

標的物質のどのような違いが流動化に影響
するのか？
それがクレーター形成に及ぼす影響の程度
は？

Numerical modeling of the impact crater depth-
diameter dependence in acoustically fluidized target
K. Wunnemann, B.A. Ivanov, 2003

神戸大学 木内真人

はじめに

流動化 (Acoustic fluidization)

クレーター形成過程において、標的物質(岩石)が一時的に流体のようにふるまい、強度が減少

⇒複雑クレーターの形態の説明に用いられている

今回の論文

- ・衝突クレーター形成過程を、AFモデルを用いて数値計算
- ・深さ-直径比、単純クレーターから複雑クレーターに移行する直径が観測結果(月、地球、金星)と一致するように、パラメータを決定

クレーター形態

◆クレーター形態

- 単純クレーター・・・お椀形、 $d/D \sim$ 約1/5
- 複雑クレーター・・・平たいクレーターの底、中央丘、 d/D が小さい

◆衝突クレーターの最終形状

トランジェントクレーター (半球状) が **重力による崩壊** を起こすことで形成

- 単純クレーター・・・物質強度 $>$ 重力の作用 (∵ サイズ小)
⇒クレーター形状を比較的保つ
- 複雑クレーター・・・物質強度 $<$ 重力の作用 (∵ サイズ大)
⇒クレーターの底が隆起、 d/D が小さくなる

e.g.) チクシュルーブクレーター
D \sim 200km、d \sim 1km以下



移行直径と物質強度の減少

◆単純クレーターから複雑クレーターの移行直径

重力に関係(1/g) (月:15km、地球:2~4km)

◆岩石強度(～100MPa)を用いた計算では、移行直径が一致しない

⇒3MPaで調和的 (Melosh, 1977)



一時的な物質強度の減少が必要

•熱によるプロセス(Thermal softening)・・・これのみでは不十分

(O'Keefe and Ahrens, 1999)

•Accoustic fluidization

Shock front によって生じる高振幅、高周波数、ランダムなアコースティック波が一時的に荷重圧力を緩和

⇒一時的に摩擦抵抗を減少させる

数値計算手法

- 2次元シミュレーション、流体コードSALE
- 熱力学状態: Tilloston状態方程式より計算
- セル数: 300×400
- 弾丸直径 (50m~20km) のセル数: 20~40 (最小セル2.5m~500m)
- 衝突点から計算を始め、最終クレーター形状をとった時点 (応力が物質強度を下回ったとき) で終了

物質強度:
$$Y = (\underbrace{Y_0}_{\text{固着力}} + \underbrace{\phi p}_{\text{荷重圧力によって強まった強度}}) \times \underbrace{\left(1 - \frac{T - \chi T_m}{T_m (1 - \chi)}\right)}_{\text{Thermal softeningによる項}}$$

Y_0 : 固着力 ϕ : $\tan \theta_r$
 θ_r : 内部摩擦角
 p : 荷重圧力 T : 温度 T_m : 融点

(荷重圧力0のときの強度)

パラメータ

Table 1
Model parameters and material properties of target and projectile

Parameter	Target/asteroid
<i>Tillotson Parameter for crystalline rock see for example Melosh (1989)</i>	
Density ρ (kg/m ³)	2650
Impact velocity v_i (km/s)	15
Gravity g (m/s ²)	9.81, 1.62
Cohesion Y_0 (Pa)	2.5×10^4 – 2.5×10^7
Maximum yield strength Y_{\max} (Pa)	2.0^{e9}
Dry friction coefficient ϕ	0.0–1.0
Melt temperature T_m (K)	1373
Fraction of melt temperature for strength weakening χ	0.2

- 弾丸と標的は同物質（結晶岩）
- 衝突速度：15km/s（月への平均衝突速度）
- 重力：地球と月の重力

クレータースケーリング則との比較 (トランジェントクレーター)

◆強度が0に近い物質におけるクレータースケーリング則

(Holsapple and Schmidt, 1987)

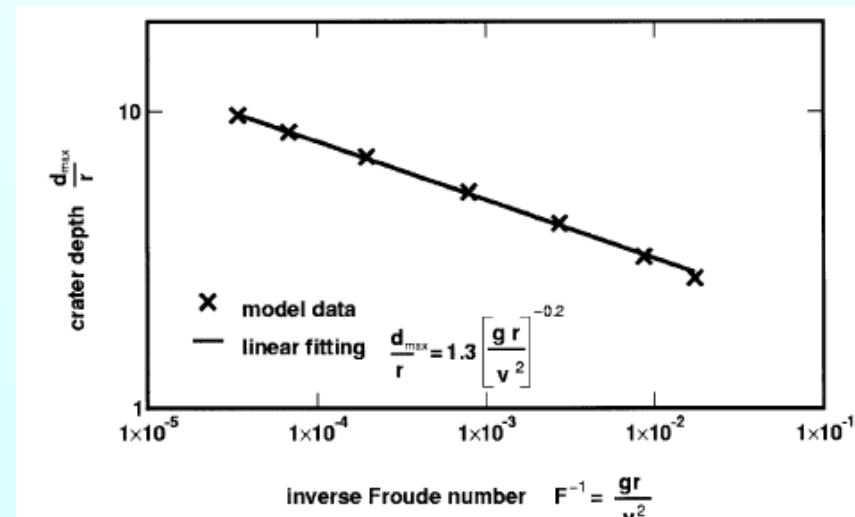
$$\frac{d_{\max}}{r} = \alpha F^{-\beta} = \alpha \left(\frac{gr^2}{v_i^2} \right)^\beta$$

d_{\max} : トランジェントクレーター深さ r : 弾丸半径
 F : フルード数 g : 重力加速度 v : 衝突速度 α, β : 定数

α, β ・・・先行研究(実験値、計算値)の値と
ほぼ同じ



トランジェントクレーター形成過程において
今回の手法の正当性を確認

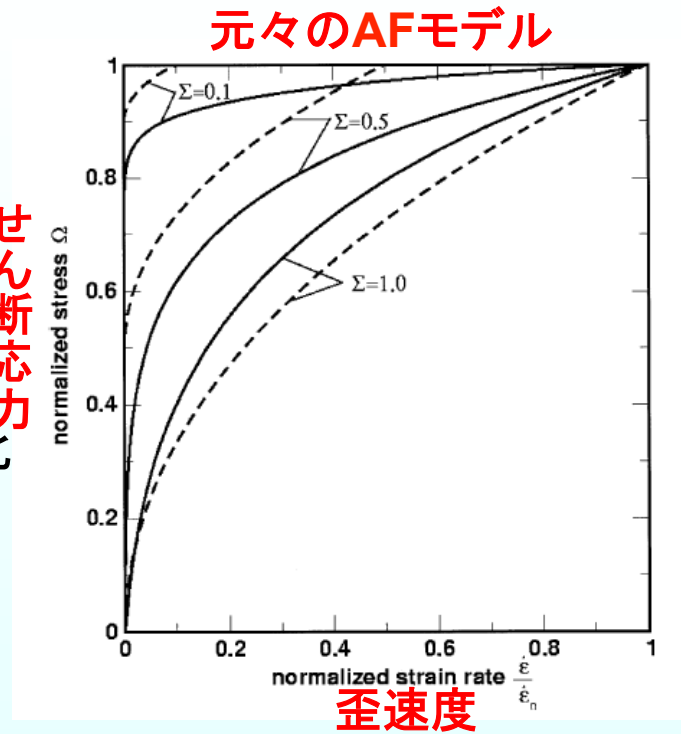


AFモデル

◆ 標的物質が一時的に流体としてふるまう

- 歪速度とせん断応力の関係 (Melosh, 1979)
- Blockモデル (Inanov and Kostuchenko, 1977)で簡略化
- Bingham流体として扱う
(ある一定以上の応力を与えると流動性をもつ)

せん断応力

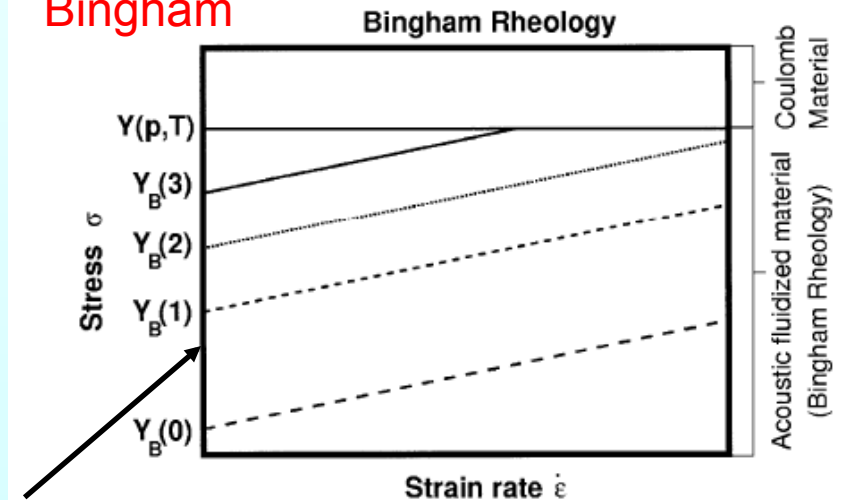


◆ AFモデルによる物質強度

$$Y = (Y_0 + \phi(p - V_p)) \times \left(1 - \frac{T - \chi T_m}{T_m(1 - \chi)}\right)$$

V_p : 圧力変動の振幅

Bingham



線形的、傾きが粘性率

減衰・粘性パラメータ

- ◆ V_p (圧力変動の振幅) は時間に関して指数関数的に減衰

$$V_p = V_{p,t=0} \exp(-t / T_{dec})$$

$V_{p,t=0}$: 最大粒子速度、密度、音速の関数

T_{dec} : 減衰係数 (大きいとゆっくり減衰)

⇒ T_{dec} …… 弾丸サイズ r に比例すると仮定

$$T_{dec} = \gamma_T (r / c_s) \quad (\gamma_T: \text{定数 } r: \text{弾丸半径 } c_s: \text{音速})$$

- ◆ 粘性率 η …… 弾丸サイズ r に比例すると仮定

$$\eta = \gamma_\eta (c_s r \rho) \quad (\gamma_\eta: \text{定数})$$

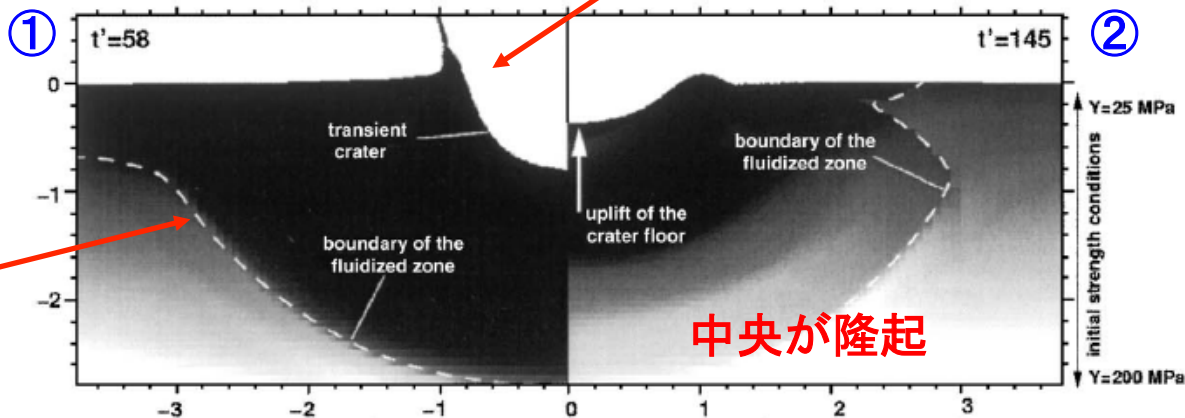


固着力 Y_0 、減衰パラメータ γ_T 、粘性パラメータ γ_η を変えて、観測結果に一致するまで計算

$$Y = (Y_0 + \phi(p - V_p)) \times \left(1 - \frac{T - \chi T_m}{T_m(1 - \chi)}\right)$$

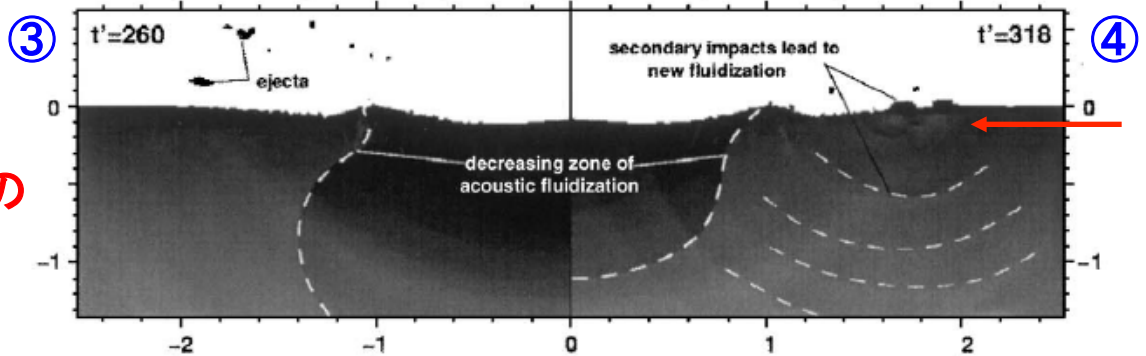
結果

トランジェントクレーター



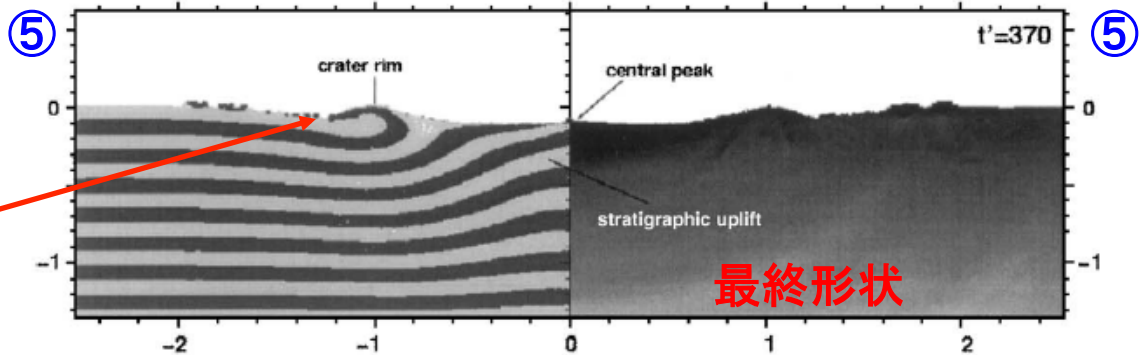
流動化の境界

中央が隆起



流動化ゾーンの減少

エジェクタによる二次的な衝突



リム付近で層が逆転

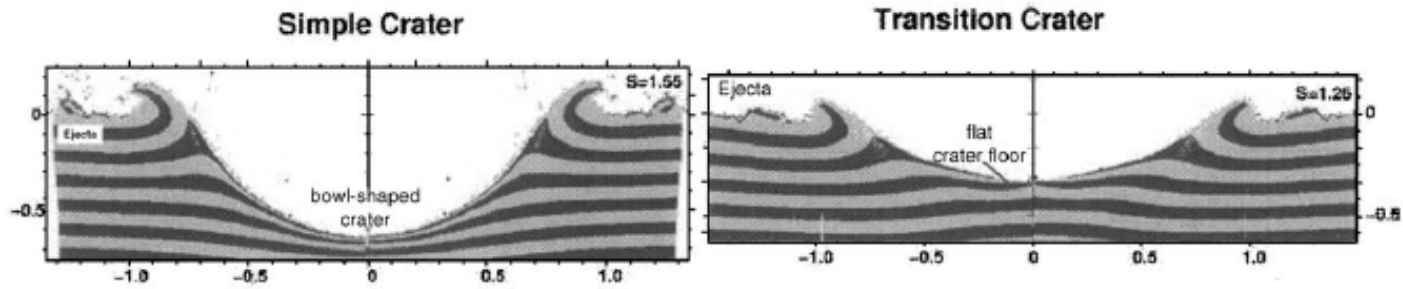
最終形状



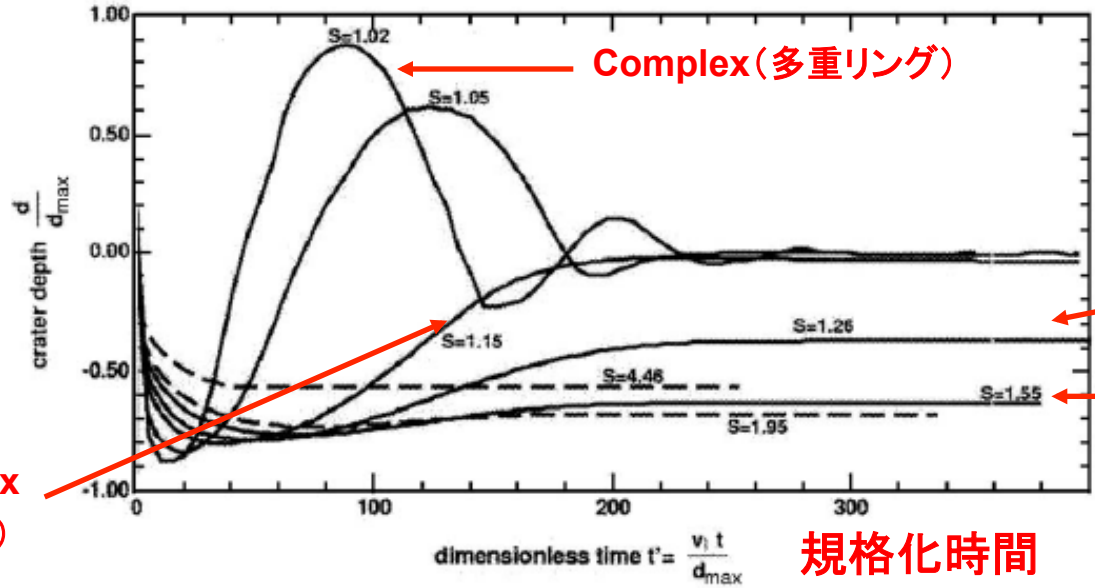
yield strength Y in MPa

重力: 月
 $\phi=1.0$
 $Y_0=25\text{MPa}$

深さと時間の関係



※規格化深さ $\frac{d}{d_{max}}$ で Transient crater の深さ



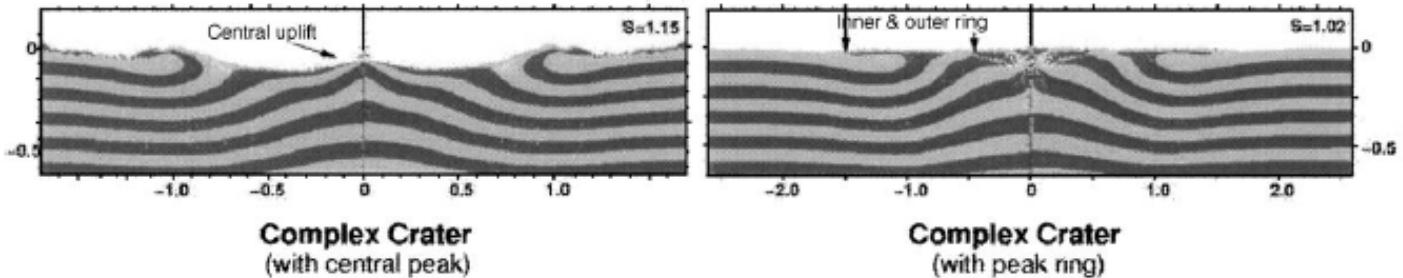
Complex (中央丘)

Complex (多重リング)

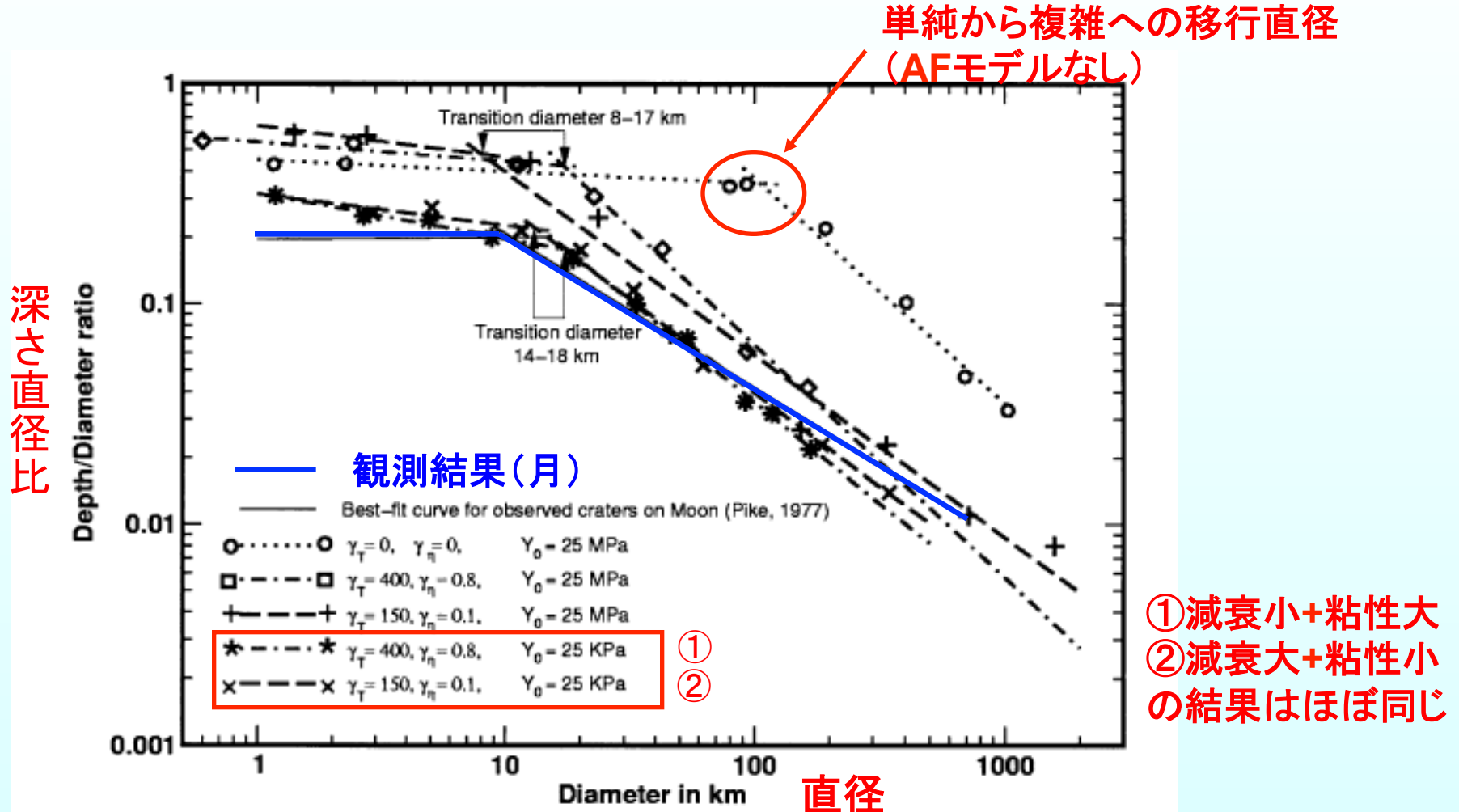
遷移クレーター

単純クレーター

規格化時間

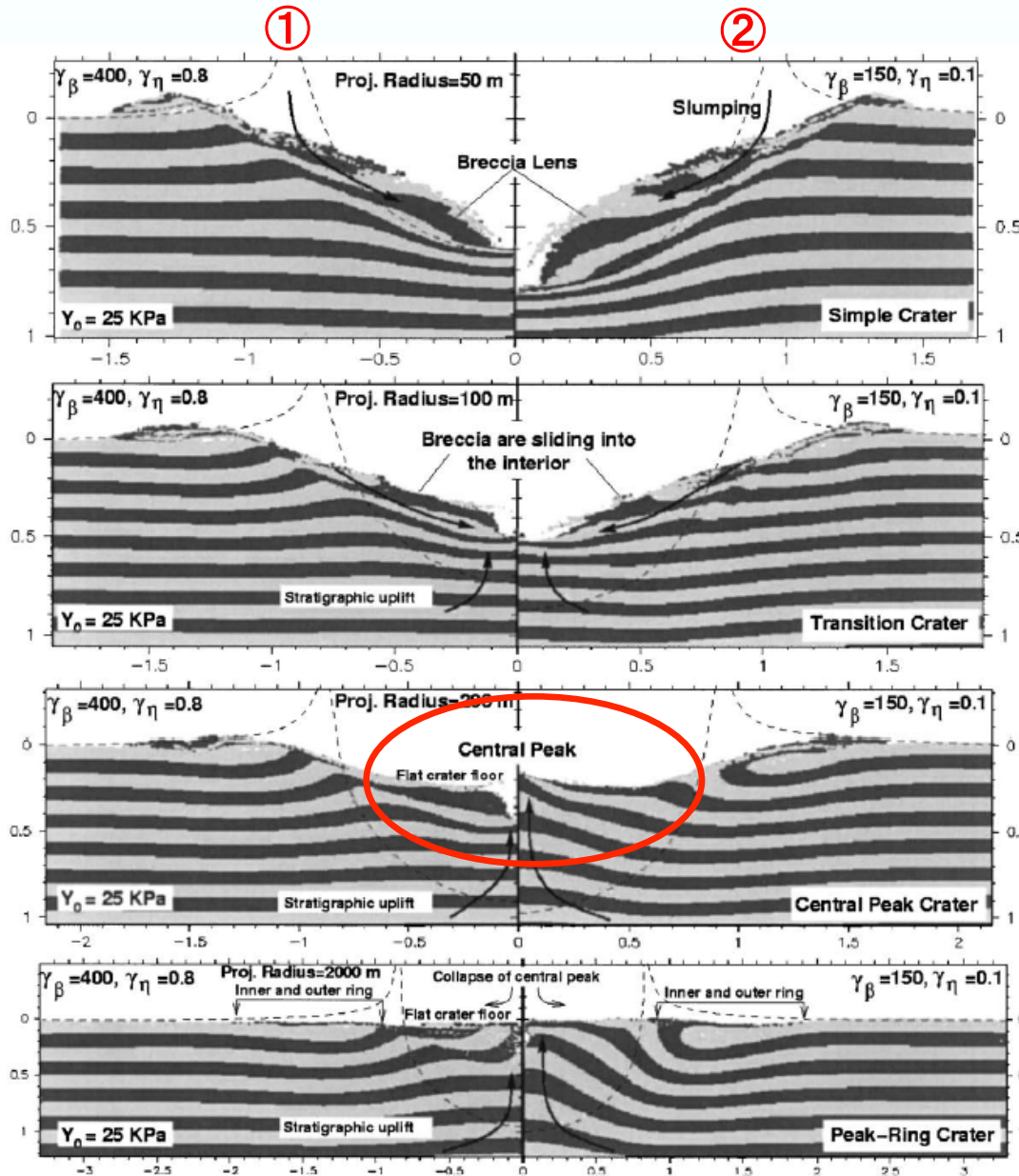


観測結果とシミュレーション結果の比較(月)



- AFモデルを用いないとき、移行直径は観測結果よりも大きい
- 固着力 Y_0 が小さいとき(25kPa)、深さ-直径比が調和的

クレーター形態の比較



①減衰小+粘性大

②減衰大+粘性小

d/D、移行直径は同じ

⇒クレーター形態を比較

減衰が大きいと(②)、中央丘が保存されやすい(観測に一致)



最も観測結果に一致する
パラメーターを得た

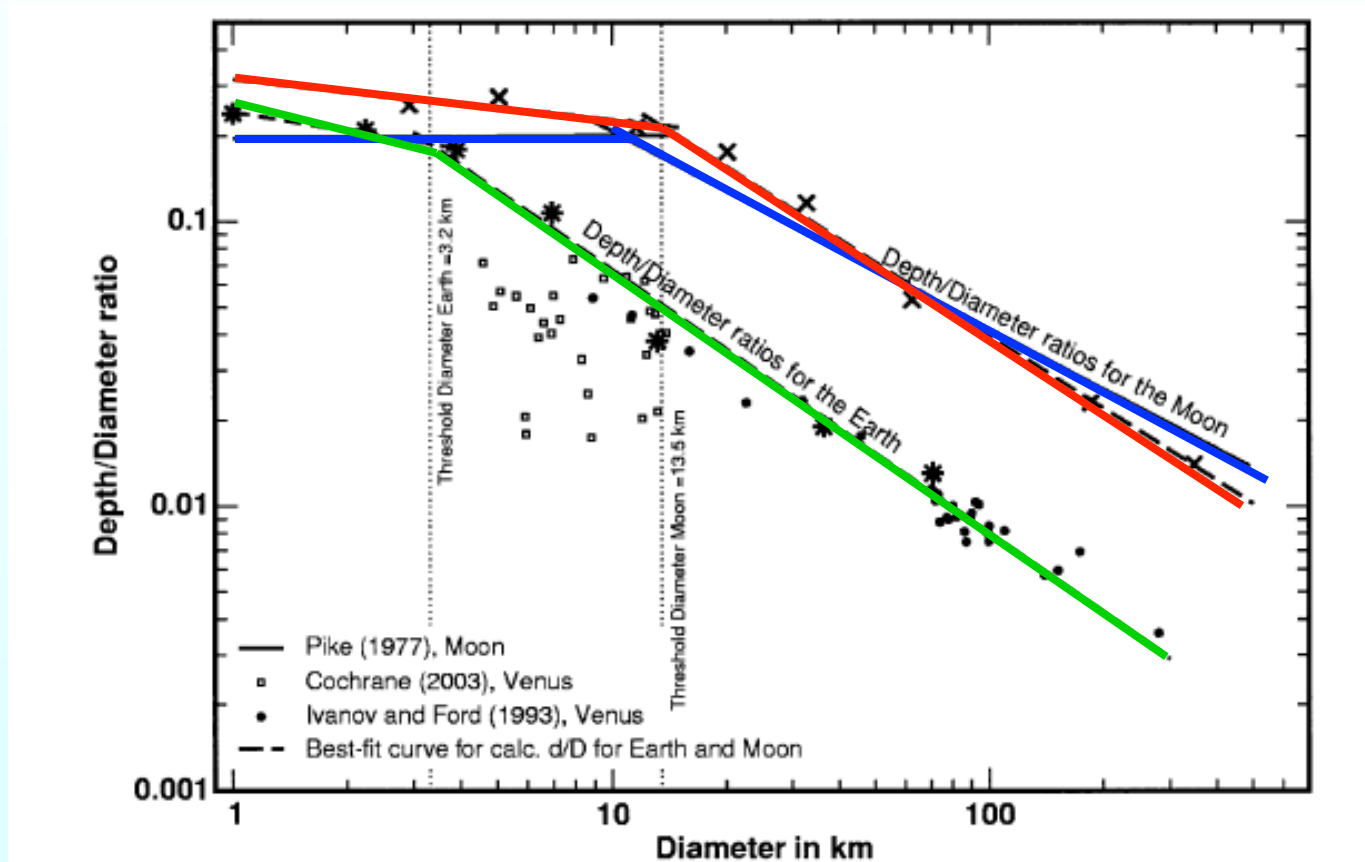
$$Y_0 = 25 \text{ kPa}, \gamma_T = 150, \gamma_\eta = 0.1$$

$$S_{crit} = 1.001$$

$$S = \frac{Y}{\rho g d_{\max}}$$

観測結果との比較

- 観測(月)
- 計算(月)
- 計算(地球)



- 地球の計算結果と金星の観測結果を比較(∵地球と重力はほぼ同じ)
- 深さ-直径比、移行直径が観測結果と調和的

論文内容まとめ

- 衝突クレーター形成過程をAFモデルを用いて数値計算
- Blockモデル(簡略化したモデル)を用い、Bingham流体として扱う
- 固着力(荷重圧力0のときの強度)を変化
⇒ 深さ-直径比を観測結果(月)と一致させた
- 流体の粘性と圧力変動の減衰に関するパラメータを変化
⇒ 単純クレーターから複雑クレーターへの移行直径、
またクレーター形態を観測結果(月)と一致させた
- 地球(金星)との観測結果とも調和的
- ただし、減衰・粘性パラメータが弾丸サイズに比例するという仮定のもと

問いに対する答え

◆標的物質のどのような違いが流動化に影響するのか？

流動化が起こった際の流体の**固着力、粘性、圧力変動の減衰率**の違いが影響を与える

◆それがクレーター形成に及ぼす影響の程度は？

- 固着力大⇒深さ-直径比大
- 粘性、減衰率の存在は移行直径を小さくする
- 減衰が大きいと、中央丘が保存されやすくなる
(クレーター形態が変化)