

# 小惑星に人工クレータを作るまでの長い道のり

千葉工業大学惑星探査研究センター 和田浩二

要旨：

2019年4月5日、小惑星探査機「はやぶさ2」から切り離された衝突装置から放たれた質量2kgの銅の弾丸が、小惑星リュウグウに衝突。直径約14mの人工クレータがリュウグウ上に生成されました。本物の小惑星上に人工クレータをつくるという世界初の快挙に至るまでの道のりを筆者個人の経緯や感想を交えて紹介します。

2019年4月5日午後3時、JAXA宇宙科学研究所「はやぶさ2」運用室にて—

「へーこれが DCAM3 アナログ系の画像ですか…おお、ちゃんとリュウグウが映ってるじゃないですか」

「まだ衝突前の画像ですかね…次…次…あ、ちょっとまって！これって…イジェクタ！？」

「そうだよ、イジェクタだよ、これは！」

「ほら、非対称だけど逆円錐型でしょ、イジェクタ、イジェクタ！！」

「おおー衝突してた！」

「他の人達呼んできますね」

—数分後—

「これが！？確かに！衝突してるね！！」

「やったー！！」

「おめでとうございます！」

「すごいね、もうわかっちゃった」

「おおー」

万雷の拍手鳴りやまず…

以上が、「はやぶさ2」衝突装置運用が行われた日の衝突確認ができたときの状況です。「はやぶさ2」から切り離された衝突装置 (Small Carry-on Impactor: SCI) から2kgの銅の弾丸を秒速2kmで放ち小惑星リュウグウに衝突させる、という一連の困難な運用を見事にやり遂げたことを、探査機避難途中に切り離した分離カメラ (Deployable Camera 3: DCAM3) が撮影した放出物 (イジェクタ) の画像によって実証した瞬間でした。

「はやぶさ2」の開発・運用、それから衝突の結果もたらされた成果などについては、論文やウェブサイトをはじめ随所に掲載されているので、詳しくはそちらをご覧ください。くとして、本稿では世界初となる小惑星上における人工クレータ生成について、ここに

至った個人的な経緯と感想を交えて紹介します。実際に惑星探査ミッションに関わった一研究者の例として何かの参考にしていただけますと幸いです。

## 1. 「はやぶさ2」以前：宇宙への興味と天体衝突研究への道

筆者はよく「なぜ宇宙に関する研究をしようと思われたのですか？小さいころ、なにかきっかけがあったのですか？」と問われます。そういう時に、「小さいころに宇宙のテレビ番組を見て」など、わかりやすいきっかけを紹介できればと思うのですが、あいにくそのような明瞭な動機付けがないなあ、といつも悩みます(申し訳なく思います)。強いて言うなら、小学校高学年のときに天体望遠鏡を買ってもらって月面や星空を眺めたのがきっかけ？しかし天体望遠鏡を欲するってことはすでに宇宙に興味があるということですし、その前にどういうきっかけがあっただけではありません。逆に皆さんにお伺いしたいのですが、なぜ「宇宙」はさしたる理由もなく好奇心を掻き立てられ、興味をひきつけてやまない対象なのでしょう？「我々はどこからきて、どこに行くのか、我々はなにものか」(ゴーギャン)という究極の問いがそこにあるからなのかもしれませんが、それとて後付け感が否めません。なにはともあれ、宇宙には人並の興味をもって育ったのだと思います。

やがて中学・高校と勉強を進めていくにしたがって、物理学や天文関係にはなぜか惹かれるものがありました。幸い(?)宇宙に対する興味を失わず、かつ自分が極めようという学問の対象として見えてきたころです。大学に進んで専門分野を選ぼうというときには、物理を極めるのはなんだか見えない世界(素粒子とか量子力学とか)過ぎて実感がわかないし、かといって銀河など遠くの星々がメインテーマである天文学の世界もやはり実感がわかないし、いまいちだな、と不遜なことを考えていました。そこでちょうど良い具合にあったのが地球惑星物理学科というところでした。それは地球の地下深くから宇宙空間まで森羅万象の謎を解き明かす学問であり、太陽系の天体すなわち惑星の起源と進化といった遠すぎず近すぎず(いや、人間の尺度では時間的にも空間的にも十分遠いのですが)頃合いのところを研究するというもので、宇宙を対象にするうえでうってつけの場所がそこにあると感じた次第。やがて地球惑星物理学科に進学し、さらには惑星科学をテーマとする研究室に入って大学院を修了し、博士号を得るに至りました。なお、地球惑星物理学科に進学する際には、ロケットや人工衛星を作るという工学的なアプローチで宇宙に関わるという事も考えたのですが(航空宇宙工学科など)、プラモデルは“ガンプラ”まで、戦艦やバイクなどは途中でやめてしまった自分の不器用さに気づいて、工学の道には行きませんでした。それが良かったことなのかどうなのか、わかりませんが…。

惑星科学といっても、対象や手法は様々です。宇宙から降ってくる隕石を分析し初期

太陽系がどのような環境であったかを明らかにする、真空チャンバの中で宇宙空間を再現し物質がどのような化学進化を遂げてきたかを探る、数値モデルを立ててコンピュータシミュレーションで惑星の進化過程を明らかにする、望遠鏡で小惑星のスペクトルを観測しその構成物質を探る、探査機を惑星まで飛ばしてその場で詳細に観測する等々。そんな中、筆者は「天体衝突」に興味を持ち、これを軸に今日まで研究活動を続けてきました。なぜ天体衝突か？単純にダイナミックな過程が面白い！というシンプルな動機に尽きる、と言ってしまうかもしれませんが、もう少し意義を述べてみましょう。そのために惑星の形成過程を簡単に説明します。ガスと塵が入り混じった分子雲からやがて原始星を中心とする円盤構造（原始惑星系円盤）が形成され、そのなかでマイクロン以下の小さな塵同士が衝突合体成長していき、kmサイズの微惑星となり、それらがまた衝突合体（時には破壊）を繰り返して原始惑星、最終的には地球のような大きさの惑星へと成長する、とされています（さもわかった風に書いていますが、各過程が完全に解明されているとはとても言えない状態です）。このような惑星形成過程のすべての段階にわたって、「衝突」は重要な鍵を握るものです。衝突過程を解明せずに惑星形成過程は解明できない、といっても過言ではありません。そのような重要なテーマだからこそ、筆者は堂々と「天体衝突が研究テーマです」と胸を張って言うことができているわけです。

大学院生のころには、主に数値シミュレーションによって、天体衝突によって形成される「衝突クレータ」の特徴に迫ろうとしてきました。修士論文では、6600 万年前に白亜紀末大量絶滅を引き起こしたとされる巨大衝突によってメキシコ・ユカタン半島に形成されたクレータ（Chicxulub crater）の熱史を解明したり、博士論文では個別要素法という粒子シミュレーション法を用いて衝突クレータ形成の数値シミュレーションに取り組んだりしていました（博士課程では、~~逃げ出して~~、日墨交流計画という政府間交換留学制度を使ってメキシコに1年間遊学し Chicxulub crater のフィールド調査なんかもしました）。そんな感じで博士号を取得後、ポスドク時代には衝突は衝突でも塵同士の衝突というテーマに取り組みました。上述した通り、惑星形成は塵同士の衝突から始まります。そこから km サイズの微惑星と呼ばれる天体まで成長することが必要なのですが、実は理論的には形成は困難である、とされています。その形成の困難さを克服し如何に塵から惑星まで成長させることができるか？というテーマを解明すべくやはり数値シミュレーションによって研究を続けていました。

そうこうしているうちに、千葉工業大学に惑星探査研究センター (Planetary Exploration Research Center: PERC) が設立されることになり、大学院生時代の指導教官が定年退官後、所長に就任するということになりました。運よく指導教官から声をかけてもらって、2009年4月に PERC に着任しました。PERC には「惑星探査」という文言が入っていますが、上述のとおりそれまで「惑星探査」とは無縁（と言っては言い

過ぎですが)の研究スタイルで過ごしてきたものですから、なかなか最初は何していいのかわかりません。当時は日本でも火星探査が盛り上がりを見せており、PERCでも「火星探査機に搭載する観測機器を開発しよう」ということになったので、筆者もとりあえずその観測機器のデータ解析方法の検討など、理論的に取り組めることを始めました。それはそれで面白かったのですが(最小二乗法って統計的にすごいことをやってるんだな、など改めて勉強になったりしました)、従来の衝突現象の数値シミュレーション研究も並行して進めており、あまり惑星探査にどっぷりはまる生活ではありませんでした。今となっては古き良き時代でした…。

## 2. 「はやぶさ2」そしてSCIとの出会い

転機は2011年、「はやぶさ」(初号機)の地球帰還(2010年6月13日)が話題となり、それに後押しされるように「はやぶさ2」も本腰をいれて計画が進められている最中でした。「はやぶさ2」には衝突装置(SCI)が搭載され、小惑星上に衝突クレータを生成するという話は聞いていたのですが、「探査」にあまり縁のなかった筆者は政治的な臭いもあって当初傍観していました。とはいえ、2011年8月には、とある研究集会で「はやぶさ2」に搭載される分離カメラ(DCAM3)にダスト検知装置をつけて衝突で生じる放出物(イジェクタ)の検出をしてみると面白いのではないか?というアイデアを出して発表したりしていました。今振り返ってみると、この発表が一つのきっかけで、筆者並びにPERCそのものが「はやぶさ2」に関わっていくことになったのかなと思われれます。さらに、2011年11月には、「はやぶさ2」の科学検討・推進を強化すべく特に理学側の体制が大きく変更されました。その時から、PERCも「はやぶさ2」に大いにかかわっていくこととなります。まずレーザー高度計(Light Detection and Ranging: LIDAR)のサイエンスを担う主任研究者(PI)に当時のPERC副所長が任命され、PERCの少なくないメンバもLIDARの一員として取り組むことになりました。さらに中間赤外カメラ(Thermal Infrared Imager: TIR)や近赤外分光計(Near Infrared Spectrometer: NIRS3)など、気が付けばPERCは、ほぼすべての観測機器に関わっていくことになっていました。筆者も天体衝突研究の経験を買われ、SCIチームにサイエンス側の副主任研究者(sub-PI)として加わることとなりました。

「はやぶさ2」は始原的なC型小惑星であるリュウグウ(対象小惑星は、当初1999JU3というコードネームで呼ばれており、リュウグウという名前は「はやぶさ2」打ち上げ後に命名されたものです)に到達して探査し、そのサンプルを地上に持ち帰るといったサンプルリターンミッションです。その理学的目標の一つは、C型小惑星に豊富に存在すると期待される水を含んだ鉱物(含水鉱物)や有機物をその産状とともに分析することで、生命の材料とされる物質が初期の太陽系においてどのような状態で存在し、またど

う進化してきたのかを明らかにすることです。またもう一つの目標は、リュウグウの表層や内部の物理的構造を観測・推定することで、小惑星がたどってきたであろう衝突進化過程を明らかにし惑星形成過程を実証的に解明する、といったものです。工学的には、「はやぶさ」初号機で培った技術を成熟させることとともに、衝突体を天体に衝突させるという宇宙衝突探査技術の実証という目標がありました。

SCI チームの一員として参画した最初の仕事は、SCI の意義を説明すること、でした。衝突実験を小惑星上で行うことは、なんとなく面白そう、とは思えます。ですがそれだけの曖昧模糊とした理由だけで SCI を搭載するわけにはまいりません。これは SCI に限らず、惑星探査機に搭載される観測機器すべてに当てはまることですが、きちんと科学的目的・意義、観測要求を明確にし（ミッション目的・要求の制定）、それに必要十分な機器構成・仕様を提案し（システム要求の制定）、必要となるコストや体制および試験計画を見積もったうえで開発計画を立てて、それらが審査をパスして初めて搭載が決定されます。探査機は打ち上げられてしまえば修理しに行くわけにはいきませんし、何百億円という莫大な予算がかかります。否が応でも慎重にならざるをえず、また高いコストパフォーマンスを要求されることになるのです。結果として一つの探査機がその計画立案から打ち上げられるまでに 10 年ぐらいかかるのが普通です。加えて、SCI は次に述べるように爆薬が詰まった新規開発機器であり、探査機は爆弾を抱えて飛行するようなもので、より一層シビアに審査されます。衝突実験やればよいな、程度では到底認められるわけがなく、まずはリスクに見合ったミッション目的をきちんと考えることが求められました。

SCI は本体が直径約 30 cm・高さ約 20 cm の円筒形の外観で、小型の炊飯ジャー程度の大きさです（重量は約 18 kg）。そのなかに円錐形状をした爆薬部があり、約 4.7 kg の PBX 爆薬が充填されています。爆薬部円錐の底面に質量約 2 kg・厚さ約 5 mm の銅板（ライナと呼ばれます）が張り付けてあり、爆薬が爆発することでその銅のライナが吹き飛ばされながら瞬時に球殻状に変形し 2km/s の速度まで加速されて弾丸となって放出されます（爆発成形侵徹体 Explosively Formed Penetrator (EFP) という技術だそうです）。その威力はすさまじく、神岡の鉱山跡地での実機（実爆）試験にも参加しましたが、射場からかなり離れた場所にも轟音が響きわたり、映像で確認すると大量の炎と煙が舞うのが確認できます。このような危なっかしいものを持っていくわけですから、それ相当の意義が認められといけません。

結局のところ、SCI には大きく二つの意義があるとして認められました。一つは、小惑星の「内部」を覗き見ることができる「窓」となる孔（クレータ）をあけることです。小惑星、なかでもリュウグウのような始原的とされる小惑星には先に述べたとおり惑星形成や生命誕生の謎に迫る物質が多く含まれているとされているわけですが、表面は太陽風や宇宙線によって変成しているものと考えられています（「宇宙風化」と呼びます）。

しかし風化している表面を剥ぎ取ってみれば、内部には風化を受けていないという意味での新鮮な状態で物質が存在している可能性があります。SCIによる衝突でクレータが形成されれば、新鮮な内部物質が露呈し、それをリモートセンシング観測する、さらにはサンプルを採取し持って帰って分析することで、太陽系における物質進化過程の理解が大きく進むものと期待されます。

SCIのもう一つの意義は、本物の小惑星において衝突クレータを人工的に形成することそのものにあります。これは、いわば「宇宙衝突実験」です。天体衝突過程を地上で再現しようとする、重力の束縛を受けますし、なにより宇宙空間で進化を辿ってきた物質そのものを標的として使用することができません。地上実験では、あれこれ想像して模擬物質を用意するわけですが、本当のところどうなのか？という実証ができないわけです。宇宙から降ってきた隕石を標的として使うことはもちろんありますが、隕石は地球大気というフィルターを通った後に入手されるものです（一般には強度の大きなものしか地上にたどり着かないと思われています）。そこで、宇宙空間の微小重力下で進化してきた本物の小惑星において衝突実験を行うことができれば、太陽系形成の鍵を握る天体衝突過程を理解するための実証実験として理想的です。つまり、SCIによる衝突実験は天体衝突の科学を進めるうえで必要かつ貴重なデータを得られる絶好の機会、というわけです。また、仮に大きな岩塊に衝突し衝突クレータが形成されなかったとしても、その岩塊の破片を詳細に観測することで岩塊の強度を推定することが可能となり、それはそれで太陽系形成進化を担う物質の強度がわかるという意味で非常に有意義となります。

以上のような目的を明確に説明し、各種データを示しながら開発可能であることや安全性を示すことで、SCIは搭載が正式に認められました。なお、初期の検討段階では、もう一つ探査機を打ち上げて、探査機ごと衝突させる、というアイデアもありましたが、経費が掛かりすぎるということで却下されています。SCIは探査機に搭載可能な小型軽量の装置で衝突を実現させることができるというものです（Small Carry-on Impactorと呼ばれる所以です）。また、純銅を弾丸とすることで、小惑星物質と容易に区別が可能となり、サンプル分析の邪魔にならないように工夫されています。

### 3. 掟破りの DCAM3

さて、SCIの搭載は決定し、実爆試験も含めて着実に（途中いろいろ問題が生じましたが最終的に解決されて）開発が進んでいきましたが、それとともに、もう一つの機器開発を急遽行うこととなりました。分離カメラ（Deployable Camera 3: DCAM3）です。分離カメラは、その名のとおりに探査機本体から分離されて撮像をする装置で、「はやぶさ2」以前には、JAXAのミッションである小型ソーラー電力セイル実証機「IKAROS」

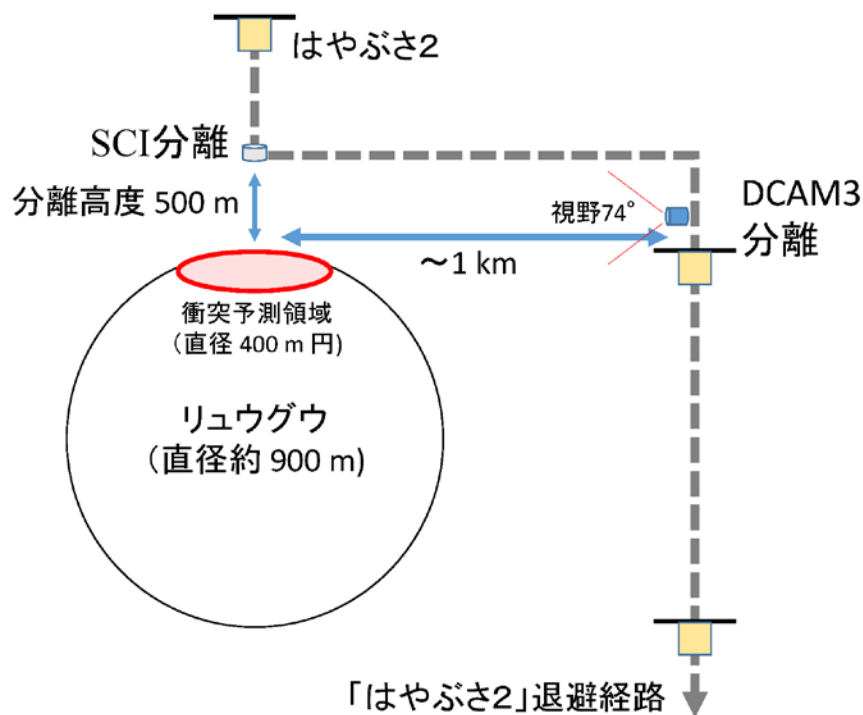


図 1：SCI および DCAM3 運用の概略図

に DCAM1, 2 として搭載され IKAROS がその帆（セイル）を広げる様子を“自撮りする”ことに成功していました。「はやぶさ2」では、DCAM1,2 に続く DCAM シリーズ 3 代目ということで DCAM3 と命名されて搭載が検討されていました。DCAM3 の役割は、探査機本体から分離されて、SCI 弾丸が小惑星に衝突したことを確認する、というものです(図 1)。実は SCI はその新規性にもかかわらず「小惑星に衝突させること」が最低限の成功基準として設定されています。つまり、小惑星に衝突したかどうかを確認する必要がある、というわけです。そんなことは探査機がその場で撮影すれば済む話でしょ？と思われるかもしれませんが、そうはいきません。

これまで述べてきたように SCI は爆発しますので、探査機から切り離されてから作動させます。しかも単に切り離すだけではだめで、SCI の爆破破片が当たる（探査機全損のリスクがあります）のを回避すべく、探査機本体は SCI 分離後、小惑星の影に隠れるように急速に避難する必要があります。SCI は分離から約 40 分後に爆発するようタイマーがセットされています。この 40 分間で探査機本体はリュウグウの傍をすり抜けながら数 km の距離を移動し避難完了しなくてはなりません。これはこれで非常にアクロバティックな運用が求められ大変なのですが（しかもフルオートです）、なにより探査機は SCI 爆発の瞬間には小惑星の影に隠れているわけですから、衝突するところを探査機から撮影・観測することは不可能です。そこで、DCAM3 の登場となるわけです。探査機本体が避難する途中、衝突地点を撮影するのに最適な位置で、DCAM3 を分離し

その場に「浮かべて」おきます。SCIが爆発する直前からDCAM3は撮影を開始し、画像データを探査機本体に送信していきます。SCI爆発後、小惑星上の衝突による何らかの変化を捉えることで、衝突確認と衝突地点の同定を行おうという計画でした。DCAM3にSCI爆破破片が当たる可能性も決して低くはないのですが、そのリスクも織り込み済みです（爆破の瞬間に通信が途切れるなどすればSCI爆破破片が当たったと推定でき、少なくともSCIが爆発したことの傍証にはなります）。

そのようなDCAM3ですが、当初は解像度も低く、画像はアナログデータとして送信されるという仕様でした。しかしながら、筆者をはじめ天体衝突研究の専門家がSCIチームに多数加入してSCIの科学意義を検討する中で、衝突の瞬間とその後のクレータが形成されていく様子を観測することは衝突研究にとってまたとないチャンスであり、これを高解像度で「その場」撮影・観測を行わないというはあり得ない！という声が上がりました。とくに、衝突クレータが形成されつつある段階においては、地下の物質が掘り返され放出されるのですが（これをイジェクタと呼びます）、その形態には地下層に関する情報が反映されるため、これは是非とも高解像度でシャープに撮影したい。そのためには、DCAM3を大幅に改良し（実質的には新規開発に近い）高解像度のデジタルカメラを搭載しデジタル画像を取得することが必要となります。ただし、その声があがった時期は、CDR（Critical Design Review）といって探査機開発にとっては最終設計が固まり製造開始のゴーサインを出す審査会が行われようとしている時期でした。このような時期から改良とはいえほぼ新規開発に近いことを行うというのは、常識的にはあり得ません。ですが、筆者をはじめ科学者の熱意とそれに答えていただいたJAXAやメーカーのエンジニアの方々の集中的な設計検討の結果、ほぼ横車を押す形でDCAM3の改良開発を認めていただけることになりました。

DCAM3は分離される子機と探査機本体に設置される分離装置・アンテナおよび処理演算・メモリ基板を含む一連のシステムの総称ですが、ここでは子機に絞って紹介します。分離子機は直径約78mm・長さ約80mmの円筒型（これにアンテナが飛び出しています）をしています。それまでの経緯と要求仕様から、その手乗りサイズの小さな筐体に二つの光学系（カメラ）とイメージャ基板、データ処理基板と送信機、電池、電源基板、二つの送信アンテナが組み込まれており、さながら一つの独立した衛星システムと言っても過言ではありません。二つのカメラと送信アンテナがあるのはなぜか？それは、もともと検討されていた低解像度撮像・アナログ送信を意図したモニターカメラ（通称「アナログ系」：DCAM3-Aと命名）と後から科学的要求を満たすために開発された高解像度撮像・デジタル送信を意図するサイエンス用カメラ（通称「デジタル系」：DCAM3-Dと命名）を両方とも搭載することになったからです。DCAM3-Dだけで良いのではないかと議論もあったのですが、デジタル通信はリスクが高いということで、バックアップの意味も込めてDCAM3-Aも残す設計となりました。おかげで、



筐体内部はぎゅうぎゅうに詰まった状態で、例えば設計段階では基板をあと 100 ミクロン拡張するとかしないとかというような議論がなされていました。

DCAM3 はコンセプトは立派なのですが、それがきちんと成立し、科学的成果を出すためには、ハードルがたくさんありました。それも、打ち上げまであと 3 年足らずという超短期間で開発せざるを得ない(普通は 10 年くらいかけるのに)、ということで、始終オプション機器扱いとなっていました。それまで、筆者は携帯のカメラ以外に自前のカメラを持ったこともなく、光学系についての勉強をほぼ一からやるという状態でした。「輝度」、「F 値」、「量子効率」、「拡散反射」、…とその時に覚えた用語は数知れず。それでも必要はなんとかの母ということで、DCAM3-D に求められる仕様や試験計画を検討し、開発の一翼を担うことができました。DCAM3-D に求められた仕様は厳しいもので、例えば確実に衝突点を捉えるのみならず、衝突角度決定のために爆発前の SCI も同時に撮影することが必要ということで、視野は広く ( $74^\circ \times 74^\circ$ )、視野端近くでも歪が少なく明るく映るような光学系が必要となりました。また、DCAM3 自体は方向を維持するために  $100^\circ / \text{s}$  程度でゆっくりと回転することになっており、これはすなわち露光時間に制約がかかることを意味します。開発メーカーまで出向いて検証試験を行ったり、夜を徹して熱真空試験を行ったり、今ではいい思い出です…。しかしながら、本当に不安にさせられたのは、その運用方法に由来する制約でした。DCAM3 は分離を確実にを行うために、探査機搭載時にその内部基板へアクセスするケーブルなどを装着することをしませんでした。もし装着していれば、分離時にそれを確実に切断する必要があり、分離リスクをあげてしまうことになるからです。また、内部に電池を搭載していますが、内部へアクセスする電源ケーブルなどないため、分離時に始めて導通されて電源が入る仕組みになっていました。これらが意味することは何か？それは、いったん打ち上げ前に搭載されたら、もう撮像パラメータを変更することはできない、かつ分離されるまで(本番まで)撮像テストができない、という事です。つまり、打ち上げ前に撮像開始時刻、露光時間、ゲイン、撮像レート(最大 1 秒に 1 枚撮ることが可能)などを反映した撮像計画を決めてしまう必要があります、それが最適だったのかどうかは本番の画像を入手してみないことにはわからない、ということになります(打ち上げ後には、「DCAM3 のシャッターはすでに押されています」という言い方をしていました)。リュウグウは初めて訪れる小惑星であり、明るさについてはある程度地上観測で平均的な情報が得られているものの、地域による差は事前には分かりません。衝突クレータが形成される際に生じる放出物(イジェクタ)の明るさがどうなるかも分かりません。結果的に、あらゆる可能性を考慮して、どんな状況でも意味ある撮像データが得られるように撮像パラメータをいろいろ変更した撮像パターンをいくつも組み合わせた非常に複雑な撮像シーケンスとなりました。さらに、「はやぶさ 2」は打ち上げからリュウグウ近傍に達するまで 3 年半、SCI 運用までだと 4 年以上かかります。DCAM3 はそれまで“火”を一度も

入れることなく沈黙し続け、いざ分離して電源がちゃんと ON されるのか？という心配も重なります（これは SCI 自体についてもいえるのですが）。

#### 4. いざリュウグウへ

そんなこんなでいろいろ心配の種は尽きなかったのですが、なんとか開発が間に合い、種子島の射場での作業も無事に終え、「はやぶさ 2」の打ち上げを見届けたのが 2014 年 12 月 3 日。リュウグウ到着まではしばらくのほほんとしていられるかと思いきや、間もなく気を入れ直して働くこととなります。というのも、SCI で形成する人工クレータを探索・発見する、というタスクが SCI チームに課せられていたからです。

SCI で形成される人工クレータは、衝突する場所の状態によってさまざまな大きさになり得ます。これまで蓄積されてきた衝突クレータに関する研究から導かれている方程式（スケーリング則と言います）をあてはめてみると、砂場のような細粒からなる平坦な領域に衝突すれば直径 10 m を越えるような大きなクレータができると予想される一方、一枚岩のような強度を持った岩盤に衝突すると直径 1 m に満たない小さなクレータになる可能性があります。もちろん、形成されたクレータを発見するうえでは大きければ大きいほどよいので、だだっ広い砂場のような領域に狙いを定めて SCI 運用を行いたいわけですが、実は SCI 弾丸の衝突精度はあまりよくなく、誤差  $3\sigma$  で直径 400 m の円内というものでした。直径 1 km 弱であるリュウグウには当たるだろうけど、狙ったところに当たるとは限らないというわけです。そもそもリュウグウの表層がどういった状態になっているかは、行ってみないことには判明しません（実際行ってみると岩だらけで、ちゃんとしたクレータができない、あるいはできたとしても非常に小さいのでは、と危惧されました）。というわけで、あらゆる可能性を想定してクレータ探索の手順を整え、たとえ小さいクレータであっても発見できるようにする訓練を行う必要がありました。想定された最悪ケースは、非常に「ふわふわ」な層（空隙率で言うとおよそ 70% 以上）があった場合で、弾丸がずぼっと埋まりイジェクタは生じず、弾丸の数倍程度の大きさの「凹み」（弾丸は直径約 14 cm なので直径 30 cm 程度の大きさの孔）ができるだけ、というものでした。クレータ探索は DCAM3 の撮像が失敗した場合を想定し、避難した探査機が復帰して低高度（高度 1.7 km）に降下して観測することが基本になります。SCI 運用の前にも同様の低高度観測を行って「事前」と「事後」の画像比較を行うのですが、その高度における探査機搭載カメラの解像度は 1 画素あたり約 17 cm、ほんの数画素の孔を見つけるのは容易ではありません。しかも、探索は自分たちの「目」で行います。ひょっとすると AI 技術を駆使して自動探索が可能なのかもしれませんが、太陽高度などの撮像条件が違ったり孔の形状がいびつであったりすることが考えられたので、探索アルゴリズムを組むことが難しく、直接目視するほうが信頼できるという

判断です。そこで、訓練です。実際に目視で探せるのか？模擬リュウグウをCGで作成していただき、そこにそれらしいクレータを大きいから小さいのまでいくつも載せ、事前事後の模擬画像を作成してもらいました。その画像を見ながら、よーいどん、で多くの訓練参加者が一斉に探すというものです。目を皿のようにしてなんとか探すわけですが（そろそろ老眼になりつつある筆者には厳しい）、大きなもの（10mクラスの孔）は一目瞭然で問題ない一方、小さなものはなかなか見つけることができません。とはいえ、時間をかけていくとなんとなくコツがつかめ、さらに事前事後画像を位置合わせしてフリックして見るができるようなツールも開発していただき、ほぼ見つけられるものは見つけることができました。ただ、最後まで誰も見つけられなかった孔がありました。それは、大きな岩塊の影につくられた孔で、まあ真っ暗なわけで、発見できなくて当然です。このクレータ探索訓練は、クレータ発見に対する自信を植え付けてもらったと同時に、あきらめざるを得ないケースを明確にしたという点で非常に意義が大きいものでした。また、あきらめざるを得ないケースにおいても、DCAM3で衝突の「その場」撮像が成功すれば位置推定が可能となると考えられ、DCAM3に大きな期待が寄せられることとなりました。

## 5. 驚愕のリュウグウ

そうして長いクルージング期間を経て、いよいよ「はやぶさ2」はリュウグウにたどり着きます。2018年6月のことです。プロジェクト関係者一同、近づくリュウグウの姿に驚愕することになりました。まず、リュウグウがそろばんの玉のような、円錐を二つ張り合わせたような「コマ型」形状（top-shape）をしていることです（図2）。リュウグウは自転周期が約7.6時間で、地球よりは速く自転しているのですが、直径1km弱の小惑星としては、決して速くはありません。理論上、コマ型形状であるためにはもっと速く自転してなければならず、このリュウグウの姿は、誰も予想していないものでした（過去に自転が速かった時期があったのだろうというのが有力な説となっていますが、詳細な検討は今後の課題です）。驚かされたとはいえ、これはまあ科学的に嬉しい「誤算」であり、やはり行ってみないとわからないことがあるね、と惑星探査の価値を高めるものでした。

ただ、どんどん近づくにつれてやがてもう一つの驚愕の姿が見えてきます。あれ？平坦な地域が…ない！？そう、リュウグウの表面は岩塊や石ころがごろごろしていて砂場のような平坦な地域がほとんどなかったのです。遠目には一見平坦に見える領域も、近づいてみるとやはり岩塊だらけ（フラクタル、ですね）。平坦な地域がないことも、コマ型形状同様、誰も予想していませんでした（いや、うすうすは気づいていた方もいたのかもしれませんが）。というのも、「はやぶさ」初号機が訪れた小惑星イトカワには、

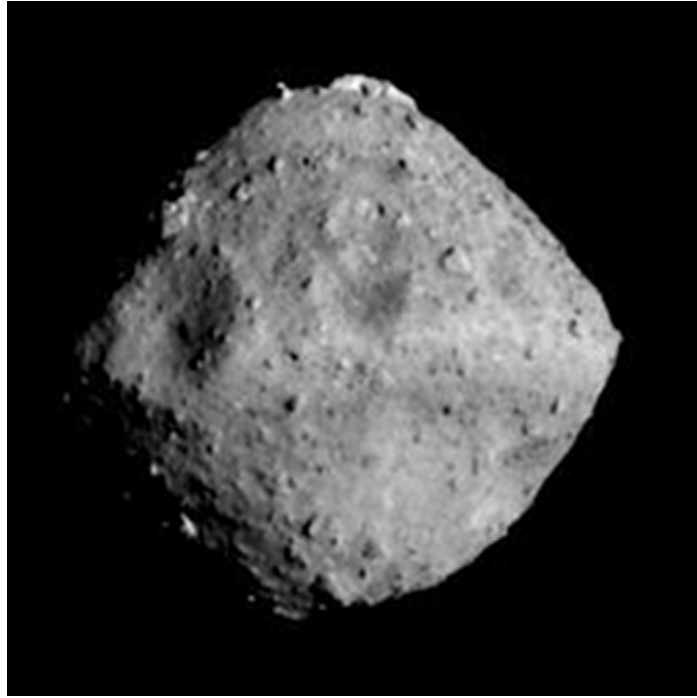


図2:「はやぶさ2」探査機搭載カメラ ONC-T によって高度 40km から撮影されたリュウグウ。2018年6月24日 00:01 (日本時間) 頃の撮影。クレジット: JAXA/東京大/高知大/立教大/名古屋大/千葉工大/明治大/会津大/産総研。

100 m スケールの平坦な地域があったことから、同じような大きさのリュウグウにもそんな地域があるだろう、と勝手に思い込んでいたからです。「はやぶさ2」はサンプルリターンミッションです。安全にタッチダウンしてリュウグウ表面からサンプルを採取しなくてはなりません。必須です。じゃあ、どこにタッチダウンすれば良いの? という話になります。もし岩でゴツゴツしたところに不用意にタッチダウンし、探査機が損傷するようなことがあっては、地球帰還が危ぶまれます。サンプル採取どころではありません。関係者一同頭を抱えることとなりました。筆者は直接にはサンプル採取に責任を負う立場ではありませんでしたが、衝突クレータを作成する立場としても困惑しました。そんなところでクレータできるかな…。

不安材料はほかにも出てきました。リュウグウの表面を詳細に見ていくと、小さなクレータの数が少ないことに気が付きます。遠目で最初に目に飛び込む最大のクレータ(通称デススタークレータ、後にウラシマクレータと命名される)をはじめ大きなクレータの存在は、リュウグウにおいて確実に衝突クレータの形成がなされることの証として安堵していたのですが、小さなクレータを明瞭に識別することが難しいのです。これは何を意味するのか? 岩がごろごろしているリュウグウ表面ではそもそも小さいクレータが形成しづらいことを物語っているのか、それとも小さいクレータが形成されても、

地滑りなどの表面流動や天体衝突に伴う地震（衝突振動）あるいは大きなクレータ形成時のイジェクタで覆い隠されるなどの結果、すぐに（とは言っても数十万年とかのタイムスケールですが）消去されてしまうのか。もし後者だとするとリュウグウの表面は最近まで活発に流動していたことを示すものであり、小天体の表層進化過程にとって重要な示唆を与えることとなります。クレータができるのかどうかは、実際に人工衝突を起こして見てみれば、答えが得られるはずですが。このような観点からも SCI による衝突実験の意義が再確認されました。

当初はリュウグウ到着後、3 か月ぐらしかけてグローバルな表面観測を行い表面状態や物質分布を把握したうえで最初のタッチダウン候補地点を選定、2018 年の 10 月には最初のタッチダウン運用を行う予定でした。しかし、現実は甘くありませんでした。岩だらけの表面から、なんとかタッチダウン可能な場所を見つけ出す作業に延々と時間を費やします。100 m スケールの平坦な領域など望むべくもなく、10 m スケールの領域を探し出すことになりました。当初の計画では、まず 100 m スケールの領域にタッチダウンすることでタッチダウン運用に慣れ、そのような「練習」（あくまで本番ではありません、念のため）を都合 2 回行った後に、10 m スケールの領域を目指してタッチダウンするというピンポイントタッチダウン運用を行う予定でした。その目論見は脆くも崩れ去り、いきなりピンポイントタッチダウンを行うことになる羽目に。そのため、慎重に検討を重ねること、約 8 か月、10 月予定から遅れること 4 か月、ようやくタッチダウンできそうだという目途がついて挙行されたのが、2019 年 2 月 22 日のことです。これが見事に成功しました。サンプル採取の方法は、「はやぶさ」初号機と同じ機構を採用し、1m の「筒（サンプラーホーン）」の先端が接地するや否や 300m/s の速度でタンタル弾丸を発射し、地表面から舞い上がった粒子や破片を回収するというものです。初号機では発射されなかった弾丸ですが、今回は無事発射され、舞い散る破片が見事に撮影されました。このタッチダウン成功・サンプル採取成功（おそらく）には、惜しめない賛辞がおくられ、筆者も感動していました。

## 6. SCI そして DCAM3：本番

さて、次はいよいよ SCI の出番です。SCI 運用は、複雑です（図 1）。まずは SCI を切り離す高度約 500 m まで探査機が降下します。そこで SCI を切り離すと、1 分ほど待ってから探査機が避難を開始します。約 1 km ほど水平に逃げたのち、今度はリュウグウを横目で見ながら「下方」に逃げていきます。その逃げる途中で DCAM3 を切り離し、さらに探査機はリュウグウの影に隠れるべく一目散に逃げていきます。SCI は分離から 40 分後に爆発するようタイマーセットされているので、40 分間で安全領域まで避難しなくてはなりません。その後もどんどん逃げて、SCI の爆発から 100 分後には約 20

kmほど遠ざかってようやく逃げるのをやめます。この一連の動作一つ一つを地上から確認し指令を送っていたのでは間に合いません（通信には片道17分ほどかかります）。したがって、あらかじめ一連のシーケンスを組んだ指令を探査機に送っておき、あとは全自動で運用となります。地上には探査機の状態を伝えるデータは送信されてきますが、地上に届くのは探査機の17分前の状態であり、リアルタイムの確認はできません。静かに結果を待つしかないわけです。これら一連の運用はすべてリハーサル不可能の一発勝負。しかも走り出したら止められません。SCIがちゃんと分離されるのか（分離が中途半端で探査機を追いかけてくるようなことがあっては目も当てられません）、ちゃんと計算通りに爆発し弾丸が飛んでいくのか、探査機はちゃんと逃げ切れるのか、DCAM3は予定位置で分離され電源が入るのか、撮像データは探査機にちゃんと届くのか、…もう心配事は山のようにあります。人事を尽くして天命を待つ、とはまさにこのことか、とドキドキしながら臨んだのが2019年4月5日。筆者も早朝から管制室に詰めかけましたが、特にすることもなく見守るだけです。「はやぶさ2」最大のイベントであるといっても過言ではないため管制室・運用室は関係者でゴった返していましたが、ほとんどが見守るしかなく、見栄えのよい映像が送られてくるわけでもないで、運用中は静まり返った状態。探査機姿勢制御の担当者が読み上げるカウントと、SCIが分離されました（と推定される時刻になりました）、SCIの爆発予定時刻です、といった報告が響き渡るのみ。予定通り逃げ切った時刻における探査機の状態を伝えるデータが確認され探査機が正常であることが告げられると、管制室にようやく安堵とともに拍手が沸き起こりました。SCIがどうなったかはともかく、探査機の無事が確認され、1回目のタッチダウンで採取したサンプルを地球に持ち帰るという使命は継続できる、というわけです。ただ、笑顔に満ちあふれた管制室の一角で浮かぬ表情をした者たちが数名。筆者を含むDCAM3チームのメンバです。その時点では、まだDCAM3の無事が確認されておらず、画像データが送信されてくるかどうか、成功か失敗か、祈る気持ちでデータ受信があれば表示されるはずのディスプレイを見つめます。そして…DCAM3からのデータを受信した旨を示す数字が表示された瞬間、ようやく笑顔がこぼれることになりました。この時点ではどんな画像が撮像できているのかはわかりませんが、ともかくDCAM3は生きており画像を送信してきたことが分かっただけでも感謝でした。

その後も探査機からデータが送られてきます。まず確認されたのは、SCIがきちんと分離されたこと、でした。探査機搭載カメラから撮像した画像には、姿勢よく分離されていくSCIが映っていました。地上試験の折に撮像した画像とほぼ同様のものであったので、おもわず「シミュレーション画像じゃないよね？」とつぶやいてしまったほど、きれいに映っていたのでした。あとは、SCIの爆破と弾丸の衝突の確認ですが…これはDCAM3の画像を確認するより術がありません。DCAM3の画像が地上へ降ろされ何が映っているかを確認するのは、その日の夜になるという話でしたので、まあのんびりし

ていたのですが….

## 7. 大成功！

お昼過ぎ、午後3時ごろだったと思います。DCAM3-Aの画像が優先的に地上に降ろされたということで、その確認を運用室の片隅で行うことになりました。画像にリュウグウが映っていることにまず感動し、そして、衝突によって生じたと思しきイジェクタが映っていた…！それからはもうお祭り騒ぎで、たくさんの人を呼び寄せ、ほら、どうよ、と見せては悦に入る状態でした。DCAM3-Aの撮影は低解像度ということであまり期待していなかったのですが、それでもはっきりシャープにイジェクタが映っていたの

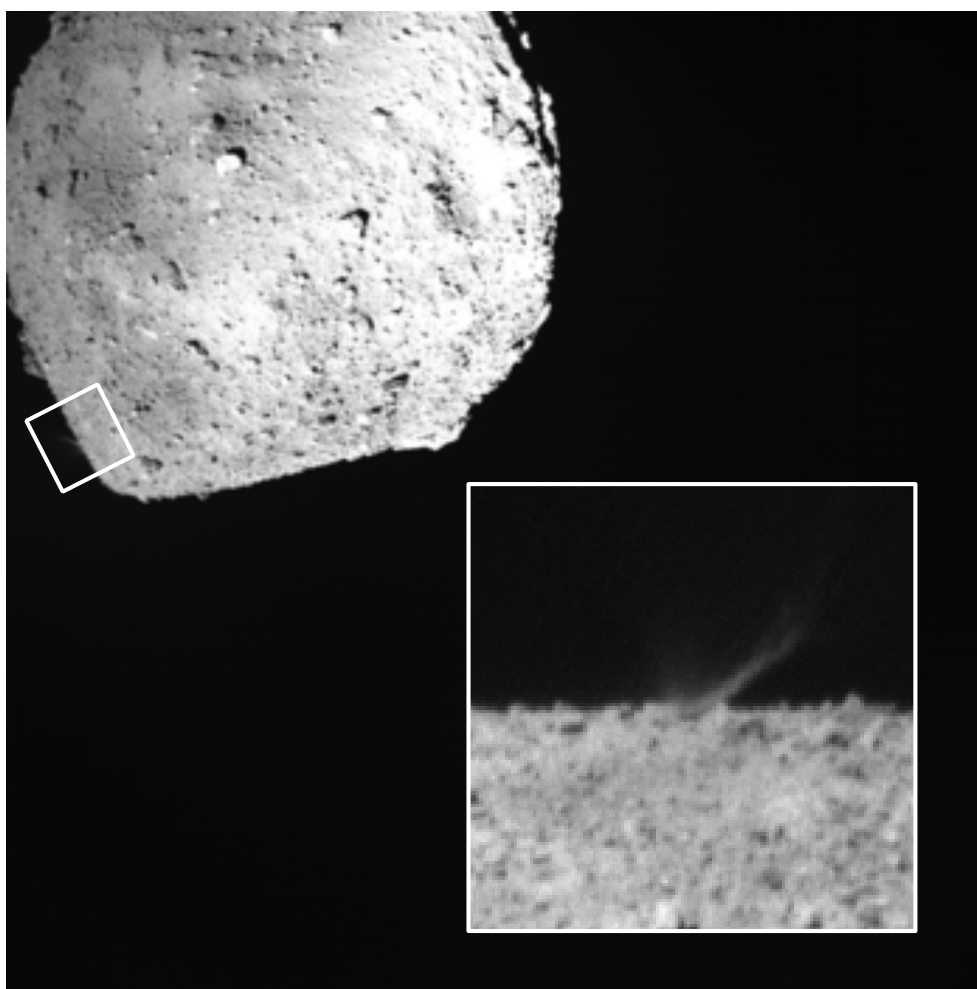


図3: SCI爆発後の約3秒後のDCAM3-D撮影画像。クレジット：：JAXA/神戸大/  
千葉工大/高知大/産業医科大。

でした。なぜこんなにもきれいに映っているのか…それはもう当たった場所が良かったというしかありません。というのも、狙ったところからわずか 20m 程度しか離れていないところに当たっており、これが DCAM3 から見て奥側でもなく手前側でもなく丁度リュウグウの縁付近でありました (図 3)。その結果、真っ黒な宇宙空間を背景にイジェクタが撮影され、それとはっきり認識できたのでした。奥側過ぎるとそもそもイジェクタが映らない可能性が高く、また手前側過ぎると背景となるリュウグウの地表面に紛れてなんだかよくわからなかった可能性が高かったと思われます。また、衝突点が硬い岩塊の上ではなく大量のイジェクタが放出されるような砂場のような場所だったことも幸いしました。直径 400 m の円内のどこか、という衝突精度からするとほぼど真ん中に当たっており、奇跡といってもよいかもしれません。

結局、この画像が決め手となり、その日の夕方には、記者発表で早々にプロマネが SCI 運用は成功！と宣言するに至りました。筆者には早朝 4 時過ぎに家を出て始まった長い一日でしたが、幸せな気分の家路につくことができました。

それからは待つてましたとばかりに画像が続々と再生され解析の始まりです。DCAM3-A の画像でこれだけきれいに映っているのだからと、DCAM3-D の画像にはがぜん期待が集まりましたが、しばらくして得られた DCAM3-D 画像が再生されると予想を裏切らない、それはそれは素晴らしい画像の連続でした (図 3)。逆円錐形状に発達するイジェクタ (イジェクタカーテンと呼びます)、それがどんどん成長しやがて消えていく様が 500 秒以上にわたって記録されており、パラパラアニメにするとまあ素敵。速報論文を SCIENCE に投稿する予定でしたが、その表紙を飾ることを確信する出来栄えでした (後日、頑張って交渉したのですが惜しくも表紙に採用とはなりませんでしたが…)。さらにこれだけ大きくはっきりと映っていると、衝突地点の特定がぐっと容易になります。あの、修行のようなクレータ探索訓練はなんだったのか、と思うほど、クレータ探しは楽になります。ただし、あれだけのイジェクタ、10 m 以上の大きな孔があっておかしくない、と思われていましたが、残念ながら DCAM3-D の画像からはクレータらしき「孔」がはっきり識別できませんでした。これは当初非常に不思議でしたが、太陽光がほぼ真上からあたる状態で、影がほとんどできなかったために孔が孔として認識できなかったということのようです。

次の楽しみは、退避した探査機が遠路はるばる復帰し (リュウグウの周りに漂っているイジェクタなど放出された塵を回避するため 100km ほど迂回して元の定常観測位置に復帰します)、再び衝突地点を撮影し出来たてほやほやのクレータを見ることでした。DCAM3 画像からおおよその形成位置が判明しているため、どのあたりを見ればよいのか見当がついているところ、2019 年 4 月 25 日、探査機が高度を下げていくとクレータが一目瞭然、その姿を現しました (図 4)。なんと大きなことか！それが最初の感想にして最大の成果といってよいものでした。クレータは円形ではなく半円形でありましたが、



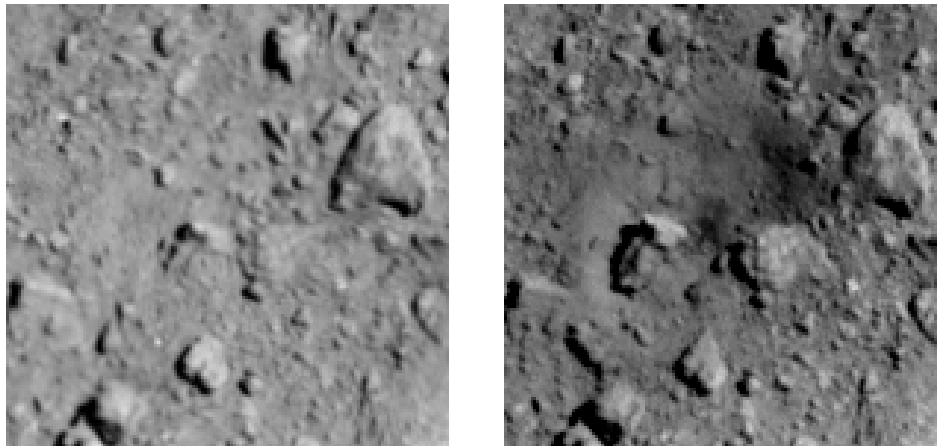


図4：高度1.7 kmから撮影された衝突地点の衝突前後の比較。(左)衝突前。(右)衝突後。クレジット：JAXA/東京大/高知大/立教大/名古屋大/千葉工大/明治大/会津大/産総研。

円形だと思えばその直径は10 mを優に超えており(その後の解析で直径約14 mと計測されました)、これは砂場への衝突によって形成されるような、予想した中では最大の大きさと匹敵するものでした。衝突前の画像と見比べると、クレータができた領域は決して平坦な場所ではなく、岩がゴロゴロしているようなところでした。さらに、衝突前に埋まっていた数mの岩塊がクレータ形成に伴って顔を出し移動しており、衝撃の大きさを物語っている一方、衝突点近傍にもかかわらず微動だにしていない岩もありました(これは地下深くまでずっと根を張った大きな岩盤のようなもの的一部分ではないかと推測されています)。ともかく、リュウグウの表層は強度が非常に弱く重力によってクレータの大きさが決まるということ、一見岩だらけ石ころだらけの表面であってもクレータはしっかり形成されるということ、などの「答え」が得られ、リュウグウ表層は非常に流動的であることが示唆される結果になりました。

このことはリュウグウの表層年代の推定にも影響を及ぼします。一般に天体表層の年代は表面にあるクレータがどれだけあるかカウントすることで計測されます(クレータ年代学という手法です)。クレータがたくさんあれば、それだけ表面が長期間天体(隕石)の衝突にさらされている、すなわち古いことになり、クレータが少なければ逆に表面が出来上がって間もないということになります。またクレータのサイズ分布も重要です。大きなクレータは大きな天体が衝突して形成されるのが普通なので、大きなクレータが多い場合にはそれだけ大きな天体がたくさん降ってきたことを意味します。衝突してくる天体は一般に大きなものほど少ない傾向にありますので、大きな天体の衝突回数を稼ぐためにはそれだけ長い期間さらされている必要があります。つまり、大きなクレー

一タが多いと表面年代は古いと判断されることとなります。精度よく表面年代を推定するためには、クレータの数密度を正確に数え上げるほか、衝突天体のサイズ分布として最適なものを仮定するなど、いくつかの指標が重要になってくるのですが、そのうちのひとつが、衝突する天体のサイズと形成されるクレータの大きさとの関係を与える「クレータサイズのスケーリング則」になります。例えば、最大のクレータに注目するとして、それが比較的小さい天体の衝突で形成され得るのであれば、まだ大きな天体が降ってきていないということで年代は新しいと考えられますし、逆に大きい天体の衝突で形成されたのであれば、古いということになります。クレータサイズのスケーリング則は、大きく分けると、重力でサイズが決まる「重力支配」か、標的の強度でサイズが決まる「強度支配」かによっており、前者は後者に比べ大きいクレータが形成されることとなります。このどちらを採用するかで、リュウグウの表面年代は1千万年か1億年かといった違いが生じます。今回の SCI 衝突実験の結果から、リュウグウにおけるクレータサイズのスケーリング則は重力支配であることが示唆されました。これを適用して、リュウグウの表面年代は1千万年程度という比較的新しいものである、と推定されています。

## 8. 2 回目のタッチダウン

ここまで、「はやぶさ2」プロジェクトは、1 回目のタッチダウン、SCI 運用、と目玉企画を次々と成功させてきました（他にも様々な特殊運用や、MINERVA-II-1、MASCOT といった分離着陸機の投下とその運用にも成功しています）。次の目玉企画は、2 回目のタッチダウンとサンプル採取です。もともとタッチダウンは3 回行うことを予定していました。しかし、先に述べたとおりリュウグウの表面が極めて険しいものであったため1 回目のタッチダウンが予定よりはるかに遅くなり、スケジュール的にあと2 回タッチダウンを行うことは厳しくなりました。最終的にタッチダウンは合計2 回にとどめるという判断が下りました（このとき SCI 運用を2 回目のタッチダウンに先駆けて行うことも決断されています）。さらに、スケジュールが厳しいということで、2 回目のタッチダウン候補地点は、SCI 衝突地点とは別に検討され、SCI 運用の前には仮決定されていました。本来なら、SCI によって形成したクレータ（「おむすびころりんクレータ」と命名されていますが、本稿では簡単に以後「SCI クレータ」と呼ぶことにします）の場所を確認した後に、そのクレータ内もしくはその近辺にタッチダウンする、という計画でしたが、それは叶わない、というわけです。ただし、SCI で狙う場所は、2 回目タッチダウン候補地点の近傍に設定しました。うまくいくと SCI クレータのイジェクタがタッチダウン予定地点を覆い、そのイジェクタを採取することが可能となるかもしれない、と淡い期待はもっていました。イジェクタを採取する、ということは、地中にあった物質を採取する、ということを意味します。1 回目で採取した表面物質の分

析と併せれば、リュウグウの深度方向の情報が得られ、宇宙風化作用や表層流動の程度を推測しリュウグウの進化過程解明に大きく貢献するとして、その科学的価値は非常に高いものとなります。一方で、SCIの低い命中精度を考えると期待しないほうがよいだろうとも思っていました。

そしてSCI弾丸は、ほぼ狙ったところに衝突し、結果的に2回目のタッチダウン候補地点の近傍にクレータが形成されました。なんと素晴らしい！と思いきや、SCIクレータからのイジェクタはタッチダウン候補地点の方向にはあまり飛んでいない、ということが判明しました。タッチダウンを計画通り挙行しサンプルを採取したとして、SCIクレータのイジェクタを採取する確率は非常に低い（なくはないけど…）、という予測が立てられたのです。それでも仕方ないということで予定通りタッチダウンを行うために、その付近にターゲットマーカを投下する運用が行われました。ターゲットマーカはタッチダウンのために探査機が降下していく際の日印なるもので、その投下は必須の運用です。順調に行けば、そのままターゲットマーカがタッチダウン候補地点付近に投下され、続いてそれを目標にタッチダウンして…ということになっていたはずですが、しかし、ここで神がかり的といってよい事態が生じました。探査機はターゲットマーカを投下する直前、不具合を検知し緊急上昇をすることになってしまったのです。普通ならばがっかりしてやり直し、となるところ、偶然にも緊急上昇時にSCIクレータを挟んだ反対側の領域の高解像度撮像を行うことに成功していたのです。その領域は、SCIクレータ由来のイジェクタが十分の厚みで堆積していると推測されているところで、高解像度画像をもとに、ここへのタッチダウンを検討する余地が生じたのでした。実際に検討すると、狭いながらも（半径3.5mの領域）タッチダウン可能な場所があることが判明し、やはりイジェクタ採取の科学的価値を重視し、2回目のタッチダウンはここに狙いを定めることとなったのです。

そうして入念に準備して臨んだ2019年7月11日、2回目のタッチダウンは挙行されました。2回目のタッチダウンを行う前には、「すでに1回目のタッチダウンに成功してリュウグウのサンプルというお宝を持っているんだから、2回目のタッチダウンというリスクの高い危ない橋を渡るようなことはせずに地球に帰ってくればよいのでは？」という議論もありました。しかし、得られるサンプルの科学的価値と、成功すれば世界初となる小天体マルチサンプリングという観点から、2回目のタッチダウンは十分挑戦するに値するということが確認され、さらに慎重に安全性が検討された結果、ゴーサインが出されました。結果は、見事成功！おそらくイジェクタが採取されたものと推測され、地球帰還後に施される分析の結果に大きな期待が寄せられています。

## 9. これからのこと

「はやぶさ2」はその後も残された時間で MINERVA-II-2 の分離運用やグローバル観測などできる限りの運用・観測を行いました。そして「もうやり残したことはないですね?」という確認がなされ、2019年11月13日、リュウグウ近傍から離れ、地球帰還の途につきました。この原稿を執筆中の2020年8月31日現在、順調に地球に向けて飛行を続けています。リュウグウのサンプルが格納されたカプセルが地球に帰ってくるのは、2020年12月6日。はやぶさ初号機と同様オーストラリアのウーメラ砂漠に落下予定です。現在まで、怖いくらいに節目となる運用をことごとく成功させてきた「はやぶさ2」です。最後の「締め」もぜひ成功してほしいものです。そして、カプセルとともに地球大気に突入し燃え尽きた初号機と違い、「はやぶさ2」はカプセル投下後再び地球を離れ宇宙に旅立つ予定です。次の探査対象となる小惑星の選定もほぼ終わっており、順調に行けば約10年間にわたる拡張ミッションに入る予定です。「はやぶさ2」の旅路はまだまだ続きます。

筆者は今、SCI クレータに関する研究および論文執筆などしつつ、火星衛星からのサンプルリターンを狙う火星衛星探査計画 (Martian Moons eXploration: MMX) をはじめ別の探査ミッションに参画しています。もう惑星探査とは切っても切れない縁ができつつあります。10年前には考えられなかったことを思うと感慨深いものがありますが、自分のライフワークはやっぱり天体衝突かな、と再認識しつつもあります。天体において衝突実験を行う探査計画は今後も盛んにおこなわれることでしょう。SCIによって「衝突探査先進国」となった日本において、次の衝突探査の実現を夢見ている今日この頃です。

### 謝辞：

「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。