

3Dシミュレーションに基づく 噴煙柱崩壊条件

小屋口剛博・鈴木雄治郎
(東京大学地震研究所)



噴煙柱

Mt. St. Helens 1980年噴火 (USGS)



火砕流

何故、3Dシミュレーションを行うのか？

3Dコードを開発 = 現象の理解と予測？

- パラメータ空間全体での解の挙動
- 風・火口形状・地形などの2D,3D的境界条件に対する応答
(実際の噴火に対する応用)



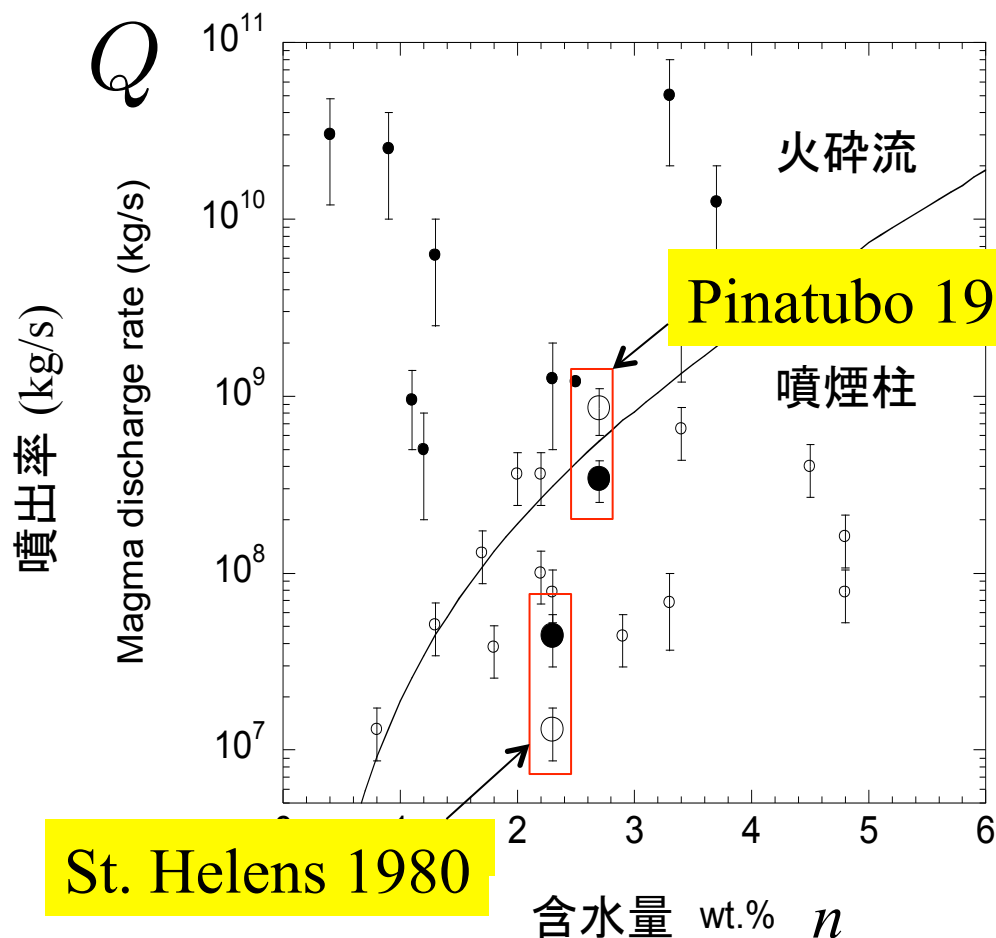
- 1D定常噴煙モデルとの整合性の理解
- 流れの2D,3D性(乱流構造・不均質構造など)がもたらす影響

今日の主な話題:

- 1D定常噴煙モデルにおける噴煙柱崩壊のスケール則
- 3D噴煙モデルによる検証

1D定常噴煙柱モデルによる噴煙柱崩壊条件

Since Sparks and Wilson (1976)



火口での上昇速度＝マッハ2を仮定した
最近の火砕流発生条件のモデル予測
(e.g., Carazzo et al., 2008)

大局的に噴出率と含水量で
火砕流の発生条件が決まる。

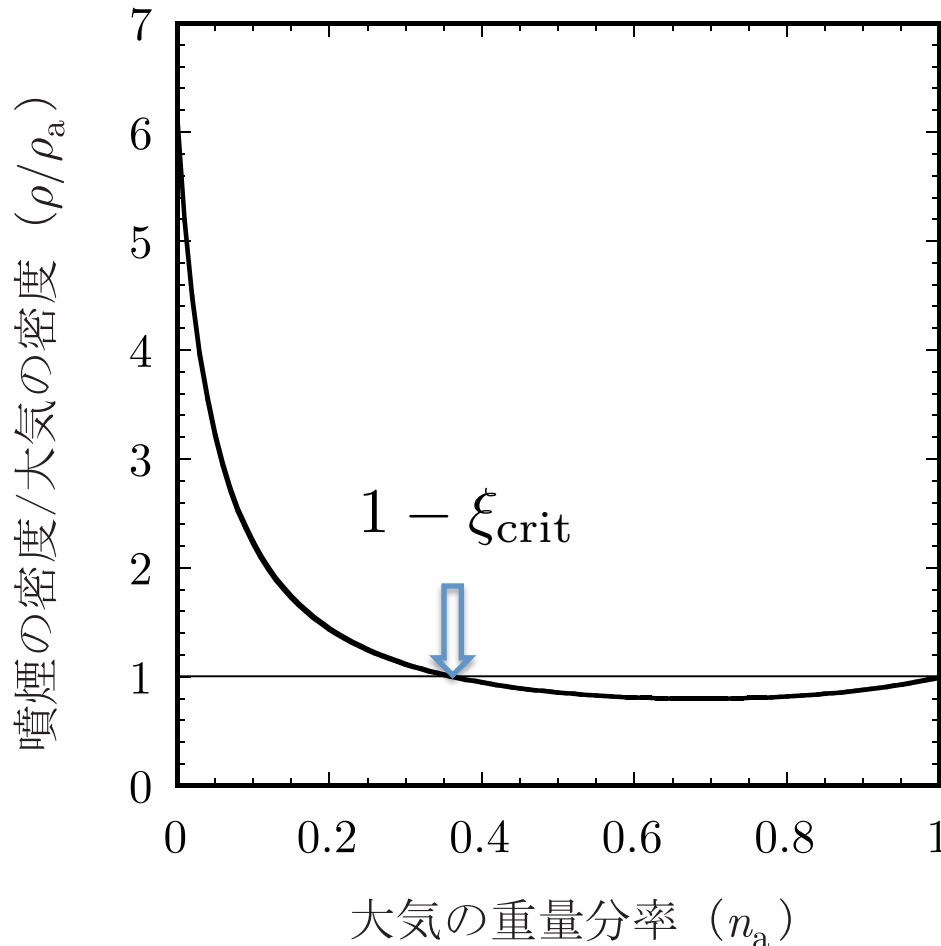
↓
火口が拡大し噴出率が増加
するとともに噴煙柱が崩壊
し火砕流が発生する。

観測結果

- 火砕流
- 噴煙柱

1D定常噴煙柱モデルによる噴煙柱崩壊条件

e.g., Woods (1988), Bursik and Woods (1991),
Kaminski and Jaupart (2001), Suzuki and Koyaguchi (2012)



$$Ri_{\text{crit}} = Ck \frac{\rho_a}{\rho_0} \frac{\xi_{\text{crit}}}{1 - \xi_{\text{crit}}}$$

where

$$Ri \equiv \frac{(\rho_0 - \rho_a)g}{\rho_0} \frac{r_a}{v_a^2} \equiv \frac{g'_0 r_a}{v_a^2}$$

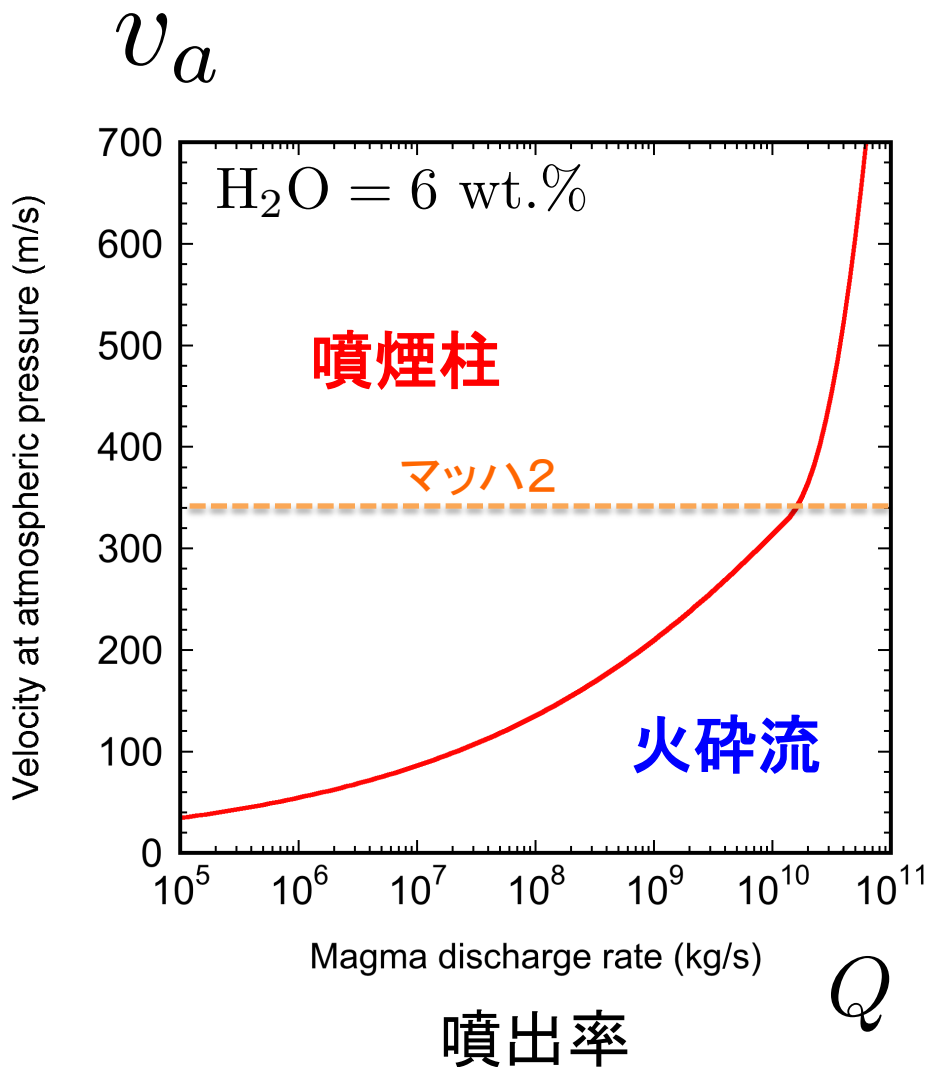
$$Q = \pi r_a^2 \rho_a v_a$$

$$v_{a_crit} = \left(\frac{g'^2_0 Q_{\text{crit}}}{\pi \rho_a Ri_{\text{crit}}^2} \right)^{1/5}$$
$$= F(n, T) Q_{\text{crit}}^{1/5}$$

1D定常噴煙柱モデルによる噴煙柱崩壊条件

e.g., Woods (1988), Bursik and Woods (1991),
Kaminski and Jaupart (2001), Suzuki and Koyaguchi (2012)

大気圧に達した時点での上昇速度



$$Ri_{\text{crit}} = Ck \frac{\rho_a}{\rho_0} \frac{\xi_{\text{crit}}}{1 - \xi_{\text{crit}}}$$

where

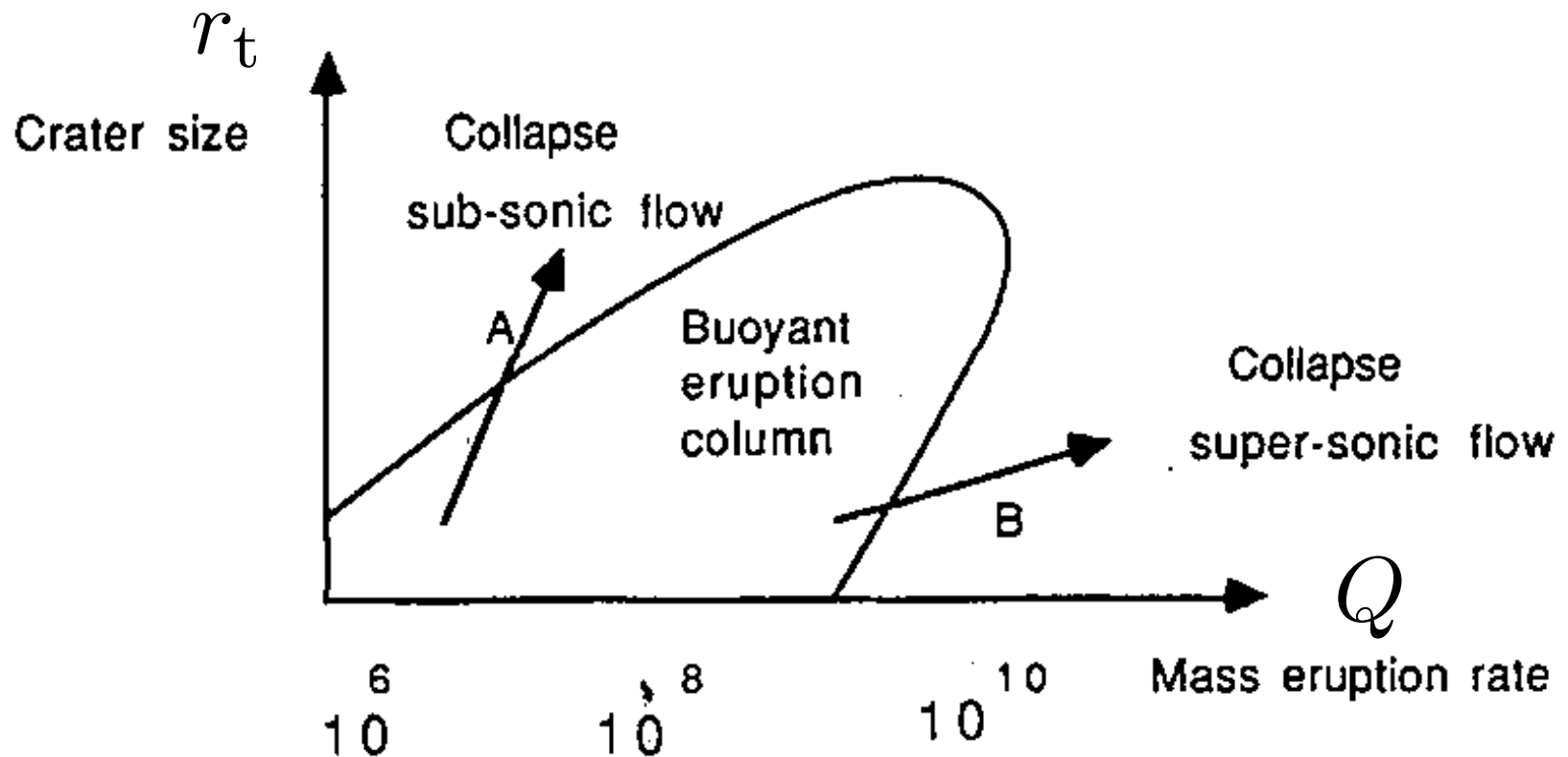
$$Ri \equiv \frac{(\rho_0 - \rho_a)g}{\rho_0} \frac{r_a}{v_a^2} \equiv \frac{g'_0 r_a}{v_a^2}$$

$$Q = \pi r_a^2 \rho_a v_a$$

$$v_{a_crit} = \left(\frac{g'^2_0 Q_{crit}}{\pi \rho_a Ri_{crit}^2} \right)^{1/5} = F(n, T) Q_{crit}^{1/5}$$

噴煙柱崩壊条件に対する 火口の影響

A **free hand** column collapse condition drawn by
Woods and Bower (1995)



Woods and Bower (1995)の噴煙柱崩壊条件

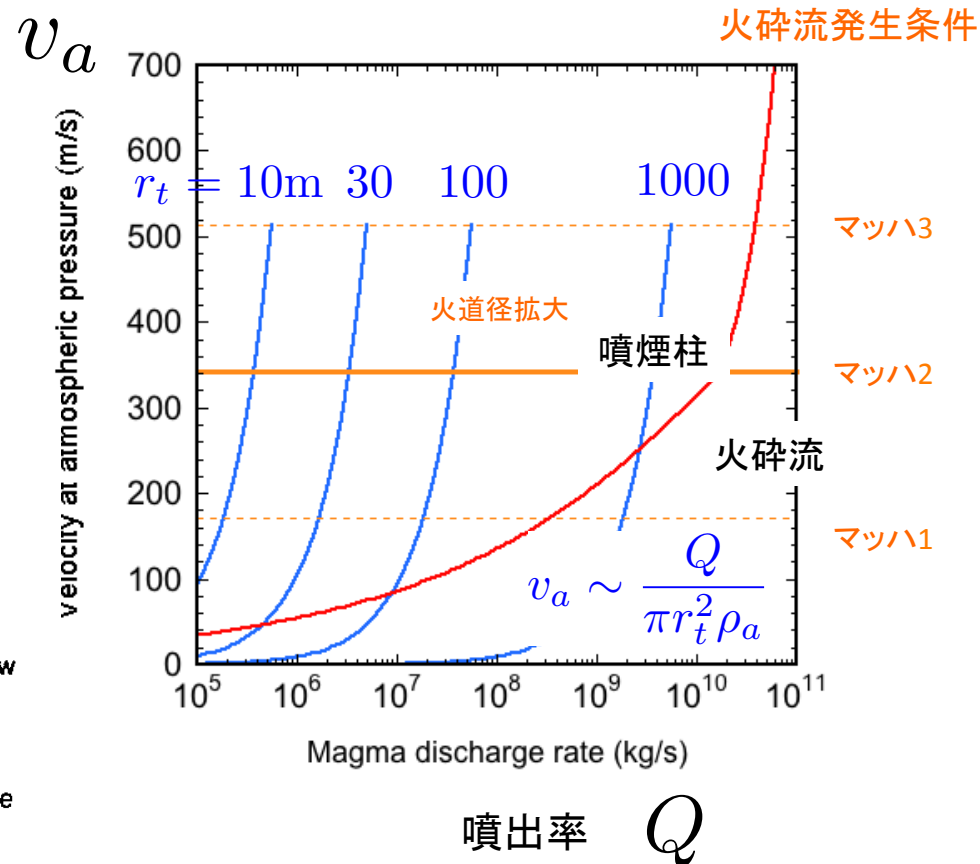
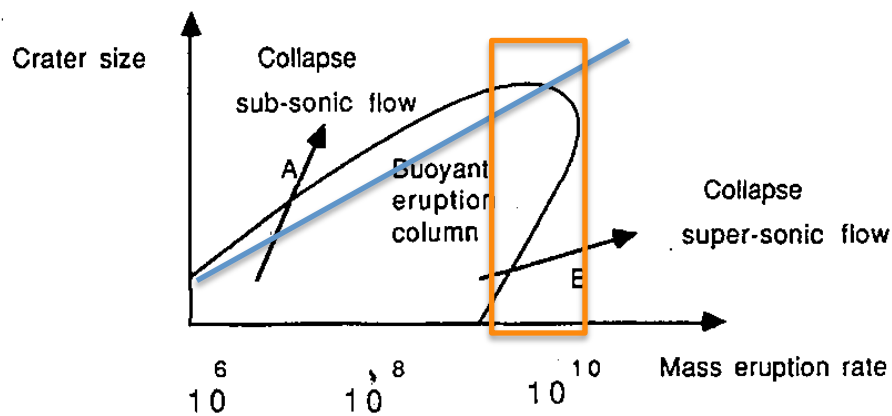
$$v_a^{\text{crit}} = \left(\frac{g_0'^2 Q_{\text{crit}}}{\pi \rho_a Ri_{\text{crit}}^2} \right)^{1/5}$$

$$= F(n, T) Q_{\text{crit}}^{1/5}$$

⇒

$$r_a^{\text{crit}} = \left(\frac{Ri_{\text{crit}} Q_{\text{crit}}^2}{g_0' \pi^2 \rho_a^2} \right)^{1/5}$$

$$= G(n, T) Q_{\text{crit}}^{2/5}$$



定性的な性質は火口の影響無しに説明される！

火口の影響の解析解

(Woods and Bower, 1995; Koyaguchi et al., 2010+本研究)

大気圧に達した時点での
マッハ数



$$K \equiv p_t/p_a$$

$$M_t \equiv v_t/a$$

$$M_a \equiv v_a/a$$

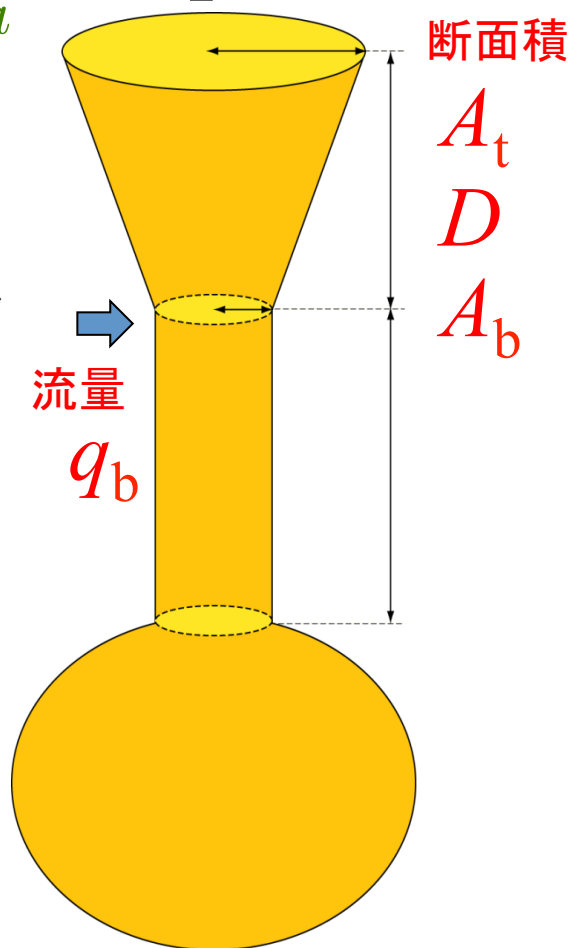
火口内部

チョーキング

流量

火道

マグマ溜り



$$M_a = M_t + \frac{1}{M_t} \left(1 - \frac{1}{K} \right)$$

for

$$X \equiv (A_t/A_b) / \exp(D/l_{sc})$$

$$Y \equiv (q_b/q^*) / \exp(D/l_{sc})$$

where $q^* \equiv \rho_a a$ $l_{sc} \equiv nRT/g$



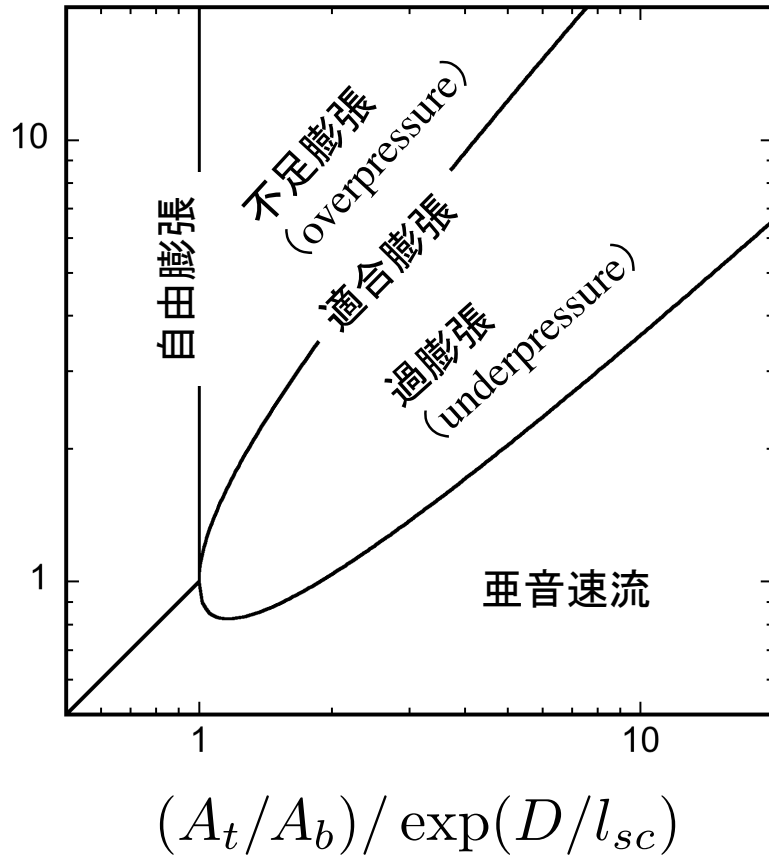
$$X = \frac{1}{M_t} \exp \left\{ \frac{1}{2} (M_t^2 - 1) \right\}$$

$$Y = K \exp \left\{ \frac{1}{2} (M_t^2 - 1) \right\}$$

火口の影響の解析解

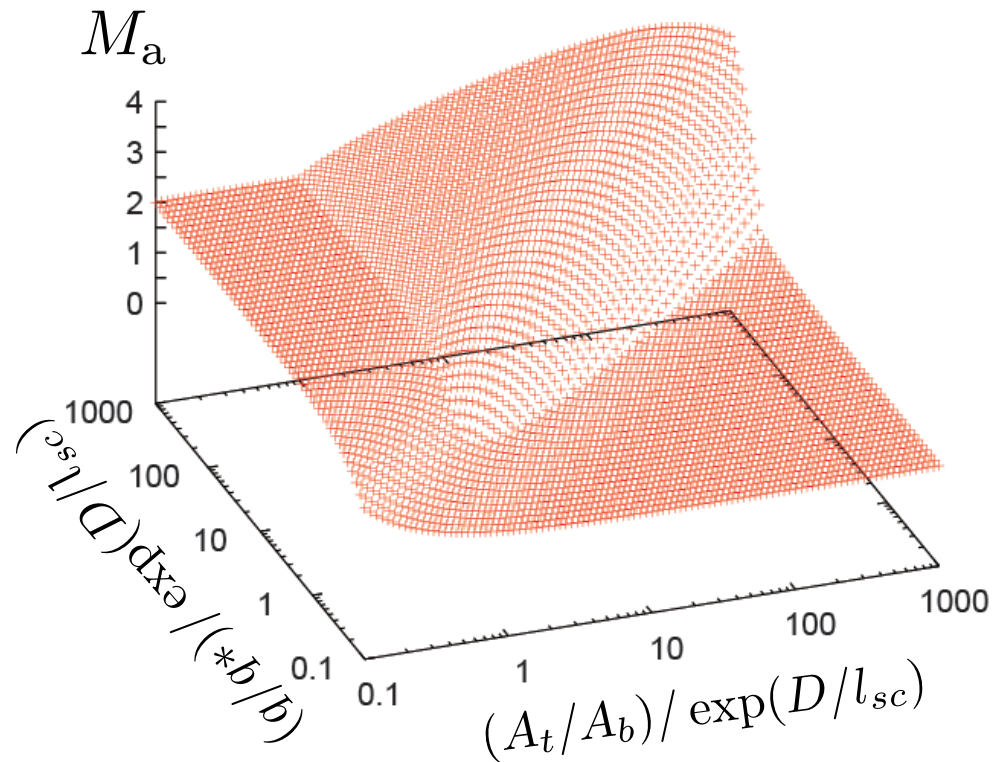
(Woods and Bower, 1995; Koyaguchi et al., 2010+本研究)

火口底での流量 $(q/q^*) / \exp(D/l_{sc})$



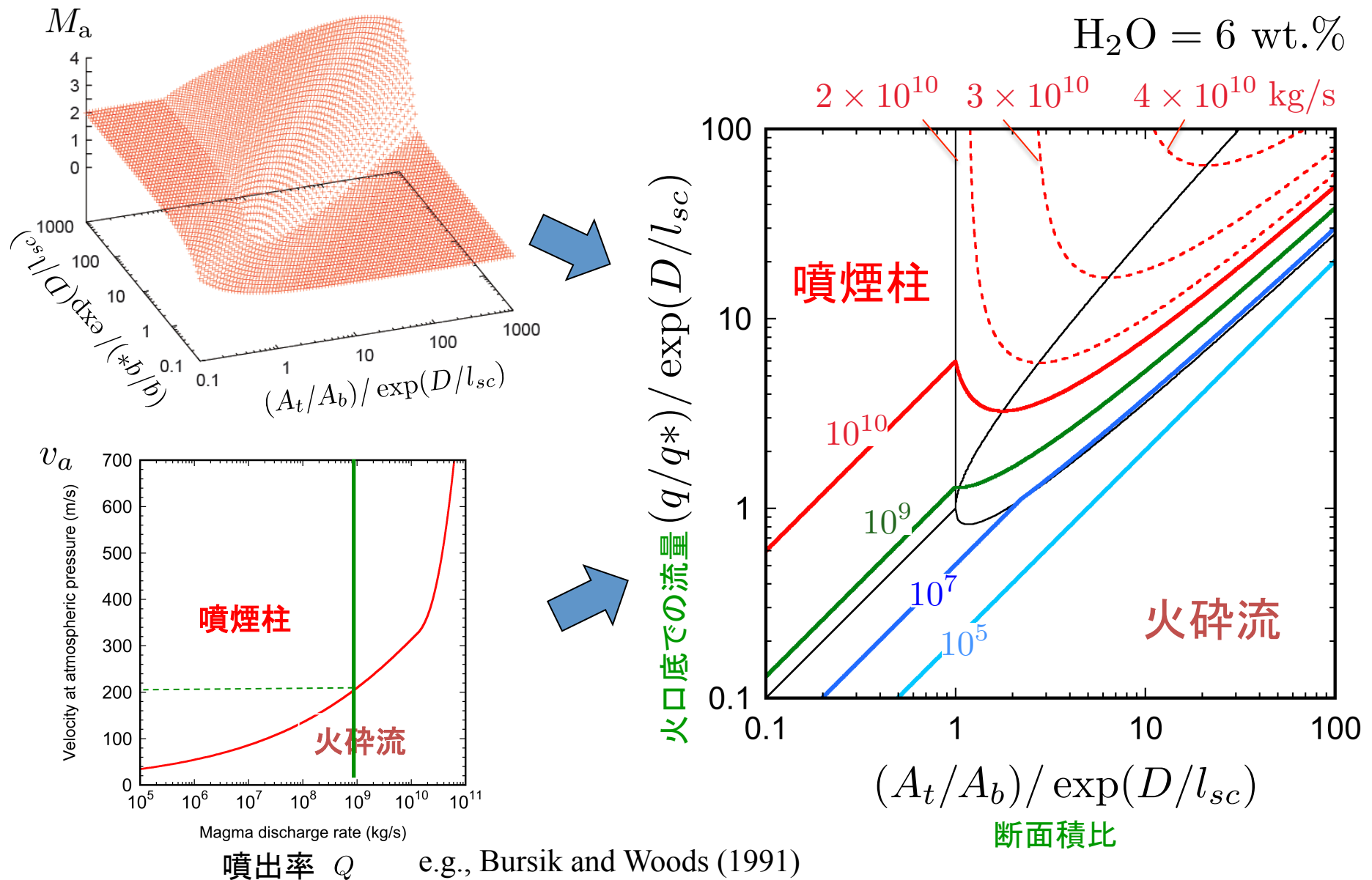
断面積比

マッハ2-3で頭打ちになる



過膨張流れで v_a が急減少する

噴出率 Q の変化に伴う火砕流発生条件の変化



火口の影響を含む 噴煙柱崩壊条件のスケール則

$$v_{a_crit} = \left(\frac{g_0'^2 Q_{crit}}{\pi \rho_a Ri_{crit}^2} \right)^{1/5}$$

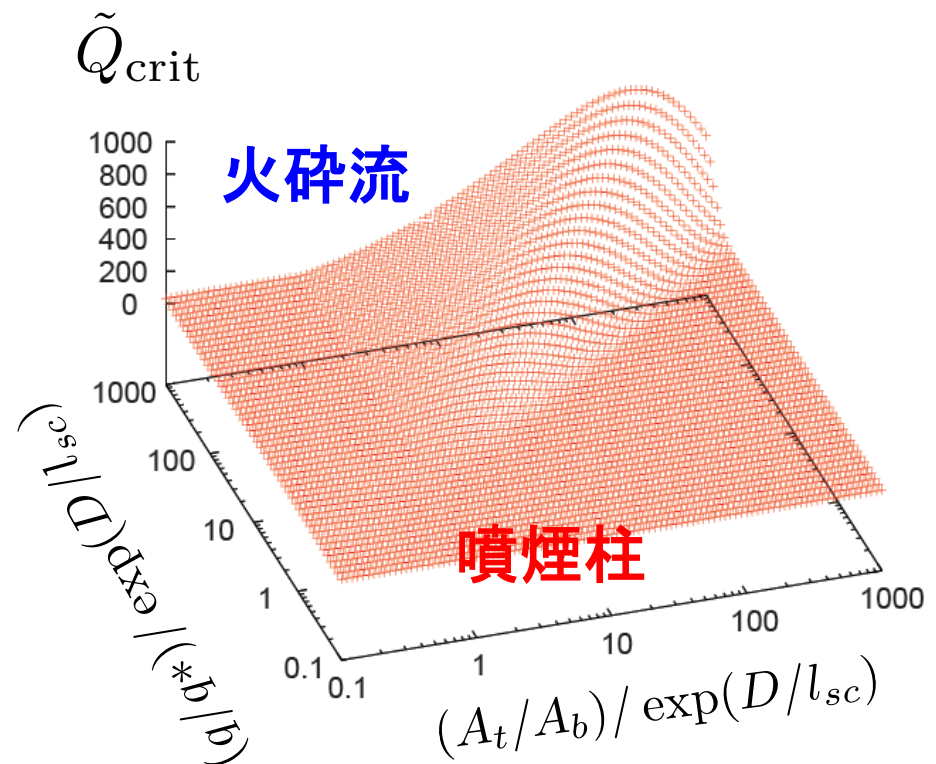
$$= F(n, T) Q_{crit}^{1/5}$$



$$\tilde{Q}_{crit} = M_{a_crit}^5$$

where

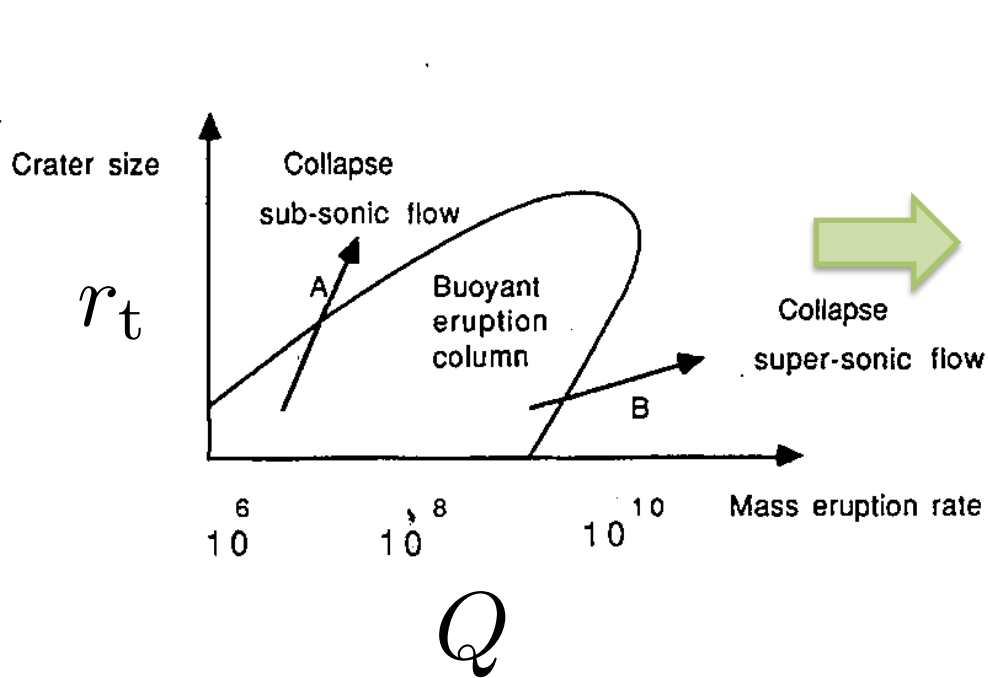
$$\tilde{Q} \equiv Q / \left(\frac{\pi \rho_a Ri_{crit}^2 a^5}{g_0'^2} \right)$$



スケール則に基づく 従来の噴煙柱崩壊条件の見直し(1/2)

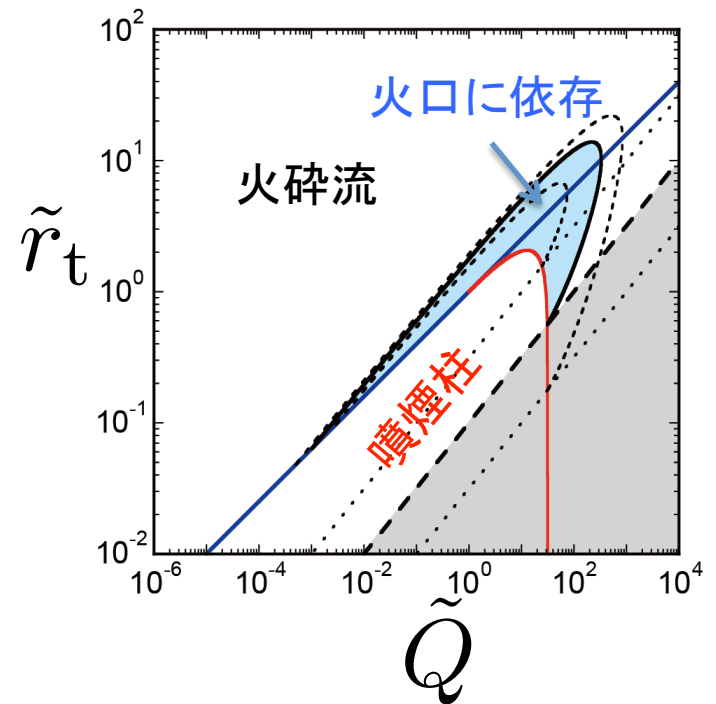
火口の影響

A **free hand** column collapse condition
Woods and Bower (1995)



無次元火口径

本研究



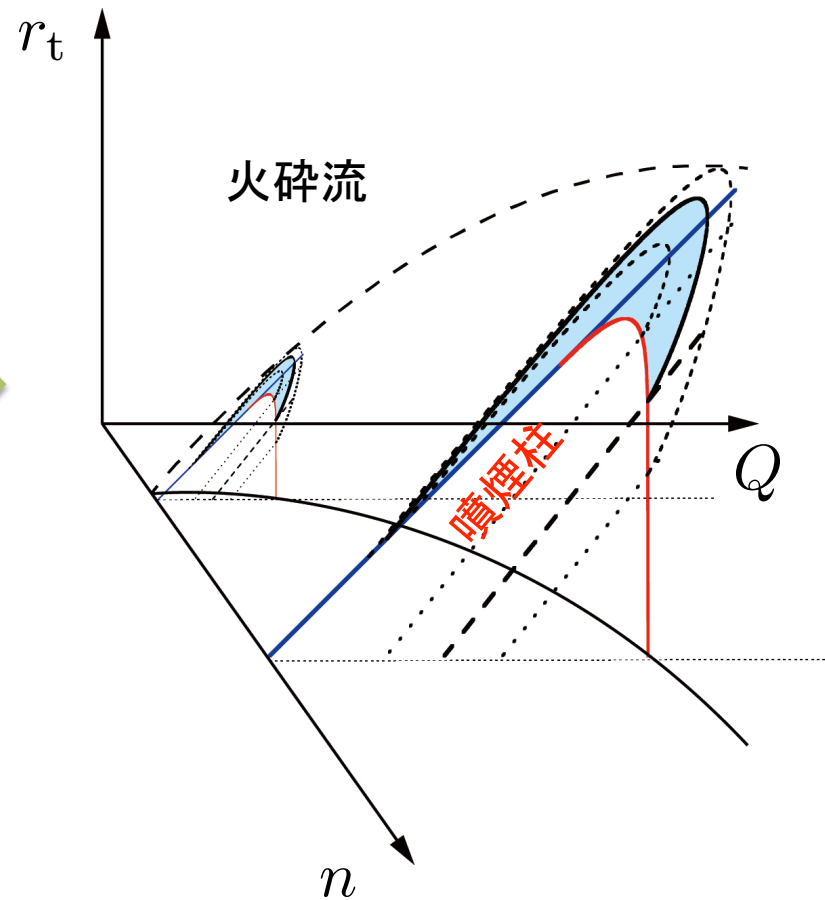
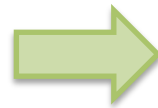
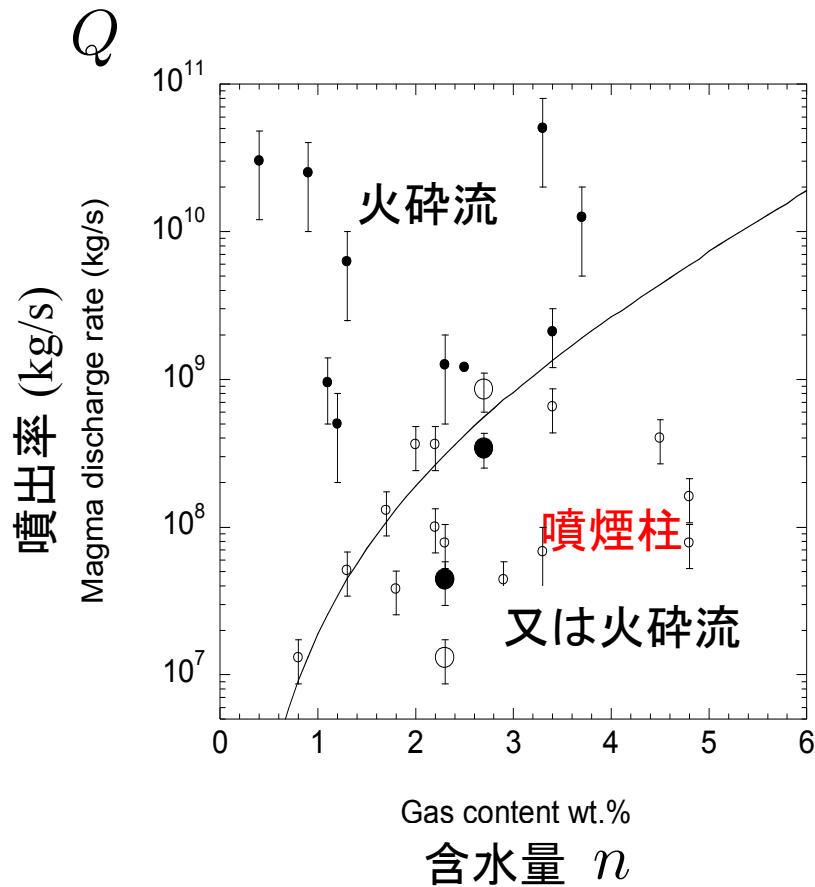
無次元噴出率

含水量の影響は
規格化パラメータに含まれる。

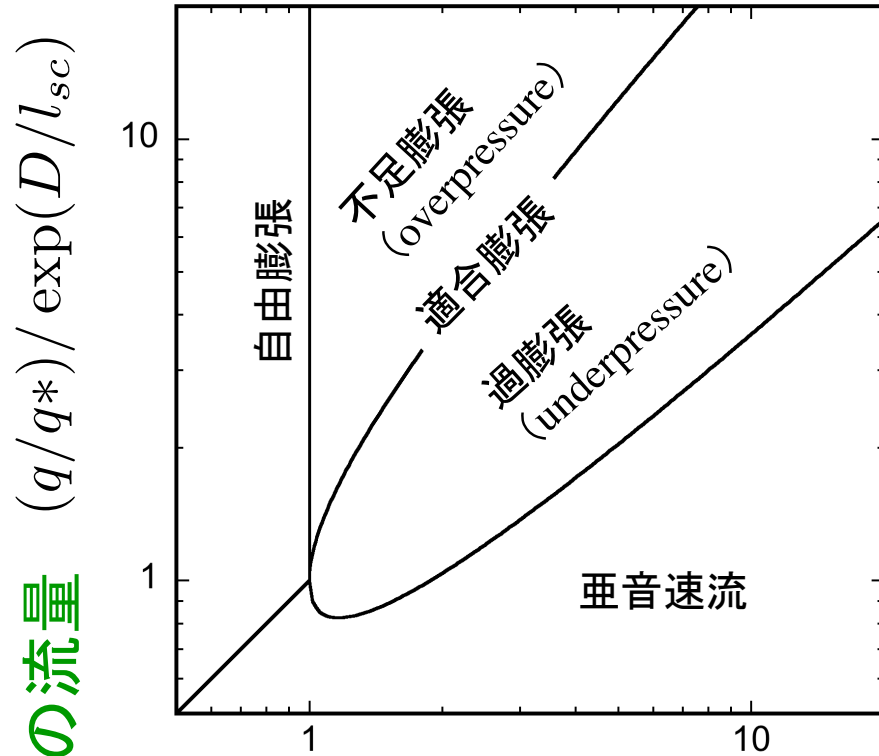
スケール則に基づく 従来の噴煙柱崩壊条件の見直し(2/2)

含水量の影響

本研究



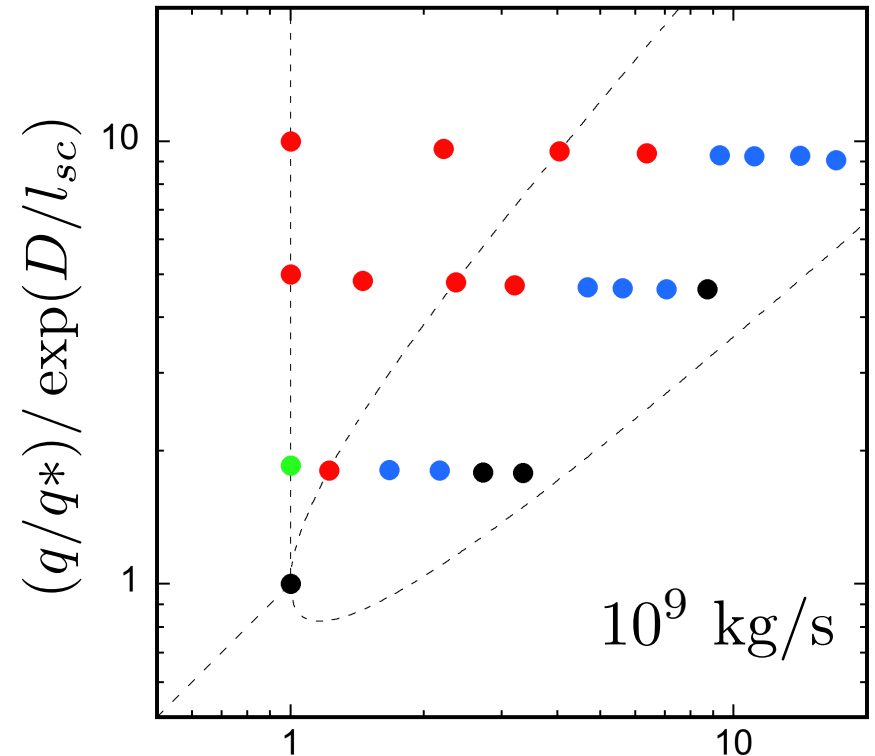
3Dシミュレーションに基づく検証



$$(A_t/A_b) / \exp(D/l_{sc})$$

断面積比

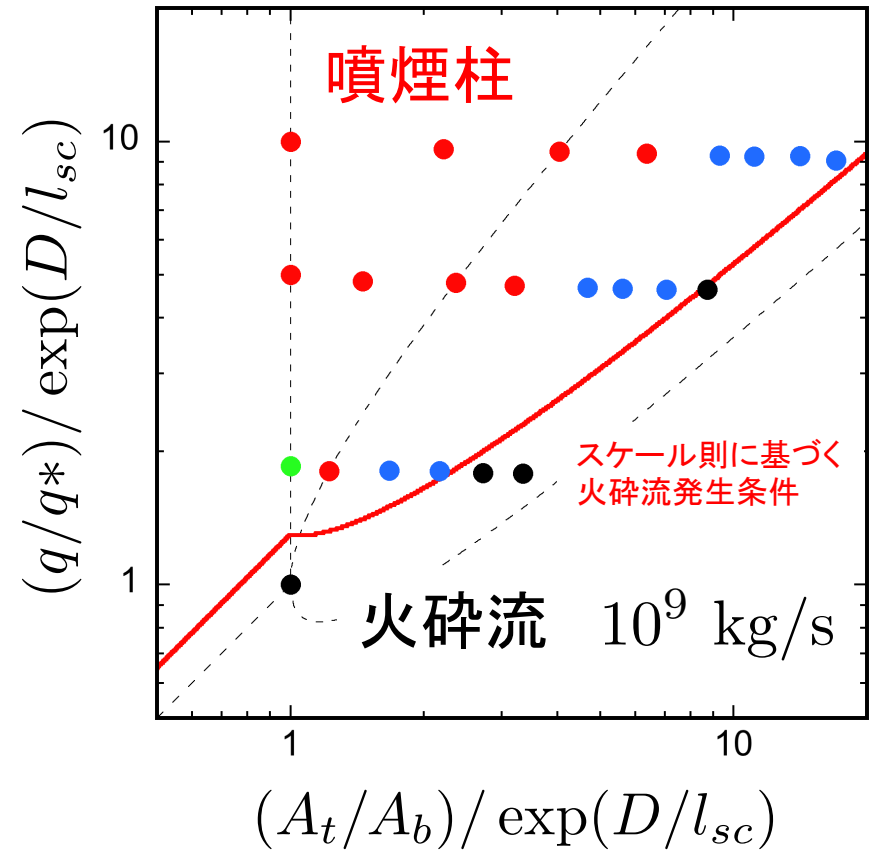
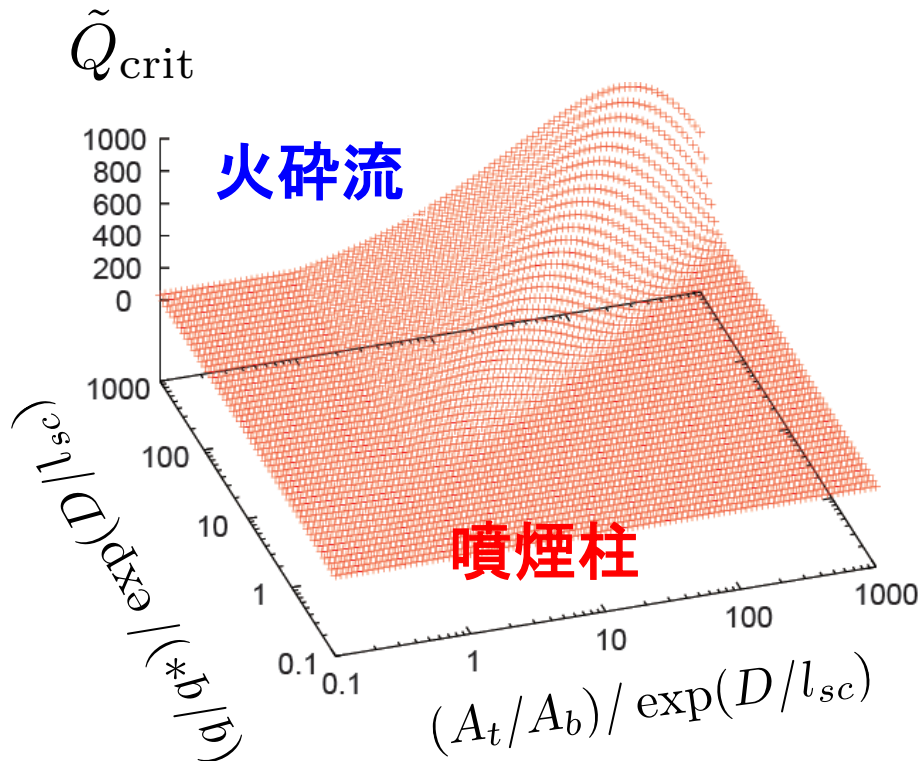
Koyaguchi et al. (2010)



$$(A_t/A_b) / \exp(D/l_{sc})$$

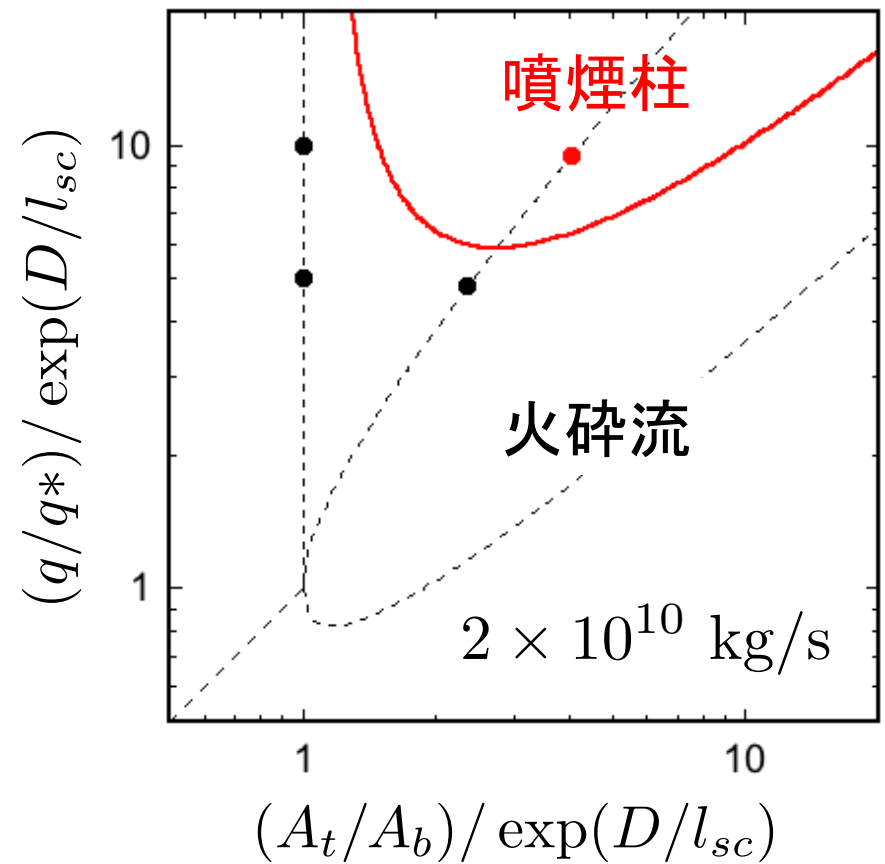
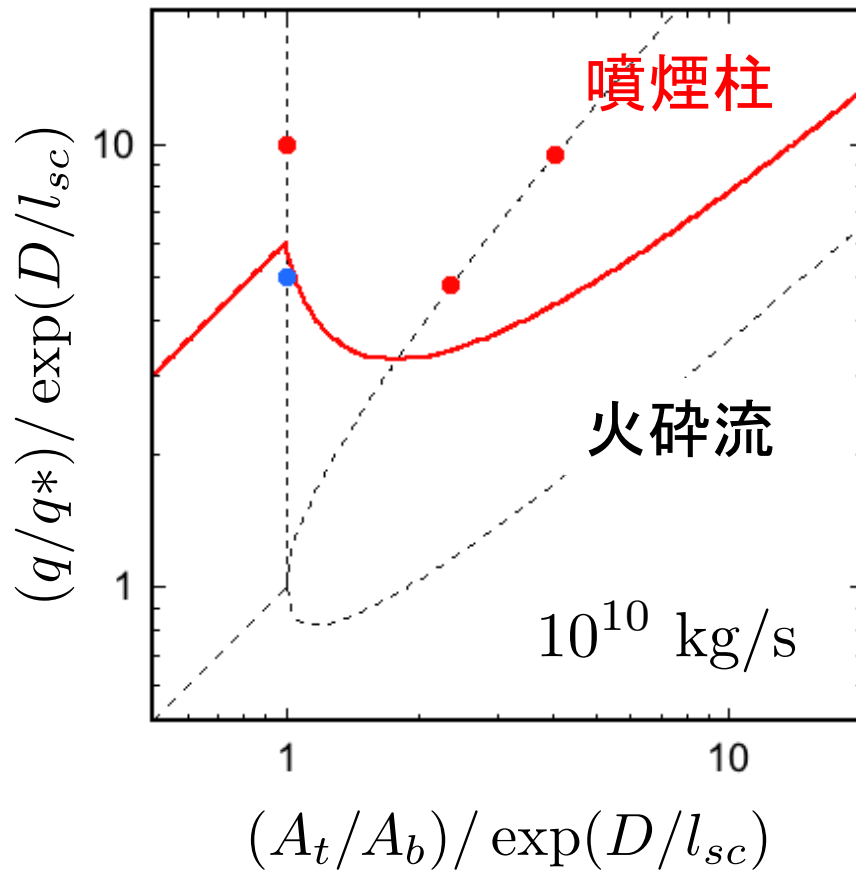
- 噴煙柱
- 火砕流
- 部分崩壊
- 噴煙柱振動

3Dシミュレーションに基づく検証



- 噴煙柱
- 火砕流
- 部分崩壊
- 噴煙柱振動

3Dシミュレーションに基づく検証

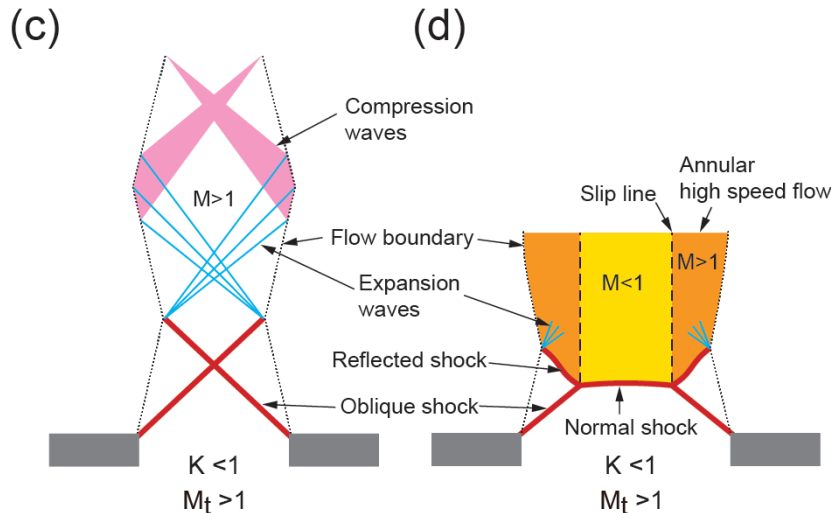
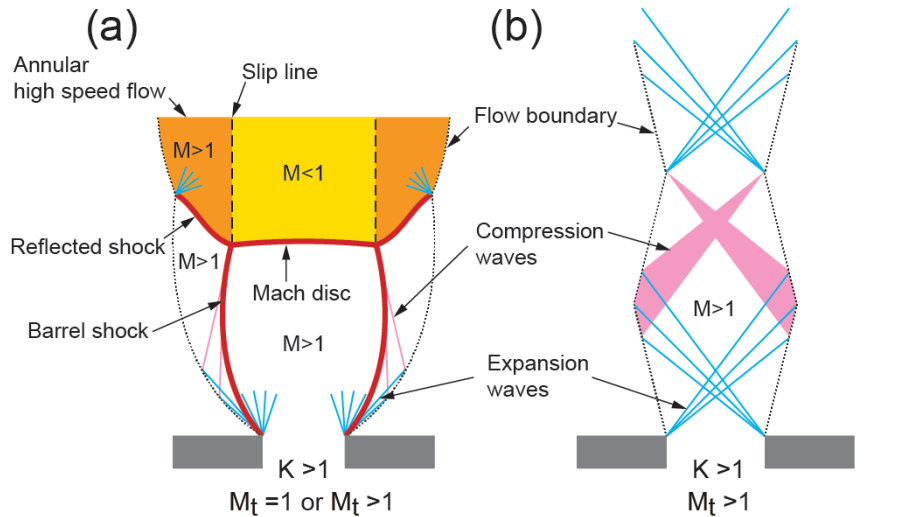


- 噴煙柱
- 火砕流
- 部分崩壊
- 噴煙柱振動

流れの多次元性の効果

(a)-(d)にむけて断面積比増加

不足膨張流



過膨張流

$$2\pi \int_0^\infty \rho v r dr = \bar{A} \bar{\rho} \bar{v}$$

$$2\pi \int_0^\infty \rho v^2 r dr = \bar{A} \bar{\rho} \bar{v}^2$$

$$2\pi \int_0^\infty v r dr = \bar{A} \bar{v}$$



$$\bar{v} = \frac{\int_0^\infty \rho v^2 r dr}{\int_0^\infty \rho v r dr}$$

$$\bar{r} \equiv \sqrt{\frac{\bar{A}}{\pi}} = \sqrt{\frac{2 \int_0^\infty v r dr \int_0^\infty \rho v r dr}{\int_0^\infty \rho v^2 r dr}}$$

まとめ

- 火口の影響を含む噴煙柱崩壊の条件に関するスケール則を導出した.
- 従来の噴煙柱崩壊の条件は, 今回のスケール則の一部あるいは, 粗い近似として理解することができる.
- 上記のスケール則を3Dシミュレーションで検証した.
- 本スケール則を基礎として, 2D,3D効果を系統的に考慮することによって, 噴煙柱崩壊条件の全体像を理解したい.