

衝突クレーター形成過程に関する実験的研究

太陽系科学研究室・D3

平岡 賢介

衝突クレーター形成過程の研究

衝突クレーターの大きさや形状から
様々な情報を得るためには、
衝突クレーター形成の物理素過程を
十分研究することが重要である

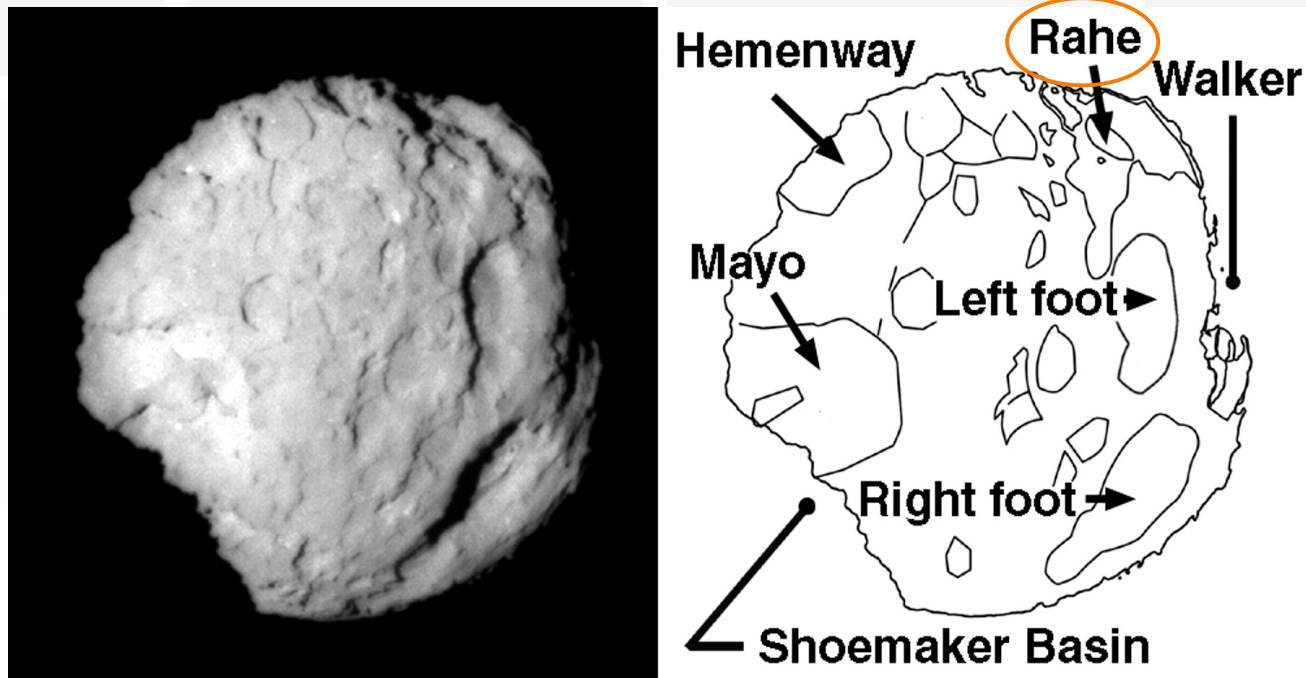
【本研究の最終的な目的】

形成されるクレーターのサイズや形状が、ターゲットの
物性にどのように依存しているかを実験的に研究すること
⇒ スケーリング則の構築

本研究で取り扱う衝突クレーター形成領域

クレーター形成がターゲットの強度に支配される(強度支配域)

小天体などの重力の小さな天体上に形成されるクレーター
室内実験などで強度の高いターゲットに形成される小さなクレーター



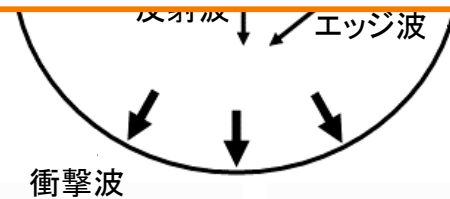
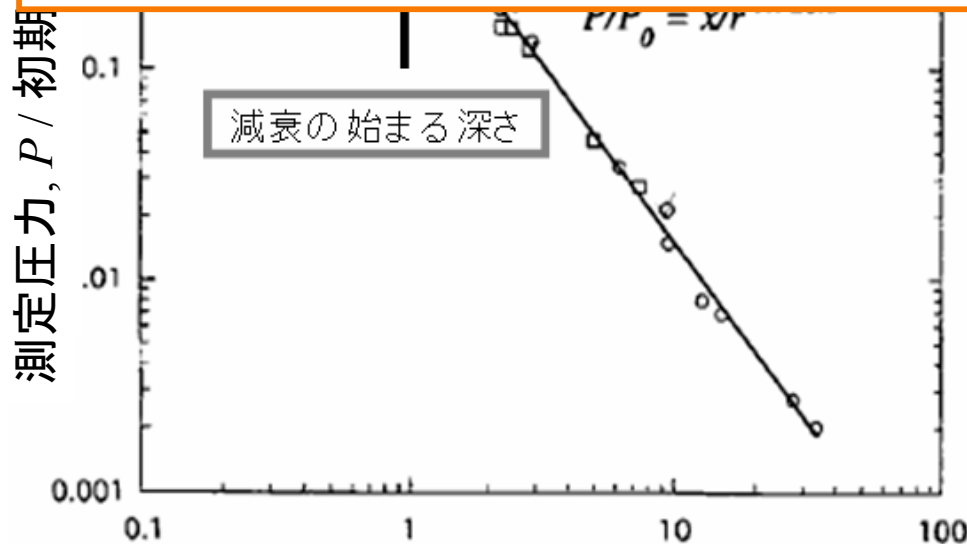
Wild2 (直径約5km, Brownlee et al., 2004)

衝撃波の伝播を考慮したスケーリング則

クレーターサイズは、破壊がどこまで進行するかで決まっている
 減衰しながら伝播する衝撃応力を記述してスケーリングできないか？
 ⇒伝播する衝撃圧力のプロファイルを知る必要がある



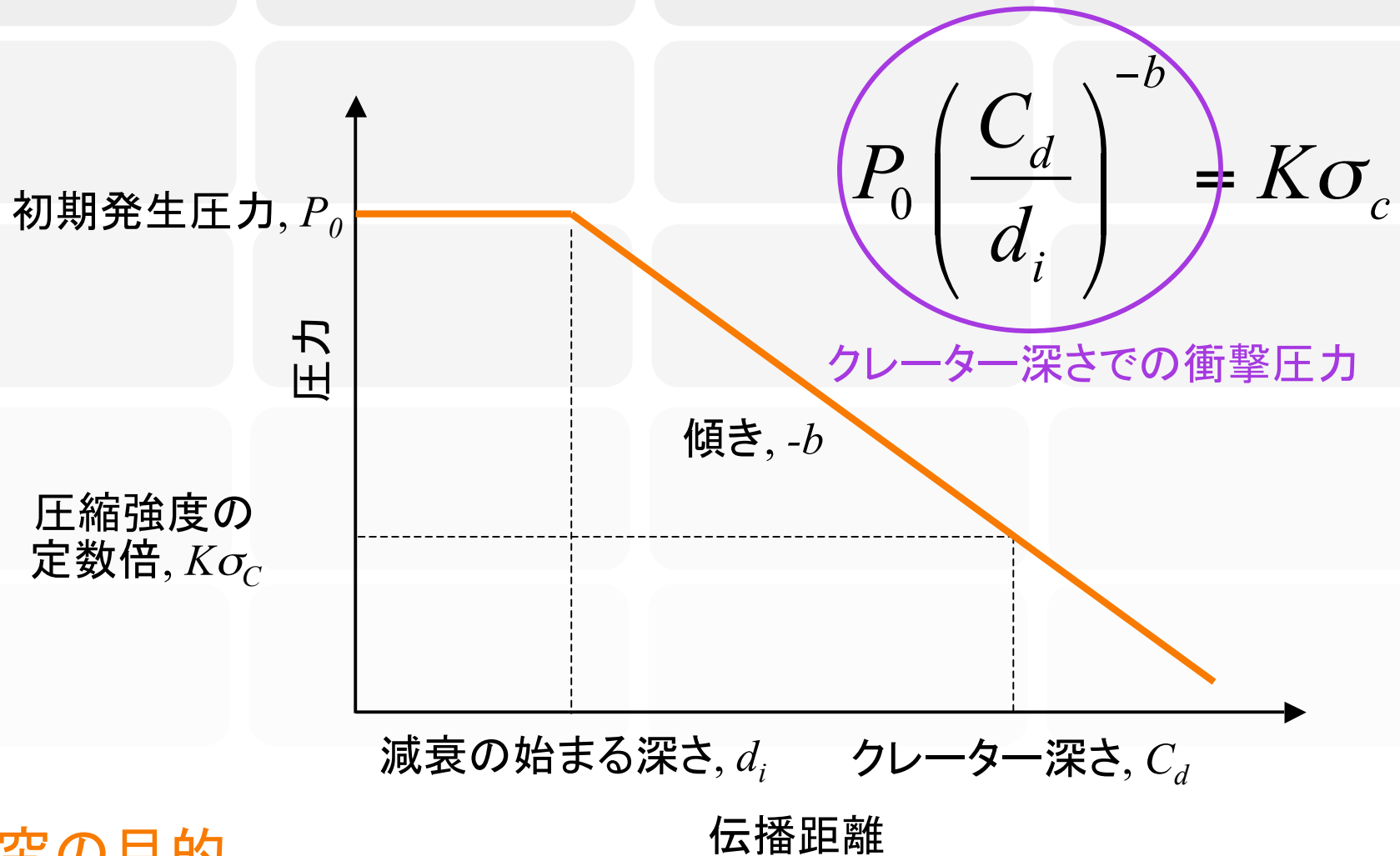
減衰の始まる深さはプロジェクトイル形状とターゲット物性に依存
 ターゲットとプロジェクトイルの密度比に依存(Melosh, 1989)



減衰の始まる深さは、希薄波が
 衝撃波に追いつく深さである
 (Nakazawa et al., 2002)

伝播距離, $x / \text{プロジェクトイル半径}, r$ (Nakazawa et al., 2002)

衝撃波の伝播とクレーター深さとの関係

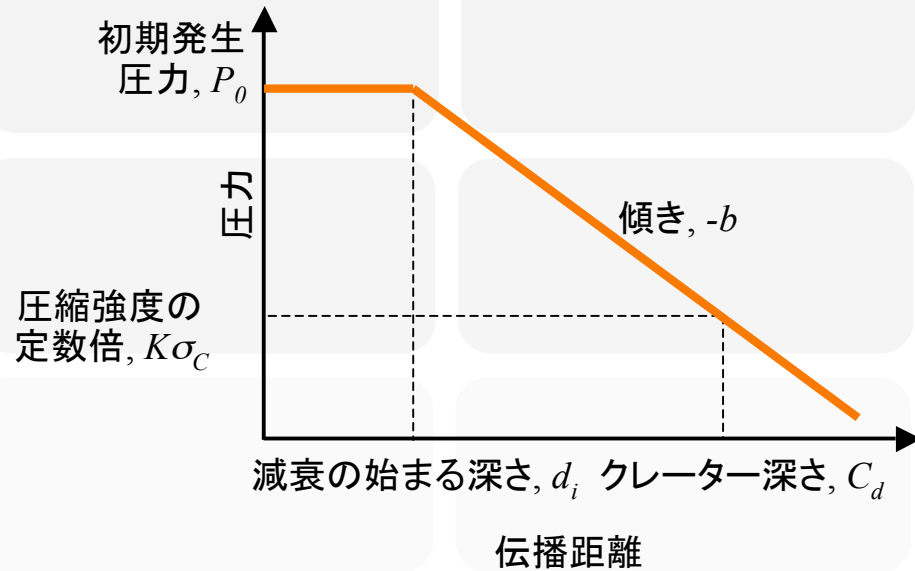


本研究の目的

クレーター深さがこのような簡単な式でスケーリングできるか？

⇒ できるようであるなら定数の決定

スケーリングのために



C_d : クレーター深さ
 b : 衝撃圧力減衰率
 d_i : 減衰の始まる深さ
 σ_c : 一軸圧縮強度
 P_0 : 初期発生圧力
 K : 定数

$$P_0 \left(\frac{C_d}{d_i} \right)^{-b} = K\sigma_c$$

衝撃圧力減衰率: 反対点放出速度より測定(瀬藤らと同様)

減衰の始まる深さ: 衝撃圧力減衰率を用いて見積もる

ターゲット

ソーダ石灰ガラス + ダナイト粉混合焼結体

ソーダ石灰ガラス
粒径: 62~53 μ m
軟化点: 734 $^{\circ}$ C

ダナイト(olivine: 90%)
粒径: 200~500 μ m

焼結: 固体粉体の集合体を軟化点(融点)以下で結合させること
本実験の温度と焼結時間では、ダナイトは焼結を起こさない

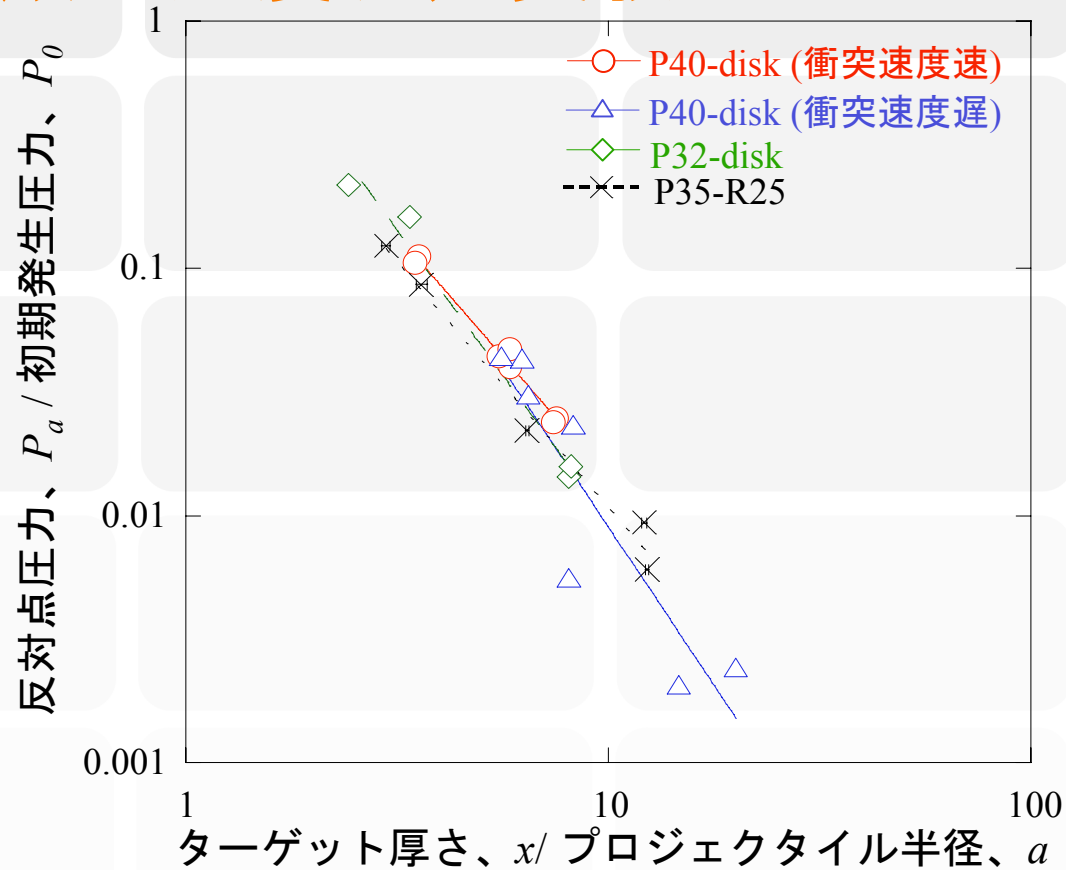
ターゲットタイプ	空隙率 (%)	岩石含有率 (%)	一軸圧縮強度 (MPa)	縦波音速 (m/s)
P40-disk	40.7 \pm 1.2	0		1900 \pm 160
P32-disk	~32	0	~41	3150 \pm 20
P35-R0	36.5 \pm 0.3	0	12.1 \pm 3.4	2180 \pm 30
P35-R12.5	34.3 \pm 1.0	12.5	15.3 \pm 6.3	1940 \pm 80
P35-R25	32.3 \pm 1.6	25	17.5 \pm 5.9	1960 \pm 150
P40-R0	40.3 \pm 1.8	0	1.91 \pm 0.51	1300 \pm 140

反対点放出速度実験用試料

クレーター形成実験用試料

両実験に用いられた試料

反対点放出速度測定実験



	衝撃圧力減衰率、 b	減衰の始まる深さ、 d_i
P40-disk (衝突速度速)	2.0±0.1	1.1±0.1 a
P40-disk (衝突速度遅)	2.6±0.5	1.6±1.2 a
P32-disk	2.3±0.2	1.4±0.4 a
P35-R25	2.0±0.1	1.0±0.1 a

衝突クレーター形成実験

実験: 宇宙科学研究本部

加速器: 二段式軽ガス銃(サボ使用)

プロジェクタイトル: ガラス球(直径3.2mm, 0.95mm) ($\delta=2.5\text{g/cm}^3$)

ステンレス球(直径1.6mm) ($\delta=7.78\text{g/cm}^3$)

アルミナ球(直径~1.2mm) ($\delta=3.7\text{g/cm}^3$)

ナイロン球(直径7mm) ($\delta=1.15\text{g/cm}^3$)

撮影速度: 31000 and 2000 frames/s

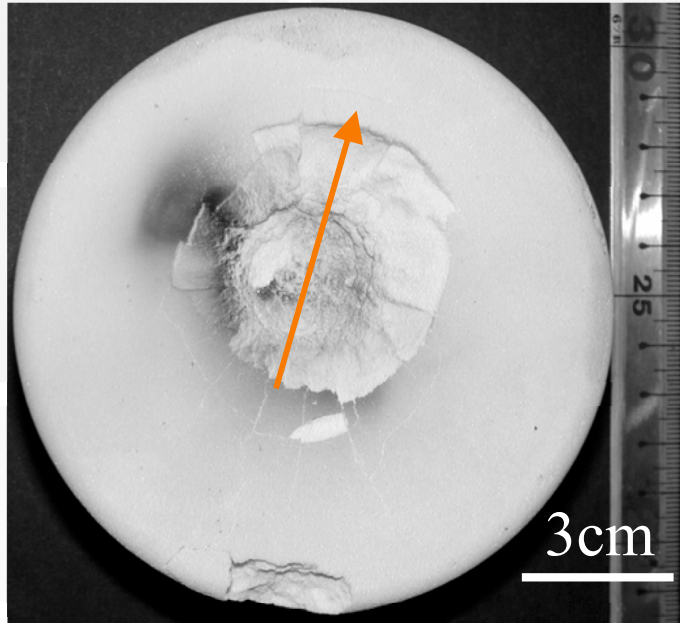
ターゲットタイプ	空隙率 (%)	一軸圧縮強度 (MPa)	衝突速度 (m/s)	プロジェクタイトル
P32-disk	~32	~41	1900, 2120	ナイロン
P35-R0	36.5±0.3	12.1±3.4	2810~3160	ガラス、ステンレス
P35-R12.5	34.3±1.0	15.3±6.3	2510~3530	ガラス、ステンレス
P35-R25	32.3±1.6	17.5±5.9	2510~3190	ガラス、ステンレス
P40-R0	40.3±1.8	1.91±0.51	2940~3300	ガラス、アルミナ

結果

クレーター深さはレーザー高度計にて測定

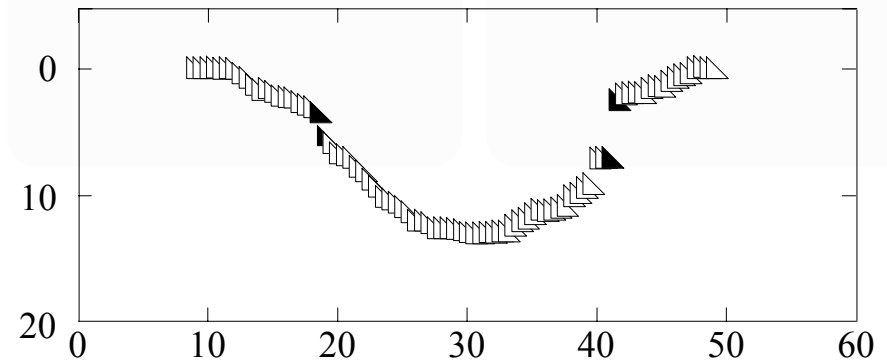
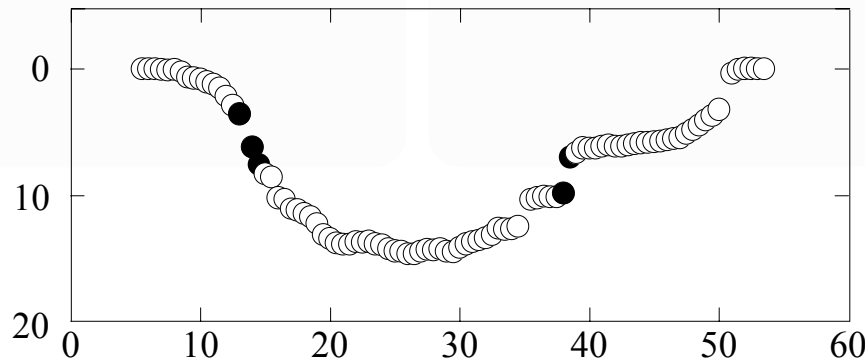
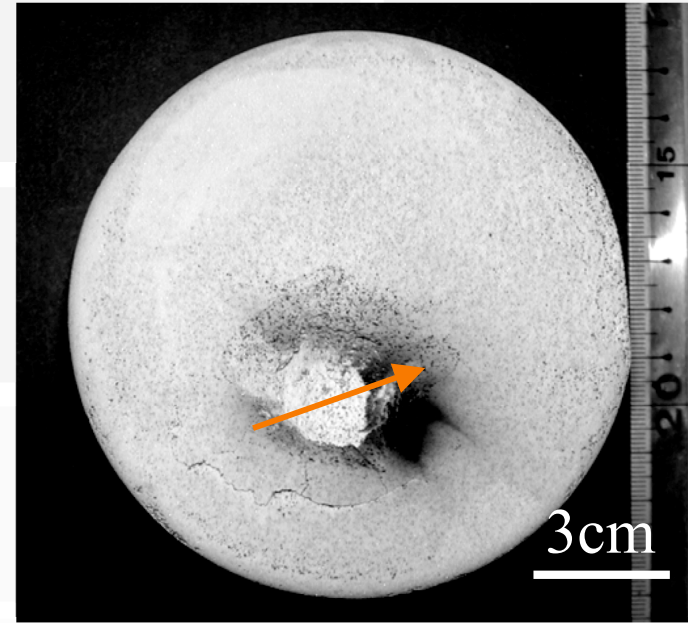
P35-R0

衝突速度:2940m/s



P35-R25

衝突速度:3190m/s

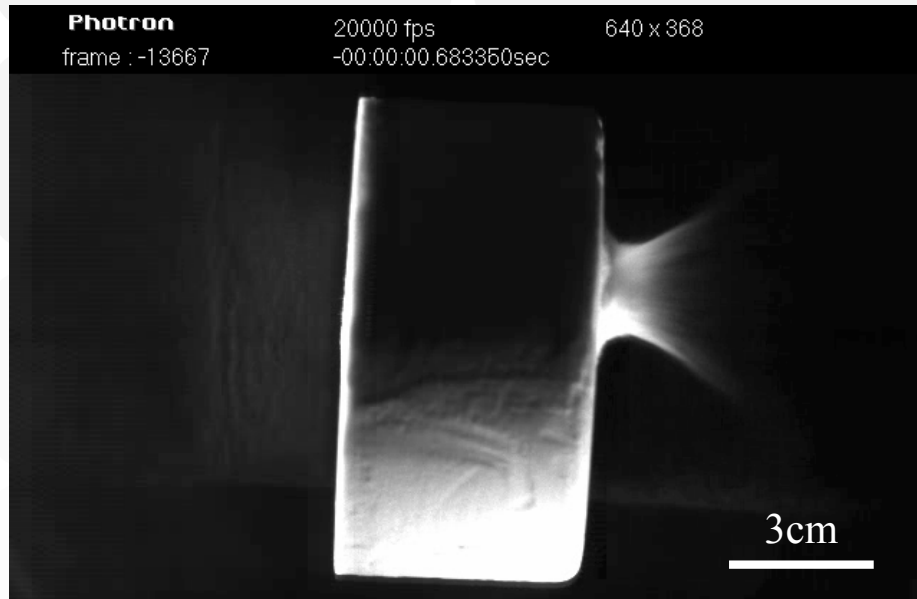


単位 (mm) (0.5mmピッチ、エラーはシンボルより小さい)

プロジェクタイル: ガラス球 (3.2mm)

減衰の始まる深さの推定

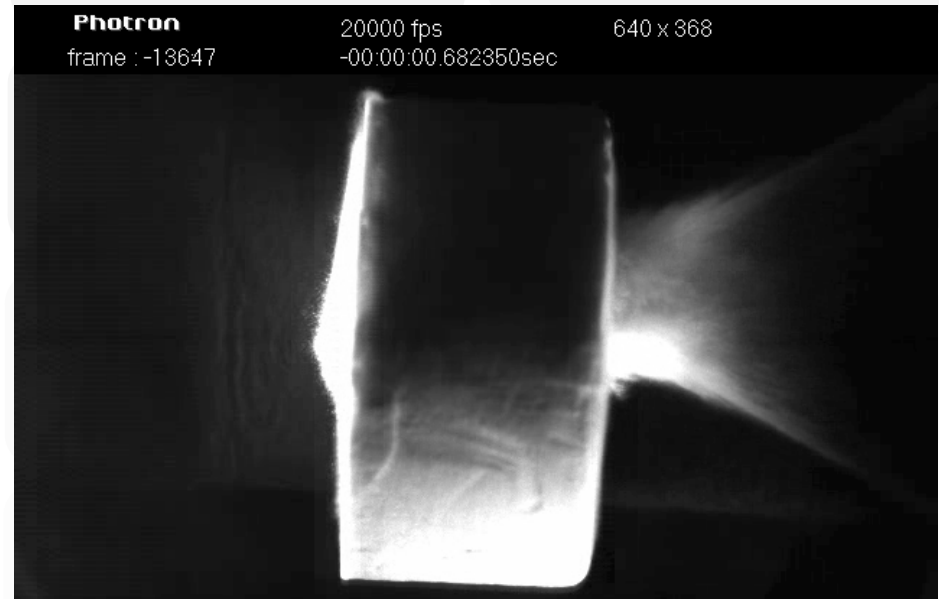
衝突クレーター形成実験には異なる物質がプロジェクトイルとして用いられている
⇒ 各物質に対して減衰の始まる深さを見積もる必要がある



協力: Photron

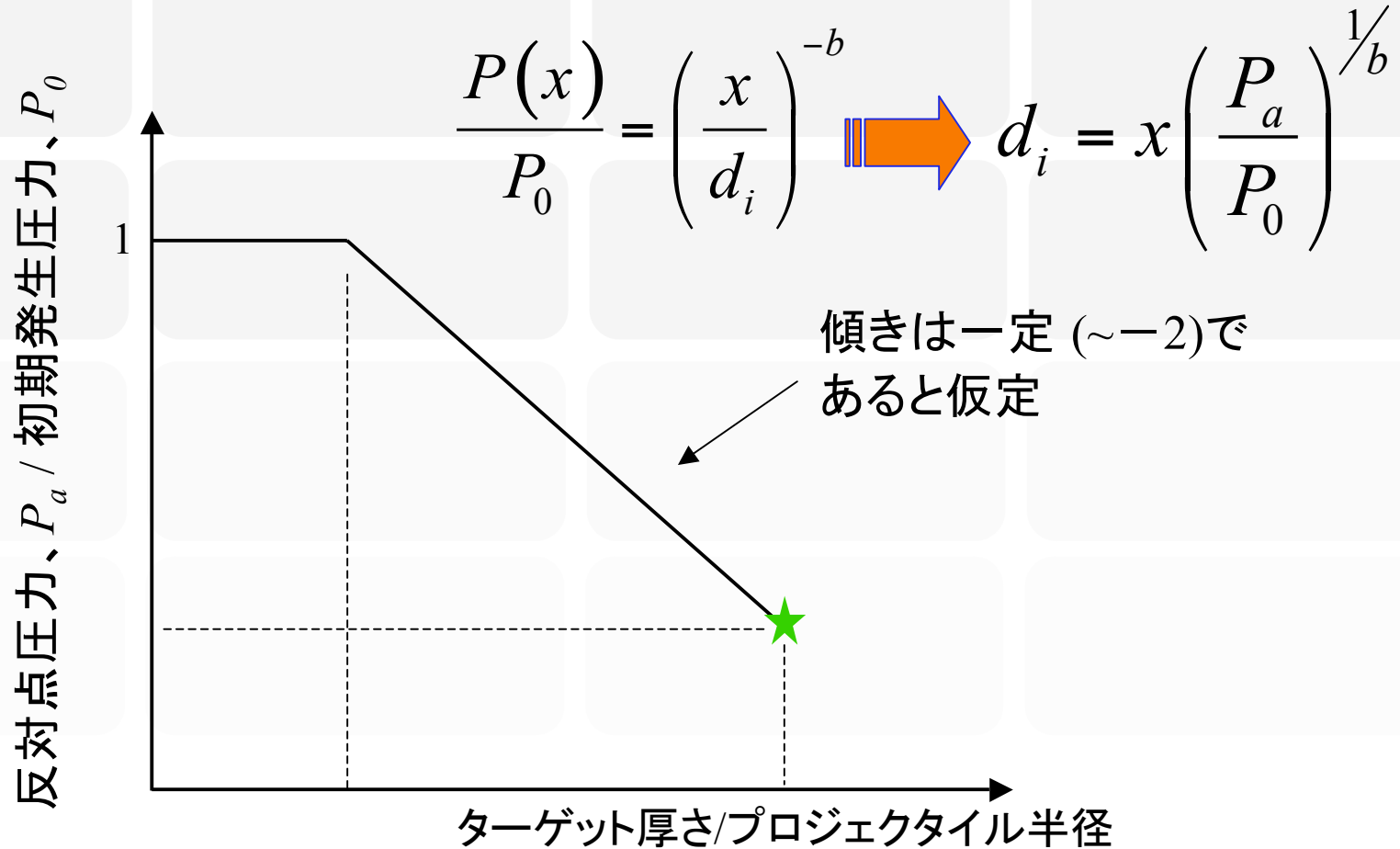


1msec後



ターゲット: P40-R0
プロジェクトイル: アルミナ球 (直径1.16mm)
衝突速度: 3.46km/s

減衰の始まる深さの推定



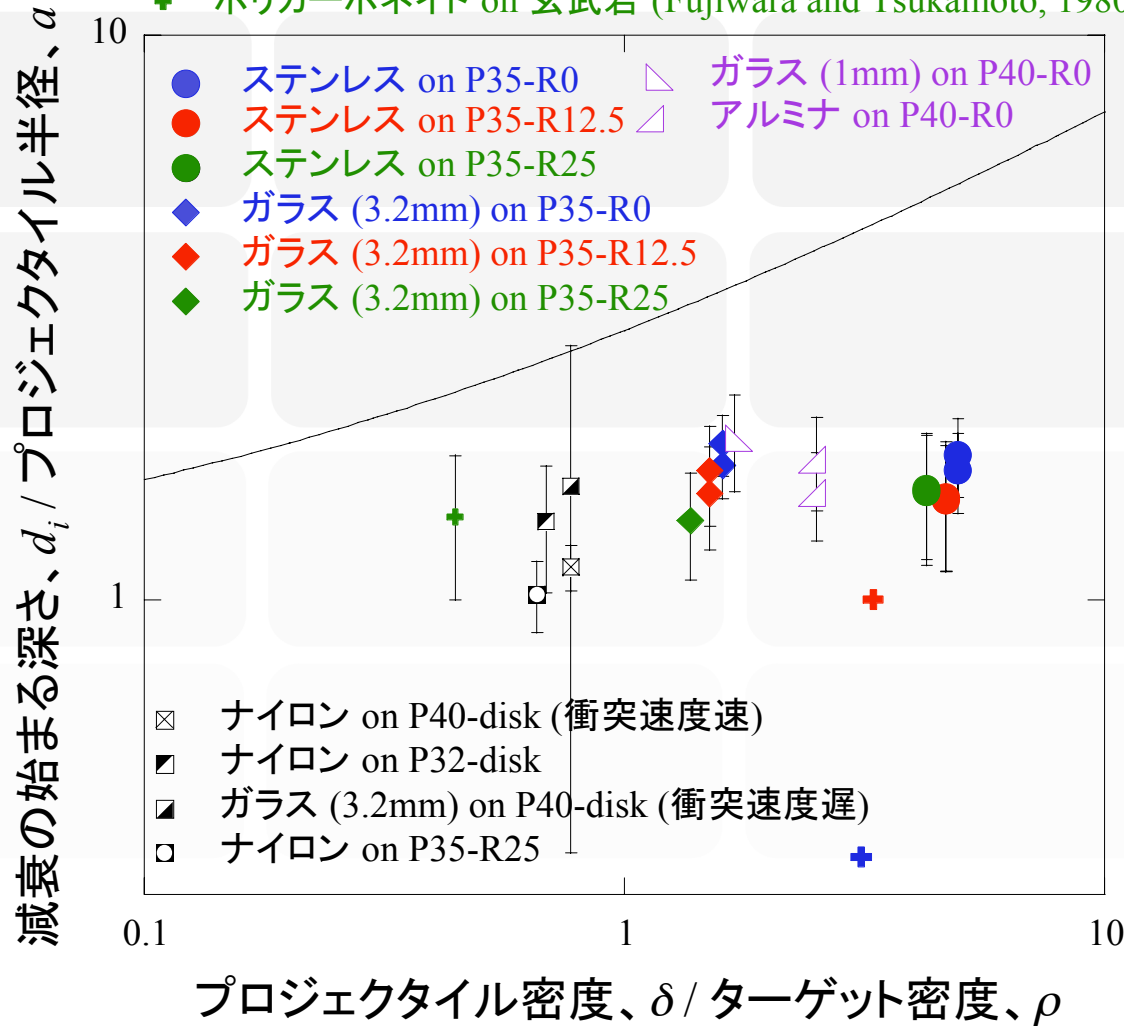
減衰の始まる深さ

伝播距離、 x / プロジェクトイル半径、 a

結果

- + アルミニウム on 氷 (Kato et al., 2001)
- + 銅 on 玄武岩 (Nakazawa et al., 2002)
- + ポリカーボネイト on 玄武岩 (Fujiwara and Tsukamoto, 1980)

P35 - R0
(空隙率) (岩石含有率)



数値計算、爆発実験より

$$d_i \approx 2a \left(\frac{\delta}{\rho} \right)^{1/2} + a$$

(Melosh, 1984)

● 玄武岩の様な密な物質ではプロジェクタイル密度には依存しない

⇒ 減衰の始まる深さは希薄波が衝撃波に追いつく深さにのみ依存

● ガラスビーズ粒子自体は強度が高く、空隙率40%はほぼ最密充填に等しい

⇒ 減衰の始まる深さは、密度比にのみ支配されているわけではない

スケーリング

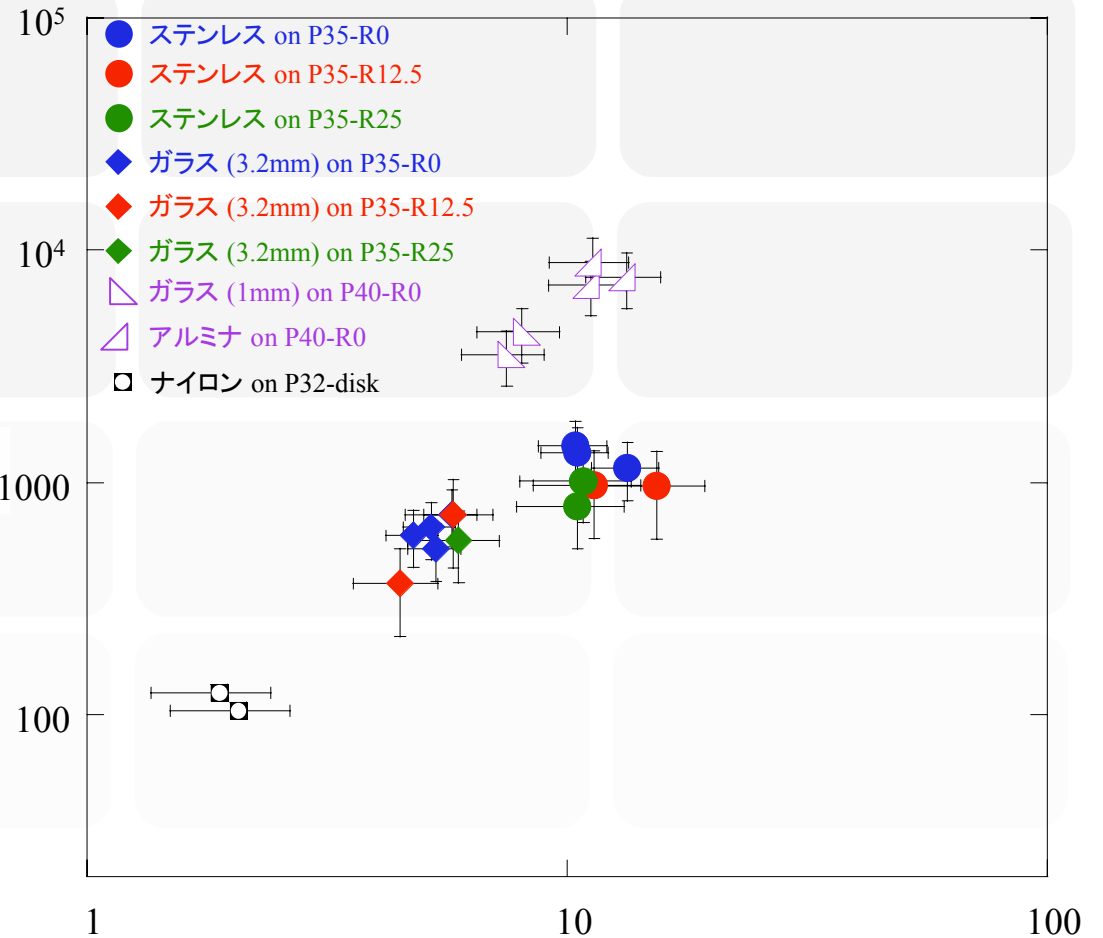
C_d : クレーター深さ
 b : 衝撃圧力減衰率
 d_i : 減衰の始まる深さ
 σ_c : 一軸圧縮強度
 P_0 : 初期発生圧力
 K : 定数

$$P_0 \left(\frac{C_d}{d_i} \right)^{-b} = K \sigma_c$$



$$\frac{P_0}{\sigma_c} = K \left(\frac{C_d}{d_i} \right)^b$$

$$\frac{P_0}{\sigma_c}$$



$$\frac{C_d}{d_i}$$

P35 - R0
 (空隙率) (岩石含有率)

スケーリング

C_d : クレーター深さ σ_c : 一軸圧縮強度
 b : 衝撃圧力減衰率 P_0 : 初期発生圧力
 d_i : 減衰の始まる深さ K : 定数

ガラスビーズ焼結体を用いた
先行研究のプロジェクト

Love et al. (1993):

直径1.6mmのガラス球

Michikami et al.(2007):

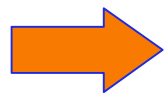
直径~1mmのアルミナ球

$$\frac{P_0}{\sigma_c} = K \left(\frac{C_d}{d_i} \right)^b$$

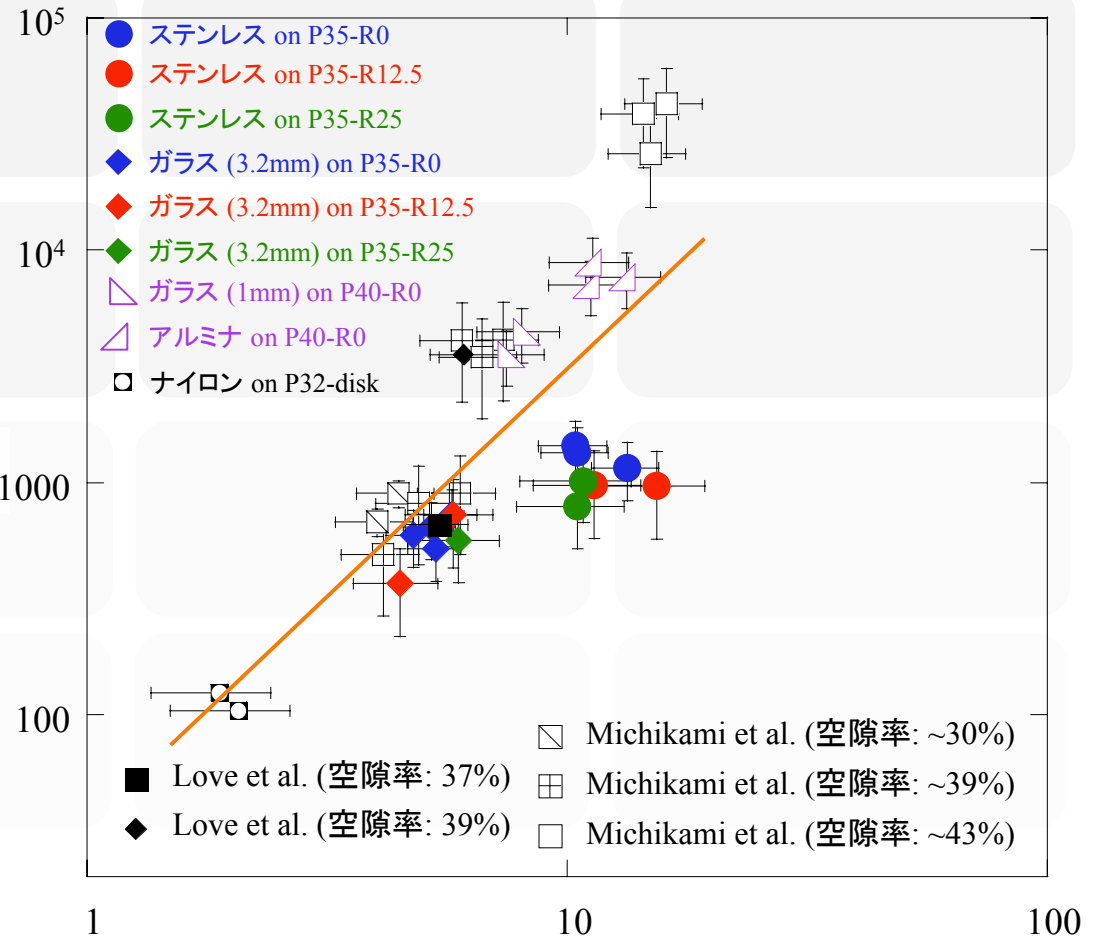
$$P_0 \propto \sigma_c$$

全プロットに対する近似曲線

$$\frac{P_0}{\sigma_c} = 31 \pm 20 \left(\frac{C_d}{d_i} \right)^{2.0 \pm 0.3}$$



スケーリングできているようにも見えるが
ばらつきが大きい



$$\frac{C_d}{d_i}$$

P35 - R0
 (空隙率) (岩石含有率)

まとめ

ガラスビーズ岩石混合焼結体へのクレーター形成実験、及び衝撃圧力減衰率の測定実験を行った

● 衝撃圧力減衰率は、本実験の空隙率の範囲、及び岩石含有率には依存しない

● 減衰の始まる深さは、ターゲットとプロジェクティル密度比にのみ支配されているわけではない

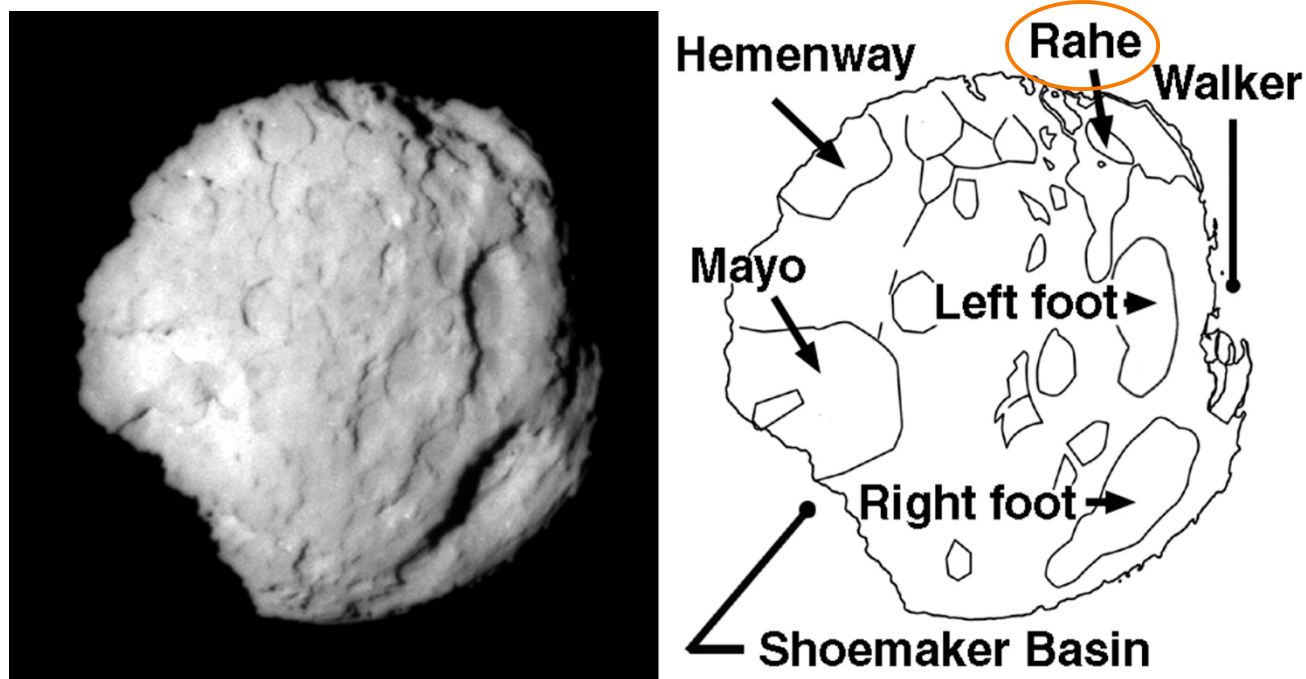
● クレーター深さは、減衰の始まる深さをを用いてスケーリングできそうである ⇒ ばらつきが大きいようにも見える

➡ クレーター深さは、ターゲット内を伝播する応力の最大値と強度との関係のみで決まっているわけではないのかもしれない

クレーターのスケーリング則について

クレーターのサイズ \Rightarrow プロジェクタイトルのサイズを推測する際に、**スケーリング則**が必要となる

これまでよく用いられてきたスケーリング則として、 **π スケーリング**という方法がある (Holsapple, 1993)



Wild2 (直径: 約5km, Brownlee et al., 2004)

氷に関する考察

純氷中の衝撃圧力減衰率測定実験
(Kato et al., 2001)

$$\Rightarrow b = 0.89$$

$$\Rightarrow d_i \sim 0.35 \cdot \text{プロジェクタイトル半径}$$

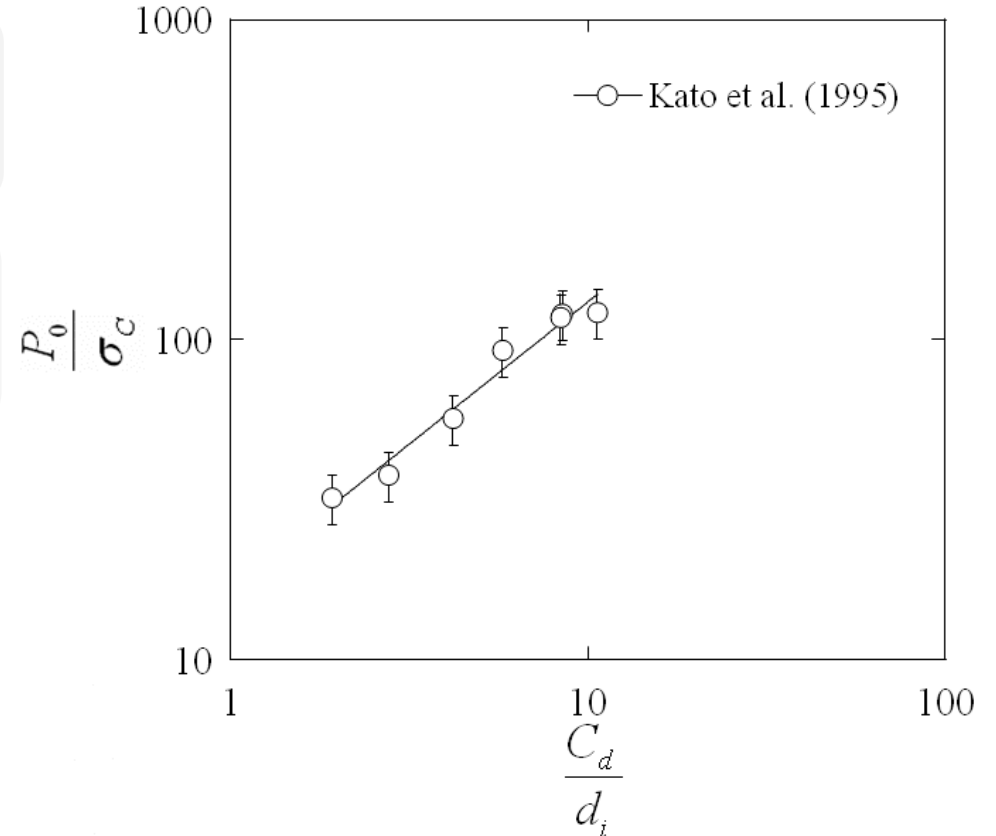
純氷へのクレーター形成実験
 \Rightarrow Kato et al. (1995)

両者は同じアルミニウム円柱をプロ
ジェクタイトルとして用いている

$$P_0 \left(\frac{C_d}{d_i} \right)^{-b} = K \sigma_c \quad \Rightarrow \quad \frac{P_0}{\sigma_c} = K \left(\frac{C_d}{d_i} \right)^b$$

$$\Rightarrow P_0 \left(\frac{C_d}{d_i} \right)^{-0.89 \pm 0.07} = 17 \pm 2 \sigma_c$$

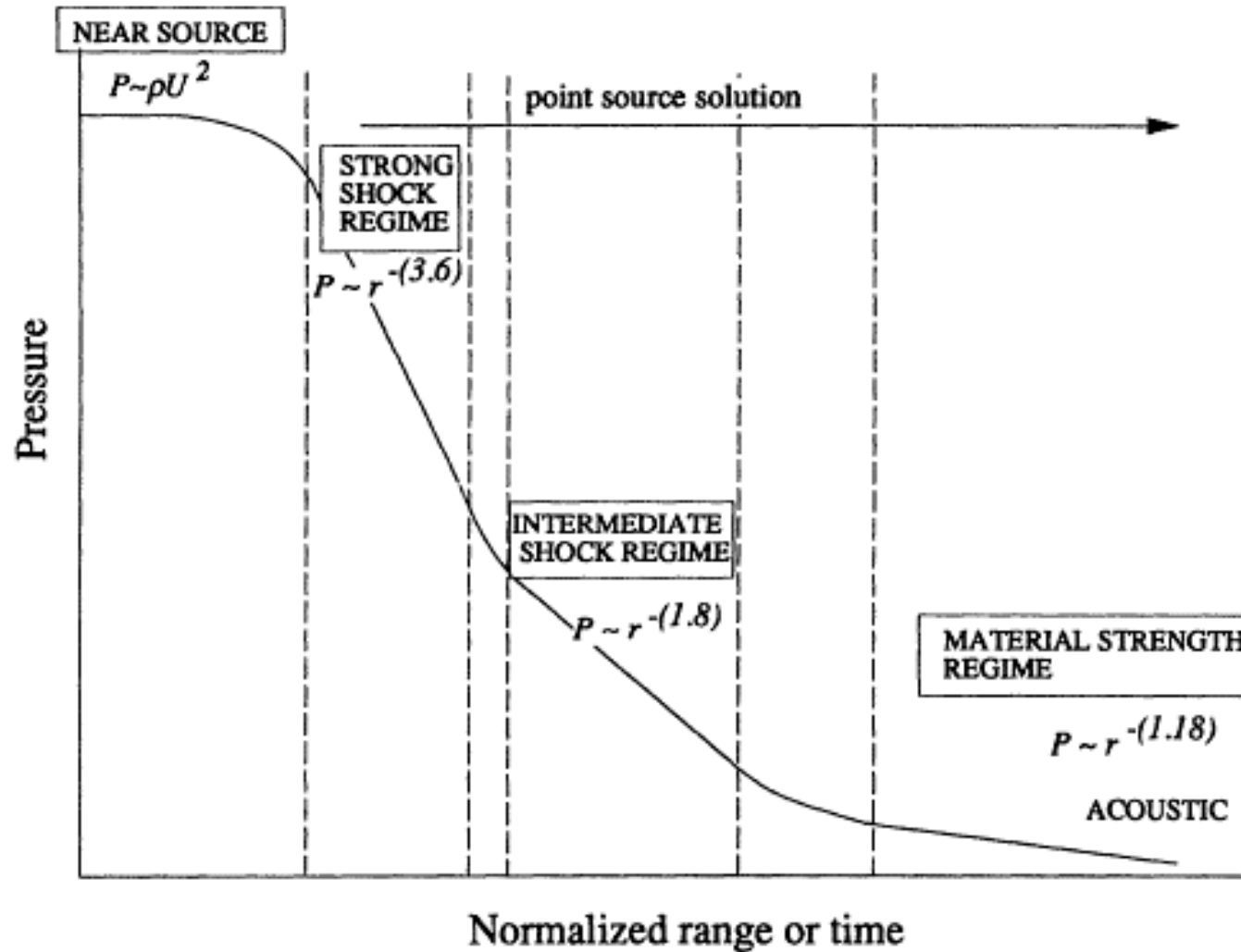
C_d : クレーター深さ
 b : 衝撃圧力減衰率
 d_i : 減衰の始まる深さ
 σ_c : 一軸圧縮強度
 P_0 : 初期発生圧力
 K : 定数



- クレーターの深さは、ターゲットの一軸圧縮強度の17倍程度で決まっている
- 異なるプロジェクタイトル(純氷等)を用いた場合はうまくスケールリングできない

点源から伝播する衝撃波

Holsapple (1993)

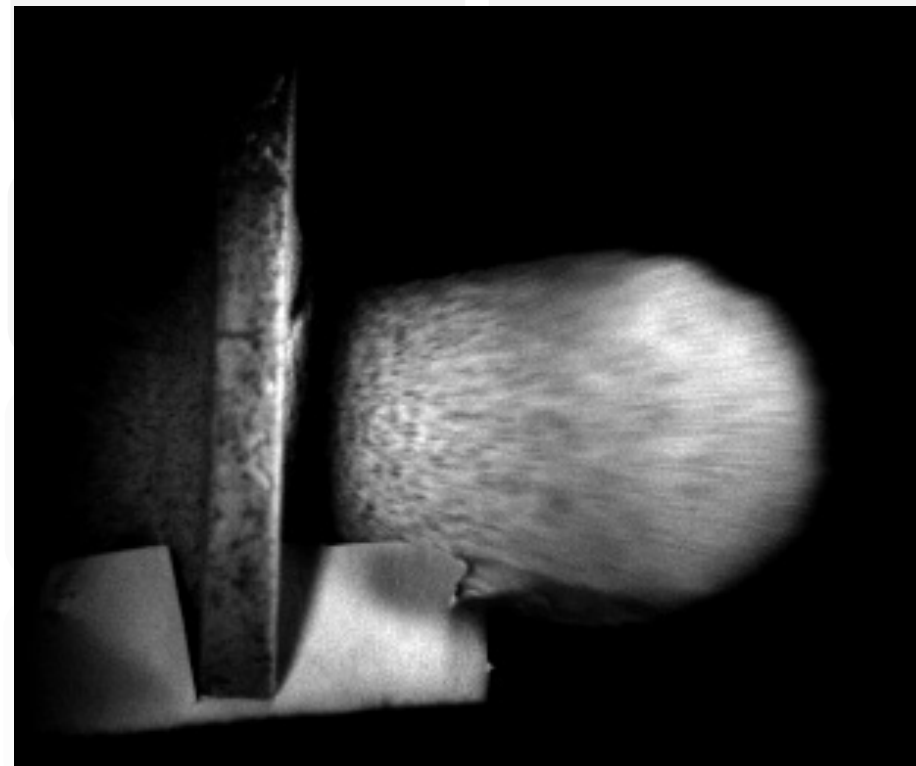
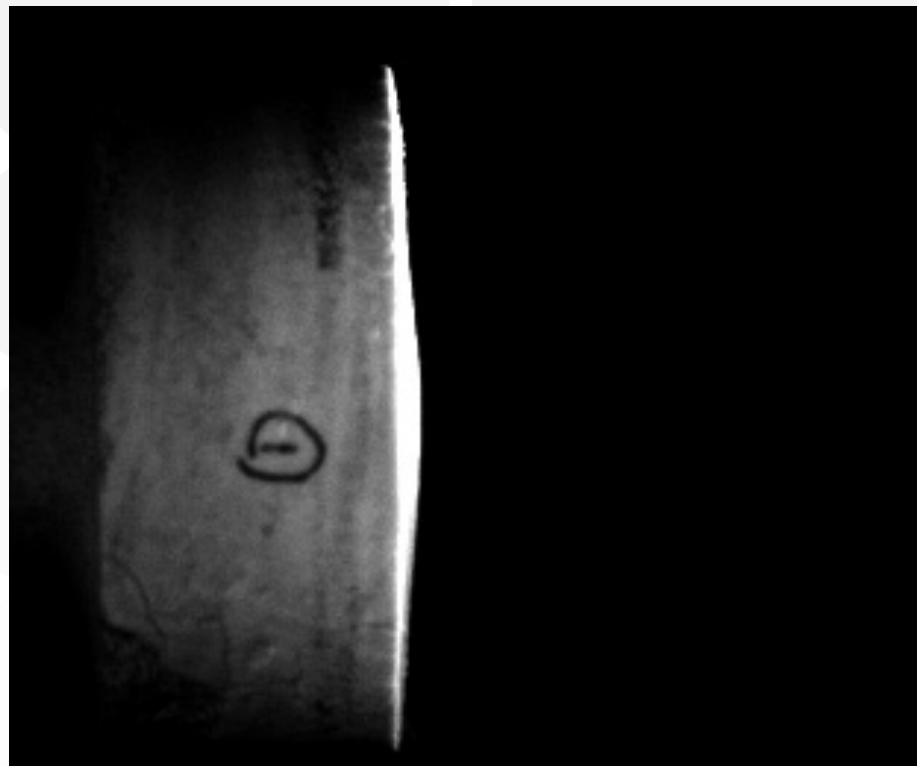


圧力…幾何学的効果、希薄波、エネルギー散逸等により減衰しながら伝播

反対点放出速度測定実験

衝突速度: 2250m/s
ターゲット厚さ: 43mm

衝突速度: 2300m/s
ターゲット厚さ: 10mm



3cm

衝突方向

衝突から7コマ目

ターゲット: P35-R25
プロジェクティル: 7mm ナイロン
撮影速度: 31000frames/s

氷に関する考察

C_d : クレーター深さ	σ_c : 一軸圧縮強度
b : 衝撃圧力減衰率	P_0 : 初期発生圧力
d_i : 減衰の始まる深さ	K : 定数

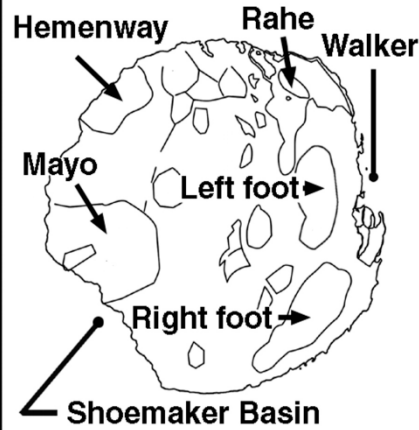
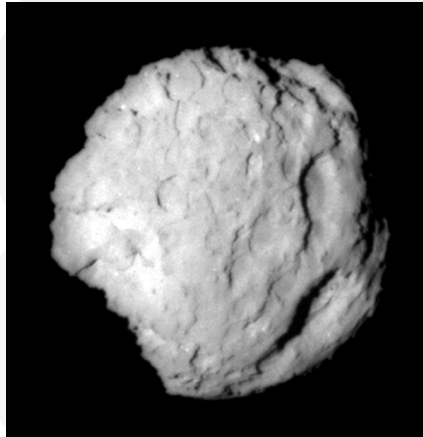
異なるプロジェクティルを用いた場合は？

プロジェクティルに原因があるのか？

それとも、減衰の始まる深さの違いか？

減衰の始まる深さ: Meloshではこういわれている

Wild2彗星上のクレーター深さをを用いた推測



Wild2 (Brownlee et al., 2004)

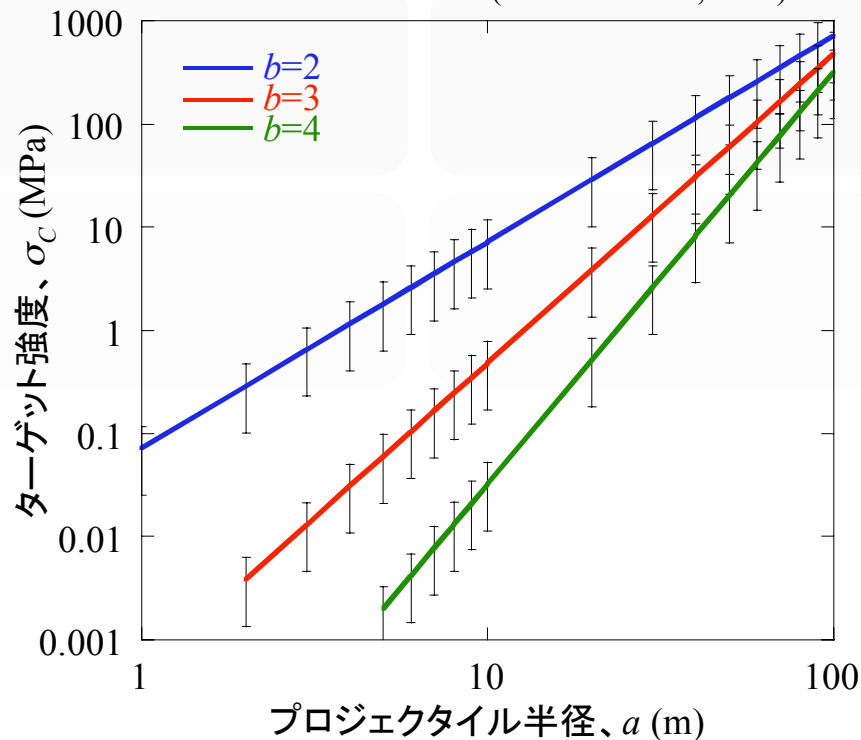
Raheクレーター: 深さ ~ 300m

Wild2彗星: 空隙率 < 30 ~ 60% → 40%と仮定

構成物: 氷岩石混合体 (岩石含有率25%)

衝突速度: 10km/s

プロジェクティル: 玄武岩(空隙率約4~8%)と仮定



初期発生圧力: $P_0 \sim 55\text{GPa}$

減衰の始まる深さ: $d_i \sim 2a$

衝撃圧力減衰率: $b = 2\sim 4$ に変化させる

$$\frac{P_0}{\sigma_c} = 31 \pm 20 \left(\frac{C_d}{d_i} \right)^b$$

反対点放出速度測定実験

実験: 宇宙科学研究本部、神戸大学

加速器: 二段式軽ガス銃、ガス銃

プロジェクタイトル: ナイロン球(直径7mm) ($\delta=1.15\text{g/cm}^3$)

ガラス球(直径3.2mm) ($\delta=2.5\text{g/cm}^3$)

衝突速度: 1.7~3.4km/s、約250m/s

撮影速度: 63000 or 31000 frames/s、2000frames/s

画像上の移動速度を測定することにより放出速度を測定

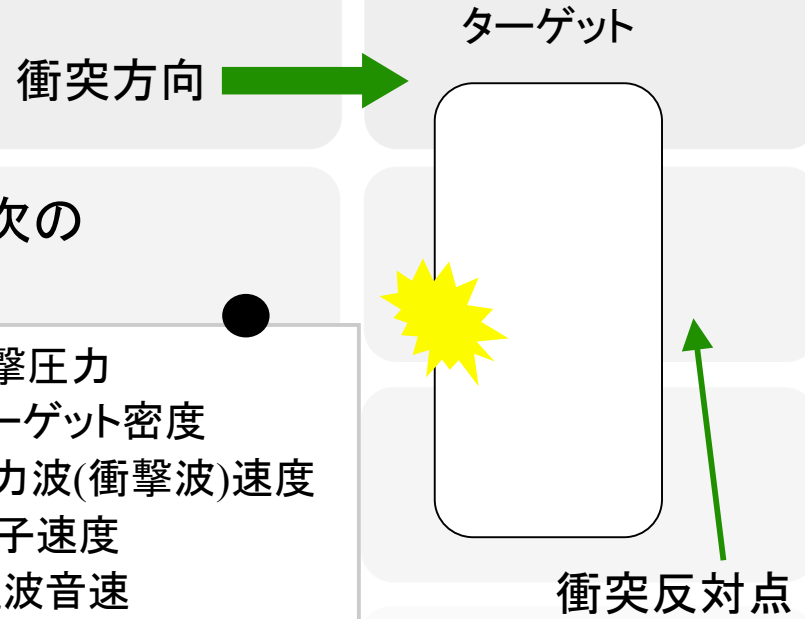
ターゲットタイプ	空隙率 (%)	衝突速度 (m/s)	ターゲット厚さ (mm)
P40-disk	40.7±1.2	1700~2080	12~16
P40-disk	40.7±1.2	~250	10~32
P32-disk	~32	1900~3390	8~29
P35-R25	32.3±1.6	2250~2630	10~43

反対点圧力を見積もる

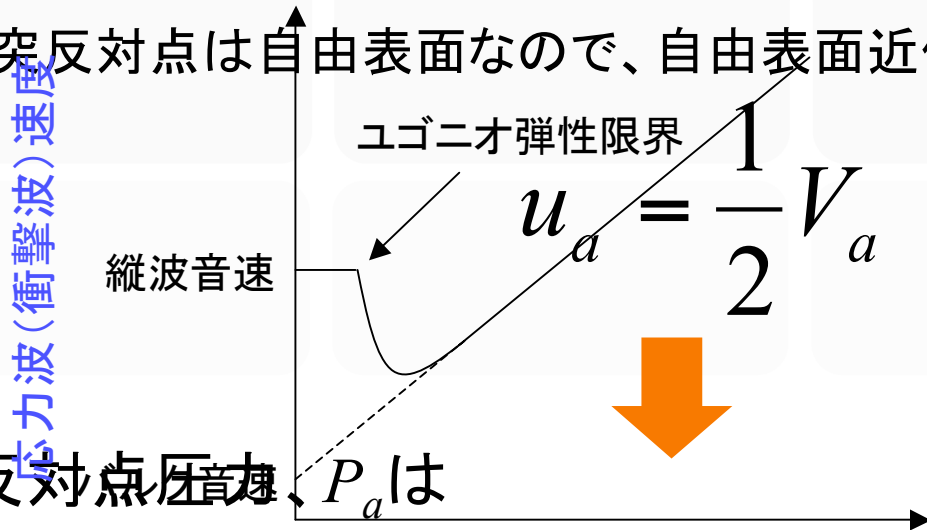
発生圧力が非常に小さい場合、衝撃圧力は次のように近似される

$$P = \rho U u_p \sim \rho C_L u_p$$

P : 衝撃圧力
 ρ : ターゲット密度
 U : 応力波(衝撃波)速度
 u_p : 粒子速度
 C_L : 縦波音速



衝突反対点は自由表面なので、自由表面近似より、

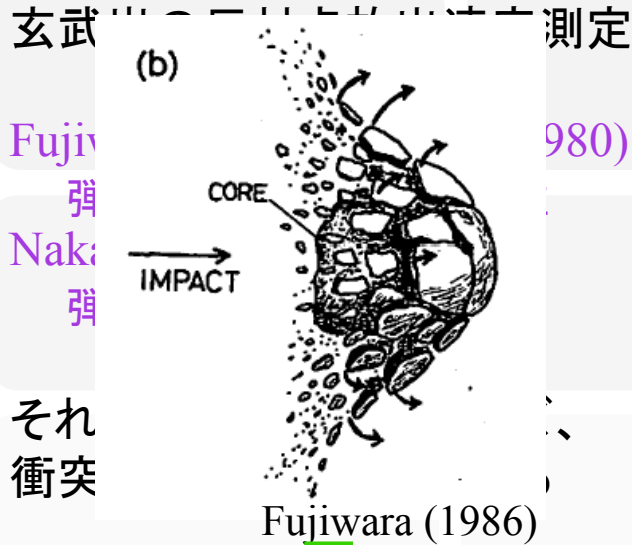


u_a : ユゴニオ弾性限界の粒子速度
 V_a : 反対点放出速度 $\sim 150\text{m/s}$
 (Kato et al., 2001)
 ソーダライムガラス...6~10GPa
 $(u_p \sim 700\text{m/s})$
 (Bourne et al., 1995)

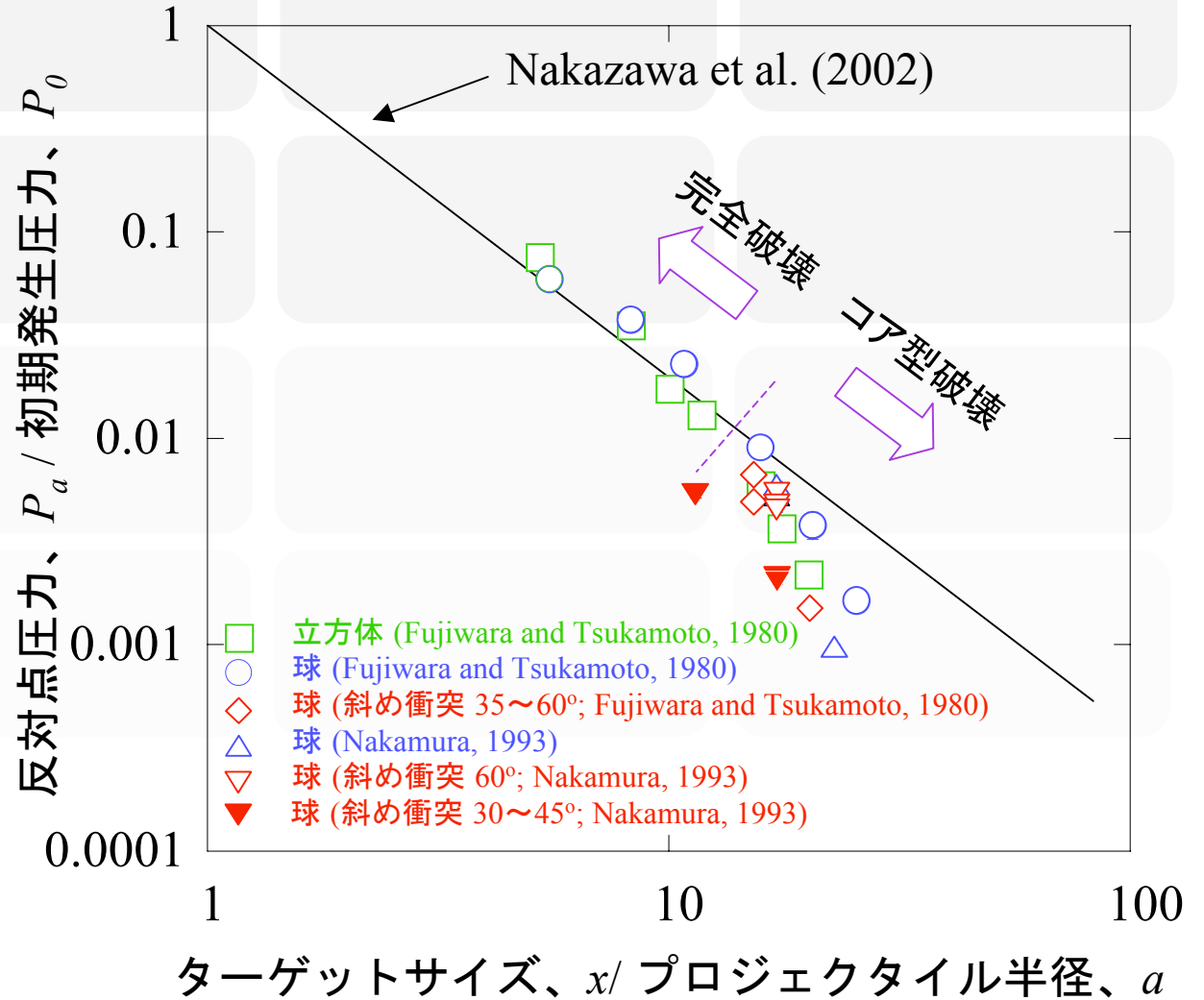
$$P_a = \rho C_L V_a / 2$$

ユゴニオ弾性限界...固体が塑性変形を開始し、流体のように振舞いだす圧力

反対点放出速度より衝撃圧力減衰率を見積もる

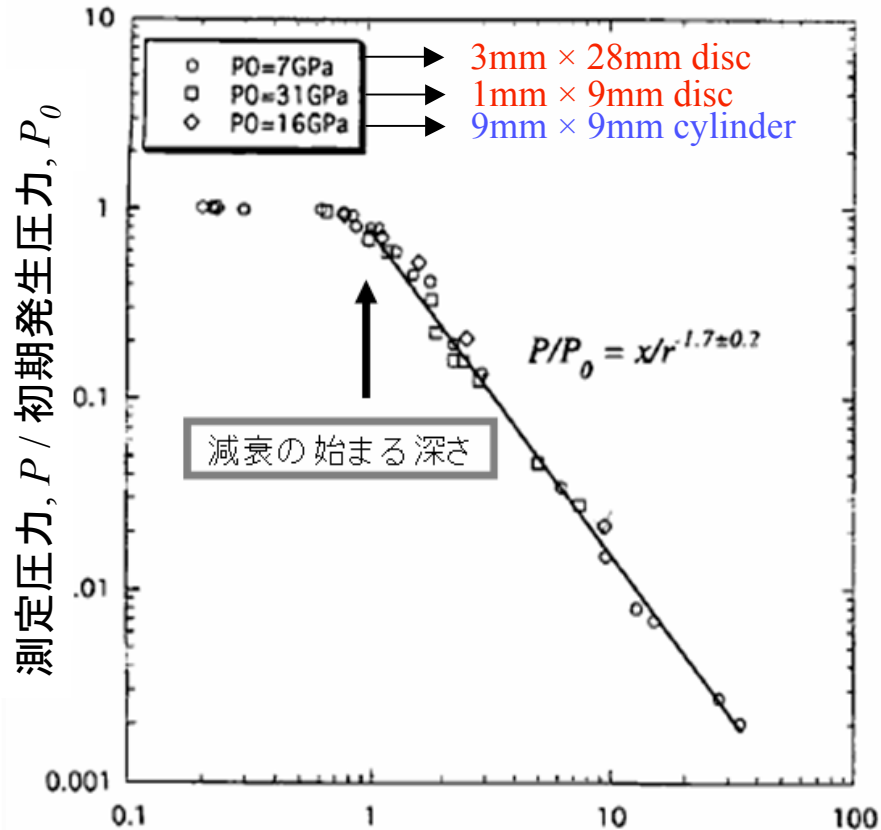


- ・反対点放出速度より衝撃圧力減衰率を見積もる際には注意が必要
- ・放出速度の衝突角度への依存が示唆される

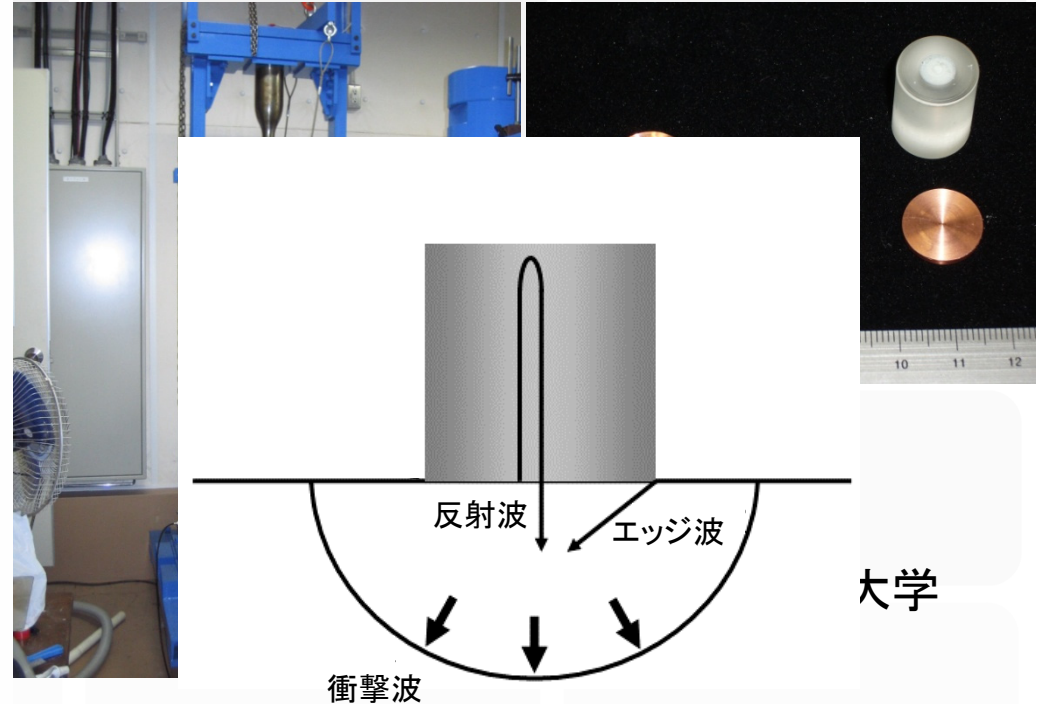


玄武岩へのクレーター形成実験

厚さ (mm)	25	15	1.7
重さ (g)	38	22	2.6 + 4.3

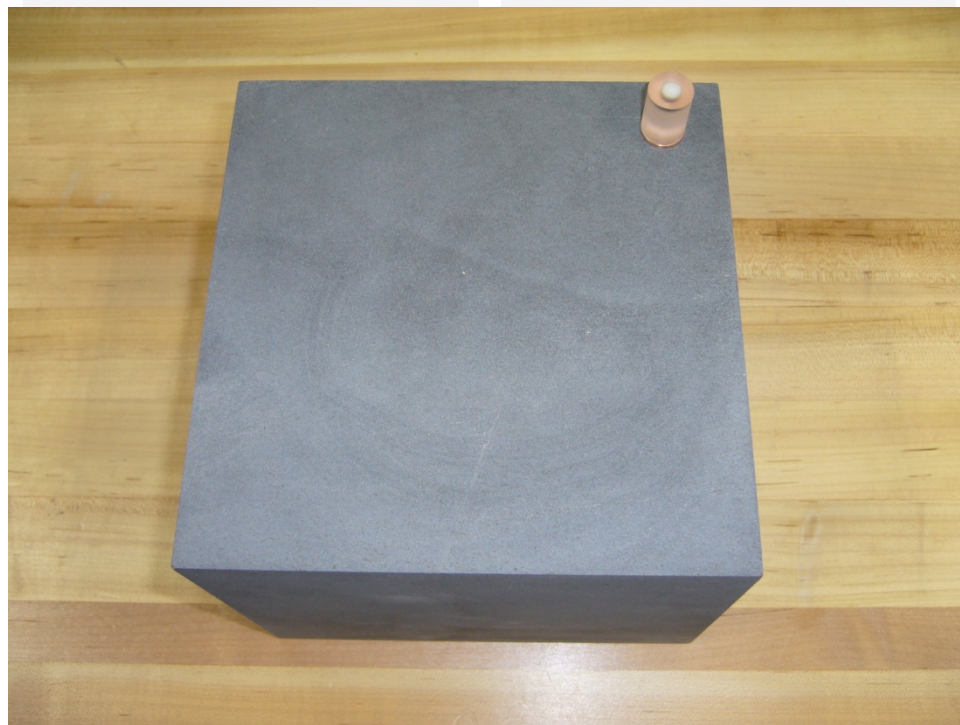


(Nakazawa et al., 2002)

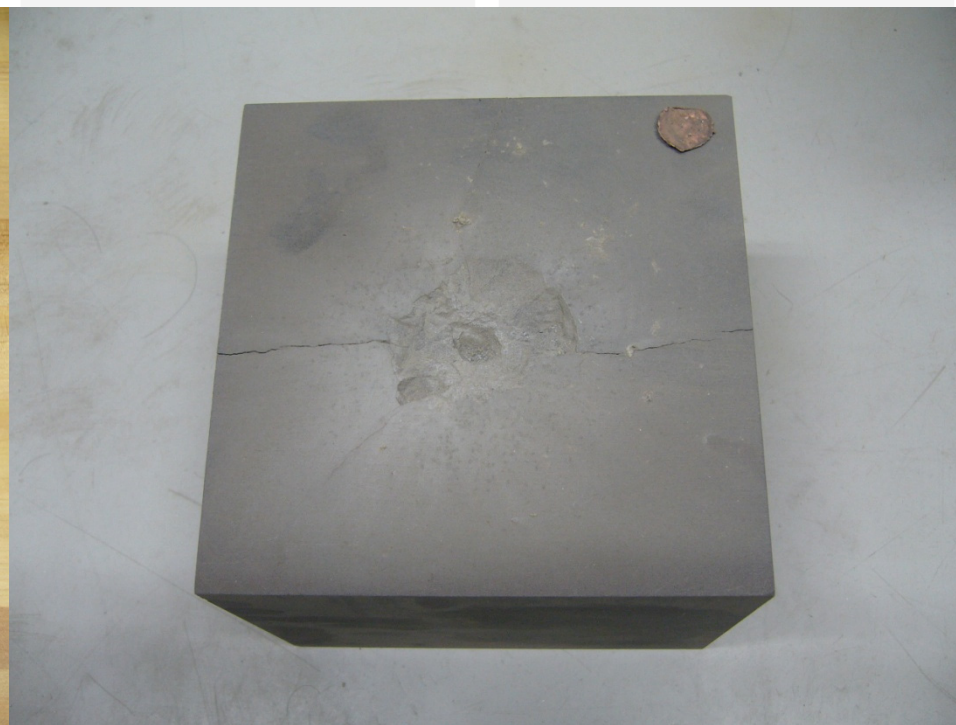


➡ クレーター深さはこれらのプロジェタイルの違いに依存していないかどうか？

玄武岩へのクレーター形成実験



城之崎玄武岩 (圧縮強度=220MPa)



プロジェクティル: disc
衝突速度: ~800m/s
クレーター深さ: 1.25cm
クレーター直径: 5.3 ± 1.0 cm

玄武岩へのクレーター形成実験

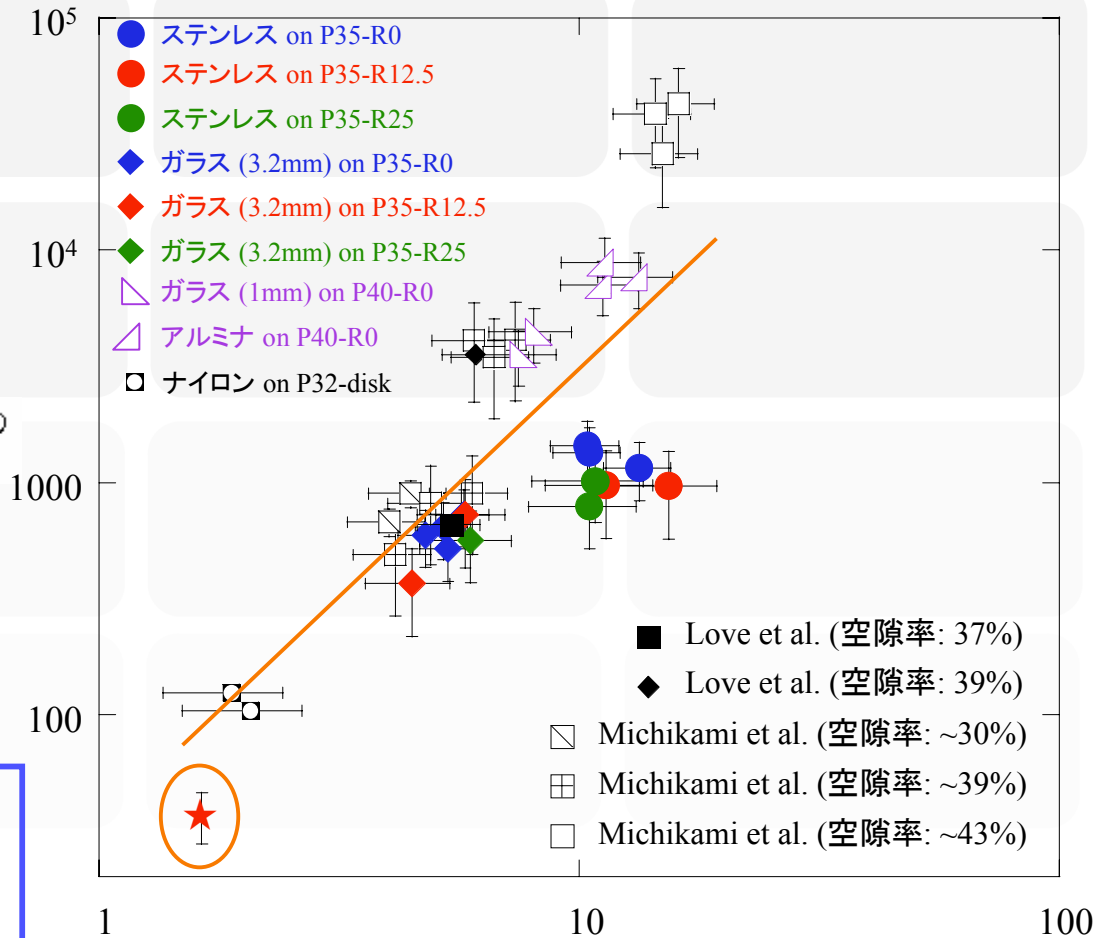
C_d : クレーター深さ σ_c : 一軸圧縮強度
 b : 衝撃圧力減衰率 P_0 : 初期発生圧力
 d_i : 減衰の始まる深さ K : 定数

ガラスビーズ:

$$\frac{P_0}{\sigma_c} = 31 \pm 20 \left(\frac{C_d}{d_i} \right)^{2.0 \pm 0.3}$$

玄武岩:

$$\frac{P_0}{\sigma_c} = 15 \pm 4 \left(\frac{C_d}{d_i} \right)^{1.7 \pm 0.2}$$



より厚いプロジェクトイルを用いた場合、同様の経験式で記述できないとすれば、その原因は現在考慮していないような効果の影響か？

$$\frac{C_d}{d_i}$$

P35 - R0
 (空隙率) (岩石含有率)

今後

●空隙率の高いターゲットに衝突する場合、減衰の始まる深さと衝撃圧力減衰率を支配している物理は何なのか？

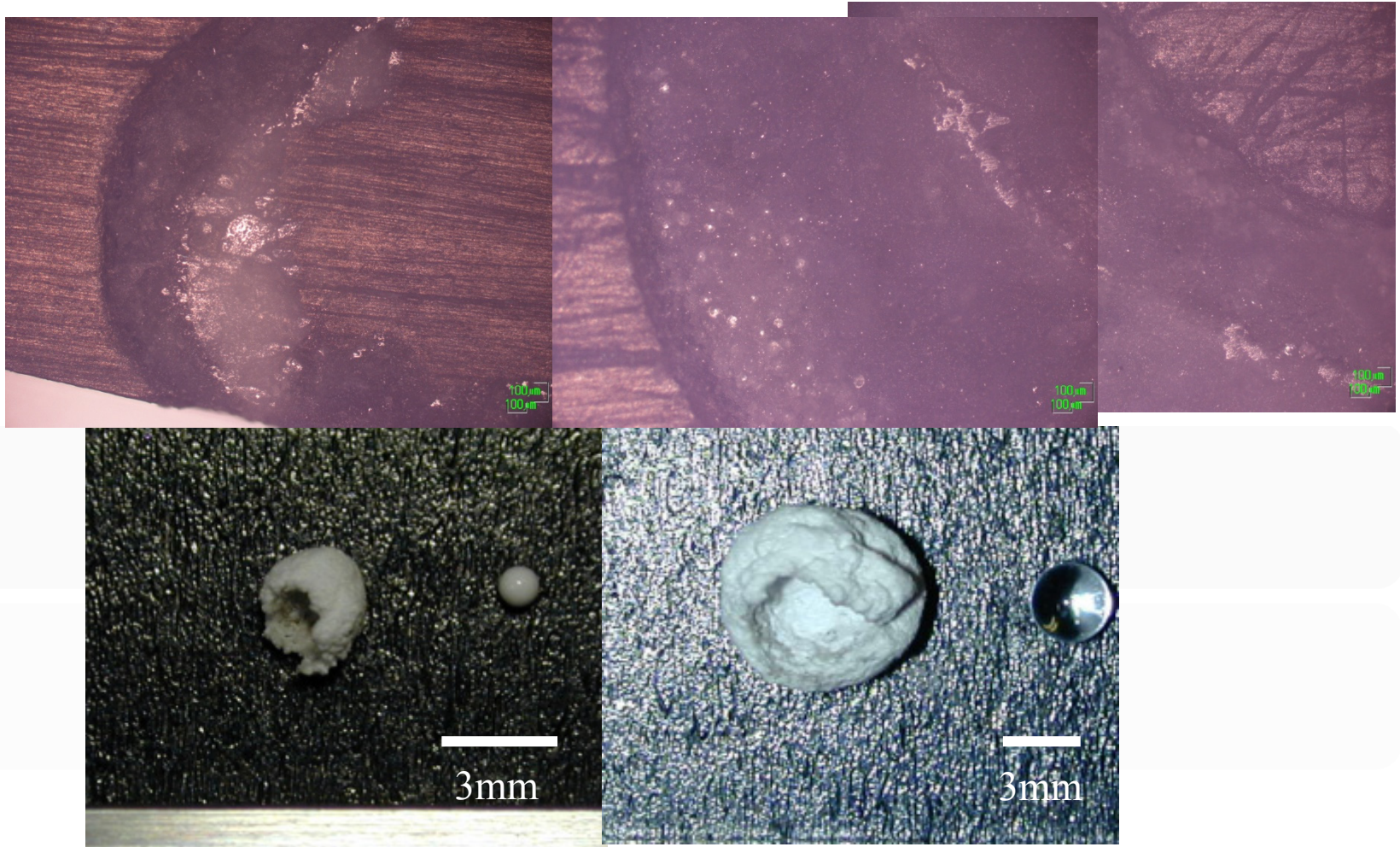
⇒小天体表面のこれらの値を推測することができれば、クレーター深さから、プロジェクトイルの大きさを推測できる

⇒Deep Impact実験やHAYABUSAのサンプリングの際にできたクレーターの深さより、天体表面の物性についての制約を与えられるかもしれない

$$P_0 \left(\frac{C_d}{d_i} \right)^{-b} = K \sigma_c$$

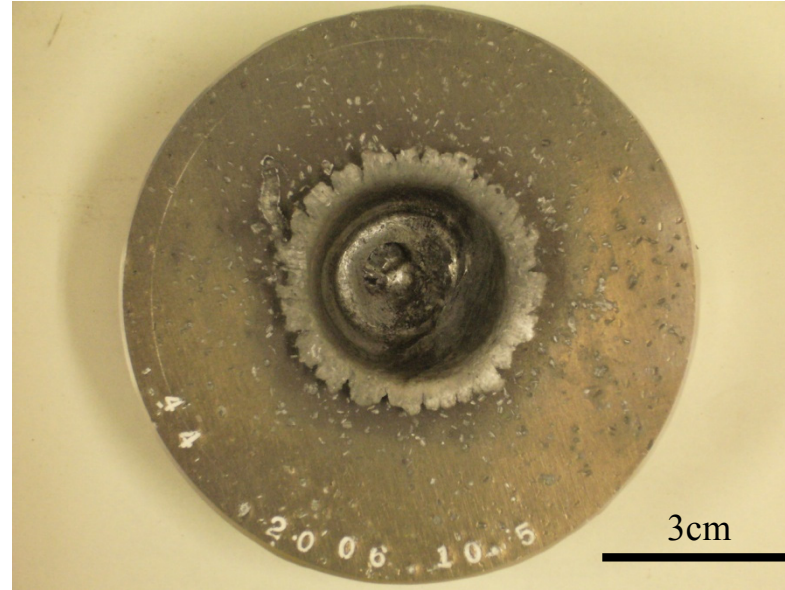
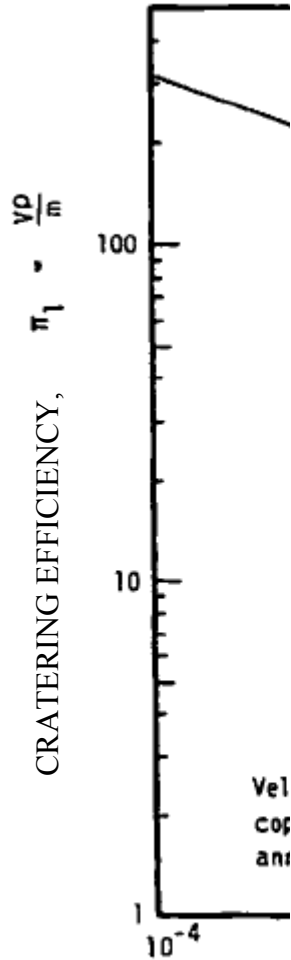
●クレーター直径を同様にスケールリングするためには
⇒直径方向への衝突応力の伝播を調べる必要がある

考察

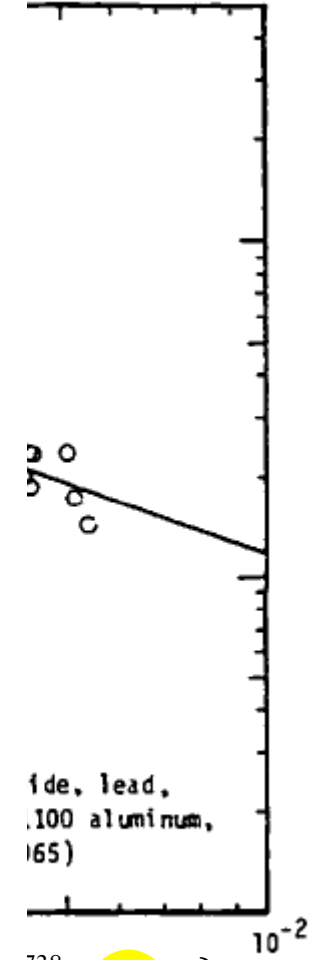


プロジェクトイルの変形違いは、金属と非金属では異なる？

考察



Al-Al、衝突速度:約1.6km/s



STRENGTH-DENSITY PARAMETER, $\left\{ \pi_3^{0.738} \pi_4 \right\} = \left\{ \left(\frac{\delta}{\rho} \right)^{0.738} \left(\frac{Y}{\delta U^2} \right) \right\}$

Holsapple & Schmidt, (1982)

考察

Holsapple and Schmidt (1982)の金属ターゲットへのスケーリングではクレーター体積(V)は、

$$V \propto \sigma_C^{-0.7} \Rightarrow C_d \propto \sigma_C^{-0.7/3} = \sigma_C^{-0.23}$$

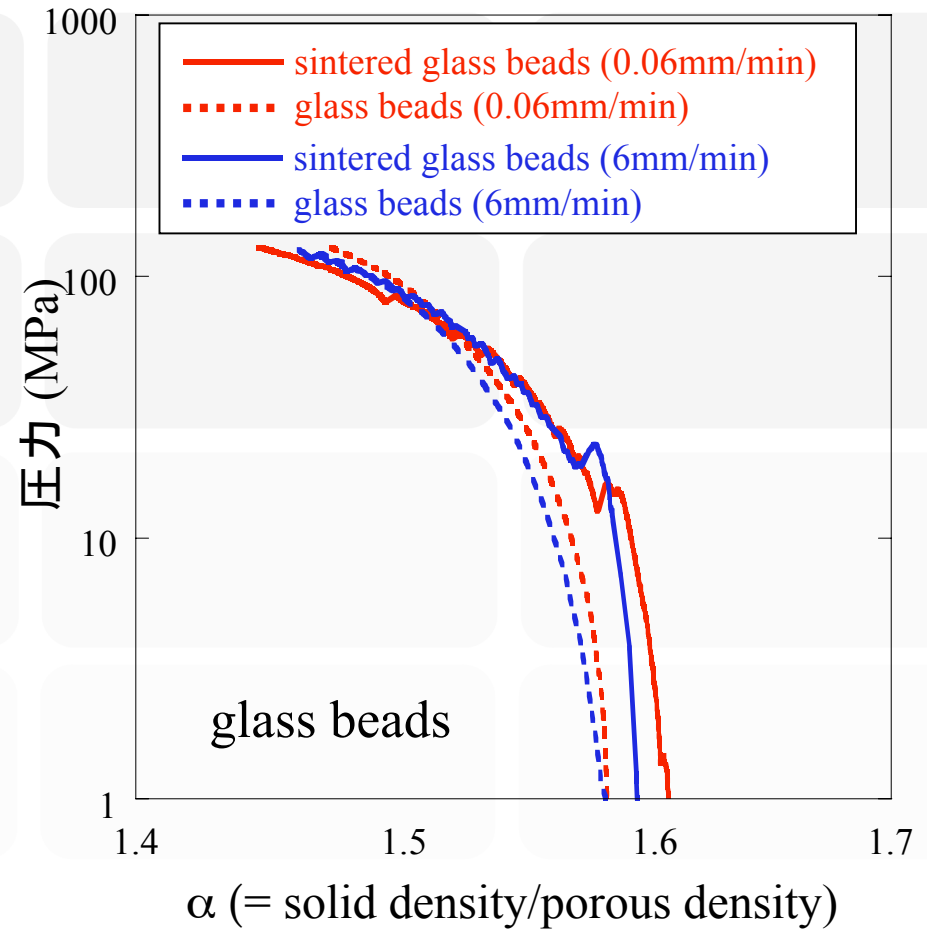
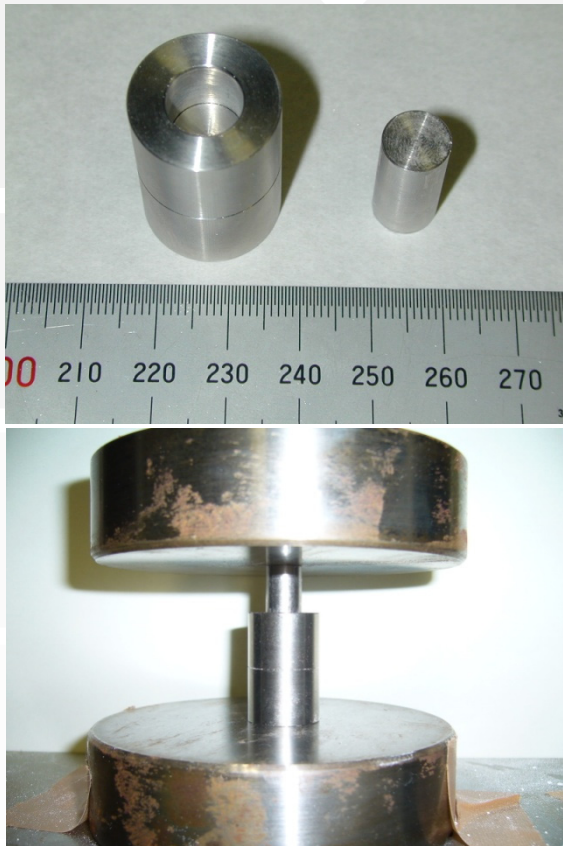
本実験の場合:

$$\frac{P_0}{\sigma_c} = 31 \pm 20 \left(\frac{C_d}{d_i} \right)^{2.0 \pm 0.3}$$

$$\Rightarrow C_d \propto \sigma_C^{-1/b} = \sigma_C^{-0.5}$$

 クレーター深さの強度への依存が異なることを示している

ガラスビーズの密封圧縮試験

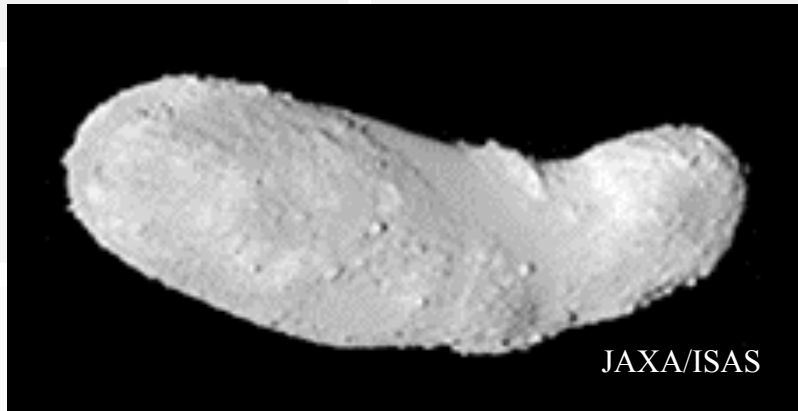


応力歪み曲線が、ひずみ速度に依存していない

➡ ビーズの再配置により空隙率が減少している

空隙率について

太陽系内の小天体には、空隙率の高いものの存在が確認、示唆されている



Itokawa: 約40% (Abe et al., 2006)

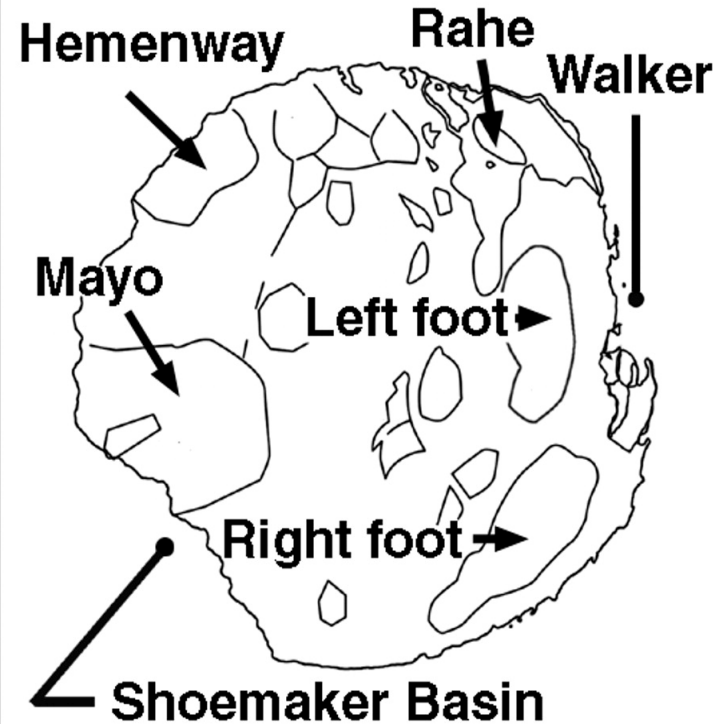
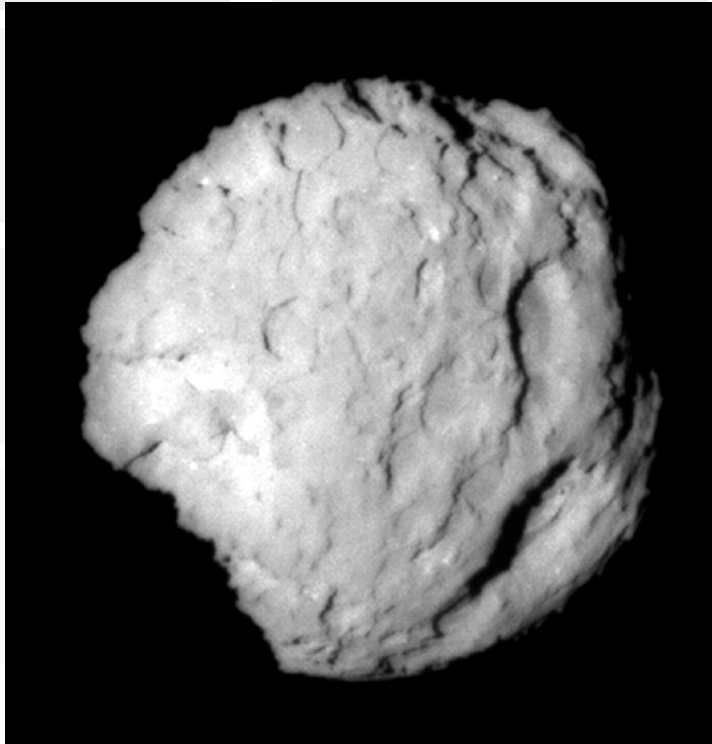
Wild2彗星: 下限値が30~60%
(Davidsson & Gutiérrez, 2005)

Tempel1彗星: 50~88%
(Davidsson et al., 2006)

小惑星: 高いもので70%程度
(Britt et al., 2002)

- ・空隙率がクレーター形成に及ぼす影響を評価することが必要
- ・空隙が存在すると、エネルギーが空隙により浪費され、衝撃圧力がより大きく減衰
 - ⇒ 減衰率の違いがクレーター形成にどのように影響するか？
- ・プロジェクトイルとターゲットの密度比が大きくなり、プロジェクトイルがターゲットにもぐりこむ

Wild2彗星の物理特性



Wild2 (Brownlee et al., 2004)

Raheクレーター: haloの深さが約200mとされている (Brownlee et al., 2004)

Wild2彗星: 空隙率 < 30 ~ 60% (Davidsson & Gutiérrez, 2005)

構成物: 岩石・氷・有機物・炭素混合体 (Davidsson & Gutiérrez, 2005)

0.2 : 0.55 : 0.19 : 0.06

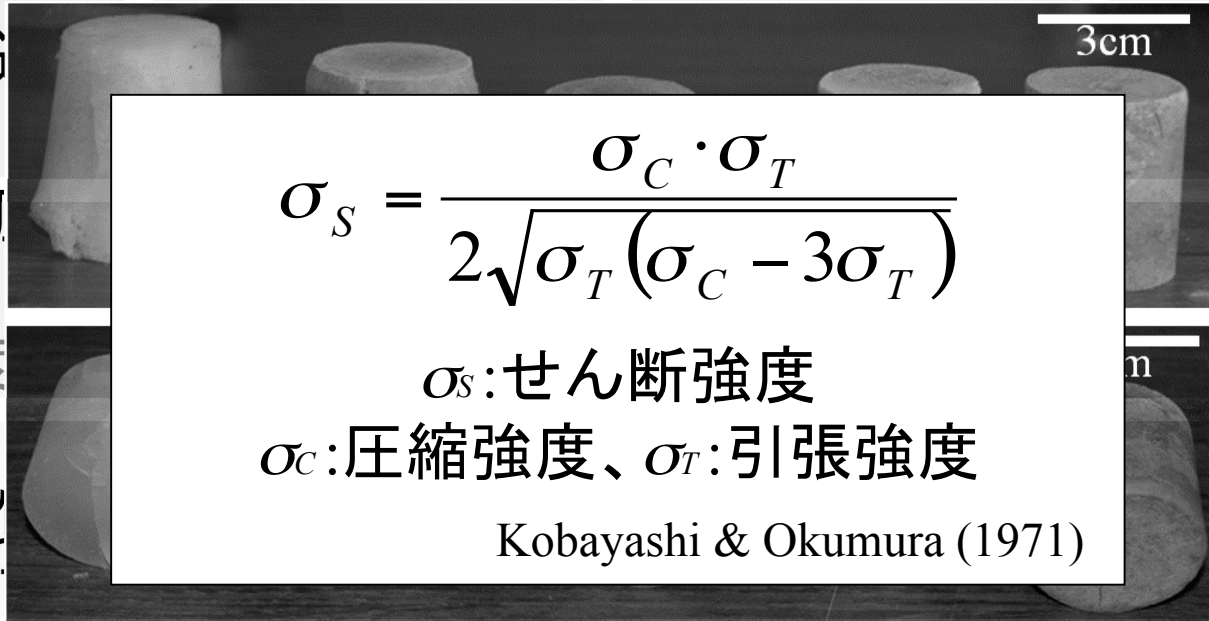
強度測定実験

場所：北海道

手法：一軸

ひずみ速度

ターゲット：

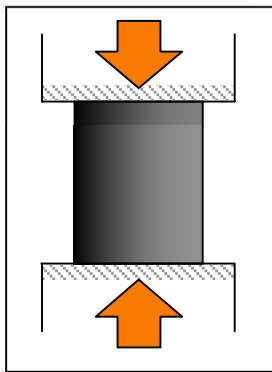


$$\sigma_s = \frac{\sigma_c \cdot \sigma_T}{2\sqrt{\sigma_T(\sigma_c - 3\sigma_T)}}$$

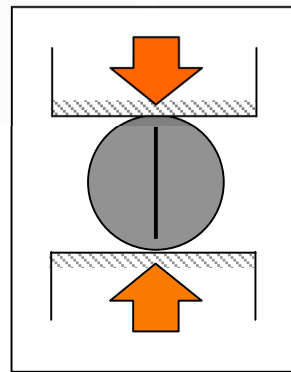
σ_s :せん断強度
 σ_c :圧縮強度、 σ_T :引張強度

Kobayashi & Okumura (1971)

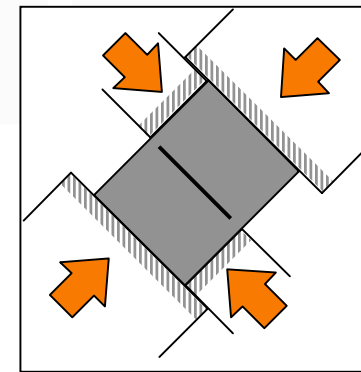
片石混合体



【一軸圧縮試験】



【圧裂引張試験】



【せん断試験】