

# 「はやぶさ2」による小惑星リュウグウ上での宇宙衝突実験

Space impact experiment on an asteroid Ryugu in Hayabusa2 mission

和田浩二\*, 荒川政彦\*\*, はやぶさ2プロジェクト,  
Koji Wada, Masahiko Arakawa, Hayabusa2 project

\*博士(理学), 千葉工業大学主席研究員, 惑星探査研究センター(〒275-0016 千葉県習志野市津田沼 2-17-1)

\*\*博士(理学), 神戸大学教授, 理学研究科惑星学専攻(〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1)

キーワード: はやぶさ2, 衝突クレータ, SCI, DCAM3

Key Words: Hayabusa2, impact crater, SCI, DCAM3

## 1. はじめに

日本の小惑星探査機「はやぶさ2」は、有機物や水を保持しているとされるC型小惑星の一つであるリュウグウを探査し、その試料を採取・地球に持ち帰るというJAXAの小惑星サンプルリターンミッションである<sup>1)</sup>。

「はやぶさ2」においては、小型搭載型衝突装置 (Small Carry-on Impactor: SCI) を用いてリュウグウ上に人工の衝突クレータを作成することが計画され<sup>2,3)</sup>、2019年4月5日 (JST) に差し渡し10 m以上のクレータの形成に成功した。形成されたクレータの詳細な画像など「はやぶさ2」本体からの観測によるデータに加えて、クレータから掘削物 (イジェクタ) が放出される衝突クレータ形成の一連の過程が、分離カメラ (Deployable Camera 3: DCAM3) によって明瞭に記録された<sup>4)</sup>。この衝突クレータ形成は、小惑星上での「宇宙衝突実験」の帰結であり、本稿ではその意義と方法及び結果について述べる。

## 2. 小惑星で衝突実験

小惑星における衝突実験そのものが世界初の試みであるが、「はやぶさ2」では主として以下の二つの目的を掲げている<sup>2,3)</sup>：

- クレータ孔をあけることで小惑星の内部を暴露し、内部物質の観測と試料採取を可能とすること。
- 本物の小惑星の物質・環境を用いた衝突実験によって、天体衝突現象の理解を促進すること。

通常の惑星探査では、探査機からのリモートセンシング観測によって天体のごく表層の情報は得られるが、天体内部に関する情報を得ることは困難である。とくに小惑星などの大気のない天体の表層にある物質は、宇宙線

や太陽風などにさらされる結果 (宇宙風化作用)、本来の構成物質から変成していると考えられている。したがって、より新鮮であろうと考えられる内部物質を観測・採取分析することは、天体の構成物質を正確に把握し、その起源と進化を探るうえで鍵となる情報を得ることを意味する。そこで、天体表層に弾丸を衝突させクレータを形成することで内部を覗く「窓」を作り、あわよくば放出される地下物質を採取する、というアイデアが「はやぶさ2」において衝突実験を行う目的の一つである。

一方、衝突現象そのものの解明も重要である。惑星をはじめとする太陽系の固体天体は、ごく初期の原始惑星系円盤内においてサブミクロンサイズの塵同士が衝突合体することから始まり、互いに衝突を繰り返して成長 (時には破壊) して形成されたと考えられている。また月面を見ればわかる通り、固体天体上で普遍的な地形は天体衝突によって形成される衝突クレータである。つまり天体衝突過程は、惑星形成論を構築するにあたりぜひとも明らかにすべき素過程である。そのような背景のもと、天体衝突によってどういった孔 (衝突クレータ) が形成されるのか? といったことを理解すべく、これまで地上の実験室において、天体同士の一般的な衝突速度である km/s を超える速度など様々な条件下で衝突実験が数多く行われてきた。その成果はクレータ直径のスケールリング則 (衝突条件とクレータ諸量とを結びつける普遍的な関係式) といった形でまとめられつつある<sup>2)</sup>。しかしながら、宇宙に浮かぶ本物の天体の衝突物性については地上実験において検証の術がない (地上で手にする隕石は地球大気による選別を受けており、宇宙空間にある物質そのものを代表しているとは言えない)。また、小惑星のような微小重力環境下でのクレータ形成につい

でも完全に理解されているわけではない。そこで、実際に宇宙空間に浮かんでいる小惑星という場で衝突実験を行うことで、これまでのスケーリング則を検証し、あわよくば新たなスケーリング則を構築するための基礎データを得ることが「はやぶさ2」の衝突実験のもう一つの大きな目的である。

さらに、小惑星の表面年代はクレータの個数密度で推定されるが（一般的に、クレータがたくさんあるほど年代は古い）、用いるクレータサイズのスケーリング則によって年代推定に一桁程度の違い（1億年なのか1千万年なのかといった違い）が生じ得る<sup>5)</sup>。したがって実際に小惑星上で衝突実験を行い形成されるクレータから小惑星上で成り立つスケーリング則を確認・構築することは、小惑星の表面年代を推定することに大きく貢献する。

以上のように、小惑星上で行う衝突実験は、小惑星ひいては太陽系天体の起源と進化を明らかにするうえで、極めて有効な手段である。

### 3. SCI および DCAM3 の仕様と運用

衝突装置 SCI の仕様と運用手順について以下に概要を述べる（詳細は参考文献<sup>2,3)</sup>を参照されたい）。

SCI は、直径約 30 cm、高さ約 20 cm、総重量 14 kg の円筒形をしており、小惑星上空約 500 m で「はやぶさ2」探査機本体から分離される（図-1）。SCI 内部には爆薬（HMX 系 Plastic Bonded Explosive: PBX）が充填された円錐形の爆薬部があり、それを起爆させることで、円錐底面に溶接されたライナと呼ばれる直径 30 cm の銅円盤（質量 2 kg、厚さ 5 mm）を瞬時に直径 13 cm の中空弾丸に成形し、同時に 2 km/s まで加速する（爆発成形侵徹体技術の応用）。つまり、小惑星には質量 2 kg の銅弾丸を速度 2 km/s で衝突させることになる。その際、飛散する SCI 爆破破片などの直撃による探査機の損傷を避けるため、探査機自体は SCI 分離後、小惑星の影に隠れるように退避する。探査機退避完了が見込まれる時間を考慮して、SCI は分離後 40 分で起爆するよう設定された。



図-1 SCI および DCAM3 運用の略図

SCI は姿勢安定のために回転しながら分離される（回転角速度約 75 deg/s）。その分離時には、水平方向・垂直方向の速度誤差および方向角度誤差が生じることに加えて、小惑星の重力場（探査の結果、リュウグウの表面重力加速度はおおよそ  $1.2 \times 10^{-4} \text{ m/s}^2$  と推定された<sup>6)</sup>）の影響もあり、弾丸の着弾推定位置は誤差  $3\sigma$  で直径 400 m の円内という広い領域であった。このことは、直径約 900 m のリュウグウに弾丸が衝突することはまず間違いがないが、狙った場所に衝突させることは困難であることを意味する。また、衝突の確認と形成されたクレータを発見するためには、衝突前後の高解像度の小惑星表面写真を比較することが有効である。そのために、探査機は衝突前と衝突後（退避から約 2 週間かけて復帰する）に高度 1.7 km まで降下滞在し、上記の衝突予測領域を隙間なくスキャン撮像する（望遠カメラの解像度で 17 cm/pix）運用を行うことが求められた。

SCI 弾丸の衝突の瞬間とその後のクレータ形成・イジェクタ放出過程の観測は、科学的に非常に価値がある。しかしながら SCI 運用においては、衝突の瞬間や起爆直前の SCI を探査機から直接観測することができない。そこで、探査機が退避する途中で、手乗りサイズのカメラ（DCAM3）を分離させ、衝突地点を観測できる位置に待機させることで、起爆直前の SCI の撮像と衝突地点における一連のクレータ形成過程を観測しようという試みがなされた（図-1）。DCAM3 の仕様と運用手順については、いくつかの論文に詳述されているが<sup>7,9)</sup>、ここでその概略を述べる。DCAM3 は、「はやぶさ2」本体から適切に分離されなければならないし、退避する「はやぶさ2」本体へ撮像データを限られた時間内に送信しなくてはならないなど、画像取得までのハードルが高いためオプション機器扱いであった。しかし DCAM3 の撮像が成功すれば衝突地点の同定にも寄与するため、科学的にもプロジェクト的にも非常に期待が寄せられた機器であった。

分離される DCAM3 ユニットは  $\phi 80 \text{ mm} \times 78 \text{ mm}$  の小さな円筒形であるが、二つの光学系が搭載されている。アナログ信号として低解像度画像を「はやぶさ2」に送信するモニタ用カメラ（アナログ系：DCAM3-A）と、デジタル信号として高解像度画像を「はやぶさ2」に送信するサイエンス用カメラ（デジタル系：DCAM3-D）であり、それぞれリアルタイム性と科学用途を追求したものとなっている。とくに、DCAM3-D は、リュウグウ上空で浮遊している起爆前の SCI と、クレータ形成の際に放出されるイジェクタの双方を撮影することを要求されたことに加え、DCAM3 の姿勢安定のために施される回転をも考慮（約 100 deg/s を想定、露光時間を稼げない）した結果、広角（74°）で明るい（F 値 1.7）光学系が採用された。センサは  $2000 \times 2000 \text{ pix}$  の CMOS イメージセンサを採用し、波長範囲が 450-850 nm の広範囲単一バンド撮像を行う。解像度はおおよそ 1 km 遠方（DCAM3 位置から衝突点までのノミナル距離）で  $< 1 \text{ m/pix}$  である。また、

以下に述べるように様々な場合のイジェクタの放出過程に対応すべく、衝突時間を中心に最大 1 fps のフレームレートで撮像することとした。

#### 4. 小惑星リュウグウの特徴と衝突目標地点および予測結果

小惑星リュウグウは、地上観測では球に近い形状と推定されていたが、実際に到着してみると、回転コマ型形状と呼ばれる“そろばんの玉”のような形状をしていることが判明した<sup>9)</sup>。また、接近観測の結果、表面は岩塊に富み、「はやぶさ」初号機が探査した小惑星イトカワに見られたような広範囲にわたる平坦な砂場のような場所がほとんど見当たらないことも判明した<sup>5,9)</sup>。このため、タッチダウンを安全に行うために多大な検討を強いられることになったのであるが、SCI によってなるべく大きな孔をあけたいという要望（大きいほど発見・観測が容易になる）にとっても問題となった。なるべく大きなクレータを形成するためにはどのような場所に衝突させるのが最適であろうか？これまでの衝突実験から構築されたスケールリング則によれば、地球重力場の十万分の一という微小重力環境のリュウグウ上で cm 以下のサイズの砂粒からなる層へ衝突した場合には、直径 10 m 以上の孔が開き、数 m～数 100 m スケールの逆円錐形のいわゆるイジェクタカーテンが形成され、100 秒以上にわたって維持されると予想された<sup>2)</sup>。一方、岩盤や強度の大きい層に衝突した場合には、開く孔の大きさは 1 m 以下となることもあり得、少量の破片が数秒以内に飛び去って終わることも考えられる<sup>2)</sup>。したがって、大きなクレータを形成するためには、なるべく細粒で満たされた平坦な場所に衝突させるのが良い、となる。しかしながら、リュウグウ表面にはそのような理想的な場所はほぼ皆無であり、そもそも狙った場所に衝突するとは限らない。

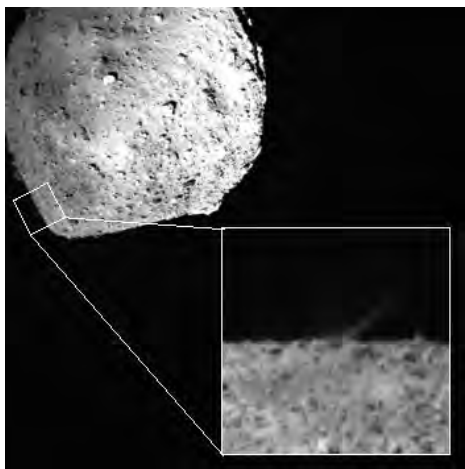


図-2 SCI 起爆の約 3 秒後の DCAM3-D 撮影画像。イジェクタの放出が明瞭に映っている。画像のクレジット：JAXA/神戸大/千葉工大/高知大/産業医科大。

それでも検討を重ねた結果、2 回目のタッチダウン候補地点（SCI 運用の前には 1 回目のタッチダウンを行い成功させている）の近傍（緯度 6°，経度 303°）が衝突目標地点として選ばれた。

#### 5. SCI 衝突の結果

SCI 運用による衝突成功の報を最初にもたらしたのは、DCAM3 から送られてきた画像であった（図-2）。イジェクタカーテンの発生が一目瞭然で示され、衝突の確たる証拠とされた<sup>4)</sup>。同時に衝突地点もほぼ同定することができ、結果的に目標地点から 20 m 程度しか離れていないところに着弾したことが確認された<sup>4)</sup>。イジェクタカーテンの形成が認められたことから、砂地への衝突による大きなクレータの形成が示唆されたが、実際に「はやぶさ 2」探査機の復帰後の低高度観測によって、差し渡し 10 m 以上の半円形のクレータの形成が確認された（図-3）。着弾地点の衝突前の画像（図-3（上））を見ると、岩塊も多数存在し必ずしも平坦な場所に衝突したとは言えない。それにもかかわらず大きな孔が形成され

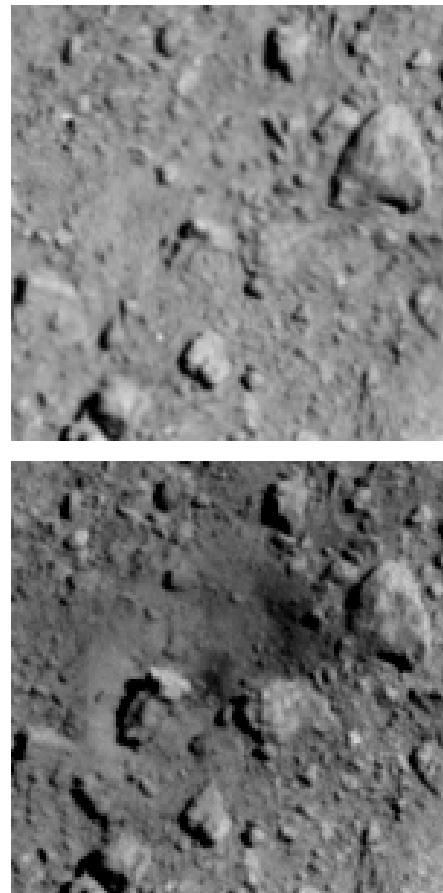


図-3 高度 1.7 km から撮影された衝突地点の衝突前後の比較。(上) 衝突前。(下) 衝突後。緑間の直径が約 17 m の半円形のクレータが明瞭に判別できる。画像のクレジット：JAXA/東京大/高知大/立教大/名古屋大/千葉工大/明治大/会津大/産総研。

たことは予想外であった。また、数 m 規模の埋まっていた岩塊が掘り起こされ移動している一方、衝突地点のごく近傍にあるにもかかわらずほとんど動いていない岩塊（おそらく地下深くまで続く基盤岩であり、クレータ孔が半円形になった原因と考えられる）もある<sup>4)</sup>。これらの詳細については現在解析中であるが、リュウグウ表面に多数見られる岩塊や表層について、それらの強度および構造を推定するうえで示唆に富む結果となった。

イジェクタカーテンの発生や形成されたクレータの大きさからは、強度のほとんどない砂地への衝突によるクレータ形成（専門的には「重力支配領域」におけるクレータ形成と呼ばれる）が示唆され、これまで地上実験をもとに構築されてきた重力支配領域のクレータスケールリング則による予想とほぼ一致する<sup>4)</sup>。このことは、リュウグウのみならず一般的に小惑星上で見られるクレータの形成過程を理解することにつながるとともに、その年代推定にも大きな進展をもたらすものであり、今後の詳細な解析が待たれるところである。

## 6. 宇宙衝突実験の今後

SCI を用いた宇宙衝突実験は成功裏に終わったと言えよう。人工衝突クレータ形成から約 3 か月後の 2019 年 7 月 11 日には、放出された地下物質であるイジェクタが十分な厚さで堆積していると考えられるクレータ近傍領域において 2 回目のタッチダウンが挙行され、地下物質の採取に成功したものと考えられている。この採取された物質が地上で詳細に分析された暁には、宇宙衝突実験の有用性が再確認されることだろう。

惑星探査ミッションにおいて有効な手段である宇宙衝突実験・衝突探査は、実は「はやぶさ 2」が初めてではない。これまでもテンペル第 1 彗星へ衝突器を衝突させた Deep Impact 計画<sup>10)</sup>（衝突実行は 2005 年）や、月北極永久影へ衝突させた LCROSS 計画<sup>11)</sup>（同 2009 年）（ともに NASA 主導）などがあり、各々成果を上げている（小惑星への衝突とその一連の過程を詳細に観測したのは「はやぶさ 2」が世界初）。さらに宇宙衝突実験は「はやぶさ 2」で終わることなく、将来の探査ミッションにおいても計画・実行されていくのは想像に難くない。直近では、連星小惑星 Didymos の衛星 Didymoon へ探査機そのものを衝突させる NASA の DART 計画がある<sup>12)</sup>（2021 年打ち上げ・2022 年衝突予定）。日本においても、「はやぶさ 2」によって“衝突探査先進国”となった優位性を生かした今後の探査計画の立案が期待される。

## 謝辞

防衛大学の別府万寿博教授には、本講演を行う機会を与えていただき、感謝いたします。「はやぶさ 2」プロジェクトは、JAXA 職員や大学教員をはじめ数多くの

研究者・技術者それからメーカーの方々の協力のもとに成り立っています。宇宙衝突実験が成功したことに対し関係者の方々のご尽力に深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) Watanabe, S., Tsuda, Y., Yoshikawa, M., Tanaka, S., Saiki, T., Nakazawa, S. : Hayabusa2 Mission Overview, Space Science Reviews, Vol.208, pp.3-16, 2017.
- 2) Arakawa, M. et al. : 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, Vol.208, pp.187-212, 2017.
- 3) Saiki, T., Imamura, H., Arakawa, M., Wada, K., Takagi, Y., Hayakawa, M., Shirai, K., Yano, H., Okamoto, C. : The Small Carry-on Impactor (SCI) and the Hayabusa2 Impact Experiment, Space Science Reviews, Vol.208, pp.165-186, 2017.
- 4) Arakawa, M. et al. *under review*.
- 5) Sugita, S. et al. : The geomorphology, color, and thermal properties of Ryugu: Implications for parent-body processes, Science, Vol.364, pp.eaaw0422, 2019.
- 6) Watanabe, S. et al. : Hayabusa2 arrives at the carbonaceous asteroid 162173 Ryugu—A spinning top-shaped rubble pile, Science, Vol.364, pp.268-272, 2019.
- 7) Ogawa, K. et al. : System Configuration and Operation Plan of Hayabusa2 DCAM3-D Camera System for Scientific Observation During SCI Impact Experiment, Space Science Reviews, Vol.208, pp.125-142, 2017.
- 8) Sawada, H., Ogawa, K., Shirai, K., Kimura, S., Hiromori, Y., Mimasu, Y. : Deployable Camera (DCAM3) System for Observation of Hayabusa2 Impact Experiment, Space Science Reviews, Vol.208, pp. 43-164, 2017.
- 9) Ishibashi, K., Shirai, K., Ogawa, K., Wada, K., Honda, R., Arakawa, M., Sakatani, N., Ikeda, Y. : Performance of Hayabusa2 DCAM3-D Camera for Short-Range Imaging of SCI and Ejecta Curtain Generated from the Artificial Impact Crater Formed on Asteroid 162137 Ryugu (1999 JU3), Space Science Reviews, Vol.208, pp.213-238, 2017.
- 10) A'Hearn, M. F. et al. : Deep Impact: Excavating Comet Tempel 1, Science, Vol.310, pp.258-264, 2005.
- 11) Schultz, P. H. et al. : The LCROSS Cratering Experiment, Science, Vol.330, pp.468-472, 2010.
- 12) Cheng, A. F. et al. : AIDA DART asteroid deflection test: Planetary defense and science objectives, Planet. Space Sci., Vol.157, pp.104-115, 2018.