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」 原始惑星系円盤におけるフォルステライト 蒸発の赤外スペクトルへの影響

瀧川 晶¹, 横山 聖典², 橘 省吾¹, 永原 裕子¹, 小澤 一仁¹

(**要旨**) 赤外線分光観測により太陽系外にも結晶質シリケイトが発見され,結晶質フォルステライトが原始惑星 系円盤や進化末期の恒星周囲に普遍的に存在することがわかってきた.フォルステライトは高温条件で結晶構造 の異方性を反映して,異方的に蒸発し,粒子形状を変化させる可能性がある.我々は,原始惑星系円盤条件に近 い水素ガス圧力条件下でのフォルステライトの蒸発実験をおこない,水素中での蒸発異方性が,真空中での蒸発 異方性とは異なり,また水素圧力に依存することを明らかにした.実験で得られた蒸発異方性およびその水素圧 依存性による粒子形状変化は,観測可能な程度の赤外スペクトルのピーク位置や相対強度の変化をもたらし,赤 外分光観測から粒子形状に関する情報を抽出することで,固体物質が経験した温度や圧力条件を推定できる可能 性がある.

1. 結晶質シリケイトと赤外スペクトル

赤外線宇宙天文台ISOやすばる望遠鏡による星周や 星間空間の赤外分光観測によって、太陽系外にも結晶 質シリケイトが発見された.中でも、主要固体形成元 素であるMg, Si, Oから構成され、地球、隕石、彗星, 惑星間塵に広く存在する鉱物であるオリビン((Mg, Fe)₂SiO₄)のMg端成分フォルステライト(Mg₂SiO₄) が宇宙空間,特に濃い塵を纏った天体の周囲に一般的 に存在することがわかってきた(図1)(例えば[1-3]).

フォルステライトをはじめとするシリケイトは赤外 領域に複数の振動モードをもっており,赤外分光に よってシリケイトの結晶構造を推定することができ る.しかし,結晶の赤外スペクトルは結晶構造を反映 するだけでなく,結晶粒子が存在している環境の温度, 粒子サイズ,粒子形状などの様々な要素にも依存する [4,5].

粒子形状を変化させる要因のひとつとして、高温ガ

スからの固体の凝縮プロセスや加熱による固体の蒸発 プロセスが考えられる.異方的構造を持つ結晶の場合, その凝縮や蒸発も異方的に進行し,ある特定の結晶軸 方向に粒子が伸長するなど,粒子形状に変化が起こる ことが期待される.結晶の凝縮や蒸発の異方性の詳細 を明らかにし,凝縮や蒸発に伴う粒子形状変化を予測 することができれば,赤外分光観測で推定される結晶 粒子の形状と比較することで,その粒子が経験してき た温度・圧力環境を理解することも可能になると考え られる.すなわち,粒子形状から,蒸発が卓越するよ うな環境を経験したか,凝縮による粒子形成が卓越す る環境であったかなどの固体物質進化を推定できるの ではないかと考えている.

本研究では、原始惑星系円盤のような水素に富んだ 環境でのフォルステライトの蒸発による粒子の形状変 化が赤外スペクトルに与える効果に注目する.星間空 間ではシリケイトは非晶質である一方、原始惑星系 円盤環境では結晶質シリケイトが観測されており[2,3]、 原始惑星系円盤環境でのダスト加熱によるシリケイト の結晶化プロセスの存在を示唆する[6,7]¹.また、隕

^{1.} 東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻

^{2.} 東京大学 大学院新領域創成科学研究科 複雑理工学専攻



図1: HD100546 (Herbig Ae 星:若い中質量星), AFGL4106 (赤色巨星), NGC6302 (惑星状星雲) の赤外スペクトルとマ グネシウム珪酸塩の赤外スペクトルの比較 (縦軸は任意), van Boekel et al. (2005) [2], 周藤ら (2006) [4] を改変.

石に見られる同位体組成の均一性から、太陽系初期に 星間物質の大規模蒸発プロセスがあった可能性が指摘 されている.原始惑星系円盤条件での蒸発プロセスの 理解は,原始惑星系円盤でのダスト加熱現象およびそ れに伴うダスト蒸発という原始惑星系円盤初期ステー ジでの重要な物質進化プロセスの理解につながると言 えよう.

これまで、フォルステライトに関する蒸発実験は数 多くおこなわれており、蒸発速度の温度依存性や水素 圧依存性などが明らかにされている[8-13]. 真空実験 ではフォルステライトの結晶軸ごとの蒸発異方性も確 かめられているが[10,13], 原始惑星系円盤をなしてい る水素ガス中での蒸発異方性についてはいまだ調べら れていない.本研究では、原始惑星系円盤条件でのフ ォルステライト蒸発速度の異方性とその水素圧依存性 を明らかにするため、水素ガス中におけるフォルステ ライト蒸発実験をおこなった.実験結果に基づき、フ ォルステライト粒子の蒸発とそれに伴う形状変化が赤 外スペクトルにどのような影響を与え、その影響は観 測可能かどうかを検討した.

2. 水素雰囲気下でのフォルステ ライト蒸発実験

チョクラルスキー法でa軸方向に引き上げた人工フ ォルステライトの単結晶を1×3×4mmの直方体に切 り出しものを実験の出発物質として用いた. 蒸発異方 性を調べるために、一番大きな面がそれぞれフォルス テライトの結晶軸(a, b, c軸)に垂直になるように 3種類の試料を用意した.重量およびサイズを測定し た3種類の試料をモリブデンメッシュに乗せ、ステン レス製真空チャンバー内に設置した円筒形タングステ ンメッシュヒーターで1535℃(1808K)に加熱し,蒸 発実験をおこなった(図2).3つの試料はヒーターや 熱電対からの距離が等しくなるように配置した.水素 ガスは試料上方約8cmからアルミナパイプ二本(内径 1mm)により導入した.真空チャンバー内は実験中 もターボ分子ポンプによって連続排気をおこない、水 素ガスの流量を調整することで水素圧力を0.02, 0.2ま たは2Paの一定条件に保ちながら、3-80時間の実験を おこなった、圧力は真空チャンバーのポートに取り付 けられたメタル電離真空計により測定した.また、比 較のための真空条件(チャンバー内圧力10⁻⁴ Pa)での 実験もおこなった.

非晶質シリケイトの結晶化過程で特定の結晶軸方向への 結晶成長が起こることによって、赤外スペクトルが変化す る可能性も指摘されている[7]



図2: 真空高温炉模式図.

実験試料は重量変化を測定し、また、本稿では議論 しないが、表面組織の異方性を電界放射型走査型電子 顕微鏡(JSM-7000F)で観察した.

3. 蒸発速度の異方性・水素圧依 存性

実験前後での試料の重量減少割合は時間に対してほ ぼ線形に増加した(図3).また,同一時間の加熱に対 する重量減少は,最大面がc軸に直交する試料で最大で, 水素ガス中でもフォルステライトは異方的蒸発をする ことがわかった(図3).

実験試料の重量変化は次式のようにサイズの変化と 関連づけて表すことができる[9].

$$\frac{W}{W_0} = \frac{(a - 2V_a t)(b - 2V_b t)(c - 2V_c t)}{abc}$$
(1)

ここで W_0 , Wはそれぞれ出発試料の重量 (W_0) と蒸 発後の試料重量 (W), tは加熱時間, a, b, $c \geq V_a$, V_b , V_c はそれぞれa, b, c軸方向の試料サイズと蒸発速度を 示す. 3つの試料に対しての (1) 式を連立させ, 各 結晶軸方向の蒸発速度 V_a , V_b , V_c を求めた.



図3: 1535℃,水素圧0.2Paでの蒸発による各試料の重量 変化.最大面が c 軸に直交する試料の重量減少(c 軸 方向の蒸発が重量減少を支配)が他の2試料に比べ て大きい.



図4: 1535℃フォルステライト蒸発速度の水素圧力依存 性. V_a, V_b, V_c はそれぞれ a, b, c 軸方向の蒸発速 度. 真空中の蒸発速度も参考のため示してある. 水 素中での蒸発速度は水素圧力の 1/2 乗にほぼ比例し て増加する. 実線が表面カイネティクスを無視した 理想蒸発速度(蒸発係数 α =1), 破線および点線が α =0.1, α =0.01 の場合の蒸発速度を表す.

得られたフォルステライトの水素中での蒸発速度は a, b, c軸方向全てにおいて真空より大きくなり,水 素圧の約1/2乗に比例して増加することがわかった (図4).

フォルステライトは真空条件,および水素ガス中で, 化学組成や結晶構造を保ったまま調和蒸発することが わかっている[8-13]. このような物質の蒸発速度(表 面後退速度)はHertz-Knudsen式

$$V = \alpha \frac{P_{eq} \Omega_{Fo}}{\sqrt{2\pi m_{sio} RT}} = \alpha V_{ideal}$$
(2)

を用いて表すことができる[14]. P_{eq} はSiOガスの平衡 蒸気圧, Tは絶対温度, m_{sio} はSiOの分子量, Rは気体 定数, Ω_{Fo} はフォルステライトのモル体積である. フ ォルステライト ($Mg_{2}SiO_{4}$) 1モルの蒸発に伴い, SiO が1モル蒸発するため, SiOを用いてフォルステライ トの蒸発速度を表している. α は蒸発係数 ($0 < \alpha < 1$) と呼ばれ, 結晶表面での原子間ボンドの切断, 表面吸 着原子の拡散, 表面からの離脱といった一連の表面プ ロセスの蒸発への効果をすべて含めた反応係数である. $\alpha = 10$ 場合, 表面プロセスの蒸発カイネティクスへ の影響はないと考えられ, 蒸発速度は最大となる.

実験で得られた蒸発速度を,(2)式で表される蒸発 速度と比較すると,蒸発係数が α =0.1-0.01程度で実験 データをうまく説明できることがわかる(図4).今回 見積もられた蒸発係数 α は,過去の水素中でのフォル ステライト蒸発実験[11,12]とも調和的である.

真空と水素ガス中での蒸発においてαの値に大きな 変化がないことから,水素ガス導入による蒸発速度の 上昇は,水素ガス存在下でSiOの平衡蒸気圧が上昇し たことによると考えられる.すなわち,水素圧に応じ た蒸発速度上昇の主な原因は,熱力学的駆動力の増大



図5: 水素ガス圧の変化に対する V_b/V_a, V_c/V_aの変化.

によるものであると考えられる.

しかし、蒸発速度の異方性に着目すると、水素圧の 増加とともに、蒸発速度の異方性が変化することが明 らかになり、水素ガスによる熱力学駆動力増加以外の 効果も存在することが示唆される.図5にb, c軸方向 の蒸発速度(*V_b*, *V_c*)のa軸方向の蒸発速度(*V_a*)に対 する比を水素圧に対して示す.水素圧が上昇するにつ れて*V_b*/*V_a*は1に近づく一方で*V_c*/*V_a*は約1.7から約2.6 まで増加する.

真空中での蒸発異方性は、蒸発に関わる表面プロセ スの中でも、結晶面ごとの原子間ボンド強度(おそら く最も結合の強いSi-Oボンド)もしくはボンドの切断 効率の違いに依存している可能性が高い.水素雰囲気 中では、フォルステライト表面に吸着した水素は原子 間ボンドの切断を促進する働きをすると考えられるが、 水素圧に対する蒸発速度の異方性の変化は、水素の吸 着サイト密度が異なるなどの理由で、水素が原子間ボ ンド切断を促進する効果が結晶面ごとに異なることを 示唆しているものと考えられる.これらのことを定量 的に考察するためには、フォルステライト結晶面のエ ネルギー状態や表面での原子間のボンド強度を結晶面 ごとに調べる必要がある.

蒸発異方性の結晶学的議論は本研究の直接の目的か らは外れるため、本稿ではこれ以上の議論はおこなわ ないが、水素ガス圧の変化に伴い蒸発速度の異方性が 変化するという実験結果は、宇宙空間でフォルステラ イト粒子が蒸発環境に応じて異なる形状になることを 意味し、粒子形状から粒子の経験した温度や圧力条件 を推定できる可能性を示している.

蒸発に伴うフォルステライト 形状変化が赤外スペクトルに 及ぼす効果

本節では実験で得られたフォルステライトの蒸発速 度の異方性に基づいて,蒸発による粒子形状の変化が 赤外スペクトルに及ぼす効果を見積もる.蒸発前のフ ォルステライト粒子の形状は球形と仮定する.蒸発温

	c 軸方向の 蒸発量(c/c₀)	b 軸方向の 蒸発量(b/b ₀)	a 軸方向の 蒸発量(a/a₀)	a/c	b/c
水素圧 2 Pa	0.5 0.2 0.05	0.83 0.72 0.67	0.81 0.69 0.64	1.62 3.47 12.70	1.65 3.60 13.40
真空 (全圧 10 ⁻⁴ Pa)	0.5 0.2 0.05	0.85 0.77 0.72	0.72 0.56 0.48	1.45 2.80 9.53	1.71 3.83 14.40

表1 1535℃,水素圧 2Pa または真空での蒸発によるフォルステライト球の形状変化



図 6: 1535℃, 水素圧 2Pa でのフォルステライト蒸発に伴う質量吸収係数の変化. 蒸発前の球状フォルステライトを点線, c 軸 方向に 50%, 80%, 95% 蒸発後 (c/c₀=0.5, 0.2, 0.05)の粒子のスペクトルをそれぞれ破線, 一点破線, 実線で表す. 蒸発後 の粒子形状は表 1 を参照.

度は実験条件と同じ1535℃とし,蒸発ガスの再凝縮な どを考えない自由蒸発のみを考慮する.また,蒸発に よって結晶面が発達することも考えられるが,ここで は簡単のために,結晶軸方向に異なる速度での蒸発に よって,粒子形状が球形から三軸不等楕円体に変わる と仮定する.

蒸発による粒子形状の変化を表1にまとめる. 真空 中での蒸発速度異方性は $V_c >> V_a > V_b$ であるのに対 し,水素圧2Pa条件では $V_c > V_a \sim V_b$ であるため(図 4),蒸発が進行すると、フォルステライトの形状は真 空条件でも水素ガス存在下でも蒸発によって、c軸に つぶれた形になるが,真空条件ではb軸に伸長した形 に,水素ガス中では円盤状になると予想される(表1). 実験における真空条件(10⁴Pa)や水素ガス2Paの条 件は,それぞれ進化末期の恒星からの恒星風,原始惑 星系円盤の地球軌道付近の圧力条件に相当すると考え られる.

得られた軸比を元に,寒川ら[15]によって合成フォ ルステライト単結晶の反射スペクトル測定からローレ ンツ型振動モデルを使って求められたa,b,c軸方向 の振動モードの共振周波数および振動強度を用い,蒸 発結果のフォルステライト粒子の形状に対応した質量



図 7: 1535℃, 真空条件 (10⁴Pa) または水素圧 2Pa で c 軸方向に 80% 蒸発 (c/c₀=0.2) したフォルステライト粒子の質量吸収 係数 (点線および実線). 球状フォルステライトのスペクトルも比較のために示してある (細い実線). 蒸発後の粒子形状 は表 1 を参照.

吸収係数を波長の関数として計算した.ここでは、粒 子サイズは赤外線の波長より充分小さいと仮定し、レ イリー散乱条件で計算をおこなった.

図6に水素中での異方的蒸発の進行に伴う質量吸収 係数の変化を示す.蒸発が進行し形状が変化するに従 い,吸収を担う振動モードが変化し,質量吸収係数ス ペクトルのピーク位置と吸収バンドの相対強度比が大 きく変化することがわかる.例えば,中間赤外領域で は,波長16,19,21,22,24,27µmのピークが長波長 側に移動し,18µmのピークは短波長側へ移動する(厳 密には卓越する振動モードの変化なので,あるピーク の移動という表現は正しくないが,ここではわかりや すさのため,移動と表現する).このピークの移動は 最大で1µm程度で,観測の精度と比較しても十分識 別可能な変化である.

異なる圧力条件下で同程度に蒸発したフォルステラ イト粒子の質量吸収係数を図7に示す.質量吸収係数 スペクトルのピーク位置と相対強度比は,10μmから 70μmまでの幅広い波長域で蒸発時の水素圧に応じて 判別可能な程度の違いを見せる.

真空中,水素ガス中での蒸発の異方性はともに, 波長9.8, 11.2, 16.5, 18, 23.7, 25, 28, 33.7µm域のピ ーク位置の変化と, 49, 69µmピークの相対強度変化 として顕著に見られる. 9.8, 16.3, 19, 23.6, 33.7µm フィーチャーは水素圧が高い条件での蒸発を経験する ほど長波長側に移動し, 10.3, 11.8, 18, 21.5, 25, 27, 33µmフィーチャーは短波長側に移動する.

赤外スペクトルは,温度や結晶の化学組成の変化に よっても変化する[3,4].しかし,温度や化学組成の変 化に対して,スペクトルのピーク位置は一般に波長に 対して一方向にシフトし,本研究で示したような短 波長側にも長波長側にもシフトが見られることはない. そのため,形状変化によるスペクトルのピーク位置や 相対強度比の変化は,温度や化学組成によるスペクト ルの変化とは区別することが可能であろう.

ここまで見てきたように、フォルステライトの異方 的蒸発による粒子の形状変化は観測可能な赤外スペク トルの変化をもたらす.蒸発異方性が水素圧に依存し て変化することから、粒子形状情報から、ダスト蒸発 が起こった環境の圧力条件を推察することができる可 能性がある.今後、様々な温度・圧力条件での実験的 研究を進める必要はあるが、観測される赤外スペクト ルから粒子形状に関する情報を抽出することで、ダス トの経験した温度圧力条件などの環境情報を推定する ことが可能となっていくだろう.

5.まとめ

フォルステライトの水素ガス中での蒸発実験により, フォルステライトは原始惑星系円盤条件に近い水素ガ ス圧力条件下で異方的に蒸発することがわかった.水 素ガス中でのフォルステライト蒸発速度は水素圧力の 約1/2乗に比例して増加し,蒸発異方性は真空と比べ て有意な変化をすることがわかった.

また、フォルステライトの蒸発異方性は広い赤外波 長域で判別可能なスペクトル変化として現れることが 明らかになった、観測によるスペクトルから固体物質 の状態あるいは場に関する情報を得るためには、広い 温度条件での蒸発異方性を調べる必要があり、また、 凝縮による結晶の形の変化も考慮に入れる必要がある. 蒸発の場合と同じように凝縮速度もc軸方向に速いな らば、フォルステライト粒子はc軸に伸びた形となり、 蒸発時とは異なる形状を示すことになるかもしれない. これらは今後の課題であるため、今回の実験結果だけ から, 直ちに系外原始惑星系円盤や赤色巨星, 惑星状 星雲などの観測にあてはめることができるものではな い. しかしながら、一見、鉱物学の問題のように思え る鉱物の物性異方性が、進化末期の星から星間空間を 経て、原始惑星系円盤において惑星が誕生するまでの 物質進化の場を定量的に理解するための一つの判断要 素になりうることを示したという点で、今回の実験結 果は重要である.

謝 辞

質量吸収係数計算コードは寒川尚人博士にご提供い ただき,質量吸収係数の計算に際しては茅原弘毅博士 から助言をいただいた.実験試料の観察に関する試料 準備や装置使用に関して,吉田英人氏にご協力いただ いた.また,小池千代枝博士には本稿に関して,有 益なコメントをいただいた.ここに記して感謝致しま す.なお,本研究は文部科学省科学研究費基盤研究S (16104007),特定領域研究「太陽系外惑星科学の新展 開」(17039002,17039003)からの補助を受けている.

参考文献

- Molster, F. J. et al., 2002, Astron. Astrophys. 382, 184.
- [2] van Boekel, R. et al., 2005, Astron. Astrophys. 441, 563.
- [3] 藤原英明, 2007, 遊星人 本号.
- [4] 周藤浩士ら, 2006, 天文月報 99, 682.
- [5] 茅原弘毅ら, 2006, 遊星人 15, 44.
- [6] 村田敬介ら, 2007, 遊星人 本号.
- [7] 村田敬介ら, 2006, 日本天文学会2006年度秋季大 会講演予稿集, P44a
- [8] Hashimoto, A., 1990, Nature 347, 53.
- [9] Nagahara, H. and Ozawa, K., 1996, Geochim. Cosmochim. Acta. 60, 1445.
- [10] Ozawa, K. et al., 1996, Lunar Planet. Sci., 27, 989.
- [11] Tsuchiyama, A. et al., 1998, Mineral. J. 20, 113.
- [12] Kuroda, D. and Hashimoto, A., 1998, Antarct. Meteorit. Res. 15, 152.
- [13] Yamada, M. et al., 2006, Planet. Space. Sci. 54, 1096.
- [14] Paule, R. C. and Margrave, J. L., 1967, in The Characterization of High-Temperature Vapors, 130.
- [15] Sogawa, H. et al., 2006, Astron. Astrophys. 451, 357.