

熱進化する微惑星の衝突破壊とフラッシュ X 線観測

石田紗那¹、荒川政彦¹、保井みなみ¹、長野 巧¹、白井 慶¹、長谷川直²

1 神戸大学大学院理学研究科、2 宇宙航空研究開発機構

はじめに

微惑星や小惑星同士の衝突破壊・再集積過程の研究では、衝突破壊強度 (Q^*) がその指標として利用される。この衝突破壊強度は、カタストロフィック破壊時の衝突条件により定義される量で、一般には、標的が半分まで壊される時のエネルギー密度が使われる。なお、エネルギー密度 (Q^* , J/kg) とは、弾丸の運動エネルギーを標的質量で割った値である。この Q^* は、標的となる天体サイズによりその支配メカニズムが異なり、物質強度が支配する場合は Shattering Strength (Q_s^*) と言われており、重力が支配する場合は Dispersion Strength (Q_D^*) と名付けられている。これまで、 Q_s^* の研究は、主に室内実験により行われおり、岩石、氷、鉄等、様々な物質について調べられてきた。一方、 Q_D^* の研究には、衝突破片の再集積過程を再現する必要があるため、これまで重力を考慮した数値シミュレーションにより研究が行われてきた。これらの結果から、天体サイズ約 100m を境界として、支配メカニズムが、物質強度から重力に変化することが分かってきた。一方、重力支配域においても重力だけでなく物性が Q_D^* に影響を及ぼすことが数値シミュレーションにより分かってきた。特に重要な物性は、空隙率、摩擦、強度であり、その寄与の度合いは Jutzi (2015) により系統的に調べられている。 Q_D^* は、再集積する破片の量により決まるが、再集積自体は個々の破片の速度と重力場によりコントロールされている。すなわち Q_D^* の物性依存性とは、破片速度の物性依存性と言い換えることもできる。そこで、Arakawa et al. (2022) では、衝突時に発生する衝突破片の速度-質量分布に対する強度や空隙率の依存性を実験的に調べた。

彼らの方法は、個々の破片速度を計測するのではなく、標的中にトレーサー粒子を入れて、そのトレーサーの速度を計測することで、トレーサー周囲の破片も含めた標的全体の速度-質量関係を求めるというものであった。標的内部のトレーサー粒子の可視化には複数のフラッシュ X 線を利用している。彼らの実験では、衝突点近傍から放出される高速破片の速度計測では、トレーサーと破片が分離してしまうため精度は良くないが、衝突点から離れた領域では、トレーサーは破片内部にくるまれたまま移動することが多いので、比較的良く速度-質量部分を再現していると思われる。そこで彼らは、速度の遅い破片から質量を積算して、破片速度と積算質量の関係を求めている。この関係から、標的質量の半分まで積算質量が達する時の速度を求めて、この速度を中間速度 v^* と定義し、この v^* とエネルギー密度との関係を強度や空隙率の異なる標的に調べた。その結果、以下のような経験式を得た。

$$v^* = \varepsilon Q^{\gamma} \quad (1)$$

その結果、Jutzi らの数値シミュレーションで予測されていたように、 v^* は強度にはあまり敏感ではなく、空隙率に依存することが分かった。さらに、室内実験を再現する数値シミュレーションを実施することで、 v^* を利用して Q_D^* を表す半理論的を導き出している。シミュレーションでは、 v^* が標的質量の半分の質量を持つ天体の脱出速度と一致するとき、標的の半分が再集積することが分かった。この結果と実験から得られた v^* の経験式を用いて、 Q_D^* を表す式が提案している。なお、この式は天体サイズが 10km を超える領域では数値シミュレーションとほぼ一致するが、

100m~10km では強度支配域の影響が大きくなり、下限値となる傾向がある。

$$Q_D^* = \left[\frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{2GM}{R} \right)^{1/2} \right]^{1/\gamma} \quad (2)$$

ここで M, R は標的天体の半分の天体の質量と半径である。

氷微惑星は熱進化に伴い内部構造も変化する。特に内部の氷が融解して水になると、初期の空隙がなくなり、さらに水と無水鉱物が反応して粘土鉱物が生成する。この粘土鉱物は温度の高い微惑星中心部で生成するので、微惑星は粘土鉱物から成るコアと多孔質未変成のマンテルを持つ層構造天体となる。このような層構造天体は惑星集積期には多く存在したと考えられる。現在、観測される小惑星では、多孔質のものや粘土鉱物から成るものが発見されており、その残骸かもしれない。そこで、本研究では、雪線近傍での氷微惑星の衝突集積過程を再現するために重要な Q_D^* を、著者らにより開発されたフラッシュ X 線と、新たに開発したデジタル画像相関法を用いた手法により実験的に調べることにした。特に氷微惑星が熱進化した結果現れるこの粘土コア・多孔質マンテルの衝突破壊強度を調べることにした。

実験方法

二層構造試料は直径 60mm でコアの直径は 30mm、マンテルの厚みは 15mm である。マンテルは $100\mu\text{m}$ の石英砂と多孔質石膏の混合物で模擬しておりその空隙率は 37% である。石英砂と石膏の混合比は、2:1 と 8:1 の二種類を準備した。それぞれの引っ張り強度は、770 kPa と 105 kPa である。コアは、ベントナイトとシリコンオイル (10Pas) を質量比 3:1 で混合して準備した。その密度は 1.7 g/cm^3 である。比較のためにマンテル物質でできた均質試料も準備した。フラッシュ X 線実験のための試料には、コアとマンテルに合わせて 12 個の鉄球をトレーサーとして入れた。トレーサー粒子

の扱いは Arakawa et al. (2022) と同じである。デジタル画像相関法 (DIC 法) 用には半球試料を準備した。半球の断面には、解析に必要なランダムな斑点を黒のスプレーで付けた (図 1)。

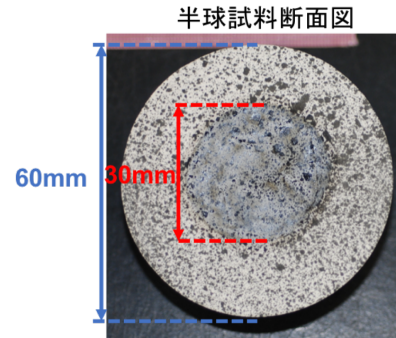


図 1：二層構造試料の半球標的の断面

衝突実験は、JAXA と神戸大で行った。JAXA ではフラッシュ X 線を利用した実験を実施した。衝突速度は $1.5\sim 5.1\text{ km/s}$ であり、弾丸には直径 7mm のポリカを用いた。詳しい実験方法は、Arakawa et al. (2022) を参照して欲しい。神戸大では、DIC 法を利用した実験を行った。衝突速度は $2.6\sim 6.0\text{ km/s}$ であり、弾丸には直径 4.7mm のポリカを用いた。実験はすべて正面衝突であった。DIC 法で必要な高速撮影は、露出時間 285ns、撮影速度 20 万コマで実施した。

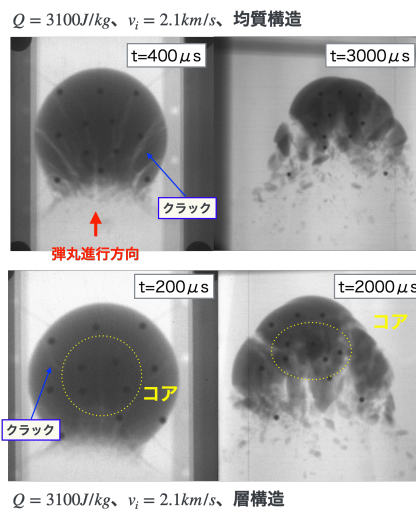


図 2：フラッシュ X 線の撮影画像

実験結果

図 2 にフラッシュ X 線で撮影した結果を示す。両方ともエネルギー密度は約 3100J/kg であるが、上段は均質試料で下段は層構造試料の結果である。それぞれ衝突後 0.4ms, 3ms と 0.2ms, 2ms に撮影を行った。下段の層構造試料では、中心部分に薄くコアが写っている。また、両者ともトレーサー粒子である鉄球ははっきりと写っている。均質試料では、衝突後 0.4ms には試料全体を通るようなクラックが発生しているのがわかる。一方、層構造試料では、コアによりクラックの成長が妨げられており、0.2ms では試料全体に渡るようなクラックは成長していない。ただ、2ms 後の層構造試料を見ると、均質試料とのはっきりした違いは見られない。コアは点線のように変形しているが、周囲のマントルもかなり破壊しており、コアの変形に伴いマントルの破壊も進行したと思われる。

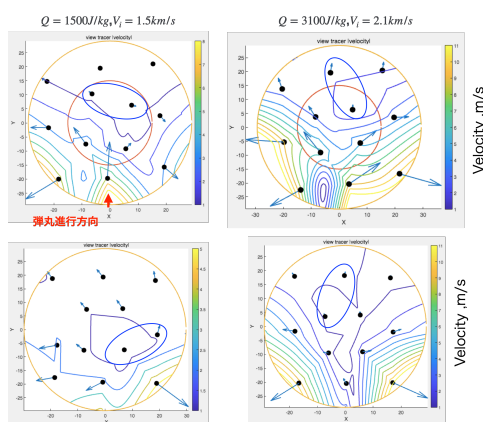


図 3：破片速度分布と標的内部の速さのコンターマップ

図 3 に均質試料と層構造試料のフラッシュ X 線観測の結果から得られたトレーサー粒子の速度ベクトルと速さのコンターマップを示す。なお、速度は重心系での速度に変換している。コンターの色は速さを表し、各図の右側に速さと色の表示がある。上段が層構造試料で下段が均質試料である。左側はエネルギー密度が 1500 J/kg で右側はエネルギー密度が

3100J/kg である。均質試料では速度の小さな領域が試料の中心部分にあることが特徴である。一方、層構造試料では中心よりも反対点領域の方が、速度が小さくなっている。また、層構造試料では衝突点領域でのコンターが密であり、速度勾配がより大きくなっているように見える。さらに、両者ともエネルギー密度が大きくなると試料全域において速度が大きくなっている。

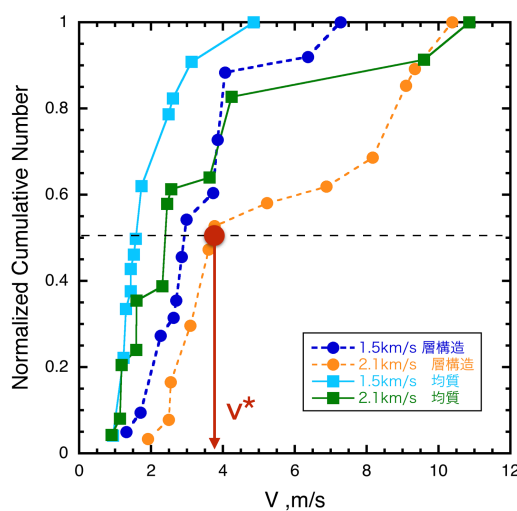


図 4：破片の速度—質量関係。質量は規格化積算質量であり、遅い速さの質量から積算している

図 4 に図 3 のような速度ベクトルを元にして求めた速度—質量分布の図を示す。なお、詳しい解析方法は Arakawa et al. (2022) にある。図 4 は、横軸が重心系での破片速度を表し、縦軸はある重心系速度よりも遅い破片の積算質量となっている。なお、この積算質量は標的質量で規格化しているので、最大値は 1 である。同一試料の場合、衝突速度が 1.5km/s から 2km/s に大きくなると、分布全体が右にずれており、これは破片速度が全体的に大きくなることを表している。一方、同じ速度で異なる試料を比較すると層構造試料の方が、系統的に速度が大きくなっている。層構造の場合、中心のコア部分は大きく変形しているにもかかわらず衝撃エネルギーの損

矢が小さく、その結果、周囲のマントルが早い速度で飛んでいるのかもしれない。この図4から規格化積算質量が0.5の時の破片速度を求めて、その速度を中間速度 v^* と定義し、速度—質量関係を表す代表値とする。

この中間速度とエネルギー密度の関係を図5に示す。以前の実験で計測した多孔質石膏（空隙率50%）と粘土（コアと同じ試料）の結果を比較のために示している。2:1混合均質試料は、系統的に中間速度が層構造試料より小さく、また、粘土試料よりもずっと小さい。多孔質石膏試料とほぼ一致するよう見える。多孔質石膏の引っ張り強度は2:1混合均質試料の3倍以上であるので、多孔質試料の場合でも v^* にはあまり強度依存性はあるようには見えない。層構造試料は、粘土試料と均質試料の間にあるよう見える。さらに、マントル部分の強度が小さくなると粘土試料に近くなるような結果もあり、速度分布はマントル強度に依存している可能性がある。引き続き、実験を継続してこの件は調べる必要がある。

最後に、今回初めて試みたDIC法による観測結果を紹介する。図6に半球試料を高速撮影した画像をこのDIC法で解析した結果を示す。層構造試料の破壊初期の画像が図6aにあるが、衝突点近傍が破壊してクレータリングが起こり、同時にコアの衝突点近傍が変形していることが確認できる。このタイミングでの断面の二次元速度分布が図6b, cに示す。図6bは左右方向（衝突方向）の速度成分を表し、図6cは上下方向（衝突方向に垂直な方向）の速度成分を表す。速度の大きさは右側のバーの色合いと対応している。図6bを見ると衝突点付近ではクレータリングに伴い、衝突方向と反対方向の速度成分を持つことがわかる。

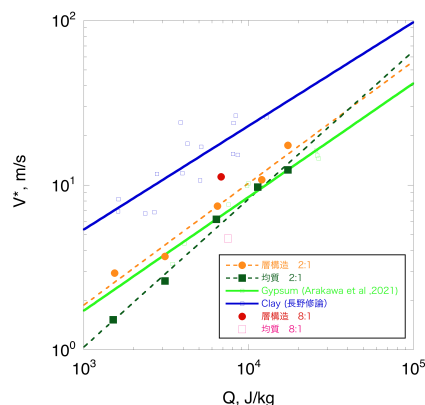


図5：中間速度とエネルギー密度の関係

ただし、コア部分はすべて衝突方向に変形しており、衝突面ではコアとマントルの分離が顕著であることを示している。図6cを見ると下方方向の運動は標的の下部の台座に影響されているように見えるので、ここでは議論しない。上方方向は自由表面となっており、標的の表面付近ほど早い速度で運動していることが明瞭である。また、衝突点からその反対点を結ぶ線の両脇は上下方向の運動速度はほぼ0となっていることも確認できる。これらの結果は、フラッシュX線を用いて調べた標的内部の速度分布と矛盾しない結果であり、今後さらに定量的な比較を行う予定である。

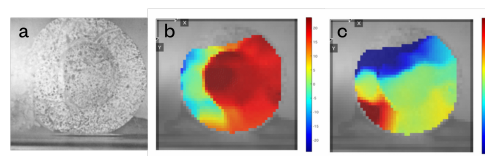


図6：DIC法により解析した標的断面の速度分布。a: 高速撮影画像, b: 衝突方向の速度成分, c: 衝突方向と垂直方向の速度成分

参考文献：Jutzi, M. (2015) Planetary and space science, 107, 3-9. Arakawa, M. (2022) Icarus, 373, 114777.