

# 国際研究会「Icy Grain Chemistry for Formation of Complex Organic Molecules: From Molecular Clouds to Protoplanetary Disks, Comets and Meteorites」開催報告

野村 英子<sup>1</sup>

## 1. はじめに

2015年3月5日-7日に東京工業大学において国際研究会「Icy Grain Chemistry for Formation of Complex Organic Molecules: From Molecular Clouds to Protoplanetary Disks, Comets and Meteorites」が開催された。我々の生命起源を探る上で、星間空間における大型有機分子生成過程の理解は1つの鍵となる。近年の天文観測技術の進展により、アミノ酸や核酸塩基の前駆体、糖類など、星間空間における複雑な有機分子の発見数が増えている。特にアタカマ大型ミリ波・サブミリ波干渉計ALMA(Atacama Large Millimeter/submillimeter Array)により、従来のミリ波・サブミリ波望遠鏡をはるかに上回る高感度・高空間分解能観測が可能になった。実際、ALMAにより既にイソプロピルシアニドが大質量星形成領域で発見されたり、原始惑星系円盤でもアセトニトリルが初検出されたりしている。星間雲中ではアミノ酸は現在探査中であるが、一方で、彗星や隕石中では既にアミノ酸が発見されており、星間空間で検出されている複雑な有機分子からどのようにして太陽系内天体中で発見されたアミノ酸を生成するかに関し、様々に議論が行われている。

星間空間は低温低密度かつ紫外線や宇宙線により分子は壊されるため、気相における大型有機分子の生成は難しい。よって星間空間で大型有機分子が発見されて以来、星間塵表面反応の重要性が指摘されている。実際、大質量星形成領域で検出されている複雑な有機分子は、星形成前の冷たい分子雲コア中で星間塵表面

反応により生成された分子が星形成に伴う塵の加熱により気相に放出され、その後気相反応を起こして生成されたと考えられている。近年のより複雑な有機分子の検出に伴い、星間塵表面反応モデルはさらに発展している。しかし、反応素過程の理論計算や実験はごく限られたものしか存在せず、モデルは多くの不定性を含んでいる。

本研究会は、星間塵反応素過程の室内実験や理論計算に基づき、星間塵表面/マントル反応の化学反応ネットワークを如何に構築するかに焦点をあて、議論を行うことを目的に開催された。また、星間雲中の複雑な有機分子やその前駆体の観測によるモデルへの制約や、観測された分子の反応経路に対するモデルからの提案、さらには、星間分子から彗星や隕石中に存在する複雑な有機化合物、ひいては生命起源分子種を作る反応経路の解明まで、幅広い分野の研究者が互いに情報交換し、議論することも本研究会の目的である。研究会では、星間雲中の複雑な有機分子の観測、星間塵表面/マントル反応のモデル、素過程の理論計算と室内実験、また、彗星や隕石中の有機分子の研究に携わる研究者14名(海外:8名,国内:6名)に招待講演をして頂いた。また、国内外より総勢50名(海外:14名,国内:36名)の皆様に御参加頂いた。

## 2. 講演内容

(I) 星間雲および彗星中の複雑な有機分子の観測とモデル、(II) 星形成コアおよび原始惑星系円盤中の複雑な有機分子生成に関する塵表面反応を含めた化学反応ネットワーク計算、(III) 星間塵表面/マントル反応の室内実験、(VI) 隕石中や赤色巨星周囲の有機

1. 東京工業大学 大学院理工学研究科  
nomura@geo.titech.ac.jp

表1: 研究会プログラム: (I) 招待講演, (C) 一般講演.

**3月5日(木)**

13:30 - 13:50 Introduction (Hideko Nomura)

**(I) FROM ASTRONOMICAL OBSERVATIONS TO MODELLING FORMATION PROCESS OF COMPLEX ORGANIC MOLECULES**

13:50 - 14:35 (I) Brett McGuire

"Complex Organic Molecules as Gas-Phase Tracers of Ice Processing: HNCNH and NH<sub>2</sub>OH"14:35 - 15:20 (I) Masatoshi Ohishi "Discovery of Objects Richest in CH<sub>3</sub>NH<sub>2</sub>, Candidates for Future Glycine Surveys"

15:40 - 16:25 (I) Steven Charnley "The Chemical Composition of Comets"

16:25 - 16:40 Short Discussion 1 (Robin Garrod)

16:40 - 17:40 Poster Presentation (Short Oral Presentation)

**3月6日(金)****(II) MODELLING FORMATION PROCESS OF COMPLEX ORGANIC MOLECULES**

09:00 - 09:45 (I) Eric Herbst "Some Major Questions Concerning Ice Chemistry on Grains"

09:45 - 10:30 (I) Robin Garrod "Modelling the formation of complex organic molecules in star forming regions"

10:50 - 11:35 (I) Yuri Aikawa "Gas-Grain Chemical Models in the Star- and Planetary System Formation"

11:35 - 12:20 (I) Catherine Walsh "Complex Organic Molecules in Protoplanetary Disks"

14:00 - 14:30 (C) Maria Drozdovskaya "Complex Chemistry Embracing Low-Mass Protostars Exposed"

14:30 - 15:00 Short Discussion 2 (Tom Millar)

**(III) FROM THEORETICAL SIMULATIONS TO LABORATORY EXPERIMENTS RELATED TO ICY GRAIN CHEMISTRY**

15:20 - 16:05 (I) W.M.C. Sameera "Interstellar radical species binding on ices: a hybrid QM/MM approach"

16:05 - 16:50 (I) Naoki Watanabe "Experimental approach to nonenergetic physicochemical processes on icy grains"

16:50 - 17:20 (C) Jean-Baptiste Bossa "Methane ice photochemistry and kinetic study using laser desorption time-of-flight mass spectrometry at 20 K"

17:20 - 18:00 Poster Presentation

**3月7日(土)**

09:00 - 09:45 (I) Patrice Theule "Ice chemistry"

09:45 - 10:30 (I) Asper Chen "The effects of photon energy and carbon source on the formation of S-bearing species by VUV/EUV irradiation of H<sub>2</sub>S-containing ice mixtures"

10:50 - 11:20 (C) Angela Ciaravella "Soft X-ray Irradiation of CO Ice: Effects of the Photon Energy and Flux"

11:20 - 12:05 (I) Kensei Kobayashi

"Formation of Complex Amino Acid Precursors and Nucleic Acid Bases from Possible Interstellar Media"

12:05 - 12:20 Short Discussion 3 (Patrice Theule)

**(IV) ORGANIC COMPOUNDS IN METEORITES AND AROUND EVOLVED STARS**

14:00 - 14:45 (I) Jim Cleaves "From Simplicity to Complexity: HCN/HCHO as a Model System for Parent Body Processes"

14:45 - 15:15 (C) Zan Peeters "Large veins of organic matter in meteorites"

15:15 - 15:45 (C) Sun Kwok "Synthesis of Complex Organics in the Late Stages of Stellar Evolution"

15:45 - 16:10 Discussion and Summary (Tom Millar)

化合物の4つのセッションで、招待講演と一般講演あわせて18講演があった(表1にプログラムを示す)。以下にそれぞれのセッションでの講演内容の概略を記す。

**(I) 星間雲および彗星中の複雑な有機分子の観測とモデル**

星間雲中の複雑な有機分子の観測に関連して、Brett McGuire氏(NRAO/Caltech)と大石雅寿氏(国

立天文台)に招待講演をして頂いた。Brett McGuire氏には、核酸塩基の前駆体といわれるシアノメタンイミン(HNCHCN)とカルボジイミド(HNCNH)の発見およびヒドロキシルアミン(NH<sub>2</sub>OH)の探査とこれらの有機分子の生成過程、室内実験と遷移線モデル計算について講演頂いた。大石雅寿氏には、アミノ酸のグリシンの前駆体であるメチルアミン(CH<sub>3</sub>NH<sub>2</sub>)とメチレンイミン(CH<sub>2</sub>NH)の最新観測とその生成過程、および今後のグリシンの探査について講演して頂いた。

また、Steven Charnley氏(NASAゴダード宇宙飛行センター)には、彗星の化学に関して招待講演をして頂いた。彗星中の水素、炭素、窒素化合物の同位体比に関する観測的・理論的研究や、Lemmon, ISON, PanSTARRS彗星の最新観測、ALMAによる有機分子存在量の時間変動の観測など、最新の研究成果を紹介して頂いた。

## (II) 複雑な有機分子生成の化学反応ネットワーク計算

大質量星形成領域で発見された有機分子の生成過程を探るための塵表面反応モデルおよび化学反応ネットワークの構築とそれを星形成コアや原始惑星系円盤に適用したモデル計算について、国内外の5人の研究者の方に招待講演、一般講演をして頂いた。

Eric Herbst氏(バージニア大学)には、星間塵表面反応モデルの様々な不定性について、特に、星間塵表面における分子の拡散過程のモンテカルロ計算などについて最新の研究成果を紹介して頂いた。Robin Garrod氏(コーネル大学/バージニア大学)には、氏が近年開発してきた暖かい星間塵表面におけるラジカル同士の反応モデルについて、特に最近取り組んでいるアミノ酸のグリシン生成まで含めた化学反応ネットワークの構築および、それを応用したALMAによる星間雲中のグリシン観測可能性に関して講演して頂いた。相川祐理氏(神戸大学)には、水素分子のオルソ・パラによる反応率の違いを含めた化学反応ネットワーク計算とその重水素生成への依存性や、星形成コアの流体シミュレーションを取り入れたダイナミカル化学反応計算と原始惑星系円盤形成時の有機分子生成についてお話し頂いた。Catherine Walsh氏(ライデン大学)には、原始惑星系円盤中の有機分子生成と彗星中の有機分子組成との関連およびALMAによる円盤からの有機分子輝線観測の予測、若い星団中における近

傍の大質量星からの紫外線照射が円盤内有機分子生成におよぼす影響などについて講演頂いた。Maria Drozdovskaya氏(ライデン大学)には、星形成コア中の原始惑星系円盤生成段階における有機分子分布の時間進化と有機分子の寿命に関する最新研究の成果を発表して頂いた。

## (III) 星間塵表面/マントル反応の理論計算と室内実験

星間塵表面/マントル反応素過程に関する最新の理論計算と室内実験の研究結果を、国内外の7人の研究者の方に招待講演、一般講演をして頂いた。

W.M.C. Sameera氏(京都大学 福井謙一記念研究センター)には、実験室での取り扱いが難しいが、星間化学、特に星間塵表面反応において重要な役割を果たす、OH, HCO, CH<sub>3</sub>, O, Hなどのラジカルの水ダスト表面への束縛エネルギーに関する量子力学/分子力学法(QM/MM)による計算の成果を講演して頂いた。ダストへの束縛エネルギーは、化学反応ネットワーク計算においてダスト表面反応を制御する非常に重要な物理量である。渡部直樹氏(北海道大学 低温科学研究所)には、渡部氏らのグループで行っている星間塵表面反応の実験結果について、特に氷表面の水素原子の拡散と氷表面反応におけるトンネル効果の役割に焦点をあて、講演頂いた。Jean-Baptiste Bossa氏(ライデン大学)には、紫外線レーザー脱離と飛行時間質量分析計を用いた最新の実験装置により、メタンからの炭化水素生成反応に関する紫外線照射実験の成果をお話し頂いた。

Patrice Theule氏(アクス・マルセイユ大学)には、暖かな氷マントル内における非ラジカル同士の反応実験、特に反応係数と氷マントル内の分子の拡散係数に関する最新の成果をお話し頂いた。Asper Chen氏(台湾国立中央大学)には、反応性が高く実験が困難な、硫黄を含む分子の紫外線照射実験の成果と、ペプチド生成における硫黄分子の役割についてお話し頂いた。Angela Ciaravella氏(イタリア国立宇宙物理学研究所 INAF)には、炭素鎖分子生成に関する氷マントル反応のX線照射実験の成果を発表して頂いた。小林憲生氏(横浜国立大学)には、星間空間の氷マントルを想定した高エネルギー粒子照射実験によるアミノ酸や核酸塩基生成に関する実験について、メタンの影響など還元的环境下での成果について、また、X線や紫外線に

よる生成物の変性と隕石中の有機分子の形成、タンポポ・ミッションによる惑星間塵の採集・解析、特にアミノ酸関連化合物の安定性についてなど、様々な話題に関して講演頂いた。

#### (IV) 隕石中や赤色巨星周囲の有機化合物

Jim Cleave氏(東工大ELSI / IAS)には、 $\text{NH}_4\text{CN}/\text{HCHO}$ 溶液の様々な温度での液相反応による有機化合物生成実験と生成物の質量分析について、また、これらの実験生成物と隕石中の有機化合物との関連、特に炭素質隕石の母天体における水質変性との関連について講演頂いた。Zan Peeters氏(台湾中央研究院ASIAA)には、ASIAA nanoSIMSを用いたマーチソン隕石中の有機物質のその場分析の成果について、特にその元素組成や同位体組成の不均質性についてお話し頂いた。Sun Kwok氏(香港大学)には、赤色巨星から惑星状星雲にかけての各進化段階で存在する様々な有機化合物の赤外線スペクトル分光と観測、未確認赤外線放射(UIE)と非結晶炭素質固体との関連、またその隕石中の有機化合物との類似性について講演頂いた。

### 3. まとめおよび謝辞

口頭講演のほかにも、ポスターセッションで国内研究者12名の発表があった。ポスターセッションの時間はもちろんそれ以外の時間帯でも、海外・国内の研究者とポスターの前で活発に議論を交わしている姿が良く見られた。また、各セッションの最後に議論の時間を設け、研究会最後にはTom Millar氏(クィーンズ大学ベルファスト)にまとめの講演として頂いた。

海外・国内より多くの皆さんに御参加頂き、盛況な研究会が開催でき、大変感謝している。星間塵表面/マントル反応による有機分子生成はまだ未解明の点が多いが、本研究会で得られた知識や議論が、今後の研究の足掛かりになれば幸いである。

最後になりましたが、研究会開催を支えてくれたオーガナイザーの皆様、丁寧に講演準備をして頂いた招待講演者の皆様、また、研究会を盛り上げて頂いた全ての参加者の皆様に感謝致します。また本研究会は、自然科学研究機構 新分野創成センター 宇宙における生命研究分野からの援助で開催されました。深く御礼申し上げます。



図1：研究会集合写真。

※[http://www.geo.titech.ac.jp/lab/nomura/grain\\_chem/index.html](http://www.geo.titech.ac.jp/lab/nomura/grain_chem/index.html)