

Laboratory impacts into dry and wet sandstone with and without an overlying water layer: Implications for scaling laws and projectile survivability

E. C. BALDWIN, D. J. MILNER, M. J. BURCHELL, and I. A. CRAWFORD

*Meteoritics & Planetary Science* 42, Nr 11, 1905–1914 (2007)

名古屋大学大学院 環境学研究科M1 土肥弘嗣

## イントロ

- **スケーリング則**
  - クレーターサイズと**衝突条件**を関連づける方法
    - 弾丸速度、質量、密度、target強度、重力
  - ⇒これらの衝突条件だけでクレーターサイズを決めることはできない
  - ⇒実験結果から天体スケール
    - 物性のモデリングに制限が多い
- **Local condition**
  - 上記以外の衝突条件
- **空隙率、含水率、水の層の有無**

## 空隙率の影響

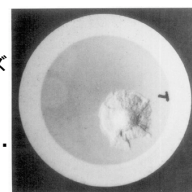
- 小惑星に対する衝突に関するモデルが考案された (Housen and Holsapple 2003)
- Meteor Crater の様な堆積岩への衝突でも空隙率は重要
- **衝突現象におけるPorous targetの特徴**
  - 衝撃波が伝わりにくい
  - 弾丸の運動エネルギーが熱に変わりやすい
  - 粒子間の隙間を埋めようとする (Love et al. 1993)
  - 結合力が弱く、圧縮強度も弱い

衝突時に物質が吹き飛びにくい

一定の運動Eを与えたときにできるクレーター体積は、空隙のないtargetに比べて大きくなるはず (Holsapple and Schmid 1987)

## 過去の研究

- **Love et al. (1993)**
  - ソーダライムガラス vs 焼結ガラスビーズ
  - 高空隙率: 深いクレーター
  - クレーター体積は空隙率に依存しない
  - コメント: 依存しているように見えますが...
- **この論文**
  - 鉄球 vs 砂岩
  - 高空隙率: 浅く広いクレーター
  - クレーター体積は高空隙率の方が大きい



Love et al. (1993)のクレーター  
φ=37%

## 含水率の影響

- **含水率**
  - 岩石中の空隙に液体(水)がしみ込んでいる割合
- **地球の堆積岩への衝突では重要**
- **岩石の脆性強度**
  - 水を含むことで小さくなる (Baud et al. 2000)
- **惑星スケールの衝突**
  - 衝撃波が通った後に膨張する蒸気が、岩石を破壊してクレーターが大きくなる可能性がある (Schaefer et al. 2006)

## 水の層の影響

- **水の層**
  - 地球でのクレータリングを考える上で重要
- **水の層が厚くなると**
  - 弾丸が岩石に衝突する時の**衝撃圧力が弱まる**
  - 海洋衝突では**衝突物がかなりの割合で残る**
    - 地球外の有機物を地球に運ぶ (Milner et al. 2006)
    - パンスペルミア説 (Melosh 1988, Burchell 2004)
  - 水の層で弾丸がどれだけのエネルギーを失うか
    - 数値計算: Wünnemann and Lange 2002
    - 実験ではまだ調べられていない
  - クレーターのできる最大深度:  $d/H=0.1\sim 0.05$  (Gault and Sonett 1982, Shuvalov and Trubetskaya 2002)

### この論文では

- 2種類の砂岩に対する衝突実験
  - 浸潤させた試料・乾燥させた試料
  - ⇒クレーターサイズの違いを調べる
- 砂岩の上に水の層を引いた場合の衝突
  - 浸潤させた試料・乾燥させた試料
  - 水の層厚: 0~12mm
  - ⇒クレーターサイズの違い
  - ⇒弾丸の残りやすさ

### 試料について


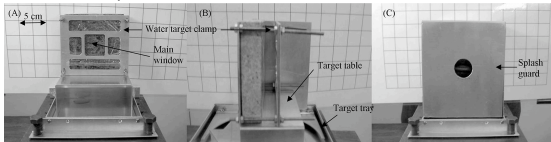
- パイロットテスト砂岩
- Coconino 砂岩: Meteor Crater(アリゾナ州)付近の砂岩
  - 100×100×60mmの塊
- Wet試料
  - 真空中で2日間以上蒸留水に浸す
- Dry試料
  - 80°Cの炉の中で乾燥させる

試料の種類		密度	空隙率	粒子サイズ	圧縮強度
テスト砂岩	Wet	2.35	16.76	0.4	43
	Dry	2.18	16.76	0.4	90
Coconino 砂岩	Wet	2.01	22.70	0.15	nd
	Dry	1.78	22.70	0.15	74

Coconino砂岩の方が空隙率  
wetにすると強度が下がる

### 衝突実験

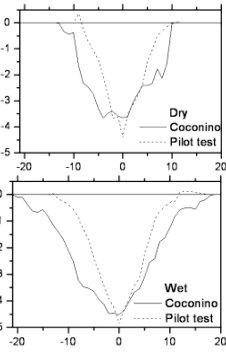
- 2段式軽ガス銃
- 弾丸:  $\phi=1\text{mm}$ , 鉄球
- 衝突速度: 5km/s
- チャンバー: 5kPa
  - ⇒水の蒸気圧=2kPa@20°C
- 水の層
  - 厚さ29 $\mu\text{m}$ のポリエチレンの袋に詰める

### 回収試料の分析

- クレーター直径
- クレーター深さ
- クレーター体積: ガラスビーズ
- 弾丸回収
  - 濾過(whatman1:11 $\mu\text{m}$ )⇒磁石で弾丸を回収⇒電子天秤で質量計測

### 結果: 空隙の影響

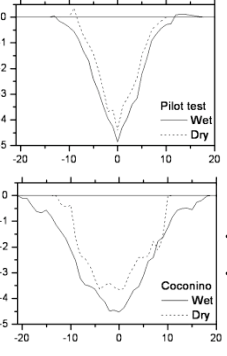


- パイロットテスト砂岩とCoconino砂岩の結果を比較
  - WetとDryそれぞれ
- 実験結果とLove et al. (1993)の比較

この論文	Love et al. (1993)
直径	直径
高空隙率 > 低空隙率	高空隙率 > 低空隙率
深さ	深さ
高空隙率 < 低空隙率	高空隙率 > 低空隙率
体積	体積
高空隙率 > 低空隙率	高空隙率 > 低空隙率

• 体積、深さデータが2つの論文で矛盾  
⇒この論文では空隙率・密度・強度の異なる試料を使用  
⇒空隙率だけの影響を見るのは難しい

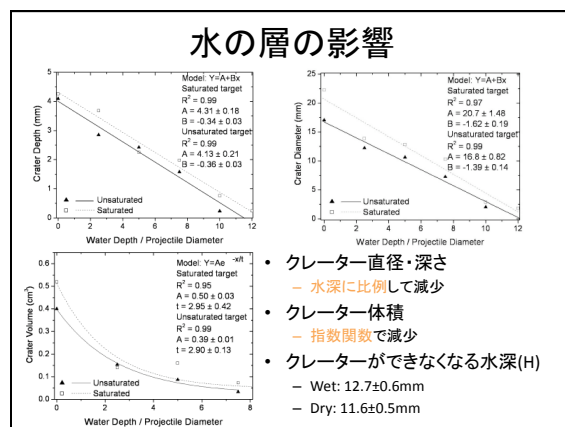
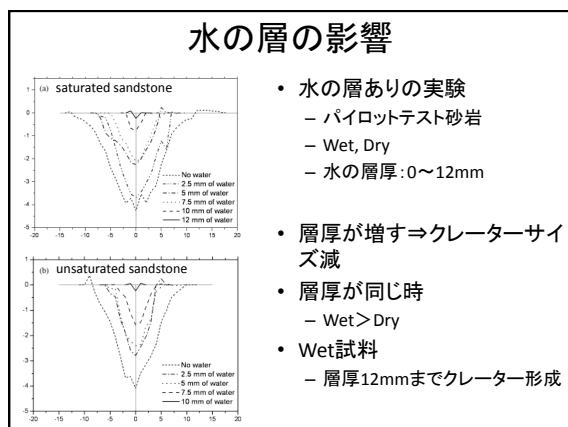
### 含水率の影響



- WetとDryの試料を比較
  - テスト砂岩・Coconino砂岩それぞれ
- Schaefer et al. (2006)との比較

この論文	Schaefer et al. (2006)
直径	直径
Wet > Dry	Wet > Dry
深さ	深さ
Wet > Dry	Wet < Dry
体積	体積
Wet > Dry	Wet > Dry

- Wet > Dryになる原因
  - 降伏応力がWet < Dryだからだろう
- 2つの論文で結果が矛盾
  - 砂岩の強度
  - 弾丸サイズ: Schaefer et al. ⇒ cm
  - 空隙率: Schaefer et al. ⇒ 12~20%層構造
  - 含水率: Schaefer et al. ⇒ 44%



### d/H比について

- d/H比
  - 弾丸直径/クレーターができなくなる水深
  - Dry:  $1/(11.6 \pm 0.5) = 0.086$
  - Wet:  $1/(12.7 \pm 0.6) = 0.079$
- Gault and Sonnet (1982)
  - 砂+水の層に対する衝突実験(衝突速度3km/s)
  - $d/H = 0.05$
  - 強度の大きいターゲットではd/Hが大きくなることを示唆
  - ⇒この論文の実験で実証された

### d/H比について

- d/H比を変化させる要因
  - Targetの強度 (Gault and Sonett; 1982, Shuvalov and Trebestkaya; 2002)

Housen and Holsapple 1999  
 大きい物は小さい物より壊れやすい  
 • 単位体積あたりの運動Eと弾丸速度を一定にする衝突実験  
 • 大きい試料の方が大きいクラックが入ってる  
 スケールが大きい⇒負荷持続時間が長くなる⇒クラックの成長時間が長くなる

### 弾丸の残りやすさ

- クレーターができた時
  - 弾丸と砂岩粒子が結合して分析できない
- クレーターができないうち
  - 元の弾丸の25%の質量が残る
- 海底衝突痕のコアから衝突した小惑星の破片が見つかる (Kyte 2002)
- 大陸衝突でも小惑星の碎屑片の発見 (Maier et al. 2002)

### πスケール則

- πスケール則
  - クレーターサイズといくつかの衝突条件の無次元量比の関係を示す

$$\pi_D = D_i \left( \frac{\rho_i}{m} \right)^{1/3} \Rightarrow \text{クレーター直径}$$

$$\pi_2 = \frac{1.61gL}{v_i^2} \Rightarrow \text{重力支配域}$$

$$\pi_3 = \frac{Y}{\rho_p v_i^2} \Rightarrow \text{強度支配域}$$

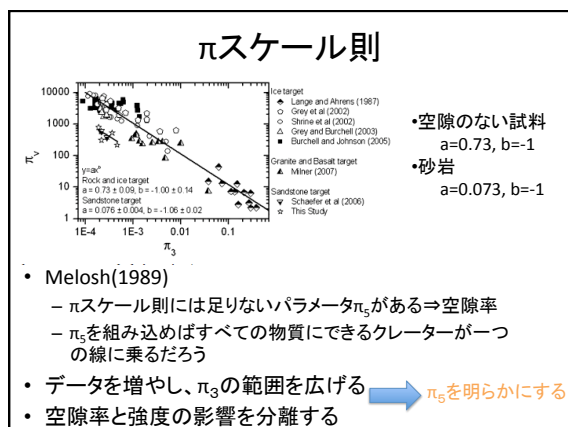
$$\pi_4 = \frac{\rho_i}{\rho_p} \Rightarrow \text{密度}$$

$$\pi_v = \frac{\rho_i V}{m} \Rightarrow \text{クレーター効率}$$

クレーター効率 $\pi_v$ とその他のパラメータでデータを表すことが多い。今回の試料は強度があるので $\pi_2$ と $\pi_3$ で表す

$$\pi_v = a\pi_3^b$$

$D_i$ : クレーター直径  
 $V$ : クレーター体積  
 $\rho_i$ : Target密度  
 $\rho_p$ : 弾丸密度  
 $g$ : 重力加速度  
 $m$ : 弾丸質量  
 $v_i$ : 衝突速度  
 $Y$ : Target強度



### まとめ

- 空隙率と含水率がクレーターサイズに及ぼす影響を示した
  - 高空隙率・Wet試料の方が大きなクレーターができる
- 砂岩の結果を $\pi$ スケール則(強度支配域)に乗せると空隙を持たない物質の線の下になる
- 水も層がある場合、クレーター直径・深さは水深に比例して、体積は指数関数的に減少する
- 弾丸直径の12倍の水深でクレーターができなくなった
- d/H比はターゲットの強度に依存するだろう
- 水の層が厚い時、元の弾丸の25%の質量が残った