

10km/sを超える衝突速度でのクレーター形成実験

○荒川政彦¹, 藤田幸浩², 中村昭子¹, 岡本尚也¹,
門野敏彦³, 重森啓介³, 弘中陽一郎³, 佐野孝好³, 境家達弘³
1 神戸大学, 2 名古屋大学, 3 大阪大学

はじめに

太陽系には10km/sを超える高速度衝突現象が頻繁におきている。例えば、地球・月系への小惑星衝突の平均速度は10数km/sと言われており、また、木星系や土星系の衛星への系外からの衝突は、20km/sを超えることが知られている。このような超高速度での衝突実験を再現するために、阪大レーザー研の高出力レーザーを用いた飛翔体加速による弾丸衝突技術が開発された。現在、100~250 μ mの金属弾丸を>10km/sで定常的に加速することに成功している。この技術を用いて、これまで未踏領域であった超地球脱出速度におけるクレーター形成実験が行われている。>10km/sでは、珪酸塩鉱物の溶融・蒸発が起こる衝突圧力であるため、衝突時のエネルギー散逸機構が大きく変化することが期待される。その結果、衝突のスケール則に影響を及ぼす可能性がある。

10km/sを超える衝突時の衝撃圧力の減衰過程の研究は、これまで数値シミュレーションにより行われてきた。その結果、衝突溶融や蒸発が起きると圧力減衰率が大きく変化することがわかっている。カンラン石を用いたシミュレーションでは、衝突溶融が開始すると初期圧力が高くなればなるほど溶融領域での減衰が大きくなるという結果が得られている (Pierazzo et al., 1997)。一方、氷は珪酸塩と違って衝撃溶融が起こる圧力が低いため、5km/s未満の衝突速度で溶融を開始する。そこで、上記のような圧力減衰と衝突溶融の関係を室内実験において確認可能である。白井らの実験では、衝突速度~3km/sでは、衝突点近傍で非常に減衰の激しい領域が確認されており、衝突溶融との関係が示唆されている (Shirai et al., 2008)。このように、衝撃圧力の減衰率が衝突溶融に起因して、衝突速度により変化することから、衝突のスケール則も同様に衝突速度依存性を示すと思われる。そこで、本研究では、固体天体を構成する代表的な岩石であるカンラン石と玄武岩を用いて>10km/sでのクレーター形成実験を行い、クレータースケール則に対する衝突速度依存性について実験的に調べることにした。

実験方法

衝突実験は阪大レーザー研の激光XII-HIPERレーザーを用いて行った。弾丸加速に持ちいたレーザーのエネルギーは<~5kJである。弾丸にはAl球を用いており、そのサイズは100 μ mと250 μ mの二種類である。レーザー加速の結果、弾丸の衝突速度は9~61km/sであることがX線ストリークカメラによる観測で確認されている。試料には、玄武岩立方体（城崎産）とカンラン岩立方体（幌満産）を用いた。試料サイズは15mmである。弾丸と試料の間は<5mmとして、弾丸の分裂前に試料への衝突が起こるようにしている。実験後は試料を回収して、クレーターの観察を顕微鏡、SEMにより行った。

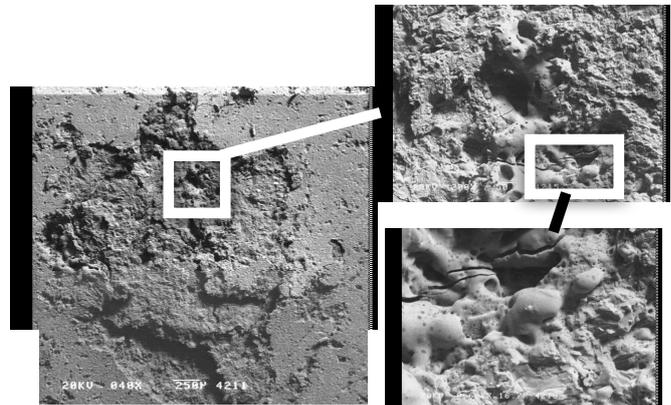


図1 玄武岩上のクレーター (SEM像)

10-2-10-3:Al
250 μ m, 13.3km/s

実験結果

(1) 形状：玄武岩試料では、衝突エネルギーが小さい時には、はっきりしたクレーターが作られなかった。衝突したと思われる領域が破碎を受けて、破片が剥がれてるだけの状態で、飛び散らずにちゃんとした孔には成長していない。また、衝突エネルギーが大きい時に作られる衝突孔も形状が不定形で4km/s以下で形成される典型的なピット・スプール型のクレーターとは形状が異なる。クレーター内部をSEMで観察すると図1のように局所的に溶融・固結したと思われる場所を点在して確認することができた。玄武岩試料を構

成する斑晶，石基の構造は，今回の弾丸サイズよりも大きいか，ほぼ同じサイズである。従って，弾丸により発生した衝撃波の伝播は試料の不均一構造に大きく影響を受けることになる。玄武岩に含まれる数%の空隙や結晶粒界における衝撃波の反射が，クレーター形状や融解・固結構造の原因ではないかと思われるが，詳しい考察は今後行う予定である。一方，カンラン岩試料では，玄武岩試料で観察されたような融解の証拠は確認されなかった。クレーターの壁や底面は破断面を示し，破碎によりクレーター孔が形成されたことがわかる。クレーター形状は円形のものが多いが，実験によってはカンラン岩に潜在的に存在したクラックがクレーターの成長を妨げているようなものもある（図2）。衝突孔は一般には白濁しており，細粒の破碎がクレーター壁でおきていることが推測される。次に図3に形成したクレーターの直径-深さ比を示す。参考のため2-4km/sでナイロン弾丸により玄武岩上に形成されたクレーターの直径-深さ比も示す。このように今回の高速度衝突では，直径-深さ比が，玄武岩・カンラン岩の両方で0.1となり，低速度実験と比較して小さな値をとっていることがわかる。高速度衝突での浅いクレーターの特徴の原因は，衝突溶融が関与している可能性が高いが詳しいメカニズムはまだわかっていない。

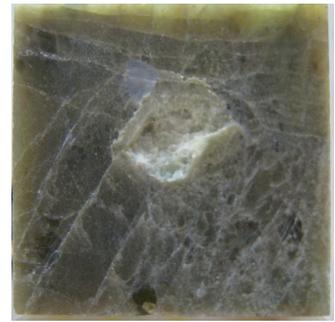


図2 カンラン岩上のクレーター。衝突速度22km/s，アルミ直径121 μm

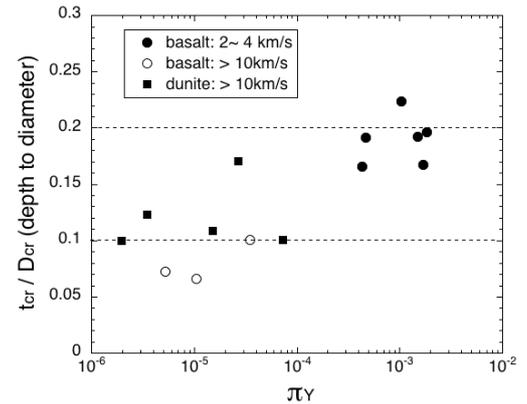


図3 クレーターの直径-深さ比

(2) **スケーリング**：今回の実験結果におけるクレーター直径のまとめを図4に示す。参考のため，2-4km/sの速度で玄武岩に衝突させた結果も同じ図に掲載する。実験結果を

Holsappleらのスケール則と比較するために，縦軸はスケーリングされたクレーターサイズ (π_R) に密度補正を加えた無次元数を取り，横軸は物質強度と運動エネルギーの比に関連する無次元数をとる。実験データのバラツキが大きいので，確定的なことは言い難いが，Holsapple and Housen (2007)で提案されている強度支配域でのスケール則を同じ図にプロットすると，低速と高速の両方のデータを矛盾なく説明できることがわかる。実際，岩石の種類を無視してすべてのデータを使って，フィッティングすると彼らの提案するスケール則のほぼ一致した。

$$\pi_R(\rho/\delta)^{0.4} = 1.2 \pi_Y^{0.255}$$

π_Y は， $Y/\rho v_i^2$ と定義される。Yは試料強度， ρ は密度， v_i は衝突速度である。データ解析の方法としては，各速度領域で別々にフィッティングする方法もあるので，そのような解析を行なってみると，低速度実験の結果と高速度実験の結果では，はっきりしたオフセットが現れるような結果となった。オフセットがある場合は，その原因として衝突溶融による圧力減衰の増加が推測されるが，既存のスケール則と一致してしまった場合，衝突溶融がクレータースケール則には影響を及ぼさないことになる。これらのどちらが正しいかは，現在のところはっきりしない。今後，低速実験と高速実験の衝突条件が重なるような実験を行なって確認していく必要がある。

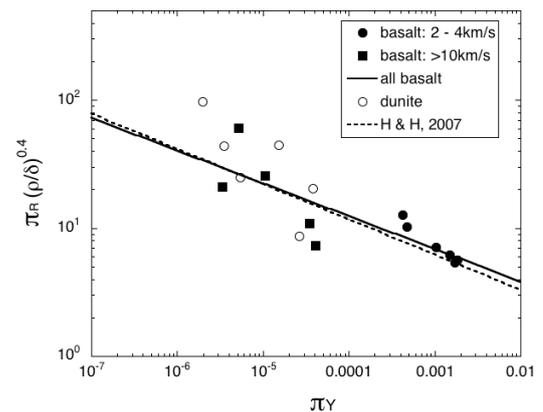


図4 クレーターサイズに関するスケール則