

AF仮説は複雑クレーター形状のどこまでを  
説明できるのか？  
AF仮説の検証方法は？

Hydrocode simulations of Chicxulub crater collapse  
G. S. Collins, H. J. Melosh, J. V. Morgan and M. R. Warner, 2002.

2014/1/21 衝突勉強会

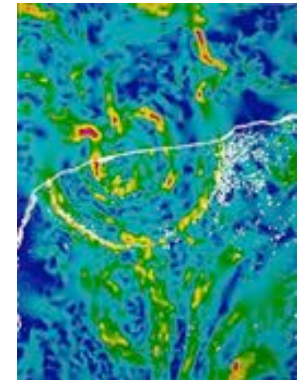
東大・新領域 M1 古賀すみれ

# Chicxulub crater

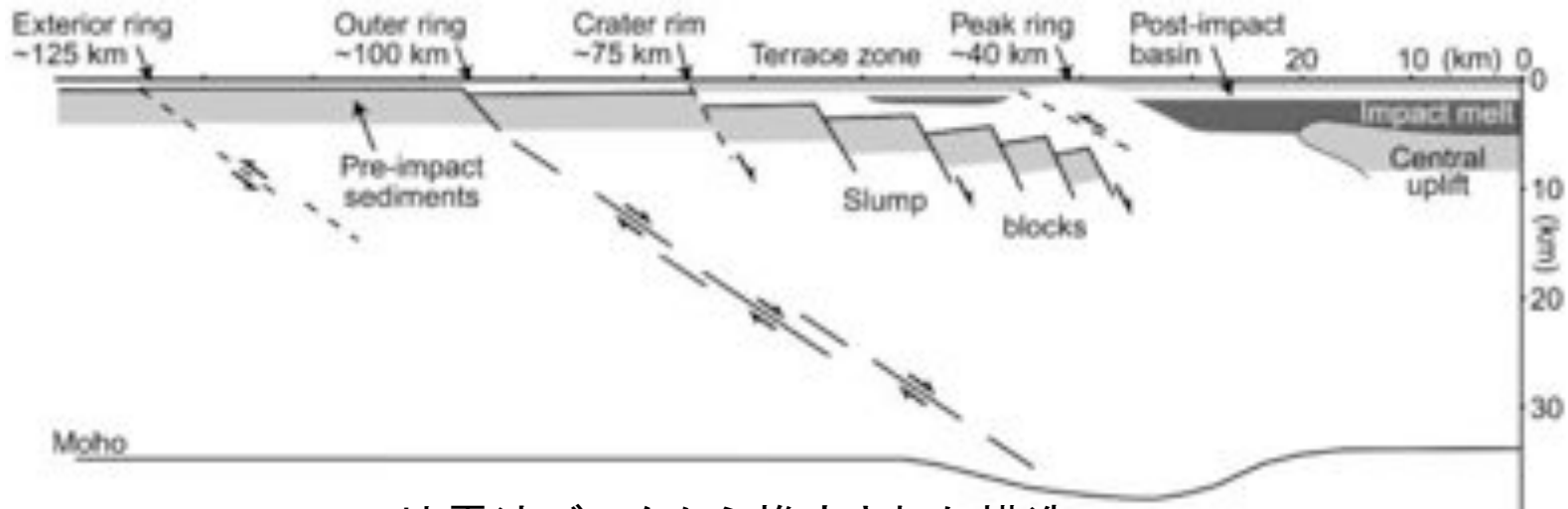
- ◇ 白亜紀末期の生物大量絶滅の原因とされる
- ◇ 直径150km以上
- ◇ 埋没クレーター
- ◇ 複雑クレーター  
浸食が比較的少なく、  
ピークリングが見られる



Chicxulub craterの位置



重力分布

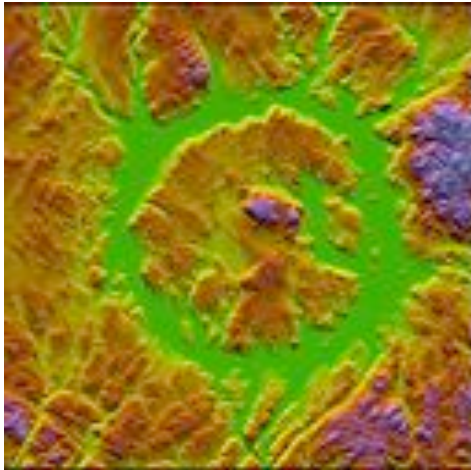


地震波データから推定された構造

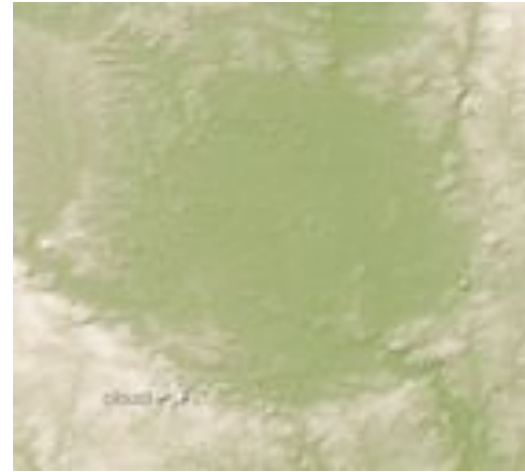
# クレーター形成過程の理解の妨げ

## 対立する特徴を持つクレーター

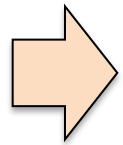
- 狭い中央丘をもつVredefort crater、Manicouagan crater
- 広い基盤岩をもつPopigai crater、Ries crater



Manicouagan crater  
高度分布



Ries crater  
高度分布



Chicxulub crater形成の対立するモデル  
(Pilkintigton et al. 1994、Sharpton et al. 1996)

# 紹介論文の目的

巨大衝突クレーター形成のさらなる理解のために  
数値シミュレーション結果と地震波データから  
導かれる力学モデルを統合する

## 手法

チクシュループクレーターの崩壊を再現する  
流体シミュレーション



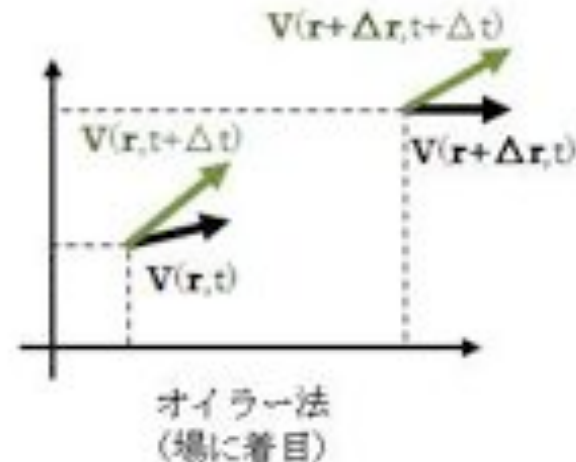
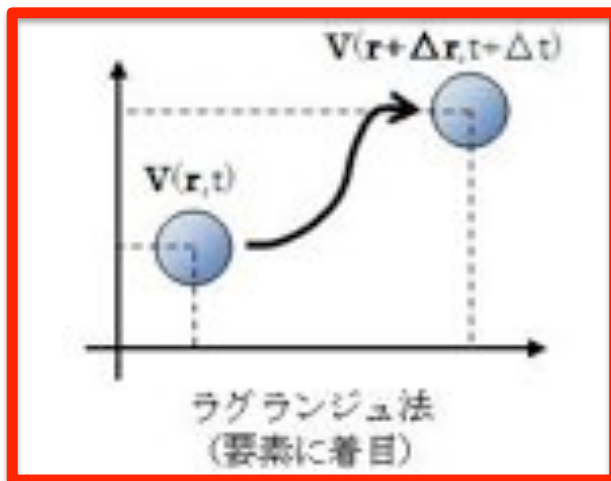
チクシュループクレーターの地震波データによる  
観測形状と比較

# シミュレーションの手法 概略

- ◇ 使用したコード、方法  
変更したSALE、ラグランジュ的方法、Block-model
- ◇ 初期条件  
トランジェントクレーター  
衝突体減速、初期掘削は最終形状への影響は小さく、お椀型クレーターの崩壊が最終形状決定に重要 (Melosh & Ivanov 1999)
- ◇ 崩壊過程  
重力による崩壊と物質強度との競合
- ◇ 終了条件  
各場所で、応力が物質強度を下回ったとき計算終了

# ラグランジュ的方法

- ◇ 計算の参照フレームは物質の流れと共に移動
- ◇ 長所  
歪められる自由表面の記述が可能
- ◇ 短所  
物質の変形が大きくなりすぎると計算が破綻



# シミュレーションの手法 詳細

- ◇ 初期条件のトランジェントクレーター
  - ・ MaxwellのZ-model(  $Z = 3$  ) → 物質の変位、圧力
  - ・  $D = 100 \text{ km}$
  - ・ 衝突の衝撃波による高圧は完全に散逸
  - ・ 物質は静止 : シミュレーション1  
(速度場を与える場合も実行 : シミュレーション2)

- ◇ 崩壊過程
  - ・ 不安定なトランジェントクレーターの重力による崩壊
  - ・ 衝突後のターゲットの物質強度
  - ・ Bingham流体
    - (応力  $>$  物質強度 → 物質はニュートン流体
    - (応力  $<$  物質強度 → 計算終了

- ◇ 物質強度  
Acoustic fluidizationによって弱められた降伏強度 $Y$

# Acoustic fluidization

## 前提

広がるShock frontによって作られた高振幅、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し、粒状媒体の破片間の摩擦抵抗を減少させる

## シミュレーションへの組み込み方

圧力振動振幅 $p_{vib}$ に依存する降伏強度 $Y$

$$Y = \begin{cases} \mu[p - p_{vib}(r,t)] & (p_{vib} < p) \\ 0 & (p_{vib} > p) \end{cases} \text{降伏強度は非負}$$

$$p_{vib}(r,t=0) = fp_{shock}$$

$$p_{shock} = p_{max} (a_i/r)^n$$

$$p_{max} = \rho v_i^2 / 4$$

$$p_{vib}(r,t) = p_{vib}(r,t=0) \exp(-t / \tau_v)$$

→ 振幅大：降伏強度小

$\mu$ ：内部摩擦係数

$r$ ：衝突点からの距離

$t$ ：時刻

$p$ ：圧力、 $\rho$ ：密度

$p_{shock}$ ：ピークショック圧

$p_{max}$ ：衝突点近傍でのショック圧

$\tau_v$ ： $p_{vib}$ の減衰緩和定数

$v_i$ ：衝突速度

## ピーク圧力 $p_{max}$ の式導出

• Hugoniot方程式  $\frac{\rho', p'}{\rho, p} \begin{matrix} \uparrow u \\ \uparrow u' \end{matrix}$   
 $p' - p = \rho u' U$

• 多くの物質で

$$U = c + S u' \quad (S \sim 1, c: \text{音速})$$

$$U \gg c \text{ の時 } U \sim u'$$

• 衝突体とターゲットが同物質

$$\rightarrow u' = v_i / 2$$

$$p' \gg p \text{ を用いると } p' = \rho v_i^2 / 4$$

$\rho v_i$ はChicxulubに適した定数を与える



# シミュレーションの流れ まとめ

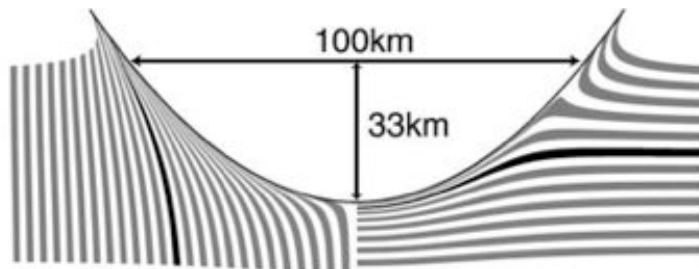
初期条件 Z-modelによりお椀型クレーターの形状決定 ( $D, Z(=3)$ 固定)  
 その形状で静止した物質から計算開始  $D$ :トランジェントクレーター直径  
 (または速度場を与える)

降伏強度  $Y$  計算 Acoustic fluidizationで  $Y$  計算 (パラメタ:  $\rho, v_i, f, \mu, \tau_v$ )

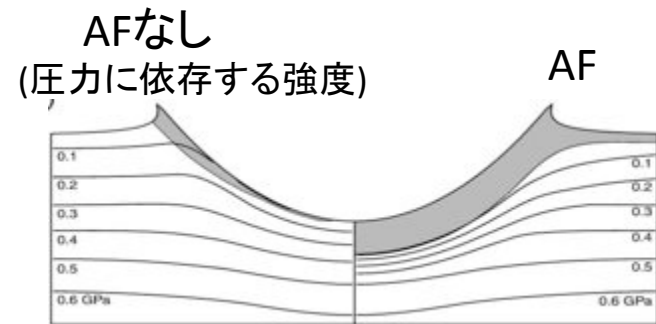
$$Y = \begin{cases} \mu[\rho - \rho_{vib}(r,t)] & (\rho_{vib} < \rho) \\ 0 & (\rho_{vib} > \rho) \end{cases}$$

重力駆動応力  $\sigma$  計算 ( $\rho$ )

$Y$ と  $\sigma$ の比較  $Y > \sigma \rightarrow$  ニュートン流体として運動計算 ( $\eta$ )  
 $Y < \sigma \rightarrow$  計算終了、物質は停止。

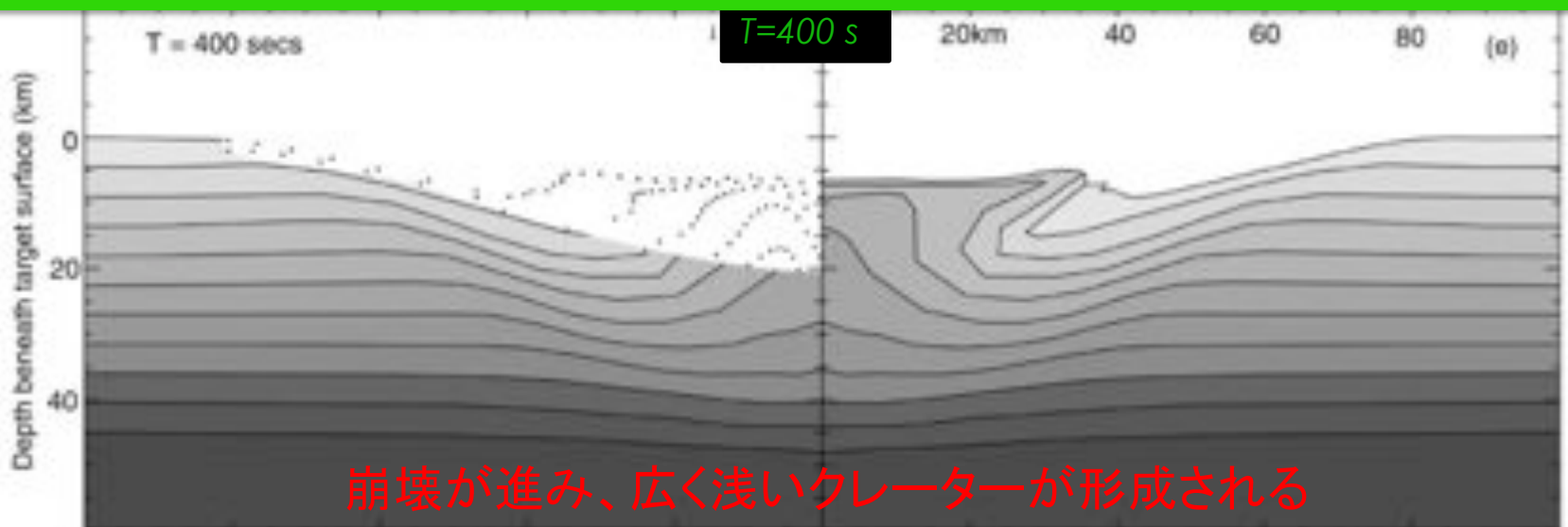
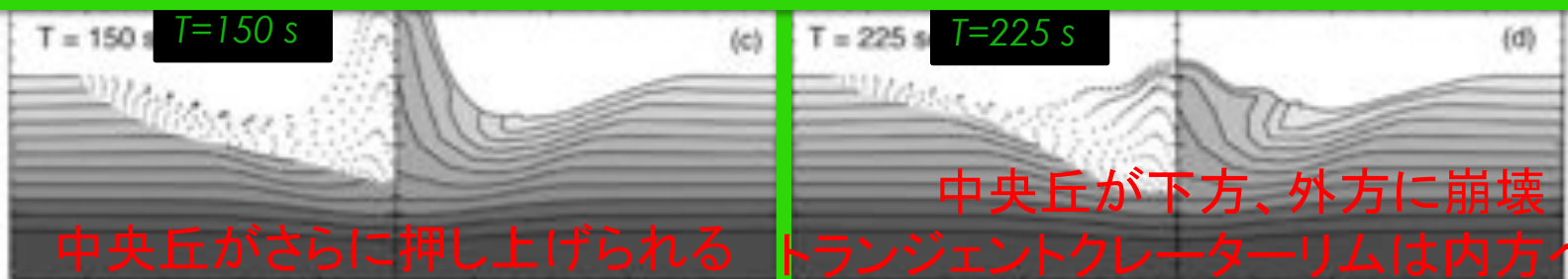
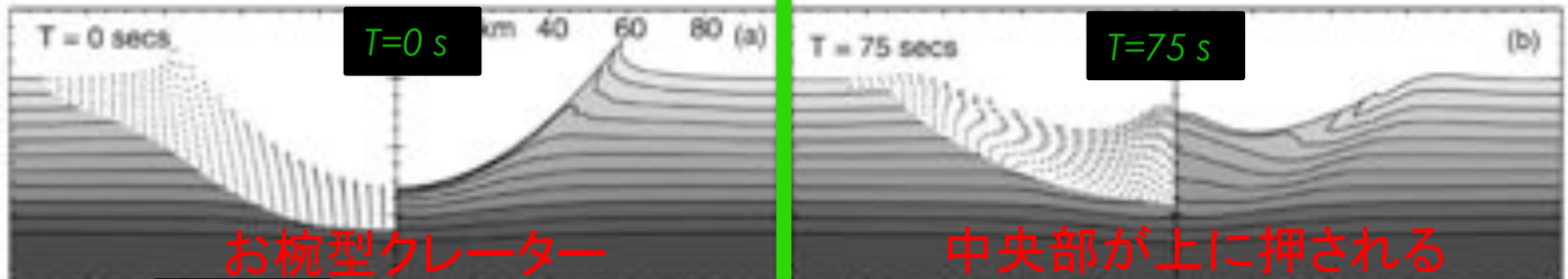


Z-modelで計算した初期形状

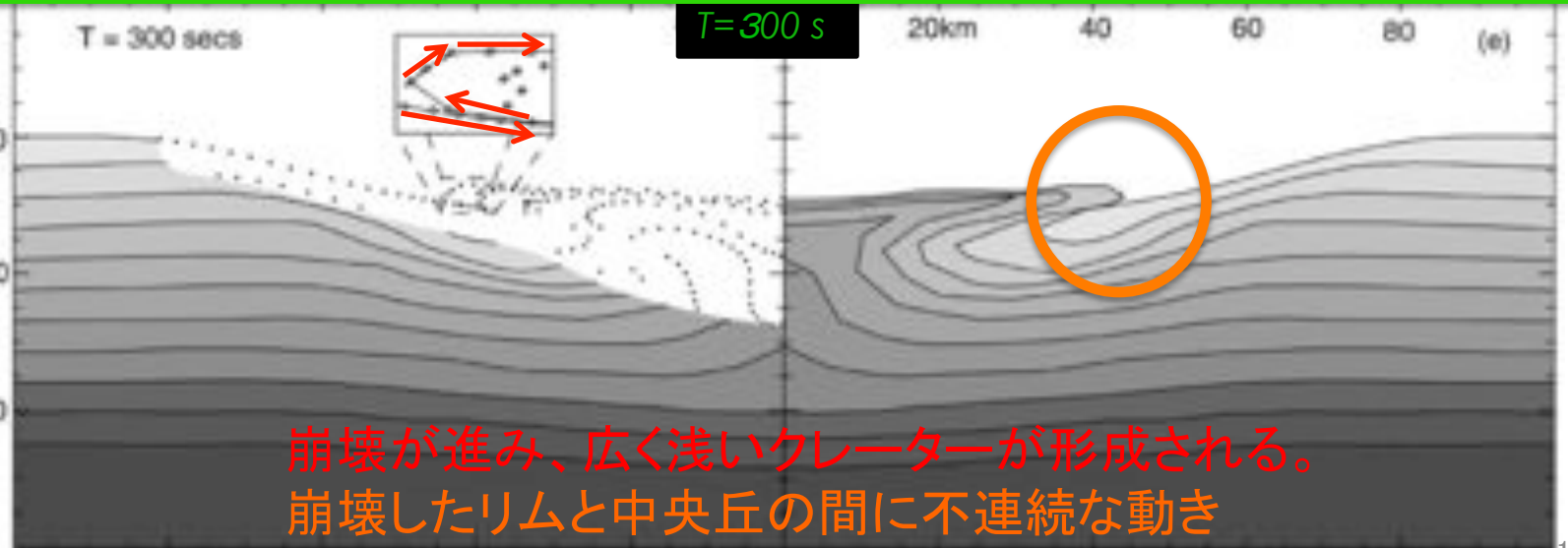
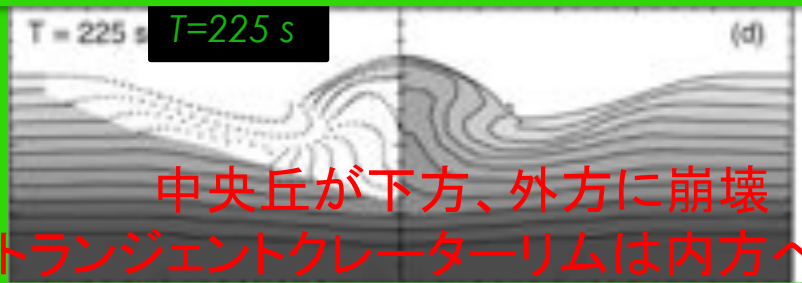
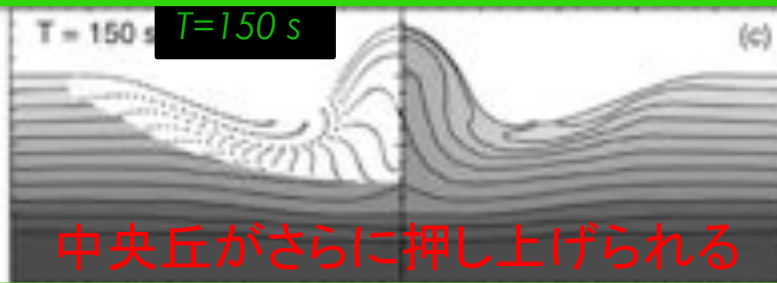
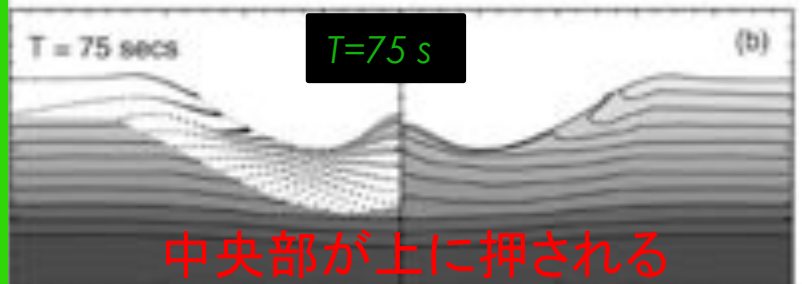
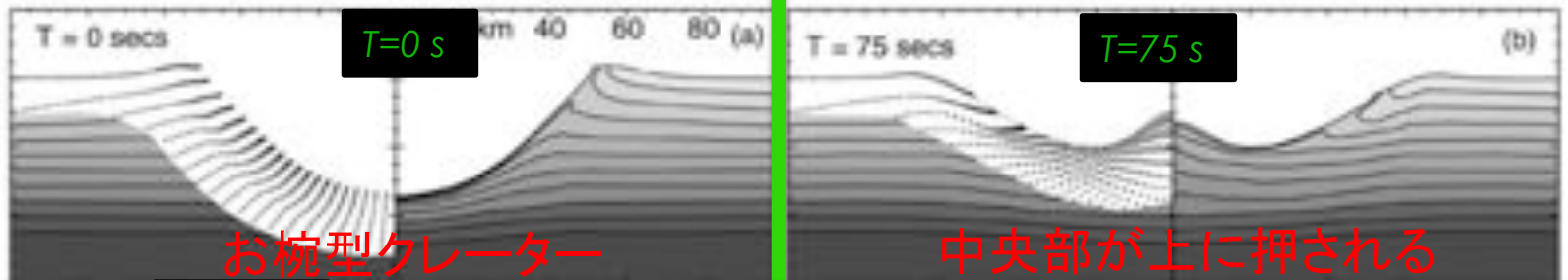


流動域

# 結果 シミュレーション1



# 結果 シミュレーション2



# 結果 パラメタの影響

- ◇  $a_j, v_j, f$  : fluidizeされる領域の大きさに重要。  
fの値により1-2トランジエントクレーター半径の領域で変化。  
 $f$ 大 → fluidizeされる領域大
- ◇  $\tau_v$  : 最終形状に重要。  
 $\tau_v$ 大 → 圧力振動の減衰小 → 形成が進む  
 $\tau_v$ が最終形状(中央丘、ピークリング)を決定。
- ◇  $\eta$  : 崩壊のダイナミクス  
 $\eta$ 大 → 中央丘の高さ、崩壊速度小

# 観測との比較 (1/3)

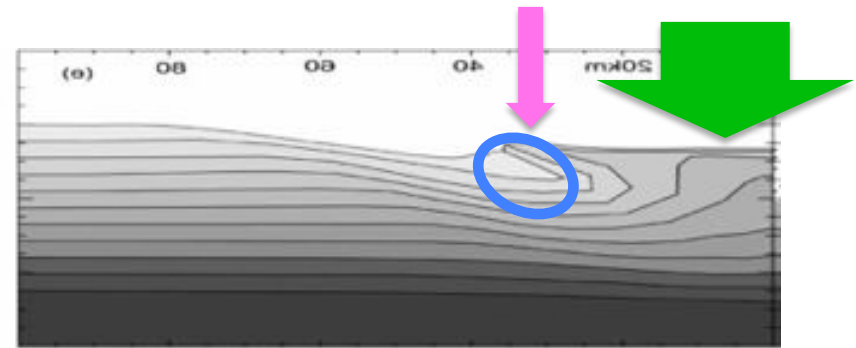
## 直接再現できている点

- ✧ 広く浅い最終クレーター
- ✧ ピークリング
- ✧ 元々トランジェントクレーターの外側、浅くにあった崩落した物質は、最終的にピークリング外よりの下に。
- ✧ 凹型の中央丘

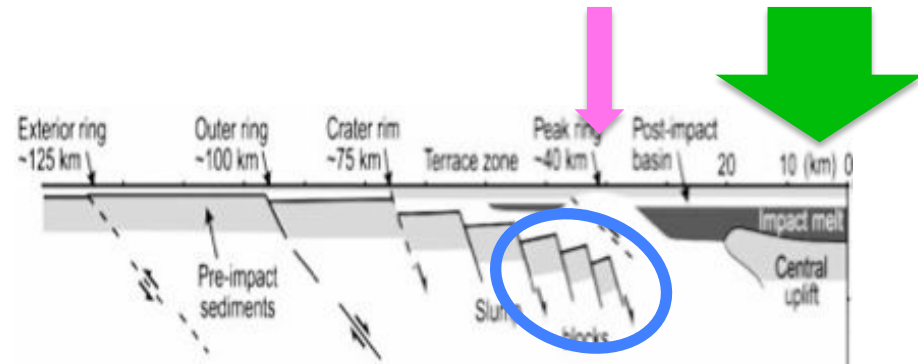
## AFだけでは説明できない特徴

中央丘上部は融けると期待される。  
崩壊した中央丘とリムの間にはメルトができるはず。

⇔ インパクトメルト (観測)



AFシミュレーション結果

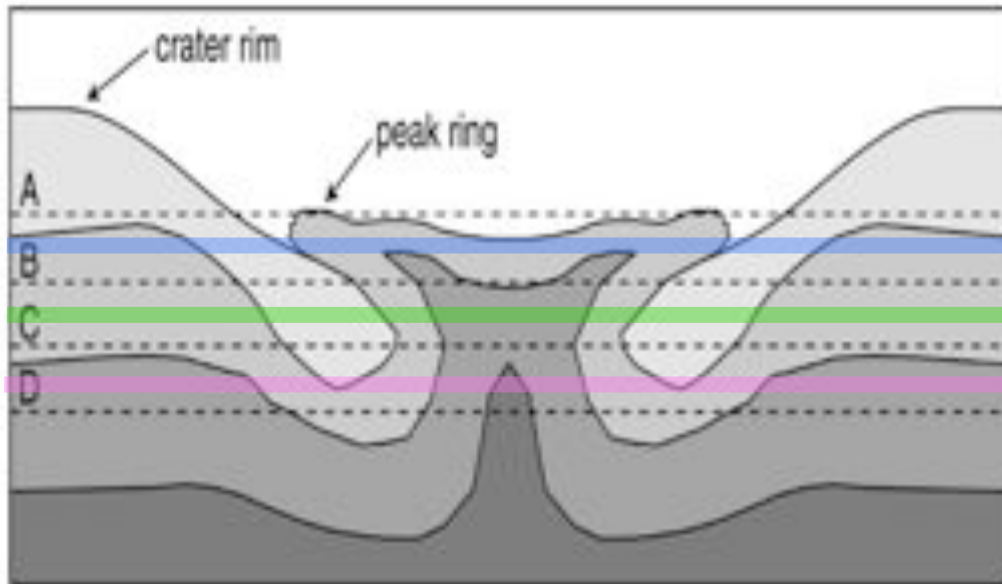


Chicxulub地震波データからの推定構造

# 観測との比較 (3/3)

## 対立する観測地形に対する統一的説明

水平面を取り除かれる浸食を考えると. . .



広い層積基盤岩

準現地性の基盤岩をもつ

Popagai crater (Masaitis+1999,  
Visnevsky & Montanari 1999)

狭めの基盤岩と周りの若い層  
中央丘が浸食されたと考えられ  
(Grieve & Theriault 2000)、凹型褶曲層に  
囲まれた (McCarthy+1990) Vredefort  
衝突地形

狭い中央丘

環状のメルトシートに囲まれた  
狭い中央丘をもつ Manicouagan  
crater

# シミュレーションの限界

- ◇ このBlock-modelで扱ったAcoustic fluidizationは不完全。  
Acoustic振動振幅が物質の流動に依存しない。
- ◇ このシミュレーションではWeekeningメカニズムとして圧力振動だけを使用。  
熱によるWeekeningも存在するはず。

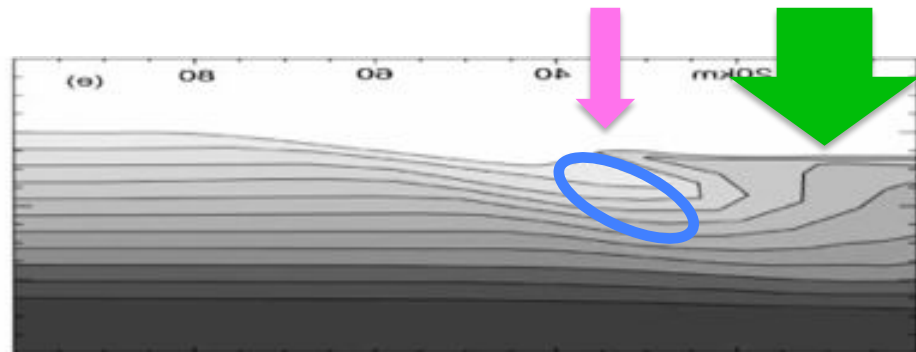
数値計算への非線形方程式の組み込みの困難による

# 問いに対する答え

問1：AF仮説は複雑クレーター形状のどこまでを説明できるのか？

◇ 比較的浸食の少ない複雑クレーター-Chicxulub craterの多くの特徴を説明できる

- ・ 広く浅い形状
- ・ ピークリング
- ・ ピークリング下の逆転した層序
- ・ 中央丘の形状



AFシミュレーション結果



# 問いに対する答え

## 問2：AF仮説の検証方法は？

AF仮説の予測では、ターゲット表面近傍の物質の動きは鉛直だけでなく水平方向にも大きく動く。その結果、深くから掘削された物質が覆われてピークリングを作る。

更なる地震波実験と陸地・沖合両方の掘削で地下構造を明らかにし、予測と比較することで検証できる。