

平成 30 年 6 月 4 日現在

機関番号：12601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2016～2017

課題番号：16H06719

研究課題名(和文) 小天体衝突による地球型惑星大気散逸についての実験的研究

研究課題名(英文) Experimental study on atmospheric escape from terrestrial planets caused by asteroid impacts

研究代表者

巽 瑛理 (Tatsumi, Eri)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・特任研究員

研究者番号：60623197

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は小惑星や彗星などの小天体が地球型惑星に衝突した際の大気散逸を明らかにすることを目的としている。主に次の2つのポイントで研究を進めた：1) レーザー照射実験による衝突蒸気雲運動の観測、2) 探査機の直接観測による小天体の力学進化の解明。蒸気雲の可視化のためにシュリーレン法を用いた高速度観測装置の開発を行なった。衝突閃光や感度の問題があり、改良が必要である。地球型惑星への主な衝突体である小さな小惑星の質量分布を明らかにするため、衝突実験を行い小さな小惑星の質量損失率を求めることができた。さらに、はやぶさの探査画像から小惑星帯から地球近傍への小惑星の移動の観測的証拠を発見することができた。

研究成果の概要(英文)：The goal of this study is to evaluate the physical effect of impacts of small bodies, such as asteroids and comets. There are two sub-theme in this study: 1) Laser ablation experiment to observe the motion and interaction of vapor cloud and atmosphere, 2) Asteroid mass evolution based on spacecraft observation. We used Schlieren method for visualization of vapor and atmosphere. However, due to impact luminescence and low sensitivity of detector, we need to develop our observation method to detect the motion of vapor. On the other hand, the mass evolution of small asteroids, which are too faint to observe from ground, as impactors to terrestrial planets are also important. We conducted impact experiments and derived new crater scaling law for such small asteroids, which can be a clue for mass evolution of small asteroids in last stage. Moreover, from Hayabusa spectral and morphological analyses, the first direct footprint of transition from the main belt to near Earth was found.

研究分野：宇宙惑星科学

キーワード：小惑星 衝突実験 探査 イトカワ

1. 研究開始当初の背景

地球型惑星の大気は個々に特徴的な進化を遂げている。未だ、地球型惑星大気の個性を完全に説明できる理論はない。大気進化を理解することは地球の水の起源とも直結する問題であり、系外惑星での生命存在可能性の制約にも非常に重要である。大気散逸の有力なメカニズムの一つとして天体衝突が考えられる。惑星形成時の原始惑星衝突(ジャイアントインパクト)による大気散逸の影響は Genda and Abe (2003, 2005)で見積もられており、一回の衝突では半分以上の大気が残ることが示されている。それに対して、小規模な衝突は全球的な影響を及ぼさないため、ほとんど大気は剥ぎ取られないと思われていた。しかし、近年、数 km 程度の天体でも一回あたりの散逸量は小さいが、衝突頻度が桁が多いため、効率的に大気を散逸できることが示唆された[Schlichting et al., 2015]。巨大衝突は惑星形成初期には多くあったが、その後現在に至るまで、比較的小規模の衝突が定常的に起こっている。そのため、小天体の衝突蒸気雲による大気散逸・集積条件は、惑星大気の後期進化過程を支配する可能性があるという着想を得た。

2. 研究の目的

本研究は、天体衝突による大気散逸及び集積の物理機構を実験的に解明することを目的とする。天体衝突は太陽系形成初期から普遍的に見られる現象である。惑星大気の希薄度は Knudsen 数 (Kn : 平均自由行程/代表長)が 0 の流体極限から無限大の宇宙空間まで連続的に変化する。天体衝突時に発生する高温高压の蒸気雲は膨張と共に周辺大気の Kn 数が変化し膨張速度が大きく変化する。大気中の蒸気雲膨張速度は、大気の散逸と集積条件に直接寄与する重要な物理量である。特に、天体衝突による大気剥ぎ取り量は Kn が 1 程度の大气上端部での流れ場で決定される。しかし、天体衝突蒸気雲による大気散逸について希薄な大気中の力学的挙動について調べた研究はない。大気が徐々に希薄になっていく効果を考慮すると、散逸効率が 1 桁以上も変わり、地球型惑星大気進化の描像を大きく変える可能性がある。本研究では衝突後の蒸気雲の運動と、衝突体の質量進化に着目し、小天体衝突による大気散逸を明らかにする。

3. 研究の方法

本研究内では2つのトピックについて平行に研究を進めている。(1) 衝突蒸気雲の力学的挙動の解明、(2) 直接観測から得られる衝突小天体の力学進化の解明である。

(1) 衝突蒸気雲の可視化

天体模擬物質をレーザーでアブレーションすることにより蒸気雲を発生させる。蒸気雲の観測はシュリーレン法を用いて可視化する。図1はレーザー照射実験の概略図である。

シュリーレン法

シュリーレン法は密度による屈折率の違いを利用した可視化方法である。密度差に敏感であるため、蒸気雲と周辺大気の境界を可視化できる。

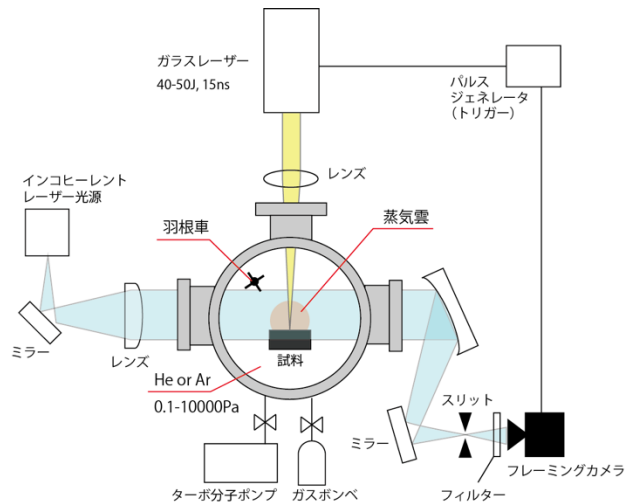


図1 実験装置概略

(2) 直接観測からの小天体力学進化の制約

地球型惑星への主な衝突体となる小惑星の進化、および質量分布は本研究において常に重要である。小さな小惑星は地球近傍にも多く存在していることがわかっているが、小さな小惑星は望遠鏡での観測が困難であり、どのような現象により進化しているかは理論的な計算などはあるが、直接観測からは詳しく調べられていない。そこで本研究では、はやぶさの可視画像データを用いて小惑星進化について議論する。はやぶさのイトカワ直接観測から小天体の詳細な画像が得られた。小惑星表面は太陽風や微小隕石衝突による宇宙風化を受けていると考えられている。宇宙風化を受けることにより露出時間に応じて天体表面の反射スペクトルが変化することが知られている。宇宙風化という指標を用いて、小惑星の衝突と関連した力学進化を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 実験装置の開発

シュリーレン法による高速度観測用実験装置の開発を行った。静止画ではシュリーレン法から密度差が観測できた。

バサルト岩への高速衝突実験を行なった。高温高压のために衝突閃光が強く、衝突直後の観測が非常に困難であることがわかった。今後、レーザーアブレーションによる実験を行うことを考えている。衝突蒸気雲は非常に高速で運動するため、高フレームレート、高感度のカメラが必要となる。衝突蒸気雲については、今後観測精度を高めていきたい。

(2) 直接観測による小惑星の軌道進化の証拠

はやぶさのサンプルリターンによって、

イトカワの組成が普通コンドライトであることが明らかになった。普通コンドライトは宇宙風化に伴って反射率の低下、可視スペクトルの赤化が起こることが知られており、探査機はやぶさの可視分光カメラ (AMICA) によって、イトカワの表面が比一様な宇宙風化を受けたことが示唆された [Ishiguro et al., 2007]。さらにイトカワの可視スペクトルを主成分分析すると、第一主成分は宇宙風化を表していることが示唆された [Koga et al., 2018]。宇宙風化度は天体表面の露出時間と直接的な関係があり、天体表面での物理過程を明らかにするために重要な指標である。まず、観測画像から各地点での反射スペクトルを求めるためには、照明、観測条件を補正する測光補正を行う必要がある。本研究では初めて、探査画像を用いてイトカワの測光特性を明らかにし、測光補正を可能にした [Tatsumi et al., 2018]。本研究では、イトカワの衝突起原と考えられる円形窪地 [Hirata et al., 2009] の宇宙風化度を反射スペクトルから評価し相対的なクレーターの形成年代を明らかにした。クレーターの形成率を求め、イトカワの軌道変化とメインベルト、地球近傍滞在時間について明らかにした。これは、小惑星がメインベルトから地球近傍へ移動するという初めての観測的な証拠である (図 2)。

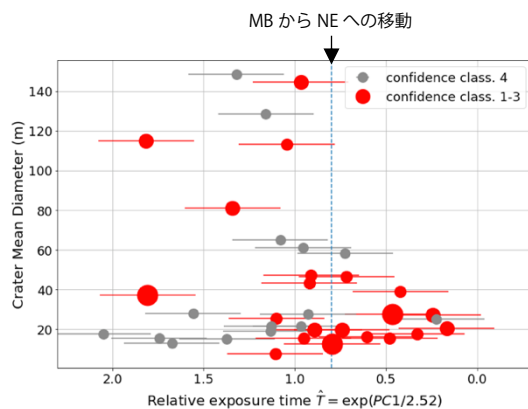


図 2 イトカワ表面のクレーター相対年代分布。衝突頻度の変化から、イトカワがメインベルトから地球近傍へ移動したことが示唆された。

(3) 実験による小惑星の質量進化

小惑星の質量進化は地球型惑星への衝突体の条件を知る上で非常に重要である。また、近年の研究では小さな小惑星の多くはラブルパイル天体であることが示唆されている。つまり、地球型惑星へ降り注いでくる多くの天体はラブルパイル天体である可能性が高い。本研究の中で、高速衝突実験により、ラブルパイル小惑星の衝突クレーターによる掘削効率を明らかにした [Tatsumi and Sugita, 2018]。ラブルパイル天体でのクレーター掘削効率

は、表面が比較的大きな岩塊に覆われていたとしても、一枚岩の天体よりも一桁程度高い。一方で、ラブルパイル天体の表面は岩塊で覆われており、岩塊の存在によりクレーター掘削効率が落ちる効果も明らかになった。岩塊が小さい場合には、小惑星は非常に早い速度で消滅してしまうが、表面の岩塊が大きい場合には質量損失率が落ちる。このことはイトカワの表面に小さなクレーターが少ないという観測事実と整合的である。

さらに、岩塊衝突後のイジェクタの運動を計測した。イジェクタの速度を計測することにより、脱出速度を超えるイジェクタ量の評価を行うことができる。岩塊の破壊エネルギーと衝突体の運動エネルギーの比によりイジェクタの放出の様子やクレーター形状が大きく変化することがわかった。特に、運動エネルギーが破壊エネルギーの 10 倍程度になるとクレーターアスペクト比が砂にできるクレーター程度になり、イジェクタの運動も流体的に運動量保存に従う形になる (図 3)。このようなクレーター形成が小惑星の衝突破壊の終末期を支配していると考えられる。

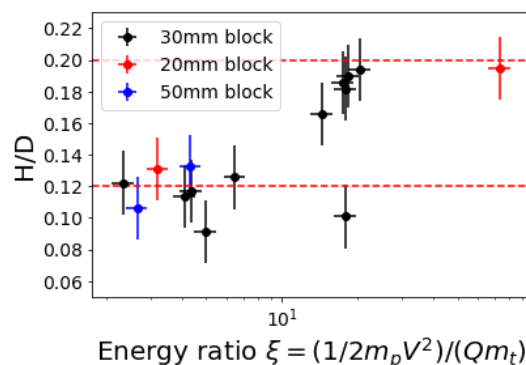


図 3 衝突体の運動エネルギーと岩塊の破壊エネルギー比に対するクレーターアスペクト比。エネルギー比が 10 程度のところでアスペクト比が大きく変化している。これよりも運動エネルギーが高いところでは、非常に高いクレーター掘削効率。

(4) 今後の展望

本研究では小惑星の進化及び、小惑星の地球型惑星の大気進化への寄与を明らかにすることを目的としていた。現状では小惑星の進化について大きく研究を進めることができたが、大気への寄与は実験装置開発を進めていく必要がある。また、小惑星質量損失レートから小惑星質量分布進化を明らかにし、定量的に大気散逸について議論したい。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① Sumire C. Koga, Seiji Sugita,

Shunichi Kamata, Ishiguro Masateru, Takahiro Hiroi, Eri Tatsumi, Sho Sasaki, Spectral decomposition of asteroid Itokawa based on principal component analysis, *Icarus*, 査読有, 2018, 299, 386-395, doi:10.1016/j.icarus.2017.08.016.

- ② Eri Tatsumi, Seiji Sugita, Cratering efficiency on coarse-grain targets: Implications for the dynamical evolution of asteroid 25413 Itokawa, *Icarus*, 査読有, 2018, 300, 227-248, doi:10.1016/j.icarus.2017.09.004.
- ③ Eri Tatsumi, Deborah Doming, Naru Hirata, Kitazato Kohei, Faith Vilas, Susan Lederer, Paul R. Weissman, Stephan C. Lowry, Seiji Sugita, VIS-NIR disk-integrated photometry of asteroid 25413 Itokawa around opposition by AMICA/Hayaubsa, *Icarus*, 査読有, 2018, 311, 175-196, doi:10.1016/j.icarus.2018.04.001.

[学会発表] (計9件)

- ① Eri Tatsumi, Seiji Sugita, Toru Koyama, Hiroaki Kamihoshihara, Hiroyuki Sato, Manabu Yamada, Hidehiko Suzuki, Shingo Kameda, Naoya Tanabe, Keiichi Moroi, Marika Ishida, Tomokatsu Morota, Naoya Sakatani, Yasuhiro Yokota, Kazuo Yshioka, Chikatoshi Honda, Rie Honda, Sensitivity calibration of ONC-T/Hayabusa2 and importance of UV observation on Ryugu, JpGU, 2018, Chiba/Japan.
- ② Eri Tatsumi, Seiji Sugita, Itokawa's orbital transition from main belt to near-Earth orbit as derived from spectral ages of quasi-circular depressions on Itokawa, Lunar and Planetary Science Conference, 2018/3/21, #1945, TX/USA.
- ③ Eri Tatsumi, Deborah Domingue, Naru Hirata, Kohei Kitazato, Faith Vilas, Susan M. Lederer, Paul R. Weissman, Stephan C. Lowrys, Seiji Sugita, Regolith properties on the S-type asteroid Itokawa estimated from photometrical measurements, Lunar and Planetary Science Conference, 2018/3/20, #1920, TX/USA.
- ④ 巽瑛理、杉田精司、Olivier S. Barnouin、長谷川直、岩塊衝突によるイジェクタ軌跡の変化、宇宙科学に関する室内実験シンポジウム、2018/2/27、神奈川。
- ⑤ 巽瑛理、ラブルパイル小惑星でのクレーター形成と緩和過程、衝突研究会、2017、兵庫。
- ⑥ Eri Tatsumi, Seiji Sugita, Space

weathering of quasi-circular depressions on Itokawa and its orbital transition, JpGU-AGU joint meeting, 2017/5/24, Chiba/Japan.

- ⑦ Eri Tatsumi, Seiji Sugita, New crater scaling law for coarse-grained targets based on dimensional analysis, Lunar and Planetary Science, 2017/3/23, #1911, TX/USA.
- ⑧ 巽瑛理、杉田精司、ラブルパイル天体の質量損失効率に関する実験、宇宙科学に関する室内実験シンポジウム、2017/2/28、神奈川。
- ⑨ Eri Tatsumi, Seiji Sugita, Collisional history of asteroid Itokawa revealed by remote sensing and sample analyses obtained by Hayabusa, Planet2 symposium, 2017/2/21, Villefranche-sur-mer/France.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

巽 瑛理 (TATSUMI ERI)

東京大学・大学院理学系研究科 (理学部) ・
特任研究員

研究者番号 : 60623197