

火の鳥「はやぶさ」未来編 その3 ～ SCI/DCAM3と衝突の科学～

荒川 政彦¹, 和田 浩二², はやぶさ2 SCI/DCAM3チーム

(要旨) はやぶさ2には小型の衝突装置(SCI)が搭載されており、これは秒速2 kmで小惑星表面に衝突してクレーターを形成する。このクレーターは小惑星内部を覗くための小窓であり、リモートセンシング観測やサンプル回収から、小惑星表面の宇宙風化や浅内部構造に関する知見を得る。一方、SCIが衝突する様子は分離カメラ(DCAM3)により撮影され、イジェクタカーテンの拡大する様子や小惑星周囲を飛び交うダストを観察する。SCIによる小惑星への衝突は宇宙衝突実験ともいえる。我々はこの世界で最初の小惑星における宇宙衝突実験の機会を利用して、微小重力下における「本物の小惑星物質」のクレーター形成過程を明らかにする。

1. 惑星科学と衝突

1.1 SCIの目的

SCIとはSmall Carry-on Impactorの略で、日本語では小型搭載型衝突装置と呼んでいる機器である。はやぶさ2では、はやぶさ初号機と比較して幾つかの新しい試みがなされているが、このSCIはその中でも最もチャレンジングな試みである。また、このチャレンジをその場で観測するために分離カメラ(DCAM3)が搭載されている。簡単にSCIの機能を説明すると、SCIは、母船から切り離された後、ライナーと呼ばれる約2 kgの弾丸を爆薬により加速し、衝突速度約2 km/sで小惑星表面に衝突させる機器である。また、DCAM3は、このSCIの衝突過程を観測するカメラであり、SCIの衝突前に母船から切り離されて観測を行う。

SCIの目的は非常に単純で、単に小惑星の表面に穴を掘ることである。この穴が小惑星の内部にアクセスする小窓となり、表面のリモセン観測だけでは得られない様々な情報をもたらしてくれるはずである。さらに穴をあけた時の放出物(イジェクタ)も貴重な観測対

象である。放出物には様々な深さから出てきた物質が含まれているはずなので、これを採取したり観測することにより、小惑星内部の情報に確実にアクセスできる。このようにSCIは表層掘削の手段であり、その意味ではテンペル第一彗星に対するDeep Impactや月に対するLCROSSなど、NASAが行った衝突機を用いた惑星探査の延長上にある。両者は主として放出物の観測に重点を置いており、地上望遠鏡でも観測できるほど大規模な放出物の形成を目標としていた。そしてDeep Impactでは放出物の観測に成功したが、LCROSSでは地上望遠鏡からの観測はかなり難しかったようである。また、両者ともクレーター孔の同定には非常に苦労したようである。SCIは両者と比べて遙かに衝突エネルギーが小さく、そのため形成されるクレーターも小さく、放出物の量も少ない。ただ、衝突前後の小惑星表面を詳細に観測できるという点で2つの探査にはないアドバンテージがある。はやぶさ2では、形成されるクレーターは小さいが、 <10 cm/pixelという高空間分解能の可視カメラ(ONC)で観測する予定であり、またDCAM3による衝突時のその場観測も予定している。我々はこれらの手段により、確実に衝突放出物と衝突点を捉える予定である。

一方、衝突探査には避けては通れない問題がある。それは衝突時に形成されるクレーターサイズなど、ク

1. 神戸大学大学院理学研究科

2. 千葉工業大学惑星探査研究センター

masahiko, arakawa@penguin.kobe-u.ac.jp

レーターの物理量に関する事前の予想が難しいということである。はやぶさ2が探査対象とする小惑星1999JU3の場合もそうであるが、天体表面の状況は行ってみるまでわからない。探査計画を立案する上では、衝突規模の見積もりは安全性や観測可能性の検討の上でも必須であるが、この検討が極めて難しいのである。従って、事前の計画ではあらゆる可能性を検討することになるが、あまりにも悲観的な見積もりをするとSCIを撃つこと自身に意味が見いだせなくなる。我々が、SCIの科学目標を検討して行く中で一番困ったのがこの点である。そこで、我々は、このSCIの持つ穴掘り機能を宇宙における衝突実験と見なして、その科学的意義について見直すことにした。その結果、非常に小さな穴であっても、それはその小惑星の表面物性を表すものであり、さらにその物性において得られる衝突クレーターの情報は、地上では得られない貴重な実験データとなることに気づかされた。

1.2 地上実験と惑星衝突をつなぐ宇宙衝突実験

はやぶさ2でSCIが搭載されることになったのは、これまでの日本の惑星衝突に関する研究とは無縁でないと思う。その搭載には様々な議論があったと思うが、結果として30年以上行われてきた日本の衝突実験の実績を生かす良いチャンスとなった。日本では1980年代に惑星衝突に関する室内実験が本格的に開始されて以来、一時は研究が下火になった時期もあったが、

衝突破壊やクレーター形成に関する研究が次々と新しい視点から行われてきている。

世界的に見れば衝突クレーターに関する研究は、1990年代には地上実験とそれに基づいた解析から理論(スケーリング則)が整備され、クレーターサイズやイジェクタの速度分布などが予測できるようになっていた [1]。このクレーター形成に関する理論を用いるとSCIにより形成されるクレーターの物理量を推定することが可能である。しかしながら、この理論は均質標的に対して構築されたものであり、そこから大きく外れる性質を持つ表層に対して応用することは難しい。2000年代に入って頻繁に行われるようになった小惑星探査から、エロスのような岩石質の一枚岩天体だけでなく、C型小惑星のマチルデのように50%以上の高い空隙を持つ天体やイトカワのようにラブルパイル構造を持つ天体までも発見され、小惑星の表層は多様であることが改めて認識された。その結果、現在のクレーター形成に関する研究では、空隙率、物質強度、粒径などといったこれまでスケーリング則構築の上でありあまり考慮されてこなかった要素がクレーター形成に及ぼす影響を調べるものが中心となっている。一方、実際の小惑星を構成している表層の物性を推測することは困難であり、その一部分を隕石の物性から類推するしかない。

スケーリング則は、室内実験の結果を実スケールの天体衝突に応用するために提案されているが、本当に

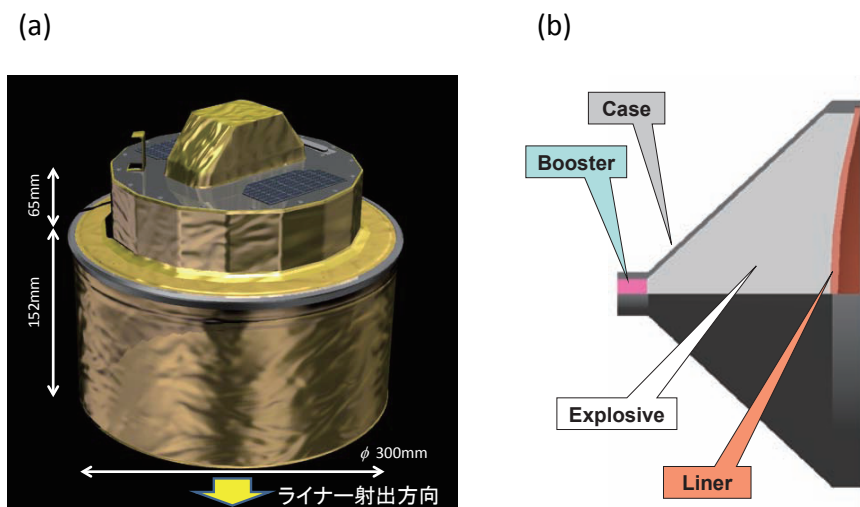


図1：小型搭載型衝突装置(SCI)の説明。(a)概観。(b)爆薬部の断面図。

このスケーリング則を信じてcmスケールの結果をkmスケールの現象に適用して良いのか常に心配になる。このスケールの問題としては、物質強度の減少や重力の影響などが挙げられるが、地上実験では両者とも実現するのが難しく、その多くは数値シミュレーションによる研究に依存しているのが現状である。

このように小惑星衝突を模擬する地上実験(数値実験も含む)には、対象物の不定性と物質強度や重力などのスケールに由来する問題が常に存在しており、これを解決するのは極めて困難である。SCIによる小惑星表層への衝突は、地上実験では解決が難しいこの2つの問題に対して、解決の糸口を与えてくれる。すなわち、SCIの衝突は、(1) 本物の小惑星の表面を標的にしている、(2) 弾丸大きさが1桁以上大きい、(3) 標的は微小重力下にある、という地上では得難い3つの特徴を持っており、衝突実験としてはまたとないチャンスである。こうして表面の穴掘りのために搭載されたSCIは、本物の小惑星における世界初の宇宙衝突実験のための装置として見直されることになった。

2. 小型搭載型衝突装置と分離カメラ

2.1 機器の紹介

2.1.1 小型搭載型衝突装置 (Small Carry-on Impactor)

この装置の概略を図1aに示す。サイズは直径30 cm、高さ30 cmほどで、質量は約20 kgとなっている。母船の-Z面(アンテナとは反対側の面で小惑星に対峙する)に設置され、分離機構により小惑星へと投下される。内部にはコーン型の爆薬部があり、このコーンの底面に円盤型のライナーが取り付けられている(図1b)。ライナーは質量2.5 kg、直径26.5 cmの銅板であり、コーン中のプラスチック爆弾の爆破によって加速される。その加速による初速度は2 km/s程度である。ライナーは加速中に徐々に中空の球殻へと変形していく。最終的には直径15 cm程の半球殻状の弾丸に成形され、質量2 kg以上に保って小惑星に衝突することが期待されている。これまでにSCIの実爆実験が野外試験場で実施されているが、その実験からこの半球殻は、加速時に回転運動が加わることがあり、衝突時の弾丸の衝突面は制御できないことが分かっている。球殻の閉じた方向からぶつかる場合と球殻が開いた方向からぶ

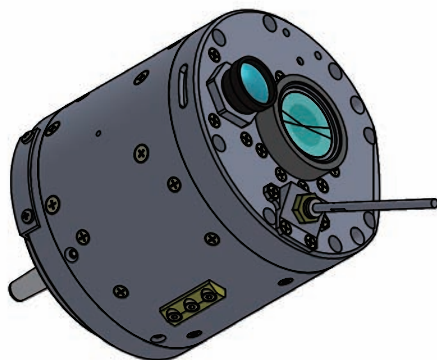


図2：分離カメラ(DCAM3)の構造。

つかる場合でクレーター形成に対して何らかの影響があるのかは、模擬SCI弾丸を使用した室内実験により確認していく予定である。一方、このような半球殻の弾丸は通常の室内実験では利用しないため、この半球殻弾丸に対してスケーリング則を適応する時に問題が生ずる。それは、直径15 cm程度の外形は持つが、中空まで含めた時の密度は銅よりかなり低くなるという点である。通常の弾丸は中味が平均的に詰まった球形もしくは円筒形であるので、そのような弾丸と比較した場合、この半球殻弾丸をどのように扱うべきかについても室内実験で確認しておく必要がある。

2.1.2 分離カメラ (Deployable CAMera 3)

分離カメラは、SCI運用時に母船から分離して、衝突の様子を撮影する小型可視光カメラである。その原型は、小型ソーラー電力セイル実証機IKAROSに搭載されたDeployable CAMera 1, 2であり、そのヘリテージを生かして、はやぶさ2において開発されている(そのため通称DCAM3と呼ばれる)。このDCAM3は、図2にあるように直径78 mmの小さな筐体であるが、その中にミニ衛星の機能を詰め込んである。それらは、レンズ、光学センサーユニット、バッテリー、送信機ユニット、それにアンテナである。また、このDCAM3には冗長性を考慮して二種類のカメラユニットが搭載されている。それは、科学観測に用いるデジタル系カメラと工学モニター用のアナログ系カメラである。デジタル系カメラが急遽、準備不足の状態で搭載されることになったため、そのバックアップの意味もありアナログ系カメラとの同居となった。この二つのカメラを区別するためにデジタル系カメラを

DCAM3-D、アナログ系カメラをDCAM3-Aと呼んでいる。ここでは科学観測に用いるDCAM3-Dに関して簡単に紹介する。

このカメラの特徴は非常に広い視野を持つことである。距離1 km程度離れた位置から後述するように爆発前のSCIと小惑星上での衝突地点を撮像できるように74°×74°の視野を持つ。その爆発前のSCI、すなわち母船との分離後に小惑星へと落下する小さなSCI本体を観測し、かつ放出されるイジェクタも明瞭に撮像するために明るくシャープに撮像可能な光学系を持つ。光学センサーは2000×2000 pixelの画素数を持つCMOSである。この光学系で得られる空間分解能は、撮影対象までの距離にもよるがおよそ数10 cm/pixelから1 m/pixelとなる。なお、取得する画像の階調はモノクロ8 bitである。

カメラで観測する被写体はSCI運用の時間とともに変わっていく。DCAM3は、母船が小惑星の裏側へ避難する途中で分離されるが、姿勢を安定化させるために光軸と回転軸が一致するような回転が分離時に与えられる。分離時にはまずSCIの落下を観測する予定である。SCI表面から散乱する太陽光を観測することにより、SCIが点火・発射されるまでの軌跡を追尾する。SCI発射後からは、小惑星表面から成長するイジェクタカーテンの観測を行う(図3)。この期間は、100m/sまでの高速のイジェクタを観測する事を狙って毎秒1枚づつ撮影を行う予定である。イジェクタカーテンは、



図3：分離カメラで撮像した衝突クレーターの想像図。NASA dawn-image-072311を改変。

小惑星の重力により徐々にその形状を変化させ、最終的にはダストの数密度が低くなりカーテンとしては認識できなくなる。そのためイジェクタカーテンの観測は20分程度を予定しており、その後は、小惑星の重力により落下する個々のダストを観測する。このダスト観測モードでは、10秒おきに5×5 binning画像を取得し、カメラの周囲を通り過ぎるダストの撮影を試みる。DCAM3の電源の寿命は1～2時間であるので、この寿命が尽きるまでダスト観測を行う。ただ、小惑星の重力によっては電源寿命以前に小惑星に落下・衝突する可能性もあるため、その場合は衝突によりDCAM3が故障した時点で撮影終了となる。

2.2 SCIの運用シナリオ

図4にSCIの運用シナリオを示す。まず、母船の制御により小惑星上にSCIの照準を合わせる。その後、小惑星から高度500 mの位置でSCIは母船から切り離される。切り離しと同時に母船は回避マヌーバを開始し、SCIの爆破後の破片や小惑星からの放出物の直撃を受けない位置まで移動する。移動の途中、ちょうどSCI衝突を真横から観測できるような位置でDCAM3

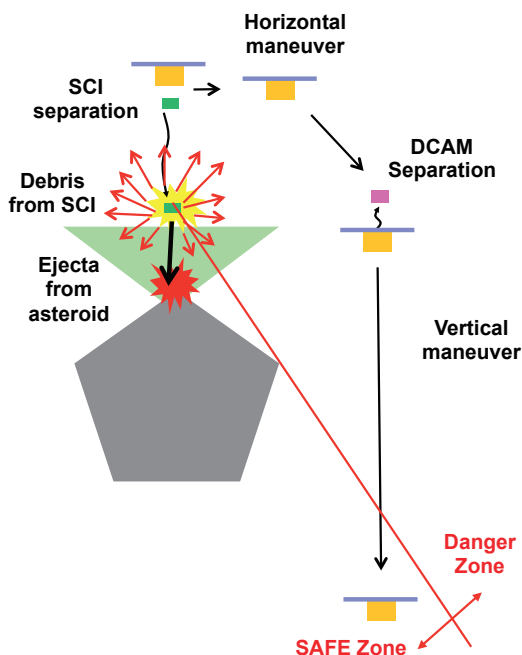


図4：小型衝突装置(SCI)の運用シーケンス。

を分離する。DCAM3はその時点から撮影を開始し、SCIが小惑星に落下する様子を観測し続ける。はやくは2が、DCAM3とは通信可能であるが、衝突デブリからは安全な位置にまで退避した後、SCIは点火され弾丸が発射される。

SCI衝突後は、母船は最低2週間、衝突によるダストが小惑星周囲から消えるまで退避を続ける。その後、衝突孔の探索を行うためにホームポジションに復帰する。この時、予測される最大径のクレーター(10 m)が形成されているなら、可視カメラ(ONC)により観測できるはずである。この後、衝突クレーター付近からサンプル採取を行うために、衝突孔を探すことになるが、DCAM3で観測した衝突点を参考に徐々に高度を下げながらクレーター孔探しを行う。運良く(?)クレーターが見つければ、ONC以外のリモセン機器(近赤外線分光計 NIRS3, 中間赤外カメラ TIR, レーザー高度計 LIDAR)でも詳細観測が可能となる。さらに、クレーターのサイズやクレーターが形成された周囲の地形等を考慮しながら可能であればサンプル採取を試みることになる。

3. 宇宙衝突実験

3.1 衝突条件を押さえる

SCI衝突を宇宙衝突実験として考えた時、室内実験と同様に衝突条件を押さえることが重要である。弾丸の衝突速度や質量は、その場観測はできないので地上の実爆実験の結果から推定することになる。ただし、これまでの実爆実験の結果を見ると再現性は良いようである。一方、SCI弾丸は、母船から分離した後、真っ直ぐ小惑星に向かって飛ぶとは限らない。そのため衝突角度は実測する必要がある。角度の計測にはSCIの点火位置を正確に求める必要がある。切り離し時の母船の速度誤差や切り離し後のSCIのニュートンシヨンの大小により衝突位置の精度が決まる。そこで切り離し後のSCIの運動を知るために母船からSCIが落下する様子を、ONCで撮像する予定である。ONCによる分離後のSCIの観測とDCAM3によるSCIの発射高度の記録から発射点を決定する。この発射点と小惑星表面の着弾点を結ぶことにより、実際の衝突角度を求めることができる。さらに、着弾点付近は事前に

ONCによりあらかじめ撮像しておくことで、局所的な衝突面の傾きや凸凹具合などの情報も考慮して衝突角度を推定する。

3.2 スケーリング則への貢献

実際の小惑星表面において既知の衝突条件でクレーターを作ることができれば、それは今後の衝突研究における重要なベンチマーク(基準点)になるはずである。地上実験では、小惑星のアナログ物質を用いて実験するしかないが、このアナログ物質を選定するためにも貴重なデータとなる。衝突クレーターのスケーリング則には、クレーターサイズやイジェクタ速度を表すものがあるが、それらのスケーリング則を現実の小惑星上の衝突実験から検証・改訂することができる。例えば、クレーターサイズに関しては、1999JU3のような微小重力下で重力がクレーター形成に対してどのように影響するかは、これまで良く分かっていない。まず、地上実験の例が少ないのと、その結果も研究毎に矛盾している[2]。微小重力下での衝突クレーターの形成は、小惑星だけでなく、微惑星の様な微小天体上でも頻繁に起きていたと考えられる。従って、この過程は小惑星の衝突進化だけでなく、惑星形成論を研究して行く上でも重要な素過程である。もちろん、1999JU3が微惑星というわけではないが、微小重力下に長期間おかれた表層・内部構造を持つ天体という意味では、微惑星のような力学構造を持つ天体と言えるかもしれない。くどいようだが、地球上で微小重力実験を行うのは至難の業である。確かに落下棟や専用の飛行機を使えばある程度長時間の微小重力を作り出せるし、それだけの時間があれば衝突実験は可能である。しかしながら、問題は実験時の微小重力だけではない。その標的試料そのものが微小重力下で準備されていなければ不十分なのである。地上実験では1 Gの元で標的を準備するため、砂であれガラスビーズであれ自重による圧縮を受けている。また、1 G下では砂やビーズ同士の結合力より、はるかに重力が大きいため100 μm 以上の粒子では、ほぼランダム最密充填となってしまう。一方、微小重力下では粒子同士の結合力のため、ある程度大きな粒子サイズであっても重力に抗して構造を保つことが可能となり、最密充填より遙かに大きな空隙率を持つことができる。微惑星や微小天体の表層はそのような状態になっているのではないかと想像する。そう

いう意味でも1999JU3への衝突実験は、微小重力下での衝突過程に関して我々に全く新しい知識をもたらしてくれる可能性がある。

クレーターサイズのスケール則の構築に関しては、SCI衝突だけでなくサンプラーによる衝突クレーターも参考になる。サンプラーでは300 m/sで弾丸を発射し放出される破片を資料として回収する機構を採用している。この衝突によって最大1 m程度のクレーターが形成される可能性があるが、衝突条件はSCIとは大きく異なる。SCI衝突地点をサンプリング地点に近接させることができれば、表面状態が似通った条件で、衝突速度や弾丸サイズの異なる実験データを得ることができる。これは、はやぶさ2の探査データのみでクレーターサイズに対するスケール則のパラメーターを決めることができることを意味しており、宇宙衝突実験にはSCIだけでなくサンプラーの衝突孔観察も重要である。

一方、イジェクタの速度分布に関するスケール則は、クレーターサイズほど確立したものではない。イジェクタの速度分布は、天体の衝突破壊・再集積、レゴリス形成、それに惑星間塵の生成率を調べるためには必須の素過程であるが、3次元的に広がる多数の高速飛翔粒子を計測するという実験的困難さからその研究はあまり進んでいない。現在でも速度分布を計測するための室内実験が引き続き行われている。先行している理論的研究によれば、クレーター中心から放出されるイジェクタの速度分布はクレーターサイズのスケール則と同じく点源近似と終段階有効エネルギーに関連するパラメーターで記述できることが分かっている。一方、クレーターリム付近では、その理論からは外れた挙動を示すことが分かってきた。リム近傍では、粒子間の固着力など表層物質の性質に依存している可能性があり、この領域の室内実験を進めることがSCIのイジェクタカーテンを解析するには重要であると思われる。

イジェクタの速度分布は、DCAM3により観測されたイジェクタカーテンの形状やその時間変化を解析して求める予定である。しかしながら、イジェクタカーテンの形状から速度分布を求めるような研究はこれまで室内実験では例がなく、我々は、まずこの解析手法の構築から始めなくてはならなかった。現在、個々のイジェクタ粒子の軌跡とその粒子が作るイジェクタカ

ーテンの関係を理論的に整理し、その結果得られた理論式に基づいた解析手法を試験中である。SCIによる宇宙衝突実験を成功させるためには、室内実験を中心として検討すべき課題が数多く残されている。

3.3 本当はもっと複雑

1999JU3の表面はいったいどの様になっているのだろうか。当初、SCIの衝突クレーターの検討においては、砂面と岩盤の2種類を典型的な例として検討していた。しかしながら、イトカワの表面やマチルデの空隙率を考慮し、その後、さらに検討を重ねた結果、現在では図5にあるような分類を考えている。表面を特徴づける量としては、構成物の強度、サイズ、空隙率が挙げられるが、粉体層(粒径1 mm以下)では、バルクの強度が重要であり、粒子層(粒径1mm～1.5m)では、バルク強度はほぼ0となるので個々の構成粒子の強度が重要となる。一枚岩では、もちろんバルクの強度がクレーターサイズを制御する最も重要な物理量である。1999JU3の表面は図5にあるすべてが可能性のある表面となる。従って、SCIによって形成されるクレーターサイズを検討するには、これらすべての想定される表面状態において形成されるクレーターの特徴を押さえておく必要がある。これまでの研究から推定される衝突クレーターの大きさやイジェクタカーテンの特徴を表1に示す。また、それぞれの表面状態においてクレーター形成を支配するメカニズムも列挙している。これまでの知見から予測可能な表面状態もあるが、粒子サイズの影響や粉体上に形成されるクレーターの研究などは、さらなる詳しい研究が必要

表1：小惑星の表面多様性と予測されるクレーターサイズ。

表面地形の分類：表層構造均質ケース

分類	細分類	クレーター径	イジェクタ	スケール則
一枚岩 >1.5m	高強度層	15cm-1m	45°以外 高速破片	強度
	弱強度層	1m-10m	45°以外 根本で分離	強度+重力
粒子層 1mm-1.5m	ガレ場15cm-1.5m	<15cm - 1m	45°以外、大破片、 崩い	強度
	小石場5cm-15cm	1m -10m	見えない	重力
	砂場 1mm-5cm	1m ->10m	45°、広い領域	重力
粉体層 <1mm	Φ=40-45%	1m - 10m	45°、広い領域で明 るい、根本で分離	重力+強度
	Φ=45-70%	30cm - 1m	低速で薄い、観測 困難	重力+強度
	Φ>70%	< 30cm	見えない	強度+重力 ^{*1}

Φ: 空隙率

*1 天井崩落

表面地形の分類

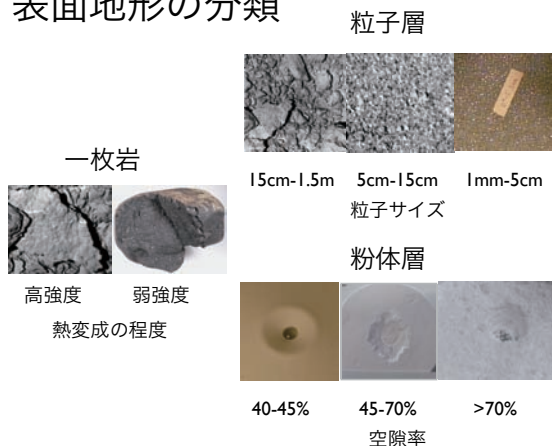


図5：小惑星表面の多様性。

である。均質標的に対して構築された既存のスケーリング則が多様な表面に対してそのまま利用できれば良いが、そうでない場合には、スケーリング則の改訂を含むクレーター形成メカニズムの探求まで考慮したしっかりした研究が必要となる。これまでのように実験室の良く制御された均質な標的だけを見ていては、SCI衝突実験の結果を十二分に理解して、そこから重要な物理を引き出すことはできない。今後は現実的な小惑星表面での衝突過程を扱うことができる理論を整えてく必要がある。

4. まだまだ先は長い

我々は、はやぶさ2プロジェクトの中でSCI/DCAM3によるサイエンスを実現するために様々な検討を重ねてきた。一方、SCIがその発射時に生成する自身のデブリや小惑星表面から発生するイジェクタは、母船に対して極めて危険な存在である。それ故、我々はSCI運用のリスクとそれに見合った科学的価値があるかどうかを常に問われてきた。リスクに関しては今後も検討を重ねてはやぶさ2プロジェクトが破綻しないように注意していきたいと思っている。サイエンスの検討は、ここまで書いてきたように地上実験を含めて我々がやらなくてはならないことは多く残っている。宇宙衝突実験という新しい探査の形をしっかりと実現して行くためにも、一つ一つステップを踏んで実績を積み重ねて行くつもりである。さらに、DCAM3の開

発は現在佳境を迎えている。他の機器と比べてかなり遅れて開発が始まったこの機器は、常にプロジェクトのお荷物として迷惑をかけ続けている。開発メンバーは最高のパフォーマンスで仕事をこなしてくれているが、それ以上に課題が増えるという状況がずっと続いている。今後半年は厳しい開発状況が続くと思われるが、SCIにより最高のサイエンスを実現するにはDCAM3はなくてはならない機器であるので、なんとか開発を成功させたいと思っている。

最後にこのSCI/DCAM3について我々の意気込みをまとめてみたい。小惑星への人工クレーターの形成実験は世界初であり、その詳細観測により、天体衝突過程に関するベンチマークが得られると期待される。我々は、以下をモットーとして衝突の“SCIENCE”を発展させることに努める。

Small Carry-on Impactor Elucidates the Nature of Craters and Ejecta (SCIENCE).

(つづく)

参考文献

- [1] Housen, K. R. and Holsapple, K. A., 2011, *Icarus* 211, 856.
- [2] 高木靖彦, 2012, 日本マイクログラビティ応用学会誌 29(4), 163.