

## アルマ望遠鏡で惑星系の物質の起源を探る

国立天文台 科学研究部 野村 英子

夜空を見上げると、宇宙にはたくさんの恒星が存在します。これらの恒星の多くには、惑星が公転していることが最近の研究でわかってきました。それでは、我々の太陽系や、太陽系外の惑星系は、どのようにしてできたのでしょうか？我々の生命の材料となるような物質は、太陽系外の惑星系にも存在しているのでしょうか？

太陽系も含めた惑星系は、原始惑星系円盤とよばれる、若い星のまわりの円盤状の天体の中で形成されます。最近の大型望遠鏡により、このような惑星形成領域の観測が急速に進展しています。本稿では特に、アルマ望遠鏡によって明らかになりつつある惑星形成の現場の様子と、そこに存在する物質に関する研究を紹介します。

### 1. 原始惑星系円盤内の惑星形成の兆候

原始惑星系円盤は、1980年代後半に初めて発見されました。当時は、円盤の形は見えておらず、若い恒星からのスペクトルに、星以外の成分が含まれていることから、円盤の存在が示唆されたものでした。1990–2000年代にかけて、すばる望遠鏡や野辺山干渉計などの大型の光赤外線望遠鏡や電波望遠鏡・干渉計が建設され、円盤状の形状が「観測画像」としてとらえられるようになりました。原始惑星系円盤が発見される以前から、太陽系の惑星がほぼ同一平面上を公転していることから、惑星系が円盤状の天体で形成されるのではないかと理論的に考えられていましたが、その候補天体が観測されたのです。その後も観測技術の進展とともに円盤のより詳細な構造が明らかになりました。そして、2010年代にアルマ望遠鏡が始動して、従来の望遠鏡とは桁違いの空間分解能と感度の電波観測が可能になり、惑星がまさに形成されている現場が、今、明らかになりつつあります。

アルマ望遠鏡の最大の観測成果の1つに、原始惑星系円盤内の環状のギャップ構造(図1)の発見があります。これは、木星のような巨大ガス惑星が形成される領域に存在することが理論的に予測されていたもので、2014年に行われたアルマ望遠鏡の高空間分解能観測の試験観測中に初めて発見されました。ギャップ構造の発見自体は理論予測通りだったのですが、このギャップ構造が最初に見つかった天体の年齢は、木星のような惑星が形成されると理論的に予測されていたよりも、ずっと若い天体でした。そこで、このギャップ構造が本当に惑星によって形成されたものなのか、あるいは他の原因で形成されたものなのか、という論争が起こりました。この発見が発表された翌年に、今度は、原始惑星系円盤を持つ天体としては、比較的年老いた天体にも、同様のギャップ構造が発見されました。この発見に続き、円盤内へのどのくらい普遍的にこのようなギャップ構造が存在するのか、年齢やその他の特徴に

対する依存性はあるのか、ということ調べるため、原始惑星系円盤20天体を高空間分解能観測する、という大型サーベイ観測が実施されました。当初の予想では、このようなギャップ構造が付随しているのは、せいぜい数割程度ではないか、と考えられていたのですが、観測結果はその予想に反し、20天体中19天体にギャップなどの構造が存在する、というものでした。原始惑星系円盤は比較的滑らかな構造をしていると考えられてきた、これまでの常識をくつがえす発見でした。これらのギャップ構造がすべて惑星により形成

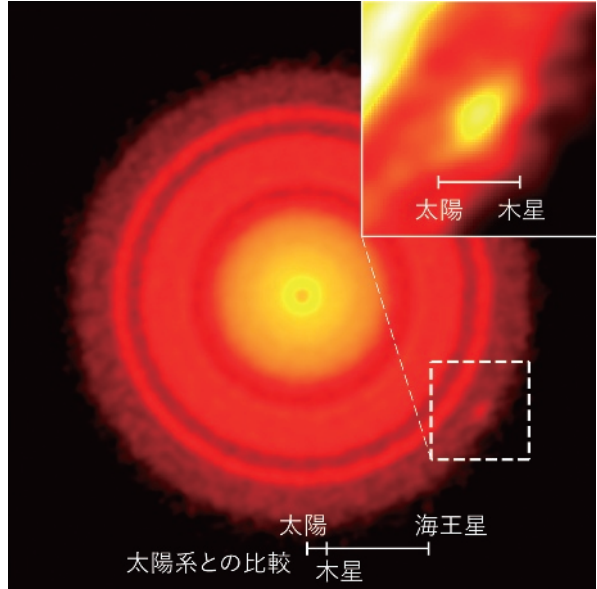


図1. 原始惑星系円盤内の環状のギャップ構造と周惑星円盤候補天体の観測。

Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), Tsukagoshi et al.

されたのか、他の原因があるのかの論争については、未だに決着はついていません。

ギャップ構造が惑星によってできたのか否かを確認するには、ギャップ構造内の惑星を観測する必要があります。惑星そのものは、原始惑星系円盤に比べると非常に小さいため、観測が難しいのですが、生まれたばかりの惑星のまわりに存在すると理論的に予測されている、周惑星円盤の候補天体がすでにいくつか発見されており、今後も、さらに多くの天体での発見が期待されています。このような周惑星円盤内で、太陽系の木星のまわりを公転する、ガリレオ衛星のような衛星系が形成されると考えられています。図1右下の点状の天体は、その候補天体の1つです。中心星から52天文単位の位置に存在し、楕円の短軸は1天文単位程度です。周惑星円盤の大きさの理論予測にもとづくと、海王星程度の質量の惑星が存在していると考えられます。ただ、惑星が存在していれば見つかるはずの赤外線点源はまだ検出されておらず、現在、検出に向けた試みが続けられています。2021年12月25日に打ち上げられたジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡は、このような生まれたばかりの惑星が放つ赤外線をとらえるのに適しており、新たな発見に向け、今、まさに観測が進められています。

## 2. スノーライン ～惑星形成と物質進化～

惑星形成を考える上で、物質的に重要な要素の1つに、スノーラインがあります。原始惑星系円盤は太陽系と同じように、中心の星(太陽)からの光で暖められています。従って、星に近い場所では温度が高く、星から離れるほど、温度が低くなります。これは、星に近い場所では物質は気体の状態にあるが、星から離れると、ある場所で固体になることを意味します。この気体と固体の境界の場所をスノーライン(雪線)と呼んでいます。太陽系の場合、水(H<sub>2</sub>O)のスノーラインは、太陽から2.7天文単位の場所、火星と木星の間に位置しており、水星、金星、地球、火星のような小さな岩石惑星が形成される領域と、木星、土星、天王星、海王星などの巨大なガス惑星が形成される領域の境界に位置します。では、なぜスノーラインの外側で、巨大ガス惑星が形成されるのでしょうか？スノーラインの外側では、水が氷として存在するため、スノーラインの内側に比べて固体成分が増加します。ここで、惑星形成論によると、原始惑星系円盤内で形成された固体の核にガスが集まることにより、巨大ガス惑星が形成されると考えられています。ガスを効率よく集めるためには、大きな固体の核を作る必要がありますが、スノーラインの外側では、水が固体になる分、大きな固体の核を形成しやすくなり、その結果、ガス惑星が形成されたと考えられています。

スノーラインの内側では水は蒸発するため、岩石惑星には、水は少量しか含まれていません。それでは、我々のような生命に欠かせない水は、どこから来たのでしょうか？一つの説として、スノーラインの外側に存在する小惑星や彗星が、地球に衝突して水をもたらした、と考える説があります。月の表面には多数のクレータが存在しますが、これは、地球や月ができて間もない、小惑星のような小天体が太陽系にまだ数多く存在していたころに、それらの小天体が月に衝突した結果できたと考えられています。地球には大気が存在するため、大昔にできたクレータはすでに風化されて見えなくなっていますが、月と同じように多数の小天体が衝突し、その際に水が地球に運ばれたと考えられます。従って、原始惑星系円盤内のスノーラインの位置を知ることは、岩石惑星にどのように水が運搬されたのかを知る上でも、重要な情報になります。

アルマ望遠鏡は、この原始惑星系円盤内のスノーラインの観測を可能にしました。図2は、一酸化炭素(CO)のスノーラインの撮像観測の結果です。凍りやすさは物質によって異なり、一酸化炭素は水に

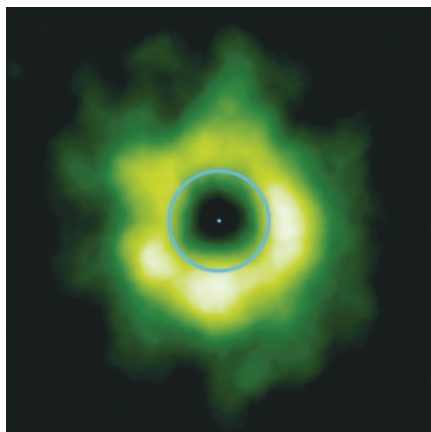


図2. 原始惑星系円盤内の一酸化炭素のスノーラインの観測。

Credit: ALMA(ESO/NAOJ/NRAO)

比べて凍りにくい物質になります。この天体では、一酸化炭素のスノーラインは、星から30天文単位の位置に観測されました。

水は一酸化炭素より凍りやすく、そのスノーラインは円盤のより内側に位置するため、より高空間分解能の観測が必要になります。直接的な撮像観測は難しいので、分子線のスペクトルを用いて、間接的に水のスノーラインの位置を測定する手法も開発されています。一方で、水と同じくらい凍りにくい、メタノール( $\text{CH}_3\text{OH}$ )が、そのスノーラインの内側で発見されました(図3)。このような少し複雑な有機分子からの放射は強度が弱いため、アルマ望遠鏡の高感度観測により初めて原始惑星系円盤からの検出が可能になりました。ちなみに、観測した円盤の中心の星は、太陽よりも質量が大きくて温度が高いため、メタノールのスノーラインも円盤の比較的外側に位置しており、撮像観測が可能になったものです。宇宙空間でおこる化学反応の研究によると、水やメタノールは、岩石惑星の材料である塵(ダスト、固体微粒子)の表面で生成されることが考えられています。実際、太陽系の彗星が太陽に近づいたときに、表面の氷から蒸発した気体を観測すると、水やメタノールが多く含まれています。分量比としては、水に対して、メタノールが1%程度になります。彗星にはメタノールの他にも多くの有機分子が含まれており、もし彗星や小惑星により地球に水が運ばれたのであれば、このような有機分子も一緒に地球に運ばれたと考えられています。

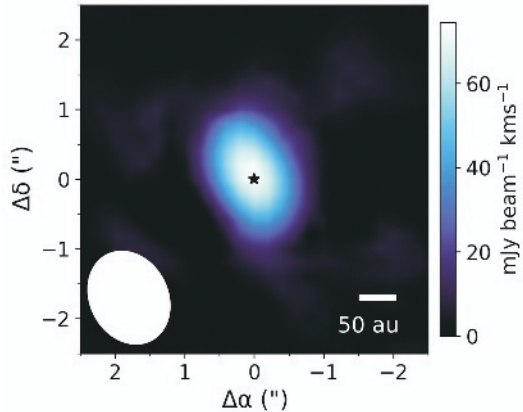


図3. 原始惑星系円盤のスノーラインの内側で初検出されたメタノールの観測  
Credit: A.Booth(Leiden Observatory)

### 3. 元素組成と同位体比 ~ 惑星形成領域から惑星系へ ~

原始惑星系円盤から惑星系まで、物質がどのように進化するかを考える上で、元素組成比や同位体比は鍵になります。宇宙空間に存在する物質の大部分は水素で、次いでヘリウムが1%程度存在します。我々の生命の材料となるような、炭素、窒素、酸素はそれぞれ0.01%程度しか存在しません。太陽やガス惑星の大気はこの元素組成比と比較的似たような組成比を持ちますが、地球のような小さな岩石惑星の大気や表層環境の元素組成比は、大きく異なります。これは、水素やヘリウムのような軽い元素は、惑星表面に留まっていることができず、宇宙空間に散逸してしま

うためです。地球の表層環境の元素組成は、一部は、地球内部から表層への物質の放出の影響を受けます。また、前述のように、小惑星や彗星の衝突の影響も受けている可能性があります。それでは、彗星や小惑星の元素組成は、どのようにして決まるのでしょうか？

原始惑星系円盤の中心星から離れた温度の低い領域では、多くの物質がスノーラインの外側に位置し、気体中の酸素や炭素などの元素は、塵表面に凍結します。また、凍結した原子や分子が反応して、より凍りやすい複雑な分子を生成します。どのくらい凍りやすい分子が生成されたかによって、気体中からどのくらい酸素や炭素などの元素が凍結して固体になるかが決まります。この固体成分が、やがて彗星や小惑星になると考えられます。最近のアルマ望遠鏡などの観測により、原始惑星系円盤の気体中では、酸素や炭素などの元素が枯渇していることが示唆されています。裏返すと、これらの元素は固体となっていると考えられます。図4は、アルマ望遠鏡による原始惑星系円盤内の気体質量の観測結果で、この観測により、一酸化炭素のスノーラインの内側でも一酸化炭素が気体中で枯渇していることが示唆されました。アルマ望遠鏡により、様々な分子からの放射が高空間分解能で観測されており、円盤内の元素組成の分布が、今、明らかになりつつあります。

一方で、アルマ望遠鏡により、原始惑星系円盤内の同位体比の分布の観測が急速に進展しました。同位体比は、地球上、あるいは太陽系内の様々な物質で測定されており、物質の起源を探る上で重要なツールの1つと考えられています。その代表例として、地球上の海水の重水素比があります。宇宙空間において、水素(H)に対する重水素(D)の比は、0.001%程度になります。これに対し、海水の重水素比は

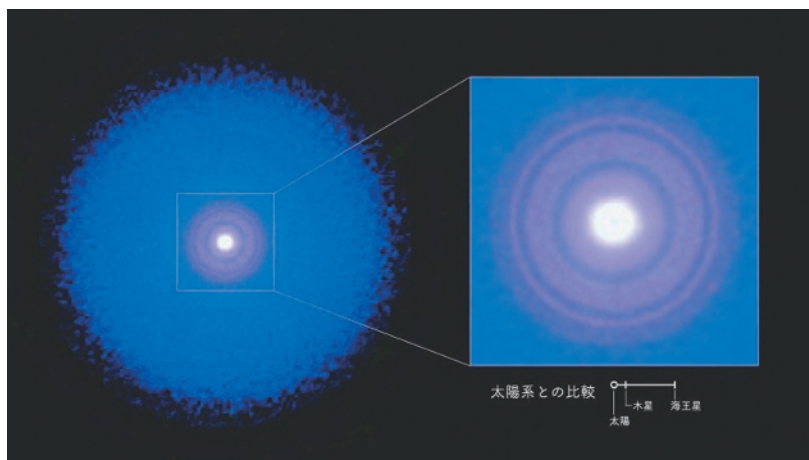


図4. 原始惑星系円盤内のガス質量の観測。中心の白色の部分が、今回の観測でガスが大量に存在することが明らかになった場所。一酸化炭素は枯渇している。  
Credit: T.Yoshida, T.Tsukagoshi et al. – ALMA(ESO/NAOJ/NRAO)

0.01%程度で、10倍ほど高い値を示します。一方で、太陽系の彗星や小惑星中の水の重水素比も、0.01%程度の値を持ちます。この一致は、地球上の水の起源が、彗星や小惑星の地球への衝突である、という説を支持します。

最近のアルマ望遠鏡による原始惑星系円盤内の同位体比観測の一例として、一酸化炭素の炭素同位体比の分布の測定があります。太陽系内の炭素同位体は、隕石内で物質によってややばらつきはあるものの、金星

から海王星まで、彗星も含め、ほぼ一定の値を取ることが知られています。これに対し円盤の観測結果は、中心星からの距離が約100天文単位より内側と外側で、炭素同位体比の値が異なるというものでした(図5)。系外惑星系では、中心星から100天文単位以遠でも惑星が見つかっており、炭素同位体比も物質進化を探る上での指標となり得ることが、この観測より示されました。

現在、はやぶさ2などの太陽系内探査ミッションにより、太陽系内物質の進化に関する研究が進んでいます。一方で、ジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡などの光赤外線望遠鏡で、系外惑星大気の色組成を明らかにする研究も進んでいます。特に、高分散分光観測では、惑星大気の色組成の測定まで可能になりつつあります。将来的には、様々な原始惑星系円盤に対して色組成や同位体比の分布の測定を行い、その結果を太陽系内の物質や系外惑星大気の色組成と比較することで、惑星形成領域から惑星系に至る物質進化の謎が解明されていくことが期待されます。

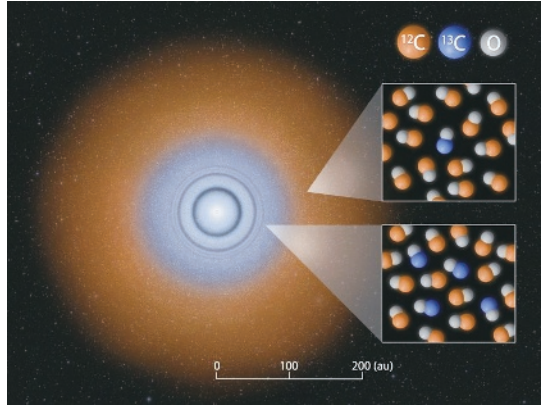


図5. 観測に基づく、原始惑星系円盤内の一酸化炭素の炭素同位体比の分布の概念図。円盤内側と外側で同位体比が異なる。 Credit:NAOJ

## 著者紹介 野村 英子(のむら ひでこ)



2001年京都大学理学研究科物理学・宇宙物理学専攻で博士(理学)を取得。イギリスなどでの研究員、京都大学理学研究科助教、東京工業大学理学院准教授を経て、現在、国立天文台科学研究部教授。原始惑星系円盤の物理的・化学的構造の理論的・観測的研究を軸に、惑星形成領域から惑星系への物質進化を探る研究を行っています。