

プレソーラー コア／マントル粒子の生成条件

千貝 健¹, 小笹隆司², 山本哲生¹

1. プレソーラー粒子

近年, 微小粒子の同位体分析技術の向上により, 炭素質隕石中から太陽系組成と大きく異なる同位体組成を持ったマイクロサイズの粒子が多数発見されるようになった[1, 2]. これらの粒子は, プレソーラー粒子 (presolar grain) と呼ばれている. プレソーラー粒子として, グラファイト, ダイヤモンド, シリコンカーバイド (SiC), シリコンナイトライド (Si₃N₄), コランダム (Al₂O₃) 等が発見されている. さらに最近では, 主成分であるシリケイトの同位体組成の分析も行なわれるようになってきた[3]. プレソーラー粒子は, 太陽系形成以前に, 進化した星の周りで形成され, 太陽系形成時に大きな変成を受けずに隕石中に取り込まれたと考えられている. プレソーラー粒子は星間ダストの生成から惑星形成に至る星間ダストの進化の両端をつなぐ物質である.

従来, プレソーラー粒子の起源の研究はその同位体組成に着目して行なわれてきた. 本研究では, プレソーラー粒子の構造に着目して, ダスト生成の観点から, その生成環境の解明に迫る. これによって, 生成環境に関する情報を格段に精密に抽出することが可能となる. 様々な種類のプレソーラー粒子の中から, チタンカーバイド (TiC) を中心に持つグラファイト粒子に注目する. TiCコア／グラファイト・マントル粒子はメタル (チタン, モリブデン, ジルコン) カーバイドをコアにもつグラファイト粒子の内でもっとも数が多い分

ファイト・マントルのサイズは生成環境のガス圧とその膨張速度 (冷却速度) に関する情報を含んでいる.

第2節では, 炭素星周領域での粒子生成環境を考察し, TiCとグラファイト粒子の原材料とその生成にいたる反応を明らかにする. 第3節で非平衡凝縮論に基づいた粒子生成の素過程を説明する. 第4節でTiCコア／グラファイト・マントル粒子形成の計算結果を示し, 形成条件を明確化する. 第5節に今後の課題を述べる.

2. 炭素星周領域での粒子生成環境

同位体分析と星における元素合成理論との比較から, TiCコア／グラファイト・マントル粒子の生成場所の候補の一つは, 炭素の元素存在度が酸素の元素存在度よりも大きい ($\epsilon \equiv [C]/[O] > 1$) 漸近巨星分枝星 (Carbon-rich AGB 星, 以後 "炭素星" と呼ぶ) であると推定されている[4].

2.1. 炭素星周領域のモデル

簡単のため, 炭素星からのガスの放出は球対称, 定常と仮定する. 粒子生成はガスの膨張タイムスケールと比べて, 十分短時間で完了するため, 生成領域のガス流速 v は一定と見なすことができる. 炭素星からの質量放出は星周領域で形成されたダストに働く輻射圧によるガス・ドラッグによって引き起こされる. 定

パラメータとして $0.01 < \nu < 10 \text{ km/s}$ の範囲で考えた。質量放出率 M は炭素星の進化段階に応じて、 $M = 10^{-6} \sim 10^{-4} M_{\odot}/\text{yr}$ の範囲で変化する。星から放出されたガスの動径方向の温度分布は、輻射輸送モデル計算を参考にし $T(r) = (L/4\pi\sigma_B)^{1/4} r^{-1/2}$ で近似した [5]。ここ r は星の中心からの距離、 $L \sim 10^4 L_{\odot}$ は星の光度、 σ_B はシュテファン・ボルツマン定数である。このモデルでは炭素星の星周領域の構造は ν 、 M 、 L によってすべて決定される。

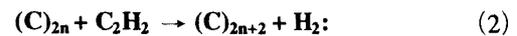
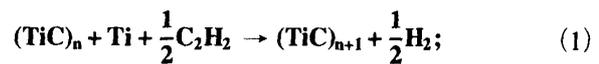
2.2. TiC, グラファイト生成の原料分子と凝縮核生成反応

炭素星での TiC とグラファイトの粒子形成に関わる炭素を含んだ分子 (C-bearing 分子) の種類と数密度を決定する重要な物理量の一つは C/O 比 ϵ である。観測から、炭素星の進化段階に応じて $1 < \epsilon < 1.6$ であることが示されている [6]。星周領域の物理条件では、炭素を含む分子の中で CO 分子が最も豊富に存在するが、問題となる条件下では安定なため粒子生成には関与しない。CO 以外の残りの炭素量 $\epsilon - 1$ が TiC とグラファイトの凝縮に利用できる。

CO 分子に次いで存在度が大きい炭素を含む分子を図 1 に示した。炭素以外は太陽系の元素存在度 [7] を

仮定し、全ガス圧 P と ϵ ごとに化学平衡計算を行った。左図は $\epsilon = 1.05$ に、右図は 1.3 に対応する。 $M = 10^{-5} M_{\odot}/\text{yr}$ 、 $\nu = 0.02, 0.1, 0.5 \text{ km/sec}$ に対する放出ガスの軌跡を破線で示した。また、TiC とグラファイトの平衡温度 (蒸気とバルク固体が共存する温度) $T_e(\text{TiC})$ 、 $T_e(\text{C})$ を点線で示した。凝縮核生成に必要な過冷却効果により、粒子の凝縮する温度は平衡温度よりも低くなる (非平衡凝縮論 [8])。図より、凝縮温度域で CO に次いで多い C-bearing 分子は C_2H_2 であることがわかる。同様な計算から、TiC 粒子の凝縮温度域では Ti 原子がもっとも多い Ti-bearing 分子であることがわかった。また、これらの凝縮温度域で、H は H_2 分子として存在する。

以上から TiC とグラファイトの凝縮核生成 (nucleation) は次の反応を通じて起こることがわかる：



3. 粒子生成過程

粒子は、材料分子の過飽和にとまなう凝縮核生成と、それに続く核から粒子への成長を通じて生成される。過飽和に達しても、すぐに粒子生成が始まるわけでは

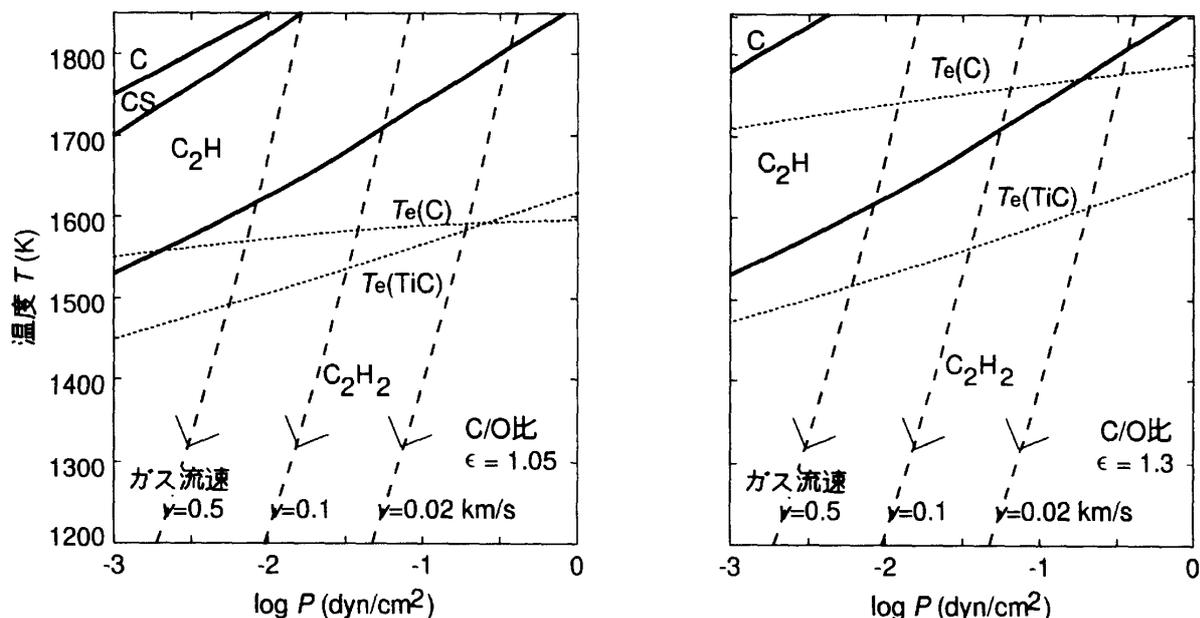


図1：炭素を含む分子でCO分子の次に存在度が大きい分子。左図はC/O比 $\epsilon = 1.05$ 、右図は $\epsilon = 1.3$ 。点線はTiCとグラファイトの平衡温度 $T_e(\text{TiC})$ 、 $T_e(\text{C})$ 。破線は質量放出率 $M = 10^{-5} M_{\odot}/\text{yr}$ で、ガス流速 $\nu = 0.02, 0.1, 0.5 \text{ km/s}$ に対する軌跡。

ない。凝縮核表面に起因する正 (>0) エネルギーのため、ある程度過飽和になり、はじめて、顕著な核生成が起こる。この“顕著な核生成の起こる温度”が凝縮温度である。TiC, グラファイト粒子の原材料であるTi原子, C_2H_2 分子がともに過飽和に達しても、どちらが先に凝縮するかは、TiC, グラファイトの核生成エネルギーとTi原子, C_2H_2 分子の数密度によって決まる。

1) 先にTiCが凝縮するならば、凝縮したTiC表面上でグラファイトが不均質凝縮を起こし、TiCコア/グラファイト・マントル粒子が形成する。2) 先にグラファイトが凝縮するならば、グラファイト粒子(もしくはグラファイト・コア/TiCマントルor 薄膜?)が形成する。炭素星周領域では、C/O比やガス流速が比較的小さい場合には1)が起こる(第4節, 図6参照)。

今注目しているTiCコア/グラファイト・マントル粒子が形成する場合の生成過程を図2にまとめた。ガスの膨張・冷却につれ、以下の過程を経てTiC コア/グラファイト・マントル粒子が生成される:

- (1) TiC, グラファイトの原材料であるTi原子, C_2H_2 分子が過飽和になる。
- (2) TiC粒子の均質核生成 (homogeneous nucleation) と成長。
- (3) 成長途中のTiC粒子表面上におけるグラファイトの不均質核生成 (heterogeneous nucleation)。TiC粒子とTiC粒子表面上に不均質核生成したグラファ

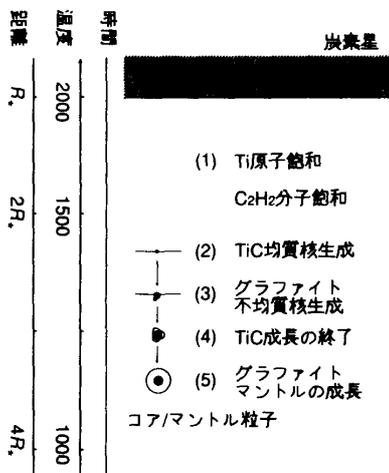


図2: TiCコア/グラファイト・マントル粒子の生成過程。

イトが共に成長する。

- (4) TiC粒子の表面が完全にグラファイトに覆われた時点でTiC粒子の成長が終わる。
- (5) 原材料である C_2H_2 分子を使い切るまでグラファイト・マントルの成長が続く。

一般にはグラファイトの生成は、TiC粒子表面上での不均質核生成および気相からの均質核生成との2過程を通じて起こる。その率比はTiC表面上におけるグラ

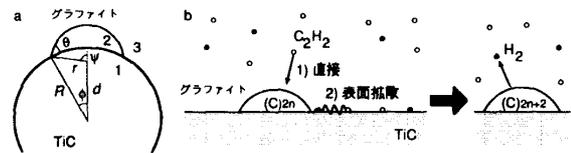


図3: a) TiC粒子とTiC粒子表面上のグラファイト粒子。RがTiC粒子半径, rがTiC粒子表面上に生成したグラファイト粒子の曲率半径, θ が接触角である。b) TiC粒子表面上でのグラファイト粒子の成長。TiC粒子表面上のグラファイト粒子は、1) 気相中の C_2H_2 分子の直接衝突, 2) TiC表面付着 C_2H_2 分子の拡散衝突, により成長する。

ファイトの接触角 θ , 図3a 参照)に依存する。しかし、実際には気相からのグラファイトの均質核生成は無視できる(第3.2節参照)。

3.1. TiCコアの生成

TiCコアの凝縮過程とそれを記述する方程式はChigai et al. (1999)で詳しく述べられている[9]。すなわち、TiC粒子は、1) Ti原子の過飽和にともなう均質核生成と、2) それに続く核から粒子への成長を通じて生成される。この過程は核の成長方程式、および成長にともなうTi原子の消費方程式によって記述される[8]。(1) 式のような化学反応を伴う核生成率については[10, 11]で定式化されている。これらの方程式から、Ti原子が飽和してから顕著な均質核生成が起こるまでの温度低下(過冷却度)、凝縮核の数密度、核生成したTiC粒子の半径の時間変化を決定できる。

3.2. グラファイト・マントルの生成

さらに温度が低下すると、TiC表面上でグラファイトが不均質凝縮する(図3参照)。TiCの凝縮と同様に、

この過程も、1) グラファイトの原料分子である C_2H_2 の過飽和にともない生成したグラファイト核の成長方程式と、2) 核の成長による C_2H_2 分子の消費方程式で記述される。ただし以下の2点が均質凝縮と異なる：

・核生成エネルギーの低下

表面上に不均質凝縮する場合は、気相から均質凝縮する場合と比べて核生成エネルギーが低下する。図3aのように、半径 R の粒子上に接触角 θ で球帽形に曲率半径 r の核が生成する場合、不均質凝縮と均質凝縮の核生成エネルギーの比 f は基盤の曲率半径 R とそこに生成する核の曲率半径 r との比 R/r 、および接触角 θ で決まる[12]。図4に比 $f = f(R/r, \cos \theta)$ を示した。 f は $0 < f < 1$ で変化し、 $R/r \geq 1$ で $\cos \theta$ が増加するにつれて急速に f は小さくなる。墻内グループの測定によると、TiC粒子表面上のアモルファス・カーボンの接触角は $\cos \theta = 0.92$ ($\theta \simeq 23^\circ$)である[13] (本研究ではこの値を用いた)。この場合、不均質核生成が圧倒的に起こりやすいことがわかる。実際にはこれに加えて、基盤として利用できるTiC粒子の総表面積も関係するが、今の場合これを考慮しても結論は変わらない。

・核の成長の仕方

図3bのように、核は1) 気相分子が直接、衝突して成長するだけでなく、2) 表面上に吸着した分子が、拡散することによっても成長する。

TiCコアの成長はその表面がグラファイトに完全に覆われる時点で終了し、グラファイト・マントルの成長は原料である C_2H_2 がなくなった時点で終了する。

4. 形成条件

星から流出し冷却するガス中での、TiCが核生成してからグラファイトに覆われるまでの成長、TiCが完全にグラファイトに覆われてからのTiCコア/グラファイト・マントル粒子の成長の一例(C/O比 $\epsilon = 1.01$)を図5左図に示した。この場合、温度 $T = 1334K$ でTiCの顕著な核生成が起こり、TiC核の成長が始まる。この温

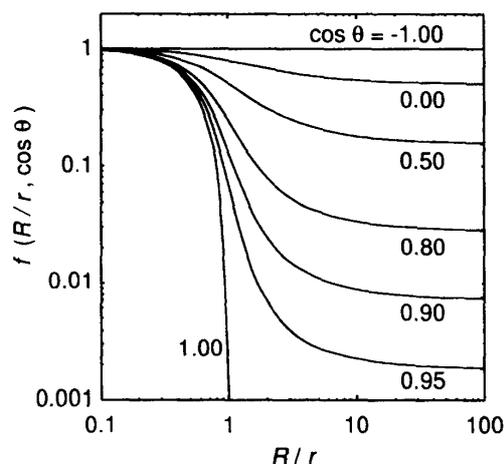


図4：不均質凝縮の効果を表す因子 $f(R/r, \cos \theta)$

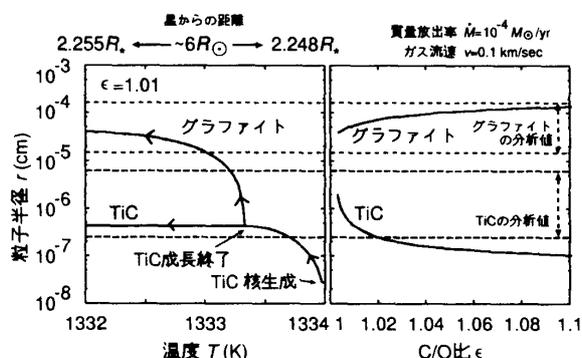


図5：左図) C/O比 $\epsilon = 1.01$ の場合のTiCコア ("TiC"で表示)とグラファイト・マントル ("グラファイト"で表示)との粒径の時間変化。時間は温度が低下する方向に進む。右図) TiCコア/グラファイト・マントル粒子とTiCコアの最終半径の ϵ 依存性。いずれも、ガス流速 $v = 0.1 \text{ km/sec}$ 、質量放出率 $\dot{M} = 10^{-4} M_{\odot}/\text{yr}$ の場合。

度域ではグラファイトの原料分子 C_2H_2 は飽和しているため、成長しつつあるTiC表面でグラファイトの不均質凝縮も起こる。グラファイトでTiC表面が覆われた段階でTiCの成長は完了し、グラファイト・マントルは C_2H_2 がなくなるまで成長を続ける。TiC核生成からグラファイト・マントルの成長完了までの時間はきわめて短い。この条件では約2年である。

図5右図に、TiCコアとTiCコア/グラファイト・マントル粒子の最終半径のC/O比依存性を示した。C/O比が1に近づくと、グラファイトの材料である C_2H_2 が少なくなるため、TiC上へのグラファイトの不均質生成が起こりにくくなり、TiCがより大きく成長できる。マーチソン隕石中から抽出された粒子の分析値を再現するためには、

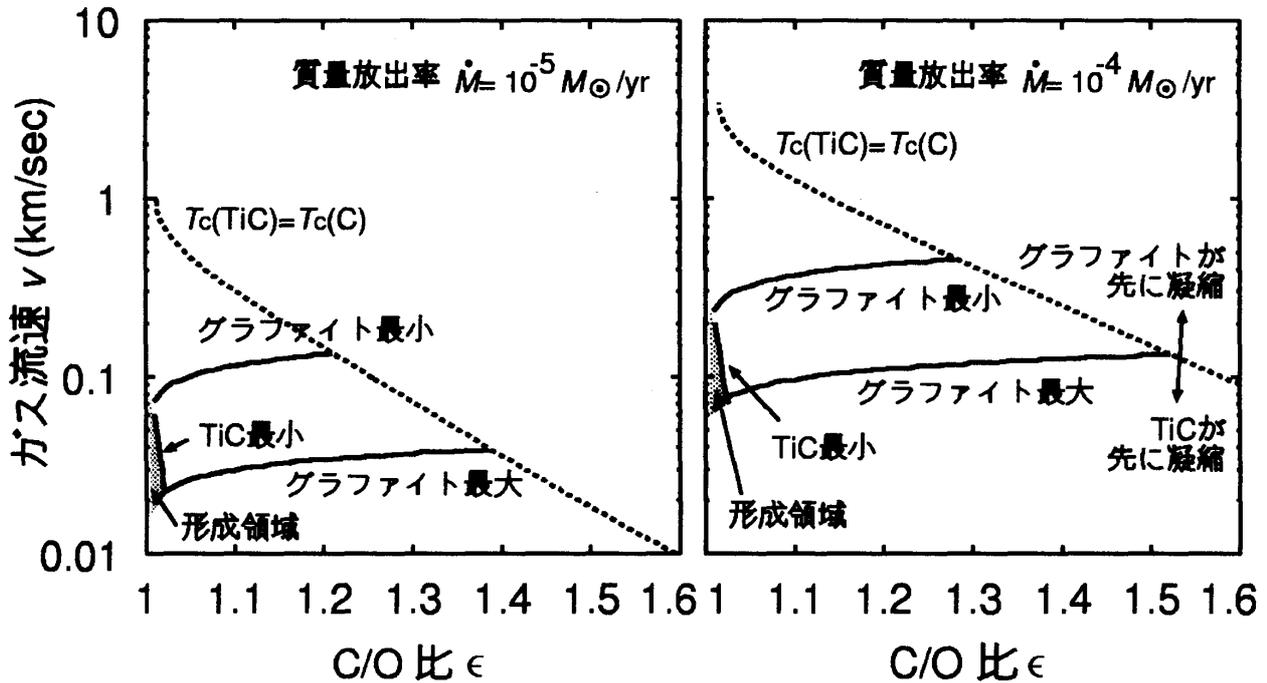


図6：マーチソン隕石から抽出されたプレッシャーTiCコア／グラファイト・マントル粒子の生成条件。左図は質量放出率 $\dot{M}=10^{-5} M_{\odot}/\text{yr}$ 、右図は $\dot{M}=10^{-4} M_{\odot}/\text{yr}$ の場合。" $T_c(\text{TiC})=T_c(\text{C})$ "で示されている線より v が小さい領域で、TiCがグラファイトよりも先に凝縮する。グラファイト・マントル半径の分析値が再現される領域は、最小値"グラファイト最小"と最大値"グラファイト最大"には含まれた領域である。TiCコア半径の分析値が再現される領域は、最小値"TiC最小"よりも ϵ が小さい領域である。TiCコア半径の最大値は $1 < \epsilon < 1.01$ の領域に存在するが、この図では示していない。分析結果を再現する領域は"形成領域"で示している。

C/O比が1.02より小さくしてはならないことがわかる。

TiCコア／グラファイト・マントル粒子の形成条件を探るうえで、以下の特性に着目した：1) コア／マントル構造：これは明らかにTiCがグラファイトよりも先に凝縮したことを示している。2) マーチソン隕石から抽出されたTiCコアおよびグラファイト・マントルの粒径の観測値。粒径は形成環境のガス圧や冷却率（星の質量放出率 \dot{M} 、ガス流速 v に関連）、C/O比 ϵ を反映する。

種々の ϵ 、 v 、 \dot{M} についてTiCとグラファイトの凝縮順序、これらの粒径を計算し、条件1)、2)を満足する形成条件を図6にまとめた。マーチソン隕石で見出されたTiCコア／グラファイト・マントル粒子の上述の特性を再現する条件を図のハッチ部分で示した。TiCの粒径を再現する条件がもっとも厳しくC/O比を制限することがわかる。C/O比の上限はほとんど質量放出率によらず1.03である。これより大きいC/O比では、マーチソン隕石で見出されているよりも小さいTiCコアが形成される。形成場所のガス流速 v と質量放出率 \dot{M}

に対する条件は

$$0.2 < \left(\frac{v}{0.1 \text{ km/s}} \right) \left(\frac{\dot{M}}{10^{-5} M_{\odot}/\text{yr}} \right)^{-1/2} < 0.8 \quad (3)$$

と表わすことができる。この条件は形成場所の全圧に換算すると $0.02 < P < 0.2 \text{ dyn/cm}^2$ に相当する。この全圧は、TiCとグラファイトの凝縮順序のみを束縛条件として考慮した平衡凝縮計算から推定された全圧 $P > 0.1 \text{ dyn/cm}^2$ [4]と同程度か、やや小さい。

一方、本研究で得られたC/O比の条件($\epsilon \leq 1.03$)は従来の平衡凝縮計算の結果($\epsilon < 1.2$ [14, 15])と大きく異なる。観測からは、炭素星のC/O比は $\epsilon \leq 1.6$ 、内半数は $1 < \epsilon < 1.1$ と見積もられている[6]。主系列での質量が $4M_{\odot}$ 以下のAGB星は、進化するにしたがってC/O比が増加する。このことは、マーチソン隕石中から抽出されたプレッシャーTiCコア／グラファイト・マントル粒子の生成源が、AGB段階の初期にあるC/O比が1に近く比較的質量放出率の大きい炭素星の星周領域であることを示している。また、プレッシャーグラフ

ファイトには、進化の進んだAGB星で生成されたより小さい($\sim nm$)TiCコアを含む粒子が含まれていることが示唆される。

5. 今後の課題

隕石中のプレソーラー粒子の構造から、その生成環境を読み解く研究を紹介した。同位体組成分析と星における元素合成理論との比較から生成源の星の種類を同定する研究と相補的に、ダスト生成の観点からその生成環境の解明に迫る点が本研究の特徴である。ここではTiCをコアにもつグラファイト粒子に着目したケーススタディーについて述べた。AGB星の進化の最終段階の赤外天文観測から、TiCのスペクトルを観測したとの報告もなされている[16]。炭素星の赤外観測からは、SiCのスペクトルも観測されている。グラファイトとともに、SiCはプレソーラー粒子の主要種でもある。観測されている"TiC"スペクトルが本当にTiCの凝縮に起因するものなのか、SiCとグラファイトの同時生成が可能なのか等、今後研究すべき課題は多い。

プレソーラー粒子は星間ダストの進化の両端をつなぐ物質であり、その研究は惑星原物質の物質科学、天文観測、星における元素合成の理論、ダスト生成の実験および理論的研究と多岐にわたっている。本研究を進展させることによって、星間物質から惑星形成にいたる物質進化の描像を確立するうえでの総合的な研究の一端を担いたいと考えている。

謝辞

議論や実験面からのご教示をいただいた堀内教授をはじめとする立命館大学ナノスコピック物理研究室の皆様へ感謝します。

参考文献

- [1] 簡潔かつ明快な解説は、甘利幸子,1994:固体惑星物質科学の基礎的手法と応用,武田 他編,サイエンスハウス,128-137.
- [2] プレソーラー粒子に関する話題全般については,Astrophysical Implications of the Laboratory Study of Presolar Materials,1997:ed.T.J. Bernatowicz and E.Zinner,AIP Conf.Proc.**402**に詳しい.
- [3] Alexander,C.M.O'D.et al.,2001:Lunar and Planetary Science **XXXII**, 2191.
- [4] Bernatowicz,T.J.et al.,1996:Astrophys.J.**472**, 760-782.
- [5] Gail, H.P.et al.,1984:Astron.Astrophys.**133**, 320-332.
- [6] Lambert, D.L.et al.,1986:Astrophys.J.Suppl.**62**, 373-425.
- [7] Anders, E., and Grevesse, N.,1989:Geochim. Cosmochim.Acta **53**,197-214.
- [8] Yamamoto,T.,and Hasegawa, H.,1977:Prog. Thor.Phys. **58**,816-823.
- [9] Chigai,T.et al.,1999:Astrophys.J.**510**, 999-1010.
- [10] Kozasa,T.,and Hasegawa, H.,1987:Prog.Theor. Phys. **77**,1402-1410.
- [11] Yamamoto,T.\ et al.,2001:Astron.Astrophys.,to be published.
- [12] Fletcher, N.H.,1958:J.Chem.Phys. **29**,572-576.
- [13] 木村勇氣 他,2000:Grain Formation Workshop **XXI**,121-125.
- [14] Lodders,K.,and Fegley,B.,1995:Meteoritics **30**, 661-678.
- [15] Sharp,C.,and Wasserburg,G.,1995:Geochim. Cosmochim.Acta **59**, 1633-1652.
- [16] von Helden, G.et al.,2000:Science **288**, 313-316.