

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 2 日現在

機関番号：62616

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2011～2015

課題番号：23103001

研究課題名(和文)太陽系外惑星の新機軸：地球型惑星へ

研究課題名(英文)New Frontiers of Extrasolar Planets: Exploring Terrestrial Planets

研究代表者

林 正彦(HAYASHI, Masahiko)

国立天文台・大学共同利用機関等の部局等・台長

研究者番号：10183914

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 28,500,000円

研究成果の概要(和文)：総括班は4件の計画研究を有機的な連携のもとに推進する事を主な目的としている。領域全体の情報交換を促進する為、国際研究集会を9回開催し、その参加者は国内外合わせて800名を数えた。同じく研究で得られた成果を広く国内外に発信し、若手育成の為に措置を講じ、領域ホームページを作成し情報発信をした。公募研究では2度の募集を行い全14件を採択。参加者は全国の大学・研究機関に分布している。

研究成果の概要(英文)：The managing team had an objective to promote the four pre-planned areas of research under close interaction one another. We encouraged active exchange of information among the researchers involved in this Grant-in-aid program, and organized nine international conferences with more than 800 participants in total. We also build a homepage dedicated for the program and released information and achievements to both inside and outside of the country. We worked to foster younger generation researchers by involving graduate students and hiring posdocs with the Grant. We approved a total of 14 open research proposals in two times, with the proposed researchers spreading over many Japanese universities and research organizations.

研究分野：天文学

キーワード：系外惑星 惑星大気 原始惑星系円盤 惑星系形成

1. 研究開始当初の背景

1995年の太陽以外の恒星を周回する惑星(系外惑星)の発見以来、系外惑星は宇宙論と並んで天文学における最重要課題となっている。その理由は、これらの研究は人類の根源的な問い「我々はどこから来たのか、我々は何者なのか、我々はどこに行くのか」(ゴーギャン)に科学的に答えようとしているからである。人類が長年かけて発見してきた太陽系内の8個の惑星に対し、わずか15年のあいだに500個近い系外惑星が発見された今、最も重要な次のマイルストーンは「直接撮像・分光」と「地球型惑星」である。かねてより我が国は、太陽系の起源の研究において天文学と惑星科学の密接な連携を培い、世界をリードする成果を挙げてきた。しかしながら、系外惑星の研究をめぐる世界的競争は非常に激しく、我が国においても、本研究により両分野の連携・融合を一層強化し、系外惑星の研究をさらに発展させることが喫緊の課題である。

2. 研究の目的

本領域では、天文学と惑星科学の密接な連携・融合によって、我が国において「系外惑星」という新たな学術領域を確立し世界的リードを狙うことで、当該分野における我が国の学術水準を飛躍的に向上・強化することを目的とした。

その中心となるのは、直接的・間接的観測手法を用いた太陽系外惑星の検出である。これによって、木星型から地球型にいたる多様な惑星の性質や、その形成と進化の理解を目指す。

これらの観測を、日本の独創的分野である地球型惑星の形成理論や惑星大気理論と密接に連携・融合させることで、地球型および木星型惑星の起源と形成を解明することを目標とした。

また本研究では、天文学・惑星科学の両分野にわたる日本の代表的研究者が、オールジャパン体制で連携・融合して研究を推進する。本領域の研究分担者・連携研究者は、全国のような様々な大学・機関の研究者を含み、とりわけ若手研究者を多く含んでいる。本領域では、これらの研究者間の共同研究の推進に積極的に取り組み、天文学・惑星科学にこだわらず分野横断的に研究員等を雇用し、新たな学術領域を担う人材育成に取り組む。このような取り組みを通して、5年後には世界をリードする人材が育成され、当該領域が継続的に発展する状況を作り出すことを目指す。

3. 研究の方法

5年にわたる研究期間において、我々は以下の四つの研究計画によって目標の実現を目指した。

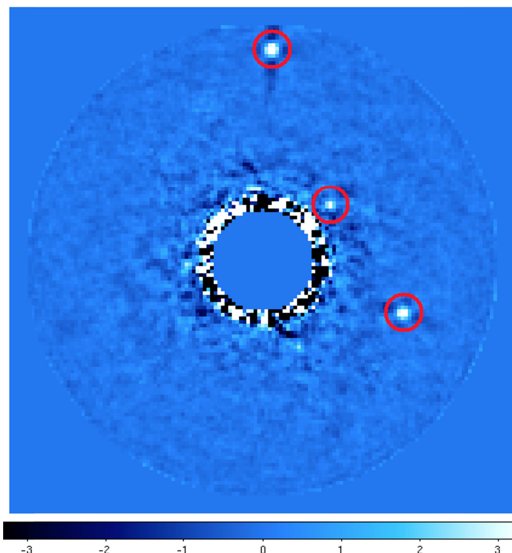
A01)木星型惑星を直接検出し、また様々な手法を用いた地球型惑星の間接検出を推進する。さらに、高コントラスト赤外線分光器を開発して、木星型惑星を直接分光し、その特徴を明らかにする(キャラクタリゼーション)。
A02)直接分光によって得られたスペクトルを解釈し、惑星大気の化学的性質や進化を明らかにするための、汎惑星大気理論を構築する。

B01)ALMAやすばるを用いた原始惑星系円盤の観測や、ダストの成長実験を推進し、円盤物質から地球型惑星が形成されていく過程を解明する。

B02)ハビタブル地球型惑星を含む惑星形成理論を展開し、直接・間接観測から得られる系外惑星の統一的描像との比較を通して、汎惑星系形成理論を構築する。

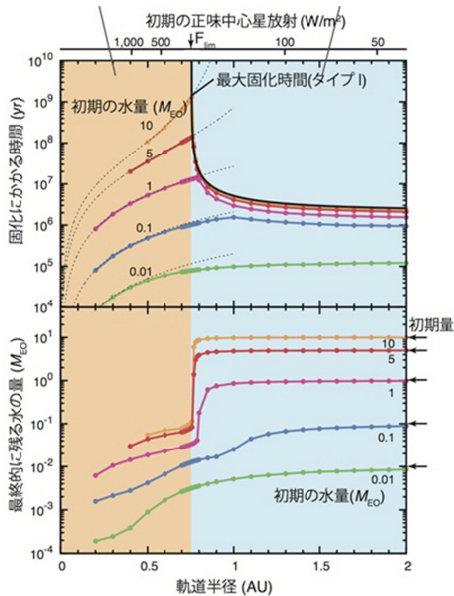
4. 研究成果

新たに2個の恒星周囲の惑星を撮影することに成功した。そのうちひとつは、直接検出された惑星では最小の質量をもつ「第二の木星」で、系外惑星の直接検出において大きなインパクトを与えた(A01)。またCHARISを完成させ、系外惑星の分光観測に成功した(A01)。

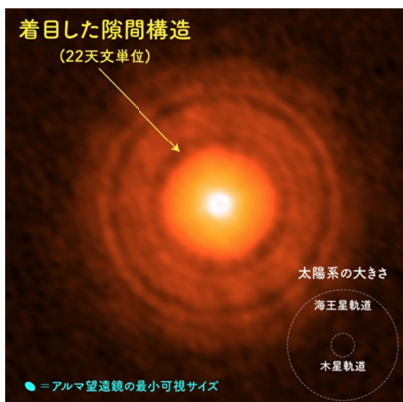


図：CHARISの観測で得られた系外惑星HR 8 7 9 9c(上),d(右下),e(中央右)の画像。

地球型惑星大気は水惑星と灼熱惑星のふたつの型に別れることを発見。惑星のハビタビリティの研究を強く刺激し、発表後3年間で71回引用された(A02)。



図：中心星からの距離に応じて、地球型惑星の大気進化と海洋形成の有無を示す。



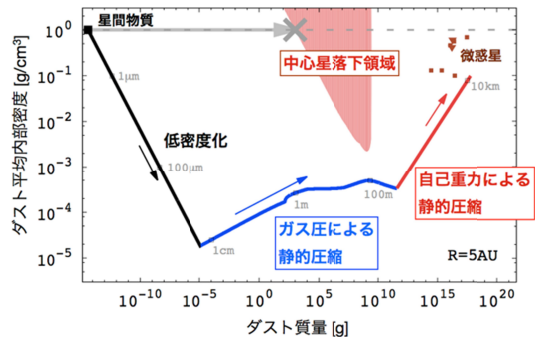
図：うみへび座TW星周囲の原始惑星系円盤（波長1.7mmダスト連続波画像）

SAO 206462やうみへび座TW星の原始惑星系円盤に渦巻や溝を検出し、これらが未検出の惑星によって作られている可能性を示唆。前者については発表後4年間で136回引用された（B01）。

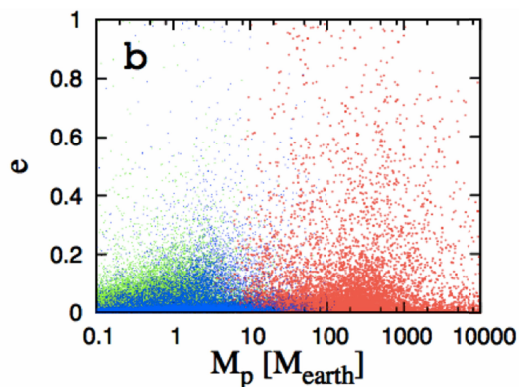
原始惑星系円盤内に成長したダストが多量に集中している領域を発見。岩石微惑星の効率的な形成場所である可能性を示唆（B01）。

世界で初めてセルフ・コンシステントな氷微惑星形成シミュレーションに成功した。発表後4年間で81回引用された（B01/B02）。

最新の惑星形成理論をもとにした系外惑星の分布の理論推定した。この結果は、アルマ、ケプラーなど第一線の観測結果と頻繁に比較検討されている（B02）。



図：シミュレーションで初めて明らかとなった微惑星形成に至るパス



図：巨大惑星の重力散乱シミュレーションにより得られた系外惑星分布の理論推定図

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（領域全体で以下の7件を含む計517件の査読論文）

Buragohain, M., Pathak, A., Sarre, P., Onaka, T., & Sakon, I., 2016, “Mid-infrared vibrational study of deuterium-containing PAH variants”, Planetary and Space Science, Vol.133, 97, doi: 10.1016/j.pss.2016.05.001

Nomura, H., Tsukagoshi, T., Kawabe, R., Ishimoto, D., Okuzumi, S., Muto, T., Kanagawa, K.D., Ida, S., Walsh, C., Millar, T.J.; Bai, X.-N., 2016, ALMA Observations of a Gap and a Ring in the Protoplanetary Disk around TW Hya, Astrophys. J. Letter, 819, L7, 7pp, doi:10.3847/2041-8205/819/L7

Sato, T., Okuzumi, S., Ida, S., 2016, On the water delivery to terrestrial embryos by ice pebble accretion, Astronomy & Astrophysics, 589, id.A15 (19pp), doi: 10.1051/0004-6361/201527069

Honda, M., ... Sakon, I., ..., 2015, High-resolution 25 M Imaging of the Disks around Herbig Ae/Be Stars: A Link between the Progenitor and the Mass Loss, *Astrophys. J.*, 804, 143, doi:10.1088/0004-637X/804/2/143

Brandt, T., ... Guyon, O., ... Hayashi, M., ... Takato, N. ..., 2014, A Statistical Analysis of SEEDS and Other High-contrast Exoplanet Surveys: Massive Planets or Low-mass Brown Dwarfs?, *Astrophys. J.*, 794, 159, doi: 10.1088/0004-637X/794/2/159

Ida, S., Lin, D. N. C. & Nagasawa, M. 2013. Toward a Deterministic Model of Planetary Formation. VII. Eccentricity Distribution of Gas Giants, *Astrophys. J.*, 775, article id. 42, 25 pp., doi: 10.1088/0004-637X/775/1/42

Kuzuhara, M., ... Guyon, O., ... Hayashi, M., ... Takato, N., ..., 2013, Direct Imaging of a Cold Jovian Exoplanet in Orbit around the Sun-like Star GJ 504, *Astrophys. J.*, 774, 1, doi: 10.1088/0004-637X/774/1/11

〔学会発表〕(領域全体で以下の5件を含む計434件)

百瀬宗武
「ALMA高解像度撮像が明かしつつある惑星形成過程」、理論懇シンポジウム2015「宇宙における天体形成から生命まで」、2015年12月23日、大阪大学(大阪府吹田市)

倉本圭
Thermal History and Volatile Partitioning between Proto-Atmosphere and Interior of Mars Accreted in a Solar Nebula, *American Astronomical Society, DPS meeting #47*, 2015/11/11, National Harbor, MD, Washington DC (USA)

井田 茂
Impacts of observed statistical properties on our understanding of planetary formation, *Exoplanetary Science*, 2014/4/17, Quy Nhon (Vietnam)

井田 茂
Planet Population Synthesis, Protostars and Planets VI, 2013/7/19, Heidelberg (Germany)

井田 茂
Theoretically predict distributions of mass and orbital elements of exoplanets, *The origins of*

stars and their planetary systems, 2012/6/11, Hamilton (Canada)

〔図書〕(計7件)

井田茂・田村元秀・生駒大洋・関根康人、朝倉書店、系外惑星の事典、2016年、356ページ

井田茂(中本泰史氏と共著)、共立出版、惑星形成の物理、2015年、144ページ

井田茂・長沼毅、岩波書店、地球外生命—われわれは孤独か、2014年、224ページ

井田茂(長沼毅氏と共著)、岩波新書、地球外生命、2014年、224ページ

井田茂、ちくまプリマー新書、系外惑星 - 宇宙と生命のナゾを解く、2012年、210ページ

左近 樹(分担執筆)、朝倉書店、地球と宇宙の化学事典、2012年、472ページ

井田茂、PHPサイエンス・ワールド新書、スーパーアース、2011年、190ページ

〔産業財産権〕
○出願状況(計0件)
○取得状況(計0件)

〔その他〕
ホームページ等
<http://exoplanets.astron.s.u-tokyo.ac.jp/index.php>

6. 研究組織

(1) 研究代表者: 林 正彦 (HAYASHI, Masahiko)
(自然科学研究機構・国立天文台台長)
研究者番号: 10183914

(2) 研究分担者: 倉本 圭 (KURAMOTO, Kei)
(北海道大学・理学研究科・教授)
研究者番号: 50311519

研究分担者: 百瀬 宗武 (MOMOSE, Munetake)
(茨城大学・理学部・教授)
研究者番号: 10323205

研究分担者: 井田 茂 (IDA, Shigeru)
(東京工業大学・地球生命研究所・教授)
研究者番号: 60211736

研究分担者: 左近 樹 (SAKON, Itsuki)
(東京大学・大学院理学系研究科・助教)
研究者番号 : 70451820