

有機質星間塵の惑星系形成への影響

小惑星，隕石起源論の残された謎に迫る

香内 晃¹，工藤 達行¹，中野 英之¹

1. 有機物研究の重要性

最近，宇宙空間に大量の有機物が存在することが，次々に明らかになってきた．ハレー彗星の塵から，有機物からなる塵（いわゆるCHON粒子）が発見された．赤外線宇宙望遠鏡による観測で，宇宙空間にはいたるところに有機物の塵が存在することが明らかになった．さらに，彗星コマの電波望遠鏡による観測から，有機物の塵起源と思われる有機分子が見つかった．また，有機物が宇宙空間に大量に存在するであろうことは，元素の宇宙存在度を見ても直感的に理解できる．Si, Mg, Feより，C, O, Nの存在度のほうが一桁大きいのである．

分子雲中の星間塵が太陽系の材料物質になったので，惑星系の起源や進化を議論する際には，星間塵の加熱蒸発過程や衝突・付着成長過程は，まず最初に明らかにしなければならない重要な素過程である．これまでの，鉱物と氷に着目した研究がなされてきたが，有機物に着目した研究はほとんど行われてこなかった．大量に存在する物質の本質的な重要性はいまさら指摘するまでもないが [1]，それらの物質を無視すると間違った議論を展開する危険性が大きくなる．私たちはこのような観点から，有機物の重要性を認識するようになり，惑星系の材料物質としての有機物の研究を開始した．

本稿では，まず，有機質星間塵が原始太陽系星雲でどのように蒸発するかを明らかにする．ついで，そ

れらの有機質星間塵が惑星系集積にどのような影響を与えるかを議論するために，有機物の衝突・付着特性を調べた．それらの結果をもとに，未解決の小惑星，隕石関連諸問題を議論する．ただし，本稿の後半の議論は作業仮説の段階で十分に練られたものではないが，編集委員会の注文もあり，今後の議論のたたき台としてあえて提示することをお断りする．

2. 有機質星間塵

はじめに，研究の出発点となる星間塵を概観してみよう(図1)．分子雲には鉱物を核として，低密度雲で変成を受けた有機物，分子雲で光化学反応で生成された有機物，アモルファス氷，それに微小な炭素質微粒子からなる星間塵が存在する[2,3]．

私たちは有機質星間塵を直接手にすることができ

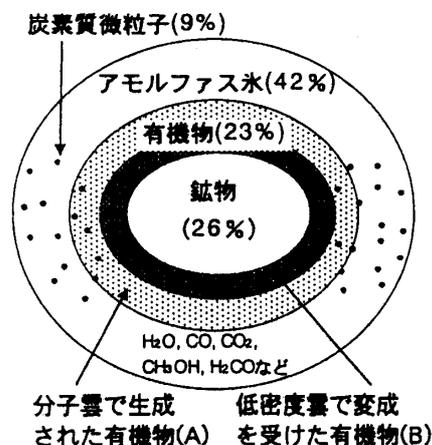


図1 Greenbergの星間塵モデル．数字はそれぞれの物質の質量比を示す．

¹ 北海道大学 低温科学研究所

表1 モデル有機物の処方箋

	用いた試薬	分子量	化学式	質量(%)
	acetamide	59.1	CH ₃ CONH ₂	4.07
	urea	60.1	H ₂ NCONH ₂	0.53
	ethylene glycol	62.1	HOCH ₂ CH ₂ OH	1.15
	glycolic acid	76.1	HOCH ₂ COOH	7.24
	lactamide	89.1	CH ₃ CH(OH)CONH ₂	5.40
	glycerol	92.1	HOCH ₂ CH(OH)CH ₂ OH	1.41
	hexamethylene tetramine	140.2	C ₆ H ₁₂ N ₄	0.67
	indene	116.2	C ₉ H ₈	4.68
	1,2-dimethylnaphthalene	156.2	C ₁₀ H ₈ (CH ₃) ₂	1.62
A	1,4-diiisopropenyl benzene	158.2	C ₈ H ₄ [C(CH ₃)=CH ₂] ₂	1.96
	cyclohexyl phenyl ketone	188.3	C ₈ H ₁₁ COCH ₃	4.97
	4'-cyclohexylacetophenone	202.3	C ₈ H ₁₁ C ₆ H ₄ COCH ₃	4.38
	4-(1-adamantyl)phenol	228.3	C ₁₆ H ₁₅ C ₆ H ₄ OH	1.29
	4,4'-methylenebis(2,6-dimethylphenol)	256.3	C ₁₇ H ₂₀ O ₂	1.43
	aa'-bis(4-hydroxyphenyl)-1,4-diiisopropylbenzene	346.5	HOCH ₂ C ₆ H ₄ C(CH ₃) ₂ C ₆ H ₄ C(CH ₃) ₂ C ₆ H ₄ OH	0.14
	phenanthrene	178.2	C ₁₄ H ₁₀	6.81
	lauric acid	200.3	CH ₃ (CH ₂) ₁₀ COOH	3.82
	sebacic acid	202.3	HOOC(CH ₂) ₈ COOH	3.87
	eicosanoic acid	312.5	CH ₃ (CH ₂) ₁₈ COOH	5.97
	phenanthrene	178.2	C ₁₄ H ₁₀	5.24
	pyrene	202.3	C ₁₆ H ₁₀	4.34
B	benzopyrene	252.3	C ₂₀ H ₁₂	6.67
	benzoperylene	276.3	C ₂₂ H ₁₂	3.91
	coronene	300.4	C ₂₄ H ₁₂	18.43

ないので、アナログ物質を作製し、それを用いて蒸発変成および衝突付着実験を行うことにした。有機質星間塵のアナログ物質は、シミュレーション実験の化学分析データ[4-6]を参考にし、できるだけそれらに忠実になるように試薬を用いて調製した(表1)[7]。「分子雲で生成された有機物」をAとし、「低密度雲で変成を受けた有機物」をBとした。本稿ではこれらを「モデル有機質星間塵」と呼ぶ。Aには、アルコール、アミド、芳香族化合物、-CH₂が直鎖状に連なったカルボン酸などが含まれる。酸素と窒素を含む化合物はすべてAに含まれている。Bとしては、多環式芳香族炭化水素を用いた。Bには炭素と水素しか含まれていない。

3. 蒸発変成過程[4,5]

原始太陽系星雲での有機物の分布を明らかにするために、有機質星間塵(A+B)の加熱実験をおこなった[7,8]。試料を石英ガラスのるつぼに入れ、真空チェンバー(8x10⁻⁸ Torr)内で目的とする温度で80時間加熱する実験をおこなった。最高加熱温度に達してか

ら20時間以降は蒸発がほとんど起きないので、80時間加熱の実験結果を原始太陽系星雲での加熱現象に適用することができるとみなした。加熱終了後、蒸発残渣を秤量し、元素分析(C,N,H)をおこなった。

図2に蒸発残渣の質量および元素組成の温度依存性を示す。100℃までに出発物質の約75%が蒸発し、180℃までに約98%の出発物質が蒸発することがわかった。また元素組成をみると、100℃までに出発物質に含まれているOとNの大部分、すなわち、Aが蒸発したことがわかる。いっぽう、100℃以上での蒸発残渣はCとHが大部分を占める。さらに、蒸発があまり起こらない100-120℃付近の蒸発残渣の質量は、Bに含まれるコロネンの質量にほぼ一致する。このことから、100℃以上で残る蒸発残渣の大部分はBであることがわかる。図2から24-80℃および140-180℃で大量のガスが発生することがわかり、図3から、前者はわずかに還元的なガス(C/O=5-20)、後者は非常に還元的なガス(C/O=100-170)であることがわかった。

加熱温度と蒸発残渣の質量の関係が明らかになったので、加熱温度を、降着円盤モデル[9]を用いて、太

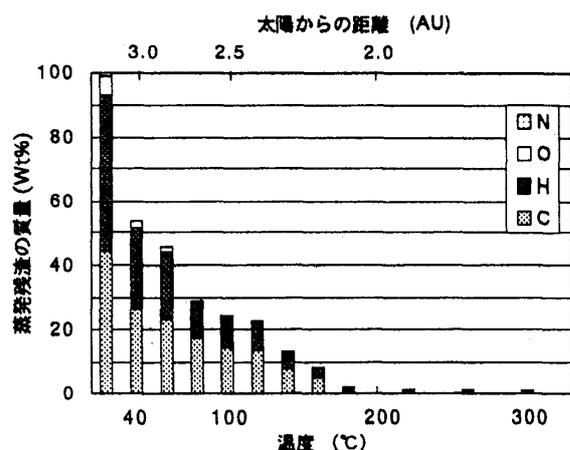


図2 加熱蒸発実験での蒸発残渣の質量の温度依存性。蒸発残渣の元素組成は棒グラフの中にモル比で示した。

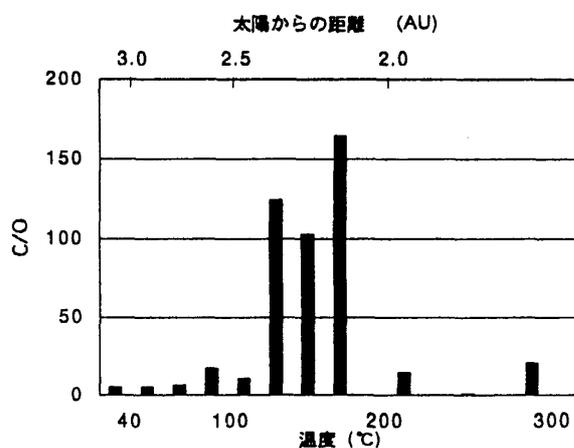


図3 蒸発ガスのC/O比の温度依存性

陽からの距離に換算した(図2.3の上側の横軸)。ここで、円盤の質量輸送率 $=10^7$ 太陽質量/yr, $\alpha=0.005$ とした。星間塵中の有機物は2.1 AUよりも内側の領域ではほとんど蒸発したことがわかる。有機物が存在したのは2.1 AUよりも外側の領域であり、2.1 AUより外側では低密度雲で変成を受けた有機物が、2.5 AUよりも外側では、それに加えて分子雲で生成された有機物が存在していたと結論づけられる。

4. 衝突・付着成長過程[4,7]

星間塵表面に存在する有機物に着目した衝突実験をおこなって、衝突時に付着の起こる最大衝突速度(付着臨界速度)の温度依存性を調べた[7,10]。試料

は、分子雲で生成された有機物(A)を用いた。実験は、銅球(直径9.8 mm)を銅ブロック(厚さ12 mm)上の有機物層(厚さ1 mm)に垂直衝突させる方法で行った。銅球および銅ブロック上の有機物層は、窒素ガス雰囲気下で液体窒素を用いて200-300 Kに冷却した。銅球の射出は自由落下で行い、高さを変えることで衝突速度を変化させた。銅球の衝突速度は、銅ブロック上を横切るように通したレーザー光を銅球が遮蔽した瞬間と、銅ブロック裏面に取り付けられたAcoustic Emission (AE) センサーで検出される銅球の衝突の瞬間の時間間隔から求めた。付着と反発の判断は、AEセンサーからのシグナルとデジタルビデオカメラによる観測によって行った。

分子雲で生成された有機物(A)の付着臨界速度の温度依存性を図4に示す。付着臨界速度は温度が下がるにつれて増加し、250 K付近で最大5 m/sに達する。さらに温度が下がると、付着臨界速度は減少する。mmサイズの他の物質では、鉱物の場合は0.15 m/sの衝突速度でも[11,12]、氷の場合は0.015 cm/sの衝突速度[13,14]でも付着は観測されていない。衝突実験で付着が観測されているのは、 μ mサイズの微粒子に限られていることに注意してほしい。したがって、mmサイズの有機質星間塵は、氷や鉱物より数桁も大きな数m/sの衝突速度でも付着すると結論できる。この結果から、原始太陽系星雲で有機物が星間塵表面に存在した領域では、Weidenschilling and

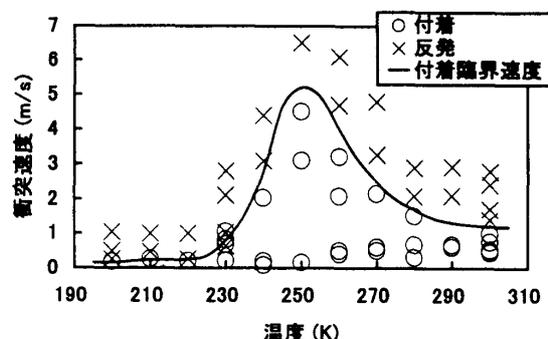


図4 分子雲で生成された有機物(A)の付着臨界速度の温度依存性

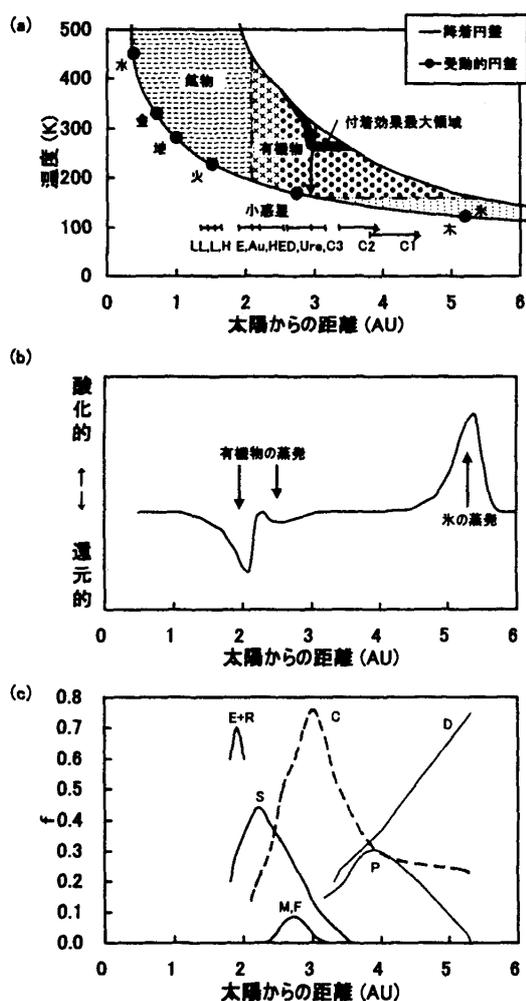


図5 諸データと私達のモデル。(a) 星間塵表面に存在する物質分布と隕石母天体の形成領域、(b) 酸化還元状態、(c) 小惑星のスペクトルタイプ。

Cuzzi[15]が提案したように星雲が乱流状態になっている時でも、星間塵やそれらの集合体の成長が急速に進んだと結論される。

原始太陽系星雲が、降着円盤から受動的円盤へ進化する過程で、星間塵表面に存在した物質が惑星系の形成に与えた影響を考えてみよう。図5aに有機物が星間塵表面に存在していた領域を示す。鉱物と有機物の境界線が縦になっているのは、有機物は、降着円盤時には CH_4 や CO_2 、 H_2O などの小さな分子に分解されて蒸発し(熱分解)、温度が低下した際にも再凝縮しないためである。いっぽう、有機物と氷の境界線が横になっているのは、 H_2O が160 K以下の温度で

氷として凝縮するためである。図5aには、有機物による付着効果が最大となる温度(250K付近の太線)も示してある。星雲の温度が時間とともに図の矢印のように低下した場合、最大10 m/sの乱流があるにもかかわらず、250 K付近で最も効率的な星間塵の付着・凝集成長が起こった。いっぽう、星間塵表面に氷の存在した木星領域や鉱物の存在した地球領域では、乱流のため付着・凝集成長は起こらなかった。したがって、「原始太陽系星雲で有機物が星間塵表面に存在した小惑星領域(2.5-3.5 AU)では、星雲が乱流状態になっているにもかかわらず、それらの集合体や微惑星の成長が急速に進行した」と結論される。

5. 議論 — Big picture —

上述の結論を作業仮説として受け入れると、これまで問題になっている種々の現象が、以下のように統一的に説明できる。

5.1. 小惑星はなぜ小惑星か? [4]

小惑星の特徴は次のようにまとめられる:(a) 現在、小惑星領域に存在する固体物質は非常に少ない(林モデルの面密度より3-4桁少ない)。これは、もともと材料物質がなかったからなのだろうか、それとも材料物質がなくなったからなのだろうか。(b) 通常の惑星に比べて小さな天体が多数ある。これは、大きくなれなかったからなのだろうか、それとも大きな天体が壊れたからなのだろうか。

(a)の「固体物質が非常に少ない」のは、次の理由による。有機物の付着効果によって小惑星は、星雲が乱流状態にあるにもかかわらず、急速に成長した(寡占成長)。小惑星に取り込まれなかった1 mサイズの粒子集合体(質量では大部分を占める)は、ガス抵抗によって急速に内側に落下した(落下のタイムスケールは 10^{23} 年)。それで、2-3.5 AUでは小惑星の材料物質が急速に減ってしまった。したがって、小惑星領

域に固体物質が非常に少ないのは「なくなった=内側に落下した」ためである。

(b)の「小さいものが多数」あるのは「大きな天体が壊れた」のではなく、上の理由(材料物質がなくなった)で「大きくなれずに成長が止まった」ためである。小惑星で破壊が重要になってくるのは、木星形成後で、しかも星雲ガス散逸後の高速衝突が起こりうる段階であるが、この時には、すでに小惑星領域の基本的な姿はできあがっていた。

5.2. 地球・金星はなかなか成長しない

渡邊[16]によると、林モデルの面密度を仮定すると、地球領域には10個くらいの火星サイズの原始惑星が形成されるが、地球サイズの惑星はできない。林モデルの面密度を5倍にすると地球が形成されるが、その場合には、水星・火星が大きくなりすぎる、という問題がある。

この問題も有機物効果で解決可能である。小惑星領域からガス抵抗によって落下してくる1 mサイズの粒子は、雪だるま的に急速に成長しながら(これが本当に起こるかどうかは不明であり、定量的な検討が必須である)地球・金星領域で100 mくらいまで成長する。100 mくらいまで成長するとガス抵抗がきかなくなるので、落下は停止する。これによって、地球・金星領域の面密度を2.5倍にすることができ、地球・金星の成長は十分に可能となる。水星や火星では林モデルの面密度に変化はなかった。図6に降着円盤から受動的円盤にいたる面密度分布の時間変化を示す。

小惑星領域から供給された有機物が地球・金星の材料物質の一部になったことを考えると、地球のバルク組成はこれまで考えられてきたよりも、軽元素(C, H)に富んでいるかもしれない。また、地球の酸素同位体が、火星や普通コンドライトとは異なり、E-コンドライトやオーブライイトと一致していることと調和的である。

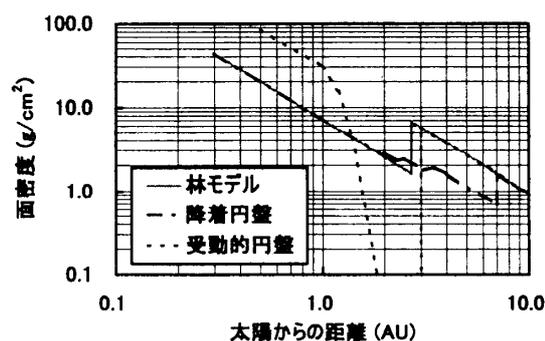


図6 面密度分布の時間変化

5.3. 隕石諸問題

隕石諸問題に答える新しいモデルを提案する。紙面の都合により、ここでは「これまで、どんなことが問題になっていたのか」に関する内容には立ち入らないので、以下に示す解説等を参照して頂きたい:酸化・還元状態[17], 炭素質コンドライト中の有機物[18], コンドリュールの形成機構[19], 酸素同位体[20].

(1) コンドライト-エコンドライト

エコンドライト母天体は、有機物の付着効果によって、コンドライト母天体に比べて急速に成長した。5.1で述べた「小惑星」=「エコンドライト母天体」である。エコンドライト母天体は早期に(乱流がある状態にもかかわらず)しかも急速に成長したので、 ^{26}Al が十分に残っており、それによって火成活動がおこった(表2)。

いっぽう、有機物が星間塵表面に存在しない領域、すなわち、2.1 AUより内側(鉱物微粒子)と3.5 AUより外側(低温のため有機物でも付着しない。後に氷が凝縮)では、乱流のために星間塵の付着成長は進行しなかった。コンドライト母天体は ^{26}Al が十分に残っているうちに成長できなかったため、火成活動はおこらず未分化のままであった。星雲の乱流がおさまってから、2.1 AUより内側では普通コンドライト母天体が、3.5 AUより外側では炭素質コンドライト母天体が形成された。この時点では、 ^{26}Al の量が少なくなり、もはや母天体を溶融させることはできなかった。わずかに残った ^{26}Al で、普通コンドライト母天体ではタイプ47の熟変

表2 隕石母天体の進化

形成場所	<2.1 AU	2.1-2.5 AU	2.5-3.5 AU	>3.5 AU
微粒子表面の物質	鉱物	有機物	有機物	有機物→氷
成長速度	小	中	大	小
形成時代	受動的円盤	降着円盤	降着円盤	受動的円盤
²⁶ Al量	少ない	中間	多い	少ない
進化	加熱変成	熔融・分化	熔融・分化	水質変成
隕石母天体	普通コンドライト	エコンドライト	ユレイライト	炭素質コンドライト
酸素同位体 (¹⁶ O)	乏しい	地球型	富む	富む

成作用が、炭素質コンドライト母天体では氷が融けてタイプ1-2の水質変成作用が起こった。

コンドライトが熔融・分化したものがエコンドライトではなく、それぞれの母天体は異なる領域で形成された。また、母天体が融けるかどうかはサイズによるのではなく、母天体の形成された年代による。

この考えによるとエコンドライトはかなり古いことになる。特に、ユレイライト母天体は太陽系最古の天体と言える。最近このような考えを裏付けるデータが出始めている。ユレイライトのPb同位体年代は 45.63 ± 0.21 億年を示す(cf., CAI 45.66 ± 0.02 億年)[21]。²⁶Alがユークライト(Sm-Nd年代 45.70 ± 0.23 億年)から発見された[22]。

(2) 酸化・還元状態

蒸発ガスのC/Oの測定(図3)から、有機物がほぼ蒸発する2 AU前後での蒸発ガスが最も還元になることがわかる(図5b)。2 AUより内側に行くと徐々に酸化的になる。いっぽう、氷の蒸発によって5 AU付近では酸化的になる。このことから、図5aに示す隕石母天体の形成位置が考えられる。オーブライトやEコンドライトが強還元状態を示すのは、有機星間塵の蒸発によって、星雲ガスが2 AU付近で非常に還元になるためである。今後は、星雲ガスのC/O比の定量的な見積もりが必要である。これまで普通コンドライトではH, L, LLの順に太陽から遠くなると考えられてきたが、逆に並ぶことがわかった。

このように考えると、観測されている小惑星のスペクトル(図5c)[23]とよくあう。普通コンドライトに対応す

る小惑星のスペクトルがメインベルトに見られない事、地球で発見される隕石の大部分は普通コンドライトであること、軌道の決まった普通コンドライトの遠日点は1.5 AU付近を示すことと調和的である。

(3) 炭素質コンドライトの有機物

図5aから2.5 AU以遠で形成された天体の材料物質には有機物がかなり含まれていたことがわかる。始源的なエコンドライトであるユレイライトに炭素質物質がかなり含まれていることは、ユレイライト母天体形成時には有機物が大量に含まれていたことを示している。2-2.5 AUのエコンドライト母天体には、わずかに有機物が入っていたはずだが、その後の火成活動で痕跡はなくなってしまった。この考えによると、有機物が炭素質隕石にしか存在しないことを自然に説明できる。もし、有機物が太陽系星雲起源だとすると、有機物は400 K以下で生成されるので、金星より外側の惑星に存在し、しかも内側の惑星ほど多いことになってしまう。元素組成の詳細な比較からも、炭素質隕石中の有機物は有機質星間塵の変成作用で説明できることが結論されている[8]。

ほとんど加熱変成を受けていない始源的な有機質星間塵は、炭素質コンドライトの母天体であると思われるC型小惑星にではなく、PやD型小惑星に存在するであろう。これらの始源的な小惑星はサンプルリタンのターゲットとして最適であろう。

(4) コンドリュールの形成機構

コンドリュールは、急速に成長して内部がある程度

融けかかったエコンドライト母天体(表面はあまり融けてなく, かなり未分化な状態)と, できたばかりの微惑星(2 AUより内側では鉱物, 3.5 AUより外側では氷を含む)との低速衝突(木星ができる前で星雲ガスがある状態)で形成された。コンドライトにみられるFe含有量の差は, コンドリュールをつくるもとになったエコンドライト母天体の溶融度の差を反映していると考えられる。

したがって, コンドリュールはエコンドライト母天体より新しいことになる。さらに, コンドリュール形成は, 星雲の進化のある時点で起こった1回限りのイベントではなく, 比較的長い時間にわたって継続された現象であるといえる。また, 最も古い年代を示すコンドリュールは, 太陽系最古の天体であるユレイライト母天体起源なので, 普通コンドライトではなく, 炭素質コンドライトに入っているはずである。

この考えを裏付けるデータとして, 以下のような事があげられる:コンドライトに岩石片(エコンドライトの破片も)が入っている[24], 炭素質コンドライト(タイプ3)の中に水質変成を受けた炭素質コンドライト(タイプ2)の破片が入っている[25], コンドリュールの年代が比較的ばらついている[26]。

(5) 酸素同位体

酸素の3同位体プロットで, 質量に依存しない同位体分別(傾きが1)を示す物質は, 炭素質コンドライト中のCAIとコンドリュールおよびユレイライトなどに見られるが, エコンドライトや普通コンドライトには見られない。このことは, その原因が, 2.5 AUより外側にあったことを示唆している。これに該当するのは「分子雲で生成された有機物(A)」か氷である。もし, 氷だとすると, 分子雲で生成された氷が蒸発する, 5 AU付近で同位体異常が現れることになる。これでは炭素質コンドライト等に見られる同位体異常を説明できないので, 同位体異常のキャリアは「分子雲で生成された有機物(A)」ということになる。この有機物と反応した

シリケートなどが同位体異常を示すと考えられる。質量に依存しない同位体分別を作り出すメカニズムとしては, 分子雲での氷への紫外線照射による光化学反応(有機物Aの形成)が, 有力なメカニズムのひとつだと考えられる。今後, 実験的な検証を行う予定である。なお, 「低密度雲で変成を受けた有機物(B)」には酸素はほとんど含まれないので[3], キャリアとしては失格である。

CAIは, FUオリオニスまたはEXオリオニスで降着率が瞬間的に大きくなった時期に, 3-4 AUで形成されたと考える。降着率が瞬間的に大きくなる前には, 図5aの降着円盤と似た様な物質分布が実現されていたはずであり, 3-4 AUにあった「分子雲で生成された有機物(A)」起源のガスと新たに降着してきた物質が高温で反応して, CAIが形成された。

分子雲で生成された有機物(A)が ^{16}O に富んでいると考えると, 太陽に近くなるほど ^{16}O が少なくなることになる。地球が普通コンドライトより ^{16}O に富んでいるのは, 5.2で述べたように, 地球の材料物質が小惑星

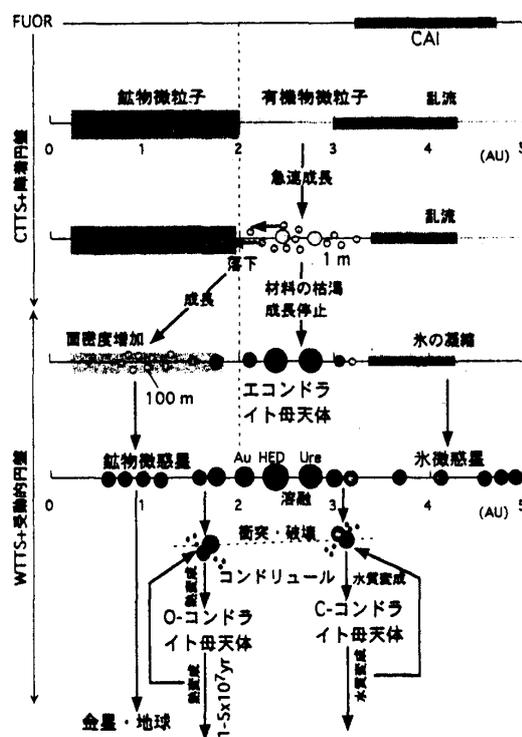


図7 星間塵から隕石母天体までの進化

領域から供給されたためである。

以上の記述は年代を追った話になっていないので、年代順に微粒子から隕石母天体までの進化をまとめたものを示す(図7)。

なお、本稿では、著者の能力と紙面の都合もあり、これまで提案されている種々のモデルとの比較検討はあえて行わなかった。中途半端な比較をするよりは、著者独自の考えを知っていただいたほうが良いと考えたからである。皆様からのコメント、問題点のご指摘などを頂ければ幸いです。この研究は、広い分野にわたる多くの方々と議論に負うところが大きい。共同研究者ならびに私たちの研究に興味を持って議論してくださった方々に感謝するとともに、今後の議論の継続をもお願いする次第です。

参考文献

- [1] 熊沢峰夫, 1983, 鉱物学雑誌 16, 73.
- [2] Greenberg, J.M., 1998, *Astron. Astrophys.* 330, 375.
- [3] 香内 晃, 1994, 遊星人 3, 94.
- [4] Briggs, R. et al., 1992, *Origins Life Evol. Biosphere* 22, 287.
- [5] Greenberg, J. M. and Mendoza-Gomez, C.X., 1991, in *The Chemistry of Life's Origins*, 1.
- [6] Greenberg, J. M. et al., 2000, *Astrophys. J.* 531, L71.
- [7] Kouchi, A. et al., in prep.
- [8] Nakano, H. and Kouchi, A., 2001, submitted to LPSC.
- [9] Bell, K. R. et al., 1997, *Astrophys. J.* 486, 372.
- [10] Kudo, T. et al., 2001, submitted to LPSC.
- [11] Hartman, W. K. et al., 1978, *Icarus* 33, 50.
- [12] Blum, J. and Munch, M., 1993, *Icarus* 106, 151.
- [13] Hatzes, A. P. et al., 1988, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 231, 1091.
- [14] Higa, M. et al., 1998, *Icarus* 133, 310.
- [15] Weidenschilling, S. J. and Cuzzi, J. N. 1993, in "Protostars and Planets III", Levy, E.H. and Lunine, J.I. eds., Univ. Arizona Press, 1031.
- [16] 渡邊誠一郎, 1999, 遊星人 8, 163.
- [17] Krot, A. N. et al., 2000, in "Protostars and Planets IV", Mannings, V. et al. eds., Univ. Arizona Press, 1019.
- [18] Cronin, J. R., 1988, in "Meteorites and the Early Solar System", Kerridge, J. F. and Matthews, M. S. eds., Univ. Arizona Press, 819.
- [19] Hewins, R.H. et al. eds., 1996, "Chondrules and Protoplanetary Disk", Cambridge Univ. Press.
- [20] 比屋根肇, 1999, 遊星人 8, 246.
- [21] 木多紀子, 1999, 地球化学 33, 103.
- [22] Srinivasan, G. et al., 1999, *Science* 284, 1348.
- [23] Bell, J. F. et al., 1989: in "Asteroids II", Binzel, R. P. et al. eds., Univ. Arizona Press, 921.
- [24] Hutchison, R. 1982, *Phys. Earth Planet. Inter.* 29, 199.
- [25] Kracher, A. et al., 1985, *J. Geophys. Res.* 90 Suppl., D123.
- [26] 木多紀子, 1999, 遊星人 8, 256.