

領域略称名：宇宙分子進化  
領域番号：2507

平成30年度科学研究費補助金「新学術領域研究  
(研究領域提案型)」に係る事後評価報告書

「宇宙における分子進化：星間雲から原始惑星系へ」

(領域設定期間)

平成25年度～平成29年度

平成30年6月

領域代表者 (北海道大学・低温科学研究所・教授・香内 晃)

## 目 次

1. 研究領域の目的及び概要	7
2. 研究領域の設定目的の達成度	9
3. 研究領域の研究推進時の問題点と当時の対応状況	12
4. 審査結果の所見及び中間評価の所見等で指摘を受けた事項への対応状況	13
5. 主な研究成果（発明及び特許を含む）	15
6. 研究成果の取りまとめ及び公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）	18
7. 研究組織（公募研究を含む。）と各研究項目の連携状況	23
8. 研究経費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）	25
9. 当該学問分野及び関連学問分野への貢献度	29
10. 研究計画に参画した若手研究者の成長の状況	30
11. 総括班評価者による評価	31

**研究組織** (総：総括班, 支：国際活動支援班, 計：総括班及び国際活動支援班以外の計画研究, 公：公募研究)

研究項目	課題番号 研究課題名	研究期間	代表者氏名	所属機関 部局 職	構成員数
X00 総	251080001 宇宙における分子進化:星間雲から原始惑星系へ	平成25年度～ 平成29年度	香内 晃	北海道大学・低温科学研究所・教授	8
Y00 支	15K21735 宇宙における分子進化研究の国際連携・分野間融合への展開	平成27年度～ 平成29年度	香内 晃	北海道大学・低温科学研究所・教授	7
A01 計	25108002 分子雲における氷・有機物生成	平成25年度～ 平成29年度	香内 晃	北海道大学・低温科学研究所・教授	8
A02 計	25108003 原始惑星系における有機物生成とその進化	平成25年度～ 平成29年度	永原 裕子	東京工業大学・地球生命研究所・フェロー	7
A03 計	25108004 宇宙における分子生成と物質進化	平成25年度～ 平成29年度	深澤 倫子	明治大学・理工学部・教授	5
A04 計	25108005 原始惑星系の化学的多様性とその進化	平成25年度～ 平成29年度	山本 智	東京大学・理学系研究科・教授	8
A05 計	25108006 宇宙有機物の構造と同位体	平成25年度～ 平成29年度	塚本 尚義	北海道大学・理学研究院・教授	6
統括・支援・計画研究 計 7 件					
A01 公	26108501 星間塵表面反応による有機分子の重水素濃集:炭素鎖伸長による濃集度の変化	平成26年度～ 平成27年度	大場 康弘	北海道大学・低温科学研究所・助教	1
A01 公	26108508 星間ダスト表面におけるアモルファス氷の強誘電性と触媒機能	平成26年度～ 平成27年度	杉本 敏樹	京都大学・理学研究科・助教	1

A01 公	26108510 鉍物組成クラスターの 気相反応による表面反 応機構の探究	平成26年度～ 平成27年度	荒川 雅	九州大学・理学研究院・助教	1
A01 公	26108511 高精度理論計算による 星間雲分子の紫外線ス ペクトル、解離反応機構 および同位体効果	平成26年度～ 平成27年度	Danielache Sebastian	上智大学・理工学部・准教授	1
A01 公	26108514 星間分子雲における炭 素フラレーンへの水素 付加反応の解明	平成26年度～ 平成27年度	中井 陽一	国立研究開発法人理化学研究所仁科 加速器研究センター・専任研究員・	1
A01 公	26108504 水クラスター表面で起 こる光反応過程のレー ザー分光研究	平成26年度～ 平成27年度	松田 欣之	東北大学・理学研究科・助教	1
A02 公	26108505 未同定赤外バンドのキ ャリアの同定と重水素 化による赤外スペクト ルへの影響の調査	平成26年度～ 平成27年度	左近 樹	東京大学・理学系研究科・助教	1
A03 公	26108502 星間物質表面上での水 素分子の生成反応と核 スピン転換に関する理 論的研究	平成26年度～ 平成27年度	國貞 雄治	北海道大学・工学研究院・助教	1
A03 公	26108503 木星形成後の微惑星衝 撃波による物質進化モ デルの構築	平成26年度～ 平成27年度	田中 今日子	北海道大学・低温科学研究所・学術 研究員	2
A03 公	26108516 星間化合物の量子スペ クトルのシュレーディ ンガー・レベルの計算	平成26年度～ 平成27年度	中嶋 浩之	特定非営利活動法人量子化学研究協 会・研究所・部門長	1
A04 公	26108506 無極性直線炭素鎖分子 のサブミリ波天文観測 のための最低変角振動 遷移の実験室分光	平成26年度～ 平成27年度	金森 英人	東京工業大学・理工学研究科・准教 授	3

A04 公	26108507 星間分子研究のための 低周波数帯の高感度高 速高分解能マイクロ波 分光計の製作	平成26年度～ 平成27年度	小林 かおり	富山大学・理工学研究部・教授	1
A04 公	26108512 原始惑星系円盤のスノ ーラインへの観測的制 限	平成26年度～ 平成27年度	本田 充彦	久留米大学・医学部・助教	1
A05 公	26108509 マルチターン飛行時間 型質量分析計による隕 石中に存在する有機物 の高精度測定	平成26年度～ 平成27年度	青木 順	大阪大学・理学研究科・助教	1
A05 公	26108515 真空紫外マイクロビー ムを用いた円二色性計 測による隕石中のキラ リティ分析手法の検証	平成26年度～ 平成27年度	田中 真人	国立研究開発法人産業技術総合研究 所・分析計測標準研究部門・主任研 究員	1
A01 公	16H00926 光化学反応による星間 分子の重水素濃集度の 変化	平成28年度～ 平成29年度	大場 康弘	北海道大学・低温科学研究所・助教	1
A01 公	16H00930 星間における反応場と しての氷の理解に向け た水和クラスターレー ザーの分光研究	平成28年度～ 平成29年度	松田 欣之	東北大学・理学研究科・助教	1
A01 公	16H00933 非接触原子間力顕微鏡 による氷表面上の化学 進化の研究	平成28年度～ 平成29年度	杉本 宜昭	東京大学・新領域創成科学研究科・ 准教授	1
A01 公	16H00937 分子化学進化に及ぼす アモルファス氷の強誘 電性効果	平成28年度～ 平成29年度	杉本 敏樹	京都大学・理学研究科・助教	1
A02 公	16H00938 有機分子の生成と進化 における鉱物クラスター の触媒作用	平成28年度～ 平成29年度	荒川 雅	九州大学・理学研究院・助教	1

A02 公	16H00941 隕石有機物の窒素同位体異常の起源と初期太陽系内における物質進化	平成28年度～ 平成29年度	橋口 未奈子	九州大学・惑星微量有機化合物研究センター・学術研究員	2
A03 公	16H00927 固体微粒子凝縮・結晶化理論の微惑星衝撃波による物質進化への応用	平成28年度～ 平成29年度	田中 今日子	北海道大学・低温科学研究所・学術研究員	2
A03 公	16H00928 星間塵表面上での分子進化シミュレーション-反応素過程と水素同位体効果の解明	平成28年度～ 平成29年度	國貞 雄治	北海道大学・工学研究院・助教	1
A03 公	16H00931 星・惑星系形成過程における気相と固相の化学:天体構造の観測指標と物質進化	平成28年度～ 平成29年度	相川 祐理	東京大学・理学系研究科・教授	1
A03 公	16H00932 星間分子進化における水素分子触媒機構の寄与に関する理論研究	平成28年度～ 平成29年度	高柳 敏幸	埼玉大学・理工学研究科・教授	1
A03 公	16H00939 気相および星間塵表面における複雑分子生成素過程の理論化学的手法による解明	平成28年度～ 平成29年度	田代 基慶	東洋大学・理工学部・准教授	1
A03 公	16H00943 実験困難な不安定星間分子種のシュレーディンガー・レベルの精密量子化学計算	平成28年度～ 平成29年度	中嶋 浩之	量子化学研究協会・研究所・部門長	1

A04 公	16H00934 「あかり」近赤外線分光 データに基づく氷の変 性過程の研究	平成28年度～ 平成29年度	尾中 敬	東京大学・理学系研究科・教授	3
A05 公	16H00929 (H29 廃止) Evolution of water and organic compounds on carbon-rich asteroids.	平成28年度～ 平成28年度	Laurette Piani	北海道大学・理学研究院・講師	1
A05 公	16H00940 真空紫外領域の円偏光 分光法による隕石中の キラリティの非破壊分 析法の確立	平成28年度～ 平成29年度	田中 真人	国立研究開発法人産業技術総合研究 所・分析計測標準研究部門・主任研 究員	2
A05 公	16H00942 (H29 廃止) 星間塵表面へのアミン の吸着に伴う窒素・炭素 同位体分別メカニズム の解明	平成28年度～ 平成28年度	菅原 春菜	海洋研究開発機構・生物地球化学研 究分野・ポストドクトラル研究員	1
公募研究 計 31 件					

## 1. 研究領域の目的及び概要（2ページ以内）

研究領域の研究目的及び全体構想について、応募時に記述した内容を簡潔に記述してください。どのような点が「我が国の学術水準の向上・強化につながる研究領域」であるか、研究の学術的背景（応募領域の着想に至った経緯、応募時までの研究成果を進展させる場合にはその内容等）を中心に記述してください。

### 概要

星間分子雲から原始惑星系における分子進化を物質科学的に研究する新領域を立ち上げる。宇宙で最も大量に存在する元素(H, O, C, N)からなる固体物質（氷および有機物）の形成・進化に着目し、実験、観測、理論、分析等の多様な手法で、分子進化の全体像を描く。これらによって、これまでの惑星形成論で不十分であった化学的視点に着目した研究を推進する。

### ①どのような点が「我が国の学術水準の向上・強化につながる新たな研究領域」であるか

宇宙でO, C, Nは、H, Heに次いで多い元素であり、H, O, C, Nは、10K程度の星間分子雲においては氷や固相の有機分子となっている。これらの物質は地球型惑星を構成している鉱物と比べて一桁存在量が多いだけでなく、進化史を記録しているロゼッタストーンでもあり、格段の重要性を有している。これまでは、氷や有機物の研究は、天文学、物理化学、隕石学などの分野で独立しておこなわれ、しかもそれぞれが分断されていた。これらを統合することで、新たな学問領域の展開が期待できる。本領域では、それぞれの分野で世界の先端を担っている我が国の観測・実験・理論・分析などによる研究を高度に融合することで、原始惑星系進化にともなう氷や有機物の進化を明らかにし、自然科学のあらゆる分野を統合する新しい学術領域を開拓する。

### ②研究の学術的背景

これまでの惑星形成過程の研究では、力学的な視点が主で、化学的な側面からの研究は非常に少なかった。最近、系外惑星や氷衛星の大気に注目が集まっており研究の必要性が指摘されているにもかかわらず、これら大気の原料である氷や有機物の研究は限られていた。氷や有機物は環境（温度、光子場）に敏感なので、原始星円盤の環境を探るプローブとして最適であるが、適切な観測手段がなかったため観測はできなかった。しかし、ALMA (Atacama Large Millimeter /submillimeter Array)望遠鏡が本格運用フェーズに入り、原始星円盤が高分解能で観察できるようになった。これまでにない質と量のデータの入手が期待され、この分野の研究は、時宜を得ているだけでなく大きな発展が見込まれている。

星間分子雲では、星間塵表面での原子反応や光化学反応により、氷や有機物が生成される。これらの生成過程は室内での模擬実験により、代表者たちのグループによって精力的に研究が行われている。また、多種の不飽和有機物が分担者の電波観測により発見され、H, Nの重い同位体が濃集していることが明らかになった。しかし、これらの物質が原始太陽系星雲でどのように進化して来たかに関してはほとんど研究が行われていない。

最近、炭素質隕石や彗星塵などの地球外物質中に分子雲や原始惑星系の外縁部起源の有機物が見つかるようになってきている。これらの物質中にも、H, Nの重い同位体が濃集している。これらの研究から、天文観測だけではわからない分子雲の情報を地球外物質の分析から読み取ることができることを示している。ロゼッタストーンを紐解く（氷・有機物の生成・進化過程の解明）には、H, C, O, Nの同位体が強力なツールであることが認識されてきた。

このような状況にあって、今求められていることは、星間分子雲から原始惑星系でC-H-O-Nからなる物質がどのように進化したかの理解である。これらの元素を含む系の反応は、温度・圧力が低だけでなく紫外線の影響等もあり、非平衡である。したがって、物理化学的基盤に立った実験的・実証的研究が必要になる。具体的には、氷・有機物を、物質科学的手法で生成効率（反応速度）、生成経路、同位体分別機構を調べることにより、星間分子雲から原始惑星系に至る環境（固体とガスの化学・同位体組成）の変化を明らかにする。このような研究を展開するにあたっては、これまでそれぞれの研究分野や対象毎に分断されていたものを高度に統合することが必須である。



### ③研究期間内に何をどこまで明らかにしようとするのか

#### 分子雲から原始惑星系に至る分子進化の物理化学的手法による解明

- 1) 分子雲における表面原子反応・光化学反応の反応速度定数を測定するとともに、これらの反応によって生成される氷・有機物の化学組成、同位体の特徴を明らかにする。
- 2) 原始惑星系での氷・有機物生成・進化プロセスに着目し、①氷・分子雲有機物が加熱によりどのように変化するか（特に、蒸発ガスの化学組成に着目）、②触媒（表面）反応の反応速度定数を測定するとともに、生成される有機物の化学組成、同位体の特徴を明らかにする。
- 3) 電波望遠鏡(ALMA, ASTE 等)を用いて、有機分子の進化とその多様性を系統的に観測する。

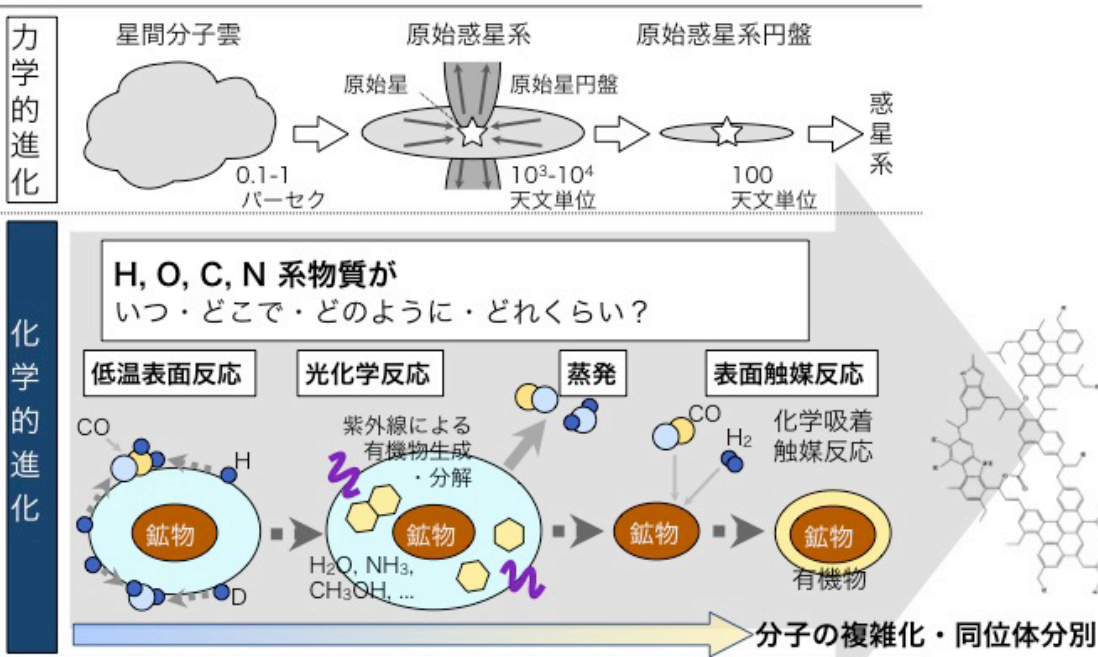
#### 始原的地球外物質（ロゼッタストーン）の解読

- 4) 始原的地球外物質中の有機物の化学・同位体組成の分析から、分子雲や原始惑星系起源の有機物を見出しその特徴を明らかにする（物的証拠の収集）。

#### 分子進化のシナリオ作成

- 5) 1) - 3) のデータを用いるとともに、4) を満足するように、分子雲から原始惑星系に至るまでの氷・有機物の起源・進化（分子進化）を明らかにする。特に、分子進化の多様性を生む原因となる物理条件の解明に重点をおく。

本領域の大きな特長は、実際に手を動かして研究を行っている若手研究者が主役を担う点にある。とりわけ、実験、理論、観測においては、若手研究者がリーダーシップをもって、世界最先端の研究を切り拓くことで、次世代のリーダーの育成を図る。ベテランの班長は、若手研究者が研究しやすい環境整備にも気を配る。



実験・観測・理論・分析の統合による惑星系形成に伴う分子進化の全貌の理解

## 2. 研究領域の設定目的の達成度（3 ページ以内）

研究期間内に何をどこまで明らかにしようとし、どの程度達成できたか、また、応募時に研究領域として設定した研究の対象に照らしての達成度合いについて、具体的に記述してください。必要に応じ、公募研究を含めた研究項目ごとの状況も記述してください。

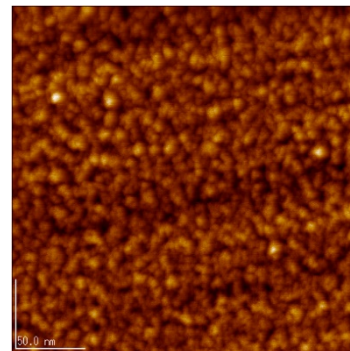
各班ともきわめて順調に当初の計画通りの研究成果をあげた。さらに、いくつかの研究項目では、当初の想定をはるかに超える画期的な研究成果もでている。

### 【研究項目A01】分子雲における氷・有機物生成（分子雲実験班）

#### 計画研究

分子雲に存在する低温の星間塵でおこる化学反応について系統的・定量的室内実験をおこない、表面原子反応および光化学反応による分子生成過程の全容解明を目的とする。

分子雲の化学反応場としての役割を果たす星間塵の表面を覆うアモルファス氷表面の幾何構造を、超高真空透過型電子顕微鏡および超高真空原子間力顕微鏡を用いて直接観察することに初めて成功し、アモルファス氷は結晶とは全く異なるナノ構造（柱状、雪だるま状）を持つことがわかるなど、顕著な成果が得られた（図）。



10 Kでは軽いH原子も星間塵の表面に物理吸着し、量子トンネル効果により活性化エネルギーを透過して反応が進むが、その反応速度論・動力学はほとんど分からなかった。そこで、量子トンネル表面反応の温度依存、同位体効果(H, D原子)、構造依存(アモルファス・結晶)、生成した分子の核スピン状態(オルソ/パラ比)を系統的に調べた。まず、主要な星間分子である、 $H_2$ ,  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $H_2CO$ ,  $CH_3OH$ ,  $NH_3$ ,  $C_2H_4$ について、生成機構を明らかにすると同時に反応速度定数を測定した。さらに、ベンゼン( $C_6H_6$ )を用いて、量子トンネル表面反応に関する反応速度論・動力学の一般的描像を得ることに成功した。これは当初の計画をはるかに上回る画期的な成果といえる。特筆すべきは、10Kで作製した氷から蒸発した水分子のオルソ/パラ比が蒸発温度にかかわらず、常に統計重率である3を示すことを明らかにしたことにより、「オルソ/パラ比が氷（水分子）生成の温度を示す」という30年来の推論が明瞭に否定された。

水および他の分子( $CH_3OH$ ,  $NH_3$ など)を含む氷星間塵に紫外線が照射され、その後氷が蒸発すると、光化学反応により複雑な有機物ができる。この過程を調べるために、新規光化学反応実験装置を開発し、分子雲を模した種々の氷への紫外線照射実験をおこなった。残渣有機物の網羅的的化学分析と形態観察をA05班と共同で行い、残渣有機物のナノ構造を明らかにするなど先駆的な結果が得られた。さらに、紫外線照射を受けたアモルファス氷が、50-140Kで液体的挙動をすることを発見した。このような温度では、当然アモルファス氷は固体であるとみなされてきたので（ガラス転移温度=136K）、大きな驚きであると同時に、これまでのアモルファス氷内での光化学反応や氷微粒子の付着・成長過程の見直しを迫る画期的な成果である。

#### 公募研究

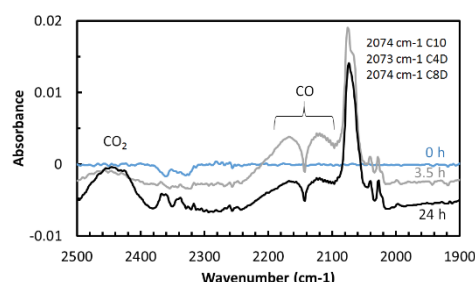
以下のように画期的な成果がいくつか得られた。(1) 金属基板上に成長させたアモルファス氷薄膜が強誘電的に成長すること(杉本敏)、(2) 金属基板表面に吸着した水分子が互いに水素結合して形成される水分子ネットワークの走査型トンネル顕微鏡による観察(杉本宜)、(3) 表面原子反応時の反応エネルギーによって生成分子の蒸発が起こりうることの証明(大場)。

### 【研究項目A02】原始惑星系における有機物生成とその進化（原始惑星系実験班）

#### 計画研究

原始惑星系円盤初期において、アモルファスケイ酸塩および金属微粒子を触媒とする化学反応により分子がどの程度まで進化するかを、実験的・理論的に研究することが目的である。

本研究では、(1) 原始惑星系円盤を特徴づける低温・低圧における触媒反応により、50-100Kにおいて金属上で有機物が形成されうること、その有機物は炭素鎖分子であること(図)、反応効率はNiが顕著に高いことなど、きわめて重要な成果を得た。(2) SPring-8 にウォルターミラー光学系を用いた高空間分解能の結像型軟X線分光装置（以下、顕微XANES装置）



を開発することに成功し、装置の目標空間分解能（数 100nm）および観測時間（数 ms）達成した。さらに、深さ方向の状態分析にも成功した。また、他班の実験生成物の分析も行った。(3) 第一原理計算により、結晶質および非晶質ケイ酸塩（フォルステライト）の表面エネルギーを決定し、原始惑星系円盤において最も基本である  $H_2$ ,  $CO$  分子のそれらの表面への吸着エネルギーを決定した。また、XANES スペクトルを理論的に決定した。(4) 原始惑星系円盤進化にともなう粒子移動とその結果である有機物・氷の時空分布についてのモデルを完成させた。このように、きわめて順調に当初の計画通りの研究成果をあげることができた。

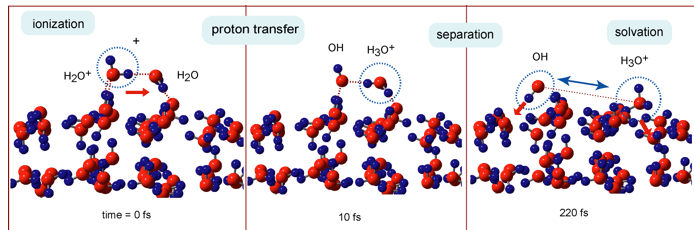
### 公募研究

鉱物クラスター上で起こる種々の分子との反応の観測に成功した（荒川）。

## 【研究項目A03】宇宙における分子生成と物質進化（理論班）

### 計画研究

本課題では、古典分子動力学法、ダイレクト・アブイニシオ分子動力学法、第一原理法、数値シミュレーション等の理論的手法を用いて、星間分子雲から原始惑星系に至るプロセスで起こる氷および有機物の生成・進化の過程をマイクロおよびマクロな視点から解明することを目的として研究を実施した。その



ために、(1)アモルファス表面構造の解明、(2)アモルファス表面における吸着・拡散および表面反応機構の解明、(3)原始惑星系における低分子の熱変性過程の解明、(4)星間分子雲および原始惑星系における分子進化シナリオの構築、以上四つの個別目標を設定した。

研究の成果として、項目(1)では、古典分子動力学法を用いた計算により、極低温下のアモルファス氷とアモルファスフォルステライトの表面構造を明らかにした。項目(2)では、ダイレクト・アブイニシオ分子動力学法を用いて氷表面上に吸着した水ダイマーおよびアンモニアダイマーの拡散機構を解析し、表面拡散のメカニズムを明らかにした(図)。項目(3)では、数値シミュレーションにより氷ダストの蒸発が生じる衝撃波条件を解析し、 $CO_2$ 氷が典型的な降着衝撃波(次項の「遠心カバリア」を想定)により昇華可能であることを示した。項目(4)では、塵表面反応を含めた化学反応計算や重水素濃縮過程のモデル化に成功した。以上のように、研究は計画通り順調に進展した。

### 公募研究

(1) 第一原理計算による、氷および炭素表面上での原子・分子の吸着・拡散特性の解明(國貞)、(2)シミュレーティング方程式の正確な解法を星間分子に適用し、高精度の解を得た(中嶋)などが、物理・化学分野の研究者の参画による成果の一例である。

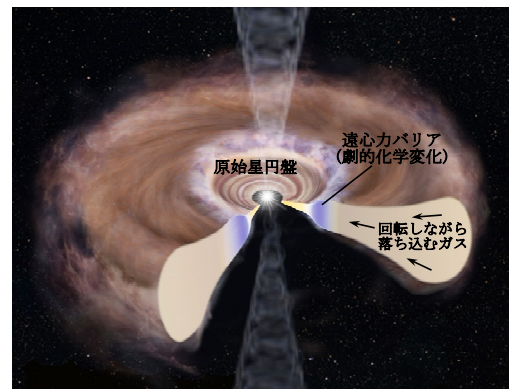
## 【研究項目A04】原始惑星系の化学的多様性とその進化（観測班）

### 計画研究

本研究の目的は、ALMAをはじめとする先端的電波望遠鏡を用いて、太陽質量程度の星が形成される領域におけるガスの化学組成の多様性とその起源を探求し、その化学的多様性が原始惑星系円盤へ伝播されるかどうかを検証することである。

まず、原始星 L1527 について ALMA で観測を行い、回転しつつ落下する原始星エンベロープの遠心カバリアを発見し(図)、そこで化学組成や温度が大きく変化する様子を捉えることに成功した。これまで、原始星周囲の円盤は、化学組成は一様で静かに降着し温度変化も連続的であると考えられてきたため、本観測結果は画期的な成果である。

さらに、国立天文台 ASTE 10 m 望遠鏡、野辺山 45m 電波望遠鏡などによる観測をもとに選択した、様々な化学組成を持つ 8 個の原始星天体を ALMA で詳細に観測し、100 天文単位スケール以下における化学組成の特徴を明らかにすることに成功した。原始惑星系円盤の初期段階である原始惑星系円盤が形成されつつある様子を、いくつかの天体で捉えることができ、その結果、母体となる原始星コア(1000 天文単位)スケールでの化学組成の多様性が、原始星円盤にまでもたらされていることが明らかになった。このことは、惑星系の多様性に、物質的多様性という新しい「軸」を設定する



ものであり、太陽系の起源の理解に新しい視点を与えた。

原始星円盤形成領域の物理・化学状態の評価には、より広い周波数帯域での観測が必要である。特に、高励起の分子スペクトル線の観測は、今後非常に重要になると期待される。そのためにテラヘルツ帯の超伝導受信機を開発し、ASTE 10 m 電波望遠鏡に搭載して観測実験を行った。0.9 THz 帯において  $^{13}\text{CO}$  (J=8-7: 880 GHz) の観測に成功し、ALMA における高励起スペクトル線の観測提案への基礎を築いた。

### 公募研究

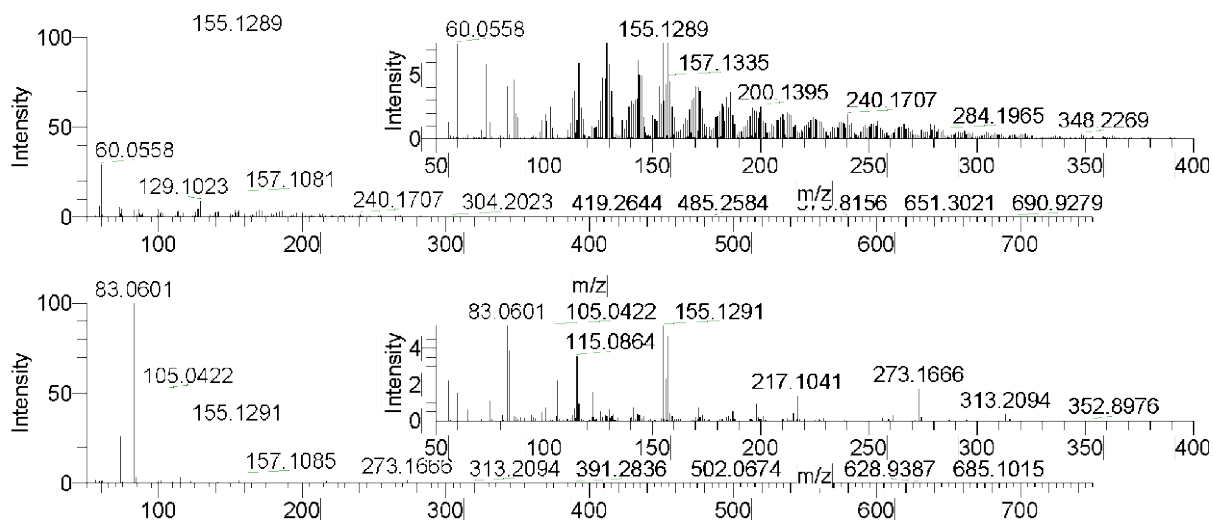
(1) 原始惑星系円盤の近赤外高空間分解能観測による氷ダストの検出(本田), (2) 実験室分光のための 240 MHz 帯のマイクロ波分光計の開発(小林), などがおこなわれた。

### 【研究項目A05】宇宙有機物の構造と同位体 (分析班)

#### 計画研究

本研究では、分子雲環境において合成した分子雲模擬有機物と始原的隕石中の極微量有機物に対して、網羅的に分子構造を同定し、同位体を含め世界最高感度で分析する手法を開発し、有機物の定性定量分析、有機化合物単位の構造解析・同位体分析を行うことにより、分子雲、原始惑星系での有機物生成過程と分子構造との関係を解明することを目的とする。その研究成果より、分子雲分子から隕石有機物分子をリンクする新しいマーカー分子・マーカー官能基を探索し、分子雲から原始惑星系までの有機分子進化の解読を目指す。

網羅的に分子構造を同定するために超高質量分解能液体クロマトグラフ質量分析計を導入し、分子雲実験班が作製した模擬分子雲有機物と隕石より抽出した可溶性有機物に対し分子量決定精度 1ppm の高分解能質量スペクトルを取得する分析法を開発した。その結果、どの試料からも分子量 700 に至る全ての質量数を持つ多種の有機分子が存在することが認められ、その精密質量とスペクトルパターンからいくつかの同族体有機化合物として分類することが有効であることが判明した (図)。この分類は分子雲有機物の生成経路と対応すると考えられる。このスペクトルパターンの解析により、アルデヒドとアンモニアが分子雲分子から隕石有機物分子をリンクする新しい鍵となるマーカー分子・マーカー官能基であることが判明した。また、生成有機物の一つであるアミノ酸に注目して、アミノ酸分子部位レベルの同位体分析とアミノ酸キラル分析が達成された。以上より当初に設定した研究目的は概ね達成された。



### 公募研究

(1) 隕石試料などのキラリティ直接分析手法としてのマイクロビームを用いた紫外～真空紫外線領域の円二色性スペクトル計測装置の開発 (田中真), (2) 炭素質隕石中の水は2つの起源を異にする二種類の水の混合であることの発見 (Piani) など、顕著な成果をあげた。

### 3. 研究領域の研究推進時の問題点と当時の対応状況（1ページ以内）

研究推進時に問題が生じた場合には、その問題点とそれを解決するために講じた対応策等について具体的に記述してください。また、組織変更を行った場合は、変更による効果についても記述してください。

#### 問題点1 総括班ワークショップ

領域スタート時から若手を中心とするワークショップにより、連携・融合研究を推進する方針で領域を運営してきた。ワークショップでの議論により科学的問題点や新規連携・融合研究課題が明らかになった。しかし、具体的に連携・共同研究をどのように立ち上げ、展開していくかに関する方法の策定や具体的研究の進め方に関しては、若手だけでは困難な面もあった。

#### 問題点1に対する対策

領域代表および各班長がワークショップや総括班会議で、共同研究の具体的推進策を議論・決定し、それを受けて迅速に共同研究を遂行した。その結果、「6. 研究成果の取りまとめ及び公表の状況」に★で示すように、各班および公募研究の連携・融合研究が大きく進展し、重要な成果をあげることができた。

#### 問題点2 光化学反応実験生成物の少なさ

不純物を含む氷に10Kで紫外線を照射し、紫外線照射後に温度を上昇させると氷が蒸発して固体の有機物が残る。この有機物を種々の分析法で分析する予定であった。しかし、生成された有機物の量が想定より少なく（それでもこれまでよりは3倍の量できるようになったが）、他班の分析にまわす時期が遅れ、量も不足した。

#### 問題点2に対する対策

年間を通じて実験装置を休みなく稼働させ、有機物を多量に作製するよう努めた。その結果、分析班へ試料を渡す時期が遅れは生じたものの、分析班の分析感度も徐々に上がったこととも相まって、最終的には遅れを取り戻すことができ、ほぼ当初の計画通り研究は実施できた。

#### 問題点3 顕微XANES装置開発における入射X線照明系

ウオルターミラーを用いた入射X線の照明系が予想以上に暗く、また、照明X線にむらが発生した。

#### 問題点3に対する対策

入射系にポリキャピラリレンズを用いたり、照明系を用いない蛍光イメージングを試みるなどの試行錯誤をした。照明X線のむら対策としては、ディフューザーを照明系の前におき、ディフューザーを回転させることで、一様な照明系を実現した。装置全体の開発に時間を要してしまっていたが、諸々の試行錯誤をおこなったことで、逆に、装置を種々のモード（低倍率モード、高倍率モード、蛍光モード、密着モード）で使うことが可能になった。

#### 問題点4 ASTE望遠鏡の鏡面精度

ASTE10m望遠鏡に搭載する受信機開発は順調に進行し、THz帯の受信機技術を確立した。しかし、ASTE10m望遠鏡に搭載した結果、同望遠鏡の主鏡面精度が想定以上に悪く、1THz以上の周波数ではほとんど集光力を持たないことがわかった。

#### 問題点4に対する対策

ASTE望遠鏡による測定は技術立証と初期成果に留め、最終年度はALMAによる観測に集中した。その結果、原始星の多様性を明らかにするなど当初の予定以外の観測に集中でき、大きな成果をあげることができた。

#### 組織変更とその効果について

該当しない。

#### 4. 審査結果の所見及び中間評価の所見等で指摘を受けた事項への対応状況（2ページ以内）

審査結果の所見及び中間評価において指摘を受けた事項があった場合には、当該コメント及びそれへの対応策等を記述してください。

##### <審査結果の所見において指摘を受けた事項への対応状況>

###### 審査結果の所見

本研究領域は、宇宙における星間雲から原始惑星系への分子進化を、物理化学的基盤に立って、実験、観測、理論の協力により解明しようという意欲的な提案である。ALMA 望遠鏡が利用できるなど、時宜を得た計画でもある。惑星系形成の力学的進化については多くの研究が行われているが、本研究領域ではH, O, C, N系物質に着目した化学進化の研究を行うところが新しく、既存の学問分野の枠に収まらない新規・融合領域の創成に適したもので、研究領域設定の必要性は高い。研究組織は、トップレベルの研究者が結集して研究手法の異なる計画研究を組織し、その有機的な連携によって物質進化の謎を解明するよう計画されており成果が期待できる。また、「星間分子雲から原始惑星系初期の分子進化」に絞り込んでいる点も評価できる。研究経費については、研究計画に沿ってそれぞれの研究機関へ、実験に必要な設備装置の導入のための予算が計上されており妥当である。なお、各計画研究の成果がどのように有機的に関連してシナジー効果を生み出すのか、より一層明確にする必要がある。

###### 対応状況

所見の指摘（最後の下線部分）を受け、次の基本的考えに基づき、領域を運営してきた。「共同研究や連携研究による単なる研究の効率化や最適化だけに留まるのではなく、真の有機的連携によって、全く新しい視点からこれまでにない発想を得ることを特に重視する。」

キックオフミーティングにあたる第一回の全体集会では、各班長にこのような視点からの哲学を語って頂くようお願いし、若手研究者はそれを十分に認識することができたようである。全体集会に参加して頂いた学術調査官からも、このような手法を評価するコメントを頂いた。

###### 分野横断的ワークショップの開催

上記の哲学を実現するための一つの方策として、各計画研究に共通するテーマや複数の班が密接に関連するテーマをとりあげて徹底的に議論する、分野横断的ワークショップを17回開催した。研究の進展に応じて随時開催する機動性も兼ね備えている事がもう一つの特長である。総括班は目配りをするだけに留め、テーマや内容は若手リーダーの自主性に任せた。

###### 異分野への参入

ワークショップでの議論は上記のように非常に有益であるが、さらに一歩進めて、これまでの研究分野を離れて他分野へ参入することが、これまでにない発想で旧来の研究を打破する鍵になる。特に、若い研究者ほど新しい物事の吸収能力に優れているので、博士研究員等の若手に異分野への実質的（相当深いコミット）参入を強く推奨した。2回の公募研究においては、純粋な物理、化学の研究者からの公募を半数程度採択したが、地球惑星科学や天文学に興味を持ってもらい、全体集会での議論なども通じて連携・融合研究が進展し、優れた成果が多数生み出された。今後の地球惑星科学や天文学の裾野を広げる役割を果たすことができたと考えている。

## <中間評価の所見等で指摘を受けた事項への対応状況>

### 中間評価の所見

評価：A 研究領域の設定目的に照らして、期待どおりの進展が認められる

### 総合所見

本研究領域は、星間分子雲から原始惑星系における分子進化を物質科学的に研究することを目標とし、特に氷や有機物の形成進化に着目して研究が進められている。全体として概ね順調に進行しており、優れた研究成果も生み出されている。各研究計画の有機的な連携についても、キックオフミーティングで戦略を検討し、分野横断的ワークショップを開催し、本研究領域の若手研究者等の異分野参入が見られるなど、様々な工夫がなされている。表題に掲げられている宇宙における分子進化の統一的理解に対して、領域代表者がビジョンをもってリーダーシップを発揮し、連携の策定と推進を進めることで、連携・融合研究の成果が上がることを期待する。

### 対応状況

前半の3年間は、若手を主体とする純粋に科学的なワークショップが主であった。しかし、具体的に連携・共同研究をどのように立ち上げ、展開していくかに関する方法の策定や具体的研究の進め方に関しては、若手だけでは困難な面もあった。班長が新しく提案されたサイエンスの内容や重要性を理解した上で、諸々のサポート（人的、研究経費など）を迅速に行うことが肝要である。そこで、後半の2年間は領域代表者および総括班が主導して、融合・連携研究の進め方および徹底的に議論するワークショップを頻繁に開催した。その結果、各班の現状を班長間で共有できただけでなく、新しく提案されたサイエンスの重要性を認識することができた。それを受けて、具体的な共同研究の推進策を煮詰め、迅速に支援することができた。これらの努力により、実際に共同研究を短時間で立ち上げ、多くの成果を出すことに繋がった。この時、計画班の班員だけでなく、公募研究者、本研究領域に関わっていない関連分野の研究者、および国際活動支援班の経費で招聘した外国人研究者に参加してもらうことで、より広い視点からの議論ができるように配慮した。また、これらの活動は、将来展望を議論する絶好の機会にもなり、本研究領域終了後の具体的共同研究案の策定にも繋がった。

さらに、シニアから若手まで幅広い年齢層の海外研究者との連携を意識的におこなった。海外研究拠点との交流も積極的に進め、北海道大学低温科学研究所とスペインCSICの部局間交流協定の締結に繋がった。両機関共催で2回の国際ワークショップを開催した。さらに、分析班および観測班が中心となって、それぞれ、3回、1回の国際シンポジウムを開催した。

以上の結果、複数班にまたがる班員および海外研究者を共著者とする分野融合的論文を相当数出版することができた（「6. 研究成果の取りまとめ及び公表の状況」に★で示した論文が複数班にまたがる連携研究、◎が融合研究）。研究分担者や公募研究者として参画してもらった多くの若手研究者が、優れた研究成果を出すとともに、彼らの多くが研究期間中に昇進を果たしている。連携研究の成果が当初の想定より早く、しかもこれまでの概念を変えるような画期的成果が得られたので、それらをアピールするとともに今後の展開を議論するための領域主催の国際シンポジウムを平成29年6月に開催した。

以上のように、若手研究者が連携・融合研究において著しく活躍するとともに、領域全体として、宇宙における分子進化の概念を変えるような成果が得られたので、中間評価の所見に対して、十分答えることができたと考えている。

## 5. 主な研究成果（発明及び特許を含む）[研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に整理する]

（3 ページ以内）

本研究課題（公募研究を含む）により得られた研究成果（発明及び特許を含む）について、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、図表などを用いて研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に整理し、具体的に記述してください。なお、領域内の共同研究等による研究成果についてはその旨を記述してください。記述に当たっては、**本研究課題により得られたものに厳に限る**こととします。

### 【研究項目A01】分子雲における氷・有機物生成（分子雲実験班）

#### 計画研究

##### (a) 星間塵の表面を覆うアモルファスH<sub>2</sub>O氷の表面構造

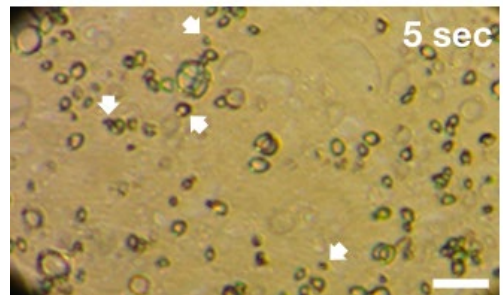
極低温超高真空透過型電子顕微鏡および原子間力顕微鏡を用いて、アモルファスH<sub>2</sub>O氷の可視化に初めて成功し、ナノスケールで不均一な構造を明らかにした。45 Kおよび100Kのアモルファス氷の最表面のナノ構造について観察をおこない、それぞれ柱状および雪ダルマ状であることを明らかにした。100Kでは、これまで高温なので平坦であると考えられてきた。

##### (b) 表面に吸着した原子による化学反応

量子トンネル表面反応の温度依存、同位体効果(H, D原子)、構造依存(アモルファス・結晶)を系統的に調べた。まず、主要な星間分子である、H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>CO, CH<sub>3</sub>OH, NH<sub>3</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>について、生成機構を明らかにすると同時に反応速度定数(H, D原子について)を測定した。また、ベンゼン(C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>)を用いて、量子トンネル表面反応に関する反応速度論・動力学の一般的描像を得ることができた。さらに、10Kで作製した氷から蒸発した水分子のオルソ/パラ比は蒸発温度にかかわらず(10Kでも150Kでも)、常に統計重率である3を示し、「オルソ/パラ比が氷(水分子)生成の温度を示す」という30年来の推論を明瞭に否定した。

##### (c) H<sub>2</sub>Oや他の分子(CH<sub>3</sub>OH, NH<sub>3</sub>など)を含む氷の光化学反応

光化学反応実験では、PICACHU (Photochemistry in Interstellar Cloud for Astro-Chronicle in Hokkaido University) を開発し、模擬分子雲有機物を経常的に作製できるようになった。生成物は、分析班・原始惑星系実験班と共同で分析・観察を進めてきた(分析に関してはA05参照)。残渣有機物が10 nm程度の粒状組織の集合体であることが初めて明らかになった。さらに、紫外線照射を受けたアモルファス氷(純粋なH<sub>2</sub>OでもCH<sub>3</sub>OHやNH<sub>3</sub>を含む場合でも)が、50-140K(ガラス転移温度は136K)で液体のように振る舞う特異な現象を見いだした(図は泡の発生を示す)。これまで、「固体」だと思っていた氷が「液体」だということになると、そこでの化学反応が著しく変化するだけでなく、氷微粒子の付着成長過程を見直す必要がある。



#### 公募研究

- ・ Pt(111)基板上に成長したアモルファス氷薄膜が強誘電的になることを解明した
- ・ 金属基板上に吸着した水分子が水素結合してできた水ネットワークを走査型トンネル顕微鏡で観察した
- ・ 表面原子反応時の反応エネルギーによって10Kでも分子の蒸発が起こることを証明した(なぜ分子雲では10Kにもかかわらず多種類の星間分子が気相にあるかを説明できた)

### 【研究項目A02】原始惑星系における有機物生成とその進化（原始惑星系実験班）

#### 計画研究

##### (a) アモルファスケイ酸塩薄膜基板作製と構造の理論的解析

原始惑星系円盤に存在する主要な固体物質基板を多様な方法で作成することが可能となった。本班のみならず、他班の実験にも基板を供給し、領域全体の研究推進に貢献した。理論的には、フォルステライト(Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>)に関し、第一原理的にその表面エネルギーを求めること、さらに、H<sub>2</sub>, COの吸着エネルギーの決定に成功した。

##### (b) 原始惑星系円盤における触媒反応実験

原始惑星系円盤条件における、非晶質ケイ酸塩や金属表面における軽元素を主とする化学反応を実験的に進める方法を確立した。その結果、50-100KでH<sub>2</sub>, COからCH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, 炭素質物質が生成する事が確認できた。原始惑星系円盤条件における実験は従来世界的に全く成功してこなかったものであり、本研究の重要な成果である。

##### (c) 結像型軟X線分光装置の開発

有機物生成反応のその場観察および地球外物質の分析のための顕微XANES装置を開発し、SPring-8に設置した。ウォルターミラーを2個直列に配置した反射型の光学系を用いることによって、これまでの装置ではできなかった



高空間分解能（数100nm）と観測時間の短縮（数ms）の両立に成功した。さらに、深さ方向の状態分析にも成功した。この装置で、他班の実験生成物の分析も行った。

### (c) 原始惑星系円盤粒子移動モデル

原始惑星系円盤における粒子の移動を考慮したモデルを開発し、氷および有機物の分布の時間変化が追跡できるようになった。その結果、氷・有機物の分布は円盤の質量および大きさに強く依存することが判明した。初期質量が小さな円盤では、 $10^6$ 年後には100天文単位でも氷がなくなってしまい、彗星を作ることが困難なことが示された。

#### 公募研究

- ・ 鉱物クラスター上で起こる種々の分子と鉱物との反応の観測に成功した。

## 【研究項目A03】宇宙における分子生成と物質進化（理論班）

### 計画研究

#### (a) アモルファス表面構造

古典分子動力学法を用いて、アモルファス氷の表面構造を解析した。その結果、アモルファス氷には、熱振動の振幅が大きい低密度の層が存在することが分かった。また、ガラス転移点以下の極低温においても焼結現象が起こることを示した(図)。さらに、アモルファスフォルステライトについても、表面構造やガラス転移のメカニズムを明らかにした。

#### (b) アモルファス表面における吸着・拡散および表面反応機構

ダイレクト・アブイニシオ分子動力学法を用いて、アモルファス氷表面に吸着した水ダイマーおよびアンモニアダイマーのプロトン移動速度を解析した。その成果、氷表面のプロトン移動速度は気相中のほぼ倍の速さであり、さらに中間体の寿命が極めて短いことを示した。このことから、氷表面にはプロトン移動速度を加速する効果があることを明らかにした。

#### (c) 原始惑星系における低分子の熱変性過程

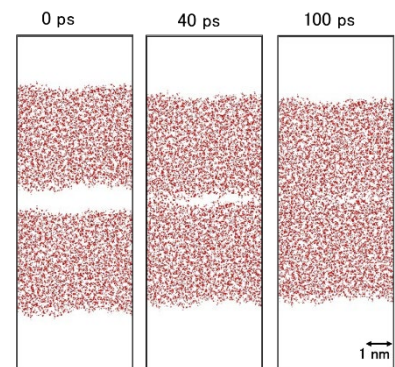
数値シミュレーションにより、衝撃波に伴う氷ダストの蒸発過程を解析した。その結果、固体状態のSOやCO<sub>2</sub>が、典型的な降着衝撃波により昇華可能であることが分かった。

#### (d) 星間分子雲および原始惑星系における分子進化過程

原始惑星系円盤中の塵表面反応を含めた化学反応計算を行い、半径数十天文単位の暖かな領域で、ラジカル同士の塵表面反応により有機分子生成が促進されることを明らかにした。また、計算結果が彗星内の分子組成と良い一致を示すことから、メタノール分子輝線の観測により円盤内の塵表面反応の検証が可能であることを提案した。

#### 公募研究

- ・ 第一原理計算によって、氷および炭素表面上での原子・分子の吸着・拡散特性を解明した
- ・ シュレーディンガー方程式の正確な解法を開発し、それを星間分子に適用し、星間分子(C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>CO)や不安定星間分子(H<sub>2</sub><sup>+</sup>)などで高精度の解を得た。



## 【研究項目A04】原始惑星系の化学的多様性とその進化（観測班）

### 計画研究

ALMAを用いた観測で7つの低質量（太陽型）星形成領域における化学組成とその多様性を数十天文単位スケールの解像度で明らかにした。

#### (a) 遠心力バリアの発見

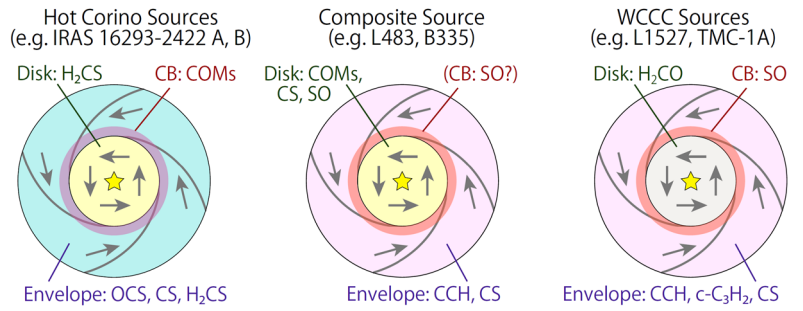
原始星周辺の数百天文単位スケールでは、ガスは回転しながら原始星に落下する。この扁平なエンベロープガスは遠心力半径を超えて落下を続け、遠心力バリア（遠心力半径の1/2）近傍に達し、そこで衝撃波を発生し滞留することが見出された。この遠心力バリアは、エンベロープと原始星円盤をつなぐ遷移領域にあたる。従来、原始星円盤の半径は遠心力半径と考えられてきたが、実際には動圧のために遠心力バリア半径近傍まで押し込まれていることがわかった。

#### (b) 原始星の構造解明

エンベロープガス、遠心力バリア、そして、その内側の原始星円盤の化学組成は遠心力バリアを境に大きく異なることを発見した。これは、衝撃波による星間塵氷マントルからの分子の蒸発(SO分子、飽和有機分子など)と、それに伴う化学反応などが寄与していると考えられる。この新しい描像は、化学モデルに新たな挑戦を求めた。

**(c) 原始星の多様性**

これまでの観測で、エンベロープガスの化学組成は多様性をもつことが知られていた。たとえば、飽和有機分子に富む Hot Corino 天体と不飽和有機分子に富む Warm Carbon Chain Chemistry (WCCC) 天体がその一例である。このような多様性が、実際に原始星円盤形成領域にまでもたらされていることが示された。また、Hot Corino 化学と WCCC を両方含む天体も見出され、そのような複合的天体が太陽型原始星の標準的組成であることを指摘した。



CB : 遠心カバリア, COM : 飽和有機分子

**公募研究**

- ・ 原始惑星系円盤の近赤外高空間分解能観測により氷ダストを検出した。
- ・ 実験室分光用240 MHz帯のフーリエ変換型マイクロ波分光計を開発した。

**【研究項目A05】宇宙有機物の構造と同位体 (分析班)**

**計画研究**

**(a) 炭素質隕石中の有機物分析**

マーチソン炭素質隕石中に 600 個以上の含窒素環状化合物アルキル同族体(C<sub>n</sub>H<sub>m</sub>N, C<sub>n</sub>H<sub>m</sub>N<sub>2</sub>; n,m:自然数)を新たに発見し、それらがアルデヒドとアンモニアから合成される反応過程を示した (図)。同じく、マーチソン炭素質隕石中からヒドロキシ基を有する地球外アミノ酸を新発見し、今まで主張されてきた過程と異なるアルデヒドとアンモニアからの合成経路を発見した。これらの結果は、原始惑星系の有機物の化学進化にアルデヒドとアンモニアが重要であることを示している。

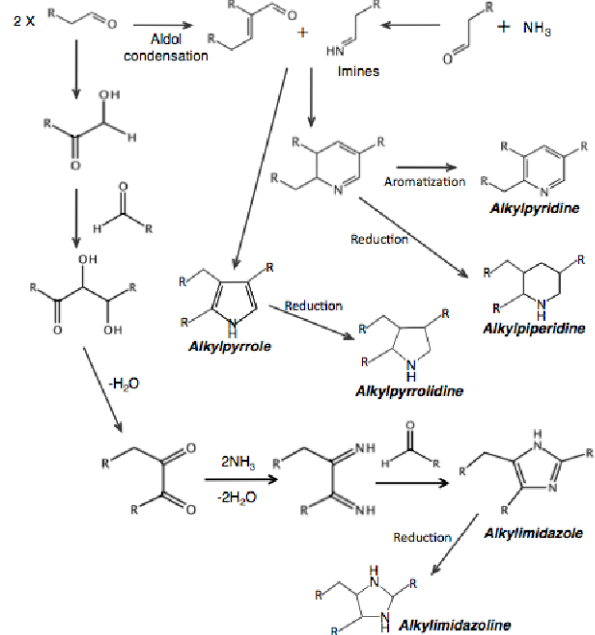
隕石アミノ酸のキラル分析のために新規に3次元 HPLC 分析システムを開発することに成功し、マーチソン隕石中のアミノ酸においてエナンチオ過剰が検出されるものは一部の生物アミノ酸だけに限ることを明らかにした。これは従来の定説を覆す発見で、地球の生物アミノ酸が持つエナンチオ過剰の原因は宇宙起源ではないことを強く示唆する。

**(b) 隕石に含まれる水の起源**

同位体顕微鏡を用いて炭素質隕石 NWA 801 (CR2)のマトリックスを観察することにより、重水素 D に濃縮した有機物ナノ粒子の形状・分布・重水素濃縮度を決定し、成因推定をおこなった。普通隕石中に保存されている小惑星表面の H<sub>2</sub>O 液体の同位体分析に成功した。この小惑星 H<sub>2</sub>O の同位体分析により分子進化に彗星起源の水が重要な役割を果たしている可能性が示唆された。

**(c) 実験生成物の分析**

分子雲模擬有機物の精密質量スペクトル解析を進めた。分子雲に普遍的に存在すると考えられるメタン・メタノール・水・アンモニアの混合氷への紫外線照射により生成する可溶性有機物は、C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>N<sub>z</sub>O<sub>w</sub> と C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>N<sub>z</sub> の全ての組み合わせが存在するが出発ガスの種類によりその量比が異なることが判明した。一方、分子雲模擬有機物のアミノ酸は分子部位ごとに重水素濃縮度が異なることを明らかにし、分子雲におけるアミノ酸の重水素濃集プロセスを解明した。



**公募研究**

- ・ 隕石試料などのキラリティ直接分析手法として、マイクロビームを用いた紫外～真空紫外線領域における円二色性スペクトル計測装置を開発した。
- ・ 炭素質隕石 Paris (CM2)中の水は起源を異にする二種類の水の混合であることを発見した。

## 6. 研究成果の取りまとめ及び公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）（5 ページ以内）

本研究課題（公募研究を含む）により得られた研究成果の公表の状況（主な論文、書籍、ホームページ、主催シンポジウム等の状況）について具体的に記述してください。記述に当たっては、本研究課題により得られたものに厳に限ることとします。

- 論文の場合、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に記載し、研究代表者には二重下線、研究分担者には一重下線、連携研究者には点線の下線を付し、corresponding author には左に\*印を付してください。
- 別添の「(2) 発表論文」の融合研究論文として整理した論文については、冒頭に◎を付してください。
- 補助条件に定められたとおり、本研究課題に係り交付を受けて行った研究の成果であることを表示したもの（論文等の場合は謝辞に課題番号を含め記載したもの）について記載したもののについては、冒頭に▲を付してください（前項と重複する場合は、「◎▲・・・」と記載してください）。
- 一般向けのアウトリーチ活動を行った場合はその内容についても記述してください。

◆：オープンアクセス，★：複数の計画班／計画班と公募研究の連携研究の成果

【主要論文：研究項目 A01：分子雲実験班】（全て査読あり）

### 計画研究

- ▲S. Matsuda, M. Yamazaki, A. Harata, \*A. Yabushita (2018) CO<sub>2</sub> formation yields from different states of CO adsorbed on amorphous solid water under 157 nm photoirradiation, *Chem. Lett.*, 47,4(4pp).
- ▲◆◎\*Tachibana S., Kouchi A., Hama T., Oba Y., Piani L., Sugawara I., Endo Y., Hidaka H., Kimura Y., Murata K., Yurimoto H., Watanabe N. (2017) Liquid-like behavior of UV-irradiated interstellar ice analog at low temperatures. *Science Advances* 3, eaao2538(6pp).★
- ▲◆◎\*Piani L., Tachibana S., Hama T., 他 4 名, Kimura Y., 他 4 名, Tsuchiyama A., 他 2 名, Yurimoto H., Kouchi A. (2017) Evolution of morphological and physical properties of laboratory interstellar organic residues with ultraviolet irradiation. *Astrophys. J.* 837, 35, (11pp).★
- ▲◎\*M. Araki, S. Takano, N. Sakai, S. Yamamoto, T. Oyama, N. Kuze, K. Tsukiyama (2017) Long carbon chains in the warm-carbon-chain-chemistry source L1527: First detection of C<sub>7</sub>H in molecular clouds, *Astrophys. J.*, 847, 51 (7pp).★
- ▲◎\*A. Kouchi, T. Hama, Y. Kimura, H. Hidaka, R. Escribano, N. Watanabe (2016) Matrix sublimation method for the formation of high-density amorphous ice, *Chem. Phys. Lett.* 658, 287–292.★
- ◎\*H. Ueta, N. Watanabe, T. Hama, A. Kouchi, (2016) Surface temperature-dependence of hydrogen ortho-para conversion on amorphous solid water, *Phys. Rev. Lett.* 116, 253201(5pp).
- ▲◎\*T. Hama, A. Kouchi, N. Watanabe (2016) Statistical ortho-to-para ratio of water desorbed from ice at 10 kelvin, *Science*, 351, 65–67.
- ▲◎\*T. Hama, H. Ueta, Kouchi, A., N. Watanabe (2015) Quantum tunneling observed without its characteristic large kinetic isotope effects, *Proc. Nat. Acad. Sci. U.S.A.*, 112, 7438–7443.
- ▲\*M. Araki, Y. Matsushita, K. Tsukiyama, (2015) Laboratory optical spectroscopy of the phenoxy radical as a candidate for diffuse interstellar bands, *Astron. J.*, 150, 113(6pp).
- ◎\*Y. Oba, N. Watanabe, Y. Osamura, Kouchi, A. (2015) Chiral glycine formation on cold interstellar grains: Origins of chiral molecules in space, *Chem. Phys. Lett.*, 634, 53–59.★
- ◎\*Y. Oba, K. Osaka, N. Watanabe, T. Chigai, Kouchi, A. (2014) Reaction kinetics and isotope effect of water formation by the surface reaction of solid H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> with H atoms at low temperatures, *Faraday Disc.*, 168,185-204.★
- ▲◎\*T. Hama, H. Ueta, Kouchi, A., N. Watanabe, H. Tachikawa (2014) Quantum tunneling hydrogenation of solid benzene and its control via surface structure, *J. Phys. Chem. Lett.*, 5, 3843-3848.★
- ◎\*T. Hama, N. Watanabe (2013) Surface processes on interstellar amorphous solid water: Adsorption, diffusion, tunneling reactions, and nuclear-spin conversion, *Chem. Rev.*, 113, 8783-8839.

### 公募研究

- ◎\*Y. Oba, T. Tomaru, T. Lamberts, A. Kouchi, N. Watanabe (2018) An infrared measurement of chemical desorption from interstellar ice analogues. *Nature Astronomy*, 2, 228-232.★
- ▲◆\*A. Shiotari, Y. Sugimoto (2017) Ultrahigh-resolution imaging of water networks by atomic force microscopy, *Nature Comm.*, 8, 14313(7pp).
- ▲◎T. Endo, \*Y. Matsuda, A. Fujii (2017) Infrared spectroscopic study of the acidic CH bonds in hydrated clusters of cationic pentane, *J. Phys. Chem. Lett.*, 8, 4716-4719.
- ▲◆◎\*Y. Oba, Y. Takano, H. Naraoka, A. Kouchi, N. Watanabe (2017) Deuterium fractionation upon the formation of hexamethylenetetramines through photochemical reactions of interstellar ice analogs containing deuterated methanol isotopologues, *Astrophys. J.*, 849, 122 (9pp).★

- ◎\*Y. Nakai, H. Hidaka, N. Watanabe, T. M. Kojima, (2016) Stepwise formation of  $\text{H}_3\text{O}^+(\text{H}_2\text{O})_n$  in an ion drift tube: Empirical effective temperature of association/dissociation reaction equilibrium in an electric field, *J. Chem. Phys.*, **144**, 224306. ★
- ▲\*T. Sugimoto, N. Aiga, Y. Otsuki, K. Watanabe Y. Matsumoto, (2016) Emergent high-Tc ferroelectric ordering of strongly correlated and frustrated protons in heteroepitaxial ice film, *Nature Physics*, **12**, 1063–1068.

【主要論文：研究項目 A02：原始惑星系円盤実験班】（全て査読あり）

#### 計画研究

- ▲◆◎\*O. Takahashi, Y. Tamenori, T. Suenaga, T. Ikeda-Fukazawa, J. Matsuno, A. Tsuchiyama (2018) XANES spectra of forsterite in crystal, surface, and amorphous states, *AIP Advances*, **8**, 025107(10pp). ★
- \*Noguchi T., Yabuta H., Ito S., ..., Tachibana S.(14名中9番目), ..., Nagahara, H.(14名中14番目) (2017) Variation of mineralogy and organic material during the early stage of aqueous activity recorded in Antarctic micrometeorites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **208**, 119-144. ★
- \*Yabuta, H., Noguchi T., Ito S., ..., Tachibana S.(17名中13番目), ..., Nagahara, H.(17名中17番目) (2017) Formation of an ultracarbonaceous Antarctic micrometeorite through minimal aqueous alteration in a small porous icy body. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **214**, 172-190. ★
- ▲\*N. Watanabe, S. Aoki, N. Yamaguchi (2017) Design and fabrication of Wolter-type 4-mirror system, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **849**, 012058 (4pages).
- ◆◎\*Y. Kimura, K. K. Tanaka, T. Nozawa, S. Takeuchi, Y. Inatomi (2017) Pure iron grains are rare in the universe, *Science Advances*, **3**, e1601992(6pp). ★
- \*O. Takahashi, N. Kunitake, S. Takaki (2015) Theoretical study for geometry relaxation following core-excitation:  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NH}_3$ , and  $\text{CH}_4$ , *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.*, **48**, 204001.
- T. Gejo, T. Ikegami, K. Honma, O. Takahashi, E. Shigemasa, Y. Hikosaka, Y. Tamenori (2014) Dynamics of oxygen Rydberg atom generation following O 1s inner-shell excitation of  $\text{H}_2\text{O}$ , *J. Chem. Phys.*, **140**, 214310(7pp).
- \*O. Takahashi, K. Ueda (2014) Molecular double core-hole spectroscopy for probing chemical bonds:  $\text{C}_{60}$  and chain molecules revisited, *Chem. Phys.*, **440**, 64-68.
- ◎\*M. Hoshino, K. Uesugi, T. Tsukube, N. Yagi (2014) Quantitative and dynamic measurements of biological fresh samples with X-ray phase contrast tomography, *J. Synchrotron Rad.*, **21**, 1347-1357.
- Tenner, T.J., Ushikubo, T., Kurahashi, E., Nagahara, H., Kita, N.T. (2013) Oxygen isotope systematics of chondrule phenocrysts from the CO3.0 chondrite Yamato 81020: Evidence for two distinct oxygen isotope reservoirs. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **102**, 226-245.
- ◆◎\*Kimura Y., Sato T., Nakamura N., Nozawa J., Nakamura T., Tsukamoto K., Yamamoto K. (2013) Vortex magnetic structure in framboidal magnetite reveals existence of water droplets in an ancient asteroid. *Nature Comm.*, **4**, 2649(8pp).
- ◎T. Matsumoto, A. Tsuchiyama, K. Nakamura-Messenger, T. Nakano, K. Uesugi, A. Takeuchi, M. E. Zolensky (2013) Three-dimensional observation and morphological analysis of organic nanoglobules in a carbonaceous chondrite using X-ray micro-tomography. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **116**, 84-95.

#### 公募研究

- ▲M. Arakawa, T. Omoda, \*A. Terasaki, (2017) Adsorption and subsequent reaction of a water molecule on silicate and silica cluster anions, *J. Phys. Chem. C*, **121**, 10790–10795.
- I. Sakon, S. Sako, T. Onaka, T. Nozawa, Y. Kimura, 他 10 名 (2016) Concurrent formation of carbon and silicate dust in nova V1280 Sco, *Astrophys. J.*, **817**, 145(23pp). ★

【主要論文：研究項目 A03：理論班】（全て査読あり）

#### 計画研究

- ▲ Notsu, S., Nomura, H., Walsh, C., Honda, M., Hirota, T., Akiyama, E., Millar, T.J. (2018) Candidate water vapor lines to locate the  $\text{H}_2\text{O}$  snowline through high-dispersion spectroscopic observations. III. Sub-millimeter  $\text{H}_2^{16}\text{O}$  and  $\text{H}_2^{18}\text{O}$  lines, *Astrophys. J.*, **855**,62(24pp). ★
- ▲Y. Kumagai, \*T. Ikeda-Fukazawa (2017) Structures of surface and interface of amorphous ice, *Chem. Phys. Lett.*, **678**, 153–158.
- ▲\*H. Tachikawa (2017) Hydrogen atom addition to the surface of graphene nanoflakes: A density functional theory study. *Appl. Surf. Sci.*, **396**, 1335-1342.
- ▲\*H. Tachikawa (2017) Effects of zero point vibration on the reaction dynamics of water dimer cations following ionization. *J. Comput. Chem.*, **38**, 1503-1508.
- ▲\*H. Miura, T. Yamamoto, H. Nomura, T. Nakamoto, K. K. Tanaka, H. Tanaka, M. Nagasawa (2017)

Comprehensive study of thermal desorption of grain-surface species by accretion shocks around protostars, *Astrophys. J.*, 839, 47 (16pp).★

- ▲\*T. Ikeda-Fukazawa (2016) Molecular dynamical investigations for effect on temperature history of forsterite glass, *J. Soc. Inorg. Mater. Jpn.*, 23, 130–135.
- ▲\*H. Tachikawa (2016) Ionization dynamics of water dimer on ice surface, *Surf. Sci.*, 647, 1-7.
- ▲\*H. Tachikawa, H. Kawabata (2016) Effects of a single water molecule on the reaction barrier of interstellar CO<sub>2</sub> formation reaction, *J. Phys. Chem. A*, 120, 6596-6603.
- ▲\*H. Tachikawa (2016) Reaction dynamics following ionization of ammonia dimer adsorbed on ice surface, *J. Phys. Chem. A*, 120, 7301-7310.
- \*H. Tachikawa, T. Takada (2015) Proton transfer rates in ionized water clusters (H<sub>2</sub>O)<sub>n</sub> (n = 2–4), *RSC Adv.*, 5, 6945-6953.
- Aota, T., Inoue, T., Aikawa Y. (2015) Evaporation of grain-surface species by shock waves in a protoplanetary disk, *Astrophys. J.*, 799, 141(9pp).
- ©Y. Sekine, T. Ikeda-Fukazawa, M. Aizawa, R. Kobayashi, S. Chi, J. A. Fernandez-Baca, H. Yamauchi, \*H. Fukazawa (2014) Neutron diffraction of ice in hydrogels, *J. Phys. Chem. B*, 118, 13453-13457.
- Walsh, C., Herbst, E., Nomura H., Millar, T.J., Widicus Weaver, S. (2014) Complex organic molecules along the accretion flow in isolated and externally irradiated protoplanetary disks, *Faraday Disc.*, 168, 389-421.
- \*H. Tachikawa, T. Takada, Ionization dynamics of the water trimer: A direct ab initio MD study, *Chem. Phys.*, 415 (2013) 76-83.
- \*Aikawa, Y. (2013) Interplay of chemistry and dynamics in the low-mass star formation, *Chem. Rev.*, 113, 8961-8980.

#### 公募研究

- H. Nakashima, H. Nakatsuji (2016) Analytical potential curve from Non-Born-Oppenheimer wave function: Application to hydrogen molecular ion, *AIP. Conf. Proc.*, 1790, 020017-1-4.
- ©\*R. Angelil, J. Diemand, K. K. Tanaka, H. Tanaka (2015) Homogeneous SPC/E water nucleation in large molecular dynamics simulations, *J. Chem. Phys.*, 143, 0640507 (10pp).
- ▲◆\*Y. Kunisada, H. Kasai (2015) Hindered rotational physisorption states of H<sub>2</sub> on Ag(111) surfaces, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 17, 19625-19630.

【主要論文：研究項目 A04：観測班】（全て査読あり）

#### 計画研究

- \*Yamamoto S. (2017) ‘Introduction to Astrochemistry: Chemical Evolution from Interstellar Clouds to Star and Planet Formation, Astronomy and strophysics Library, *Springer*, 286pp.
- ▲\*Hirota T., Machida M. N., Matsushita Y., Motogi K., Matsumoto N., Kim M. K., Burns R. A., Honma M. (2017) Disk-driven rotating bipolar outflow in Orion source I, *Nature Astronomy*, 1, 146 (5pp).
- ▲\*Y. Fujii, T. Kojima, A. Gonzalez, S. Asayama, M. Kroug, K. Kaneko, H. Ogawa, Y. Uzawa (2017) Low-noise integrated balanced SIS mixer for 787–950GHz, *Supercond. Sci. Technol.*, 30, 024001 (13pp).
- ▲\*Watanabe, Y., Nishimura Y., Harada N., Sakai N., Shimonishi T., Aikawa Y., Kawamura A., Yamamoto S. (2017) Molecular-cloud-scale chemical composition. I. A mapping spectral line survey toward W51 in the 3 mm band, *Astrophys. J.*, 845, 116(30pp).★
- ▲\*Oya Y., Sakai N., Watanabe, Y., Higuchi A.E., Hirota T., Lopez-Sepulcre A., Sakai T., Aikawa Y., Ceccarelli C., Lefloch B., Caux E., Vastel C., Kahane C., Yamamoto S. (2017) L483: Warm carbon-chain chemistry source harboring Hot Corino activity, *Astrophys. J.*, 837, 174 (15pp).★
- ▲\*Sakai N., Oya Y., Higuchi A.E., Aikawa Y., Hanawa T., Ceccarelli C., Lefloch B., Lopez-Sepulcre A., Watanabe, Y., Sakai T., Hirota T., Caux E., Vastel C., Kahane C., Yamamoto S. (2017) Vertical structure of the transition zone from infalling rotating envelope to disk in the class 0 protostar, IRAS 04368+2557, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc. Lett.*, 467, L76-L80.★
- ▲\*Sakai N., Oya Y., Lopez-Sepulcre A., Watanabe Y., Sakai T., Hirota T., Aikawa Y., Ceccarelli C., 他 4 名, Yamamoto S. (2016) Subarcsecond analysis of the infalling-rotating envelope around the class I protostar IRAS 04365+2533, *Astrophys. J. Lett.*, 820, L34 (6pp).★
- ◆Bottinelli S., Demyk K., Coutens A., Taquet V., Ohashi N., Takakuwa S., Yen H.-W., H. Maezawa (2015) Application of superconducting hot-electron bolometer mixers for Terahertz-band astronomy, *IEICE Trans. Electron.*, E98.C, 196-206.
- ▲\*Soma T., Sakai N., Watanabe Y., Yamamoto S. (2015) Metanol in the starless core, Taurus molecular

cloud-1, *Astrophys. J.*, 802, 74(9pp).

- ▲\*Sakai T., Sakai N., Foster J.B., Sanhueza P., Jackson J.M., Kassis M., Furuya K., Aikawa Y., Hirota T., Yamamoto S. (2015) ALMA observations of the IRDC Clump G34.43+00.24 MM3: DNC/HNC Ratio, *Astrophys. J.*, 803, 70(9pp).★
- ▲\*Sakai N., Sakai T., Hirota T., Watanabe Y., Ceccarelli C., 他 10 名, Aikawa Y., Yamamoto S. (2014) Change in the chemical composition of infalling gas forming a disk around a protostar, *Nature*, 507, 78-80.★
- ▲\*Sakai N., Oya Y., Sakai T., Watanabe Y., Hirota T., Ceccarelli C., 他 7 名, Aikawa Y., Takakuwa S., Ohashi N., Yen H.-W., Yamamoto S. (2014) Chemical view of protostellar-disk formation in L1527, *Astrophys. J.*, 791, L38(5pp).★
- ▲Oya, Y., \*Sakai N., Sakai T., Watanabe Y., Hirota T., Lindberg, J.E., Bisschop, S.E., Joergensen, J.K., van Dishoeck, E.F., Yamamoto S. (2014) A Substellar-Mass Protostar and Its Outflow of IRAS 15398-3359 Revealed by Subarcsecond-Resolution Observations of H<sub>2</sub>CO and C<sub>2</sub>H, *Astrophys. J.*, 795, 192(9pp).
- ▲Yanagida, T., Sakai T., Sakai N., Foster, J.B., Sanhueza, P., Jackson, J.M., Kassis, M., Furuya, K., Aikawa Y., Hirota T., Yamamoto S. (2014) ALMA Observations of the IRDC Clump G34.43+00.24 MM3: 278 GHz Class I Methanol Masers, *Astrophys. J.*, 794, L10(6pp).★
- ◎\*Gonzalez A., Soma T., Shiino T., Kaneko K., Uzawa Y., Yamamoto S. (2014) Optics Characterization of a 900 GHz HEB Receiver for the ASTE Telescope: Design, Measurement, and Tolerance Analysis, *J. Infrared Milli. Terahz. Waves*, 35, 743-758.
- ▲\*Sakai N., \*Yamamoto S. (2013) Warm carbon-chain chemistry, *Chem. Rev.*, 113, 8981-9015.

#### 公募研究

- \*K. Kobayashi, T. Kuwahara, H. Tachi, Y. Urata, S. Tsunekawa, N. Hayashi, H. Higuchi, M. Fujitake, N. Ohashi (2018) Microwave spectroscopy of HCOO<sup>13</sup>CH<sub>3</sub> in the second methyl torsional excited state, *J. Molecular Spectroscopy*, 343, 50-53.
- \*H. Kanamori, Z. T. Dehghani, A. Mizoguchi, Y. Endo (2017) Detection of MW transitions between ortho and para states in a free isolated molecule, *Phys. Rev. Lett.*, 119, 173401(5pp).
- ▲\*Honda M., Kudo, T., Takatsuki, S., Inoue, A. K., Nakamoto, T., Fukagawa, M., Tamura, M., Terada, H., Takato, N. (2016) Water ice at the surface of the HD 100546 disk, *Astrophys. J.*, 821, 2 (6pp).

【主要論文：研究項目 A05：分析班】（全て査読あり）

#### 計画研究

- ▲◎Sugahara H., Meinert, C., 他 3 名, Hamase K., \*Takano Y. Meierhenrich, U. (2018) D-amino acids in molecular evolution in space: Absolute asymmetric photolysis and synthesis of amino acids by circularly polarized light. *Biochim. Biophys. Acta*, 1866, 7,743-758.★
- ▲\*Naraoka H., Yamashita, Y., Yamaguchi, M., Orthous-Daunay F. R. (2017) Molecular evolution of N-containing cyclic compounds in the parent body of the Murchison meteorite, *ACS Earth Space Chem.*, 1, 540-550.
- ▲◆Koga T. and \*Naraoka H. (2017) A new family of extraterrestrial amino acids in the Murchison meteorite. *Sci. Rep.*, 7, 636 (8pp).
- ▲◆\*Sugahara H., Takano Y., Ogawa N.O., Chikaraishi Y., Ohkouchi N. (2017) Nitrogen isotopic fractionation in ammonia during adsorption on silicate surface. *ACS Earth Space Chem.*, 1, 24-29.★
- ◆\*Zhang, A.-C., Li, Q.-L., Yurimoto H., Sakamoto, N., Li, X.-H., Hu, S., Lin, Y.-T., Wang, R.-C. (2016) Young asteroidal fluid activity revealed by absolute age from apatite in carbonaceous chondrite, *Nature Comm.*, 7, 12844(6pp).
- \*Hashiguchi, M., Kobayashi, S., Yurimoto H. (2015) Deuterium- and <sup>15</sup>N-signatures of organic globules in Murchison and Northwest Africa 801 meteorites, *Geochem. J.*, 49, 377-391.
- ▲◆\*Takano Y., Chikaraishi, Y., Ohkouchi, N. (2015) Isolation of underivatized amino acids by ion-pair high performance liquid chromatography for precise measurement of nitrogen isotopic composition of amino acids: development of comprehensive LCxGC/C/IRMS method, *Int. J. Mass Spectr.*, 379, 16-25.
- \*Yurimoto H., Itoh S., Zolensky, M., Kusakabe, M., Karen, A., Bodnar, R. (2014) Isotopic compositions of asteroidal liquid water trapped in fluid inclusions of chondrites, *Geochem. J.*, 48, 549-560.
- ▲Yamashita, Y. \*Naraoka H. (2014) Two homologous series of alkylpyridines in the Murchison meteorite, *Geochem. J.*, 48, 519-525.

- ◆◎Hamase, K., 他 5 名, Naraoka, H., Mita, H., Kadota, Y., Nishio, T., Mita, M., Lindner, W. (2014) Enantioselective determination of extraterrestrial amino acids using a two-dimensional chiral high-performance liquid chromatographic system, *Chromatography*, 35, 103-110.
- Kawaguchi, Y., 他 10 名, Mita, H., Yokobori, S., Yamagishi, A. (2014) Fluorescence imaging of microbe-containing micro-particles shot from a two-stage light-gas gun into an ultra-low density silica aerogel, *Origin Life Evol. Bios.*, 44, 43-60.
- ◎\*Ebata, S., Ishihara, M., Kumondai, K., Mibuka, R., Uchino, K., Yurimoto, H. (2013) Development of an ultra-high performance multi-turn TOF-SIMS/SNMS System “MULTUM-SIMS/SNMS”, *J. Am. Soc. Mass Spectrom.*, 24, 222-229.
- Hashiguchi, M., Kobayashi, S., Yurimoto, H. (2013) In situ observation of D-rich carbonaceous globules embedded in NWA 801 CR2 chondrite, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 122, 306-323.

### 公募研究

- ▲Piani L., Yurimoto H., Remusat L. (2018) A dual origin for water in carbonaceous asteroids revealed by CM chondrites. *Nature Astronomy*, 2, 317-323. ★
- ◎A. Takanabe, M. Tanaka, A. Taniguchi, H. Yamanaka, \*T. Asahi (2014) Quantitative analysis with advanced compensated polarized light microscopy on wavelength dependence of linear birefringence of single crystals causing arthritis, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 47, 285402(8pp).

### 【ホームページ】

和英双方のウェブページ (<http://www.astromolecules.org>) を制作し、当研究領域の研究成果、公募情報、研究集会やワークショップの案内、その他トピックス等を随時掲載し、これらの情報を迅速に広く周知するように努めた。

### 【主催国際シンポジウム等】

- Symposium ‘Molecular Evolution in Space’ Hokkaido Univ., 2017.6.27-29
- Solar-System symposium in Sapporo 2016, 2017, 2018, Rusutsu, 2016.2.17-19, 2017.2.13-15, 2018.2.26-28
- Meeting on Dust and Ice Particles Spectroscopy and Scattering, Granada, 2017.9.25-28 (CSIC との共催)
- Astrophysical Ices in the Lab, Madrid, 2016.3.7-8. (CSIC との共催)
- Experimental Cosmochemistry, Yokohama, 2016.6.26
- Workshop on Astrochemistry in Star and Planet Formation, Riken, 2016.2.16
- Workshop on Interstellar Matter 2014, Hokkaido Univ., 2014.10.16-18 (共催)

### 【アウトリーチ】

#### 啓蒙書

香内 晃 (2016) 「宇宙の氷」の疑問 in 「雪と氷の疑問」日本雪氷学会編, 成山堂書店  
 橋 省吾 (2016) "星くずたちの記憶—銀河から太陽系への物語" (岩波科学ライブラリー), 岩波書店, pp.128

#### メディア, 一般講演会等

香内 晃, 羽馬哲也: 北海道大学一般公開「実験室で彗星を作ってみよう」2014年から毎年  
 塚本 尚義, 橋 省吾: なよろ市立天文台きたすばる市民講演会 2013年から毎年  
 木村勇氣: 先端科学移動大学, ナノ粒子特有の振る舞いから宇宙の謎に迫る 2017.11.11  
 深澤倫子: 明治大学公開講演会 (一般市民を対象) 2016.12.10  
 三浦 均: サイエンスカフェ in 名古屋 2017.6.16  
 高野秀路: 学部学生向け電波天文観測実習 平成 25, 26 年度  
 前澤裕之: 大阪府立三国丘高等学校「光速を測る/フィゾーの実験」の指導 2016 年  
 塚本尚義: NHK スペシャル「遭遇! 巨大彗星アイソン」2013.12.4 OA  
 奈良岡浩: NHK コズミックフロント「密着! 隕石ハンター」2014.3.27 OA  
 三田 肇: 国公立大コンソーシアム・福岡出前講義「地球外生命体を求めて! ~アストロバイオロジー研究の最先端~」城東高校 2014.1.10  
 高野識淑: 宇宙航空研究開発機構 特別公開イベント「生命圏と非生命圏の境界における分子の科学」2014.7.26.

## 7. 研究組織（公募研究を含む。）と各研究項目の連携状況（2 ページ以内）

領域内の計画研究及び公募研究を含んだ研究組織と領域において設定している各研究項目との関係を記述し、総括班研究課題の活動状況も含め、どのように研究組織間の連携や計画研究と公募研究の調和を図ってきたか、組織図や図表などを用いて具体的かつ明確に記述してください。

### 計画研究と研究項目の関係

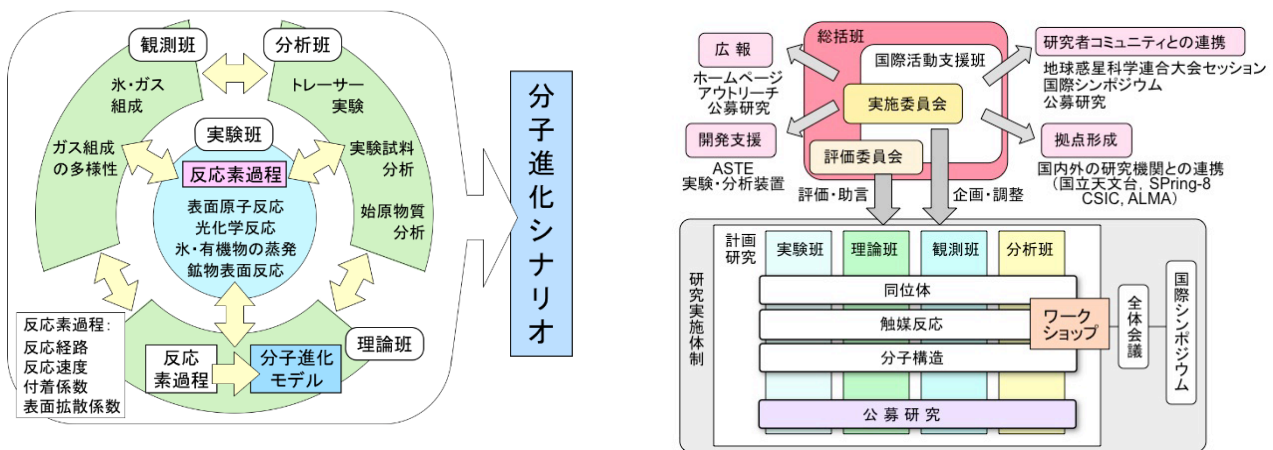
本研究領域の目的は、分子雲から原始惑星系に至る分子進化を、多様なしかも最先端の方法で理解することである。このため、研究手法の異なる研究チームを組織することが最も効率的に研究を推進する方法であると考え、以下のように5つの研究項目を設けた。

- ・研究項目A01：分子雲における氷・有機物生成（分子雲実験班）
- ・研究項目A02：原始惑星系における有機物生成とその進化（原始惑星系実験班）
- ・研究項目A03：宇宙における分子生成と物質進化（理論班）
- ・研究項目A04：原始惑星系の化学的多様性とその進化（観測班）
- ・研究項目A05：宇宙有機物の構造と同位体（分析班）

また、これらの研究計画および公募研究間での相互協力のもと**高度に統合**して機能するよう、企画調整・評価助言を担う総括班を設けた。

- ・研究項目X00：宇宙における分子進化：星間雲から原始惑星系へ（総括班）
- ・研究項目Y00：宇宙における分子進化研究の国際連携・分野間統合への展開（国際活動支援班）

惑星系形成初期（分子雲および原始惑星系）にどのような分子が生成されるかを解明する二つの実験班が中心となり、生成物を分析する分析班、反応素過程を調べる理論班とともに分子進化に関わる反応を解明した。観測班は分子雲から惑星系形成に至る過程での気相分子組成を調べ、分析班は地球外有機物の分析をおこない、実験結果の妥当性を検証するとともに、惑星系形成における分子進化を探った。理論班は実験・観測結果を組み込み、分子雲、原始惑星系スケールでの分子進化モデル構築もおこなった。



### 研究組織間の連携状況

本研究領域では、計画研究間の交流を促し、実験、理論、観測、分析という手法の枠を超え、垣根を取り払うことによって新たな研究を生み出す事が重要であると考えた。具体的には、分子進化のシナリオの作成に必須な項目について、各班同士が迅速に情報を共有し、相互理解・議論を深め、共同研究を大幅に高速化させ、相乗効果を生むように最大限の努力をした。

図に計画研究間で遂行された連携研究課題を示す。当初の想定以上に幅広い課題で連携・融合研究が進展した。総括班メンバー間の密接な連絡や、総括班会議を通して連携研究の推進を図った。計画研究の分担者や公募研究を含む領域全体の研究や連携に関しては、年1回開催される全体集会で、

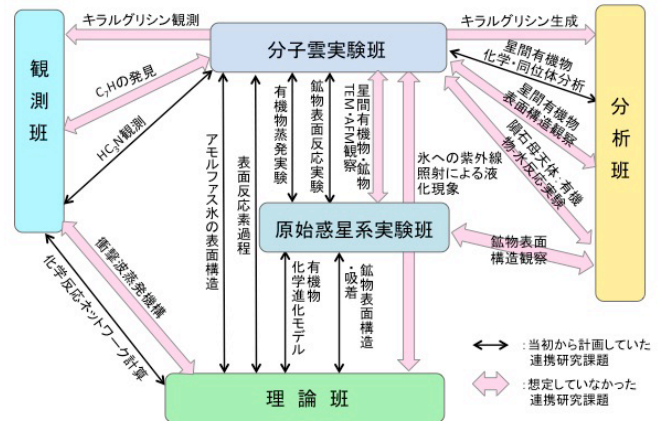


研究成果をできる限り多くのメンバーと共有しさらに新たな展開に結びつかせるよう努めた。

さらに、共通性の高い研究課題に関しては、各計画研究の枠を超えた「ワークショップ」を研究の進展に応じて随時開催し、より深い議論が進むよう工夫をして、最大限の有機的連携を図るよう努めた。研究期間内に計 17 回のワークショップを開催した。

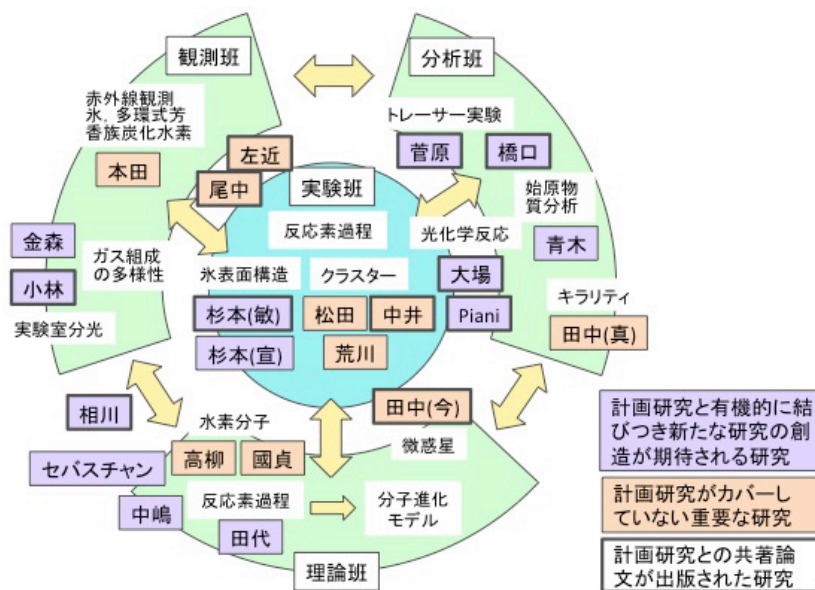
### 研究項目と公募研究の関係

本研究領域では、平成 26-27 年度および平成 28-29 年度のそれぞれ 2 年間で行う公募研究として、15 件+16 件の研究課題を採択した。これらの公募研究では、計画研究と有機的に結びつき新たな研究の創造が期待できる課題、計画研究がカバーしていない重要な課題およびその他独創的・萌芽的な課題、が採択された。特筆すべきは、これまで天文学や地球惑星科学に携わっていない物理や化学の研究者の提案課題を半数程度採択したこと（8/15, 8/16）、さらに採択研究者の平均年齢が 2 回の公募でそれぞれ 38.5 歳、39.5 歳と、若手研究者の研究を採択できたことである。なお、計画研究との関連に関しては、図に代表者の名前を入れて当該課題の位置づけを示した。



多額の研究経費が必要な実験的・観測的研究課題には最大 600 万円/年、その他の研究課題には最大 200 万円/年の研究経費を配分して、若手研究者が独立して研究を遂行するために配慮した。

全体集会やワークショップでの議論を通じて、公募研究と計画研究間の連携も想定以上に活発におこなわれ、優れた研究成果が多数生み出された (Sugimoto et al. 2016, Nature Physics; Shiotani and Sugimoto 2017, Nature Communications.; Oba et al. 2018, Nature Astronomy; Piani et al. 2018, Nature Astronomy など)。図で複数の班にまたがる共同研究がおこなわれた研究は両班を跨ぐ位置に名前を置き、成果が計画班との共同研究として出版されたものは太枠で示した。



## 8. 研究経費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む。）（1 ページ以内）

領域研究を行う上で設備等（研究領域内で共有する設備・装置の購入・開発・運用・実験資料・資材の提供など）の活用状況や研究費の効果的使用について記述してください（総括班における設備共用等への取組の状況を含む。）。

### 総括班

領域全体集会，ワークショップ，国際シンポジウム（主催，共催）の開催経費や旅費支援に使用した。領域の研究意義や成果を広く発信するために，和英双方の WEB ページを整備した。また，会計・情報とりまとめ・広報のために事務補佐員を一名雇用した。

### 国際活動支援班

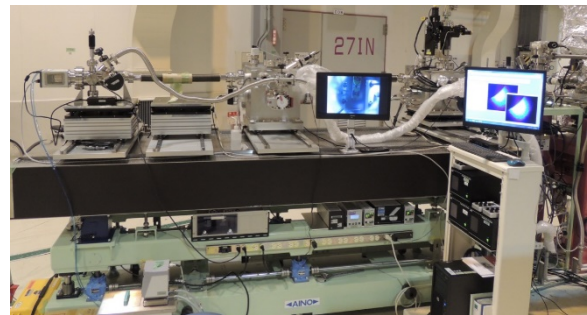
シニア研究者の招聘・派遣旅費および技術職員を含む若手研究者の長期派遣・招聘に旅費を，その他の経費として国際シンポジウム報告書印刷費等を支出した。

### 分子雲実験班

研究費の主たる用途は，新規光化学反応実験装置の開発であり，具体的には，真空チャンバー，800K まで加熱可能な極低温冷凍機，高輝度紫外線源，ガス分析用の高質量分解能四重極型質量分析計，ガス混合装置からなる。これにより，模擬星間分子雲有機物のルーチン的な作製が可能になった。また，極低温超高真空透過型電子顕微鏡用の CCD カメラを購入した。加えて，現有装置での実験に必要な比較的少額の備品費，消耗品費，旅費として使用した。光化学反応実験補助のために，技術支援職員 1 名を雇用した。

### 原始惑星系実験班

研究費の主な使途は，2 種類の大型実験装置に関わるものであり，大部分は計画通りに使用した。北海道大学には触媒反応装置を設置した。SPring-8 に設置した顕微 XANES 装置（図）は，本研究計画で開発した Wolter 鏡を搭載することによって，高空間分解能化が達成された。その他の消耗品，旅費などもほぼ予定通りに使用した。

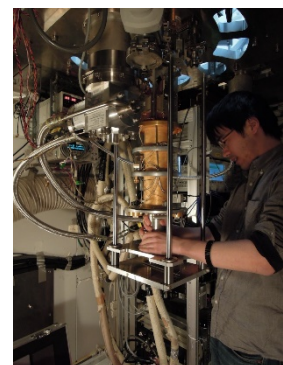


### 理論班

主な設備として，シミュレーション用のワークステーションと大容量データサーバ，並列計算・データ処理用のパーソナルコンピュータを導入した。これらの設備を用いて，古典分子動力学計算および，ダイレクト・アブイニシオ分子動力学計算，第一原理計算，数値シミュレーション(化学反応ネットワーク計算)等の理論計算と解析を実施している。人件費については，博士研究員 1 名の雇用に充て，表面反応のダイレクト・アブイニシオ分子動力学法を用いた計算研究を強化した。このほか，研究組織構成員の学会等の旅費を支出した。

### 観測班

観測研究のための高性能計算機やデータストレージ等の購入，および，IRAM 30 m 電波望遠鏡などによる観測研究の実施旅費に用いた。また，この観測に従事する外国人博士研究員を雇用した。一方，THz 帯受信機の開発のために，それぞれのカートリッジ局発振源，導波管マウント，冷却増幅器などのコンポーネントを購入した。さらに，受信機テストのための冷却ジュワー装置一式を措置し，東京大学に設置した。ASTE 10 m サブミリ波望遠鏡に搭載されているものとコンパチブルであり，この措置により，搭載前に受信機の試験・評価が十分にできるようになった。開発した THz 帯受信機を ASTE 望遠鏡に搭載して試験観測をおこなった（図）。



### 分析班

合成星間有機物と隕石有機物の分析のため最新鋭の液体クロマトグラフ質量分析計を福岡工業大学に新規導入整備した。この経費が研究費使用の最も大きい部分を占める。この装置は分析条件の最適化などの調整がすみ，分子雲実験班が合成した模擬星間有機物の網羅的な分析等に活用されている。この装置の立ち上げと分析を行うため，九州大学で博士研究員を 1 名，また，現有装置を使った有機物分析を行うため，北海道大学と海洋研究開発機構において博士研究員を各 1 名（うち 1 名は外国人）雇用し，若手育成を図った。これらの装置の維持費と試料調整のために消耗品費を使用した。

・研究費の使用状況（(1), (2), (3) を合わせて3ページ以内）

(1) 主要な物品明細（計画研究において購入した主要な物品（設備・備品等。実績報告書の「主要な物品明細書」欄に記載したもの。）について、金額の大きい順に、枠内に収まる範囲で記載してください。）

年度	品名	仕様・性能等	数量	単価（円）	金額（円）	設置(使用)研究機関	
25	Q Exactive システム	サーモフィッシャーサイエンティフィック(株)社製・電場型 FT-MS	1	46,515,000	46,515,000	福岡工業大学	
	テラヘルツ信号源	Amplifier/Multiplier 1.4THzAMC	1	11,550,000	11,550,000	東京大学	
	JEM-2100VL 用 CCD カメラ	ES500WEM-Z04384TES5W	1	5,659,500	5,659,500	北海道大学	
	テストデュワー	A14-216	1	5,578,000	5,578,000	東京大学	
	キネマティックマイクロポジションシステム	真空対応 6 軸 H811 型	1	4,987,500	4,987,500	SPring8	
	超高真空排気装置	特型	1	4,770,960	4,770,960	北海道大学	
	冷凍機システム	DE-204AB-800K 型	1	4,662,200	4,662,200	北海道大学	
	信号発生器	アジレントテクノロジー E8257D	1	3,952,515	3,952,515	電気通信大学	
	ガス混合装置	特型	1	3,787,296	3,787,296	北海道大学	
	ハイパフォーマンス・コンピュータ	HPC システムズ HPC5000-XH220R2P-SIP	1	1,938,600	1,938,600	明治大学	
	科学技術用計算機 CPU	サイエンス・テクノロジー製	1	1,365,000	1,365,000	名古屋市立大学	
	26	研究用四重極質量分析コンポーネント	MAX-500HT-RD	1	13,468,680	13,468,680	北海道大学
		サブミリ波信号源	880-960Hz AMC/920GHz	1	9,934,920	9,934,920	東京大学
		4KGM 冷凍機	MODELSRDK-3 ST-R3-F50L	1	6,210,000	6,210,000	東京大学
デジタル CCD カメラ		ORCA II	1	6,156,000	6,156,000	SPring8	
除振台		結像型軟 X 線顕微分光装置用	1	6,048,000	6,048,000	SPring8	
真空封止冷却ホルダー		北野精機(株)製	1	3,758,400	3,758,400	北海道大学	
ガス冷却吸着回収装置一式		HGCA-100	1	3,518,316	3,518,316	京都教育大学	
27		真空チャンバー	(株)ハイブリッジ社製	1	1,727,244	1,727,244	北海道大学
	重水素拡散同位体置換装置	特型	1	1,280,000	1,280,000	京都大学	
	質量分析器コントローラー	特型	1	1,062,000	1,062,000	北海道大学	
28	FFT 分光器用 XFFTS ボード	特型	3	1,564,740	4,694,220	東京大学	
	Displex 用コンプレッサー (水冷型)	ARS-4HW	1	1,155,600	1,155,600	北海道大学	
29	広帯域周波数逡倍器	特型	2	1,231,200	2,462,400	東京大学	
	4K GM 冷凍機	SRDK-205E-W21A	1	1,890,000	1,890,000	北海道大学	

(2) 計画研究における支出のうち、旅費、人件費・謝金、その他の主要なものについて、年度ごと、費目別に、金額の大きい順に使途、金額、研究上必要な理由等を具体的に記述してください。

**【平成25年度】**

・旅費

1. 研究成果発表 4,153,030 円 総括班
2. 研究成果発表 2,229,507 円 原始惑星系実験班
3. 研究打合せ・実験訪問 1,483,648 円 分析班
4. 研究成果発表 1,004,490 円 分析班

・人件費・謝金

1. 博士研究員の雇用 4,526,286 円 分析班 (3名×4月)

・その他

1. 機器修理費用 2,629,200 円 分子雲実験班
2. 全体集会会議費・概要集代 684,490 円 総括班

**【平成26年度】**

・旅費

1. 研究成果発表 3,686,154 円 原始惑星系実験班
2. 研究成果発表 2,588,710 円 総括班
3. 研究成果発表 1,936,819 円 分析班
4. 研究成果発表 1,460,587 円 理論班

・人件費・謝金

1. 博士研究員の雇用 14,547,305 円 分析班 (3名×12月)
2. 特任研究員の雇用 3,179,510 円 観測班 (1名×8月)
3. 博士研究員の雇用 3,076,920 円 理論班 (1名×7月)
4. 派遣労働者の雇用 3,073,464 円 分子雲実験班 (1名×12月)

・その他

1. 人材派遣 3,781,080 円 観測班
2. 機器修理費用 1,395,900 円 分析班
3. 実験用機器修理代 1,281,528 円 観測班
4. 全体集会会議費・概要集代 1,019,248 円 総括班 (東大開催)

**【平成27年度】**

・旅費

1. 研究成果発表 2,803,429 円 国際活動支援班
2. 研究成果発表 1,331,730 円 総括班

・人件費・謝金

1. 博士研究員の雇用 11,595,000 円 分析班 (2名×12月)
2. 博士研究員の雇用 5,568,233 円 理論班 (1名×12月)
3. 特任研究員の雇用 3,270,000 円 観測班 (1名×12月)
4. 技術者の雇用 3,774,000 円 観測班 (1名×12月)
5. 派遣労働者の雇用 3,663,070 円 分子雲実験班 (1名×12月)

・その他

1. 国際シンポジウム会議費 990,000 円 分析班
2. 全体集会会議費・概要集 921,485 円 総括班

【平成28年度】

・旅費

1. 海外研究者招へい旅費 5,620,765円 国際活動支援班
2. 研究成果発表 2,799,660円 総括班
3. 研究成果発表 2,746,339円 国際活動支援班

・人件費・謝金

1. 博士研究員の雇用 10,446,000円 分析班（2名×12月）
2. 博士研究員の雇用 5,942,206円 理論班（1名×12月）
3. 技術者の雇用 3,784,000円 観測班（1名×12月）
4. 派遣労働者の雇用 3,703,019円 分子雲実験班（1名×12月）
5. 特任研究員の雇用 736,000円 観測班（1名×2月）

・その他

1. 国際シンポジウム会議費 814,000円 分析班
2. 全体集会会議費・概要集 781,789円 総括班

【平成29年度】

・旅費

1. 研究成果発表 7,203,708円 国際活動支援班
2. 海外研究者招へい旅費 5,494,077円 国際活動支援班

・人件費・謝金

1. 博士研究員の雇用 5,925,278円 理論班（1名×12月）
2. 技術者の雇用 3,575,000円 観測班（1名×12月）
3. 派遣労働者の雇用 3,701,453円 分子雲実験班（1名×12月）
4. 博士研究員の雇用 4,562,861円 分析班（1名×12月）

・その他

1. 観測装置の輸送費（日本-チリ間の往復） 2,553,000円
2. 国際シンポジウム会議費 989,956円 分析班

(3) 最終年度（平成28年度）の研究費の繰越しを行った計画研究がある場合は、その内容を記述してください。

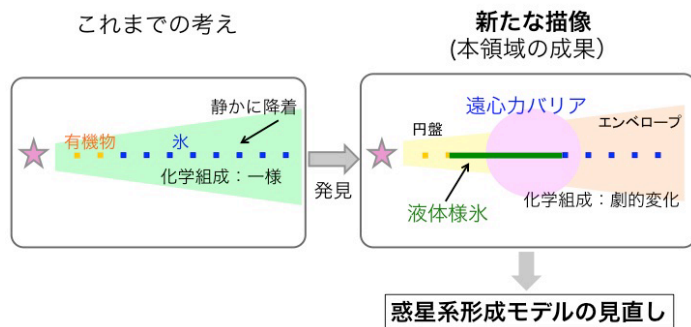
## 9. 当該学問分野及び関連学問分野への貢献度（1ページ以内）

研究領域の研究成果が、当該学問分野や関連分野に与えたインパクトや波及効果などについて記述してください。

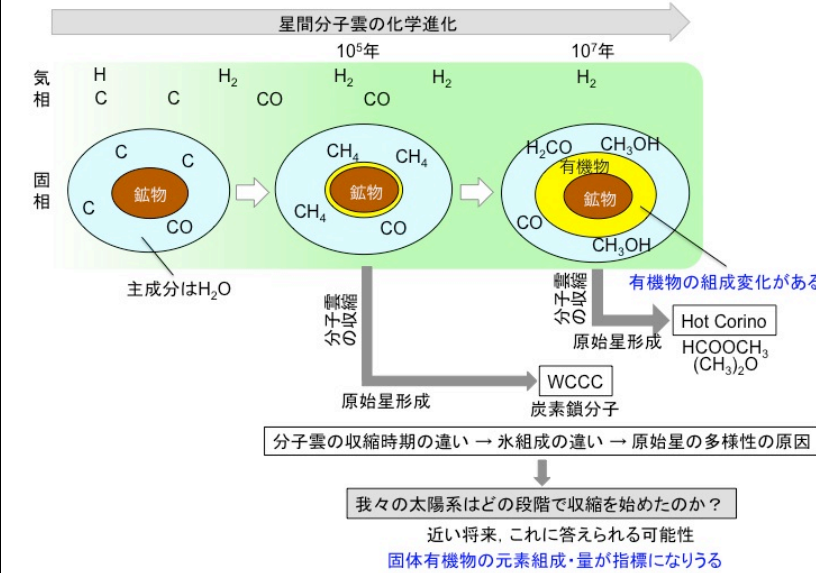
### 星・惑星系形成分野へのインパクト

ALMAによる観測で、星形成から惑星系形成に至る構造形成および化学進化の概要が捉えられた。遠心力バリアがエンベロープガスと原始星円盤との遷移領域となっているという事実はこれまで認識されていなかったものであり、星・惑星系形成分野にインパクトを与えた（図）。特に、微量な有機分子の観測から、構造形成・進化を巡る「化学診断法」の開発は、今後の電波観測に大きな影響を与えている。また、そこでの劇的変化の発見は、星間化学と惑星化学をつなぐ重要な成果であり、国際的に広く認知されつつある。

氷に紫外線を照射して液体的な挙動を示すことを発見したことは、これまで氷は固体であると考えて研究をおこなってきた天文学、惑星科学などの分野に大きな衝撃を与えた。氷内での化学反応や氷微粒子の付着成長過程の議論を大幅に見直す必要性が生じている。



惑星系形成モデルの見直し



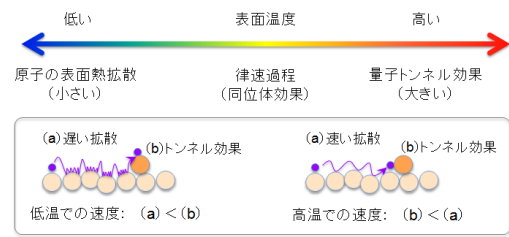
さらに、化学組成の多様性の発見（WCCC天体からHot Corinoまで連続的に分布する）は、「我々の太陽系は、分子雲のどの段階で収縮を始めたのか？」という根源的な疑問に、彗星などの始原的天体に含まれる氷や有機物の化学組成から答えることができることを示した（図）。これは、次の研究への大きなステップとなる。

本研究で開発した顕微XANES装置はじめ、各種微量有機物の分析装置・手法は、今後「はやぶさ2」はじめ複数の宇宙探査により地球に持ち帰られる宇宙物質分析の強力なツールとして貢献が期待される。

### 他分野への波及効果

アモルファス氷表面での表面原子反応実験では、星間分子雲で初期に生成される簡単な分子の生成を明らかにした。これは天文学でも重要な成果で大きな貢献であるが、物理化学でも、アモルファス表面での物理吸着系の化学反応という、これまでほとんど着目されてこなかった研究であり、大きな関心を集めている。量子トンネル反応の一般化に関しては、これまで「水素(H)と重水素(D)で何桁もの反応速度の差がなければその反応が量子トンネル反応である」とは認識されてこなかった。しかし、律速過程がトンネル反応でなければHとDで反応速度の差がない場合もありうることを示したことは、常温で起こっている酵素反応の反応素過程の見直しを迫る重要な成果である（図）。

本研究で開発されたアト( $10^{18}$ )モルオーダーでアミノ酸の D/L を分析する手法は、薬理診断や微生物生態学などの分野での応用が期待される。



## 10. 研究計画に参画した若手研究者の成長の状況（1ページ以内）

研究領域内での若手研究者育成の取組及び参画した若手研究者（※）の研究終了後の動向等を記述してください。  
※研究代表者・研究分担者・連携研究者・研究協力者として参画した若手研究者を指します。

ワークショップ等を通じて、若手研究者が主体的に研究活動をおこなうよう促し、総括班および国際活動支援班からも支援した。その結果、分野融合的な共同研究が展開されるとともに、多くの優れた研究成果が生み出され、次世代の指導者たる人材を育成することができた。

### 国際的な視野を持つ研究者育成

領域全体で、博士研究員5名を雇用し、理論班、観測班、分析班の研究に参画させ研究体制を強化させるとともに、若手研究者育成の柱とした。うち2名（分析班、観測班）は外国人であり、研究のみならず、彼女たちの出身の研究グループとの連携強化に大きな役割を果たした。さらに分析班の外国人博士研究員は、短期間に優れた研究成果をあげ、それが高く評価され北大の講師として採用されたことは、特筆に値する。

### 若手研究者の自主性を尊重したワークショップの開催

ワークショップのテーマ選定にあたっては、若手研究者が自主的に企画し、主体的に参加することを最も重視した。また、分野の異なる研究者が集まる新学術領域において共通語を育み、さらに、若手研究者に広い視野を持たせるという意味でも重要な企画であった。事実、ワークショップにおける徹底した議論から、当初の想定をはるかに超えた多様で新しい連携研究が始まり、優れた成果も創出され、ワークショップの企図は成功したと考えている。

### 公募研究に際しての若手重視

公募研究では、若手研究者からの応募を促すとともに、採択にあたって特に研究課題の将来性を考慮した。31件の採択課題のうち、19件が40歳未満の若手研究者であった。若手研究者が独立して研究を推進できるように配慮し、最大600万円/年の研究経費を配分した。

### 若手技術者育成

若手技術者の育成も重要な課題であると認識し、北大低温研の若手技術職員2名をチリのASTE望遠鏡に派遣し、彼らが開発した観測機器の搭載作業を行わせた。実際に現地に赴いて搭載作業を行うことは、望遠鏡全体をシステムとして理解することに繋がり、非常に大きな利点があるだけでなく、今後の機器開発においても大きな糧となった。

### 若手研究者育成の成果

本領域期間の5年間に、多くの若手の研究者（代表者および分担者、連携研究者、公募研究者）が、以下に示すように昇進を果たした。もちろんこれまでの研究成果等も評価されていることは間違いないが、本領域における研究成果が高く評価されてのことだと考えている。特任助教→助教：3名、博士研究員→講師：1名、助教→准教授：5名、助教→准主任研究員：1名、研究員→主任研究員：2名、研究員→准教授：1名

## 11. 総括班評価者による評価（2ページ以内）

総括班評価者による評価体制や研究領域に対する評価コメントを記述してください。

今般の評価にあたっては、評価担当の先生には事後評価報告書（案）を読んで頂くとともに、研究成果の全貌を把握して頂くために、領域代表が研究成果を説明し、議論をする機会を設けた。それをもとに以下の評価を作成して頂いた。

### 東京大学大学院理学系研究科 田近英一教授（地球惑星科学）

本領域は、星間分子雲から原始惑星系の形成における分子進化に焦点を当て、物質科学的な視点からその全体像を明らかにする新学術領域の創成を目指したものである。領域の5年間の活動はきわめて有意義であり、若手研究者を中心に多くの連携・融合研究が行われ、当初の想定をはるかに越える特筆すべき研究成果をいくつも挙げた。そのなかには、従来の考えに根本的な見直しを迫る結果や分子進化のまったく新しい描像につながる成果が含まれる。

たとえば、極低温で生成した氷から蒸発した水分子のオルソ／パラ比が蒸発温度にかかわらず一定であることを実験的に明らかにした研究成果は、この比が温度指標になるとする従来の考えを覆す大きな発見である。また、紫外線照射を受けた低温のアモルファス氷が液体的挙動をするという驚くべき発見は、従来の常識を覆すだけでなく、アモルファス氷内の光化学反応等の見直しにもつながる重要な成果である。さらに、ALMAを用いた観測により、星形成領域においてエンベロープガスと原始星円盤の境界付近に遠心力バリアが形成され、そこを境に化学組成が劇的に変わることで、化学的に Hot Corino と WCCC の複合的な天体が見出されたことなど、星・惑星形成領域の化学的な構造とその多様性の存在を発見した。こうした多様性は、太陽系がどのような条件で誕生したのかを知る上で重要なだけでなく、星・惑星系形成のシナリオや理解度を格段に前進させる画期的な成果といえる。

これらに加え、主要な星間分子の生成機構及び反応速度定数を明らかにしたこと、アモルファス氷表面の直接観測や原始惑星系円盤条件における表面反応実験に世界で初めて成功したこと、世界最高感度の分子構造解析、化学・同位体分析装置の開発など、素過程の解明、研究基盤技術の獲得、今後の研究の展開を大きく変える研究手法開発の成功などの面でもきわめて大きな貢献をした。

さらに、連携・融合研究を推進するため、若手研究者にワークショップを企画実施させるとともに、総括班が指導力を持って迅速に共同研究を遂行させることで、いくつもの共同研究が進展し、優秀な若手研究者が多く育ったことも大変意義深い。

本領域の立ち上げによって、宇宙における分子進化の研究に間違いなく新しい展開がもたらされたといえる。周辺分野へのインパクトや波及効果もきわめて大きい。新学術領域研究にふさわしい活動内容及び成果を挙げたことを非常に高く評価するとともに、今後のさらなる研究の進展を大いに期待したい。

### 茨城大学理学部 百瀬宗武教授（電波天文学）

本領域は、分子レベルまで突き詰めて物質に対する基本的理解を得ようとする実験・理論研究(A01,02,03)と、星・惑星系形成領域に対する天文観測(A04)、太陽系始原物質に対する分析研究(A05)が連携し、星間物質から惑星物質へと至る物質進化過程の解明を目指していた。評価者は主に電波天文観測により、マクロな視点から星形成領域や原始惑星系円盤を研究している。この立場から、今後の研究展開への新機軸を確立した重要な成果について評価する。

第一は、最新の ALMA 観測に基づき、星間物質から円盤が形成されていく過程における物質進化の枠組みが提示された点である。星間物質から惑星物質への進化において、原始星期にインフォールしている外層部と原始惑星系円盤との境界に作られる衝撃波領域（遠心力バリア）が重要な場所である可能性が本領域の活動によって明らかになった。さらに、原始星最初期にガスが持っている化学組成の情報がどう円盤物質へと引き継がれていくのかという疑問に対し、一貫したシナリオが提示された点にも強い印象を受けた。具体的には、炭素鎖分子に富む Warm Carbon-Chain Chemistry と飽和有機分子に富む Hot Corino を初期化学組成パターンの二つの雛形とし、それらを起点にした場合の遠心力



バリアと円盤内で気相を特徴づける分子種がお互いに対応する形で提示された。惑星物質の起源とその多様性を解明していくためには、今後さらに多くの天体を対象にした統計的研究が必要になるだろうが、本領域を通じて提示された枠組みは、多数の天体を統一的に理解していく具体的な作業仮説を確立したものであると高く評価される。

第二に、円盤環境を模した室内実験によって、天文観測データの解釈に確固とした基盤を与える物質の振る舞いの理解を得た点を取り上げる。重水素化合物が関わるダスト表面反応の実験ではこれまで広く受け入れられていた仮説を根底から否定する結果が得られ、蓄積されてきた天文観測データに対する解釈の根本的な見直しを促している。また、水氷から水蒸気へと昇華が起こる中温度環境下において液体状の水が存在しうる点を発見したことは驚きであったが、これは今後、円盤のガス化学（特に、糖類に代表される大型有機分子の円盤中における生成効率）を理解していく上で決定的に重要な要素となる可能性がある。これらの成果は、直接的には新たな装置の開発や実験法の進歩によってもたらされたものではあるが、一方で ALMA 等によってもたらされている天文観測からの情報により触発されたものという側面もある。その意味では、本新学術領域の活動があってこそ得られた成果とあって過言ではないだろう。

以上は、宇宙物質の進化を理解していく上で、天文観測と極限環境下での実験を両輪としていくことの必要性を如実に示している。本領域の活動は、実験や理論から得られた物質科学的情報をいち早く天文観測・太陽系物質分析へと適用できる体制の構築を促した。これは、関連研究分野における我が国の競争力を高める貴重な財産になると考えられる。この新学術領域で構築された連携体制が今後も継続・発展していくことを期待したい。

#### 国立天文台 渡部潤一教授（太陽系観測天文学）

本研究は、ダイナミックに変化していく宇宙環境の中で分子がどのように進化していくかについて、実験・観測・理論・分析といった様々な手法により多角的に研究を行い、それらを結びつけて統一的な描像を描こうとする試みであった。学際的な色彩が強く、分子雲を模して実験する分子雲実験班、原始惑星系環境を模して実験する原始惑星系実験班、素過程から大規模な化学反応を計算する理論班、実際に天文学的な観測を行う観測班、そして隕石から微量成分を取り出し研究する分析班と5つに分かれて、それぞれ研究を推進していった。本研究以前には、日本の研究グループは、それぞれ独自に成果を上げてきたのは確かだが、それらの研究結果が分野を超えて有機的に繋がりにくいという難点があった。そこで、天文学から惑星科学、化学に至るまでのグループを形成し、断片的なこれまでの知見を系統的に見直すと共に、それぞれに新しい手法を用いてフロンティアを開拓し、星間空間の分子の進化を星間雲の状況から、原始惑星系形成に至るまで統一的に明らかにしようとしている。この大きな筋道は実に明確であり、意義深いものである。

特に新しい手法により、それぞれの班での進捗は著しい。アモルファスとは異なるナノ構造や紫外線励起による液体的挙動の発見（分子雲実験班）は、宇宙の低温下における素過程を考える上で新しい化学進化のパスを考える必要性を示している。さらにミラー結像型軟X線顕微鏡の開発・応用（原始惑星系実験班）、微量分析手法の開発と、その応用による隕石中の水の同位体分析や新しいアミノ酸の発見（分析班）は特筆すべき成果であり、また表面拡散メカニズムのシミュレーションによる解明（理論班）や、国立天文台のASTE電波望遠鏡やALMA望遠鏡を用いた原始惑星系円盤の化学組成から見た多様性の発見（観測班）のインパクトも大きい。これまでの原始惑星系円盤の素過程から構造形成に関して、特に高温から低温へ遷移する領域での化学的進化の概念を変革させる可能性が極めて大きい。当初、不安視された班同士の連携も、生み出された成果(論文)が、異なる班員による共同発表になっている例も多く、総括班がうまく連携を促してきた結果であり、さらには公募研究が計画研究でカバーし切れていない領域をうまく推進されていることも評価すべきである。本研究を契機に生み出された分野を超えた有機的な連携が継続し、今後も共同研究によって先駆的研究がされることも期待される点もおおいに評価すべきと考える。