



特集記事・2

鉄～宇宙・地球・生命・文化・未来～

鉄隕石の起源：宇宙を漂い故郷に帰る 小さな鉄の旅人

Origin of Iron Meteorites:
Small Travelers in the Universe Returning to Their Home

大槻圭史
Keiji Ohtsuki

神戸大学大学院
理学研究科・惑星学専攻
教授

1 隕石：太陽系形成過程解明の鍵

太陽系の中を漂う小さな固体物質のうち、地球などの惑星の表面に落下してきたものを隕石（いんせき）と呼びます。地球の場合、落下してくる固体物質が小さい場合には、地球大気中を通過している間に燃え尽きてしまい地表まで届きません。十分暗い夜空では流れ星を観察することができますが、これは上のように、地球大気に突入してきた小さな塵（ちり）が燃え尽きる際に発せられる光を見ているのです。大気中で燃え尽きてしまうような小さな塵は、小宇宙と呼ばれる小さな天体の破片や彗星から放出されたものだと考えられています。一方、十分大きくて燃え尽きずに地表に達したものが隕石です。落下する隕石が巨大な場合は、地球の気候に大きな影響を及ぼすことさえあります。そこまで大きくなくても落下によって被害が出ることもあり、2013年2月のロシア・チェリャビンスク州での隕石落下のニュースは記憶に新しいところです。この際には直径約17メートルの小惑星が大気に突入したのち爆発・分裂して落下し、発生した衝撃波により多数の建物のガラスが割れるなど建物に被害が出て、けが人も多数出ました。このように大き過ぎる隕石は歓迎されませんが、そうでないものは実は科学的に大変貴重なものです。

隕石の多くは45億年前頃に形成されたことが詳しい分析の結果わかっており、太陽系の形成進化過程を探るうえで、とても重要な手掛かりを与えてくれます。太陽系や宇宙の進化を明らかにするために、望遠鏡や探査機などを使った研究が進められていますが、隕石は太陽系の起源に関する情報を内に秘めて自ら地球にやってきてくれるという、まさに天からのプレゼントとも言えるのです。隕石には様々な種類があ

りますが、主として岩石からなる石質隕石と金属からなる鉄隕石、そして両者が混じったような石鉄隕石に大きく分類することができます。このうち岩石からなる隕石は地球に落下したのち、太陽光や風雨にさらされて徐々に変質したり壊れたりしてしまい、地表で長生きすることはできません。一方、鉄隕石は主として鉄とニッケルからできており、地表に落下後も風化等の影響を受けにくく古いものでも長生きできます。例えば、ナミビアで発見されたホバ隕石という鉄隕石は最大の隕石として知られていますが、8万年以上前に落下したにもかかわらず幅約3メートル、厚さ約1メートルの大きさがあり、重さは60トンにもなります。また火星表面に落下した鉄隕石も探査機によって発見されています¹⁾ (図1)。地

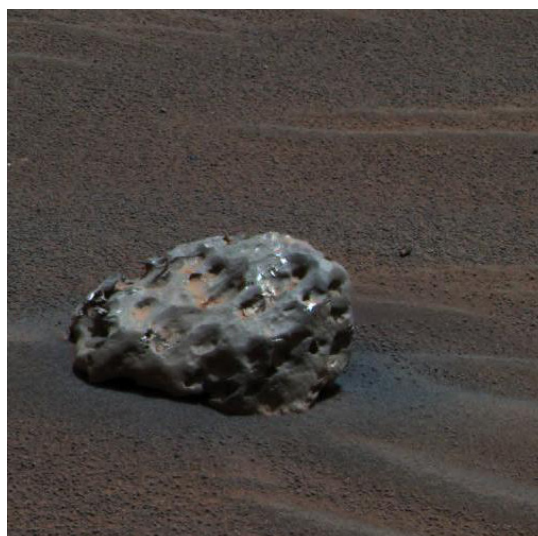


図1 NASAの火星探査機オポチュニティが火星表面上に発見した鉄隕石 (NASA提供¹⁾)。

地球上に落ちた鉄隕石は、精錬技術を持たなかった時代には貴重な道具や武器として使われました。実はこの鉄隕石がどうやってできたか、というのは、大きな謎でした。

2 鉄隕石の作り方

惑星は微惑星と呼ばれる小さな天体が、太陽の周りを回りながら衝突合体を繰り返して形成されたと考えられています。惑星の材料物質は岩石と金属の鉱物が混じったものであったと考えられています。一方、鉄隕石は鉄とニッケルからできています。これは、惑星材料物質の進化過程のどこかで、これらの金属成分が岩石から分離されたことを示しています。この分離過程では、惑星材料物質に含まれる放射性核種と呼ばれる不安定な元素、特に ^{26}Al および ^{60}Fe が重要な役割を果たしたと考えられています。例えば、安定なアルミニウム原子である ^{27}Al の原子核は陽子13個と中性子14個を持つのに対して、不安定な ^{26}Al は中性子が13個です。 ^{26}Al の陽子のうち一つが中性子に変わると陽子が12個、中性子が14個となりますが、これは安定な元素であるマグネシウム(^{26}Mg)です。この ^{26}Al から ^{26}Mg への変化(放射壊変)の際に熱が放出されます。この変化により ^{26}Al は次々と ^{26}Mg に変わり、約70万年という、太陽系の年齢である46億年に比べると非常に短い期間で数が半減します。このため現在の太陽系には ^{26}Al はほとんど存在していません。同様に ^{60}Fe は約300万年で半減します。しかし、太陽系形成の初期の頃にはこれら短寿命放射性核種と呼ばれる元素が出す熱が、天体の加熱に重要な働きをしたと考えられています。小さな微惑星の場合、衝突による加熱よりもこれらの核種の崩壊熱が主な熱源となるのです。

微惑星は衝突合体をしながら徐々に大きくなります。この際、大きくなるのがゆっくりだと、上に述べた放射性核種による加熱があってもすぐに冷えてしまい、微惑星内部の温度は高くなりません。一方、微惑星の衝突が次々と起こり成長が早いと、冷える前にさらに上から他の微惑星が降り積もってくるため熱エネルギーが蓄えられ、微惑星内部の温度は徐々に高くなっていきます。温度が十分高くなると惑星材料物質のうち融点の低いものから融けだします。鉄などの金属は岩石よりも融けやすく、融けた金属成分は密度が高いため微惑星自身の重力に引かれて微惑星の中心部分に集まります。このようにして、短寿命放射性核種の崩壊熱により岩石と金属の分離が起き、その結果、中心に金属核が形成されます。核とマントルに分化した微惑星が後に衝突を受けて破壊され、その際に飛び散った金属核の破片が鉄隕石の元となったと考えられています。

3 鉄隕石の起源の謎

しかし、鉄隕石の起源には謎がありました。隕石の多くは、太陽系の中でも小惑星帯という、火星と木星の間の軌道付近から地球にやってきたと考えられています(図2)。地球のすぐ近くでは地球や火星といった惑星の重力の影響のために軌道が乱されて惑星への衝突が起こるため、長時間安定な軌道上に滞在することができないのです。つまり、太陽系の中でもより安全な、小惑星帯を長く漂い、そのあとで地球に落ちてきたのが隕石であると考えられています。一方、上に述べたように、微惑星の内部が短寿命放射性核種の崩壊熱によって十分加熱されるためには、微惑星が冷える前に次々と衝突が起きて微惑星がすばやく成長する必要があります。地球や金星、火星といった地球型惑星が形成された場所では惑星材料物質も十分あり、太陽の周りをまわる時間も短いので、微惑星がすばやく成長することが可能で、微惑星の内部も岩石と金属の分化が起きるほど高温になったと考えられます。それに対し、さらに太陽から離れた場所である小惑星帯では、惑星材料物質が少なかったうえに太陽の周りをまわるのも時間がかかるため、なかなか微惑星は成長できません。そうこうしているうちに短寿命放射性核種の崩壊は進んでしまい、微惑星を十分加熱する前になくなってしまいます。このため、小惑星帯で成長した微惑星の場合は内部分化が起きず、金属の核はできなかったと考えられます。

このように、鉄隕石を含む隕石は小惑星帯からやってきたと考えられるのに、隕石の故郷であると思われる小惑星帯では微惑星内部の分化は起きず、鉄隕石は形成されません。ではどのようにして鉄隕石は形成され、どのような道をたどって地球にやってきたのでしょうか？この謎は、コンピュータを使った詳しい研究により明らかにされました²⁾。

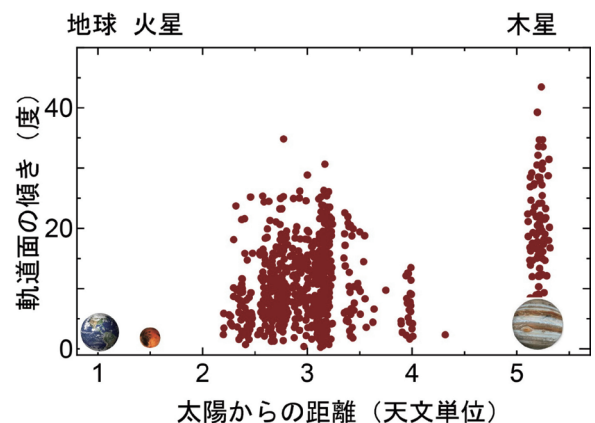


図2 直径50キロメートル以上の小惑星の分布。軌道面の傾きと太陽からの距離の関係を表す。参考のために、地球、火星、木星の位置を示している。小惑星が多く分布する火星と木星の間の領域は小惑星帯と呼ばれる。

4 故郷を離れて宇宙の旅へ

微惑星は衝突合体を繰り返し、より大きなものへと成長していきます。この結果、数十キロメートルのものから、大きいものでは月や火星のように、直径1000キロメートルを超えるものも形成されます。このように大きく成長した微惑星は、原始惑星と呼ばれます。地球型惑星領域では微惑星は十分早く成長するため、短寿命放射性核種の崩壊熱によって内部が加熱され、岩石と金属の分化が起きます。一方で、原始惑星から受ける重力のため小さな微惑星の軌道は大きく乱され、微惑星同士が高速度で衝突するようになります。その結果、今までのように衝突したら合体するのではなく、粉々に壊れるということが起きようになります(図3)³⁾。岩石と金属に分化していた微惑星がこのような衝突によって粉々になると、岩石の破片だけでなく金属からなる破片もまき散らされます。

これらの破片の多くは引き続き地球や火星の近くの軌道にあり、その後、これらの惑星に衝突し、惑星の一部になったと考えられます。一方、惑星への衝突を免れた破片の一部は原始惑星からの重力作用をさらに受け続けて太陽系内を徐々に広がっていき、やがて地球型惑星の領域を出て、小惑星帯にまで達します。無事、小惑星帯に達した破片は、地球型惑星に衝突する危険もなくなり、この安全な場所で数十億年の間、太陽の周りを回り続けます。こうして、地球型惑星の領域で生まれた金属破片は、地球からはるか離れた小惑星帯に達し、故郷のことを思いながら長らく宇宙を漂うのです。

5 巨大惑星に後押しされて再び地球へ

このように、地球型惑星軌道から小惑星帯を含む領域で微惑星の衝突合体と移動が進む一方、太陽系のさらに遠方では

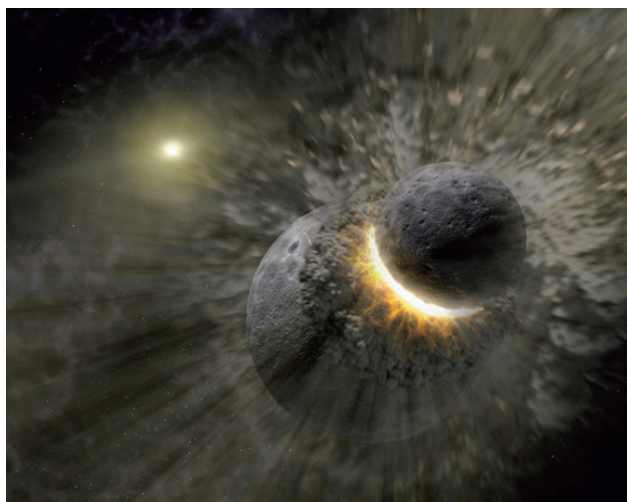


図3 太陽系形成期の天体同士の大規模衝突の想像図(NASA 提供³⁾)。

木星や土星といった巨大惑星の形成が進んでいきます。土星は地球の約100倍、木星は地球の約300倍の質量をもっているため、小惑星帯のすぐ近くにいらなくても強い重力作用を及ぼします。特に、小惑星帯とその近くにあるいくつかの特定の軌道では、木星・土星の重力の影響が強く働きます。このため、そのような軌道に移動した小惑星は徐々に軌道が乱されて不安定になり、一部は地球に達する軌道を持つことになります。このようにして地球にやってくるのが隕石であり、上で述べた金属破片がこの道のりで地球にやってきたものが、鉄隕石であるという訳です。

小惑星帯の中でも、このように「地球行き」となる軌道は限られており、小惑星帯の中を徐々に移動した結果、そのような軌道に到達することができます。金属破片の場合、小惑星帯の中を移動するのが特にゆっくりで数十億年かかるため、太陽系形成初期に生成された金属破片がまだ小惑星帯を漂っており、その一部が鉄隕石として地球にやってくるのだと考えられています。地球を作った材料物質とほとんど同じ場所で生まれた微惑星が、加熱による内部分化、衝突による破壊、原始惑星からの重力作用による移動を受けて小惑星帯へと旅立つ。そして数十億年という長い年月をかけて小惑星帯を漂ったのち、巨大惑星の助けを借りて、同郷の仲間たちが作った地球にやってくる。鉄隕石は、そのような歴史を経て地球にやってきたと考えられています。

6 鉄の天体から太陽系の起源を探る

このように鉄隕石は、太陽系の進化過程を探る手掛かりを与えてくれる、貴重な惑星材料物質です。また、生まれた場所が地球の近所らしいということから、鉄隕石を調べることで、地球を形作った物質についての情報を得ることも繋がると考えられます。一方、上の考えに従えば、鉄隕石と同様に地球の近くで生まれた小惑星が、今も小惑星帯を漂っている可能性があります。それらを詳しく調べることで、地球誕生の謎の解明に迫れる可能性があります。

現在の小惑星帯には様々な組成を持った小惑星があることが、望遠鏡を使った観測や探査機による調査によって明らかになっています。例えば、日本が打ち上げた小惑星探査機「はやぶさ」が訪れて試料を持ち帰った小惑星イトカワ(Itokawa)は、岩石からなる小惑星です。これに続くものとして探査機「はやぶさ2」が2014年12月に打ち上げられました。はやぶさ2は2018年に小惑星リュウグウ(Ryugu)に到着し、試料を採取して2020年に地球に帰還する予定です。リュウグウは有機物など、より太陽系初期の物質を保持していると考えられ、地球の水の起源の解明にも貢献が期待されています。

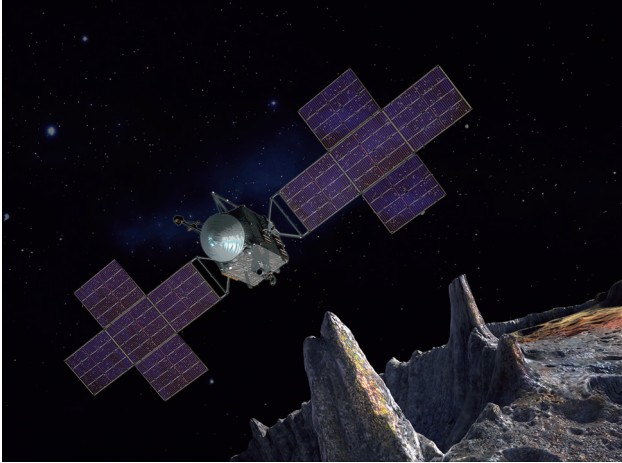


図4 NASAの次期太陽系探査機Psycheと、探査目標天体である鉄質小惑星プシケの想像図 (NASA提供⁴⁾；credit：NASA/JPL-Caltech/Arizona State Univ./Space Systems Loral/Peter Rubin)。

一方、小惑星帯には、数は少ないですが、金属からできていると思われる小惑星もあります。この一つがプシケ (Psyche) と呼ばれる小惑星です。この小惑星は、分化した微惑星が衝突破壊を経験した結果、内部の金属核がむき出しになったと考えられています。このため、その組成等を詳しく調査し起源を明らかにすることは、上に述べた鉄隕石の起源と同様、惑星の形成と内部分化、そして太陽系内の移動という、太陽系形成過程におけるいくつかの重要な過程の解明

につながると考えられます。そこでNASAは、次期の太陽系探査計画の一つとして、この小惑星に、小惑星と同名である探査機Psycheを送り込むことを、2017年1月に決定しました (図4)⁴⁾。小惑星プシケは小惑星帯にある直径約200kmの天体です。計画によると探査機Psycheは2022年に打ち上げられ、2023年に火星に近づいて軌道を曲げます。そして2026年に目標である小惑星プシケに到着し、約2年間の観測を行います。これにより、通常では覗き見ることのできない、分化した微惑星内部の情報が得られると考えられます。

宇宙を旅してきた鉄である鉄隕石に、今も宇宙を漂う鉄である小惑星プシケ。今後もこれらの鉄たちは、太陽系の形成進化過程という、我々人類の起源ともかかわる重要な問題の解明のために、大きく貢献してくれると期待されています。

参考文献

- 1) <https://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA07269>
- 2) W. F. Bottke, D. Nesvorný, R. E. Grimm, A. Morbidelli and D. P. O'Brien : Nature, 439 (2006), 821.
- 3) https://sservi.nasa.gov/wp-content/uploads/2012/03/moon_formation.jpg
- 4) https://www.nasa.gov/mission_pages/psyche/images

(2017年8月10日受付)