

## 特集「新・惑星形成論」

初期太陽系内の二つの加熱現象：  
コンドリュール形成と微惑星熱進化脇田 茂<sup>1</sup>

2021年12月21日受領, 査読を経て2022年1月13日受理

(要旨) 始原始的な隕石に含まれるコンドリュールと呼ばれる粒径物質がある。この形成には初期太陽系星雲内での瞬間的な加熱現象が必須である。これとは異なる加熱現象が同時期に存在した小天体、微惑星内部では長期間に渡って続く。本稿では初期太陽系内の二つの加熱現象に関するこれまでの研究を簡単に紹介することを試みた。微惑星の熱進化にはその形成年代が非常に重要である一方で、コンドリュールを形成するような加熱現象には微惑星が関わる説が主流となりつつある。コンドリュールを含んだ微惑星の進化過程の解明には、小惑星からのリターンサンプルの分析やより幅広い視点を取り込んだ研究が望まれる。

## 1. 隕石とコンドリュール

地球とは異なる場所から飛来した地球外物質は隕石と呼ばれる。隕石はその発見場所に基づいて名前が決められており、例えば2020年夏に千葉県に落下した石は習志野隕石と名付けられた<sup>1</sup>。ただ、このように人の生活圏内で見つかることは稀であり、主だった隕石は(地球の石がほぼ存在しない)南極や砂漠などで発見されている。隕石は化学的特徴に基づいて分類される[1]。ここでは大分類として2種類紹介する。まず、地球のようなコアをもつ天体から飛来した隕石は分化隕石と呼ばれる。日本刀の製作にも使われる(?)鉄隕石や<sup>2,3</sup>、小惑星帯にある天体の中で二番目に大きい(直径500 km)の小惑星ベスタが起源と考えられているHowardite-Eucrite-Diogenite(HED)隕石と総称される隕石、さらには月や火星から飛来した隕石もこの分化隕石に分類される。一方、小惑星イトカワや小惑星リュウグウのようにコアを持たない天体を起源とする隕石は未分化隕石と呼ばれる。地球に飛来する隕石の大部分(9

割以上)を占めるコンドライト隕石はこちらに属する[2]。写真は過去の遊星人連載“エポックメイキングな隕石たち”をご参照いただきたい。

『コンドライト』(chondrite)と呼ばれる隕石に含まれる物質の中で、最も特徴的な含有物が本稿のテーマの一つである『コンドリュール』(chondrule)である[3]。語源は古代ギリシャ語で粒を意味する“ $\chi\acute{o}\nu\delta\rho\omicron\varsigma$  (chondros)”であり、その名の通り(二次元写真でも三次元X線顕微鏡画像でも)ほぼ球形に見える。球状を保持していることから、一度溶けた岩石が急冷してできたものと考えられている。もし小惑星の内側で他の鉱物に囲まれた状態で溶けた場合には球形にならないため、宇宙空間すなわち太陽系星雲内で形成されたと考えられている。コンドリュールの形成時期に関しては数多くの研究から、太陽系誕生から100~500万年以内に形成されたことがわかっている[4-6]。なお、太陽系誕生年は最初

<sup>1</sup><https://www.kahaku.go.jp/procedure/press/pdf/503253.pdf>

<sup>2</sup><https://www.tsm.toyama.toyama.jp/?tid=101911>

<sup>3</sup><https://cit-skytree.jp/exhibitions/%e5%a4%a9%e9%89%84%e5%88%80/>

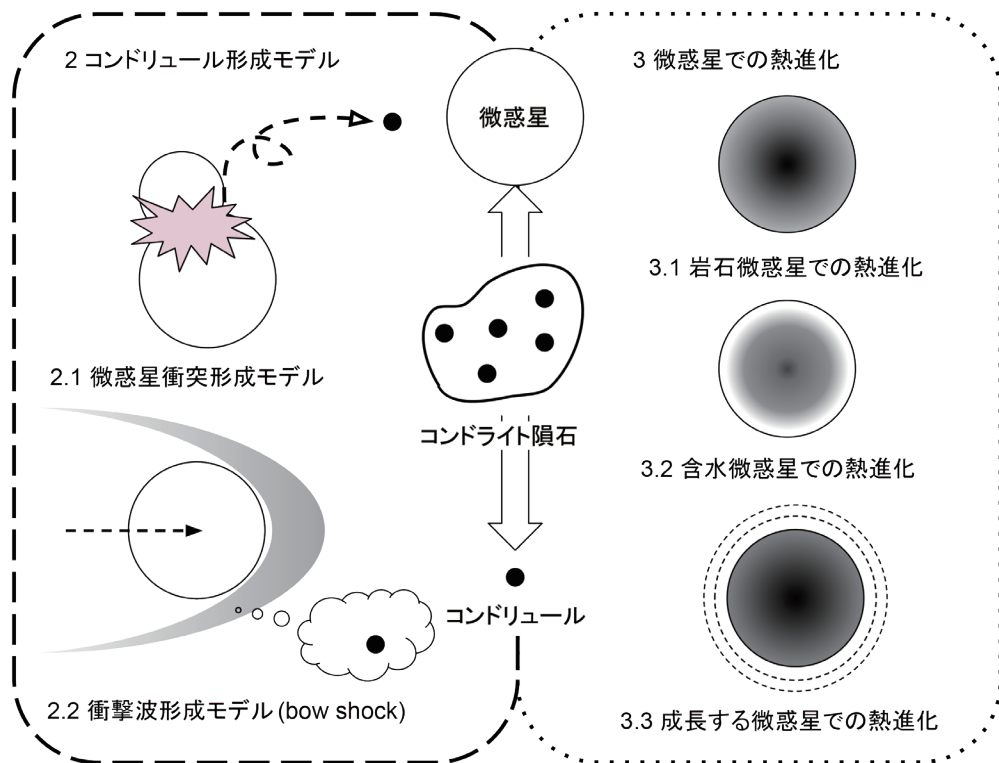


図1: 本稿で紹介するモデル等の概要図。色が黒い物体は高温を経験したことを示し(例: 黒丸は加熱溶融を経験したコンドリュール), 灰色や白色は高温を未経験であることを表す(例: 含水微惑星での表面付近や成長する微惑星で点線で示される新しく追加された表層)。

に高温ガスから凝縮したとされる難揮発性物質(Ca-Al-rich inclusions; CAIs)の年代測定から, 45.67億年前であることがわかっている[7]。コンドリュールを含むコンドライト隕石は初期太陽系の情報を保持しており, 太陽系の歴史を紐解く重要な化石といえよう。

太陽系形成の謎に迫る重要な隕石であるコンドライト隕石は, 様々な角度からの数多くの研究がなされてきた。例えば, コンドライト隕石の9割を占める『普通』コンドライト隕石は, 飛来元, もしくはさらに以前の元あった天体(隕石母天体)の中で加熱による変成を経験した痕跡を持つことが多い。一方, 『炭素質』コンドライト隕石は同時に水も存在していた環境に居た痕跡を持つことがある。すなわち, 鉱物の層の間に水を含む層状珪酸塩や, 水溶液中から析出したと考えられる炭酸塩鉱物などである。このように, 隕石母天体中で経験した何らかの変成・変質作用を

受けた痕跡をもつ物質のことを二次鉱物と呼ぶ。この鉱物を調べることで, 形成当時の環境を推測することが可能となる。さらには, その変成が起こった時期を特定することもできるため, 初期太陽系に存在した大昔の小惑星内の環境を調べることができる。なお, 普通コンドライト隕石と炭素質コンドライト隕石は化学組成(揮発性物質の存在度や酸素同位体組成など)によって分類される。前述のように前者は熱による変成, 後者は水の痕跡を示すことが多い。

本稿では, 太陽系星雲内でどうやってコンドリュールができたかの研究を紹介する。その後, コンドリュールはそれ以外の粒子(石基)と一緒に集まることでコンドライト隕石母天体が形成される(小林浩氏の本特集論文を参照)。さらに, コンドライト隕石を含む初期太陽系に存在した始原的な小天体内部では, どのように温まってどういうことが起こっていたかを, 現在の隕石との比較を交えながら簡単に紹

介する。図1に本稿で紹介する事項の概念図を示す。コンドリュールとコンドライト隕石、そして微惑星がどう関連するかに注目していただきたい。興味がある節だけを読めるように、なるべく独立させて書いている。どうしても関連する事項は、節をまたいでお読み頂けると幸いである。

## 2. コンドリュール形成モデル

コンドリュールは普通コンドライト隕石の体積の6割~8割を占めている[2]。このため、コンドリュールが普通コンドライト隕石そのものであると言っても過言ではない。普通コンドライト隕石が形成された時代の太陽系では、コンドリュール形成は普遍的に起こっていたと考えるのが自然である。しかしながら、コンドリュールを形成するためには、岩石を溶かすほどまでの高温に達する現象が必要である。なお、コンドリュール同士が癒着している、コンパウンドコンドリュールは普通コンドライト隕石や炭素質コンドライト隕石で見つかっている[8, 9]。

コンドリュールを構成する主な鉱物は珪酸塩鉱物であるカンラン石や輝石である。ちなみに緑色で特にきれいなカンラン石は、ペリドットと呼ばれる宝石となる。珪酸塩鉱物を全部溶かすために必要な温度は1200度である。身近そうなものと比べるとマッチ、ライター、ろうそくなどの炎が数100度から1000度程度であるようだ。さて、どうやって太陽系星雲内でこれらの炎に相当するような高温現象を発生させるかを少し考えてもらいたい。

- A. 火打石のように何かをおつけければ良いのではないかといい考えです。2.1 微惑星衝突モデルにお進みください(図1左上)。
- B. 木をこすり合わせて火を起こすのは? 着眼点として面白いです。2.2 衝撃波形成モデルに近い(?)説が載っています(図1左下)。
- C. 野火のような自然現象でも発生するのは? 確かにそうです。2.3 その他のモデルで少しだけ様々な説を紹介しています。

上記のように大まかに分けた上で、本節では未だに有力だと考えられ、検討や研究が続いている説を紹介する(2010年以降でも論文発表があるものを主とする)。なお、これまでに様々な仮説が立てられてき

たが、残念ながら誰もが納得できる説は未だにない。

コンドリュール形成モデルとみなせるかどうかには様々な条件がつく[10]。決して欠かすことのできない条件は『岩石の融点に達して急冷する』ことである。溶けたとしても徐冷した場合には、観察されているような球形を形成することができないからである。そこで、形成モデルでは上記の条件を満たすかどうか議論の主点がおかれている。その他にも、コンドリュールに含まれる鉄や貴ガス、同位体組成比、などなど化学分析結果から示唆される制約は多い。しかしながら、形成モデルを構築する上で、これらの条件は初期条件に左右されやすく扱うことが難しい。このため、学会などで形成モデルを話すと実際にコンドリュールを『観ている』研究者から『怒られる』こともある。ぜひとも、読者の方々は寛大な目で下記の説を『見て』頂きたい。

### 2.1 微惑星衝突形成モデル

初期太陽系で必ず起こっていたであろう現象の一つが天体同士の衝突である。例えば、微惑星同士による衝突で地球型惑星が形成されたであろうし[11]、惑星表面上のクレーター形成にも天体衝突が欠かせない[12]。衝突時には天体表面が加熱され、衝突速度によっては岩石が溶融したり蒸発したりする温度にまで達する。天体同士の衝突の際にコンドリュールができたのではないかと考えるのが、『微惑星衝突形成モデル』である(図1右上)。なお、コンドリュール程度の大きさのダスト同士が衝突した場合には破壊が生じ[13]、たとえ溶融できたとしても更に小さくなるのでコンドリュール形成には向かない。

衝突前の微惑星(被衝突体)がどのような場合だとコンドリュールができるだろうか? 天体衝突や内部加熱(3節参照)などによって、微惑星表面は高温になりうる。すでに表面が高温、場合によっては溶融している微惑星に別の微惑星が衝突した場合には、衝突による放出物は容易に岩石の融点を超えることができる[14-16]。高温(溶融)微惑星の衝突であれば、コンドリュール形成に必要な条件、岩石融点に達することができる上に、その衝突速度は低速度でも構わない。さらには同時に放出される蒸気や微惑星のまわりにある非溶融のダストとの混合などは、コンドリュールの組成を説明するのにも役立ちそうであ

る[17, 18]. その一方で、溶融している微惑星は分化している可能性があるため、未分化隕石にあるコンドリュールの組成を再現するには向かない懸念もある(3節参照).

一方、低温状態の微惑星は衝突したとしてもコンドリュールはできないのであろうか? そうではない. 低温の微惑星が衝突した場合であっても、岩石の融点を超える物質を放出可能なことが数値計算によってわかってきた[19, 20]. 微惑星が未分化の状態かつ低温のままであってもコンドリュールは形成可能で、形成されたコンドリュールのサイズや冷却速度も測定値とよく合いそうである[19]. こちらの場合でも同時に蒸気を放出しうるため、コンドリュール組成の説明にも向いている[21]. 高温(溶融)微惑星における低速の衝突では放出物のサイズが大きくなってしまふ問題点も回避できる. しかしながら、溶融した放出物を形成するための衝突速度(2.5 km/s)は初期太陽系内では達成しにくいという問題点もある. 微惑星同士は少なくとも脱出速度以上で衝突する. 脱出速度は天体の大きさに依存し、直径100 kmでは数百 m/s、直径1000 kmで数 km/s程度となる(1000 kmの天体を微惑星と呼ぶには議論があると思うが、それはさておき). 低温微惑星でのコンドリュール形成に必要な衝突速度 2.5 km/sを超えるには、原始惑星の存在が必要そうである[19, 22, 23]. この微惑星衝突モデルによる一回の衝突で形成可能なコンドリュールの量は、衝突天体質量の1%程度である[19, 20]. 少量に思えるかもしれないが、長い目でみると衝突回数が多く小惑星の全質量に匹敵する量を形成可能であるし[19, 22]、角度のある衝突条件ではより多くの量(最大6%程度)を形成しうることもわかってきた[24].

さて、微惑星衝突形成モデルでの最大の懸念事項は、衝突の時期である. コンドリュールの形成年代は同位体測定によって、太陽系誕生時からおよそ100から500万年以内とわかっている[3-6]. それより前に微惑星が形成している必要があるが、微惑星自体の形成過程とその時期は未だに不明である. 仮に、コンドリュール形成前に微惑星ができていたとした場合、その微惑星は内部熱源を多く持つため高温に達ししやすい(3節参照). 高温微惑星の衝突形成モデルによく合いそうに見える一方で、やはり『分

化』してしまう可能性を持ち合わせている. 分化天体の衝突だと、形成される放出物の化学組成は『未分化』隕石に含まれるコンドリュールとは異なってしまふだろう. もし未分化の物質が表面を占めている状態であれば、内部の分化によらずコンドリュールの組成は説明可能であろう. 『未分化』のまま存在できるような時期に形成された微惑星はどうであろうか? 一般的には太陽系形成200万年後以降に形成された微惑星は『未分化』であり(3節参照)、低温微惑星の衝突形成モデルにあいそうである. 溶融した球形の鉄と隕石中で共存しているようなコンドリュールの形成は形成年代も遅く[25, 26]、微惑星衝突モデルと合いそうである[27, 28]. しかしながら、こちらのモデルでは太陽系形成から200万年以前に形成されたコンドリュールを説明することはどうあってもできない. 微惑星衝突形成モデルにおいては、微惑星の熱進化と合わせての研究が今後は欠かせなくなるであろう.

## 2.2 衝撃波形成モデル

初期太陽系星雲内にmm程度の大きさを持つ未溶融の固体物質(以下、ダスト)が星雲ガス中に漂っている状況は、微惑星が形成される前の描像である. まさにこのようなガスとダストをもつ原始惑星系円盤をALMA望遠鏡は観測している[29, 30]. 微惑星形成後であってもその周辺には、まだ微惑星に取り込まれていないダストが存在しうる. そのようなダストがコンドリュールになる前の物質(前駆物質)だとすると、ダストを溶かすために必要な高温に達するためには何が起これば良いだろうか. もし、なにかしらの要因によって、ガス中に衝撃波が発生すればガスはダストよりも高速で動くことになる. すると、ガスとダストとの相対速度が大きくなるために、ガスとの摩擦によってダストが高温になる. ダストが溶融できるほどの高温に達することができればコンドリュールが形成される、と考えるのが衝撃波モデルである[31]. 流星はこの加熱機構に比較的近い現象である(動く対象が逆であるが、高速で飛来するダストが地球大気との摩擦により高温になって発光している).

さて、初期太陽系内でガス中に衝撃波を発生させる要因は何があるであろうか? これまでには二つの説がある. 一つは、円盤内で大規模な不安定性が励

起された場合には起こりうると考えている。重力不安定などによる衝撃波モデルである[32, 33]。もう一つは、微惑星が円盤ガス中を高速で移動する際に生じる衝撃波で形成されるとする説である(その形状からbow shockモデルと呼ばれることが多い、図1左下参照)[34, 35]。通常であれば、太陽の周りを円軌道を描きながら公転運動している天体の速度は一定であるため衝撃波は発生しない。しかしながら、木星などの巨大ガス惑星(コア)によって、円軌道が乱されて楕円軌道になった場合には衝撃波を発生可能な速度にまで達することができる(例えば軌道離心率が0.3-0.5など[36])。どちらの説であっても、ある密度を持つ円盤ガスに対してコンドリュール前駆物質の相対速度が妥当な値を超えることができれば溶融が可能となる(例えば、 $10^{-9}$  g/ccだと7 km/s [34, 35])。

コンドリュールの物質化学的証拠から、ガスの存在下で凝縮したことが示唆されている。必ずガスに囲まれた状況で発生する衝撃波モデルは有力そうである。特に、衝撃波通過前後ではガスの密度も異なるため冷却時間も短くなり、コンドリュールの観察結果からわかっている冷却率を幅広い範囲で再現が可能である[35]。同位体組成の観点からも衝撃波モデルは支持されている[37]。さらには、原始惑星系円盤の観測結果などからは標準的な円盤ガスの持続時間は数100万年とされており、コンドリュールの形成中もまだガスが存在しているため衝撃波も発生しそうである。不安定性によるものは円盤の初期、bow shockは天体形成後の後期と、長期に渡ってコンドリュール形成が可能になるため、衝撃波モデルも良い説に思える。その一方で、高温に達するためには円盤のガス密度もある程度必要であるため(前述の $10^{-9}$  g/ccは円盤内側(数 au)に相当)、円盤外側での形成には向かない[10]。また、そもそも衝撃波が発生するかどうかが懸念事項となる。ある限られた条件下で不安定性が発生する必要があったり、微惑星とそれを揺り動かす巨大惑星が必要であったりする。前者に関しては本稿の主題を大いに超えるので、詳しくは[38]などを参照していただきたい。後者のコンドリュール形成に木星が関わっていたかどうかは、未だに議論が行われている[39]。隕石の同位体比測定からわかっている二分化の観点もあり

[40]、今後の研究の発展に期待したい。

### 2.3 その他のモデル

コンドリュール形成条件となる高温加熱現象として、微惑星衝突モデルと衝撃波モデルを本節では紹介してきた。他のモデルについても簡単に紹介する。表面がマグマオーシャン状態の微惑星であれば、そもそも微惑星をぶつけずとも放射による加熱で近くにあるダストを高温にすることができるというモデルがある[41]。マグマオーシャンを持つ微惑星はおそらくガスも放出しているので、ガスの存在下でコンドリュールが形成される。その後は、放出されたガスの流れに乗るために高温状態の微惑星に落ちることもない。しかし、どれだけ長期間マグマオーシャンを保持できるのか、その時期がコンドリュール形成時期と合うかなど疑問は付きにくい。他にも太陽系星雲内で発生した雷によって形成するというモデルもある[42, 43]。そもそも雷が発生しうるかという条件に関しては、 $^{26}\text{Al}$ の壊変時に発生する電子が有力な候補になるうことが示された[44]。ただし、こちらも他のモデルと同様にコンドリュール形成前に微惑星ができていなければならない。その一方で、国際宇宙ステーションでは雷モデルを模擬したコンドリュール形成実験が試みられているようで非常に興味深い[45]。本稿で最後に紹介するモデルとして、微惑星によらないモデルを紹介したい。原始惑星系円盤内で磁気乱流を駆動源とする円盤風と呼ばれる機構がある[46]。この円盤風によって鉛直方向に持ち上げられている際に加熱されて、コンドリュールができるというモデルがある[47]。コンドリュール形成に必要な条件を満たしそうな起点は1-3 au(地球から太陽の距離が1 au)と太陽系でも内側となるが、到着点が外側であればうまく外側でできたであろうコンドライト隕石母天体に取り込まれるし、内側由来の酸素同位体組成を外側でも保持できる可能性もある[48]。本節では著者の知りうる限りのモデルを散発的に紹介してきた。以前は検討されていたが近年ではあまり見かけなくなった説の行く末を知りたい読者や、コンドリュール形成史を紐解きたい熱心な読者には、レビュー論文として[10]や[49]などがお薦めである。

### 3. 微惑星での熱進化

隕石はコンドリュール以外にも多様な鉱物から構成されているが、熱による変成を経験した鉱物を含むこともある[1]. コンドリュールがその形成後に到達する隕石母天体中で生じた熱は、コンドリュール形成とは別となる初期太陽系で起こったもう一つの加熱現象によるものである。隕石内の鉱物の多様性は、飛来元である天体や隕石母天体の形成進化過程や場所にもよる。水質変質や熱変成によって生じた二次鉱物を調べることで、隕石が経験した当時の環境を推測することが可能となる[2]. 隕石母天体内部で変成が生じたということは、何らかの原因によって加熱を受けたことを意味する。本節では、隕石母天体内での加熱過程、微惑星の熱進化に触れる。

隕石の飛来元となった天体を推理することは難しいが、サンプルリターンミッションにおいてはその限りではない。はやぶさミッションによって採取された小惑星イトカワの微粒子を分析した結果、普通コンドライト隕石に近いことがわかっている[50]. はやぶさ2ミッションによって得られた小惑星リュウグウの微粒子は初期分析中であるが(本稿執筆2021年12月時点)、探査機によるリモートセンシング観測結果から炭素質コンドライト隕石に近いであろうと思われる[51]. サンプルリターンミッションで対象となったどちらの小惑星も直径が1 km未満と小さい上、再集積してできた小惑星(ラブルパイル天体)であることから、元になった天体はより大きかったものと考えられる。本節では、これらの微粒子や隕石の飛来元になった母天体の大きさを推測する試みにも触れる。

微惑星(隕石母天体)の主要な熱源として考えられているものは、短寿命放射性核種の壊変熱である。とある不安定な同位体元素は別の元素に壊変することが知られており、そのような元素は放射性元素と呼ばれている。壊変の際に放出されるエネルギー(熱)が微惑星の内部加熱の要因だと考えられている[52]. 放射性元素が壊変して半分になる時間のことを半減期と呼ぶが、その長さに応じて短寿命と長寿命の2種類に分類される。本節での微惑星の熱進化が対象とする時期は初期太陽系の数100万年間であるため、短寿命放射性元素による加熱の方が長寿

命放射性元素の加熱よりも効く[53]. 短寿命放射性核種の中でもその存在量などから $^{26}\text{Al}$ による加熱が有力であると考えられている。なお、衝突による加熱の痕跡も隕石中に確認されるが、局所的なものに留まるため微惑星の熱進化としては本節では取り扱わない。微惑星の形成時期や大きさに応じた熱進化過程の違いを順に紹介していく。3.1節では一般的な微惑星の熱進化、3.2節ではより複雑な微惑星の熱進化、3.3節で成長を考慮した微惑星、をそれぞれ取り扱う(図1右側参照)。

#### 3.1 微惑星の熱進化と拡散方程式

なにもない空間にポツンと存在する球を思い描いて頂きたい。それが本節で扱う微惑星、初期太陽系に存在した天体の姿である(図1). 外部からの影響を受けず、内部からの熱源のみで温まって冷えていく。微惑星の形成過程が未解明であり最初の形状が不明なことから、微惑星の熱進化を考える際には球対称の固体天体として扱うことが多い。このため、比較的簡単な式で解くことができる。本節では岩石のみからできている岩石微惑星に関する熱進化について述べる(水氷を含んだ場合は3.2節にて)。

さて、ほんの少しだけ物理数学の話をするので、就学していた頃を思い出して頂きたい。ここに一本の棒があったとして、棒の真ん中の温度が両端の温度よりも高いとする。さて、棒はどうやって冷えていくのであろうか。棒の大きさはどのくらいですか? その棒の物性値は何ですか? 温度条件はどうなっているのですか? こういった疑問が湧いてくる方は是非、微惑星の熱進化の研究にも手をつけていただきたい。微惑星の場合での先程の疑問に対する誰もが納得できる答えはない。なぜなら、誰も見たことがないからである。今後、微惑星の熱進化の研究に触れる際には注意してもらいたい。ちなみに、棒の冷却過程は拡散方程式と呼ばれる式を解くことでわかる。

微惑星の熱源として有力な短寿命放射性核種である $^{26}\text{Al}$ は半減期72万年で $^{26}\text{Mg}$ へと壊変する。この際に放出されるエネルギーが全て熱に変わると仮定することで、ようやく微惑星を温めることができる。先述の拡散方程式に壊変熱の加熱に関する項を一つ加えるだけで良く、ある条件下であれば解析的に解くこともできる[54]. 前述のように微惑星が未

知という点が問題となるため、実際には数値計算を用いることが多い。微惑星の大きさがわからないなら様々に仮定して解けば良く、物性値や温度条件も同様である(パラメータとして解く、という)。さらには、重要な熱源である $^{26}\text{Al}$ の量(初生比 $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ )、最初にどれだけの熱源を持っていたかは微惑星が形成された時期で決まる。微惑星の大きさ以上に形成時期が不明であるため、こちらもパラメーターとして数値計算で調べる必要が出てくる。

CAIsから推定されている初期太陽系での初生比と合わせて(CAIsは1節参照)、なぜ短寿命核種の中でも $^{26}\text{Al}$ が熱源なのかという疑問にここで答えたい[e.g., 55]。比較としてここでは $^{60}\text{Fe}$ をあげる。 $^{60}\text{Fe}$ も半減期260万年で $^{56}\text{Fe}$ へと壊変する短寿命放射性核種であり、壊変時の原子1個当たりのエネルギーは $^{26}\text{Al}$ と同程度である。太陽系元素存在度からFeの存在比はAlよりも10倍程度大きい。しかしながら、初期太陽系での $^{60}\text{Fe}/^{56}\text{Fe}$ の初生比は大きく見積もっても $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ の100分の1以下である。結果として、 $^{26}\text{Al}$ の壊変熱の方が卓越するため $^{60}\text{Fe}$ を考慮することは少ない[55]。

微惑星熱進化から微惑星の大きさを探った研究はいくつかある。ここでは一例として小惑星イトカワの母天体に関連した研究をとりあげる[56]。彼らはイトカワ微粒子が経験した温度と時間を再現するために必要な母天体の姿を明らかにするために拡散方程式を数値計算で解いた。イトカワ微粒子が普通コンドライト隕石に近いことから、その隕石の物性値を仮定した。800度以上1000度未満を経験しつつ、太陽系形成から760万年後にも700度を保っていたというイトカワ微粒子の観察結果がある。これを満たすためには、太陽系形成から約200万年後に半径20 km以上の大きさでイトカワ母天体が形成されていたことがわかった。イトカワ母天体の大きさの最小値にしか言及できていないのは、これ以上大きくとも中心の温度、微惑星の最高到達温度には差は出てこないからである<sup>4</sup>。一般的な普通コンドライト隕石の物性値を使った場合、微惑星内部の最高到達

温度に影響が出てくる微惑星の半径は20–30 kmである。これ以上大きい天体の熱進化で違いが出てくる点は天体内部の冷却速度ぐらいである。大きな天体のほうが熱を内部に維持できる期間が長くなるというのは、同じ温度だとしても浴槽のお湯が冷えるにくくコップの中のコーヒーが冷めやすいのと同様である。冷却のタイミングは微惑星の内部でも深さによって異なる。このことを用いて、隕石中の二次鉱物の年代とその形成温度を対応させることで、隕石母天体の大きさだけではなく形成時の深さまで特定することが可能となる[57, 58]。

太陽系形成直後に形成された微惑星の内部温度は岩石が溶融するほどの高温に達することができる。このような微惑星では、溶融した物質が内部に沈み込みコアを形成して分化すると考えられている[59–61]。前述のように加熱の重要な鍵となるのは形成時期であるため、微惑星の大きさが数 kmであっても(部分)溶融の可能性はある[62]。早期に形成されて分化した微惑星というのは、机上の空論ではない。鉄ニッケル合金を主成分とする鉄隕石が存在しているが、鉄隕石を作るためには鉄隕石母天体が分化していたと考えられている。分析結果からは分化した時期(鉄コア形成の時期)は太陽系形成から70–290万年後と幅はあるものの、最も早く分化するためには10–30万年後頃には鉄隕石母天体が形成されたと推測されている[60, 61]。普通コンドライト隕石に近いイトカワ母天体の形成よりだいぶ前に、鉄隕石母天体が形成されていたことになる。

このように微惑星の大きさや形成時期( $^{26}\text{Al}$ の量)で熱進化過程は様々に変化する。とはいえ、一次元熱拡散方程式を解くだけであれば、もう熱進化の研究は終わったのでは? やる意味はないのでは? 実際にそう言ってくる方もいたし、疲れたときの著者ですらそう思うこともある。そう思わない読者は是非次節以降も読んで頂きたい。隕石との関連や微惑星の成長過程から、もう少しだけ微惑星の熱進化ではやるべきことが残っている、と疲れていないときの著者は考える。

### 3.2 含水微惑星での熱進化

初期太陽系で微惑星は $^{26}\text{Al}$ の壊変熱による加熱で温まって冷えていく。これが微惑星の熱進化の基

<sup>4</sup>熱拡散を無視できる極限を想定すると微惑星が到達可能な温度(最高到達温度, K)は、微惑星が形成した際の単位質量あたりの $^{26}\text{Al}$ の壊変熱(J/s/kg)を比熱(J/kg/K)で割った値に時間の項(s, ~100万年)を適切に掛けることで得ることができる。

礎であるが、前節で取り扱わなかった熱に関する重要な項目が二つある。一つは水氷の存在、もう一つが化学反応である。後者の中でも水質変質では、液体の水と岩石の反応や液体の水からの析出によって二次鉱物が生じる。これらは炭素質コンドライト隕石には普遍的に見られる鉱物であり、以前は水氷を含んでいたであろう小惑星(リュウグウやベヌーなどのC型小惑星)との関連性を考える上では欠かせない。そこで本節では水氷を含む含水微惑星に関する熱進化について述べる。

初期太陽系のある時期に形成された同じ大きさ(体積)の微惑星として、含水微惑星と岩石のみから構成される岩石微惑星を考えてみる。含水微惑星では水氷を含むために岩石の体積が岩石微惑星に比べて少ないため、結果として $^{26}\text{Al}$ の量も少なくなる( $\text{Al}$ を含む水氷は考えにくいいため、 $\text{Al}$ は岩石にのみ含まれると仮定している)。このために到達できる温度は含水微惑星よりも岩石微惑星の方が高くなる。たとえ、含水微惑星の内部で氷が融ける温度(圧力による融点の違いを無視すれば摂氏0度)にまで達することができたとしても、ここで氷を融かすために熱が使われてしまう(水氷の潜熱)。氷の溶融にどの程度の熱が使用されるかは含水微惑星に含まれている水氷の量(含水量)にもよるが、総じて含水微惑星の方が岩石微惑星よりも低い温度にまでしか達することができない(図1右側参照)。

氷と岩石は接していても反応しないが、液体の水と岩石では化学反応が生じることがある。实例を示すために、少しだけ炭素質コンドライト隕石中の鉱物に触れる。コンドライトの主成分でもある珪酸塩鉱物は、コンドライト隕石でも主要鉱物であり石基中にも多い。液体の水と接して水質変質を経験すると異なる鉱物、(鉱物の層と層の中に水分子を含む)層状珪酸塩鉱物へと置き換わる。水質変質を経験した炭素質コンドライト隕石中ではよく見られる鉱物であり、水質変質の程度が大きいとコンドライトもその形状のみを残して二次鉱物に置き換わることもある[63]。さて、珪酸塩鉱物が層状珪酸塩へと置き換わった際の化学反応を推測すると、その水質変質は発熱反応だとわかる[55, 64, 65]。含水微惑星内で水質変質が生じると、新たな熱源となって内部の温度が上昇するのである。ここで注意したい点

は、すべての化学反応が温度上昇に寄与するわけではない。例えば、更に温度が上昇して600度近くに達した場合には、層状珪酸塩鉱物から水が抜ける脱水反応が生じる[66]。こちらの化学反応は吸熱反応となるため、逆に温度上昇を妨げる役割を果たす[55]。

含水微惑星の熱進化では、氷の溶融のために温度上昇が抑制される一方、液体の水によって水質変質が生じた場合には温度上昇に貢献が得られる。温度上昇が継続してしまうと脱水反応によって再び温度上昇が抑制されるため、含水微惑星の熱進化は一筋縄ではいかない。さらに付け加えると、変成を受けた隕石中の二次鉱物は多岐にわたるため、実際の系はさらに複雑である。そもそも実際の鉱物の大きさ(マイクロメートルからミリメートル)と比べてもだいぶ大きいスケール(どんなに頑張ってもメートルまで)でしか計算できない微惑星の熱進化では、二次鉱物の再現には困難が付きまとう。しかしながら、二次鉱物が生成した際の温度と時期を測定によって知ることが可能なため、微惑星の熱進化を用いて隕石母天体の形成時期を制約することができる。ここでは一例として、炭素質コンドライト隕石に含まれる炭酸塩鉱物についての研究をとりあげる[67]。放射性同位体元素を用いた年代測定から太陽系形成から430–570万年後に炭酸塩鉱物が形成されたこと、その形成には20度~120度以上が必要ことがわかった。この温度と時期を同時に達成可能な含水微惑星は太陽系形成から300万年後に形成される必要があることを微惑星の熱進化の計算から突き止めた[67]。同様の研究は別の炭素質コンドライト隕石中の二次鉱物に対しても行われている[68]。炭素質コンドライト隕石母天体の形成年代を推測するという重要な研究を行う上で、含水微惑星の熱進化はまだまだ欠かせない。

### 3.3 成長する微惑星での熱進化

前節までは微惑星が瞬間的に形成されたという仮定をおいた上での熱進化を紹介してきた。その理由の一つが、熱進化で取り扱う時間スケールが数100万年単位であるためである。もしも微惑星が初期太陽系星雲内での不安定性によって形成された場合には、太陽の周りを一周する程度の時間(一周



期; 地球の場所であれば1年, 木星の場所であれば12年)で形成される[69]. 熱進化の時間スケールに比べると非常に短いため, 微惑星の熱進化では形成された微惑星を考慮することが多い. 微惑星の形成過程がよくわかっていないとはいえ大雑把な仮定ではある. 本節では, 微惑星が形成しながら熱進化をした場合はどうなるかを考慮した研究について簡単に触れたい.

成長過程を考慮した微惑星の熱進化であっても, 基本的には前節までと変わらず球対称な微惑星を取り扱う. そのため, 単位時間当たりの微惑星の半径がどれだけ増加していくかが新たなパラメーターとして加えられる(布団の中で温まろうとしている最中に上から冷たい毛布が追加されることを想像してもらいたい, 図1右下参照). 熱進化の途中である微惑星表面にある温度の質量(体積)と熱源( $^{26}\text{Al}$ )が増えていったとしても, 半径30 km以上の大きさを持つ微惑星では内部の最高到達温度は変わらない(3.1節参照). 微惑星の大きさが大きいほど, その後の成長過程は内部の温度進化には影響しなくなる. しかしながら, 初期微惑星の半径が小さかった場合には, 成長過程を考慮することで熱進化には大きな影響があり[70], 鉄コアの形成などの分化を考慮する際には重要となる[62, 71]. ちなみに, 鉄コア形成によって初期に保持していた空隙が減ったり焼結が生じたりした場合には, 微惑星の全体の大きさが縮むことになり, このことはその後の熱進化に影響を与える[58, 62].

成長中の微惑星表面に追加された物質に対しては, 鉄コアの有無が重要になってくる. 地球の鉄コアでのダイナモと同じ原理で磁場が発生した場合は特にそうである. 岩石の溶融が起こるほどの高温に達した微惑星内では鉄のコアが形成されて分化が起き, その状況によっては磁場を発生させる可能性がある[72-74]. 微惑星の成長を考慮した場合には, その成長速度に応じて鉄コアの大きさが異なるため, 磁場の強さに大きな影響がでることがわかってきた[71]. このような天体由来磁場の痕跡を保持しているのは鉄隕石だけではない[75]. 未分化のコアをもたない天体由来だと考えられている(た)コンドライト隕石でも確認されている[74, 76, 77]. もし鉄コアによる磁場を保持している微惑星が成長を続けてい

た場合には, 降り積もった未分化の物質は磁場を記録できるようになる[78, 79]. 磁場の起源が鉄コアであった場合には, 成長する微惑星での熱進化と隕石から測定された磁場の強さを考慮することで, 隕石母天体の成長過程に制約を与えることができるようになってきた.

## 4. コンドリュール・微惑星から隕石・小惑星まで

本稿ではコンドリュール形成モデルと微惑星の熱進化モデルと, 初期太陽系星雲内の二つの加熱現象を簡単に紹介してきた. 最後の節では両者を結ぶために必要な時間や形成場所の話題, 隕石・小惑星へと至る過程について触れる. もうしばらくお付き合いいただければ幸いである.

まずは, コンドリュール形成と隕石母天体(微惑星)の形成時間の話から始めよう. 本稿で出てきた時間( $t$ )に関する話を太陽系生成時=CAIs形成時を基準にまとめると, 以下のようになる(図2).

- (a)  $t = 0$ ; CAIs形成(現在から45.67億年前)
  - (b)  $t = 10\text{--}30$ 万年後; 分化隕石母天体形成
  - (c)  $t = 100\text{--}500$ 万年後; コンドリュール形成期間
  - (d)  $t = 200$ 万年後; 未分化隕石母天体形成
  - (e)  $t = 400$ 万年後; 隕石母天体内での二次鉱物形成
- コンドリュール形成に微惑星が関わっている可能性はあるようにもみえるし, ないようにもみえる. 早期に形成された微惑星は高温になっている可能性が高いため(3.1節), 高温(溶融)微惑星の衝突には都合が良いようにも見える(2.1節). その一方で, コンドリュールは未分化の隕石から見つかっているため(未分化隕石母天体由来), 分化している可能性をもつ早期形成の微惑星は好ましくない可能性も残る. もしも, 微惑星の表面が未分化のままの状態であったり, 未分化物質が降り積もっている状態であったりする場合は微惑星衝突であればコンドリュール形成も可能である[19]. 低温状態で未分化の微惑星同士の衝突の方がコンドリュール形成には好ましい[19, 20, 24].

隕石中の同位体比測定により, 初期太陽系星雲がなんらかのメカニズムで二分化されていたことが示唆されている[40]. もし, 巨大ガス惑星(コア)によ

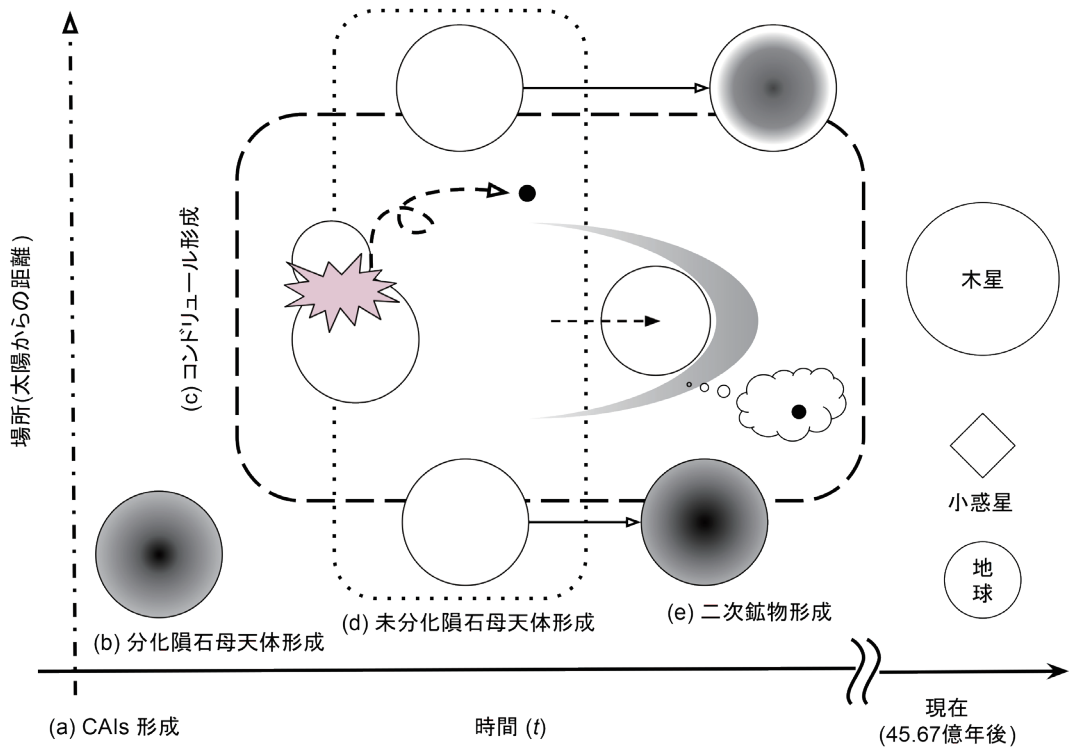


図2: コンドリュール形成と微惑星熱進化の時間と場所の概要図(4節)。横軸は時間、縦軸は場所を表している(天体の大きさなどはスケール通りではない)。

て太陽系内物質が二分されていた場合には、二分された後で隕石母天体が形成されると隕石の同位体比を説明可能である。コンドリュール形成の前までに巨大ガス惑星のコアが形成されていた場合には、微惑星の分化・未分化の状態に関わらず衝撃波モデル(bow shock)によるコンドリュール形成も可能となる[34–36]。二分化された時期とその機構が明らかになれば、より詳しいコンドリュール形成と微惑星形成の描像が明らかになるであろう。

コンドリュールが初期太陽系星雲内のなんらかの加熱過程で形成されたとしよう。その後、未分化隕石の母天体に取り込まれるまでには時間が空いている。コンドリュールの年代測定の結果[4–7]、熱進化計算から示された二次鉱物を形成するための隕石母天体の形成時期[67, 68]、この二つから推測するに少なくとも100万年間の時間が空いている[80]。さらには、一つのコンドライト隕石中でも幅広い年代を示すコンドリュールが含まれることもある[26]。し

かしながら、100万年間もコンドリュールが太陽系星雲内に留まれるのかは甚だ怪しい。原始惑星系円盤中での1 mmサイズのダスト粒子は10万年程度の時間で動径方向に移動する [81]。せっかく形成されたコンドリュールは動径方向に移動して、微惑星に取り込まれる前に太陽に向かって移動していく可能性が高い。コンドリュールの酸素同位体組成の測定結果からは同じような組成を持つ場所で形成されて、異なる場所で形成されたものは混ざっていないとも示唆されている[82]。もし動径方向への移動があったとしても同じ大きさの物質であれば同じような時間スケールに動くため、どこか一か所に留める機構があれば良いことになる。例えば、円盤での乱流が弱かったり円盤構造が比較的平らだったり条件によってはコンドリュールを太陽系星雲内に100万年間留めておくことが可能そうである[83]。その後、コンドリュールは一つのダストとして振る舞って微惑星を形成したり[69]、既存の微惑星表面に降り積もった

りすることになるであろう[84].

大雑把な時間的な視点からは、微惑星ができてコンドリュールができて、それが微惑星に取り込まれて隕石母天体となつてから小惑星へと進化していった(図2). と簡単に書けるが、ここには場所という視点が抜けているので、少し補強を試みる。コンドリュールと微惑星の形成場所を議論するために、ここでは磁場を取り上げてみる。強い磁石にクリップをくっつけるとクリップ自体が磁石になる。これと似たような仕組みで、磁場の存在下では特定の鉱物(磁鉄鉱)は磁場の情報を記憶することができる。この情報は残留磁化と呼ばれ、その鉱物がある温度(キュリー温度)付近を下回った際に獲得できる。もう一度その温度を経験すると以前の情報は消えてしまうことには注意が必要である。3.3節で述べたように、未分化隕石であるコンドライト隕石中の鉱物でも残留磁化を示す鉱物が発見されており[74, 76, 77], その強度や向きから微惑星内での磁場を発生させる鉄コアの存在を示唆するものもある[75, 78]. その一方で、コンドリュールの残留磁化は明確に初期太陽系星雲内での磁場の存在を示すものと言える[85].

コンドリュールが残留磁化を獲得できそうな場所と時間は、初期太陽系星雲内でコンドリュールが加熱形成された時であろう。このことが確かめられた上、示唆された原始太陽系星雲内の磁場の強さは炭素質コンドライト隕石中のコンドリュールと普通コンドライト隕石中のコンドリュールで同程度であった[85]. 普通コンドライト隕石と炭素質コンドライト隕石は形成場所が異なっていたであろうことが同位体組成から指摘されている[40]. もしコンドリュールの形成年代と初期太陽系の磁場の強さ(太陽系内ガスの散逸過程に由来)を同時に測定できれば、コンドリュールはもちろんのことコンドライト隕石母天体の形成場所も明らかにすることができる可能性が高い。ただし、前段落で述べたようにコンドリュールの形成時期とコンドライト隕石母天体の形成年代に差はあるため、形成場所が同じとは限らないことには注意が必要であろう。とはいうものの、別のコンドライト隕石中で発見されたコンドリュール以外の鉱物も、微惑星の鉄コア起源の磁場よりも初期太陽系星雲内での磁場の存在を支持している[86]. コンドリュールと微惑星は似たような磁場の強さの場所で

形成された可能性もあるため、半径数10 km以上の隕石母天体の内部にまで影響を及ぼすことができる初期太陽系の磁場の強さがわかれば、コンドリュールと隕石母天体の形成場所も明らかになるかもしれない。その一方で、現時点では小惑星の磁場の情報はほとんどないため[87], 今後の探査ミッションにも期待したい。

本稿ではコンドリュールの形成過程や隕石母天体の熱進化過程に関する研究を述べてきた。過去の情報が完全ではないため仕方がないことではあるが、どちらの過程でも様々な仮定をおいている。少しでも仮定を減らすことができればさらなる研究の進展が望める。コンドライト隕石は初期太陽系の情報を持つ貴重な化石である一方で飛来元の天体が不明であるという欠点がある。サンプルリターンミッションでは小惑星とリターンサンプルの両方の情報が得られる重要な機会であるため、今後も継続してもらいたい。現在分析中であるリュウグウや今後分析されるであろうバヌーのサンプル分析の結果から、元になった天体の進化過程が明らかになると著者は大いに期待している。ただ、どちらも再集積した小惑星にみえるため大元になった天体を探るためにはいくつかの仮定を置く必要があるであろう。本稿で述べたようにコンドライト隕石は必ずしも太陽系内で最初にできた天体から飛来しているものではなくさそうである。もしも、最初にできた微惑星を見つけることができれば、さらなる研究の発展が望めるのではなからうか?そのような試みが達成されることを強く願う。

最後に、ここまで読んでいただいた読者の方々、本稿の執筆の声掛けをしてくださったゲストエディターの奥住聡氏、初稿の確認などをしてくださった遊星人編集長の三浦均氏、そして本稿を査読してくださった城野信一氏に感謝します。

## 引用文献

- [1] Krot, A. N. et al., 2014, in *Meteorites and Cosmochemical Processes*, 1.
- [2] Scott, E. R. D. and Krot, A. N., 2014, in *Meteorites and Cosmochemical Processes*, 65.
- [3] 牛久保孝行, 2016, *遊星人* 25, 8.

- [4] Kita, N. T. and Ushikubo, T., 2012, MAPS 47, 1108.
- [5] Nagashima, K. et al., 2017, GCA 201, 303.
- [6] Pape, J. et al., 2019, GCA 244, 416.
- [7] Connelly, J. N. et al., 2012, Science 338, 651.
- [8] Wasson, J. T. et al., 1995, GCA 59, 1847.
- [9] Akaki, T. et al., 2007, ApJL 656, L29.
- [10] Desch, S. J. et al., 2012, MAPS 47, 1139.
- [11] Kokubo, E. and Ida, S., 2000, Icarus 143, 15.
- [12] Melosh, H. J., 1989, Impact Cratering (Oxford Univ. Press, New York).
- [13] Ueda, T. et al., 2001., Earth Planets Space 53, 927.
- [14] Asphaug, E. et al., 2011, EPSL 308, 369.
- [15] Sanders, I. S. and Scott, E. R. D., 2012, MAPS 47, 2107.
- [16] Sanders, I. S. and Scott, E. R. D., 2018, in Chondrules: Records of Protoplanetary Disk Processes, 361.
- [17] Alexander C. M. O. 'D. et al., 2008, Science 320, 1617.
- [18] Budde, G. et al., 2016, PNAS 113, 2886.
- [19] Johnson, B. C. et al., 2015, Nature 517, 339.
- [20] Wakita, S. et al., 2017, ApJ 834, 125.
- [21] Dullemond, C. P. et al., 2016, ApJ 832, 91.
- [22] Hasegawa, Y. et al., 2016, ApJ 816, 8.
- [23] Oshino, S. et al., 2019, ApJ 884, 37.
- [24] Wakita, S. et al., 2021, Icarus 360, 114365.
- [25] Krot, A. N. et al., 2005, Nature 436, 989.
- [26] Bollard, J. et al., 2017, Science Advances 3, e1700407.
- [27] Fedkin, A. V. et al., 2015, GCA 164, 236.
- [28] Oulton, J. et al., 2016, GCA 177, 254.
- [29] 武藤恭之, 2019, 遊星人 28, 190.
- [30] 野村英子, 2019, 遊星人 28, 200.
- [31] 三浦均, 2005, 遊星人 14, 4.
- [32] Boss, A. P. and Durisen, R. H., 2005, ApJL 621, L137.
- [33] Morris, M. A. et al., 2016, MAPS 51, 870.
- [34] Boley, A. C. et al., 2013, ApJ 706, 101.
- [35] Mann, C. R. et al., 2016, ApJ 818, 103.
- [36] Hood, L. L. et al., 2009, MAPS 44, 327.
- [37] Nie, N. X. et al., 2021, Science Advances 7, eabl3929.
- [38] Boss, A. P., 2017, ApJ 836, 53.
- [39] Bodenan, J.-D. et al., 2020, ApJ 901, 60.
- [40] Kruijer, T. S. et al., 2017, PNAS 114, 6712.
- [41] Herbst, W. and Greenwood, J. P., 2016, Icarus 267, 364.
- [42] Desch, S. J. and Cuzzi, J. N., 2000, Icarus 143, 87.
- [43] Güttler, C. et al., 2008, Icarus 195, 504.
- [44] Johannsen, A. and Okuzumi, S., 2016, A&A 609, A31.
- [45] Koch, T. E., et al., 2021, MAPS 56, 1669.
- [46] 鈴木建, 2009, 遊星人 18, 147.
- [47] Salmeron, R. and Ireland, T. R., 2012, EPSL 327, 61.
- [48] Ireland, T. R. et al., 2016, MetSoc 79, 6240.
- [49] Connolly, H. C. and Jones, R. H., 2016, JGR 121, 1885.
- [50] Nakamura, T. et al., 2011, Science 333, 1113.
- [51] Sugita, S. et al., 2019, Science 364, 6437.
- [52] Gail, H.-P. et al., 2014, in Protostars and Planets VI, 571.
- [53] Gail, H.-P. and Tieloff, M., 2019, A&A 628, A77.
- [54] Carslaw, H. S. and Jager, J. C., 1959, Conduction of heat in solids (Oxford: Clarendon Press).
- [55] Wakita, S. and Sekiya, M., 2011, EPS 63, 1193.
- [56] Wakita, S. et al., 2014, MAPS 49, 228.
- [57] Harrison, K. P. and Grimm, R. E., 2010, GCA 74, 5410.
- [58] Henke, S. et al., 2012, A&A 545, A135.
- [59] Kruijer, T. S. et al., 2013, EPSL 361, 162.
- [60] Kruijer, T. S. et al., 2014, Science 344, 6188.
- [61] Neumann, W. et al., 2018, JGR 123, 421.
- [62] Neumann, W. et al., 2012, A&A 543, A141.
- [63] Brearley, A. J., 2006, in Meteorites and the Early Solar System II, 584.
- [64] Grimm, R. E. and McSween, H. Y., 1989, Icarus 82, 244.
- [65] Cohen, B. A. and Coker, R. F., 2000, Icarus 145, 369.

- [66] Nozaki, W. et al., 2006, MAPS 41, 1095.
- [67] 藤谷渉 ほか, 2012, 遊星人 21, 350.
- [68] Doyle, P. M. et al., 2015, Nature Communications 6, 1.
- [69] Johansen, A. et al., 2014, in Protostars and Planets VI, 547.
- [70] Merk, R. et al., 2002, Icarus 159, 183.
- [71] Dodds, K. H. et al., 2021, JGR 126, e2020JE006704.
- [72] Weiss, B. P. et al., 2021, Science Advances 7, eaba5967.
- [73] Bryson, J. F. J. et al., 2019, EPSL 521, 68.
- [74] Bryson, J. F. J. et al., 2019, JGR 124, 1880.
- [75] Maurel, C. et al., 2021, GRL 48, e2020GL091917.
- [76] Carporzen, L. et al., 2011, PNAS 108, 6386.
- [77] Shah, J. et al., 2017, EPSL 475, 106.
- [78] Elkins-Tanton, L. T. et al. 2011, EPSL 305, 1.
- [79] Weiss, B. P. and Elkins-Tanton, L. T., 2013, Annual Review of Earth and Planetary Sciences 41, 529.
- [80] Desch, S. J. et al., 2018, ApJS 238, 11.
- [81] Nakagawa, Y. et al., 1986, Icarus 67, 475.
- [82] Herwig, A. T. et al., 2019, GCA 253, 111.
- [83] Taki, T. and Wakita, S., 2021, submitted.
- [84] Matsumoto, Y. et al., 2017, ApJ 837, 103.
- [85] Borlina, C. S. et al., 2021, Science Advances 7, eabj6928.
- [86] Fu, R. R. et al., 2021, AGU advances 2, e2021AV000486.
- [87] Henrick, D. et al., 2020, JGR 125, e2019JE006035.