

# Impact Craters on Asteroids: Does Gravity or Strength Control Their Size?

Micael C. Nolan, Erik Asphaug, H. Jay  
Melosh, Richard Greenberg  
Icarus 124, 359-371 (1996)

神戸大学大学院理学研究科  
M1 紫垣 沙央

# INTRODUCTION

- ◎ クレーター形成のスケールの違い
  - 地球上(mサイズ)~小惑星(kmサイズ)
- ◎ 数値流体コードを用いたシミュレーション
  - 地球上の実験では再現できない規模のクレーターリング
  - 実験室スケールから小惑星スケールへの外挿のためのスケールリング則の検証
- ◎ 標的の強度: 単位面積あたりの力の量(=圧力)
  - 衝突の結果を描写する鍵となる
  - 外挿モデル(実験室→小惑星規模)には最適なパラメータとされる

# INTRODUCTION

- ◎ しかし、大規模な衝突では
  - > 掘削流開始前に衝撃波が標的を破壊
  - > 標的の強度は取り除かれてしまうのでは？

## 本研究

大規模なクレーター形成イベントにおける  
標的の強度(・重力)の重要性について検証

- > ※本研究における「物理的な強度」  
...脆性的な破壊に対する静的な引張強度

# 1. SCALING LAWS

- ◎ K. Housen, R. Schmidt, K. Holsapple
  - 次元解析に基づいた、ベキ乗則のスケーリング則を構築
- ◎ スケーリング則による外挿
  - その場を支配する物理量の変化に注意
    - 例: 非常に大きな標的への衝突では重力が支配的であるが、実験室での衝突では重力はほぼ無関係
      - どのような場合に実験室での実験から重力スケーリングを適用できるのか?
  - スケーリング則をうまく扱うためには、場に関する物理体制(強度 $\leftrightarrow$ 重力)を見極める必要がある



# 1. SCALING LAWS

## ◎ 物理体制(強度 $\leftrightarrow$ 重力)の推移

### > 地球上:

- 強度スケールリングを適用できるのは直径数十mのクレーターまでと考えられている

### > 小惑星上:

- 重力が地球上よりもずっと小さいが、物質の強度もおそらく非常に弱い

### > 強度・重力支配域の推移は不確か

### > 地球の状態に起因する経験的なスケールリング則は直接適用されない

## 2. NUMERICAL MODELING OF IMPACTS

- ◎ 数値流体コード [SALE (Amsden et al. 1980)]
  - > 破壊や衝撃、重力といった小スケールの物理を模擬、現象に関する物理条件下でエジェクタを生じることが可能
  - > スケーリングの関係を越えた利点
    - 大きなスケールに外挿したパラメータよりも、物質の特性を利用した小さなスケールを扱う
    - 大スケールでの結果は、小スケールの過程を累積させた結果として決定

# 2. NUMERICAL MODELING OF IMPACTS

## ◎ Grady and Kipp (1987) の破壊モデル

- > 物質に分布した既存の割れ目が引張応力のもとで破損することで脆性破壊が起こると仮定
- > パラメータ  $D$  "damage"
  - 割れ目によって物質のバルク特性が変えられる際のパラメータ、fragmentation の程度を描写
    - $D=0$ : 物質はHookeの弾性固体としてふるまう
    - $D$ の増加: 弾性係数の減少
    - $D=1$ : fragmentation は完了、引張強度は0  
液体のように振る舞い、圧縮の力に対してのみ抵抗

# 2. NUMERICAL MODELING OF IMPACTS

- Grady and Kipp (1987) の破壊モデル
  - ＞ 強度のサイズ依存
    - ・ 大きな標的ほど弱い割れ目を含む可能性が高い  
→破壊のしきい値が低い
  - ＞ 強度の歪み速度依存
    - ・ 弱い割れ目が活性化する時間がある  
→破壊のピーク応力が低く済む

∴サイズが小さく、歪み速度が速い  
→事実上強度が大きくなる

# 3. LARGE- AND SMALL-SCALE IMPACTS

## ○ シミュレーションにおいて

- > 標的: 直径12.6kmの玄武岩の球と、半無限体
  - 球では、小惑星951 Gaspraと同じ体積になる
- > 全ての場合において重力はあえて適用せず、破壊の効果のみを扱う
  - 結果が強度スケーリングから逸脱した場合でも、その原因は重力の影響ではないと言える

## ○ Table 1:

全シミュレーション  
に用いた物質の特性

Uncompressed density	$\rho = 2700 \text{ kg m}^{-3}$
Bulk modulus	$\kappa = 26.7 \text{ GPa}$
Shear modulus	$\mu = 22.7 \text{ GPa}$
Weibull flaw distribution	$N(\epsilon) = 10^{33} \epsilon^{9.5} \text{ m}^{-3}$

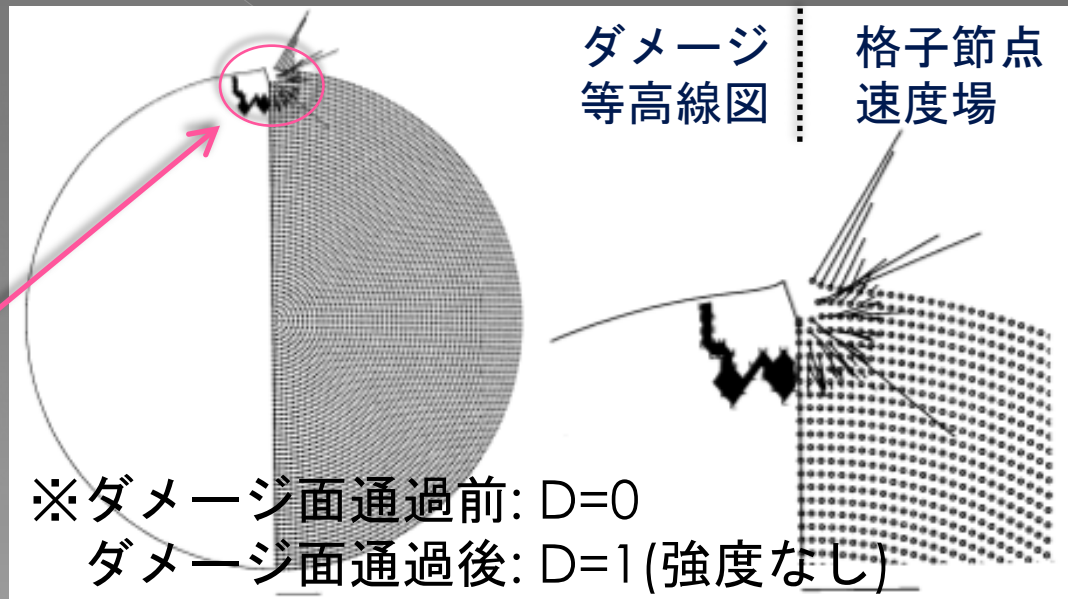
# 3-1. Large Cratering Event

- ◎ 大スケールのクレータリング
  - > 弾丸: 直径123m玄武岩 ( $\rho = 2700\text{kg/m}^3$ )
  - > 衝突速度: 5.3km/s
  - > 標的は球体

- ◎ Fig. 1:
  - > 衝突後0.234s

速度を持つのは  
ダメージ面通過後の領域

固体岩石の圧縮変形による  
クレータリングフロー



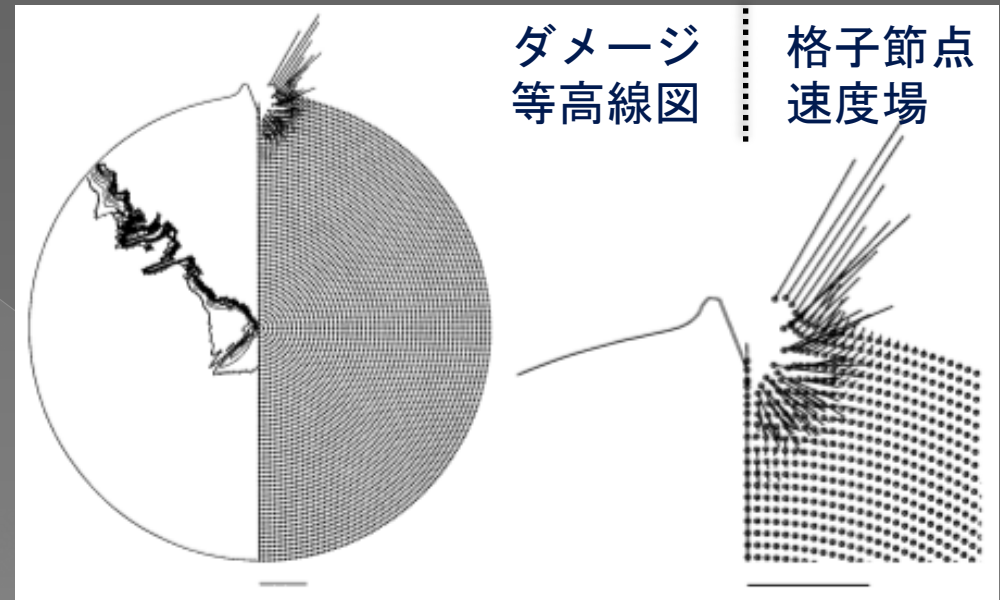
# 3-1. Large Cratering Event

## ● Fig. 2:

> 衝突後 1.88s

破碎・fragmentation  
を受け、強度の減少した  
岩石の流れ

→ Fig. 1.における破壊の  
メカニズムとは異なる



- ・ ダメージ面通過後の強度のない部分は流体的なふるまい
- ・ 岩石が強度を持つのは、クレーター形成初期の非常に短い間のみ
- ・ クレータリングが進むにつれ、クレータリングフローはより破碎された岩石の流れになっていく



# 3-1. Large Cratering Event

## ● Fig. 3:

> 衝突後240s

## ● クレータリングの終了

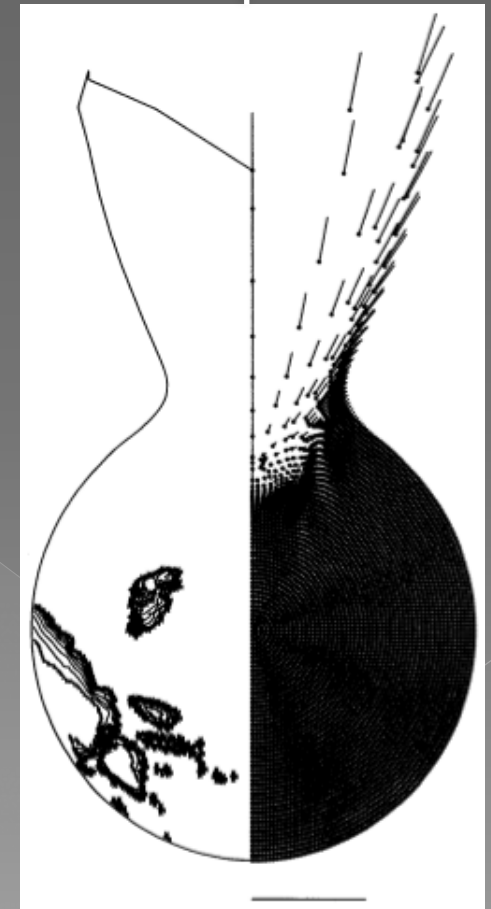
摩擦や重力のないモデルであるので、  
エジェクタフローは遅くはなるが永遠に続く

→ダメージ領域の拡大が止んだ時の  
クレーターのサイズを上限とする

→クレータリングの終了とする

ダメージ  
等高線図

格子節点  
速度場



100m/s



## 3-2. Small Cratering Event

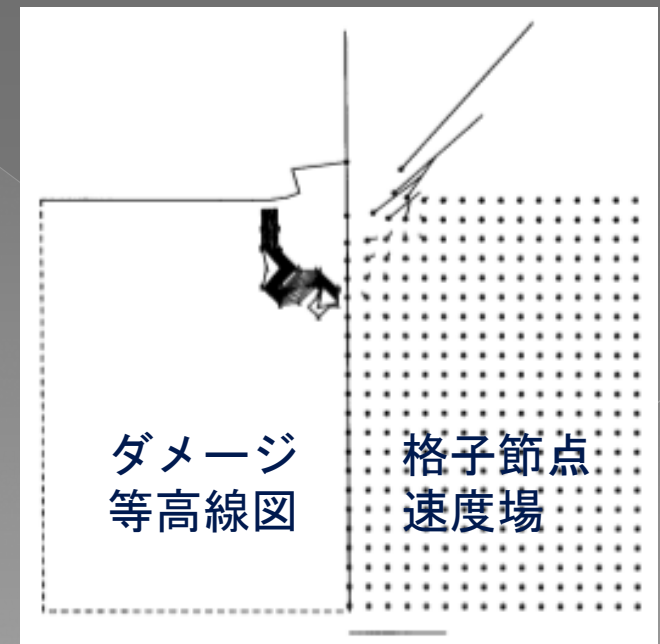
### ◎ 小スケールのクレータリング

- 半無限遠領域に1cmのクレーターを形成するような衝突を模擬(弾丸サイズのみ変更)
- 物質は大スケール時と同じ

### ◎ Fig. 4:

- 衝突後 $3.77\mu\text{s}$

Fig. 1.とほぼ同様、  
ダメージ面は衝撃波と共に広がり、  
速度場の流れは衝突点からおよそ放射状



200m/s

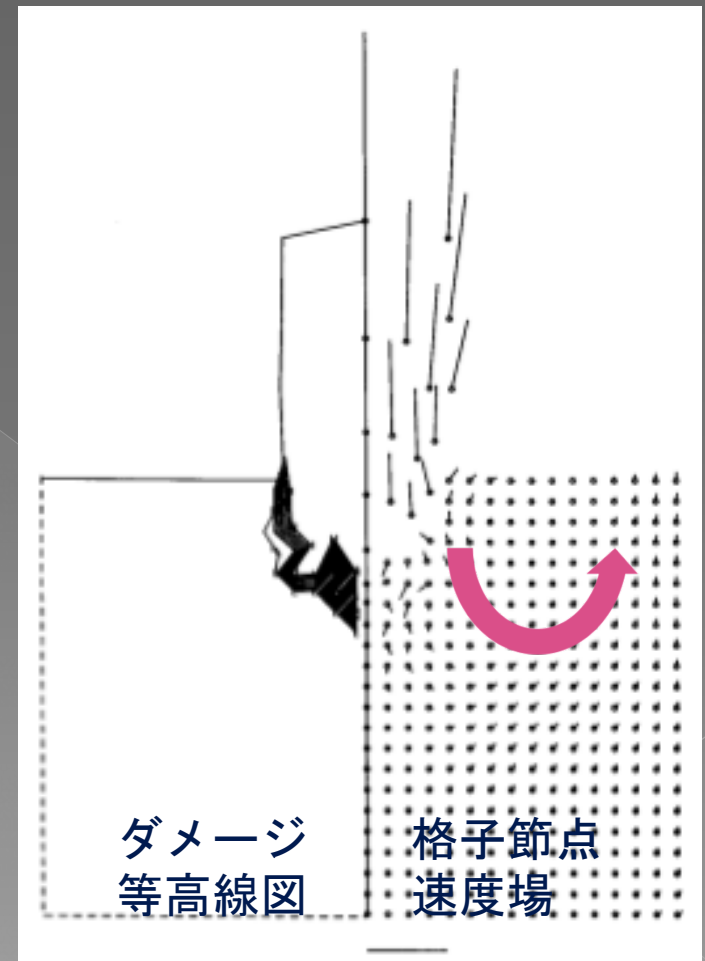
## 3-2. Small Cratering Event

### ○ Fig. 5:

#### > 衝突後60.4 $\mu$ s

- ・ダメージ面通過後の物質は速度を持つが、そのすぐに外側の速度はかなり小さい
- ・ダメージ面より外側に、微小な速度が存在(図中矢印)  
→弾性あるいは塑性変形による変位と考えられる

※ダメージ面の中央がくぼむのは、軸対称により軸付近にセルが集まりダメージやフローが誇張されるため

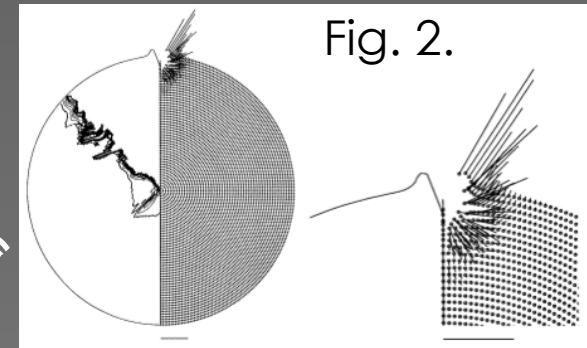


# 3-2. Small Cratering Event

## ○ Fig.2. と Fig.5. の違い

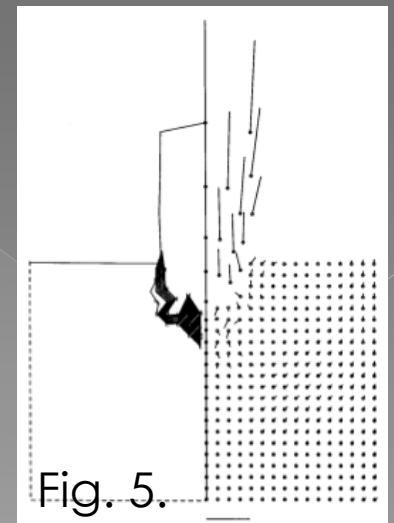
### > Fig. 2:

- 大スケール
- 衝突点からの距離と共にフロー速度減少
- 物質は破碎され強度小
- ほぼ圧縮応力のみが伝わる



### > Fig. 5:

- 小スケール
- ダメージ面を境にフロー速度激減



クレーターフローに対する影響  
大スケール：強度の影響ほぼなし  
小スケール：強度の影響大

## 3-3. Strengthless Targets

- ◎ 強度によるエジェクタフローの違い
  - →強度がサイズに従って失われるため(サイズ依存)



### 仮説

始めから強度のない標的への衝突は、  
大きなスケールの衝突と似た結果になるのでは

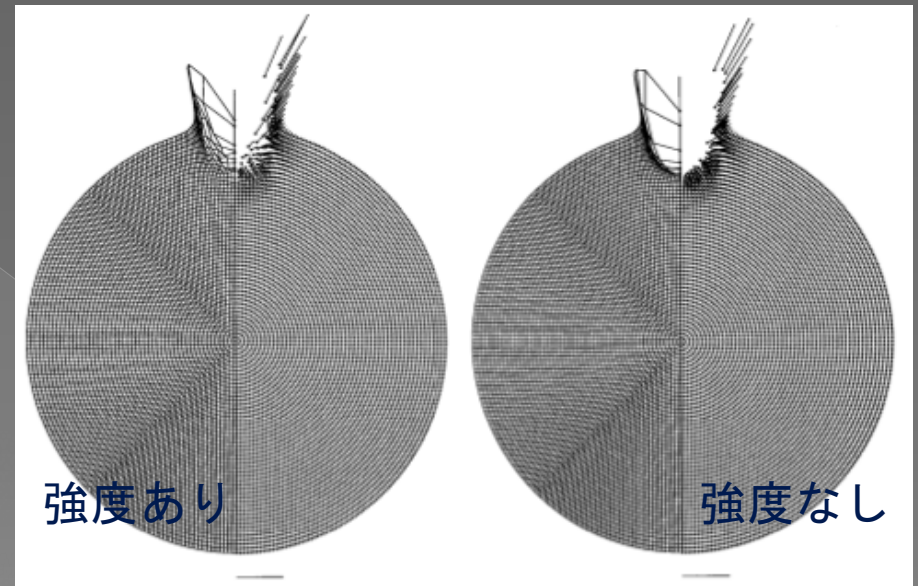
- ◎ これをシミュレーションにて検証
  - 強度のない天体: 初期条件での $D=1$ とし、  
その他はこれまでと同様の条件で  
→液体のように振る舞う

# 3-3. Strengthless Targets

## ◎ 大きな衝突

> Fig. 6:

- ・ 前述の大スケールクレータリングを、同じ条件で始めから強度のない( $D=1$ )天体への衝突と比較
- ・ 衝突後15sの様子



違いはほぼなし

→このサイズの衝突では、

強度はエジェクタフローにほとんど影響しない

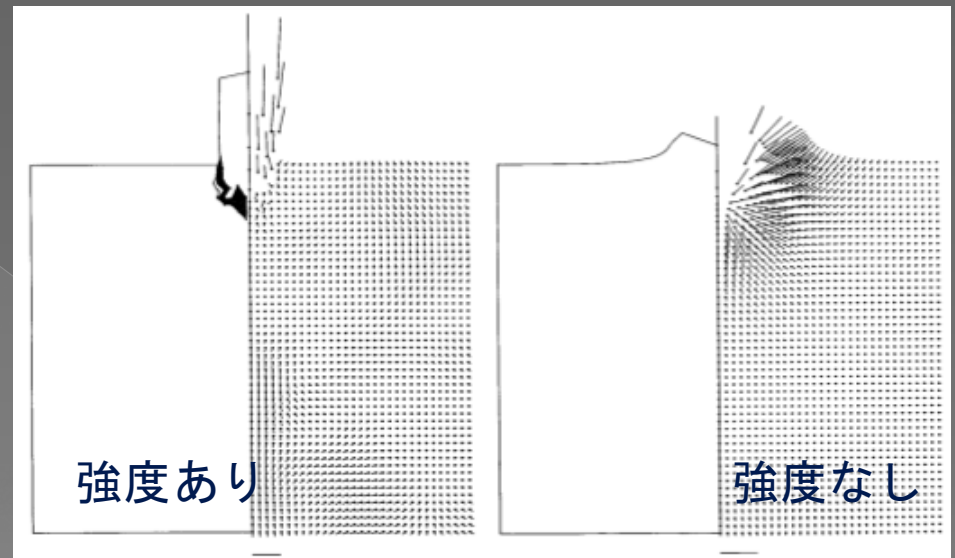
※わずかな違いは、強度を持つ方が初期に引張・剪断強度を保っていた段階での微妙な変位の違い

# 3-3. Strengthless Targets

## ◎ 小さな衝突

> Fig. 7:

- ・ 前述の小スケールクレータリングを、同じ条件で始めから強度のない( $D=1$ )天体への衝突と比較
- ・ 衝突後 $60.4\mu\text{s}$ の様子



- ・ 強度あり: 高速度エジェクタがほぼ垂直に放出
- ・ 強度なし: 低めの速度・広い体積で放射状に放出  
→ 明らかな違い



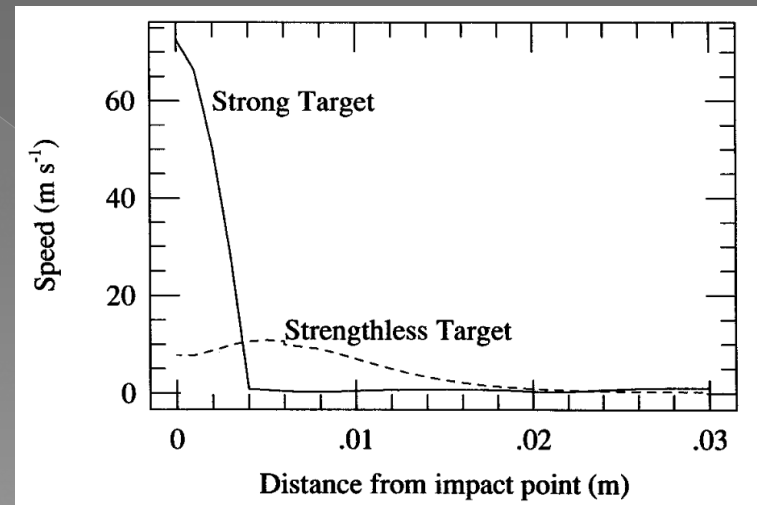
# 3-3. Strengthless Targets

- > Fig. 8: エジェクタ速度-衝突点からの距離
  - 強度あり: 半径4mmまでで速度はほぼゼロに
  - 強度なし: 半径数cmまでのエジェクタフロー

...仮説は論証された



重力の効果を無視しても、  
物理的な強度が重要になるのは  
小さな衝突においてのみである。

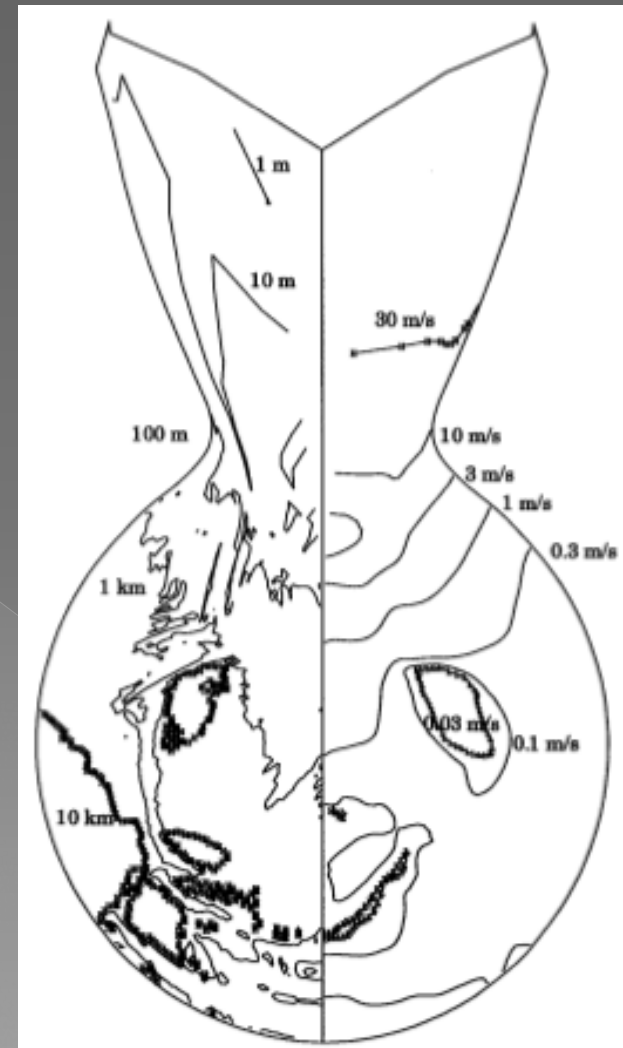


- 強度は衝撃波によりすぐに除去される
- 強度と重力の直接比較で強度支配域-重力支配域の遷移点を決定するのは、うまくいかない

# 4. EFFECTS OF FRAGMENT SIZES

## ◎ 4.1. Fragment Size Distribution

- > Fig. 9: 大きな衝突における破片のサイズ分布(等高線図)
- > 衝突点近傍
  - 強い衝撃波、歪み速度大
  - 割れ目の核形成が速い、多い  
→小さな破片
- > 遠方
  - 弱まった衝撃波、歪み速度小
  - 割れ目の核形成が遅い、少ない  
→大きな破片





# 5. CRATER SIZES

## ◎ クレーターサイズの推定

> Fig. 10:

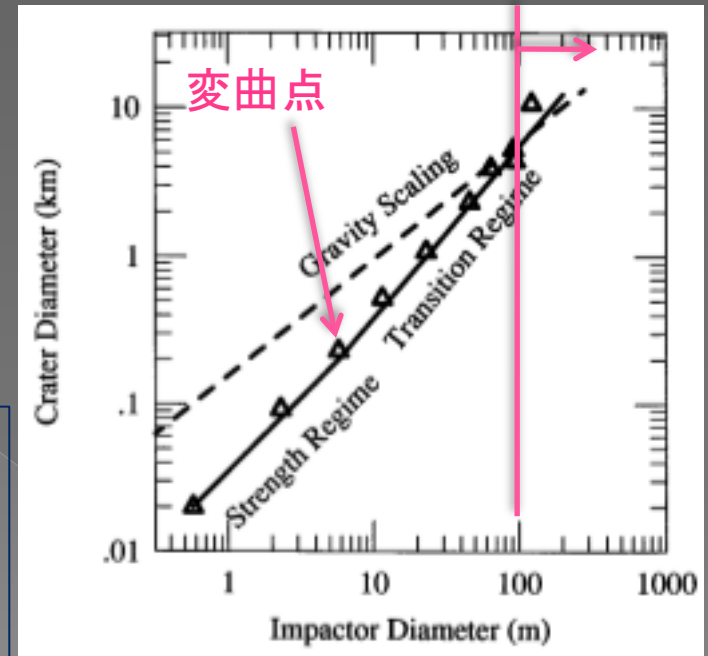
本研究のモデルによる衝突クレーターのサイズと、スケーリング則のモデルによる予測を比較

△ : 本研究で  $D=1$  (強度0) 領域のサイズとその時の衝突体のサイズ

実線 : △ を最小二乗法で fitting

破線 : 重力スケーリングによる推定

フローは重力に止められる

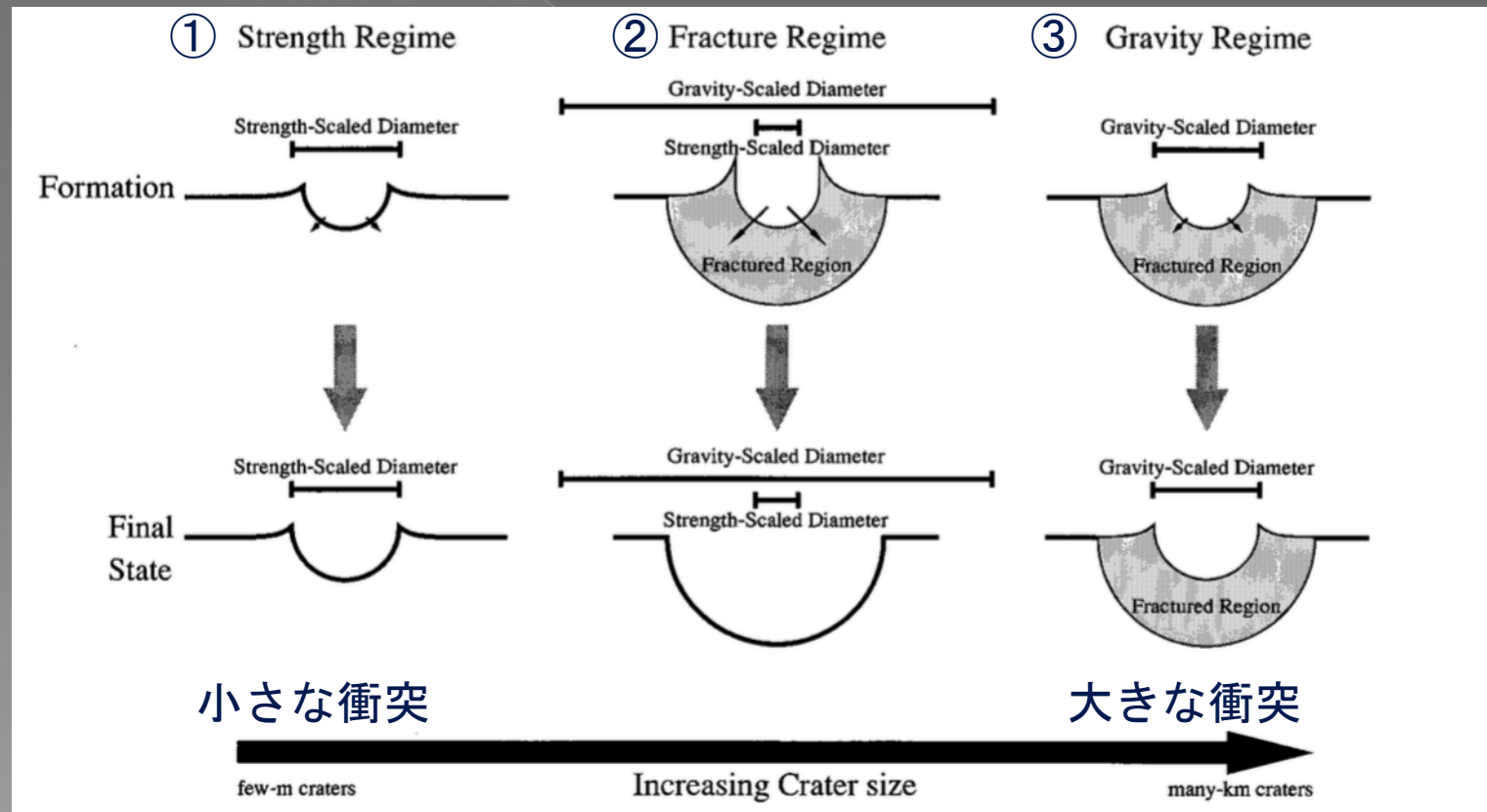


## クレーターサイズに上限をかけるもの

- ・ 図中△で示される $D=1$ 領域のサイズ(破壊された領域のサイズ)
- ・ クレーターフローが自身の質量を外へ持ち上げるエネルギーの上限 (→重力スケーリングされるクレーターのサイズを決定)

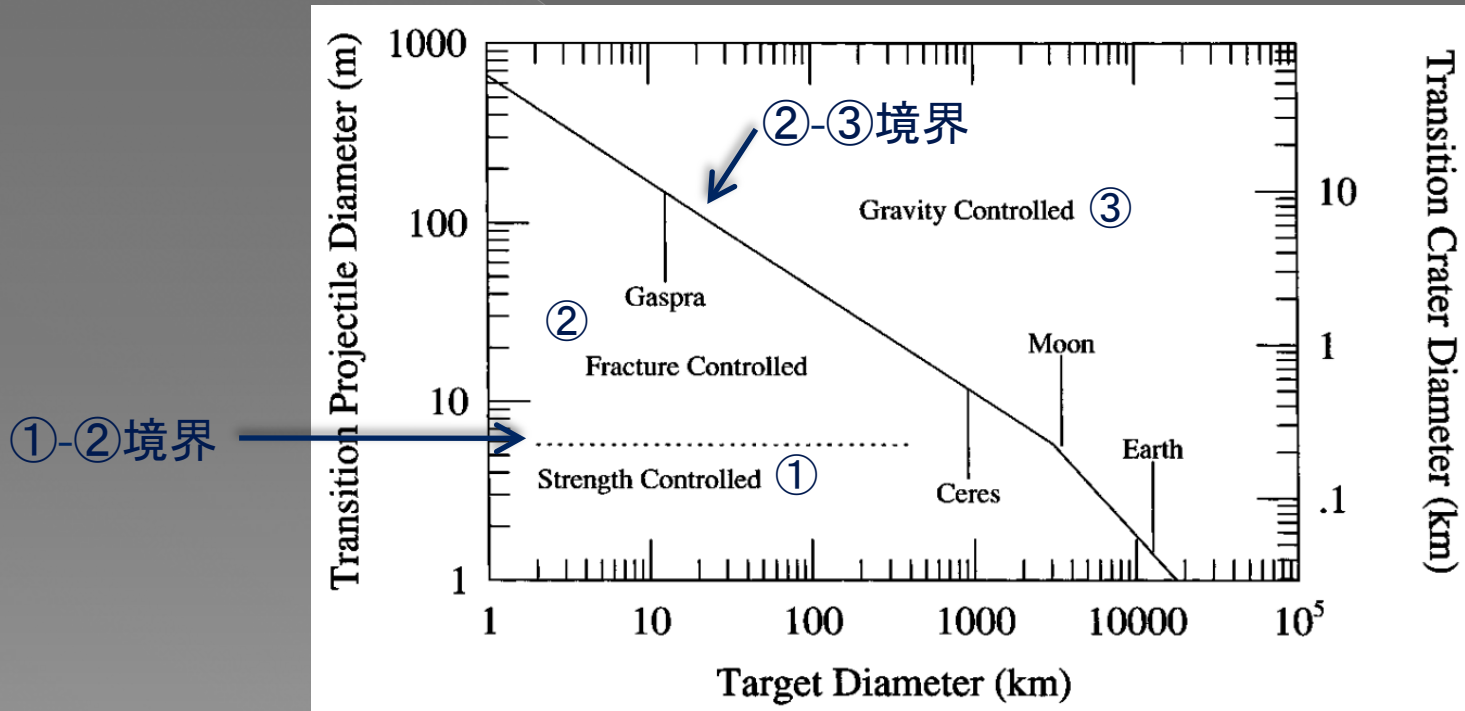
# 5. CRATER SIZES

- クレーターサイズを支配するもの
  - > Fig. 11: 物理的限界の模式図



# 5. CRATER SIZES

> Fig. 12: 弾丸およびクレーターサイズと標的サイズの関係



小さい天体(Gaspraなど)  
ほとんど破壊に支配される領域

大きな天体(月など)  
破壊に支配される領域はなくなる

# 6. STRENGTH VERSUS GRAVITY SCALING IN LIGHT OF HYDROCODE RESULTS

## ◎ 本研究

- > 小(cm)スケールのクレーターには強度支配域が適用、大(km)スケールのクレーターには重力支配域が適用。
- > 支配域の変遷は、引張強度がfragmentationにより失われて引き起こされる  
→Housen et al. (1983)のように、スケールに依存して支配域が変化するのではない。
- > 遷移領域では、破砕がクレーターサイズを決定

Fig. 11.  
中央図②  
Fracture Regime

# 7. CONCLUSION

- 小惑星951 Gaspraサイズの標的への衝突では、クレータリングフロー発生よりも先に衝撃波が標的を破砕する
    - ・ Gaspraの200mより大きなクレーターに強度スケーリングは適用しない
    - ・ Gaspraの最も大きなクレーター( $\geq 10\text{km}$ )には重カスケーリングが適用
- これらの間は Fracture Regimeとなる
- 小惑星規模ではクレータリングのメカニズムが質的に変化してしまうため、Housen et al. (1983)を用いて実験室からのスケーリングを行うのは難しい
  - 本研究の数値実験は、実験を行うのは難しいスケールでの物理プロセスを視覚化することで、解析的なスケーリングを補完するものとなった