

# 第3回DTAシンポジウム「The Origins of Planetary Systems: from the Current View to New Horizons」開催報告

長谷川 靖紘<sup>1</sup>, 大宮 正士<sup>2</sup>, 深川 美里<sup>3</sup>

## 1. はじめに

2015年6月1日(月)~4日(木)の日程で、国立天文台三鷹キャンパス大セミナー室にて第3回DTAシンポジウム「The Origins of Planetary Systems: from the Current View to New Horizons」が行われた(図1)。

1995年、ペガサス座51番星周りで人類史上初となる太陽系外惑星が発見された。この発見を皮切りに、6000(内、約4000は候補惑星)近くの系外惑星がこれまでに観測されている。これは、日本を含む世界各国が競って行ってきた惑星探査サーベイの賜物であり、こうしたサーベイは今現在も進行中である。また、国立天文台も参加しているALMA望遠鏡も本格的な運用段階に入った。格段に向上したその性能により、これまでにない高解像度なサブミリ観測が可能になりつつある。実際に去年の11月にプレスリリースされたHL Tauの図は、惑星の誕生場所として考えられている原始惑星系円盤がリングのような溝(ギャップ)を幾つも有することを示した。このギャップは惑星がその場で今まさに形成している可能性を暗示するもので、研究者のみならず一般の方にも大きな衝撃を与えたことは記憶に新しい。また、HL Tauの図の注目すべき点は、天体自体がまだ若く星形成段階にあると考えられることである。これは、星・惑星形成が同時に起こりうることを示唆している。以上のような革新的な観測結果の急速な蓄積により、惑星系がどのように誕生し、どう進化するかという我々の理解は大きく向上しつつある。そういった背景の下、惑星形成を中心に据



図1: 会議中の様子。活発な議論・質疑応答が行われた。

えて、星形成・惑星形成・アストロバイオロジーを三位一体で議論することが不可欠となってきた。今回のシンポジウムは、上記3分野の発展・融合、またそれを通じた惑星形成の包括的理解を目的として開催された。

## 2. プログラム

本シンポジウムは「Current View of Planet Formation+HL Tau」, 「Disk Formation in the Context of Star Formation I & II」, 「Protoplanetary Disks I, II, & III」, 「Exoplanets: Observations & Formation and Evolution」, 「GI」, 「Planetary Atmospheres + Future Missions + Astrobiology」の6セッションで構成された(表1)。

参加者は国内外の研究者総勢68名(内、国内より60名、海外より8名)。星形成・惑星形成・アストロバイオロジーについての最新研究の紹介及び分野間の情報共有のため、招待講演者を国内外から招集した(図

1. EACOA Fellow, 国立天文台理論研究部

2. 国立天文台太陽系外惑星探査プロジェクト室

3. 国立天文台チリ観測所

yasuhiro.hasegawa@nao.ac.jp

表1: シンポジウムプログラム.

|                                  |                                                                                                                                                                                     |
|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Monday, June 1, Day 1:</b>    |                                                                                                                                                                                     |
| 10:00-12:15 (135mins)            | Current view of planet formation + HL Tau                                                                                                                                           |
| <b>10:00-10:10</b>               | <b>Hasegawa, Yasuhiro (NAOJ) (SOC chair)</b> Opening remark                                                                                                                         |
| <b>10:10-10:55</b>               | <b>Adibekyan, Yordan (Institute of Astrophysics and Space Sciences – CAUP)</b> (review) Heavy metale rules: star-planet connection                                                  |
| <b>10:55-11:40</b>               | <b>Kokubo, Eiichiro (NAOJ)</b> (review) A Standard Scenario for Formation of Planetary                                                                                              |
| <b>11:40-12:15</b>               | <b>Akiyama, Eiji (NAOJ)</b> (keynote) ALMA Capabilities and Science Review of HL Tau                                                                                                |
| 13:30-15:30                      | (120mins) Disk formation in the context of star formation I                                                                                                                         |
| <b>13:30-14:15</b>               | <b>Sakai, Nami (RIKEN)</b> (review) Disk Formation Traced by Chemistry                                                                                                              |
| <b>14:15-15:00</b>               | <b>Li, Zhi-Yun (University of Virginia)</b> (review) Theory of Protostellar Disk Formation                                                                                          |
| <b>15:00-15:20</b>               | <b>Tsukamoto, Yusuke (RIKEN)</b> (contributed) Two types of circumstellar disk evolution induced by the Hall term                                                                   |
| <b>15:20-15:30</b>               | <b>Poster short talks</b>                                                                                                                                                           |
|                                  | Matsumoto, Yuji (NAOJ), Okada, Kazushi (the University of Tokyo),<br>Ono, Tomohiro (Kyoto University)                                                                               |
| 16:00-17:40                      | (100mins) Disk formation in the context of star formation II                                                                                                                        |
| <b>16:00-16:45</b>               | <b>Machida, Masahiro (Kyushu University)</b> (review) Disk Formation and Jet Driving in Collapsing Cloud Cores                                                                      |
| <b>16:45-17:05</b>               | <b>Kunitomo, Masanobu (Nagoya University)</b> (contributed)<br>Pre-main sequence evolution of low-mass stars: Effects of planet formation on stellar composition                    |
| <b>17:05-17:40</b>               | <b>Discussion (discussion leader: Nakamura, Fumitaka)</b>                                                                                                                           |
| <b>Tuesday, June 2, Day 2:</b>   |                                                                                                                                                                                     |
| 10:00-11:50                      | (110mins) Protoplanetary disks I                                                                                                                                                    |
| <b>10:00-10:45</b>               | <b>Perez, Laura (NRAO)</b> (review) Protoplanetary Disk Observations at Radio Wavelengths                                                                                           |
| <b>10:45-11:30</b>               | <b>Nomura, Hideko (Tokyo Institute of Technology)</b> (review) Chemical Processes in Protoplanetary Disks                                                                           |
| <b>11:30-11:50</b>               | <b>Aikawa, Yuri (University of Tsukuba)</b> (contributed) Analytical Formulas of Molecular Ion Abundances and N <sub>2</sub> H <sup>+</sup> Ring in Protoplanetary Disks            |
| <b>11:50-12:10</b>               | <b>Fujii, Yuri (ELSI)</b> (contributed) Non-equilibrium Ionization Degree and MRI in Protoplanetary Disks                                                                           |
| 13:30-15:15                      | (105mins) Protoplanetary disks II                                                                                                                                                   |
| <b>13:30-14:15</b>               | <b>Lyra, Wladimir (Caltech/JPL)</b> (review) Gas dynamics in disks: planet signatures and dynamical instabilities                                                                   |
| <b>14:15-14:35</b>               | <b>Inutsuka, Shu-ichiro (Nagoya University)</b> (contributed) The Origin and Fate of Rings in HL-Tau: Diversity of Planet Formation Mechanisms                                      |
| <b>14:35-14:55</b>               | <b>Sirono, Sin-iti (Nagoya University)</b> (contributed) Collision simulation of sintered icy aggregates                                                                            |
| <b>14:55-15:15</b>               | <b>Mori, Shoji (Tokyo Institute of Technology)</b> (contributed) Electron Heating and Suppression of Magnetorotational Turbulence in Protoplanetary Disks                           |
| 16:00-17:40                      | (100mins) Protoplanetary disks III                                                                                                                                                  |
| <b>16:00-16:45</b>               | <b>Dong, Ruobing (UC Berkeley)</b> (review) Observational Signatures of Planets in Protoplanetary Disks                                                                             |
| <b>16:45-17:05</b>               | <b>Kanagawa, Kazuhiro (Hokkaido University)</b> (contributed) Disk-planet interaction and gap formation induced by a giant planet in protoplanetary disks                           |
| <b>17:05-17:40</b>               | <b>Discussion (discussion leader: Fukagawa, Misato)</b>                                                                                                                             |
| <b>Wednesday, June 3, Day 3:</b> |                                                                                                                                                                                     |
| 10:00-11:50                      | (110mins) Exoplanets: observations                                                                                                                                                  |
| <b>10:00-10:35</b>               | <b>Kusakabe, Nobuhiko (NAOJ)</b> (keynote) SEEDS : Review of direct imaging explorations of exoplanets/disks with Subaru                                                            |
| <b>10:35-11:10</b>               | <b>Hirano, Teruyuki (Tokyo Institute of Technology)</b> (keynote) Probing the Dynamical History of Exoplanets: Spectroscopic Observations of Transiting Systems                     |
| <b>11:10-11:30</b>               | <b>Omiya, Masashi (NAOJ)</b> (contributed) Occurrence rate of giant planets around massive stars                                                                                    |
| <b>11:30-11:50</b>               | <b>Kamiaka, Shoya (The university of Tokyo)</b> (contributed) Re-characterization a gravity-darkened and precessing planetary system PTFO 8-8695                                    |
| 13:30-15:35                      | (125mins) Exoplanets: formation & evolution                                                                                                                                         |
| <b>13:30-13:50</b>               | <b>Kominami, Junko (Tokyo Institute of Technology)</b> (contributed) High-resolution, global N-body simulation of planetary formation: Outward migration of a protoplanet           |
| <b>13:50-14:10</b>               | <b>Wakita, Shigeru (NAOJ)</b> (contributed) Constraints on planetesimals implying from Itokawa dust particles                                                                       |
| <b>14:10-14:55</b>               | <b>Chatterjee, Sourav (Northwestern University)</b> (review) Dynamical Evolution of Planetary Systems                                                                               |
| <b>14:55-15:15</b>               | <b>Rieder, Steven (RIKEN)</b> (contributed) Impact of stellar encounters on planetary systems                                                                                       |
| <b>15:15-15:35</b>               | <b>Kobayashi, Hiroshi (Nagoya University)</b> (contributed) Planet Formation and Debris Disks                                                                                       |
| 16:00-17:40                      | (100mins) GI                                                                                                                                                                        |
| <b>16:00-16:45</b>               | <b>Basu, Shantanu (University of Western Ontario)</b> (review) Gravitational Instability in Early Disk Evolution and the Formation of Clumps, Companions, and Free Floating Objects |
| <b>16:45-17:05</b>               | <b>Takahashi, Sanemichi (Tohoku University)</b> (contributed) The revised criterion for the self-gravitational fragmentation of protoplanetary disks                                |
| <b>17:05-17:45</b>               | <b>Discussion (discussion leader: Ida, Shigeru)</b>                                                                                                                                 |
| <b>Thursday, June 4, Day 4:</b>  |                                                                                                                                                                                     |
| 10:00-11:55                      | (115mins) Planetary atmospheres + Future missions                                                                                                                                   |
| <b>10:00-10:45</b>               | <b>Lopez, Eric (University of Edinburgh)</b> (review) Understanding Kepler's Super-Earth's & Sub-Neptunes                                                                           |
| <b>10:45-11:20</b>               | <b>Fukui, Akihiko (NAOJ)</b> (keynote) Atmospheric Study of Exoplanets by Transmission Spectroscopy                                                                                 |
| <b>11:20-11:55</b>               | <b>Narita, Norio (NAOJ)</b> (keynote) Future Missions of Transit Surveys and Characterizations                                                                                      |
| 13:30-15:20                      | (110mins) Future mission + Astrobiology + concluding remark                                                                                                                         |
| <b>13:30-14:05</b>               | <b>Sato, Bun'ei (Tokyo Institute of Technology); Omiya, Masashi (NAOJ)</b> (keynote) Infrared Doppler planet search for Earth-mass planets                                          |
| <b>14:05-14:50</b>               | <b>Tamura, Motohide (NAOJ)</b> (review) Exoplanet Researches at the NINS Astrobiology Center (ABC)                                                                                  |
| <b>14:50-15:20</b>               | <b>Hasegawa, Yasuhiro (NAOJ) (SOC chair)</b> concluding remark                                                                                                                      |
| 16:00 - 17:00 4D2U theater       |                                                                                                                                                                                     |



図2：集合写真。国内外より多くの研究者が参加した。

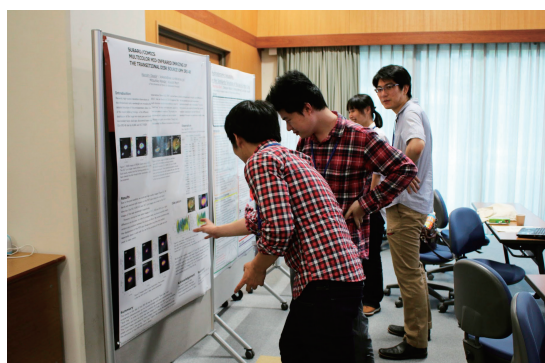


図3：ポスターセッションの様子。

2). 具体的には、現Hubble & Jansky Fellowsを含む海外の若手研究者や国内の活発な研究者などを招待した。これにより、国内外で活躍する研究者の講演を直に聴く機会のみならず、彼らと直接議論する機会をも大学院生を含む国内の若手研究者に提供した。実際、講演後の質疑応答や休憩・ポスター時間中に活発に議論する参加者の姿が数多く見受けられた。また、国内外の外国人研究者の参加に伴い、全てのセッションを英語で行った。これは、DTAシンポジウムとしては初の試みであり、「単にサイエンスとしての意義だけではなく、分野横断的な研究・理論と観測のコラボレーション・大学院生や若手研究者の育成を目的とした研究会」というDTAシンポジウムの理念に「国際性」というキーワードを新たに追加することが出来た。一般講演やポスターショートトークの時間も十分に取られ、大学院生を含む国内の若手研究者にも英語で講演する機会を提供した(図3)。その日に行われた講演・議論を総括する「ディスカッションタイム」を1日ごとに設け、分野の枠を超えた理論・観測研究が今後どう展開できるかについて、参加者全員で議論した。そこでも活発な議論が積極的に行われ、全体として大いに盛り上がった。最後に、天文台の活動紹介として、4D2Uドームシアターで上映される3Dムービーを視聴した。

### 3. 講演概要

上述したように、本シンポジウムでは星形成・惑星形成・アストロバイオロジーを三位一体で議論・討論した。ここでは著者の印象に残った講演の一部について紹介する。

初日に行われたVardan Adibekyan氏(Institute of Astrophysics and Space Sciences, ポルトガル)の招待講演では、系外惑星探査により既存の惑星形成理論がどれほどの革新を迫られているのかについてレビューがなされた。具体的には、ホットジュピターと言われる、中心星のごく近傍を公転するガス惑星の存在やスーパーアースと呼ばれる、太陽系には存在しない地球よりも数倍重い惑星の発見である。また、中心星の金属量と惑星の発見頻度についても議論がなされた。現在の観測データによると、ガス惑星は金属量の高い恒星の周りで高頻度で発見されている。その一方、スーパーアースなどの小質量惑星の発見と中心星の金属量には相関がないことが示唆されている。これは、観測された多くの系外惑星がコア集積モデルに基づいて形成した結果であると考えられている。Adibekyan氏は惑星と金属量の関係、特に小質量惑星を吟味する際には細心の注意が必要であることを強調した。これは、統計的な解析をするには小質量惑星の観測データがまだ不十分であることに起因する。

二日目のRuobing Dong氏(UC Berkeley, アメリカ)の招待講演では、原始惑星系円盤の構造と惑星形成との関連性について議論がなされた。これまでの円盤観測により、原始惑星系円盤は様々な構造を持つことが知られている。具体的には、すばる望遠鏡を用いて行われた近赤外線の円盤・系外惑星サーベイ(SEEDS)が円盤表面にはギャップ・スパイラル・非対称な構造が存在することを発見した。またSMAやALMAのサブミリ観測も同様の構造を示唆した。これらの構造の真の起源は未だに謎であるが、惑星形成がその一端を担っている可能性は大いにある。Dong

氏は二次元の流体シミュレーションと三次元の輻射輸送計算を組み合わせることでこの可能性を吟味した。円盤中のギャップ構造は(幾つかの)ガス惑星で説明できそうであるが、スパイラルや非対称な構造は難しいというのが今回の講演で明らかにされた。惑星起源を含めた様々な可能性の統一的検証が今後重要になってくるであろう。

三日目にはShantanu Basu氏(University of Western Ontario, カナダ)が中心星周りの円盤の重力不安定性及びそれによる惑星形成についての招待講演を行った。円盤の重力不安定は円盤質量が大きい時に起こる現象であり、星形成過程で誕生した星周円盤から、惑星のまさに元となる原始惑星系円盤へと進化する段階に相当する部分である。ALMAで観測されたHL Tau円盤も星周円盤から原始惑星系円盤へと進化する過渡期にあると考えられる。Basu氏は様々な初期条件を用いて二次元の流体シミュレーションを共同研究者らと実行し、円盤の重力不安定性が不可避なものであることを示唆した。また、重力不安定によって生じたclumpsが円盤中を移動すること、またそれが反復して起こるアウトバースト現象を引き起こす一因であることも議論された。円盤の重力不安定は、FU Ori星で確認されているアウトバースト現象など、幾つかの円盤観測結果を再現できるが、問題点も存在する。その一つが円盤質量の見積もりについてである。Basu氏らのシミュレーションは、サブミリ観測で推測される円盤質量の5倍以上を预言している。更なる理論的・観測的研究が必要である。

シンポジウム最終日には、Eric Lopez氏(University of Edinburgh, イギリス)が惑星大気、及びその進化についての招待講演を行った。惑星の大気は、その惑星がどこでどのように誕生したかについての記録を含むするだけではなく、その組成から生命起源の手がかりまでも内包する。現在行われている系外惑星大気の観測によって、水やメタン、二酸化炭素など生命誕生に必要であろうと考えられる分子が系外惑星の大気中に存在することが分かってきた。これは、第二の地球やハビタブル惑星の発見に大いに有用である。その一方で、惑星大気の質量やその組成が中心星の放射によって時間進化することも明らかになってきた。ホットジュピターなどのガス惑星は自身の質量が大きいために、その影響をあまり受けないが、スーパーアースな

どの小質量惑星は大気の光蒸発を経験することが示唆された。これは、惑星大気の観測により導き出される結果と惑星形成とが線形的には結びつかないことを暗示している。この複雑な関係を理解するためには、惑星形成の更なる理解、特に惑星の組成計算が重要である。

## 4. 最後に

このように、本シンポジウムでは、昨今急速に進歩する惑星形成及びそれに深く関連する星形成・アストロバイオロジーを包括的に議論し、各分野の発展はもちろん、分野間の融合及びそれを通じた新たな共同研究の促進を目指した。本シンポジウムがきっかけとなり、世界に類のない新たな研究活動が今後育まれることを期待する。

本シンポジウムは国立天文台理論研究部より支給されたDTA経費及びEACOA Fellowshipを通じて支給されたEACOA経費を元で開催された。シンポジウムの詳細は以下のURLを参照。

[http://th.nao.ac.jp/meeting/dta2015a\\_planet/](http://th.nao.ac.jp/meeting/dta2015a_planet/)