

平成21年 5月 25日現在

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2007～2008

課題番号：19540247

研究課題名（和文） 珪酸塩結晶の赤外光学特性の研究

研究課題名（英文） Infrared property of crystalline silicates

研究代表者

周藤 浩士 (SUTO HIROSHI)

国立天文台・光赤外研究部・助教

研究者番号：50300710

研究成果の概要：宇宙固体として興味のある珪酸塩固体結晶の高精度赤外反射スペクトルをオルソエンスタタイト ( $\text{MgSiO}_3$ ) とオリビン ( $[\text{Mg}_{92}\text{Fe}_8]\text{}_2\text{SiO}_4$ ) について、波長 5 ミクロンから 100 ミクロンの反射スペクトルを絶対温度 50K の低温から常温 300K の範囲で取得し、これらについての信頼性の高い誘電率を与えた。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：光学赤外線天文学

## 1. 研究開始当初の背景

1990年代の後半にISO赤外線衛星によるスペクトル観測で固体微粒子を多く伴う星周に結晶性シリケートの存在がはじめて確認された。それまでは非晶質の微粒子の存在しか確認できていなかったが、結晶質の粒子の存在は非晶質粒子からは得られない情報を多くもっており、粒子の形成、星の進化に伴う質量放出について新たな知見が得られることが期待され、大型の地上望遠鏡を含めた観測が活発におこなわれるようになった。一方で、観測結果を解釈するための粒子の光学的な基本データが不十分であることも認識され、天文上興味ある結晶固体の分光学的分析がもとめられた。特に赤外線観測との比較か

ら、赤外線波長域での光学特性をより詳しく精密に知る必要性が生じた。

## 2. 研究の目的

シリケート類の結晶固体は波長9ミクロンから長波長側に複数の振動バンドをもっており、多くの場合これらは輝線フィーチャーとして観測される。このフィーチャーの出現する波長や形は、固体の組成、温度、形状などに依存して変化する。したがって、物性とスペクトルの対応を正確に導くことができれば、観測されるフィーチャーから星周に存在する微粒子についての物性を精度良く推定することができるはずである。赤外波長域における誘電体結晶のこのよう

な光学的性質は、より基本的な物理量である誘電率（あるいは屈折率）で決まっていると考えられる。従って、誘電率を正しく定量化することが、観測結果の解釈にとって重要である。星周に存在すると考えられるオリビン等のシリケート物質について、誘電率をもとめることが本研究の具体的目的であった。また観測されている結晶固体は 100K 前後の低温で存在すると考えられるので、常温だけでなく、低温下での誘電率を求めることも課題とした。

### 3. 研究の方法

誘電体結晶の反射率スペクトルは振動子モデルによる誘電率で精度良く再現できることが知られており、また逆に、反射スペクトルを求めることによって、振動子モデルによる誘電率が求まる。本研究ではこの事実に沿って、結晶の反射スペクトルをもとめることで誘電率を導出する方法を採用した。

計測したい固体の一つである、エンスタタイト単結晶は得られるサンプルサイズがミリサイズと小さく、計測の精度を上げるためには輝度の高い光源が必要であった。また、測定が低温下でも可能ならなかつた。これらの要請から放射光施設 SPring8 に設置されている、低温測定可能な赤外分光計測ポートを利用することとした。ここでは分光光学系にフーリエタイプの干渉系が使用可能で、広い波長帯にわたる高い波長分解での測定が可能であり、フィーチャーの出現波長の温度による微妙な変化を捉えることができる。またこのポートでは、光源の発光点から最終の検出器まで光路は完全に真空下におかれており、大気中に存在する水蒸気と二酸化炭素の吸収の影響を排除した計測ができることも大きな利点であった。

この赤外ポートに備え付けてあるサンプルステージは大型の冷凍機ヘッドと直結しており、サンプルの移動にあたって位置精度の再現性が不十分なため、計測の再現性も十分ではなかつた。そのため、国立天文台で用意したサンプルステージを持ち込み、計測時の位置設定精度を高めることで、それ以前には 10% 近くあった誤差を 1% 以下におさえた計測を可能とした。

計測の波長範囲はほぼ 5 ミクロンから 100 ミクロンに渡っておこない、温度範囲は絶対温度 50K から常温 300K までの範囲を 50K のステップで、最小波数分解能は 0.1 [1/cm] で計測が達成された。

### 4. 研究成果

オルソエンスタタイト (MgSiO<sub>3</sub>) とオリビン ([Mg92%Fe8%]2SiO<sub>4</sub>) についての誘電率を波長 5 ミクロンから 100 ミクロンの範囲で、絶対温度 50 K から常温にわたって取得できた。このデータから振動子モデルのパラメーターを決定することで誘電率を導出できた。反射スペクトル例として、オルソエンスタタイトの C 軸、オリビンの B 軸について図 1-1, 1-2 にそれぞれ示す。図で赤、緑、青の各線は温度 300K, 200K, 100K に対応し、温度によるスペクトル変化が捉えられている。

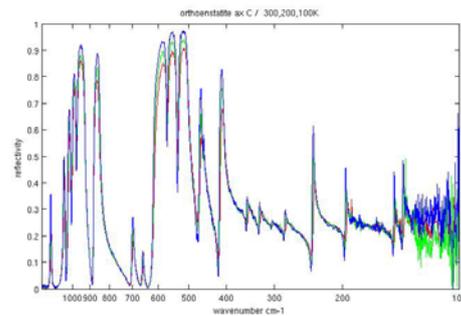


図 1-1  
オルソエンスタタイト C 軸の反射スペクトル

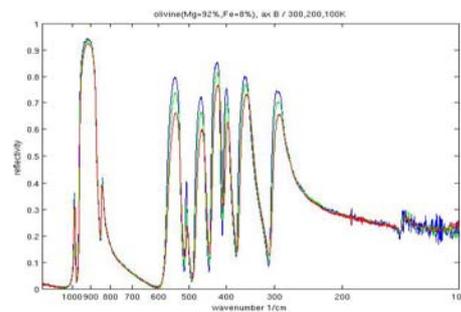


図 1-2  
オリビン B 軸の反射スペクトル

我々の基本データをもとにして得られる結論、推定の主なものを以下に示す。

「エンスタタイトによる 40 ミクロン帯フィーチャー」  
ISO 赤外線衛星の観測結果で 40 ミクロン帯に輝線フィーチャーが捉えられており、これが何に由来するのかという問題がある。図 2 に天体 NGC6302 の観測例 (図中青線) を示した。図中の黒線はわれわれのオルソエンスタタイトから予想される輝線フィーチャーでありこれ単独では観測結果を再現できない。これは温度を振っても同様であることがわかる。一方われわれが別途計測したクリノエ

ンスタタイトによる輝線フィーチャーの予想は図中の空色と緑の線である。これをオルソエンスタタイトのフィーチャーの和をとると図中の赤線となりオルソ、クリノの単独の場合よりも高い再現性が得られる。したがって観測された40ミクロン帯のフィーチャーはオルソとクリノの混合したエンスタタイトによるものという強い証左がえられた。

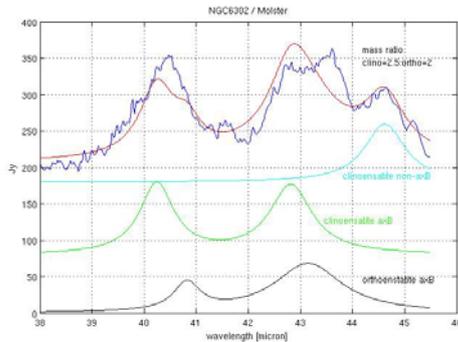


図2  
40ミクロン帯観測スペクトルとエンスタタイトフィーチャーによる再現性

「10ミクロン帯フィーチャー」

10ミクロン帯は活発に観測され様々なフィーチャーが検出されているが、スペクトル形状の特徴として、左上がりのフィーチャーと右上がりのフィーチャーが得られている。例を図3に示した、これらは星周円盤に付随するフィーチャーであると考えられる。例に示したHD45677の左あがりのフィーチャーは、エンスタタイトのa, b, c軸による輝線フィーチャーを4:9:6の割合で混ぜ、さらに非晶質の石英とパイロキシンのフィーチャーを合わせると再現される。右上がりのフィーチャーを持つACHerについては、フォルステライト由来と考えられるフィーチャーが卓越しエンスタタイトの寄与はc軸によるものがフォルステライトの約1/3ほどありこれに非晶質のパイロキシンの寄与があればよく再現されることがわかる。このような軸による寄与を精度良く議論できるのは結晶軸毎の誘電率がわれわれの測定によって正確にもとまっているからである。エンスタタイトとフォルステライトは同じSi-O-Mgの混合系であるが、アニール実験によって混合系はエンスタタイトからフォルステライトへと組成変化を起こすことが知られており、またエンスタタイトは成長を起こすとa, b軸にくらべてc軸が卓越してくることから、フィーチャー形状の差は固体粒子の円盤内部での熱的な遍歴を反映していると解釈できる。

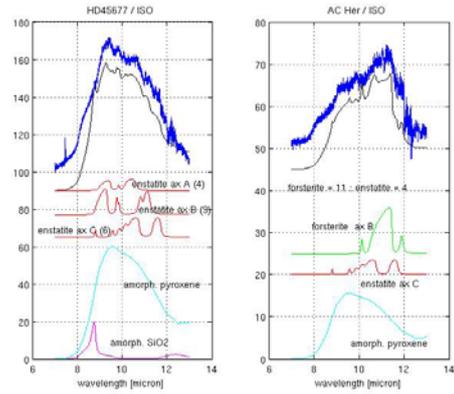


図3  
10ミクロン帯観測フィーチャーとエンスタタイト他による再現

「50ミクロン帯フィーチャー」

50ミクロン帯には確定した観測結果はまだえられていないが、オルソエンスタタイトによるダブルピークを特徴とする輝線フィーチャーが観測されると期待される。図4に波長50ミクロン前後に検出が期待されるオルソエンスタタイトの輝線フィーチャーを示した。図中の各色は温度の違いを反映している。温度によってフィーチャーの出現位置と幅がことなるのがわかるが、この結果と対応させればオルソエンスタタイトの温度が高い精度で推定できる。

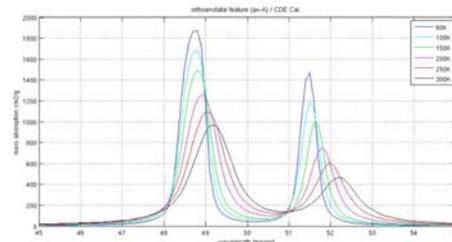


図4  
50ミクロン帯に予想される輝線フィーチャーとその温度変化

「69ミクロンフィーチャー」

ISO赤外線衛星によって波長69ミクロンにつよい輝線フィーチャーが10個以上の天体に見いだされた。オリビンにもこの波長(波数では約140[1/cm])に対応する)にフィーチャーが存在している。しかしこの観測フィーチャーは鉄を成分に含んだオリビンのものではなく、フォルステライト(Mg2SiO4、鉄をまったく含まないマグネシウム100%のオリビンと見なせる)によるものと考えられ、われわれの結果はこれを支持する。我々の測定したマグネシウム92%、鉄8%の割合のオリビンでは、波長71ミクロンに輝線の出現が予想され、観測波長より2ミク

ロンずれがある。また、フィーチャーの強度は観測値ほど強くなく、温度を振っても強度は大きくはかわらない。図5にはこの波長帯でのオリビン反射スペクトルの測定結果をしめす。図からもフィーチャーの弱さが明瞭に認められる。本研究以外でも、鉄成分含有比の異なるオリビン粒子の透過スペクトル測定から、69ミクロンフィーチャーの出現波長位置と強度を調査した研究でも、鉄成分をもつオリビンによっては観測結果を再現できないことが結論付けられている。

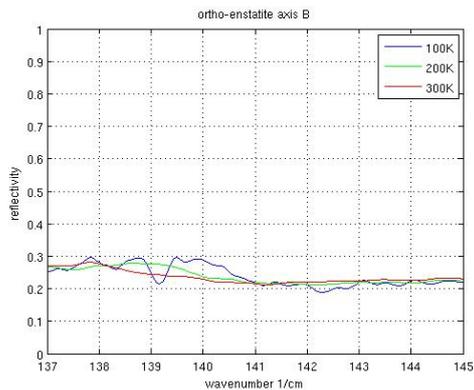


図5  
69ミクロン近くに存在する弱い反射スペクトルフィーチャー

一方でフォルステライトによる輝線は100K以下の低温であれば、観測波長も強度も再現できる。これは本研究に先行して測定したフォルステライト反射スペクトルからも支持される(図6)。

これから、観測上確認できるオリビンには鉄成分が混じっていないという興味深い結果が得られるが、この理由は未解決で今後の課題である。

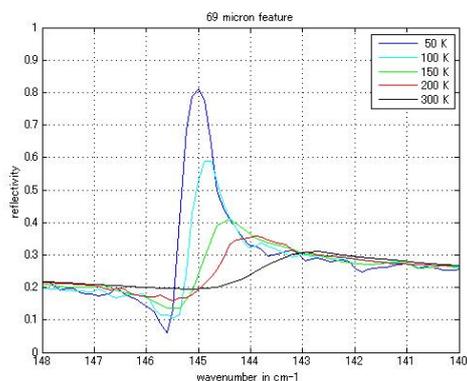


図6  
69ミクロンに対応するフォルステライトの反射スペクトル、温度による変化が大きく、低温での波長位置と強度は観測結果を再現する。

5. 主な発表論文等  
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

周藤 浩士 (SUTO HIROSHI)  
国立天文台・光赤外研究部・助教  
研究者番号：50300710

(2) 研究分担者

(平成19年度)  
小池 千代枝 (KOIKE CHIYOE)  
大阪大学・大学院理学研究科・招聘研究員  
研究者番号：20097835

(3) 連携研究者

(平成20年度)  
小池 千代枝 (KOIKE CHIYOE)  
大阪大学・大学院理学研究科・招聘研究員  
研究者番号：20097835