

隕石を作った初期太陽系プロセス

原始惑星系の物質大循環

坂本尚義 倉本 圭

太陽とほぼ同じ年齢をもつ隕石に秘められていた原始太陽の活動の記録が明らかになった。生まれたばかりの太陽も、最近観測されている誕生期の恒星のように、非常に活発な活動をしていたようだ。この創生期の原始太陽と星周円盤との間のダイナミックな相互作用が、その後の太陽系の進化を決定したと考えられる。最近明らかになってきた隕石形成時の環境と高精度の年代決定の結果を総合し、原始太陽系で生じたダイナミックな変化についての新しいシナリオを提示しよう<カラーページ参照>。

太陽系の起源や形成過程を探る最大の手がかりは隕石に刻まれた記録を解読することである。なぜなら、コンドライトと呼ばれる隕石は、約 46 億年前、太陽の誕生と同時に形成した最初の天体の破片であるからである。隕石中の記録の解析は、最近、飛躍的に進んでいる。太陽系や隕石の形成時にどのような物理化学的素過程を経たのか、またその年代はいつ頃である中、その詳細な解答が得られつつある。これらの結果、従来考えられていた太陽系形成シナリオの欠陥が明らかとなってきた。新しい地検を総合するグローバルで統一的なシナリオが必要とされている。

コンドライトを顕微鏡やルーペで観察すると、コンドルールと呼ばれるミリメートルサイズの球状物質がミクロンサイズの微粒子のマトリックス中に埋まっているのが見られる(カラーページ)。このような不思議な組織は、地球や月の岩石にはみられない。化学組成の類似性から、コンドルールは宇宙空間においてマトリックス微粒子が瞬時に熔融固結した結果であることがわかった。しかし、この加

熱現象の機構や場については、依然謎につつまれている。コンドルールやコンドライトに相当する物質の形成は太陽系形成初期にのみ起こった不思議な出来事で、現在の太陽系ではこれに相当する物質進化過程はもはや営まれていない。

近年の天体観測の進歩は、太陽系のほかに惑星系が存在することを明らかにし、また、星の誕生している周辺で惑星が形成しつつあることもわかりはじめた¹。これらの観測事実とそのモデル化により誕生期の惑星系の環境と進化について、マクロスケールの知見が得られつつある。もし太陽系が特別な存在でないのなら、現在も隕石のような物質が形成期の星の周辺で形成されていると考えられる。しかしながら、隕石の形成を直接観測することは、しばらくは困難であろう。

したがって、惑星系のマクロスケールの知見を隕石中のミクロスケールの情報と対応づける努力により初めて、星間雲から惑星の形成に至る太陽系物質進化の統一的描像が構築できる。ここでは、物質に刻まれた記録からだけでなく、太陽系の形成・進化

のモデルや、形成期にある星とその周星環境についての観測の最近の進歩を総動員してそれを試みよう。

惑星形成現場の観測とその天体物理

最近の電波天文学の進歩により、生まれたばかりの若い星の周辺に原始惑星系円盤が実際に存在することが明らかにされた²。また、ハッブル宇宙望遠鏡は、これらの若い星の周りの原始惑星系円盤の様子を数十 AU の分解能で明らかにしつつある³。まず、恒星と原始惑星系円盤の形成過程の最近の理解を概観しよう。

太陽系のような惑星系の形成は恒星の形成に付随して起こる。惑星や恒星の材料は星間空間に漂っている星間物質である。その質量のほぼ 99% は水素を主成分とする星間ガスであり、残りの 1% は固体微粒子の星間ダストである。星間物質の分布には密度むらがあり、比較的濃く集まった領域 ($10^{2-3} \text{ H}_2 \text{ cm}^{-3}$ 以上) を分子雲とよぶ。分子雲は約数千万年の寿命をもつ。分子雲中には分子雲コアとよばれるさらに密度の高い領域 ($10^4 \text{ H}_2 \text{ cm}^{-3}$ 以上) がある。分子雲コアは数万 AU の広がりをもち、その質量は太陽質量の数倍程度である。

星形成の最初の段階では、分子雲コアがその自己重力により中心部から収縮してゆく。収縮中心は重力エネルギーの解放により加熱され準静水圧平衡の状態が実現される。この平衡が成り立っている領域は太陽の数倍程度の半径を持っており、原始星とよばれている。原始星は落下するガスの重力エネルギーにより可視光・紫外線・エックス線・高エネルギー粒子を大量に放出している。しかし、大部分の光や粒子は、分子雲コアの外側に残るガスとダストに吸収され、最終的に赤外線として星間空間に放出される。そのために、原始星は明るい赤外線天体として観測される。また、原始星には星の自転極の双方向に噴き出す分子ガス流が観測される。これは双極流とよばれる。このような原始星の段階は数十万年

続く。

中心星へのガスの収縮がさらに進んで、分子雲コア外側のガスの密度が小さくなると、中心星の光が直接観測されるようになる。そして、その周りには惑星系を形成する母体となる原始惑星系円盤も観測される(カラーページ)。このような段階の星は古典的 T タウリ型星 (CTTS) とよばれる。原始惑星系円盤は原始星の段階にはすでに形成されていると考えられているが、原始星段階では分子雲コアのガスに遮られてよく観測できない。

実は、分子雲コアの物質は、自身の角運動量のため、中心星には直接落下できず、遠心力と中心星の重力の釣り合う位置に着地する。こうして形成されるのが、原始星と CTTS の段階における原始惑星系円盤なのである。この時に解放される重力エネルギーにより、原始惑星系円盤自身が熱放射をする。原始惑星系円盤内部では角運動量の再分配が起こり、角運動量を失ったものは徐々に中心星に落ちていく。このときにも重力エネルギーが解放され、円盤の熱放射に寄与する。観測的に、この円盤への質量降着の大きさは、不規則に大きな振幅で変動を繰り返すことが知られている。この CTTS の段階は数百万年続く。

原始惑星系円盤からの熱放出は、やがて観測されないようになる。この段階の中心星を弱輝線 T タウリ型星 (WTTS) とよぶ。WTTS 段階では分子雲コアの収縮が停止し、その結果、原始惑星系円盤への質量降着が不活発になったことを意味している。また、この段階では双極流はほとんど観測されなくなる。したがって、原始惑星系円盤は外部からの物質の供給がほとんどない状態で進化していく。この段階で惑星の形成が起こると考えられている。WTTS 段階は数千万年続く。その後、中心星は星中心で核融合を起こし始め、主系列星へと進化する。

古典的 TTS 段階における双極流の形成

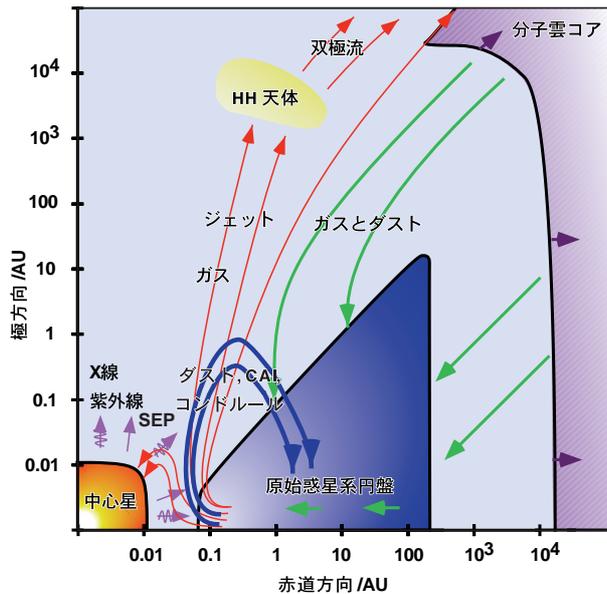


図 1 原始惑星系の模式図(文献⁴に加筆)。座標軸が対数であることに注意。矢印は物質の流れを示す。中心星の周りを取り巻く原始惑星系円盤に分子雲コアからガスとダストが降着している。降着したダストは中心星へと運動する。中心星は可視光・紫外線・X線・高エネルギー粒子を活発に放出し、それにより円盤の最内縁領域は高温に加熱される。この領域で難揮発性ダスト・CAI・コンドルールが形成される。また円盤の最内縁部では中心星の双方の極方向に超音速で流れるガス流(双極流)が発生している。この双極流により円盤内のガスと固体の一部は中心星に落下せず、星間空間や中心星から離れた円盤上へと還流する。

古典的 TTS 段階における原始惑星系円盤の模式図を図 1 に示す。図は対数スケールをとっていることに注意してほしい。物質の流れを矢印で示している。中心星の周りの原始惑星系円盤は半径数 100AU の広がりを持ち、中心星の%オーダーの質量を持っている。分子雲コアの物質(ガスとダスト)は、この原始惑星系円盤に降着したのち、角運動量を失いながら螺旋を描き中心星へと落下していく。しかし一部の物質は中心星には落下せず、中心星近傍において極方向に加速を受け、星間空間に還流される。この現象が誕生したばかりの若い星に伴う双極流として観測されている。双極流は原始惑星系円盤の最内縁領域において中心星の磁気遠心力により駆動されるというモデル(Xウインドモデル)が提案されている⁵。Xウインドは超音速(数百 km s^{-1})のガス流であり地球からは光ジェットとして観測される。

原始星および WTTS の段階もほぼ同じ描像で記述できるが、原始星段階では分子雲コアは中心星の上方まで取り囲んでいると点で、CTTS 段階と異なる。また、WTTS 段階では分子雲からのガスの降着と双極流の放出がほとんどなくなる。

もし X ウインドのような超音速のガス流が原始惑星系円盤から発生すれば、ガスの引きずりにより原始惑星系円盤中に存在する固体も吹き上げられるはずである。Shu たち⁶はこの過程を解析し、約 mm サイズの固体でも中心星の近傍から数 AU 離れた原始惑星系円盤中へ放り出されることを示した。また、中心星近傍では活動的な中心星からの輻射によりダストを溶融させるに十分な高温状態が実現し、Xウインドによる放出により溶融した液滴を急冷することも可能であることを示した。これらの条件はコンドールの物質科学的特徴が要求する形成条件をほぼ満足している。彼らの説によると、コンドールは中心星近傍の原始惑星系円盤の最内縁領域で形成され、双極流により原始惑星系円盤の中心星から離れた領域に運ばれた。この中心星から離れた領域において飛び込んできたコンドールと、そこに元々存在していたダストが混じり合い固まったものがコンドライトである。したがって、コンドライトには、コンドールのような高温起源の物質とマトリックスのような低温起源の物質が必然的に混在することになる。

宇宙化学的元素分別

もし、Xウインドプロセスが原始惑星系円盤で活発に起きていたならば、原始惑星系円盤の内側と外側を結ぶ物質循環が起こるため、原始惑星系円盤中の化学組成に不均質が生じるにちがいない。この不均質はコンドライトの化学組成に反映されるはずである。後述するように、この大循環作用は惑星の平均化学組成を決定した直接のプロセスだと考えられる。だが、その前に分子雲のダストが原始惑星系円盤の内縁領域に至るまでの、主要な 3 つの物質進化過程について説明しておこう。

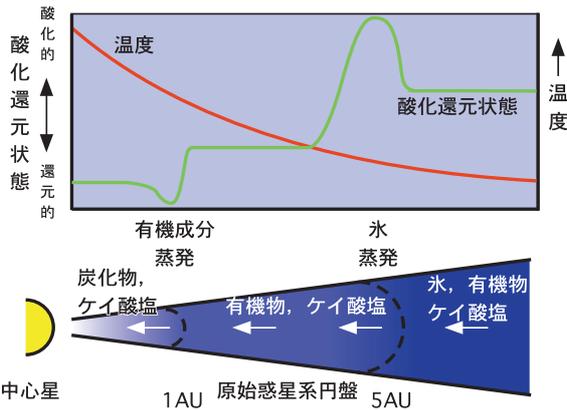


図 2 揮発性ダストの選択蒸発による原始惑星系円盤内の組成不均質。氷や有機物のような揮発性のダスト成分は原始惑星系円盤中の温度勾配により中心星に向かう途中で容易に蒸発する。現在の木星軌道付近で、まず、氷成分の蒸発が起こり、水蒸気が多量に発生する。ガスはダストより中心星に落下する速度は小さいので、水蒸気は木星軌道付近に長く留まり、その内側は原始太陽系平均組成に比べ還元的になる。有機物成分は、現在の金星軌道付近で蒸発が始まる。有機成分から蒸発するガスはメタンガスや水素ガスなので雰囲気はさらに還元的になる。このような酸化還元状態の変化により他のダスト成分の蒸発様式が変化する。

分子雲中のダスト形成は、低温・低密度下で進行し、宇宙線や紫外線が駆動する化学反応のネットワークによりコントロールされる。平均的なダストは、ケイ酸塩の核に有機物と氷がマンテル状に取り巻いていると考えられている。観測的に星間分子雲中では Si, Mg, Fe など珪酸塩鉱物をつくる金属元素のすべてと、C と O の数 10% がダストに含まれていると推定されている。それらの量比については化学反応が非平衡であるため、ダストごとに非常に不均一であると考えられる。事実、ハレー彗星から放出されたダストは非常にさまざまな組成を持っている。しかし平均値は星間分子雲の観測とだいたい一致しており、普通の隕石物質と比べて H_2O 氷や有機炭素に富んでいる。したがって、原始惑星系円盤のダスト成分の前駆物質は、ケイ酸塩成分・有機物成分・氷成分という 3 つの端成分に大別できる。炭素に富むダストは、酸化還元状態の不均質を原始惑星系円盤内にもたらす要因となる。

次に、ダストが原始惑星系円盤中を中心星に向か

って流れる過程を考えてみよう。原始惑星系円盤中の温度分布は中心星に近づくほど高温である。したがって、ダストは中心星に近づくにつれ周りのガスとともに徐々に加熱される。そのため、揮発性成分の蒸発やダスト内部およびダストとガス間の化学反応が物質進化の重要な要素となる。

最後に、原始惑星系円盤内のガスとダストの相対運動について述べておく。ダストはガスと異なり、圧力勾配の力を感じない。そのため、ダストの運動はガスの運動と一致しない。ダストは原始惑星系円盤中心面へ沈降するとともに、中心星方向へ選択的に落下する傾向がある。特に後者は、ダストの蒸発過程を介して、原始惑星系円盤内に組成の不均質構造を生じさせる。なお、前述した双極流を介したダスト成分の循環も、このようなガスとダストの相対運動の一種と捉えることができる。

マトリックス形成期

以上の物質進化過程を考慮して、原始惑星系円盤での物質の振る舞いを考えよう(図 2)。原始星から CTTS に達する段階では、円盤の質量降着率は激しく揺らぐ。降着率の大きな期間は円盤は強い乱流状態にあり、ガスとダストは互いに良くかき混ぜられて相対運動は小さい。しかし降着率の小さな期間は乱流が弱くなり、ガスとダストの分離が進む。

分子雲コアから原始惑星系円盤に降着するダスト 3 成分(ケイ酸塩、氷、有機物)は、十分低温の円盤外縁部(中心星から数百 AU)では、どれも安定に存在する。円盤の温度は中心星に接近するほど高い。ダストが中心星に向かって運動すると、半径約 5 AU に達したところで氷成分が蒸発し、1 AU よりやや内側に達したところで有機物成分が蒸発する。質量降着率の小さな期間では、ダストが選択的に中心星方向へ落下する。これは円盤内に酸化還元雰囲気の不均質をもたらす。氷成分の蒸発域では星雲ガスの H_2O 分圧が上昇し、酸化的な領域が作られる。一方、有機物の蒸発域では星雲ガスの C/O 比が上昇

し還元的な領域が作られる。

このような不均質性が作られた円盤の質量降着率が再び上昇すると、まず還元的雰囲気をもつ領域の物質が中心星近傍に運ばれる。このような還元雰囲気では有機物は不一致蒸発を起こし、グラファイトや炭化物が蒸発残渣となる。そのため原始惑星系円盤の高温領域ではダストはケイ酸塩成分と炭化物成分からなる。より高温になるとケイ酸塩成分の蒸発が始まり、 Al_2O_3 、SiC、グラファイトが残渣となってゆく。もっと温度が上昇すると Al_2O_3 、SiC、グラファイトの順に蒸発が進む⁷。つぎに 5AU 付近で形成された酸化的雰囲気にある系も、内部へ輸送されてくる。この場合、温度上昇と共に有機物成分はすべて CO ガスとして蒸発し、SiC やグラファイトが生じるために必要な過剰の C がダストから失われてしまう。そのため酸化的雰囲気の系の最終的な蒸発残渣は Al_2O_3 である。

これらの難揮発性物質を蒸発させる熱源は中心星からの輻射であり、原始惑星系円盤の最も内側の領域（中心星からの半径の数倍）でこのような高温が実現される。X ウインドモデルによると、そこは双極流の噴き出し口でもある。これらの蒸発残渣は双極流により加速され、その一部は原始惑星系円盤に還流される（図 3b）。

以上のような過程が実際に起こっていたとすると、原始惑星系円盤のダストが集積して形成されたコンドライトにその痕跡が残されているだろう。コンドライトはその化学組成をもとに、いくつかのグループに分類される。代表的な分類法の一つが、Mg/Al 比-Si/Al 比のダイアグラムである（図 4）。同じグループのコンドライトは Mg/Si 比がほぼ一定で、このダイアグラムの原点を通る直線上にプロットされる。このような関係は、原始太陽系円盤内でまず Mg/Si 比を領域ごとに異なる値に決めたできごとが起こり、その後 Al に富む物質が不均一に混入したと考えると自然に理解できる。もし原始惑星系円盤の最も内側の温度が十分高ければ（約 1600 K）、 Al_2O_3 成分は蒸発し双極流と共に星間空間へ失われ、SiC ダストが円盤の外側の領域に還流する。これは

円盤内の Mg/Si 比を領域ごとに変動させる。

このような円盤内側の高温状態は中心星が原始星から CTTS 初期の進化段階にあるときに実現する。このような段階では原始惑星系円盤は繰り返し激しい乱流状態を経験するため、ダストは付着成長が抑制され、円盤の各領域で均一に分散する。コンドライトのマトリックスは星間雲ダストの生き残りかも知れないと前述したが、それに加え、双極流により環流した太陽系起源のダストの割合が増え、平均的にみると次第に Si に富むようになる。ただし、円盤全体の完全な均質化は起こらない。なぜなら、乱流による攪拌と角運動量の再分配（質量降着による中心星への落下）は、ほぼ同じタイムスケールを持つからである。分子雲コアからの質量降着率と双極流による還流率は円盤上の位置によって異なるため、領域ごとに星間ダストと太陽系起源ダストの混合比率は異なる。そして、そのような不均質性は後の段階まで生き残る。

では Al に富む成分の変化はどのようなプロセスが関与していたのだろうか。Al も難揮発性元素の一つである。中心星が原始星から CTTS、WTTS へと進化するにしたがい、その活動は穏やかになり熱輻射量も減少する。したがって Al_2O_3 もガス化を免れ、蒸発残渣となる。つまり、SiC ダストの還流に続くイベントは Al に富むダスト成分の還流となる。

CAI(Ca と Al に富んだ酸化物)形成期

中心星が CTTS の段階にある時期を考えてみよう（図 3c）。この時期は分子雲ガスの降着率がだんだん小さくなり、原始惑星系円盤内の乱流も以前にくらべて弱い。すると円盤内のダストは円盤の赤道面に向かい沈降し、ダスト成分に富む層が形成され始める。ダストはダスト濃集層内部を中心星に向かい運動するにつれて、お互いに付着し、やがて mm-cm サイズのダストボールを形成する。

この中心星に向かい運動するダストボールは、やがて、中心星の輻射による高温により蒸発を開始する。ダスト層はケイ酸塩成分に富んでいるので、

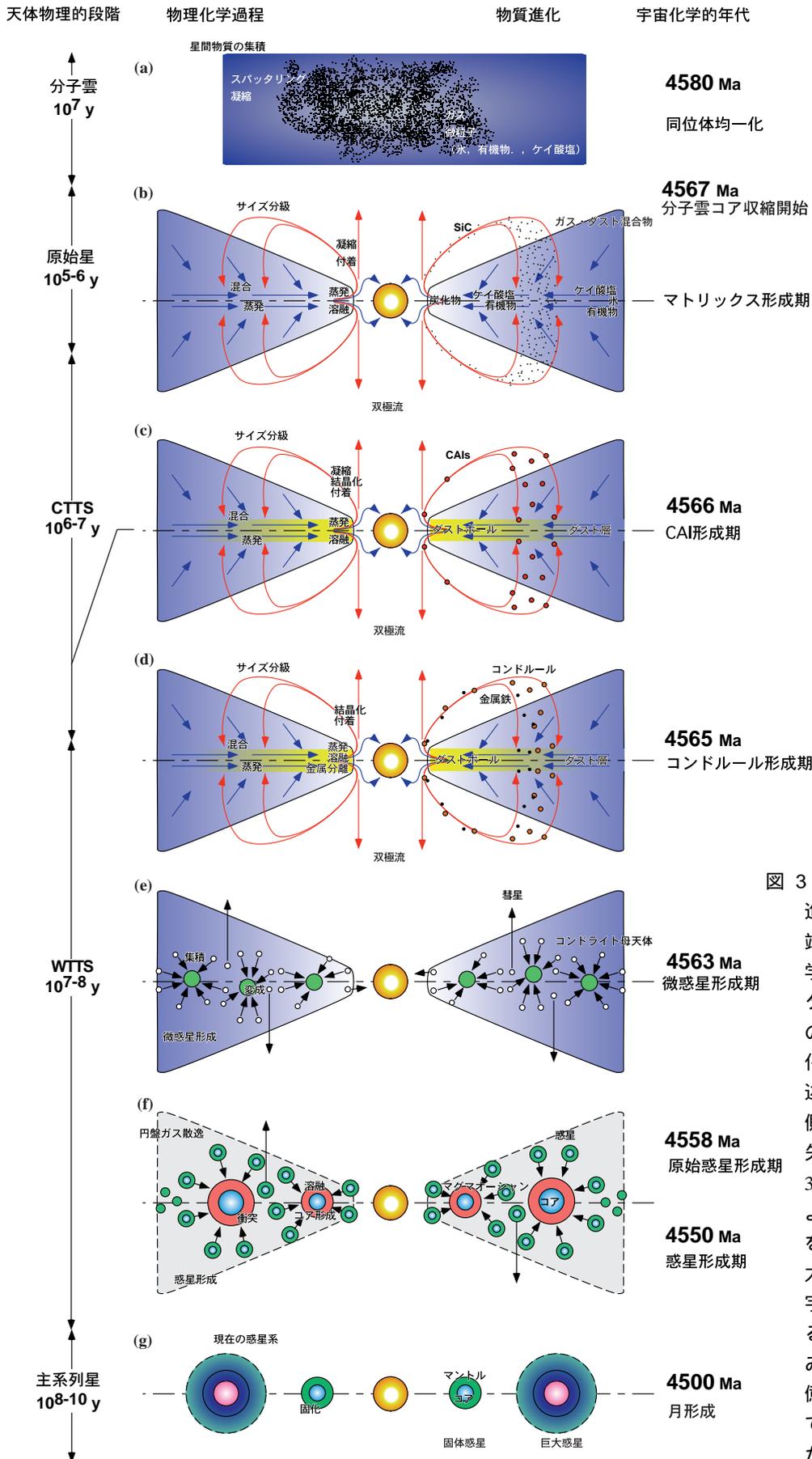


図 3 原始惑星系における物質進化とタイムスケール。左端の列は中心星の天体物理学的進化状態とその段階のタイムスケールを示す。次の列は原始惑星系の物質進化の物理化学的素過程を記述し、その関係を中心星左側の円盤中に示している。矢印は物質の流れを示す。3番目の列はこの素過程により形成される物質や状態を示している。右端の列は太陽系における物質進化の宇宙化学的年代を示している(Ma=100 万年前)。現在みられる惑星系の姿は、46 億年前の約 2 千万年の期間でほぼ構築されたことがわかる。

蒸発が始まると周囲のガスは酸化的雰囲気シフトしてゆく。そのような状況下では SiC のような C/O 比 1 以上の系で安定な鉱物はもはや蒸発残渣として存在できない。それに代わり Al や Ca に富む酸化物が最終的な蒸発残渣鉱物となる。事実これらの元素に富む酸化物の集合体はコンドライト中に見つかっており、CAI (Ca, Al-rich Inclusion) という名前がつけられている(カラーページ)。

CAIは双極流によって中心星近傍から吹き上げられ、原始惑星系円盤の様々な位置に再投入される。還流量は位置によって異なる。これが Mg/Al 比-Si/Al 比のダイアグラム(図 4)に見られる Al 量の変化に対応していると考えられる。

コンドルール形成期

中心星が CTTS から WTTS に移行する段階を考える。円盤からの質量降着率の低下によって、中心星の活動はさらに穏やかになってゆき、原始惑星系円盤の最内縁部の温度も低下する。そのためダストボールの蒸発は抑制される。ダスト濃集層では金属元素の分圧が上昇しているため、ケイ酸塩と金属鉄のメルトが最終蒸発残渣となる。このケイ酸塩のメルトはコンドルールにほかならない。

コンドライトの粉末を出発物質として、原始惑星系円盤の温度圧力を模擬した蒸発実験の結果では、ケイ酸塩と金属鉄の液滴が蒸発残渣となった(カラーページ)。また、表面張力の差によって両相の濡れが良く無いこともわかる。このような状態の液滴が双極流による加速を受けると、両相は容易に分離するであろう。分離した液滴はそれぞれサイズが異なるので、ガス抵抗の違いによる分級効果によって、原始惑星系円盤の異なる位置に還流される。つまりコンドルール形成期の還流過程でケイ酸塩成分と金属鉄成分の分別が必然的に起こる(図 3d)。

このケイ酸塩と金属鉄成分の分別の証拠は、コンドライトの組成に見ることができる。コンドルールの中に最も多量に存在するケイ酸塩は Si, Mg, O の化合物である。そこで Mg と Fe 量の相関を検討して

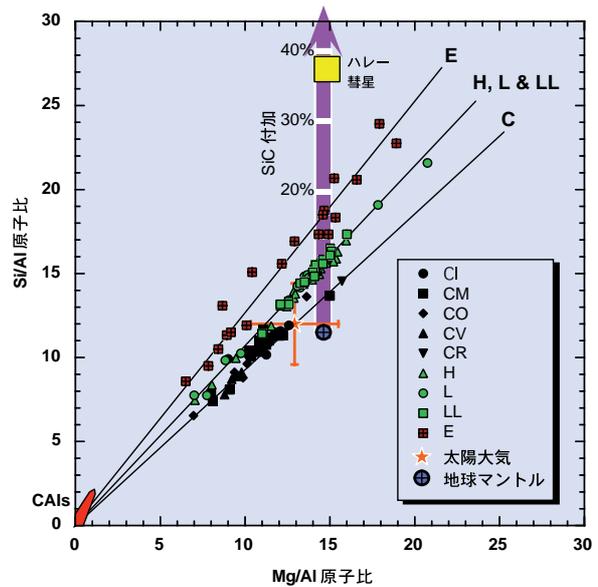


図 4 コンドライトの Al, Mg, Si 成分の分布図。CI, CM, CV, CR, H, L, LL, E はコンドライトを化学組成で分類したときのグループを示す。グループ毎に Si/Mg 比が一定であることがわかる。このような関係は双極流による SiC の付加が数十%あればおこる。太陽系で最も Si 成分に富んだ天体はハレー彗星である。彗星の組成を詳しく調べるにより双極流の影響をさらに詳しく理解できるかもしれない。Al 成分の変動は CAI の付加により説明できる。

みる。図 5 によると Fe-Mg 比がコンドライトのグループごとに異なっている。これは Fe/Mg 比の小さいコンドライトほど、コンドルールの体積分率が大きくなる事実を反映している。

微惑星から惑星形成期

コンドルール形成期後、原始惑星系円盤は本格的な WTTS 段階にはいる。この段階では、若い星の活動を特徴づける双極流は衰える。また、原始惑星系円盤への分子雲ガスの降着もほとんど停止する。したがって、中心星近傍から原始惑星系円盤へ向かう物質環流はこれ以後無くなる。また原始惑星系円盤内の乱流もおさまるため、これまで提唱されてきた惑星形成のシナリオ⁸⁾にしたがい惑星形成が進むだろう。ここでは隕石と惑星の宇宙化学的側面に注目して簡単にまとめておこう(図 3(e,f,g))。

乱流の静まった原始惑星系円盤では、ダストは円

盤赤道面に向かい沈殿してゆく。こうして形成されるダスト層は、やがて自己重力により分裂して直径10キロサイズの微惑星が形成される。これらが衝突合体を繰り返して直径数百キロ程度になったものがコンドライト母天体である。現在我々の手元にあるコンドライトは、後にこれらの天体同士が高速度で衝突して壊れた破片である。

コンドライトはその化学組成によって化学的クラスに分類されている。それぞれのクラスは、それぞれの母天体に起源を持つものと考えられている。先に、化学的分類分けの代表的な方法として、Si, Mg, Al の存在度を採り上げた。もう一つの重要な分類法に、総 Fe 量と Fe の酸化還元状態に着目したものがあつた。これはユーリーとクレイグのダイアグラムとして知られている。コンドライト母天体の場合、酸化鉄と還元鉄の和はほぼ一定値をとっている。ただし両者の比は母天体によって異なっている。また、顕著な特徴として、還元鉄が多い母天体ほど Si に富む傾向がある。この規則性の成因は今までよくわかっていなかった。しかしこれはマトリックス形成期に環流していた SiC が母天体に取り込まれ、同時に取り込まれた酸化鉄を還元したと考えると自然に理解できる。このような還元反応は低温下では進まなかつたであろう。したがって小惑星の一部、彗星や最近見つかりつつあるカイパーベルト天体には、SiC と酸化鉄が未反応のまま残されているかも知れない。

コンドライト母天体がさらに衝突合体して、直径千 km 程度になると天体上で火成作用が起こり始める。このように進化した天体を原始惑星と呼び、その破片も隕石として地球に落下している。エイコンドライト、鉄隕石、石鉄隕石がそれである。その後、原始惑星が集積し、現在見られるような惑星が形成された。この間に、原始惑星系円盤中のガス成分は散逸したと考えられるが、そのプロセスと詳しい時期は明らかではない。これらの惑星形成過程は中心星が主系列星になる前にほぼ完了した。

従来は隕石や惑星の化学組成の差異は、太陽から

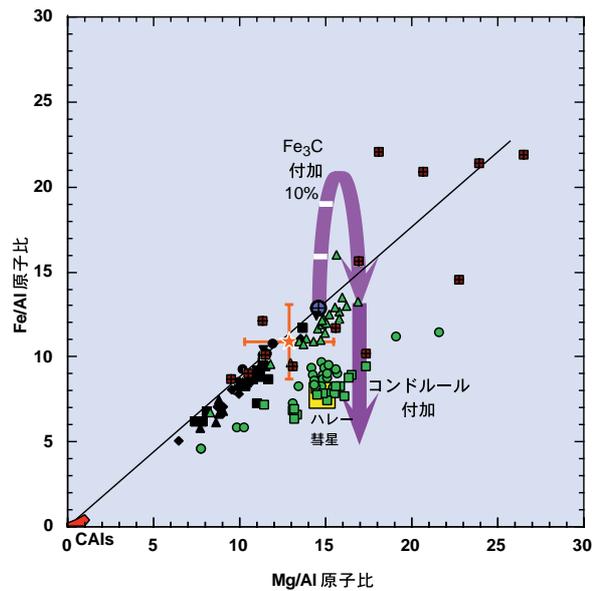
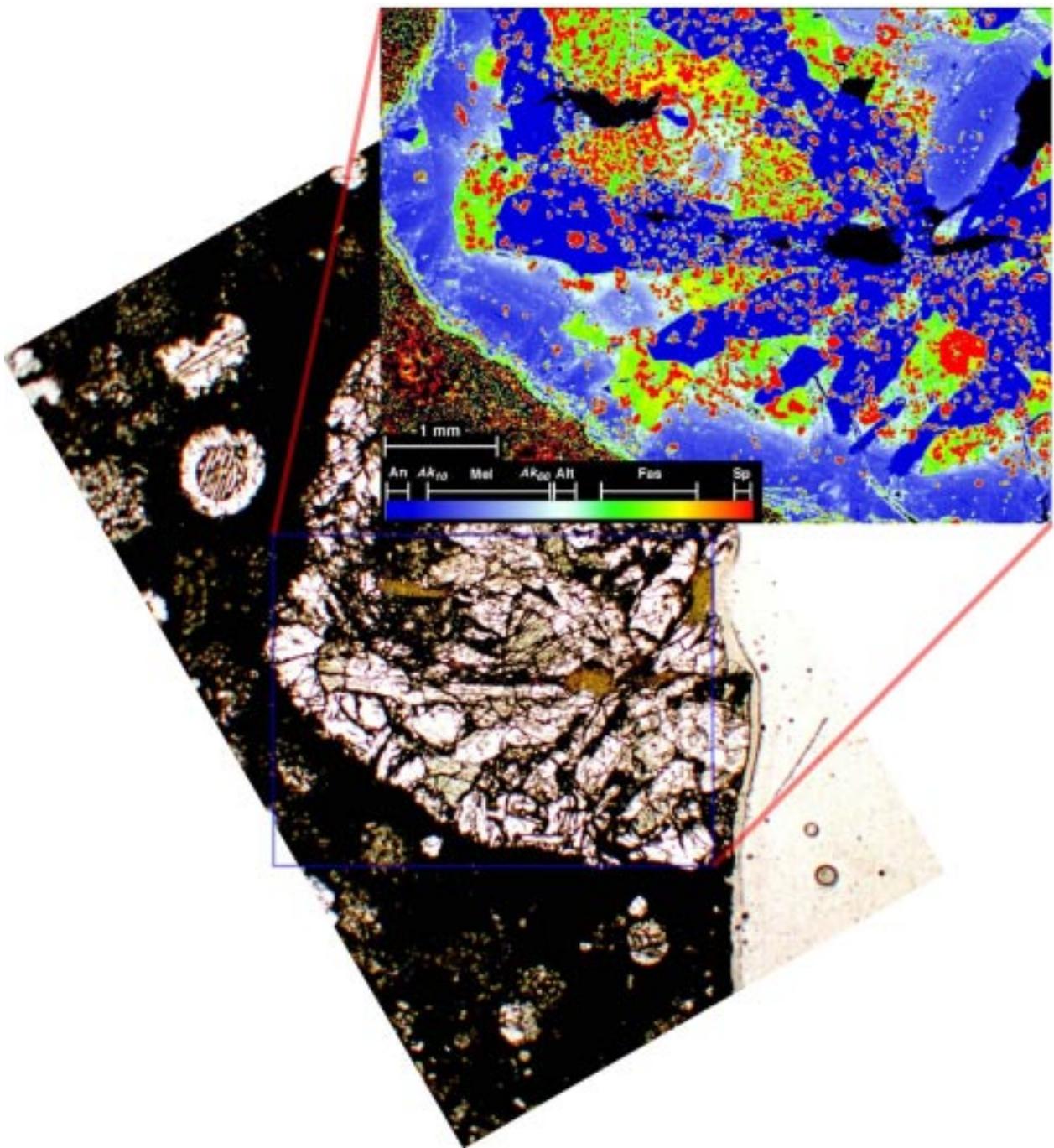


図5 コンドライトの Al, Mg, Fe 成分の分布図。

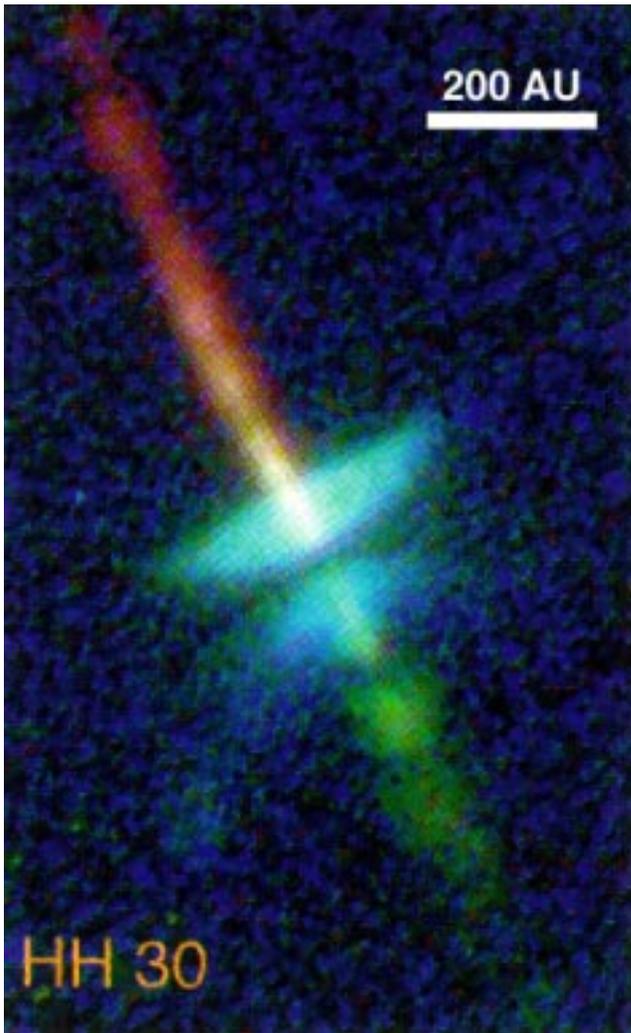
図中の記号は図6のものと同じである。直線は太陽系の平均 Fe/Mg 比を示している。ほとんどのコンドライトはこの直線より下方にプロットされる。小さい Fe/Mg 比をもつコンドライトほど隕石中にコンドライトの占める割合が大きい。このことはコンドライト形成時に金属成分と珪酸塩成分の分離が起き、双極流の分級作用により空間的に隔離されたことを示唆している。直線より上側にプロットされるコンドライトは、マトリックス形成期の鉄の炭化物の付加によるものであろう。

の距離に応じた原始惑星系円盤内の広域的な温度分布に起因すると考えられていた^{9, 10}。この立場にたつと、内惑星領域はダストがほぼ完全に蒸発するほどの高温状態を経験した必要がある。しかしながら、惑星形成現場の観測では、そのような高温の原始惑星系円盤は見つかっていない。今回紹介した著者達のシナリオでは、隕石や惑星の化学組成の多様性を説明するには、原始惑星系円盤の最内縁領域、つまり、中心星から 0.1AU 程度の領域が高温であればよい。中心星近傍で蒸発変成を受けた固体は X ウインドにより中心星から数 AU はなれた低温領域に環流する。

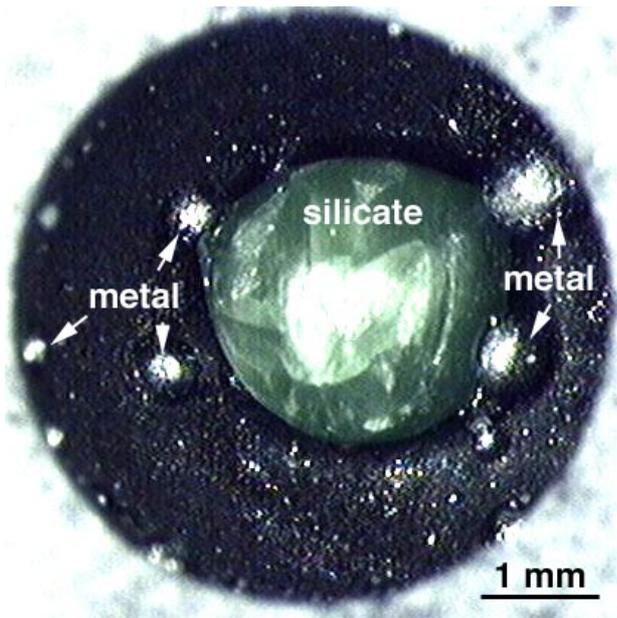
物質の空間的移動に重点を置かない従来の静的なシナリオと比較して、新しいシナリオでは原始惑星系円盤内を物質が大規模に循環する動的な視点を重視している。各々のコンドライト母天体や惑星の



コンドライト隕石の顕微鏡写真と組成像。コンドルール，CAI(CaとAlにとんだ酸化物)，マトリックスからなる。顕微鏡写真（後方）はコンドライトを厚さ 50 μ m の薄片にして後方から光をあて観察している。左上方にみえる直径約 1mm の円形のもがコンドルールである。カンラン石という鉱物（棒状と周囲のリング状のもの）とその間を埋めるガラスから構成されている。その右側の緩くうねった輪郭をもつ透明な鉱物集合体が CAI。コンドルールと CAI の周囲を埋める黒い基質がマトリックス。マトリックスは微粒子の集合体のため、光を透さない。前方のカラー写真は CAI の鉱物組成のちがいを疑似カラーであらわしたものである（分析は東京大学永原裕子助教授による）。CAI は宇宙空間に浮かんでいた液滴から晶出した鉱物が複雑に組み合わさっている。



ハッブル宇宙望遠鏡により撮影された原始惑星系円盤と双極流(文献3より転載)。天体は牡牛座分子雲にある HH30。上下に細くのびる赤と緑の線は双極流によるジェットの中のイオン化したガス流を示す。皿状の青い部分は中心星の周りの円盤付近のダストによる散乱を表している。青い部分の間の暗く細長い部分が原始惑星系円盤である。中心星はこの円盤の中心にあるが、円盤内のダストにより遮られて見えていない。この段階の中心星が CTTS である。



コンドルール形成解明のための蒸発実験．アエンデ隕石（炭素質コンドライト）粉末を出発物質として，真空高温条件（ 10^{-5} torr, 1600 °C）で10分間，加熱した後の回収物．70%の出発物質は蒸発してしまった．坩堝中に残った蒸発残渣は直径数 mm のケイ酸塩メルトと数百 μm 以下の金属鉄メルトである．それぞれに対応する物質は，コンドライト中にコンドルール，金属粒として観察できる．

化学組成の特徴は、原始星から WTTS 段階で中心星近傍から環流した高温変成物質と、円盤中の始源的物質との混合比率により基本的に決定されたと考えられる。したがって、高温起源物質と低温起源物質の混合物としてのコンドライトの形成は、我々の原始太陽系のみの特異的なものではなく、原始惑星系一般において必然的な過程であったろう。双極流の噴き出し口やそこでの温度は、中心星の質量や原始惑星系の角運動量などにコントロールされるので、それぞれの惑星系において特徴あるコンドライトが形成されるだろう。

隕石に残る太陽系形成のタイムスケール

最近の年代測定法の進歩はめざましく、46 億年前の太陽系誕生期の出来事について数十万年の精度で年代を決定することが可能となってきた¹¹。この精度の向上は、隕石の形成年代と、観測や理論に基づく星-惑星系形成のタイムスケールとが厳密に対比可能になったことを意味している。したがって、コンドライトの化学的特徴に基づいた原始惑星系の形成・進化モデルの妥当性は、これらの時間情報の整合性から検証できるだろう。

一つ一つの年代の詳しい議論は別の機会にゆずるとして、以下ではこの時間の制約についての結論だけを述べることにしよう(図 3)。隕石物質をもとに太陽系形成に関して数十万年の精度で年代が測定されているのは、CAI の形成、微惑星の形成、原始惑星の形成の 3 つのイベントについてである。これらの年代は、それぞれ、4566, 4563, 4558 百万年前と判明している。CAI 形成期から原始惑星が形成され始めるまでの時間間隔である 8 百万年は、観測から推定されている WTTS 段階の継続時間に合致する。したがって、CAI 形成期を CTTS 段階の後期とすることは妥当な位置付けといえる。このように考えると、コンドライト形成期は CAI 形成期の百万年後、4565 百万年前のことであったと考えられる。地球など現在見られる惑星の形成は原始惑星の形成後、約 5 百万年たった 45 億 5 千万年前と考えられる。こ

の頃、原始太陽系原始惑星系円盤中のガス成分が吹き払われ、惑星間空間は現在のようにほぼ真空になった。この約 5 千万年後、できあがった地球に火星サイズの天体が衝突し、地球の月が形成された。地球のマントルが記憶する 45 億年の年代はこの月形成のイベントに相当している。

では、太陽系をつくった分子雲の年齢はどのようにしてわかるのだろうか。これは隕石中の放射性ヨウ素の記録から推定できる。この放射性ヨウ素を供給した分子雲は原始惑星形成から 2 千万年前の相対年代をもっている。したがって、45 億 8 千万年前には太陽系をつくった分子雲が存在していた。この分子雲が収縮を開始した時期、つまり、太陽と太陽系の誕生年代は、コンドライト中のマトリックス成分の中に隠されていると思われるが、残念ながら測定に成功していない。この年代だけ星形成理論のタイムスケールを借用して、4567 百万年前としておこう。

惑星系形成論と惑星探査 - 21 世紀に向けて

小論では、隕石の宇宙化学的解析、惑星形成領域の天文学的観測、天体物理による恒星形成と惑星系形成理論の全ての結果に整合的な惑星系形成シナリオの構築を試み、重大なイベントについて説明を与えた。今回は、原始惑星系円盤の中心星近傍領域と遠方領域を結ぶ双極流を介した物質循環の重要性を強調したが、そのフラックスや空間構造については定性的議論にとどまっている。そのため、隕石・惑星相互の平均組成の違いが生じることは説明できたが、その定量的な予言を与えるにいたっていない。これは、原始惑星系円盤の進化理論が未熟であることに加え、より本質的には、モデルを拘束する原始惑星系の観測に、なお大きな不確定性がつきまとっているためでもある。今後、国立天文台が建設を進めているすばる望遠鏡等による新しい観測天文学により、原始惑星系のより詳しい観測が行われていくものと期待される。

これを演繹的手法による惑星系形成論の実証とすれば、帰納的手法による実証は太陽系の惑星探査

により得られるだろう。今回の我々の物質進化シナリオが強調する第一の点は、原始惑星系円盤の組成を大規模に変化させるプロセスが働き、これが固体天体の主成分元素組成に反映されているということである。固体惑星表面の主成分は探査機からのリモートセンシングで測定することができる。内部組成は宇宙科学研究所が月探査用に開発したペネトレーター地震計などを応用することにより、決定できるだろう。また、隕石は本当に小惑星を起源としているかどうかの検証は、現在日本においてプロジェクトが進行中の小惑星サンプルリターンミッションにより明らかにされるであろう。隕石は小惑星を起源としていると考えられているが、実は何処からやってきたのか未だに証明されていないのである。

元素組成とは独立した重要な観測量として、同位体組成は無視できない。同位体は、元素組成と異なり、化学反応による変動が小さいため、物理過程をトレースする独立のデータセットとなるからである。特に酸素はガス成分としても固体成分としても大量に存在する元素なので、原始惑星系における物質進化のトレーサーとしての価値は大きい。誌面の都合でふれることができなかったが、隕石中の酸素同位体宇宙化学は二次イオン質量分析法¹²という新しい分析法により画期的なデータが出始めている。これらの結果によると、酸素同位体の変動は、原始惑星系円盤の中心星近傍の状態、あるいは、円盤低温領域における氷成分の蒸発・凝縮と密接な関係があるらしい。したがって、将来の惑星探査では、巨大ガス惑星の氷衛星と彗星の氷成分の探査が重要な項目として考えられる。これらの探査は探査機搭載質量分析計の開発という新しい実験手法の開発が鍵となるが、その実現は太陽系の起源論に重要な貢献をもたらすはずである。

もし大規模な物質循環があったとしたら、中心星を含めた惑星系の平均組成と原始惑星系円盤の平均組成は異なっていたはずである。惑星系の平均組成はその質量の99%以上を占める中心星の組成で代表できるであろう。しかしながら、分光観測による太

陽大気の実験でさえ、始源的コンドライトの化学組成と直接比較できるだけの精度に達していない。しかも、同位体組成に関してはほとんどお手上げといってもよい。現在、米国 NASA により進行中の太陽風サンプリングミッションは同位体を含めた太陽系平均組成の精密決定の新しい幕開けである。本ミッションの成果により双極流による物質の環流効果の大きさが定量的に議論できるようになるであろう。

20 世紀末に実現した原始惑星系の観測は双極流というそれまで予想されていなかった現象が惑星系形成に普遍的であることを示した。また、これらの観測は、太陽系成因論を惑星系成因論として一般化する契機となった。小論では、従来隕石により得られてきた宇宙化学データが惑星系形成の一般的シナリオとして活用できることを示した。今後は、惑星系の一般的性質と太陽系の特殊性を区別して論じる宇宙化学へと発展してゆくであろう。そのためには、偶然地球に落下してきた隕石等の宇宙物質のみをデータ源として活用する従来の研究法以外に、惑星探査を活用した能動的なサンプリングやデータ取得により、惑星系成因論の欠落している部分を積極的に補完する新しい研究法を開発する必要がある。21 世紀を目前に控え、新しい比較惑星系成因論の宇宙化学が始まろうとしている。

文 献

- ¹ 井田茂：科学，67，842（1997）
- ² 観山正見，林 正彦：科学，62，84（1992）
- ³ C.R. O'Dell, S.V.W. Beckwith: Science, 276, 1355 (1997)
- ⁴ 渡邊誠一郎：惑星夏の学校講演要旨集，（1996）
- ⁵ F. Shu et al.: Astrophys. J., 429, 781 (1994)
- ⁶ F.H. Shu, H. Shang, T. Lee: Science, 271, 1545 (1996); F.H. Shu, H. Shang, A. Glassgold, T. Lee: Science, 277, 1475 (1997)
- ⁷ J.A. Wood, A. Hashimoto: Geochim. Cosmochim. Acta, 57, 2377 (1993)
- ⁸ 渡邊誠一郎，井田茂：比較惑星学，岩波書店（1997）pp.131-232
- ⁹ 宮城秋穂：科学，37，520（1967）
- ¹⁰ J.S. Lewis: Annu. Rev. Phys. Chem., 24, 339 (1973)
- ¹¹ C.J. Allegre, G. Manhès, C. Gopel: Geochim. Cosmochim. Acta, 59, 1445 (1995)
- ¹² H. Yurimoto: Earth Planet. Sci. Lett., 127, 47 (1994)