Impact cratering in sandstone: The MEMIN pilot study on the effect of pore water

Thomas KENKMANN et al.

Meteoritics & Planetary Science 46, Nr6, 890-902, 2011

神戸大学　M2
岡本　尚也

KOBE UNIVERSITY

1. Introduction

地球上には178個を超える衝突クレーターが発見されている (Earth Impact Database)

形成場所

- 70個ー 堆積岩
- 57個ー 結晶質の下部構造の上を堆積岩が覆っている場所
- 51個ー 結晶質岩 or 脱水された堆積岩

・地球上の衝突クレーターでは、堆積岩が最もありふれたターゲット物質の一つとなっている。
・風成堆積物や河成堆積物は火星にもある
・月のような他の惑星天体には、レゴリス角礫岩が表面に良く見られる。

1. Introduction

水の存在

・海の環境、地下水で部分的に満たされた表面上。
(Dypvik et al. 2004)

・月にも水がある (LCROSS)

衝突実験

・空隙率を考慮（Love et al. 1993）

・Pore water(間隙水)とクレーター体積の関係に注目
(Baldwin et al. 2007)

➡ クレーター形成に対する空隙率や液体の効果を
理解することが重要。

1. Introduction

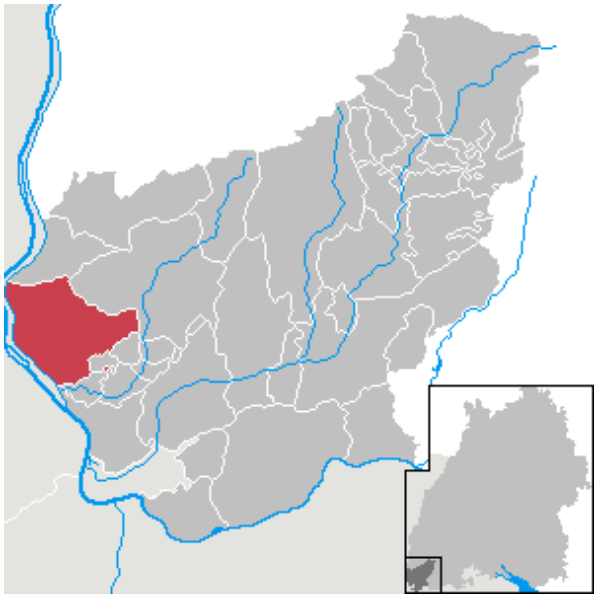
研究目的

Sandstoneにできるクレーターにおける pore water（間隙をうめる水）の影響を理解すること

- ・衝突実験　2タイプ
  — dry sandstone, wet sandstone
- ・クレーター形状、ターゲットの破壊、イジェクタ速度を解析

これらは近年設立されたMEMINの枠組みによって行われた。
(Multidisciplinary Experimental and Modeling Impact Research Network)

2. Experiments



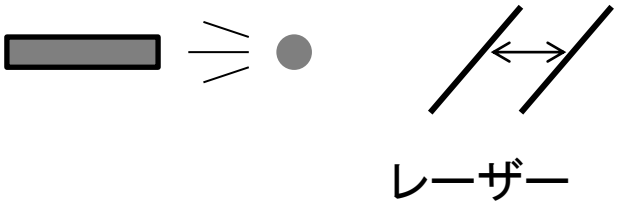
全長40m

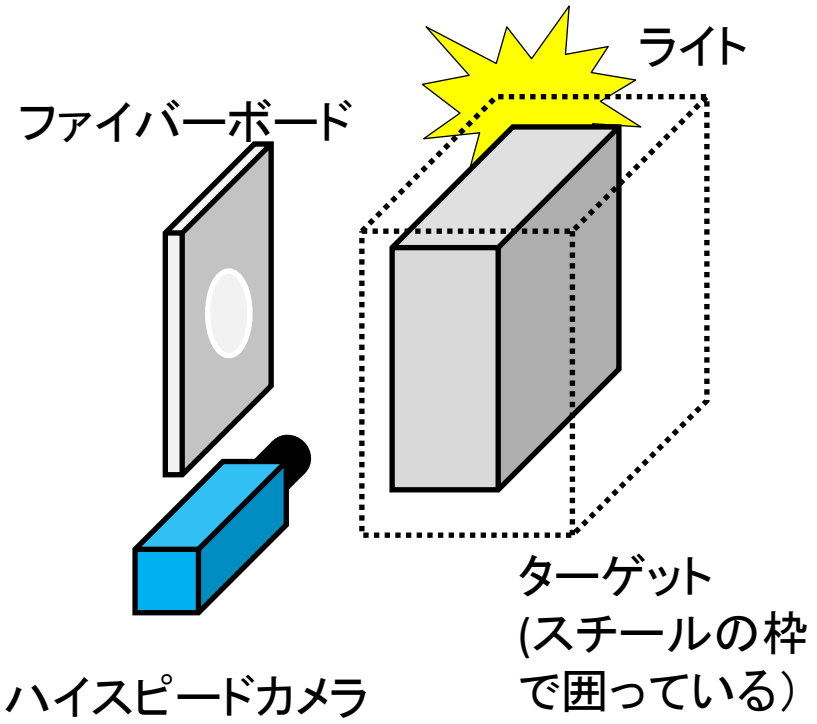
二段式軽ガス銃

(@Fraunhofer Institut Fur Kuzzeitdynamik Ernst-Mach-Institut in Efringen-Kirchen, Germany)

2. Experiments

Set -up





- 水平撃ち
- レーザー通過時間から速度を求める
- 円筒形のサボに封入して発射

フレーミングインターバル：180ns
チャンバー内圧力：500mbar

2. Experiments

ターゲット

サイズ：1.0×1.0×0.5 m

Sandstone

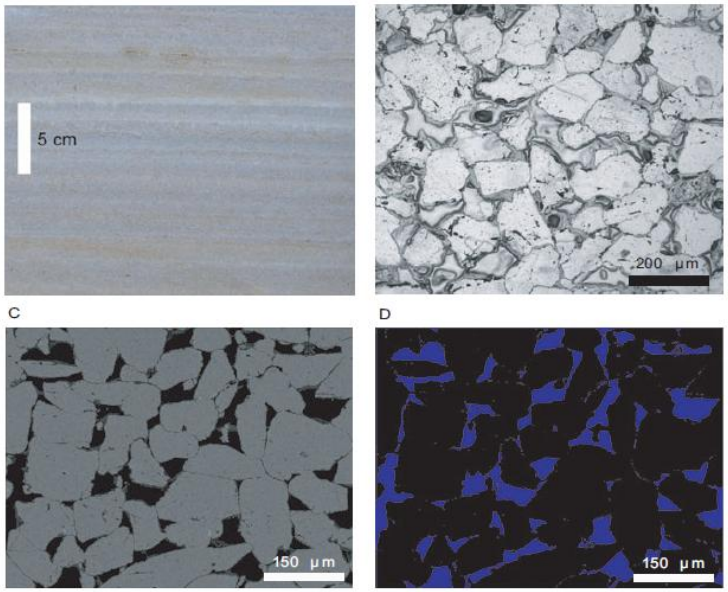
—Seeberger Sandsteinと呼ばれる塊から切り分けられた

Seeberger Sandstein（ドイツのGotha近く、チューリンゲン盆地）

—後期三畳紀時代の砂岩、河川作用で作られた堆積物

使われたSandstoneの特徴

— 平均粒子サイズ：0.17±0.01 mm
センチメートル間隔の層
組成はほぼSiO_2 (97wt%)
空隙率:12～20 vol%



2. Experiments

1. 実験2808
   Dry sandstone を使用

2. 実験2809
   Wet sandstone を使用

圧縮強度：
dry target : 62.4±2.8 MPa
wet target : 47.0±3.7 MPa

<u>Wet sandstone</u>

水に浸す前後の質量測定により、全体のpore(間隙)の44%が水に満たされていたと計算

水がどのように分布しているかはわからないが、単純な幾何学計算からあらゆる表面から6.6cm以内には広がっていると考えている。

クレーター形成過程はこの水の入った部分に起こったとしている。（←実験2809でのクレーター深さは4.5cm）

2. Experiments

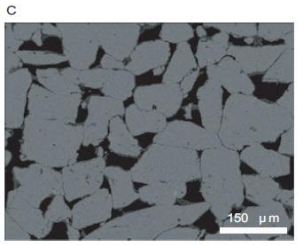
Table 1. Impact experiments of steel spheres on Seeberger Sandstein—experimental parameters.

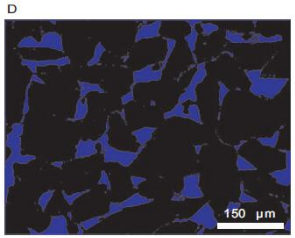
		Exp. 2808 Dry sandstone	Exp. 2809 Wet sandstone
Projectile	Mass (g)	4.1	
	Sphere diameter (mm)	10	
	Material	Steel (AISI 4130)	
	Composition	97.3–98.22% Fe; 0.8–1.1% Cr; 0.4–0.6% Mn; 0.28–0.33% C; 0.15–0.25% Mo; 0.15–0.30% Si	
	Tensile strength (N mm^{-2})	800	
	Sabot weight (g)	132	
	Impact velocity (km s^{-1})	5.34 ± 0.11	5.27 ± 0.11
Target	Size (cm)	100 × 100 × 50	100 × 100 × 50
	Weight (kg)	1138	1136 (dry); 1176 (wet)
	Material	Seeberger Sandstone	
	Composition	95.7 wt% SiO_2; 2.1 wt% Al_2O_3; 0.22 wt% Fe_2O_3; 1.0 wt% LOI	
	Strength (MPa)	62.4 ± 2.8	47.0 ± 3.7
	E-Modulus (GPa)	14.8 ± 1.4	12.1 ± 1.0
	Grain size (μm)	169.5 ± 8	
	Porosity (%)	17.9 ± 4.0	
	Fluid saturation of pore space (%)	0–2	44
	Density (g cm^{-3})	2.27	2.35 (wet)
Crater	Diameter (mm)	243.4 ± 5.1	286.8 ± 9.3
	Depth (mm)	56	45
	Depth/diameter ratio	0.23 ± 0.01	0.16 ± 0.01
	Crater volume (cm^3)	715 ± 29	1099 ± 44
	Parabola volume (cm^3)	149 ± 19	223 ± 69
	Parabola volume (% crater volume)	20.8	20.3
	Parabola diameter (mm)	82 ± 5	112 ± 18

LOI = loss on ignition; parabola = "transient" crater.

2. Analysis

解析方法





・密度、空隙率
　アルキメデス法、空隙率は薄片画像からも決定

・水の飽和度
　ターゲットを水に入れる前と後の質量を測ることで決定

・解析機器

X線蛍光分光法（XRF）、走査型電子顕微鏡(SEM)、光学顕微鏡

・クレーター形状

シリコンの型を用意。
これを使ってクレーターcavityのレプリカを石膏で作る。
デジタルスキャンして三次元のデータを得た。

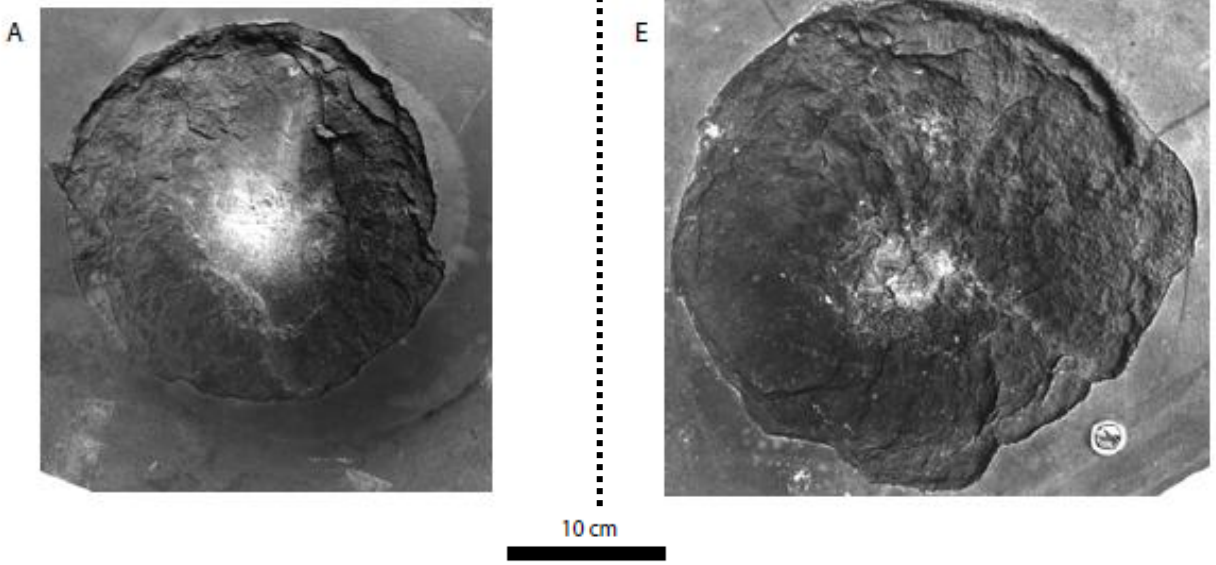
・データ処理、体積測定、高度決定

3D Move and Surfer software package

3. Results

Dry sandstone

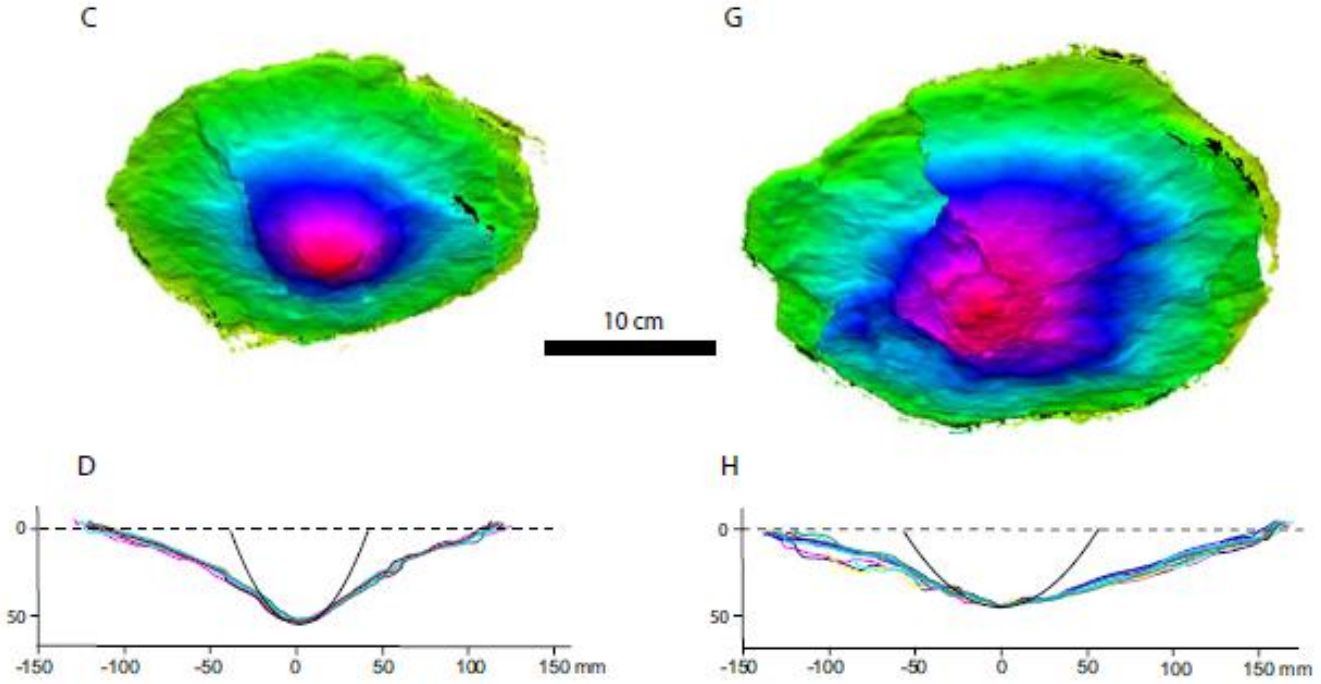
Wet sandstone



	Dry sandstone	Wet sandstone
直径	24.3±0.5 cm	28.7±0.9 cm
深さ	5.6±0.2 cm	4.5±0.1 cm
深さ / 直径	0.231±0.013	0.157±0.008
体積	715±29 cm^3	1099±44 cm^3

3. Results

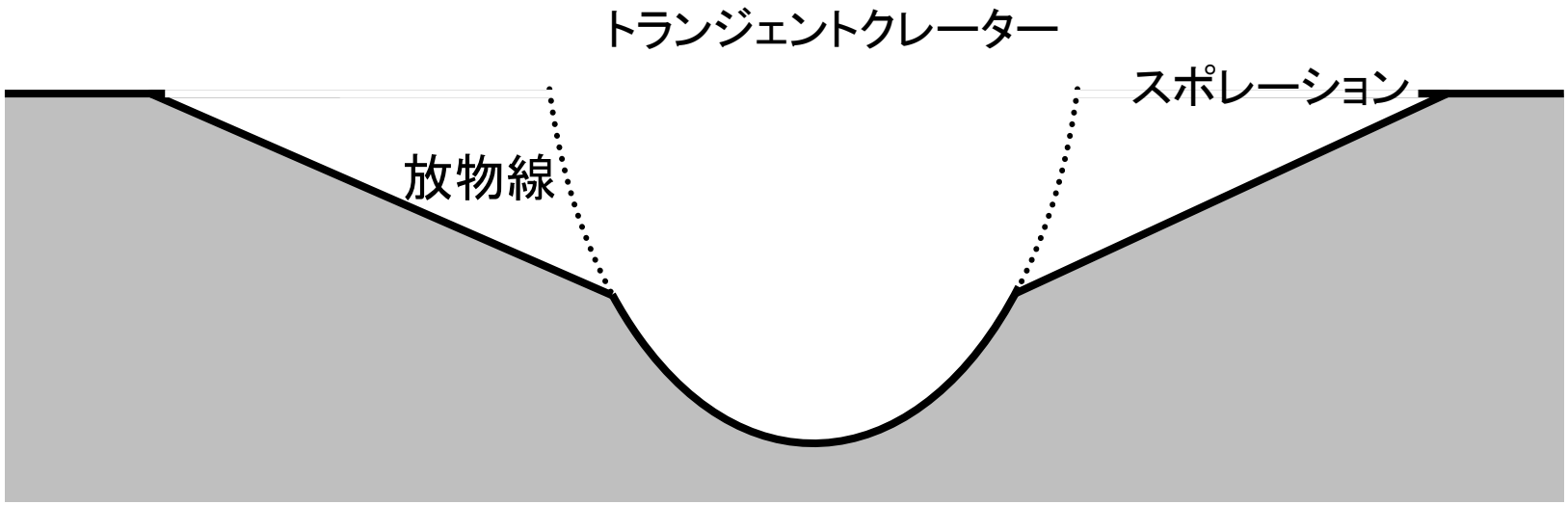
Dry sandstone　　Wet sandstone



特徴

dry	wet
最下部は丸みを帯びてる。 逆円錐形になっている	広がりがdry sandstone よりも大きい。

3. Results　クレーター形状の解析

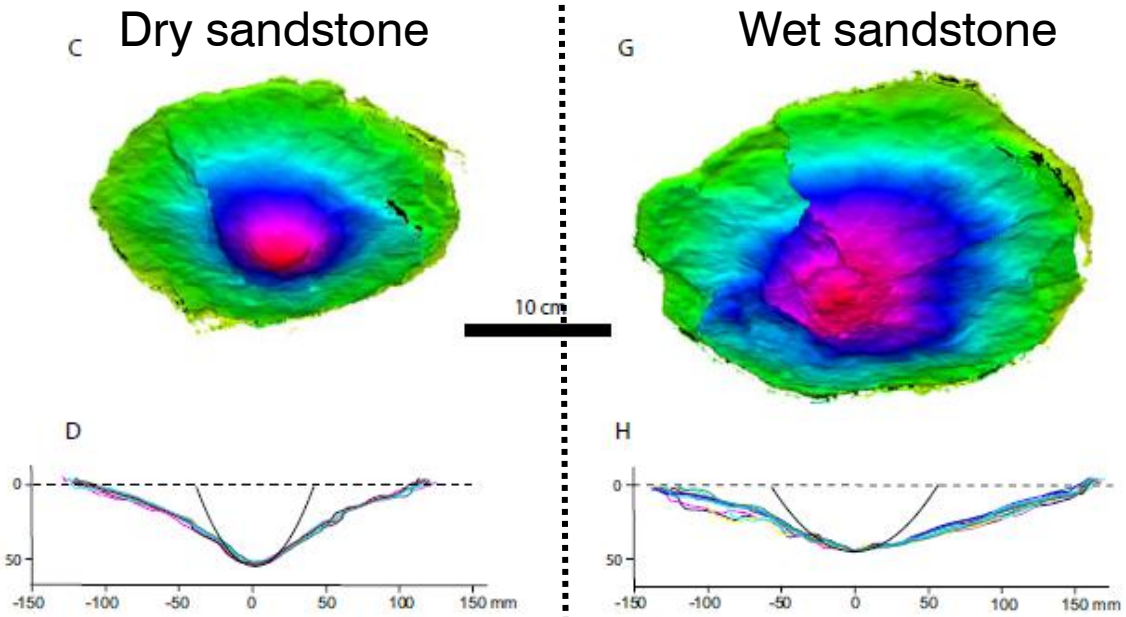


・自然界でできるクレーター
⇒トランジェントクレーターの範囲内にスポレーションが位置する

・トランジェントクレーターはcavityの最大範囲を表し、放物線で近似できる。

・自然界でおこるクレーターを考える上で、本実験でのトランジェントクレーターを決定する。

3. Results

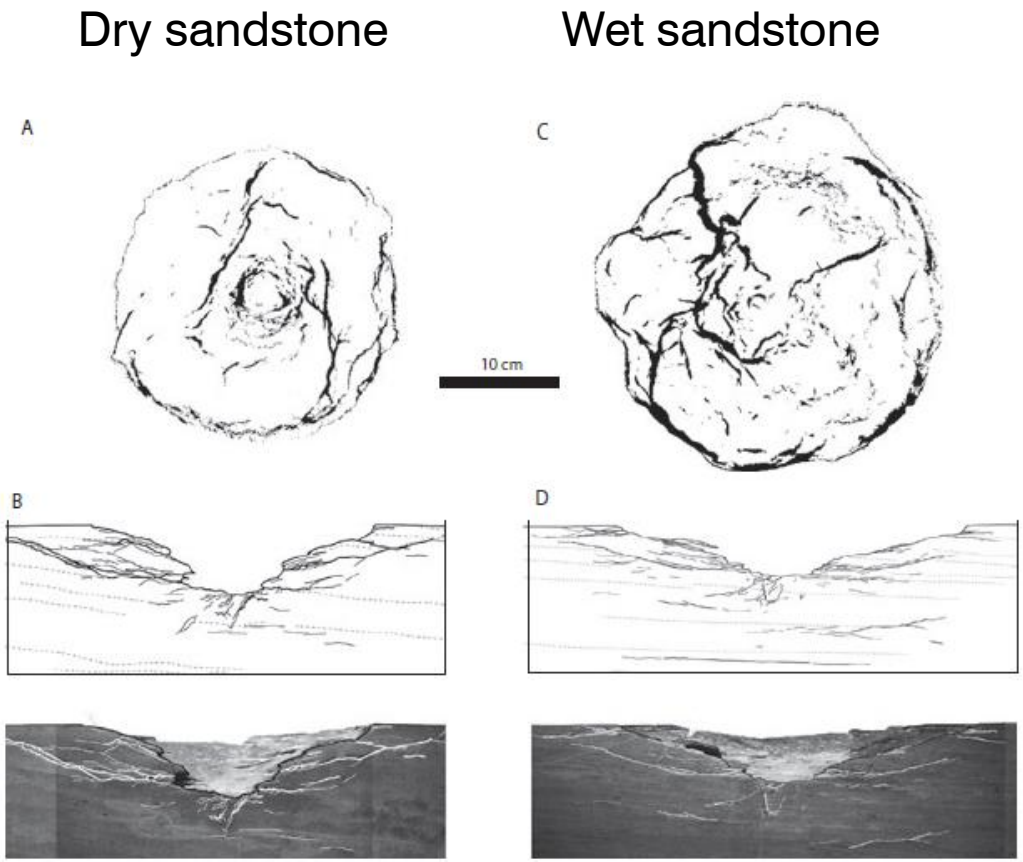


	Dry sandstone	Wet sandstone
トランジェントクレーターの直径	8.2±0.5 cm	11.3±1.8 cm
クレーター効率 $\pi_V = \rho_t * V / m_p$	83±10	128±40

どちらもおよそ79%ほどのスポレーション

3. Results

クレーター下の様相

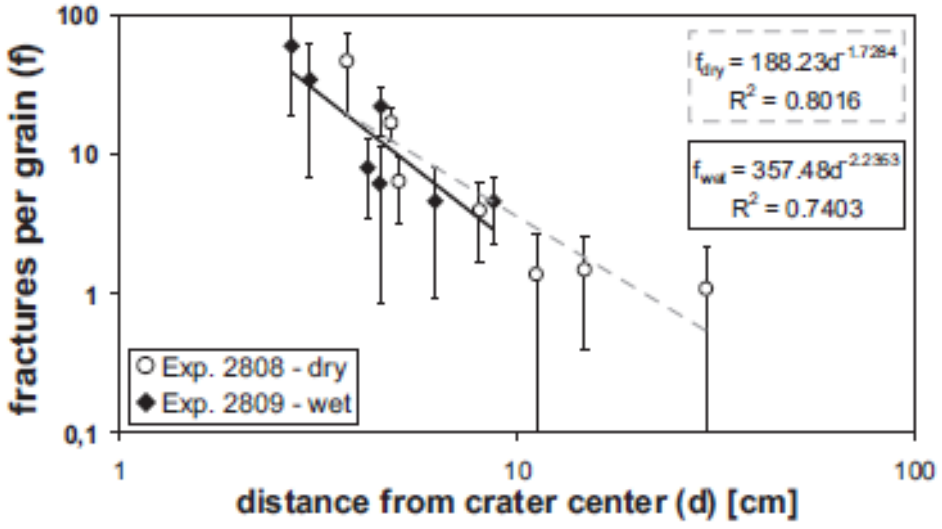


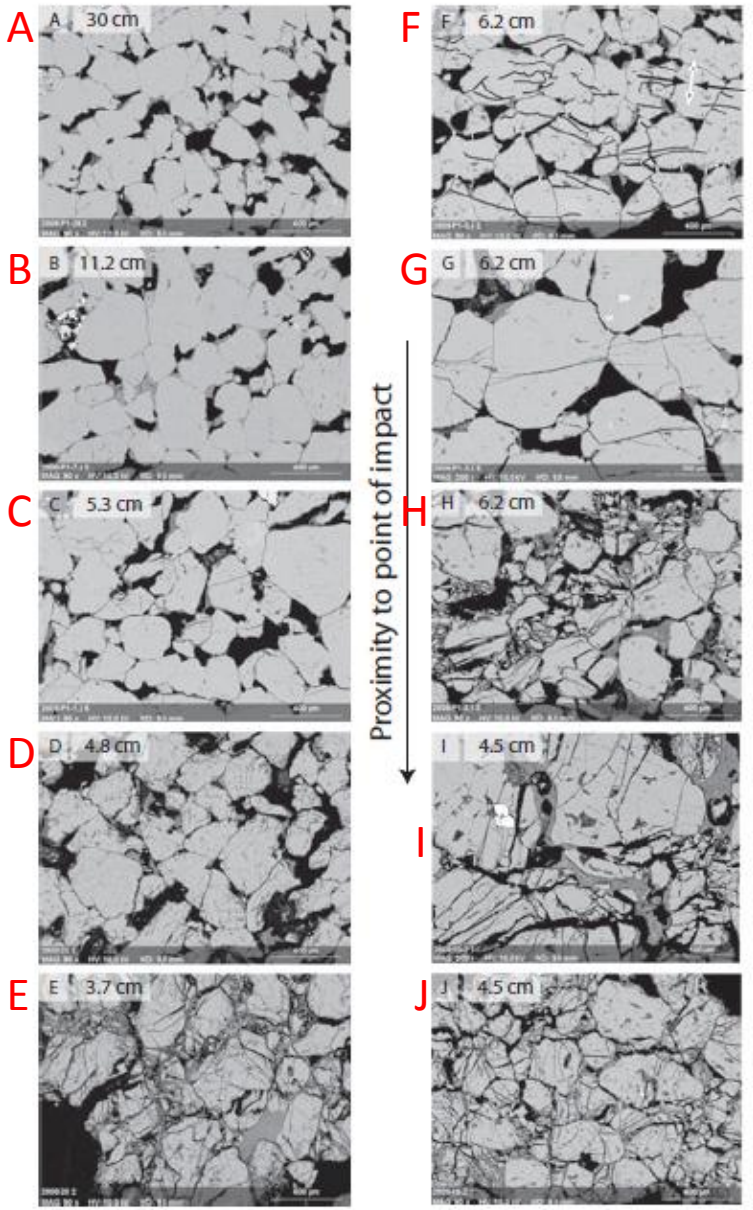
・クレーターの最も深いところでは石英の破片によっておおわれていた。
・割れ目は同心円状に広がり、角度は浅い。
・層のある面に沿い、割れ目が優先的にできている。
・クレーター中央の真下にある割れ目は3-4cmに広がっている。

3. Results

(1)粒子がほとんど変形していないsandstone
(2)粒子の破壊、pore（間隙）の崩壊
(3)粉々になった粒子

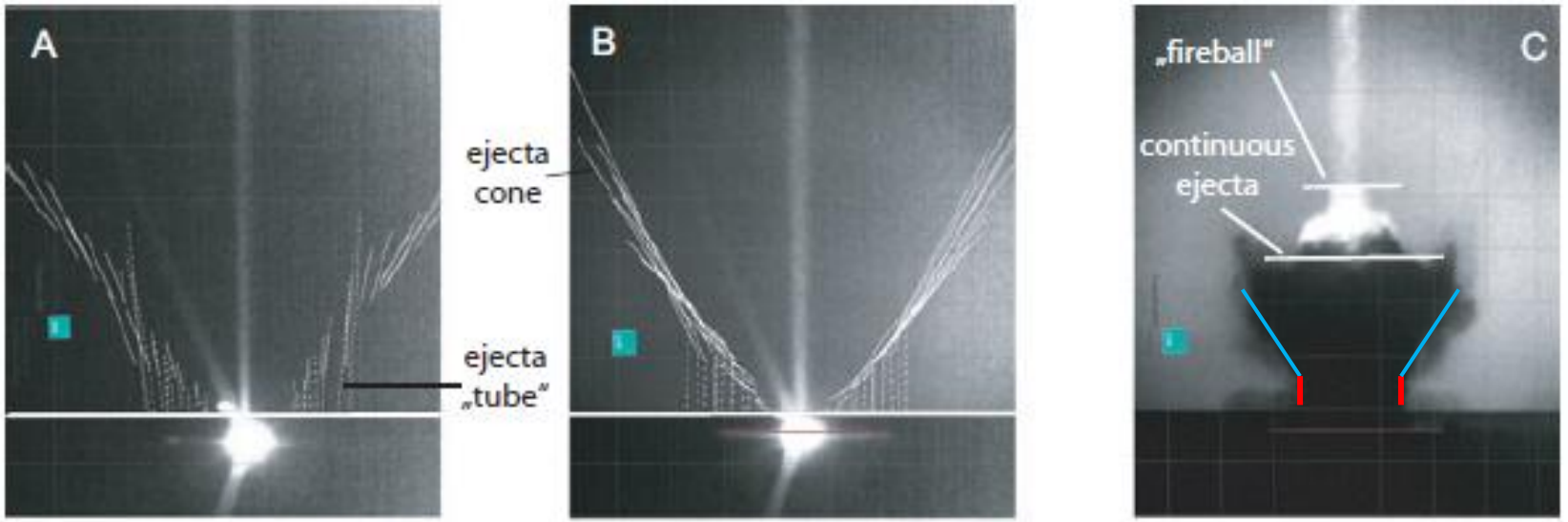
割れ目の数はベキ乗で減少





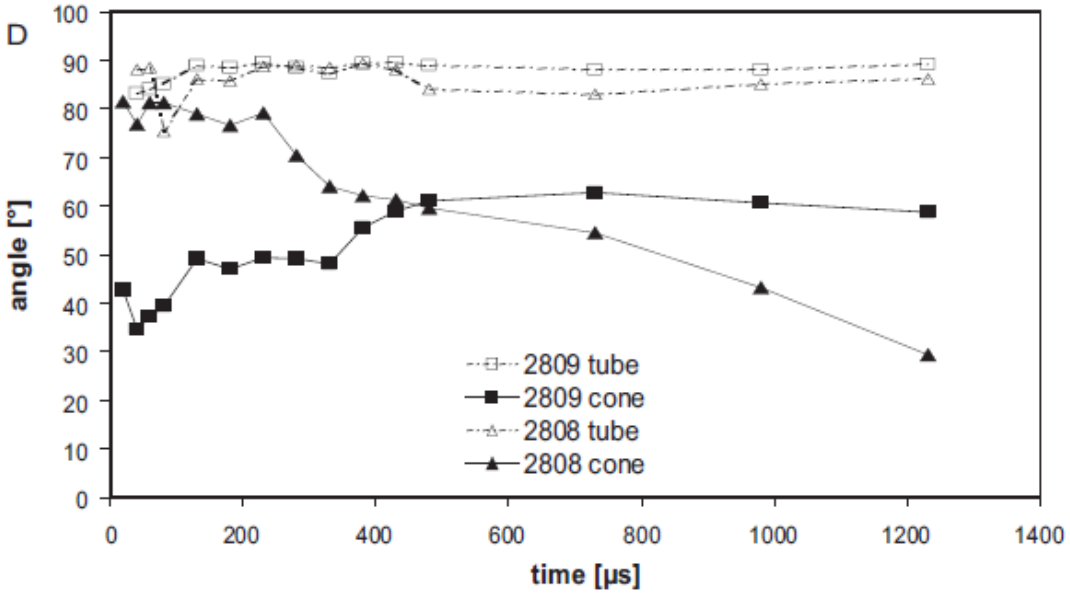
3. Results

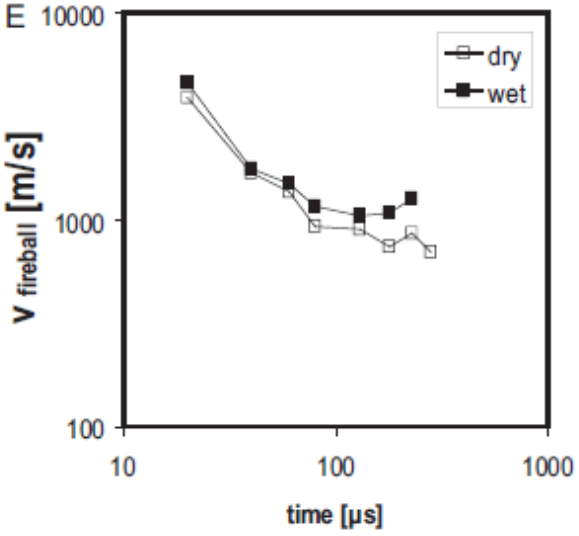
dry sandstone　　wet sandstone　　dry sandstone

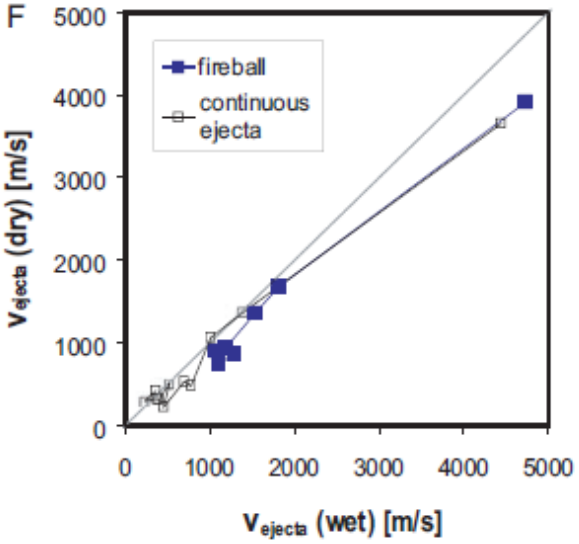


・ejecta tubeとejecta coneの角度の時間発展
・continuous ejectaとfireball(hot ejecta plume)の速度の時間発展

3. Results


D
angle [°]
time [µs]
2809 tube
2809 cone
2808 tube
2808 cone


E
v fireball [m/s]
time [µs]
dry
wet

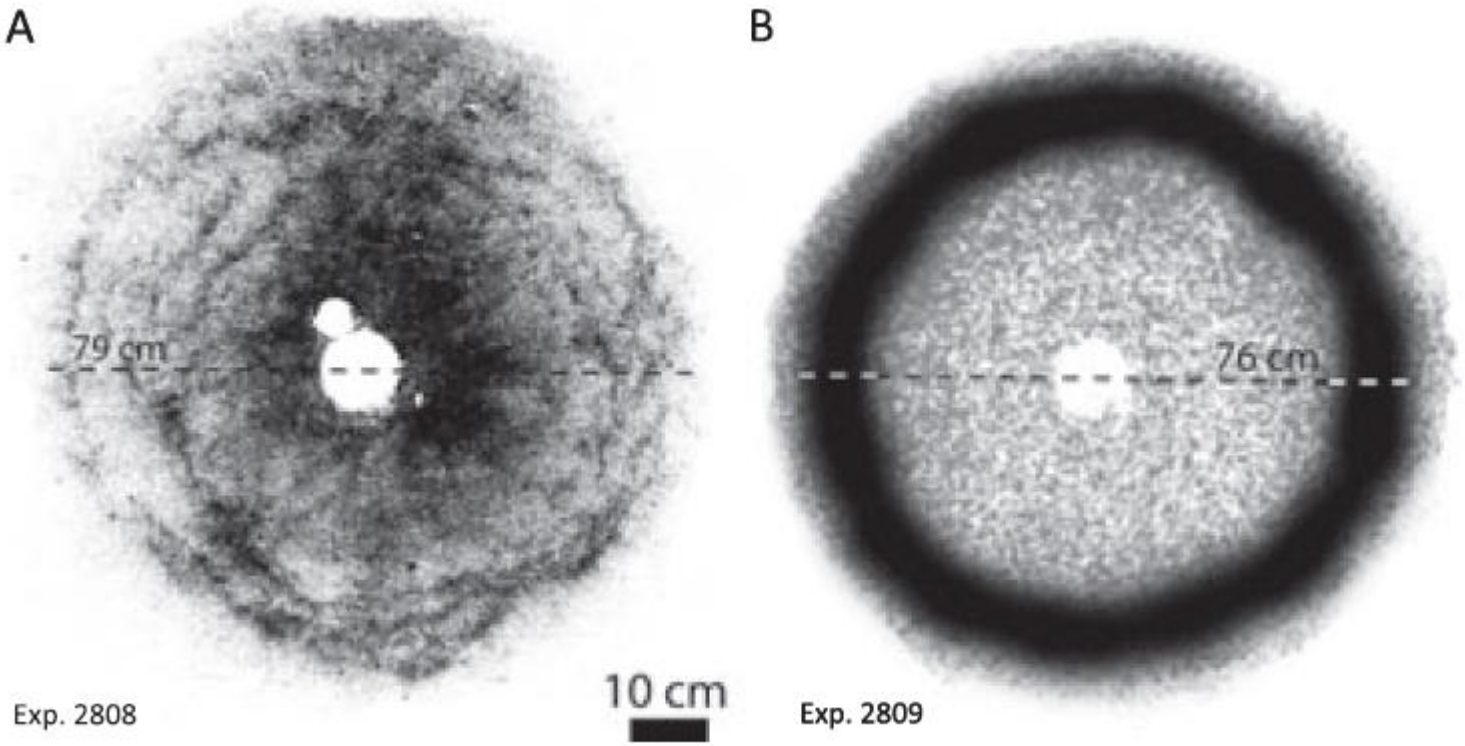

F
v ejecta (dry) [m/s]
v ejecta (wet) [m/s]
fireball
continuous ejecta

3. Results

ファイバーボードに残った跡

Dry sandstone

Wet sandstone



3. Results

iSALE（Wunnemann et al. 2006）

・空隙率の影響がクレーター成長に及ぼす影響を定量化

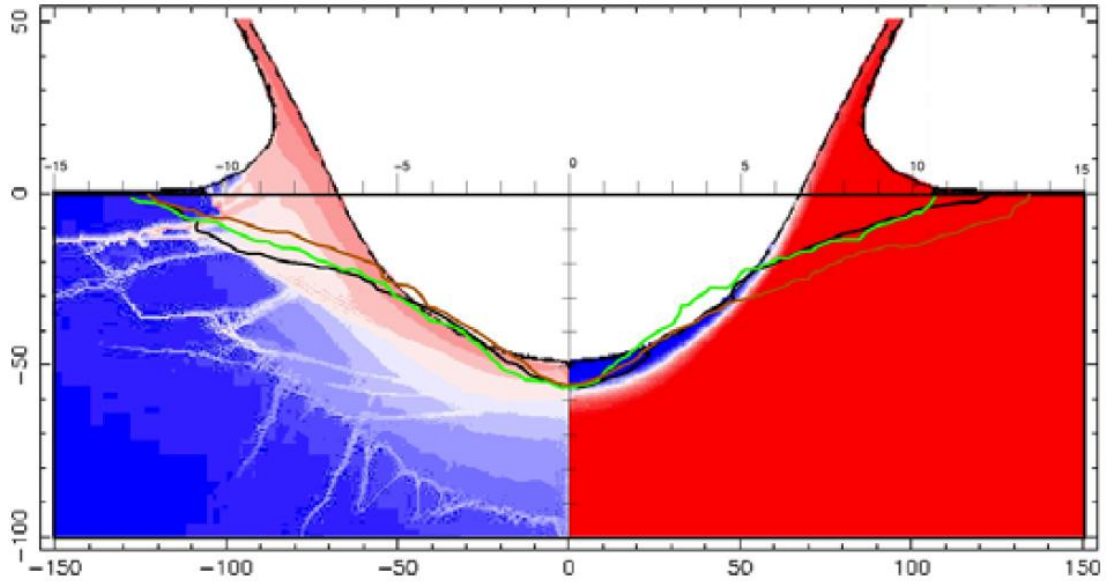
・衝撃加熱や溶融の定量化もできる

・トランジエントクレーターサイズを合わせる
　　←物質のせん断強度を変えることで

3. Results

数値シミュレーションとの比較

Dry sandstone



問題点

・シミュレーションではせん断強度を5MPa⇔静的強度測定では50-60MPa
⇒体積が増すと強度が小さくなる効果（Weibull 1951）の影響？

・引っ張り破壊を考慮していない。
⇒シミュレーションではスポレーションができない。

4. Discussion

pore waterの効果

・wet実験の方がクレーターがより浅い
⇒間隙の崩壊は流体の存在によって妨げられるから

・dryターゲットのイジェクタの角度が60°　⇔Burchell 2003　では47-53°
⇒空隙が大きいとより深く潜り込み、イジェクタの角度はより狭くなるから。

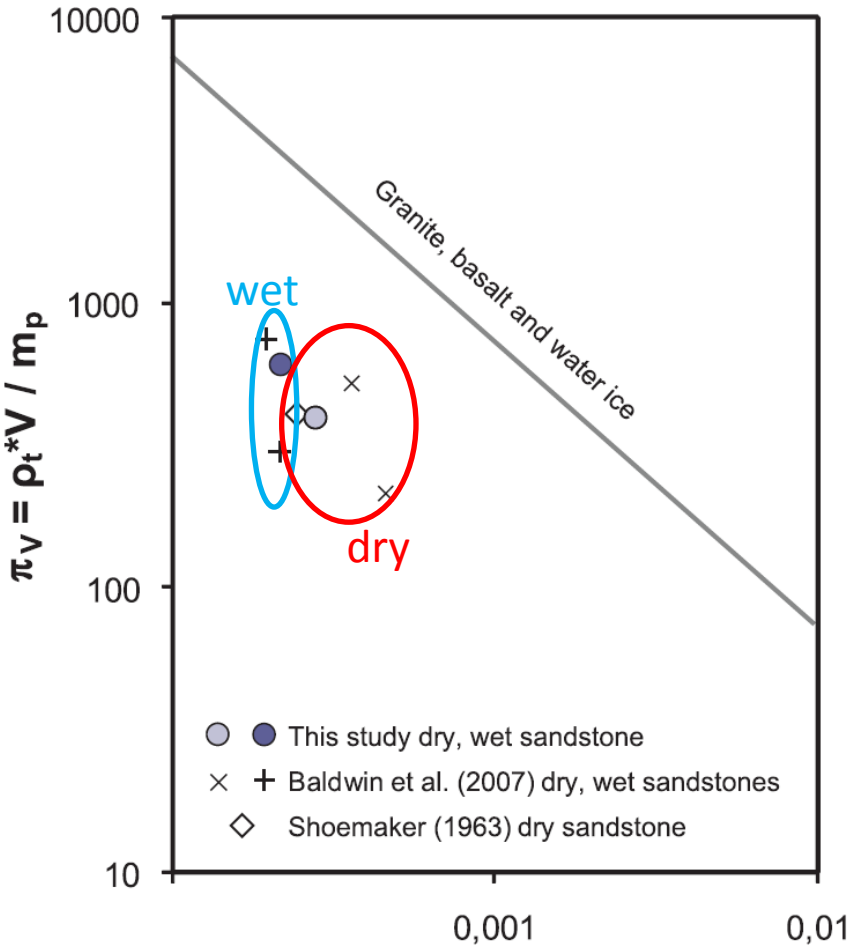
しかし、Burchell 2003では氷や氷－シリケート混合物への衝突実験では60°を超えるイジェクタもある。
⇒イジェクタ角度はいくらかの要因によってコントロールされている

・クレーター効率π_V はwetよりもdryターゲットの方が小さい。
⇒粒子のすきまに水 が入ることで衝撃波が減衰するため。また静的強度を弱くなっているため。

・イジェクタの速度がwetターゲットの方が速い
⇒水が蒸発しイジェクタを付加的に加速させているのかも

4. Discussion

Pi スケーリング



$\pi_3 = \rho_p / Y * U^2$ → $Y/\rho_p * U^2$

5. Summary

自然界に起こる衝突イベント
⇒ 空隙率や揮発性物質の役割を理解するために
実験が必要

二段式軽ガス銃を用いて衝突実験
プロジェクタイル：steel
ターゲット：dry sandstone, wet sandstone
衝突速度：～5300m/s

クレーター効率、イジェクタ速度、スポール体積
⇒ pore water(間隙水)があると大きくなる

水の蒸発が衝突の流れ場に寄与する可能性がある

MEMINプロジェクトの枠組みとして、クレーター形成の理解を広げるため、dryとwet sandstoneへのクレーター実験をさらに実行中