指標となる"結晶化度"であり、シリケイト全体 に対する結晶質シリケイトの質量比で定義される量で ある. もともと星間空間に存在するシリケイトダスト は、サブミクロンサイズでほぼ非晶質であることが知 られているので[13], ここで定義した "Large Grain Fraction"と"結晶化度"はともにほぼ0になる。一方、 原始惑星系円盤内では、ダストが合体成長や加熱によ る変成などを起こすことが考えられている. すなわち, この2つの指標がダストの"進化"を示す良い指標と なるはずである.以下で、これらの指標が星自身のパ ラメータに対してどのような傾向があるのかを議論す る.

3. 結果と議論

3.1 ダストサイズ

原始惑星系円盤におけるダストの粒子サイズ成長は, 惑星形成過程の第一段階である.そこでまず,導出 した"Large Grain Fraction"に基づいて,Herbig Ae/Be型星星周におけるダストサイズの傾向について 議論する.図2に,横軸に中心星の質量および年齢を, 縦軸にLarge Grain Fractionをとった図を示す.中心 星の質量および年齢は,[8]から引用した.

まず第一に, Large Grain Fractionが50%以上の天 体が多数を占めていることが分かる. すなわち,本



図2: 観測スペクトルに対する最小二乗フィットから導出 した Large Grain Fraction を中心星の質量(a) およ び年齢(b)に対してブロットしたもの. なお, 結晶質 フォルステライトのフィーチャーとの混同を避ける ため, PAH 放射の寄与が強かった天体はこのプロッ トからは除いてある.また,中心星の質量と年齢は, [8]によって HR 図上における各天体の位置と前主系 列星の理論的な進化トラックとの比較から決められ た値を用いた.

研究の観測対象であるHerbig Ae/Be型星の段階では, 星周ダストのサイズ成長がかなり進んでいるという ことを意味している. [14] による,ダスト成長のシミ ュレーションによれば,小さいダストの供給がない 条件下では,原始惑星系円盤中におけるダストの成長 速度は速く,1Myrに達する前に小さなダストはなく なってしまうとされている.多くの天体でダスト成 長がすでに進行しているという点では,今回の観測結 果と[14] とは調和的であるといえる.ただし,Large Grain Fractionが100%近くに達していない天体もあ る程度存在していることから,実際にはダスト同士の 衝突破壊などによって小さなダストが新たに供給され 続けていると考えるのが妥当であろう.

また,図2は,Large Grain Fractionと星の質量お よび年齢との間に傾向があることを示している.すな わち,質量が大きいかあるいは年齢が若い星の周囲で は、サブミクロンサイズの小さなダストが欠如してい る、という傾向が見られる.これは、ダストにかか る放射圧が、シリケイト放射を担っている円盤表層 におけるダストのサイズ分布に影響した結果であると、 我々は考えている.光度の大きい星の周囲ではダスト にかかる放射圧が大きくなるために、円盤表層にある 小さなダストが遅択的に動径方向に飛ばされ、結果的 に大きなダストが卓越して見えるのである.ダストが 放射圧で飛ばされるか否かは、重力に対する放射圧の 比βという指標で代表される.βが1より大きければ、 ダストには半径方向外向きの力がかかり、ダストが飛 ばされることになる.このβは、

$$\beta = \frac{F_{\rm pr}}{F_{\rm gr}} = \frac{3L}{16\pi GMc} \cdot \frac{\langle Q_{\rm pr} \rangle}{as} \propto \frac{L}{M} \cdot \frac{\langle Q_{\rm pr} \rangle}{a} \quad (2)$$
と記述される. ここで, Lは中心星の光度, Mは中心
星の質量, Gは重力定数, cは光速, aはダスト半径, s
はダスト密度, そして $\langle Q_{\rm pr} \rangle$ は中心星スペクトルと
ダストの物質化学的性質で決まる放射圧係数である.
つまり, β はダストサイズに依存し, 一般的にはダ
ストサイズが小さくなるほど β は大きくなるのであ
る. たとえば, [15] によれば, サブミクロンサイズの

"voung cometary grain" $O\beta d$, $\xi / D \to T / T$ それよりもおよそ一桁ほど大きくなるとされている. 一方, βは星の質量と光度の比にも依存するが, 今回 扱っているサンプル星は、 $L \propto M^4$ の質量 – 光度関係 にほぼ従っているので[8],大質量の星の周囲ほどダ ストにかかる放射圧が大きくなることになる. したが って、今回観測された"Large Grain Fraction"の傾 向は、大質量・高光度の星の周囲ではダストに生じる 放射圧の影響が大きく、大きなダスト(ミクロンサイ ズ)よりも飛ばされやすい小さなダスト(サブミクロン サイズ)が原始惑星系円盤の表層から選択的に除去さ れたために達成されたものであると考えるのが妥当で ある、逆に言えば、今回得られたこの結果は、中心星 からの放射による放射圧が原始惑星系円盤表層におけ るダストのサイズ分布に大きく寄与する可能性を示し ているものであると言える.

3.2 結晶化度

次に,先に導出した"結晶化度"に基づいて, Herbig Ae/Be型星星周におけるシリケイトダストの 結晶性について議論する.地上実験の結果によれば, もともと星間空間で非晶質だったシリケイトダストが 結晶化するためには,ダストが800K程度の高温環境 を経験する必要があるとされる(e.g. [16, 17]).すなわ ち,ダストの結晶性を探ることは,原始惑星系円盤に おけるダストの熱史を知ることに相当し,ダストの進 化を探る上で大変重要である.

図3に、横軸に中心星の質量および年齢を、縦軸に 結晶化度をとった図を示す.この図から、シリケイト の結晶化度と中心星のパラメータとの間には特に傾向 は見られないものの、本研究で取り扱ったサンプルの ほとんどは、5%以上の結晶化度を示していることが 分かる.すなわち、星間空間に見られるような完全に 非晶質なダストフィーチャーは、Herbig Ae/Be型星 周囲においてはほとんど見られない.また、中心星の 年齢の観点で言えば、0.5Myrよりも若い星でも数10 %の結晶化度を示す天体が存在するということが分か る(図3(b)). すなわち,この結果は,原始惑星系円盤 中のシリケイトの結晶化プロセスが,0.5Myrよりも 若い段階ですでに進行していることを意味する.

最近,短周期彗星であるWild 2彗星から放出された ダストが,NASAの彗星探査機STARDUSTによって 採取されたが,採取されたダストの中に結晶質シリケ イトが含まれているということが報告されている[18]. 短周期彗星が生まれるような太陽系外縁部においては, その場で結晶質シリケイトを生成することが難しいこ とから,原始太陽系円盤内において結晶質シリケイト を動径方向外側への輸送するプロセスが働いていた 可能性が指摘されている.一方,これに先立ち[19]で は、シミュレーションの結果から,結晶質シリケイト が原始惑星系円盤の内側の高温領域のみで生成されて いるとした場合,円盤内側で生成された結晶質シリケ イトが乱流による拡散によって円盤外側に輸送される



図3: 観測スペクトルに対する最小二乗フィットから導出 した結晶化度を中心星の質量(a)および年齢(b)に対 してプロットしたもの.

メカニズムが効くタイムスケールは0.01Myr程度であ り、中心星から数AUよりも外側領域における結晶質 シリケイトの質量比は1Myr以内に平衡状態に達する はずである、ということを主張している.0.5Myrよ りも若い星でも高い結晶化度を示している一方で、結 晶化度と年齢に相関は見られない、という点を鑑みる と、我々の結果は、[19]によるシミュレーションの結 果を観測的にサポートするものであるといえる.

3.3 まとめと今後の展望

本研究では、中間赤外線Nバンドのスペクトルに対 してダスト成分分解を行うことでHerbig Ae/Be型星 星周におけるシリケイトダストのサイズ分布と結晶性 を定量化し、中心星の質量や年齢との比較を行った. その結果、質量および光度が大きい星の周囲ではサブ ミクロンサイズの小さなダストが欠如しているように 見える、という傾向を見出し、放射圧が原始惑星系円 盤表層におけるダストのサイズ分布に大きく寄与する 可能性を示した、一方、シリケイトダストの結晶化度 は、中心星の物理パラメータと相関が見られなかった. しかし本研究で取り扱ったサンプルの半数は、数10% の結晶化度を示しており、しかもその中には中心星の 年齢0.5Myrよりも若い天体も存在するということが 分かった。すなわちこれは、シリケイトダストの結晶 化プロセスがより若い段階でスタートしていることを 意味している。ただし本研究では、シリケイトダスト の結晶化プロセスの開始時期に制限をつけたに過ぎず, 具体的なダスト加熱/結晶化のメカニズムを示したわ けではない.したがって,原始惑星系円盤内における 結晶質シリケイトの動径分布を調べることで、原始惑 星系円盤内におけるダストの結晶化のメカニズムを特 定することが次に狙うべき課題である. そのために今 後は、地上の大型望遠鏡による高い空間分解能を活か した観測をこれからも進めていくと同時に, Spitzer宇 宙望遠鏡や日本の赤外線天文衛星「あかり」によって もたらされる中間赤外線~遠赤外線域の高感度の観測 データを用いることで,円盤のより外側に存在する低

温ダストの性質や空間分布にも迫っていきたい.

謝 辞

本研究は、筆者の修士論文の一部です.筆者の指導 教員である尾中敬教授(東京大学)に心から感謝いた します.また、片ざ宏一氏(宇宙航空研究開発機構・ 宇宙科学研究本部)、岡本美子氏(茨城大学)、本田充 彦氏(神奈川大学)、山下卓也氏(広島大学)をはじ めとするすばる望遠鏡COMICSグループの方々には、 データ取得や議論においてお世話になりましたことを 感謝いたします.また、本研究を紹介する機会を与え てくださいました橘省吾氏(東京大学)、研究会等で 貴重なアドバイスを下さった科研費特定領域「系外惑 星」ダスト班の方々に感謝いたします.なお、本研究 は、科研費特定領域「系外惑星」のサポートを受けて 行われました.

参考文献

- [1] Waelkens, C., et al., 1996, A&A 315, L245
- [2] Honda, M., et al., 2006, ApJ 646, 1024
- [3] Kessler-Silacci, J., et al., 2006, ApJ 639, 275
- [4] van Boekel, R., et al., 2005, A&A 437, 189
- [5] Muzerolle, J. et al., 1998, AJ 116, 455
- [6] Kataza, H., et al., 2000, Proc. SPIE 4008, 1144
- [7] Sloan, G.C., et al., 2003, ApJS 147, 379
- [8] Manoj, P., et al., 2006, ApJ 653, 657
- [9] Dorschner, J., et al., 1995, A&A 300, 503
- [10] Servoin, J. L., and Piriou, B., 1973, Phys. Stat.Sol. (b) 55, 677
- [11] Jäger, C., et al., 1998, A&A 339, 904
- [12] Spitzer, W. G., and Kleinman, D. A. 1960, Phys. Rev. 121, 1324
- [13] Kemper, F., et al., 2004, ApJ 609, 826
- [14] Dullemond, C. P., and Dominik, C. 2005, A&A 434, 971

- [15] Wilck, M., and Mann, I. 1996, Planet. Space Sci. 44, 493
- [16] Fabian, D., et al., 2000, A&A 364, 282
- [17] 村田ら, 2007, 遊星人, 本号
- [18] Keller, L. P., et al., 2006, Science 314, 1728
- [19] Bockelee-Morvan, D., et al., 2002, A&A 384, 1107