

Formation of SiC and Carbon Grains in Dust-Driven Wind around Pulsating Carbon-Rich Asymptotic Giant Branch Stars

(脈動する炭素に富む漸近巨星分枝星の周縁部で固体微粒子により
駆動される星風中での炭化ケイ素と炭素微粒子の形成)

学位論文内容の要旨

低質量星および中質量星は Thermally Pulsing AGB 段階で質量の大半を失う。特に C-rich AGB stars からの質量放出現象は炭素(C)ダストの形成過程を考慮した dust-driven wind 流体モデルによって再現されている。その質量に富む星風の中では C ダストだけでなく炭化ケイ素(SiC)ダストや硫化マグネシウム (MgS)ダストなども形成されると考えられている。特に SiC ダストは隕石中に比較的多く含まれおり、その同位体組成比から約 90% の presolar SiC ダストは C-rich AGB stars 起源であることが判明している。C-rich AGB stars の周縁部で形成される SiC ダストの量はそのダストが起源だと考えられている 11.3 μm feature を含む近赤外領域から中間赤外領域にわたる観測で得られたスペクトル分布を、C と SiC ダストの空間分布とサイズ分布を仮定した輻射輸送計算により導出したモデルスペクトルと比較することでおおまかに見積もられている。また、C-rich AGB stars で形成された SiC ダストのサイズ分布も隕石から抽出された presolar grains の分析から明らかになってきた。その一方で C-rich AGB stars 周縁部での SiC ダストの形成過程および形成場所は依然として不明であり、また質量放出現象をよく再現する dust-driven wind 流体モデルでもその形成は取り扱われていない。本論文ではCダストと共にC-rich AGB stars 周縁部での SiC ダストの形成過程を理論的に考察し、dust-driven wind の枠組みで SiC の形成を取扱い、天体観測や presolar SiC grains の分析から推測される SiC ダストの量およびそのサイズと比較し、形成過程及び形成領域を明らかにする。

まず最初に Gail & Sedlmayr (1988)の手法に従って炭素と SiC ダストの形成および蒸発過程を定式化した。その際、蒸発によるダストの消失率を適切に見積もり、サイズ分布を明らかにするためにサイズ分布を差分化し逐次追跡する方法を導入した。次に断熱的に振動している炭素に富む気体中での炭素や SiC ダストの核形成および成長過程を調べ、SiC ダストの形成過程について議論した。この試みから C-rich AGB stars 周縁部での SiC ダストは以下の過程を経て形成されると考える。核形成過程の起点となる分子(starting molecule)は気相にある SiC 分子と Si₂C₂分子であり、核形成過程は SiC 分子や Si₂C₂分子の付着によって進行する。核形成した後、小さい SiC 粒子はシリコンを含有し、存在量の

多い Si 原子、 Si_2C 分子との衝突とその際の化学反応によって成長する。次に脈動によって誘発される球対称 dust driven wind 流体モデルを構築し C-rich AGB stars 周縁部での C ダストと SiC ダストの形成および形成されるダスト量とそのサイズ分布を調べた。

計算は SiC クラスターの温度がガスの温度と同じであるとした場合 (LTE case) と SiC クラスターの温度が小さい SiC ダストの温度と同じであるとした場合 (non-LTE case) で行った。LTE case では、SiC ダストの形成領域は星の中心から星の半径の 4 倍程度の場所であり、C ダストの形成領域よりもやや外側である。形成される SiC ダストの量やサイズは天体観測及び隕石の分析から見積もられる値に比べて非常に小さい。一方、non-LTE case では、SiC ダストの形成領域は C ダストの形成領域とほぼ同じかやや内側に位置する。形成される SiC ダストの量やサイズは天体観測及び隕石の分析から見積もられる値と同程度になる。以上の計算結果から、C-rich AGB stars 周縁部での SiC ダストは主に SiC 分子を starting molecule とし、均質核形成過程を通じて形成される。その際には、ガスと SiC クラスターの温度は同一ではなく inverse green house 効果が重要な役割を果たしていることがわかった。

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	特任教授	藤 本 正 行
副査	教授	羽 部 朝 男

学位論文題名

Formation of SiC and Carbon Grains in Dust-Driven Wind around Pulsating Carbon-Rich Asymptotic Giant Branch Stars

(脈動する炭素に富む漸近巨星分枝星の周縁部で固体微粒子により
駆動される星風中での炭化ケイ素と炭素微粒子の形成)

主系列段階での質量が太陽質量の 1~8 倍程度の星の進化終末期にある漸近巨星分枝 (AGB) 星は我々の銀河中に存在する星間固体微粒子 (星間ダスト) の主要な供給源であり、その質量放出機構および形成されるダストの種類、サイズ、量を明らかにすることは、銀河の星形成史や物質循環の解明と密接に関連する重要な研究課題である。AGB 星のなかで炭素に富む (炭素過多) AGB 星は主系列段階での質量が太陽質量の 1.5 から 4 倍程度の星の進化終末期にあり、星からの星風による質量放出現象は、星表面近くでの脈動によって持ち上げられ冷却したガス中で形成した炭素微粒子 (炭素ダスト) に働く輻射圧によって駆動されるとする pulsation-enhanced dust-driven wind 機構に基づく流体力学モデルで再現できることが知られている。炭素過多 AGB 星の星風中には炭素ダストだけでなく炭化ケイ素微粒子 (SiC ダスト) も存在し、天体観測の結果からその存在量は炭素ダストに対する質量比で 0.01~0.3 程度と見積もられている。更に、隕石から抽出された presolar grains (前駆太陽系ダスト) にはその同位体組成から炭素過多 AGB 星起源の半径が $0.2\sim0.7\mu\text{m}$ 程度の SiC ダストが数多く発見されている。にも関わらず、炭素過多 AGB 星の星風中での SiC ダストの形成過程と形成条件や形成領域は未だ明らかではなく、質量放出現象をよく再現する流体力学モデルでも取り扱われていないのが現状である。

申請者は、炭素過多 AGB 星での SiC ダストの形成過程、形成条件と形成領域を解明することを目的として、質量放出現象を取り扱うために必要なダスト形成過程と輻射輸送過程を組み込んだ流体力学モデルを構築し、従来の研究で取り扱われていなかった SiC ダストの形成・成長過程を物性および熱力学データをもとに考察して、炭素ダストだけでなく SiC ダストの形成を含む流体力学計算を世界で初めて実行した。その結果、炭素ダストの形成により形作られる炭素ダスト殻が星風中のガスの密度温度構造を支配し SiC ダストの形成条件と形成場所に大きな影響を及ぼす。SiC ダストの形成に際して通常暗黙に仮定されているガスの温度と凝縮核の温度が等しいとした場合には、SiC

ダストは炭素ダスト形成後の加速膨張する低密度ガス中で形成され、観測にかかる量の SiC ダストは形成されない。一方、凝縮核の温度が微小な SiC ダストの温度と等しいとして凝縮核の温度とガスの温度の違いによる非平衡効果を考慮した場合には、凝縮核の温度がガス温度より低くなり、SiC ダストは炭素ダスト形成前かほぼ同時に形成され、形成される SiC ダストの量とサイズ分布はそれぞれ天文観測と隕石から抽出された SiC ダストの分析から得られた結果に匹敵することを示した。即ち、申請者は炭素過多 AGB 星の星風中での SiC ダストの形成に際しては凝縮核とガスの温度の違いによる非平衡効果が決定的な役割を果たすことおよび SiC ダスト形成場所とその形成条件を世界に先駆けて明らかにした。宇宙の典型的なダスト形成領域ではガス密度は低くまた比較的強い輻射が存在しており、ダスト形成時に凝縮核とガスの温度の違いによる非平衡効果が働くことが期待され、本論文で明らかにされたダスト形成時の非平衡効果に関する知見は天体環境下でのダスト形成および関連する研究分野の研究の進展に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（理学）の学位を授与される資格あるものと認める。