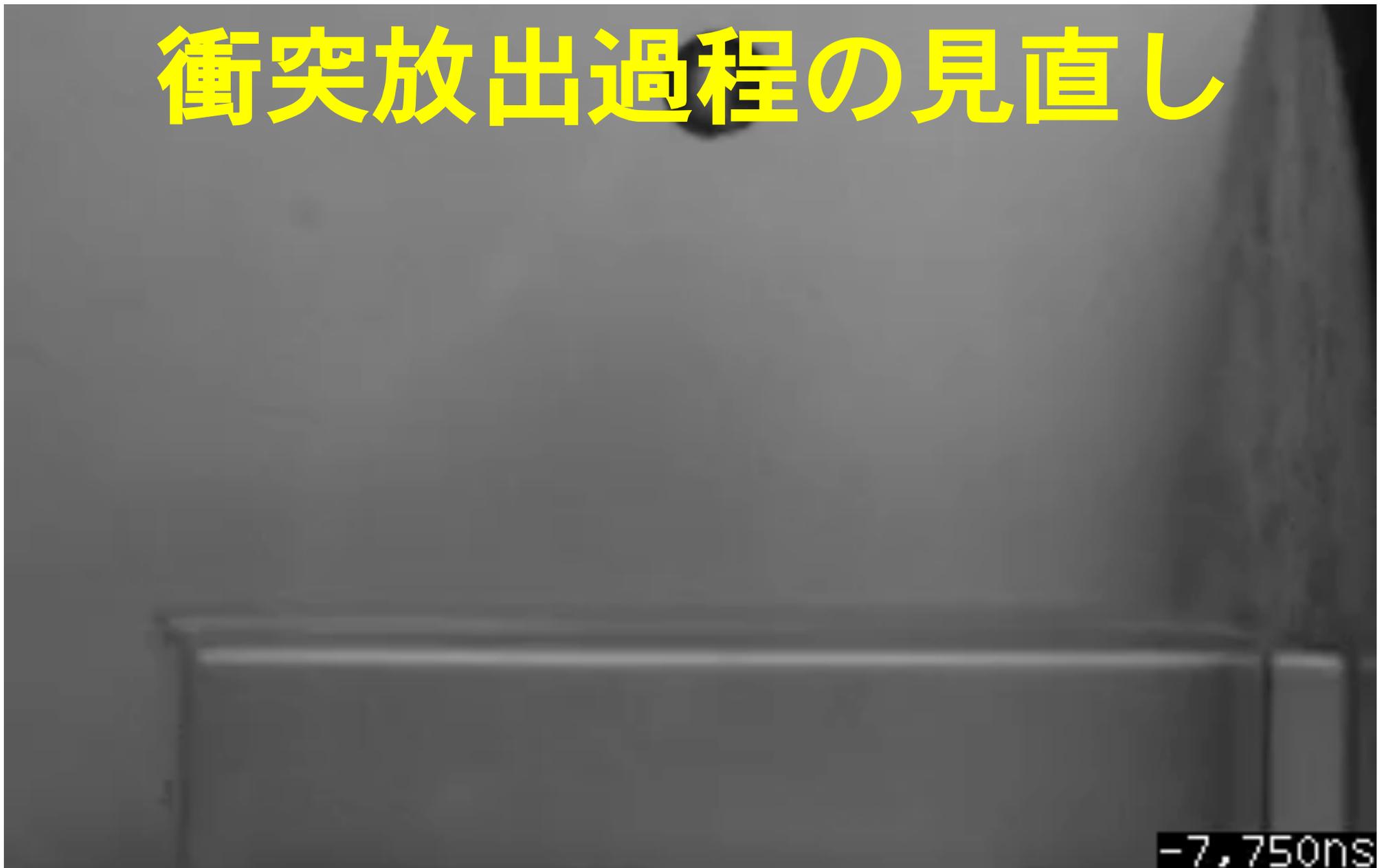


# 衝突放出過程の見直し



黒澤耕介 (千葉工業大学 惑星探査研究センター)

# 共同研究者のみなさま

**千葉工業大学:** 岡本尚也, 長岡洋一, 千秋博紀,  
(4月から宇宙研) (宇宙線研PDを経て明星電気)  
和田浩二, 松井孝典

**東京工業大学:** 玄田英典

**東京大学:** 高田智史, 杉田精司  
(地震研)

**宇宙科学研究所:** 長谷川直

# 本日の話

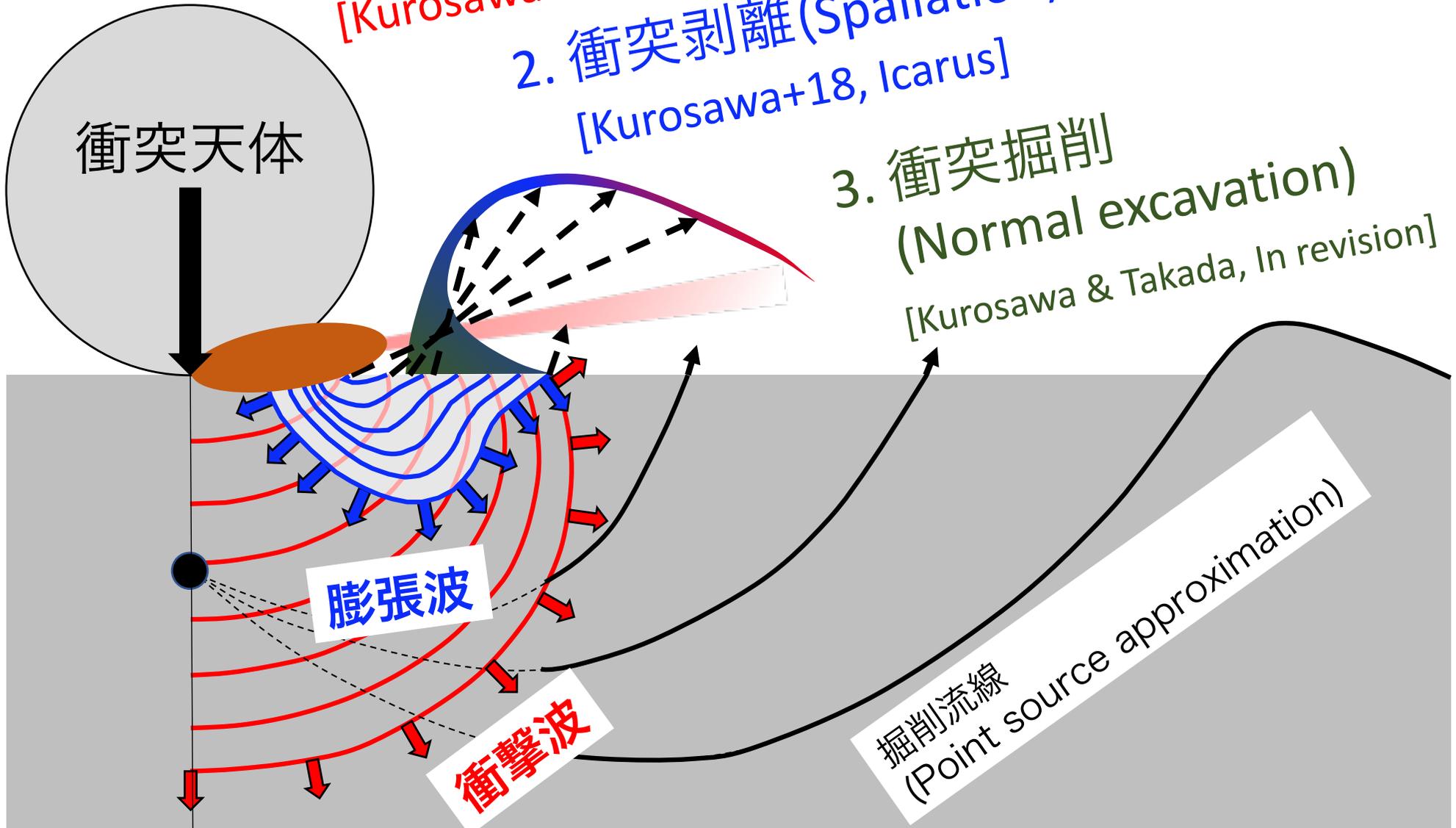
衝突放出に3段階あり.

[e.g., Melosh89]

1. 衝突噴射 (Jetting)  
[Kurosawa+15, JGR]

2. 衝突剥離 (Spallation)  
[Kurosawa+18, Icarus]

3. 衝突掘削  
(Normal excavation)  
[Kurosawa & Takada, In revision]



# 本日の話

衝突放出に3段階あり.

[e.g., Melosh89]

Polycarbonate

-> Polycarbonate plate  
at 4.3 km/s

[黒澤, 岡本, 松井]



# 本日の話

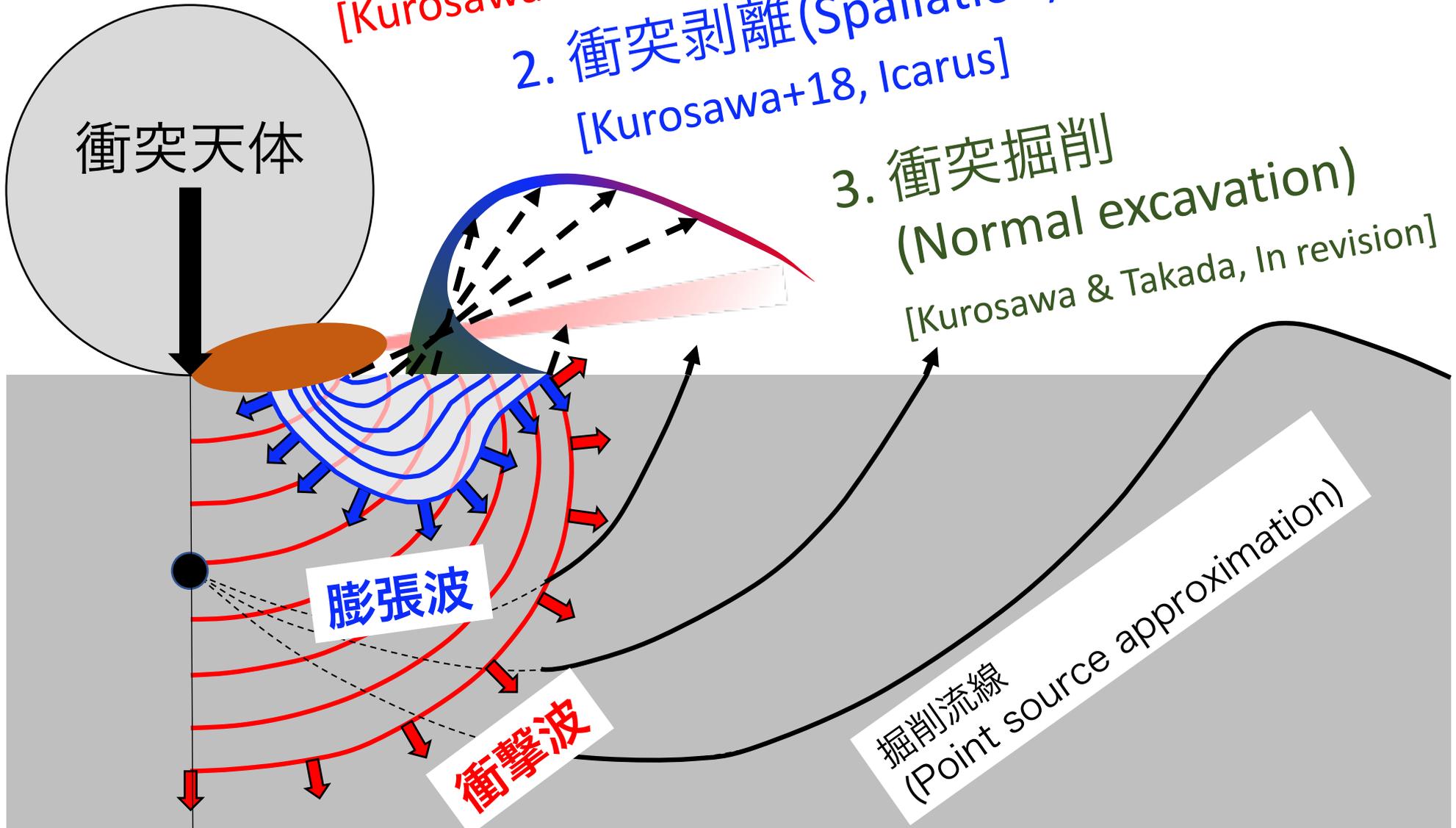
衝突放出に3段階あり.

[e.g., Melosh89]

1. 衝突噴射 (Jetting)  
[Kurosawa+15, JGR]

2. 衝突剥離 (Spallation)  
[Kurosawa+18, Icarus]

3. 衝突掘削  
(Normal excavation)  
[Kurosawa & Takada, In revision]



# 本日の話

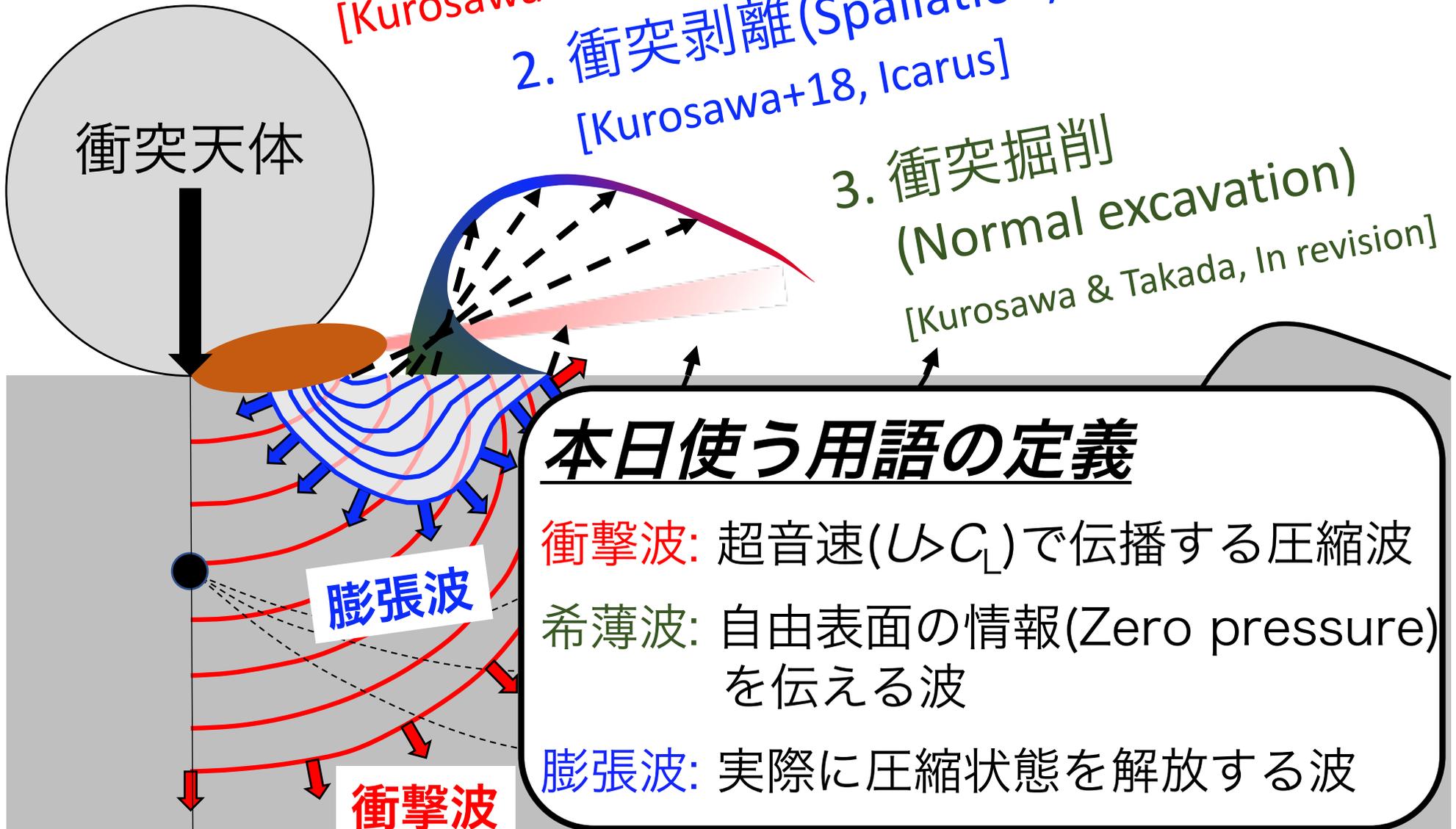
衝突放出に3段階あり.

[e.g., Melosh89]

1. 衝突噴射 (Jetting)  
[Kurosawa+15, JGR]

2. 衝突剥離 (Spallation)  
[Kurosawa+18, Icarus]

3. 衝突掘削  
(Normal excavation)  
[Kurosawa & Takada, In revision]



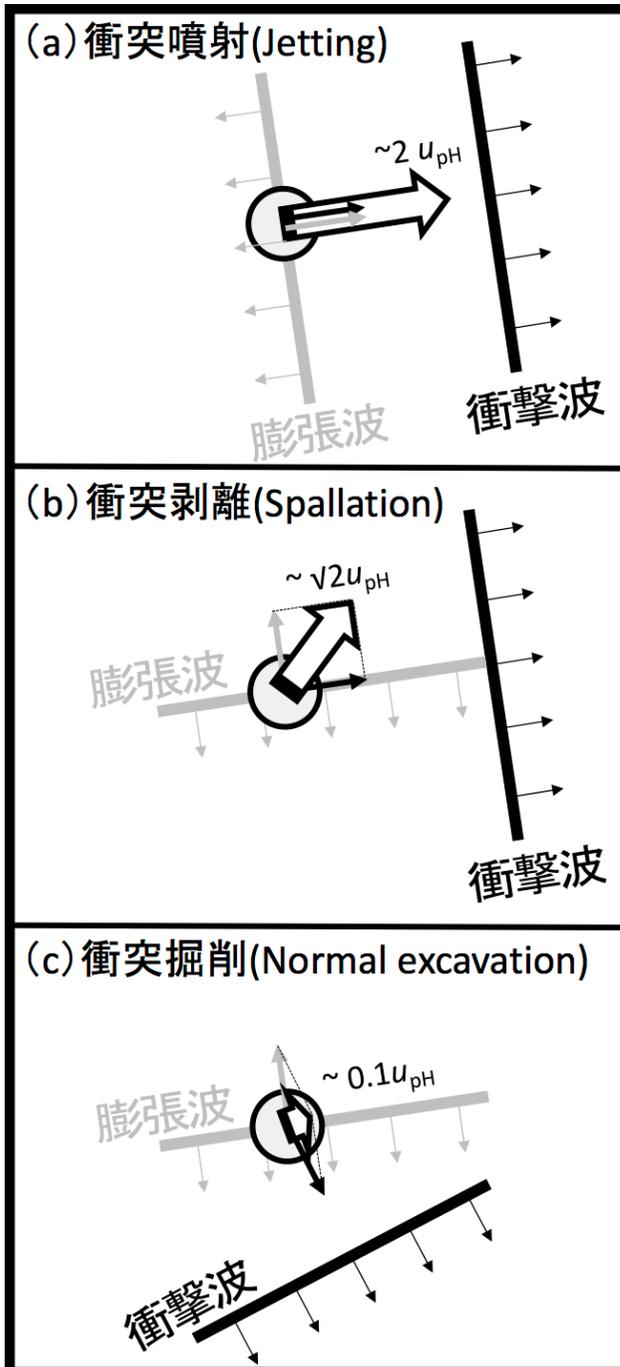
## 本日使う用語の定義

**衝撃波:** 超音速 ( $U > C_L$ ) で伝播する圧縮波

**希薄波:** 自由表面の情報 (Zero pressure) を伝える波

**膨張波:** 実際に圧縮状態を解放する波

# 衝突放出過程の見直しを進行中



## 衝突放出速度を決める要因

[Kurosawa+18, *Icarus*]

1. 衝撃波通過後の粒子速度  $u_{pH}$
2. 衝撃波と膨張波のなす角度
3. 放出物流中の圧縮性

衝突放出を衝撃波と膨張波の干渉の帰結として統一的に理解する.

[黒澤17, 天文月報, を微修正]  
(別刷り, あり☑)

# 衝突放出過程を理解することの重要性

## Jetting (高衝撃圧, 放出速度 > 衝突速度)

- ☆ Tektiteの起源 [Kieffer77]
- ☆ カロンの高い岩石/氷比 [Mckinnon89]
- ☆ Chondruleの起源 [Johnson+15]

## Spallation (低衝撃圧, 放出速度 > 0.5衝突速度)

- ☆ 月・火星隕石の起源 [Melosh84; Vickery&Melosh90; Head+02; Artemieva&Ivanov04]
- ☆ (Litho-)Panspermia [Melosh03; Krijt+17]

## Normal excavation (放出総質量の > 90% を占める.)

- ☆ 惑星表層物質移動 [e.g., Norman+10]
- ☆ 表層熱進化 [Senshu+02]
- ☆ 大気進化 [Sleep&Zahnle98; Kurosawa15]

# 話の流れ

1. 衝撃波と膨張波の干渉
  - a. 衝撃波/膨張波通過後の速度変化
  - b. 幾何学効果の重要性
2. 衝突噴射現象(Impact jetting)
  - a. 高速度衝突実験@PERC
  - b. 従来の理論モデルと改良版モデル
3. 衝突剥離現象(Impact spallation)
  - a. 数値衝突実験 with 2-D iSALE & 3-D SPH
  - b. 後期加速現象の発見
4. 衝突掘削現象(Normal excavation)
  - a. 残留速度による掘削流形成の解析モデル
  - b. 衝突掘削の終焉による過渡クレータ形成

## 衝撃波と膨張波の干渉

- a. 衝撃波/膨張波通過後の速度変化
- b. 幾何学効果の重要性

# 衝撃波/膨張波による速度変化

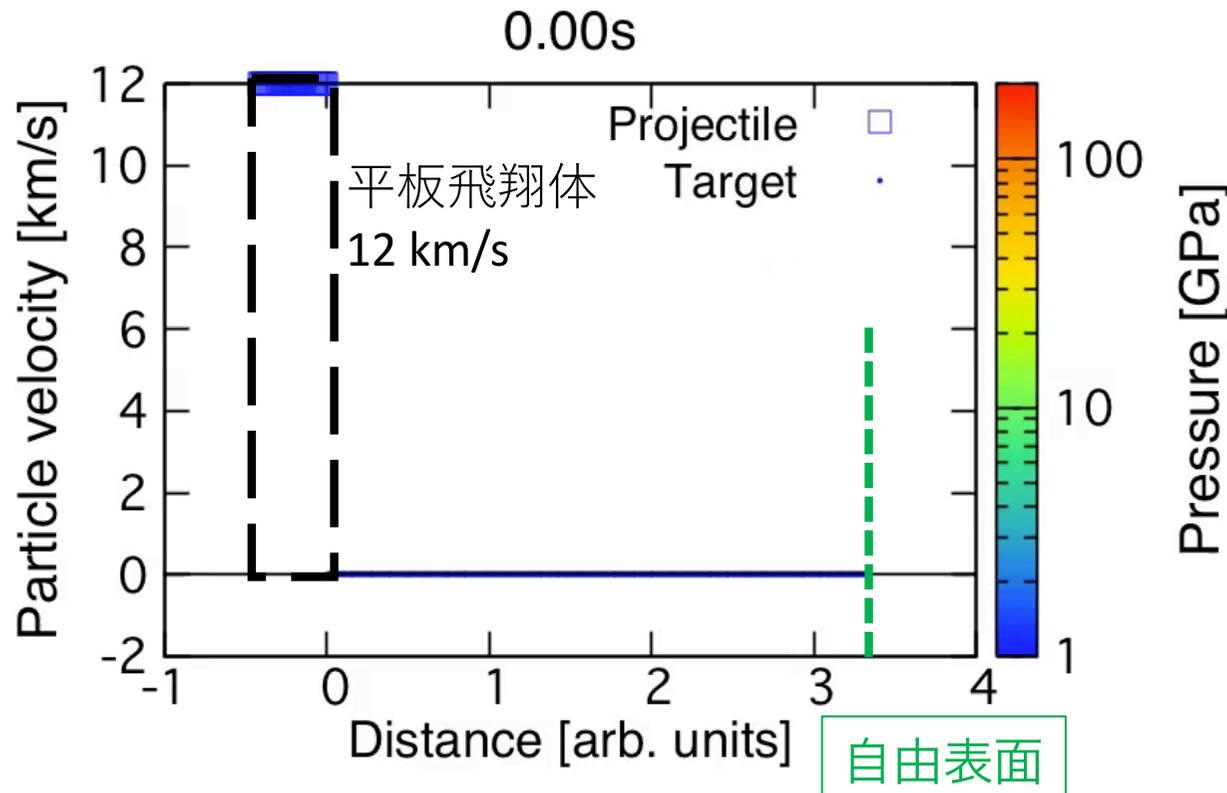
1. 衝撃波の通過に伴う物質加速:  $P_H = \rho_0 V_s u_{pH}$

2. 膨張波の到達に伴う速度ベクトルの変化:  $\Delta u_p \sim u_{pH}$

※**衝撃波**: 波面の進行方向と同じ向きに物質を加速.

**膨張波**: 波面の進行方向と反対向きに物質を加速

[e.g., Melosh84, 85]



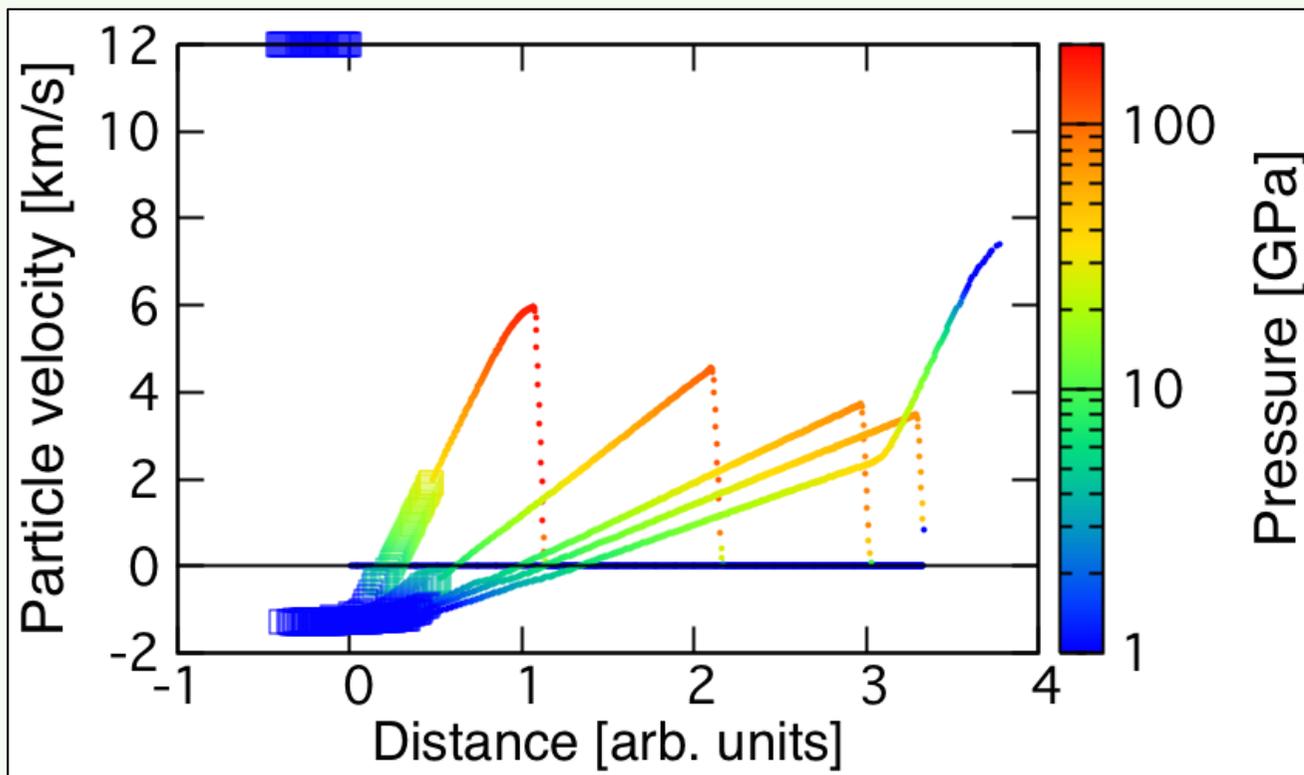
$u_{pH}$   
衝撃波通過  
に伴う加速

# 衝撃波/膨張波による速度変化

1. 衝撃波の通過に伴う物質加速:  $P_H = \rho_0 V_s u_{pH}$
2. 膨張波の到達に伴う速度ベクトルの変化:  $\Delta u_p \sim u_{pH}$

※**衝撃波**: 波面の進行方向と **同じ向き** に物質を加速。  
**膨張波**: 波面の進行方向と **反対向き** に物質を加速

[e.g., Melosh84, 85]

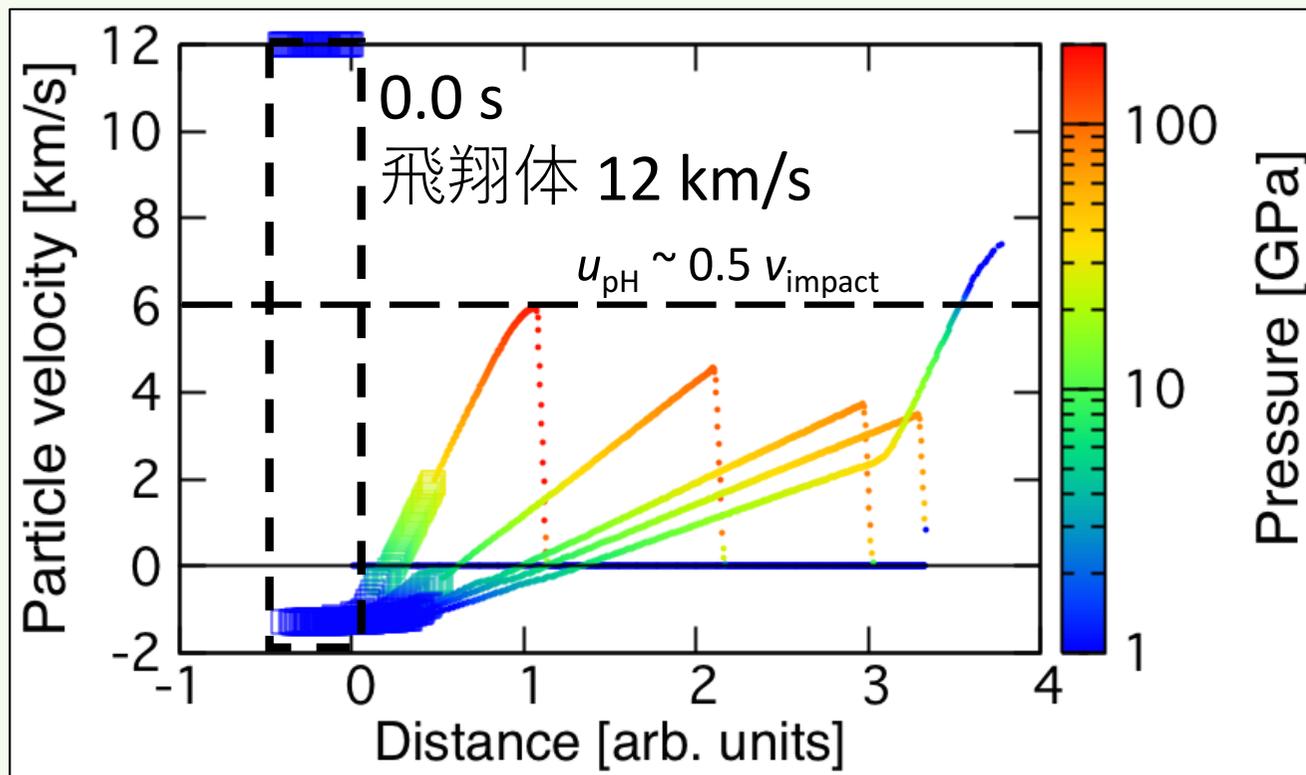


# 衝撃波/膨張波による速度変化

1. 衝撃波の通過に伴う物質加速:  $P_H = \rho_0 V_s u_{pH}$
2. 膨張波の到達に伴う速度ベクトルの変化:  $\Delta u_p \sim u_{pH}$

※**衝撃波**: 波面の進行方向と **同じ向き** に物質を加速。  
**膨張波**: 波面の進行方向と **反対向き** に物質を加速

[e.g., Melosh84, 85]

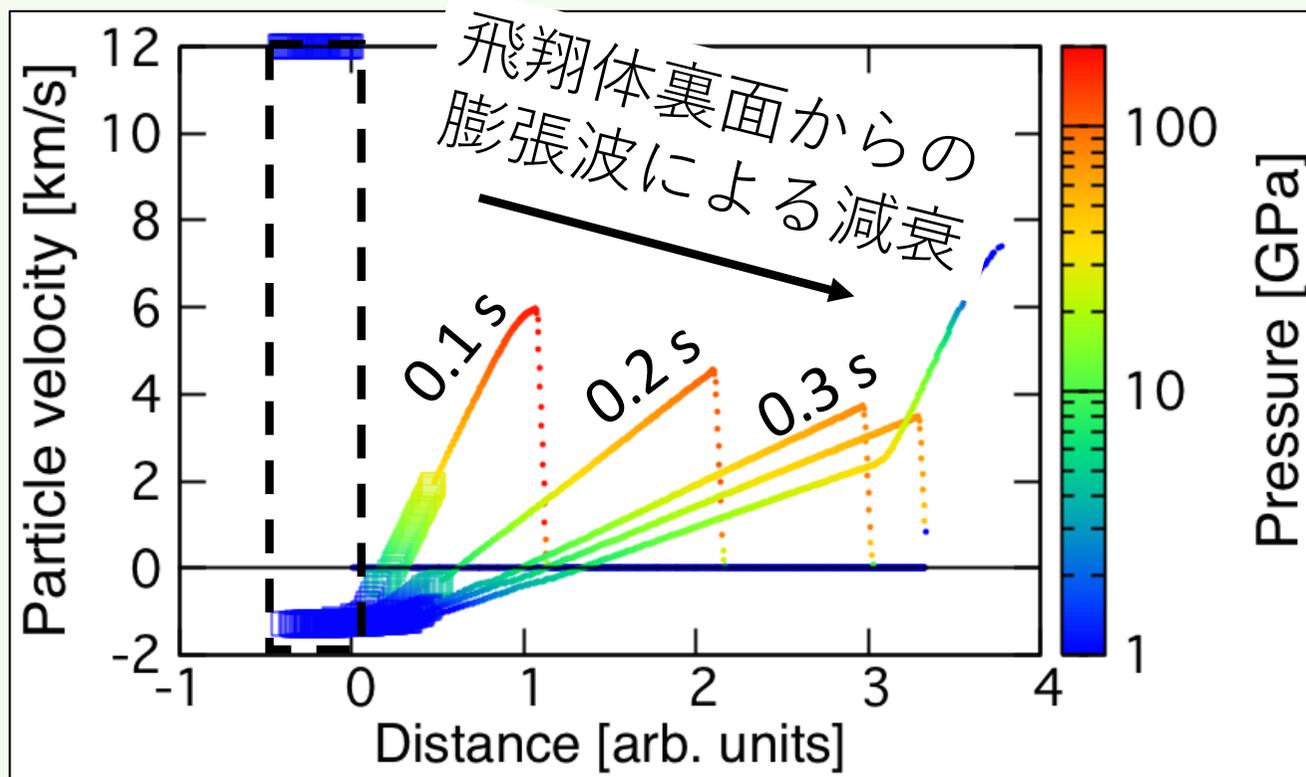


# 衝撃波/膨張波による速度変化

1. 衝撃波の通過に伴う物質加速:  $P_H = \rho_0 V_s u_{pH}$
2. 膨張波の到達に伴う速度ベクトルの変化:  $\Delta u_p \sim u_{pH}$

※**衝撃波**: 波面の進行方向と **同じ向き** に物質を加速。  
**膨張波**: 波面の進行方向と **反対向き** に物質を加速

[e.g., Melosh84, 85]

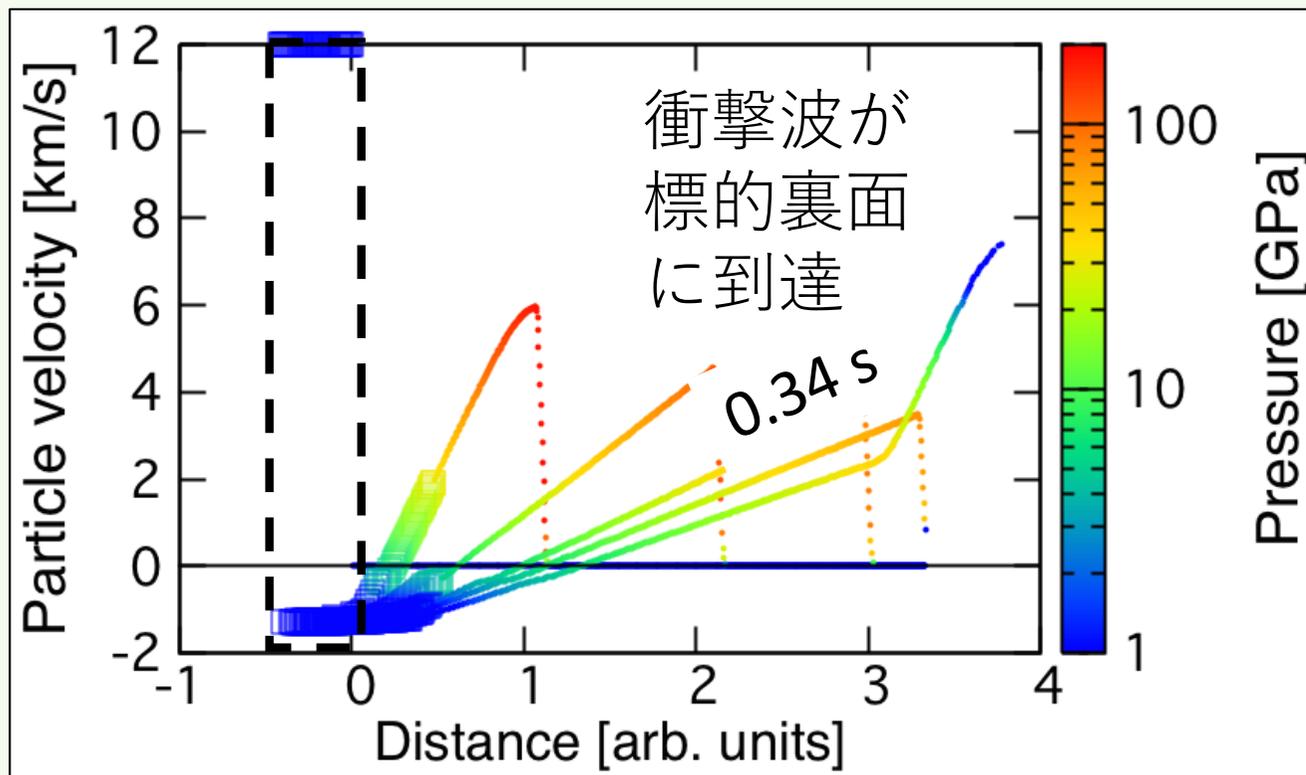


# 衝撃波/膨張波による速度変化

1. 衝撃波の通過に伴う物質加速:  $P_H = \rho_0 V_s u_{pH}$
2. 膨張波の到達に伴う速度ベクトルの変化:  $\Delta u_p \sim u_{pH}$

※**衝撃波**: 波面の進行方向と同じ向きに物質を加速。  
**膨張波**: 波面の進行方向と反対向きに物質を加速

[e.g., Melosh84, 85]

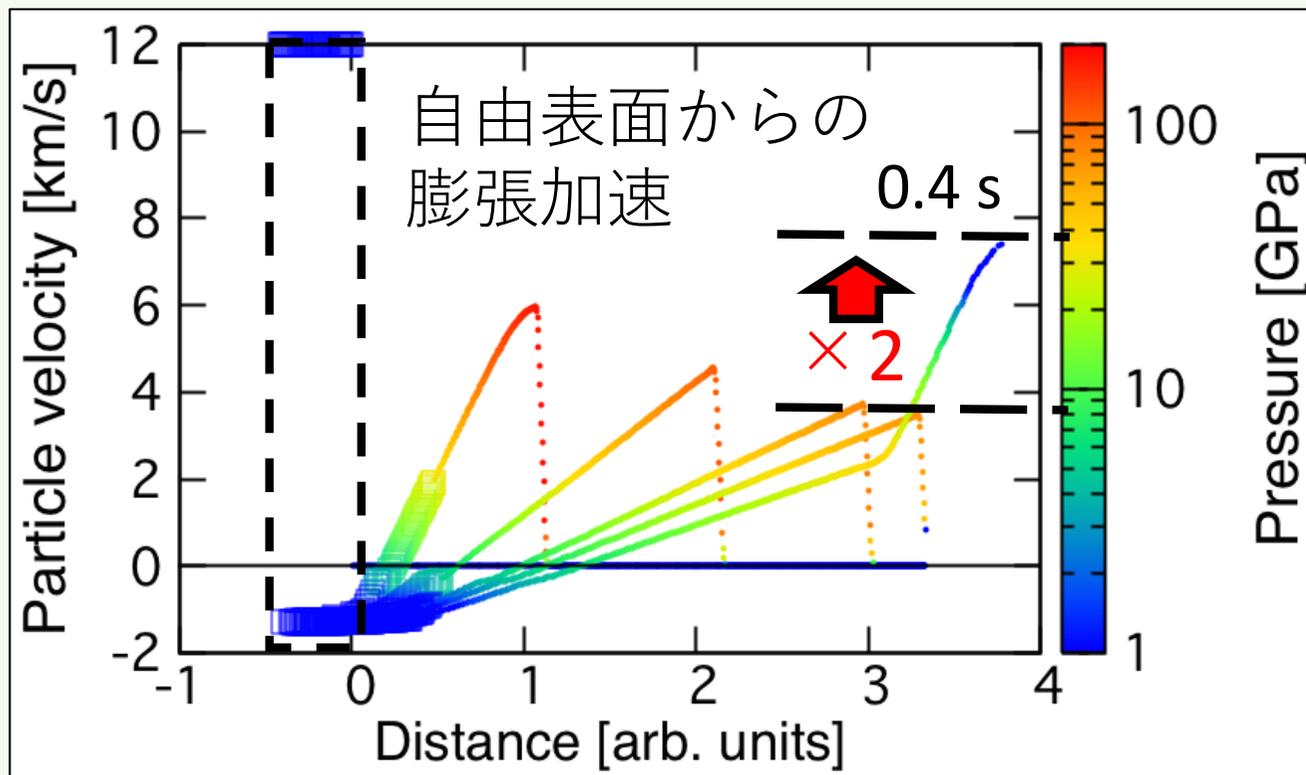


# 衝撃波/膨張波による速度変化

1. 衝撃波の通過に伴う物質加速:  $P_H = \rho_0 V_s u_{pH}$
2. 膨張波の到達に伴う速度ベクトルの変化:  $\Delta u_p \sim u_{pH}$

※**衝撃波**: 波面の進行方向と同じ向きに物質を加速.  
**膨張波**: 波面の進行方向と反対向きに物質を加速

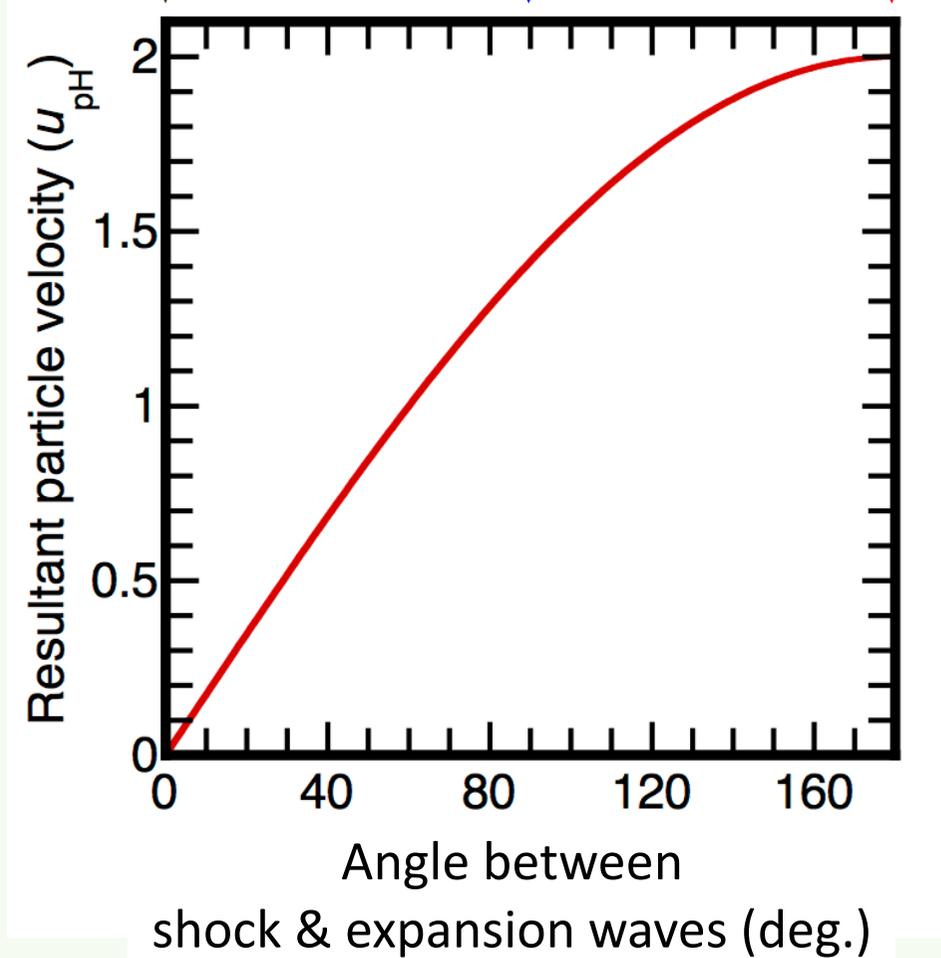
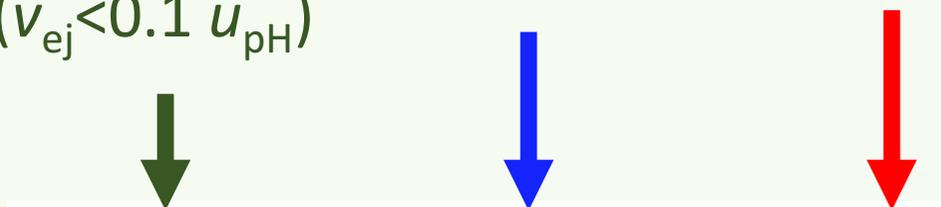
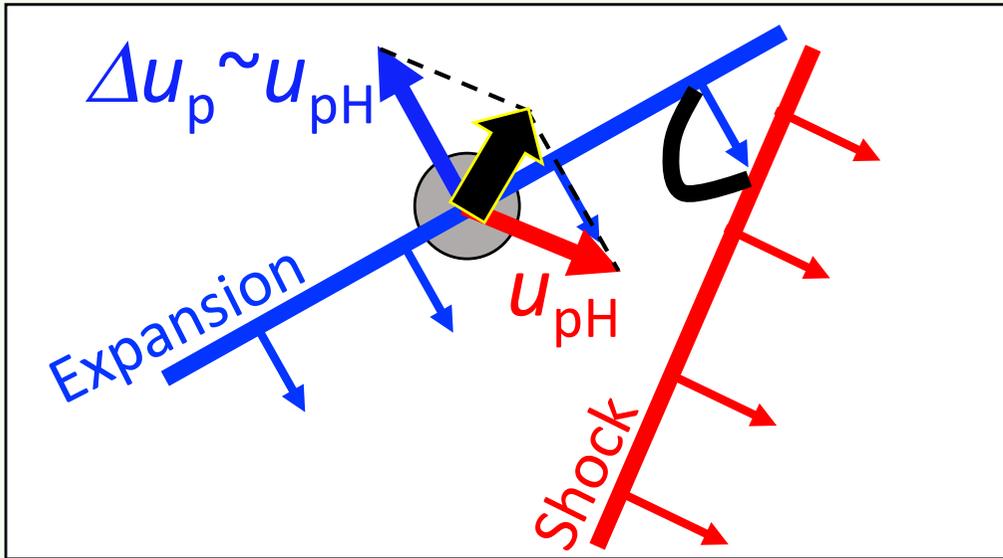
[e.g., Melosh84, 85]



平板衝突実験  
裏面の飛び出し速度  
~2倍の粒子速度  
(自由端条件)

# 幾何学効果の重要性-合成速度ベクトルの大きさ-

Normal excavation ( $v_{ej} < 0.1 u_{pH}$ )      Spallation ( $v_{ej} \sim \sqrt{2} u_{pH}$ )      Jetting ( $v_{ej} \sim 2 u_{pH}$ )



衝突放出速度を決める要因

1. 衝撃波通過後の  $u_{pH}$
2. 衝撃波と膨張波のなす角度

# 話の流れ

## 1. 衝撃波と膨張波の干渉

- a. 衝撃波/膨張波通過後の速度変化
- b. 幾何学効果の重要性

## 2. 衝突噴射現象(Impact jetting)

- a. 高速度衝突実験@PERC
- b. 従来の理論モデルと改良版モデル

## 3. 衝突剥離現象(Impact spallation)

- a. 数値衝突実験 with 2-D iSALE & 3-D SPH
- b. 後期加速現象の発見

## 4. 衝突掘削現象(Normal excavation)

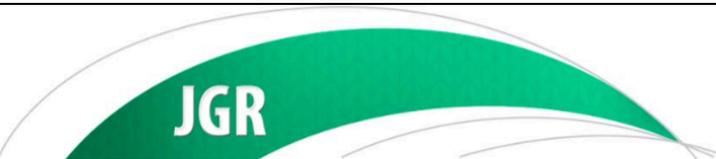
- a. 残留速度による掘削流形成の解析モデル
- b. 衝突掘削の終焉による過渡クレータ形成

# 衝突噴射現象 (Impact jetting)

a. 高速度衝突実験@PERC

b. 従来の理論モデルと改良版モデル

 **AGU** PUBLICATIONS

 JGR

## Journal of Geophysical Research: Planets

### RESEARCH ARTICLE

10.1002/2014JE004730

#### Key Points:

- The 100 ns imaging of impact jetting during oblique impacts of spherical projectiles
- The measured jet velocities were much slower than the prediction of the standard theory
- Impact jetting might contribute to atmospheric chemistry on Titan

### Dynamics of hypervelocity jetting during oblique impacts of spherical projectiles investigated via ultrafast imaging

**Kosuke Kurosawa<sup>1</sup>, Yoichi Nagaoka<sup>1,2</sup>, Hiroki Senshu<sup>1</sup>, Koji Wada<sup>1</sup>, Sunao Hasegawa<sup>3</sup>, Seiji Sugita<sup>4</sup>, and Takafumi Matsui<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology, Narashino, Japan, <sup>2</sup>Institute for Cosmic Ray Research, The University of Tokyo, Kashiwa, Japan, <sup>3</sup>Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, Sagami-hara, Japan, <sup>4</sup>Department of Complexity Science and Engineering, Graduate School of Frontier Science, The University of Tokyo, Kashiwa, Japan

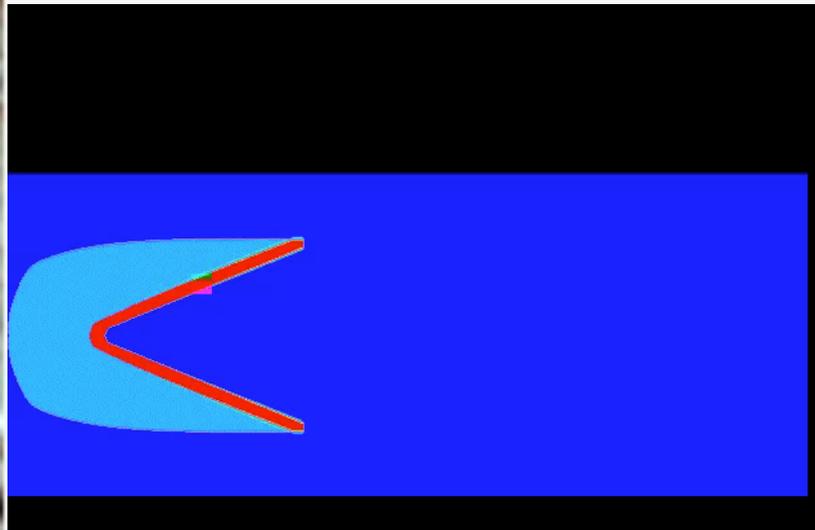
# Jetting現象とは？

“平板”が斜めに衝突するときに超高速成分が放出される現象

[e.g., Walsh, 1953; Gault et al., 1968]



Shaped charge



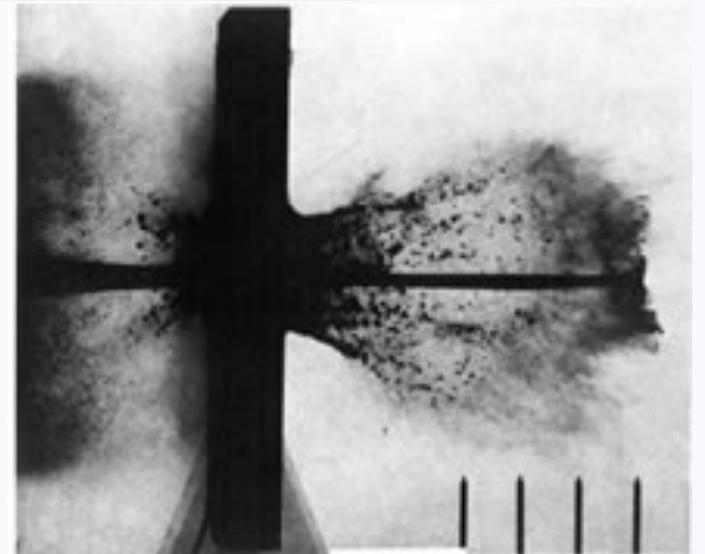
[[http://www.lancemore.jp/ls-dyna/example\\_280.html](http://www.lancemore.jp/ls-dyna/example_280.html)]

↑[<http://defense-update.com/features/du-2-05/IED-1.htm>]→

固体密度を持つ

~10 km/sの“Kinetic slug”

(cf. ライフル銃の弾速~1 km/s)



# Jetting現象とは?

“平板”が斜めに衝突するときに超高速成分が放出される現象  
[e.g., Walsh53; Gault+68]

## Jetting現象の2つの特徴

1. 放出速度が衝突速度よりも速い.
2. 放出された物質は最も強い衝撃加熱を受ける.

## Jettingの惑星科学研究

強い衝撃加熱 -> 低速衝突でも熔融・蒸発が起きる.

☆ テクタイト, コンドリュールの起源

[Kieffer77; Vickery93, Johnson+15]

☆ 巨大衝突時のJetting -> 安定な原始月円盤

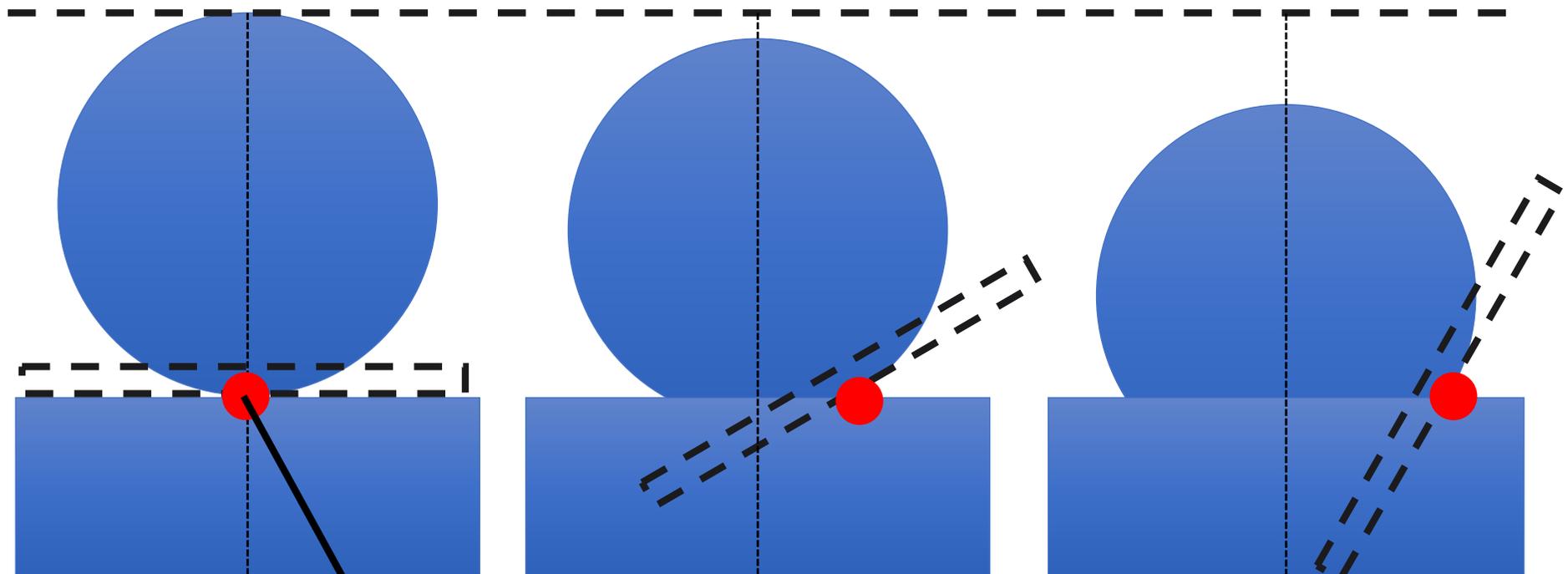
冥王星-カロン系の高い岩石/氷比

[McKinnon89ab; Melosh & Sonett86]

# Jetting現象とは?

“平板”が斜めに衝突するときに超高速成分が放出される現象  
[e.g., Walsh53; Gault+68]

平板に貫入する球 -> 角度を変えながら衝突する平板



接触点: 標的表面上に沿って移動

# Jetting現象とは？

“平板”が斜めに衝突するときに超高速成分が放出される現象  
[e.g., Walsh53; Gault+68]

## Jetting現象の2つの特徴

1. 放出速度が衝突速度よりも速い.
2. 放出された物質は最も強い衝撃加熱を受ける.

## Jettingの惑星科学研究

強い衝撃加熱 -> 低速衝突でも熔融・蒸発が起きる.

☆ テクタイト, コンドリュールの起源

[Kieffer77; Vickery93, Johnson+15]

☆ 巨大衝突時のJetting -> 安定な原始月円盤

冥王星-カロン系の高い岩石/氷比

[McKinnon89ab; Melosh & Sonett86]

# Jet速度(放出速度)

理論モデルを構築する際の重要制約の一つ

球衝突時のJet速度の先行研究

Theory: 現象論的モデルのみ

[Melosh & Sonett86; Ang90; Vickery93]

Experiments: 空間・時間分解能不足,  
斜め衝突は実験報告が少ない.

[Gault+68; Eichhorn78; Kadono & Fujiwara96; Schultz+06]

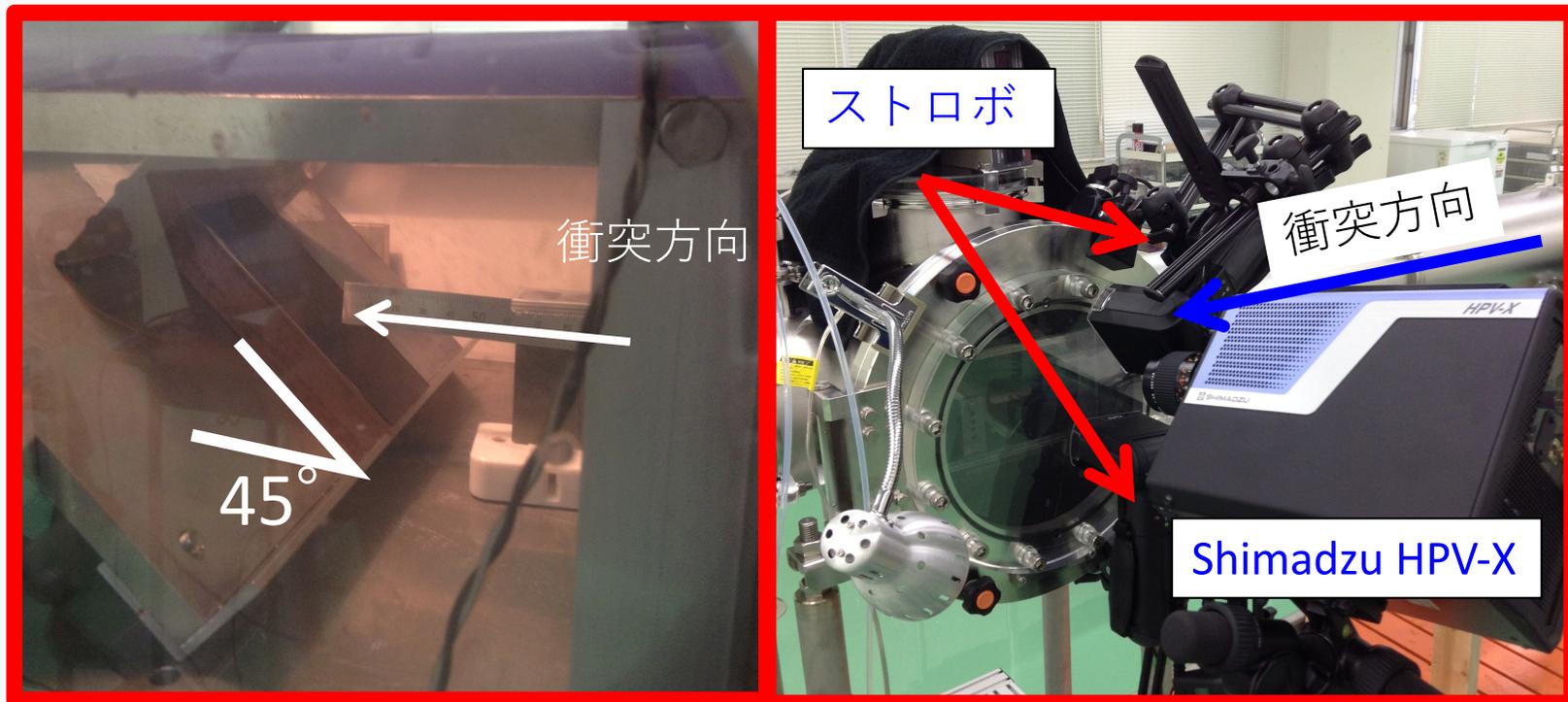
理論・実験どちらも研究が進んでいなかった.

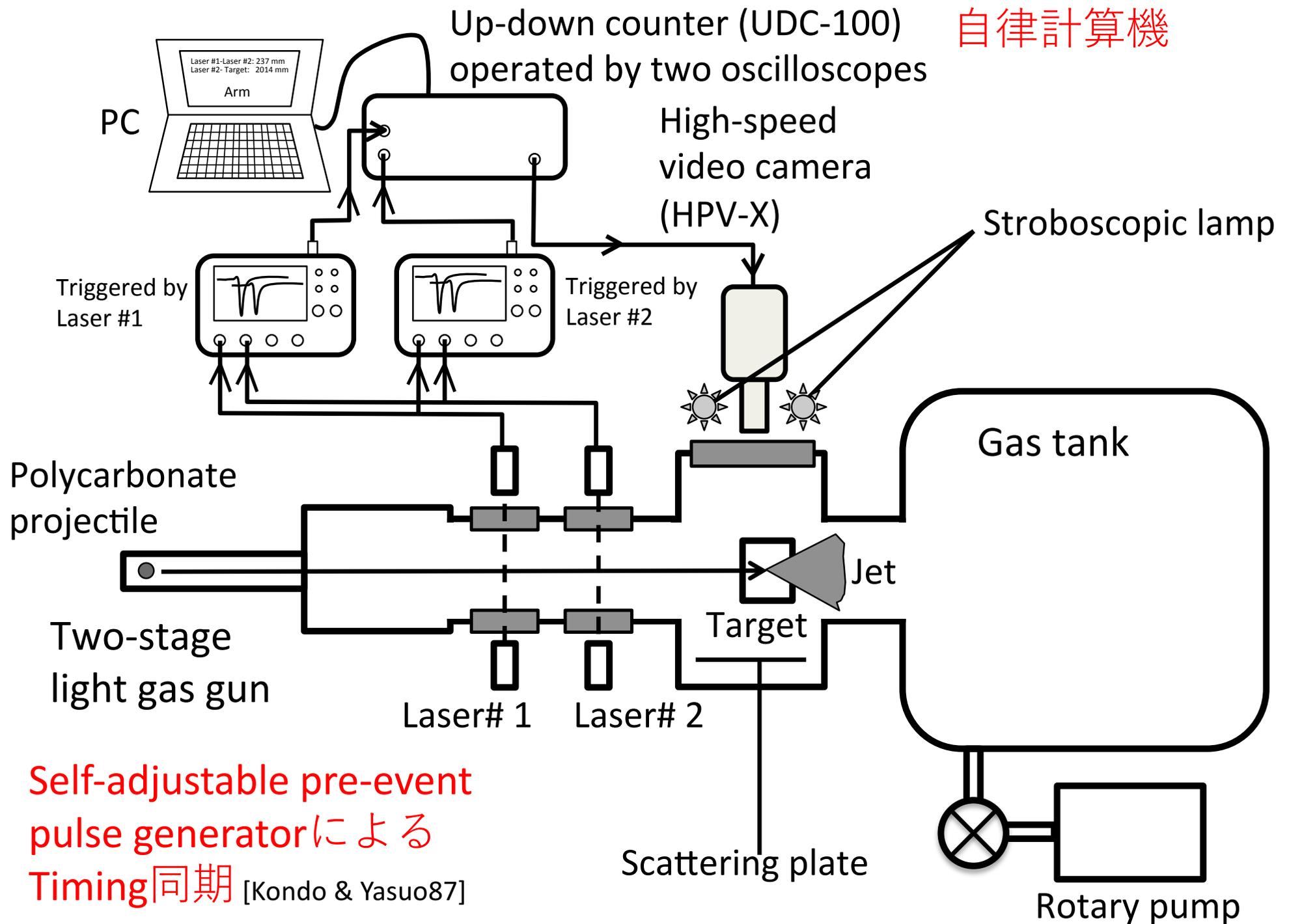
十分な精度でJet速度を計測できていなかったことが問題.

# 斜め衝突実験 @千葉工大PERC

# 斜め衝突実験条件

弾丸:	Polycarbonate sphere (4.8 mm $\phi$ )
標的:	Cu, Al, Polycarbonate (5 cm x 5 cm x 2 cmt)
衝突速度:	2.8 – 7.2 km/s
衝突角度:	45 deg. or 90 deg. (only for Al)
真空度:	<100 Pa
撮像速度:	100 ns/frame (i.e., $< D_p/v_{\text{impact}}$ )

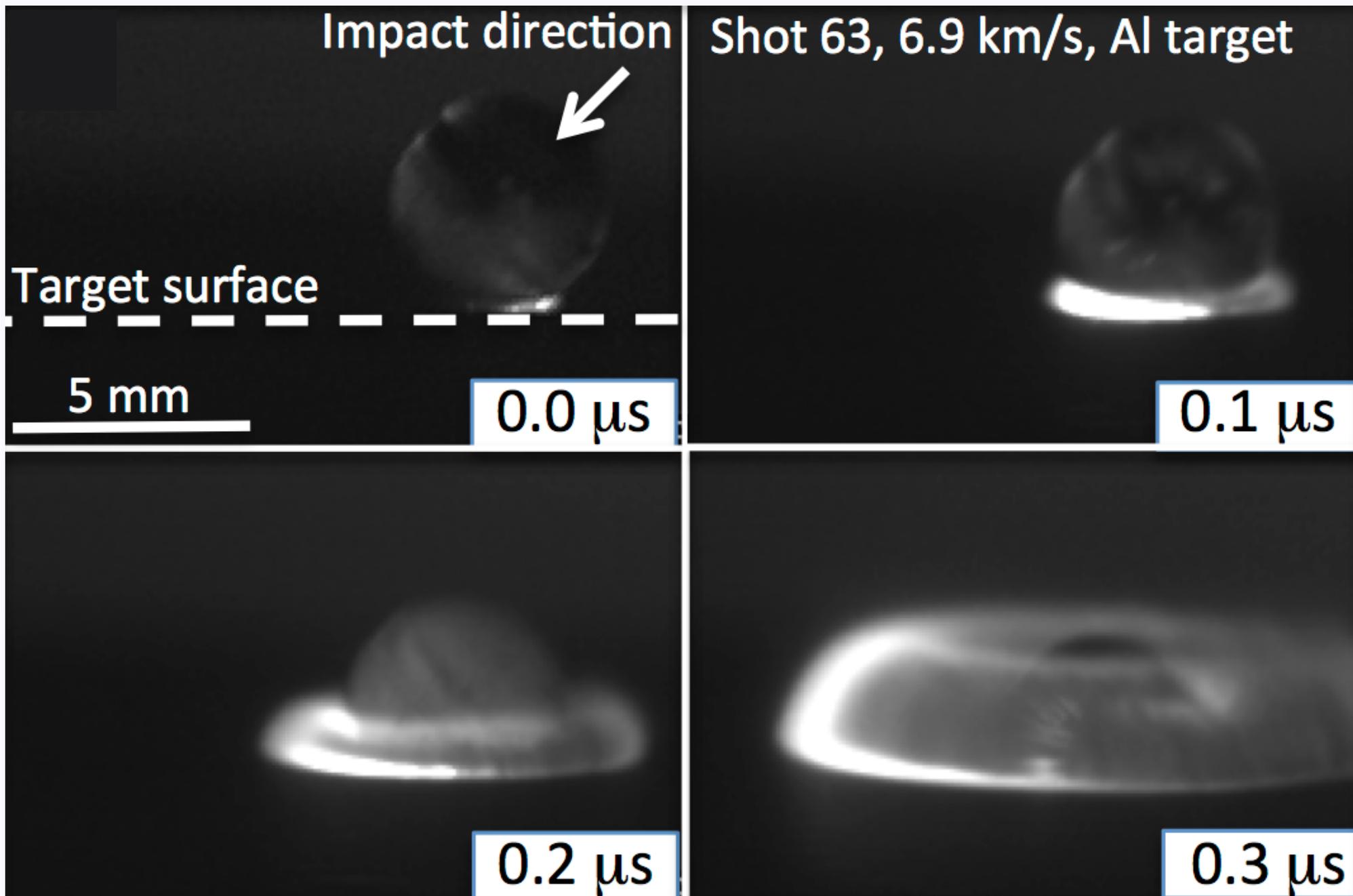




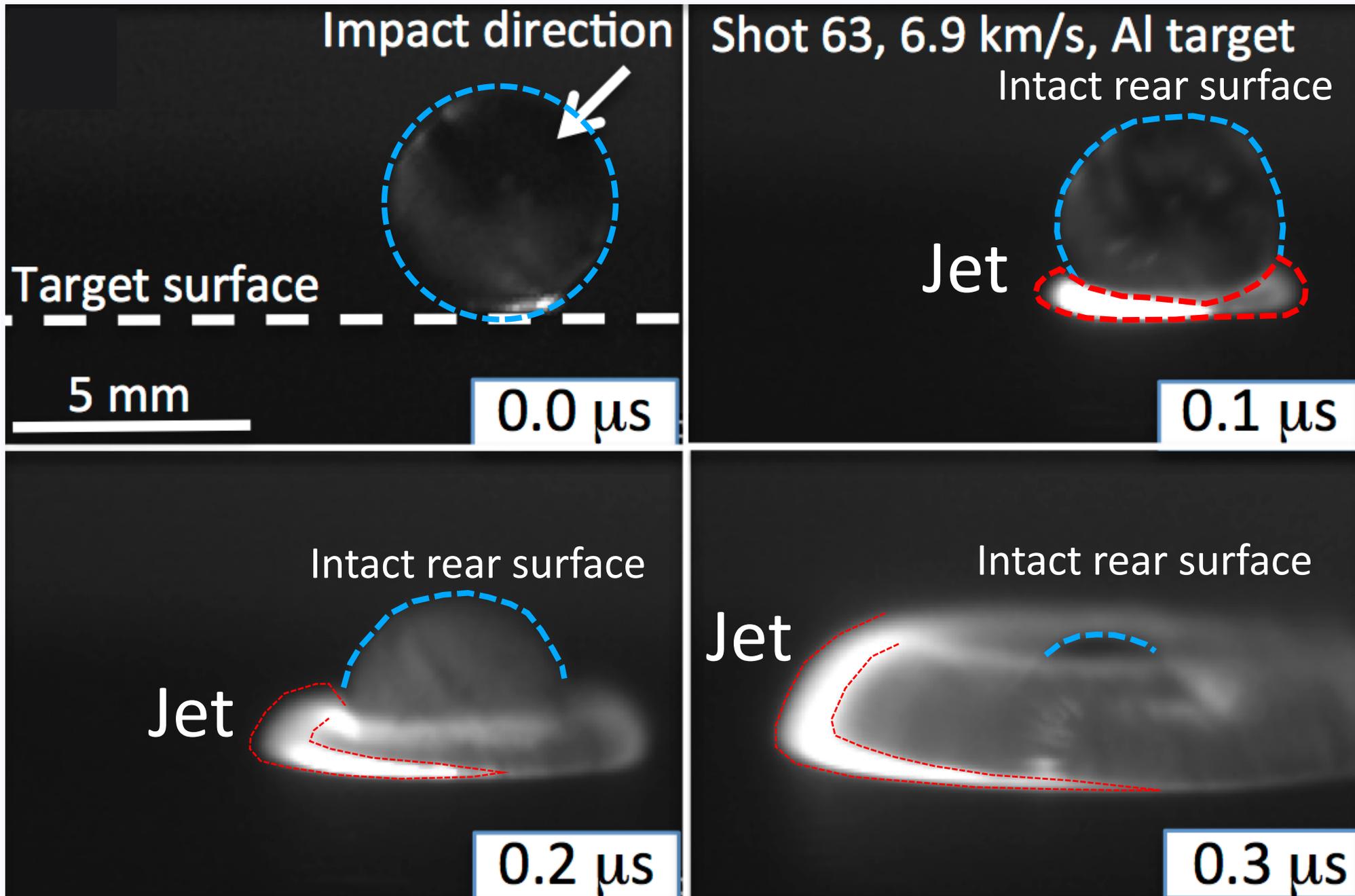
Shot# 63, Polycarbonate sphere -> Al plate, 6.9 km/s

-1,350ns

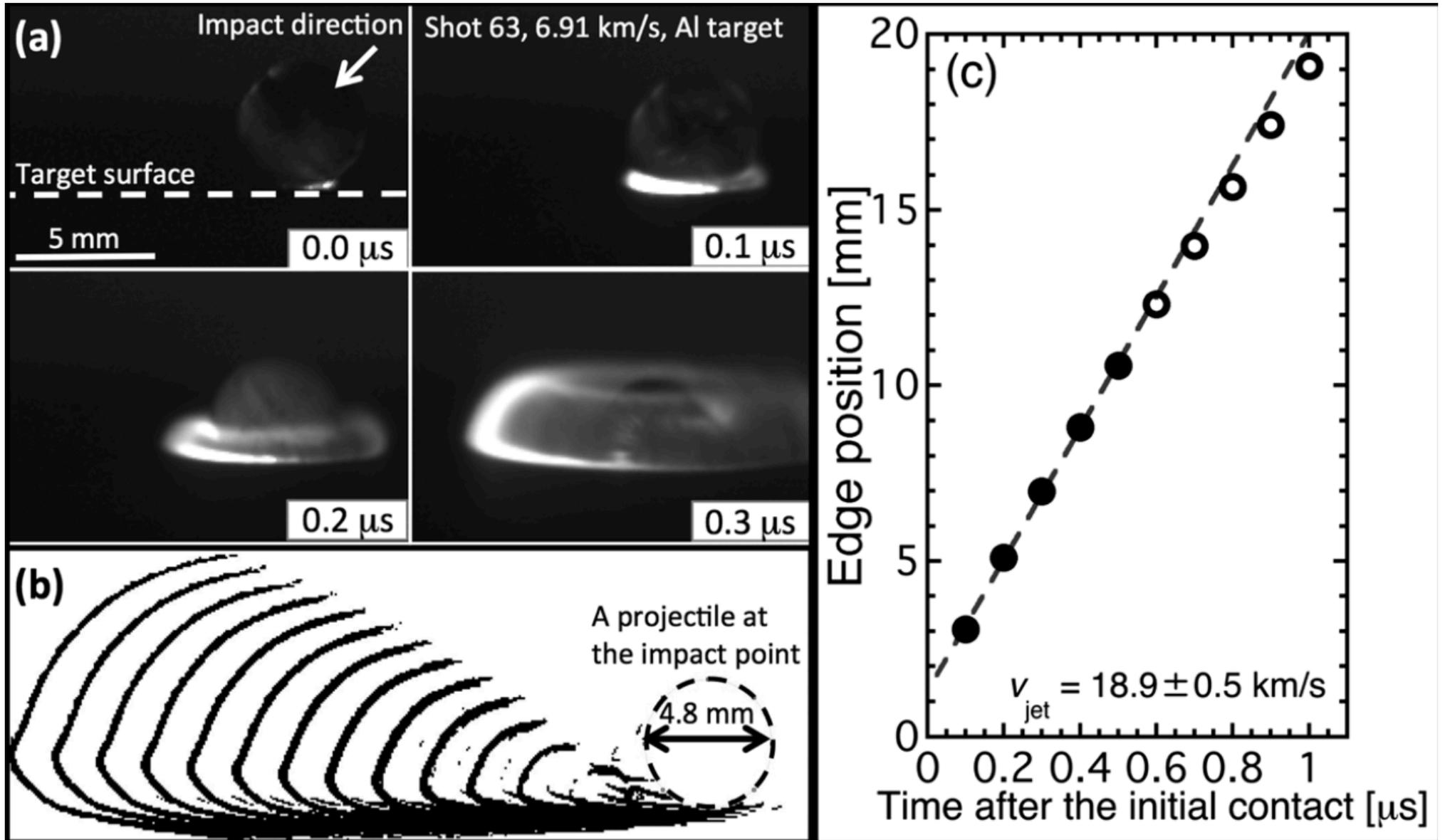
# Jet噴射開始



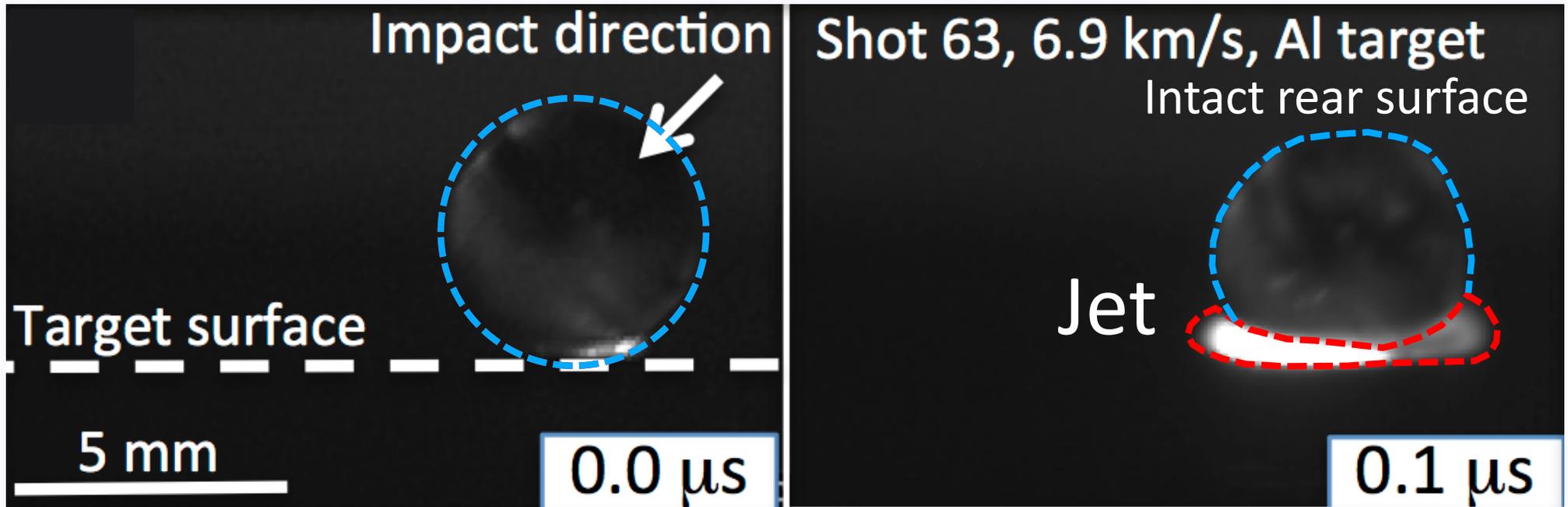
# Jet噴射開始



# 解析手順

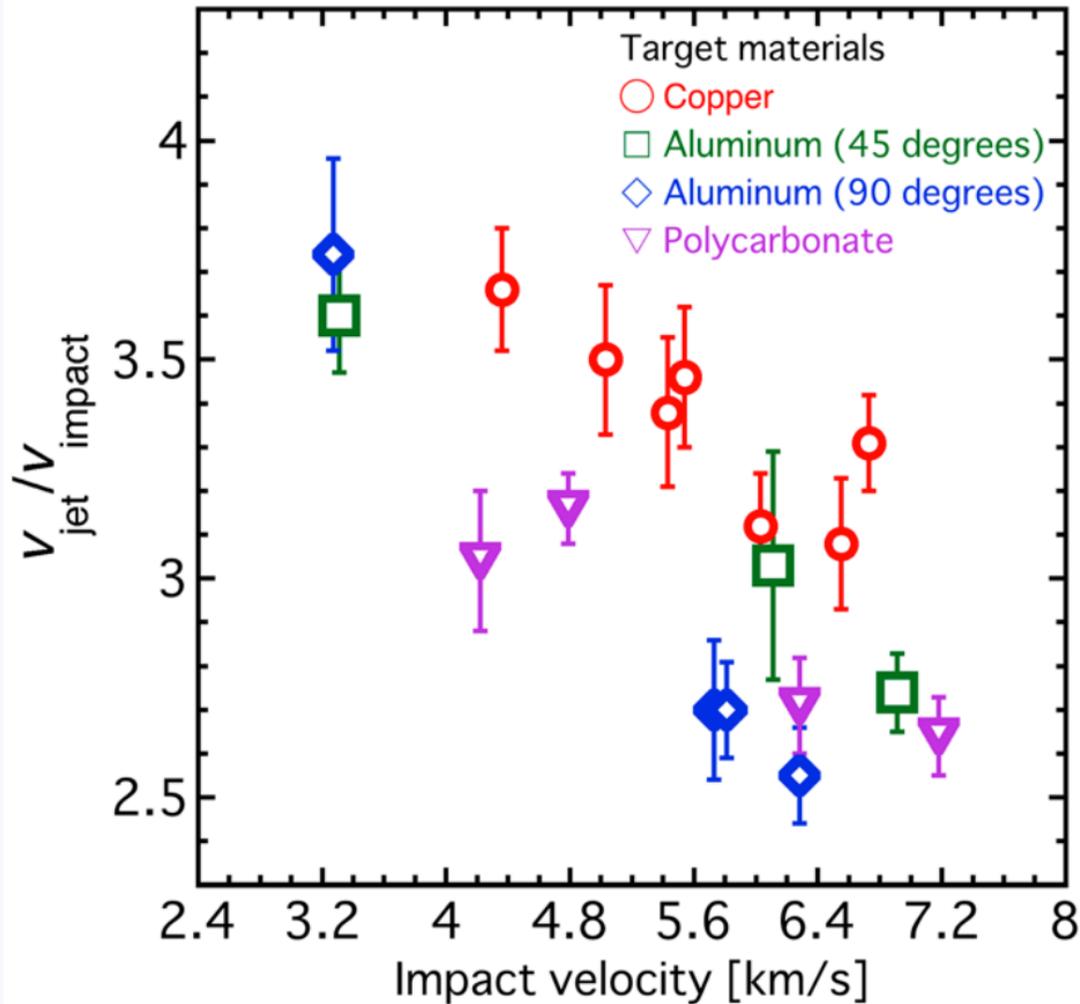


# Jet噴射開始



- ☆ 衝突後100 nsですすでに物質噴射が始まっている。
- ☆ Jet速度は $18.9 \pm 0.5 \text{ km/s} = 2.7 v_{\text{impact}}$
- ☆ Jetは現象中で最も強い衝撃加熱を受けている。  
※カメラのカウント値(可視光積分)が最大値。

# Velocity ratio vs $v_{imp}$



Velocity ratio  $v_{jet}/v_{imp}$

☆  $v_{jet} > 3v_{imp}$  に及ぶ.

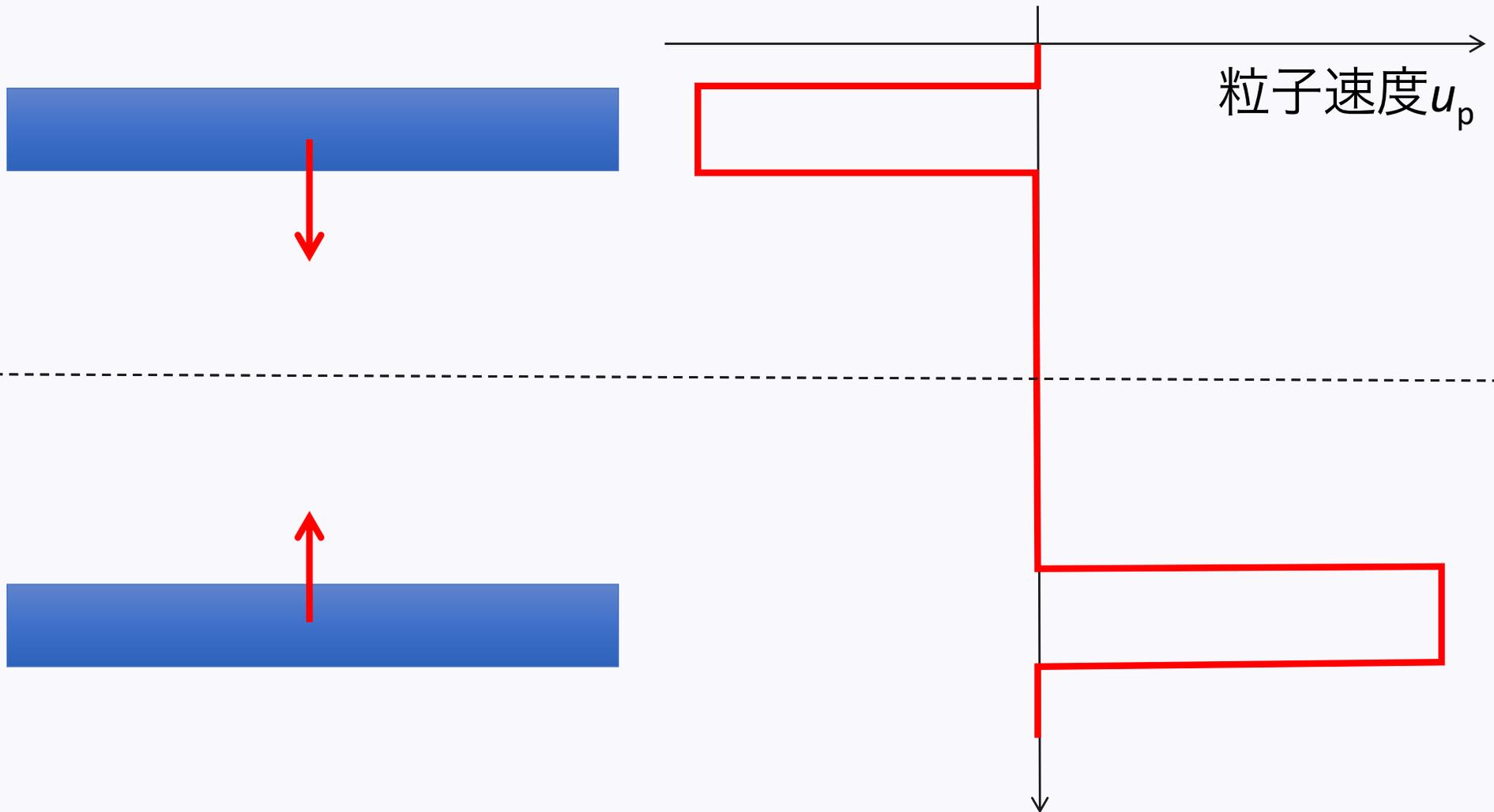
☆ 衝突速度とともに減少

☆ 標的のShock impedance  
が大きいかほど増加

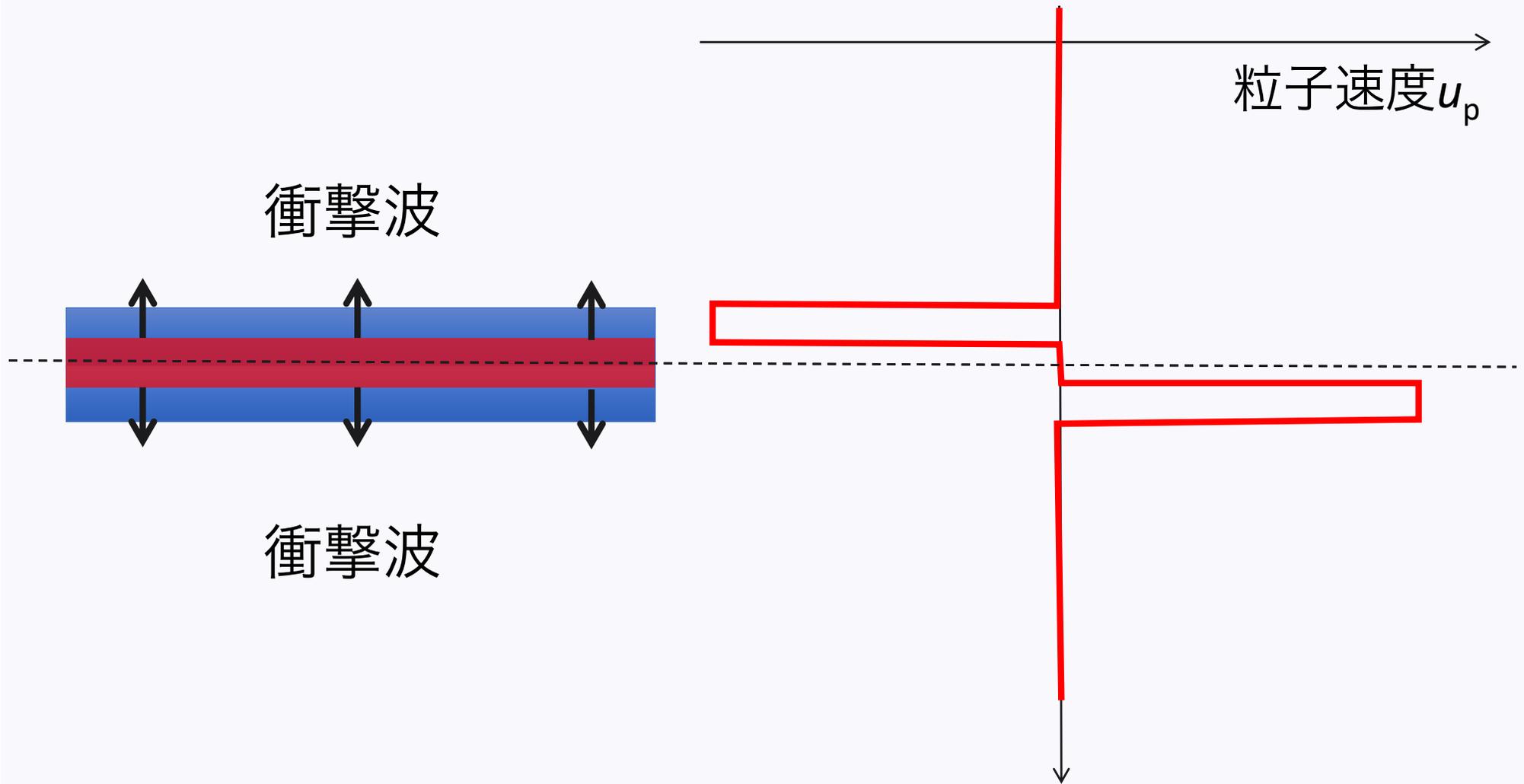
世界初の  $v_{jet}$  の系統的データ

# Impact jettingの 従来の理論モデル

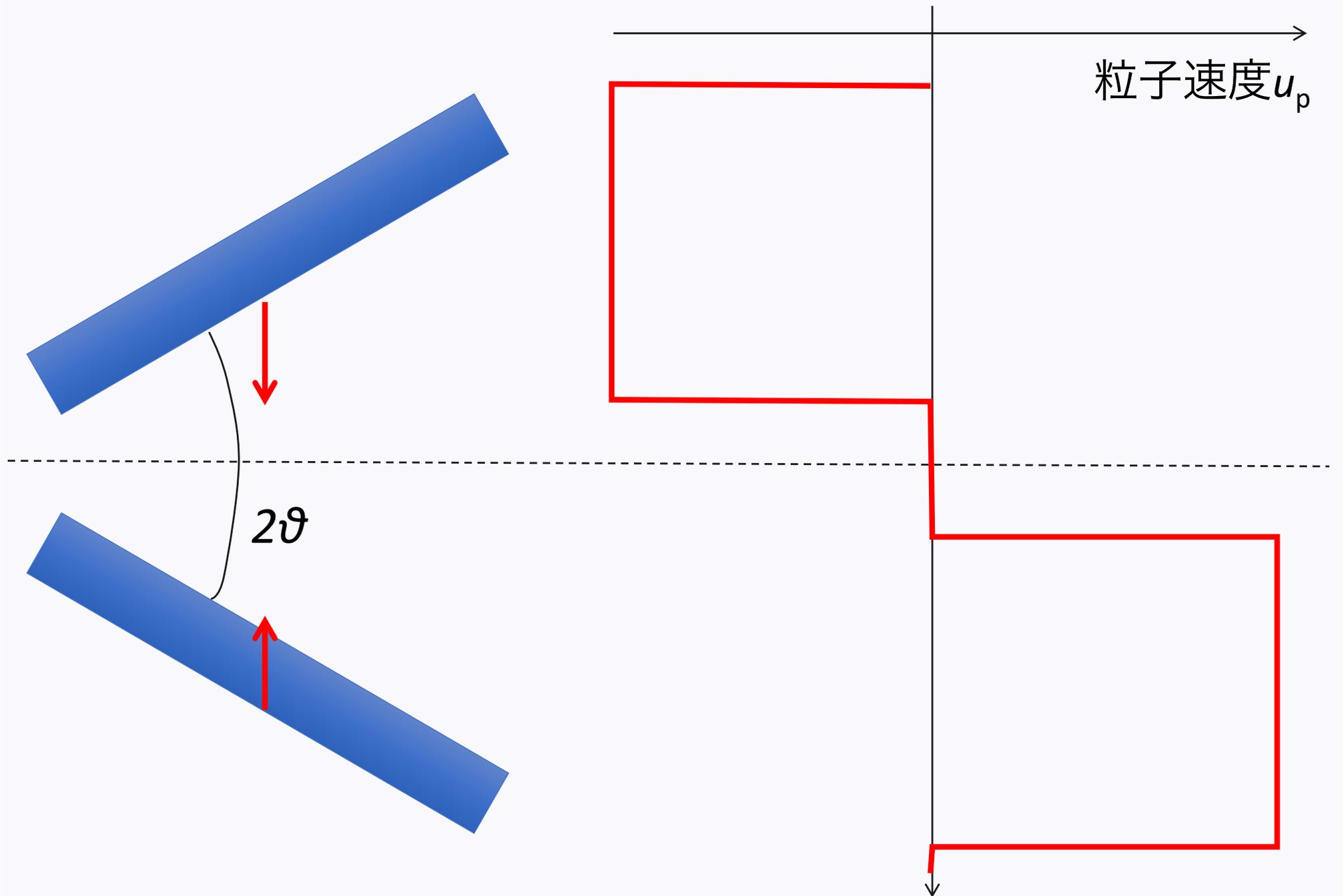
# 斜め衝突による衝撃圧力増加



# 斜め衝突による衝撃圧力増加

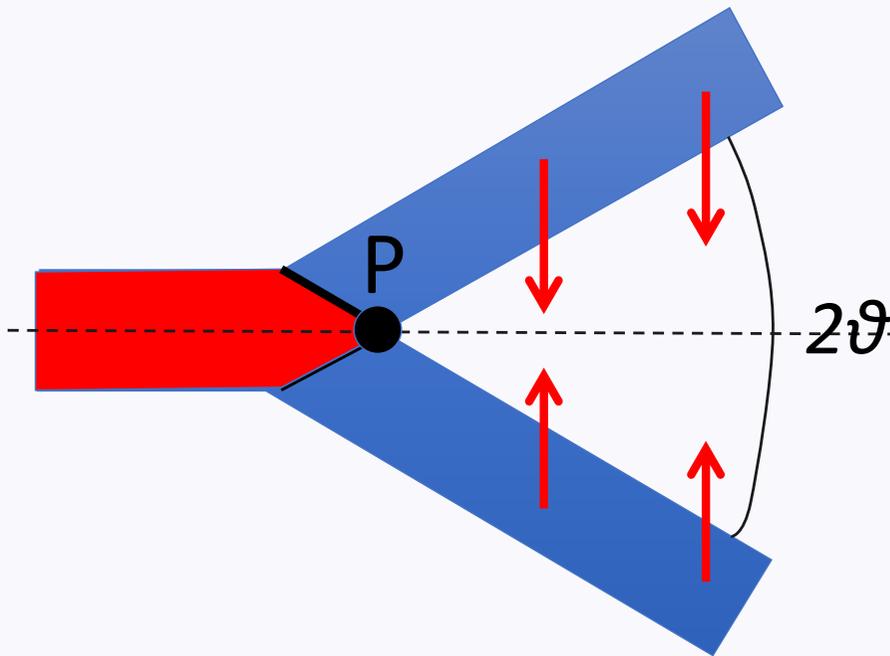


# 斜め衝突による衝撃圧力増加

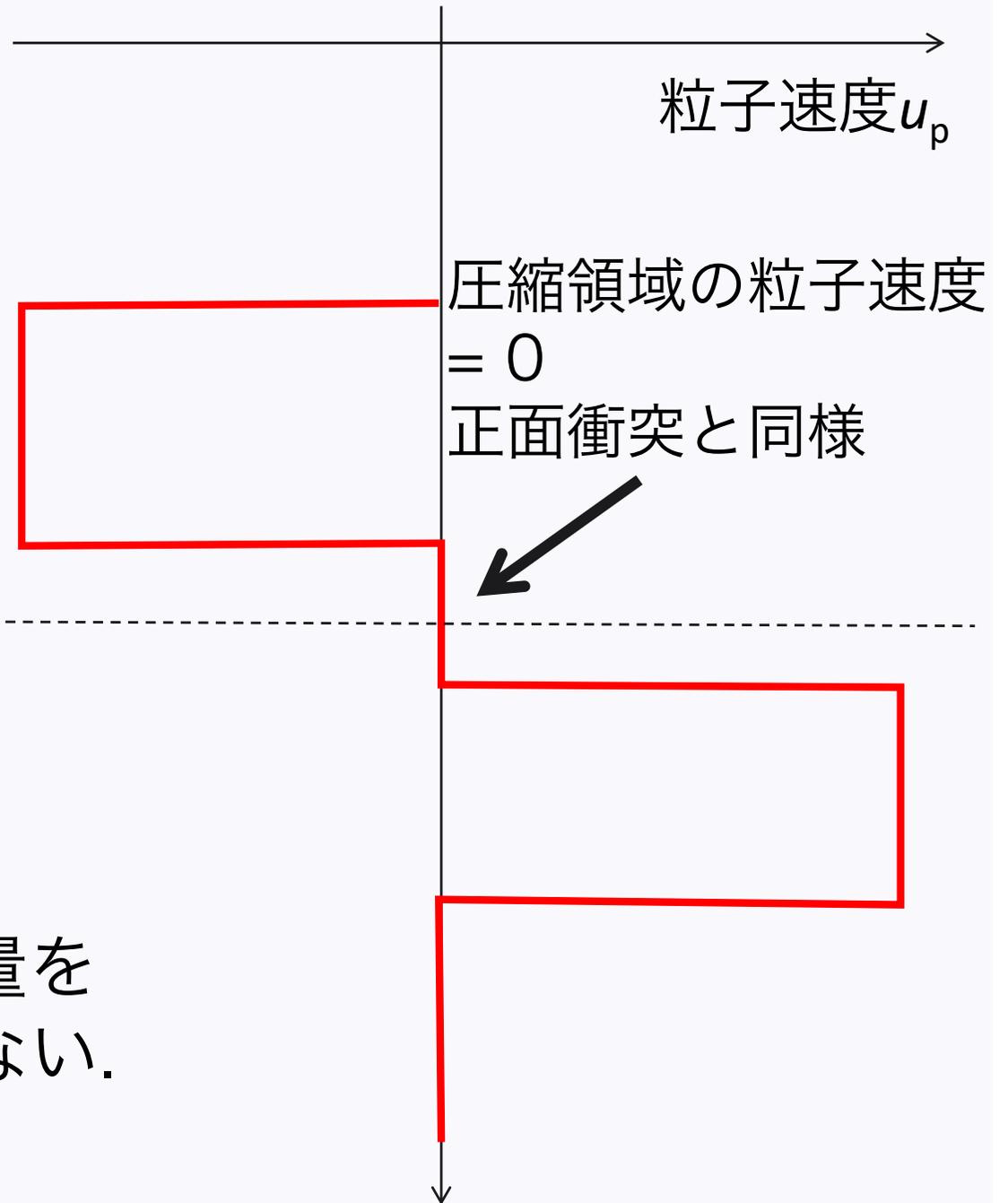


# 斜め衝突による衝撃圧力増加

接触点Pの移動速度  
角度によっては  
衝突速度より速い。



斜め衝撃波で同じ運動量を受け止めなければならない。  
-> 衝撃圧増加

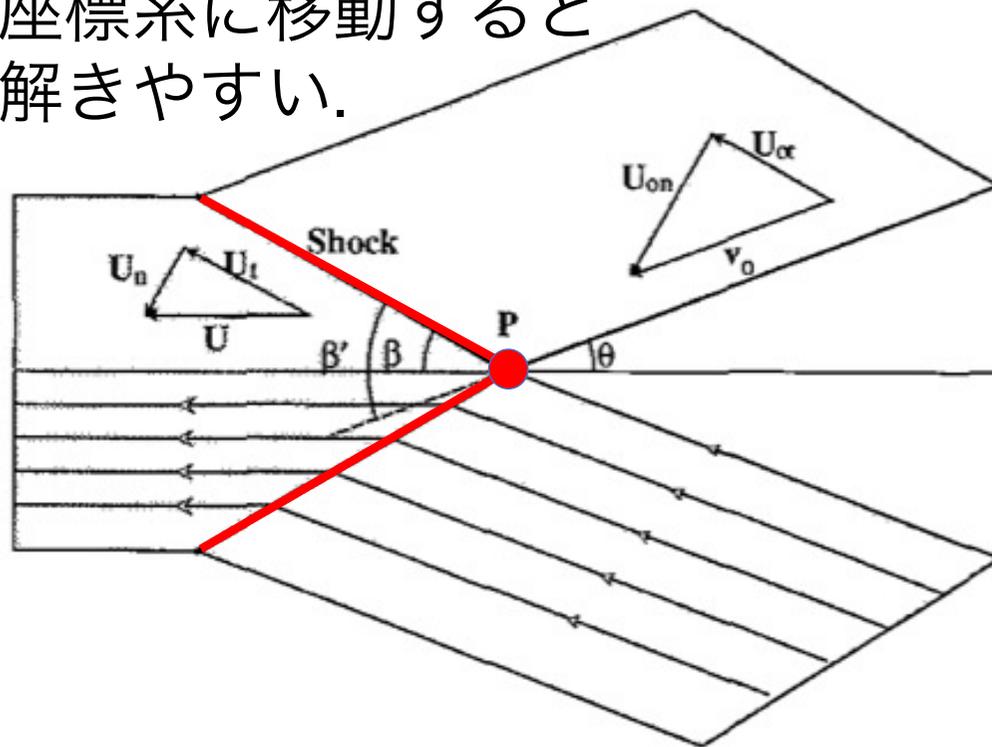


# Jettingの標準理論 -基本方針-

衝撃波面に垂直方向, 水平方向の二成分に分けて,  
斜め衝撃波に対する2次元のR-H方程式を解く.

[e.g., Walsh+53]

衝撃波面を固定した  
座標系に移動すると  
解きやすい.



[Vickery93]

垂直成分

質量保存:  $v_{on}\rho_o = U_n\rho$

運動量保存:  $v_{on}\rho_o(v_{on} - U_n) = P$

水平成分

$v_{ot} = U_t$

※滑りなし条件

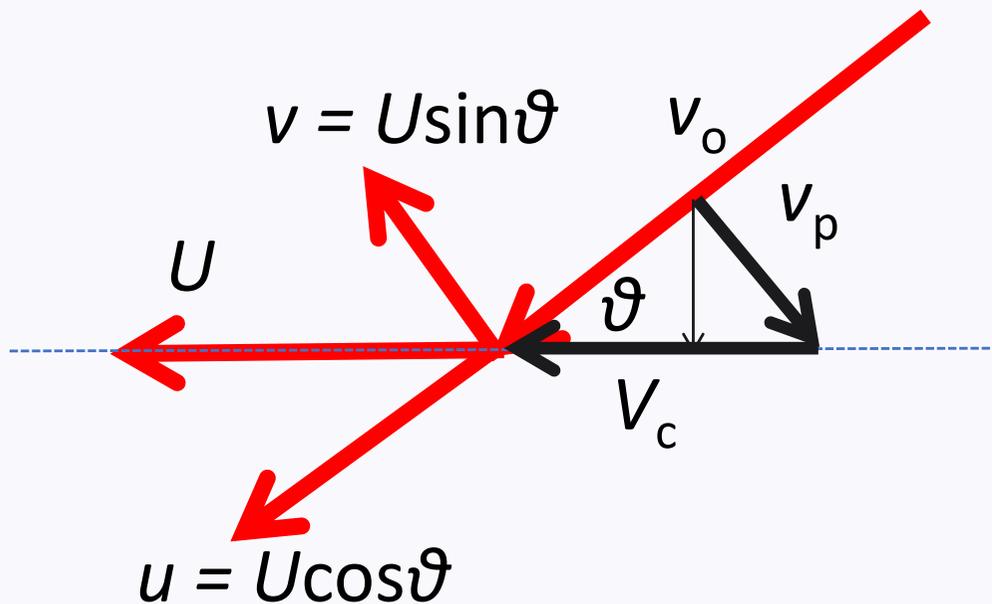
Hugoniot EOS

$$P = \frac{\rho_o c_n^2 \mu (\mu + 1)}{[\mu(1 - s) + 1]^2}$$

※  $\mu = (\rho/\rho_o) - 1$

# Jettingの標準理論 – Shock polar–

衝撃波背面速度  $U$  の流入速度  $v_0$  に対する垂直, 水平成分



衝突速度

$$v_{\text{impact}} = 2v_p \cos \vartheta$$

点P固定系衝突速度

$$v_0 = v_p / \tan \vartheta$$

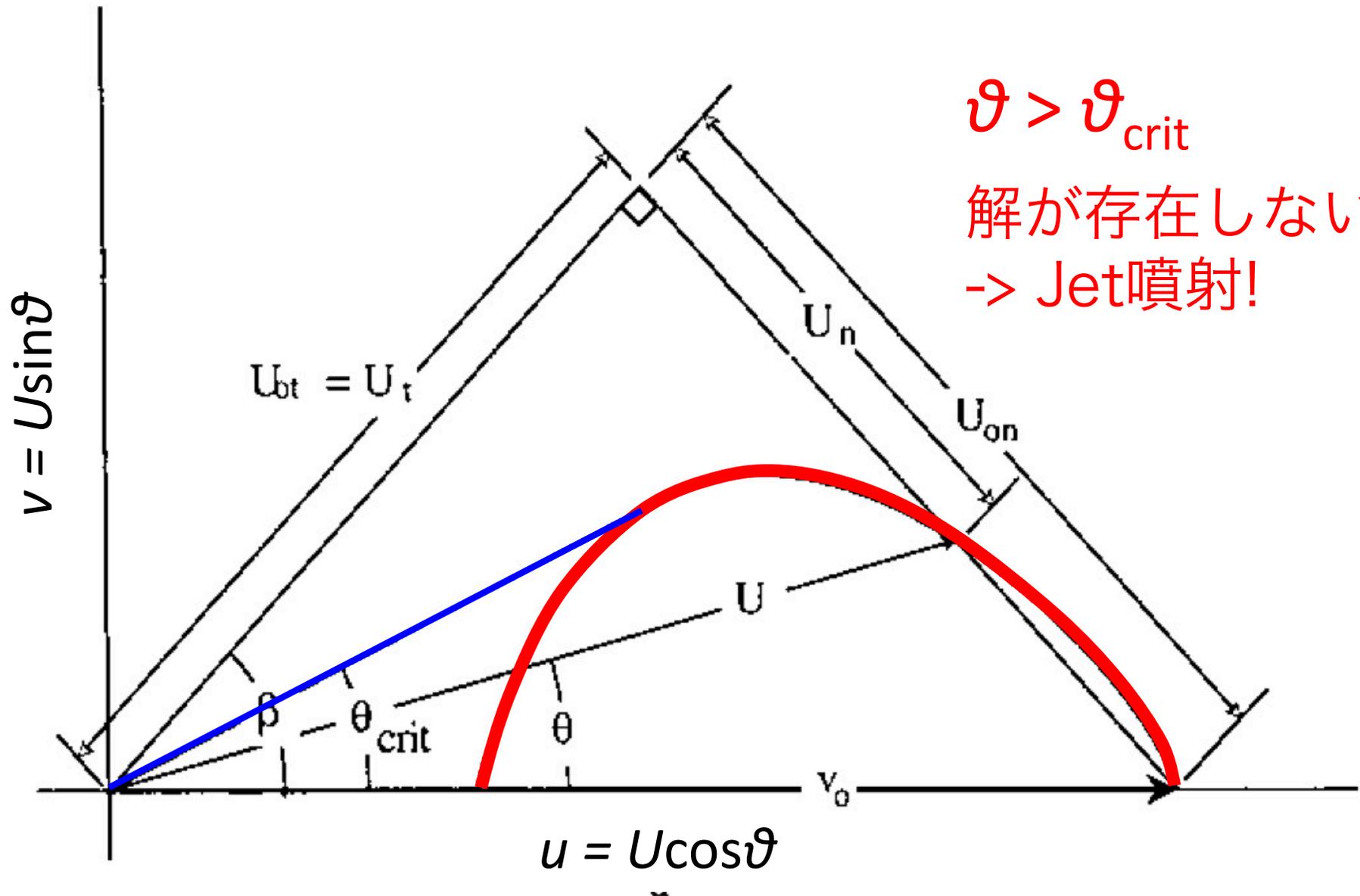
点Pの移動速度

$$v_c = v_p / \sin \vartheta$$

ある  $v_0$  に対して  $u, v$  が満たすべき条件は？

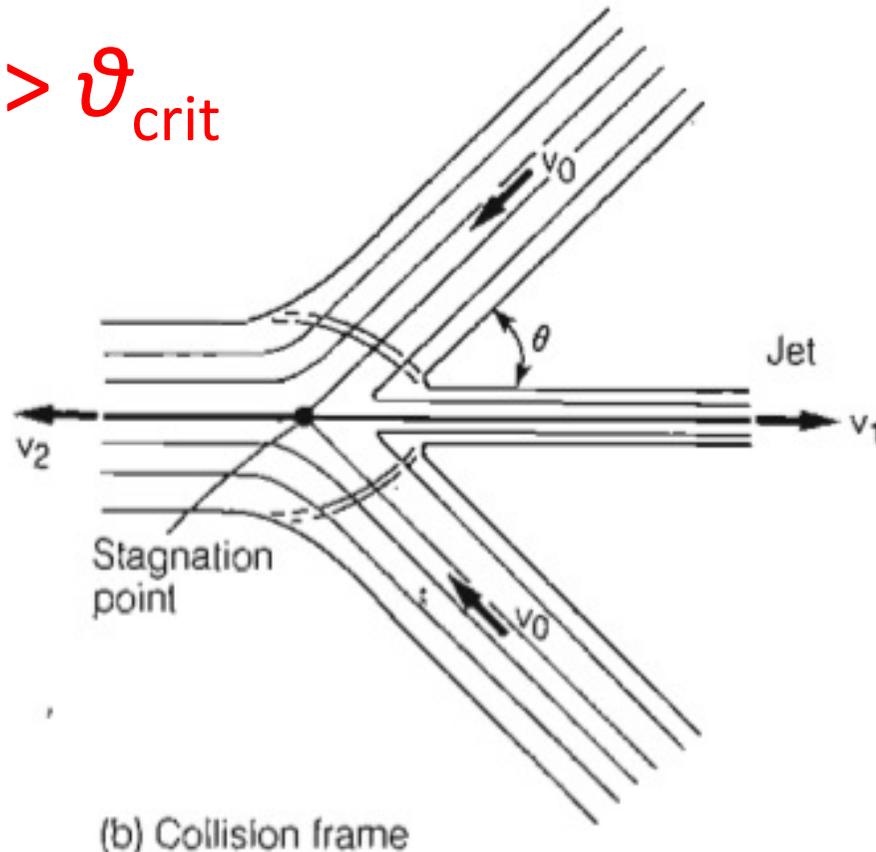
# Jettingの標準理論 -Shock polar-

ある $v_0$ に対して $u$ ,  $v$ が満たすべき条件



# Jettingの標準理論 -Jet速度-

$$\vartheta > \vartheta_{crit}$$



[Melosh89]

解なし状態とは？

- ・ 流入した質量/運動量を受け流せない。
- > Jetが運動量を持ち去る。
- ※ 衝撃波が脱離し、膨張波が発生。

実験室系Jet速度

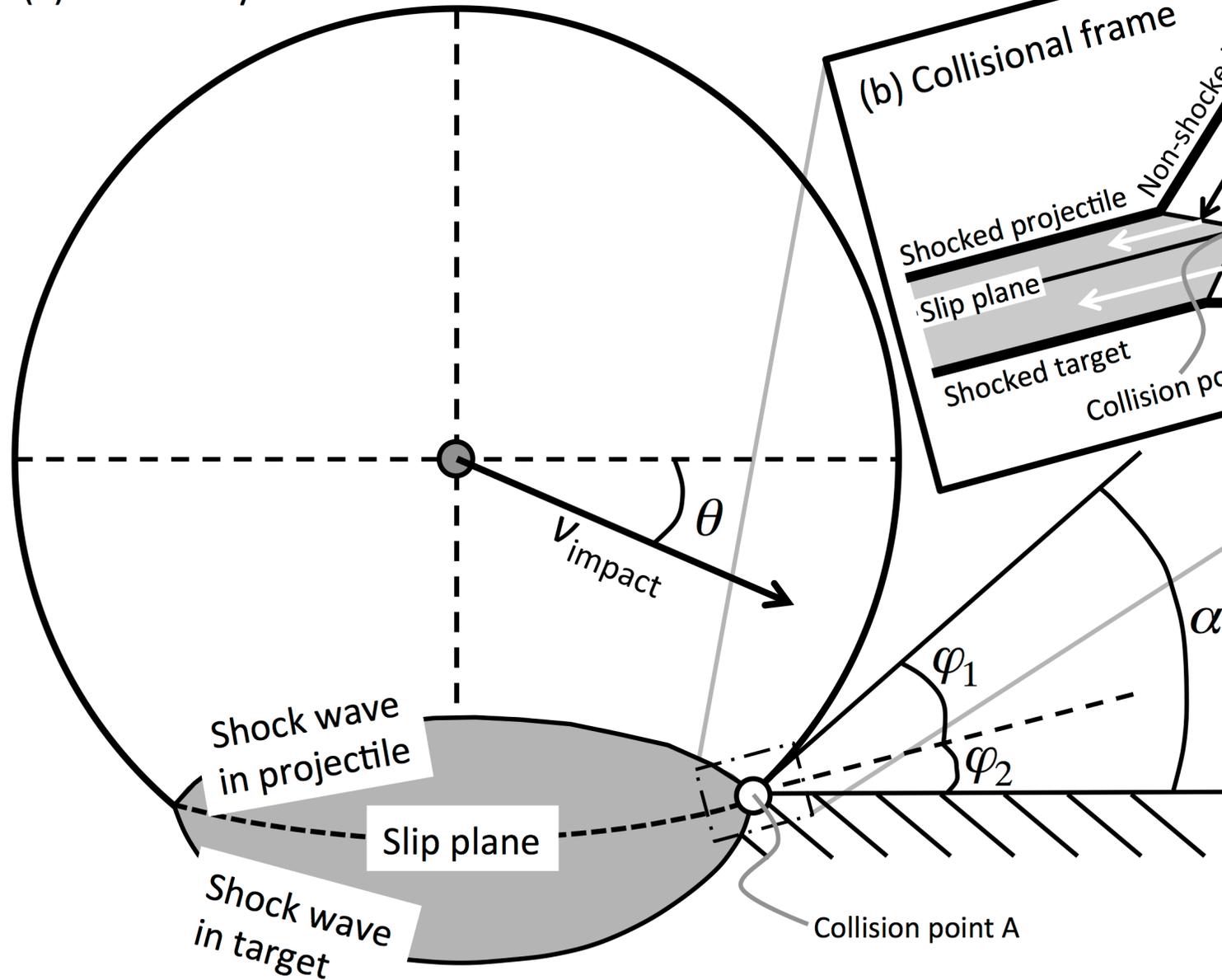
$$\begin{aligned} V_{jet} &= f v_0 + V_c \\ &= v_p (f / \tan \vartheta + 1 / \sin \vartheta) \end{aligned}$$

流入速度  $v_0$  の  $f$  倍 (0 から 1 のパラメータ) で Jet が噴出。  
※ ベルヌーイの定理が成り立つなら  $f = 1$

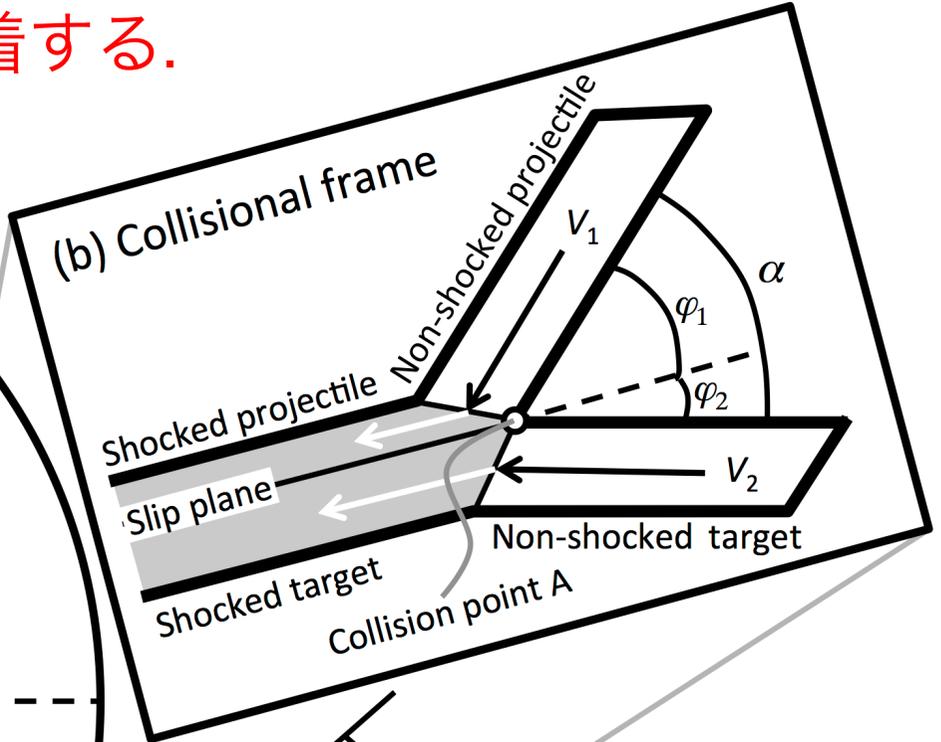
# 標準理論の球弾丸斜め衝突への適用

非対称二次元平板衝突問題に帰着する.

(a) Laboratory frame



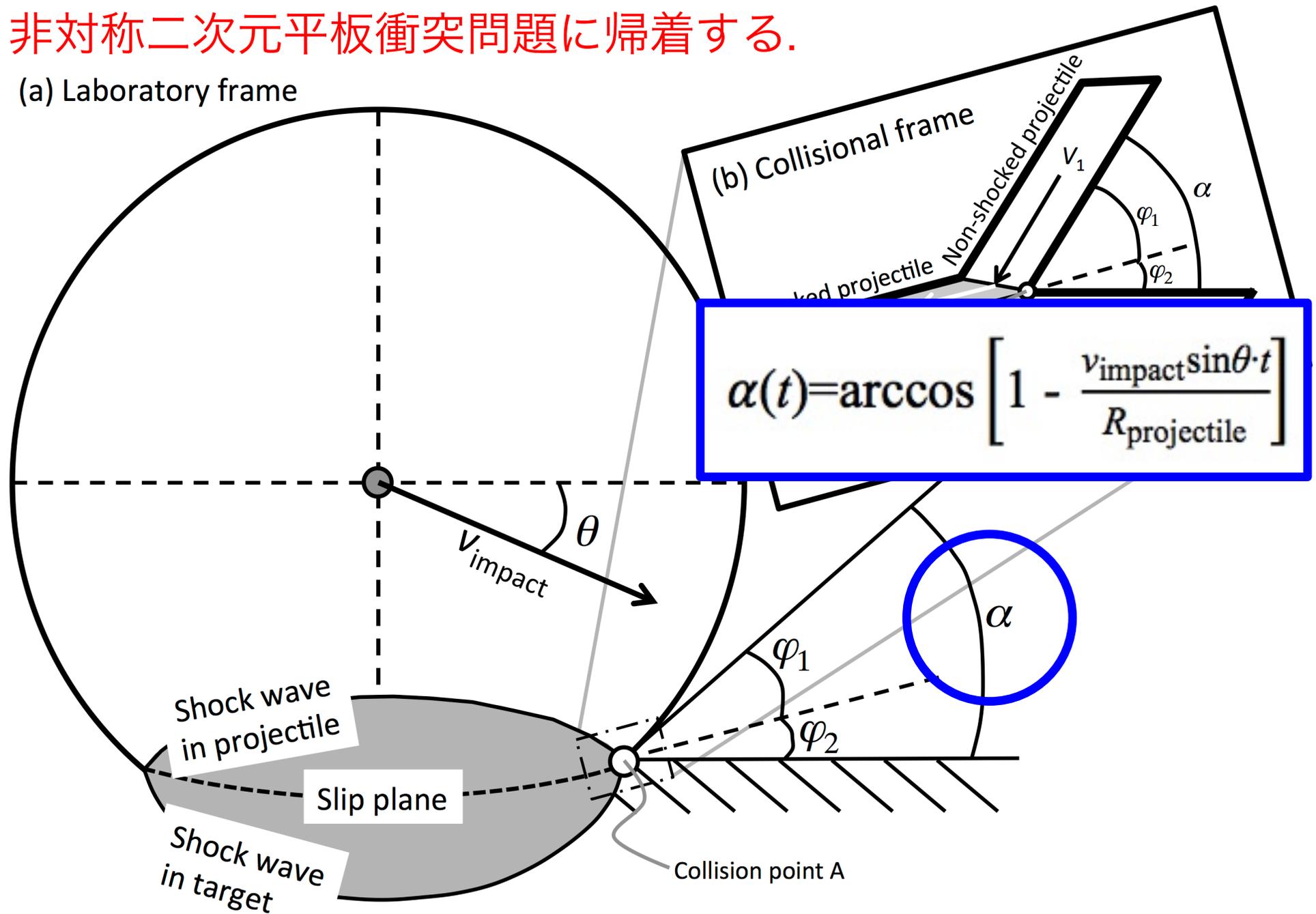
(b) Collisional frame



# 標準理論の球弾丸斜め衝突への適用

非対称二次元平板衝突問題に帰着する。

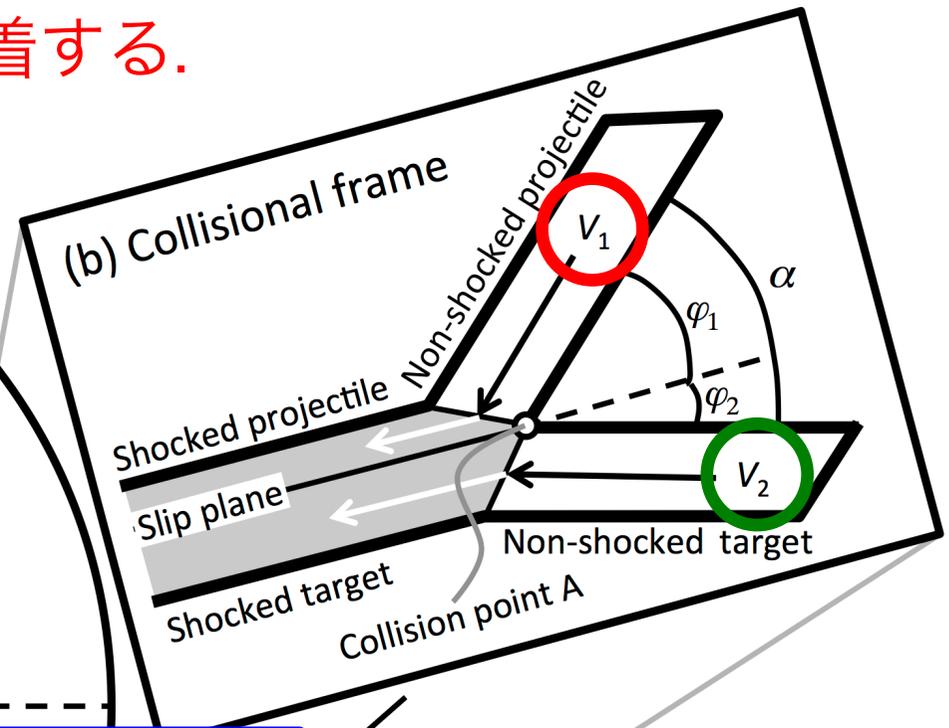
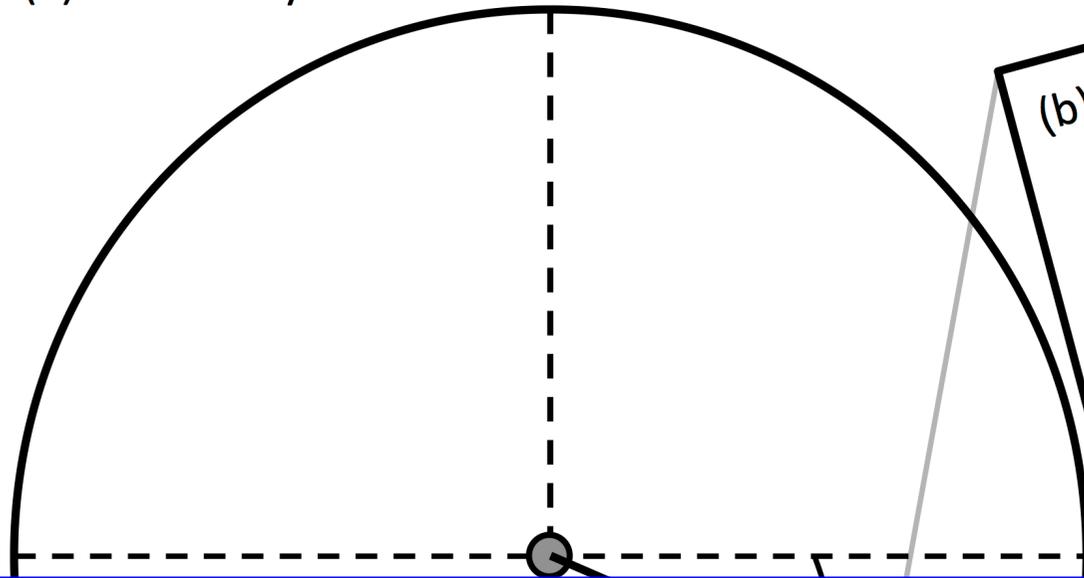
(a) Laboratory frame



# 標準理論の球弾丸斜め衝突への適用

非対称二次元平板衝突問題に帰着する。

(a) Laboratory frame



$$V_1 = \frac{v_{\text{impact}} \sin \theta}{\sin \alpha} \quad \leftarrow \text{弾丸}$$

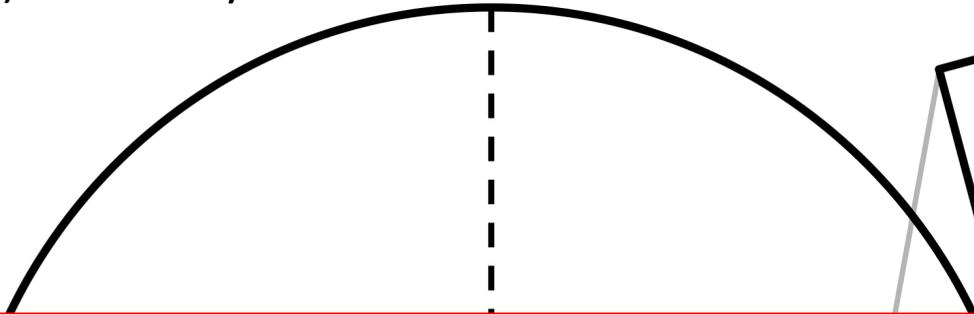
標的 ↓

$$V_2 = \frac{v_{\text{impact}} \sin \theta}{\tan \alpha} + v_{\text{impact}} \cos \theta$$

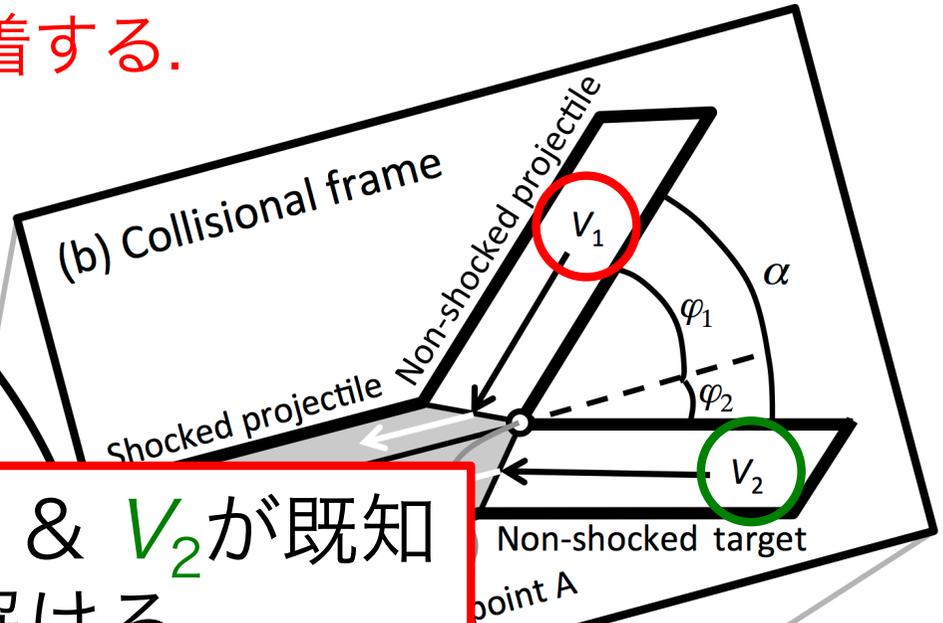
# 標準理論の球弾丸斜め衝突への適用

非対称二次元平板衝突問題に帰着する。

(a) Laboratory frame



(b) Collisional frame



点P固定系での"衝突速度" $V_1$  &  $V_2$ が既知  
->平板問題と同様の計算で解ける。

$$V_1 = \frac{v_{\text{impact}} \sin \theta}{\sin \alpha} \quad \leftarrow \text{弾丸}$$

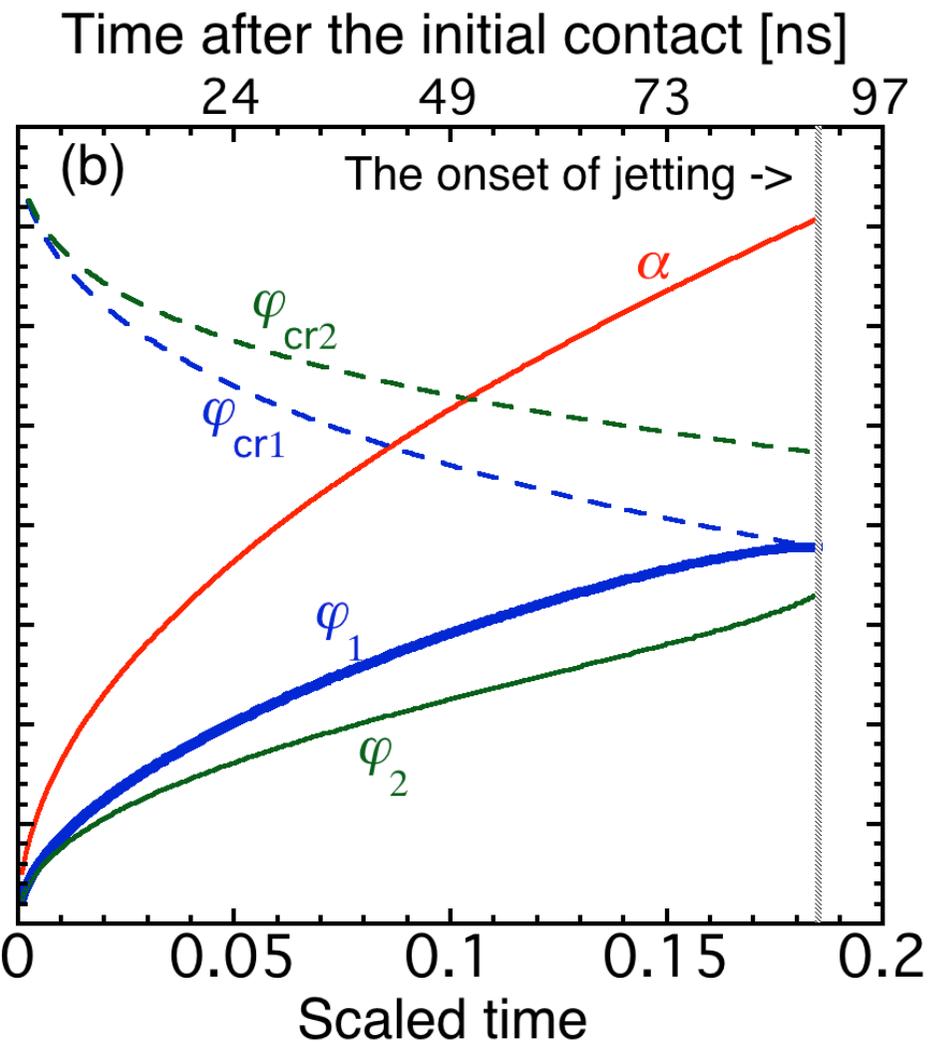
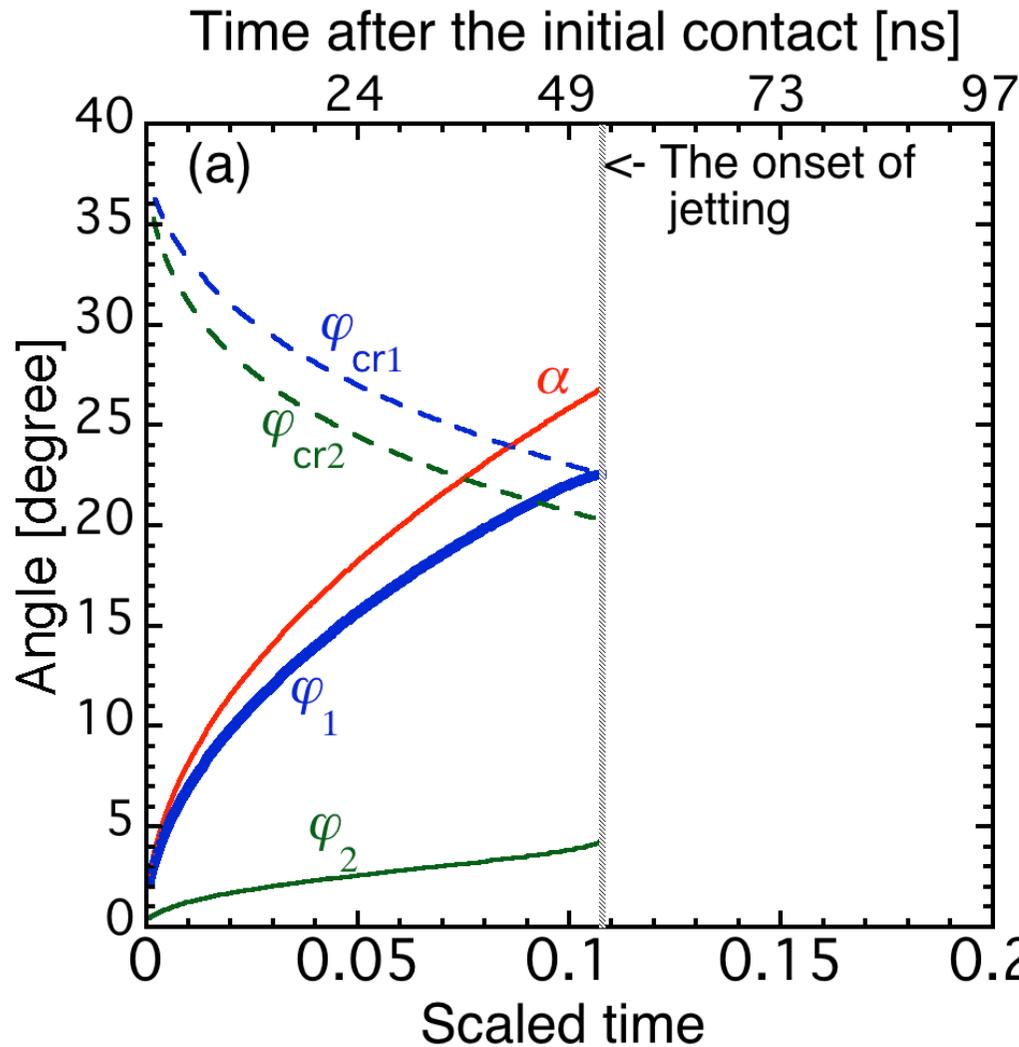
標的↓

$$V_2 = \frac{v_{\text{impact}} \sin \theta}{\tan \alpha} + v_{\text{impact}} \cos \theta$$

# 例: 7 km/sで貫入中の $\alpha$ , $\phi_1$ , $\phi_2$

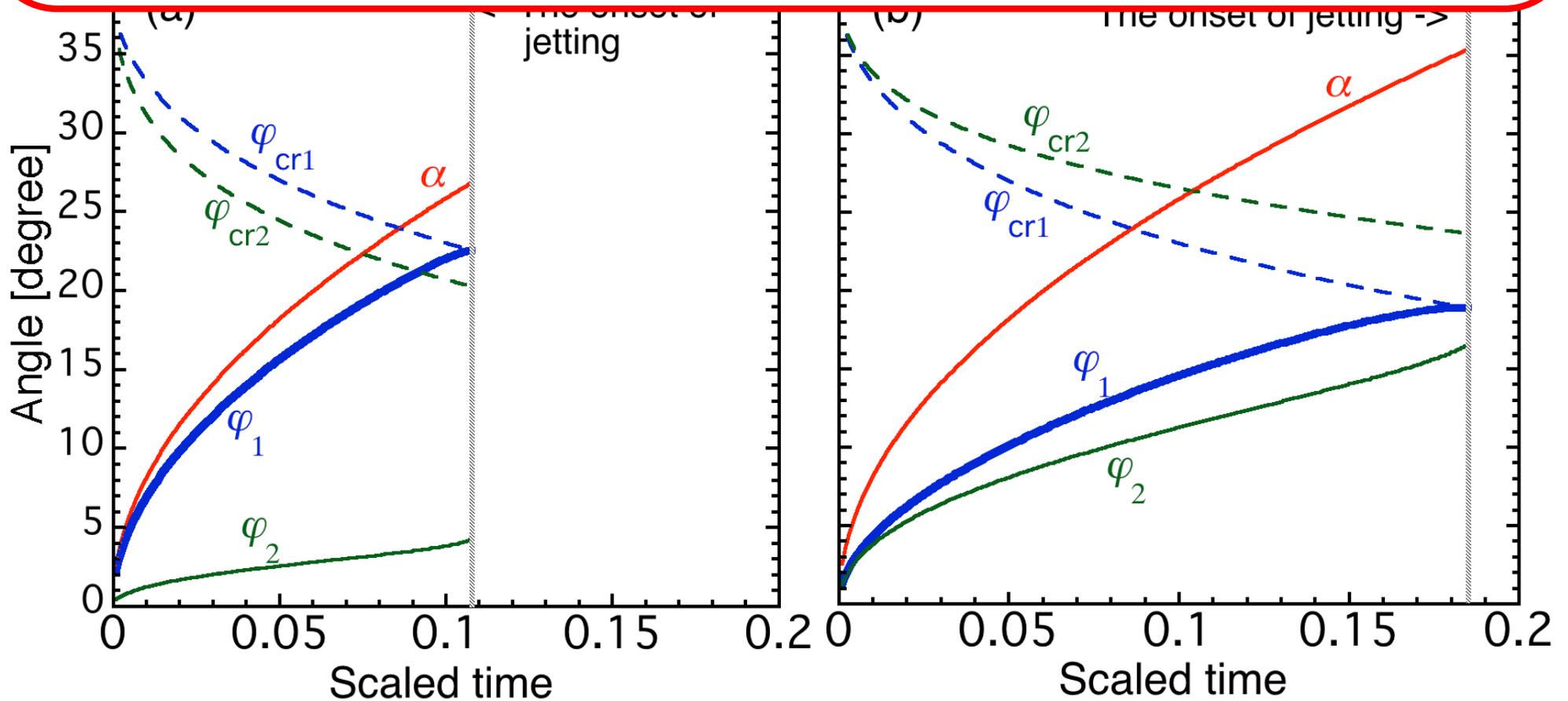
ポリカ球 -> 銅平板

ポリカ球 -> ポリカ平板



- 両側の物質が同時にJet噴射条件を満たす訳ではない
- 片方の物質がJetを噴射した場合,  
反対側も噴射を開始するはずだ.

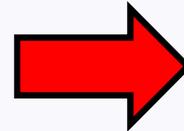
[Walsh+53; Ang90]



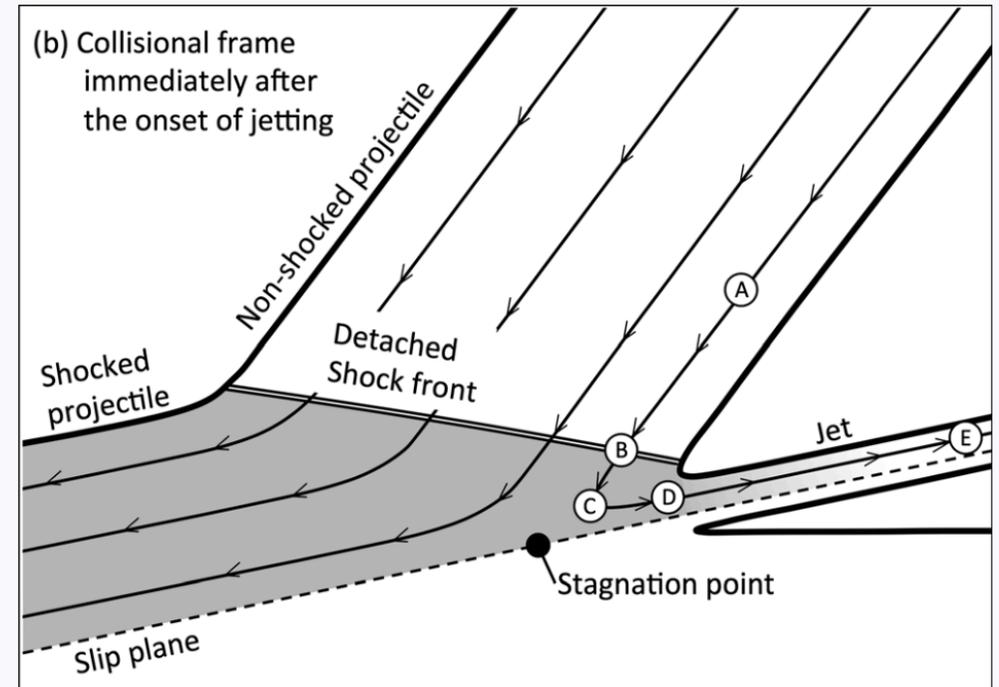
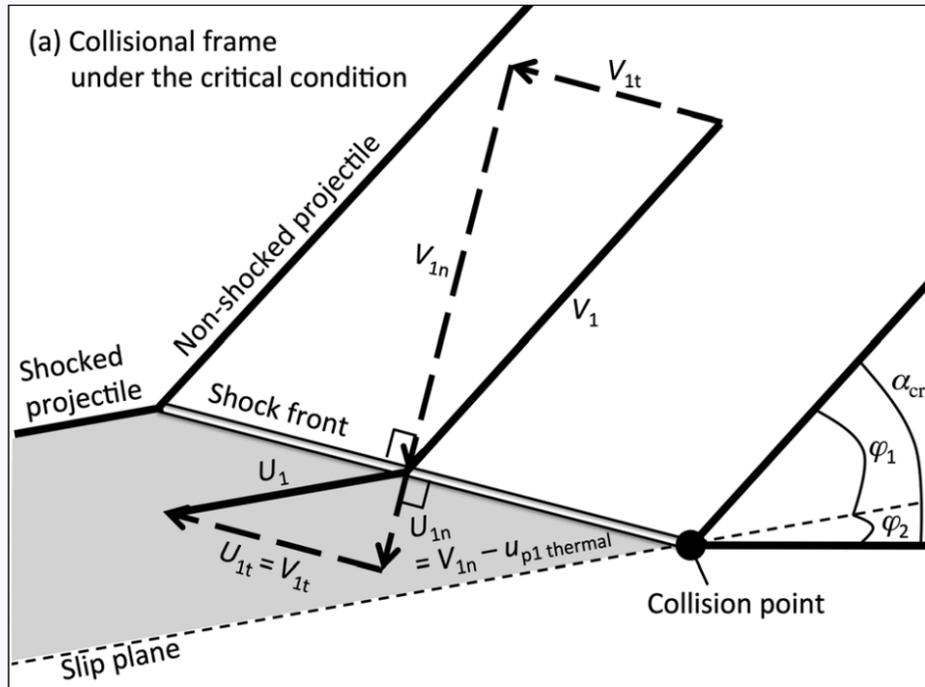
# Jet速度

球弾丸: 貫入中に臨界条件を超える.

Jetなし



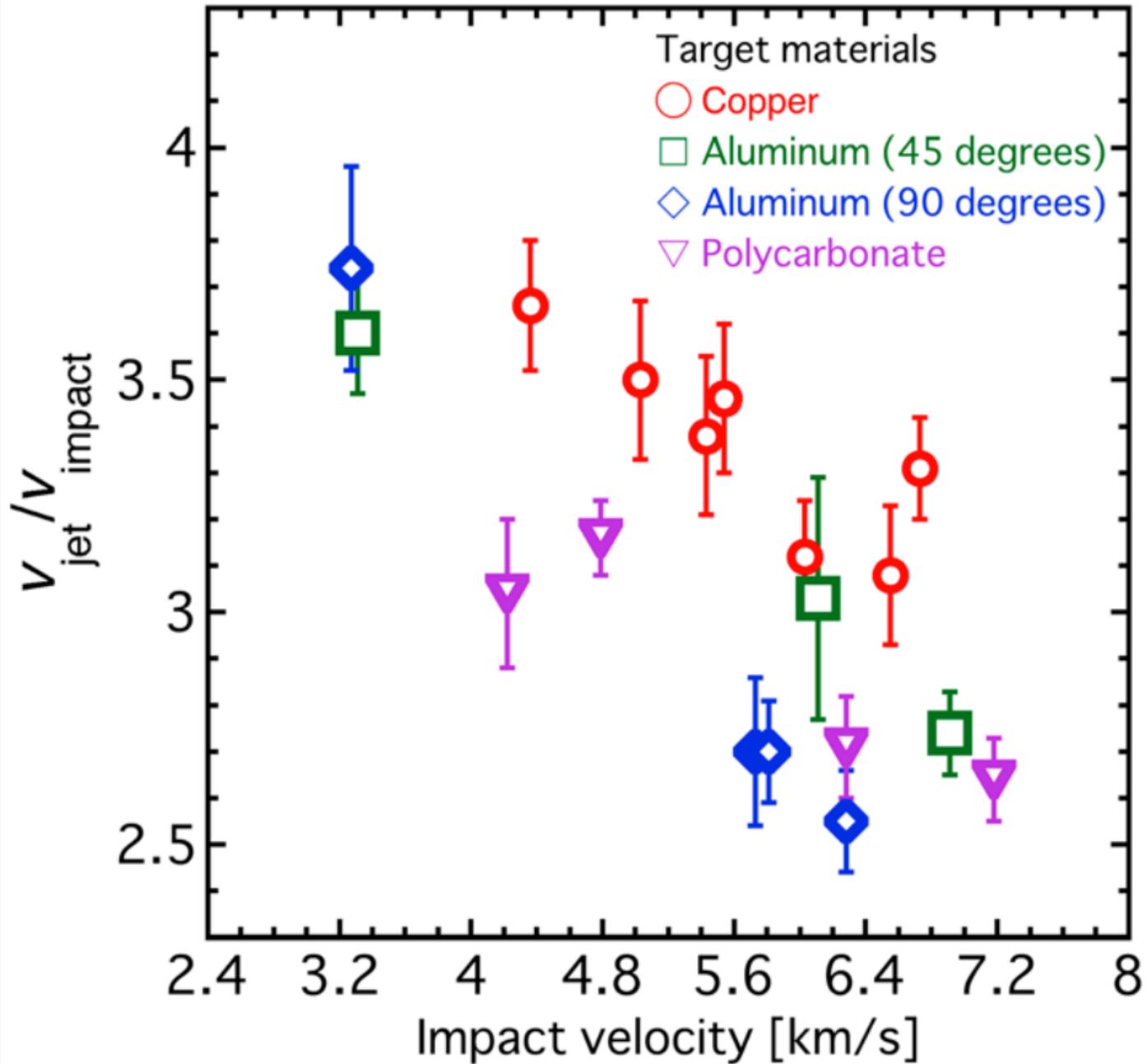
Jetあり



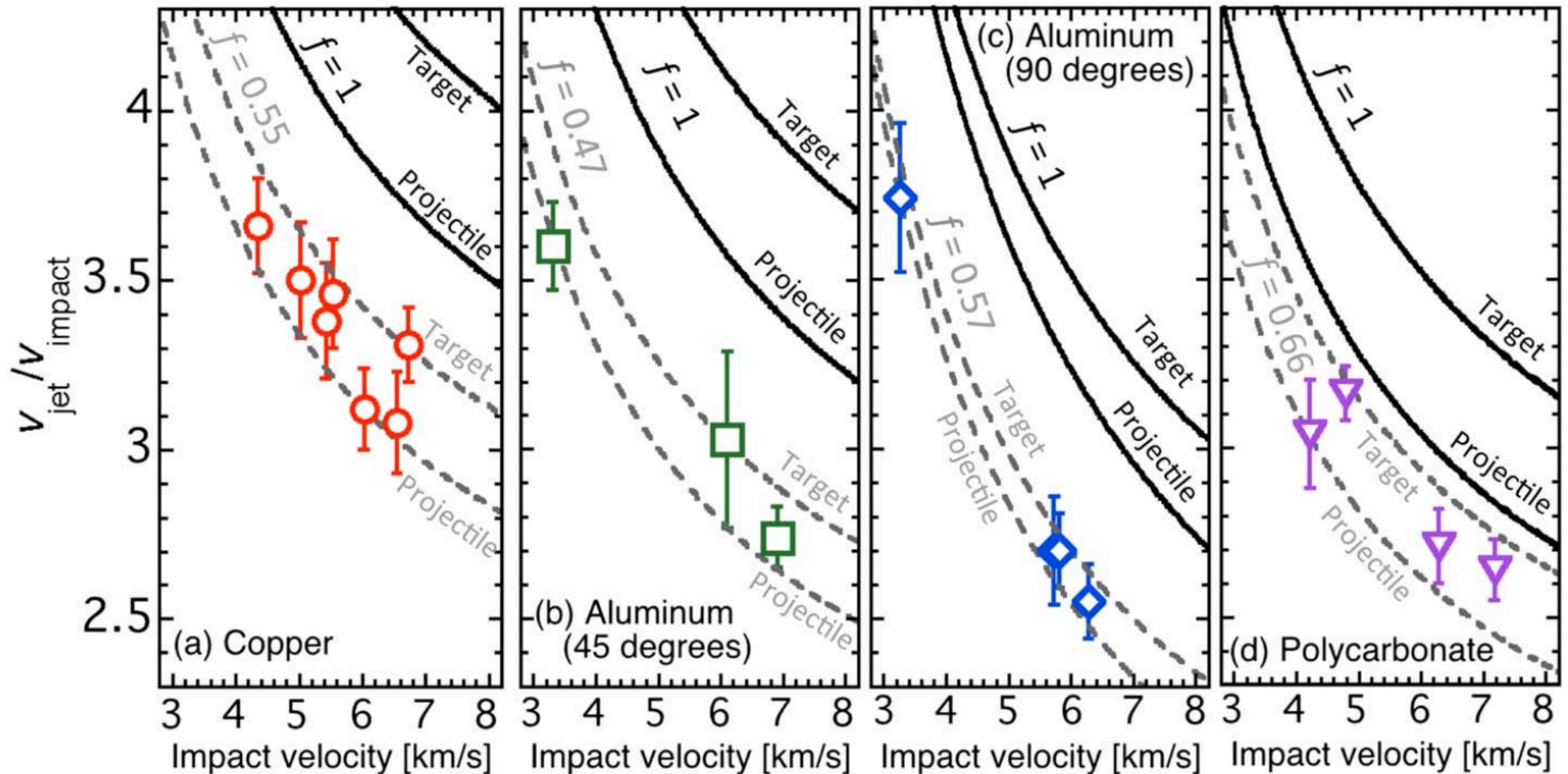
実験結果と比較したい.

地表面に射影した実験室系Jet速度  $v_{jet} = fV_i \cos(\phi_2) + V_2$

# 実験結果 vs 標準理論



# 実験結果 vs 標準理論

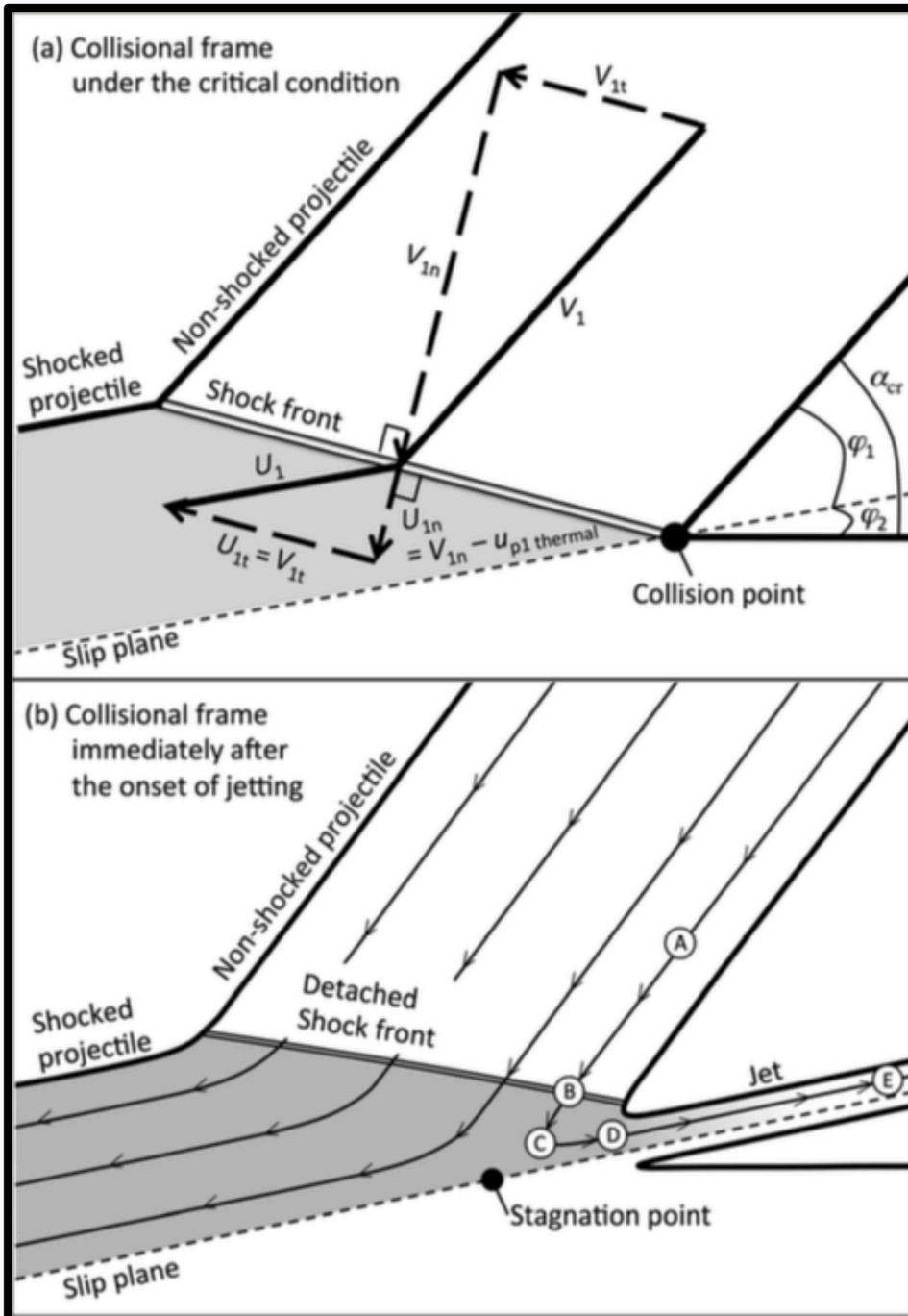


- ☆標準理論はJet速度の衝突速度依存性をよく再現.
- ☆係数  $f$  は系統的に  $f < 1$ ,  $f = 0.5-0.7$

# Impact jettingの 改良モデル

衝撃波と膨張波の干渉の帰結として  
経験的パラメータ $f$ を用いずにJet速度を計算する.

# 流線にそった点P固定座標での粒子速度変化



Point A (衝撃波入射前)

$$u_p = V_1 \text{ (Effective impact velocity)}$$

Point B (衝撃圧縮直後)

$$u_p = U = (U_n^2 + U_t^2)^{1/2}$$

$$U_n = V_n - u_{pH}$$

$$U_t = V_t$$

Point B → C → D (断熱圧縮)

$$u_p = U$$

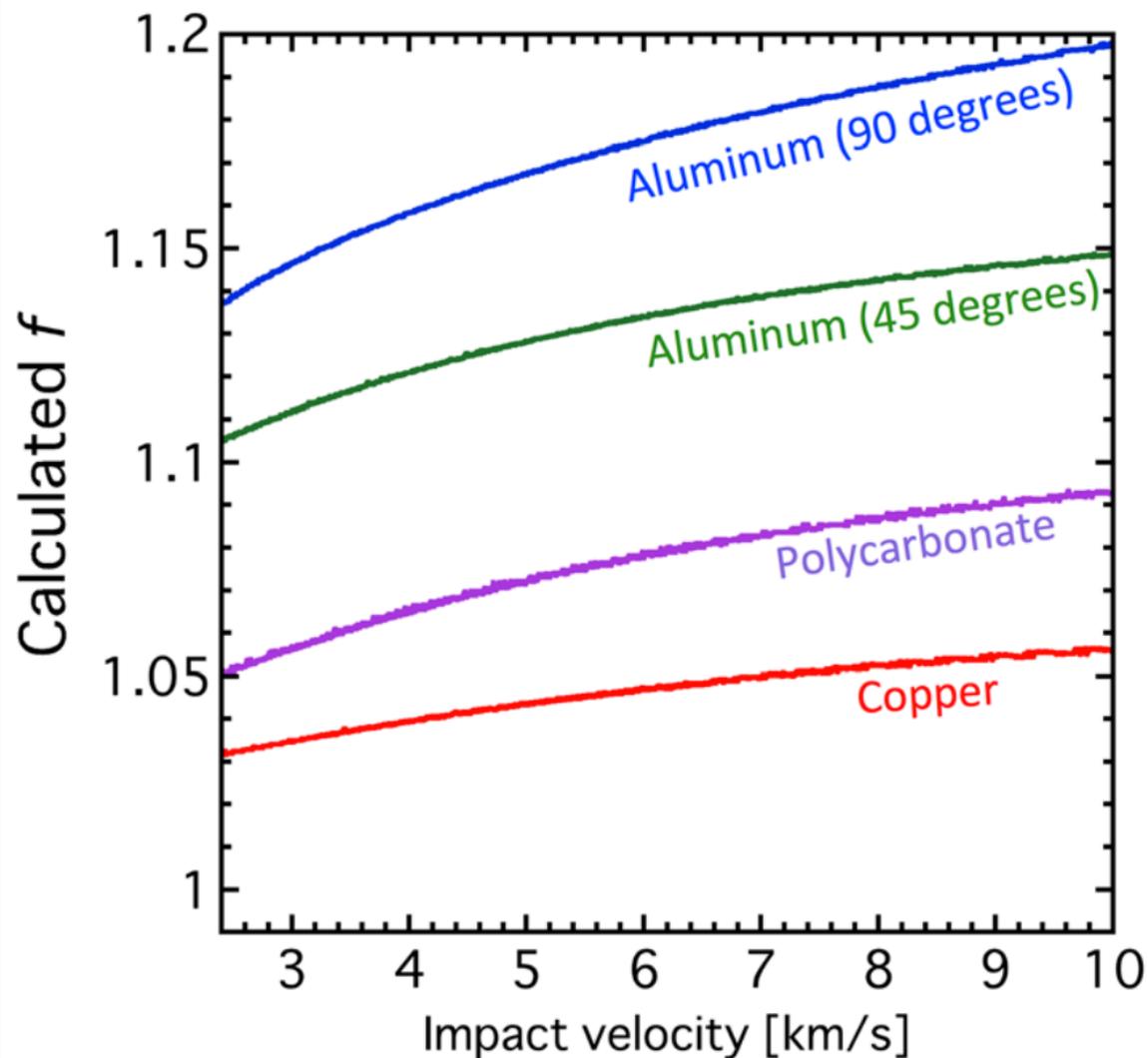
& 膨張波到達.

粒子速度の絶対値は変化しない.

Point D (真空への断熱膨張)

$$u_p = U + \Delta u_p$$

# 改良モデルによる係数 $f$



$$f = \frac{U + \Delta u_p}{V_1}$$

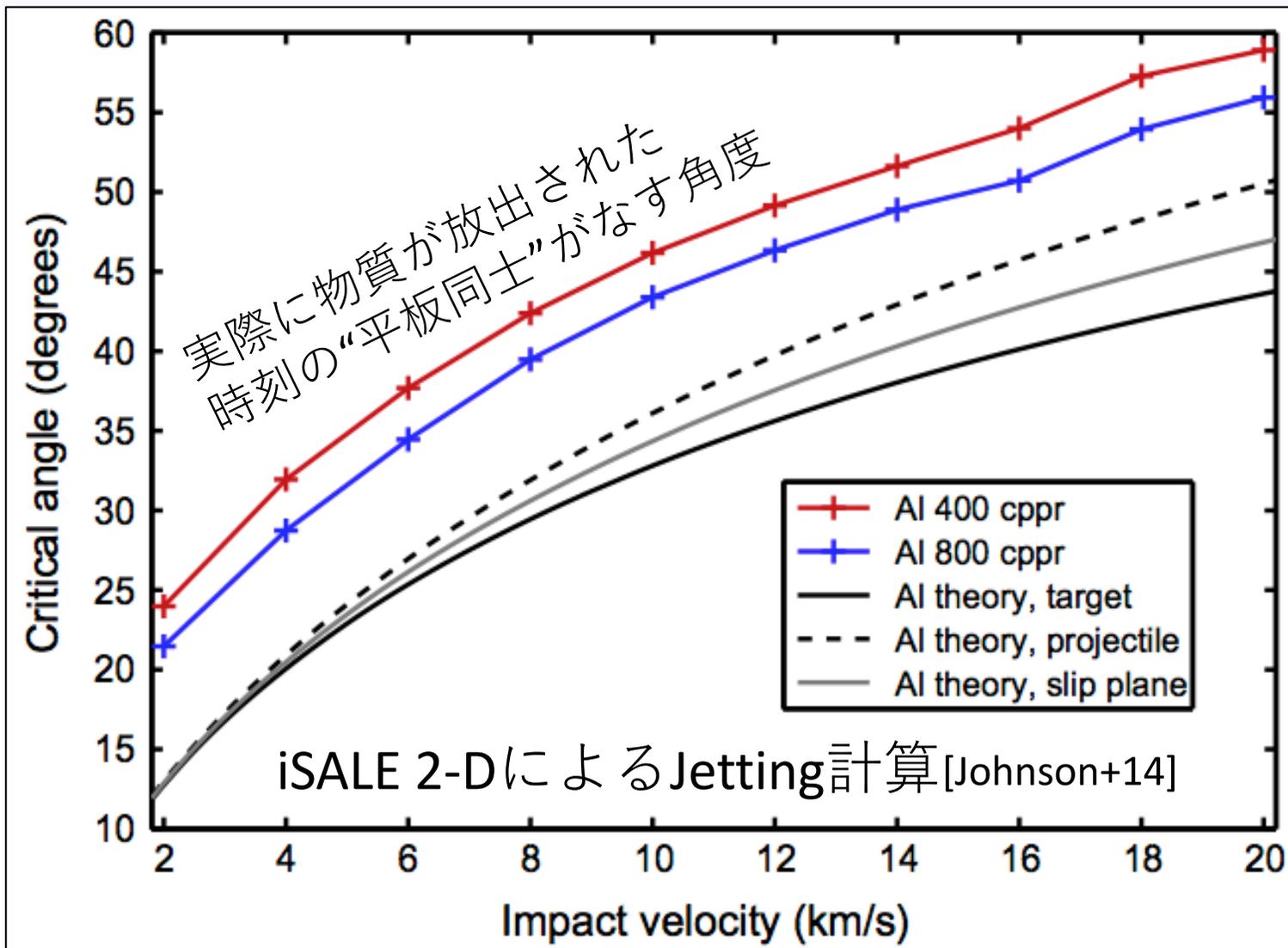
経験的パラメータ  $f$  を  
熱力学から導出.

ただし, やはり  $f \sim 1$

※実験結果:  $f = 0.5-0.7$

# Jet開始時と臨界角達成時の時間差

- × 臨界角達成時点でのJetの質量はゼロ. [Walsh+53]  
->Jet流に十分な質量が集まるのに有限の時間がかかる.

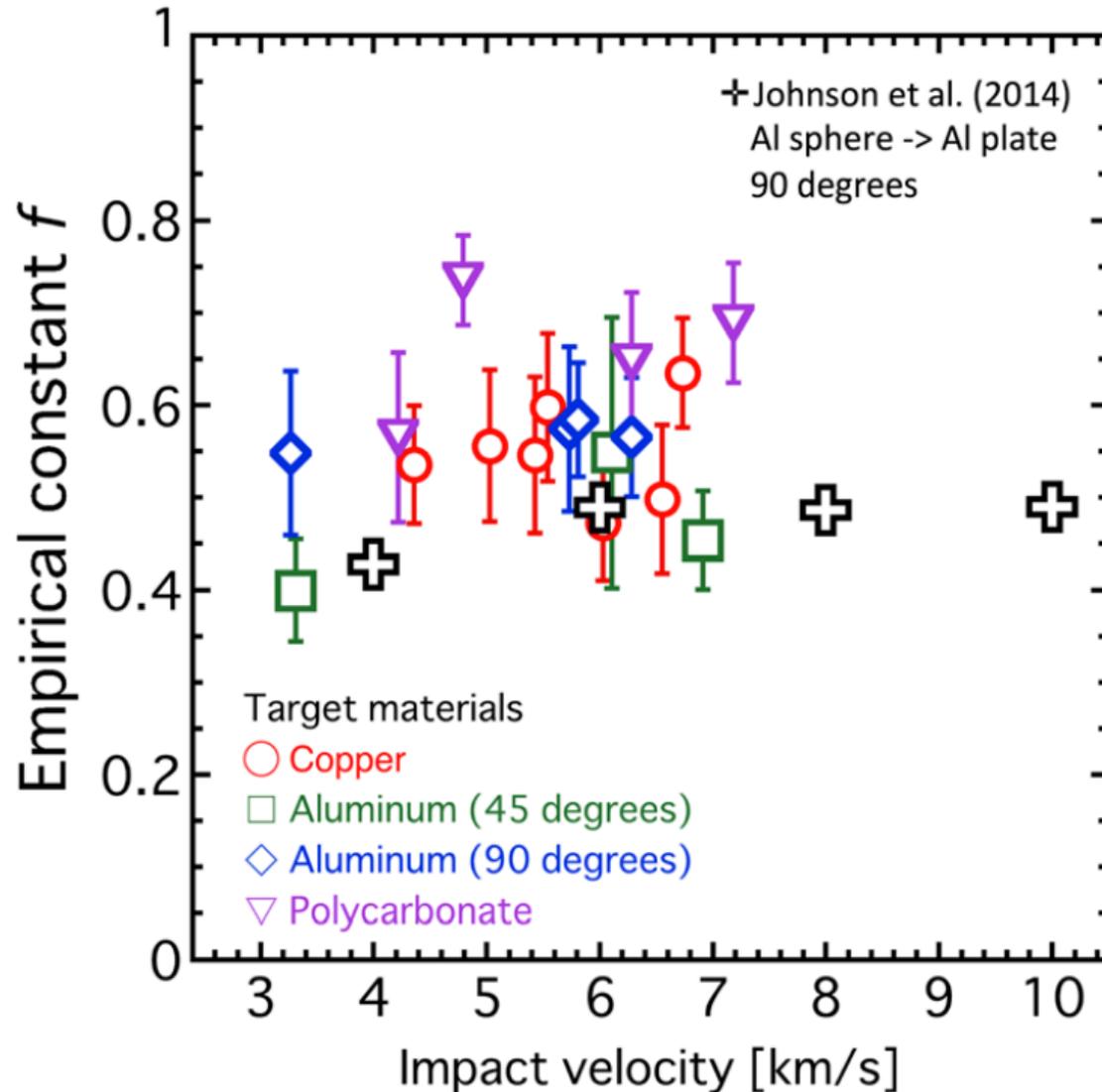


Jet発生時角度  
~臨界角+10°

# Jet開始時と臨界角達成時の時間差

実験結果 vs

Jetの発生遅れを考慮したiSALE計算中の係数 $f$



$f < 1$

Jet発生遅れが原因.

# 衝突噴射(Jetting)まとめ

☆世界初のJet速度の系統的データを取得.

☆標準モデルは実験結果の傾向をよく再現.  
ただし経験的パラメータ  $f = 0.5-0.7$

☆衝撃波と膨張波の干渉の帰結として  
Jet速度を計算する改良モデルを提案.  
 $f \sim 1$ を物理的に導出可能.

☆ $f < 1$ の原因はJetの発生遅れ.

# 話の流れ

## 1. 衝撃波と膨張波の干渉

- a. 衝撃波/膨張波通過後の速度変化
- b. 幾何学効果の重要性

## 2. 衝突噴射現象(Impact jetting)

- a. 高速度衝突実験@PERC
- b. 従来の理論モデルと改良版モデル

## 3. 衝突剥離現象(Impact spallation)

- a. 数値衝突実験 with 2-D iSALE & 3-D SPH
- b. 後期加速現象の発見

## 4. 衝突掘削現象(Normal excavation)

- a. 残留速度による掘削流形成の解析モデル
- b. 衝突掘削の終焉による過渡クレータ形成

# 衝突剥離現象(Impact spallation)

- a. 数値衝突実験 with 2-D iSALE (& 3-D SPH)
- b. 後期加速現象の発見

今日はiSALEの結果をお見せします。

Icarus 301 (2018) 219–234

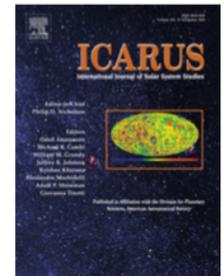


ELSEVIER

Contents lists available at [ScienceDirect](#)

Icarus

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/icarus](http://www.elsevier.com/locate/icarus)



Hydrocode modeling of the spallation process during hypervelocity impacts: Implications for the ejection of Martian meteorites



Kosuke Kurosawa<sup>a,\*</sup>, Takaya Okamoto<sup>a</sup>, Hidenori Genda<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Planetary Exploration Research Center, Chiba Institute of Technology, 2-17-1, Tsudanuma, Narashino, Chiba 275-0016, Japan

<sup>b</sup> Earth-Life Science Institute, Tokyo Institute of Technology, 2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8550, Japan

(別刷り, あり☑)

# 火星隕石(現在201個)



**THE METEORITICAL SOCIETY**  
International Society for Meteoritics and Planetary Science



MetSoc Home    Publications    Search Meteorites

Search the [Meteoritical Bulletin Database](#)  
**Last update: 3 Feb 2018**

**Search for:**  Names     Text <sup>?</sup>     Places     Classes

**Search type:**  Contains     Starts with     Exact     Sounds like

**Search limits:** All countries     Martian meteorites      NonAntarctic     Falls     Has photo

**Display:** Link to Google Earth     Sort by name     50 lines/page     Normal table      Limit to approved meteorite names

**Publication:** All bulls

**What's new in the last:** (no time limit)

Search text:     Search!    Reset



201 records found for meteorites (Martian meteorites) with names that contain "\*" (click on a name for more information; click in header to sort)

Showing data for page 1 of 5: records 1 - 50

Select page: ( [1](#) [2](#) [3](#) [4](#) [5](#) ) [Next page](#)

Name <sup>?</sup>	Abbrev <sup>?</sup>	Status <sup>?</sup>	Fall <sup>?</sup>	Year <sup>?</sup>	Place <sup>?</sup>	Type <sup>?</sup>	Mass <sup>?</sup>	MetBull <sup>?</sup>	A
<a href="#">Allan Hills A77005</a> **	ALHA77005	Official		1977	Antarctica	<a href="#">Martian (shergottite)</a>	483 g	<a href="#">76</a>	<a href="#">40</a>
<a href="#">Allan Hills 84001</a> **	ALH 84001	Official		1984	Antarctica	<a href="#">Martian (OPX)</a>	1931 g	<a href="#">76</a>	<a href="#">16</a>
<a href="#">Chassigny</a>		Official	Y	1815	Champagne-Ardenne, France	<a href="#">Martian (chassignite)</a>	4 kg		<a href="#">1</a>
<a href="#">Dar al Gani 476</a> **	DaG 476	Official		1998	Al Jufrah, Libya	<a href="#">Martian (shergottite)</a>	2.02 kg	<a href="#">83</a>	<a href="#">1</a>
<a href="#">Dar al Gani 489</a> **	DaG 489	Official		1997	Al Jufrah, Libya	<a href="#">Martian (shergottite)</a>	2.15 kg	<a href="#">83</a>	<a href="#">1</a>



# 火星隕石(現在201個)



**THE METEORITICAL SOCIETY**  
International Society for Meteoritics and Planetary Science



MetSoc Home

Publications

Search Meteorites

Search the [Meteoritical Bulletin Database](#)  
**Last update: 3 Feb 2018**

Search for:  Names  Text  Places  Classes

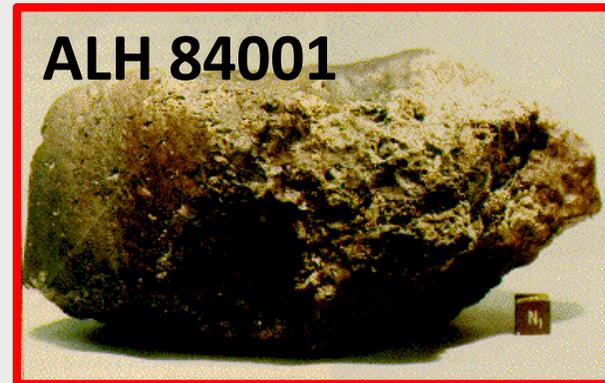
Search type:  Contains  Starts with  Exact  Sounds like

Search limits:    NonAntarctic  Falls  Has photo

Display:      Limit to approved meteorite names

Publication:  **What's new in the last:**

Search text:  Search!



201 records found for meteorites (Martian meteorites) with names that contain "\*" (click on a name for more information; click in header to sort)

Showing data for page 1 of 5: records 1 - 50

Select page: ( [1](#) [2](#) [3](#) [4](#) [5](#) ) [Next page](#)

Name	Abbrev	Status	Fall	Year	Place	Type	Mass	MetBull	A
<a href="#">Allan Hills A77005</a> **	ALHA77005	Official		1977	Antarctica	<a href="#">Martian (shergottite)</a>	483 g	<a href="#">76</a>	<a href="#">40</a>
<a href="#">Allan Hills 84001</a> **	ALH 84001	Official		1984	Antarctica	<a href="#">Martian (OPX)</a>	1931 g	<a href="#">76</a>	<a href="#">16</a>
<a href="#">Chassigny</a>		Official	Y	1815	Champagne-Ardenne, France	<a href="#">Martian (chassignite)</a>	4 kg		

- ・ 熔融固化層に閉じ込められた火星大気成分
  - ・ 地球の石と異なる酸素同位体
- > 火星から来たことは間違いなさそうだ.

# 火星隕石放出時の2つの制約

Sample	Mass (kg)	Size (m)	Type	Max. $P_{sh}$ (GPa)	Crystallization age (Ma)	$T_{ej}$ (Ma)
Source crater 1 EET79001	7.94	0.22	Basalt	30–43	?	$0.82 \pm 0.2$
Source crater 2 DAG 476	2.015	0.14	Basalt	40–50	<400	$1.2 \pm 0.2$
DAG 489 (paired)	2.146 4.161	0.14 0.17				
Source crater 3 Shergotty	4	0.17	Basalt	30–43	180	$2.75 \pm 0.17$
Zagami	18	0.28			180	$2.71 \pm 0.45$
QUE94201	0.012	0.03			330	$2.81 \pm 0.18$ ( $2.76 \pm 0.06$ )
Source crater 4 ALH77005	0.483	0.08	Lherzolite	30–43	$187 \pm 12$	$3.52 \pm 0.55$
LEW88516	0.013	0.03		30–43	?	$4.15 \pm 0.62$
Y793605	0.016	0.03		30–50	$210 \pm 62$	$4.4 \pm 1$ ( $3.84 \pm 0.64$ )
Source crater 5 (and 6?) Nakhla	40	0.37	Cpx	–	1300	$11.6 \pm 1.8$
Lafayette	0.8	0.10	Ol-cpx			$10.1 \pm 2.2$
Governador Valadares	0.16	0.06	Cpx			$11.4 \pm 2.1$ ( $11.0 \pm 0.9$ )
Chassigny	4	0.17	Dunite	~35	1300	$11.6 \pm 1.5$
Source crater 6 (7?) ALH84001	1.931	0.14	Opx	Complex	4500	$14.4 \pm 0.7$

“The MM condition”  
(MM = Martian meteorite)

制約 1

$v_{ej} > 5 \text{ km/s}$   
(火星脱出速度)

制約 2

$P_{peak} = 30\text{--}50 \text{ GPa}$   
(低衝撃圧)

[Compiled by Head+02]

※実際にはサイズを説明するための歪速度や含まれている高圧相鉱物を説明するための高圧持続時間などの制約もあるが今回は議論しない。

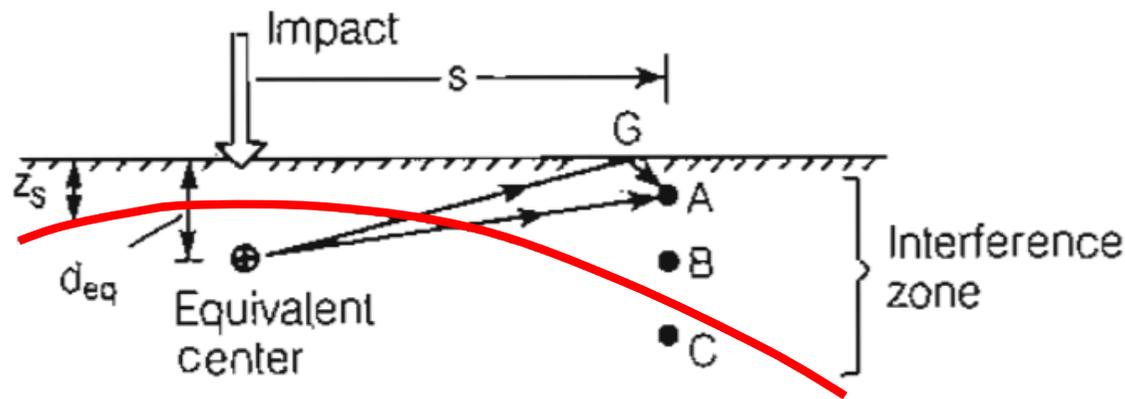
# Impact Ejection, Spallation, and the Origin of Meteorites

H. J. MELOSH

*Lunar and Planetary Laboratory, University of Arizona, Tucson, Arizona 85721*

Received February 28, 1983; revised April 2, 1984

Recent discoveries suggest that some meteorites have originated from major planets or satellites. Although it has been suggested that a large primary impact event might eject rock fragments as secondaries, it was previously supposed that material ejected at several kilometers per second would be highly shocked or perhaps melted. It is shown that a small amount of material (0.01 to 0.05 projectile mass) may be ejected at high velocity without suffering petrologically detectable shock pressures. The approach utilizes observations of stress-wave propagation from large underground explosions to predict stresses and particle velocities in the near-surface environment. The largest fragments ejected at any velocity are spalls that originate from the target planet's surface. The spall size is proportional to the radius of the primary impactor and the target tensile strength and inversely proportional to ejection velocity. The shock level in the spalls is low, typically half of the dynamic crushing strength of the rock. The model also predicts the aspect ratio of the spalled fragments, the angle of ejection, and the sizes and shock level of other fragments originating deeper in the target. Comparison with data from laboratory experiments, the Ries Crater, and secondary crater sizes shows generally good agreement, although the observed fragment size at ejection velocities greater than 1 km/sec is considerably smaller than the simple version of the theory predicts. The theory indicates that although significant masses of solid material could be ejected from the Moon or Mars by large meteorite impacts, the fragments ejected from ca. 30-km-diameter craters are at most a few tens of meters in diameter if the most optimistic assumptions are made. The maximum fragment diameter is more likely to be about a meter. This theory, however, applies rigorously only up to ejection velocities of ca 1 km/sec. Further numerical extensions are necessary before firm conclusions can be drawn, especially for Martian ejecta.

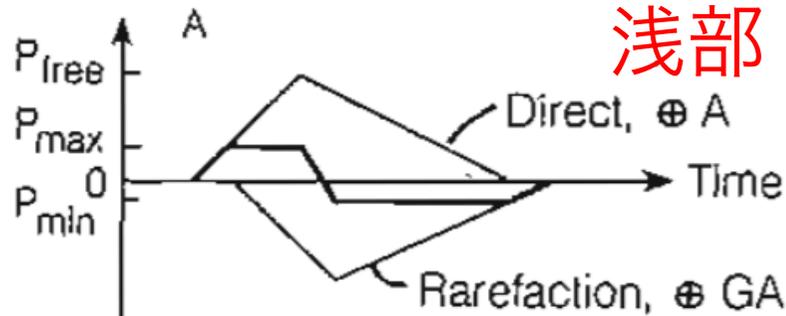


## The Origin of Meteorites

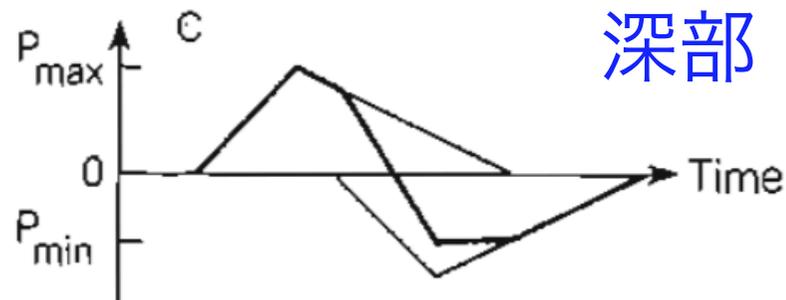
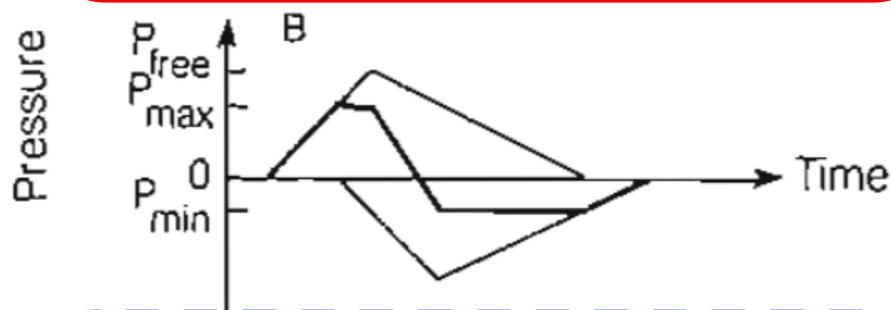
H

Arizona, Tucson, Arizona 85721

vised April 2, 1984



自由表面付近の干渉領域内  
低衝撃圧と高速度放出の  
両立は可能



ress wave propagation from large under-  
ities in the near-surface environment. The  
originate from the target planet's surface.  
y impactor and the target tensile strength  
k level in the spalls is low, typically half of  
so predicts the aspect ratio of the spalled  
level of other fragments originating deeper  
periments, the Ries Crater, and secondary  
the observed fragment size at ejection  
er than the simple version of the theory  
masses of solid material could be ejected  
ragments ejected from ca. 30-km-diameter  
e most optimistic assumptions are made.  
ut a meter. This theory, however, applies  
urther numerical extensions are necessary  
rtian ejecta.

## Impact Ejection, Spallation, and the Origin of Meteorites

H. J. MELOSH

*Lunar and Planetary Laboratory, University of Arizona, Tucson, Arizona 85721*

Received February 28, 1983; revised April 2, 1984

This theory, however, applies rigorously only up to ejection velocities of ca 1 km/sec. Further numerical extension are necessary before firm conclusions can be drawn, especially for Martian ejecta.

三角波の仮定は衝撃波存在下では適用不可。  
-> 数値解法[Head+02; Artemieva&Ivanov04]

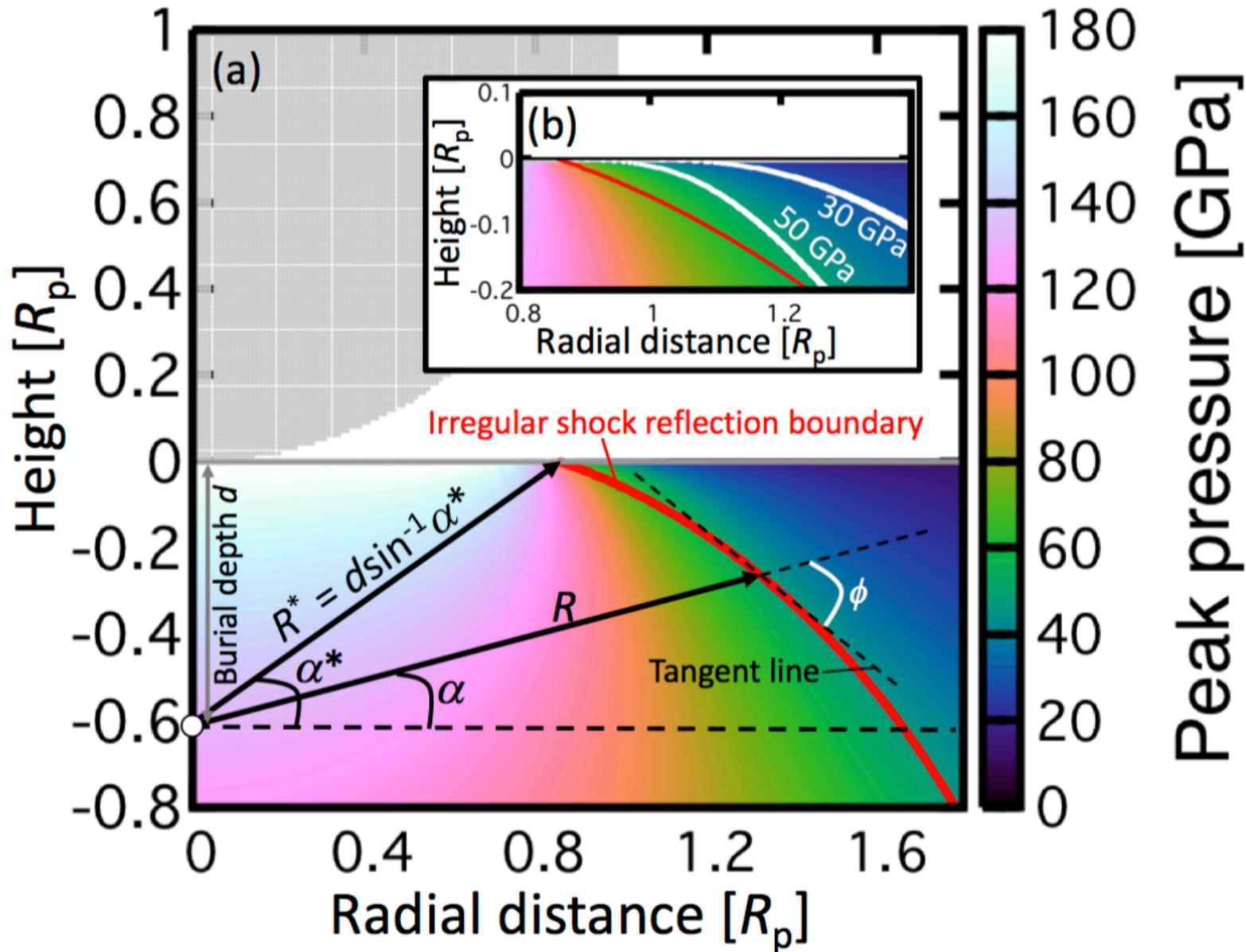
※JettingからSpallationへの遷移は滑らかに起こるため実験的検証は困難。

The maximum fragment diameter is more likely to be about a meter. This theory, however, applies rigorously only up to ejection velocities of ca 1 km/sec. Further numerical extensions are necessary before firm conclusions can be drawn, especially for Martian ejecta.

# 衝撃波発生条件でも干渉領域は形成される.

[Rosenbaum&Snay56; Kamegai86; Melosh+17]

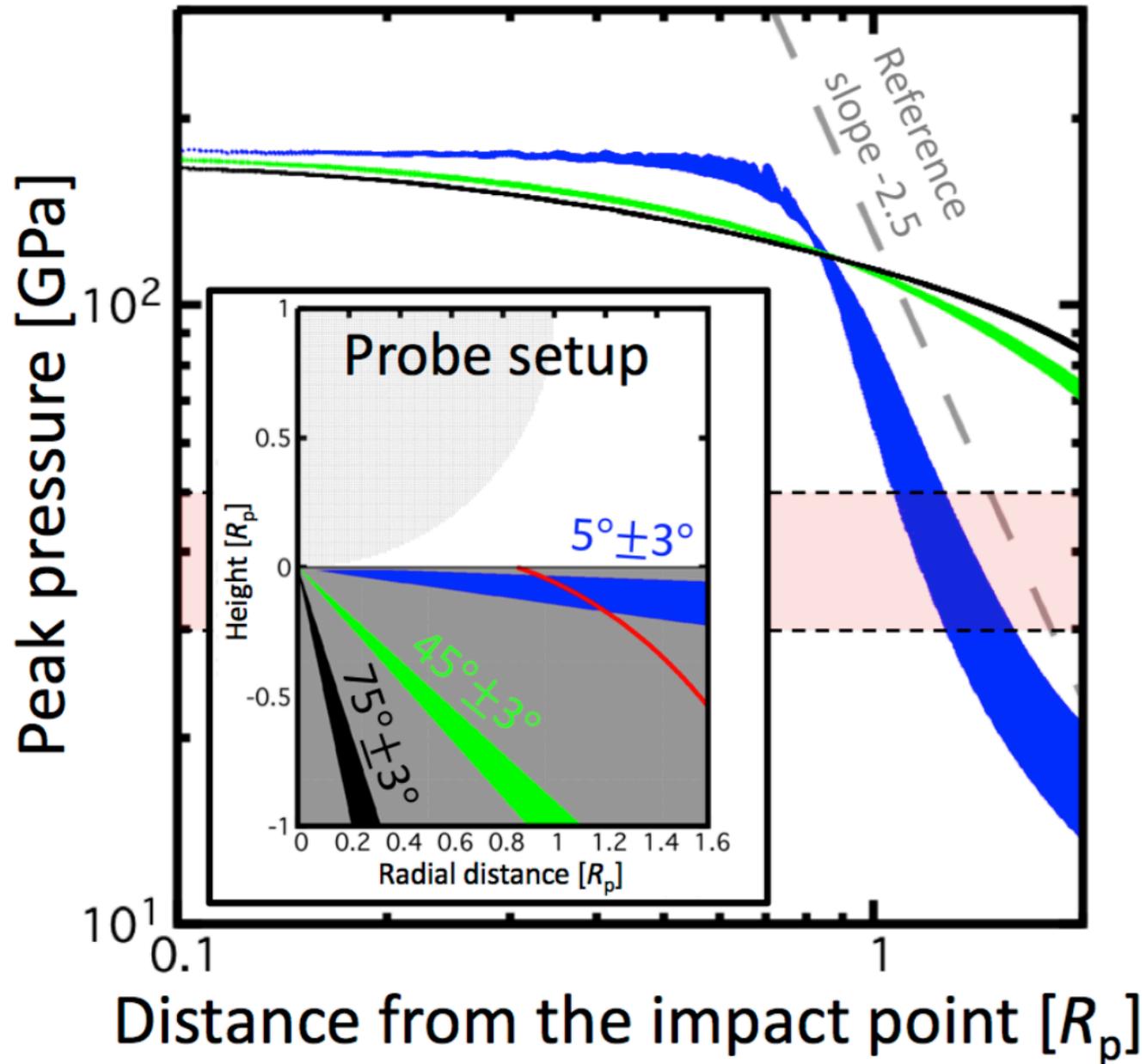
iSALE 2-D, Granite-> Granite, 12 km/s, 1000 CPPR



# 衝撃波発生条件でも干渉領域は形成される.

[Rosenbaum&Snay56; Kamegai86; Melosh+17]

iSALE 2-D, Granite-> Granite, 12 km/s, 500 CPPR



## Impact Ejection, Spallation, and the Origin of Meteorites

H. J. MELOSH

*Lunar and Planetary Laboratory, University of Arizona, Tucson, Arizona 85721*

Received February 28, 1983; revised April 2, 1984

This theory, however, applies rigorously only up to ejection velocities of ca 1 km/sec. Further numerical extension are necessary before firm conclusions can be drawn, especially for Martian ejecta.

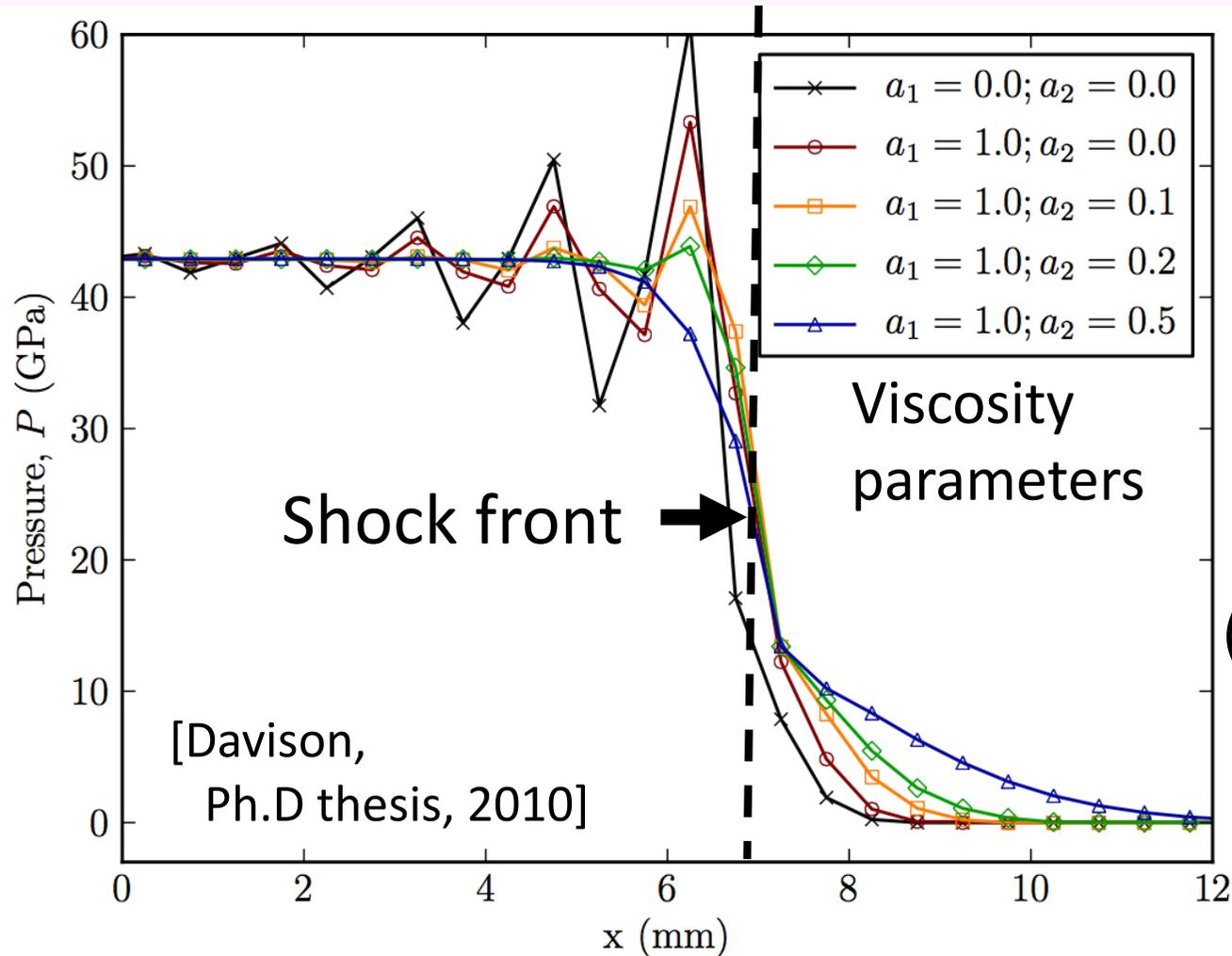
三角波の仮定は衝撃波存在下では適用不可。  
-> 数値解法[Head+02; Artemieva&Ivanov04]

※JettingからSpallationへの遷移は滑らかに起こるため実験的検証は困難。

The maximum fragment diameter is more likely to be about a meter. This theory, however, applies rigorously only up to ejection velocities of ca 1 km/sec. Further numerical extensions are necessary before firm conclusions can be drawn, especially for Martian ejecta.

# De Carli博士による警鐘

先行研究の数値計算で火星隕石と判定されたのは表層数層の粒子.



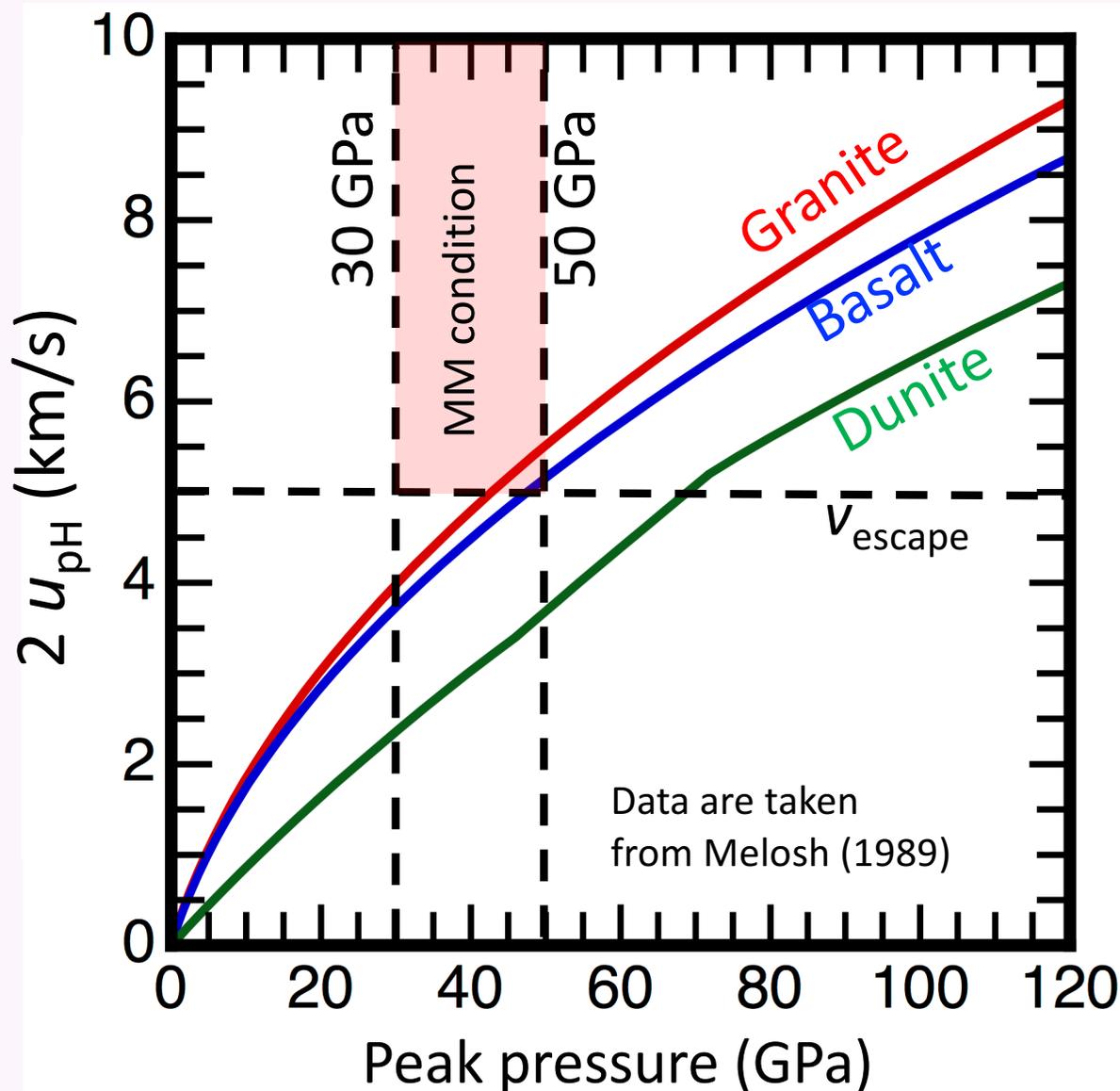
数値計算中の  $P_{\text{peak}}$  は  
真の衝撃圧力の10-30%  
(ex. 60 GPa  $\rightarrow$  10-20 GPa)

[De Carli13]

人工粘性による衝撃波面の鈍化: 3-10 cells

[De Carli13; Johnson+14]

# Spallation originへの試練



$$P_{\text{peak}} = \rho_0(C_0 + su_{pH})u_{pH}$$

$$v_{ej} < 2u_{pH}$$

衝撃波と膨張波の  
なす角度が理想的  
であっても  
火星隕石放出を  
説明不可.

高い空間解像度の数値衝突計算で検証する.

# iSALE計算条件

**座標系:** 2次元円柱座標(垂直衝突)

**空間解像度:** 1000 Cells Per Projectile Radius (CPPR)  
(Projectileを2000 x 2000格子で表現)

**EOS:** 花崗岩(Granite)のTillotson EOS (弾丸&標的)

**衝突速度:** 6-21 km/s, 3 km/sおき (本日は12 km/sの結果  
を中心にお見せします)

※ 重力, 強度は無視. -> 結果はスケールに依存しない.

**解析:** 各計算格子にLagrangian tracer particlesを挿入. (~200万個)

※Trace particlesの書き出しには"iSALEPlot"を使用した.

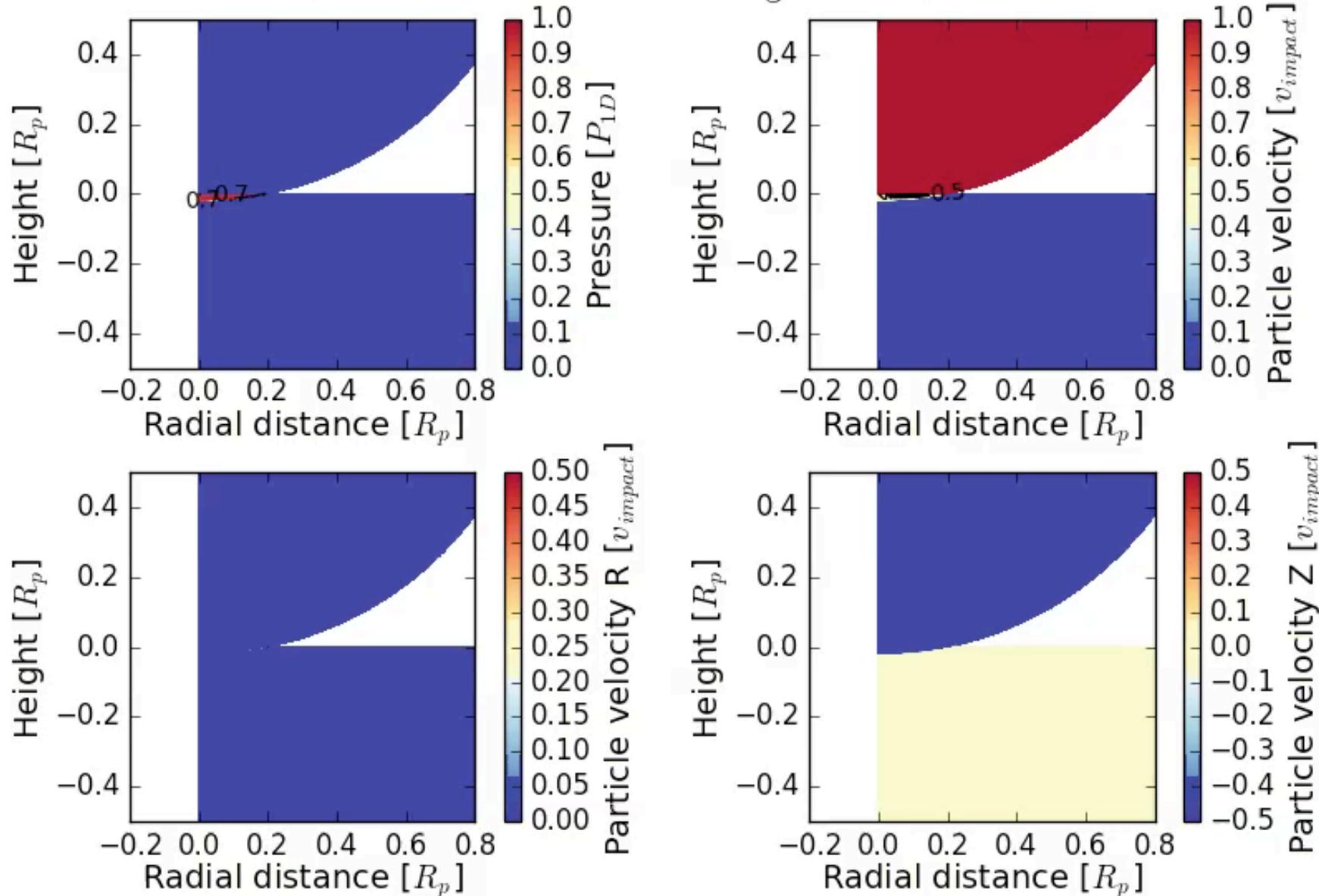
# iSALE計算結果

$$v_{\text{imp}} = 12 \text{ km/s}$$

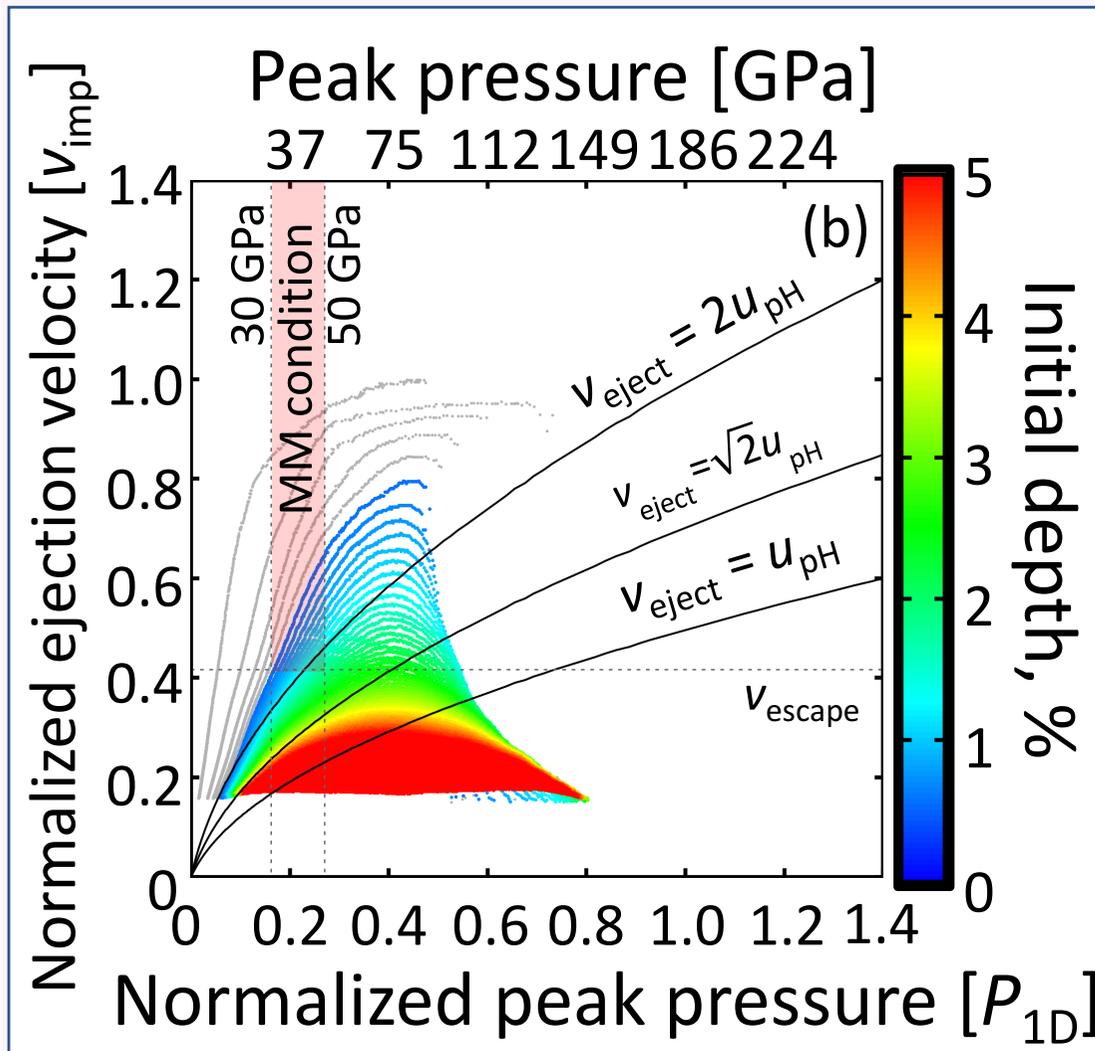
$$P_{1D} = 190 \text{ GPa}$$

$t_s$ : 貫入特徴時間

Scaled time  $t/t_s = 0.01$



# 衝撃圧力 $P_{\text{peak}}$ vs 放出速度 $v_{\text{ej}}$



## グループ分け

Group 1 (Normal excavation)

$$\frac{v_{\text{eject}}}{u_{\text{pH}}} < 1$$

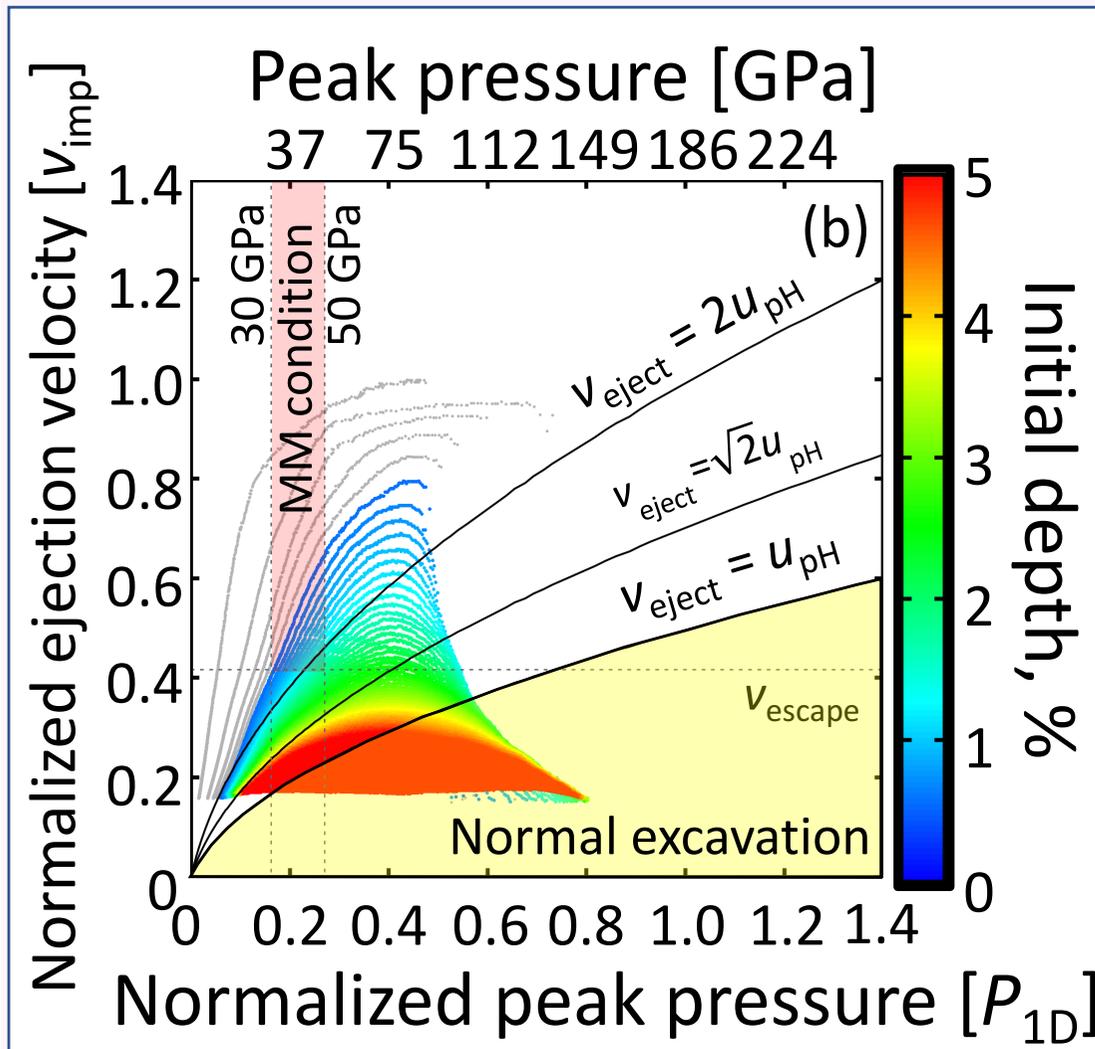
Group 2

$$1 < \frac{v_{\text{eject}}}{u_{\text{pH}}} < \sqrt{2}$$

Group 3

$$\sqrt{2} < \frac{v_{\text{eject}}}{u_{\text{pH}}}$$

# 衝撃圧力 $P_{\text{peak}}$ vs 放出速度 $v_{\text{ej}}$



## グループ分け

Group 1 (Normal excavation)

$$\frac{v_{\text{eject}}}{u_{\text{pH}}} < 1$$

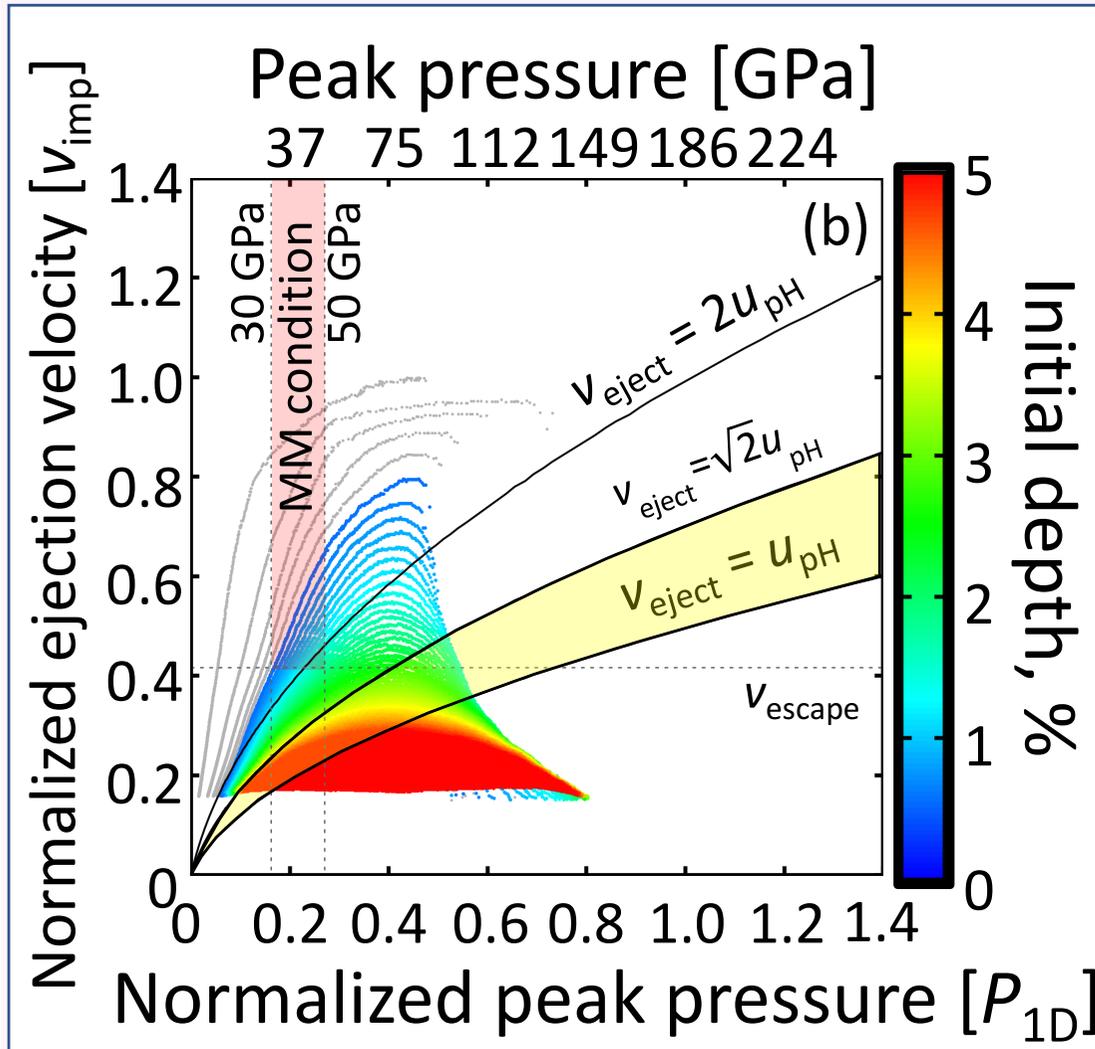
Group 2

$$1 < \frac{v_{\text{eject}}}{u_{\text{pH}}} < \sqrt{2}$$

Group 3

$$\sqrt{2} < \frac{v_{\text{eject}}}{u_{\text{pH}}}$$

# 衝撃圧力 $P_{\text{peak}}$ vs 放出速度 $v_{\text{ej}}$



## グループ分け

Group 1 (Normal excavation)

$$\frac{v_{\text{eject}}}{u_{\text{pH}}} < 1$$

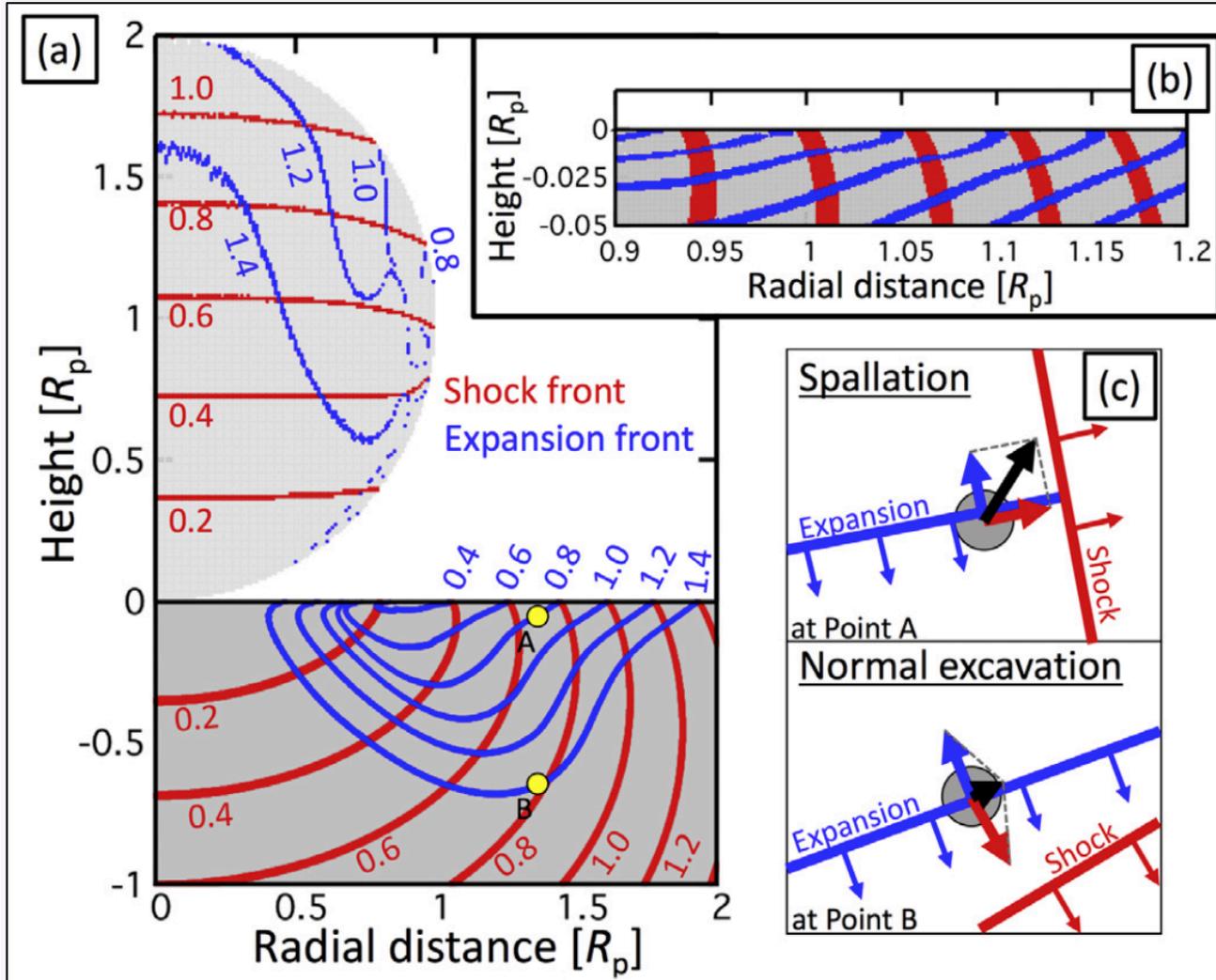
Group 2

$$1 < \frac{v_{\text{eject}}}{u_{\text{pH}}} < \sqrt{2}$$

Group 3

$$\sqrt{2} < \frac{v_{\text{eject}}}{u_{\text{pH}}}$$

# 波の到来方向の可視化



衝撃波/膨張波の等時線

波の到来の定義

衝撃波: 標準状態  $\rightarrow$  5 GPa

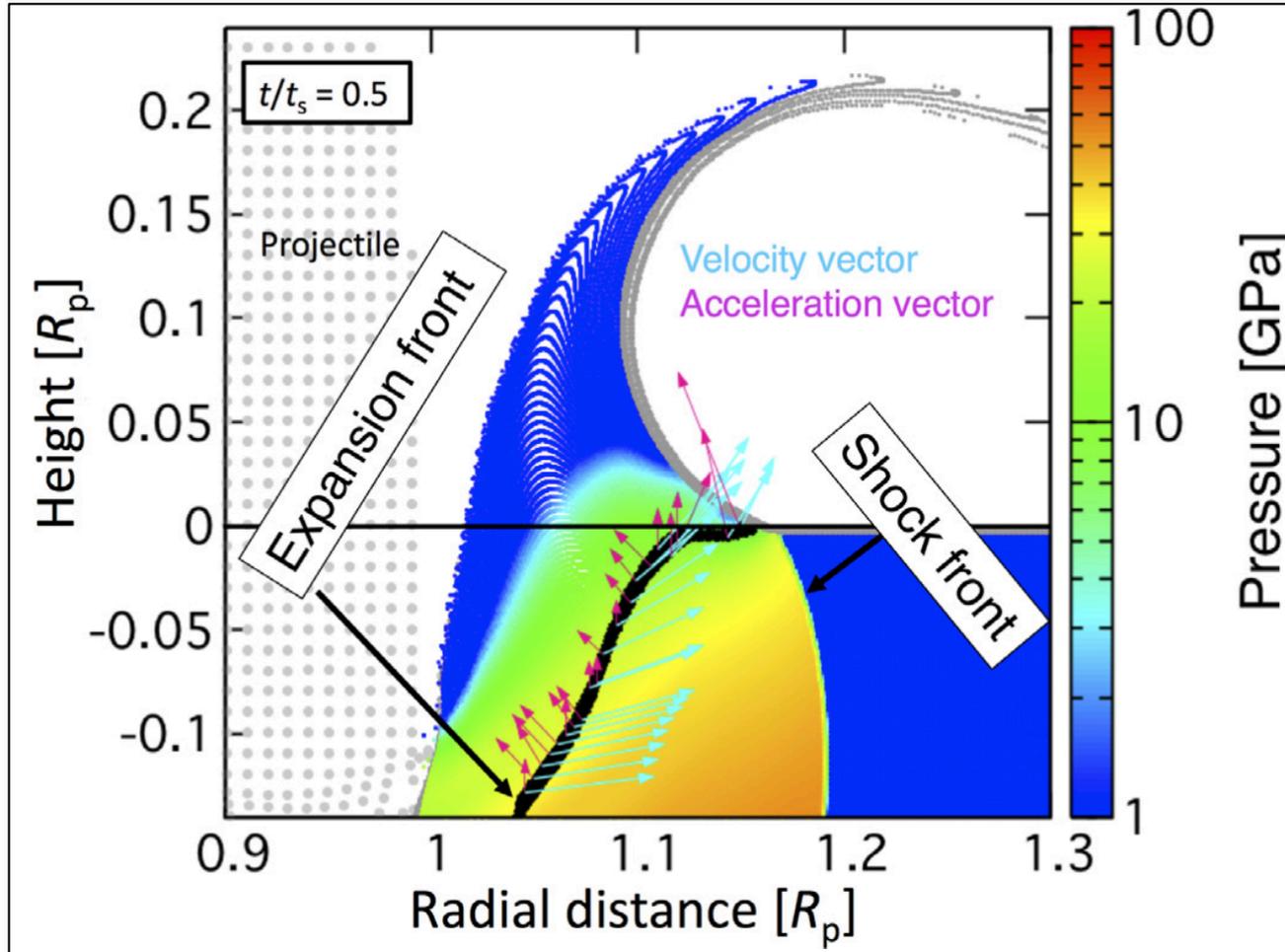
膨張波:  $P = (1/3)P_{peak}$

自由表面付近で2つの波がなす角度 $\sim 90^\circ$

2-D衝撃波伝播の場合,  
Shock-release cycleのみで得られる最高到達速度 $\sim \sqrt{2}u_{pH}$

# 波の到来方向の可視化

膨張波面上の速度・加速度ベクトル



波の到来の定義

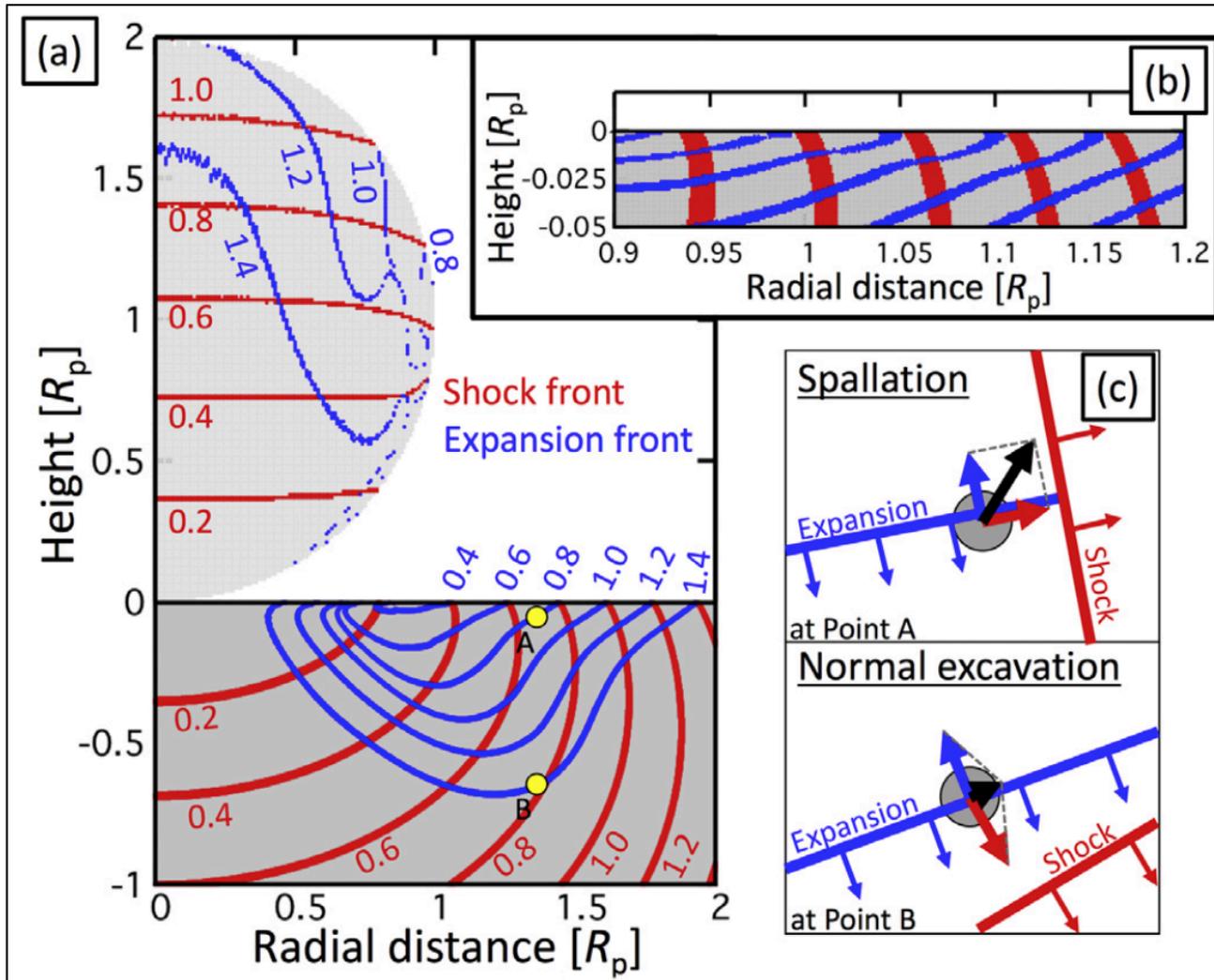
衝撃波: 標準状態  $\rightarrow$  5 GPa

膨張波:  $P = (1/3)P_{\text{peak}}$

自由表面付近で2つの波がなす角度 $\sim 90^\circ$

2-D衝撃波伝播の場合,  
Shock-release cycleのみで得られる最高到達速度 $\sim \sqrt{2}u_{pH}$

# 波の到来方向の可視化



衝撃波/膨張波の等時線

波の到来の定義

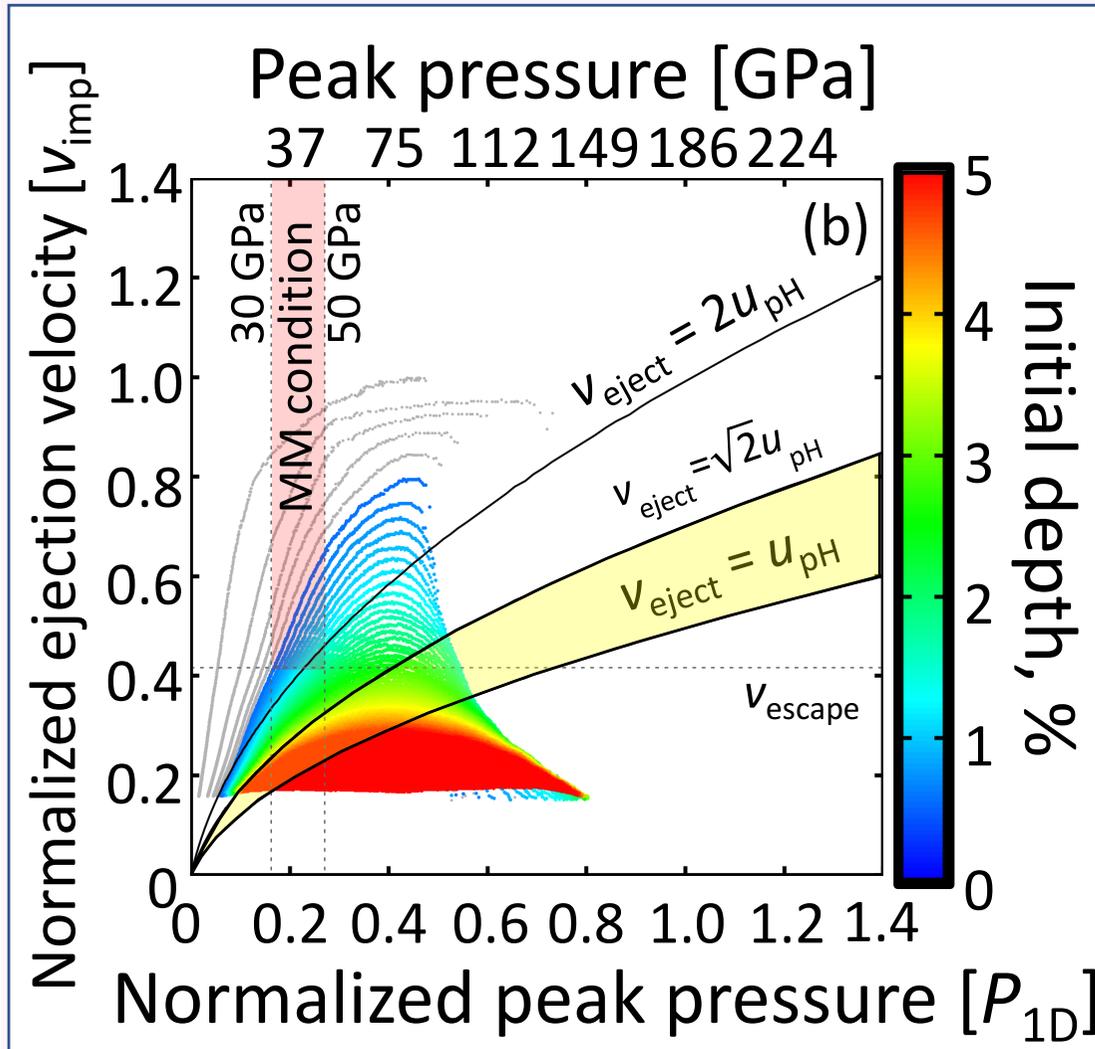
衝撃波: 標準状態  $\rightarrow$  5 GPa

膨張波:  $P = (1/3)P_{peak}$

自由表面付近で2つの波がなす角度 $\sim 90^\circ$

2-D衝撃波伝播の場合,  
Shock-release cycleのみで得られる最高到達速度 $\sim \sqrt{2}u_{pH}$

# 衝撃圧力 $P_{\text{peak}}$ vs 放出速度 $v_{\text{ej}}$



## グループ分け

Group 1 (Normal excavation)

$$\frac{v_{\text{eject}}}{u_{\text{pH}}} < 1$$

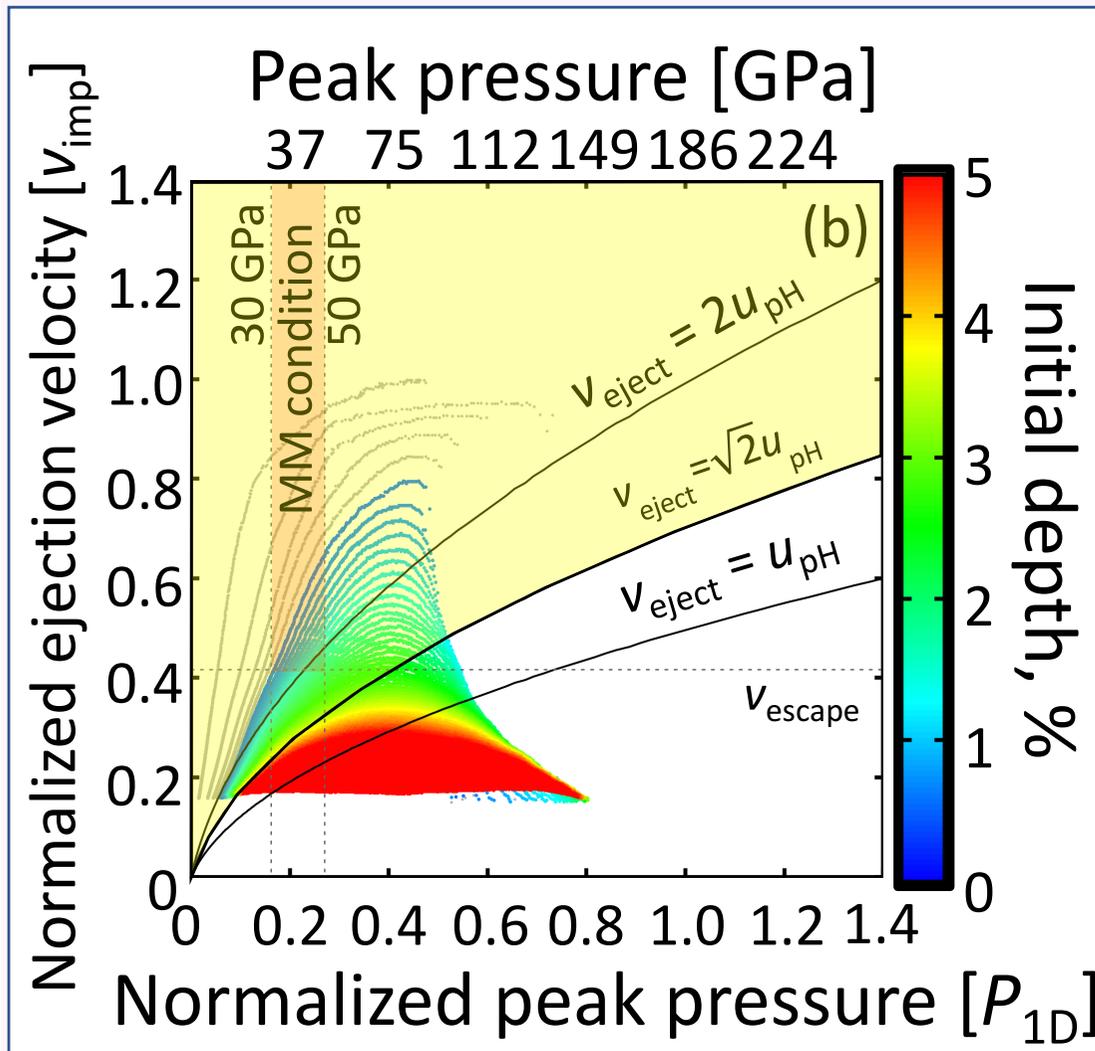
Group 2

$$1 < \frac{v_{\text{eject}}}{u_{\text{pH}}} < \sqrt{2}$$

Group 3

$$\sqrt{2} < \frac{v_{\text{eject}}}{u_{\text{pH}}}$$

# 衝撃圧力 $P_{\text{peak}}$ vs 放出速度 $v_{\text{ej}}$



## グループ分け

Group 1 (Normal excavation)

$$\frac{v_{\text{eject}}}{u_{\text{pH}}} < 1$$

Group 2

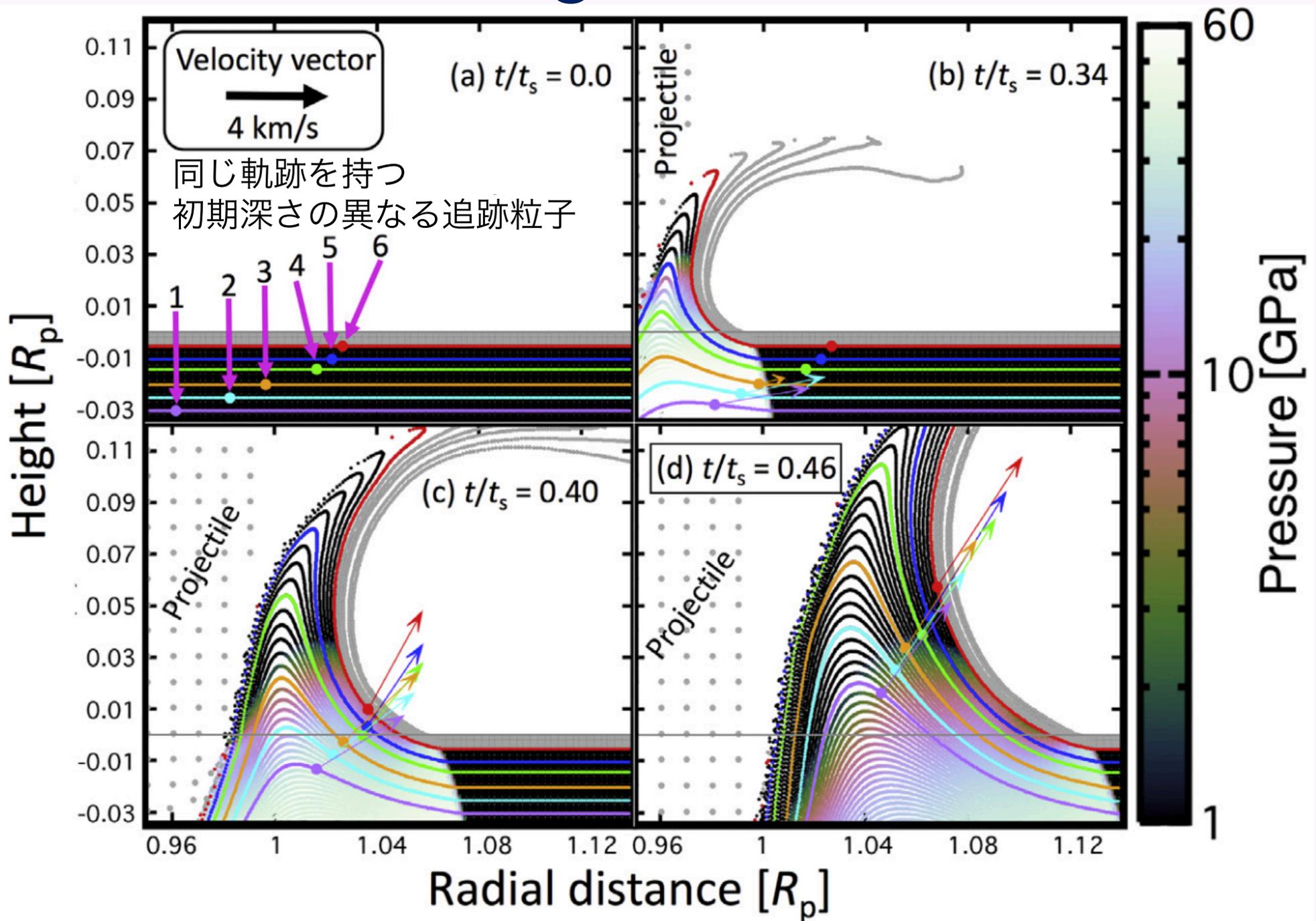
$$1 < \frac{v_{\text{eject}}}{u_{\text{pH}}} < \sqrt{2}$$

Group 3

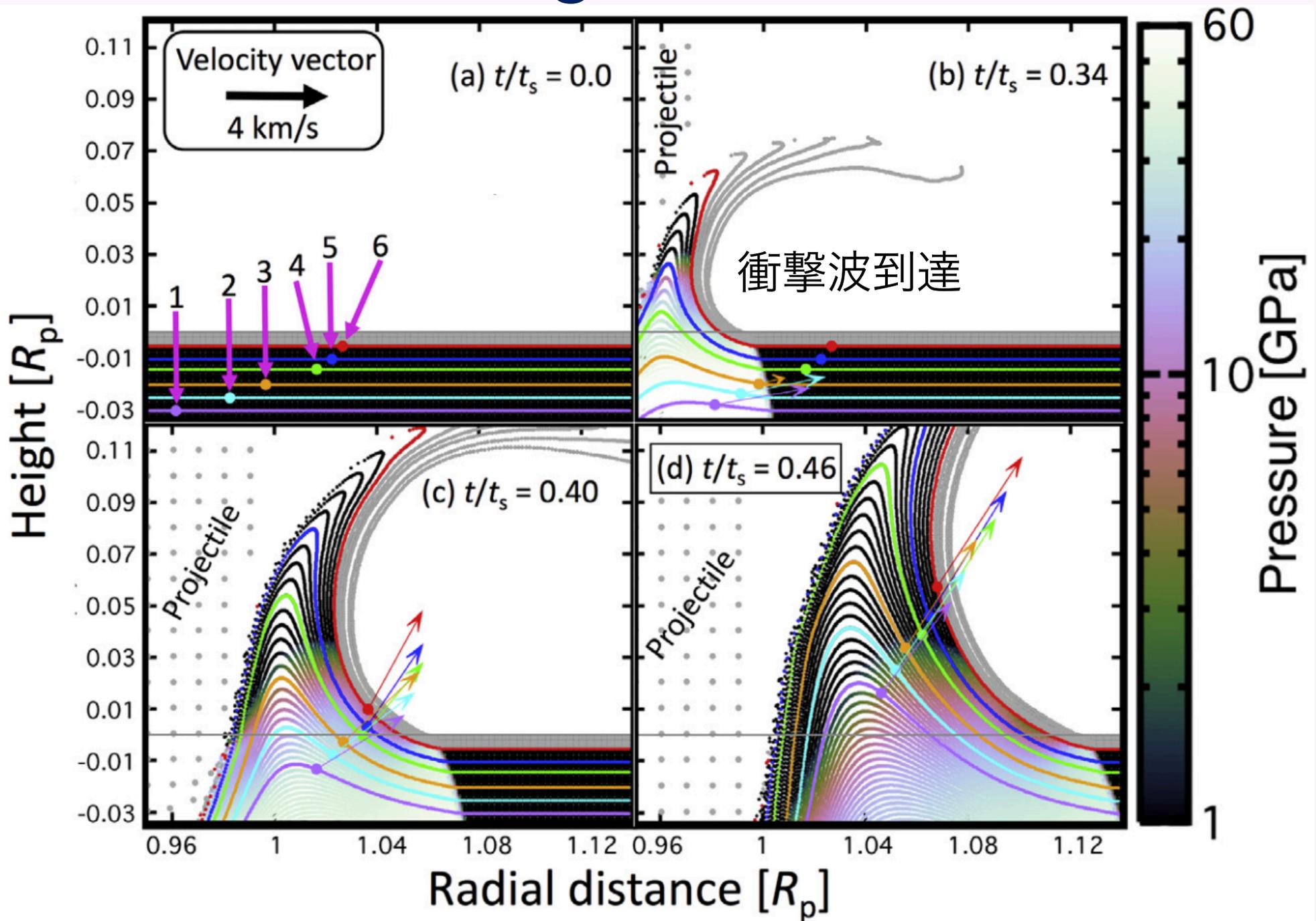
$$\sqrt{2} < \frac{v_{\text{eject}}}{u_{\text{pH}}}$$

未知の加速機構が存在している!

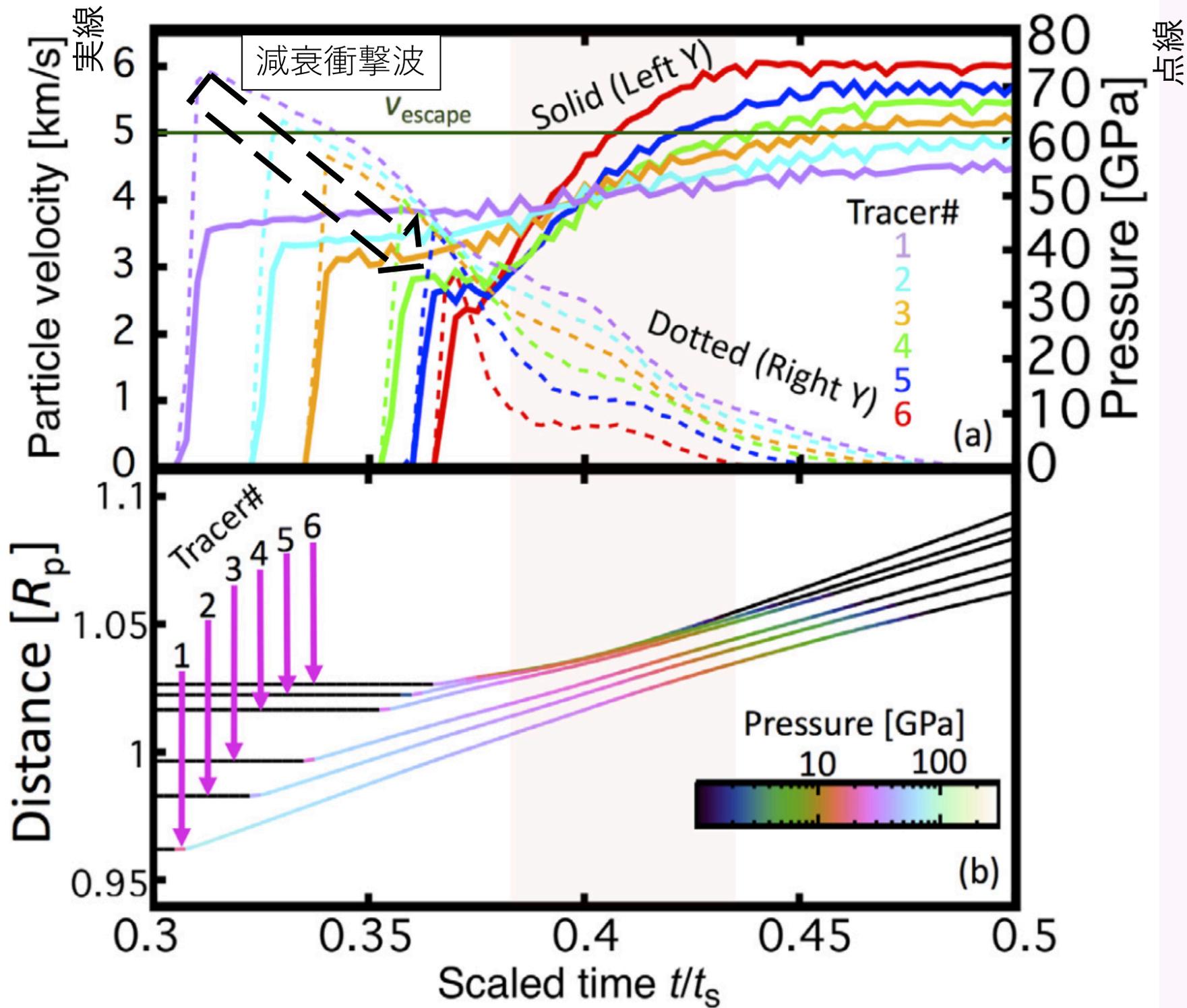
# Late-stage acceleration



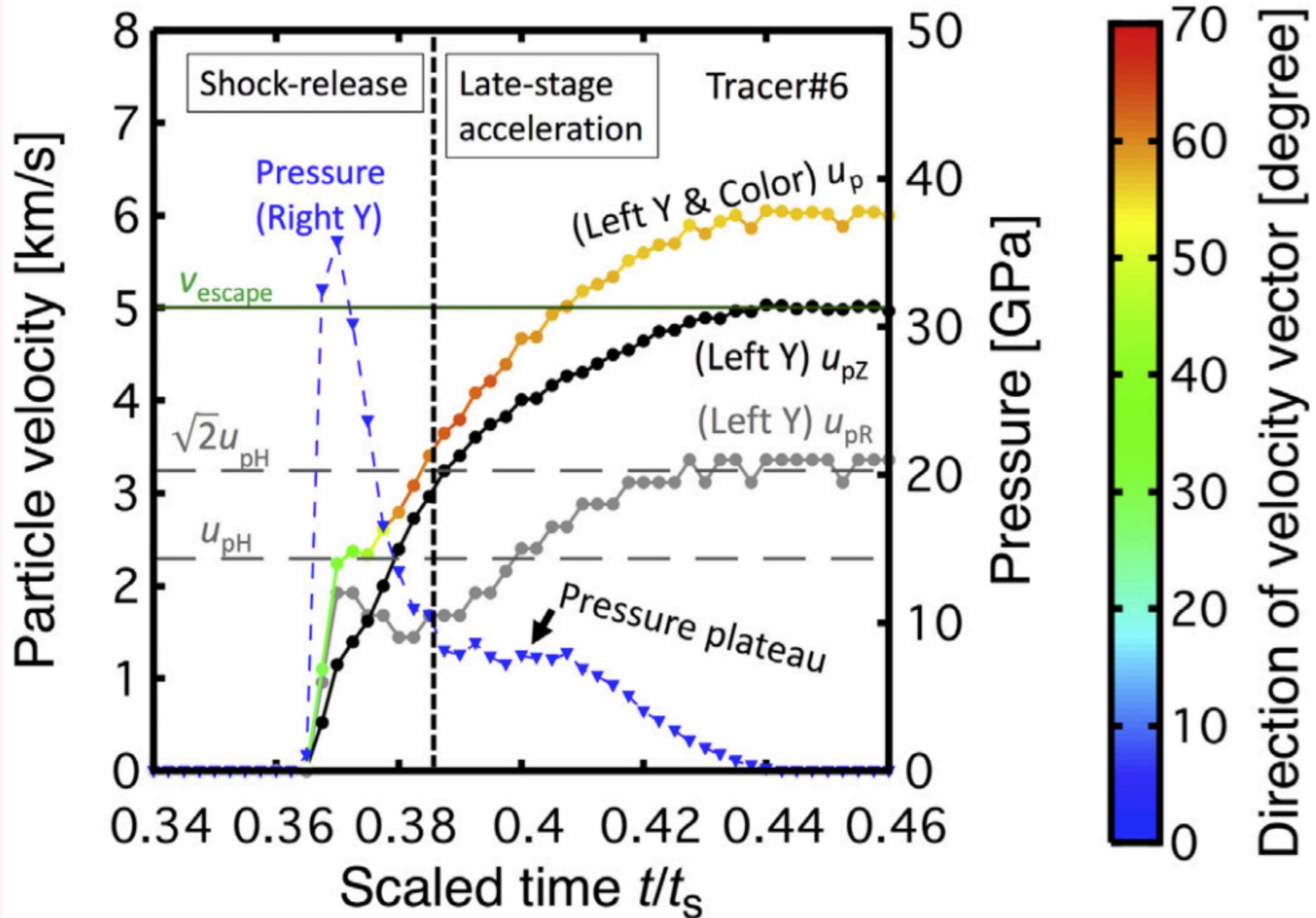
# Late-stage acceleration



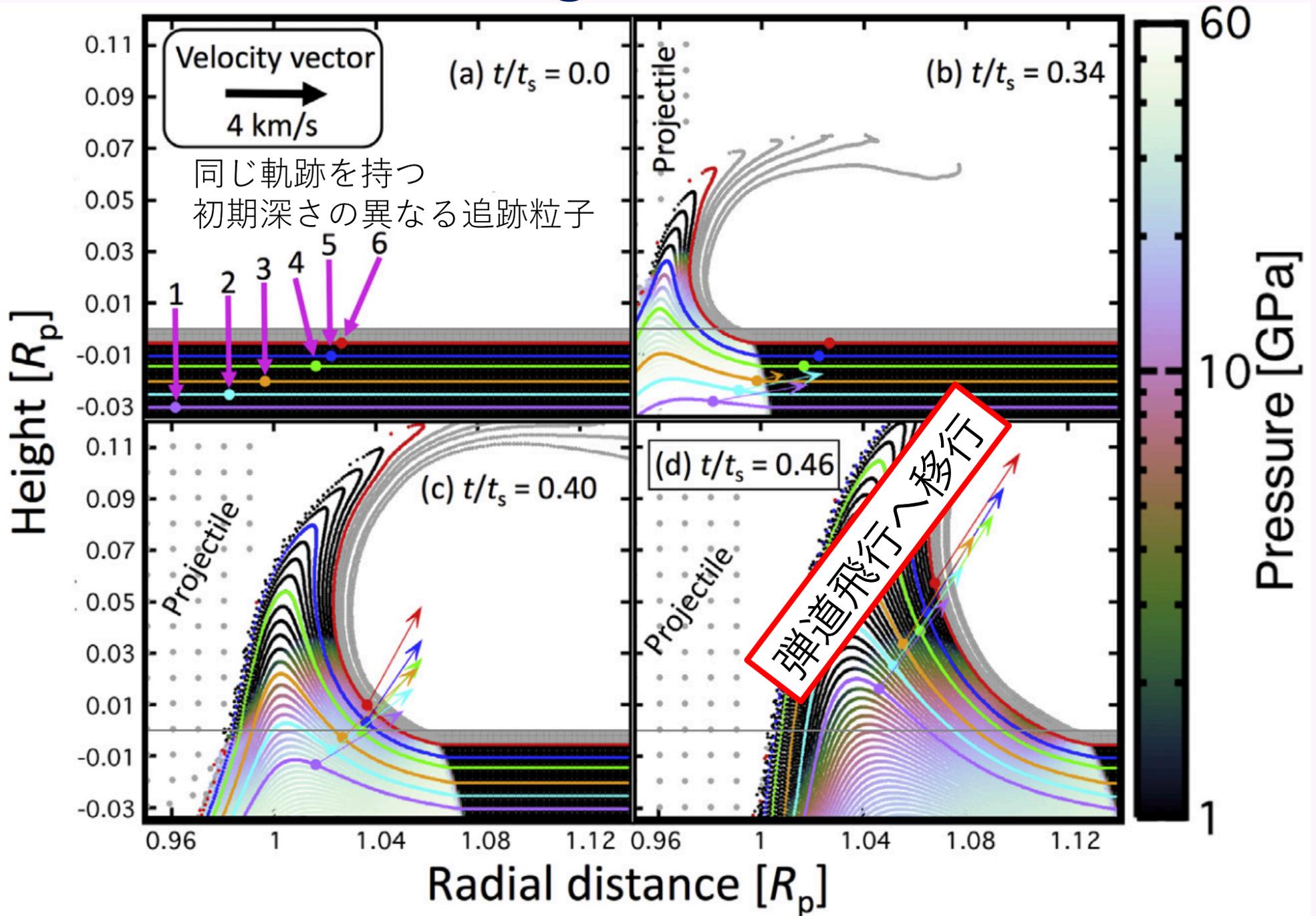




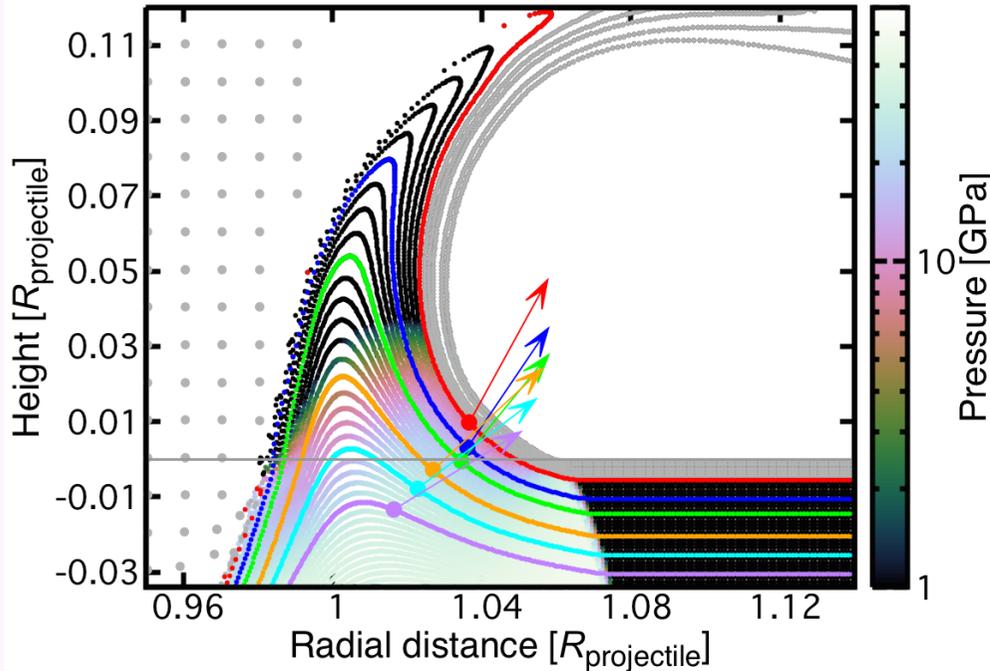
# 浅部粒子(赤)の履歴



# Late-stage acceleration



# Late-stage acceleration



$$\Delta v \sim a_{\text{late}} \Delta t$$

$$\sim \frac{P_{\text{root}}}{\rho l} \Delta t$$

$a_{\text{late}}$ : Acceleration  
 $\Delta t$ : duration  
 $P_{\text{root}}$ : The pressure in the root of curtain  
 $\rho$ : Density  
 $l$ : Thickness of the ejecta curtain

iSALE計算結果

$$P_{\text{root}} \sim 10 \text{ GPa}$$

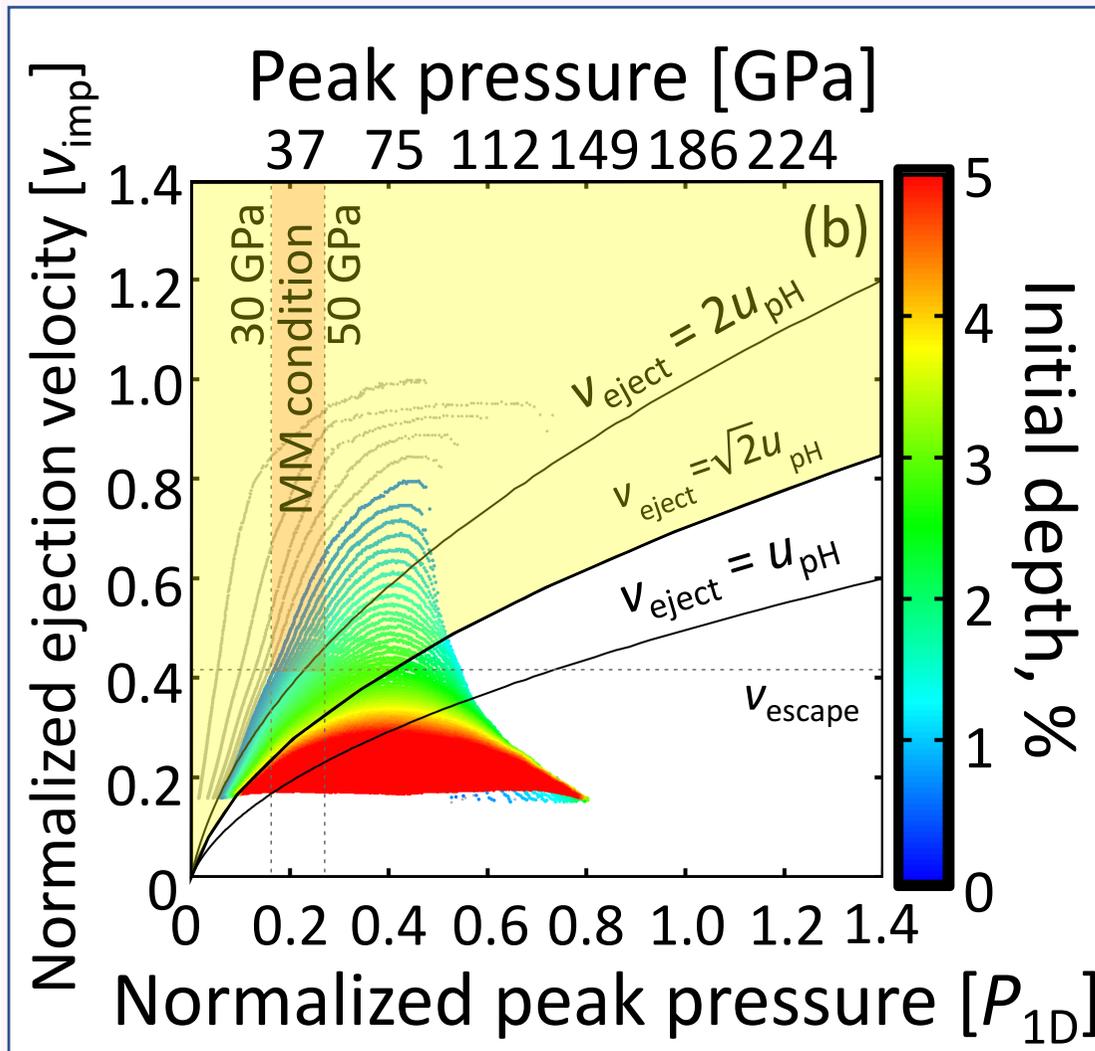
$$\Delta t \sim 0.05 t_s = 0.1 R_p / v_{\text{imp}}$$

$$l \sim 0.05 R_p$$

$$\Delta v \sim 5 \left( \frac{P_{\text{root}}}{10 \text{ GPa}} \right) \left( \frac{\Delta t / t_s}{0.05} \right) \left( \frac{\rho}{3 \text{ g/cc}} \right)^{-1} \left( \frac{l / R_p}{0.05} \right)^{-1} \text{ (km/s)}$$

放出物カーテンの根本で十分な加速を受ける。

# 衝撃圧力 $P_{\text{peak}}$ vs 放出速度 $v_{\text{ej}}$



## グループ分け

Group 1 (Normal excavation)

$$\frac{v_{\text{eject}}}{u_{\text{pH}}} < 1$$

Group 2

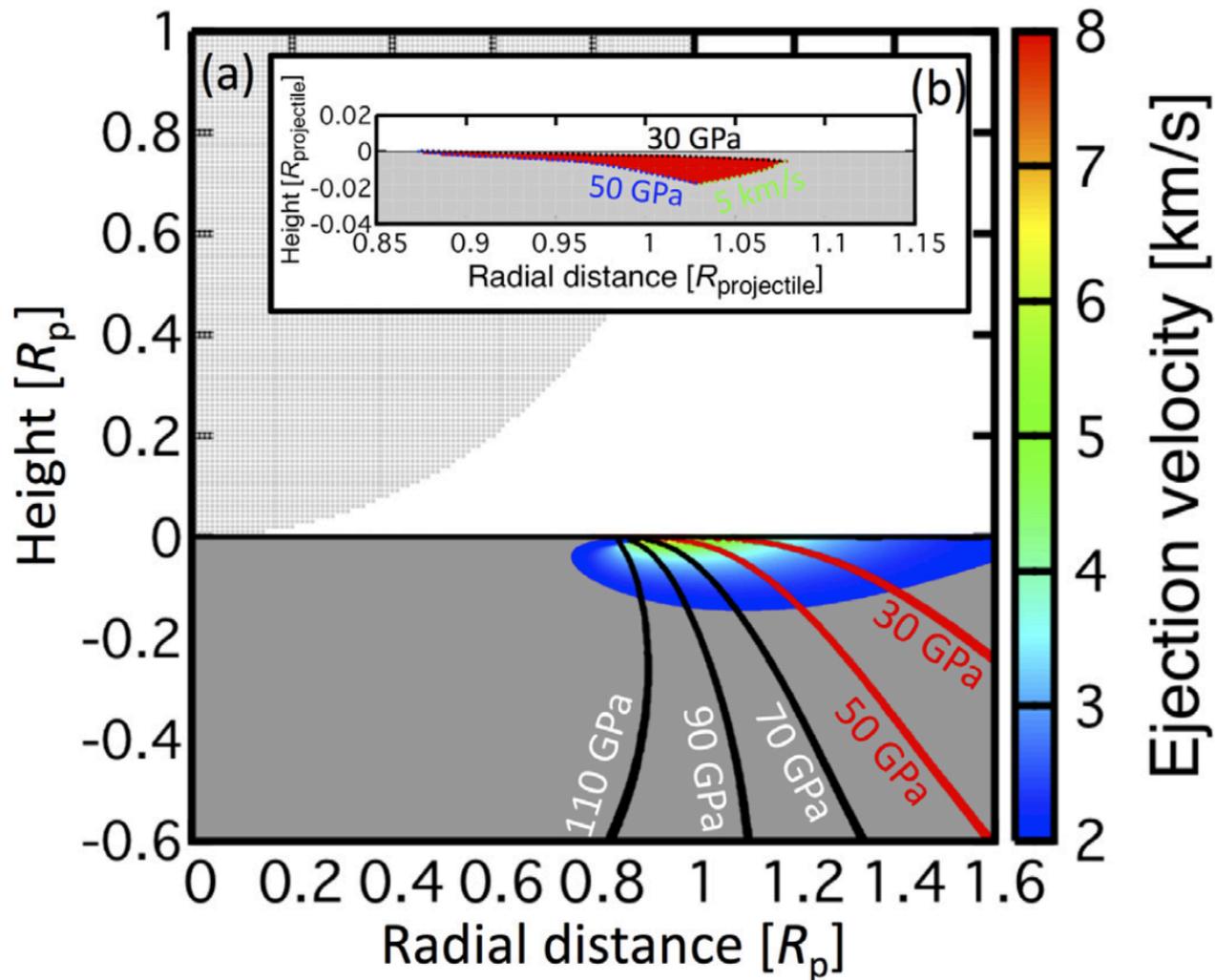
$$1 < \frac{v_{\text{eject}}}{u_{\text{pH}}} < \sqrt{2}$$

Group 3

$$\sqrt{2} < \frac{v_{\text{eject}}}{u_{\text{pH}}}$$

後期加速メカニズム

# 火星隕石放出領域

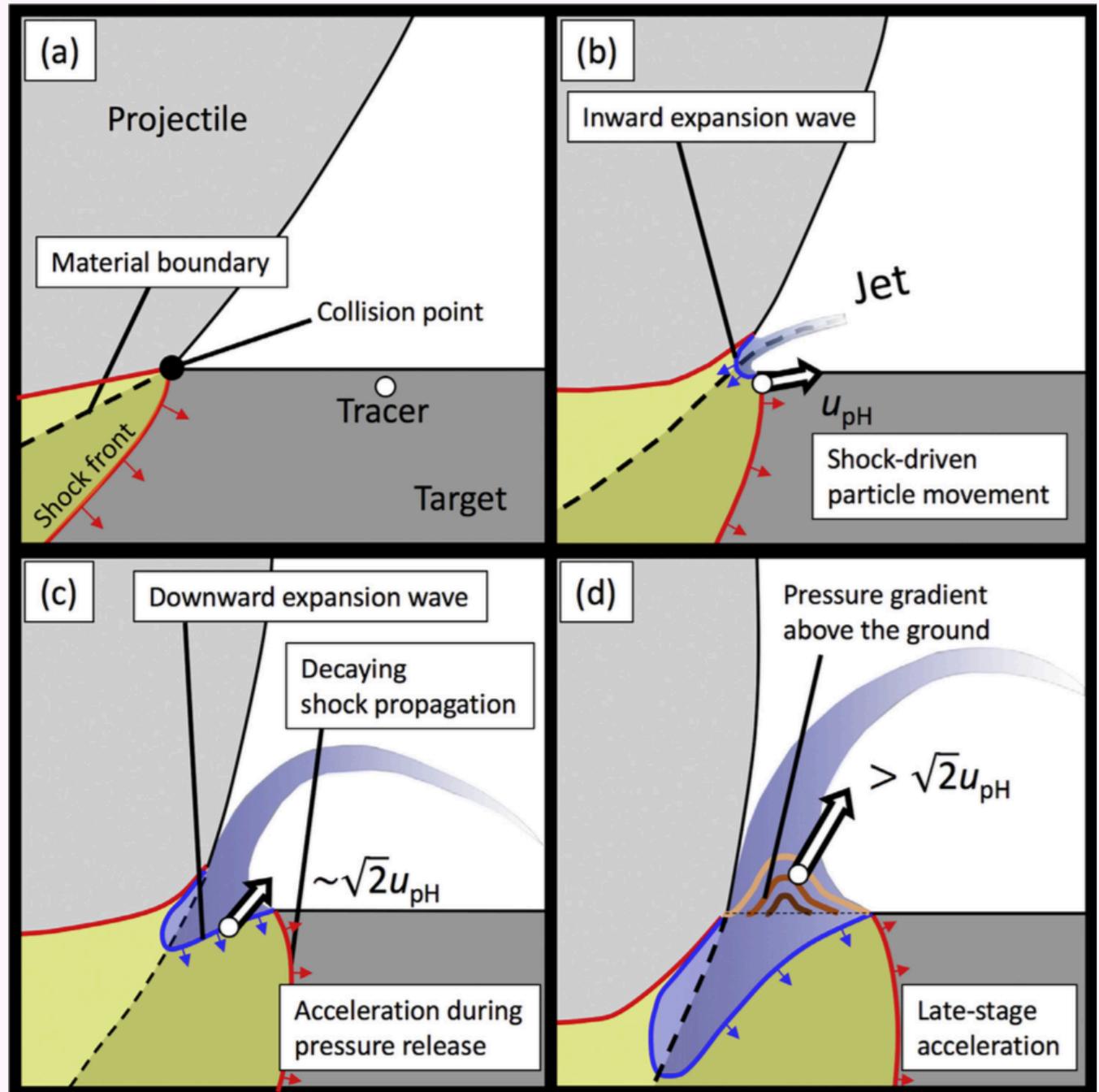


垂直衝突の場合

☆初期深さは衝突天体半径の~2%.

☆MM条件を満たす放出物質量は衝突天体質量の~0.1%.

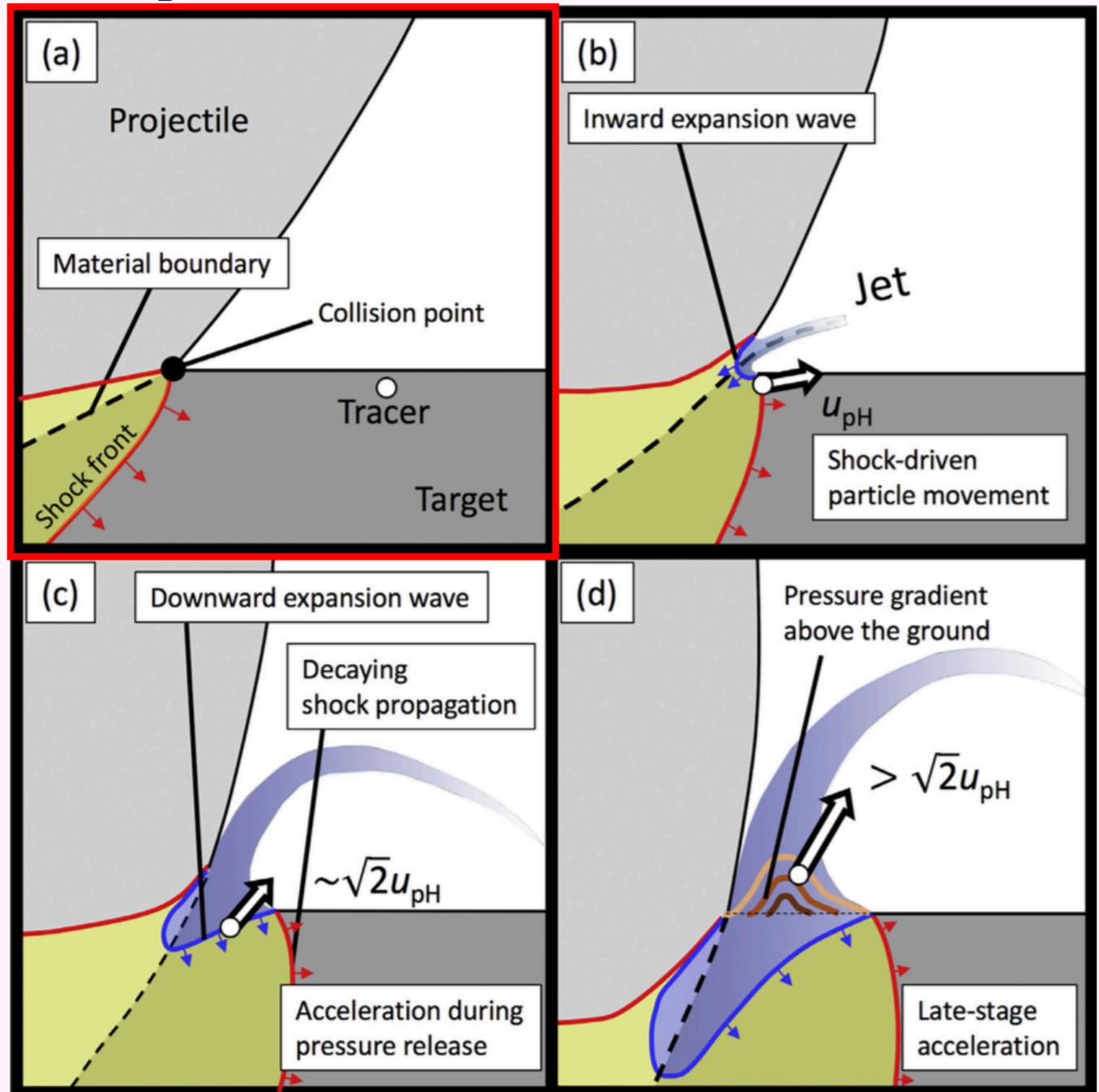
# JettingからSpallationへの遷移



# JettingからSpallationへの遷移

## (a) Jet噴射前

Grey: Unshocked  
Yellow: Shocked  
Blue: Released



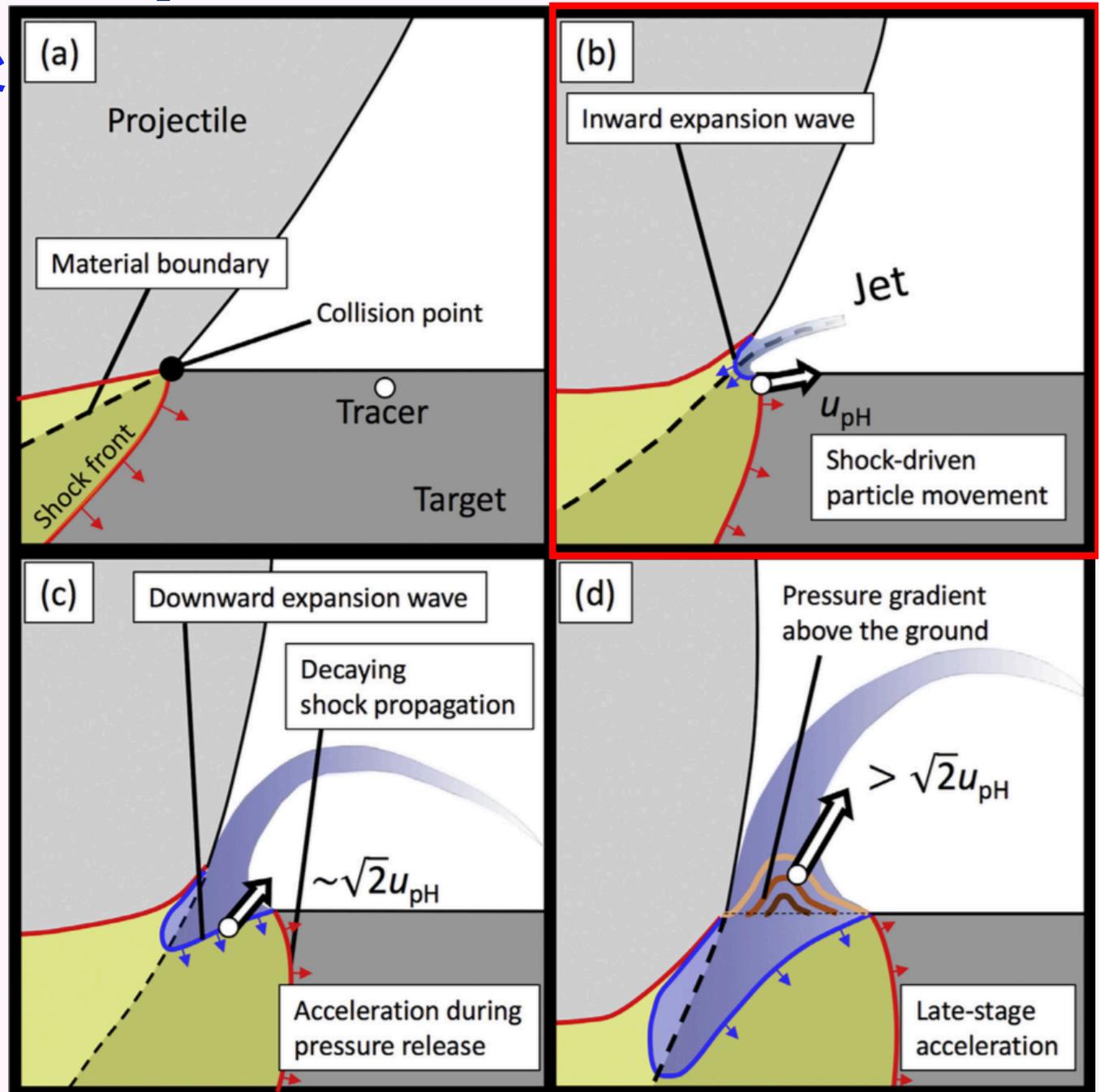
# JettingからSpallationへの遷移

## (b) Jet噴射開始直後

- ・ 膨張波発生の時刻原点
- ・ 膨張波は“内側”へ伝播.

2つの波のなす角度 $\sim 180^\circ$   
→  $v_{ej} \sim 2u_{pH}$

高衝撃圧力  
& 高速度放出  
→ Jet



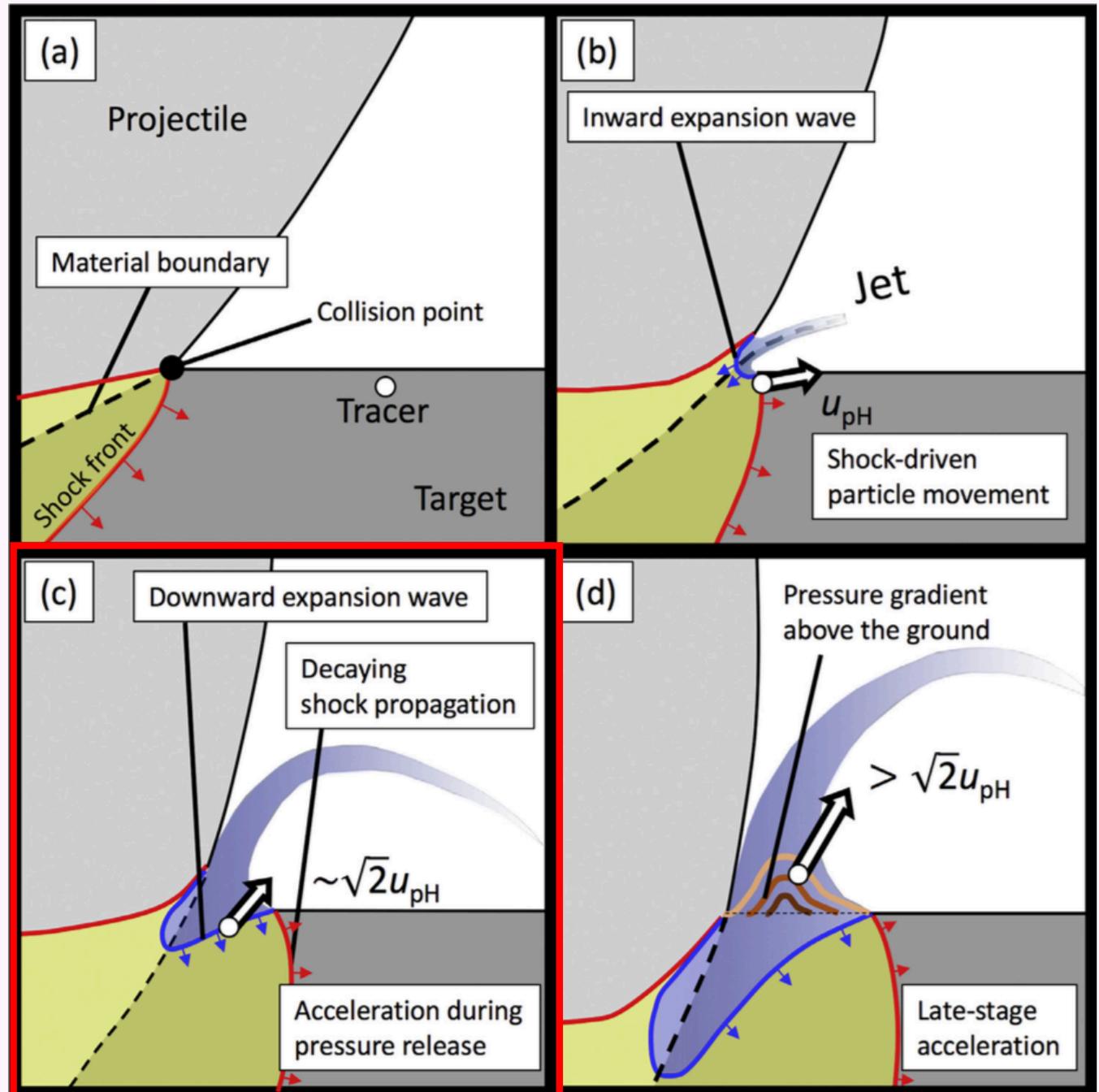
# JettingからSpallationへの遷移

## (c) Shock-releaseによる加速

- ・ 減衰衝撃波  
→  $LOW P_{peak}$
- ・ 膨張波は  
“下側”へ伝播.

2つの波の  
なす角度 $\sim 90^\circ$

→  $v_{ej} \sim \sqrt{2}u_{pH}$



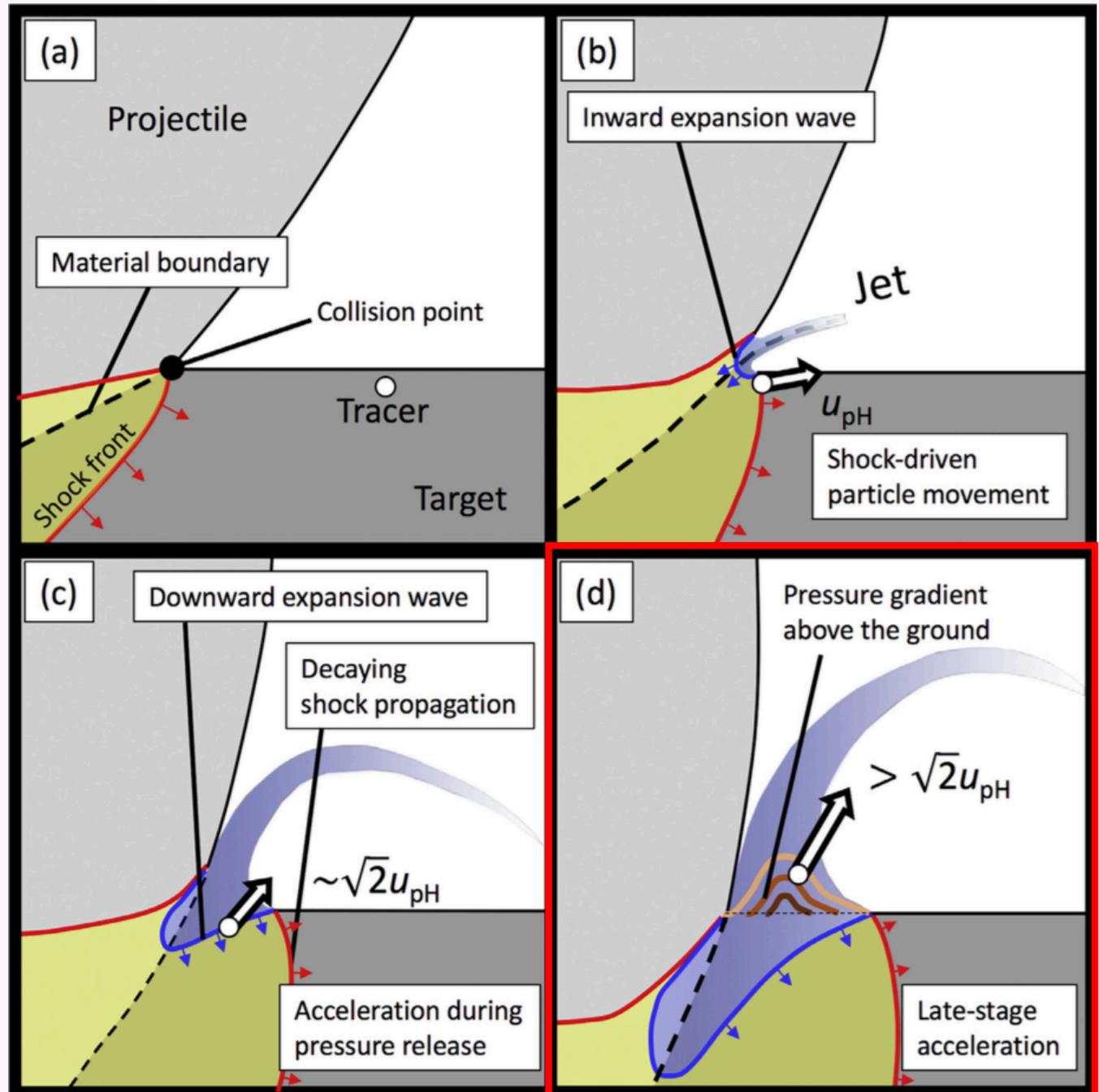
# JettingからSpallationへの遷移

## (c)心太式後期加速

- \* 初期位置の違い  
->  $u_{pH}$ の差異
- > 地表面付近で物質が詰まる.

\*  $v_{eject} > 2u_{pH}$

低衝撃圧力  
& 高速度放出  
-> Spallation



# 衝突剥離 (Spallation) まとめ

☆人工粘性の影響を取り除いても数値計算中で  
MM条件を満たす放出物が現れることを確認.

☆衝撃波/膨張波を可視化.

Shock-release cycleで得られる最大速度は

$$\sim \sqrt{2} u_{\text{pH}} \neq 2 u_{\text{pH}}$$

☆後期加速メカニズムを発見.

放出物流の圧縮性によって,

低衝撃圧/高速度の放出物が発生し得る.

## **Acknowledgements:**

We thank the developers of iSALE, including G. Collins, K. Wünnemann, B. Ivanov, J. Melosh, and D. Elbeshausen. The quick look of the iSALE results using the pySALEPlot tool written by Tom Davison greatly helped us to conduct the series of numerical simulations.

# 話の流れ

## 1. 衝撃波と膨張波の干渉

- a. 衝撃波/膨張波通過後の速度変化
- b. 幾何学効果の重要性

## 2. 衝突噴射現象(Impact jetting)

- a. 高速度衝突実験@PERC
- b. 従来の理論モデルと改良版モデル

## 3. 衝突剥離現象(Impact spallation)

- a. 数値衝突実験 with 2-D iSALE & 3-D SPH
- b. 後期加速現象の発見

## 4. 衝突掘削現象(Normal excavation)

- a. 残留速度による掘削流形成の解析モデル
- b. 衝突掘削の終焉による過渡クレータ形成

# 全体まとめ

## 衝突放出速度を決める要因

[Kurosawa+18, *Icarus*]

1. 衝撃波通過後の粒子速度  $u_{pH}$
2. 衝撃波と膨張波のなす角度
3. 放出物流中の圧縮性

- 定性的にはこの枠組で説明可能.
- 定量的には「補正」が必要.

例. Jetの発生遅れ.

Spallationの後期加速.

衝突掘削の各論については投稿中の内容であるため  
スライドは非公開とさせていただきます.

