

学 位 論 文 題 名

Experimental studies on the metamorphism  
of interstellar organic materials in the solar nebula  
and meteoritic parent bodies

（原始太陽系星雲および隕石母天体における星間有機物の変成作用）

学位論文内容の要旨

分子雲には鉱物、星間有機物（分子雲有機物（MC）＋低密度雲有機物（DC））、氷からなる  $0.1\mu\text{m}$  程度の固体微粒子（星間塵）が存在する。星間塵は惑星系の材料となった物質であり、原始太陽系星雲で星間塵から 10 km 程度の微惑星が形成され、さらに微惑星から 100 km 程度の隕石母天体が形成される。この間、星間塵は原始太陽系星雲内で加熱を受け、揮発性分子の蒸発や熱分解ならびに固体の構造・化学組成が変化する「蒸発変成作用」を受ける。また、隕石母天体内部では、星間塵中の鉱物や有機物が水（氷が融けてできた）と反応する「水質変成作用」を受ける。その後、隕石母天体はさらに加熱され、水質変成を受けた鉱物や有機物は「熱変成作用」を受ける。星間塵の原始太陽系星雲や隕石母天体内部での変成作用は、惑星材料物質の化学組成・構造に大きな影響を与えると考えられる。しかしながら、これまでは鉱物と氷の変成作用に関する研究が中心であり、星間有機物の変成作用に関する研究は行なわれてこなかった。本研究では、分子雲や原始太陽系星雲に大量に存在する星間有機物に着目し、蒸発変成実験および水質・熱変成実験により、星間有機物がどのように変化するかを明らかにする。実験結果をもとに、星間有機物の原始太陽系星雲内での存在状態や星間有機物の蒸発が星雲ガスの酸化還元状態に与える影響を議論する。さらに、隕石母天体内部での水質・熱変成過程による、有機物の変成過程を議論する。

実際の星間有機物を手に入れることができないため、星間空間で分子雲有機物や低密度雲有機物が生成される過程を再現する実験で得られた有機物の分析結果をもとに、試薬を調合して「星間有機物のアナログ物質」を作製した。このアナログ物質を用いて実験を行った。蒸発変成は、アナログ物質 (MC+DC) 約 30 mg を石英ガラス製のるつぼに入れ、真空チェンバー内 ( $10^{-8}$  Torr) において 80 時間一定温度 ( $40\sim 400^{\circ}\text{C}$ ) で加熱する蒸発変成実験により再現した。四重極質量分析計を用いて発生ガスの質量分析を行った。また、蒸発残渣の質量を測定し、元素組成 (C,H,N) を元素分析計で測定した。水質変成は、星間有機物のアナログ物質 (MC) と水を混合 (2:3) した試料約 500 mg をテフロン容器に封入し、ステンレス製高圧容器内で 7 日間加熱 ( $100^{\circ}\text{C}$ ,  $200^{\circ}\text{C}$ ) する水質変成実験により再現した。実験後、 $-30^{\circ}\text{C}$  で 72 時間凍結乾燥させ、凍結乾燥試料を得た。熱変成は、凍結乾燥試料約 30 mg を真空下 ( $8\times 10^{-8}$  Torr) で常温から各加熱温度 ( $50\sim 600^{\circ}\text{C}$ ) まで加熱し、80 時間一定温度に保つ蒸発実験により再現した。実験後、蒸発残渣の質量を測定し、元素分析計、赤外分光計、透過型電子顕微鏡、ラマン分光計を用いて分析を行なった。

蒸発変成実験では、分子雲有機物の大部分が  $100^{\circ}\text{C}$  までに、低密度雲有機物は  $180^{\circ}\text{C}$  までに蒸発することが分かった。また、発生ガスの質量分析により、これらの有機物の大部分は分解を伴って蒸発することが分かった。実験結果をもとに、原始太陽系星雲の温度分布を示すモデルを用いて原始太陽系星雲内での星間有機物の存在状態を推定した。その結果、原始太陽系星雲内で星間塵中に有機物が存在したのは 2.1AU (1AU=太陽地球間の距離) よりも外側の領域であり、2.1 AU よりも外側では低密度雲有機物が、2.7AU よりも外側では低密度雲有機物に加え分子雲有機物が存在していることが明らかになった。また、実験結果をもとに、星間有機物の蒸発が原始太陽系星雲の酸化還元状態に与える影響を議論した。星間有機物を含む星間塵が原始太陽系星雲内で濃集したとき、星間塵の完全蒸発により、2.4 AU 付近に星雲ガスの局所的な強還元状態 ( $\text{C/O}\approx 1$ ) が実現できることがわかり、強度に還元的な隕石 (E 型) の成因が明らかになった。このことは、小惑星・隕石

形成過程を議論する際に星間有機物が重要な役割を果たしていることを示している。

水質・熱変成実験から、100℃で水質変成をさせた試料を 400℃まで加熱した場合、Allende 隕石の C, N 含有量をうまく説明でき、Allende 隕石が経験した母天体の最高加熱温度にもよく一致することがわかった。また、200℃で水質変成をさせた場合、200-300℃の加熱で Orueil 隕石の C, N 含有量を説明でき、Orueil 隕石の水質・熱変成の温度とよく一致することがわかった。さらに、600℃まで加熱した試料は、B-7904 隕石の C, N 含有量だけでなく、B-7904 隕石が経験した隕石母天体での加熱温度とも一致することが分かった。本研究により、炭素質隕石中の有機物の C, N 含有量の違いは、有機物が受けた水質変成温度や熱変成温度を反映していることを明らかにした。赤外分光計を用いた分析でも 200℃で水質変成をさせ 300℃まで加熱した試料は Orueil 隕石中の有機物のスペクトルとよく一致することがわかった。透過型電子顕微鏡とラマン分光計を用いた分析から、200℃で水質変成をさせた試料を加熱（200～400℃）すると、グラファイトやアモルファスカーボンの他にダイヤモンドが形成されることを発見した。炭素質隕石中のダイヤモンドの起源として、炭素質隕石母天体での水質・熱変成作用が重要であることを明らかにした。本研究により、星間有機物と炭素質隕石中の有機物やダイヤモンドとの関連性が明らかになった。

今後は、試料と水の混合比や圧力条件を変えた水質変成実験を行なうことにより、星間有機物と炭素質隕石中の有機物の関連性がより一層明らかにされることが期待される。また、水質変成試料を用いた衝撃変成実験を行なうことにより、強い衝撃を受けて生成された隕石中のダイヤモンドの成因を解明できると期待される。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 香 内 晃

副 査 教 授 前 野 紀 一

副 査 助 教 授 水 野 悠 紀 子

副 査 教 授 小 笹 隆 司 (北海道大学大学院理学研究科)

## 学 位 論 文 題 名

### Experimental studies on the metamorphism of interstellar organic materials in the solar nebula and meteoritic parent bodies

(原始太陽系星雲および隕石母天体における星間有機物の変成作用)

星間分子雲には鉱物、星間有機物(分子雲有機物(MC) + 低密度雲有機物(DC))、氷からなる  $0.1\ \mu\text{m}$  程度の固体微粒子(星間塵)が存在する。星間塵は惑星系の材料となった物質であり、原始太陽系星雲で星間塵から  $10\ \text{km}$  程度の微惑星が形成され、さらに微惑星から  $100\ \text{km}$  程度の隕石母天体が形成される。この間、星間塵は原始太陽系星雲内で加熱を受け、揮発性分子の蒸発や熱分解ならびに固体の構造・化学組成が変化する「蒸発変成作用」を受ける。また、隕石母天体内部では、星間塵中の鉱物や有機物が水(氷が融けてできた)と反応する「水質変成作用」を受ける。その後、隕石母天体はさらに加熱され、水質変成を受けた鉱物や有機物は「熱変成作用」を受ける。星間塵の原始太陽系星雲や隕石母天体内部での変成作用は、惑星材料物質の化学組成・構造に大きな影響を与えると考えられる。しかしながら、これまでは鉱物と氷の変成作用に関する研究が中心であった。そこで、本研究では、星間有機物が原始太陽系星雲内で受ける蒸発変成作用、および隕石母天体で受ける水質変成・熱変成作用を調べるために、星間有機物のアナログ物質を用いた蒸発変成実験、および水質・熱変成実験をおこなった。

まず、原始太陽系星雲内での星間有機物の存在状態を明らかにするために、星間有機物のアナログ物質を用いた蒸発実験を行った。星間有機物のアナログ物質約  $30\ \text{mg}$  を石英ガラス製のるつぼに入れ、真空チェンバー内 ( $10^{-8}\ \text{Torr}$ ) において  $80$  時間一定温度で加熱 ( $40\text{--}400\ ^\circ\text{C}$ ) した。実験後、蒸発残渣の質量を測定し、元素組成(C,H,N)を元素分析計で測定した。その結果、分子雲有機物は  $100\ ^\circ\text{C}$  で、低密度雲有機物は  $180\ ^\circ\text{C}$  で蒸発することが分かった。実験で得られた蒸発温度を原始太陽系星雲内での温度分布を示すモデルを使って、太陽からの距離に置き換えると次の結論が得られた。原始太陽系星雲内で、低密度雲有機物(DC)が存在していたのは  $2.1\ \text{AU}$  以遠であり、 $2.7\ \text{AU}$  以遠では、低密度雲有機物に加え分子雲有機物(MC)が星間塵に存在していたことが分かった。本研究により、原始太陽系星雲では、現在の小惑星帯( $2\text{--}3\ \text{AU}$ )で星間有機物が残渣として残ることが始めて

明らかになった。また、2.4 AU 付近での星間有機物の蒸発により、原始太陽系星雲ガスの局所的な強還元状態 ( $C/O=1$ ) が実現できることが明らかになり、これまで明らかになっていなかった強度に還元的な隕石(E 型)の成因が明らかになった。

ついで、隕石母天体での星間有機物の変成過程を明らかにするために、星間有機物を用いた水質・熱変成実験を行った。水質変成は星間有機物のアナログ物質(MC)と水を 2:3 に混合した試料 (約 500 mg) をテフロン容器に封入し、ステンレス製高圧容器内で 7 日間加熱 ( $100^{\circ}\text{C}$ ,  $200^{\circ}\text{C}$ ) する実験により再現した。熱変成は、水質変成実験後、凍結乾燥試料約 30 mg を真空下で加熱 ( $50-600^{\circ}\text{C}$ ) することにより再現した。実験後、蒸発残渣の質量を測定し、元素分析計、赤外分光計、透過型電子顕微鏡、ラマン分光計を用いて分析を行った。その結果、炭素質隕石中の C, N 含有量の違いは、星間有機物が受けた水質変成温度および熱変成温度を反映していることが分かった。これまで、炭素質隕石中の C, N 含有量の違いは、母天体での熱変成の度合いを反映しているものと考えられていたが、水質変成の温度の違いが、星間有機物の変成作用に大きな影響を与えていることが明らかになった。また、電子顕微鏡による分析の結果、星間有機物の水質・熱変成過程でダイヤモンドが形成されることを発見した。炭素質隕石中で見つかったダイヤモンドの起源にはいくつかの可能性が考えられており、最近の研究では太陽系内でダイヤモンドが生成される可能性が示唆されている。しかし、太陽系内のどこでダイヤモンドが形成されたのかはまだ明らかになっていない。本研究の成果は、炭素質隕石母天体がダイヤモンドの供給源と成り得ることを実験的に明らかにしたという点である。このことは、炭素質隕石中のダイヤモンドの起源を議論する上で非常に興味深い結果である。

以上、申請者は、星間有機物と炭素質隕石中の炭素質物質 (有機物、ダイヤモンド) との関連性に関する興味深い新知見を得た。よって申請者は博士 (地球環境科学) の学位を受けるのに十分な資格を有するものの判定した。