

平成 30 年 5 月 9 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26287101

研究課題名(和文)大規模数値計算サーベイによる天体衝突破壊モデルの構築

研究課題名(英文)Modelling of Collisional Disruption of Planetary Bodies via Large-scale Numerical Simulations

研究代表者

田中 秀和 (Tanaka, Hidekazu)

東北大学・理学研究科・教授

研究者番号：00282814

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、惑星科学の多くの研究で不可欠である、高精度かつ統一的天体衝突の破壊モデルを、大規模数値計算サーベイをもとに構築した。計算手法としてSPH法、メッシュ法、DEM法を用いることで、1km程度の小惑星から原始惑星サイズ(~千km)までの天体衝突現象をカバーし、イジェクタ総質量をモデル化した。まず数値計算結果の解像度依存性を明らかにし高解像度極限での収束値を求める方法確立した。これを用いた高精度数値計算サーベイより広い衝突条件に対し成り立つ新たなスケーリング則を見出しそのモデル化に成功した。またこの破壊モデルを応用し木星型惑星固体コア形成に対する天体衝突破壊による制約も明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In this work, by performing a large-scale survey of numerical simulations, we constructed an accurate and unified model of collisional disruption, which is a key process in various studies of planetary sciences. As the numerical methods, we used three kinds of methods, i. e., a SPH code, a mesh (iSALE) code, and a DEM code, which enable us to obtain the total ejecta mass at various impacts for planetary bodies with a wide size range from km-size to 1000km-size.

Clarifying the resolution dependence of the collisional disruption, we developed the method to calculate the convergent value at high-resolution limit. From a survey of accurate numerical simulations applied this method to, we obtain a new scaling law of the total ejecta mass, which is valid for a wide range of parameters (sizes of colliding bodies, the impact velocity, and the angle) and succeeded in modelling the collisional disruption. We also applied this new model to Jovian planets formation and obtained constraints on it.

研究分野：惑星科学

キーワード：惑星形成 小惑星 天体衝突破壊 デブリ円盤

1. 研究開始当初の背景

小惑星などの太陽系小天体は、母天体の衝突破壊によってつくられたものであり、小惑星分布から太陽系初期における天体衝突の情報を読み取るとうとする試みが数多くなされている¹。月表面などの衝突クレーターからも太陽系形成初期に関する様々な情報が得られている。さらに、他の恒星の周りで観測されるマイクロサイズのダストからなるデブリ円盤は、惑星摂動を受けた小天体同士の衝突破壊で生成されたと考えられており、惑星の存在を示唆している。衝突破壊で粉々にされた固体物質は、輻射圧やガス抵抗などにより円盤から取り除かれるので、天体衝突破壊には、惑星材料物質を大幅に減少させて惑星形成を阻害する効果もある²。

このように惑星科学の多くの研究において天体衝突破壊過程の理解は必須だが、応用されている天体衝突破壊モデルはごく単純で、その精度は低かった³。実際、破壊モデルのもととなる数値計算の空間解像度は低く、その粗い空間解像度がどれ程の誤差を生んでいるのかも明らかでなかった。各研究で様々なモデルを採用している点も問題だ。小惑星やデブリ円盤などの多様な情報源から情報を引き出すため、現実的かつ統一的な天体衝突破壊モデルが必要となっていた。

天体衝突の統一的モデル構築における困難は、惑星形成過程において起こる非常に多様な衝突現象をカバーしなければならない点にある。天体衝突のパラメータは多く、かつ、範囲が広い。天体サイズは小惑星から惑星まで、衝突速度は数十 m/sec から 10km/sec までをカバーする必要がある。衝突する 2 天体の様々なサイズ比や斜め衝突の効果も考慮しなければならない。天体の構成物質については、固結した岩石天体や小惑星イトカワのような瓦礫が集積した強度の低いラップパイル天体も扱う必要がある。これまでに天体衝突破壊を想定した多くの室内実験や数値実験が行われてきたが、これらのパラメータ範囲全体をカバーしたモデルは未だなかった^{3,4}。このような広範なパラメータ空間を適切な高精度数値計算によりサーベイすることで、基準となる統一的モデルを構築することが惑星科学分野において強く求められていた。

2. 研究の目的

本研究では、大規模衝突数値計算を大量に実行して、天体サイズ、衝突速度、衝突角度等の各パラメータに対して広いパラメータ空間をサーベイすることによって、天体衝突破壊モデルの構築を行った。

本研究の天体衝突破壊モデルは衝突破壊で放出される破片の総質量を記述する。これは衝突破壊によって天体から失われる質量の総量であり破壊の程度を表す。破片総質量が衝突する 2 天体の全質量の半分以上であれば大規模破壊、それ以下であればクレータ

ー破壊と分類される。従来の多くの破壊モデルは、このクレーター破壊と大規模破壊との境界の衝突エネルギーのみをモデル化した非常に単純なものであった。これに対し、本研究では、破片総質量を衝突エネルギーの関数としてモデル化し、クレーター破壊から大規模破壊までを統一的にカバーすることによって、より現実に即した応用を可能にする。これにより、各研究へ応用の効く基準的モデルとなる。

さらに、本研究では、構築した衝突破壊モデルの、惑星形成や小惑星、デブリ円盤起源に対する応用も試みた。従来は小惑星を想定し 5km/sec 程度の衝突速度が重点的に調べられてきた³。本研究では、衝突速度の広い範囲をカバーすることによって、様々なサイズ・位置の摂動天体に対する応用が可能にする。さらに、天体破壊には大規模破壊より頻繁におこるクレーター破壊が寄与することが示されているが⁵、従来の破壊モデルではクレーター破壊の計算精度が低く、未だ不定性が大きい³。本研究の高解像度な数値計算によって、これらの不定性を取り除いた。

3. 研究の方法

数値計算手法としては、天体サイズや衝突速度の広い範囲をカバーするために、SPH 法 (Smoothed Particle Hydrodynamics) と DEM 法 (Distinct Element Method) の 2 種類の粒子法を用いた。前者の手法は惑星サイズの天体や高速衝突が得意であり、後者はラップパイル天体など強度の低く空隙のある小天体の低速衝突に適している。2 つの手法を用いて計算することで、1km から原始惑星サイズ(千 km) までの天体の衝突の再現を可能にする。SPH 法においては空間解像度依存性とそれによる誤差の問題が指摘されている。本研究では、メッシュ法である iSALE 数値流体 2 次元計算コードで天体の正面衝突の軸対称数値計算を行い比較することで、SPH 法の精度の検証も行った。

衝突計算として、天体 2 体の衝突計算と質量比が大きい極限である平面への衝突計算の 2 種類を行い、幅広い質量比の範囲をカバーした。これにより、従来のクレータースケールリング則を大規模破壊にまで拡張したモデル化を行った。

SPH 計算は玄田と末次が行い、DEM を用いた数値計算は田中、和田が行った。

比較のための iSALE-2D コードを用いた衝突数値計算は末次が行った。計算結果をもとにしたモデル構築と天体破壊進化への応用は小林と田中が行った。これらの数値計算は、本研究費で購入した計算機と東北大田中研究室所有の計算機を合わせた計算機群にて行った。

4. 研究成果

(1) 解像度依存性と高解像度収束値

SPH 法や DEM 法において様々な衝突条件に

対して、複数の異なる解像度（粒子数）で計算を行い、放出破片総質量や等の計算結果の解像度依存性を調べた。粒子数 N が大きくなるほど、空間解像度は N の $1/3$ 乗に比例して高くなる。SPH 法では、計算結果の誤差は常に粒子数 N の $-1/3$ 乗に比例し小さくなること明らかになった。これは空間 1 次精度であることを示している。SPH 法の差分は空間 2 次精度であるが、表面の取扱いのため 1 次精度になっていると推測される。さらに、この誤差の解像度依存性を利用して、複数の解像度の計算結果から高解像度極限での収束値を算出する方法を確立した（発表論文 16）。

一方、DEM 法では、粒子数が数千以上と大きい場合には放出破片総質量の解像度依存性はほとんどないことが明らかになった（発表論文 27）。

(2) 衝突天体質量比等のパラメータ依存性

SPH 法において、インパクト-天体質量を変えて、小規模なクレーター破壊から大規模破壊までの重力支配域における放出破片総質量を明らかにした。その結果は、破壊規模が大きくなるにつれてクレーター破壊からの外挿から次第にずれる。正面衝突では放出破片総質量が増加する方向にずれ、薄い角度の斜め衝突の場合には逆に破片総質量が減少する方向にずれる。両者の効果ともターゲット天体の表面曲率の効果で説明できる。

放出破片総質量は、インパクト-天体質量と衝突角度以外に、衝突速度とターゲット質量に依存する。放出破片総質量のこれらに対する依存性は、単位ターゲット質量当たりの衝突エネルギーで定義される Q の関数としてよく表される。放出破片総質量がターゲット質量の $1/2$ となる Q の値は Q_0^* と呼ばれ、これは一般に衝突角度、衝突速度、ターゲット質量に依存する。放出破片総質量/ターゲット質量の比は比 Q/Q_0^* の関数としても表されるが、我々の数値計算結果からその関数形は衝突速度やターゲット質量には依存せず衝突角度のみに依ることが分かった。この新たなスケール則により、 Q_0^* が一旦得られれば、経験的に得られた上記の関数形を用いて、放出破片総質量も得られるというようにモデル化することができた。特に、衝突角度で平均した放出破片総質量については、数値計算結果から上記関数形の経験式を得た（発表論文 3）。

Q_0^* はクレータースケール則を用いて、これを $Q=Q_0^*$ まで外挿することで近似的に求めることができる。さらに、数値計算から得られた上記関数形を用いることで、 Q_0^* をより精度よく算出する方法を確立することに成功した（発表論文 33、投稿中論文）。

DEM 法の数値計算より、強度支配域における放出破片総質量を得た。この場合、衝突角度で平均した放出破片総質量/ターゲット質量の比は $0.5Q/Q_0^*$ で与えられ、 Q_0^* の経験式

も各構成粒子に対して得られた。

(3) iSALE-2D コードと SPH 法との比較

天体の正面衝突について iSALE-2D コードを用いた数値計算を行った結果、放出破片総質量等の結果は、SPH 法による結果とほぼ一致することが確かめられた。放出破片総質量の解像度依存性や Q/Q_0^* に対する関数形についても一致することを確認した。両手法の一致により、これらの数値計算結果の信頼性はより確かなものとなった（発表論文 1、投稿中論文）。

(4) 木星型惑星形成への破壊モデルの応用

原始惑星系円盤中で、数倍地球質量もの固体核が形成されることでその重力で大量のガスを集積することが可能になり、木星型惑星がつくられる。しかし同時に、このように重い固体核は、重力擾動で周囲の小天体の軌道を乱し、それらの間的高速衝突による破壊を引き起こす。本研究(1)-(3)で作成した破壊モデルを用いて、木星型惑星の固体核形成に対する衝突破壊の影響について調べた。

従来の破壊強度モデルでは、簡単のため固結した一枚岩の天体が仮定されていたが、その場合 10m-1km 間のサイズで天体の強度が弱くなる。このような破壊モデルを用いると木星型惑星の固体核の形成は極めて難しいことが分かった。一方、惑星形成中の小天体は一枚岩ではなく始原的な彗星のような構造をもつと考えられ、本研究で得られた始原的天体の破壊強度モデルでは、そのサイズ域の天体の破壊強度/密度は 10^7 erg/g とかなり大きい値をとる。この破壊モデルを用いた結果、木星型惑星の固体核形成は現実的なパラメータ範囲内において可能となった（投稿中論文）。

<引用文献>

1. Bottke et al. 2005, Icarus 119, 261
2. Kobayashi et al. 2010, Icarus 209, 836
3. Benz & Asphaug 1999, Icarus 142, 5; Leinhardt & Stewart 2012, Astrophys. J. 745, 79
4. Takagi et al. 1984, Icarus 59, 462
5. Kobayashi & Tanaka 2010, Icarus 206, 735

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 33 件)

1. R. Suetsugu, H. Tanaka, H. Kobayashi, H. Genda, "Collisions between planetesimals in the gravity regime with iSALE code", Proceedings of Lunar and Planetary Science Conference 49, 1386(2pp), 2018, 査読なし. <https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2018/pdf/1386.pdf>
2. L. Piani, S. Tachibana, T. Hama, H. Tanaka, Y. Endo, I. Sugawara, L.

- Dessimoulie, Y. Kimura, A. Miyake, J. Matsuno, A. Tsuchiyama, K. Fujita, S. Nakatsubo, H. Fukushi, S. Mori, T. Chigai, H. Yurimoto, A. Kouchi, "Evolution of morphological and physical properties of laboratory interstellar organic residues with ultraviolet irradiation", *Astrophysical Journal* 837, 35(11pp), 2017, 査読あり. DOI:10.3847/1538-4357/aa5ca6
3. H. Genda, T. Fujita, H. Kobayashi, H. Tanaka, R. Suetsugu, Y. Abe, "Impact Erosion Model for Gravity-Dominated Planetesimals", *Icarus* 294, 234-246, 2017, 査読あり. DOI:10.1016/j.icarus.2017.03.009
 4. H. Miura, T. Yamamoto, H. Nomura, T. Nakamoto, K. K. Tanaka, H. Tanaka, and M. Nagasawa, "Comprehensive study of thermal desorption of grain-surface species by accretion shocks around protostars", *Astrophysical Journal* 839, 47(16pp), 2017, 査読あり. DOI:10.3847/1538-4357/aa67df
 5. S. Arakawa, H. Tanaka, A. Kataoka, and T. Nakamoto, "Thermal conductivity of porous aggregates", *Astronomy & Astrophysics* 608. L7(4pp), 2017, 査読あり. DOI:10.1051/0004-6361/201732182
 6. K. D. Kanagawa, H. Tanaka, T. Muto, and T. Tanigawa, "Modelling of deep gaps created by giant planets in protoplanetary disks", *Publications of the Astronomical Society of Japan* 69, 97(18pp), 2017, 査読あり. DOI:10.1093/pasj/psx114
 7. K. K. Tanaka, J. Diemand, H. Tanaka, and R. Angelil, "Analyzing multistep homogeneous nucleation in vapor-to-solid transitions using molecular dynamics simulations", *Physical Review E* 96, 022804(9pp), 2017, 査読あり. DOI:10.1103/PhysRevE.96.022804
 8. T. Ueda, H. Kobayashi, T. Takeuchi, D. Ishihara, T. Kondo, and H. Kaneda, "Size Dependence of Dust Distribution around the Earth Orbit", *Astrophysical Journal* 153, 232(11pp), 2017, 査読あり. DOI:10.3847/1538-3881/aa5ff3
 9. H. Kobayashi, H. Tanaka, S. Okuzumi, "From Planetesimals to Planets in Turbulent Protoplanetary Disks. I. Onset of Runaway Growth", *Astrophysical Journal* 817, 105(10pp), 2016, 査読あり. DOI:10.3847/0004-637X/817/2/105
 10. S. Okuzumi, M. Momose, S. Sirono, H. Kobayashi, H. Tanaka, "Sintering-induced Dust Ring Formation in Protoplanetary Disks: Application to the HL Tau Disk", *Astrophysical Journal* 821, 82(24pp), 2016, 査読あり. DOI:10.3847/0004-637X/821/2/82
 11. N. Hosono, T. R. Saitoh, J. Makino, H. Genda, S. Ida, "The Giant Impact Simulations with Density Independent Smoothed Particle Hydrodynamics", *Icarus* 271, 131-157, 2016, 査読あり. DOI:10.1016/j.icarus.2016.01.036
 12. T. Tanigawa and H. Tanaka, "Final Masses of Giant Planets. II. Jupiter Formation in a Gas-Depleted Disk", *Astrophysical Journal* 823, 48(14pp), 2016, 査読あり. DOI:10.3847/0004-637X/823/1/48
 13. R. Tazaki, H. Tanaka, S. Okuzumi, A. Kataoka, and H. Nomura, "Light scattering by fractal dust aggregates: I. Angular dependence of scattering", *Astrophysical Journal* 823, 70(14pp), 2016, 査読あり. DOI:10.3847/0004-637X/823/2/70
 14. K. D. Kanagawa, T. Muto, H. Tanaka, T. Tanigawa, T. Takeuchi, T. Tsukagoshi, and M. Momose, "Mass constraints for a planet in a protoplanetary disk from the gap width", *Publications of the Astronomical Society of Japan* 68, 43(7pp), 2016, 査読あり. DOI:10.1093/pasj/psw037
 15. K. K. Tanaka, H. Tanaka, R. Angelil, and J. Diemand, "Reply to 'Comment on 'Simple improvements to classical bubble nucleation models''", *Physical Review E* 94, 026802(4pp), 2016, 査読あり. DOI:10.1103/PhysRevE.94.026802
 16. H. Genda, T. Fujita, H. Kobayashi, H. Tanaka, Y. Abe, "Resolution Dependence of Disruptive Collisions between Planetesimals in the Gravity Regime", *Icarus* 262, 58-66, 2015, 査読あり. DOI:10.1016/j.icarus.2015.08.029
 17. K. D. Kanagawa, T. Muto, H. Tanaka, T. Tanigawa, T. Takeuchi, T. Tsukagoshi, M. Momose, "Mass Estimates of a Giant Planet in a Protoplanetary Disk from the Gap Structures", *Astrophysical Journal Letter* 806, L15(6pp), 2015, 査読あり. DOI:10.1088/2041-8205/806/1/L15
 18. H. Genda, H. Kobayashi, E. Kokubo, "Warm Debris Disks Produced by Giant Impact During Terrestrial Planet Formation", *Astrophysical Journal* 810, 136(8pp), 2015, 査読あり. DOI:10.1088/0004-637X/810/2/136
 19. 玄田英典, "SPH 法による衝突数値計算", *遊・星・人*, 24, 191-200, 2015, 査読あり. <https://www.wakusei.jp/book/pp/2015/20>

- 15-3/2015-3-191.pdf
- 20.H. Kimura, K. Wada, H. Senshu, H. Kobayashi, "Cohesion of Amorphous Silica Spheres: Toward a Better Understanding of Coagulation Growth of Silicate Dust Aggregates", *Astrophysical Journal* 812, 67(12pp), 2015, 査読あり . DOI:10.1088/0004-637X/812/1/67
- 21.和田浩二, "離散要素法による衝突の数値シミュレーションの歩み", *遊・星・人*, 24, 201-213, 2015, 査読あり . <https://www.wakusei.jp/book/pp/2015/2015-3/2015-3-201.pdf>
- 22.M. Ogihara, H. Kobayashi, S. Inutsuka, T. Suzuki, "Formation of terrestrial planets in disks evolving via disk winds and implications for the origin of the solar system's terrestrial planets", *Astronomy & Astrophysics* 579, A65(8pp), 2015, 査読あり . DOI:10.1051/0004-6361/201525636
- 23.H. Kobayashi, "Orbital evolution of planetesimals in gaseous disks", *Earth, Planet and Space* 67, 60(7pp), 2015, 査読あり. DOI:10.1186/s40623-015-0218-y
- 24.Citron, R. I., Genda, H. and Ida, S., "Formation of Phobos and Deimos via a giant impact", *Icarus* 252, 334-338, 2014, 査読あり . DOI:10.1016/j.icarus.2015.02.011
- 25.田中秀和, "粒子衝突過程を分子動力学計算で観る", *アンサンブル* 17, 14-19, 2014, 査読なし . DOI:10.11436/mssj.17.14
- 26.A. Johansen, J. Blum, H. Tanaka, C. Ormel, M. Bizzarro, and H. Rickman, "The Multifaceted Planetesimal Formation Process", *Protostars and Planets* 6, 547-570, 2014, 査読あり . DOI:10.2458/azu_uapress_9780816531240-ch024
- 27.M. Nagasawa, K. K. Tanaka, H. Tanaka, T. Nakamoto, H. Miura, and T. Yamamoto, "Revisiting Jovian-Resonance Induced Chondrule Formation", *Astrophysical Journal Letters* 794, L7(5pp), 2014, 査読あり . DOI:10.1088/2041-8205/794/1/L7
- 28.A. Kataoka, S. Okuzumi, H. Tanaka, and H. Nomura, "Opacity of fluffy dust aggregates", *Astron. & Astropys.* 568, A42(15pp), 2014, 査読あり . DOI:10.1051/0004-6361/201323199
- 29.Sekine, Y., Genda, H., Muto, Y., Sugita, S., Kadono, T. and Matsui, T., "Impact chemistry of methanol: Implications for volatile evolution on icy satellites and dwarf planets, and cometary delivery to the Moon", *Icarus* 243, 39-47, 2014,

査読あり

DOI:10.1016/j.icarus.2014.08.034

- 30.H. Kobayashi, T. Loehne, "Debris disc formation induced by planetary growth", *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 442, 3266-3274, 2014, 査読あり . DOI: 10.1093/mnras/stu1073
- 31.M. Ogihara, H. Kobayashi, S. Inutsuka, "N-body Simulations of Terrestrial Planet Formation under the Influence of a Hot Jupiter", *Astrophysical Journal* 787, 172(16pp), 2014, 査読あり . DOI:10.1088/0004-637X/787/2/172
- 32.Kadono, T., Suzuki, A. I., Wada, K., Mitani, N. K., Yamamoto, S., Arakawa, M., Sugita, S., Haruyama, J., and Nakamura, A. M., "Crater-ray formation by impact-induced ejecta particles", *Icarus* 250, 215-221, 2014, 査読あり . DOI:10.1016/j.icarus.2014.11.030
- 33.Yamamoto, T., Kadono, T., and Wada, K., "An Examination of Collisional Growth of Silicate Dust in Protoplanetary Disks", *Astrophysical Journal Letter* 783, L36(4pp), 2014, 査読あり . DOI:10.1088/2041-8205/783/2/L36

【学会発表】(計 30 件)

1. R. Suetsugu, H. Tanaka, H. Kobayashi, H. Genda, "Collisions between planetesimals in the gravity regime with iSALE code", 49th Lunar and Planetary Science Conference, 2018
2. 田中秀和, "宇宙ダストの成長を分子動力学計算で観る", 「自然科学における階層と全体」シンポジウム(招待講演), 2017年
3. 田中秀和, "氷マントルダストのサイズ分布とダスト付着成長への影響", 日本惑星科学会 2017年秋季講演会, 2017年
4. 田中秀和, "氷マントルダストのサイズ分布とダスト付着成長への影響", 日本天文学会 2017年秋季年会, 2017年
5. 田中秀和, "氷マントルダストのサイズ分布と微惑星形成への影響", 基研研究会「原始惑星系円盤」, 2017年
6. H. Kobayashi, "Gas in Debris Disks", *Cosmic Dust X*, 2017年
7. H. Kobayashi, "Debris disc formation induced by planetary growth", Workshop on gaseous debris disks(招待講演), 2017年
8. H. Kobayashi, "From planetesimals to planets in a turbulent disk", 10th RESCEU/Planet2 Symposium Planet Formation around Snowline(招待講演), 2017
9. H. Genda, "Pluto 's Elongated Dark Regions Formed by the Charon-Forming Giant Impact",

- Multi-scale Planetary Science WS(招待講演), 2017
10. H. Genda, "Pluto ' s Elongated Dark Regions Formed by the Charon-Forming Giant Impact", European Geosciences Union General Assembly 2017(招待講演), 2017
 11. 玄田英典, "巨大天体衝突", 第49回天体力学N体力学研究会(招待講演), 2017年
 12. 末次竜, 田中秀和, 小林浩, 玄田英典, "iSALE による重力支配域での微惑星の衝突計算", 日本惑星科学会 2017 年秋季講演会, 2017年
 13. H. Kobayashi, "From Planetesimals to Planets in Turbulent Protoplanetary Disks. I. Onset of Runaway Growth", Exoplanets and Disks: Their Formation and Diversity III, 2016
 14. 玄田英典, "惑星形成シミュレーションの量的・質的向上に向けて", 天文学会 2016 年春季年会(招待講演), 2016年
 15. H. Tanaka and T. Tanigawa, "Jupiter formation in a gas-depleted disk", Protoplanetary Discussions, 2016年
 16. H. Tanaka, K. Kanagawa, M. Koji, "Signs on Protoplanetary Disks Created by Planet Fomation Processes", Japan Geoscience Union Meeting 2016(招待講演), 2016年
 17. H. Tanaka, "Dust growth in protoplanetary disks and reexamination of the particle interaction model", Cosmic Dust IX, 2016年
 18. H. Tanaka, "Dust Collision Simulation and Reexamination of Particle Interaction Models", Japan-Germany Planet & Disk Workshop(招待講演), 2016
 19. 田中秀和, "Dust Growth and Planetesimal Formation in Protoplanetary Disks", 平成26年度系外惑星大研究会, 2015年
 20. H. Tanaka, "Planetesimal formation via dust sticking", Protoplanetary Disk Dynamics and Planet Formation, 2015
 21. K. Wada, "Collisions of dust aggregates consisting of particles with a size distribution", Protoplanetary Disk Dynamics and Planet Formation, 2015
 22. K. Wada, and H. Kimura, "Ejecta mass produced at collisions of monomers against large dust aggregates", Cosmic Dust VIII, 2015
 23. H. Kobayashi, "Planet Formation and Debris Disk", Cosmic Dust VIII, 2015
 24. 小林浩, "衝突過程による惑星形成", 理論懇シンポジウム 2015(招待講演), 2015年
 25. H. Tanaka, "Fluffy Dust Growth and Planetesimal Formation", The 2014 German-Japanese Meeting on

- Exo-Planets and Their Formation, 2014
26. H. Genda, "Collisions in Extrasolar System", The 2014 German-Japanese Meeting on Exo-Planets and Their Formation, 2014
 27. H. Kobayashi, "Importance of Collisional Fragmentation in Planet Formation", The 2014 German-Japanese Meeting on Exo-Planets and Their Formation, 2014
 28. 和田浩二, 田中秀和, 小林浩, 奥住聡, 木村宏, "モノマーサイズ分布のあるダストアグリゲイトの衝突とイジェクタ量", 日本惑星科学会 2014 年秋季講演会, 2014
 29. H. Kobayashi, H. Genda, E. Kokubo, "Hot debris disk foramtion caused by giant impacts for terrestrial planet formation", The 7th meeting on Cosmic Dust, 2014
 30. K. Wada, "Ejecta Mass at Collisions of Dust Aggregates", The 7th meeting on Cosmic Dust, 2014

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田中 秀和 (TANAKA, Hidekazu)
 東北大学・大学院理学研究科・教授
 研究者番号: 00282814

(2) 研究分担者

和田 浩二 (WADA, Koji)
 千葉工業大学・惑星探査研究センター・
 主席研究員
 研究者番号: 10396856

小林 浩 (KOBAYASHI, Hiroshi)
 名古屋大学・大学院理学研究科・助教
 研究者番号: 40422761

玄田 英典 (GENDA, Hidenori)
 東京工業大学・地球生命研究所・准教授
 研究者番号: 90456260

(3) 連携研究者

末次 竜 (SUETSUGU, Ryo)
 産業医科大学・医学部・助教
 研究者番号: 40737334

(4) 研究協力者

なし