

令和元年6月17日現在

機関番号：32503

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K05273

研究課題名(和文) イジェクタカーテンの光散乱モデルの構築

研究課題名(英文) Construction of the light scattering model of ejecta curtain emerging at impact

研究代表者

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題においては、宇宙衝突実験におけるイジェクタカーテンの観測からどのような情報が得られるか？に答えるべくその光散乱モデルを構築した。具体的には、イジェクタカーテンの構造モデルの構築・光散乱計算・実験による検証、を相互に行うことで、イジェクタカーテンが太陽光を散乱した際の輝度分布が、イジェクタカーテンの形状、粒子サイズ分布、粒子数密度分布、粒子の散乱関数、太陽位相角、といったパラメータにどう依存するかを明らかにした。この成果は、はやぶさ2衝突実験をはじめとした今後の宇宙衝突実験への応用が期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果は、はやぶさ2の衝突実験をはじめ今後の宇宙衝突実験を伴う惑星探査計画において、イジェクタカーテンのその場観測の重要性を改めて意義付けるものであり、衝突対象天体の情報をより適切に引き出すことを可能とするものである。

研究成果の概要(英文)：In this study, we constructed a light scattering model of ejecta curtain emerging at impact to obtain precious information on target bodies from observation of the ejecta curtain. Conducting numerical simulations and laboratory experiments of impact cratering and light scattering, we revealed the dependence of light scattering on the form and structure of ejecta curtain, the particle size distribution, the particle number density distribution, the scattering phase function of ejecta particles, the solar phase angle, and so on. The products of this study is expected to be applied for the future planetary missions with impact experiments in space.

研究分野：惑星科学

キーワード：天体衝突 イジェクタ イジェクタカーテン 固体惑星探査 光散乱

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

イジェクタカーテンの形成とその形状についてはこれまで室内衝突実験や数値計算によって研究されてきた。加えて、近年では惑星探査においても衝突体を天体に打ち込むといういわば宇宙衝突実験が盛り上がりを見せている。例えば、Tempel-1 彗星へ相対速度 10km/s で衝突機を衝突させた NASA の DeepImpact 計画、日本の小惑星探査機「はやぶさ 2」では 2km/s で衝突体を小惑星へ衝突させる計画があり(これは見事に成功した)、さらに米欧共同で小惑星の衛星へ 6km/s で衝突機を衝突させ観測する AIDA 計画が動き出している。このような宇宙衝突実験の際に生じるイジェクタカーテンの観測と抽出される諸性質について検討する必要性が高まっている。イジェクタカーテンの観測においては、太陽光に照らされたその散乱光を測定することになる。しかしながら、研究開始当初は、イジェクタカーテンの散乱光測定に与えるカーテン構造や構成粒子のパラメータ依存性が明らかになっていなかった。

2. 研究の目的

本研究課題は、宇宙衝突実験におけるイジェクタカーテンの観測からどのような情報が得られるか?に答えるべくその光散乱モデルを構築しようというものである。そのために、イジェクタカーテンの構造モデルの構築・光散乱計算・実験による検証を相互に行うことで、イジェクタカーテンが太陽光を散乱した際の輝度分布がパラメータにどう依存するかを明らかにする。具体的には、イジェクタカーテンの形状、粒子サイズ分布、粒子数密度分布、粒子の散乱関数、太陽位相角、といったパラメータ依存性を明らかにする。

3. 研究の方法

イジェクタカーテンの光散乱モデル構築にあたっては 3 つの柱でそれぞれ進める。各結果を相互参照しながら精度を上げてモデル構築を行っていく。具体的には、以下の方法で行う。

- イジェクタカーテンの形状や粒子数密度分布などを明らかにするために、DEM コードによる数値計算による衝突シミュレーションを行う。
- イジェクタカーテンの光散乱が各パラメータに対してどう依存するかを、光子のモンテカルロ計算によるイジェクタカーテンの光散乱計算を行う。
- 衝突時に生じるイジェクタカーテンの構造等を理解すべく、室内衝突実験を行う。

4. 研究成果

(1) 衝突数値計算によるイジェクタカーテンの構造モデル

数値的に 40 万個程度の粒子を堆積させることで衝突標的をつくり、その標的に弾丸粒子を衝突させることでクレータ形成・イジェクタ放出過程を再現した。結果として、イジェクタカーテンの粒子数密度は根本から先端に行くにしたがって減ることが確かめられ、イジェクタカーテンの光学的厚さをイジェクタカーテンの根本から計測した高さの関数としてモデル化した(図 1)。

(2) イジェクタカーテンの光散乱計算

光子一つ一つの散乱を追跡するモンテカルロ計算によって、解析解に基づく簡単な逆円錐形状の厚さが均一な場合と光学的厚さが高さとともに減少する場合について、イジェクタカーテンに太陽光(波長 550nm で代表させる)を照射したときの散乱光による輝度を算出した。イジェクタカーテンの光学的厚さ、イジェクタ粒子の散乱位相関数、およびイジェクタカーテンの傾きをパラメータとし、それらの値を様々に変化させることで輝度値がどう変化するかを見た結果、光学的厚さもさることながら散乱位相関数の寄与が大きく、さらにイジェクタカーテンの傾きが重要であるという傾向が判明した(図 2)。

さらにイジェクタカーテンの光散乱の数値計算を進め、とくにイジェクタ粒子がアグリゲイトである場合を考慮して計算を進めた。構成粒子をアグリゲイトとすることで、イジェクタカーテンの輝度に影響があると考えられている。本研究では T-マトリックス法によるアグリゲイトの光散乱計算コードを改良することで、計算速度の高速化が進み、大きなアグリゲイトの光散乱特性を計算することに成功した。これを用いて輻射輸送計算することで、イジェクタカーテン輝度の計算に従来の Henyey-Greenstein 散乱関数を用いると桁で過小評価することが示唆される結果となった。

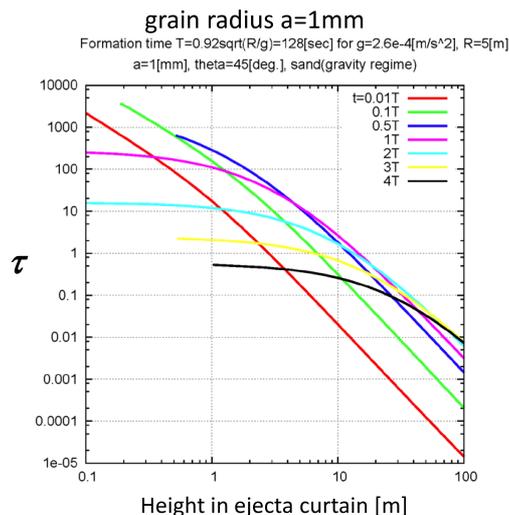


図 1: イジェクタカーテンの光学的厚さを形成時間別にイジェクタカーテンの高さの関数として表示したもの。

(3) 室内衝突実験によるイジェクタカーテンの理解

神戸大学に導入済みの縦型式ガス銃によって弾丸をガラスビーズや自然の砂で構成された標的に衝突させ、衝突クレータおよびイジェクタカーテンを形成し、これに模擬太陽光を光源として照射し、ハイスピードカメラで撮像した。これにより、標的の表面の輝度と比べてイジェクタカーテンの輝度は最大で約 1.2 倍程度になるという結果が得られた。

また、模擬レゴリスである珪砂粒子層や、多孔質レゴリス層を模擬した空隙率 50-70%のシリカ微粒子層、それから引っ張り強度 1 kPa までの弱い基盤を模擬した珪砂-多孔質石膏混合層へのクレータ形成実験を実施し、イジェクタ放出速度分布のスケール則もまとめることができた。

(4) 応用

本研究課題で得られた知見に基づいて、応用例として小惑星 (3200) Phaethon 表層からのイジェクタをモデル化した。さらに、本研究課題で得られたモデルは、「はやぶさ 2」衝突装置によって形成された小惑星リュウグウ上の人工クレータと撮像されたイジェクタカーテン(図 3)の解釈への適用など、今後有効に活用されると期待される。

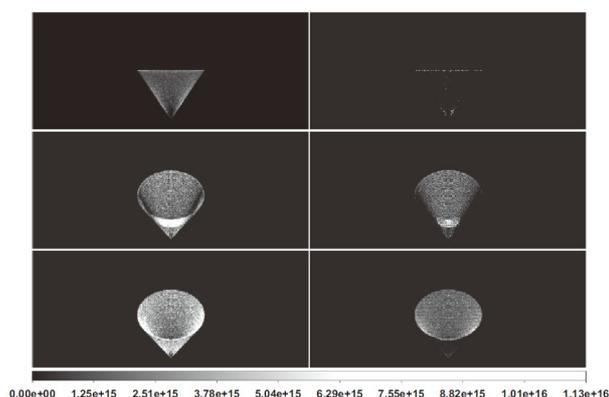


図 2 : 様々な角度・光学的厚さのイジェクタカーテンにおける光散乱計算の結果。左は光学的厚さが 0.314 の場合、右は 314 の場合。また輝度値の単位は $\text{photon}/\text{m}^2/\text{s}/\text{sr}/\text{\AA}$ for 550 nm.

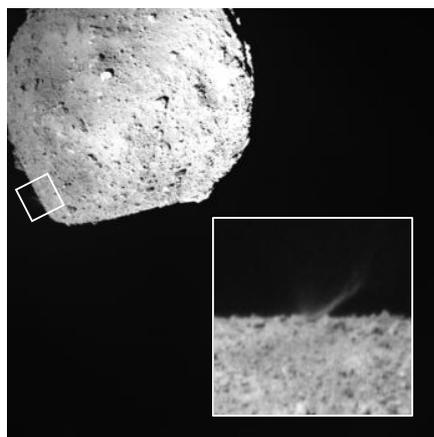


図 3 : 分離カメラがとらえた「はやぶさ 2」衝突実験で生じたイジェクタカーテン (image credit: JAXA, Kobe Univ., Chitech, Kochi Univ., UOEH) .

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 22 件)

Watanabe S., ... Wada, K. (19 番目), ... Arakawa, M. (33 番目) et al. (著者 88 名), Hayabusa2 arrives at the carbonaceous asteroid 162173 Ryugu - A spinning top-shaped rubble pile. *Science*, 364, 268-272, 2019. 査読有 .

<http://doi.org/10.1126/science.aav8032>

Wada K., et al. (著者 34 名), Ryugu before the Hayabusa2 encounter, *Progress in Earth and Planetary Science*, 5, 82, 2018, 査読有 .

<http://doi.org/10.1186/s40645-018-0237-y>

Kimura, H., High Radiation Pressure on Interstellar Dust Computed by Light-scattering Simulation on Fluffy Agglomerates of Magnesium-silicate Grains with Metallic-iron Inclusions, *The Astrophysical Journal*, 839, L23, 2017, 査読有 , 10.3847/2041-8213/aa6c2d

Arakawa, M., Wada, K., et al. (著者 22 名), Scientific Objectives of Small Carry-on Impactor (SCI) and Deployable Camera 3 Digital (DCAM3-D): Observation of an Ejecta Curtain and a Crater Formed on the Surface of Ryugu by an Artificial High-Velocity Impact. *Space Science Reviews*, 208, 187-212, 2017, 査読有 ,

<http://doi.org/10.1007/s11214-016-0290-z>

Tsujido, S., Arakawa, M., Suzuki, A. I., Yasui, M., Ejecta velocity distribution of impact craters formed on quartz sand: Effect of projectile density on crater scaling law, *Icarus*, 262, 79-92, 2015, 査読有 , 10.1016/j.icarus.2015.08.035

P. Shalima, K. Wada, H. Kimura, Ejecta curtain radiative transfer modeling for probing its geometry and dust optical properties, *Planet. Space Sci.*, 116, 39-47,

[学会発表](計 42 件)

Wada, K., Where to shoot SCI, *1st International Regolith Science Group & Multi-scale Asteroid Science Group joint meeting*, 2018.

Kimura, H., Kobayashi, M., Wada, K., Arai, T., Hirai, T., Yoshida, F., Ishibashi, K., Hong, P., Preliminary Results of Numerical Simulation on DESTINY+/DDA's Detection of Dust Particles Ejected from Asteroid 3200 Phaethon by Bombardments of Interplanetary Dust, *Dusty Visions 2018*, 2018.

Kimura, H., Kanada, Y., Matsui, T., High Performance Computing of Light Scattering by Aggregate Dust Particles of Organic-rich Submicron Grains with Improvements to the MSTM Code., *Cosmic Dust*, 2018.

Arakawa, M., Experimental study on scaling laws for high-velocity impact phenomena on water ice targets, *9th Workshop on Catastrophic Disruption in the Solar System*, 2018.

荒川政彦, 小型搭載型衝突装置と分離カメラを用いたリュウグウ上での宇宙衝突実験, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, 2018.

Koji Wada and Hayabusa2 SCI/DCAM team, Small Carry-on Impactor Elucidates the Nature of Craters and the Evolution of Solar System. *JpGU-AGU Joint Meeting 2017*, 2017.

P. Shalima, Koji Wada, and Hiroshi Kimura, A radiative transfer model of an impact-induced ejecta curtain consisting of dust aggregates, *Cosmic Dust*, 2017.

松榮一真, 荒川政彦, 保井みなみ, 辻堂さやか, 長谷川直, クレーターイジェクタのスケール則に対する衝突速度依存性, 日本惑星科学会 2017 年度秋季講演会, 2017.

Wada, K., Cratering by SCI: as a means for estimating surface properties of Ryugu, *1st International Regolith Science Group Workshop*, 2016.

小川和律, 荒川政彦, 和田浩二, 白井慶, 本田理恵, 石橋高, 澤田弘崇, 門野敏彦, 坂谷尚哉, 中澤暁, 早川基, Hayabusa2/DCAM3 による衝突実験観測, 「天体の衝突物理の解明」研究会(XI), 2015.

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：荒川 政彦

ローマ字氏名：ARAKAWA, Masahiko

所属研究機関名：神戸大学

部局名：理学研究科

職名：教授

研究者番号(8桁)：10222738

研究分担者氏名：木村 宏

ローマ字氏名：KIMURA, Hiroshi

所属研究機関名：千葉工業大学

部局名：惑星探査研究センター

職名：研究員

研究者番号(8桁)：10400011

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。