

宇宙塵にみられる結晶質シリケート

周 藤 浩 士¹, 小 池 千 代 枝², 茅 原 弘 毅^{2, 3},
寒 川 尚 人², 橘 省 吾⁴

〈¹ 国立天文台 〒181-0015 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: suto@naoj.org

〈² 京都薬科大学 〒607-8412 京都市山科区御陵四丁野町 1〉

〈³ 大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻 〒560-0043 豊中市待兼山町 1-1〉

〈⁴ 東京大学大学院理学研究科地球惑星科学 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1〉

1990年代後半に ISO 衛星（ヨーロッパ宇宙連合による赤外線観測衛星）によって結晶性のケイ酸塩固体粒子（結晶質シリケート）が太陽系外でも発見され、それ以来注目を集めている。濃い塵をまとった天体（AGB 星、惑星状星雲、Herbig AeBe 星、T Tau 型星など）に対して結晶質シリケートが見いだされてきている。結晶質の塵による発光スペクトルには塵の物性をよく反映した複数の幅の狭いフィーチャーが存在し、非晶質の塵よりもずっと精密で豊富な情報を運んでいる。この情報を十分に引き出すためには、結晶の光学的な性質をよく理解しておくことが必要である。本稿では、結晶質シリケートの光学特性を計測する実験室での取り組みを紹介し、実験室測定と観測結果との比較から、宇宙にある結晶質シリケートについて得られつつある性質を記す。

1. はじめに

地球は多様な鉱物から形成されているが、マントルや地殻を代表する鉱物はシリケート（ケイ酸塩）である¹⁾。シリケートは、Si の周りに四つの O が結合した SiO₄ 四面体が基本構造をつくり、その隙間に他の金属元素が入るといった構造をもつ。シリケートは地球に住む私たちにとって非常にありふれたものであるが、地球ばかりでなく、われわれの太陽系全体にわたって豊富に存在し、隕石、地球型惑星、月、彗星、惑星間塵 (Interplanetary Dust Particle) などにも認められている。シリケートが太陽系に普遍的に存在するのは、太陽系は O の存在度が C より多い酸化的な環境であり、Si が最も豊富に存在する金属元素の一つであるためである。太陽系に見つかる主要なシリケートの具体例としては、Si と同程度に豊富に

存在する Mg や Fe を含むオリビン（化学組成は (Mg_xFe_{1-x})₂SiO₄、ここで x は割合を示すパラメーターで 0 から 1 の範囲を動く）やパイロキシン (Mg_xFe_{1-x}SiO₃) が挙げられる。これらは規則的な原子配列をもつ結晶質（クリスタル）、あるいは結晶構造をもたない非晶質（アモルファス）の両方の形態で存在している。

シリケートは波長 9 ミクロンを超える赤外領域に振動モードを複数もっている。この振動モードの多くは光と相互作用し、シリケートの赤外スペクトルには強い吸収あるいは輝線フィーチャーが現れる。1970 年代から活発になった赤外線観測によって、分子雲中や星間にある塵に対して波長 10, 20 ミクロンに吸収フィーチャーが観測された。これは非晶質のシリケートによるものと同定され、太陽系の外にもシリケートが存在していることがわかってきた。また塵を多くまとった、赤

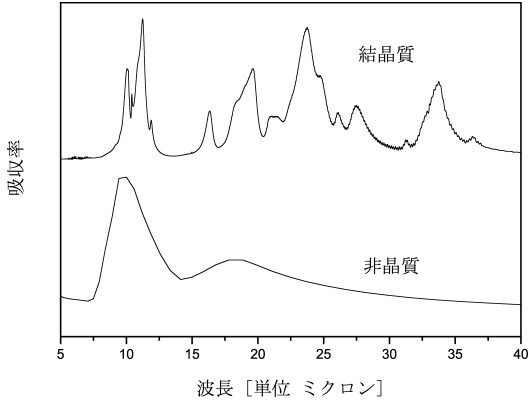


図1 結晶のケイ酸塩（フォルステライト）（上）と非晶質のケイ酸塩（下）のスペクトル例。結晶質は非晶質に比べ、多くの特徴的なフィーチャーをもっている。

外線では明るい天体にも同様の輝線または吸収のフィーチャーが観測された。さらに系外銀河でもシリケートの存在は確認され、宇宙の広範な領域にわたってその存在は確かめられている。なお、太陽系外にあるほとんどの固体はサイズとしては数ミクロン以下の小さい粒子と考えられており、これらの小さい固体粒子を宇宙塵とかダストと称している。シリケートは炭素化合物（グラファイト、SiC、PAH）等と並んで、宇宙塵の主要な構成物質となっている。

わずかな例外はあったが、1990年代半ばまでは、観測される波長10、20ミクロン帯のスペクトルは幅が広く、なだらかで非晶質に特徴的なものばかりであった。そのため太陽系外にあるシリケートは非晶質ばかりで結晶のままのシリケート（結晶質シリケート）は例外的とおもわれてきた。しかし、赤外線衛星ISO（1995-1998）がこの描像を覆した。結晶質シリケートに特徴的な鋭いフィーチャー（図1）が、濃い塵をまとったAGB星やHerbig AeBe星に対して検出され、その存在が確かめられたのである。これは画期的な発見であって、結晶の存在によって宇宙塵の性質をより詳細に探る研究の可能性が開かれた。結晶質の固

体であれば、それに伴う特有の複数のフィーチャーを同定することによって、結晶の組成は高い確度で判別できる。また結晶の示すフィーチャーはその波長位置と幅が結晶粒の形、サイズ、温度などに依存して敏感に変化する。その変化の仕方を正確に把握しておけば、物質や環境の細かい情報が精度よく推定できることになる。

ISOによる発見を契機にして、多様な結晶の光学特性を精密に導くことがより重要になっており、宇宙塵候補の多角的で精度の高い光学分析への要求が高まっている。また、既存の鉱物学に比して、宇宙鉱物学（Astromineralogy）という標語も掲げられて、関連する観測、理論、実験的研究が活性化している。以下では結晶質シリケートの光学特性導出の実験室での取り組みを述べる。また星周に存在する結晶質シリケートについてどのような性質が見えてきているかについて記してみたい。

2. 実験室でのプロセス

2.1 サンプルの用意

計測に当たっては、最初に宇宙塵の候補となる物質を選定し用意しなければならない。固体になりえる原子種は豊富にあり、それらの組み合わせを考えると候補となりえる物質種は膨大な数になるが、現在、強い興味のもてる宇宙塵候補、あるいは技術的に用意可能な宇宙塵候補となるとかなり限られてくる。固体として凝集しやすく、個数も十分にある元素の候補は、C、O、N（対水素比100 ppm以上）、Mg、Si、Fe（30 ppm）、Al、Ca、Na、Ni（3 ppm）などである。これらの元素の組み合わせからできる固体をまずは考えることになる。さらに高温ガスの冷却時にどのような鉱物が凝縮するかを予測する平行凝縮論や、隕石中の鉱物などを参照すると、先にも触れたオリビン（ $(Mg_xFe_{1-x})_2SiO_4$, $0 < x < 1$ ）やパイロキシン（ $(Mg_xFe_{1-x}SiO_3$, $0 < x < 1$ ）といったシリケートは有力な候補である。オリビンやパイロキシンは上

部マントルや始源的隕石の主要構成鉱物である。これほど有名な鉱物の光学特性などづくりに知られているはずと思われる読者もいるかもしれない。しかし、波長 100 ミクロンまでの赤外領域での光学特性が観測との比較に耐える精度で調べられたのは、やっと 90 年代になってからである。それには、分析機器の普及や性能の向上という要因も大きい。ISO による発見とそれに続く結晶質シリケートの観測が計測への強い動機となっている（なお、グラファイト、SiC、PAH などの炭素化合物、シリケート以外の酸化物なども宇宙塵候補であるが、本稿ではこれらには触れず、主に取り組んでいるシリケートについて述べる）。

地球上に自然に産するシリケート鉱物が当面のサンプルとして手にいれやすい。われわれのグループでも、オリビン、パイロキシン、ディオプサイド ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$)、プラジオクレス ($(\text{Na}_{1-x}\text{Ca}_x)(\text{Al}_{1+x}\text{Si}_{1-x})\text{Si}_2\text{O}_8$)、メリライト ($\text{Ca}_2\text{Al}_2(1-x)\text{Mg}_x\text{Si}_{1+x}\text{O}_7$)、モンモリロナイト ($\text{Al}_2\text{O}_3(\text{SiO}_2)_n\text{H}_2\text{O}$, $n \geq 1$) など自然に産するものを手に入れてそれらのスペクトル測定をしている。地球上の鉱物も宇宙固体の一部なのでこれも貴重なデータである。しかし、地球上の物質が宇宙塵を代表しているという保証はない。また、地球上の鉱物にはさまざまな微量元素が含まれており、鉱物そのものの物性を知るには適していない。さらには、それらの微量元素は高温や高圧下での固相-液層間もしくは固相間での元素分配によるものであり、固相-気相間反応で形成される宇宙塵に含まれる微量元素とは種類や存在度が異なることが予想され、測定には必ずしも適していない。したがって測りたい組成をもつ物質を高い純度で人工的に製作することも必要である。

鉱物を人工的に用意することは、結晶学関連の分野では盛んに行われている。鉱物の単結晶を製作したい場合には、チョクラルスキー法、フローティングゾーン法、融剤法、ベルヌイ法などがよく使われる。いずれも原料を加熱融解して、材料

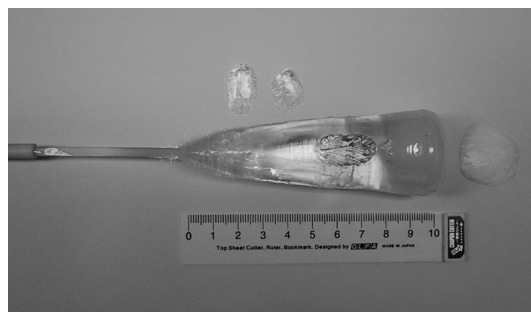


図2 チョクラルスキー法で製作したフォルステライト結晶。

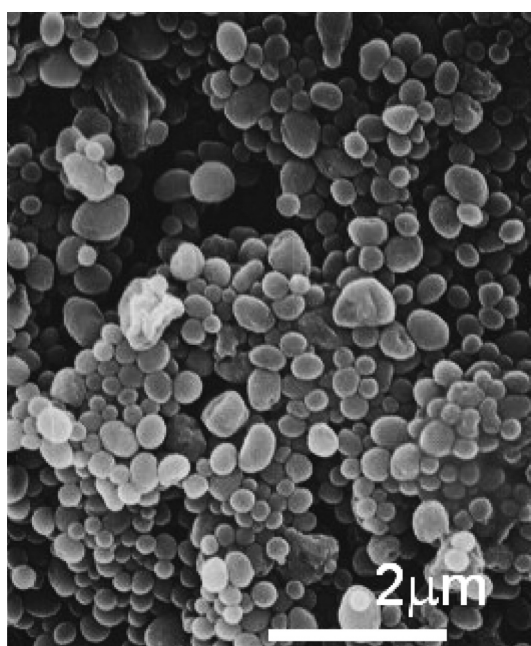


図3 噴霧からの合成で製作したフォルステライト粒の走査型電子顕微鏡写真。写真中の白棒の長さが2ミクロンに相当する。

が結晶化できる高温状態をつくりだし、適当な温度管理のもとで徐々に冷やして結晶を得る方法である。製作に当たっては結晶の成長を促すための種結晶が添付されることが多い。結晶製作の過程では、熔融温度、温度分布、冷却速度、雰囲気、溶液の流れなどの細かい制御が必要である。大きくて高品位な結晶の製作は容易ではなく、それ自体が研究課題でもある。図2はチョクラルスキー

法で製作したフォルステライト結晶 (Mg_2SiO_4 , オリビン ($\text{Mg}_x\text{Fe}_{1-x}$) $_2\text{SiO}_4$ のうち $x=1$, Mg100% のもの) である。この場合には、センチオーダーの高品質な結晶が製作できている。この結晶を使ってこれまでにはない精度の反射スペクトルをとることが可能になった^{2), 3)}, フォルステライトと並んで主要なシリケートのエンスタタイト (MgSiO_3 斜方晶系のパイロキシンで Mg100% のもの) は溶融引き上げ法で数ミリサイズの結晶が製作されている⁴⁾。ベルヌイ法を使ったものとしては、ケイ酸塩ではないが酸化物としての宇宙塵候補スピネル (MgAl_2O_4) の製作例がある⁵⁾。

粉末状の小さな結晶や、多結晶体の製作であれば溶剤や粉末状の素材を用意し、これに熱や圧力を加えて熱合成する方法がある。パイロキシン ($\text{Mg}_x\text{Fe}_{1-x}\text{SiO}_3$) とオリビン ($(\text{Mg}_x\text{Fe}_{1-x})_2\text{SiO}_4$) の多結晶体は MgO, SiO₂, FeO のパウダーをプレスした後、摂氏 1,200 度で焼き固めて製作された⁶⁾。メリライト ($\text{Ca}_2\text{Al}_2(1-x)\text{Mg}_x\text{Si}_{1+x}\text{O}_7$) 結晶も同様の方法で製作されている⁷⁾。あるいは、シリカ (SiO₂) のゾルと硝酸マグネシウム溶液 ($\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) を混ぜ合わせたうえでそれらの噴霧状態をつくり、これを摂氏 200/400/600/1,000 度の炉に順次流し入れて、サブミクロンサイズの多結晶フォルステライト粒を焼結合成した例もある⁸⁾。われわれは未経験であるがマイクロ波や高いパワーのレーザーで材料を加熱蒸発させこれを基板上に堆積させて粒状の結晶を得ることも行われている⁹⁾。これ以外にも、工業製品材料として Si, Mg, Ca, Al, Ti などの各種酸化物が市販されている。なかには宇宙塵候補と重なる組成のものもあり、それらの粒やバルク結晶を購入してサンプルとすることもできる。

いずれかの方法で用意したサンプルは、その組成や結晶状態、粒子の場合は粒の形や大きさなどを確認しておくことが望ましい。これには X 線や電子線を使ってその回折パターンやスペクトル、画像情報などからマイクロサイズでの確認が

行われる。図 3 は前記の噴霧から合成したフォルステライト粒子の電子顕微鏡写真である。サイズがサブミクロンではぼそろっていて、形が空豆状あるいは楕円体状のものになっているのが確認できる。粒子サンプルの場合は可能ならば、サイズや形のそろった粒子を用意することがのぞましい。なぜなら粒子の光学特性は一般に形やサイズにも依存するからである。しかしこれらを選別する効率的な方法がない。サイズについては、沈降法を使ってサイズをより分けることはできるが、0.2 ミクロンサイズで数 cm 沈降するのに一月オーダーもの時間がかかる。形の分布は製法に依存して決まってしまう、より分ける方法がない。形を変えたければ、いまのところ製法を工夫するしかない。さらに凝集の度合い、フラクタル度、コアマントル構造などの形態の制御まで考えるとほとんどお手上げである。このあたりは製法技術の今後の課題である。

2.2 光学特性の測定

このようにして用意したサンプルを、主に赤外線領域で分光測定し光学特性を導く。粒子の場合は吸収率 (透過率) を、バルク結晶の場合は反射率を計測する。われわれのグループでは通常は 1.4–100 ミクロンの波長範囲 (波数範囲では 7,000–100 cm^{-1}) をフーリエ分光器によって測定している。赤外線の検出素子には三硫化グリシン (TGS) を用いる。必要ならば、ボロメーター検出器を使って波長 500 ミクロン (波数 20 cm^{-1}) までの計測も可能である。波数分解能は最高で 0.125 cm^{-1} である。吸収率からは吸収断面積や熱放射の効率が、反射率からは誘電率がそれぞれ導かれ、観測スペクトルを解釈する際の参照データとなる。

2.2.1 粒子の吸収率 (透過率) 測定

吸収測定の場合、1 個の粒子だけでは吸収量が小さすぎて計測できない。したがって、かなりの量 (数 mg から 10 mg) の粒子をペレット中に混入させて、適度な吸収量にしておいて吸収スペク

トルを測る必要がある。ペレット材料としては臭化カリウム (KBr, 1ペレットあたり重量 1,000–1,500 mg) あるいはポリエチレン (600–1,000 mg) を使う。KBr は波長 25 ミクロンより短い波長での計測に、ポリエチレンは波長 15 ミクロンより長波長での計測に使う。ペレットを製作するには、まず KBr 粒あるいはポリエチレン粒と計測したい粒子を乳鉢内で攪拌し一様になるまで混ぜる。1個のシリケート粒子はミクロン以下の小さなものなのでお互いにくっついて凝集しやすく、その結果大きな固まりを形成しやすく、粒子の凝集をふせいで一様に分散させることが肝心である。これに失敗すると、凝集したサイズの大きな粒子群の透過スペクトルを測ることになるが、これは粒子1個がもっている透過率と一般には異なる。また光の波長が粒子サイズに近づくと、吸収ばかりでなく散乱も大きくなり、吸収率を測っているとはいえなくなる。よく分散させることが、信頼できる吸収スペクトルを得るための肝心な点である。混ぜ合わさったあとは KBr であれば 8 トンの圧力をかけて直径 13 mm の円盤状のペレットにする。ポリエチレンの場合は摂氏 130 度 (低密度ポリエチレン) から 150 度 (高密度ポリエチレン) で加熱し円盤状に整形し、厚さ数ミリに押しつぶしてから冷却してペレットにする。これらペレットに対する吸収スペクトルから粒子の単位質量当たりの吸収断面積がだせる。物質の吸収の効率は放射の効率でもある (熱平衡にある場合) ので、観測される放射スペクトルと直接比較することができる。フォルステライト粒子の吸収スペクトルの測定例を図4に示す。なお、ヘリウム冷凍機の普及で低温環境をもつ測定モジュールを構築するのが容易になり、われわれのグループでも冷凍機付きのクライオスタットを用意し、サンプルの低温下での測定も行って、スペクトルの温度依存性を調べている。

2.2.2 バルク結晶の反射率の測定

誘電体の場合、反射率はその物質の誘電率 (あ

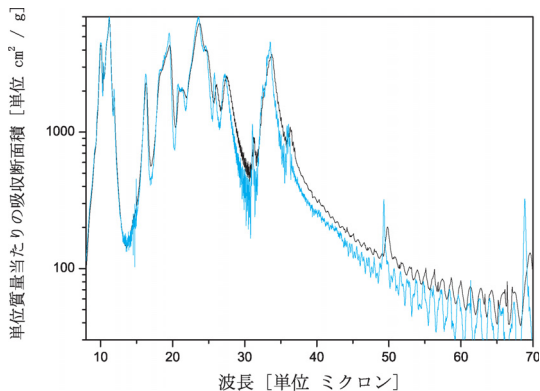


図4 フォルステライト粒子の吸収スペクトルの測定例。縦軸の単位は単位質量当たりの吸収断面積。横軸はミクロン単位の波長。温度が 295 K (黒線) と 50 K (青線) の場合を示した。波長 40 ミクロンから長波長でスペクトルが細かく波打っているのはポリエチレンペレット表面での光反射によって起こった干渉効果。

るいは屈折率) で決まっている。誘電率に対してはローレンツによる振動モデルがよくあてはまるので、反射率の計測から振動モデルを仮定して、誘電率を求めることができる^{2), 3), 10)}。誘電率が得られれば、形やサイズをパラメータとしてこの誘電率をもつ粒子の散乱、吸収、放射のスペクトルが計算できる。星周の塵による輻射輸送を解くためには誘電率は欠かせない量であり、これを押さえておくことは重要である。

フォルステライト結晶の反射率測定例を図5に示す。結晶は結晶軸ごとに誘電率が異なることが一般である。したがって、結晶軸方向に偏光した光をあててそれぞれの結晶軸ごとに誘電率を導く必要がある。反射計測の場合も吸収測定と同様のシステムを使って低温での測定が可能である。

フォルステライトの場合は 2.1 で記したようにセンチオーダーのものが合成できた。しかしこれほど大きな結晶のできることは少なく、せいぜい 1 ミリといったところが結晶サイズの相場である。そのような小さいサンプルの場合は顕微分光が使用される。顕微鏡とフーリエ分光器を組み合

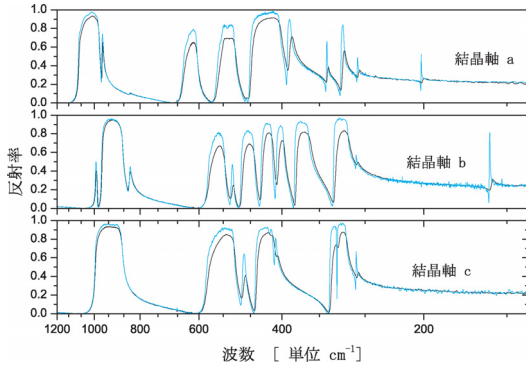


図5 フォルステライト粒子の反射スペクトルの測定例。結晶の三つの軸(上から a, b, c 軸)に対応する反射率が示してある。温度が 295 K (黒線) と 50 K (青線) の場合。横軸は波数で、1,000 cm⁻¹ は波長で 10 ミクロン、100 cm⁻¹ は波長で 100 ミクロンに相当する。

わせ、ビームを 100 ミクロンの大きさに絞ってサンプルにあてて計測する。しかし、市販の光学仕様では波長 20 ミクロンまでしか計測ができない。また長波長側ではビーム強度も落ちる。ミリオーダーあるいはそれ以下のような小さいサンプルに対する長波長での反射計測は、放射光施設で得られるような強度と干渉性の高い特別のビームが必要になってくる。日本には放射光施設として **SPRING 8** がある。ここは主には X 線計測の施設であるが、赤外の計測ポートもあり宇宙塵の計測に使われ始めている。

3. 観測される結晶質シリケートの特徴

ISO 以来の観測で、太陽系外では AGB 星、惑星状星雲などの主系列を離れた天体の周囲と、Herbig AeBe 星、T Tau 型星などの若い天体周りで結晶質シリケートの探索が行われてきた。これらの天体であっても、結晶のフィーチャーが受かる天体は塵を多く伴う環境に限られている。また、結晶フィーチャーが受かる天体であっても、伴っている塵全体で見れば、結晶質より非晶質の塵のほうが量は多い (IRAS 09425-6040 は例外か

もしれない¹¹⁾)。さらに希薄な星間空間には結晶フィーチャーはいまのところ全く見いだされていない¹²⁾。宇宙にある、ほとんどの塵はやはり非晶質で存在していると思われ、結晶は量としては依然マイナーな存在だと思われている。量としてはマイナーではあるが、伝えてくれる情報は豊富にある。以下ではこれまでの観測で得られた結晶質シリケートの性質で、われわれの実験室測定にかかわりのある部分について列挙してみる。

3.1 組成

これまでの観測ではオリビン ((Mg_xFe_{1-x})₂SiO₄) とパイロキシン (Mg_xFe_{1-x}SiO₃) によるフィーチャーが際だってよく検出されている。このような組成の結晶が主要なものであることは元素数の多寡や平衡凝縮理論からいっても納得できるものである。しかもこれらのうちの鉄の入っていない Mg100% のもの、すなわちフォルステライト (Mg₂SiO₄) とエンスタタイト (MgSiO₃) が観測をよく再現する。ここでは、典型的な例として図 6 に AFGL4106 (赤色巨星) と NGC6302 (惑星状星雲) の ISO による赤外スペクトルを示した (非晶質固体からの放射は除いてある)。同じ図にはわれわれのグループが吸収測定で得た、フォルステライト粒とエンスタタイト粒の 100 K でのスペクトル (吸収係数に 100 K の黒体輻射を乗じたもの) を比較に示してある。AFGL4106, NGC6302 の両方に波長 33.6 ミクロンに強い輝線が見えているがこれはフォルステライトによるもので、実験室での測定でもここに強い吸収フィーチャー、あるいは反射フィーチャーが認められる。また波長 40-45 ミクロンにも強いフィーチャーが見えているが、これはエンスタタイトによるフィーチャーとよい一致を示す。それ以外にも、波長 19.5, 23.6, 27.6, 69 ミクロンにあるフィーチャーがフォルステライトと、また波長 19.5, 20.7, 21.6, 27.9, 30.5 ミクロンにあるフィーチャーがエンスタタイトとよい一致を示している。Molster の論文¹³⁾⁻¹⁵⁾には 17 個の AGB や惑星

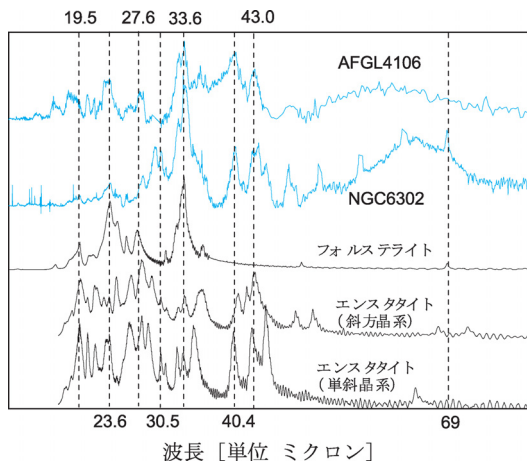


図6 AFGL4106 (赤色巨星) と NGC6302 (惑星状星雲) の ISO によるスペクトル (非晶質固体からの放射は除いてある). 実験室でのフォルステライトとエンスタタイトの 100K でのスペクトル (吸収係数に 100 K の黒体輻射を乗じたもの) を比較に示してある. エンスタタイトでは斜方晶形 (ortho) と単斜晶形 (clino) の異なる晶形のスペクトルが示してある.

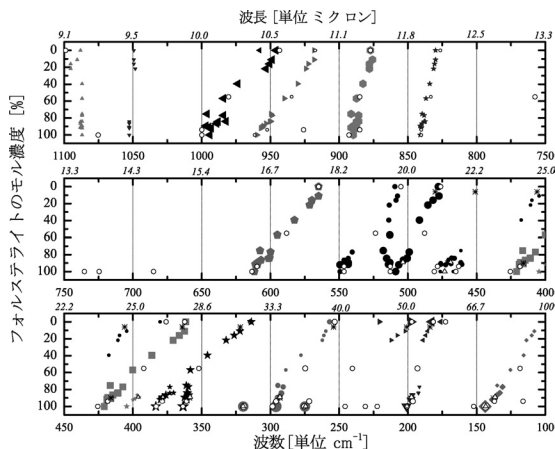


図7 オリビンの各フィーチャーのピーク位置と鉄の割合の関係をプロットした図¹⁶⁾. 横軸はフィーチャーのピークの位置を波数 (cm⁻¹) あるいは波長 (ミクロン) で表す. 縦軸はオリビン中の Mg の割合 (% 値). 100% のときがフォルステライトに相当する. 鉄の割合 (100% から Mg の割合を引いた値) が増えるにつれてフィーチャーのピーク位置は低波数 (長波長) ヘシフトする.

状星雲天体に対する ISO 分光観測の報告がある. この論文では ISO 観測結果として 8 から 90 ミクロンの間でこまかいものも含めて全部で 55 本のフィーチャーを塵起源としてリストし, そのうちの 19 本はフォルステライトまたはエンスタタイトによるものと同定し, さらに別の 10 本もフォルステライトまたはエンスタタイトによるもので説明可能としている. 残りの 26 本については, SiO₂, ディオプサイド, 水の氷などが候補にあがっているが, フォルステライトやエンスタタイトほど確定はしていない.

観測される結晶性シリケートのフィーチャーは Fe が欠乏している組成の場合のスペクトルとよく一致する. フォルステライトやエンスタタイトに鉄が混ざってくるとフィーチャーのピーク波長は長い波長にシフトしていき, フィーチャーのピーク強度は弱まる. フィーチャーのピーク位置のシフト量は含まれる鉄の割合にほぼ比例してお

り, フォルステライトについての定量的関係を調べた結果が図7である¹⁶⁾. 例えば波長 69 ミクロンにあるフィーチャーの場合, 鉄が 5% 混入 (このとき Mg は 95%) するとピーク波長は波長 72 ミクロンに移動することになる. 温度による変化を考えてもこのような波長位置は観測と 1 ミクロン以上ずれている. また波長 20-40 ミクロンにあるフィーチャーのピーク位置も鉄が入ってくると長波長へずれて観測とは合わなくなる. エンスタタイトについても, 鉄が混じってくると波長 40-45 ミクロンにあるフィーチャーは長波長へ移動し, かつなまってしまい, これも観測と合わない⁶⁾. したがって鉄は結晶質シリケートの中には全く入っていないか, 入っているとしてもごくわずかでしかない.

鉄は豊富に存在する元素なので結晶中に紛れ込んでもよさそうであるが, なぜ鉄の欠乏した結晶がうかるのだろう. 太陽系組成ガスが平衡凝縮し

た場合を考えると、塵の形成が 500 K 以上の高温で起こっていれば、鉄は金属鉄として存在しシリケートに入らないとされている¹⁷⁾ (また金属鉄は赤外観測では同定ができない)。しかし、実際は平衡凝縮ではなく過冷却の気相から凝縮は起こる。過冷却を考慮した核形成論では鉄は酸化鉄となりシリケートに入り込むことが予想される¹⁸⁾。これだと観測と一致しないが、鉄が結晶に取り込まれるとそこで結晶格子が乱されて非晶質になってしまう可能性が指摘されている¹⁹⁾。また核形成論でも、塵が通常より高いガス圧のもとで形成されると、鉄は金属鉄もしくは硫化鉄となってシリケートには入らないとされている¹⁸⁾。以上のような理論的な指摘はあるが、鉄が排除される具体的なプロセスはまだわかっていないのが現状である。またシリケート中の鉄の割合は完全に 0 なのか、あるいは微量には入っている可能性があるのかについての実験的な探索は茅原によりなされつつある²⁰⁾。

Herbig AeBe, T Tau 型星などの若い星の周囲でも結晶質シリケートはフォルステライトとエンスタタイトで説明できている^{21), 22)}。ただしすばる望遠鏡によるベガ型星 HD145263 の観測では、波長 11.44 ミクロンフィーチャーの存在から、鉄の豊富に入ったオリビンの存在が示唆されている²³⁾。ベガ型星の段階まで時間を経ると、塵の集積による衝突、微惑星の形成および微惑星上での熱や水による変成といったさまざまな過程の結果、鉄の結晶質シリケートへの混入が起こりうるのかもしれない。

いまのところはフォルステライト、エンスタタイトが星周での主要な結晶質シリケートと考えてよいだろう。これら以外には Ca 豊富なシリケートであるディオプサイド ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$) の存在が示唆されている。図 6 で AFGL4106 と NG 6302 には 60 ミクロン近傍に広いフィーチャーが見えているが、これと波長の一致するところにディオプサイドのフィーチャーが存在し、氷 (水) の

フィーチャーと合わせると観測フィーチャーをおよそ再現できるのである。しかし、例えばメリライト ($\text{Ca}_2\text{Al}_2(1-x)\text{Mg}_x\text{Si}_{1+x}\text{O}_7$, $x=0.4$) も 60 ミクロンフィーチャーを再現できる候補であり⁷⁾、確かな同定には至っていない。また 26, 40 ミクロンフィーチャーの一致からプラジオクレイス ($(\text{Na}_{1-x}\text{Ca}_x)(\text{Al}_{1+x}\text{Si}_{1-x})\text{Si}_2\text{O}_8$, $x=0.964$) の存在が示唆された例 (postAGB 星 IRAS 16279-4757) がある^{24), 25)}。

なお、エンスタタイトには斜方晶系 (ortho) と単斜晶系 (clino) の異なる結晶系が存在し、この 2 種類の赤外スペクトルはわずかに異なる (図 6)。Molster の前記の論文では斜方エンスタタイトと単斜エンスタタイトはほぼ同じ量か、斜方エンスタタイトのほうがいくぶん多い割合で星周に存在していると推定している。単斜エンスタタイトは 1,270 K 以上で安定なプロトエンスタタイト (オルソ相とは異なる斜方晶系) からの急冷によってつくられ、斜方エンスタタイトは 1,270 K 以下の温度もしくは徐冷が必要であり、それぞれ生成されるとき温度プロセスが異なる。単斜と斜方の両方の晶形が存在することは結晶の生成場所や生成ルートが一通りではないことを示唆している。

3.2 サイズと形

結晶粒のスペクトルは組成ばかりではなく、サイズ、形にも依存する。塵のサイズが大きくなると、フィーチャーの形状はより緩やかに広がったものになるし、ピークの強度は落ちる。したがってサイズがあまり大きくなると、結晶であってもフィーチャーが鈍ってしまい、観測結果を再現しない^{26), 27)}。また、サイズが大きくなって塵が太ると、それだけ塵の個数が減ってしまい、観測にかかるほどの数がなくなってしまうことにもなる。Min による計算²⁶⁾によれば、明らかな結晶フィーチャーがある場合は、結晶サイズは 10 ミクロンより小さい必要がある。前節の Molster の論文¹⁵⁾ ではわれわれのサブミクロンサイズ粒子の吸収測

定結果を使って、AGB星や惑星状星雲の結晶フィーチャーをフィットできている。したがって、これらに付随する塵の平均的なサイズは1ミクロン以下であろう。また Herbig AeBe と T Tau 型星で見つかる結晶質シリケートについては、10ミクロン帯のフィーチャーを0.1ミクロンと1.5ミクロンの2種類のサイズに代表させてフィットすることが可能である^{21), 22)}。これらの天体については平均サイズはやや大きく0.1ミクロンから数ミクロンの幅をもっているであろう。星周円盤の年齢が進むとともに結晶サイズが大きくなる傾向も示唆されている^{21), 28)}。

形については、その取りえる自由度が大きく、また正確なスペクトル計算ができる粒子の形が限られており、特定するのが難しい対象である。それでも大雑把な制限はつけられる。もし結晶質シリケートの形が単純な球とすると、波長10-40ミクロンでの予想されるスペクトルは非常に細く鋭いものになる。観測データにはそれほど細いフィーチャーは見つかっていない。したがって結晶粒子の形はきれいな球形ではないはずである。一方、いろいろな軸比をもつ楕円体形状を一様に分布させたモデル(CDEモデル)は、計算が容易なことであってよく引き合いにだされるが、これは実験室での吸収スペクトルも観測結果も比較的良好に再現する。したがって、第0近似的には、形状はさまざまな軸比の楕円形の集まりと思ってそんなにはずれてはいないだろう。しかし、結晶であるからには楕円のような丸っこい形より、角張った形状のほうが自然である。惑星間塵の中に見られるフォスフェイトやエンスタタイトは角張ったもの、針状に伸びたものが見られる²⁹⁾。星周の結晶にも角張った形の結晶質シリケートが予想されるが、まだ観測的な実証には至っていない。

より細かい話をすると、波長9-13ミクロン帯のシリケートのスペクトルには11.3ミクロンにしばしば小さなピークあるいは肩が見られる。こ

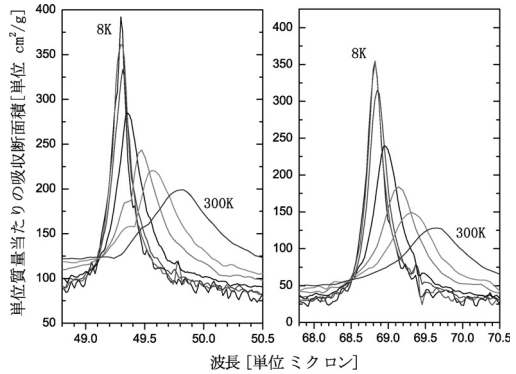


図8 フォスフェイトの49ミクロンと69ミクロンフィーチャー(吸収スペクトル)の温度による変化の様子。各線の温度は300, 200, 150, 100, 50, 20, 8 [K] に対応する。温度が下がるにつれて、フィーチャーのピーク波長が短い波長へ移動し、ピーク強度は上がり、フィーチャー幅は狭くなる。

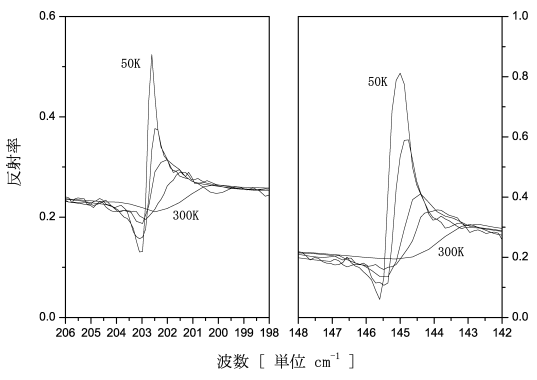


図9 フォスフェイトの49ミクロンフィーチャー(波数ではおよそ200 cm⁻¹)と69ミクロンフィーチャー(波数ではおよそ145 cm⁻¹)の反射スペクトルの温度による変化の様子。横軸は波数、縦軸は反射率。各線は300, 200, 150, 100, 50 [K] の温度での反射率。低温になるにつれて反射率は大きく増加する。

れはフォスフェイト結晶によるものと考えられ、CDEの形分布でもこのピークは再現できる。しかし、がく座β星の中心近傍でフォスフェイトがフレッシュに生成されていると思われる現場ではこのピークが11.3ミクロンではなくて短い

ほうへずれて 11.1 ミクロン辺りに見えている³⁰⁾。このずれは、フォスフェライト粒が特定の形をとっていると仮定すると説明できる。フォスフェライトの反射スペクトルを見るとわかるように、結晶の *c* 軸には 900 cm^{-1} より少し高い波数に強い振動がある。この振動を卓越させ、*a, b* 軸からの振動の寄与を弱めると、輝線ピークを 11.1 ミクロンにもってこることができる。ピークが 11.1 ミクロンにでるのは、*c* 軸方向の放射効率が卓越しているためであり、それはつまりフォスフェライトの形が結晶の *c* 軸に沿って伸びた形をしているという解釈がなりたつ。ガスからのフォスフェライトの凝縮実験でも *c* 軸に伸びた形のものできやすいという結果がある³¹⁾。星周でもできたてのフォスフェライトは特定の軸方向に伸びた形になっているのではないかと考えられる。

3.3 温度

結晶のフィーチャーは温度依存性を示し、300 K 以下の低温では、長波長にあるフィーチャーほど温度による変化が大きい。これまで同定された結晶質シリケートのフィーチャーでは、フォスフェライトの 69 ミクロンフィーチャーが最も温度に敏感である。その 69 ミクロンフィーチャーの温度変化について、吸収スペクトルの場合を図 8 に、相当する振動の反射スペクトルを図 9 に示した。いずれも温度によって大きく変化し、温度が下がるにつれて、ピーク波長（波数）の位置は短い（大きい）ほうへシフトし、幅は細くなり、ピーク強度が増えている。

この結果からフィーチャーのピーク波長と半値幅を各温度に対してプロットすると図 10 に示したような相関を示す（温度が上がるにつれてプロットされる点は図の左下から右上への移動する）。ここで、反射スペクトルからの予想には結晶粒の形が CDE の場合をとってある。また、図 10 には ISO による 10 天体の観測結果（十字印）を重ねてある。ISO の結果は実験室からの値と完全には一致しないが、誤差を考慮した範囲では傾向

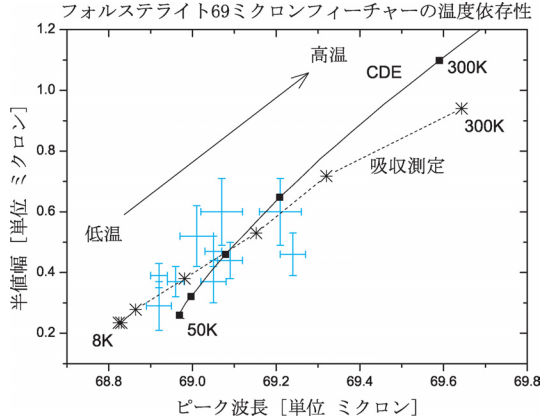


図 10 フォスフェライトの 69 ミクロンフィーチャーのピーク波長と半値幅のプロット。温度によってピーク波長と半値幅は変化し、温度が低ければ左下に、温度が高いと右上にプロットされる。ISO で観測された天体を十字印（十字線の縦横の長さは測定誤差の大きさ）、実験室の微粒子の吸収測定から得られた結果を星印（300 K, 200 K, 150 K, 100 K, 50 K, 20 K, 8 K での測定点）で示す。反射計測で得られた誘電率を使って粒の形分布を CDE としたときの場合が CDE とラベルした線で示してあり、四角印は 300, 200, 150, 100, 50 [K] での値である。

表 1 69 ミクロンフィーチャーが検出された天体に付随する塵の温度。T_{abs} は吸収スペクトルからの、T_{cde} は反射スペクトルから CDE モデルを仮定しての結晶質シリケート（フォスフェライト）の推定温度。最後の列の T_{am} は波長 50–190 ミクロンの連続光スペクトルから推定した非晶質塵の温度。

天体名	ピーク波長 [μm]	T _{abs} [K]	T _{cde} [K]	T _{am} [K]
NGC6537	68.92	74	< 50	39
IRAS16342	68.92	74	< 50	67
NGC6302	68.96	91	< 78	52
OH26.5+0.6	69.01	108	108	58
CPD-568032	69.05	120	126	70
AFGL5379	69.05	120	126	85
HD44179	69.07	126	135	72
HD101584	69.09	132	144	64
HD100546	69.21	167	193	62
MWC922	69.24	176	203	54

はよく合致している。

ピーク波長の実験結果と ISO 観測結果の比較から、結晶質シリケートの温度を算定すると、表 1 のようになる。推定される結晶の温度は 70 K から 200 K の範囲となっている。これらの値は波長 50–190 ミクロンでの連続光スペクトルの黒体フィットから推定される温度³²⁾よりだいたい数十 K から 150 K ほど高い温度になっている。連続光成分は非晶質の塵による放射と考えられるので、結晶質シリケートは中心星に近い場所にあるか、あるいは星周円盤の表面近くを中心星からの光の届きやすい場所にあつて、非晶質の塵より暖かい場所に局在していると思われる。結晶が高温の限られた場所でしか形成されないことを反映した結果かもしれない。一方、非晶質の塵は星周囲のより広い領域に分散して存在し、その平均温度はより低くなっていると解釈することができる。

フォルステライトの 49 ミクロンにあるフィーチャーも孤立していて温度変化が大きいので、温度のよい指標になりうる (図 8, 図 9)。ISO では検出はできているようだが、残念ながら詳しい分析ができるほどの感度では受からなかった。フォルステライトの波長 69, 49 ミクロンフィーチャーのピーク位置と幅は温度推定の貴重な指標である。将来の赤外線観測衛星にはこれらのフィーチャーの正確な形状が検出できる高い波長分解能が望まれる。

4. 展 望

赤外線衛星 ISO の観測によって太陽系外にやっと結晶質シリケートが検出された。発見が可能になった理由としては、それまでにない広い波長領域で分光測定が行われたことが大きい。波長 10 ミクロン帯や 20 ミクロン帯だけで見ている、とくに温度の低い結晶塵のフィーチャーは非晶質の放射に覆い隠されて見えにくい。波長 100 ミクロンまでの長い波長に豊富に存在するフィーチャーを捕らえることが結晶の観測には重要であ

る。また結晶フィーチャーの温度、形状に依存する変化を捕らえるには高い波長分解能も必要である。今後の赤外線衛星には ISO を踏まえ、それを越える観測仕様を期待したい。

ISO による結晶フィーチャーの発見を受けて宇宙塵のための実験室測定は活気づいた。現在は Spitzer 衛星や日本の赤外線衛星あかりが宇宙塵の新たな結果を出しつつある。また Stardust による彗星塵の回収も成功し、詳細な分析が始まったが、これも宇宙塵のモデルに新たな枠組みを提供するであろう。将来には SPICA 等の各種大型赤外線衛星もひかえている。宇宙塵あるいは宇宙鉱物の研究がどう展開していくのか、今後も楽しみである。

参 考 文 献

- 1) 理科年表: 国立天文台編 2006 年版, p. 625
- 2) Sogawa H., et al., 2006, A&A 451, 357
- 3) Suto H., et al., 2006 MNRAS 370, 1599
- 4) Tanaka T., Takei H., 1997, J. Crystl. Growth 180, 206
- 5) Chihara H., et al., 2000, ASP Conf. 219, 150
- 6) Chihara H. et al., 2002, A&A 391, 267
- 7) Chihara H., et al., 2003, Grain Formation Work Shop, p. 31
- 8) Suto H., et al., 2002, NASA Laboratory Workshop, p. 94
- 9) Colangeri L., et al., 2003, A&AR. 11, 97
- 10) Suto H., et al., 2002, A&A 389, 568
- 11) Molster F. J., et al., 2001, A&A 366, 923
- 12) Kemper F., et al., 2004, ApJ 609, 826
- 13) Molster F. J., et al., 2002, A&A 382, 184
- 14) Molster F. J., et al., 2002, A&A 382, 222
- 15) Molster F. J., et al., 2002, A&A 382, 241
- 16) Koike C., et al., 2003, A&A 399, 1101
- 17) Larimer J. W., 1979, Ap&SS 65, 351
- 18) Hasegawa H., Kozasa T., 1988, Prog. Theor. Phys. Suppl. 96, 107
- 19) Tielens A. G. G. M., et al., 1997, Ap&SS 255, 415
- 20) 茅原ほか, 2006, 日本惑星学会誌 15(2), 44
- 21) 本田充彦, 2005, 東京大学博士論文
- 22) van Boekel R., et al., 2005, A&A 437, 189
- 23) Honda M., et al., 2004 ApJ 610, L49
- 24) Matsuura M., et al., 2004, ApJ 604, 791
- 25) Chihara H., et al., 2004, Proc. of Dusty and Molecular

Universe, p. 351

- 26) Min M., et al., 2004, A&A 413, L35
- 27) Bohren C. F., Huffman D. R., 1983, Absorption and Scattering of Small Particles, John Wiley and Sons
- 28) Jura M., et al., 2004, ApJS 154, 453
- 29) Bradley J., 2003, Astromineralogy, Th. Henning, Ed., Lecture Notes in Physics, Springer
- 30) Okamoto Y. K., et al., 2004, Nature 431, 660
- 31) Tsuchiyama A., 1998, Mineral. J. 20(2), 59
- 32) Bowey J. E., et al., 2002, MNRAS 331, L1

Crystalline Silicates in Space

Hiroshi SUTO,¹ Chiyoë KOIKE,² Hiroki CHIHARA,^{2,3} Hisato SOGAWA,² and Shogo TACHIBANA⁴

¹ *NAOJ, Osawa 2-21-1, Mitaka, Tokyo 181-0015, Japan*

² *Kyoto Pharmaceutical University, Shichono-cho 1, Yamashina, Kyoto 607-8412, Japan*

³ *Department of Earth and Space Science, Osaka University, Machikaneyama-cho 1-1, Toyonaka, Osaka 560-0043, Japan*

⁴ *Department of Earth and Space Science, University of Tokyo, Hongo 7-3-1, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan*

Abstract: Crystalline silicates have been the focus of dust researchers interests since their discovery by ISO toward the dusty circumstellar regions around evolved and young stars. Crystalline dust allows us to draw a detail picture of cosmic dust through their specific vibration features in the infrared region. The optical character of crystalline silicates should thus be understood well in order to bring fruitful results from the astronomical observations. We present our laboratory work, which aims to reveal the optical character of cosmic silicates, and describe the nature of crystalline silicates so far seen in space.