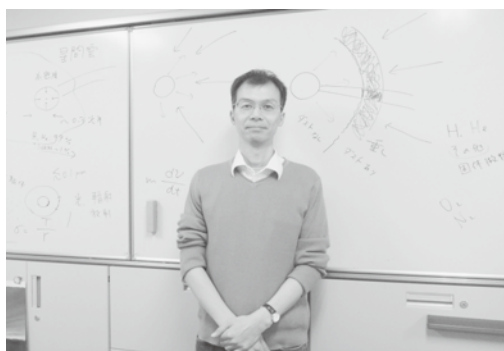




# 星々の起源を紐解く

中本 泰史 研究室～地球惑星科学専攻



中本 泰史 准教授

私たちの住む太陽系では、太陽を中心として、その周りを八つの惑星が公転している。これらの惑星はどのようにしてできたのだろうか。そのプロセスは今も完全にはわかっておらず、世界中の研究者達がさまざまなアプローチを用いて研究している。その中で、中本研究室では、円盤・ダスト・<sup>みくしや</sup>輻射の三つをキーワードにして、惑星形成プロセスについて研究している。そして最近では、「輻射」に特に関わりの深い、大質量恒星についても研究している。本稿ではそれらの成果の一部を紹介する。



## 一般的な惑星形成プロセス

惑星形成プロセスを考えるのにあたって、太陽系の惑星の特徴が手がかりになる。逆に、考えられた惑星形成プロセスは、太陽系の惑星の特徴を説明付けるものである必要がある。まずはその太陽系の惑星の特徴を挙げていく。

太陽系には、水星、金星、地球、火星、木星、土星、天王星、海王星の計八つの惑星がある。これらの惑星の公転軌道は楕円形であるが、この楕円の離心率は0.01程度と小さく、実際にはほとんど円に近い。また、公転軌道を含む平面を公転面といい、太陽系の八つの惑星の公転面は、若干のずれはあるが、ほぼ同一平面上にある。さらに、八つの惑星は全て同じ向きに公転している。

太陽系の惑星はその主成分によって、岩石惑星、ガス惑星、氷惑星の3種類に分類できる。岩石と金属を主成分とするものが岩石惑星、水素やヘリウムなどのガスを主成分とするものがガス惑星、水を主成分とするものが氷惑星である。このように分類される惑星は、主成分の他に質量も大きく異なり、岩石惑星、氷惑星、ガス惑星の順に大きくなっており、主成分の密度とは逆の順になっている。岩石惑星には水星と金星、地球、火星が、

ガス惑星には木星と土星が、氷惑星には天王星と海王星が分類される。このことから、太陽系の内側から岩石惑星、ガス惑星、氷惑星の順に並んでいることがわかる(図1)。

これらの特徴は偶然の産物ではないと考えられており、全てを無理なく説明できるような惑星形成プロセスが求められる。ここで、現在一般的なものとして考えられている惑星形成プロセスを紹介しよう。

惑星形成は、恒星の超新星爆発からはじまる。恒星が超新星爆発を起こすと、その成分が周辺に散らばり、星間雲というものをつくる。これが新たな恒星や惑星の原料となる。星間雲の構成成分を質量比で表すと、水素とヘリウムからなるガスが99%、その他の成分が1%となっている。星

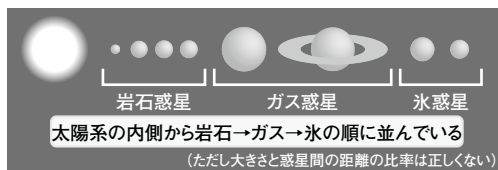


図1 太陽系の惑星

間雲には密度のむらがあり、密度の高いところで星間雲が万有引力により収縮し、新たな恒星となる。すると、残った星間雲は、恒星の周りを公転するようになる。公転を始めた星間雲は、角運動量保存の法則により、収縮するほど回転速度が上がり、遠心力も大きくなる。この遠心力と恒星の重力との釣り合いにより、生地を回転させて薄いピザができるように、恒星を中心に円盤ができる。この円盤から惑星ができるので、この円盤を原始惑星系円盤と呼ぶ。

星間雲を構成する水素とヘリウム以外の成分のうち、岩石や金属、氷といった固体成分をダストという。星間雲を構成する元素のうち、水素とヘリウムに次いで多い酸素が、水素と化合して多量の  $\text{H}_2\text{O}$  となるため、ダストの主成分は氷である。原始惑星系円盤内のダストが恒星の周りを回転していくうちに衝突・合体して、惑星の元となる、微惑星というものができる。そして、微惑星はさらに衝突・合体を繰り返して惑星となる。この過程は、恒星に近い場所の方が衝突の機会が多いため速く進む。衝突の機会が多い理由として、ダストが恒星からの重力によって大量に引き寄せられることから、ダストの量が多いことが挙げられる。公転周期が短いために、衝突までにかかる時間が短いことも理由の一つである。

では、恒星に近い側から順に惑星形成プロセスを追っていこう。恒星に近い場所では岩石惑星ができる。温度が高く、 $\text{H}_2\text{O}$  が氷としては存在しないため、通常のダスト全体の中では最も多量に存在する氷を微惑星の成分として使うことができない。これにより、形成される惑星は、わずかな量しか無い岩石や金属を使うことになる。結果、十分に大きな質量とはならず、円盤中に多量に存在するガスを重力で引き寄せることができない。そのため、ここでは岩石や金属を主成分とする岩石惑星ができる。

恒星から十分離れた地点では温度が十分に低くなるので、 $\text{H}_2\text{O}$  が氷として存在するようになる。前述した通り、氷は通常のダスト全体の中で最も多く存在するので、氷を主成分とする微惑星ができる。そのため、惑星の質量は岩石や金属だけでできた惑星よりも大きくなる。質量が大きくなると重力が大きくなるので、ガスを引き寄せることができるようになる。それにより、さらに質量が

大きくなるので、一層ガスを引き寄せて加速度的に成長し、ガスを主成分とするガス惑星ができる。

そして、ガス惑星ができる場所よりもさらに恒星から離れた場所で惑星ができる頃には、円盤からほとんどガスがなくなってしまう。恒星からは多量の粒子が吹き出していて、それがガスを円盤の外に吹き飛ばしてしまうからである。そのため、ここでは氷を主成分とする氷惑星ができる。

このような惑星形成プロセスを考えることで、前述した太陽系の惑星の特徴をよく説明できる。公転面や公転方向の一致、楕円軌道の離心率の小ささは、一つの円盤ができ、その円盤から惑星ができるということから説明できる。また、惑星の主成分と質量の特徴は、星間雲の構成成分と氷の有無、惑星ができる時期から説明できる。

また、この惑星形成プロセスは太陽系の惑星だけではなく、近年次々と発見されている太陽系外の惑星（系外惑星）にもあてはまる一般的なものだと言われている。

系外惑星には、太陽系の惑星にはない特徴を持っているものも多い。太陽-地球間の距離の1/10程度という中心の恒星（中心星）にごく近い軌道や、離心率が0.3を超えるような、大きく歪んだ軌道をとる惑星が数多く発見されている。前者はホット・ジュピター、後者はエキセントリック・プラネットと呼ばれ、発見されている系外惑星の半分近くを占める。ホット・ジュピターやエキセントリック・プラネットは前述した惑星形成プロセスだけではその形成を説明できない。

しかし、それらについても、別の仮説を導入することでこの惑星形成プロセスを用いて説明することが可能になる。原始惑星系円盤は最終的に中心星に落ちると考えられているが、惑星がそれとともに中心星に近づいていくことがある。その惑星が中心星に近いまま残ったものがホット・ジュピターだと考えられている。また、ガス惑星が三つ以上できると、その重力の相互作用で軌道が大きく歪むことがシミュレーションで明らかになっている。その惑星が大きく歪んだ軌道のまま残ったものがエキセントリック・プラネットだと考えられている。これらのような現象は十分高い確率で起こると考えられているので、この惑星形成プロセスは信憑性が高く、一般的なものとして考えられている。



# 惑星形成プロセスと氷

## 原始惑星系円盤に氷は存在するか

惑星形成プロセスでは、氷の存在が惑星形成に大いに関係していることがわかる。そこで、このプロセスをより信憑性の高いものにするために、原始惑星系円盤に氷があることを、実際の観測により証明したい。

図2に示したのはHD142527という恒星の周囲にできた原始惑星系円盤である。まず、円盤中のある一点に氷があると仮定した時に、そこを通った光の放射(輻射)が観測者にどのように見えるかを、計算して予想する。通常は、このような計算をする場合は、近似を用いて計算を簡略化する。ところが、前述のように、氷の量は原始惑星系円盤の1%以下と少ないので、近似を用いると氷が存在する証拠を消してしまう可能性がある。

そのため、中本研究室ではできるだけ近似を用いずに厳密に計算した。すると図3左に示したような予想グラフができた。このグラフには、波長 $3\mu\text{m}$ のところにへこみがある。実際にHD142527の原始惑星系円盤からの輻射を観測してグラフを描くと、確かに波長 $3\mu\text{m}$ のところにへこみが確認された(図3右)。この $3\mu\text{m}$ という波長は、氷が吸収する光の波長と一致する。また、現在、 $3\mu\text{m}$ の波長を吸収する物質は氷以外には確認されていない。これにより原始惑星系円盤には氷が存在することが示され、惑星形成プロセスの信憑性が高まった。

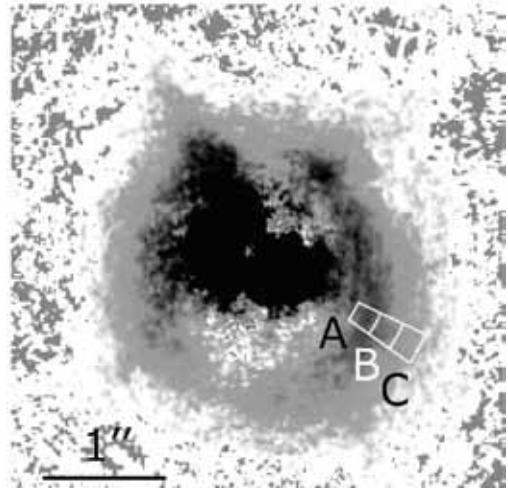


図2 HD142527

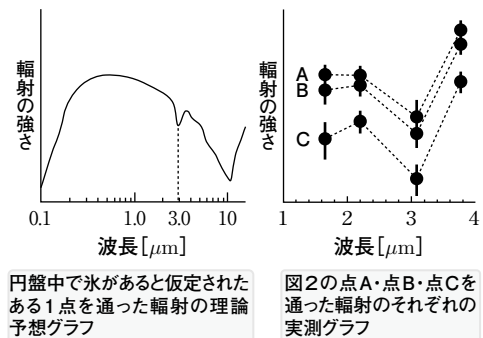


図3 HD142527の予想グラフと実測グラフ

## スノーラインの問題

太陽系について考えると、この惑星形成プロセスでは説明できない問題が発生する。惑星形成プロセスを見てみると、現在の火星と木星の間に、 $\text{H}_2\text{O}$ が氷として存在するか否かの境界(スノーライン)があったと考えられる。太陽系に原始惑星系円盤が存在していたときのスノーラインは、現在より太陽に近い場所にあった。これは、円盤内のダストやガスが太陽からの熱をさえぎってしまい、遠くまで熱が伝わらないことによる。時間が経ち、円盤がなくなると、スノーラインが現在の位置まで移動する。円盤が存在していたときのス

ノーラインの位置を計算してみると、地球は当時のスノーラインの外側に位置していた、という計算結果になった。しかし、元々地球がスノーラインよりも外側にあったとすると、現在の地球にはもっと多量の $\text{H}_2\text{O}$ が存在するという計算になってしまうのだ。これは、惑星形成プロセスの理解が不完全であるということを示している。

このことに対して、中本研究室ではいくつかの仮説を立てて、不完全な部分を補強しようとしている。仮説の一つは、スノーラインが移動してから地球ができたとする説である(図4上)。円盤

内のダストの衝突・合体が、現在想定されているよりも十分速く進むと仮定しよう。すると、太陽からの熱をさえぎるダストの減少も想定より速くなり、地球ができる頃にはスノーラインは地球よりも外側にあることになる。他にも、現在より内側にあるスノーラインよりもさらに内側で地球ができたという仮説が挙げられる。この仮説では、地球ができただけで、地球とスノーラインと現在の位置まで移動してくる（図4下）。地球が移動してきた理由は、理論的・観測的に正当なものを別に考えなくてはならないが、その理由がわかれば、この問題は解決するかもしれないと先生は考えている。

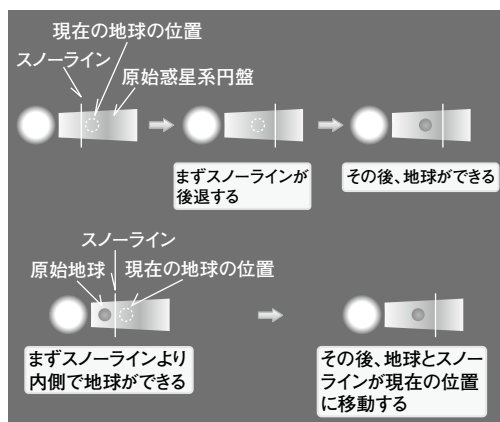


図4 スノーラインについての仮説



## コンドリュールから見る惑星形成

火星と木星の間には、多くの小惑星が存在している、小惑星帯と呼ばれる空間がある。小惑星からの光のスペクトルを観測すると、小惑星の多くがほとんど同じスペクトルをもっている。これは、小惑星が原始惑星同士の衝突によりできた破片であることを示す。衝突した原始惑星は現在の惑星と同じ時期にできたものなので、原始惑星からできた小惑星も、現在の惑星と同じ時期にできたものだと考えられる。小惑星はほとんど地質活動をしていないので、惑星形成当時の様子を留めていると推測され、小惑星を調べれば惑星形成当初の様子が見えてくると考えられている。

小惑星について調べる上で、有効なサンプルとして隕石が挙げられる。流星として観測された、

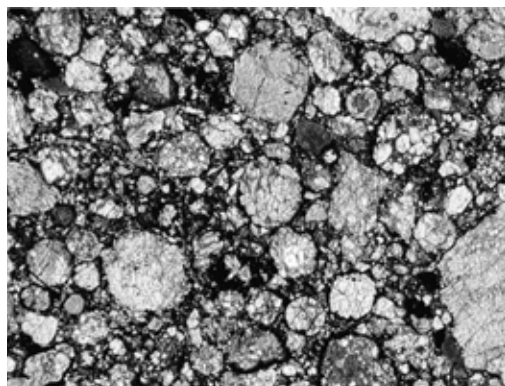


写真 隕石の断面  
(提供：ゆりもと 冨本尚義 教授 [北海道大学])

いくつかの隕石の軌道を調べると、それらは小惑星帯から来ていることがわかったからだ。隕石の調査では、化学的な分析をしたり、手にとって断面を観察したりすることが可能である。これは探査機による調査にはない大きな利点である。

実際の隕石の断面（写真）を見てみると、ケイ酸塩鉱物でできた直径1mm程度の球状組織が見られる。これらはコンドリュールと呼ばれている。放射年代測定により、コンドリュールは小惑星ができる前から存在していたことがわかった。コンドリュールを詳しく調べれば、惑星形成当初の状況を推測できることになる。

中本研究室では、コンドリュールが球状であることに注目した。中本先生は、球状である理由について、高温下でケイ酸塩鉱物が一度溶け、表面張力で球状になってから固まったからだと考えている。ケイ酸塩鉱物が溶けるには1500～2000Kという高温が必要となるので、小惑星帯にあったケイ酸塩鉱物は、一度そのような高温にまで加熱されたことになる。

一方、小惑星帯は火星と木星の間にあるが、前述の通り、スノーラインもその位置にある。原始惑星系円盤内のガスの圧力が低いことを計算に入れると、スノーラインでの温度は150～170K程度である。つまり、小惑星帯にあったダストは150～170Kという低温の場所で、1500～2000Kにまで加熱されたことになる。その理由を探れば、惑星形成当初の状況が見えてくるはずである。



まず考えられるのは太陽光による加熱である。しかし、小惑星帯付近では、太陽光のみで1500～2000 Kにまで加熱することは難しいと考えられる。これは、小惑星帯よりも太陽に近い現在の地球の温度を考えれば想像がつくだろう。さらに、この加熱は、局所的に短時間で行われたことが観測などによりわかった。つまり、太陽光以外の熱源が存在した、ということになる。そこで、これらを説明するために、中本研究室では衝撃波加熱モデルという仮説を提唱した。

原始惑星系円盤中で衝撃波が発生したときのことを考える。すると、ガスは衝撃波に乗ってすぐに移動するが、コンドリュールはガスの粒子に比べるとはるかに質量が大きいのですぐには移動しない。それにより、ガスとコンドリュールとの間で摩擦熱が発生する。衝撃波が通過するのは局所的で短時間であり、この熱でコンドリュールが融ける温度に達することも計算によりわかった。

中本研究室では、円盤中で衝撃波が発生する可能性についても、仮説を立てて証明しようとしている。まず考えられた仮説は、太陽のX線フレアに伴う円盤表面衝撃波である。X線フレアとは、磁力線が繋ぎ替わることにより、恒星がX線を放射する現象のことである。恒星の北側から出た磁力線は、原始惑星系円盤を貫いてから南側に入る(図5左)。磁力線の動きは円盤内のガスの動きと連動しており、ガスは公転しているので、連動する磁力線も、それに合わせて捻られる。すると、磁力線同士が接近した部分が生まれ、さらに磁力線が捻じられると、極端に接近した磁力線同士が繋ぎ替わる。それにより、磁場エネルギーが解放され、熱エネルギーと運動エネルギーになり、X

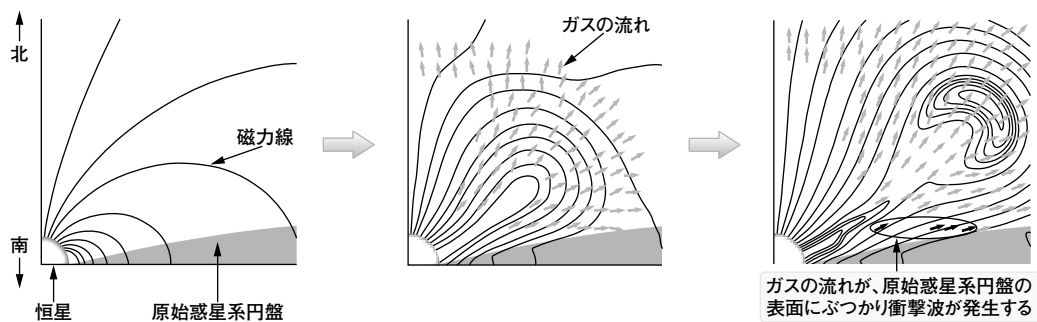
線フレアとして観測される。このときに発生する運動エネルギーが円盤内のガスを超音速で移動させて、ガスの流れが発生する(図5中央)。この流れの大半は円盤の外に飛び出していく。飛び出していったガスの一部が円盤の表面にぶつかることで(図5右)、衝撃波を発生させ、この衝撃波で加熱が行われる、という仮説がまず考えられた。

しかし実際には、原始惑星系円盤の表面での加熱では、コンドリュールが形成されるとき条件を満たさないことがわかった。例えば、コンドリュールはわずかに揮発性成分を含む。円盤の表面で加熱が行われるとすると、ガスの圧力が低すぎて、揮発性成分は全て蒸発して離れていってしまうので、コンドリュールには含まれないはずだと考えられる。

もし円盤の内部で加熱されれば、ガスの密度が高いので、一度蒸発した成分の一部がコンドリュール内で凝結する。これならばコンドリュールが揮発性成分を含んでいてもおかしくはない。

そこで、円盤の内部で衝撃波が起こるように考えられたのが、微惑星前面の弧状衝撃波である。微惑星の公転軌道が、他の微惑星からの重力のような、外力により円軌道からずれることがある。その際、円運動をしているガスとの相対速度が音速を超えれば、微惑星の進行方向前面に弧状の衝撃波が発生する。この衝撃波で加熱が行われる、というのが新たな仮説である。

この説をとると、円盤の内部で衝撃波が発生するので、コンドリュールの性質をよく説明できる。この説はいまだ仮説の域を出ないが、それを立証するために中本研究室では観測と計算を繰り返している。



※この図は模式図であり、実際の磁力線はもっと複雑になっている。

図5 X線フレアの模式図



## 大質量星形成と OMOSHI effect

宇宙には、大質量星と呼ばれる、太陽の40～150倍もの質量を持つ恒星が少数だが存在する。ところが、従来の考え方では、大質量星は存在できるはずがない、という結論に至ってしまう。

恒星の発する輻射の強さは恒星の質量の3～5乗に比例している。光を媒介する光子は、プランク定数を $h$ 、波長を $\lambda$ とすると、 $h/\lambda$ で表される大きさの運動量を持つので、光を受けるということは運動量を受け止めることである。このとき、作用反作用の法則により、受け止める側はこれに応じた圧力を受ける。この圧力を輻射圧と呼ぶ。

日常生活の中で受ける程度の電灯の光や、太陽光による輻射圧ならば、微々たる大きさなので無視できる。しかし、太陽の40倍もの質量を持つ恒星ともなると、発する輻射が強すぎて、輻射圧が物質を跳ね返す力が恒星自身の重力を上回る。すると、恒星の周囲に存在する物質は全て跳ね返されてしまい、恒星がそれ以上は成長しないことになる。ならば、太陽の40～150倍もの質量を持つ恒星はどうして存在しているのだろうか。

この矛盾については、20年以上前の論文で、周囲の物質に十分な初速度があれば、減速されながらも恒星に到達可能である、と説明付けられた。しかし、中本研究室では、大質量星形成の新たな仮説を考えた。「OMOSHI effect」と名付けられたこの仮説は、銀河形成の研究をしている学生を中本先生が指導していたときのアイデアが元になっている。

まず、大質量星の周囲の物質が重力によって大質量星に引き寄せられるが、そこで輻射圧を受けて跳ね返される。一方で、その外側ではまだ多くの物質が重力に引き寄せられていくので、大質量

星の周りに物質が溜まっていく。物質が溜まっている場所の内側表面は輻射圧と重力を受けるが、それより外側では光が遮られるので重力のみを受ける。すると、物質が溜まっている場所全体としては重力が強くなるので、輻射圧で跳ね返されることなく、その場に留まるようになる。さらに、内側表面では大質量星からの強い光とともに熱を受け、固体物質は気体になる。固体物質が気体になると輻射を吸収しづらくなるため、輻射圧は小さくなる。すると、重力だけが強く作用するようになり、大質量星まで到達可能になる(図6)。中本先生は、このときの溜まった物質をおもしに例えて、この仮説に OMOSHI effect と名付けた。

中本研究室では、このように新しい仮説を立て、それを計算や観測で証明することで、惑星や大質量星形成のプロセスを解き明かそうとしている。その鍵となるのが、円盤・ダスト・輻射という三つのキーワードである。これら三つのキーワードから真実に迫る中本研究室の今後に期待したい。

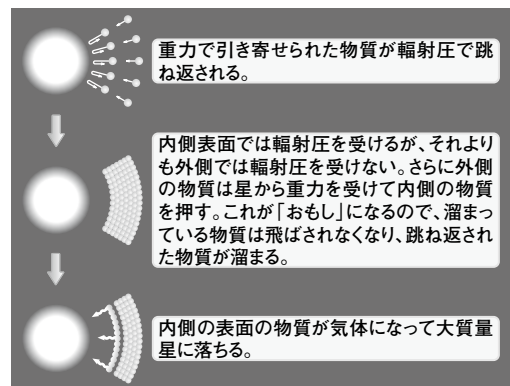


図6 OMOSHI effect

今回の取材で伺った惑星形成や大質量星形成についてのお話は、大変興味深いものでした。

特に、OMOSHI effectの仮説は、取材させていただいた2009年10月の時点ではまだ正式に論文として発表されていないものであり、そのような最先端の研究について詳しくお聞きすることができ、知的好奇心が刺激されました。

末筆になりますが、お忙しい中で度重なる取材に快く応じてくださっただけでなく、記事の執筆に当たって何度も質問にお答えくださり、専門的な知識のない私にもわかりやすく説明くださった中本先生に、心より感謝するとともに、厚く御礼申し上げます。

(堀澄 勇介)