

原始惑星系円盤のダスト進化とガスの散逸

本田 充彦, 山下 卓也, 酒向 重行

〈国立天文台ハワイ観測所 650 North A'ohoku Place, Hilo, HI 96720 U.S.A.〉

〈東京大学大学院理学系研究科天文学専攻 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1〉

e-mail: hondamt@naoj.org, takuya@naoj.org, sako@naoj.org

近年の中間赤外線観測の進展により、原始惑星系円盤におけるダスト・ガスの状態・進化の詳細が明らかになってきた。なかでも星周円盤での結晶質シリケートの発見は、彗星・隕石中に含まれる結晶質シリケートの起源を説明するだけでなく、星周円盤で起こっているできごとを探る新しい手がかりを与えてくれている。また、星周円盤のガス成分についての研究も、衛星・地上大望遠鏡による中間赤外線帯の水素分子輝線をプローブとした観測的研究が進められてきている。本稿では、主に COMICS で得られた星周円盤のダスト・ガス成分についての研究の現状を紹介する。

1. 惑星の材料：ガスとダスト

46億年前に太陽が生まれたとき、その周りにダスト（固体微粒子）とガスからなる円盤（原始惑星系円盤/星周円盤）が形成された。そのなかで、ダストが集まり“微惑星”と呼ばれる km サイズの塊が形成され、微惑星がさらに集積・合体することで原始惑星が形成され、地球のような惑星ができた。木星型ガス惑星は、原始惑星がガスを引きつけられるのに十分な重さまで成長し、円盤に存在したガスを取り込んだことで生まれた。

これが現在考えられている太陽系/惑星系形成のシナリオである。近年、惑星系形成の舞台となる原始惑星系円盤の観測が進み、惑星形成初期段階の円盤のガス・ダストの分布や状態が探られてきた。なかでも中間赤外線は、温度約数百 K の「あたたかい」領域、距離にして中心星から数〜数十天文単位のまさに惑星系形成領域から放射される。それに加え、種々のダストの放射・吸収バンドや、水素分子輝線等が存在する。そのため、惑星形成領域において惑星の材料となるダストやガスを詳しく探る強力なツールとなるのである。

2. 円盤のダストを探る

地球の大部分はシリケート（ケイ酸塩）できている。したがって、惑星形成において大きな役割を演じるのはシリケートダストであろう。星間物質中のシリケートダストはアモルファス（非晶質）な大きさ 1 ミクロン以下のダストであると考えられている。これは、銀河中心などの星間吸収を強く受けている天体を観測すると、アモルファスなシリケートに特徴的な波長 9.7 ミクロンを中心とする幅の広いなだらかな吸収フィーチャーが観測されるからである。一方、原始惑星系円盤を持つ太陽質量程度の若い星である T タウリ型星の観測からも、多くの天体で 9.7 ミクロンを中心とする幅の広い放射フィーチャーを示す（図 1（上）参照）。星間物質が集まって星・惑星ができると考えられているため、星周円盤のダストも星間空間のアモルファスシリケートダストとほとんど同じであると考えられていた¹⁾。

2.1 結晶質シリケートの発見

原始惑星系円盤のダストが星間空間のダストと異なる、ということを示唆したのは太陽系内の始源天体である彗星であった。彗星は微惑星

の生き残りであり、原始太陽系星雲を冷凍保存した「化石」と考えられている。その彗星に星間空間には見つからない結晶質シリケートの一種のかんらん石 ($[\text{Mg}, \text{Fe}]_2\text{SiO}_4$) による 11.2 ミクロンのピークが発見されたのである（詳細は、本特集の渡部氏の記事に詳しい）。シリケートの結晶化には約 1,000 K もの高温環境が必要であり、冷たい氷の含まれる彗星中でできたとは考えにくい。彗星ができるときに、すでに結晶質シリケートが存在し、それを取り込んだと考える方が自然である。ならば、彗星の元となった原始惑星系円盤に結晶質シリケートが存在したということになる。

その後、90年代初頭に太陽系外の中質量の若い星（ハービック Ae/Be 型星・ベガ型星）の周りから、結晶質シリケートの存在が報告された。しかし、中質量の若い星の周りで、結晶質シリケートの存在が決定的になったのは、赤外線天文衛星 ISO の観測によってであろう²⁾。ISO により中間赤外～遠赤外域に多数存在する結晶質シリケートのフィーチャーが明確にとらえられ、“宇宙鉱物学 (Astromineralogy)” の時代が幕開けしたのである。

2.2 T タウリ型星ダストの検証

しかし、ISO は十分な感度を持った分光器がなかったため、太陽系形成と比較すべき低質量の若い星である T タウリ型星において、結晶質シリケートが存在するのか否かを検証することはできなかった。一般に T タウリ型星は中間赤外波長帯では暗いからである。それまでの観測からは、アモルファスなシリケートが報告されるばかりであった。T タウリ型星ではシリケートの結晶化は起きないのであろうか？ 実は、それまで観測されてきた T タウリ型星は明るいものに偏っていたのである。一般に明るい T タウリ型星は星周物質が豊富に存在している“若い” T タウリ型星であり、惑星形成が進み星周物質が少なくなりつつある“進化した” T タウリ型星は暗く、これまで観測例

が少なかったのである。そこでわれわれのグループでは COMICS を用いて、これまで観測例の少ない、暗い“進化した” T タウリ型星を重点的に観測した。その結果、T タウリ型星において初めて明瞭に結晶質シリケートの特徴を見だし、太陽質量程度の星周環境においても、シリケートの結晶化が起きうるということを観測的に明らかにしたのである (図 1)³⁾。

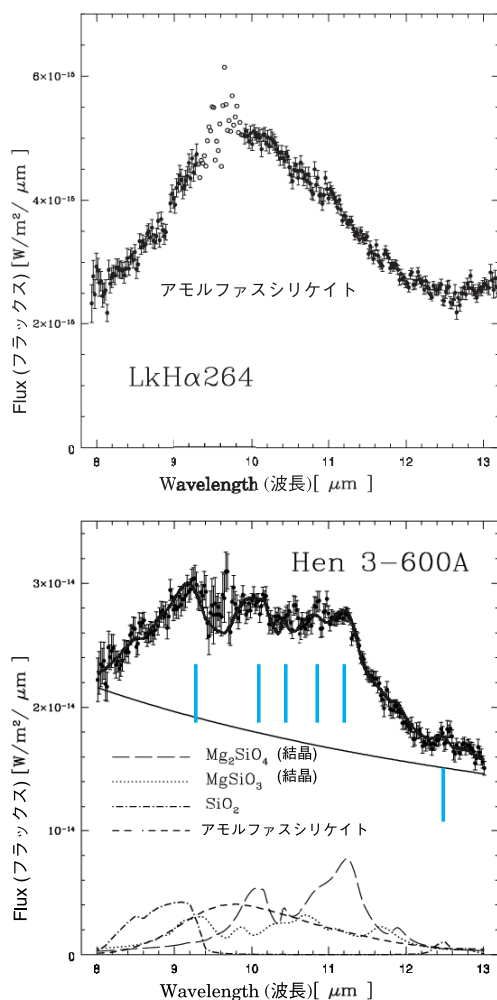


図 1 (上) 典型的なアモルファスシリケートフィーチャーを示す T タウリ型星 LkHα264 のスペクトル。波長 9.6 ミクロン付近は地球大気のオゾンの影響によるエラー。(下) いくつかの結晶質シリケートフィーチャーを示す T タウリ型星 Hen3-600A のスペクトル。

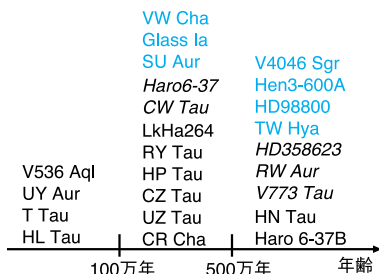


図 2 中心星の年齢とシリケートフィーチャーの関係. 黒字がアモルファスシリケート, 青字が結晶質シリケートを示すもの. 斜体黒字はフィーチャを示さない天体. 年齢が増えると結晶質シリケートを示す天体の割合が増える.

われわれはこれらの分光観測の結果から、より“進化した”Tタウ型星に結晶質シリケートが見られる傾向があると考えている(図2)。このことは惑星系形成が進行し、円盤の進化が進むにつれて、シリケートダストの結晶化も進むことを示している。しかしながら、現在はまだサンプル数が少ないので、結晶質シリケートの出現傾向に関しては他の可能性も排除できない⁴⁾。今後検出例を増やすことでこの問題に決着をつけたい。

2.3 結晶質シリケートが物語る原始惑星系円盤内のイベント

それでは結晶質シリケートは円盤中でどのように形成されたのだろうか？ 実験から、シリケートを結晶化させるには1,000 K以上もの高温にさらさなければならないことがわかっている。このようなことが起こりうるのだろうか？ 最近の理論的研究から、このような状況は、円盤に衝撃波が生じていたり、中心星の非常に近傍で加熱されたのち円盤の外部にもたらされたのであれば説明できることがわかってきた(渡部氏の記事を参照)。いずれにせよ、惑星形成が進んでいる領域では、このようなダイナミックな加熱イベントが起こっていることが、結晶質シリケートの存在から示唆されるのである。

また、このようなダイナミックな加熱イベント

の存在は、原始太陽系星雲のもう一つの「化石」とされる隕石中にも記憶されている。最も顕著なものは、コンドリュールと呼ばれるミリサイズの球状組織の存在である。コンドリュールはシリケートが瞬間的に溶けて液滴となったことを示しており、結晶質シリケートの形成と何らかの関係があるのかもしれない。

2.4 デブリ円盤ダストの鉱物学

では、さらに進化が進んだ円盤のダストはどうなっているのでしょうか？ ベガ型星と呼ばれる、中心星が主系列星に達してもなお星周ダスト円盤を伴う天体がある。このような円盤のダストは原始惑星系円盤のダストが残ったものではなく、微惑星や彗星の衝突などにより新たに供給された第二世代のダストであると考えられているため、デブリ(残骸)円盤と呼ばれている。デブリ円盤のダストの特徴を調べるため、われわれはいくつかのベガ型星を観測しその中のHD145263という天体から結晶質シリケートに特徴的なスペクトルを得た(図3)。デブリ円盤ダストに結晶質シリケートが存在することは、デブリ円盤ダストが微惑星起源であることを考えれば自然である。というのは、微惑星のシリケートは形成時の作用で結晶化するからである。しかし、スペクトルをよく見てみると、11.4ミクロン程度までスペクトルの“肩”がシフトしていることがわかった。このことは、これまで原始惑星系円盤で見つけてきた結晶質シリケートである“鉄を含まないかんらん石”(Mg₂SiO₄; 11.2ミクロンにピークを持つ)だけではうまく説明できない(図3)。

われわれは、実験室でのダスト候補物質の測定⁵⁾との比較から、このピークシフトを説明する一つの可能性として鉄を含むかんらん石が存在しているのではないかと考えている。結晶質シリケートとしてよく見つかるかんらん石は(Mg, Fe)₂SiO₄と書くように固溶体であり、物理条件による鉄とマグネシウムをさまざまな割合で含むことができる。したがって、デブリ円盤ダストでは原

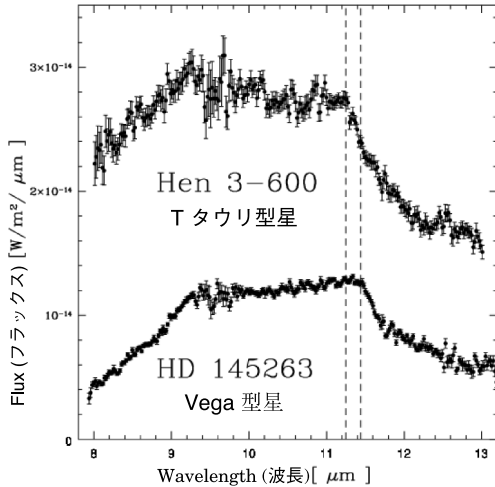


図 3 (上) T タウリ型星 Hen3-600 のスペクトル。11.2 ミクロンピークが結晶質な鉄を含まないかんらん石 (Mg_2SiO_4) に一致。(下) ベガ型星 HD 145263 のスペクトル。ピークが 11.4 ミクロンまでシフトしており、Fe を含む結晶質かんらん石 ($[\text{Mg}, \text{Fe}]_2\text{SiO}_4$) のピークに一致する。

始惑星系円盤ダストと異なり、さまざまに鉄・マグネシウムを含む結晶質シリケートが存在している可能性がある。

では、鉄を含む結晶質シリケートの出現は何を意味するのだろうか？ ここで、太陽系形成を探る惑星科学から得られた知見と比較してみる。太陽系形成時の情報をもたらしてくれる、隕石や惑星間塵はそれぞれ微惑星のような隕石母天体や彗星などを起源としている。実は、隕石や惑星間塵には鉄を含むシリケートが存在しているのである。鉄を含むシリケートの出現は、デブリ円盤ダストが隕石や惑星間塵をもたらしたような微惑星・彗星などから供給されていることを物語っているのである。

2.5 これから

ここでは主に COMICS によりもたらされた若い星の宇宙鉱物学の成果を述べた。特に、彗星や隕石からもたらされる太陽系形成の情報と、太陽系外の星周円盤で今起っていることが、まるでジグソーパズルのピースのように符合していきつ

つあることは驚きであった。今後はスピッツァー宇宙望遠鏡や赤外線天文衛星 Astro-F を用いた中間～遠赤外域の高感度観測により、宇宙鉱物学に大きな進展をもたらされるだろう。地上観測は大口径望遠鏡や干渉計による高空間分解能を活かして結晶質シリケートの円盤における分布を探り、原始惑星系円盤で起っている結晶化プロセスを特定することが次の課題である。また、宇宙鉱物学は観測のみではなく、観測結果を解釈するための実験、理論が三位一体となって進展している。今後も観測との有機的な進展を期待している。宇宙鉱物学はまだまだ始まったばかりである！

3 円盤のガスを探る

3.1 ガス成分の散逸

前節では惑星系の主要な構成物である固体成分について太陽系外の惑星系形成の現場・進化と現在の太陽系に残る形成の記憶についてのリンクをつなごうとする試みを紹介した。一方、原始ガス成分は木星型惑星の大気として残されているだけであるが、そのためには固体コアが重力で大気を引きつけられる質量に成長するまで原始大気が残されていなければならない。また、微惑星の衝突による合体成長にその軌道運動が大きく影響するが、ガス成分はその微惑星の軌道を変化させる。このように、ガス成分がどの程度どの時期まで残されているかは重要な問題であるが、観測の困難さから、まだ研究が始まったばかりの状況にある。

3.2 星周円盤からの水素分子輝線

原始惑星系円盤のガス成分の検出手段として電波波長域の CO 分子輝線が最もよく使われる。実際、CO 輝線を用いたガスの散逸時期に関する観測が行われ、 10^7 年が散逸時期とする研究もある⁹⁾。しかし、CO 分子は低温で固体化するので、分子ガス成分の万能なプローブではない。水素分子は分子ガスの主要な成分であること、低温でもガスのままであることから、その純回転輝線(波

長 9.6, 12, 17, 28 ミクロンなど) は, CO 輝線を補完するプローブとなる. また, 励起温度が高いことから暖かい ($> 100\text{ K}$) ガスから放射されるため, 必ずしもガス質量の大部分を代表しているわけではないが, その温度は惑星形成過程の起こる半径の温度にほぼ対応することから惑星形成へのガス成分の影響を考えるには最適のプローブであろう. しかし, その波長が中間赤外線にあるために, 地上からは高感度の観測が難しく, 星周円盤からの輝線は長い間検出されていなかった. この状況を, 打破したのが, 赤外線衛星 ISO である.

ISO に搭載された SWS 分光器により 14 天体の T タウリ型星やハービック Ae 型星, ベガ型星に水素分子輝線の純回転輝線を検出したのである^{7), 8)}. しかし, ISO の短波長分光器はビームが数十秒角もあり, 円盤サイズよりずっと大きいので, ISO が検出した水素分子輝線は円盤からではなく, もっと広がった成分から出ている可能性がある. したがって, 高空間分解能での追観測が必須である. そこで, ISO による水素分子輝線の検出の確度が高いとされている天体のうち 4 個を COMICS を用いて観測を行ったが, 水素分子輝線は検出されなかった (図 4). 観測から求めた水素分子輝線強度の上限値は明らかに ISO の結果から期待される値より小さかったのである. また, ISO によって水素分子輝線が検出された他の天体についても, これまでに地上望遠鏡で観測されている. これらの観測は COMICS よりは上限値は高いが, やはり検出されていない^{10), 11)}. したがって, これらの天体について ISO SWS によって検出された輝線は星周ディスクからではなく, もっと広がった領域から放射されていると考えるのがもっともらしい.

3.3 分子ガスは本当にないのか?

では, 円盤からの水素分子輝線が見えないことは円盤に分子ガスが (あったとしてもごくわずかにしか) 存在しないことを示すのだろうか? 実は, 事情はそれほど単純ではない. 水素分子輝線

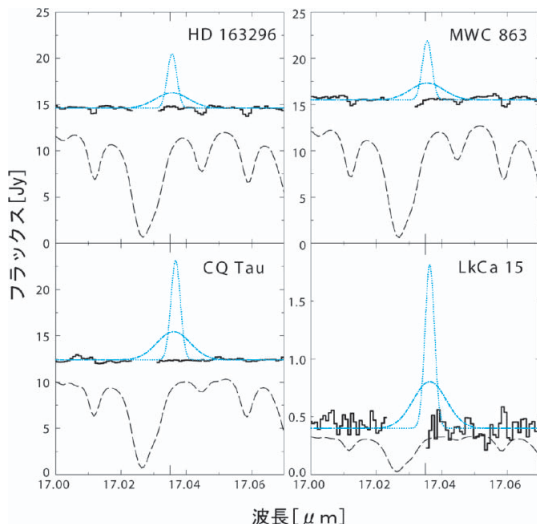


図 4 COMICS で取得した 17 ミクロンの水素分子輝線スペクトル (波長分解能 $\sim 5,000$). 破線は標準星のスペクトルで, 大気透過率を表している. この標準星データで補正して得られた目的天体のスペクトルが実線で表示されている. 一点鎖線 (青色) と点線 (青色) は, それぞれ, 速度幅として考えられる最大値と最小値を仮定し, ISO で検出された輝線が典型的なディスクサイズから放射されているとした場合に, COMICS で検出されると期待されるプロファイルである⁹⁾.

強度からガス質量への単純換算にはいくつかの仮定が必要であるが, 中間赤外線の水素分子輝線の場合はダストの熱放射による連続光の影響が問題となる. 例えば, T タウリ型星のディスクを考えると, ディスク表面からわずかの距離で, 波長 17 ミクロンで光学的に厚くなってしまふ. したがって, ガスとダストの温度が一致していると分子ガス輝線はダストからの黒体放射と放射平衡となるので, 輝線としては全く観測されない. 水素分子輝線が検出されるには, ディスク面に垂直方向に温度構造を持つ必要がある. パンチングディスクモデルでは表面の方が高温となっているので水素分子輝線が放射されるが, 大部分のガスは見えない中心層にある. もしダストが沈殿してガスと分離しているとどうなるであろうか? この場合も, 沈殿したダストが波長 17 ミクロンで光学的に厚

いならば、ガス成分の方が高温でなければ水素分子輝線は観測されない。分子ガスを暖めるには少しはダストが必要なので、輝線強度から分子ガス量を見積もるには沈殿や放射伝達のある程度詳細なモデルが必要となるであろう。というわけで、ダストがまだ豊富にあって中間赤外線で光学的に厚い星周円盤を持つような若い天体の水素分子輝線の観測データを解釈するには注意が必要である。

3.4 これから

水素分子の純回転輝線を用いた研究はまだ始まったばかりで、分子ガス成分の散逸の時期についてまだ明確な答えを与える状況にはなっていない。これは、データの蓄積がまだこれからであることによるが、本稿で述べてきたように観測データの解釈にも十分な注意が必要である。スピッツァー宇宙望遠鏡によっても中間赤外線の水素分子輝線を用いた星周円盤の分子ガスの研究が計画されているが、やはり、視野が多くの天体の星周円盤に比べて非常に大きいという状況は ISO と変わらない。したがって、水素分子輝線を星周円盤からのものと確定するには、地上の大望遠鏡による追観測が必要であろう。また、本稿で示したように、ダストが豊富にあって中間赤外線でも光学的に厚い星周円盤を持つような若い天体については輝線が効率よく放射されない。したがって、水素分子輝線を用いた観測はこの影響の少なくなる進化の後期にある天体にターゲットを絞るのが良い戦略であろう。

謝 辞

本研究は片坐宏一助教授 (JAXA)、岡本美子助手 (北里大学)、宮田隆志助手 (東京大学)、尾中敬教授 (東京大学)、藤吉拓哉さん (ハワイ観測

所)、田窪信也さん ((株)ニコン) との共同研究です。また、本研究を進めるうえでお世話になった多くの方々に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) Hanner M., et al., 1998, ApJ 502, 871
- 2) Malfait K., et al., 1998, A&A 332, L25
- 3) Honda M., et al., 2003, ApJ 585, L59
- 4) Meeus G., et al., 2003, A&A 409, 25
- 5) Koike C., et al., 2003, A&A 399, 1101
- 6) Zuckerman B, et al., 1995, Nature 373, 6514
- 7) Thi W. F., et al., 2001a, Nature 409, 60
- 8) Thi W. F., et al., 2001b, ApJ 561, 1074
- 9) Sako S., et al., 2004, submitted to ApJ
- 10) Richter M. J., et al., 2002, ApJ 572, L161
- 11) Sheret I., et al., 2003, MNRAS 343, L65

Dust Evolution and Gas Dissipation in the Protoplanetary Disks

Mitsuhiko HONDA, Takuya YAMASHITA, and Shigeyuki SAKO

Subaru Telescope/Department of Astronomy, The University of Tokyo

Abstract: Recent progress of mid-infrared observations is revealing evolution of dust and gas in the protoplanetary disks in detail. In particular, detection of crystalline silicate dust in the protoplanetary disks is important not only as the origin of crystalline silicate dust in comets and meteorites, but also as a new probe to understand the planet formation process taking place in the protoplanetary disks. Furthermore, studies of gas in the protoplanetary disks are proceeding using pure rotational H₂ emission lines in the mid-infrared. Here we introduce current observational studies of dust and gas in the protoplanetary disks using COMICS/Subaru