

学位論文題名

不均質プレソーラー粒子の生成条件

学位論文内容の要旨

従来の太陽系形成シナリオによると、太陽系を形成した星間分子雲内のダストの大部分は太陽系形成時に蒸発し、その後再凝縮した粒子が集積して惑星が形成されたと考えられている。蒸発再凝縮の際に同位体組成が一樣になる。しかし、近年、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もった粒子が発見された。これらの粒子はプレソーラー粒子 (presolar grain) と呼ばれる。プレソーラー粒子は、太陽系形成時に蒸発せずに生き残った粒子であると考えられている。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物質の進化に関する貴重な情報を多く含んでいる [1]。

最近、透過型電子顕微鏡観察により、マーチソン隕石から抽出されたプレソーラーグラファイト粒子の中に TiC 等のメタルカーバイドが存在することがわかった [2, 3]。同位体分析と星における元素合成理論との比較からこれらの粒子の生成場所の一つとして、炭素の元素存在度が酸素の元素存在度よりも大きい漸近巨星分枝 (AGB) 星 (炭素星) が考えられている。不均質プレソーラー粒子の発見は、炭素星星周領域でのプレソーラー粒子の生成条件に強い制約を与える。平衡凝縮計算により、炭素星星周領域で TiC がグラファイトよりも先に凝縮する条件と TiC とグラファイトのサイズが分析値まで成長する条件から、炭素と酸素の元素存在度比 (C/O 比) が $1.05 < C/O < 1.2$ [4, 5, 6]、圧力が $P > 0.1 \text{ dyne cm}^{-2}$ [3] であることが求められている。炭素星星周領域のような低い圧力と速い温度変化の条件では粒子は非平衡過程 (凝縮核の生成とその成長を考えた過程) を経て生成するので、平衡凝縮計算は適用できない。

Chigai et al. (1999) [7] では、粒子凝縮の素過程 (核生成+粒子の成長) に基づいた非平衡凝縮計算 [8, 9] を行い、マーチソン隕石中で見つかったプレソーラー TiC コア/グラファイトマントル粒子の炭素星星周領域における生成条件を明らかにした。隕石中の粒子との比較においては、1) 粒子の構造 (TiC コア/グラファイトマントル)、2) 粒径 (TiC コア、グラファイト粒子) に着目した。粒子の構造は凝縮温度に依存する。一方、粒径はガス密度およびその冷却速度を反映している。TiC コア/グラファイトマントル構造が形成されるための条件は $1 < C/O \lesssim 1.4$ であることを見いだした。粒径を再現する条件は、質量放出率 $\dot{M}$ 、ガスの放出速度 v 、炭素星の光度 L_* が $0.5 < v_{0.1} \dot{M}_5^{-1/2} L_4^{1/4} < 1.2$ とまとめられることがわかった。ここで $v_{0.1}$, $\dot{M}_5$, L_4 の単位はそれぞれ 0.1 km sec^{-1} , $10^{-5} M_\odot \text{ yr}^{-1}$, $10^4 L_\odot$ である。ただしこの研究では、TiC が完全に成長した後にグラファイトが降り積もると仮定した。

研究をさらに発展させ上記の仮定をはずし、TiC 粒子の生成と成長途中の TiC 粒子表面上でのグラファイトの不均質凝縮を定式化し、プレソーラー TiC コア/グラファイトマントル粒子の生成条件をより精密に解明した。

結果を図1に示した。左から順に質量放出率 $\dot{M} = 10^{-5}, 10^{-4}, 10^{-3} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ での生成条件である。質量放出率 $\dot{M} = 10^{-5}, 10^{-4} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ は典型的な炭素星の質量放出率の範囲内であり、 $10^{-3} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ は AGB 段階の最後にごく短いタイムスケールで起こる superwind phase に対応する。炭素星の光度は一般的な炭素星の光度である $L_{*} = 10^4 L_{\odot}$ を用いた。

生成条件は“allowed region”で示した範囲である。“allowed region”はTiCがグラファイトよりも先に凝縮する条件 (“ $T_c(\text{TiC}) = T_c(\text{C})$ ”), TiC コアとグラファイトマンツルのサイズの分析値から決まる条件 (マンツルサイズの最大値=“mantle max”, 最小値=“mantle min”, コ

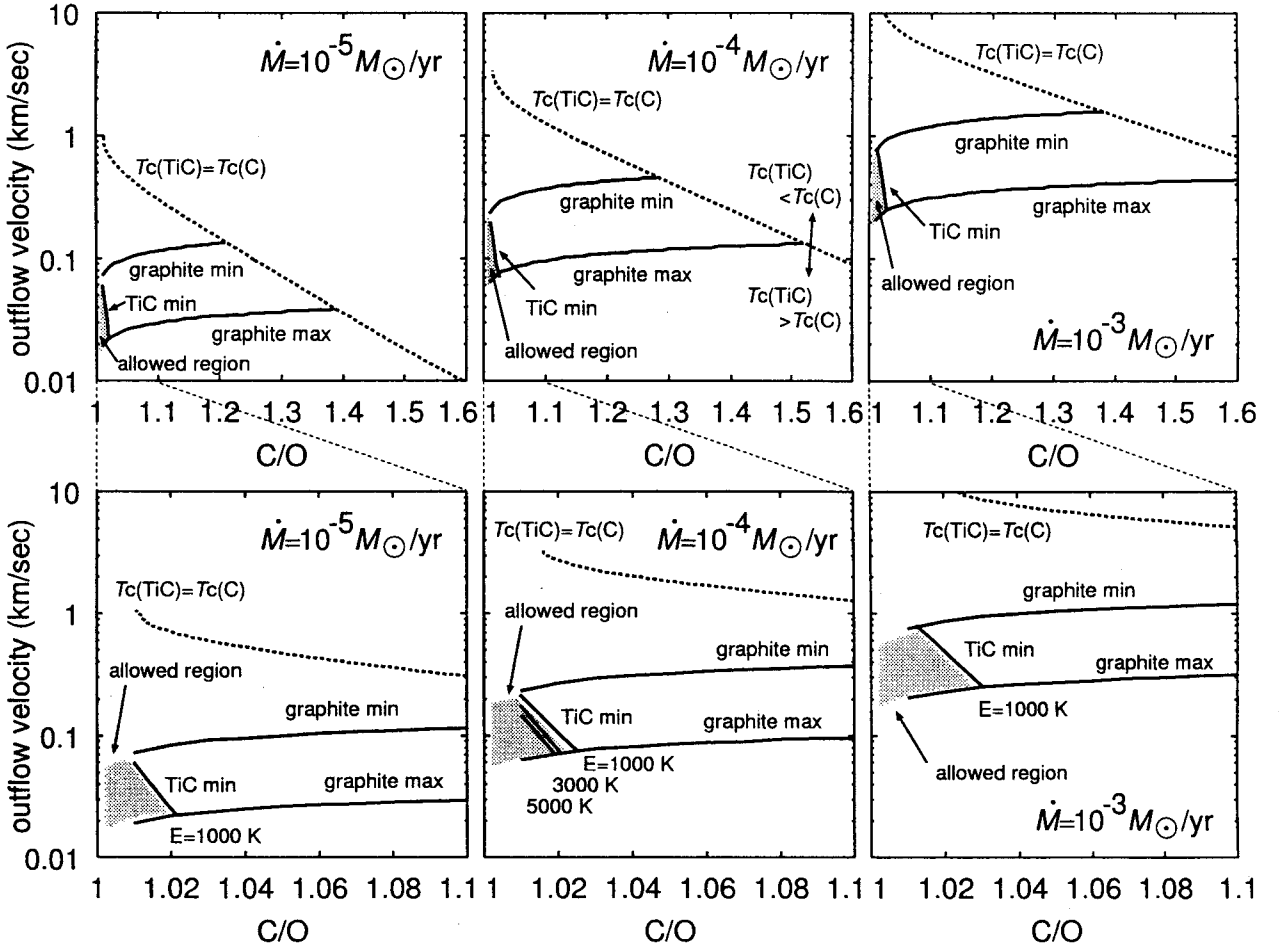


図 1: プレソラー TiC コア/グラファイトマンツル粒子の生成条件

アサイズの最小値=“core min”)を満たす範囲である。生成領域の C/O 比は $1 < \text{C/O} < 1.03$ である。ガスの放出速度は $0.2 < v_{0.1} \dot{M}_5^{-1/2} L_4^{1/4} < 0.8$ の範囲内である。圧力に換算すると $0.02 < P < 0.6 \text{ dyne cm}^{-2}$ に相当する。生成条件は Chigai et al. (1999) [7] と比べてより厳密になった。

プレソラー TiC コア/グラファイトマンツル粒子は C/O 比の小さい炭素星の普通の圧力条件下で生成したと結論づけることができる。ガスの放出速度は、TiC が subsonic 領域の内側でグラファイトよりも先に凝縮し、その後凝縮したグラファイトが dust driven wind の担い手となるという、炭素星からの定常 dust driven wind の描像 [10, 11] と矛盾しない。

参考文献: [1] Zinner, E. 1997, AIP Conf. Proc., 402, 3. [2] Bernatowicz, T. et al. 1991, ApJ, 373, L73. [3] Bernatowicz, T. et al. 1996, ApJ, 472, 760. [4] Lodders, K., & Fegley, B. 1993, Meteoritics, 28, 387. [5] Lodders, K., & Fegley, B. 1995, Meteoritics, 30, 661. [6] Sharp, C., & Wasserburg, G. 1995, Geochim. Cosmochim. Acta, 59, 1663. [7] Chigai, T. et al. 1999, ApJ, 510, 999. [8] Yamamoto, T., & Hasegawa, H. 1977, Prog. Theor. Phys., 58, 816. [9] Kozasa, T., & Hasegawa, H. 1987, Prog. Theor. Phys., 77, 1402. [10] Fleischer, A. J. et al. 1992, A&A, 266, 321. [11] Cherchneff, I. et al. 1992, ApJ, 401, 269.

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 小 笹 隆 司

副 査 教 授 渡 部 重 十

副 査 助 教 授 橋 元 明 彦

副 査 教 授 山 本 哲 生 (名古屋大学大学院理学研究科)

学 位 論 文 題 名

不均質プレソーラー粒子の生成条件

微量同位体分析の精度の向上により、炭素質隕石から抽出されたミクロンサイズ以下の微粒子のなかに太陽系組成と大きく異なる同位体組成を持つものが発見された。これらの粒子はプレソーラー粒子と呼ばれ、太陽系形成以前に、進化した星の周りで形成され、太陽系形成時に隕石中にとりこまれたものである。プレソーラー粒子は、星の内部での元素合成、星間塵の形成過程、生成時から惑星系形成に至るまでの星間物質の進化に関する貴重な情報を保持している。1996年には、マーチソン隕石から抽出された炭素質起源と考えられるグラファイト粒子の透過電子顕微鏡観察により、中心に TiC 粒子が存在する不均質構造を持つ粒子が発見され、そのサイズも明かにされた。これらの粒子は先に凝縮した TiC を核としてグラファイトが凝縮したものである。その生成環境は、化学平衡計算で得られた凝縮順序に基いて議論されていたが、気相から固体微粒子の凝縮過程は非平衡過程である。また、形成場所の物理、化学条件を反映する粒子サイズや不均質構造に関する情報は化学平衡計算から得られない。

申請者は、炭素質星周領域での TiC とグラファイトの生成条件を明かにするために、凝縮核形成と成長時の化学反応を考慮した均質および不均質凝縮核形成・成長過程を定式化し、TiC 粒子生成とその後に競合して起るグラファイトの均質および不均質凝縮核形成・成長を調べた。その結果、(1) TiC 粒子がグラファイトよりも先に凝縮する炭素質星周領域では、グラファイトは TiC 粒子上に不均質凝縮し、均質なグラファイト粒子は形成されない。(2) 測定された TiC core と graphitic mantle のサイズを同時に再現するには、形成場所での炭素元素と酸素元素の存在比 (C/O 比) は 1.03 以下であり、全ガス圧 P は $0.02 < P < 0.6 \text{ dyn/cm}^2$ の範囲でなければならないことを明かにした。

本申請論文は、世界に先駆けて、粒子形成の素過程を考慮し、観測された不均質構造と測定されたコアとマントルサイズを制約条件として、隕石中で発見された TiC core-graphitic mantle 粒子の炭素質星周領域での生成条件を考察したものである。本論文で導出された均質および不均質固体微粒子形成の素過程を記述する基礎方程式は、各種天体での種々の固体微粒子生成を取り扱う際に適用され得るものであり、これまで主として化学平衡凝縮論を使って考察されていた惑星系原物質である星間塵の起源や惑星系形成に至るまでの物質進化の研究に新たな展開と知見を与えるものであると高く評価できる。

よって審査員一同は、申請者が北海道大学博士（理学）の学位を授与される資格があるものと認める。