

# 最終的なクレーター形状を 決定する支配的な現象は何か？

IMPACT CRATER COLLAPSE

H. J. Melosh, B. A. Ivanov 1999

Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 27 (1), 385-415

東京大学

新領域

M1羽倉幸一

2013/9/27 衝突勉強会

# クレーター形態の多様性

直径

小

$\frac{1}{g}$

大

・ 2種類のクレーター形態

① 単純クレーター

● お椀型クレーター

② 複雑クレーター

● 中央丘を持つクレーター

● 段丘を持つクレーター

● 多重リングを持つクレーター



中央丘を持つクレーター

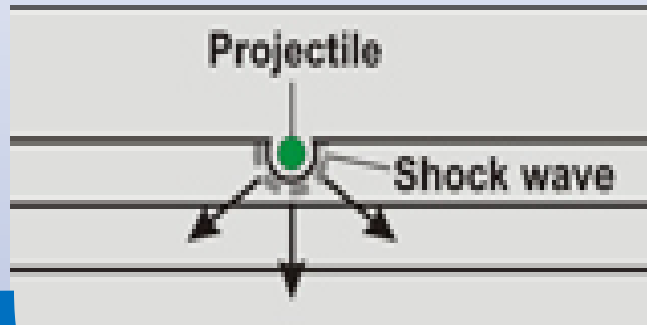
お椀型クレーター

多重リングを持つクレーター

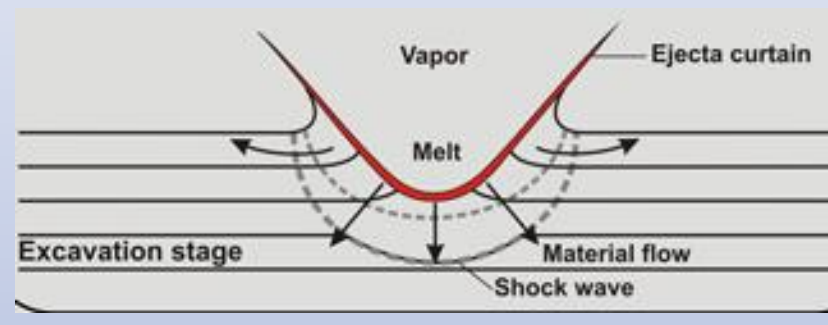
水星のクレーター

# クレーターの形成過程

## ① 衝突・圧縮段階



## ② 掘削段階



単



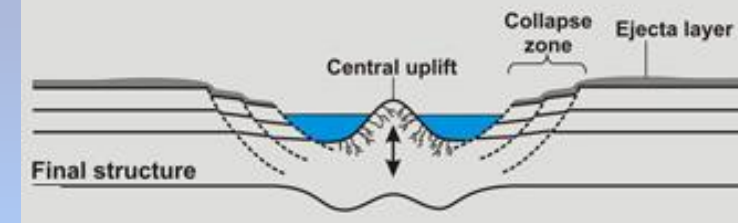
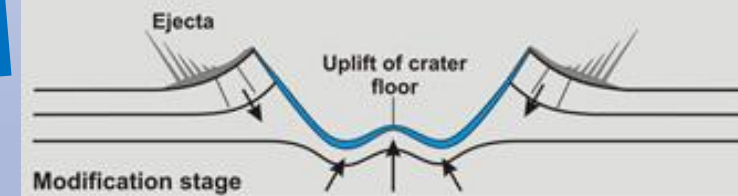
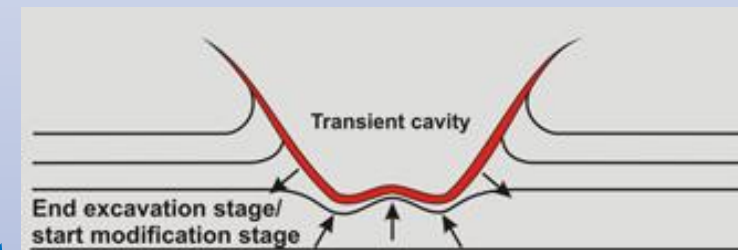
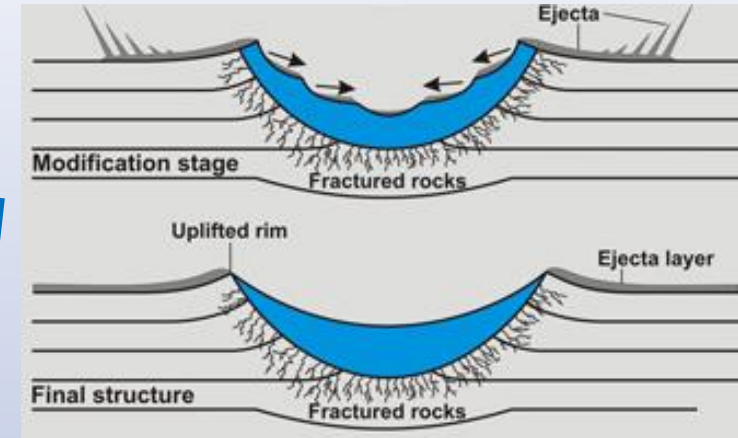
複



単純、複雑クレーター共通した形成過程

複雑クレーターの修正段階の主なプロセス:中央丘の隆起と崩壊  
⇒ どのようなプロセスなのかわかっていない。

## ③ 修正段階



French (1998)

# 中央丘の隆起・崩壊の特徴

中央丘の隆起の類測として、粘性 $10^9$ Paの粘性体での流体計算を行う。

⇒複雑クレーターの形態的な特徴を確認

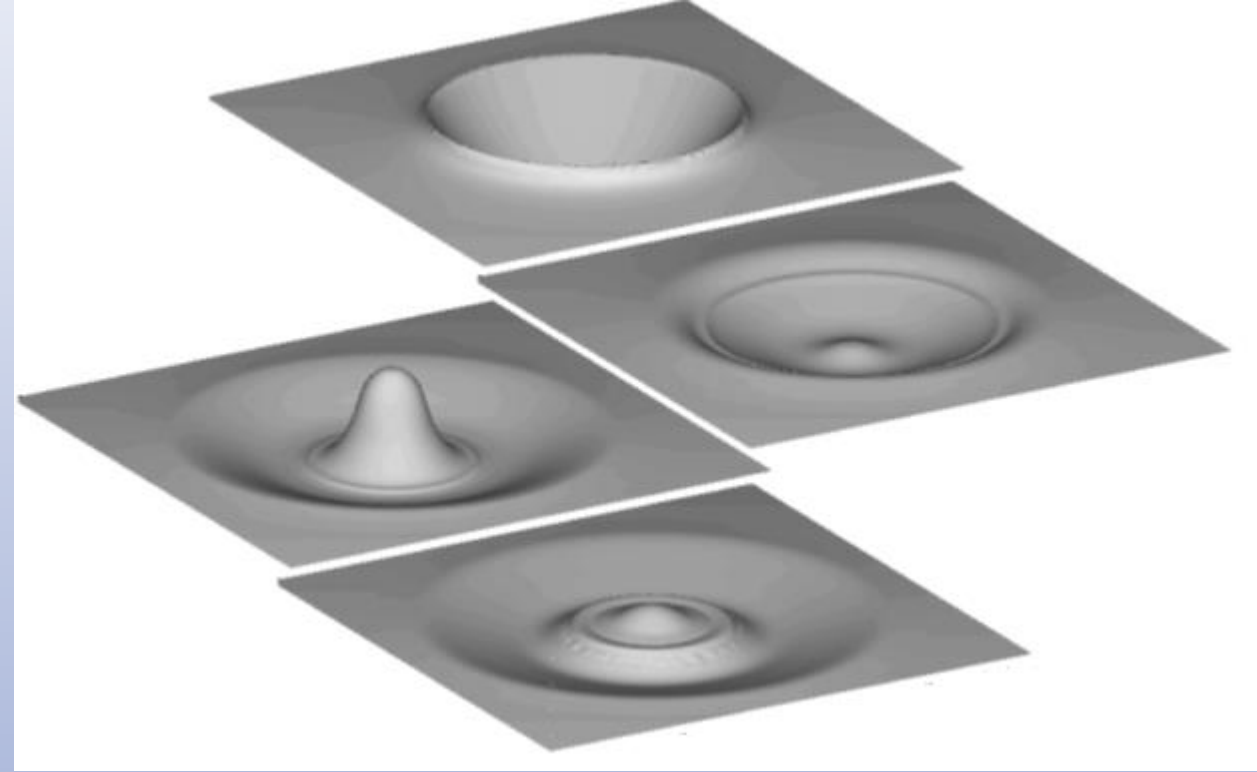


実際のクレーターでは短時間の内に中央丘の隆起が起こり、その形状を維持。(Melosh1989)



一時的に岩石の強度が減少する(流体のように振る舞う)メカニズムが必要。  
(Melosh1989)

Thermal softening(熱によるプロセス),  
Acoustic fluidization(摩擦力を下げるプロセス)



(Collins PhD\_Thesis,2002)

# Thermal softening [O'Keefe & Ahrens, 1993; 1998]

## Thermal softening

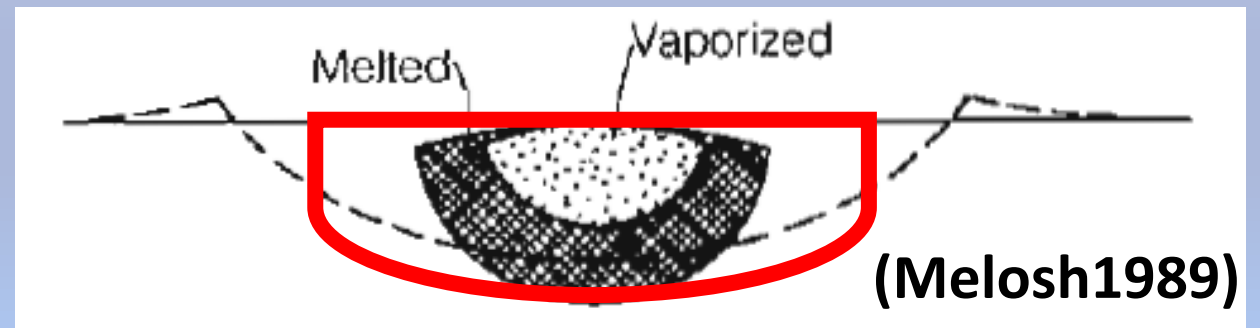
金属が加熱によって延性を持つ性質を岩石にもあると考え、衝突による衝撃波による加熱によって融点を超えない岩石にも延性を持つ仮説。

[O'Keefe & Ahrens, 1993; 1998]

## Thermal softening の有効性

巨大クレーターの場合、スケーリング則からThermal softeningを受けた岩石の体積が多い。(Melosh,1989)

⇒その挙動がクレーター周囲の岩石の挙動を支配している。



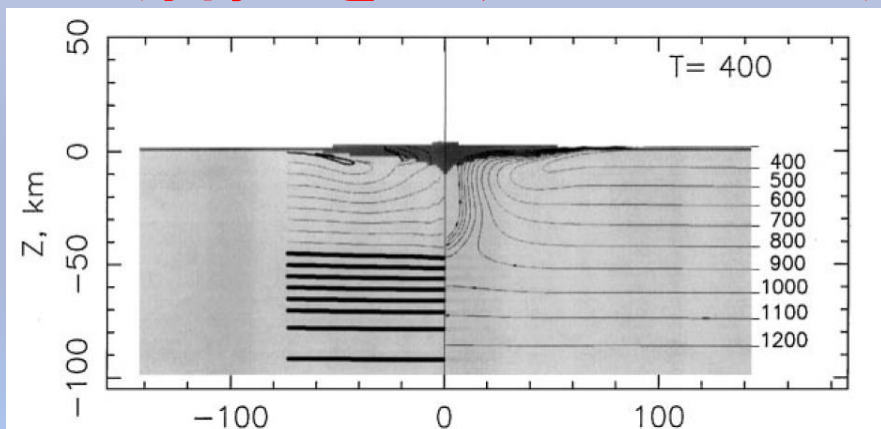
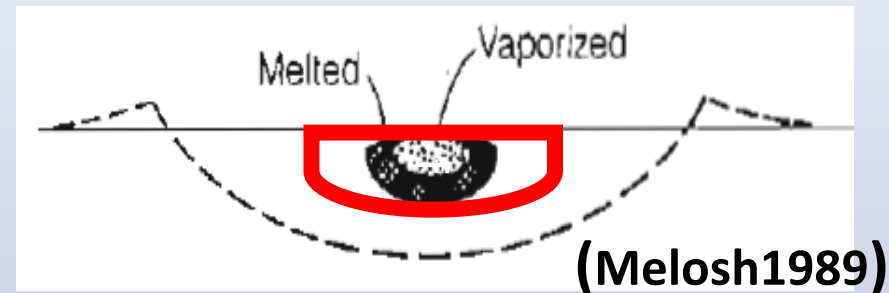


# Thermal softening (O'Keefe & Ahrens (1993, 1998))

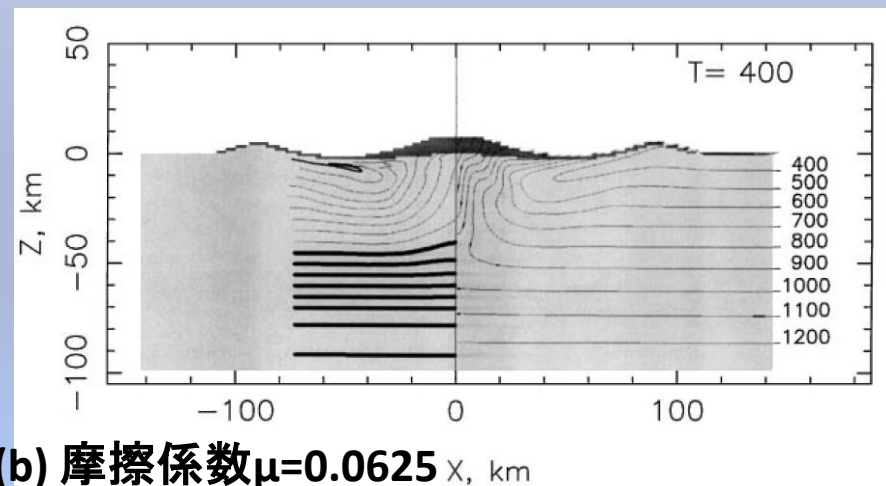
## Thermal softening の欠点

- 小さいクレーター(直径200km以下)の時に衝突による **Thermal softening の効果が小さい.** (Melosh,1989)
- Sudbury craterサイズのThermal softeningを考慮した計算結果では、摩擦がクレーター形状の修正段階を支配する結果を示す。(Ivanov and Deutsch,1998)

↳ Thermal softeningのみだとrimから岩石が崩れだけ、中央丘が出来るときは、人工的に摩擦定数を下げなくてはならない。⇒ **摩擦力を下げるプロセスが必要**

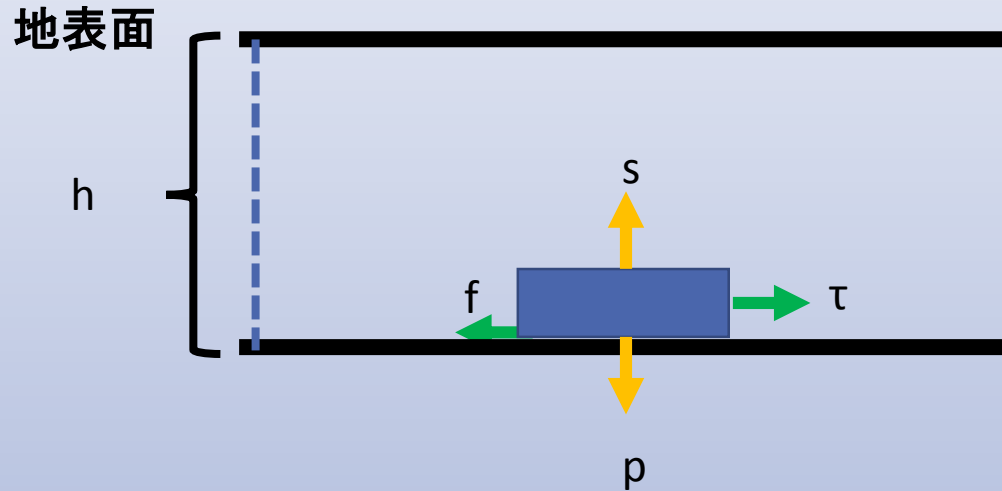


(a) 摩擦係数 $\mu=0.25$



(b) 摩擦係数 $\mu=0.0625$  X, km

# 地滑りが起こる条件



$\tau$ :せん断応力

$\mu$ :摩擦係数

$f$ :内部摩擦力

$s$ :圧力変動

$\tau_{static}$ :静的な状態で地滑りを起こす  
応力

- 圧力変動が起きていない時の地滑りが起こる条件

$$\tau > \tau_{static} = \mu p$$

## Acoustic fluidization

衝突励起地震による圧力変動が内部摩擦力を下げることで地滑りが起こるプロセス(Melosh,1979)  
(地震による地滑りをクレーターに応用)

- 圧力変動が起きた時の地滑りが起こる条件

$$\tau > \mu(p - s)$$

- 地滑りが起こる必要最低限必要な圧力変動

$$s_c = p - \frac{\tau}{\mu}$$

- 地滑りが起こる条件  $s > s_c$   
(Acoustic fluidizationにおける流動化の条件)

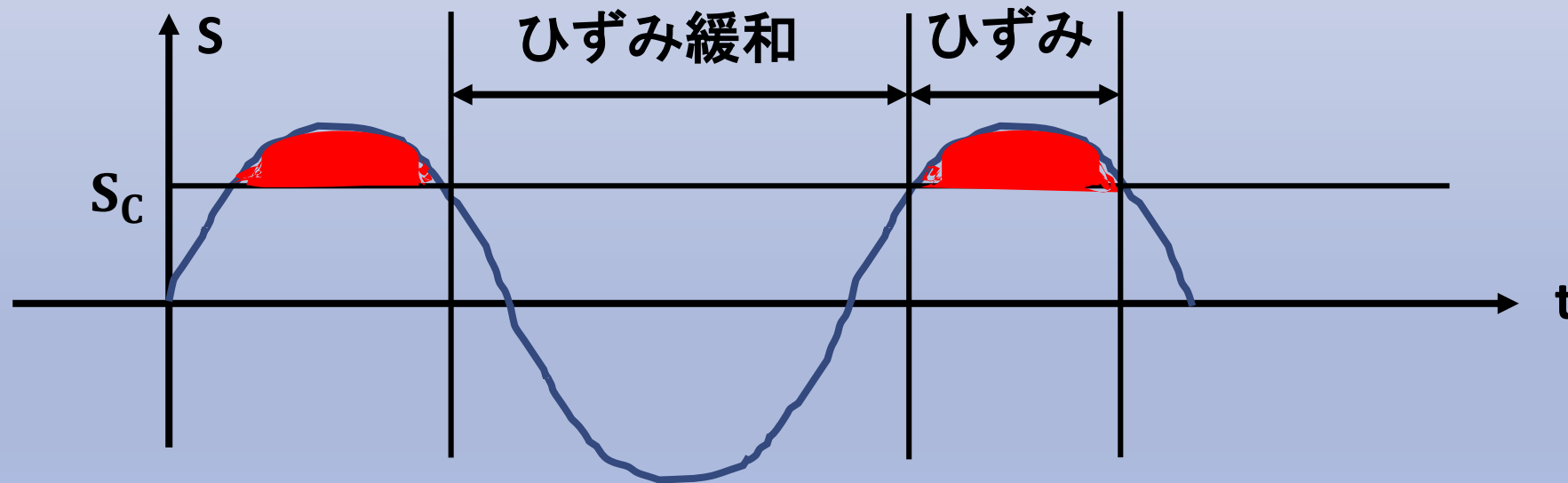
# Acoustic Fluidizationによるクレーター崩壊

Melosh(1979) model: Acoustic fluidizationが定性的に流動化現象が起こるかどうかを検証.

流動化の条件: 全体で正味のひずみが生じるかどうか?

正味のひずみ

= (地滑りが生じている間の“ひずみ”) - (地滑りが生じていない時間に戻る“ひずみ”)



Acoustic Fluidizationで生じる任意の時刻・地点における圧力変動の分布を全体で平均化



# ① 任意時刻において地滑りが起こる $S > S_c$ となる空間割合を考える

※ 空間：衝突励起地震が起こっている領域

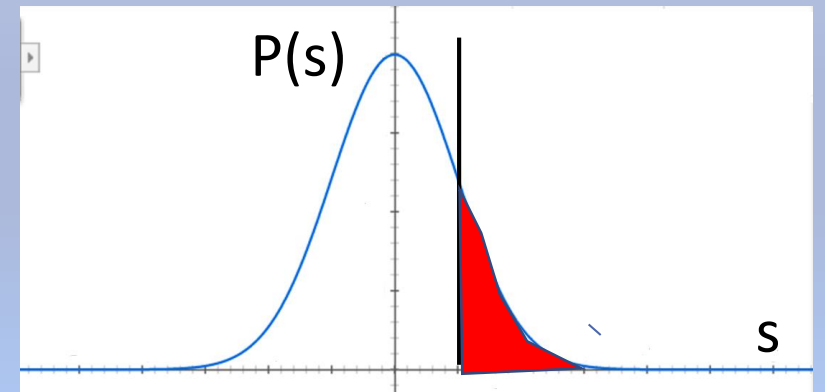
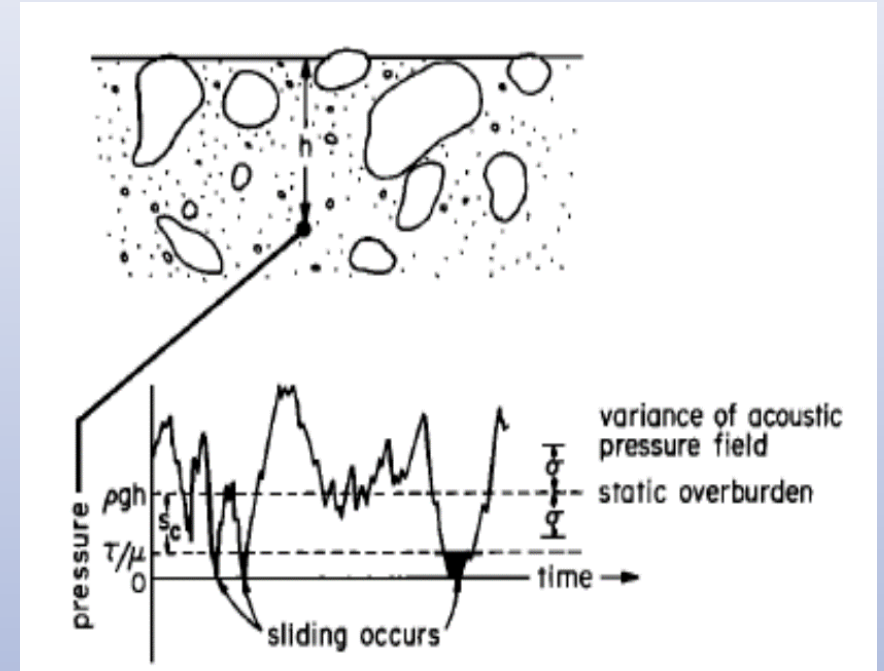
ある地点における圧力振動の時間変化 [Melosh, 1979]

仮定：圧力振幅  $s$  は正規分布に従う

$$P(s)ds = \frac{ds}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{s^2}{2\sigma^2}\right)$$

任意時刻において圧力幅  $S \geq S_c$  となる空間割合

$$\zeta(S \geq S_c) = \int_{S_c}^{\infty} P(s)ds = \frac{1}{2} \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{S_c}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right]$$



## ② $s > s_c$ を経験する中での任意の地点における正味のひずみ

正味のひずみ

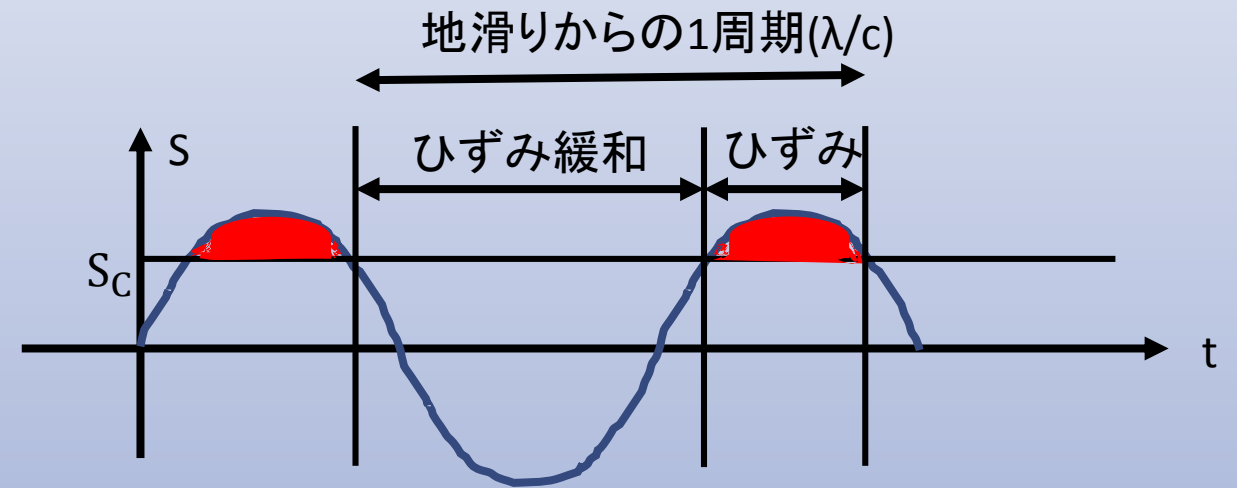
= (地滑りが生じている間の“ひずみ”) - (地滑りが生じていない時間に戻る“ひずみ”)

$$\begin{aligned}\Delta\epsilon_{net} &\cong \frac{\bar{\tau}}{G} \zeta(s_c < s) \\ &= \frac{\bar{\tau}}{\rho c^2} \zeta(s_c < s)\end{aligned}\quad G = \rho c^2 \text{ (剛性率)}$$

$\tau$ : ひずみ中のせん断応力

$\bar{\tau}$ : 地滑りが起こってからの1周期

あたりの平均せん断応力



任意の時間において負荷せん断応力 $\tau$ を支えられる領域の割合は

$$1 - \zeta(s_c < s) \quad \rightarrow \quad \tau = \bar{\tau}(1 - \zeta(s_c < s))$$

### ③任意地点における時間的に平均化された圧力振動を考える

時間的に空間的に平均化された正味のひずみ率  $\frac{\lambda}{c}$ : 振動の時間間隔

$$\dot{\epsilon} = \frac{\Delta\epsilon_{net}}{\frac{\lambda}{c}} = \frac{\tau}{\rho hc} \left[ \frac{1 - \operatorname{erf}\left(\frac{s_c}{\sqrt{2}\sigma}\right)}{1 + \operatorname{erf}\left(\frac{s_c}{\sqrt{2}\sigma}\right)} \right]$$

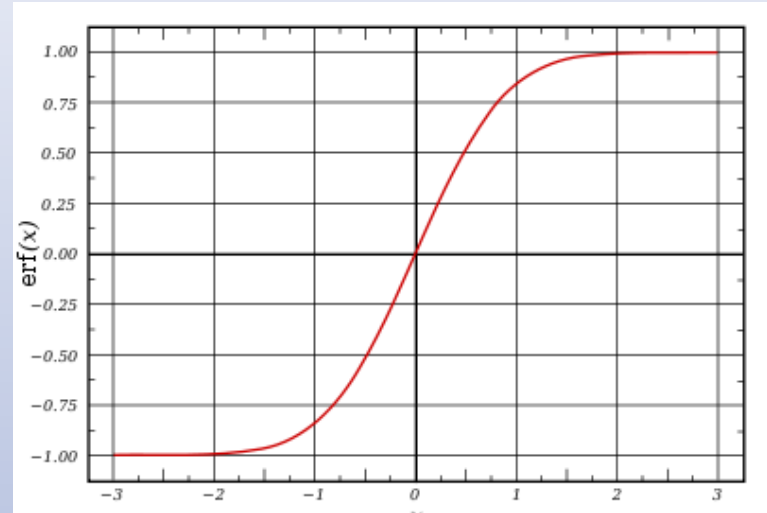
計算を簡略化するために

せん断応力と圧力場の強度を規格化した無次元量

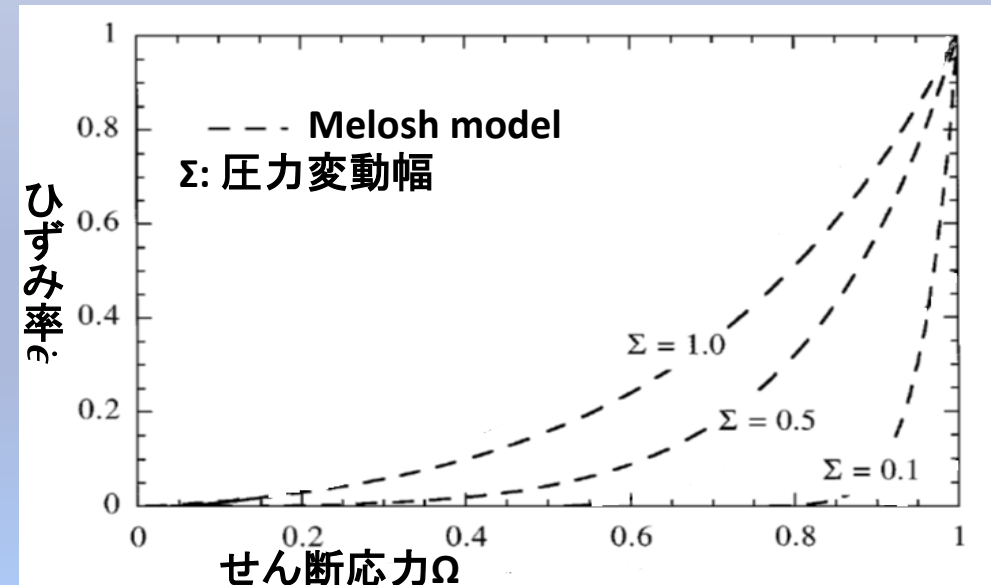
$$\Omega = \tau / \tau_{static} \quad \Sigma = \sigma / s_c$$

を代入

$$\dot{\epsilon} \approx \frac{\tau}{\rho \lambda c} \left[ \frac{2}{\operatorname{erf}(\chi)} - 1 \right]^{-1} \quad \chi = \frac{1 - \Omega}{\Sigma}$$



誤差関数



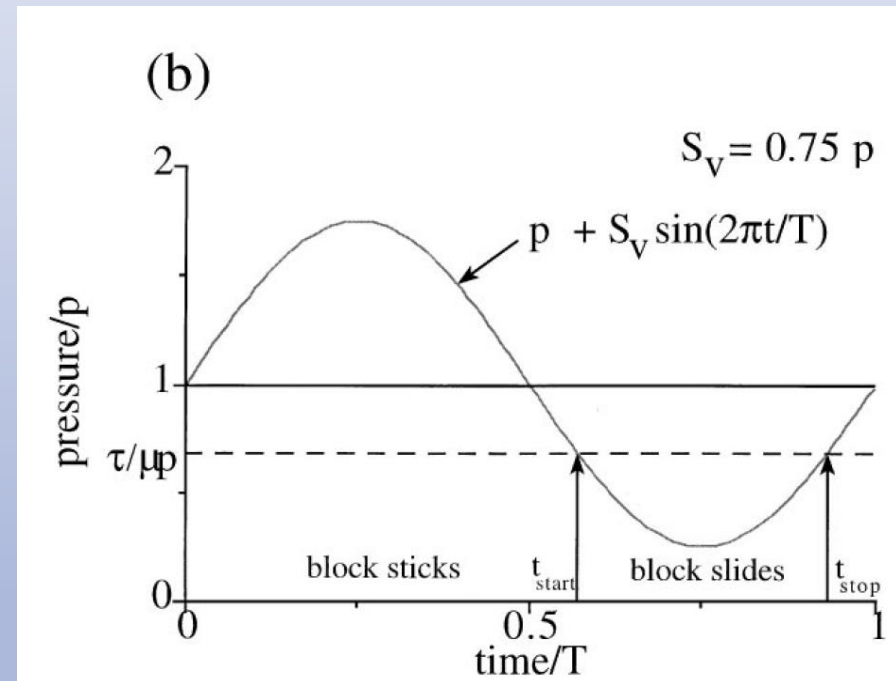
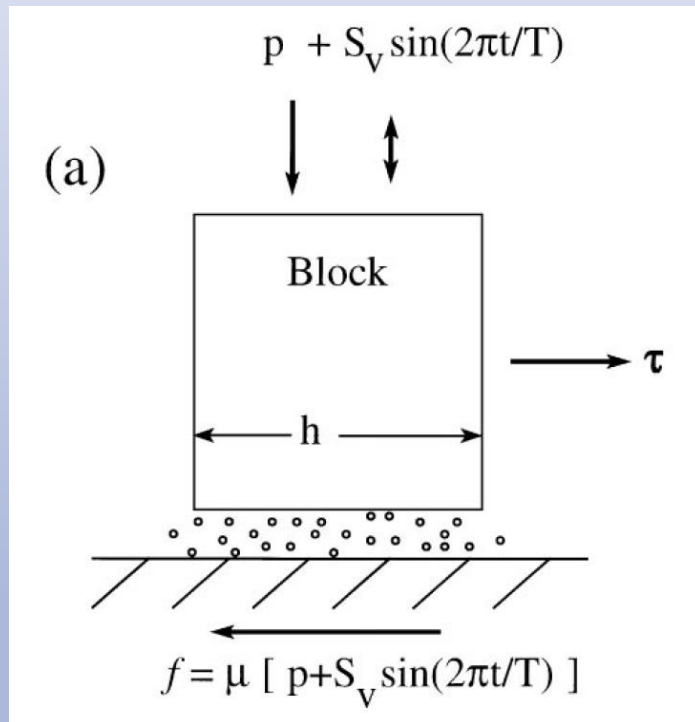
全体の時間的、空間的に平均したひずみ率を求めた。

# Block Model

Block modelの目的:

Melosh(1979)modelは計算が複雑なので、数値計算に取り入れるは困難

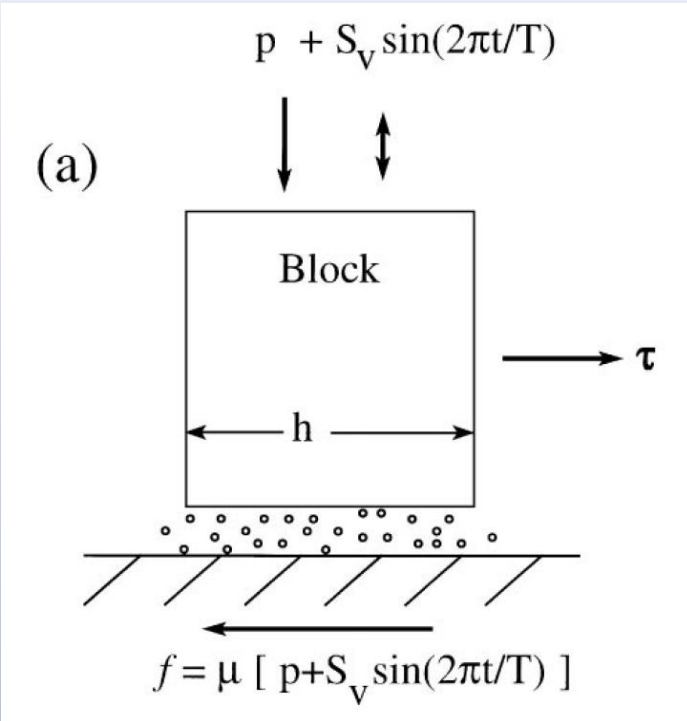
⇒さらに簡単なmodelを考える.



$h$ :ブロックの長さ,  $\tau$ :せん断応力  
 $\mu$ :動摩擦係数,  $S_v$ :振動の振幅

各地点のある大きな岩石が1周期 $T$ 中にどのような条件で滑るかを想定する.

# Block Model(計算)



## 横軸の運動方程式

$$(\rho h)\ddot{\delta} = \tau - \mu(p + s_v \sin \omega t)$$

↓  $\delta$ を2回積分してブロックの変位量を計算

$$\delta = \int_{t_1}^{t_2} \int_{t_1}^t -\frac{\mu p_v}{\rho h} (\sin \omega t + \chi) dt$$

$$= \frac{2(\tau - Y_B)}{\rho h \omega^2} \cos^{-1} \chi \left[ \sqrt{\frac{1+\chi}{1-\chi}} - \frac{\chi}{1-\chi} \cos^{-1} \chi \right]$$

$$\chi = (1 - \Omega) / \Sigma$$

$$\Sigma = \sigma / s_c$$

$$\Omega = \tau / \tau_{static}$$

P圧力

h:ブロックの長さ

$\tau$ :せん断応力

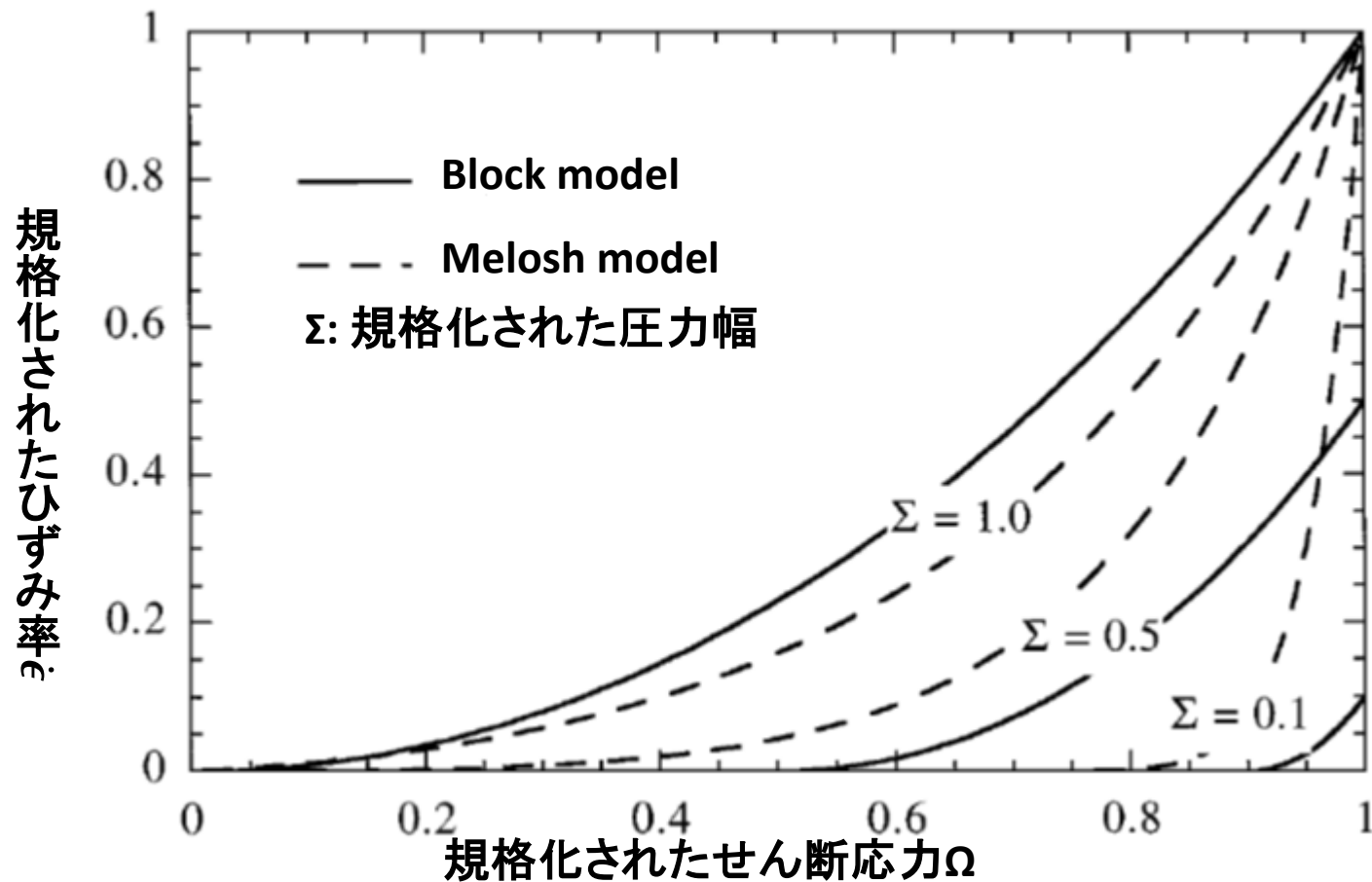
$\mu$ :動摩擦係数,

$s_v$ :振動の振幅

↓ 平均ひずみ率の定義:  $\dot{\epsilon} = \frac{\delta}{Th}$

$$\dot{\epsilon} = \frac{(\tau - Y_B)}{2\pi^2 \rho h^2} \cos^{-1} \chi \left[ \sqrt{\frac{1+\chi}{1-\chi}} - \frac{\chi}{1-\chi} \cos^{-1} \chi \right]$$

# Melosh(1979) modelとBlock modelの比較



◆ Block modelは振れ幅の関数でもあるので最大値は振れ幅にも依存されてしまう。

◆ Melosh modelとBlock modelの全体的な挙動は非常に近いことがわかる。

(Melosh modelの数式的特徴がBlock modelにも表れている)



Block modelはMelosh(1979)modelより数値計算に適している。



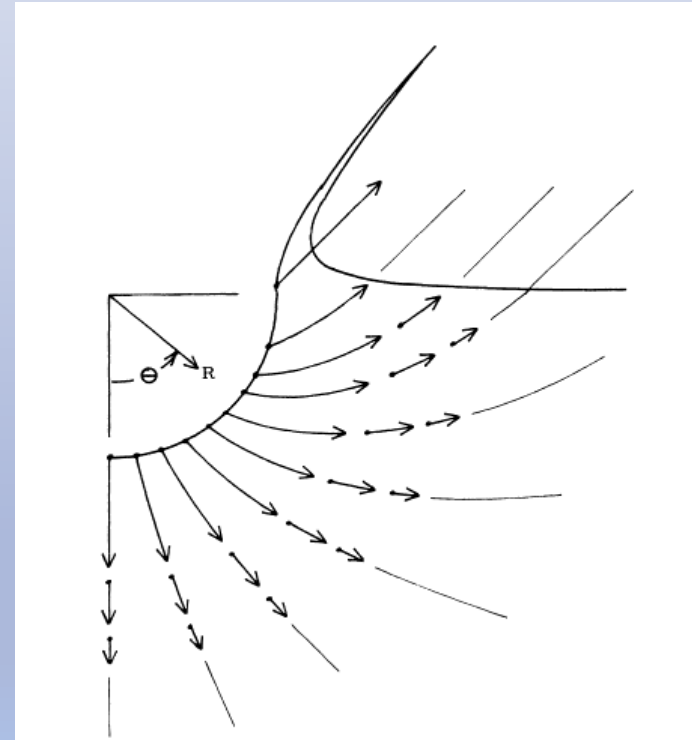
# 数値モデル(条件)

Block model を考慮した数値計算を行う(Ivanov and Kostuchenko 1977)

目的:熱の影響なしに振動のみでどうクレーターが崩壊されているかを可視化する.

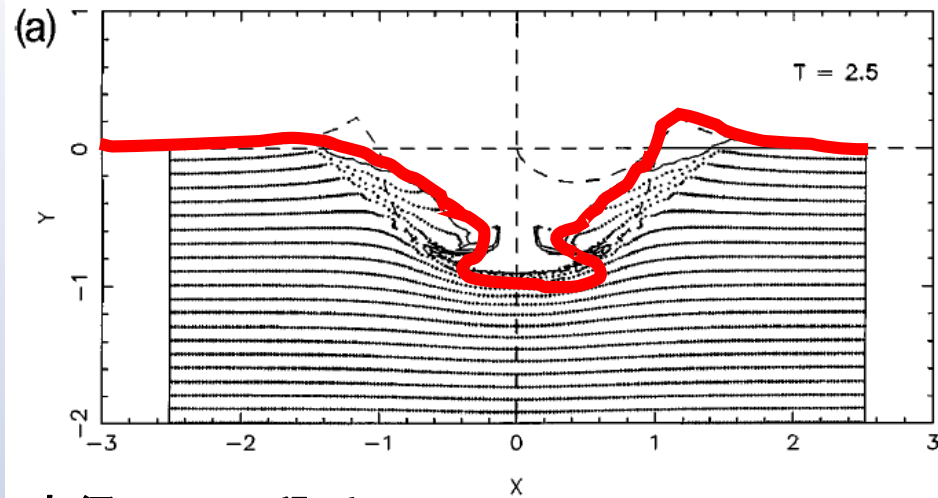
初期条件:単純化のためにZ-モデルに一致する平らな平面で半球状のトランジェントクレーターから推定する。(Maxwell 1977)

仮定:振動強度は衝突地点から距離に2乗に逆比例し、振幅の減衰は時間の指数関数的に起こる。(Anderson, 1987)

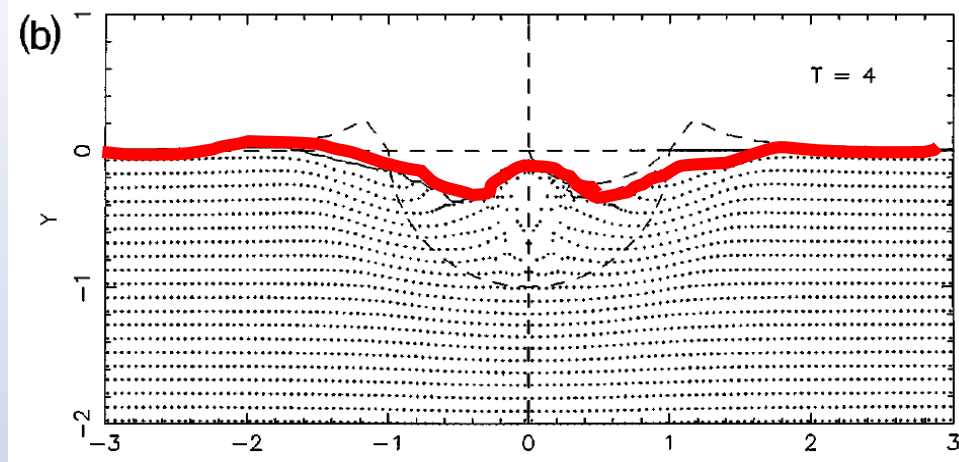


(Maxwell, D. E.,1977)

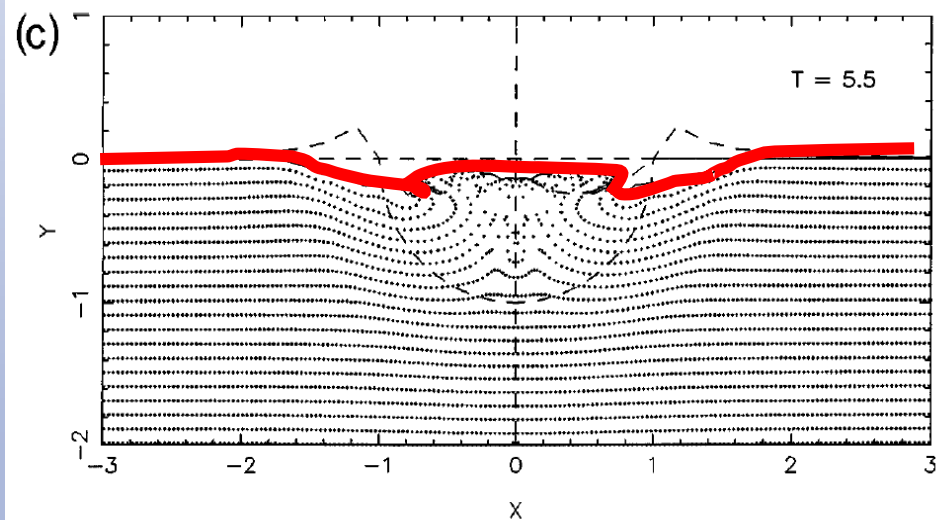
直径~2km, 単純クレーター



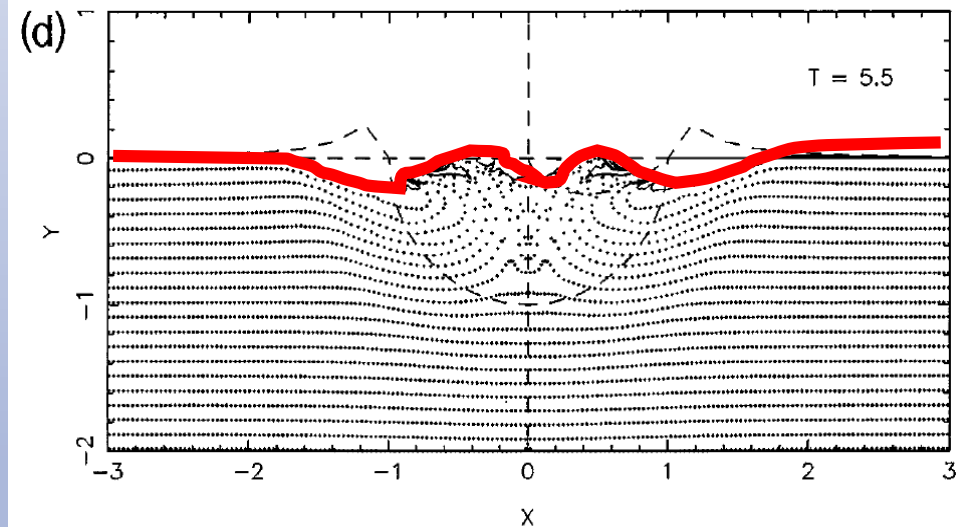
直径~20km, 中央丘



直径~40km, 段丘



直径~80km, 多重リング



- 単純クレーターから複雑クレーターへの移行が再現できる。
- 直径が大きくなるにつれて、クレーターの形状が段階的に変化している。
- Acoustic fluidizationはクレーター形態の多様性を与える主要なメカニズム

# 発表のまとめと問い

- 複雑クレーターの修正段階時、クレーター周辺の岩石が一時的に流動的になるプロセスを検証した。
  - **Acoustic fluidization**
- Melosh modelとBlock modelを検証、比較しAcoustic fluidizationにおけるBlock modelの有効性を確認
- Block modelを考慮した数値モデルが直径に準じて、単純クレーターから複雑クレーターまで再現できることを確認.

 **物質が流動的に作用されるうえで、Acoustic fluidizationの可能性を確認された。**

問:最終的なクレーター形状を決定する支配的な現象は何か？

Acoustic fluidization

(振動によって内部摩擦力を下げ、物質を流体的に振る舞えるから.)