

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：12608

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：23103005

研究課題名（和文）ハビタブル地球型惑星の形成理論

研究課題名（英文）Formation theory of habitable terrestrial planets

研究代表者

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

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 118,500,000円

研究成果の概要（和文）：原始星・原始惑星系円盤の形成については、中心星が木星質量程度で円盤が形成され、ガス塊が円盤分裂によって多数形成されて中心星に落ちて行くという描像が得られた。微惑星形成については、円盤内のダストの合体成長・空隙率進化・軌道進化を統合的に考慮して、氷微惑星が形成されることを世界で初めて示した。観測と理論モデルの比較検討については、モンテカルロ計算により、系外巨大惑星の軌道の楕円率の分布を見事に説明した。また、惑星が獲得できる大気量の解析から観測が示すスーパーアースのバルク密度の多様性を説明できることを示した。さらに、ALMAによって撮像された原始惑星系円盤のリング構造の理論モデルを2つ提出した。

研究成果の概要（英文）：Regarding formation of protostars and protoplanetary disks, we have constructed a new scenario that a disk is formed at the stage of a Jupiter-mass star and the disk fragment into clumps to fall onto the star. Regarding planetesimal formation, through analysis of simultaneous evolution of dust size, porosity and orbit, we found that icy planetesimals are successfully formed. Regarding comparison of theory with observed data, we performed Monte Carlo simulations to reproduce the orbital eccentricity distribution of exoplanets. Our study of planetary atmosphere acquired from the disk could explain diversity of bulk density of extrasolar super-Earths. We also proposed two theoretical models to explain the ring structure in the disks that were revealed by ALMA observations.

研究分野：惑星物理学

キーワード：系外惑星 星形成 原始惑星系円盤 理論天文学

## 1. 研究開始当初の背景

当時、系外惑星の発見数が500個を超え、ケプラー衛星望遠鏡によって1200個もの惑星候補が発表された。系外惑星研究には、(I)多数発見された巨大ガス惑星の統計的性質の探究、(II)発見数が急増中のスーパーアース(大型地球型惑星)の起源論、(III)ついに発見が始まった、表面に海を持って生命を宿す可能性のあるハビタブル地球型惑星に関する議論、の3つの大きな流れがある。

(I)では、従来のドップラー法観測で得られる惑星の軌道要素(長半径、離心率)や質量の分布の他にも、トランジット観測との併用で推定される内部構造/組成の議論が始まり、直接観測による大気組成まで議論の対象となってきた。

(II)は、ドップラー観測の高精度化や重力レンズ観測、衛星望遠鏡のトランジット観測によるもので、スーパーアースの高い存在確率(太陽型星の数%以上に存在)と共に軌道や内部密度の多様性が注目を集めている。この発見は地球物理学にもインパクトを与え、ハビタブル惑星から系外生命までの議論を引き起こした。

一方、観測が先行してきた系外惑星研究だが、理論研究も重要性を増している。例えば、低質量のM型星では固体惑星の存在確率が高く、その暗さゆえ観測しやすい短周期惑星こそがハビタブル惑星になるという我々の予言( Ida & Lin 2005)が、それまで敬遠されていたM型星の惑星サーベイの開始、そしてハビタブルなスーパーアースの発見につながった。また、恒星自転と逆方向に公転する惑星に関する我々の予言(Nagasawa, Ida, Bessho 2008)は、当初非常識とも受け取られたが、すぐ翌年の発見(Narita et al. 2009)につながった。

## 2. 研究の目的

当時のこのような状況を踏まえ、本研究では、原始惑星系ガス円盤の形成・進化から円盤中でのダストの成長、微惑星の形成、微惑星の合体成長、原始惑星の軌道移動・重力相互作用、ガス惑星の形成といった、惑星形成の各過程に対する大規模数値計算を推進し、その結果をもとに、観測データと詳細比較可能な包括的惑星形成モデルを構築することを目指した。そして、巨大ガス惑星やスーパーアースの分布の統計的性質を理論的に説明するとともに、今後の重要な観測対象であるハビタブル惑星の質量・軌道分布の高精度理論予測を目指した。

## 3. 研究の方法

### [I. 巨大ガス惑星の多様性]

(I-a) 塵の集積から氷微惑星分布を推定:磁気回転・動径輸送不安定及び、それによる円盤の渦の中での塵の運動を解析し、計画研究B01の観測・実験データも参照して、塵の合体成長による微惑星の形成過程を解明する。

また、輻射輸送計算によって円盤の熱進化を計算し、巨大ガス惑星のコアの材料となる氷微惑星形成領域の時間発展を推定する。

(I-b)円盤散逸を考慮して連鎖形成モデルを検証:磁気乱流による間欠的円盤風や紫外線による円盤蒸発過程も考慮して、あるガス惑星の形成がそのすぐ外側でのガス惑星の加速的形成を促す「連鎖形成シナリオ」を大規模数値計算で検証する。

(I-c)軌道変化による多様性の起源、遠方ガス惑星の予測:ガス惑星による重力散乱で外側に飛ばされるが、系内に留まった別のガス惑星やコア(その後ガス惑星へ成長)は計画研究A01の直接撮像の標的となる。この数値計算を行い、包括的惑星形成モデルに導入し、そのような惑星の分布を予測する。A01の観測計画に寄与するとともに、中心星に近いガス惑星(ホット・ジュピター)も合わせ、巨大ガス惑星の軌道の多様性の起源を系統的に論じる。軽いM型星や重いB/A型星などでも同様の理論予測をし、それらの観測を促すとともに、惑星系の中心星質量依存性の観測データにより、形成モデルを較正する。

**[II. スーパーアースの多様性]** 最近の高精度ドップラー観測やケプラー衛星望遠鏡のトランジット観測は、太陽型星の数%以上が短周期スーパーアースを持つことを示す(その大多数は複数系)。一方、太陽系を含めて短周期惑星が存在しない系も多い。この多様性は、中心星と円盤ガスの磁気結合の強さで決まる円盤内縁構造の違いで生まれるという作業仮説を、(II-a)弱電離磁気流体計算、(II-b)巨大衝突による集積数値計算(円盤内縁に移動した地球型惑星の近接散乱・合体や大気獲得の計算)により検証する。この結果を包括的モデルに導入し、計画研究A01のスーパーアース観測の分布予測をする。また、トランジット観測によって、スーパーアースの内部密度の大きな多様性が示されているが、内部構造・大気モデリングによる惑星の内部組成を推定し、形成理論モデルからの予測と比較する。

**[III. ハビタブル惑星の存在確率]** ハビタブル地球型惑星、スーパーアース、巨大ガス惑星は微惑星集積という起源を共にし、形成後はお互いに重力的に影響し合う。スーパーアース、巨大ガス惑星の観測によって包括的惑星形成モデルを較正し、地球型惑星分布の高精度予測をする。

## 4. 研究成果

### (1) 星惑星形成過程の理論モデルの構築

原始星の形成およびその直後に始まる原始惑星系円盤の形成過程のシナリオを構築した(犬塚ら)。中心星が木星質量程度のときから円盤が形成され、ガス塊が円盤分裂によって多数形成されて中心星に落ちて行くという描像が得られ、これは惑星形成の初期

条件の考え方を大きく変えた。

円盤での磁気回転乱流の強度を支配する大局磁場の長時間進化を磁場輸送の平均場モデルを用いて詳細に調べ、乱流中でのプラズマの電場加熱を考慮した円盤電離モデルを世界に先駆けて完成させ、プラズマの加熱が円盤外側領域での磁気乱流を安定化させることを示した(犬塚、奥住ら)。

## (2) 微惑星形成のシミュレーションの成功

円盤内のダストの合体成長・空隙率進化・軌道進化を整合的に考慮したダスト進化シミュレーションを実施し、高空隙率化に伴うダストのガス抵抗特性の変化が氷のダストの急速な合体成長を引き起こし、中心星に落下する前に、氷微惑星が形成されることを世界で初めて示した(奥住ら)。また、新たな小石集積(ペブルアクリション)モデルにも着目し、小石の形成を明らかにし、小石による地球型惑星へのH<sub>2</sub>Oの輸送過程を明らかにした(奥住、井田ら)

磁気回転乱流中による微惑星の離心率の増幅を、磁気流体計算の結果に基づいて一般的に定式化した(奥住)。これを微惑星の形成および成長に適用し、乱流円盤中で微惑星の暴走成長が始まる条件とそのときの微惑星サイズを明らかにした(奥住)。

## (3) 系外惑星の観測との比較検討

巨大惑星の重力散乱についてのN体シミュレーションとモンテカルロ計算により、系外巨大惑星の軌道の楕円率の分布を見事に説明した(井田、長沢ら)。中心星から離れた巨大惑星の形成も、標準コア集積モデルで形成できることを示した。さらに、系外巨大惑星の重力散乱は、巨大惑星の軌道離心率を上げ、系外への放出も起こすが、それらのはるか内側領域に存在する地球型惑星のほとんども中心星に落とすことを示した(井田、長沢ら)。また、巨大惑星の重力散乱の過程で一定の割合で惑星同士が重力的に束縛されて連惑星となることを明らかにし、トランジット観測における検出可能性を議論した(井田、長沢ら)。

原始惑星による円盤ガス獲得過程を系統的に調べ、それを木星型惑星の起源および短周期スーパーアースの大気の起源に応用した(生駒ら)。微惑星の蒸発によって原始エンベロープが汚染されると、ガス捕獲可能な惑星質量が従来の値に比べて大幅に減少することを発見した(生駒ら)。一方、中心星近くでスーパーアースが獲得できる大気量は、中心星からの距離や円盤ガスの散逸時期によって様々であり、観測が示すスーパーアースのバルク密度の多様性を説明できることを示した。そうした形成理論の妥当性を検証するために、トランジット時の惑星大気透過スペクトルを理論的に予測し、観測提案もおこなった(生駒ら)。

## (4) 原始惑星系円盤の観測との比較検討

ALMAによって撮像された、原始惑星系円盤のリング構造は非常に大きなインパクトを与えた。観測データはダストからの放射を観測しているので、リング構造は円盤ガス成分そのものの構造を表している可能性とダスト分布の構造を表している可能性の2つがある。われわれは研究項目B01との綿密な連携のもとに、原始惑星系円盤内のダストの成長・移動・焼結による多重ダストリング形成モデル(奥住、野村ほか)、円盤永年重力不安定性(犬塚ほか)、存在している惑星による円盤ガスの構造形成モデル(B01)など多方面から、その起源を探った。また、研究項目B01と共同して、ALMAに観測プロポーザルを出して採択され、他の円盤でも同様の円盤構造を発見した(野村ほか)。

円盤の詳細な化学反応及び輻射輸送計算に基づき、円盤中の有機分子の生成過程と彗星内の有機分子との関連、また、そのALMAによる観測可能性を調べ、実際のALMA観測で円盤からのメタノール輝線を初検出した(野村ほか)。

## (5) 系外地球型惑星の形成モデルの構築

地球型惑星形成過程の最終段階である巨大衝突によって形成される惑星系の軌道構造がどのように決まるかを多体シミュレーションを用いて調べ、形成される惑星系の軌道間隔と軌道離心率を予測し、生成される衝突破片を定量的に明らかにし、その観測可能性について議論した(小久保)。ハビタブルゾーンに地球型惑星があっても、円盤でのその温度領域ではH<sub>2</sub>Oは凝縮しないので、外側領域で凝縮したH<sub>2</sub>O氷をどのように惑星に運ぶのかが重要である。小石での輸送のほか、巨大ガス惑星による氷微惑星の散乱についても徹底的に調べた(井田、奥住)。

また、雲に覆われたスーパーアースの大気組成を解明するため、さまざまな大気組成の系外惑星に適用可能な鉛直1次元の雲形成微物理モデルを開発した(奥住)。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計40件)

以下の論文は全て査読有り。

1. Ohno, K. & Okuzumi, S. 2017, A Condensation-Coalescence Cloud Model for Exoplanetary Atmospheres: Formulation and Test Applications to Terrestrial and Jovian Clouds, *Astrophysical J.*, 835, id.261(10pp) 10.3847/1538-4357/835/2/261
2. Kurosaki, K. & Ikoma, M. 2017. Acceleration of Cooling of Ice Giants by Condensation in Early Atmospheres. *Astronomical J.*, 153, id. 260 (9pp). 10.3847/1538-3881/aa6faf
3. Okuzumi, S., Momose, M., Sirono, S., Kobayashi, H. & Tanaka, H. 2016,

- Sintering-induced Dust Ring Formation in Protoplanetary Disks: Application to the HL Tau Disk, *Astrophysical J.* 821, id.82(24pp) 10.3847/0004-637X/821/2/8
4. Ida, S. & Guillot, T. 2016, Formation of dust-rich planetesimals from sublimated pebbles inside of the snow line, *Astronomy & Astrophysics*, 596, id.L3(5pp) 10.1051/0004-6361/201629680
  5. Ida, S., Guillot, T. & Morbidelli, A. 2016. The radial dependence of pebble accretion rates: A source of diversity in planetary systems. I. Analytical formulation, *Astronomy & Astrophysics*, 591, id.A72(12pp) 10.1051/0004-6361/201628099
  6. Arakawa, S. & Nakamoto, T. 2016. Rocky Planetesimal Formation via Fluffy Aggregates of Nagograins. *Astrophys. J.*, 832, id. L19. 10.3847/2041-8205/832/2/L19
  7. Sato, T., Okuzumi, S. & Ida, S. 2016, On the water delivery to terrestrial embryos by ice pebble accretion. *Astronomy & Astrophysics*, 589, id.A15(19pp) 10.1051/0004-6361/201527069
  8. Tsukagoshi, T., Nomura, H., Muto, T., Kawabe, R., Ishimoto, D., Kanagawa, K. D., Okuzumi, S., Ida, S., Walsh, C., Millar, T.J. 2016, A Gap with a Deficit of Large Grains in the Protoplanetary Disk around TW Hya, *Astrophysical J.*, 829, id.L35(6pp) 10.3847/2041-8205/829/2/L35
  9. Matsumura, S., Brasser, R. & Ida, S. 2016, Effects of Dynamical Evolution of Giant Planets on the Delivery of Atmosphere Elements During Terrestrial Planet Formation, *Astrophysical J.* 818, id 15(18pp) 10.3847/0004-637X/818/1/15
  10. Nomura, H., T. Tsukagoshi, R. Kawabe, D. Ishimoto, S. Okuzumi, T. Muto, K.D. Kanagawa, S. Ida, C. Walsh, T.J. Millar, X.-N. Bai, 2016, *Astrophysical J.* 819, id.L7(7pp) 10.3847/2041-8205/819/1/L7
  11. Muto, T., T. Tsukagoshi, M. Momose, T. Hanawa, H. Nomura, M. Fukagawa, K. Saigo, A. Kataoka, Y. Kitamura, S.Z. Takahashi, S. Inutsuka, T. Takeuchi, H. Kobayashi, E. Akiyama, M. Honda, H. Fujiwara, H. Shibai, 2015, Significant gas-to-dust ratio asymmetry and variation in the disk of HD 142527 and the indication of gas depletion, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 67, id.122(28pp) 10.1093/pasj/psv098
  12. Okuzumi, S. & Inutsuka, S. 2015, The Nonlinear Ohm's Law: Plasma Heating by Strong Electric Fields and its Effects on the Ionization Balance in Protoplanetary Disks, *Astrophysical J.*, 800, id.47(19pp) 10.1088/0004-637X/800/1/47
  13. Ito, Y., Ikoma, M., Kawahara, H., Nagahara, H., Kawashima, Y., & Nakamoto, T., 2015. Thermal Emission Spectra of Atmospheres of Hot Rocky Super-Earths. *Astrophys. J.*, 801, id. 144 (15pp.) 10.1088/0004-637X/801/2/144
  14. Matsumoto, Y., Nagasawa, M. & Ida, S. 2015, Eccentricity Evolution Through Accretion of Protoplanets. *Astrophysical J.*, 810, id.106(10 pp) 10.1088/0004-637X/810/2/106
  15. Tsukamoto, T., K. Iwasaki, S. Okuzumi, M. N. Machida, and S. Inutsuka, 2015 Bimodality of Circumstellar Disk Evolution Induced by the Hall Current, *The Astrophysical Journal Letters*, Vol. 810, L26 (5pp), 10.1088/2041-8205/810/2/L26
  16. Tian, F. & Ida, S., 2015. Water Contents of Earth-mass Planets around M dwarfs, *Nature Geoscience*, 8, 177–180.10.1038/ngeo2372
  17. Walsh, C., H. Nomura & E. van Dishoeck, 2015, The molecular composition of the planet-forming regions of protoplanetary disks across the luminosity regime, *Astronomy & Astrophysics*, 562, id.A88 (28pp) 10.1051/0004-6361/201526751
  18. Kikuchi, A., Higuchi, A. & Ida, S., 2014. Orbital Circularization of a Planet Accreting Disk Gas: Formation of Distant Jupiters in Circular Orbits Based on Core Accretion Model, *Astrophys. J.*, 792, id.1, 13pp. 10.1088/0004-637X/797/1/1
  19. Kurokawa, H. and Nakamoto, T. 2014. Mass-Loss Evolution of Close-In Exoplanets: Evaporation of Hot Jupiters and the Effect on Population. *Astrophys. J.*, 783, id. 54, 11 pp. 10.1088/0004-637X/783/1/54
  20. Raymond, S.N., Kokubo, E., Morbidelli, A., Morishima, R., Walsh, K. J., Planet Formation at Home and Abroad, in *Protostars and Planets VI* (H. Beuther, R. Klessen, C. Dullemond, T. Henning eds), 2014, 595-618. 10.2458/azu\_uapress\_9780816531240-ch026
  21. Ochiai, H., Nagasawa, M. & Ida, S., 2014. Extrasolar Binary Planets. I. Formation by Tidal Capture during Planet-Planet Scattering, *Astrophys. J.* 790, id. 92, 10 pp. 10.1088/0004-637X/790/2/92
  22. Inutsuka, S. & S. Z. Takahashi & 2014, Two-component Secular Gravitational Instability in a Protoplanetary Disk: A Possible Mechanism for Creating Ring-like Structures. *Astrophysical J.* 794, 55, 10.1088/0004-637X/794/1/55
  23. Kataoka, A., Okuzumi, S., Tanaka, H. & Hideko, N. 2014, Opacity of fluffy dust aggregates, *Astronomy & Astrophysics*, 568, id.A42(15pp)

- 10.1051/0004-6361/201323199
24. Brasser, R., Ida, S. & Kokubo, E. 2013. A Dynamical Study on the Habitability of Terrestrial Exoplanets - II The super-Earth HD40307g. *MNRAS*, 440, 3685-3700. 10.1093/mnras/stu555
  25. 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, id.42, 25 pp. 10.1088/0004-637X/775/1/42
  26. Matsumura, S., Ida, S. & Nagasawa, M. 2013. Effects of Dynamical Evolution of Giant Planets on Survival of Terrestrial Planets. *Astrophys. J.*, 767, id.129, 14pp. 10.1088/0004-637X/767/2/129
  27. Okuzumi, S., & Ormel, C. W. 2013. The Fate of Planetesimals in Turbulent Disks with Dead Zones. I. The Turbulent Stirring Recipe, *Astrophysical J.*, 771, id.43(14pp) 10.1088/0004-637X/771/1/43
  28. Kataoka, A., Tanaka, H., Okuzumi, S., & Wada, K. 2013. Static compression of porous dust aggregates, *Astronomy & Astrophysics*, 554, id.A4(12pp) 10.1051/0004-6361/201321325
  29. Okuzumi, S. & Hirose, S. 2012, Planetesimal Formation in Magnetorotationally Dead Zones: Critical Dependence on the Net Vertical Magnetic Flux, *Astrophysical J. Lett.*, 753, id.L8(5pp) 10.1088/2041-8205/753/1/18
  30. Okuzumi, S., Tanaka, H., Kobayashi, H. & Wada, K. 2012, Rapid Coagulation of Porous Dust Aggregates outside the Snow Line: A Pathway to Successful Icy Planetesimal Formation, *Astrophys. J.*, 752, id.106(18pp) 10.1088/0004-637x/752/2/106
  31. Genda, H., Kokubo, E. & Ida, S. 2012. Merging Criteria for Giant Impacts of Protoplanets. *Astrophys. J.*, 744, id. 137, 8 pp. 10.1088/0004-637X/744/2/137
  32. Takeuchi, T., Muto, T., Okuzumi, S., Ishitsu, N. & Ida, S. 2012. Induced Turbulence and the Density Structure of the Dust Layer in a Protoplanetary Disk. *Astrophys. J.*, 744, id.101, 16 pp. 10.1088/0004-637X/744/2/101
  33. Ikoma, M. & Hori, Y. 2012. In Situ Accretion of Hydrogen-rich Atmospheres on Short-period Super-Earths: Implications for the Kepler-11 Planets. *The Astrophysical Journal* 753, 66. 10.1088/0004-637X/753/1/66
  34. Inutsuka, S., 2012, Present-Day Star Formation - From Molecular Cloud Cores to Protostars and Protoplanetary Disks, Prog. Theor. Exp. Phys. Vol. 2012 Issue 1, 01A307, 10.1093/ptep/pts024
  35. Kokubo, E., Ida, S., Dynamics and Accretion of Planetesimals, Progress of Theoretical and Experimental Physics, 2012, 01A308(23 pp). 10.1093/ptep/pts032
  36. Michikoshi, S., Kokubo, E., Inutsuka, S., Secular Gravitational Instability of a Dust Layer in Shear Turbulence, The Astrophysical Journal, 2012, 746, 35(12pp). 10.1088/0004-637X/746/1/35
  37. Hori, Y. & Ikoma, M. 2011. Gas Giant Formation with Small Cores Triggered by Envelope Pollution by Icy Planetesimals. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 416, 1419-1429. 10.1111/j.1365-2966.2011.19140.x
  38. Nagasawa, M. & Ida, S. 2011. Orbital Distributions of Close-in Planets and Distant Planets Formed by Scattering and Dynamical Tides. *Astrophys. J.*, 742, id. 72, 16 pp. 10.1088/0004-637X/742/2/72
  39. Oka, A., Nakamoto, T. & Ida, S. 2011. Evolution of Snow Line in Optically Thick Protoplanetary Disks: Effects of Water Ice Opacity and Dust Grain Size. *Astrophys. J.*, 738, id. 141, 11 pp.
  40. Kobayashi, H., Kimura, H., Watanabe, S., Yamamoto, T., & Mueller, S. 2011, Sublimation Temperature of Circumstellar Dust Particles and Its Importance for Dust Ring Formation, *Earth Planets Space*, 63, 1067-1075, 10.5047/eps.2011.03.012.
- [学会発表] (計 12 件)
1. Nomura, H., Molecular Line Observations of Protoplanetary Disks, EA ALMA Science Workshop 2016, 2017/3/10-12, NTHU (Taiwan)
  2. Nagasawa M., Formation of hot-Jupiters and binary planets due to planet-planet scattering, JSPS Core-to-Core Program "Planet2" Symposium, 2017/02/27, Nice (France)
  3. Ikoma, M., Formation and Evolution of Giant Planets with Snowy Envelopes, JSPS Core-to-Core Program "Planet2" Symposium, 2017/2/21, Nice (France)
  4. Okuzumi, S., Dust growth in the early stage of planet formation, New Directions in Planet Formation, 2016/7/11, Lorentz Center, Leiden (Netherlands)
  5. Nomura, H., ALMA Observations of Gas and Dust in the Protoplanetary Disk around TW Hya, Resolving planet formation in the era of ALMA and extreme AO, 2016/5/16-20, ESO Santiago (Chile)
  6. Ikoma, M., Role of Magma Ocean and Primitive Atmospheres for the Hydration of Planetary Embryos. ISSI Workshop on The Delivery of Water to Protoplanets, Planets,

and Satellites. 2016/01/13, Bern (Switzerland)

7. Kokubo, E., Formation of Close-in Terrestrial Planets by Giant Impacts: The Basic Scaling Laws, Extreme Solar Systems III, Wikoloa (USA), 2015/11/29
8. Inutsuka, S. Low-Mass Star Formation: From Molecular Cloud Cores to Protostars and Protoplanetary Disks", The 6th Zermatt ISM Symposium Conditions and Impact of Star Formation - From Lab to Space, 2015/09/07, Zermatt (Switzerland)
9. Ikoma, M., Theoretical Perspective on Super-Earths and Mini-Neptunes with a Focus on the Origins and Compositions of Short-period Exoplanets. 31st int'l colloquium of the Institut D'Astrophysique de Paris From super-Earths to brown dwarfs: who's who? 2015/06/30 Paris (France)
10. Ida, S., Impacts of observed statistical properties on our understanding of planetary formation, 2014/04/21, Exoplanetary Science, Quy Nhon (Vietnam)
11. Okuzumi, S., The fate of planetesimals in turbulent protoplanetary disks, Exoplanets and Disks: Their Formation and Diversity II, 2013/12/9, Kona (USA)
12. Ida, S., Planet population synthesis, Protostars and Planets VI, 2013/07/19, Heidelberg (Germany)
13. Nomura, H., Water in Protoplanetary Disks, The Astrochemical Universe Unveiled with Herschel, 2012/07/02, Rome (Italy)

〔図書〕(計 8 件)

1. 井田茂、岩波書店、系外惑星と太陽系、2017 年、240 ページ
2. 井田茂、NHK 出版、太陽系外の惑星をさがす、2017 年、162 ページ
3. 井田茂・田村元秀・生駒大洋・関根康人編、朝倉書店、系外惑星の事典、365 ページ、2016 年
4. 梅村雅之、福江純、野村英子、日本評論社、シリーズ・宇宙物理学の基礎 3 「輻射輸送と輻射流体力学」、2016 年、396 ページ
5. 井田茂、中本泰史、共立出版、惑星形成の物理 - 太陽系と系外惑星系の形成論入門、2015 年、144 ページ
6. 井田茂、長沼毅、岩波書店、地球外生命、2014 年、224 ページ
7. 小久保英一郎、嶺重慎、「宇宙と生命の起源--素粒子から細胞へ」、岩波書店、2014、254 ページ
8. 井田茂、筑摩書房、系外惑星-宇宙と生命のナゾを解く、2012 年、210 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〕

東工大・井田研究室

<http://www.geo.titech.ac.jp/lab/ida/>

東工大・奥住研究室

<http://www.geo.titech.ac.jp/~sokuzumi/>

東工大・野村研究室

<http://www.geo.titech.ac.jp/lab/nomura/>

名古屋大学・犬塚研究室

[http://www.ta.phys.nagoya-u.ac.jp/inutsuka/Papers/index\\_j.html](http://www.ta.phys.nagoya-u.ac.jp/inutsuka/Papers/index_j.html)

小久保英一郎 WEB URL

<http://www.cfca.nao.ac.jp/~kokubo/>

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

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

### (2)研究分担者

中本 泰史 (NAKAMOTO, Taishi)

東京工業大学・理学院・教授

研究者番号：60261757

野村 英子 (NOMURA, Hideko)

東京工業大学・理学院・准教授

研究者番号：20397821

奥住 聡 (OKUZUMI, Satoshi)

東京工業大学・理学院・准教授

研究者番号：60704533

小久保 英一郎 (KOKUBO, Eiishichiro)

国立天文台・理論部・教授

研究者番号：90332163

生駒 大洋 (IKOMA, Mitsuhiro)

東京大学・理学研究科・准教授

研究者番号：80397025

犬塚 修一郎 (INUTSUKA, Shuichiro)

名古屋大学・理学研究科・教授

研究者番号：80270453

渡邊 誠一郎 (WATANABE, Seiichiro)

名古屋大学・環境学研究科・教授

研究者番号：50230967

長沢 真樹子 (NAGASAWA, Makiko)

久留米大学・医学部・准教授

研究者番号：00419847

(3)連携研究者 (なし)

(4)研究協力者 (なし)