

特集「物質科学的研究・観測的研究で探る惑星系の誕生と進化」

小惑星を加熱した消滅核種

国広 卓也¹

(要旨) 二次変質を受けていないコンドリュールを用いて小惑星集積時のアルミニウム-26 の存在度を見積もった。コンドリュール形成後瞬間的に小惑星が集積したとして計算を行ったところ、小惑星の温度は1000K までしか上昇しないことがわかった。この温度は最初の金属メルトが発生する温度 (1260K) より低い。小惑星をアルミニウム-26 単独で融解することは難しい。小惑星における融解の痕跡説明するには、熱源として鉄-60 の壊変エネルギーや衝突によるエネルギーを考慮に入れる必要がある。

1. はじめに

我々の暮らす太陽系には、太陽・惑星・小惑星などといった天体が存在し、またそれぞれの天体内部に様々な物質構造が形成されていることが知られている。このような複雑な物質構造が出来上がる過程、すなわち惑星進化を物質科学として検討することは極めて重要な研究テーマの一つといえよう。惑星進化は、言い換えれば物質分化の歴史を反映しており、とりわけ物質の融解 (固相から液相への相転移) に伴う物質分化は、元素分配や物質移動、あるいはエネルギーの輸送などに関して極めて重要な役割を果たしてきた。例えば、惑星規模の融解を経験した地球の場合は、融解というプロセスによって、金属鉄の核とケイ酸塩マントルが分離し、様々な元素の再分配が行われ現在の地球を形作っている。また興味深い点は、このような融解過程の痕跡が直径500km 程度の小惑星ベスタや小惑星の欠片と考えられる隕石にも観察されることである。すなわち太陽系において、程度の差こそあれ、小惑星から惑星にいたるまで、太陽系形成初期において何らかの融解プロセスを経験し、その結果が現在の多様な物質構成を形作ったと論じてさしつかえはないだろう。

1. 岡山大学地球物質科学研究センター (三朝)

ではこのような融解を引き起こしたメカニズムはなんだろう? 特に小惑星や隕石に残されている融解の痕跡のもととなった熱源はなんなのであろう? 太陽系形成初期に考えられる熱源としては、重力エネルギーの開放、衝突エネルギー、そして放射性元素の壊変による放出エネルギーがあげられる。重力開放エネルギーは、例えば地球のように大きな天体においては重要な役割を果たしてきたと考えられるが、小惑星以下の小天体の場合はその効果は大きくはないと考えられる。直径100 km 程度の小惑星の場合、重力エネルギーが瞬間的に開放されたとしても、開放エネルギーはその天体を高々 10 K 暖めるにすぎない。したがって、小天体の融解の痕跡を説明するにはまったく不十分である。

ボブ・クレイトン (Robert N. Clayton) の師であるノーベル賞化学者 Harold C. Urey (Harold C. Urey) はアルミニウム-26 から発せられる放射エネルギーが小惑星を分化させた熱源であると主張した[1]。またタイフーン・リー (Typhoon Lee) らのカルテック・グループがこの説を裏付ける物質科学的発見を行った[2]。特に他に有意な熱源が見当たらないことから、現在のところアルミニウム-26 が小惑星を溶かした熱源であると広く考えられている。本稿でアルミニウム

-26 を含む消滅核種の熱源としての寄与を[3]をもとに議論する。

2. 消滅核種：アルミニウム-26

2.1 熱源としてのアルミニウム-26

不安定な核種はエネルギーを放出して安定核種へと変化する。この現象を放射壊変と呼び、放射壊変を起こす核種を放射性核種という。アルミニウム-26は半減期 0.73 Ma^1 の放射性核種で現在の地球にはほぼ存在しない。このように地球の歴史と比べ核種の寿命が短く、現在の存在度が極端に低い核種を消滅核種と呼ぶ。消滅核種は短期間で崩壊するため時間あたりのエネルギー放出が長寿命核種のそれと比べると大きいともいえる。

アルミニウム-26の典型的な寿命は 1 Ma である。[2]はアルミニウム-26が太陽系最古の物体にかつて存在していたことを示した。したがってアルミニウム-26が生成されるイベントから 1 Ma のタイムスケールで太陽系形成がはじまったか[4]、太陽系形成初期にアルミニウム-26がその場で作られていたということになる。アルミニウム-26の生成プロセスについては決着がついていないが[5]、その議論にはここでは深入りしないことにしよう。

アルミニウムの同位体組成が太陽系内で均一だったとすれば、他の放射壊変系同様、年代測定に応用する事ができる。放射性核種の存在量は指数関数的に単調減少する。消滅核種の寿命の短いという特徴は時間分解能の高い年代測定に応用できる。

さて消滅核種 ^{26}Al の小惑星加熱の熱源としての寄与を見積もるということは、小惑星集積時のアルミニウム-26の存在度 $[\text{Al}]_{\text{asteroid}}$ を見積もるということである。具体的には小惑星のアルミニウム存在度 $[\text{Al}]_{\text{asteroid}}$ と小惑星集積時のアルミニウム同位体組成

$\left(\frac{^{26}\text{Al}}{^{27}\text{Al}}\right)_{\text{asteroid}}$ を見積もり、その積として消滅核種の存在

度 $[\text{Al}]_{\text{asteroid}}$ を決める。

アルミニウム-26原子ひとつの壊変で 3.2 MeV のエネルギーが放出される。アルミニウムが[2]らによって見積もられた同位体組成を持っているのであれば、 10 g のアルミニウムは $1,300 \text{ kcal}$ のエネルギーを潜在的に有する。一見熱量としてさほどのものでないようにみえる。しかし太陽系元素存在度 $[\text{Al}]_{\odot}$ とその同位体組成を用いて見積もった $[\text{Al}]_{\text{asteroid}}$ にてモデル計算を行うと、表面積/体積が相対的に大きい 10 km 程度の小惑星ですら簡単に溶けることがわかる。小惑星を溶かした熱源が ^{26}Al だったという認識はこの見積もりを元に行っている。ここで“溶ける”とはケイ酸塩と金属鉄が分離するプロセスとしよう。

2.2 小惑星のアルミニウム-26

加熱前の小惑星のかけらには数ミリの玉粒がぎっしりとつまっている。その玉粒には2世代あることがわかっている。両者は形成時期が若干異なりおり数 Ma 程度の時間間隔があるといわれている[6]。さて時間順に物体形成を並べると第1世代の玉粒の形成、第2世代の玉粒の形成、そして小惑星の形成となる。第2世代の玉粒の形成のほうが第1世代の玉粒の形成よりも小惑星集積に時間的に近い。このことを模式的に示したのが図1である。

$\left(\frac{^{26}\text{Al}}{^{27}\text{Al}}\right)$ もしくは $[\text{Al}]_{\text{asteroid}}$ が指数関数的に減少していくことを考えると小惑星集積時の $[\text{Al}]_{\text{asteroid}}$ を見積もるにあたっては第2世代の玉粒形成時のアルミニウム同位体組成を用いるほうが適切である。実際に第2世代の玉粒形成時期のアルミニウム-26存在量は $1/5$ 程度であったらうと見積もられている[7]。

ここでいう第2世代の玉粒とはコンドリュールのことである²。コンドリュールは太陽系ネビュラでの複数回の加熱イベントを経て、ケイ酸塩鉱物の溶融物から形成したと考えられている。いくつかのコンドリュ

*1. 本稿では 100 万年 を単位として議論を行う。よって $1 \text{ Ma} (= 100 \text{ 万年})$ という記述を用いる

ールについては小惑星上でできたとも考えられているが[8], ここではコンドリュールが小惑星集積前に形成したという立場をとる.

コンドリュール形成時のアルミニウム同位体組成は, 分析によって求めることができる. ^{26}Al は現在ではほぼ ^{26}Mg へと崩壊してしまった. そこで ^{26}Al の痕跡を ^{26}Mg の過剰 ($\Delta^{26}\text{Mg}$) として検出する. 放射壊変によってできた ^{26}Mg 原子の個数 N ($\Delta^{26}\text{Mg}$) は $N(\Delta^{26}\text{Mg}) = N(^{26}\text{Al}_{\text{chondrule}}) \times N(^{27}\text{Al}_{\text{chondrule}})$ と書ける. 原子の個数は濃度に比例する量でありまた $N(^{27}\text{Al}) \approx N(\text{Al})$ であるためこの式は $[\Delta^{26}\text{Mg}] \approx \left(\frac{^{26}\text{Al}}{^{27}\text{Al}}\right)_{\text{chondrule}} \times [\text{Al}]$ と書きかえることができる. コンドリュールが形成した時の $[\text{Al}]$ は鉱物ごとにより異なるが同位体組成 $\left(\frac{^{26}\text{Al}}{^{27}\text{Al}}\right)_{\text{chondrule}}$ は一定であるため, 複数の鉱物 i について求めたデータセット ($[\text{Al}]_i, [\Delta^{26}\text{Mg}]_i$) は, $[\text{Al}] - [\Delta^{26}\text{Mg}]$ 空間における直線としてプロットされる. この直線をアイソクロンという. アルミニウム-マグネシウム系への外部からのかく乱が少ないという認識は分析データがアイソクロ

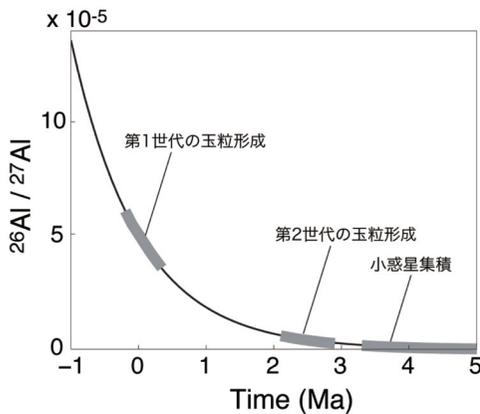


図1: $\left(\frac{^{26}\text{Al}}{^{27}\text{Al}}\right)$ の時間変化とネビュラにおける物体形成のタイミング: 横軸は第1世代の玉粒の形成してから時間で, 縦軸は第1世代の玉粒のアルミニウム同位体組成が形成時に $\left(\frac{^{26}\text{Al}}{^{27}\text{Al}}\right) = 5 \times 10^{-5}$ だったとした時のモデル同位体組成

*2. 一方第1世代の玉粒とはリフラクトリー・インクルージョン(難揮発性包有物)のことである. CAI (Calcium-Aluminum-rich Inclusion) と呼ばれることもあるが, CAI という呼び名には注意が必要である. カルシウムとアルミニウムに富む地球上の鉱物の典型は斜長石であるが, 斜長石はCAIの主要構成鉱物ではない.

ン上にプロットされることをひとつの根拠とし, また $\left(\frac{^{26}\text{Al}}{^{27}\text{Al}}\right)_{\text{chondrule}}$ はアイソクロンの傾きとして求める. 詳細は以前にも遊・星・人に紹介された記事[9, 10, 11]を参照してほしい.

2.3 小惑星の加熱

小惑星の加熱を議論するにあたり, いくつかの基準となる温度が存在する. Fe-FeS 共融点温度1260Kと最初のケイ酸塩鉱物の融解温度1400Kである. 小惑星を溶かしケイ酸塩と金属鉄を分離するにあたり, 最低でもこれらの温度よりも小惑星は熱せられなくてはならない.

[3] では炭素質コンドライトに含まれる二次変質の最も少ないコンドリュール5個を分析し(図2), $\left(\frac{^{26}\text{Al}}{^{27}\text{Al}}\right)_{\text{chondrule}} = 3.8 \times 10^{-6}$ と見積もった. この同位体組成とアルミニウムの太陽系元素存在度 $[\text{Al}]_{\odot}$ から $[\text{Al}]_{\text{asteroid}}$ を決めた. 次にそれを熱源とした時の大きさの異なる小惑星について, それぞれ温度変化を見積もった(図3). 半径が40kmより大きい小惑星での中心部における最高到達温度は940Kと見積もられる. すなわち小惑星内部はFe-FeS 共融点温度に達することができず, 金属鉄の融解は発生しない. 計算において, コンドリュール形成後瞬間的に小惑星が集積すると仮定している. したがって, 求められた温度は最大見積もりを与えると考えられる. つまり, $\left(\frac{^{26}\text{Al}}{^{27}\text{Al}}\right)_{\text{chondrule}}$ を元

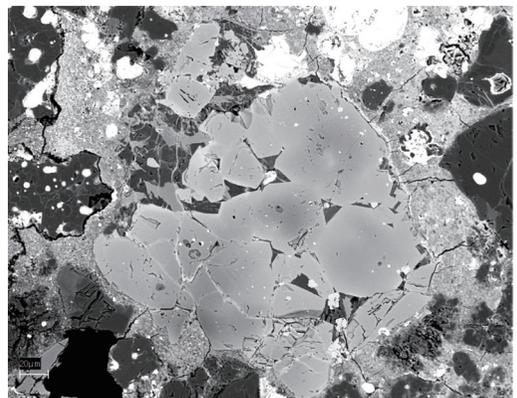


図2: 同位体分析を行ったコンドリュールの組織(反射電子像): 中央で全面像領域の1/3程度を占める直径200 μm の物体がコンドリュールに対応する.

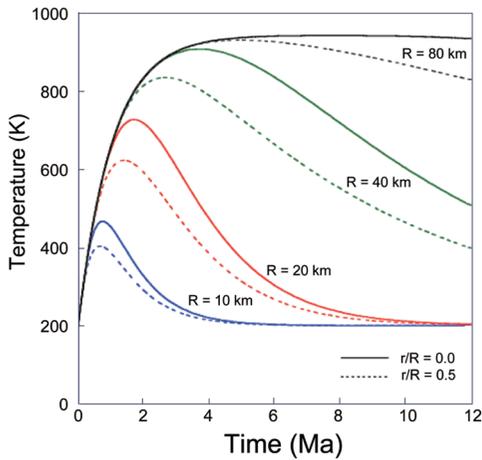


図3: ^{26}Al の壊変エネルギーを熱源とした時の小惑星の温度の時間変化 [3]: 横軸は小惑星が集積してからの時間。 ^{26}Al はコンドリュールより見積もった。曲線は小惑星の中心 ($r/R = 0$) と表面-中心の間点 ($r/R = 0.5$) の温度変化を示している。

に見積もった ^{26}Al 小惑星を溶かすことは難しいということになる。隕石に観察される熱変質を ^{26}Al で説明することは可能であるが、 ^{26}Al が小惑星を溶かすことはできない。違う言い方をすると ^{26}Al では鉄隕石や石鉄隕石をつくったケイ酸塩と金属鉄が分離するプロセスを説明することができない。詳細は[3]を参照してもらいたい。

3. 小惑星を溶かしたもの

3.1 根強い ^{26}Al 熱源説

コンドリュールから ^{26}Al 小惑星を見積もり、 ^{26}Al は熱源として不十分であると述べた。しかし測定対象物に問題があるとする ^{26}Al 熱源説の支持層はまだまだ厚い。以下に彼らの主張の根拠となっているコンドリュールの測定対象物としての問題について述べる。

3.1.1 二次変質

^{26}Al 小惑星は ^{26}Al 小惑星から見積もられた。しかし、コンドリュールを含む小惑星のかけらは程度の大小は

ともあれ必ず二次変質を受けている。二次変質が進むと、同位体系がリセットされ $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ の値が小さめにでることが報告されている[12]。二次変質をまったく受けていないコンドリュールは存在しないため、二次変質の少ないコンドリュールを選定して分析するわけだが、 ^{26}Al 小惑星を過小見積もりしている可能性を否定することは難しい。言い方をかえると、“ ^{26}Al が熱源として不十分に見えるのは、二次変質によって同位体系がリセットされたものを測定対象物として選んでいるからだ”という議論を否定することは難しい。

一方、二次変質を受けていないのかにかかわらず $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ の値が小さいのであれば、年代学的解釈としては、そのコンドリュールが後に形成したことになる。コンドリュールが小惑星形成以前に形成したというシナリオに沿うと、 $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ の値が小さければ小さいほど、コンドリュールの形成時期は小惑星のそれに時間的に近いということになる。つまり、二次変質を受けていないコンドリュールで $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ の値が小さければ小さいほどより適切な ^{26}Al 小惑星の見積もりを与えることになる。

熱源としての ^{26}Al 小惑星を見積もるにあたり、以上は相反するセンスである。[3]は手に入りうるもっとも二次変質の少ない隕石に含まれる複数のコンドリュールを分析し、その平均値を用いて ^{26}Al 小惑星を見積もった。二次変質による過小見積もりを完全には否定できないが、二次変質による影響は年代学的解釈における過大見積もりにてある程度補償されるだろうと考える。論理は完結しておらず歯がゆいところがある。

3.1.2 溶けてないものから見積もった量では溶けない

上記で、 $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ の適切な見積もりを与えるのは二次変質の影響が少ないコンドリュールであると述べた。二次変質の影響が少ないコンドリュールというのは“溶ける”というプロセスから最も遠かったコンドリュールという言い方もできる。二次変質の影響の少ない“最良の”コンドリュールを選ぶと今度は以下の議論が成立してしまう。

“溶けていないコンドリュールを用いて見積もった $[^{26}\text{Al}]_{\text{asteroid}}$ で小惑星が溶けるわけがない. そのコンドリュールは二次変質すらしていないではないか. 溶けてしまった小惑星の前駆物質に相当するものはすべて溶けてしまったのであり, 分析に用いたコンドリュールは分化した小惑星の前駆物質ではない.”という議論である. コンドリュール完全犯罪論であり, 前駆物質がなんであったかを提示しないと建設的でない気がしなくもないのだが, いわんとするところは理解できる.

この主張は, アルミニウム-26が小惑星を溶かした熱源であったという前提を伴うと以下の議論へと発展する. $(\frac{^{26}\text{Al}}{^{27}\text{Al}})_{\text{chondrule}}$ の高いコンドリュールとそうでないコンドリュールが存在し, 高いものは溶けたし, 低いものは溶けなかった. なぜコンドリュール間で $(\frac{^{26}\text{Al}}{^{27}\text{Al}})_{\text{chondrule}}$ の値にばらつきがあるのかといえば, それぞれのコンドリュールの形成した時期が違うから, ということになる³.

アルミニウム-26が小惑星を溶かしたということであれば, コンドリュールが形成されている一方で小惑星が集積していたということになる. この説は第1世代の玉粒 (リフラクトリー・インクルージョン) と第2世代の玉粒 (コンドリュール) の形成が同時に行われていたとする発見[13]や第1世代の玉粒 (リフラクトリー・インクルージョン) と分化との時間間隔が 1Ma という発見 [14] と調和的である.

$(\frac{^{26}\text{Al}}{^{27}\text{Al}})_{\text{chondrule}}$ の大きいコンドリュールが存在したのであれば, 小惑星が溶ける前の衝突現象で宇宙空間にそういったコンドリュールを含むかけらが放出されてもいい. つまりこのモデルから予測されるのは, $(\frac{^{26}\text{Al}}{^{27}\text{Al}})_{\text{chondrule}}$ の高いコンドリュールの存在である. ビザーロら[15] の分析結果はこの予測と調和的に見えるが, 彼らの分析結果は全岩分析であり, コンドリュールの前駆物質形成時の同位体組成を見ている可能性がある.

3.2 もうひとつの消滅核種: 鉄-60

これまでのコンドリュールのデータを元に見積もった $[^{26}\text{Al}]_{\text{asteroid}}$ で小惑星を分化するにはコンドリュール形成-小惑星集積が同時に発生する必要があると述べた. そのような仮定なしに小惑星を溶かす“熱い”核種として注目されているのが消滅核種 ^{60}Fe である. ^{60}Fe の半減期は 1.5Maで ^{26}Al のそれより若干長い. アルミニウム-26が注目されていた理由のひとつに, アルミニウムが主要元素であり, 太陽系に普遍的に存在していることが挙げられるのだが, 鉄に至ってはさらに存在度が高い.

太陽系初期に ^{60}Fe が存在していたことは分化隕石の全岩分析から報告されていた[16]. 近年未分化隕石の特定鉱物から ^{60}Fe の痕跡が発見され[17, 18]注目を集めている. ^{26}Al は超新星爆発でも太陽系内でも合成されうるのだが, ^{60}Fe は超新星爆発でなければ合成されない. つまり ^{60}Fe は超新星爆発からの時を刻む同位体核種であり, その太陽系物質における存在は太陽系が超新星爆発から数Maで形成を開始したことを示唆する[4].

さてその ^{60}Fe の熱的貢献を考えよう. コンドリュール内外に含まれるトロイライト (FeS) と呼ばれる硫化鉄鉱物が形成した時の鉄同位体組成は $(\frac{^{60}\text{Fe}}{^{56}\text{Fe}})_{\text{FeS}} \sim 1 - 10 \times 10^{-7}$ と見積もられる[17, 18]. 小惑星集積時の鉄同位体組成がトロイライトに観察される同位体組成の中間値 $(\frac{^{60}\text{Fe}}{^{56}\text{Fe}})_{\text{asteroid}} = 5 \times 10^{-7}$ 程度であったとすると ^{60}Fe の熱的貢献は $(\frac{^{26}\text{Al}}{^{27}\text{Al}})_{\text{chondrule}}$ から見積もられた ^{26}Al の熱的貢献と同程度となる. $(\frac{^{60}\text{Fe}}{^{56}\text{Fe}})_{\text{asteroid}}$ 値が $(\frac{^{26}\text{Al}}{^{27}\text{Al}})_{\text{asteroid}}$ と比較して一桁小さいのに関わらず熱的貢献が同程度なのは鉄存在度 $[\text{Fe}]_{\text{asteroid}}$ がアルミニウム存在度 $[\text{Al}]_{\text{asteroid}}$ と比較して一桁大きいためである. ^{26}Al 単独, ^{60}Fe 単独では小惑星を溶かすこと簡単ではないが, 二つの消滅核種を組み合わせることで小惑星を溶かす可能性がある.

これまで小惑星のアルミニウムの同位体組成を求めた際にはコンドリュールのそれを用いていた. これは

*3. (^{26}Al) が太陽系内で不均一だった可能性もあるがそれについてはここでは議論しない.

コンドリュールが小惑星以前に形成したと考えるからである。しかし小惑星の同位体組成を求めるにあたって小惑星上で生成した物体の同位体組成を用いたほうが確かかもしれない。たとえば小惑星で生成したと考えられるマグネタイトには小惑星にかつて存在した始原水と反応した痕跡が残っている[19]が、その鉄同位体組成は $\left(\frac{^{60}\text{Fe}}{^{56}\text{Fe}}\right)_{\text{mag}} = 1 \times 10^{-7}$ [18]と見積もられている。このくらいの同位体組成であると ^{60}Fe の貢献はアルミニウムと比べると有意ではない。しかし、何が小惑星の鉄同位体組成をよく代表するかという点で自明ではなく、今後の研究が待たれるところである。

コンドリュール形成時の鉄同位体組成は橋ら[20, 21]によって求められておりその値は $\left(\frac{^{60}\text{Fe}}{^{56}\text{Fe}}\right)_{\text{chondrule}} < 3 \times 10^{-7}$ と見積もられている。鉄-60の熱的貢献はアルミニウム-27を上回るものではない、という感触を現時点のデータセットからは受ける。水質変成によりこれらの鉄同位体組成がリセットしてしまった可能性もある。今後コンドリュールの $\left(\frac{^{60}\text{Fe}}{^{56}\text{Fe}}\right)_{\text{chondrule}}$ を系統的に調べることは重要である。

4. まとめ

第1世代玉粒（リフラクトリー・インクルージョン）形成－第2世代玉粒（コンドリュール）形成－小惑星集積というネビュラ進化モデルに基づく、アルミニウム-26単独で小惑星を溶かすことは難しい。一方コンドリュール形成－小惑星集積が同時的に行われていたとするのであれば、アルミニウム-26単独で小惑星を溶かすことは可能である。ただしこのモデルを受け入れるにあたっては“ ^{26}Al の存在度の高かった物体はコンドリュールを含め皆溶けてしまった”というコンドリュール完全犯罪を同時に認めなくてはならない。他の熱源として消滅核種である鉄-60が考えられる。これまでのデータに基づく鉄-60の寄与はアルミニウム-26を上回るものではないように見える。ただしアルミニウム-26と鉄-60と組み合わせることにより小惑星を溶かすことは不可能ではない。コンドリュ

ールの鉄-60存在度を見積もることが大切である。

衝突エネルギーも熱源として有意であっただろう。初期太陽系における衝突現象は顕著であり隕石にもその痕跡が残されている。融解前の小惑星の空隙率は高かったと考えられる。空隙率の高い小惑星に衝突物体が打ち込まれば衝突物体は内部まで侵入する。小惑星の破砕物は宇宙空間には放出されず衝突物体の持つ運動エネルギーはすべて熱エネルギーへ変換されるだろう。衝突エネルギーの定量的見積もりが必要である。

小論では物質科学の観点から、初期太陽系における惑星形成に密接に関連した様々な熱エネルギーに関して考察を行った。精緻な物質科学は約45.7億年前の初期太陽系のダイナミクスに関して欠かすことのできない物理化学的制約条件を与えることが可能である。このことが物質科学の最大の醍醐味の一つであることが読者に伝わらなかったとすれば、著者の力不足を嘆くよりほかない。現在著者は岡山大学物質科学研究センター（三朝）にて、次世代の惑星物質科学の展開を模索もがき続ける毎日を送っている。小論をきっかけに、若い学生諸君が惑星物質科学に興味を抱き三朝の扉をたたいてもらえることを願いつつ、筆をおかせていただきたい。

5. 謝 辞

東京大学の橋博士と岡山大学の辻森博士には的確なコメントをいただきました。また岡山大学の小林博士には日本語・構成についての指導をいただきました。

参考文献

- [1] Urey, H. C., 1955, Proceedings of the National Academy of Science 41, 127.
- [2] Lee, T. et al., 1976 Geophysical Research Letters 3, 41.
- [3] Kunihiro, T. et al., 2004, Geochim. Cosmochim. Acta 68, 2947.

- [4] 三木ら, 2007, 遊星人, 本号.
- [5] Lee, T. et al., 1998, *Astrophys. J.* 506, 898.
- [6] Amelin Y. et al., 2002, *Science*, 297, 1678.
- [7] Kita, N. T. et al., 2005, in *Chondrites and the Protoplanetary Disk*, 558.
- [8] Krot, A. N. et al., 2005 *Nature* 434, 998.
- [9] 木多紀子, 1999, 遊星人 8, 256.
- [10] 木多紀子, 2003, 遊星人 12, 151.
- [11] 倉橋映里香, 2005, 遊星人 14, 10.
- [12] Kita, N. T. et al., 2000 *Geochim. Cosmochim. Acta* 64, 3913.
- [13] Itoh, S. and Yurimoto, H., 2003, *Nature* 423, 728.
- [14] Baker, J. A. et al., 2005. *Nature* 436, 1127.
- [15] Bizzarro, M. et al., 2004, *Nature* 431, 275.
- [16] Shukolyukov, A. and Lugmair, G. W., 1993, *Earth Planet. Sci. Lett.* 119, 159.
- [17] Tachibana, S. and Huss, G. R., 2003, *Astrophys. J.* 588, L41.
- [18] Mostefaoui, S. et al., 2005, *Astrophys. J.* 625, 271.
- [19] Choi, B.G. et al., 1998, *Nature* 392, 577.
- [20] Tachibana, S. et al., 2006, *Astrophys. J.* 639, L87.
- [21] Tachibana, S. et al., 2007, *Lunar Planet. Sci.*, 38, 1709.