特集「日本における衝突研究の軌跡」

インパクターの破壊

中村 昭子[1]

2015年5月11日受領，査読を経て2015年7月15日受理.

（**要旨**）小惑星Vesta表面に発見された暗い物質（低アルベド物質）には，他天体起源物質が含まれる可能性が指摘されている．ジャイアントインパクトのインパクター物質のゆくえを扱った数値シミュレーション研究はあるが，小規模な衝突でのインパクターは通常忘れられた存在である．本稿では，小惑星の表面に衝突した他天体物質の塊がどの程度粉砕されるかについて，衝突実験で回収された弾丸の破片質量のデータと，水谷スケーリング則などをもとに考察した．実験室での結果を外挿してみると，他天体物質の塊がレゴリスへ衝突した場合，小惑星Itokawa上に見つかったブラックボルダーのような数メートル級の岩塊が残るというのは，なかなか困難そうであった．一方，センチメートルサイズの岩片は残るかもしれないことが示唆された．

1. 小天体表層の外来物質

はやぶさのItokawa画像には，ブラックボルダーと呼ばれる周りよりも反射率が顕著に小さい，大きさ数メートルの岩塊が見つかっていて，経度ゼロの目印に使われている[1]．ブラックボルダーの起源については，反射率に加えて多色測光の情報などをもとに議論されている．Itokawa母天体で衝撃変性を受けた部分が岩塊として残っている可能性のほかに，炭素質コンドライトのような塊が捕獲された可能性も挙げられている[2]．

隕石の中には，複数の母天体起源の岩片を含む種類がある[3]．Almahata Sitta隕石は，ユレイライトを主成分とする砕屑角礫岩であり，エンスタタイトコンドライトや普通コンドライト，炭素質コンドライトなど多種類の岩片からなっている[4]．この隕石は，小惑星2008TC_3が，発見された直後に地球大気に突入し，そのごく一部が回収されたものである．ユレイライト物質とその他の物質は，いつどのように混合して小惑星2008TC_3を形成するに至ったのか．1つのシナリオは，ユレイライト物質からなる天体表面のレゴリスに，他天体起源の岩片が衝突して取り込まれたとするものである[5]．

HED隕石は，分化した小惑星Vesta起源の可能性のあるエコンドライトであるが，数%の炭素質コンドライトクラストを含むことが知られている[6]．地上からの観測によってVestaに水酸基もしくは結晶水を含む鉱物があることが示され，その起源が炭素質コンドライト質インパクターの破片である可能性が，他の起源の可能性とともに議論されていた[7]．Dawn探査機による観測は，小惑星Vestaの表面に局所的に水酸基を含む低アルベド物質が存在し，ベスタ固有の物質と混合していることを示唆した[8]．この観測は，小惑星表面に他天体物質の塊が衝突しその一部がレゴリスに捕獲されて混合・石化することで他天体起源の岩片を含む隕石となる，という一連の過程のある瞬間を捉えたものなのかもしれない．

Stardust計画による木星族彗星Wild 2の塵の分析では，太陽近傍の高温領域で形成されたと考えられる物質を含むことが明らかにされている[9]．このように，小天体の形成と進化の途上で異なる起源をもつ物質が混合した可能性がさまざまな研究によって示唆されている．Wild 2彗星の高温起源物質がそう考えられているように，天体形成時に混合が起こった場合や，

1. 神戸大学大学院理学研究科 惑星学専攻
amnakamu@kobe-u.ac.jp

HED隕石中の炭素質コンドライトクラストのように，天体形成後に混合したと考えられる場合があるだろう．後者については，小天体表面に衝突した他天体物質塊が，どのくらいの大きさで残るのか，すなわち，どの程度粉砕されるのかということが定量的議論の出発点となる．後者の過程による混合物の大きさに制約を与えることができれば，観測された混合物の大きさがその起源を推測する手がかりとなるかもしれない．そこで，本稿では，インパクターの破壊に着目する．まず，2章では，水谷スケーリング[10]にもとづくインパクターの衝突破壊のスケーリングの可能性について述べる．3章では，このスケーリングにおける鍵である物質強度について，サイズ・歪速度依存性の検討を行う．4章では，弾丸破片回収実験結果を用いてスケーリングの適用可能性を確認し，5章で小惑星への応用について議論する．

2. インパクターの衝突破壊

小惑星表面への岩塊の衝突速度は，小惑星帯の平均相対速度である5 km/s程度[11]と考えられる．この速度域で主におこることは破壊であり，衝突破壊実験の手法によって直観的理解が得られる．従来の衝突破壊実験においては，標的についての研究が主である．弾丸の破壊についても，低密度物質を用いた彗星塵の捕獲の観点で研究がなされている．しかし，それ以外で，回収された破片について記載されている例は少ない．数少ない例外の1つに，月面や火星表面への衝突において隕石が残存するのかという興味から，玄武岩，かんらん石，鉄隕石，普通コンドライトを円柱に成形したものを弾丸とし，砂や火星レゴリスシミュラントに衝突速度2 km/s弱で撃ちこんだ実験がある[12]．予備的な報告では，衝突速度約1.5 km/sの玄武岩弾丸と普通コンドライト弾丸から，もとの質量の10 %を超える破片が回収されている．

標的の衝突破壊の程度は，衝突後の最大破片の質量の衝突前の質量に対する比(最大破片質量割合)で表される．破壊の程度は標的の強度で規格化された標的背面での圧力(無次元衝突圧力と称される)に依存するという描像が定式化され，水谷スケーリングと呼ばれている[10]．通常は，標的に比べて弾丸が小さい．そのため，標的内を伝わる間に圧力が減衰するという効果が入る．

同様の考え方を弾丸にあてはめると，弾丸の壊れ方は，衝突時に発生する圧力そのものを弾丸物質の強度で規格化した量に依存するであろう．よって，破壊の程度は，以下のように表されると期待される．

$$\frac{m_{pL}}{M_p} = f\left(\frac{P_0}{Y_p}\right). \tag{1}$$

ここで，M_pは弾丸質量，m_{pL}は弾丸の最大破片質量，P_0は衝突時に発生する圧力，Y_pは弾丸の強度である．火薬銃を用いてアルミニウム弾丸を加速し，パイロフィライトと玄武岩に衝突させた実験結果を水谷スケーリングで整理した論文には，岩石標的の破壊だけでなく，アルミニウム弾丸の破壊の程度についても，無次元衝突圧力との関係が報告されている[13]．それによると，アルミニウム弾丸は，岩石標的の場合に比べて2桁以上の無次元衝突圧力がかからないと壊れないという結果となっている．大きな差の原因として，アルミニウムと岩石それぞれの物質強度に何を用いるかという問題と，脆性の岩石と延性のアルミニウムの壊れ方の違いが指摘されている．

3. 試料強度のサイズ依存性と歪速度依存性

実験室での結果を，天体に応用しようとするときにぶつかる大きな壁として，強度がある．岩石の強度には，サイズ依存性があることが知られており，さまざまなモデルが提唱され実験が行われている．中でも最もシンプルなモデルとして，ワイブルの提唱したものがある[14]．ゆっくりとした引っ張りの場合に，いちばん弱い箇所(ひび)から破壊が進行する．大きな塊ほど弱い箇所を含みうるために，大きな塊ほど強度が小さい傾向となる．そこで，強度の空間一様性を表す以下の分布則を定義することとなる．

$$n(\sigma) = k\sigma^{m}. \tag{2}$$

ここで，$n(\sigma)$は，応力σ以下で活性化するひびの空間密度，kとmは物質毎の定数であり，共に正である．指数mが小さいことは，強度が空間非一様であること，強度のサイズ依存性が大きいことと対応し，mが大きいことと，強度が空間的に一様であること，強度のサイズ依存性が小さいことが対応する．指数mを用いて，強度Yと体積Vの関係が，

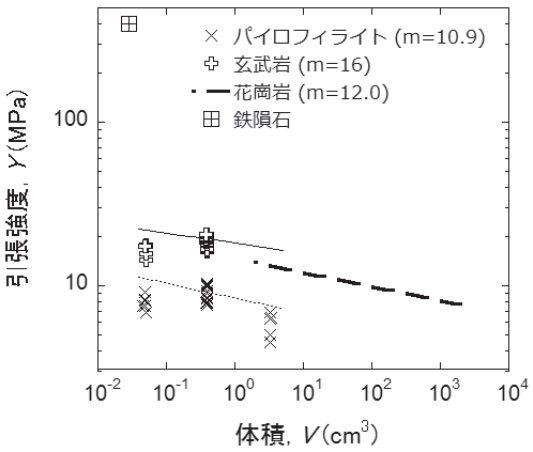

図1：試料の体積と引張強度の関係[20の図を加工]．花崗岩の線は，異なる体積を持つ試料の強度データに(3)式を適用して求められたもの[16]である．

$$Y(V) = Y_0\left(\frac{V}{V_0}\right)^{-1/m}, \qquad (3)$$

と表される．ここで，Y_0は体積V_0のときの強度である．ところで，ひびの強さ，すなわち，活性化のしにくさは，ひびの大きさと関係づけられる．大きいひびほど小さな応力で成長を始める[15]．指数mが6に等しいときは，どのスケールでみてもそのスケール程度のひびがある状態である[16]．

図1は，以下でとりあげる衝突実験[17-19]に用いたパイロフィライト，玄武岩(夜久野産)，鉄隕石(Campo del Cielo)の引張強度を示す[20]．材料物質の引張強度は，試料の両端をつかんで文字通り引っ張ることで測定される．試料の成形が難しい場合には，円板形試料を側面から押すことで内部に引張応力を発生させて行う圧裂引張試験で代用される．パイロフィライトのデータは，直径5，10，20 mmで厚みがそれぞれ直径の半分の円板試料の圧裂引張試験の結果である．玄武岩も同様に，直径5，10 mmの円板試料の圧裂引張試験の結果を示している．パイロフィライトでは，直径20 mmの試料は，10 mmの試料に比べて弱く，5 mmの試料の強度は，10 mmの試料と同様である．同様に，玄武岩の場合も(3)式からの予想とは異なり，直径5 mmの試料のほうが，直径10 mmの試料よりも強いということはない．試料サイズが小さくなる，すなわち，試料サイズが岩石を構成している鉱物の大きさに近づくと(3)式は成り立たないという適用限界があると見て取れる．パイロフィライトと玄武岩のそれぞれの10 mmの試料のデータ点を通る2本の直線は，(3)式のパラメタにそれぞれの試料の測定値を代入したものである．指数mは，同じ10 mmの試料を複数用意して，強度のばらつきから推定する方法により得ている[21]．玄武岩に比べてパイロフィライトのmは小さく，パイロフィライトの方が空間的に非一様な強度を持つということであろう．パイロフィライトの20 mmのデータは(3)式の直線よりも少し下にプロットされているが，大きくは外れていない．図には，直径1.9～17 cmの花崗岩試料についての強度測定の結果を(3)式の形で表した線[16]も載せてある．花崗岩のmは，パイロフィライトや玄武岩とは求め方が異なり，(3)式から決定され，パイロフィライトと玄武岩の間の数値となっている．図1の鉄隕石の引張強度については，以下のように推定した[19とその参考文献]．直径3 mm，高さ4 mmの円柱を圧縮試験機で押すことで降伏強度を測定したところ，300 MPaであった．鉄隕石のような鉄ニッケル合金の強度は，ニッケル含有量によることが知られている．Campo del Cielo隕石のニッケル含有量は5.5–7.4 %である．ニッケル含有量が6 %の合金の降伏強度は300 MPaであり，同じ合金の引張強度は400 MPaである．そこで，鉄隕石の引張強度も400 MPaであるとした．鉄隕石試料については，残念ながらサイズ依存性についての測定データは得られていない．しかし，目視できるほどの大きなひびが入っているので，mの値は，ここで取り上げた岩石の値よりも小さく，6に近いのではないかと推察される．

衝突のような大きな歪速度の場合の強度も，サイズに依存する．実験では，センチメートルから数十センチメートルという，大きさが一桁以上にまたがる花崗岩標的をアルミニウム弾丸の衝突によって破壊し，標的サイズの増大とともに標的が破壊されやすくなること，そのサイズ依存性が，静的破壊強度のサイズ依存性よりも大きいことが示されている[16]．(3)式と静的強度測定結果によれば，静的引張強度のサイズ依存のべき指数は$-3/m$であり，花崗岩の$m=12$を代入すると-0.25となる．他方，衝突破壊実験の結果からは，サイズ依存のべき指数は，-0.405と報告されている．我々が行ったパイロフィライトと石膏(空隙率65-70 %に調整したもの)を用いた実験でも，静的強度のサイズ依存性よりも衝突破壊強度のサイズ依存性が

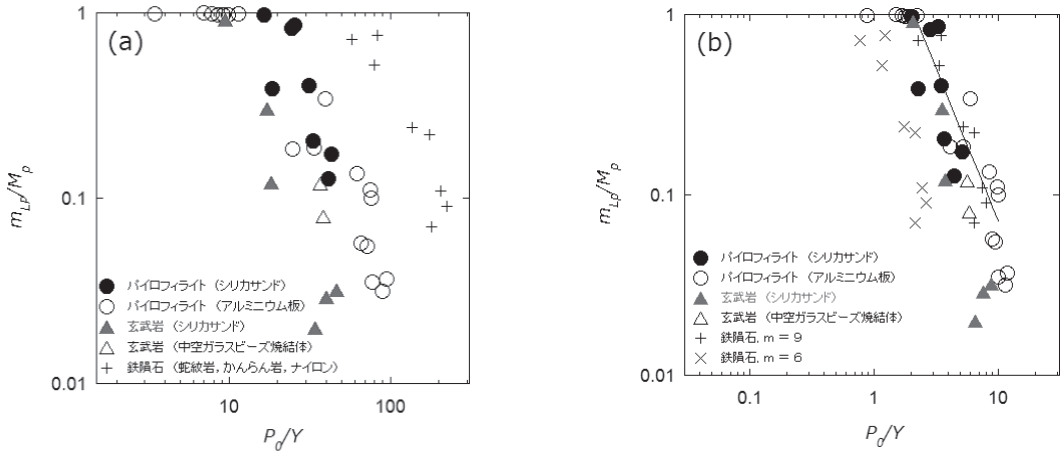

図2：無次元衝突圧力と弾丸の最大破片質量割合の関係．(a)弾丸強度を静的引張強度とした場合，(b)弾丸強度を(4)式に基づく動的引張強度とした場合．丸括弧の中に，標的物質を示す．(b)の実線は，パイロフィライトと玄武岩のデータのうち，最大破片質量割合が0.95以上のものを除いたもので最小自乗法により決めた．

大きくなっている[20]．このことは，強度の歪速度依存性と知られている現象が見えている，あるいは，サイズと直接関係づけやすい「荷重の持続時間」依存性であると解釈される[16][19]．

強度の歪速度依存性は，ある歪速度以上(動的条件下)では，強度が歪速度とともに大きくなるというもので，さまざまな物質で確認されている[22]．歪速度が大きいと，少数の弱いひびの成長では追いつかないので，より多数の強いひびの活性化が必要なために強度が増す．この描像をひびのワイブル分布を使って展開したモデル[23]にもとづくと，強度の歪速度 $\dot{\varepsilon}$ への依存性は，下の式で表される．

$$Y(\dot{\varepsilon}) = Y_{s0}\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)^{3/(m+3)}, \text{ ただし，} \dot{\varepsilon} \geq \dot{\varepsilon}_0 . \quad (4)$$

ここで，Y_{s0}は静的引張強度，$\dot{\varepsilon}_0$は，静的から動的へ変化する歪速度である．

4. 衝突実験

4.1 弾丸の加速

弾丸の速度～5 km/sを達成するには，二段式軽ガス銃が使用される．この銃をもちいた衝突実験では，銃身保護のため，通常はプラスチック弾丸が用いられる．プラスチック以外の弾丸を加速するには，サボと呼ばれるプラスチック円柱に弾丸を保持して加速する．サボには加速方向に切れ目をいれたものを用い，サボが銃口から飛び出すと弾丸とサボが分離する．標的までの途中でサボストッパー(中心に穴をあけた金属円盤)によりサボを止め，弾丸のみを標的に衝突させる．サボが上手く分離しないと弾丸の軌道が逸れて標的にあたらなかったり，分離しそこねたサボが弾丸とともに標的に衝突したりする．宇宙科学研究所の二代目の二段式軽ガス銃には，銃身にライフルが切ってあるためにサボが分離しやすくなっている．さらに，実験の成功率を高めるためのサボの開発が行われた結果，銃の口径が7 mmであるのに対して，安定して3 mmや1 mmの弾丸を飛ばすことが可能となっている[24]．そこで，小天体表面へのインパクター衝突を模擬した実験を行うことができるようになった．ただし，サボで守られていて銃身との摩擦がないとしても，最終的に速度数キロメートル毎秒までに加速しようとするため，加速そのもので弾丸が壊れてしまうことがある．脆い弾丸物質の場合には，到達速度に限界がある．

我々は，神戸大学の口径3 mmのガス銃や口径15 mmの火薬銃によってもデータを取得した．ガス銃では速度は約200 m/sまでの実験を行い，火薬銃では，200～1000 m/sの実験を行った．これらの銃では，銃身よりも直径の小さな弾丸を，銃身内径サイズのプラスチック円柱の先にとりつけて加速し，ストッパーでプラスチック円柱を止めて弾丸のみを標的に衝突させ

た．

4.2　弾丸最大破片質量割合

図2に宇宙研二段式軽ガス銃，神戸大火薬銃，ガス銃を用いて行った実験での弾丸最大破片質量割合 m_{pL}/M_p と無次元衝突圧力 P_0/Y_p の関係を示す．標的には砂，アルミニウム[18]，密度140 kg/m^{3}と非常に空隙率の高い中空ガラスビーズ焼結体[19]，岩石やナイロン[20]を用いている．弾丸は，円柱形状に成形されたもので，図に載せているのは，直径3～8 mmのものである．発生圧力は，中空ガラスビーズ焼結体を用いた実験以外では，それぞれの物質のユゴニオパラメタから推定し，中空ガラスビーズ焼結体標的の場合は，標的密度が小さいので動圧すなわち，$\rho_t U^2$，ρ_t は標的密度，Uは衝突速度，で代用している．図2aは，(1)式の Y_p に静的引張強度を代入したものである．弾丸のサイズはいずれも小さいので弾丸強度のサイズ依存性は無視できるとして，パイロフィライトと玄武岩については，直径10 mmの円板の圧裂引張強度を採用し，鉄隕石については，400 MPaそのままを使っている．岩石は，無次元衝突圧力が10～20で壊れ始めるのに対し，鉄隕石は～50程度から壊れ始めるという結果になっている．図2bは，(1)式の Y_p に式(4)を採用したものである．ここでは，$\dot{\varepsilon}_0$ を10 s^{-1}とし[23]，パイロフィライトと玄武岩のmは，(3)式と共通のものを用い，鉄隕石には，$m=6$と9の二つの値を仮定した．この場合，歪速度依存性のべき指数は，それぞれ1/3と1/4となる．鉄のスポール強度（自由表面がはがれる強度）の歪速度依存性のべき指数が0.29であるという報告[25]があるので，ここで仮定したmはひどく的外れな値ではないと考えられる．衝突破壊の程度の歪速度依存性については，前章で触れたように「荷重の持続時間」依存性と解釈すべきかもしれない．ここでは，歪速度として，

$$\dot{\varepsilon} = \frac{U}{a}, \tag{5}$$

[26]を採用するが，(5)式は，「荷重の持続時間」の逆数のオーダーとも言える．ここでaは，弾丸の等価球半径である．図2bでは，図2aに示された岩石と鉄隕石の差が小さくなった．これは，鉄隕石実験が二段式軽ガス銃を用いた速度2.4～4.8 km/sの高速度実験であったために，強度の歪速度効果が顕著に表れるのに対し，岩石の方は中空ガラスビーズ焼結体に衝突させた二例が衝突速度2 km/s程度であって，ほかは1 km/s以下の低速度衝突であったために，歪速度依存による強度の増加が鉄隕石ほどにはなかったためである．いずれの物質でも，無次元衝突圧力が1に近い値から破壊が始まっており，スケーリングの結果として期待通りの振る舞いである．

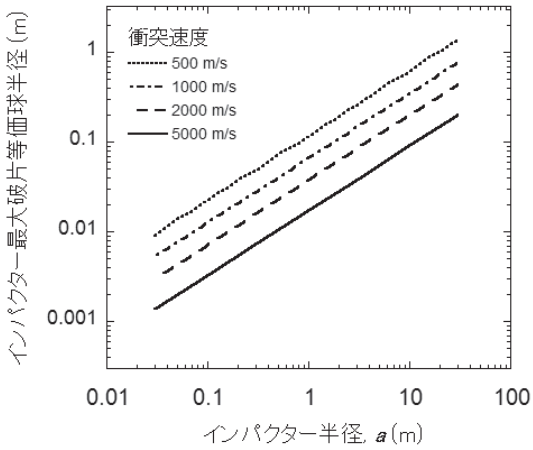

図3：弾丸衝突破壊実験から予想される，パイロフィライト質インパクターの最大破片半径．

5. 小惑星表面への応用

以上を受けて，小惑星レゴリス層に半径aの球形のパイロフィライト物質が衝突した際の，最大破片質量割合を見積もってみる．図2bで得られた経験則（図中の実線）

$$\frac{m_{Lp}}{M_p} = 3.6\left\{\frac{P_0}{Y_{S0}\left(\dot{\varepsilon}/\varepsilon_0\right)^{3/(m+3)}}\right\}^{-1.7}, \tag{6}$$

を用いるが，インパクターは実験試料よりも大きいため，静的引張強度に(3)式のサイズ依存性が現れると考え，

$$Y_{s0} = Y_0\left(\frac{V_a}{V_0}\right)^{-1/m}, \tag{3'}$$

ただし，V_aは，半径aの天体の体積，とする．(6)式

と(3')式から，強度はサイズの$-3\{1/m+1/(m+3)\}$に依存することとなり，パイロフィライトの$m=10.9$を代入すると，-0.49となる．この値は，パイロフィライト標的の衝突破壊実験から求められた-0.4 [18]よりも強いサイズ依存性を示す．(6)式は強度のサイズへの依存性をやや過大評価してしまっているかもしれない．初期発生圧力の見積もりには，小惑星レゴリス層がシリカサンドであるとしてそのパラメタを仮定する[18].

図3に最大破片の等価球半径を示す．小惑星Itokawa上の最大ボルダーの長さは約50 mであったが，そのようなボルダーが小惑星表面を飛び出し，他の小惑星表面に衝突するとしたら，数十センチメートル以下のかけらに粉砕されてしまうことを示している．今回検討した経験則とパラメタ範囲ではItokawa上のブラックボルダーを外来のインパクターの破片として形成することはできなかった．一方，Itokawaの接近画像には，周囲と明るさの異なる大きさ数10 cmの岩片が見られた[27]．これら小さな岩片の中には，外来天体が衝突して生じたものが混じっているかもしれない．Almahata Sitta隕石として回収されたものの中で，ユレイライト以外の岩片は大きなもので数センチメートルであり[28]，これらもまた，小惑星どうしの典型的な相対速度での衝突で生き残ったものなのかもしれない．

今回のスケーリングにおいては，衝突角度の効果や，衝突速度の増加による破片の残存のしかたの変化については考慮していない．例えば，玄武岩弾丸を速度2 km/s以上でシリカサンドに撃ちこんだ実験では，弾丸破片とシリカサンドが固着する現象が見られている[29]．詳細な議論には，さらなる検討を要する．

謝 辞

大変的確なコメントを下さった査読者に感謝します．

参考文献

[1] Hirata, N. and Ishiguro, M., 2011, Lunar Planet. Sci. 42, #1821.
[2] Hirata, N., private communication.
[3] 木村眞，2011, 遊星人 20, 132.
[4] 宮原正明，2014, 遊星人 23，382.
[5] Goodrich, C. A. et al., 2015, Meteorit. Planet. Sci. 50, 782.
[6] Zolensky, M. E. et al., 1996, Meteorit. Planet. Sci. 31, 518.
[7] 長谷川直，2014，遊星人 23，361.
[8] Palomba, E. et al., 2014, Icarus 240, 1.
[9] 三河内岳，2007，遊星人 16，270.
[10] 岡本尚也，水谷仁，2015, 遊星人 24，33.
[11] Bottke, W. F. et al., 1994, Icarus 107, 255.
[12] Bland, P. A. et al., 2001, Lunar Planet. Sci. 32, #1764.
[13] Takagi, Y. et al., 1984, Icarus 59, 462.
[14] Weibull, W., 1939, Ingvetensk. Akad. Handl. 151, 1.
[15] Griffith, A. A., 1920, Phil. Trans. R. Soc. A 34, 137-154.
[16] Housen, K. R. and Holsapple, K. A., 1999, Icarus 142, 21.
[17] Nagaoka, H. et al., 2014, Meteorit. Planet. Sci. 49, 69.
[18] Okamoto, T. et al., 2013, Icarus 224, 209.
[19] Katsura, T. et al., 2014, Icarus 241, 1.
[20] Nakamura, A. M. et al., 2015, Planet. Space Sci. 107, 45.
[21] 中村昭子 他, 2007, 遊星人 16，216.
[22] Kimberley, J. et al., 2013, Acta Materialia 61, 3509.
[23] Grady, D. E. and Kipp, M. E., 1980, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 17, 147.
[24] Kawai, N. et al., 2010, Rev. Sci. Instrum. 81, 15105.
[25] Razorenov, S.V. et al., 2004, JETP Lett. 80, 348.
[26] Melosh, H. J. et al., 1992, J. Geophys. Res. 97, 14735.
[27] Noguchi, T. et al., 2010, Icarus 206, 319.
[28] Horstmann, M. and Bischoff, A., 2014, Chem. Erde 74, 149.
[29] 長岡宏樹 他，2014, 地球惑星科学連合大会.