実験室で行う赤外線天文学 結晶質シリケイトの赤外分光測定

茅原弘毅^{1,2},小池千代枝²,周藤浩士³,寒川尚人²,土山 明¹

1. 宇宙鉱物学の幕明け

日常,我々の周囲の物質は、固体、液体、気体の形 態で存在しているが、宇宙に存在する物質のほとんど は気体やプラズマの形態をとる場合が普通である。字 宙空間の圧力と温度の関係からは、液体が存在する領 域はほとんどなく,固体として存在している物質の 量は、質量にして気体の1%程度と見積もられている。 そして、これらの固体物質のほとんどは、1ミクロン 以下から数ミリ程度の微粒子(宇宙塵/ダスト)とし て宇宙空間を漂っていると考えられている、このよう に,宇宙空間における固体物質は,全体からみると非 常に少ない量ではあるが、固体は一般に、高いエネル ギーの輻射を吸収し、赤外線領域で再輻射を行う性質 があるため, 星形成や原始惑星系円盤の形成など様々 な階層の天体現象において、エネルギー散逸を行うと いう重要な役割を担っている。また、地球惑星科学の 分野においては、これらの固体物質が、コンドリュー ルや隕石, さらには地球を含めた固体天体の原材料と も考えられることから、宇宙空間における固体物質の 物性研究が重要である.宇宙塵の言葉の定義は、天 文学や惑星科学の中でもいろいろであるが、ここでは、 一般に宇宙空間に存在する固体微粒子を指すものとし, 特に恒星の周辺領域に存在するものを星周塵、希薄な 星間空間に漂う塵を星間塵と呼んで区別することとす る.

1995年にヨーロッパ宇宙機構 (ESA) が打ち上げた

2. 京都薬科大学 物理学教室

赤外線天文衛星 ISO (Infrared Space Observatory) は、比較的大きな質量の晩期星や若い星の周りに、結 品質の珪酸塩(シリケイト)鉱物が存在することをつ きとめた[1,2]. これらの結晶質シリケイトは、鉱物 の種類によって特徴づけられるピーク位置に、比較的 鋭い吸収または輻射として観測される。ISOが打ち上 げられる以前には、一部の彗星やごく少数の若い星な どに結晶質のシリケイトが見つかっていた以外は、ほ とんど全てのダストは非晶質(アモルファス)だと考 えられていたので、これはISOがもたらした大きな発 見の一つとなった. さらにISO以降, 日本のすばる望 遠鏡による精力的な中間赤外線分光観測によって,太 陽程度の比較的小さな質量を持つ若い星(T-Tau型星) の星周円盤にも結晶質シリケイトが存在することがわ かってきた[3, 4]. しかし, 我々の銀河系における星 間塵のシリケイトは、やはりほとんどが非晶質である ということが、ISOを用いて行われた銀河系中心方向 の分光観測などからも再確認されている[5]. 文献に よっては, 星間塵に含まれる結晶質シリケイトの上限 値は2.2 %以下であるという主張もなされており,星 間塵にはまったくと言って良いほど結晶質シリケイト は存在していないと考えられている[5]. これらの観 測事実から, 宇宙の固体微粒子の一生は, 以下のよう なシナリオが想像される. すなわち, 宇宙塵は最初に, 晩期星から放出されたガスの凝縮により、おそらくは 非晶質の固体として形成され、何らかの加熱のイベン トを経て一部は結晶化して結晶質星周塵として観測に かかる. これらの星周塵は中心星からの輻射圧により, しだいに星間空間に漂い出て、宇宙線照射などの影響

^{1.} 大阪大学大学院理学研究科 宇宙地球科学専攻

^{3.} 国立天文台

により再び非晶質化して星間塵となる.ひとたび星間 空間に漂い出た非晶質ダストはその後,超新星爆発や 銀河系の渦状腕に付随する密度波を横切るなど,何ら かのきっかけがあると,ガスとともに集積し,分子雲 にとりこまれたのち,様々な有機物などとともに星や 原始惑星系円盤を形成する.さらに,非晶質ダストが 集まった原始惑星系円盤中でも,円盤形成のかなり早 い段階からなんらかの加熱機構が働いて結晶化が起こ り[4],その後,コンドリュールや微惑星の形成につ ながっていくと考えられている.

星周塵がどんな物質からできているのか,また,ど のように形成され進化するのか,さらに,それらが形 成される星の周りの物理的・化学的環境はどんなもの なのかを知るためには,天体観測のデータと実験室で 得られたデータを比較検討して結論を出す必要がある. そのためには,星周塵物質の候補鉱物について赤外線 分光測定を様々な条件で行って,その鉱物粒子が恒星 周囲に存在していた場合に,どのようなスペクトルが 観測されるべきかということを実験室で検証する.さ らに,実験室で得られたこれらの分光学データは実際 の観測にフィードバックされたり,輻射輸送の理論モ デルに適用されるなどして,星周塵の物質種の同定や それらが形成された領域の物理化学環境を推定するた めに用いられる.

一方,天文学の見地から興味がもたれ星周塵の候 補物質として期待される鉱物は,平衡凝縮論から存 在が予測されるもので,多くは隕石中に普通に産出 し,地球にも存在している造岩鉱物である.現在の ところ,観測から確実にその存在が確認されている と考えられている主な鉱物は,酸素リッチな恒星の 星周領域においては,カンラン石(オリビン;(Mg・ Fe)₂SiO₄)や輝石(パイロキシン;(Mg・Fe)SiO₈)と 呼ばれるシリケイト鉱物のうち,ほとんど鉄を含まな い,フォルステライト(Mg₂SiO₄)やエンスタタイト (MgSiO₈)と呼ばれるものである.図1に,すばる望 遠鏡のCOMICSという中間赤外線分光装置を用いた, T-Tau型星の観測結果の例を示す.観測されたスペク



図1: すばる望遠鏡/ COMICSによる, T-Tau型星(Hen3-600A)の結晶化シリケイトフィーチャーの観測例 (Honda et al. 2003[3], 国立天文台 提供).

トルと実験室で得られた分光データとを比較すること によって、非晶質シリケイトの他にフォルステライト やエンスタタイトなどの結晶質シリケイトによると考 えられるフィーチャーが明確にとらえられていること がわかる[3, 4]. ほかにはメリライトや斜長石などの カルシウムやアルミニウムを含んだシリケイト鉱物や、 コランダム、スピネルなどの金属酸化物も星周塵候補 鉱物として興味をもたれている.

さて、20世紀のおわりにISOによる結晶質シリケイ トフィーチャーの発見によってもたらされ、以上のよ うな方法で、観測、実験、理論の連携によって行わ れる新しい学問分野のことを、最近では"宇宙鉱物学 (Astromineralogy)"と呼んでいる。宇宙鉱物学はこ こ10年の間に、特に欧州における赤外線天文学の主流 の一つになりつつあり、観測と室内実験の両面から多 くの成果が公表され、様々なモデル計算も行われるよ うになって、星周環境における固体物質の情報が少し ずつ明らかになってきている。しかし、これまでに行 われてきた研究の多くは、星周におけるいくつかのシ リケイト鉱物の存在の有無を議論するにとどまってお り、具体的な化学組成や結晶構造の決定はいまだに不 確定で、塵の形成や進化過程の詳細な議論にはなかな か至っていないのが現状である.これは,最初の結晶 質星周塵の発見からまだ10年程度と日が浅いため,実 験データの蓄積が量的にも質的にもまだまだ圧倒的に 不十分であることが原因の一つだと思われる.したが って,塵の形成・進化過程における物理・化学条件を 詳細に推定するためには,星周物質の具体的な化学組 成や温度,結晶構造,塵の粒径,形状などの違いに着 目した分光実験による測定データが不可欠である.こ れらの問題を解決するため,星周塵候補と考えられる 固体物質について,実験室で合成を行ったり,また天 然の鉱物を用いるなどして,様々な条件のもとで,赤 外線領域における固体物質の光学特性を吸収率や反射 率の測定から明らかにすることが求められている.

組成と温度に関する赤外線吸収 ピークの挙動

さて、これまでに行われてきた結晶質シリケイトの 赤外線吸収スペクトルの測定結果からは、吸収ピーク の位置と半値幅が、一般に結晶試料の化学組成と温度、 さらには微粒子の形状や粒径、分散媒質中での凝集の 程度などによって様々に変化することがわかっている. これらのうち、現在の実験手順において実験条件の制 御が可能で、再現性の裏付けがあるものは、化学組成 と温度に関する依存性である.しかし、これらの二つ の効果はそのメカニズムこそ異なるものの、吸収ピー クの挙動に関しては似たような振る舞いをするため注 意が必要である.以下ではこの二つの効果について、 過去の実験研究から得られた結果と、それから考えら れる定性的なメカニズムを述べる.

2.1 化学組成に関する依存性

星周塵の候補物質として考えられる造岩鉱物の多く は、一般に固溶体を形成している場合が多く、化学組 成の違いにより、赤外線スペクトルの挙動が変化する. 固溶体とは、結晶構造的には等価な原子位置に対し、 複数の元素が配置されている構造を持つ固体のことで

ある.現在、星周塵の主要な構成鉱物として考えられ ているオリビンやパイロキシンもマグネシウムと鉄を 各々の"端成分"とする固溶体を形成している*.マ グネシウム端成分のモル比を n = Mg / (Mg + Fe) (た だし、 $0 \le x \le 1$)として、オリビンとパイロキシン 固溶体の化学組成式を書き下すと、各々、(Mg_xFe_{1x})2 SiO₄、(Mg_rFe₁)SiO₃となる、括弧で囲まれた部分が 固溶状態を表している. すなわち、MgOとFeOを足 し合わせたものとSiOoとの比が化学量論的に決まって おり,その値は,オリビンの場合は2:1,パイロキシ ンの場合は1:1となる.これまでの室内実験による 研究では、今のところ大まかな化学組成に対するス ペクトルの変化の依存性が確認されているのみだが, Mg/(Mg+Fe) 比が小さくなる(=鉄が増える)ほど, 吸収ピークが長波長側へ移動することや、端成分に近 い組成でピークが鋭く、中間組成でブロードであるこ となどが報告されている[6,7].赤外活性の振動モー ドは古典力学的には、両端におもりのついた双極子モ -メントが変化するバネの振動で表わされるというこ とを前提にすると、フックの法則から、これらの効果 は定性的には以下のように説明される. すなわち, バ ネの振動数vは、バネ定数をk、おもりの質量をmと すると

 $\nu \propto \sqrt{k/m}$

の関係があるため、固溶体中の重たい元素が増えると、 バネの強さは同じでもつながっているおもりの質量が 大きくなるため振動数は小さくなる.その結果、吸収 ピークの位置が低エネルギー側(長波長側)にシフト する.また、固溶体の振動モードは、本来、群論的に 決まっているものであるが、固溶体においては同一の 振動モードを形成する原子位置に対して、重たい元素 と軽い元素がランダムに配置できるため、端成分側で はどちらかの元素だけが多数を占め、片方の振動モー ドだけが卓越して吸収ピークが鋭くなる.また、中間 組成の固溶体の場合では、群論的には等価な振動モ

^{*}パイロキシンの場合は更にカルシウムを含んだ固溶体も 形成する.シリケイト固溶体の詳細については、例えば「造 岩鉱物学,森本信男 (1989)、東京大学出版会」などを参照.

ードに対し実際には二つの振動モードが存在するため、 二つのポテンシャルの重ね合わせによりピークの幅が 増加すると説明される.

また,多くの結晶質シリケイトでは、固溶体の端成 分において特に鋭い吸収ピークが遠赤外線領域に存在 している場合が多く,これらは鉱物固有の特徴を示し ている。例えば、フォルステライトの50μmや69μm のシングルピークやオルソエンスタタイトの50μmお よび70μmのダブルピークなどである。これらの遠赤 外線領域の吸収ピークは一般に化学組成に対して非常 に敏感に挙動を変え、端成分に近い組成領域で特に大 きな挙動の変化を示すため、結晶質ダストの形成条件 を含め、それらの化学組成や結晶構造を決定するため の有力な指標となると考えられている[6].

2.2 温度に関する依存性

ダストの温度もまた、吸収ピークの挙動を変化させ るもうひとつの物理的要因である.温度変化に対する スペクトルの変化も, 化学組成の場合と同様に, 吸収 ピークの移動や半値幅の変化として現れる.この場合 は低温になるほどピークが短波長に移動し、同時にピ ーク幅の減少が起こることが報告されている[8,9,10]. これらの効果についても, 化学組成の場合と同様に, 赤外線の振動モードを重心の変化するバネの振動で置 き換えて考えることができる。すなわち、低温になる と、それによって引き起こされる体積の収縮によって、 結晶の剛性が増しバネ定数kが大きくなると考えられ る. この効果によってバネの振動数 v が大きくなるた め、吸収ピークの位置は高エネルギー側(短波長側) にシフトする.一方,常温での赤外スペクトルは一般 に,赤外活性の振動モードと,結晶格子内における各 元素の原子位置を中心とした熱振動の二つの振動の重 ね合わせを見ていると考えることも出来るため、低温 における測定よりも半値幅が大きくなっているのが普 通である.したがって,極低温で測定を行えば熱振動 の効果は劇的に減少し、赤外活性モードだけが残るの で,吸収ピークは非常に鋭くなる.

3. 星周塵の物理化学特性の解明に むけて

3.1 観測研究の動向

宇宙鉱物学では一般に, 観測において若い星や晩期 星の分光データに固体結晶物質に特徴的な鋭いスペク トルフィーチャーが見つかると、それらを実験分光デ - タと比較することにより、 星周ダストの鉱物種が推 定または同定される.しかし、同じ鉱物に同定される フィーチャーでも、一般には天体ごとにピークの位置 や半値幅が微妙に異なっているのが普通である。これ らのピーク位置や半値幅の微妙な違いは、ダストのど のような物理化学特性を表わしているのだろうか? 近 年,このことに着目して,ダストや星周環境の物理化 学条件を推定しようとする観測研究の動きがある。た とえば、MolsterやBowevらは、酸素リッチな晩期星 の遠赤外線スペクトルにしばしば見つかる、フォルス テライトの69 µmの鋭いスペクトルフィーチャーを 用いて, 天体ごとのピーク位置と半値幅の相関をと った(図5). すると、ピーク位置は、ほぼ68.5 µmと 69.5 µmの間にあり、半値幅は0.4 µmから1.0µmの 間に散らばっていた[11, 12]. 彼らは, これらのデー タ値の多様性は主に温度と化学組成による効果である と考えて、ダストの温度と組成を求める試みを行った. しかし、前述したように、これまでの実験から、ピー ク位置と半値幅は化学組成によっても温度によっても 同様の挙動の変化を示すことがわかっているため、そ の二つの効果をどのようにして切り分け、観測値の多 様性がどちらの効果によるものなのかという問題に決 着をつけない限り、彼らの試みは成功しない。 また、 中間赤外線領域の観測においても、たとえば、フォル ステライトと考えられている11.2 µmのフィーチャー のピーク位置が、やはり天体によって微妙に変化し ていることが報告されている. Subaru/COMISC を用いた観測では、ベガ型星であるHD145263にお いて, このフィーチャーは11.44 µmまで移動してお

り、β-Picでは11.05 μmに現れている.本田らによ って、前者については鉄を含んだオリビン (fayalite: Fe₂SiO₄)の存在の可能性が論じられており[13]、後者 については、岡本らにより、塵粒子の形状の効果の可 能性が示唆されている[14].しかし、これらのピーク シフトの理由は実験データの不足から、現在のところ 本当はまだ良くわかっていないというのが実情なので ある.したがって、これらの問題に解を与えるために は、これまでに行われてきた実験よりも、さらに精密 な化学組成や温度などに関するピーク挙動の依存性を 実験室で系統的に調べ、吸収ピークの様々なパラメー 夕間の相関を丁寧に調べていく事が重要になってくる.

3.2 実験

これまでに述べた赤外線スペクトルの挙動に関する 温度や化学組成などの効果を切り分けるための第一歩 として、本研究では、星周塵候補鉱物として最も有力 であり、観測研究との比較が可能なオリビン結晶をマ グネシウム端成分(フォルステライト)に近い化学組 成でいくつか合成し、常温における赤外線吸収スペク トルの測定を行った.一般に、結晶質シリケイトにお いては、温度や化学組成に対する吸収スペクトルの挙 動の変化の様子は、中間赤外線領域よりも遠赤外線領 域において、より敏感である[6].したがって、本稿 では特に、オリビンが持つ50ミクロンと70ミクロン付 近の鋭い吸収ピークに着目し、これらの化学組成に対 する変化の挙動を明らかにすることを試みた.

3.2.1 試料の準備と分光測定

合成したオリビン試料は観測との比較を可能にす るため,Mg端成分に近い固溶体領域において化学組 成を2 %程度の細かい間隔で変化させた3種類の焼結 多結晶体である.充分に乾燥させたMgO,FeOおよび SiO₂の粉体試薬を手早く秤量し,各々適切なモル比で 混合したものをペレット状に成型して,酸素雰囲気を 制御した炉を用い大気圧下で,1200℃,40時間の加 熱を行った.合成試料の化学組成は出発材料の秤量値

表1 : 合成試料の化学組成

	MgO (g)	FeO (g)	${\mathop{\rm SiO}_2} ({ m g})$	Mg/(Mg+Fe)
Fo_{99}	0.1693	0.0029	0.1274	0.9905
Fo_{97}	0.1645	0.0092	0.1265	0.9696
Fo_{95}	0.1597	0.0149	0.1255	0.9503

から、それぞれ、Mg_{1.98}Fe_{0.02}SiO₄、Mg_{1.94}Fe_{0.06}SiO₄、お よびMg_{1.90}Fe_{0.10}SiO₄である. 試料のMg/(Mg+Fe) 値 を用いて、これらをそれぞれFo₉₉、Fo₉₇およびFo₉₅と 名付ける(表1). 合成試料は瑪瑙の乳鉢中で約1時間 ほど粉砕し、1 μ m 程度以下になった微粒子を、適切 な濃度で保持媒体(低密度ポリエチレン)に分散させ 遠赤外線吸収スペクトルを測定した.測定には、フー リエ変換型赤外線分光光度計(FT-IR: Nicolet Nexus 670)を用い、測定波数範囲は650-50 cm⁻¹(15-200 μ m),波数分解能1 cm⁻¹の条件で行った.

3.2.2 結果

赤外線分光測定によって得られた透過率スペクトル から、単位質量当たりの吸収量(質量吸収係数)は各 試料の透過率(%)から、以下の計算式で求められる.

 $\kappa = S/M \ln(1/T)$

ここで、Sは保持媒体を含んだ試料の断面積、Mは 保持媒体に含まれる試料粒子の質量、Tは透過率で ある.本研究で特に注目した200 cm⁻¹ (50 μm)と142 cm⁻¹ (70 μm)付近の波数領域における質量吸収スペ クトルを図2に示す.鉄の濃度が増えるにつれて、ピ ーク位置が長波長側へ移動し、同時に半値幅が増加し ていくことがわかる.これらの吸収ピークに対してロ ーレンツ関数によるフィッティングを行い、吸収ピー クの中心位置、半値幅、および適切なベースラインか らの高さを強度として求めた.これによって得られた 各パラメータの化学組成に関する依存性を図3に示す. Fo₁₀₀とFo₉₂についてはKoike et al. 2003[7]によるもの を同様の方法で解析した.吸収の中心位置は50μmと



図2: 50µm および69µm付近の質量吸収スペクトル(Fo100 とFog2 はKoike et al. 2003[7]による). ただし縦軸は 任意. 図中の数値はピーク位置(µm)を示す.



図3: 化学組成に関する, 50 µmおよび69 µm吸収ピークの 挙動の変化



図4: 各組成における, 50 µ mおよび69 µ mの吸収ピーク位 置と半値幅の相関

70μmのどちらの吸収ピークも,鉄が多くなるほど直 線的に長波長へ移動し(図3-a),半値幅が大きくなっ ていく(図3-b).この結果は,これまでの実験結果[6, 7]と調和的である.またピーク強度は鉄が多くなると 減少する傾向にあることがわかる(図3-d).半値幅か らだけではピークの鋭さは判定できないので,半値幅 をピーク強度で規格化し,ピークの形そのものの変化 の様子を図3-cに示した.鉄が増えると半値幅は増え るが,強度は減少するため,確かにピークの形そのも のが太っていく傾向がわかる.過去の観測研究と比較 するため,図4にそれぞれの化学組成における50ミク ロンと70ミクロンの吸収ピーク位置と半値幅の相関を 示す.

3.3 観測との比較 - 今後の展開

ここでは、図4で得られた70ミクロンフィーチャー の結果と、Molsterらが過去に行った晩期星の69ミク ロンフィーチャーの位置と半値幅の相関図[11]との比 較を試みる.図5では酸素リッチな晩期星で観測され たフォルステライトによるものと考えられる69ミクロ ンフィーチャーのピーク位置と半値幅を,低温で測定 した過去の室内実験のデータと共に示してある. 観 測された天体の69ミクロンの吸収位置はすべて, 69.4 μmよりも短く,半値幅は1 μm以下である.一方, 室内分光実験によるフォルステライトの常温でのピー ク位置は69.7µm, 半値幅は1.3µm程度である。これ らのことを根拠に, 星周のオリビンは非常にマグネ シウムに富み,200 K以下の低温に曝されているとい うことが示唆される[11]. 星印 (★) は本研究で新た に得られた、各オリビン試料の室温における70ミクロ ンの吸収ピーク位置と半値幅である。また、Koike & Mutschke et al. 2006[10] による最新のフォルステラ イトの低温測定のデータを◆で示してある。さて、こ こから先の議論は、現在のところ常温での実験しか行 われておらず、確かなことは言えないのだが、過去の 低温での分光測定の結果を踏まえると、温度が低くな ると、ピーク位置と半値幅の値は図5に示した相関図



図5: 観測研究との比較 (F. J. Molster et al. 2002[11]のFig.2を改変)
 ★ Mg端成分に近いオリビン(Fogg, Fogy, Fogg) の常温におけるピーク位置と半値幅(本研究)
 ◆ 実験によるフォルステライトのピーク挙動の温度依存性(Koike & Mutschke et al. 2006[10])
 ▲ 実験によるフォルステライトのピーク挙動の温度依存性(Bowey et al 2002[12])
 ○ ダスト円盤を持たない晩期星(Molster et al. 2002[11])
 ◇ ダスト円盤を持つ晩期星(Molster et al. 2002[11])
 ◇ 各組成のオリビン(★) は低温にすると,図中の破線に沿ってピーク位置と半値幅が変化していくと予想される.

において,破線で示した線上を左下方向へ移動してい くことが予想される.(ここで破線は単なる予想であり、 その長さと傾きには意味がないことに注意されたい. ただし、過去の実験からはFomでは傾きが急で、Fom では傾きが緩いことはわかる.)また,観測の値(○, ◇)は室内実験で得られたフォルステライトの温度依 存性を表わす線上(▲、◆)よりもやや上に分布して いるようにも見える. 例えば, このことは, 星周塵が 完全にMg-pureなオリビン(フォルステライト)では なく、僅かながらも鉄を含んでいる可能性を示してい るのかもしれない. ただし, 前述のように低温におけ る温度効果を確かめる実験は現在のところまだ進行中 であり、遠赤外線領域における観測データの波長分解 能にもやや問題があるため、現時点で、これまでに述 べた実験結果だけから何がしかの結論を出すことは差 し控え、今後の課題としたい、しかし将来、このよう な吸収スペクトルの詳細な組成依存性と,温度依存性, さらには微粒子の形やサイズの効果などの実験結果を

組み合わせていくことで,吸収ピークの位置や半値幅, 強度などのパラメータ間の相関を求め,組成と温度な どの様々なパラメータに対するピーク挙動の効果の切 り分けが可能になれば,星周塵および星周領域の物理 化学環境にさらに強い制限を与えることができるだろ うと考えている.また,以上のように実験分光データ を高い精度で用意しておくことは,スピッツァー宇宙 望遠鏡や先ごろ打ち上げが成功し活躍が期待される日 本の赤外線天文衛星Astro-F(あかり)などの,ポス トISO時代の赤外線天体観測ミッションの成功を実験 の立場から強力に後押しし,今後の宇宙鉱物学の進展 に大きく貢献していけるものと信じている.

4. 謝辞

研究を遂行するにあたり、JAXA/ISASの本田充 彦博士,東京大学の尾中敬教授,および宮田隆志助 手,名古屋大学の大坪貴文博士には,観測家の立場か ら様々な御助言を頂き,観測研究の動向について多 くの情報を頂いた. また,北海道大学の山本哲生教 授および木村宏博士には理論家の立場から多くの有益 な御助言を頂いた. ここに感謝の意を表したい. なお,この研究は文部科学省科学研究費基盤研究B (12440054,15340064),および特定領域研究「太陽系 外惑星科学の展開」(17039006)からの補助を受けて いる.

5. 参考文献

- Waters, L. B. F. M., Molster, F. J. de Jong, T., et al., 1996, A&A 315, L361
- [2] Waelkens, C., Waters, L. B. F. M., Molster, F.
 J., et al., 1996, A&A 315, L245
- [3] Honda, M., Kataza, H., Okamoto, K. Y., et al., 2003, ApJ 585, L59
- [4] 本田充彦,山下卓也,酒向重行,2004,天文月報97, 216
- [5] Kemper, F., Vriend, W. J., Tielens, A. G. G. M., et al., 2004, ApJ 609, 826
- [6] Chihara, H., Koike, C., Tsuchiyama, A., et al., 2002, A&A 391, 267
- [7] Koike, C., Chihara, H., Tsuchiyama, A., et al., 2003, A&A 399, 1101
- [8] Chihara, H., Koike, C., Tsuchiyama, A., 2001, PASJ 53, 243
- [9] Bowey, J. E., Lee, C., Tucker, C., et al., 2001, MNRAS 325, 886
- [10] Koike, C., Mutschke, H., Suto, H., et al., 2006, A&A 449, 583
- [11] Molster, F. J., Waters, L. B. F. M., Tielens, A. G. G. M., et al., 2002, A&A 382, 241
- [12] Bowey, J. E., Barlow, M. J., Molster, F. J., et al., 2002, MNRAS 331, L1
- [13] Honda, M., Kataza, H., Okamoto, K. Y., et al., 2004, ApJ 610, L49

[14] Okamoto, K. Y, Kataza, H., Honda, M., et al., 2004, Nature 431, 660