イトカワー探査機でみた衝突再集積天体と 小天体の衝突過程

中村昭子¹, 阿部新助¹, 平田 成²

(要旨)小惑星の多くが衝突破壊・再集積したラブルパイル天体であることは予想されていたが、平均直径320mの小惑星25143イトカワがラブルパイル天体であったことは新鮮な驚きと興奮をもたらし、小天体の内部構造や表面の進化に関わる衝突現象について、新たな疑問と興味を喚起している.本稿では、イトカワの内部・表面構造について改めて振り返り、また、関連する最近の実験的研究について触れ、小天体の衝突過程に関する我々の知見に対して投げかけられたいくつかの問題について報告する.

1. ラブルパイル天体とは

小惑星は主として火星と木星の間の空間において太 陽を公転している小天体であるが、中には軌道要素の 互いに似たグループがある。1918年に東京天文台の平 山清次によって書かれた論文で、これらの小惑星グル ープが同一起源であることが示唆され、「Family(族)」 と呼ばれるようになった[1].小惑星はお互いの直接 衝突により破壊され、これが小惑星の族の起源であ る.小惑星が衝突破壊すると、破片の一部は互いの重 力に束縛され、一部は破片どおしの自己重力を振り切 ってそれぞれに太陽に対して固有の公転運動を始め小 惑星の族をなす.自己重力から逃れられなかった破片 からできた天体のことをラブルパイルと呼ぶ.ラブル パイルの定義や小惑星の内部構造については、小惑星 433Erosの内部構造について書かれた文献[2]のレビュ ーが詳しい.

小惑星どうしの衝突破壊寿命は,小惑星の大きさ-個数分布や,それぞれの軌道,衝突による壊れやすさ

2. 会津大学コンピューターソフトウエア学科

によるが,直径数kmの天体では10億年程度,数100m の天体では数千万年程度と考えられている[3].すな わち,今見えているこれらのサイズの小惑星のほとん どは,微惑星が集積してできた第1世代の天体ではな く,衝突破壊と再集積によりできた2次的な天体であ る.

小惑星の衝突破壊・再集積の数値シミュレーション では、直径数100mの母天体の衝突破壊であっても一 部の破片が重力により束縛されることが示されている [4]. ところが、イトカワ以前に探査機が詳しく調べた 4 天体のうち、S型小惑星の3天体(951 Gaspra - 平 均直径約12km, 243Ida - 平均直径約30km, 433 Eros - 平均直径約20km)は、予想に反してラブルパイル には見えない、C型小惑星の253 Mathilde(平均直径 約53km)は、密度が1.3g/cm³と非常に小さく、体積 全体に占める内部の空隙の割合(空隙率、porosity) が40%かそれ以上あると考えられており、ラブルパイ ルかもしれない、ただし、Mathildeが、はたして衝 突で内部が壊れた末のガレキの寄せ集めの構造をもつ 天体かどうかはわかっていない.

^{1.} 神戸大学大学院理学研究科

2. イトカワはラブルパイルだった

従来の小惑星探査の対象天体が直径10km以上の天 体であったのに対し、小惑星探査機「はやぶさ」が 訪れたのは、平均直径がたったの320mのS型小惑星 25143 Itokawa(以下ではイトカワと呼ぶ)であった. 2.3節にあるように、イトカワは、むき出しの岩盤に クレーターが穿たれ、大きな岩がごろ、ごろと転がっ た天体であろうと考えられていた[5]. しかし、その 岩盤自体が衝突再集積の産物かもしれない、というこ とは積極的には予測されていなかった.

ところが、はやぶさ搭載の可視カメラ(Asteroid Multiband Imaging Camera, AMICA)が捉えたイ トカワ[6]は、図1に示すように全体としては、のっ ペりとした形状で、表面の明るさのコントラストは大 きく、それまでに撮像されたどの小惑星とも違ってみ える. ラッコにもたとえられた、のっぺりとした形状 そのものが、物質強度だけではなく重力や遠心力もイ トカワの全体形状に影響を及ぼしていることを示唆し ているようである.以下では、イトカワがラブルパイ ルと考えられる[7]根拠について触れながら、イトカ ワの内部・表面構造についての、現時点での理解と疑 問を挙げる.

2.1 イトカワの内部構造

彗星や小惑星などの小天体の内部構造を調べること は、その天体の形成過程を解明する手がかりになるだ けでなく、将来、このような地球衝突危険性のある Potentially Hazardous Asteroidsを同避する防御手 段をこうじる上での貴重な情報にもなり得る.実際イ トカワは、100万年以内に地球に衝突する可能性があ る [8]. しかし,実際に小天体の質量や密度,空隙率 を調べることは難しく、はやぶさのように探査機を小 天体のごく近傍まで送り込んではじめて、その詳細な 素顔の内側まで明らかになる、そして、内部構造を知 る上で最も重要なのは空隙率であり、空隙率を調べる ためには密度が必要になる. 天体の平均密度と構成す る物質の粒子密度の比から計算されるのが(全)空隙 率である.一方,隕石について測られる空隙率、すな わち隕石のバルク密度と構成する鉱物粒子密度の比か ら求められる空隙率をmicro-porosityと定義する[9].



図1: イトカワの全体像(ISAS/JAXA). MUSES-C 地域の主要部分はこの画像にうつっていない側にある.

特に天体の内部構造を議論する上で重要になる鉱物粒 子サイズより大きい裂け目や空隙の有無は,全空隙率 からmicro-porosityの寄与分を除いたmacro-porosity の値に反映される.

NASAのNEAR-Shoemaker 探査機による探査で は、S型小惑星Erosの平均密度が2.67 ±0.03 g/cm³と 精度よく決定された. Erosの構成物質は普通コンド ライト隕石であると考えられている。その中のLコ ンドライトで構成されているとするなら、鉱物粒子 密度は3.75 g/cm³であるので, Erosの全空隙率は文献 [9]Fig.3に示されるように28.8%と計算される. Eros のミクロな構造がLコンドライトと同じであるとして Lコンドライトの平均のmicro-porosityの値, 10.8% を仮定すると、Erosのmacro-porosityは28.8-10.8=18 %となる。普通コンドライト隕石のmicro-porosity測 定値には1 σ =5%程度の幅があるので[9], 普通コンド ライト隕石がmicro-porosityの観点でS型小惑星の無 バイアスサンプルであったとしても, macro-porosity の見積もりは, micro-porosityとしてどのような値を 仮定するかに依存する。例えば文献[2]では、Erosの macro-porosityは6-33%の間で、20%というのが最 もありそうな値であると述べられている.

Erosの内部構造がラブルパイル構造であるかどう かは、重力データや画像データを用いてさらに調査さ れた.Erosの質量重心と形状中心は13mしかずれて いないことが分かり、表層のリッジやグルーブなどの 地形と合わせて考えると、内部に割れ目を持つが、構 成粒子間に結合力が働く均質な内部構造の天体である と推定された[10][2].小惑星の内部構造は、形成初期 の状態をそのまま保持するものではなく、形成後の衝 突過程も大きく影響を及ぼしていると考えられる.C (や古典的C型を細分した分類ではF)型小惑星である Mathildeや45 Eugeniaは、macro-porosityが40%以上 あると考えられ、更に、M型小惑星16 Psycheの主要 構成物質が鉄であると仮定するとmacro-porosityは 60%を越える(図2).このような大きな空隙率は内部 の割れ目では説明できそうにない.



図2: Macro-porosity と天体質量 [9, 11]. 40% の小惑星 イトカワの内部構造は、ラブルパイルと推定される.

はやぶさは、長径500m余りの小惑星イトカワの周 回軌道に入らずに、2ヶ月間余りのランデブー期間 中,距離約7kmを保ちながらイトカワと並走して探査 を行った. 探査機に働く太陽光圧とイトカワの重力 が釣り合うのは高度4km付近であり、小惑星降下時に イトカワの重力の影響が大きくなる. イトカワの重 力(GM: G:重力定数, M:天体質量)推定は、4つの 研究グループ(おのおのは、宇宙科学研究本部、(株) NEC航空宇宙システム、日米の大学や研究機関に所 属する複数人のメンバーから構成された)(a,b,c,d) によって、それぞれに個別の手法もしくはデータ を使って、まずは独立に行われた: (a) GM=2.34 (10⁻⁹km³/s²):地球からの距離測定とドップラー計測 を使ったイトカワ質点近似推定(高度7-20 km),(b) GM=2.29; 探査機のスラスタを止めて地球からの距離 測定とドップラー計測およびカメラとレーザー高度計 (Light Detection And Ranging, LIDAR) を使った イトカワ質点近似推定, (c) GM=2.39; 降下時にカメ ラとLIDARを使ったイトカワ多面体形状モデルによ る推定 (1.4-0.8 km), すなわち, LIDARと光学航法 カメラ (Optical Navigation Camera, ONC) を使っ た探査機の位置決定を行い、太陽輻射圧、探査機スラ スタ圧を考慮した運動モデルからイトカワの重力計測 を行った. 高度1km以下では, 重力場の質点近似が成 り立たなくなるため、イトカワ形状を多面体で忠実に 再現した形状モデルにより重力場を求めて解いたとい うもの,(d)GM=2.36;降下上昇時にカメラとLIDAR を使ったイトカワ多面体形状モデルによる推定(高 度0.8-0.1 km).4つのグループの結果は全て誤差以内 で一致しており,4グループの重み平均を採用した値 (3.51 ± 0.105)× 10^{10} kgが質量として推定されている [11].

一方,イトカワの体積は,AMICA画像から形状モ デルを構築した2つの独立の研究グループによって推 定されている [12][13]. こうしてイトカワのバルク密 度は1.9±0.13 g/cm³と求められた.近赤外線分光計 (Near Infrared Reflectance Spectrometer, NIRS) と蛍光X線スペクトロメータ (X-Ray Spectrometer, XRS)の観測からは、LLコンドライト的な鉱物組成、 化学組成の物質が平均的に表面を覆っていることも 分かった。地上で回収されたLLコンドライトの鉱物 粒子密度は3.56 g/cm³である[9]のでイトカワの全空隙 率は約47%と推定されるのに対し、LLコンドライト のバルク密度は平均で3.19g/cm³なので、イトカワの micro-porosityが上記のLLコンドライトと同様であ るとすると、そのmacro-porosityは約40%であること が推定される.空隙率が40%というのは、同じような サイズの石をざざっと容器に詰めたときに実現される 値にほぼ一致する.この高空隙率と、2.2節で述べる 最大級のボルダー(大きな岩塊)の大きさとから、イ トカワは、がれき同士が重力で緩く束縛されたラブル パイル小惑星であるとされる. イトカワと同じS型小 惑星の中で、イトカワは密度が最も小さく、空隙率が 最も大きい小惑星で, (サブkmサイズの小惑星として も)初めてのラブルパイル天体とされるS型小惑星で ある.より詳細な内部構造に興味が持たれるが、非周 回で小惑星を探査したはやぶさの位置決定誤差が大き いことや、スラスタ噌射圧の変化量を全ての降下軌道 でモデル化することが困難な状況であるため、小惑星 の場所の違いによる有意な重力場の変化の検出、すな わち内部の非均質を重力計測で探ることは難しい.

イトカワ以前に直接探査された4つの小惑星の表面

構造は衝突クレーターが支配していて、その殆どは衝 突で生じたレゴリスで覆われており、ボルダーが支配 するイトカワ表層とは一見大きく異なる.しかし、レ ーザー高度計で精密に計測されたErosの大型衝突ク レーター Psycheの内側, リム付近の表面凹凸(σ)-これはクレーター放出物の平均サイズを示すと考えら れている-と、イトカワのOhsumi (旧称Tsukuba) 地域(図1参照)と呼ばれる領域の凹凸を同じ20mの 基線長(すなわち、水平方向の測定間隔)で比較すると、 $\sigma \sim 2.2$ mとほぼ一致する [11]. したがって、2つの 天体の表面は、同じような衝突のプロセスを経験して いるのかもしれない. しかし, 天体サイズがErosな どと比較して桁で小さいイトカワの内部構造進化への 衝突の影響については、今後の研究課題である.直 径100m以下の小さなクレーターの数が優位に減少し ているErosでは、1~2m程度の天体との衝突によっ て発生した振動が小さなクレーターをかき消したと示 唆されている[14]. 一方, イトカワで発見された土砂 の流動化は, イトカワが非常に小さい天体であるため, イトカワを破壊しない小規模衝突で容易に振動が伝わ った(seismic shakingが繰り返された)ことを裏付 けている[15]. 小規模衝突が内部構造にどの程度の影 響を及ぼしたのか、イトカワのクレーターやボルダー 分布を考慮して今後調べる必要がある.

2.2 イトカワのボルダー

イトカワの表面は、大小・形ともさまざまの岩の塊 で覆われている. 岩塊のうち特に大きなものをボルダ ーと呼んでいる. ボルダーは,月面,火星の衛星の表面, これまでに探査機が観測したほかの小惑星の表面(Ida とEros) にも見つかっている. イトカワ以外の天体 では、ボルダーは、その天体上のクレーターからの放 出物であると考えられている. クレーター起源である と考える有力な根拠は、ボルダーの空間分布の特徴に ある. クレーターから飛び出した岩塊の中で天体の重 力を振り切ることができずに表面に落下したものがボ ルダーである. 月面ではクレーターの縁にボルダーが

Image: Constrained state stat

図3: イトカワ上のボルダーと室内衝突実験破片 [18]. (A), (B)ともに左:実験破片,右:ボルダー(ISAS/JAXA)

見つかっている. これは,大きな岩塊がクレーターか ら飛び出す速度が,その天体の重力加速度(あるいは 脱出速度)に比べるとじゅうぶんに小さいことで説明 できる. 天体表面の重力加速度が小さくなると,クレ ーターから放出されたボルダーは,クレーターから遠 くまで散らばってしまう,すなわち,天体表面上に広 く分布することになる. それでも,Erosの場合はボ ルダーの空間分布は偏っており,その多くはEros表 面の新しく大きなクレーター(Shoemakerクレータ ー)から飛び出したものと考えられている[16].いっ ぽう,イトカワの場合,ボルダーとクレーターとは対 応づけがなされていない.

クレーターから放出される最大の岩塊の大きさ は、クレーターそのものの大きさと良い相関がある ことが経験的に知られている. Ida上の最大ボルダー も、Eros上の最大ボルダーも、それぞれの天体表面 にボルダーの起源となりうる大きさのクレーターが ある. イトカワ上の最大のボルダーは、Yoshinodai (由野台) と呼ばれ、50×30×20mと、イトカワの10 分の1もの大きさがあるが(図1,4参照)、この経験 則をYoshinodaiに適用してみると、Yoshinodaiが放 出されるためのクレーターの直径は、イトカワ上に見 つかっているクレーター候補よりも大きくなってしま う. すなわち、イトカワ上の少なくとも最大級のボル ダーは、イトカワ上のクレーター起源とは考えられな い. これらは、イトカワそのものを作った母天体の衝 突破壊時に新たにできた破片、あるいは、母天体にも ともとあったボルダー(母天体上のクレーターから作 られたものかもしれない) と考えられ、イトカワが衝 突破壊・再集積天体、すなわちラブルパイルであるこ との証拠となる.

小惑星が衝突でどのように壊れるかを調べるために、 小惑星帯の衝突速度程度に加速した弾丸で岩石を破壊 する模擬実験が行われてきた. 模擬実験で壊すことの できる岩石試料の大きさはたかだか数センチメートル である.小惑星のサイズは何桁も大きいので,実験室 の結果をそのまま小惑星に適用するのには限界がある と考えられ、90年代の半ばごろからは室内実験をもと にした衝突破壊の数値シミュレーションが行われてい る[4][17].今回、イトカワ上に見つかった様々な形の ボルダーは、図3に示すように、室内実験でできるい ろんな形の破片とよく似ている.岩石破片は、ミクロ なひびが音速の数分の1の速さで成長・合体してでき ると考えられているが、同じような過程が何桁も大き な規模でおこっているというのをイトカワ上のボルダ ーに見ることができる[18].

2.3 イトカワのクレーター

大気を持たない天体であれば、その固体表面にはほ ぼ確実に衝突クレーターが存在する.その数はクレー ター年代学をもとに、その天体、あるいは特定の地域 の履歴に関する情報を与えることになるし、その形状 は衝突の標的となった物体の構造、物性に関する手が かりとなる.はやぶさ到着以前、研究者たちはイトカ ワ上にどのようなクレーターを見いだすことになるか、 様々な予想を立てていた.レゴリスは全くないか、ご く少ないと予想されていた[5].従って、イトカワの 表面は岩盤がむき出しになっている、という見方が強 く、クレーターもこの岩盤上に直接形成されているの ではないか、と考えられていた.これは、室内で行う クレーター形成実験で岩石等のブロックに対して弾丸 を衝突させた場合に近い状況であり、実験と観測を直 接比較できる可能性が期待されていた.

しかし,前節で述べた通り,イトカワの表面は大小 のボルダーで覆われており,マクロスケールでの岩盤 の露出はほとんどないことが,はやぶさによって明ら かになった.また一見した範囲では,他の天体でわれ われが見慣れている,レゴリス上に形成されたお椀型 のシンプルな形状のクレーターもまたほとんど存在し ない.このため,初期にはイトカワ上にはクレーター がほとんど存在しない,という見解が示されたことも あった.その後はやぶさの観測が進んで高解像度画像 や形状モデルが得られたことで,衝突クレーターの可 能性があると解釈できる円形の凹地形が存在している ことが次第に明らかになった.現在,そのような地形 はイトカワ全体で38個発見されている.しかしながら, これら全てが衝突クレーターなのか,結論は未だ得ら れていない[19].

なお、本稿では衝突クレーターを、高速の天体衝突 によってイトカワ表面に直接形成された地形、と定義 している.従って、イトカワ形成時(ラブル集積時) や、その他の低速度衝突(目安として、衝突速度がイ トカワ脱出速度以下の場合) で形成された地形や、衝 突破壊・再集積前から存在していたクレーターやその 一部が保存されているもの,あるいはイトカワ母天体 の衝突破壊時に形成された地形やその一部がイトカワ 表面に露出しているような例はこれに含まない、逆に, クレーター候補地形のうち一部はこれらの非衝突クレ ーターである可能性もある.また、ボルダーの並びが 偶然凹地形に見える等の誤認も含まれている可能性も 否定できない、クレーター候補地形のサーベイ結果の 詳細は文献[19]で、それぞれの候補が実際に衝突クレ ーターである可能性の大小(確度)の評価結果ととも にまとめて報告されている.

イトカワ上で発見されているクレーター候補地形は, 非常に特異な形状をしている.例えば, ラッコの臀部 にあたるArcoona (旧称Woomera)地域は,東西方 向に対して凹,南北方向に対して凸になった馬の鞍型 の地形である.藤原らは,あらかじめ凸,または凹の 形状を持ったターゲットに対するクレーター形成実験 を行い,クレーター床面の形状がターゲット形状に大 きく影響を受けることを示した[20].図4に示すよう にArcoonaの周囲を見ると,確かに東西方向と南北方 向とで表面の曲率が異なっている.Arcoonaが衝突ク



図4: クレーター候補 Arcoona 地域の(A)画像と,(B)南北方向,(C)東西方向の断面図 [19](ISAS/JAXA). イトカワ上最大のボルダー, Yoshinodai は, Arcoona の西に位置する.

レーターだとすれば、その形状は衝突前の表面の曲率 の違いを反映していることになり、藤原らの結果にう まく対応する.現在発見されている直径の大きなクレ ーター候補はいずれも元地形の曲率の影響を受けてい るように見える.ただし、この傾向それ自体をもって、 クレーター候補地形が実際に衝突起源であるという結 論を導くものではない.

もう一つ、サイズに関わらずクレーター候補地形全 般に言える特徴として、非常に浅い、ということが挙 げられる、当初クレーター(候補)地形がほとんど存 在しないと思われたのは、ボルダーが散乱している中 で、このような浅い凹地形を視認するのが困難だった ことも影響していると考えられる. クレーター候補の 2/3は, seismic shakingなどで移動しやすい細粒の物 質で凹地の一部ないし全部が埋められている. これら はErosで発見されたponded depositに類似した地形で ある. イトカワを全球スケールで見れば, MUSES-C 地域やSagamihara地域(図1参照)などで大規模な 細粒物質の集積が観察されている[15]. 凹地形への細 粒物質の集積は、MUSES-CやSagamiharaで生じて いる現象と同じ機構が局所的に働いているものと考え られ、凹地形を浅くする一つの大きな要因であろう. しかし、細粒物質による埋没が顕著でない残り1/3の クレーター候補地形も、その平均深さ-直径比は0.09 と、月や他の小惑星のクレーターの値に比べて約半分 しかない. この結果はどのように解釈され得るのだろ うか? 第一に粗粒のレゴリス,ボルダーも移動し, 埋没を引き起こしている,という可能性が考えられる. しかし,ボルダーの移動の明確な痕跡は現在見つかっ ていない.次に,低重力下のクレーター形成では,ほ とんどのejectaが脱出速度を超えるため、リムの隆起 が形成されにくく,その分深さが減少するということ が示唆されている.実際,クレーター候補地形の中で 隆起したリムを持つものはない.しかし,月の場合ク レーターの深さに対するリムの隆起分は20%程度に過 ぎず,リム隆起の欠如だけでイトカワのクレーター(候 補地形)の浅さの全てを説明することはできない.

他に、イトカワの表層構造がクレーター形成過程に 影響を与えている可能性もある.イトカワの表層を高 解像度画像で観察すると、ラブルパイル天体とは言い つつも、ボルダーの層はそれほど厚くなく、その下に は基盤岩的な、比較的サイズの大きな岩体が存在して いることが示唆される.ボルダー層を掘り抜くような クレーター形成の場合、ボルダー層から基盤岩層へ破 壊強度が変化するところで深さ方向への掘削が抑制さ れて、浅いクレーターが形成されたと考えればよい. 月の海で、レゴリス層と基盤岩層の二層構造がクレー ター形状に影響を及ぼすことでbenched craterが形成 されている例はよく知られている[21]. ただし、イト カワで月と同様の機構が作用している明瞭な証拠はな く、bench構造も観察されていない.

以上で見てきた通り,衝突クレーターは天体の重要 な地形要素であるにもかかわらず,イトカワではその 数,形状といった基礎的な情報であっても現状では不 確定な面が強く,多くの留保を置きつつ議論を進める 必要がある.しかし一方で,この状況は衝突現象とい う太陽系の中での普遍的な現象において,イトカワが 既知の環境とは全く異なっている,ということの現れ でもある.今後,室内実験やシミュレーションを行い, はやぶさによる観測結果と比較することで,ラブルパ イル小天体における衝突現象やクレーター形成過程に ついて多くの知見を得,さらに天体の物性や内部構造 についても知ることができるであろう.

3. ラブルパイル天体発見の裏側で

前述の小惑星の衝突破壊・再集積の数値シミュレー ションは、2段階からなる.すなわち、衝突破壊の数 値シミュレーションを行った結果生じた破片につい て、自己重力場内での運動を追跡するのである.衝突 破壊過程については、室内のセンチメートルスケール での岩石衝突破壊実験での最大破片のサイズ、位置や 形、速度を再現することによってコードの妥当性が確 認されたとされている[17].このシミュレーションで は、破壊される岩石(天体)の物性、すなわち、密度、 ヤング率、剛性率、降伏応力、状態方程式などのほか に、初期状態における強度の空間ムラの度合い(ある いは、クラックの大きさの数分布とも解釈される)を 表す、2つの定数(ワイブルパラメータを呼ばれる) を与える必要がある.ワイブルのもともとの定義で は、応力σ以下で活性化するひびの空間密度 n(σ) が、

$n(\sigma) = k \, \sigma^m \qquad (1)$

と書かれるとされ、mとkがそれぞれワイブルパラメ ータに相当する. 岩石などが試料体積 (V) が大きく なると強度 (σ_{\min}) が小さくなるという、いわゆる寸 法効果は, ここから

$$\sigma_{\min} = (kV)^{-1/m} \qquad (2)$$

と導かれる. これは静的な荷重に対するものである が,このような寸法効果--すなわち,試料中に含まれ るひびの大きさあるいは強度ムラの試料サイズ依存性 は,小惑星の相互高速衝突に対する破壊強度のサイズ 依存性の予測の根拠となっている. すわわち,小惑星 は自己重力が効きはじめる大きさまでは天体サイズが 大きくなるほど衝突に対して弱くなる(壊れやすくな る)と考えられているが,それは天体サイズが大きい ほど大きなひび(あるいは小さな応力で成長しうるひ びの種)を含みうるからという理由に基づく. Grady とKippは,これを歪を以下で活性化するひびの空間 密度 $N(\varepsilon) = K\varepsilon^m$ と読み替え,簡単なモデルによって, 強度の歪速度依存性を導いている[17に解説されてい る].

ワイブルパラメータは、工学の分野では、材料の強 度(ムラ)を表すものとして広く用いられているが、 BenzとAsphaug が衝突破壊のシミュレーションを行 った当時、室内衝突破壊実験に用いられていた玄武岩 のワイブルパラメータは測られていなかった.そこで、 シミュレーションでは、もっとも実験結果をよく再現 する値で、かつ、他の産地の玄武岩について強度の歪 速度依存性から推定されたワイブルパラメータとよく 一致する値が用いられていた.その後行われた小惑星 衝突破壊のシミュレーションでもこの値が使い続けら れている.これは、潰しておかなければならない穴で ある.

そこで、15年前の玄武岩試料についてワイブルパラ メータがワイブルのオリジナルの手法-図5に示した ように、たくさんの同一とみなせる試験片についてそ の強度をはかり、強度のばらつきを調べる-を用いて 決定された[22].その結果、mの値は、従来シミュレ ーションで用いられていた8.5~9という値よりも大 きく、15~17となり、実験で用いた玄武岩試料の方 がより均質で強度の寸法効果が小さいといえる.とこ ろで、(2)式から求められる強度は、シミュレーショ



図5: 直径10mm, 厚み5mmの玄武岩円盤型試料の圧裂 引張強度の分布の例[22]. 実験結果から求めたmは 16.3 ± 0.9, モデル曲線はm = 9のもの.

ンで用いられている値と実験結果から得られる値が互 いに一致した.このことは、ミクロな破壊過程はさて おき、試料の強度(この場合は引張強度)を正しく仮 定すれば、最大破片のサイズと速度は再現できること を意味するのかもしれない.

今回求められたワイブルパラメータを用いて従来の コードの見直し・改良を促すことが必要となってきた のであるが、実際の小惑星について、強度のサイズ依 存性が室内実験で用いられた均質な試料と同じと考え られない、という課題は残る、イトカワ上のボルダー には、クラックの長さがボルダーサイズ程度のものも 見られる[18]. どのスケールでみてもそのスケール程 度のクラックがある状態はm=6に相当し[23],数値シ ミュレーションで仮定されてきたよりもより強い(強 度の)サイズ依存性を意味する.イトカワ母天体、あ るいはイトカワについて, mの値(あるいはそれに相 当するもの)があれば知りたいところであるが、今の ところ手がかりはない. 火星の衛星Phobosと小惑星 Gaspraについては、グルーブの長さ分布からm~6 が求められている[24].他方,計算機能力の格段の向 上によって、BenzとAsphaugのコードに10年余り前 には検知できなかった分解能の問題が新たに見つかっ た、と7月にスペインで開催された" IIV Workshop on Catastrophic Disruption in the Solar System" においてBenz自身から報告があった. イトカワサイ ズの天体のラブルパイル構造の可能性を予測した計算

コードが、イトカワ発見の今、再検討を余儀なくされ ていることはほろ苦いめぐり合わせである. 直接探査 の重要性が浮き彫りにされたともいえよう.

4. まとめ

ラブルパイル天体イトカワは,小惑星の衝突破壊過 程について積み上げられてきた知見とそこからの論理 的な予測(ただし,慣性に支配された人間の心情的な 予測を超えたところ)を見事なまでに体現していた. さらにイトカワの発見と観測結果から,小天体の内部 構造や表面の進化に関する衝突現象についての新たな 興味が沸き起こっている.イトカワの内部構造が衝突 による表面の進化へどのような影響をもたらしたの か,逆に,衝突によってイトカワの内部構造はイトカ ワ形成時からどのように変化したのか,しなかったの か.その一方で,我々は,そもそもラブルパイル天体 を形成する過程-衝突破壊過程の素過程の複雑さに改 めて直面している.今後の室内実験やシミュレーショ ン,そして新たな小天体探査によるこの分野の研究の 進展を期待する.

謝辞

本稿について的確な査読コメントを下さった城野信 一氏に感謝します.本研究は、はやぶさJoint Science Team (JST)のメンバーとの絶え間ない議論、およ び21世紀COEプログラム「惑星系の起源と進化」か らのサポートに拠っています.

参考文献

- [1] Kozai, Y., 1994, ASP Conference Series, 63, 1.
- [2] Wilkison, S. L. et al., 2002, Icarus 155, 94.
- [3] O'Brien, D. P., and Greenberg, R., 2005, Icarus, 178, 179.
- [4] Benz, W., and Asphaug, E., 1999, Icarus, 142, 5.

- [5] 道上達広, 2004, 遊星人, 13, 71.
- [6] Saito, J. et al., 2006, Science, 312, 1341.
- [7] Fujiwara, A. et al., 2006, Science, 312, 1330.
- [8] Michel, P. and Yoshikawa, M., 2005, Icarus, 179, 291.
- [9] Britt D.T. et al., 2002, in Asteroids III. Univ. of Arizona Press, Arizona, 485.
- [10] Konopliv, A.S. et al., 2002, Icarus, 160, 289.
- [11] Abe S. et al., 2006, Science, 312, 1344.
- [12] Demura, H. et al., 2006, Science, 312, 5778.
- [13] Gaskell, R. et al., 2007, AIAA, in press.
- [14] Richardson, J.M. et al., 2004, Science, 306, 1526.
- [15] Miyamoto, H. et al., 2007, Science, 316, 1011.
- [16] Thomas, P.C. et al., 2001, Nature, 413, 394.
- [17] Benz, W. and Asphaug, E., 1994, Icarus, 107, 98.
- [18] Nakamura, A.M. et al., 2007, EPS, in press.
- [19] Hirata, N. et al., 2007, submitted to Icarus.
- [20] Fujiwara, A. et al., 1993, Icarus, 105, 345.
- [21] Oberbeck, V. R. and Quaide, W. L., 1967, J. Geophys. Res., 72, 4697.
- [22] Nakamura, A.M. et al., 2007, J. Geophys. Res., 112, E02001.
- [23] Housen, K. and Holsapple, K., 1999, Icarus, 142, 21.
- [24] Demura, H., 2001, EPS, 53, 1065.