Kobe University Repository : Kernel

PDF issue: 2025-07-11

From interstellar matter to protoplanetary disks

古家，健次

(Degree)
博士（理学）
(Date of Degree)
2014-03-25
(Date of Publication)
2015-03-25
(Resource Type)
doctoral thesis
(Report Number)
甲第6129号
(URL)
https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1006129

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。

(別紙様式３)

論 文 内 容 の 要 旨

氏　　名　　古家　健次：３ページ

専　　攻　　地球惑星科学専攻

論文題目　From interstellar matter to protoplatetary disks
(星間物質から原始惑星系円盤へ)

指導教員　　相川　祐理　准教授

星は分子雲コアと呼ばれるガス塊の中で誕生する。濃いガスに埋もれた、誕生したばかりの星(原始星) には円盤(原始星円盤)が付随し、原始星から前主系列星への進化と共に、その一部が原始惑星系円盤となる。惑星系は原始惑星系円盤の中で形成されると考えられている。分子雲コアには、すでに水、一酸化炭素、メタノール、アンモニアなどの多様な分子が存在することが観測的に明らかになっている。では「我々の太陽系に存在する水や有機物は、太陽系の母胎となった分子雲コアを起源とするのか？」これは、星・惑星系形成論における主要な問題の一つであり、生命の起源に迫る上でも本質的に重要である。上記の問いに迫るため、本論文では、数値計算により以下の２点を明らかにすることを目的とした。

(1)　分子雲コアの分子組成が、形成途上の円盤組成にどの程度反映されうるか（第２章）

(2)　乱流による質量輸送を考慮した、原始惑星系円盤における分子組成進化（第３、４章）

本論文は４章からなる。第１章では分子雲コアから原始惑星系円盤に至るまでの構造形成、及び、それに伴う分子組成進化を概観する。第２章では、分子雲コアから原始星形成直前期（ファーストコア）までにおける分子組成の時間進化、及び3次元空間分布を明らかにする。分子雲コアの自己重力収縮により星は形成される。収縮によりコアの中心密度が上昇すると、ガスはダスト放射冷却に対して光学的に厚くなる。すると圧力上昇により収縮が止まり、静水圧平衡な天体が形成される。この天体をファーストコアと呼ぶ。中心温度が2000 Kに達すると水素分子の熱解離が始まり、ファーストコア中心部は再び収縮し、原始星が形成される（ファーストコア形成後1000年程度)。一方、ファーストコア外縁部は後に星周円盤へと進化することが理論計算から示唆されており、その組成は円盤の初期組成を考える上で重要である。

化学反応の効率は系の物理量、特に温度に強く依存するため、上述のような系の物理進化に伴う分子組成進化を明らかにするには、輻射流体計算の上で化学反応ネットワークモデルを解く必要がある。本章では、分子雲コアからファーストコアまでの3 次元輻射流体計算（Tomida et al. 2010)と化学反応ネットワークモデルを組み合わせた計算を行った。輻射流体コードは総研大の富田賢吾氏(現プリンストン大)と法政大の松本倫明氏が中心となって開発したものを使用した。その結果、冷たい分子雲コア時代に形成されたガス分子・氷分子はファーストコアの段階では分子雲コアの組成がほぼ保持されていることが分かった。つまり、原始星円盤の初期組成は分子雲コアの組成と大きく変わらないこ

とが示唆される。その一方、これまで原始星コアを特徴づけると考えられてきた大型有機分子(メタノール、ギ酸メチルなど)が、ファーストコア時代にすでに中心コア周辺のコンパクトな領域(10 AU 程度)に存在していることが分かった。

原始惑星系円盤に持ち込まれた星間物質は、そこでの化学進化により組成を大きく変える可能性がある。彗星は原始太陽系円盤の氷組成を保持した始原的な天体であると考えられている。彗星と小質量原始星周りの氷組成の比較から、彗星氷は一酸化炭素、二酸化炭素、メタン、メタノール、アンモニアなどの比較的単純な分子に乏しいことが分かっている。また、彗星の水の重水素比(HDO/H_2O比)は原始星周りで観測されるそれと比べて低いことが知られている。これらの観測事実は、原始太陽系円盤において星間起源の氷が「再加工」されたことを示唆するが、その具体的なメカニズムはよく分かっていない。第３章、４章では、円盤ガス乱流による氷の巻き上げと、紫外線による氷の破壊に着目し、観測された重水素比の違い（第３章）と彗星氷の炭素や窒素を含んだ分子の欠乏（第４章）を同時に説明しうる理論モデルを提案する。

本研究で提案した、氷の破壊・再形成のメカニズムを以下で説明する。原始惑星系円盤の表層は中心星からの強い紫外線にさらされており、そこでは酸素、炭素、窒素は主に原子・イオンとして存在する。一方、紫外線から遮蔽された円盤赤道面付近では、主にダスト表面を覆う氷として存在する。原始惑星系円盤は磁気回転不安定性により乱流状態にあると考えられている。乱流があれば、赤道面の氷は円盤上空に巻き上げられ、中心星からの紫外線照射により破壊され、原子・イオンとなる。一方、表層の原子は赤道面に運ばれ、氷が再形成される。この破壊・再形成のサイクルが進むにつれ、氷組成や重水素比は円盤内の物理環境で決まる値に漸近してゆくことになる。

上述のシナリオを検証するため、私は様々な化学反応に加え、乱流による厚さ方向のかき混ぜの効果を取り入れた数値コードを開発し、乱流状態の原始惑星系円盤における氷組成の進化を数値計算により調べた。主な結果は以下の通りである。

- 惑星は固体物質の集積により形成されるため、惑星形成領域(中心星から30 AU以内）における水氷の存在量は重要である。ダスト温度の高い円盤内側（20 AU 以内）では水氷の再形成が非効率なため、乱流を考慮しない場合と比べて、柱密度にして最大で2 桁程度、水氷が欠乏しうることを示した。これは従来考えられていたよりも氷惑星の材料物質が少ない可能性を示唆しており、惑星形成にとっても重要である。

- 彗星形成領域の一部である、中心星からの距離20-30 AU の領域において、円盤散逸のタイムスケール(数100 万年）よりも短い時間で、水の重水素比は彗星の観測値に漸近しうることを示した。この結果は、分子雲コアから円盤に持ち込まれる水の重水素比には依存しない。
- メタノールやアンモニア氷は中心星から30 AU以内で再形成が非効率なことを示した。水氷は20 AU以遠で効率的に再形成できるため、r=20-30 AUの領域において、彗星で観測されるようなメタノールとアンモニアに乏しい氷が形成されうることが明らかになった。
- 以上の結果は、彗星の氷(の少なくとも一部）は分子雲コア起源ではなく、原始惑星系円盤において形成された可能性を支持する。また、彗星の水の重水素比、及び分子組成は彗星毎に異なることが知られているが、本研究は彗星が形成された半径(つまり温度）の違いでそれを自然に説明できることを示唆する。

（別紙１）　　論文審査の結果の要旨

氏名	古家健次		
論文題目	From interstellar matter to protoplatetary disks （星間物質から原始惑星系円盤へ）		
審査委員	区　分	職　名	氏　　名
	主　査	准教授	相川祐理
	副　査	教授	巽好幸
	副　査	教授	留岡和重
	副　査	教授	山本智
	副　査		

要　　旨

星は分子雲コアと呼ばれるガス塊の中で誕生する。濃いガスに埋もれた誕生したばかりの星（原始星）には円盤（原始星円盤）が付随し、原始星から前主系列星への進化と共に、その一部が原始惑星系円盤となる。惑星系はこの原始惑星系円盤の中で形成される。分子雲コアでは天文観測によって水、一酸化炭素、メタノールなどの多様な分子がガスや氷として観測されている。では我々の太陽系に存在する水や有機物は、太陽系の母胎となった分子雲コアを起源とするのであろうか？コアから円盤さらに惑星系が形成される過程において星間物質はどのような組成変化を経るだろうか？これらの問に応えるため、本論文では、円盤の形成過程およびその後の乱流円盤内での水や有機物の進化を数値計算で調べた。

第１章は分子雲コアから原始惑星系円盤に至る構造形成とそれに伴う分子組成進化を概観している。

第２章では、分子雲コアから原始星形成直前期（ファーストコア）までの3 次元輻射流体計算（Tomida et al. 2010）結果を用い、そこでの分子組成の時間進化、及び3次元空間分布を化学反応ネットワークモデル計算によって明らかにした。その結果、冷たい分子雲コア時代に形成されたガス分子・氷分子はファーストコアの段階では分子雲コアの組成がほぼ保持されていることが分かった。つまり、原始星円盤の初期組成は分子雲コアの組成と大きく変わらないことが示唆される。その一方、これまで原始星コアを特徴づけると考えられてきた大型有機分子（メタノール、ギ酸メチルなど）が、ファーストコア時代にすでに中心コア周辺のコンパクトな領域（10 AU 程度）に存在していることが分かった。

第３、第４章では、原始星が形成され、周囲のエンベロープガスが晴れ上がったclass IIと呼ばれる進化段階での円盤の組成進化を調べた。この段階では、中心星からの紫外線やX線照射により、原始惑星系円盤の表層では酸素、炭素、窒素は主に原子・イオンとして存在する。一方、輻射から遮蔽された円盤赤道面付近では、これら揮発性元素は主にダスト表面を覆う氷として存在する。円盤は磁気回転不安定性により乱流状態にあり、赤道面付近の氷は乱流で円盤上空に巻き上げられ、紫外線照射により破壊され、原子・イオンとなる。一方、円盤表層の原子は赤道面に運ばれ、氷が再形成される。この破壊・再形成のサイクルにより、氷組成や重水素比は円盤内の物理環境で決まる値に漸近してゆくことになると予想される。そこで本論文では氷分子の光脱離や光解離など様々な化学反応に加え、乱流による円盤厚さ方向の物質のかき混ぜの効果を取り入れた数値コードを開発し、乱流状態の原始惑星系円盤における氷組成の進化を調べた。さらにその結果を太陽系始原天体である彗星の組成と比較した。主な結果は以下の通りである。

- ダスト温度の高い円盤内側（T>40K）では水氷の再形成が非効率なため、乱流を考慮しない場合と比べて、柱密度にして最大で2 桁程度、水氷が欠乏しうることを示し、その減損の時間スケールを求めた。
- 彗星形成領域の一部である、円盤半径20-30 AU の領域において、円盤散逸のタイムスケール（数100 万年）よりも短い時間で、水の重水素比が彗星の観測値に漸近しうることを示した。
- メタノールやアンモニア氷は中心星から30 AU以内で再形成が非効率なことを示した。水氷は20 AU以遠で効率的に再形成できるため、r=20-30 AUの領域において、彗星で観測されるようなメタノールとアンモニアに乏しい氷が形成されることが明らかになった。
- 以上の結果は、原始惑星系円盤の氷（の少なくとも一部）は分子雲コア起源ではなく、円盤内において再加工されたことを示す。彗星の水の重水素比、及び分子組成は彗星毎に異なることが知られているが、本研究は彗星が形成された半径（温度）の違いでそれを自然に説明できることを示唆する。

以上のように本研究は、分子雲コアから原始惑星系円盤までのガスや氷の組成進化を系統的に調べた。乱流による円盤組成の変化についても、水氷の減損およびその時間スケールの定量的な評価など今までにない重要な結果を得ている。さらにこれらの結果は現在行われている ALMA による原始星や円盤の観測にも重要な示唆を与えるものである。実際、昨年 12 月に国内外の研究者が ALMA の観測プロポーザルを作製する際、共同研究として本論文の結果の一部を基礎データと提供した。このように本論文は、今後の理論的・観測的研究の発展に大きく寄与する重要な知見を得たものとして価値ある集積であると認める。よって、学位申請者の古家健次は、博士（理学）の学位を得る資格があると認める。