

# 地球における噴火現象

寅丸敦志

九州大学大学院理学研究院

地球惑星科学部門

# Menu

- Introduction
- General background
- Examples of eruptions and volcanoes
- Laboratory experiments
- Transportation of magmas in the crust
  - Dyke and magma chamber

# Five aspects characterizing terrestrial volcanism

- Age
  - Magma production rate, evolution of planet
- **Volume**
  - Magma strage, eruption triggering
- **Style**
  - Behavior of ascending magmas, explosivity
- Chemistry
  - Magma genesis, magma rheology
- Place
  - Tectonic setting, subaerial vs submarine

# Key process

## Melting (vs crystallization)

### 1. Heat source

- advective transfer
- tidal heating

### 2. Volatiles

- reducing melting temperature
- explosivity

# VEI (Volcanic Explosivity Index)

TABLE 1. Criteria for Estimation of the Volcanic Explosivity Index (VEI)

Criteria	VEI:	0	1	2	3	4	5	6	7	8	
DESCRIPTION		non-explosive	small	moderate	mod-large	large	very large	-----			
VOLUME OF EJECTA (M <sup>3</sup> )		<10 <sup>4</sup>	10 <sup>4</sup> -10 <sup>6</sup>	10 <sup>6</sup> -10 <sup>7</sup>	10 <sup>7</sup> -10 <sup>8</sup>	10 <sup>8</sup> -10 <sup>9</sup>	10 <sup>9</sup> -10 <sup>10</sup>	10 <sup>10</sup> -10 <sup>11</sup>	10 <sup>11</sup> -10 <sup>12</sup>	>10 <sup>12</sup>	
(TSUYA CLASSIFICATION)*		(I)	(II-III)	(IV)	(V)	(VI)	(VII)	(VIII)	(IX)	-----	
COLUMN HEIGHT (KM)*		<0.1	0.1-1	1-5	3-15	10-25	>25	-----			
QUALITATIVE DESCRIPTION		---"gentle, effusive"---		-----"explosive"-----		-----"cataclysmic, paroxysmal, colossal"-----					
							"severe, violent, terrific"-----				
CLASSIFICATION		-----"Strombolian"-----			-----"Plinian"-----						
		-----"Hawaiian"-----		-----"Vulcanian"-----			-----"Ultraplinian"-----				
DURATION (hours)		-----<1-----				----->12-----					
of continuous blast							-----1-6-----				
							-----6-12-----				
CAVW MAX EXPLOSIVITY**		--lava flows--	-----explosion or nuée ardente-----								
		-----phreatic-----									
		-----dome or mudflow---									
TROPOSPHERIC INJECTION		negligible	minor	moderate	substantial	-----					
STRATOSPHERIC INJECTION		none	none	none	possible	definite	significant	-----			

+If all eruptive products were pyroclastic ejecta

\*For VEI's 0-2, uses km above crater; for VEI's 3-8, uses km above sea level.

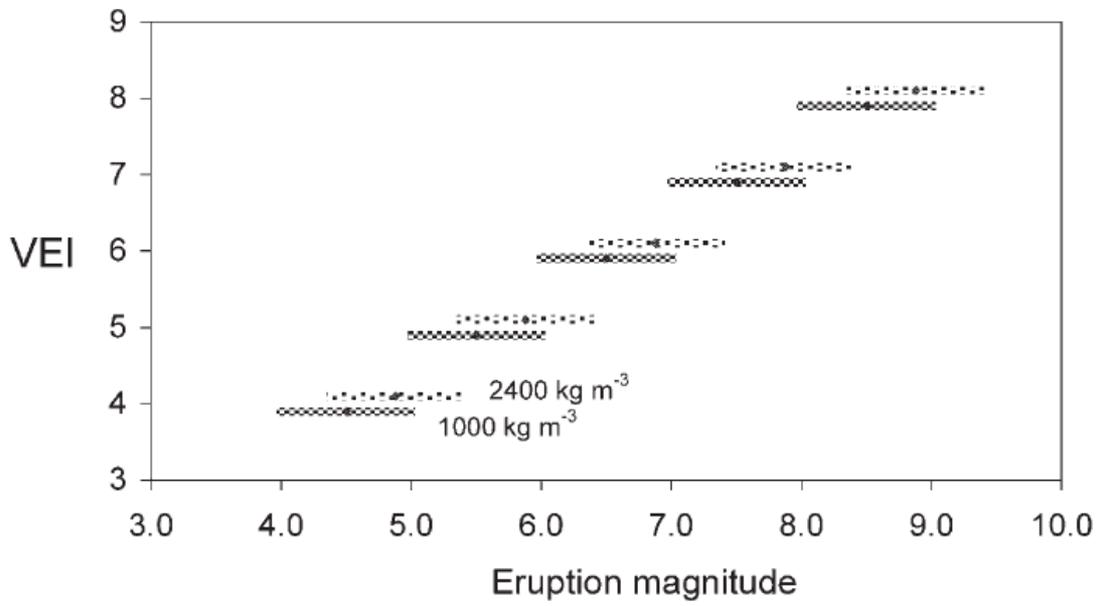
\*\*The most explosive activity indicated for the eruption in the Catalogue of Active Volcanoes

Newhall and Self (1982)

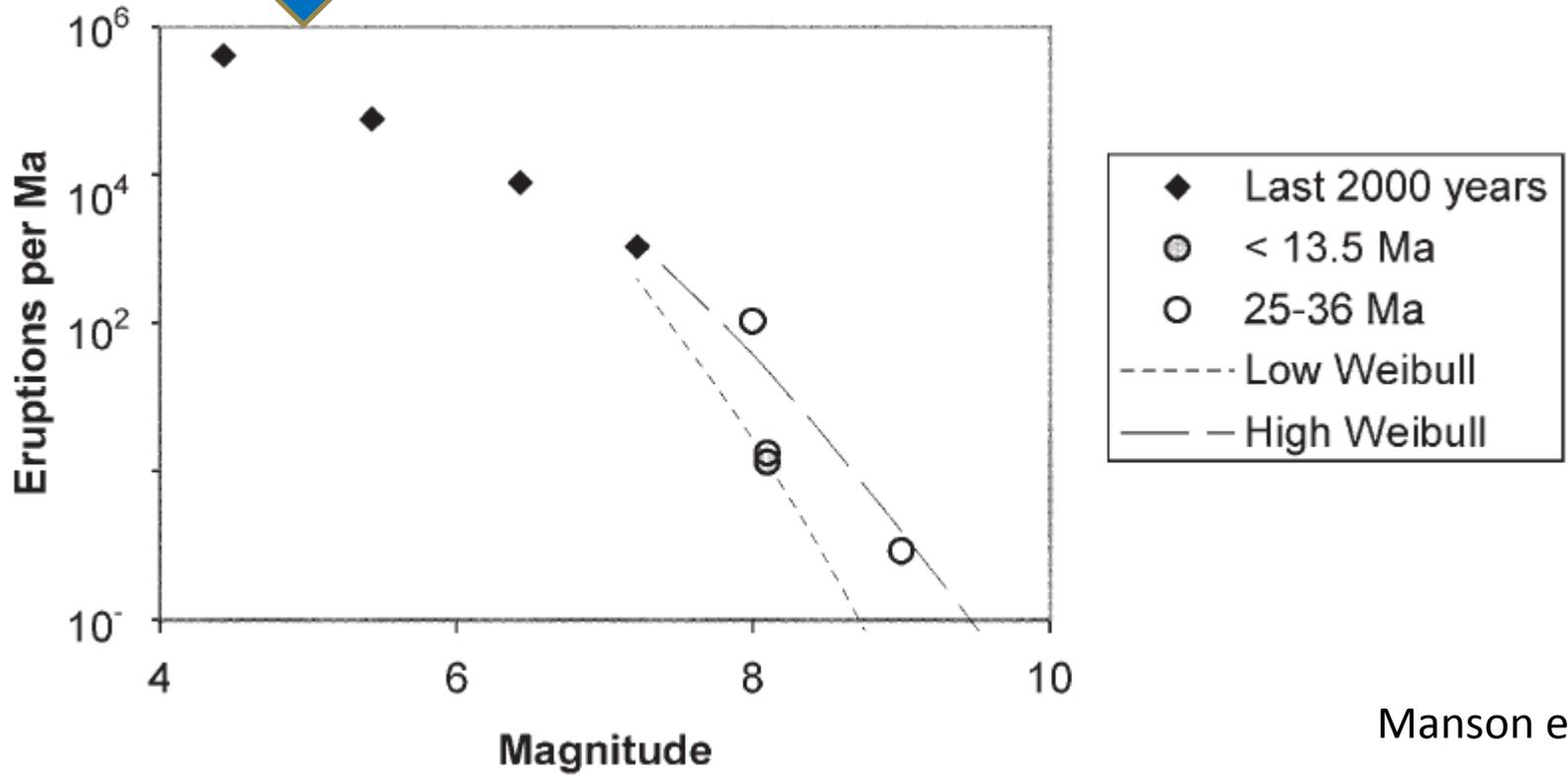
Criteria are listed in decreasing order of reliability.

10<sup>9</sup>m<sup>3</sup>のLava flowはどうカテゴライズするのか

早川(1993)は噴火マグニチュードを提唱:  $M = \log m - 7$ , m (kg) (Manson et al 2004)



1 km<sup>3</sup>

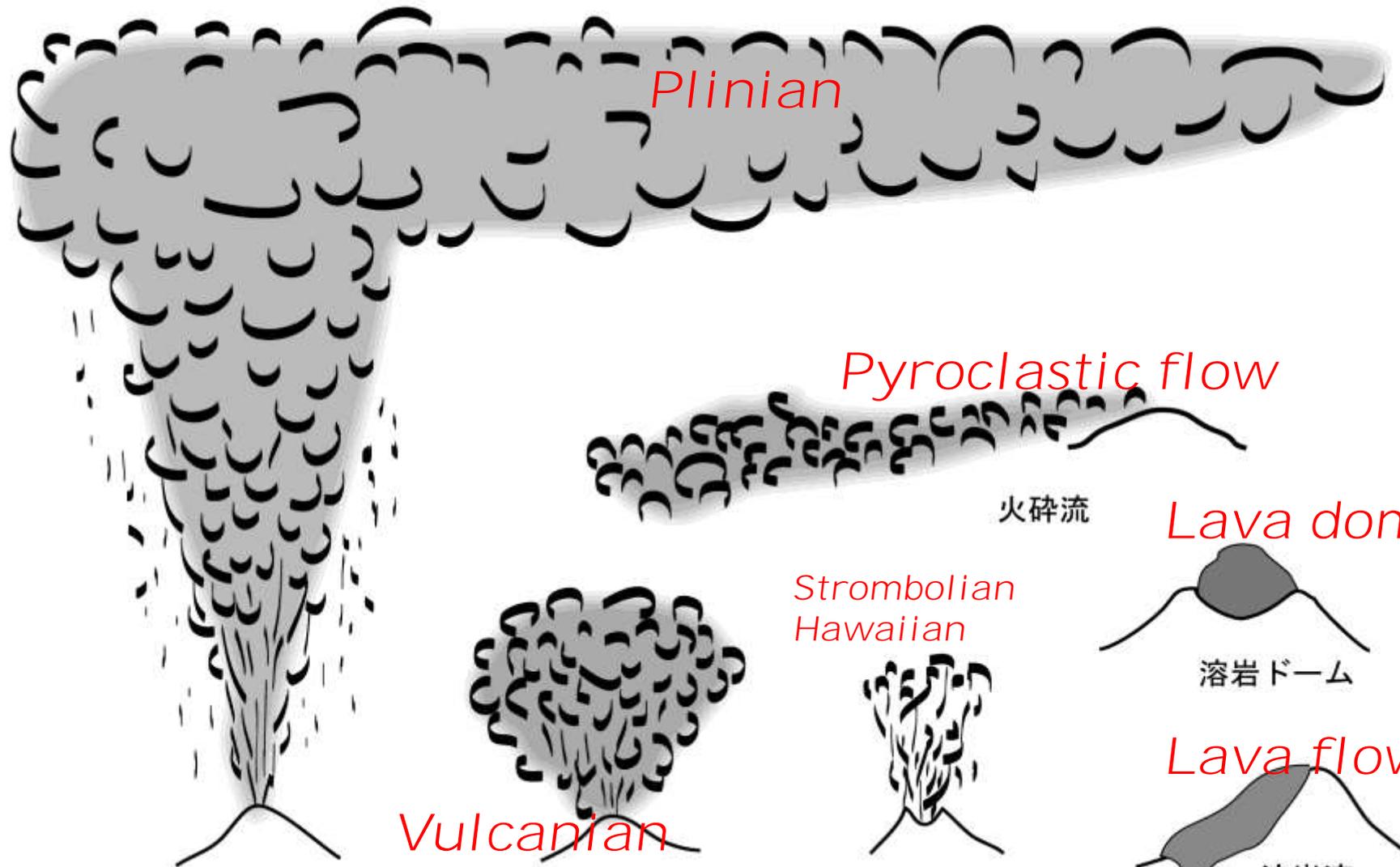


# VEIと休止期間の関係



Simkin et al (1981)  
modified by Schminke

# Eruption styles



プリニー式

ブルカノ式

ハワイ式・ストロンボリ式

溶岩流

Plinian

Pyroclastic flow

火砕流

Lava dome

溶岩ドーム

Strombolian  
Hawaiian

Lava flow

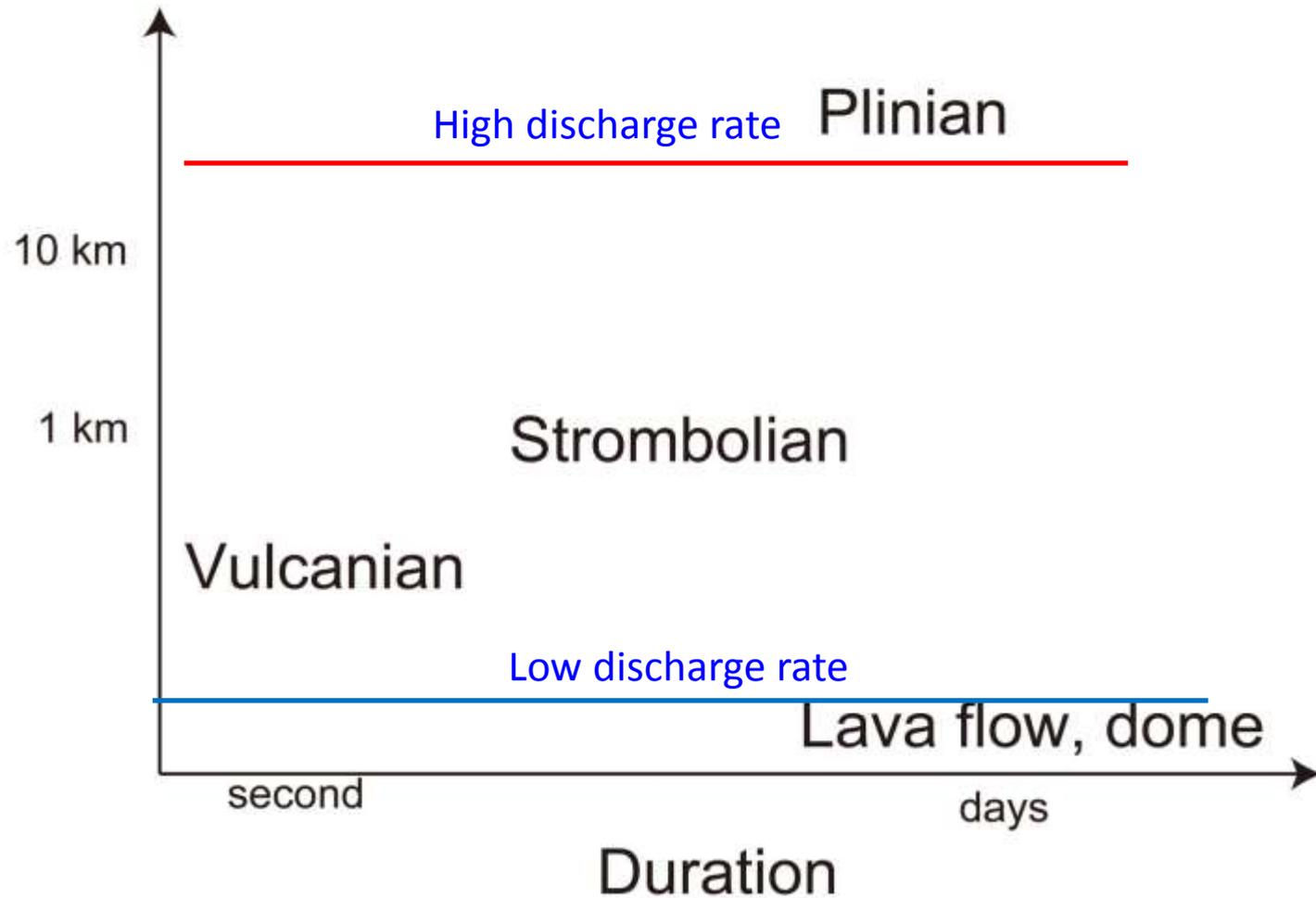
Vulcanian

# Styles of eruptions

*Column height, duration, volume*

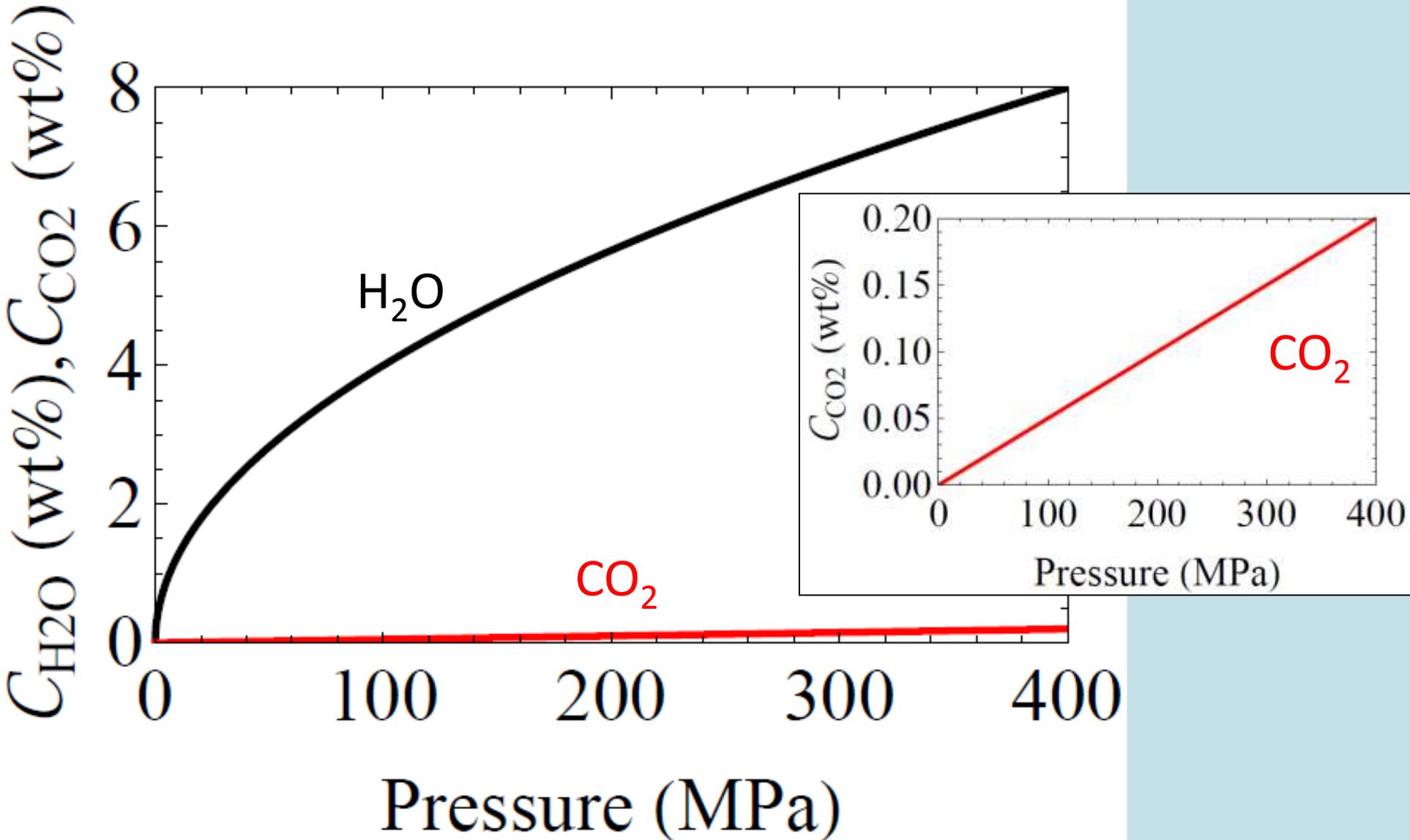
$$\text{Volume} = (\text{Discharge rate}) \times (\text{duration})$$

Eruption height

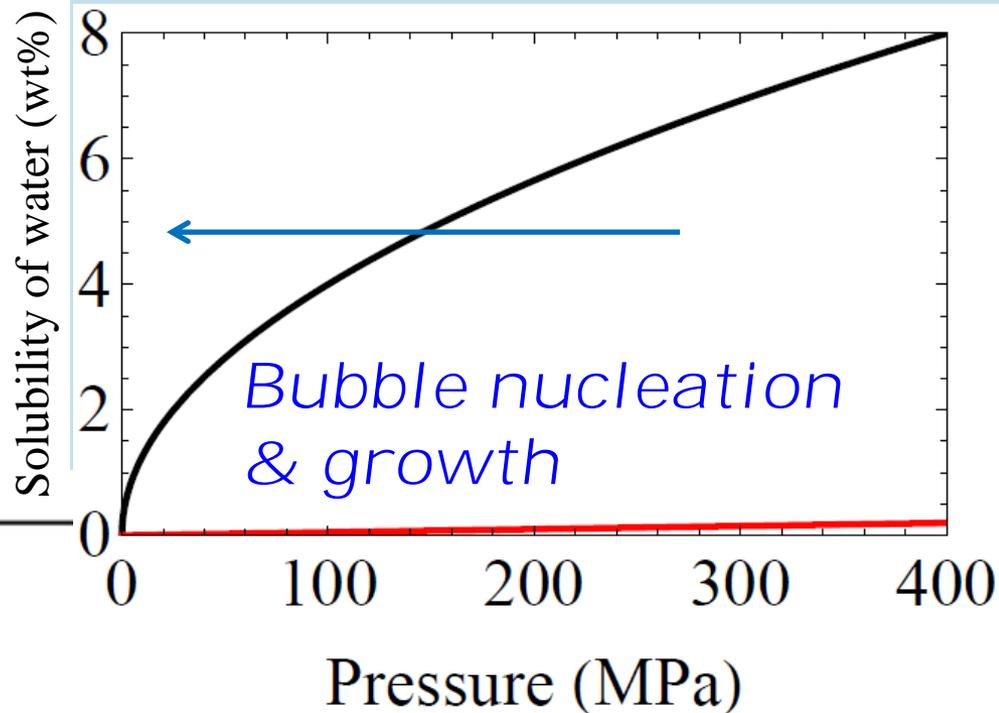


# Energy source of explosivity

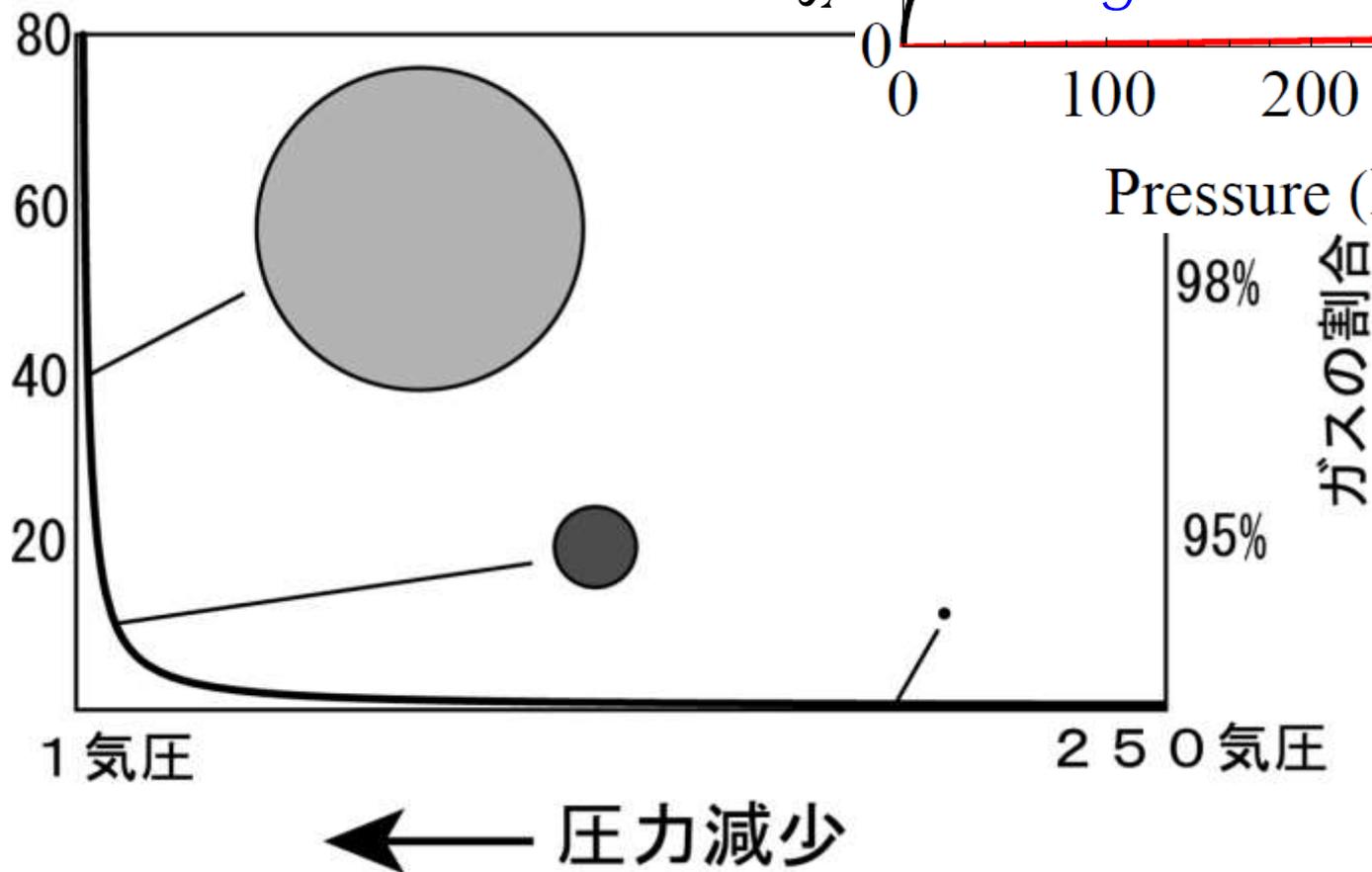
## *Solubility of volatiles*



# Expansion of gas



マグマの体積 (発泡前を1)



# Essence of Conduit flow as Compressible fluid

*1D & inviscid*

質量保存

$$\frac{d\rho}{\rho} + \frac{dv}{v} + \frac{dA}{A} = 0 \quad \rho \cdot v \cdot A = \text{const.}$$

運動量保存 (オイラー方程式)

$$v dv = -\frac{dp}{\rho} + g dz$$

エネルギー保存 (ベルヌイの方程式)

$$T ds + \frac{dp}{\rho} + d\left(\frac{v^2}{2}\right) + d\Phi = 0, \quad dh + d\left(\frac{v^2}{2}\right) + d\Phi = 0$$

$\Phi$ : 重力ポテンシャル

# 等エントロピー一流：断面積一定 $dA=0$

気体	$\gamma$
空気	1.403
水素	1.410
酸素	1.401
窒素	1.404
炭酸ガス	1.304
アルゴン	1.668
水蒸気	1.33

比熱比  

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v}$$

$$1) \quad \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dv}{v} = 0 \Rightarrow v = v_0 \left( \frac{p}{p_0} \right)^{-1/\gamma}$$

$$2) \quad v dv + \frac{dp}{\rho} = 0 \Rightarrow v = c_0 \left[ M_0^2 + \frac{2}{\gamma-1} \left( 1 - \left( \frac{p}{p_0} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right) \right]$$

Sound speed

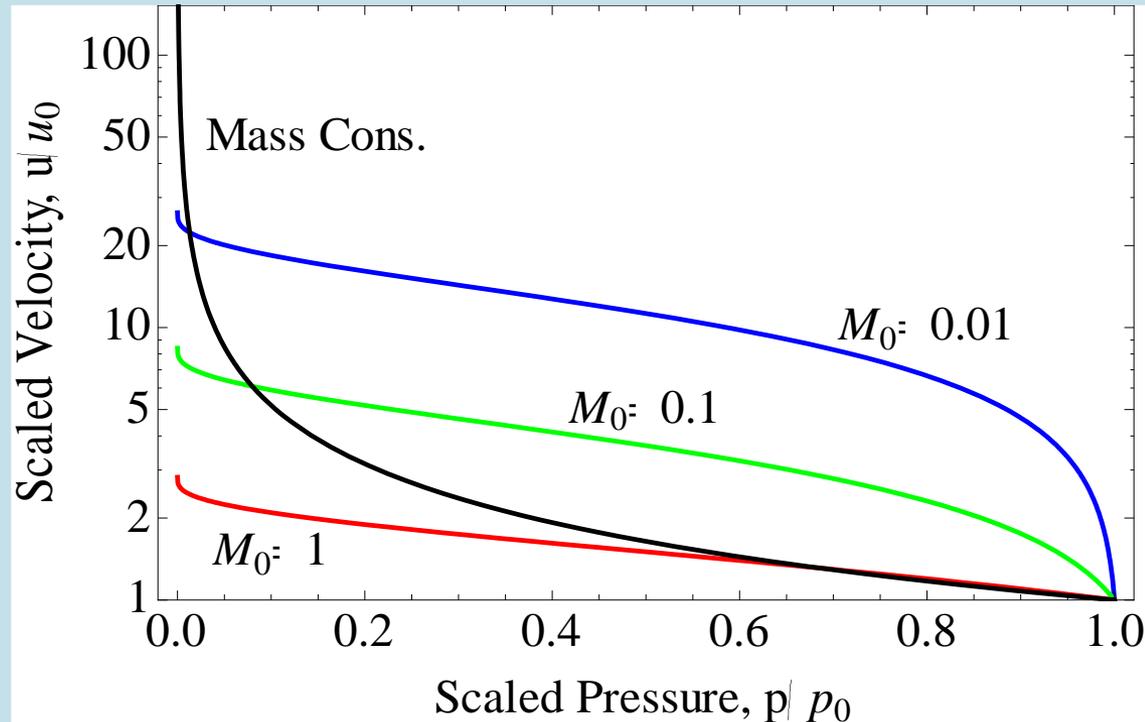
$$c_0 = \left( \gamma \frac{p_0}{\rho_0} \right)^{1/2}$$

音速

Mach Number

$$M = \frac{v}{c}$$

質量と運動量を両方満足する定常流は断面積変化か散逸のどちらかが少なくとも必要

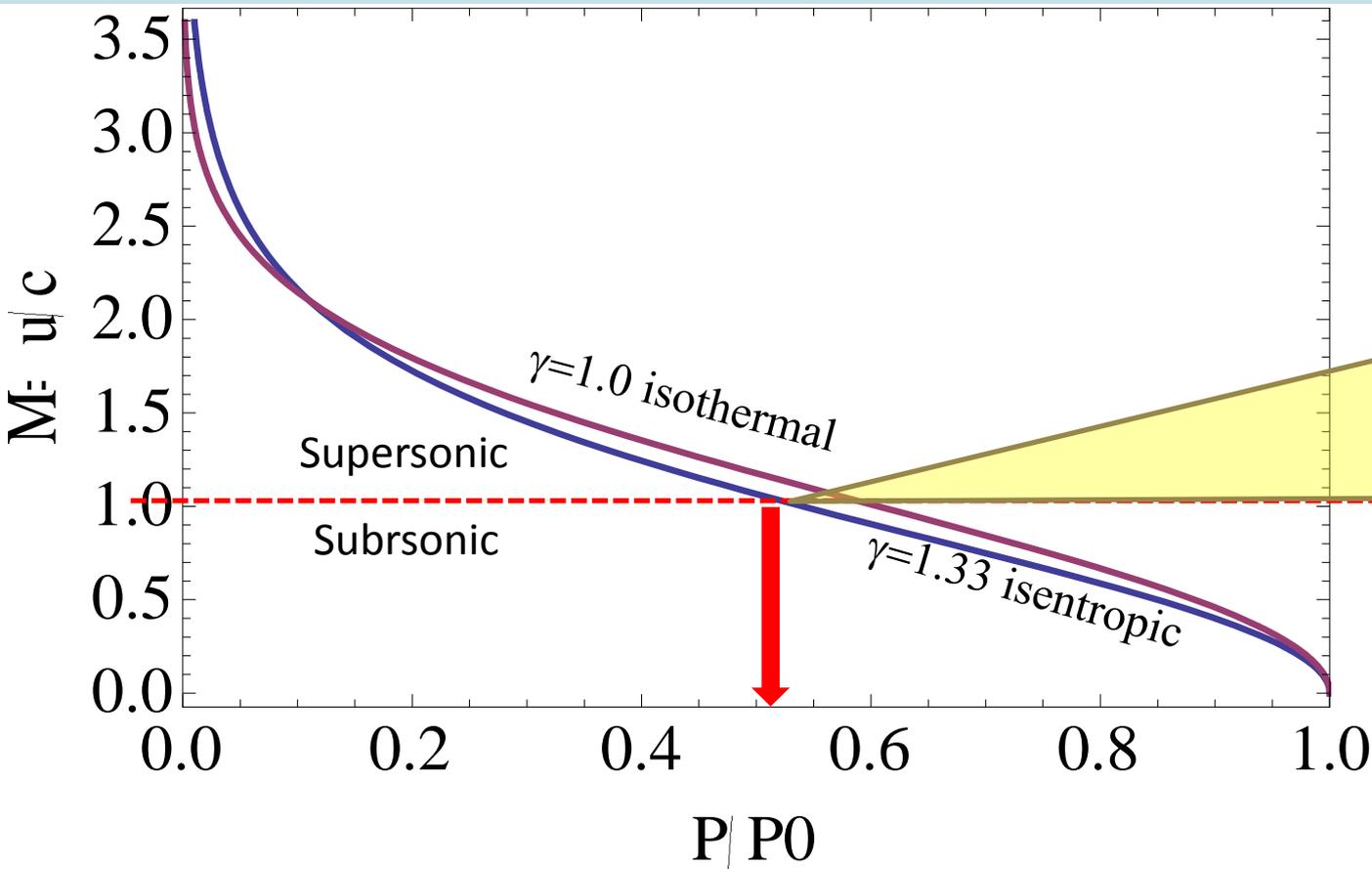


# 初速度0の場合の運動量保存の1次元流れ

$$v = c_0 \frac{2}{\gamma - 1} \left( 1 - \left( \frac{p}{p_0} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right)$$

比熱比

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v}$$



音速になる出口圧

$$\frac{p^*}{p_0} = \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}$$

$\gamma = 1.33$  (steam)

$$\Rightarrow \frac{p^*}{p_0} = 0.54$$

# 理想気体の音速 (断熱・等エントロピー)

音速の定義式

$$(1) \quad c = \sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_s}$$

理想気体の式

$$(2) \quad \frac{p}{\rho} = \frac{RT}{m}$$

熱力学の式

$$(3) \quad \left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_s = \frac{\partial(p, S)}{\partial(\rho, S)} = \frac{\partial(p, S)}{\partial(p, T)} \frac{\partial(p, T)}{\partial(\rho, T)} \frac{\partial(\rho, T)}{\partial(\rho, S)}$$

$$= \left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_p \left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_T \left(\frac{\partial T}{\partial S}\right)_\rho = \frac{T \left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_p}{T \left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_T$$

$$= \frac{C_p}{C_v} \left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_T = \gamma \left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_T, \quad \gamma \equiv \frac{C_p}{C_v}$$

$$(4) \quad \left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_T = \frac{RT}{m} = \frac{p}{\rho}$$

$$(5) \quad \left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_s = \gamma \frac{p}{\rho} = \gamma \frac{RT}{m}$$

$$(6) \quad c = \sqrt{\gamma \frac{p}{\rho}} = \sqrt{\gamma \frac{RT}{m}}$$

また、断熱変化の式は、式(5)より

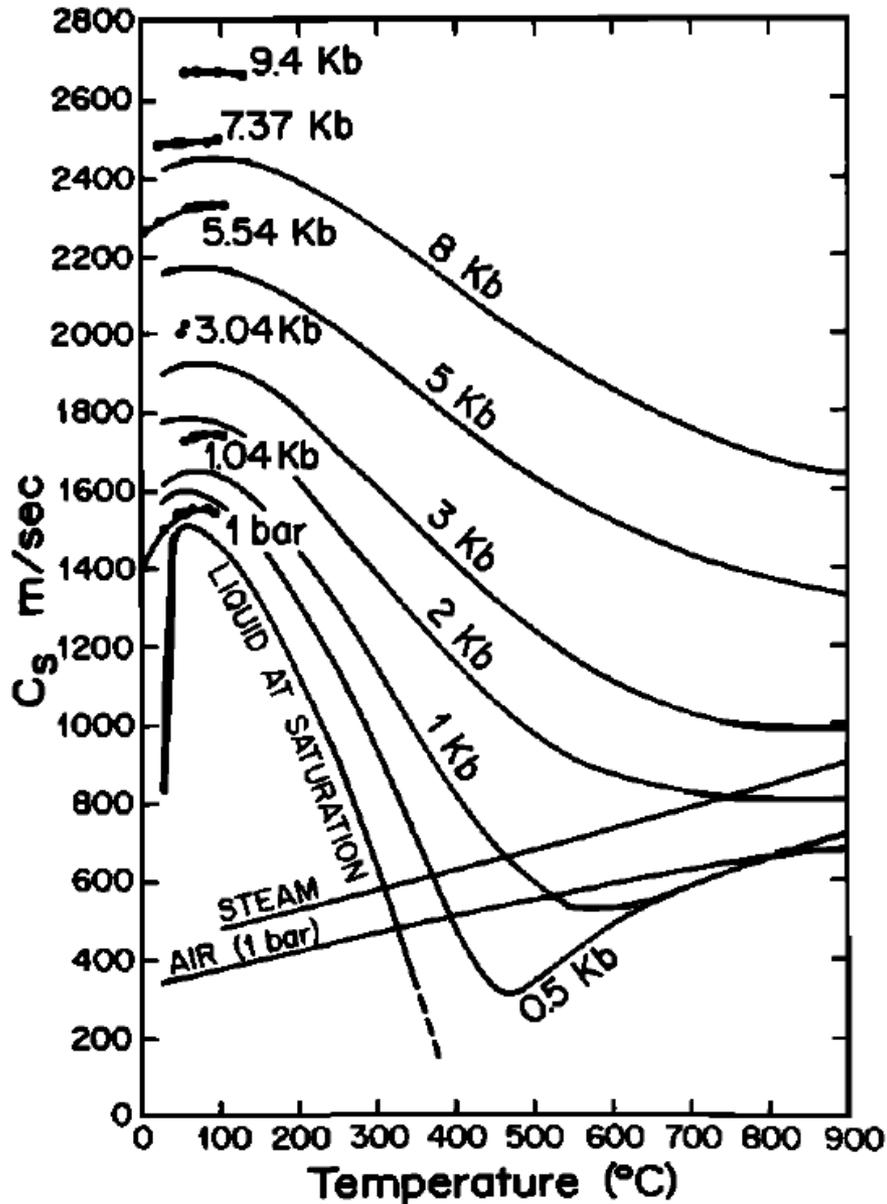
$$(7) \quad \frac{dp}{p} = \gamma \frac{d\rho}{\rho}$$

これを積分して

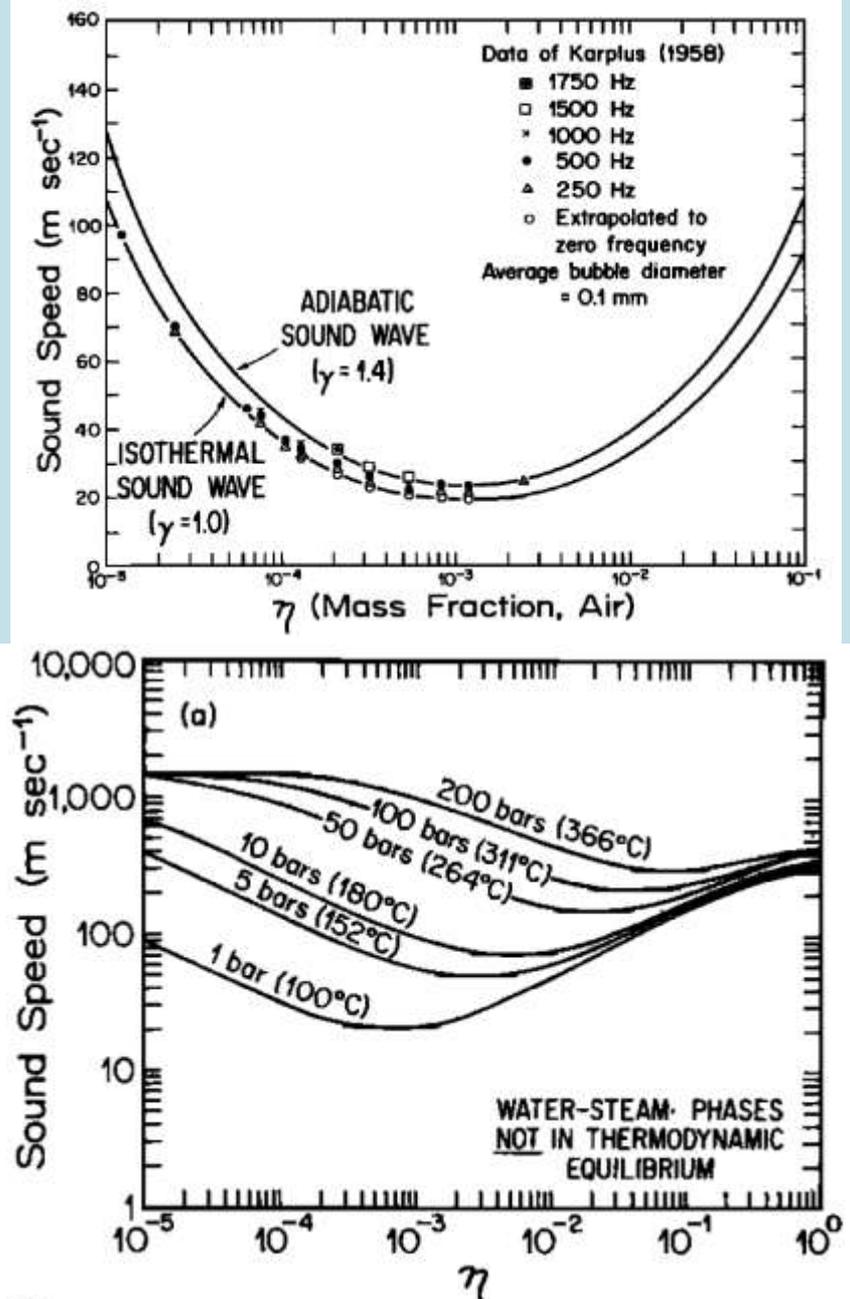
$$(8) \quad \frac{p}{\rho^\gamma} = \text{const}$$

$$(9) \quad \frac{T}{p^{(\gamma-1)/\gamma}} = \text{const}$$

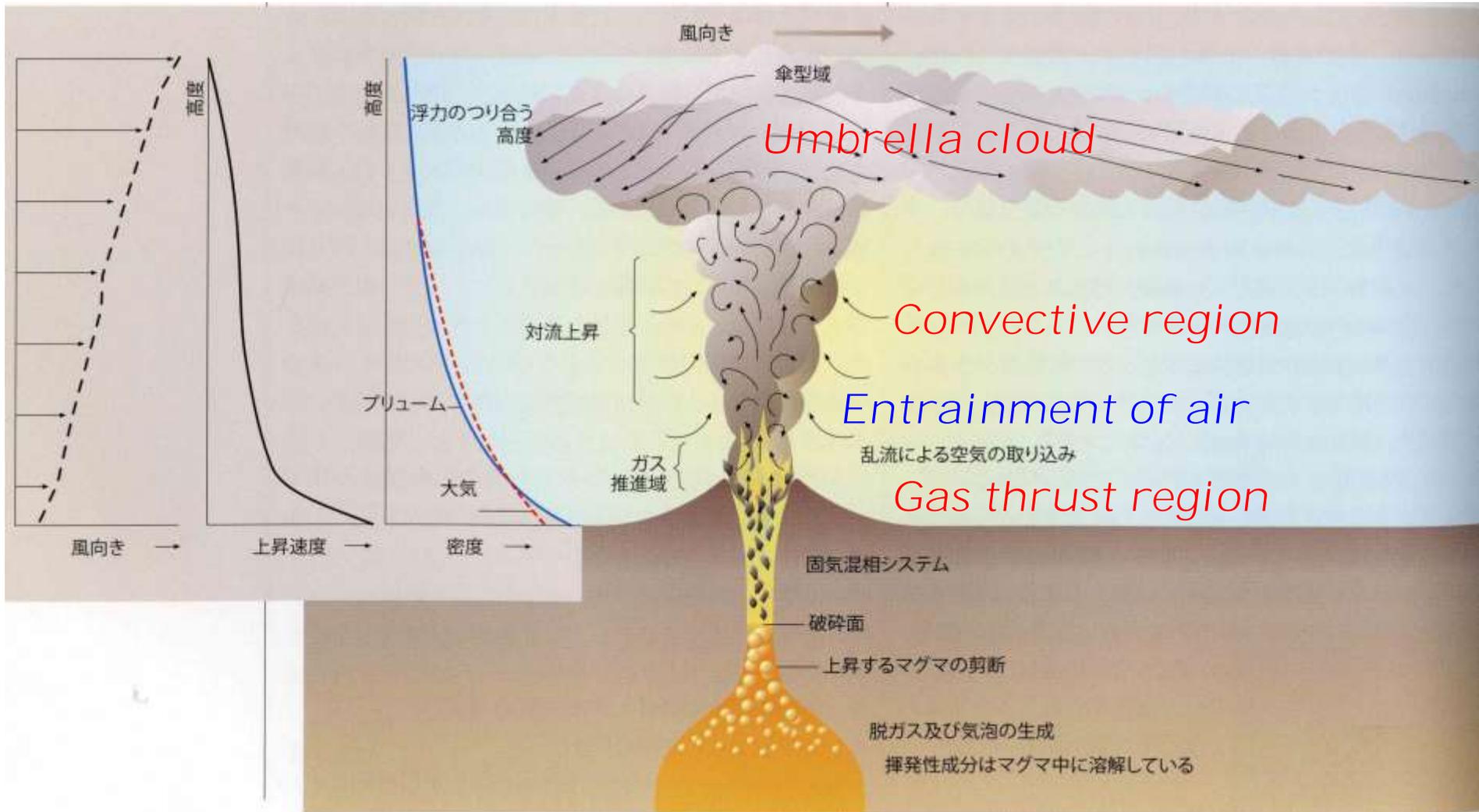
# Pure phase sound speed



# Mixture sound speed



# Dynamics of Plinian eruption



# Eruption column dynamics

$$Ht \propto Q^{1/4}$$

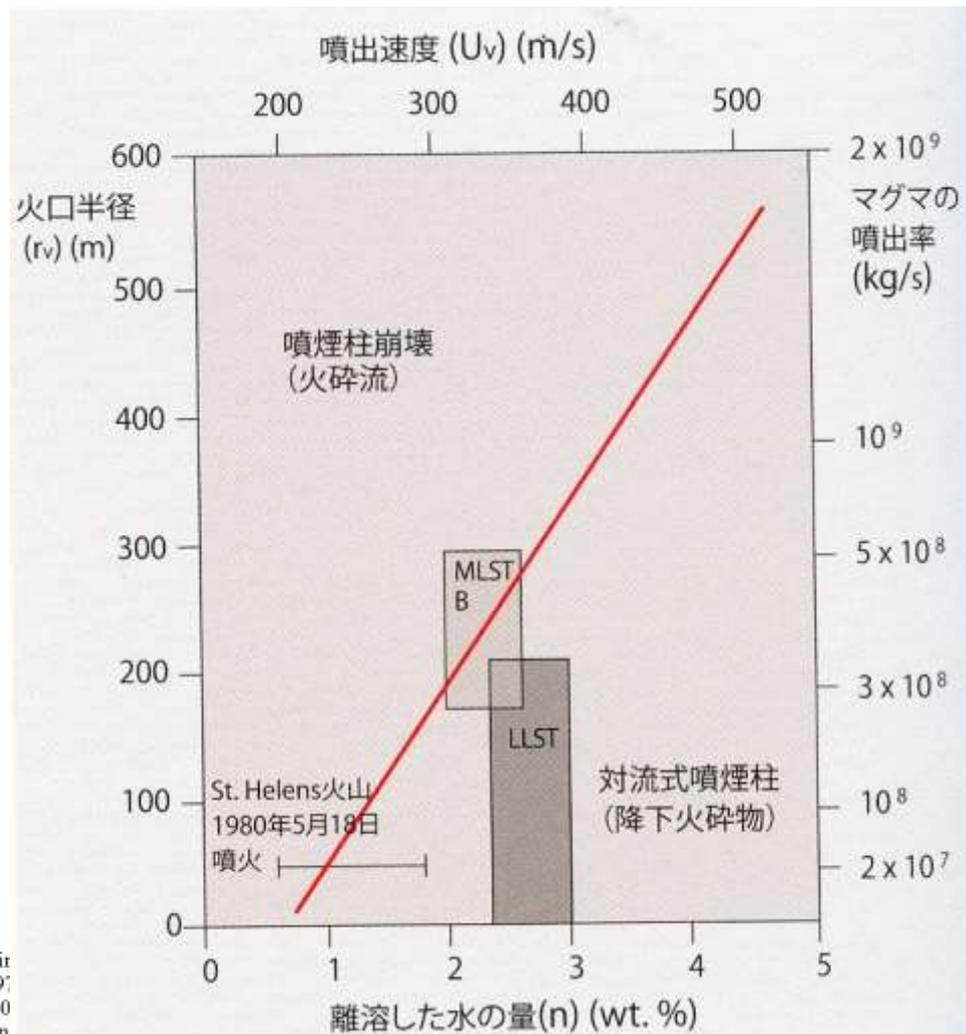
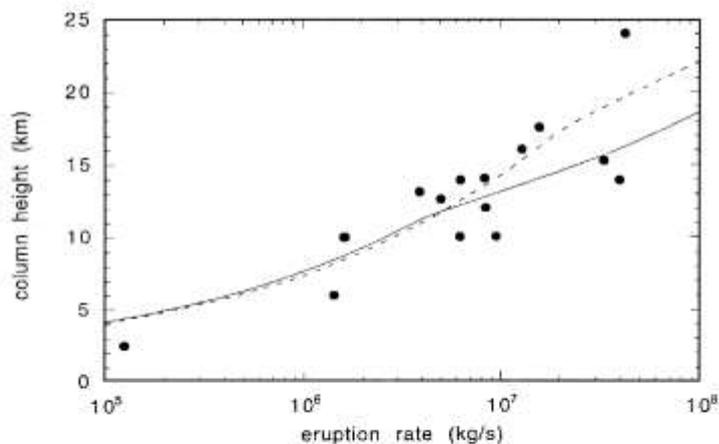
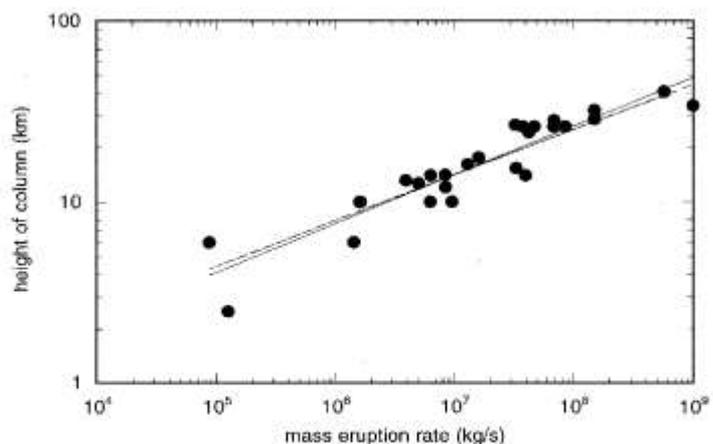
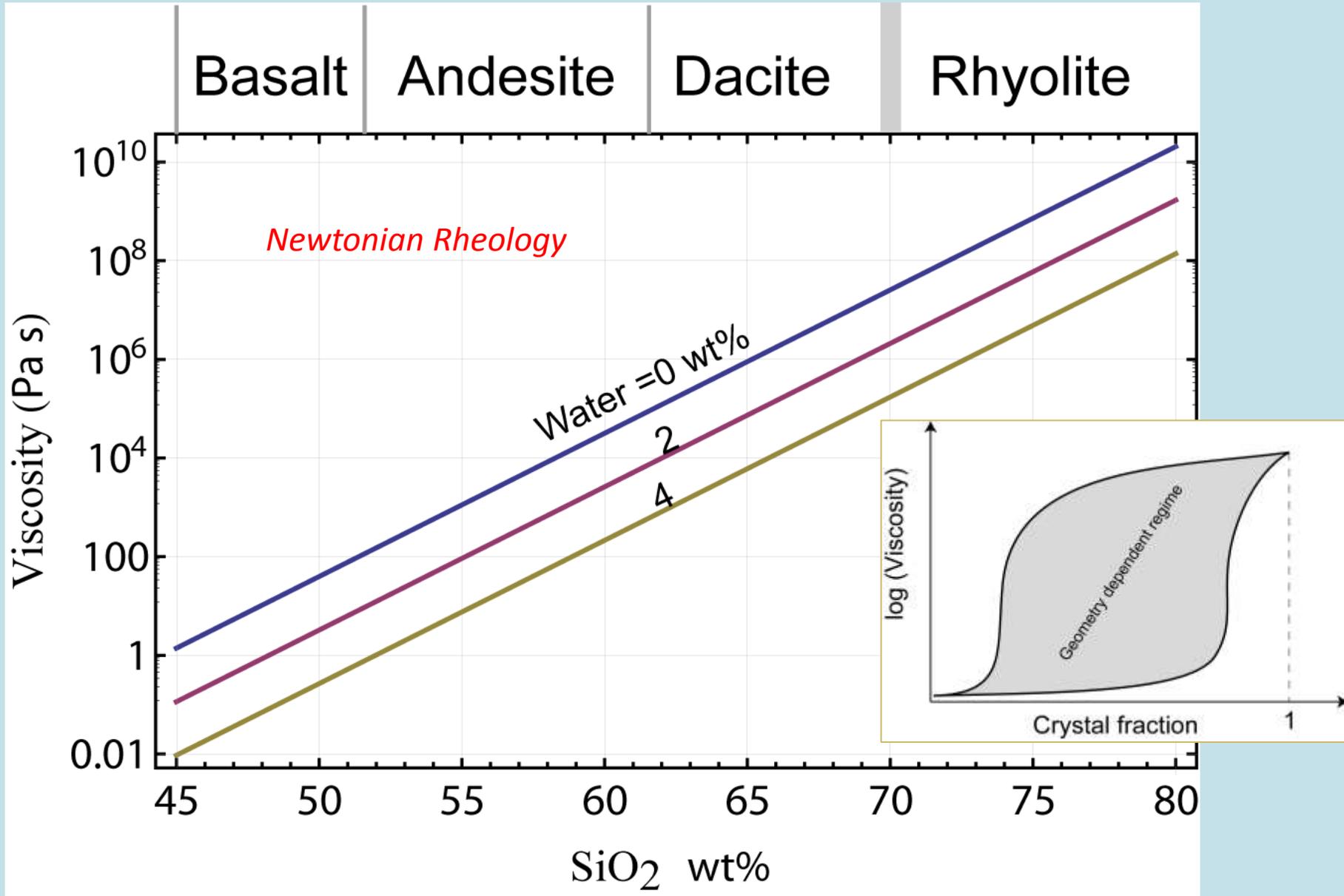


Fig. 9. (a) Eruption column height as a function of eruption rate ( $\text{kg s}^{-1}$ ) for 24 historical eruptions if independent estimates for eruption rate and column height are available (Settle 1978; Wilson *et al.* 1978; Carey & Sigurdsson 1989; Sparks *et al.* 1997). The dashed curve represents the model prediction  $H = 0.19M^{0.569}$  of equation (1). The solid curve is the best-fit power law for the data,  $H = 0.19M^{0.569}$ . Variations in observations about this model may result from: (i) variations in latitude which change the stratification structure of the atmosphere and hence the effective value of  $N$  (Woods 1995); and (ii) uncertainties in the estimates of eruption rate owing to effects such as partial collapse. (b) Eruption column height predicted by the

# Rheology ... important, but



# Non-Newtonian rheology



## 割れた溶岩ドーム

周辺部の円状の曲線と

割れた平坦な面のコントラストに注目

⇒溶岩が二つの性質（流れる、割れる）  
を持っていることを示唆する

溶岩ドームが崩壊して発生した火砕流  
谷を下る先端部と、背後に上空に浮き  
上がる灰神楽に注意

⇒このような噴火の堆積物はどのよう  
になると想像できるか？

⇒島原で実際に観察

# Volcano types

- Stratovolcano 成層火山
  - 溶岩(lava)と火砕物(pyroclast)が(繰り返し噴出して)層を成した火山: 富士山、桜島、伊豆大島
  - ~100 yrs, ~1 km<sup>3</sup>, Effusive/Explosive, Andesite, Island arc
- Caldera カルデラ
  - 大量のマグマを一気に噴出したために生じた地下の空洞が陥没: 阿寒、洞爺、十和田、阿蘇、始良
  - ~10000 yrs, ~10<sup>2</sup><10<sup>3</sup> km<sup>3</sup>, Explosive, Dacite-Rhyolite, Island arc
- Shield volcano 楯状火山
  - 粘性の低い溶岩流が作る火山: ハワイ
  - ~1 yrs, 0.01 km<sup>3</sup>/day, Effusive, Basalt, Hot spot
- Lava dome 溶岩ドーム
  - 粘性の高い溶岩がほとんど流れることなく盛り上がる: 昭和新山、平成新山
  - subsidial with stratovolcanoes
- Flood basalt 溶岩原
  - 大量の溶岩流が一気に噴出する: Columbia River Basalt, Decan Basalt
  - ~10-100 Ma, 10<sup>3</sup> km<sup>3</sup>/day from fissure, Effusive, Basalt, Continent with hot spots

# Stratovolcanoes

- Sakurajima
  1. Historic eruptions : Plinian⇒Lava flow
  2. Current eruptions: Vulcanian
- Kirishima Shinmoedake 2011  
Plinian⇒ Vulcanian + Lava flow
- Pinatubo 1991  
Plinian
- Izu-Oshima 1980
  - A) Hawaiian⇒Strombolian⇒Lava flow
  - B) Plinian+Strombolian

# 桜島



56 キロメートル

Image © 2010 DigitalGlobe  
© 2010 Cnes/Spot Image

Data © 2010 MIRC/JHA

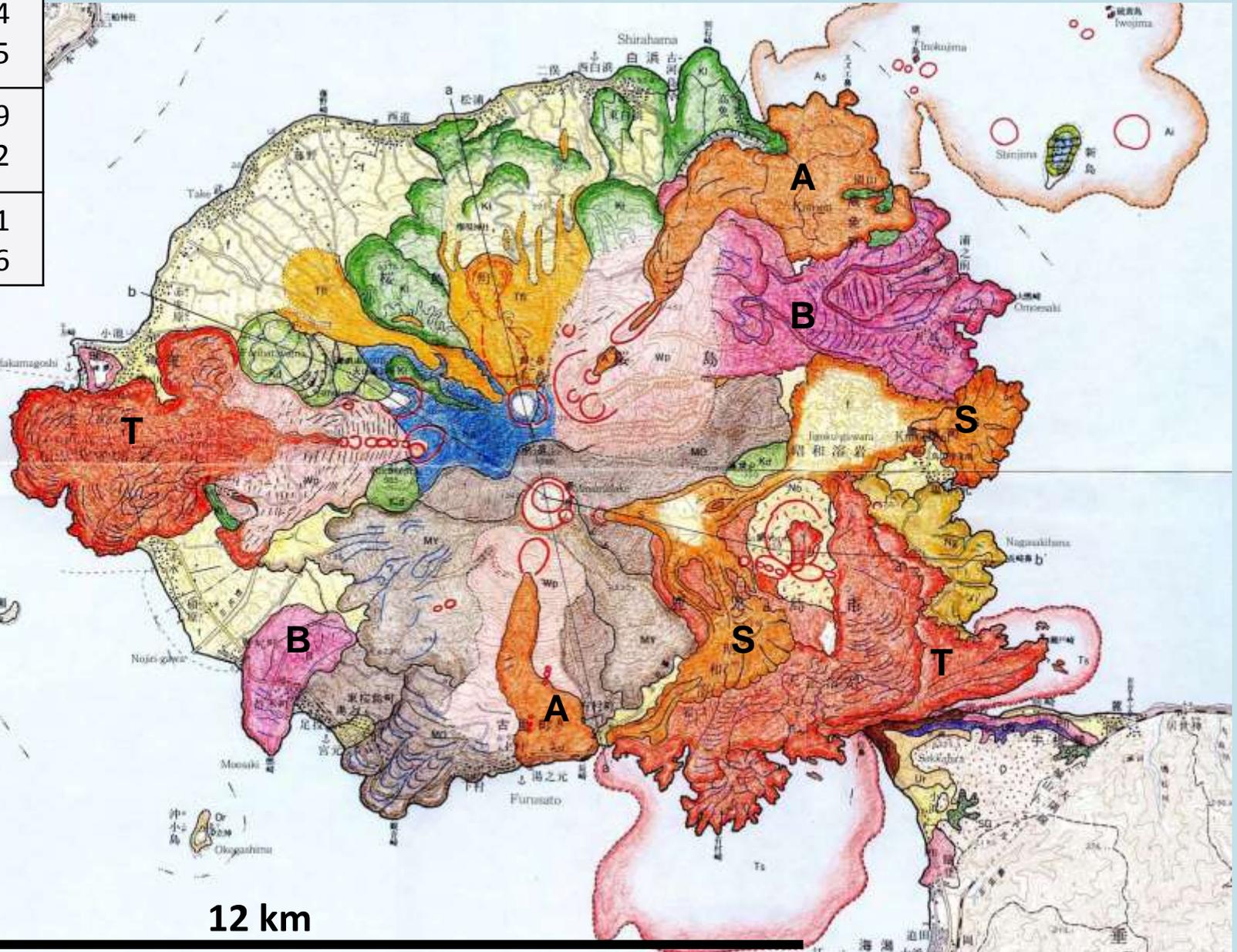
31° 39'05.38" N 130° 40'44.25" E 標高 0メートル

©2009 Google™

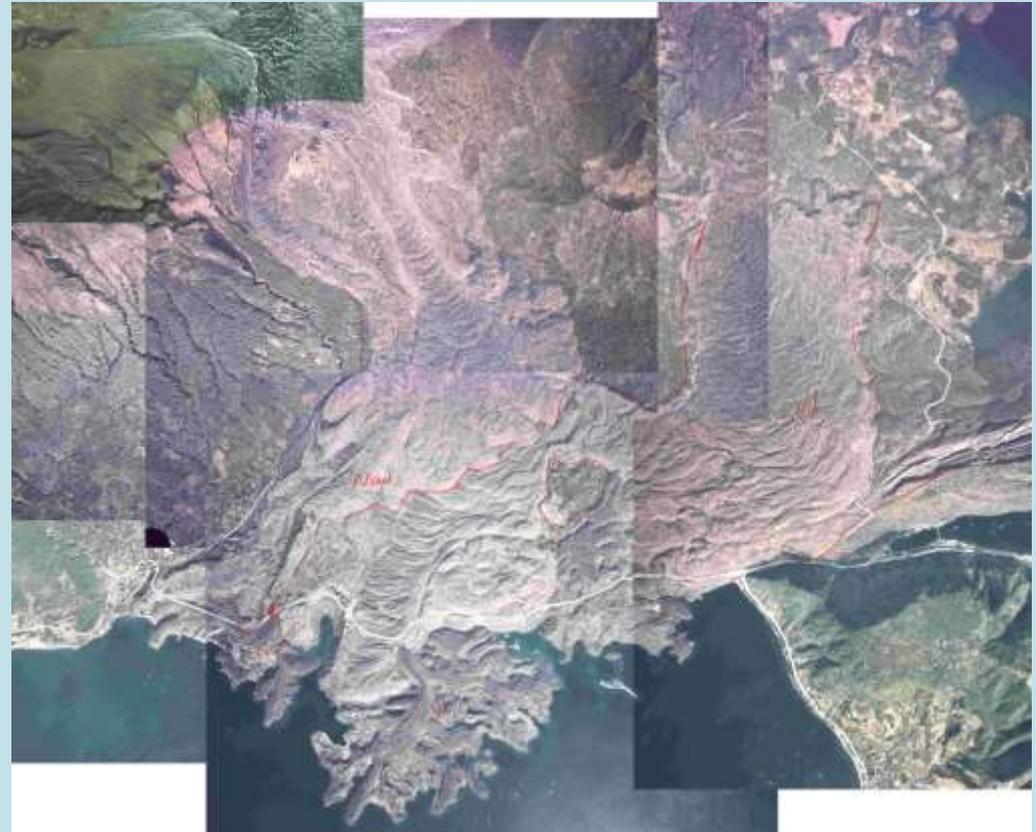
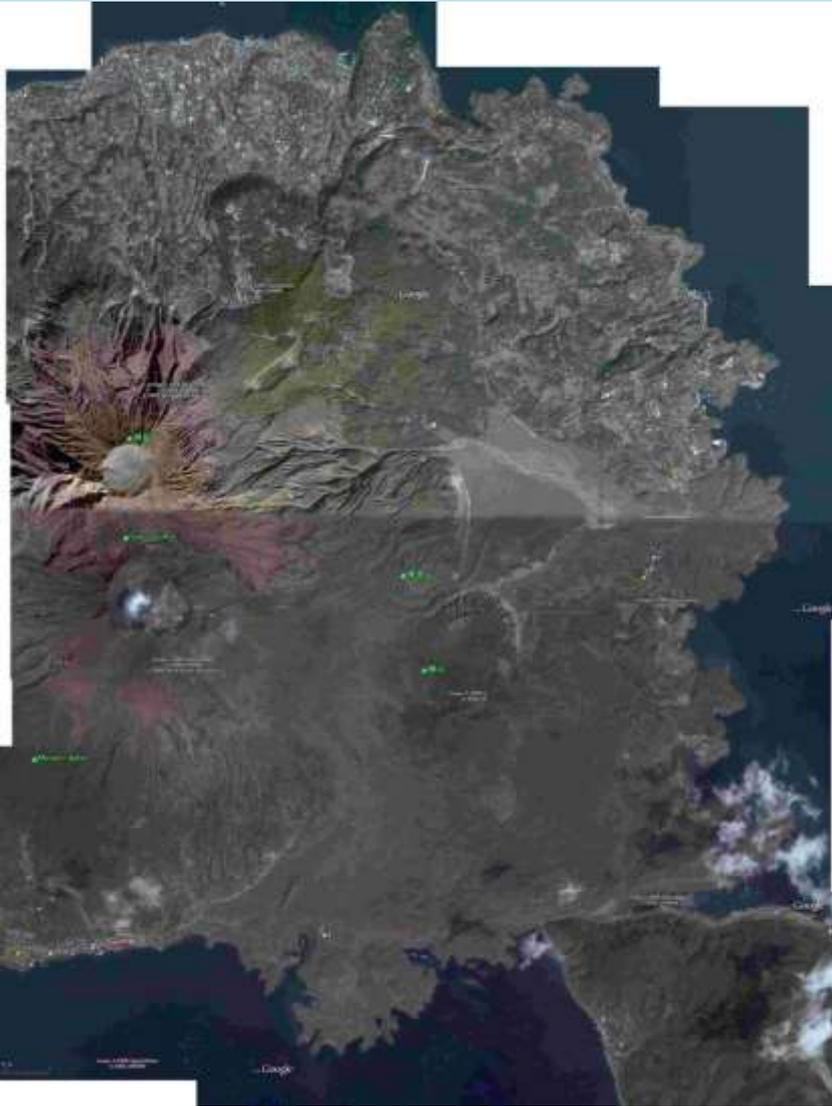
高度 193.36 キロメートル

# 桜島の地質図(小林)

昭和 S	1946
大正 T	1914 ~15
安永 A	1779 ~82
文明 B	1471 ~76



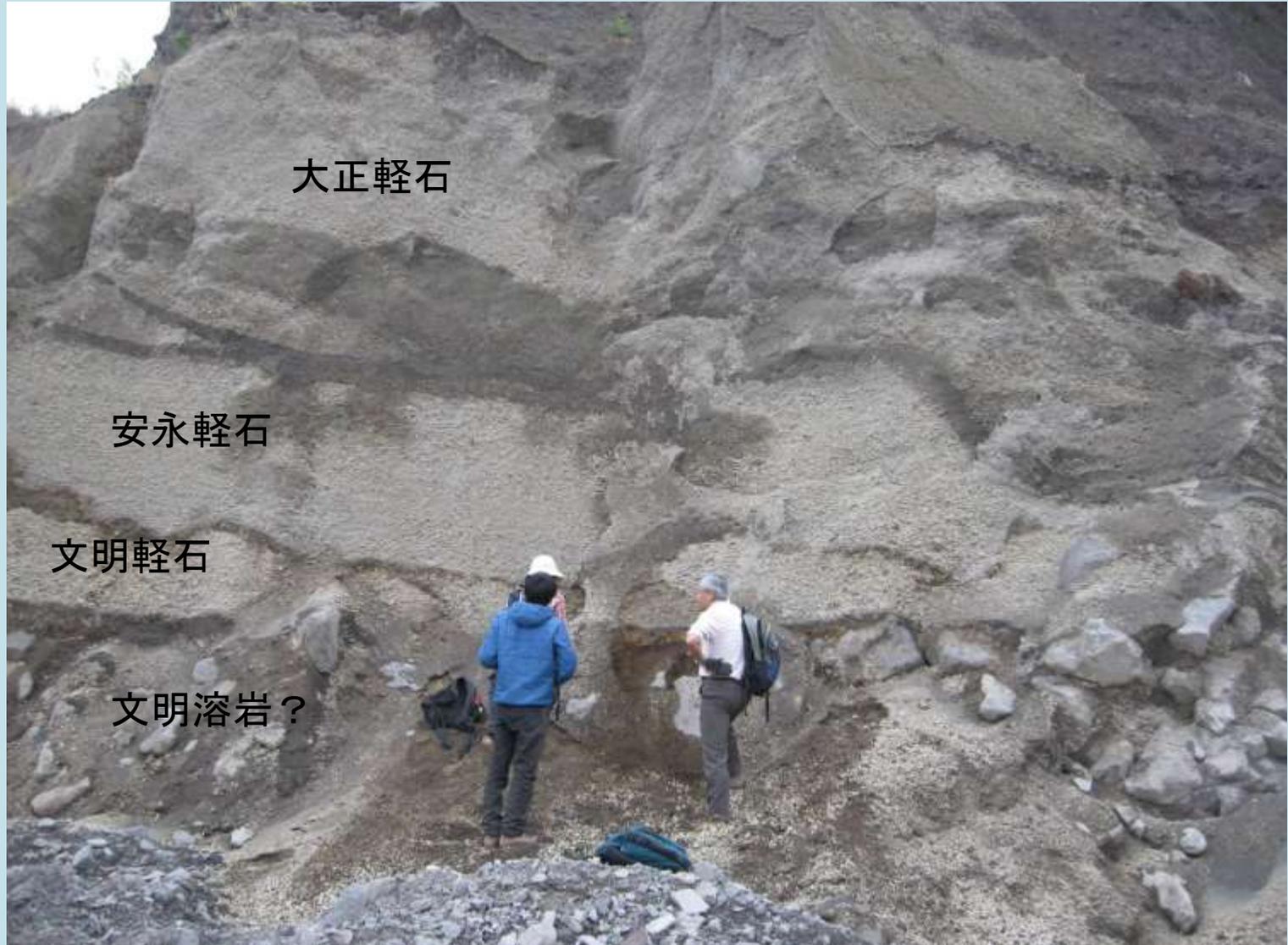
# 桜島



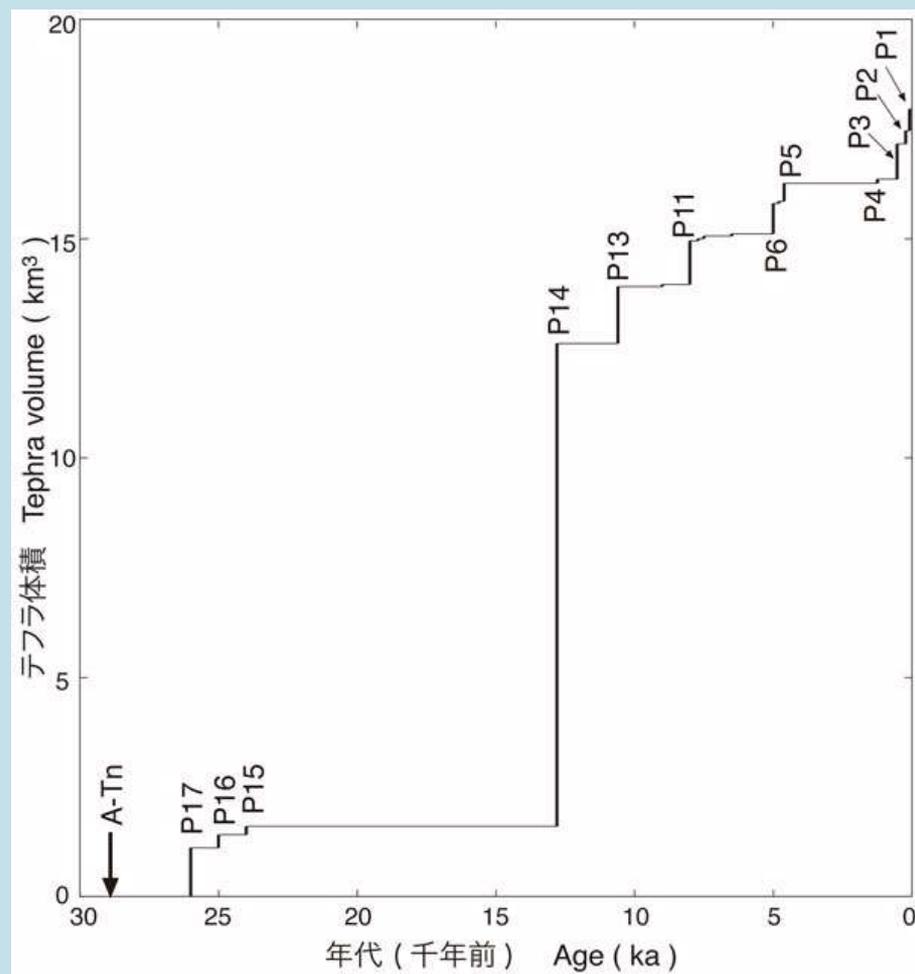
# 桜島溶岩:andesite(安山岩)



# 桜島東部での層構造

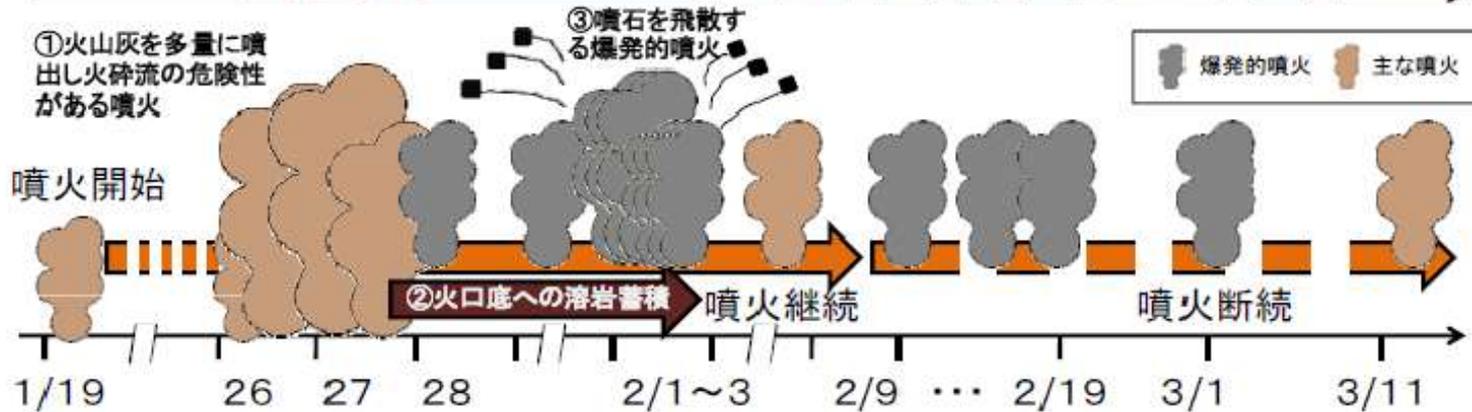
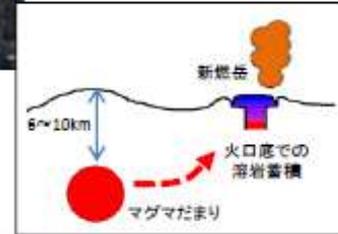


噴火	火砕物量 DRE(km <sup>3</sup> )	総量 DRE(km <sup>3</sup> )	Explosivity
昭和 (1946)	0	0.18	0
大正 (1914~15)	0.25	1.5	0.16
安永 (1779~82)	0.15	2.0	0.075
文明 (1471~76)	0.4	0.8	0.5



# 2011年新燃岳噴火活動経過(1月19日~3月21日)

気象庁作成  
「火山活動解説資料」より



26日15時~  
27日夜中~  
**準プリニー式噴火**

27日15時以降

**ブルカノ式噴火**

空振

噴煙柱高度

2500m以上

500-2000m

# ピナツボ火山

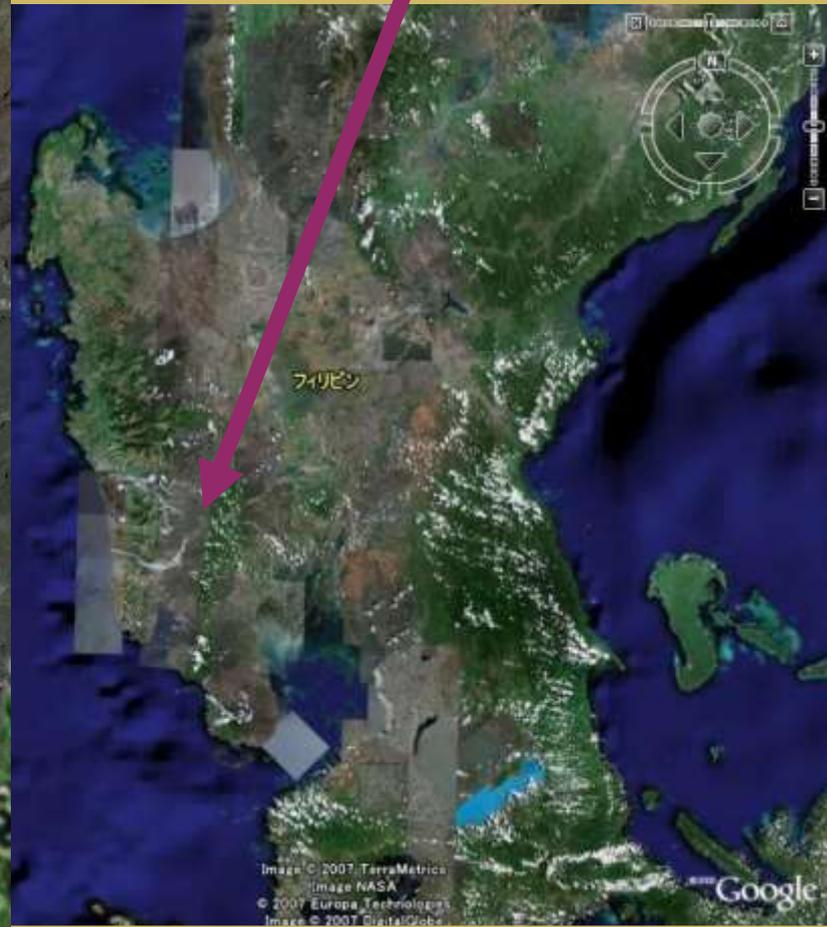


Image © 2007 TerraMetrics  
Image NASA  
© 2007 Europa Technologies

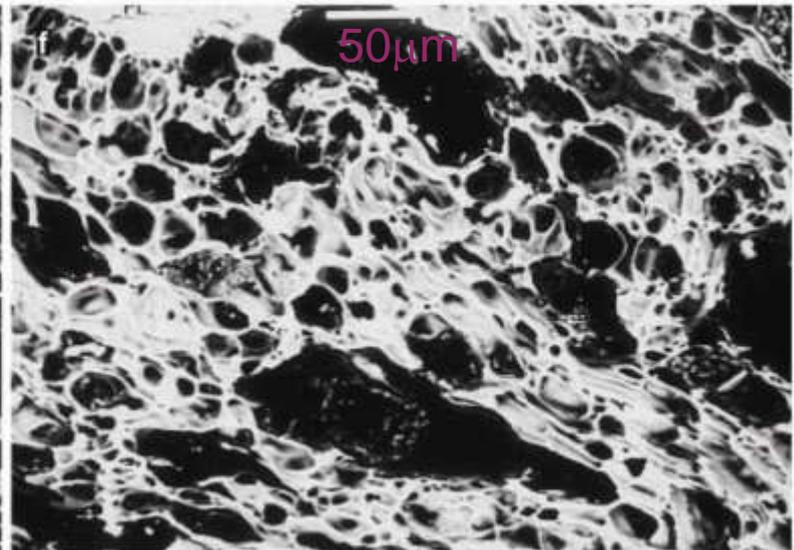
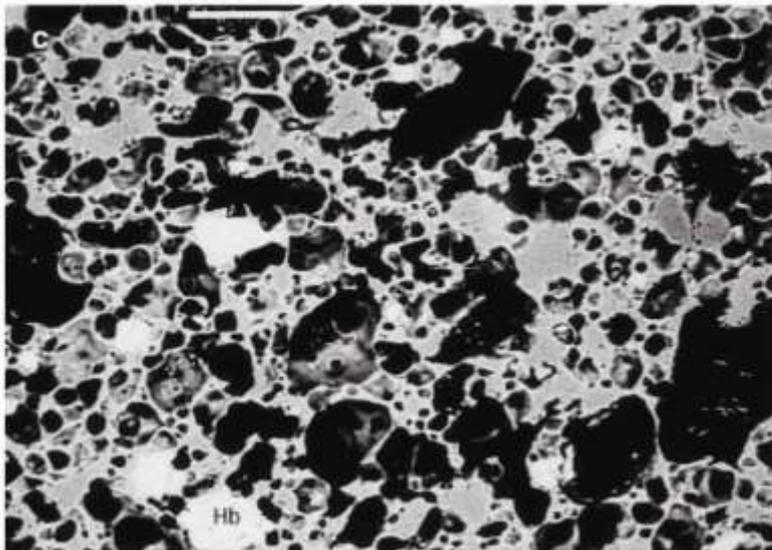
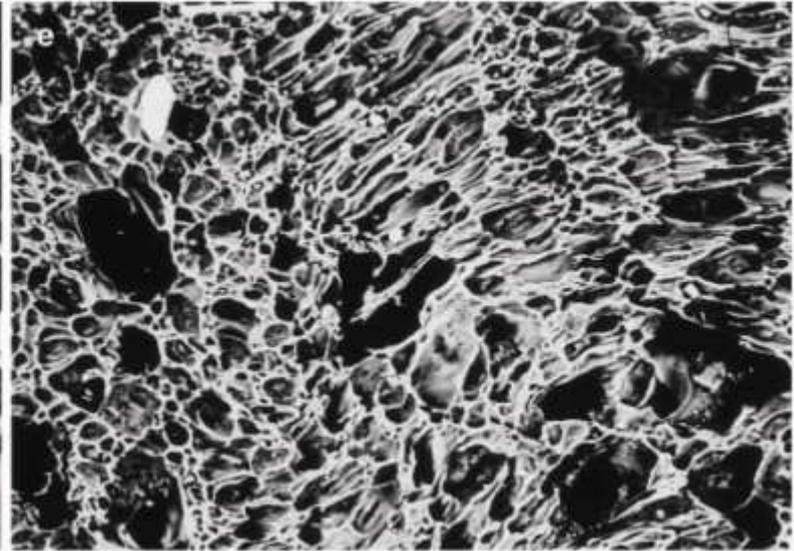
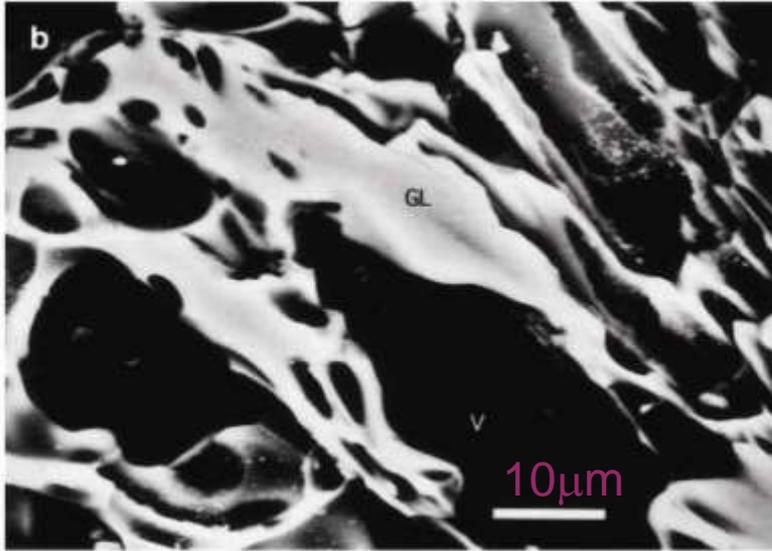
© 2007  
Google

# Pinatubo91



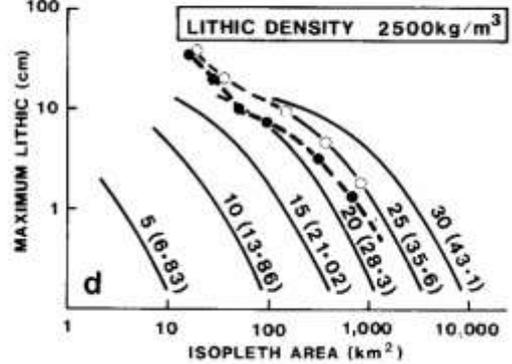
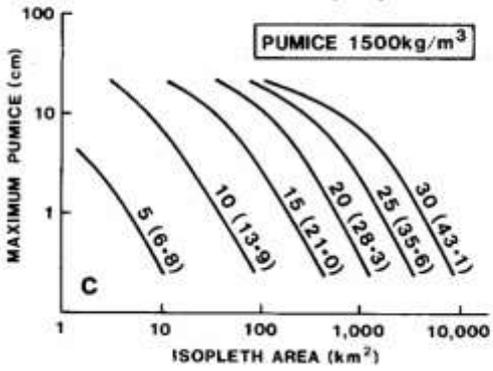
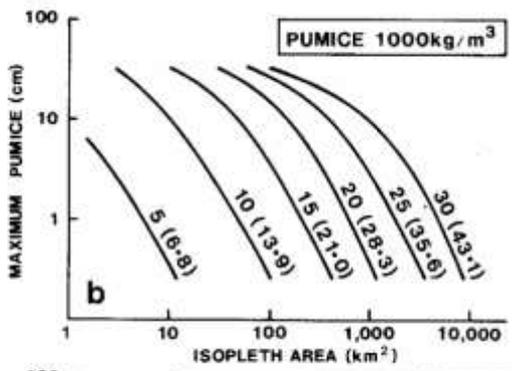
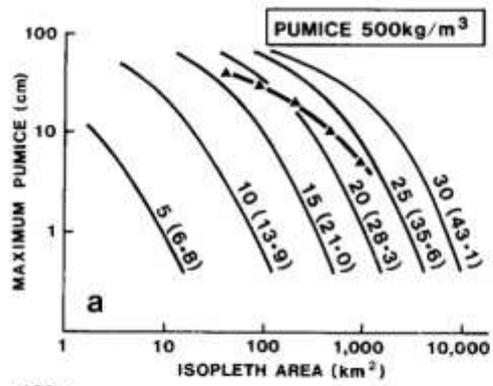
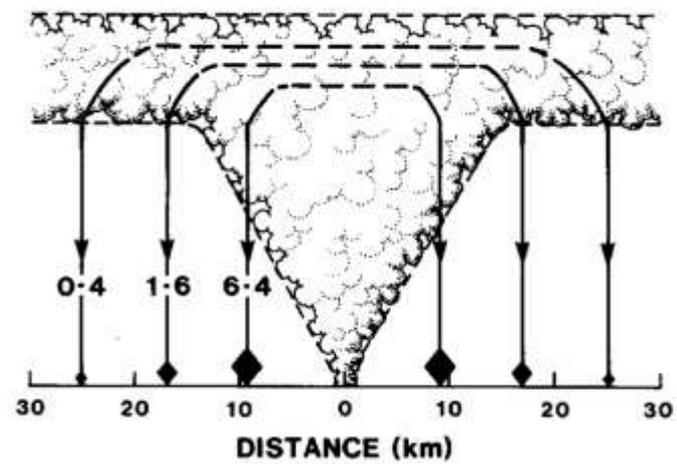
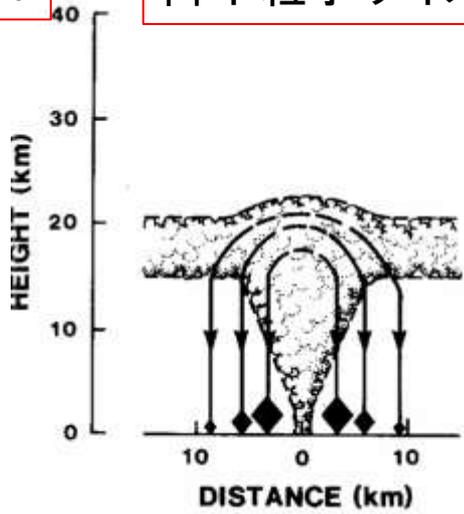
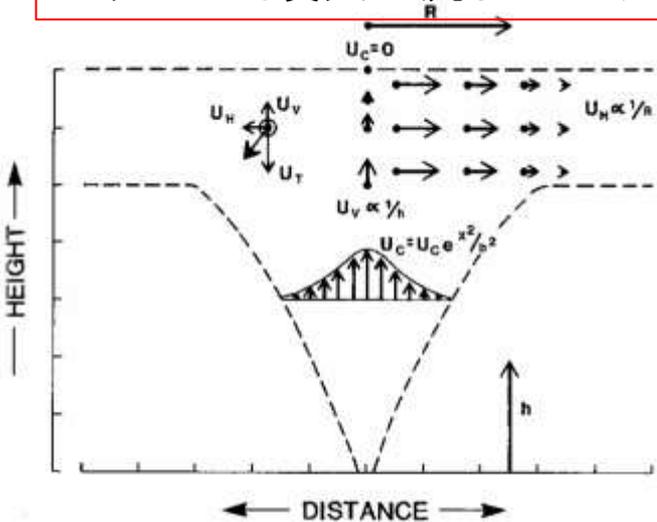
# ピナツボ噴火の軽石の内部

(Polacci 2001)



# プリニー式噴火の流れのモデル図

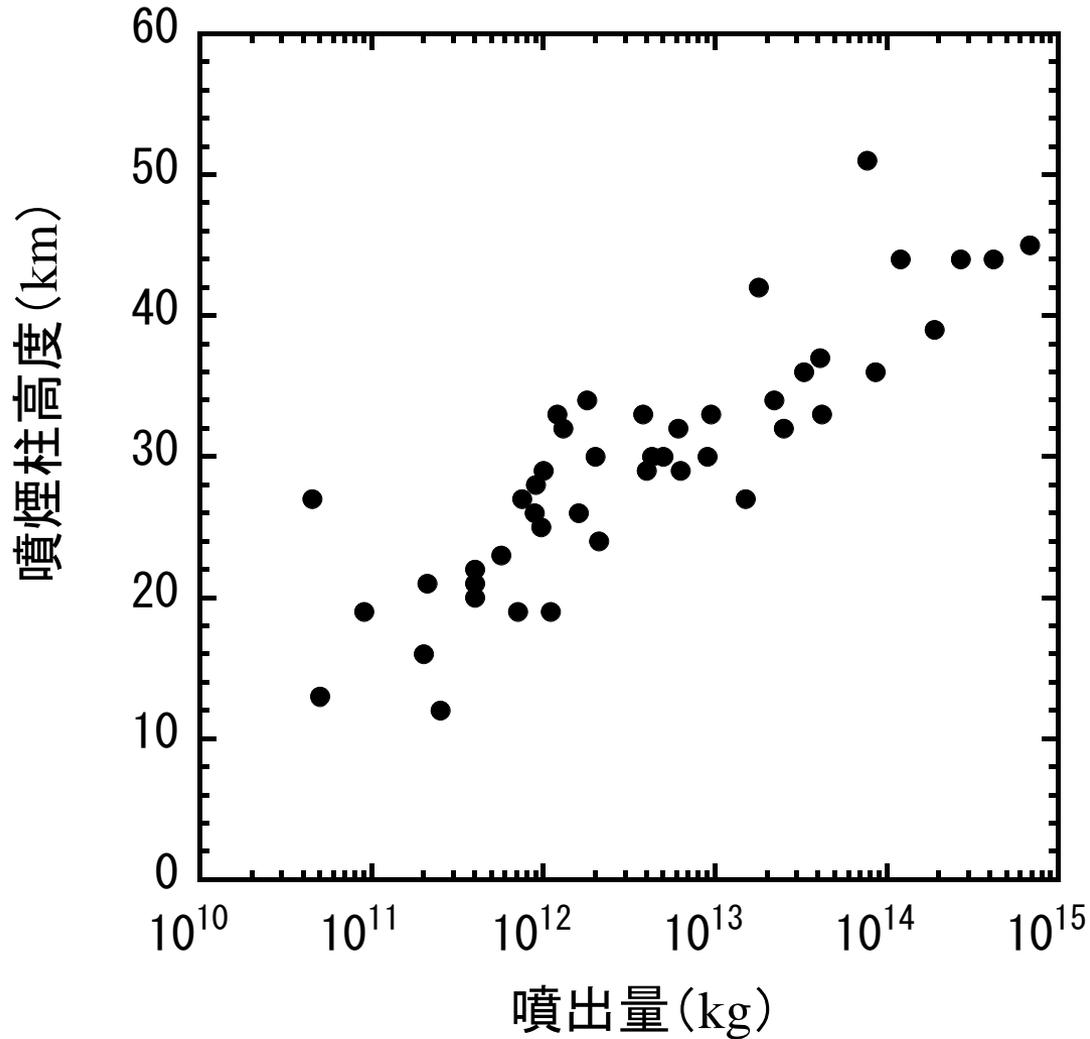
# 降下粒子サイズと噴煙柱高度の関係の模式図



給源からの距離と粒子サイズの関係  
(Isopleth area: 給源からの距離の目安)

1. 遠くなるほど粒子サイズは小さくなる。
2. 噴煙柱高度が高いほど、大きいサイズが遠くまで飛ぶ。

# Plinian噴火におけるマグマの量と噴火の強度の関係



(Carey and Sigurdsson, 1989)



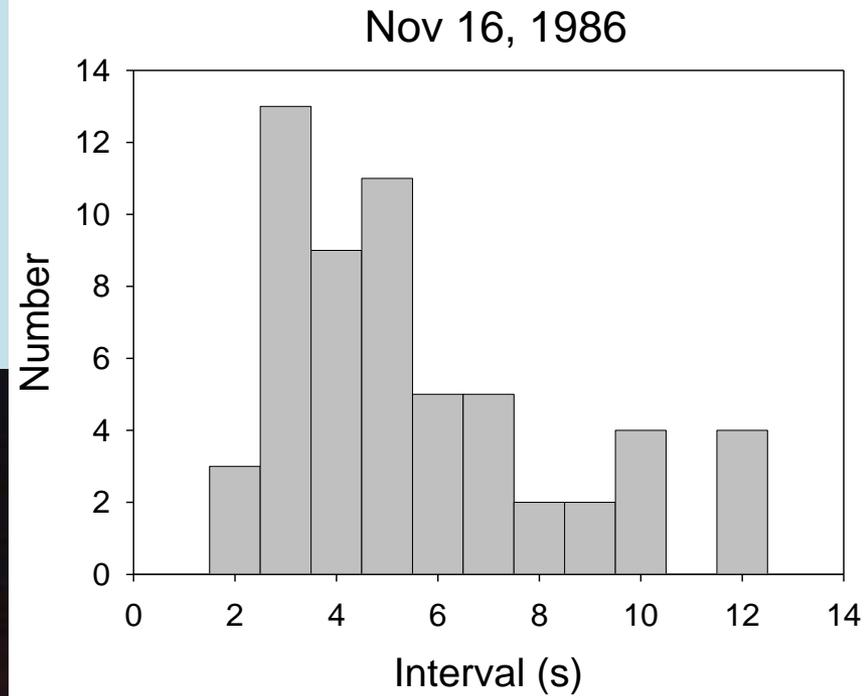
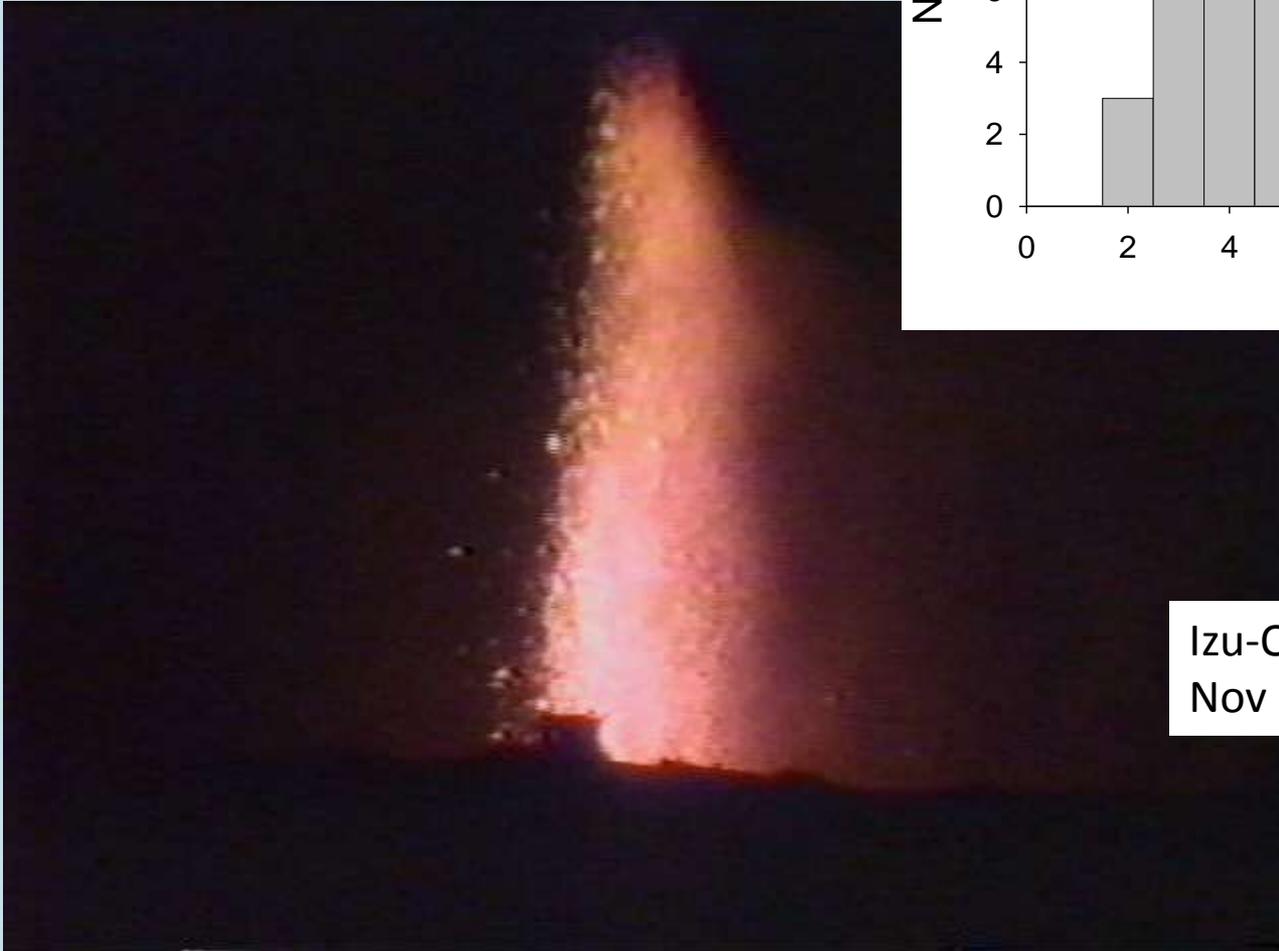
伊豆大島航空写真  
Areal phot of Izu-  
Oshima island

# 伊豆大島86A1

## Izu-Oshima 86A eruption

溶岩噴泉: ハワイ式ーストロンボリ式

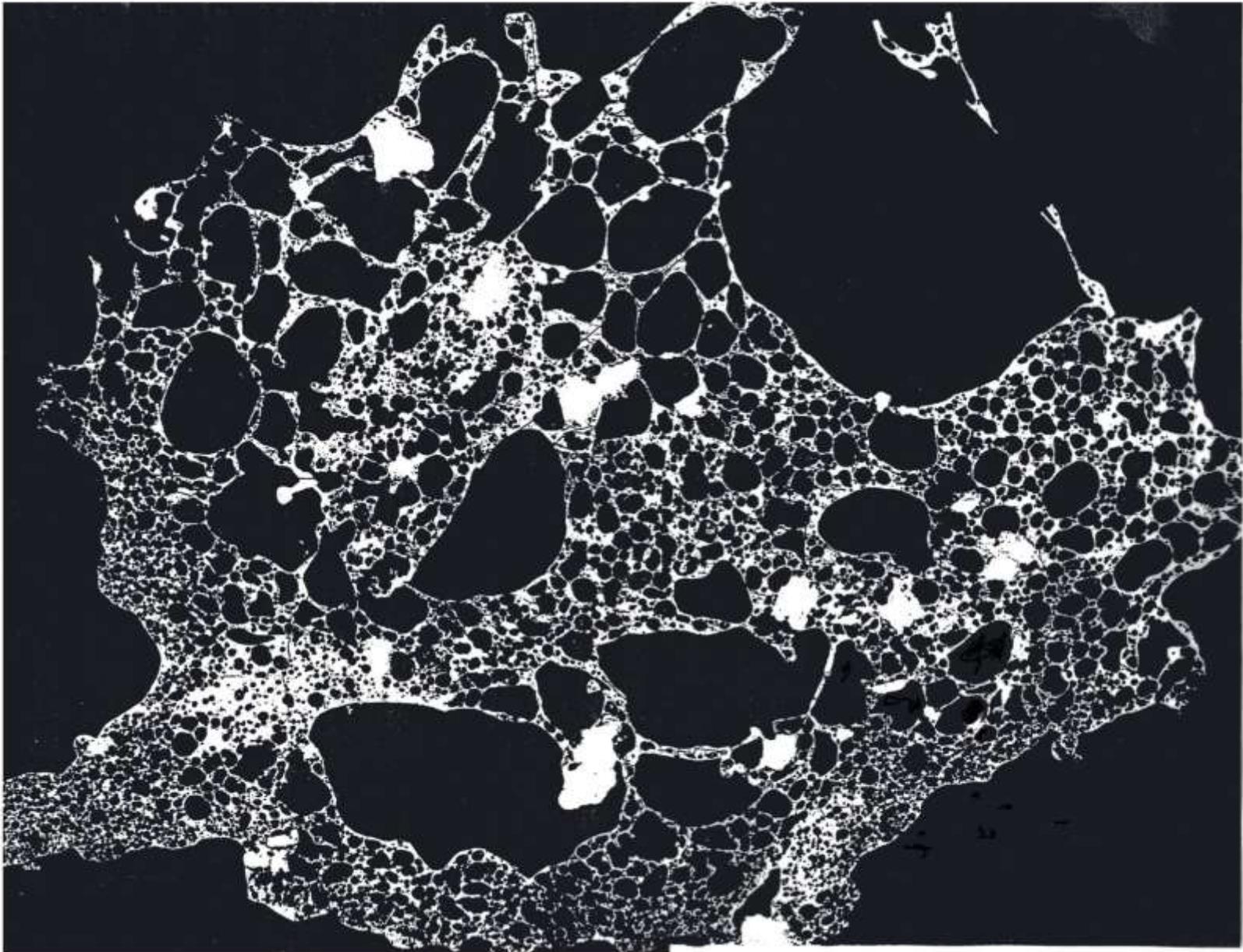
fire fountain: Hawaiian - Strombolian type



Izu-Oshima 1986 eruption  
Nov 15 - Dec 18, 1986

BSI (Back scatter electron image) of scoria erupted by fire fountain eruption

伊豆大島 1986 年 A 火口噴火（溶岩噴泉）スコリア反射電子像写真

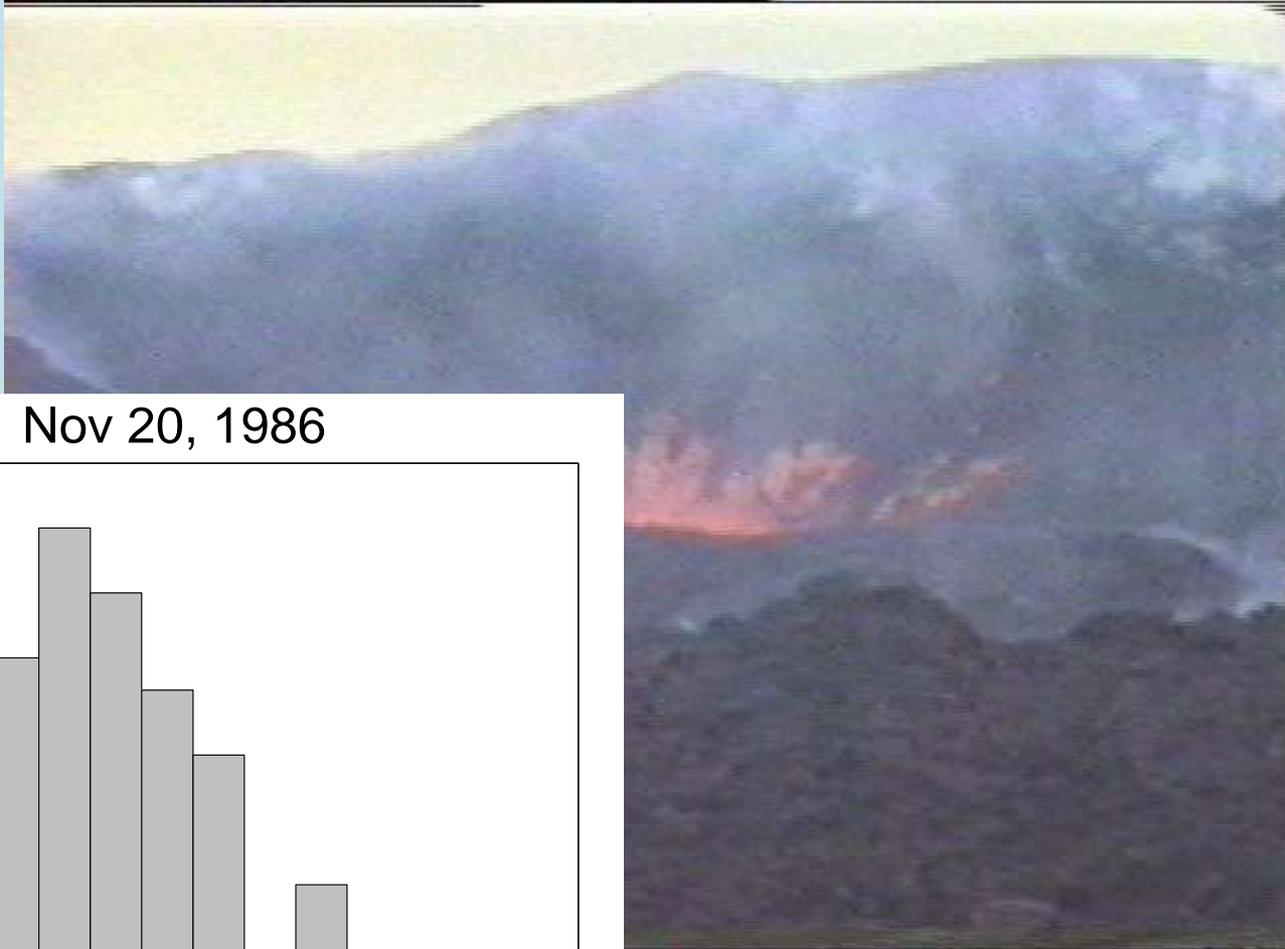


Points  
1.size  
2.number  
3.fraction

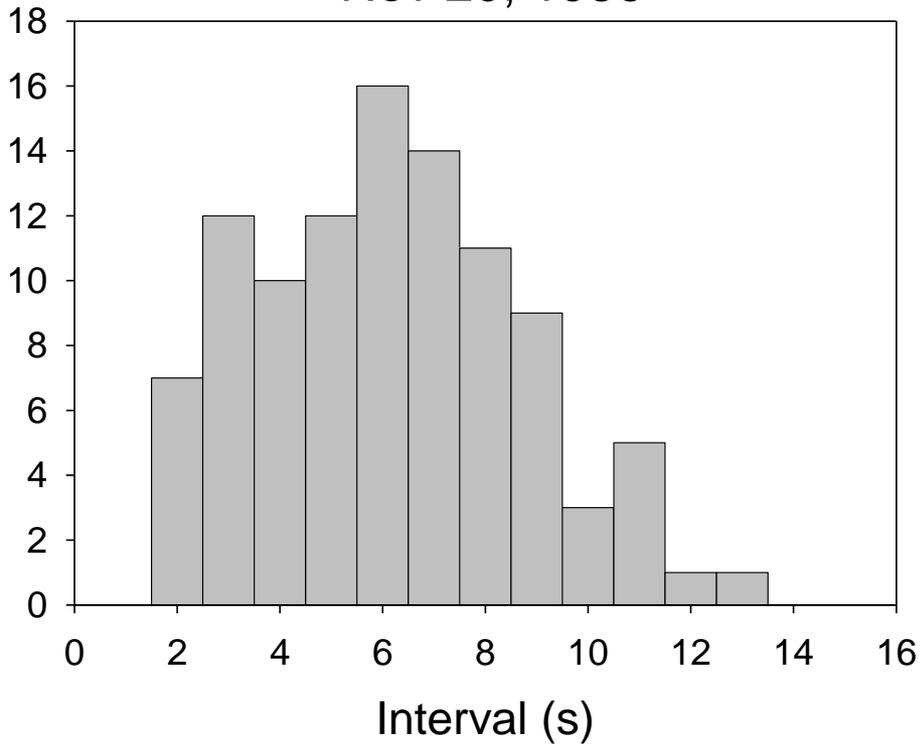
1cm

# 伊豆大島86A2

## Izu-Oshima 86A2 eruption



Nov 20, 1986



# 伊豆大島86年B噴火



# 伊豆大島86B1



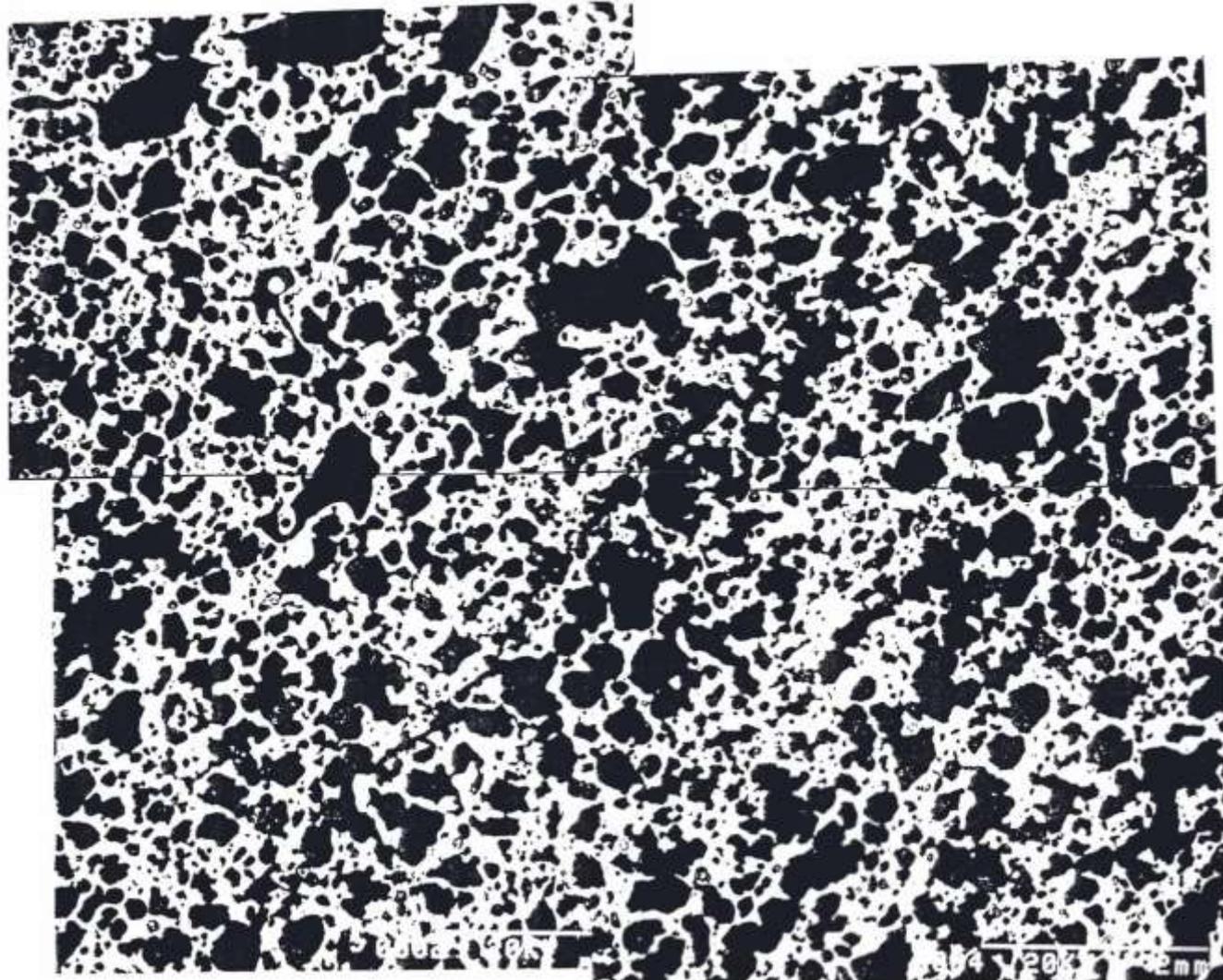


B火口：  
準プリニー式噴  
火による火口



Scoria erupted by sub-plinian eruption 1986 B

伊豆大島 1986 年 B 火口噴火（プリニー式）スコリア



5mm

# 伊豆大島の噴火履歴

## Eruption history of Izu-Oshima



過去2000年

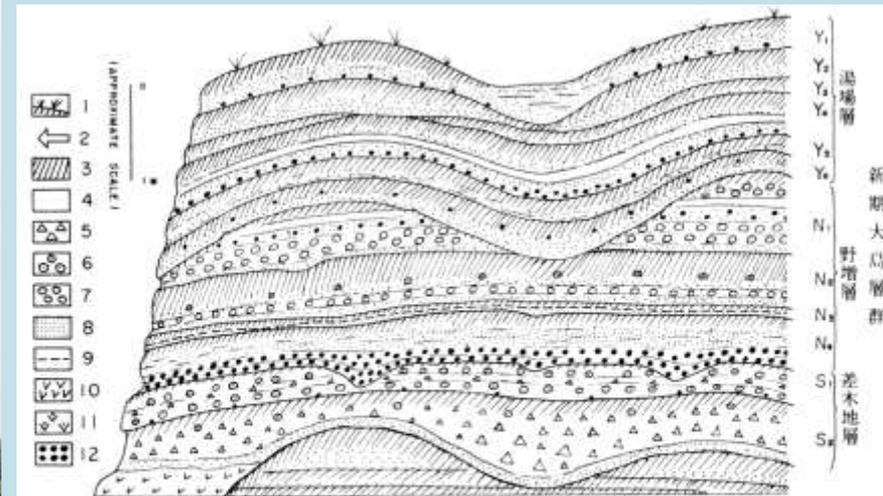


図 1.3 外輪山中腹における新期大島層群の模式的なスケッチ。

1：現在の地表、2：土器の出土層準、3：風化火山灰あるいは土壌、4：細粒火山灰、5：凝灰角礫岩、6：火山豆石凝灰岩、7：円磨された石質火山礫、8：粗粒火山灰、9：流紋岩質火山灰、10：溶岩流、11：溶結スパター、12：降下スコリア。

伊豆大島の東側の環状道路沿いの大露頭

中村一明による過去2000  
年の噴火のテフラ露頭のスケッチ

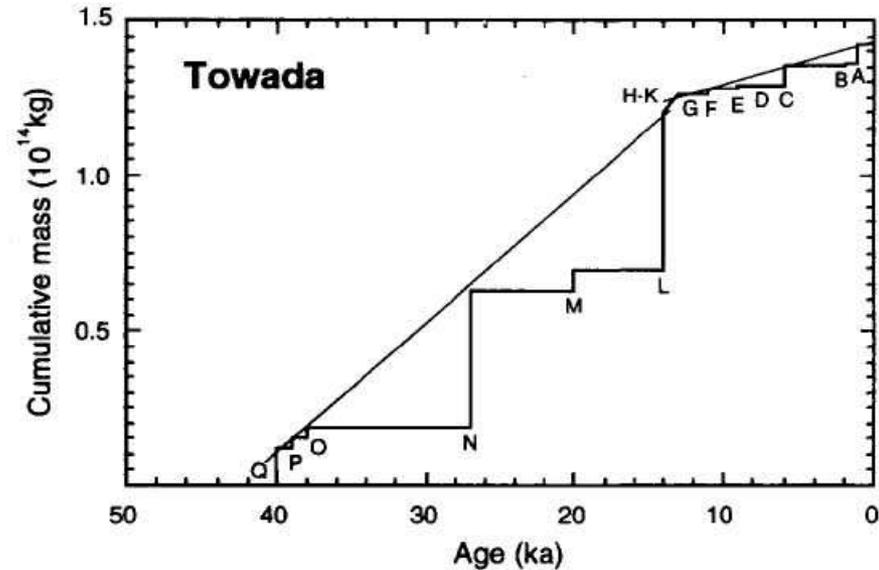
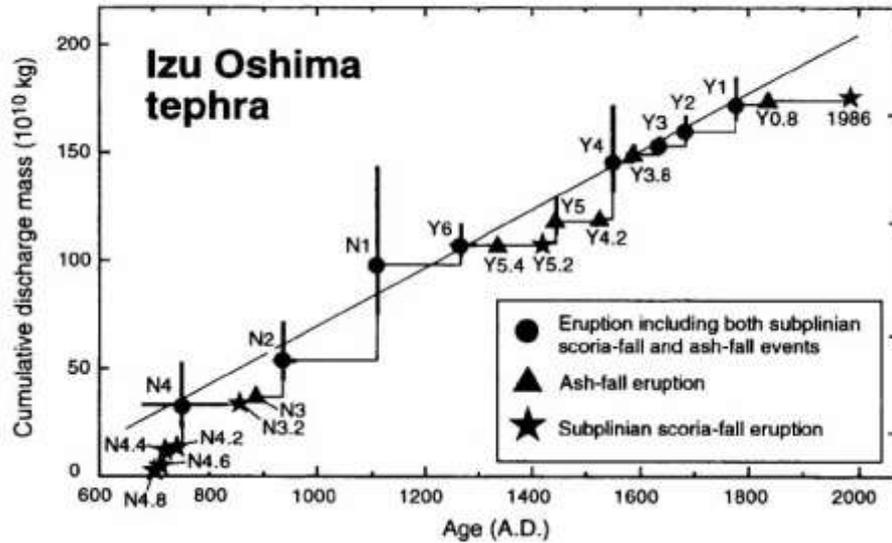


Fig. 3B. Cumulative changes in magma discharge from Towada Volcano, Japan, made from the data by Hayakawa (1985) and his unpublished data. Thin lines show volume-predictable lines for periods Q-L and L-A, respectively.

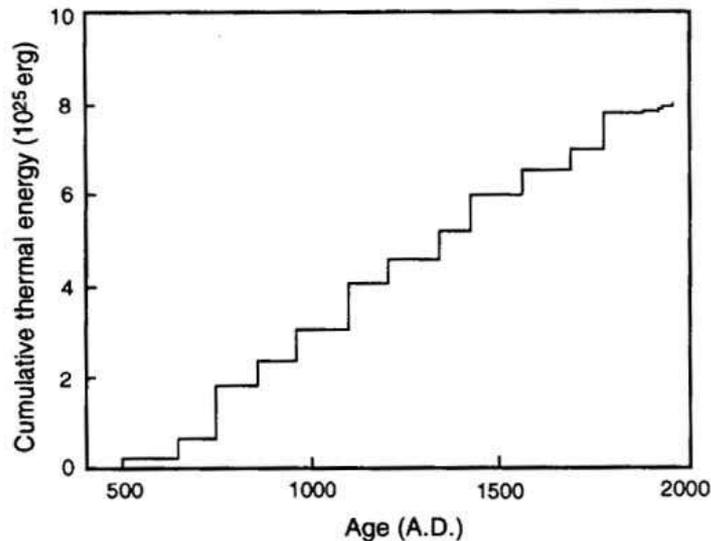


Fig. 1. Cumulative changes in magma discharge (shown as thermal energy) from Izu Oshima Volcano, Japan, for the last 1,400 years (after Nakamura, 1964).

# Fuji volcano

富士山ハザードマップ検討委員会

中間報告

DRE: Dense rock equivalent volume

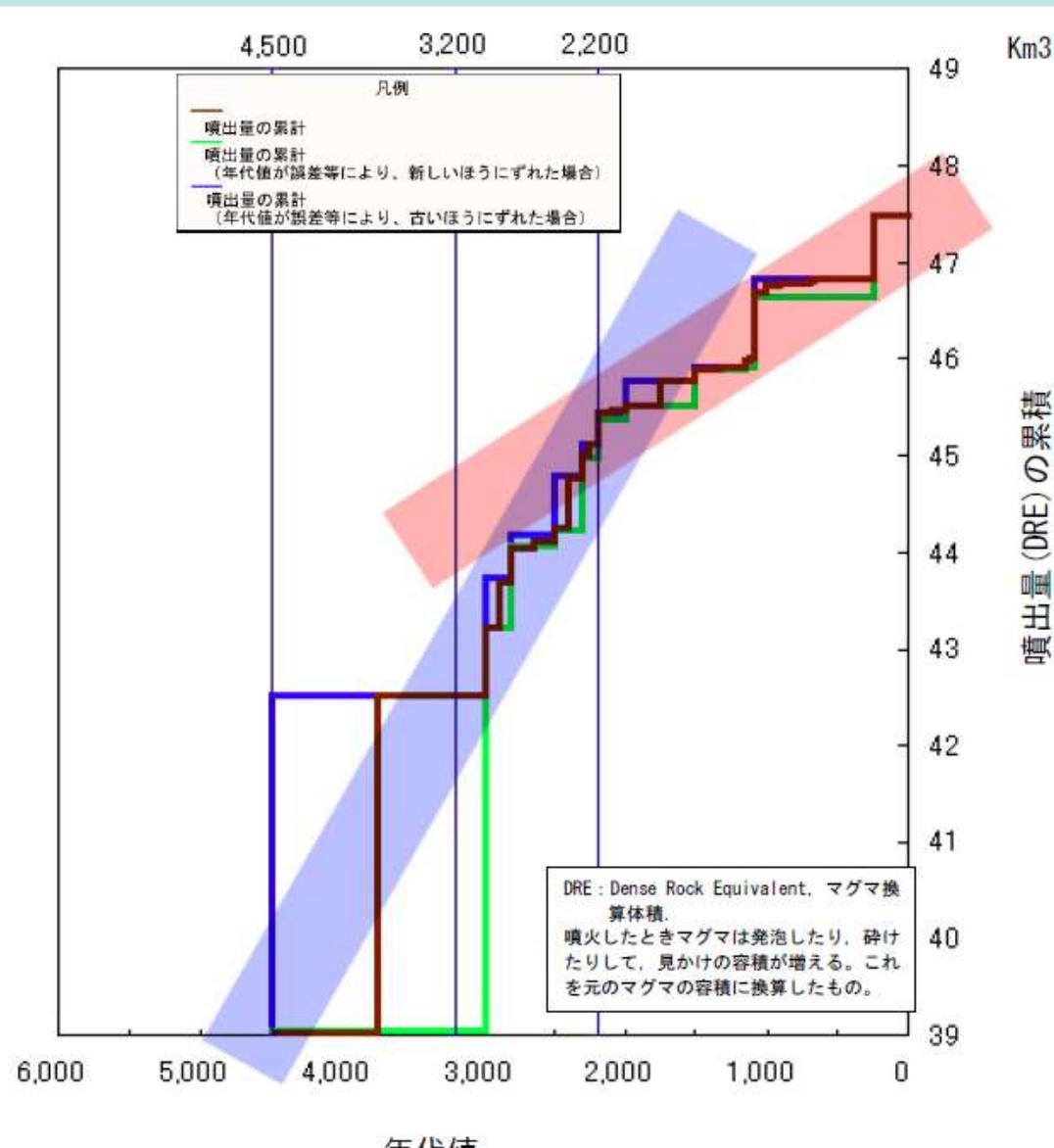


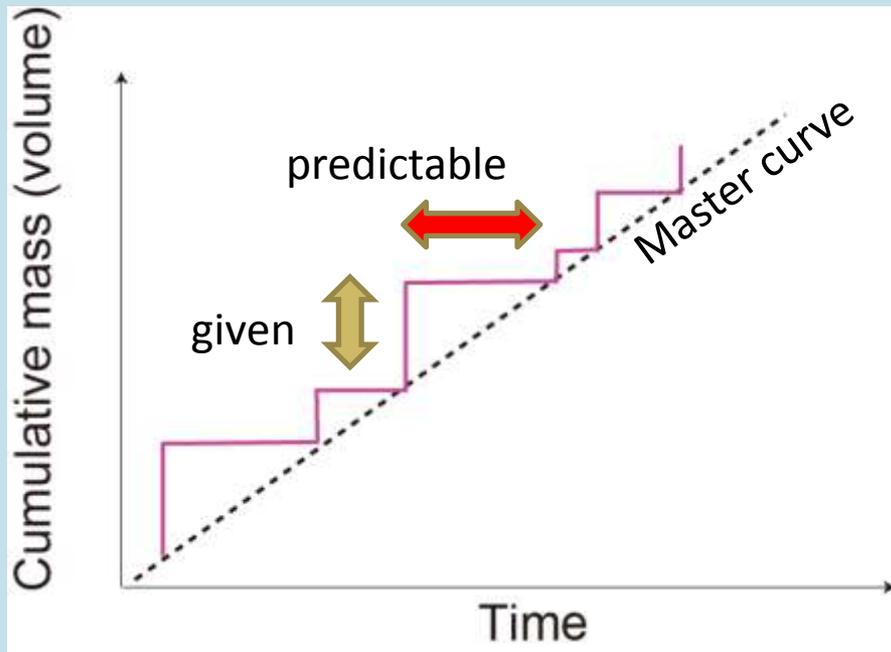
図7 約6,000年前からの富士山噴火による噴出量(DRE)の累積図

赤い帯は最近の平均的な噴出量の傾向

青い帯は約4,500年前から約2,200年前までの平均的な噴出量の傾向

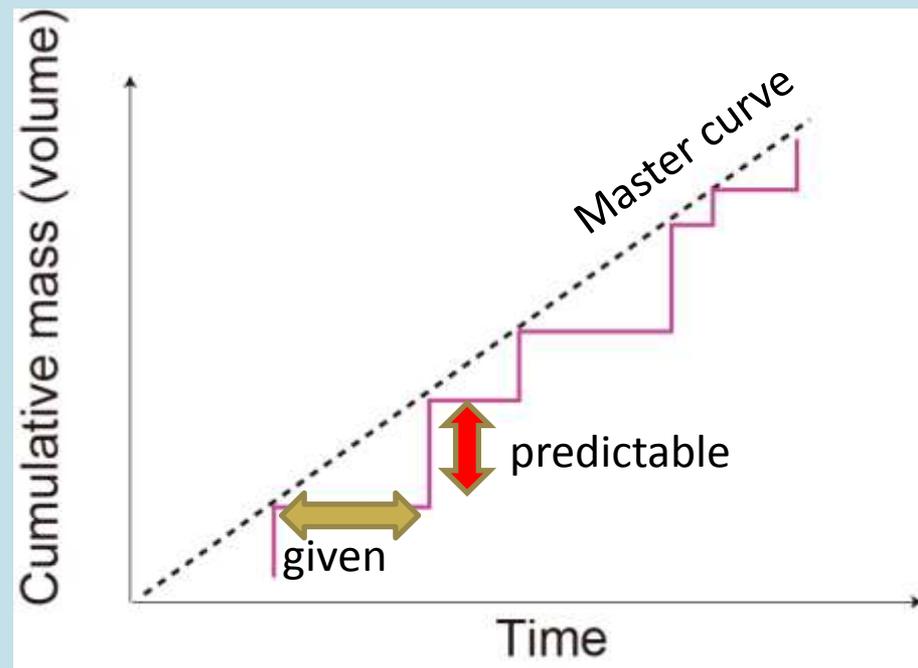
# Simplest predictable cases

## Time predictable case



ある噴火の噴出量がわかると次の噴火までの時間が予測できる  
Time to the next eruption is predictable when the mass of the last eruption is given.

## Mass predictable case



噴火時間がわかると噴出量が予測できる  
Mass of the next eruption is predictable if the time of the eruption is given.

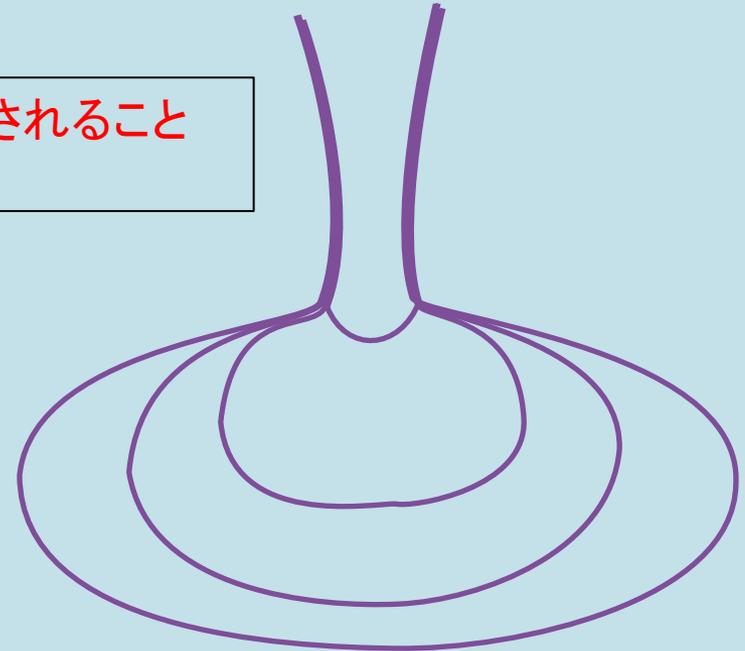
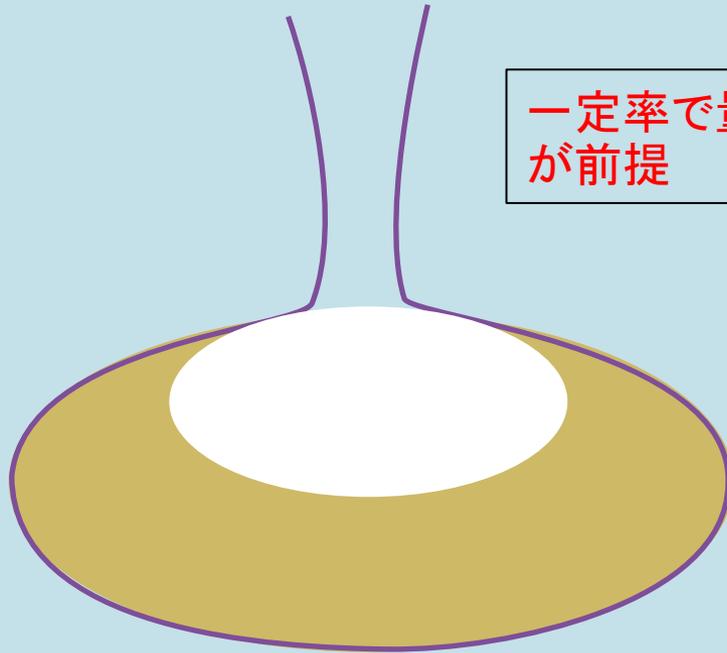
Master curve: 支配曲線

# Time predictable vs Mass predictable

Volume are fixed for the condition of eruption onset

Volume are variable for the condition of eruption onset

一定率で量が供給されることが前提



やかんのように容量が決まっている

風船のように容量が変化できる

熱容量(実験室)  
または  
質量(天然)

出た量だけ供給  
される

出るべきものは  
全て出る

過飽和領域  
または  
マグマだまりの大きさ

# Caldera

- Aira 始良カルデラ

(Precursory) Plinian Fall (Column collapse)

⇒ Pyroclastic flow + Co-ignimbrite ash (広域テフラ)

# 九州の巨大噴火とカルデラ

年代	噴火（広域火山灰）	体積 (km <sup>3</sup> )	カルデラ
7300年前	鬼界アカホヤ (K-Ak) 幸屋火砕流 (K-Ky) 幸屋降下軽石 (K-KyP)	60	鬼界カルデラ
29000年前	始良Tn 火山灰 (AT) 妻屋・入戸火砕流 大隈降下軽石 (A-Os)	450	始良カルデラ
約90000年前	阿蘇-4火砕流 (Aso4)	> 600	阿蘇カルデラ
約12万年前 約14万年前 約27万年前	阿蘇-3 阿蘇-2 阿蘇-1		阿蘇カルデラ

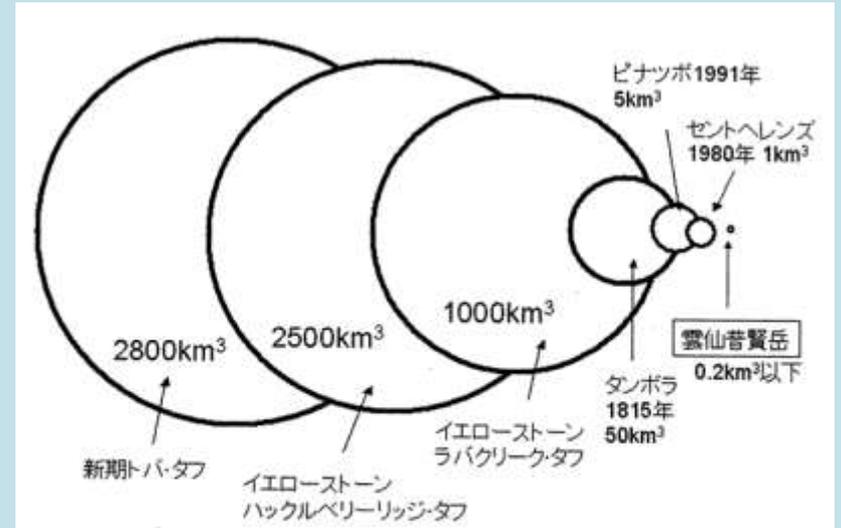
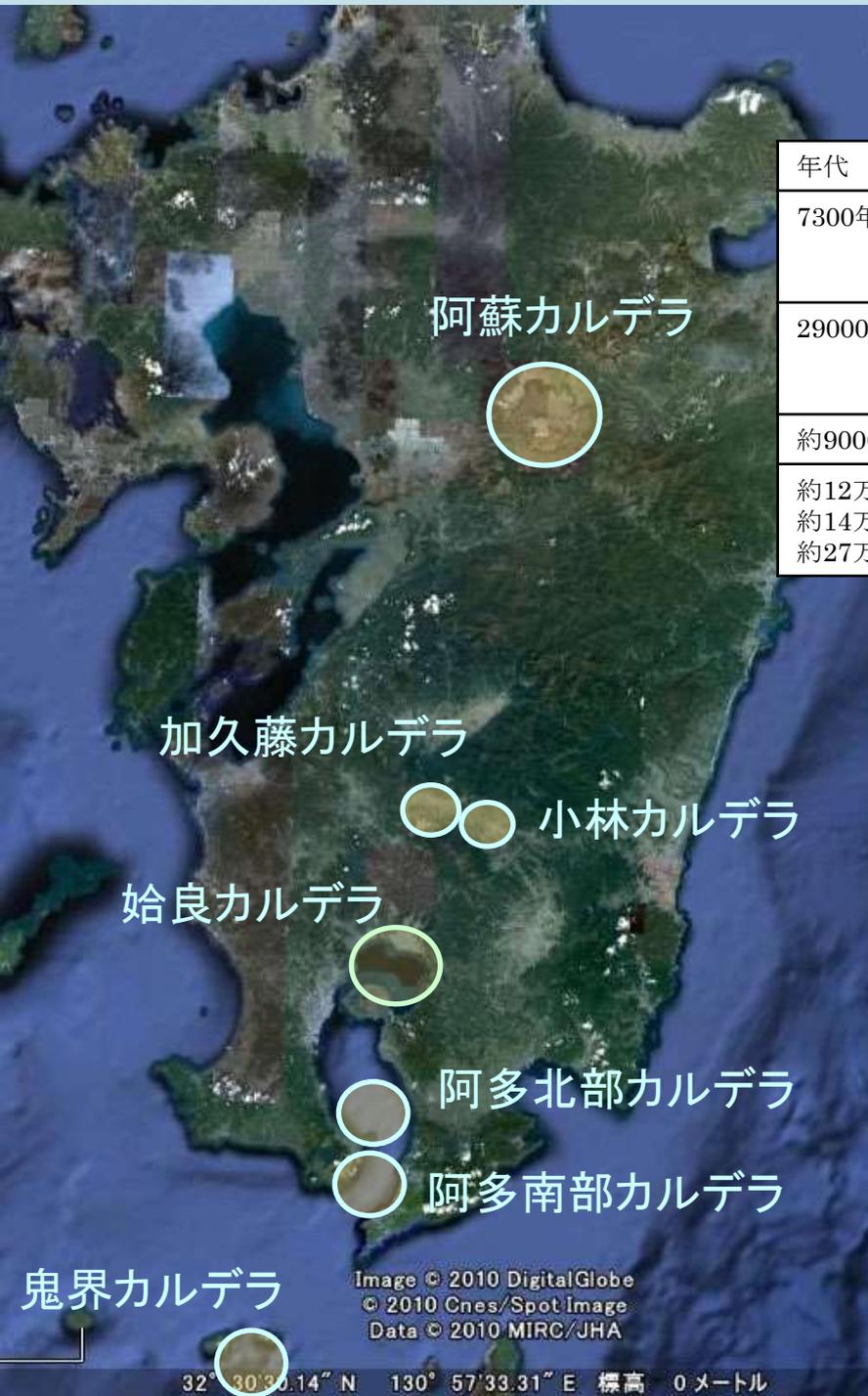


図2 超巨大噴火の噴出マグマ量 イエローストーン火山およびトバ火山の超巨大噴火により噴出したマグマの体積を球で表わした図。雲仙普賢岳などの通常の噴火に比べて、これらスーパーボルケイノの超巨大噴火の「巨大さ」がわかる。

高橋正樹著「破局噴火」祥伝社より

Image © 2010 DigitalGlobe  
© 2010 Cnes/Spot Image  
Data © 2010 MIRC/JHA

32° 30' 14" N 130° 57' 33.31" E 標高 0メートル

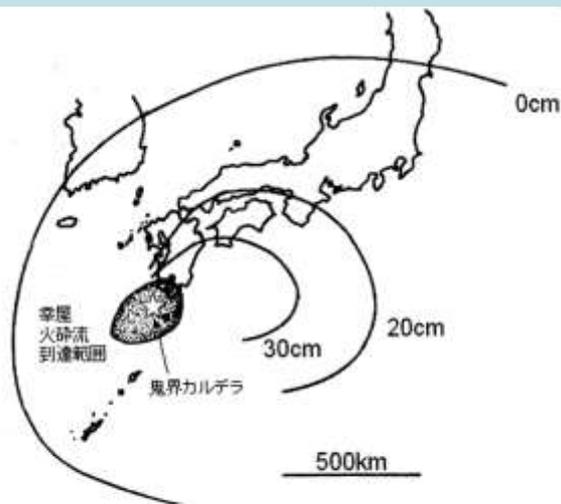


図7 アカホヤ火山灰の分布 7300年前に噴出した鬼界アカホヤ火山灰 (K-Ah) の分布 (町田・新井 [3003] を参考)。等層厚線で表わされている。鬼界アカホヤ火山灰の層厚は、紀伊半島で厚さ20センチを超え関東地方でも厚さ10センチあまりある。鬼界カルデラの位置は星印、幸屋火砕流堆積物の分布範囲は打点領域でそれぞれ示してある。



図8 幸屋降下軽石と幸屋火砕流堆積物の分布 7300年前に鬼界カルデラから噴出した幸屋降下軽石堆積物 (K-KyP) および幸屋火砕流堆積物 (K-Ky) の分布 (町田・新井 [2003] を参考)。幸屋降下軽石堆積物は等層厚線で、幸屋火砕流堆積物は最大到達範囲でそれぞれ分布領域を示してある。幸屋降下軽石堆積物は主に東北東方向に厚く堆積しているのがわかる。幸屋火砕流堆積物は、九州本島では桜島火山のすぐ南まで到達している。

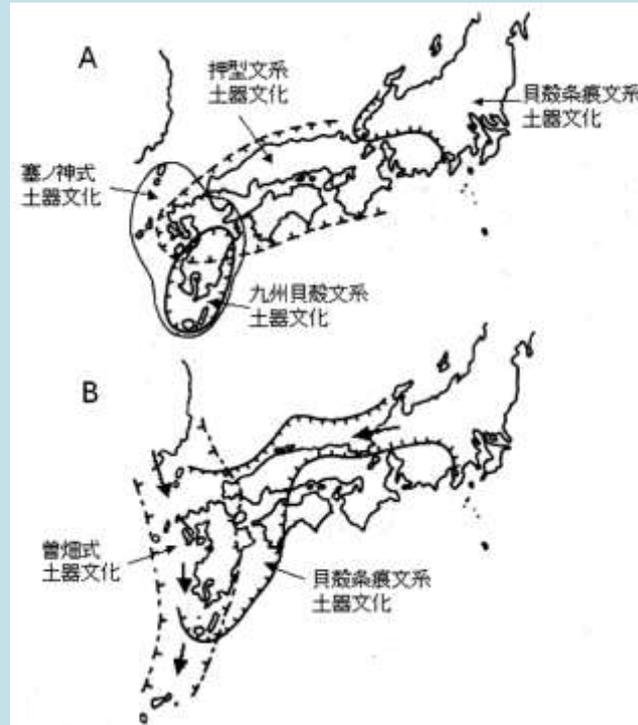


図9 アカホヤ噴火の前後における縄文式土器文化の変遷 7300年前の鬼界カルデラの超巨大噴火の前後における縄文式土器文化の西南日本での分布範囲 (町田・小島 [1996] を参考)。A：噴火前の縄文式土器文化の分布範囲；B：噴火後の縄文式土器文化の分布範囲。噴火前の九州では、九州貝殻文系土器文化および塞ノ神式土器文化、それに押型文系土器文化が栄えていた。このうち九州貝殻文系土器文化は南九州特有の縄文式土器文化であった。噴火後の九州では、これらの縄文式土器文化はほぼ消滅し、代わって東日本方面からは貝殻文系土器文化が西進し、また朝鮮半島方面からは曾畑式土器文化が南下した。こうした事実は、鬼界カルデラの超巨大噴火によって、九州の縄文式土器文化が壊滅的な打撃を被ったことを示している。



図14 AT火山灰の分布 始良Tn(AT)火山灰の等層厚線図(町田・新井[2003]を参考)。九州、四国、本州の大部分が5センチ以上の厚さの火山灰で覆われているのがわかる。打点領域は入戸火砕流堆積物の分布範囲を、星印は始良カルデラの位置を示す。

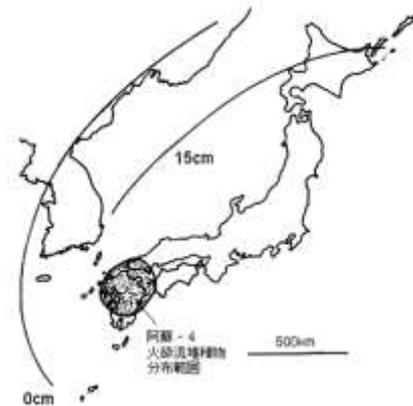


図17 阿蘇-4火山灰の分布 阿蘇-4火山灰(Aso4)の等層厚線図(町田・新井[2003]を参考)。北海道も15センチあまりの厚さの火山灰で覆われる。このときの超巨大噴火では、日本列島全体が厚い降下火山灰で覆われ、火山灰による「日本塵埃」が起きた。打点領域は阿蘇-4火砕流堆積物の分布範囲を、星印は阿蘇カルデラの位置を示す。

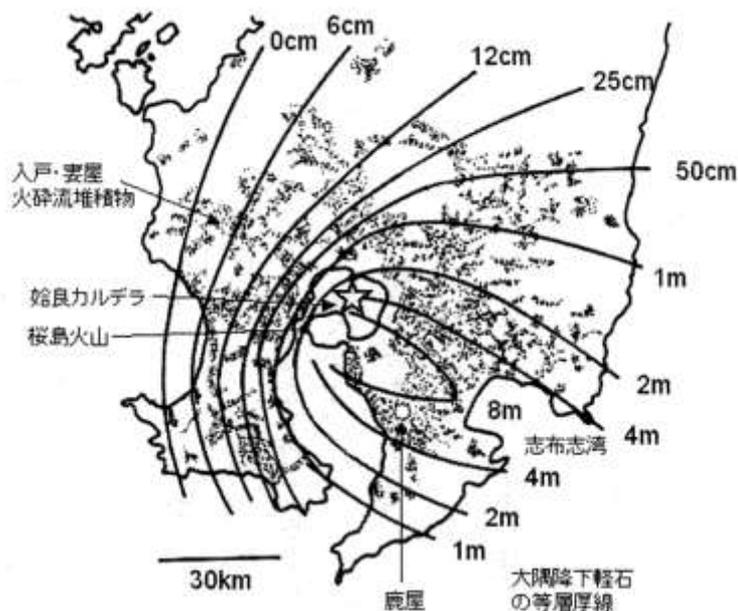


図12 大隅降下軽石と入戸火砕流堆積物の分布 2万9000年前に始良カルデラから噴出した大隅降下軽石堆積物(A-Os)と妻屋および入戸火砕流堆積物の分布(町田・新井[2003]を参考)。大隅降下軽石堆積物の分布は等層厚線で表わされている。大隅降下軽石は東南東方向に厚く堆積している。また、妻屋および入戸火砕流堆積物は、鹿児島県および宮崎県南部の全域を覆っていることがわかる。

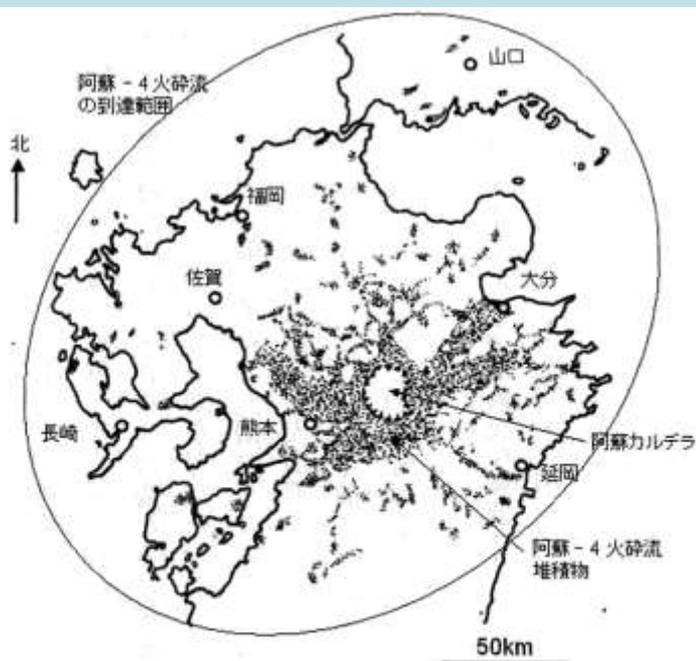


図16 阿蘇-4火砕流堆積物の分布 九州・中国地方における阿蘇-4火砕流堆積物の分布(町田・新井[2003]を参考)。長崎県北部や福岡市近傍、さらには山口県にも分布しているのがわかる。噴火直後には山口県西部、福岡県、佐賀県、長崎県、大分県、熊本県、宮崎県北部の大部分が火砕流堆積物に覆われたことになる。

# 始良カルデラ噴火堆積物(2.9ka)



大隈降下軽石－妻屋火砕流  
指交関係→intra-plinian flow



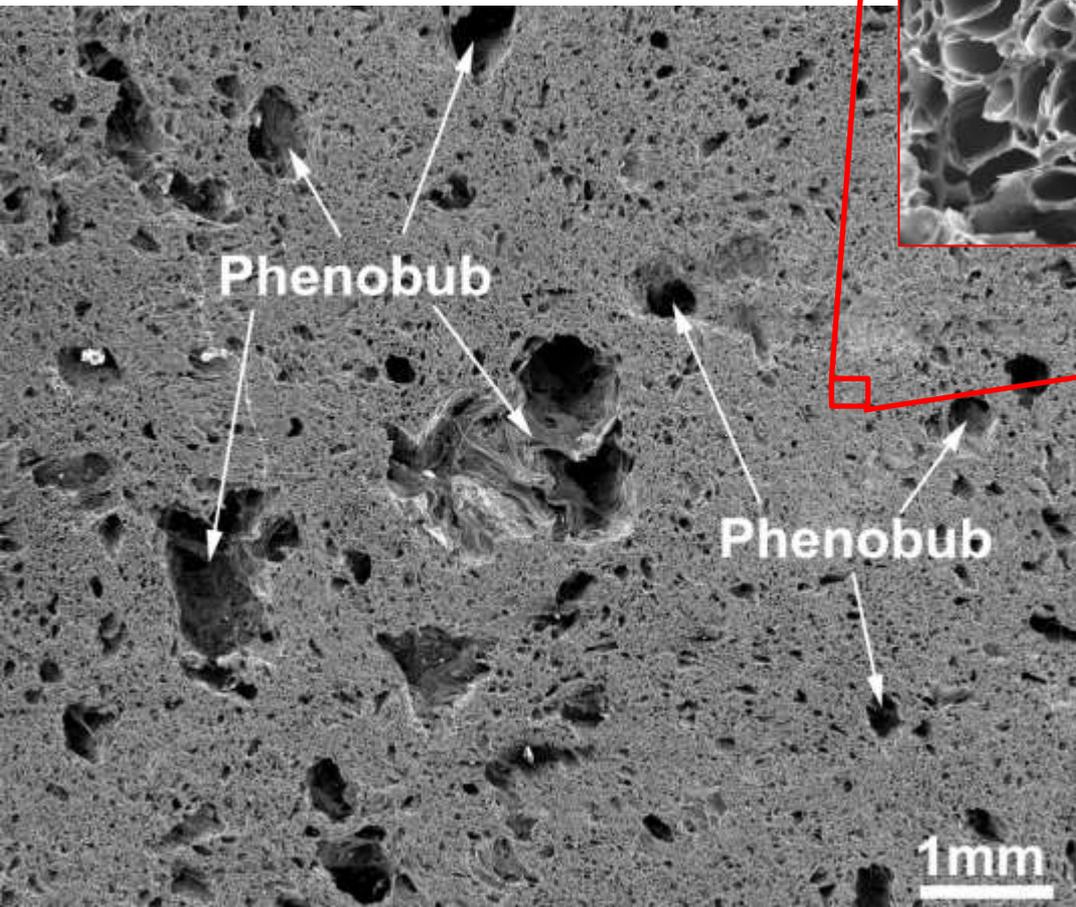
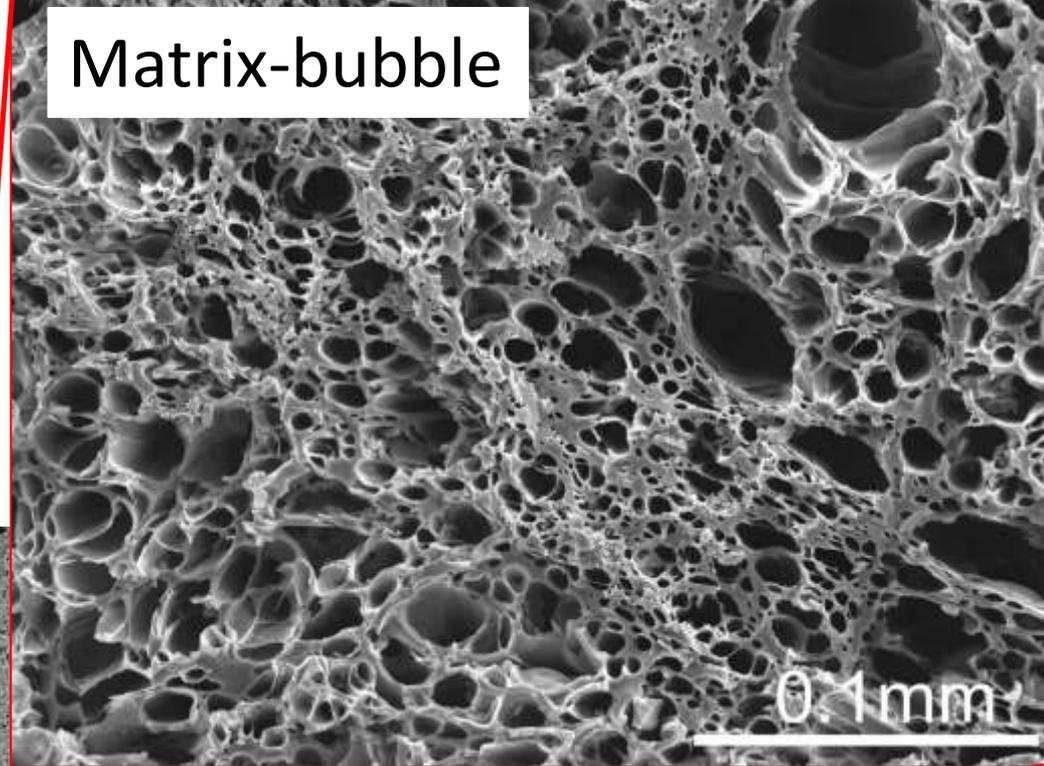
パイプ構造



# 大隅降下軽石

始良カルデラ形成の前駆プリニアン

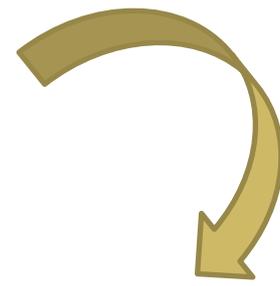
Pheno-bubble



Matrix-bubble  
BND減圧速度計  
 $10\mu\text{m} \Rightarrow N_2 = 3 \times 10^{15} \text{m}^{-3}$   
 $\Rightarrow |dP/dt| = 100 \text{MPa/s}$

Phenobub  
初期気泡サイズ: 断熱圧縮で戻す  
 $1\text{mm} \Rightarrow R_p = 30\mu\text{m}$  ( $0.1\text{MPa} \Rightarrow 250\text{MPa}$ )  
 $N_p = 10^9 \text{ (m}^{-3}\text{)}$

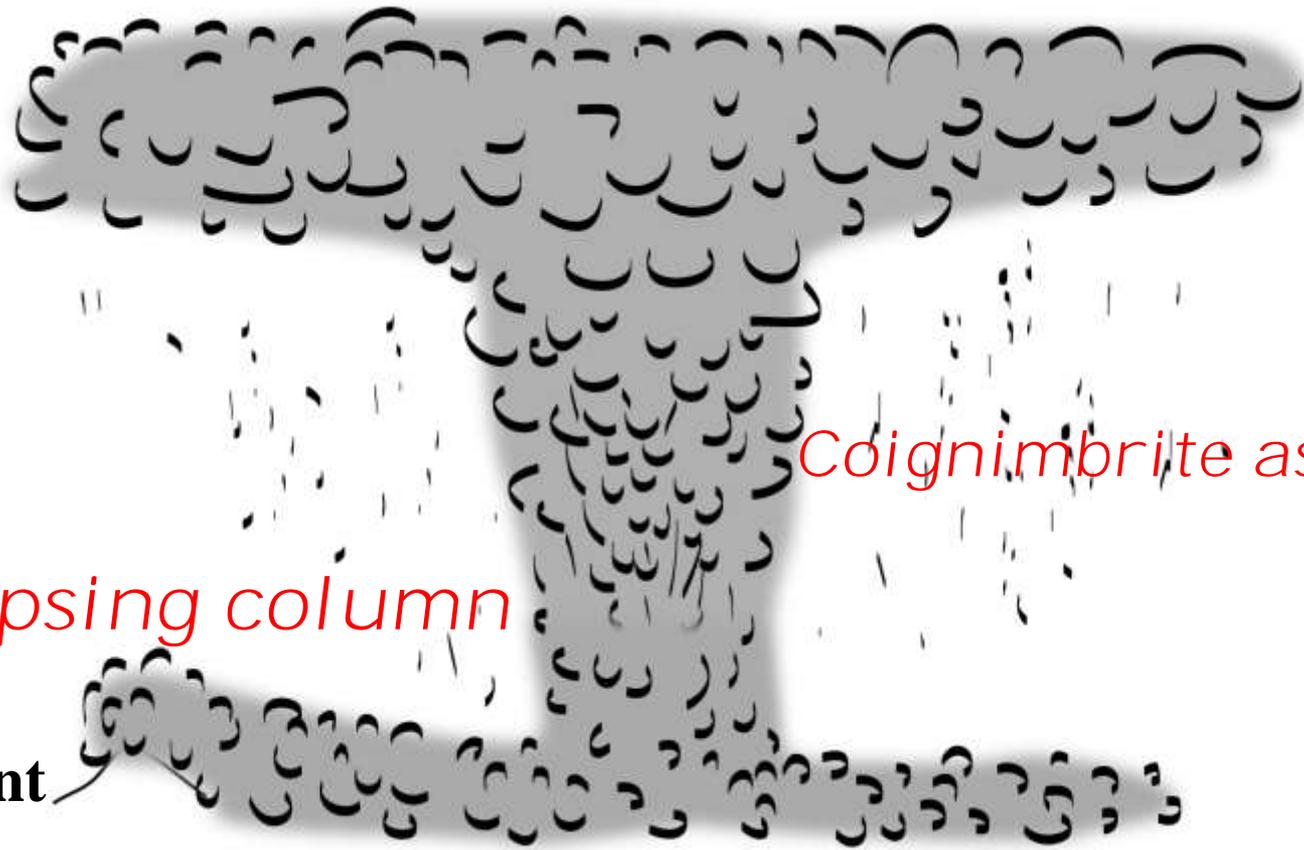
*Plinian umbrella cloud*



**Vent**

*Collapsing column*

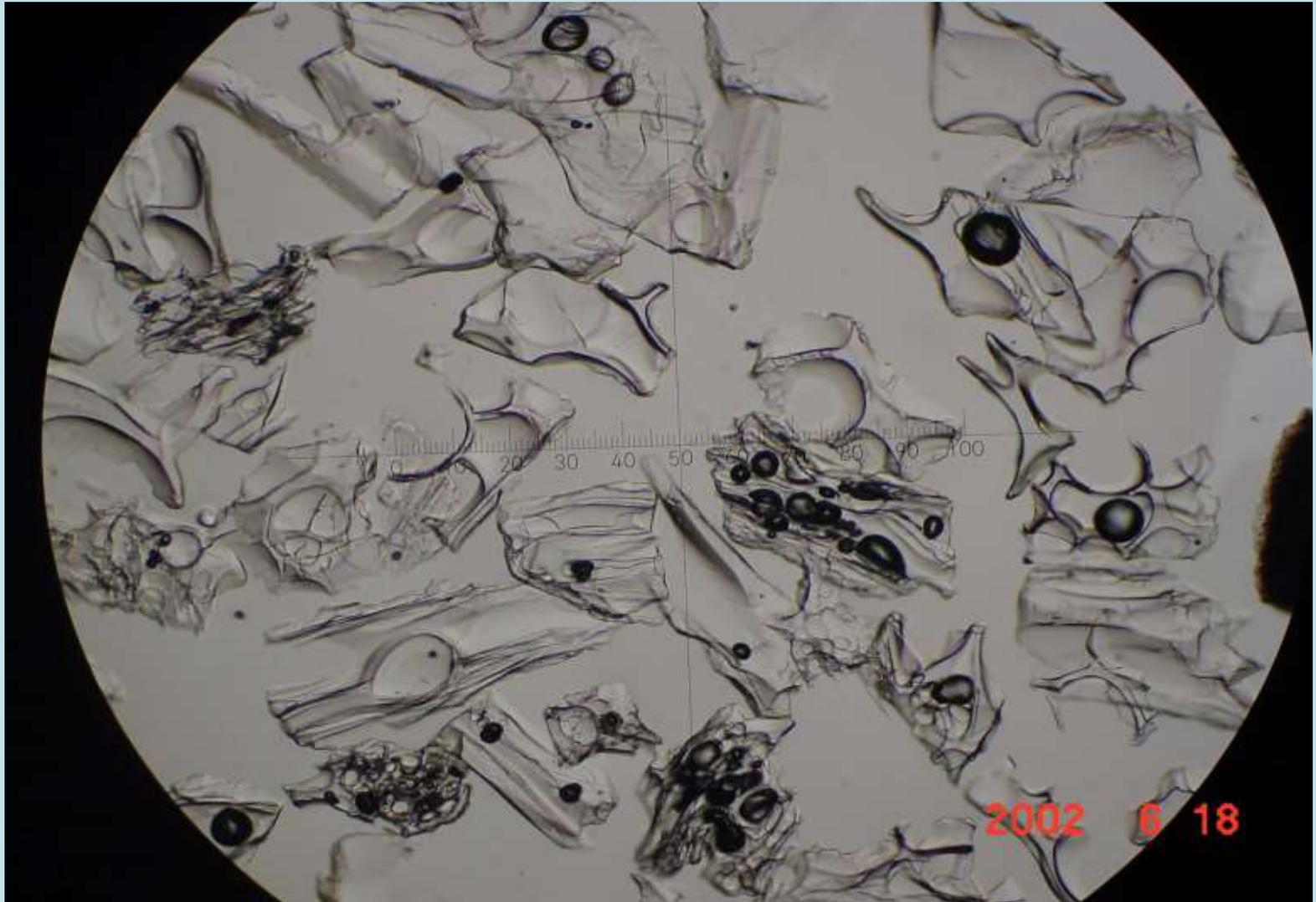
*Umbrella cloud*



*Coignimbrite ash*

**Vent**

# 火山灰を見てみよう



← 5.5mm →

# Shield volcano

- Hawaii

キラウエア

Puu Oo

11.6 キロメートル

57 キロメートル

Data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO  
Image © 2009 DigitalGlobe

Image © 2009 DigitalGlobe

©2008 Google™

©2009 Google™

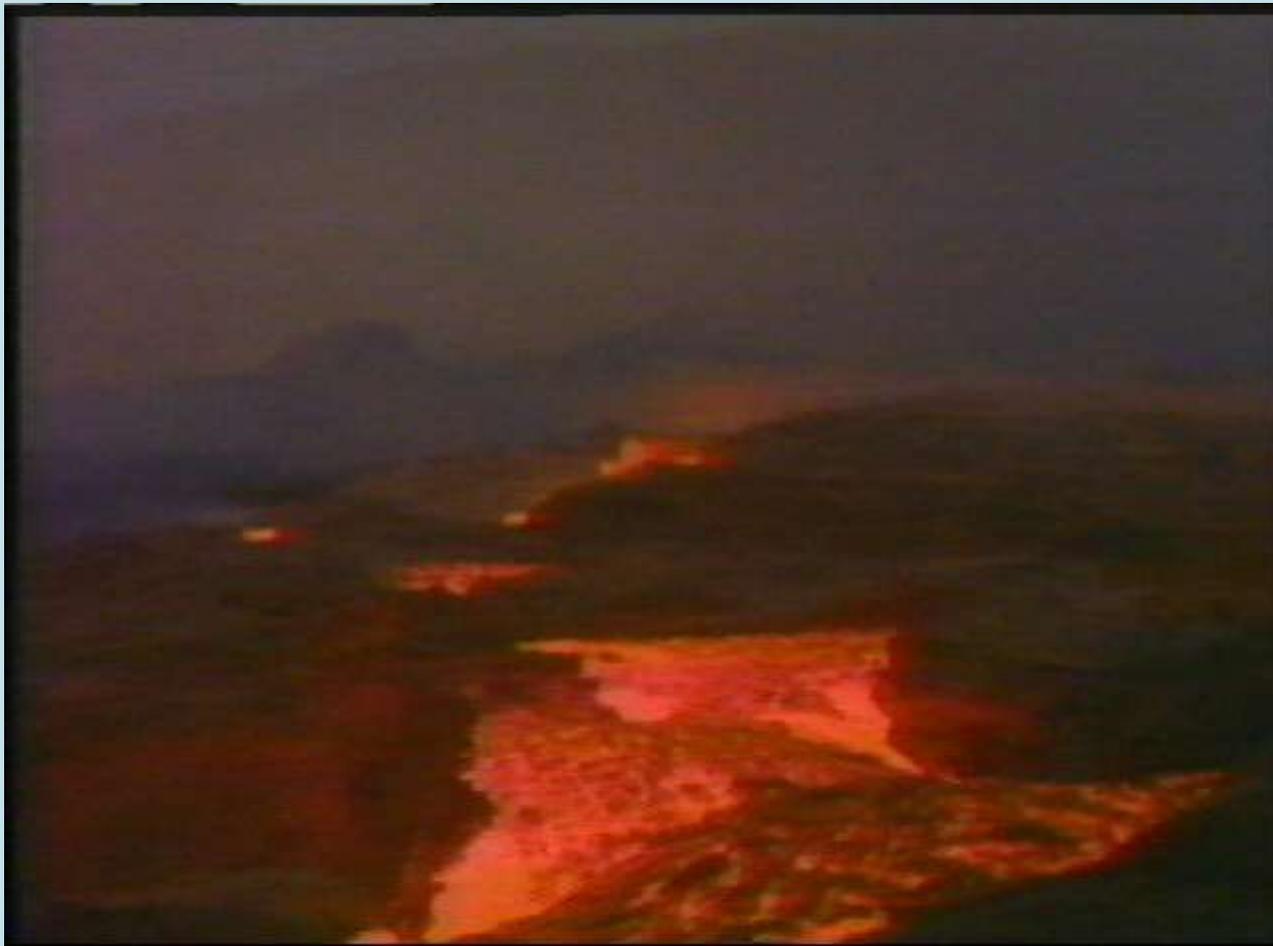
Data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO  
Image © 2009 DigitalGlobe  
Image © 2009 TerraMetrics  
Image IBCAO

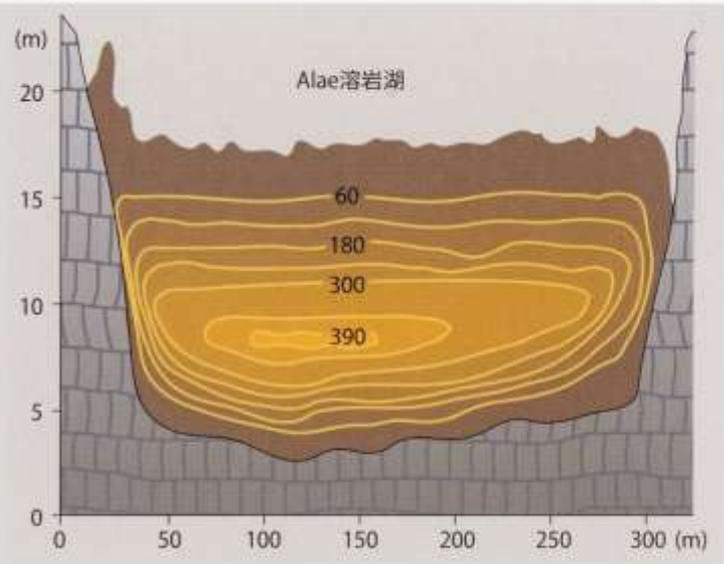
©2008 Google™



Curtain of fire along the northeast rift zone of Mauna Loa Volcano; the view is to the south. The height of the fountain is approximately 25 m (March 25, 1984, R.B. Moore).

# ハワイ溶岩流





◀ 図 3.9 Alae 溶岩湖 (ハワイ島, Kilauea 火山の東リフト帯) の冷却過程を模式的に示した断面図. 図中の曲線と数字は, 1000℃の等温線が移動する様子を, 溶岩湖ができてからの日数で示したものである (259).

East Rift zoneからのパホイホイ溶岩





PuuOO溶岩湖で見られる表面  
対流の証拠：海嶺のパターンと似  
ている



# 洪水玄武岩 flood basalt

\* 1.25億年前ゴンドワナと南アメリカ  
\* 6000万年前大西洋の拡大とスコットランド  
\* 150万年前のプルーム活動CRB

- 数10万km<sup>3</sup>
- トラップ(trap): 階段状の浸食地形
- シベリア: パーミアン・トラップ、南アフリカ: カルー玄武岩台地、南アメリカパナマ(白亜紀初期)、デカントラップ、コロンビア・リバー洪水玄武岩
- 大陸が分裂する際に起こる。⇒ マントルプルーム
- ホットスポットと関係がある。

# CRB Landmarks



Multnomah Falls



Dry Falls



Haystack Rock, Cannon Beach

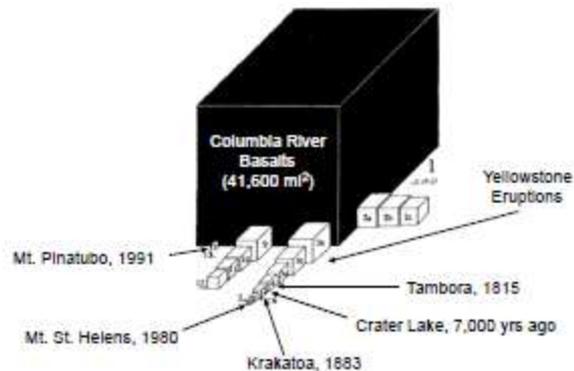


Palouse Falls

Age (Myr)	Formation	Member	# of Flows	Area (mi <sup>2</sup> )	Volume (mi <sup>3</sup> )	F-2 & F-8
6	Saddle Mountain	Lower Monumental	1	170	4	1%
8.5		Ice Harbor	4	630	18	
		Buford	1	220	5	
10.5		Elephant Mtn	2	5,190	106	
12		Flamora	1	6,710	180	
		Esquatzel	1	1,050	17	
		Wassenfels Ridge	4	470	5	
13		Acoba	1	2,490	63	
		Wilber Creek	2	1,190	17	
13.5			Umatta	2	5,830	
	TOTAL		18	11,800	374	
14.5	Wenapum	Priest Rapids	3	22,120	670	7%
		Roza	4	15,500	310	
15.5		Ferdinand Springs	21	26,000	1,540	
		Eckler Mtn	8	2,350	41	
	TOTAL		36	37,690	2,561	
15.7-15.6	Grande Roids	7 members (R)	33	44,190	6,890	86%
15.9-15.7		4 members (R)	45	45,490	12,740	
15-15.9		2 members (R)	15	39,510	7,530	
16.5-16		4 members (R)	27	37,530	6,890	
	TOTAL		120	67,530	35,640	
17.5-17	Imnaha	7 Members	26	19,380	2,230	6%
	GRAND TOTAL		311	83,200	41,588	

しょぼい奴でも

## Relative Volume of the CRBs



## One Flow in the Roza Member

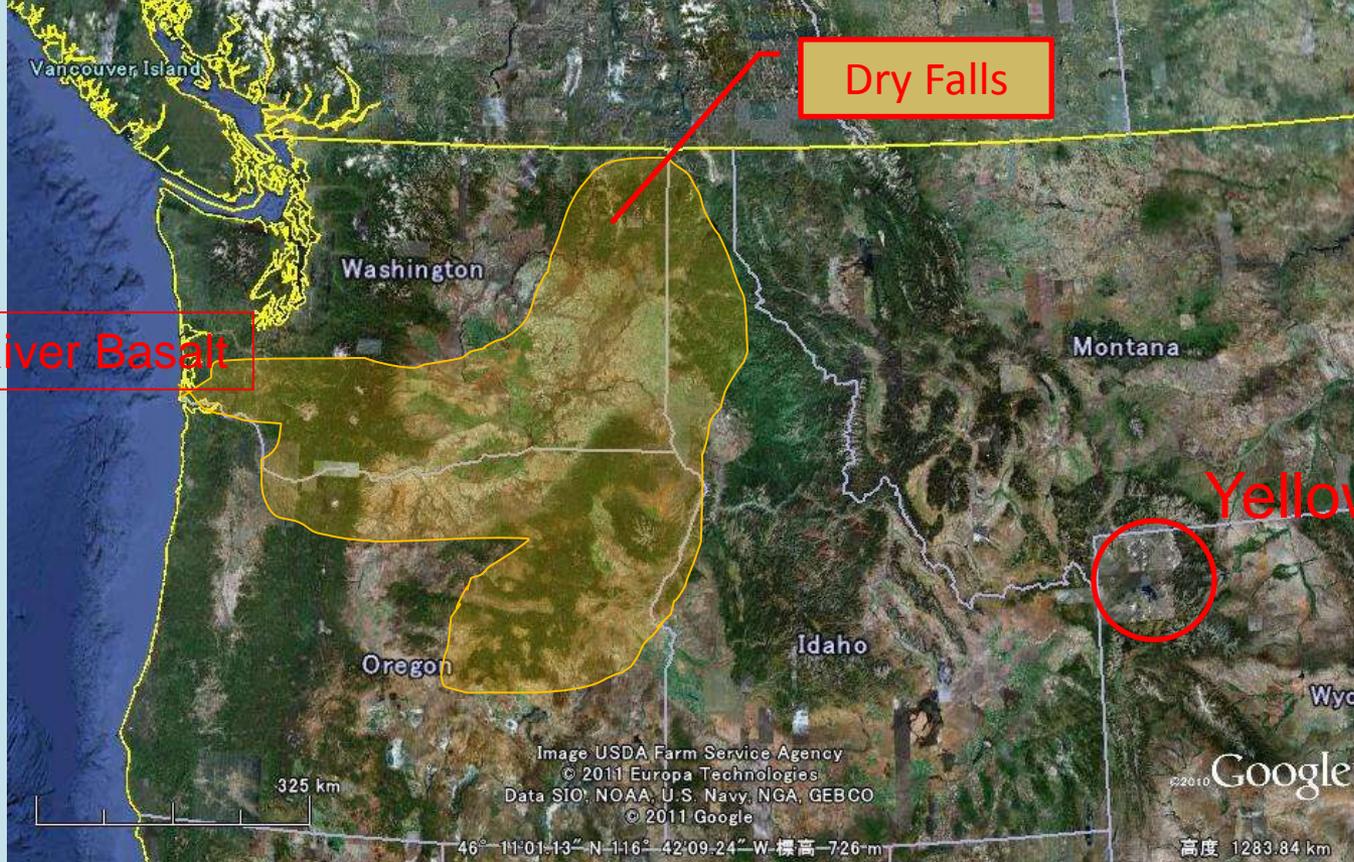
Volume: 700 km<sup>3</sup>  
 Time: 7 days  
 Velocity: 5-15 km/hr  
 Fissure Length: >100 km  
 Rate: 100 km<sup>3</sup> per day  
 (1 km<sup>3</sup> per day per km of fissure)

For Comparison - 1 Hawaii Flow  
 (0.001 km<sup>3</sup> per day per km of fissure)



14.5 million years ago

Robert Viens

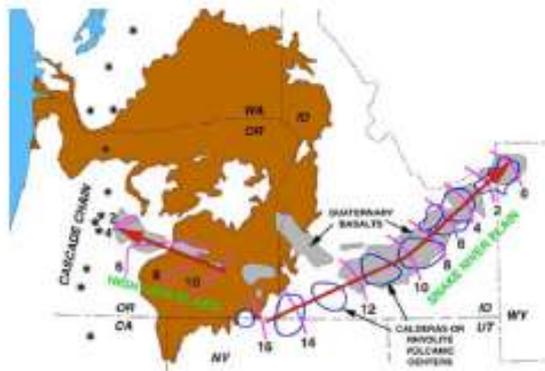


Columbia River Basalt

Dry Falls

Yellowstone

### CRB/Yellowstone Relationship





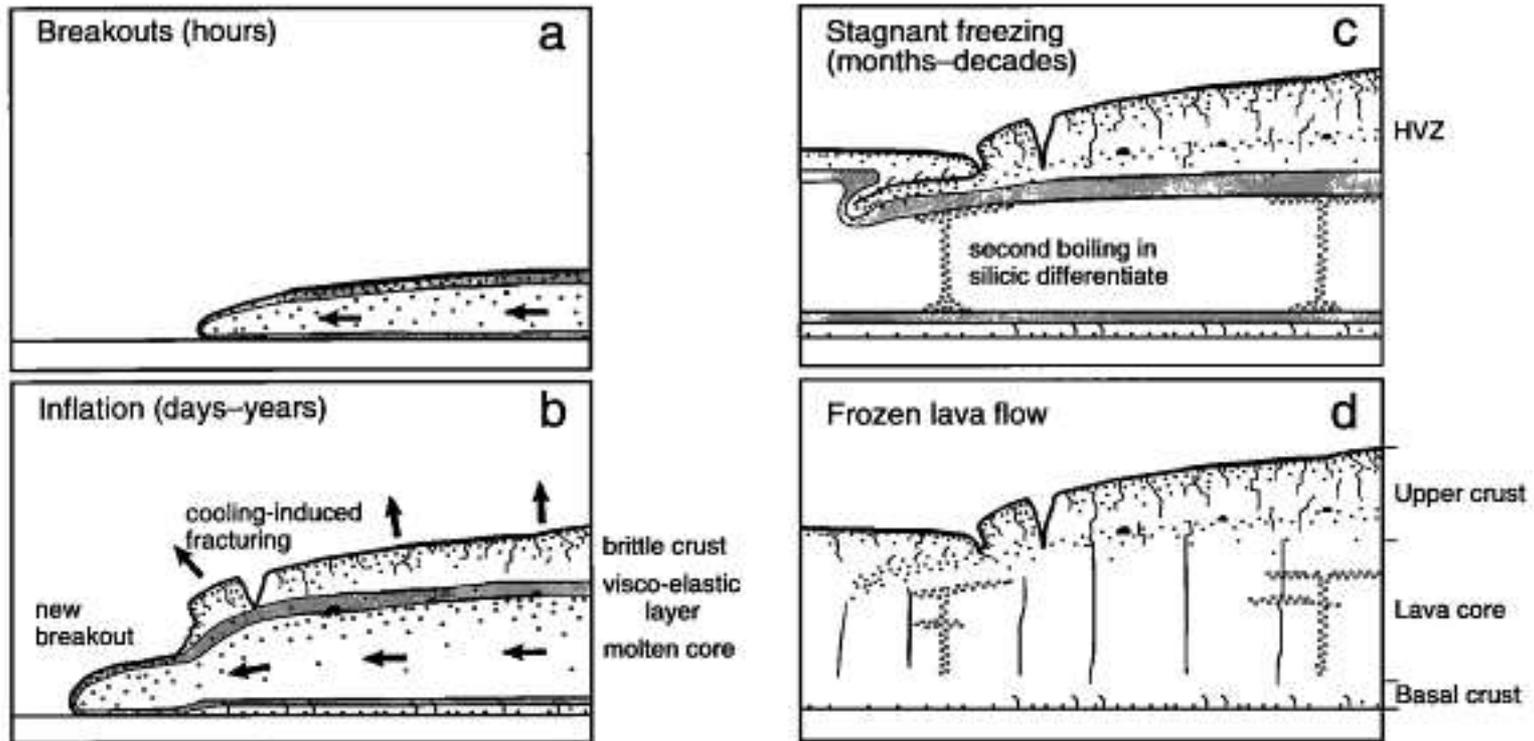
# Dry Falls





# Lava Inflation

*mechanism for lower effusion rates*



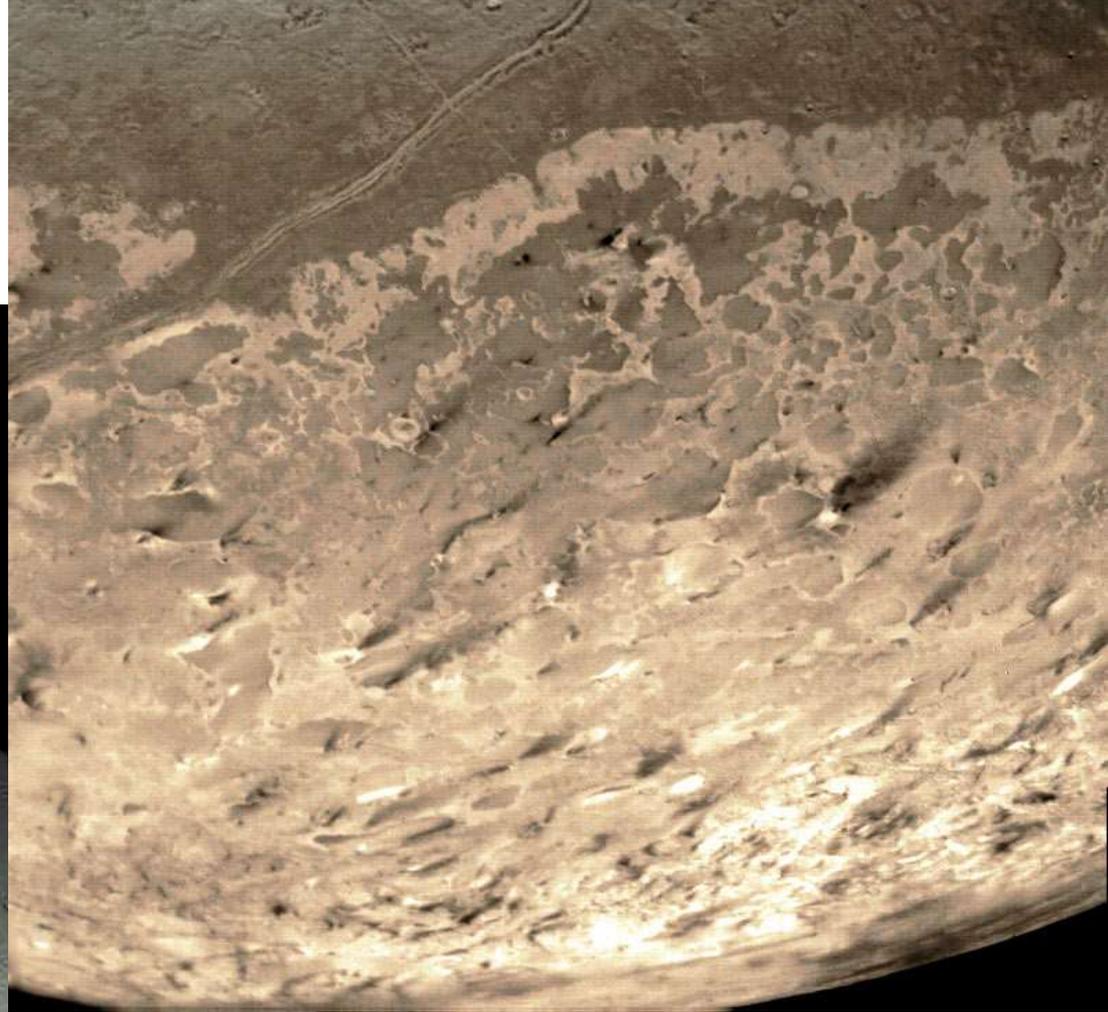
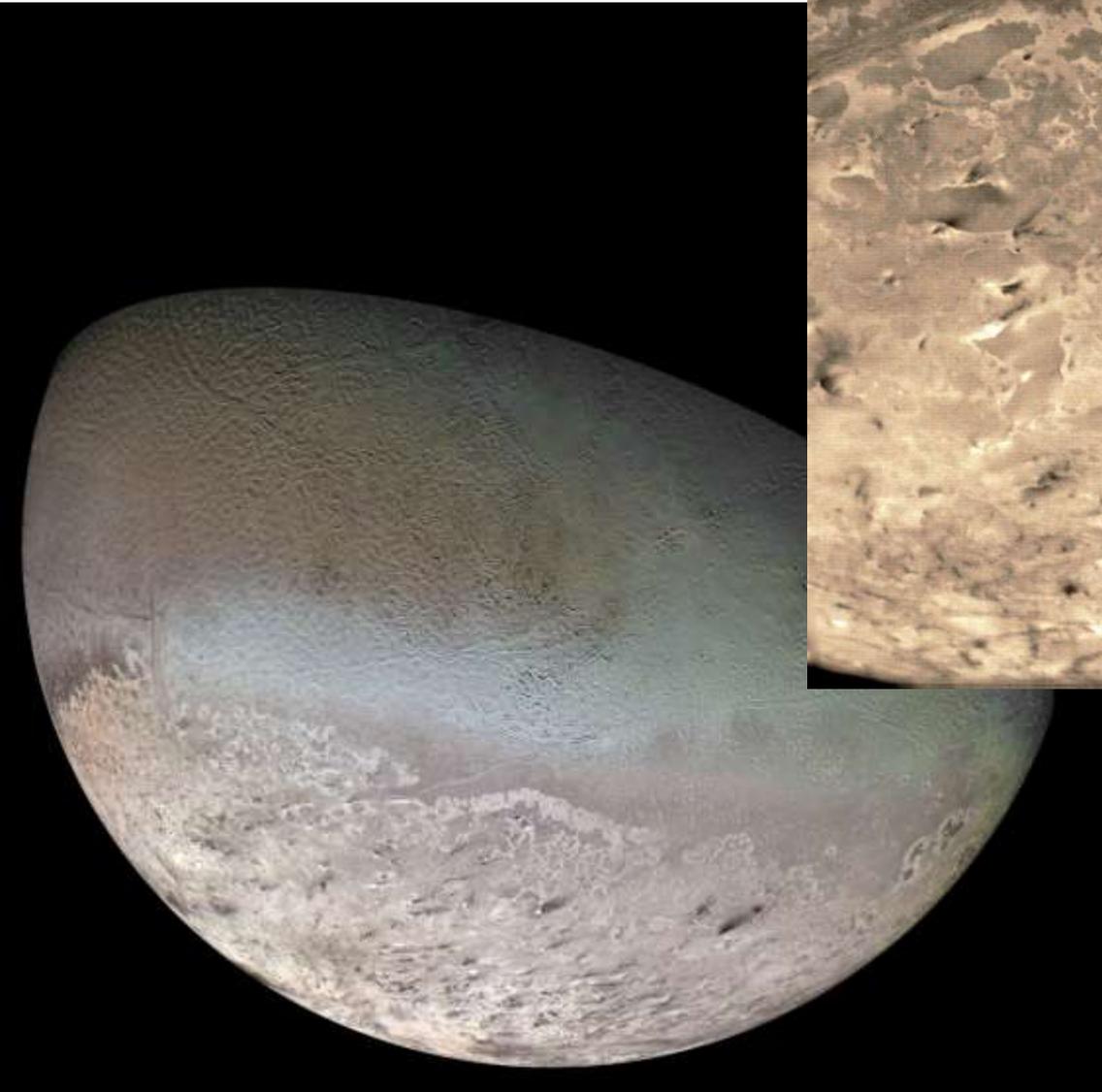
**Figure 13.** Schematic cross sections of emplacement of a generic inflating pahoehoe sheet flow. Vertical scale varies from 1-5 m for Hawaiian flows to 5-50 m for the CRB flows. (a) Flow arrives as a small, slow-moving, lobe of molten lava held inside a stretchable, chilled viscoelastic skin with brittle crust on top. Bubbles are initially trapped in both the upper and basal crusts. (b) Continued injection of lava into the lobe results in inflation (lifting of the upper crust) and new breakouts. During inflation, bubbles rising from the fluid core become trapped in the viscoelastic mush at the base of the upper crust, forming horizontal vesicular zones. The growth of the lower crust, in which pipe vesicles develop, is much slower. Relatively rapid cooling and motion during inflation results in irregular jointing in the upper crust. (c) After stagnation, diapirs of vesicular residuum form vertical cylinders and horizontal sheets within the crystallizing lava core. Slow cooling of the stationary liquid core forms more regular joints. (d) Emplacement history of flow is preserved in vesicle distribution and jointing pattern of frozen lava.

# Important questions

- What control the style and volume of an eruption?
- What control the exit velocity?
- How are magmas stored in the crust and transported to the surface?

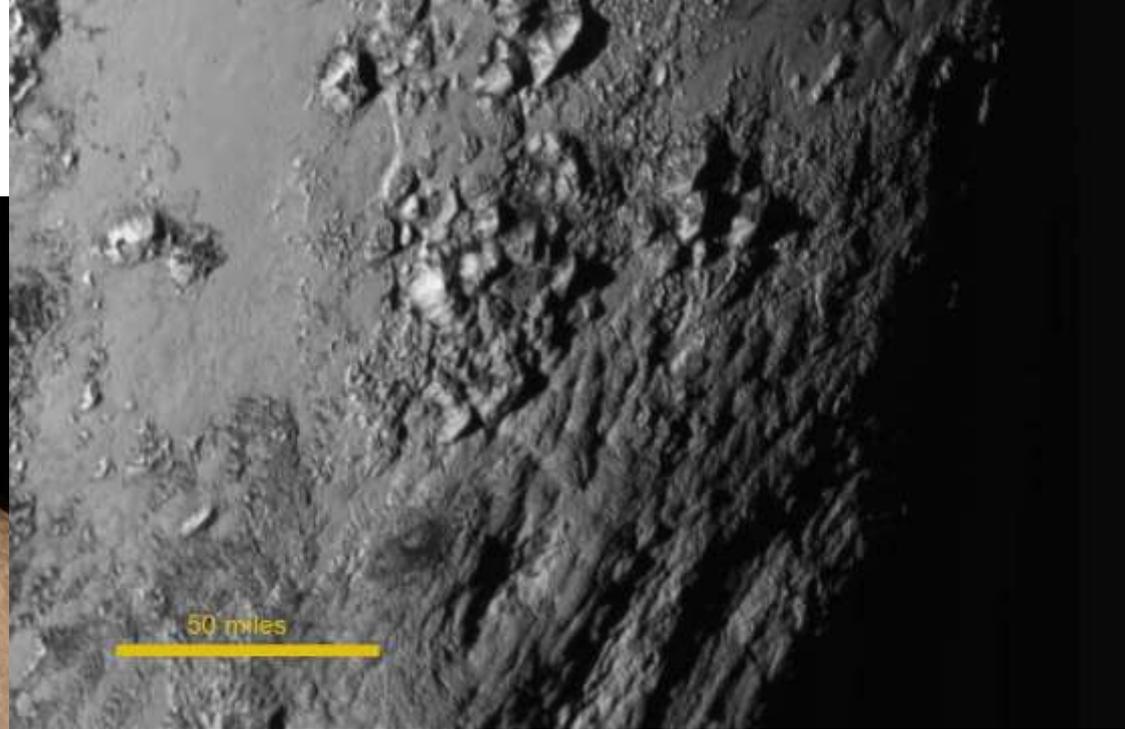
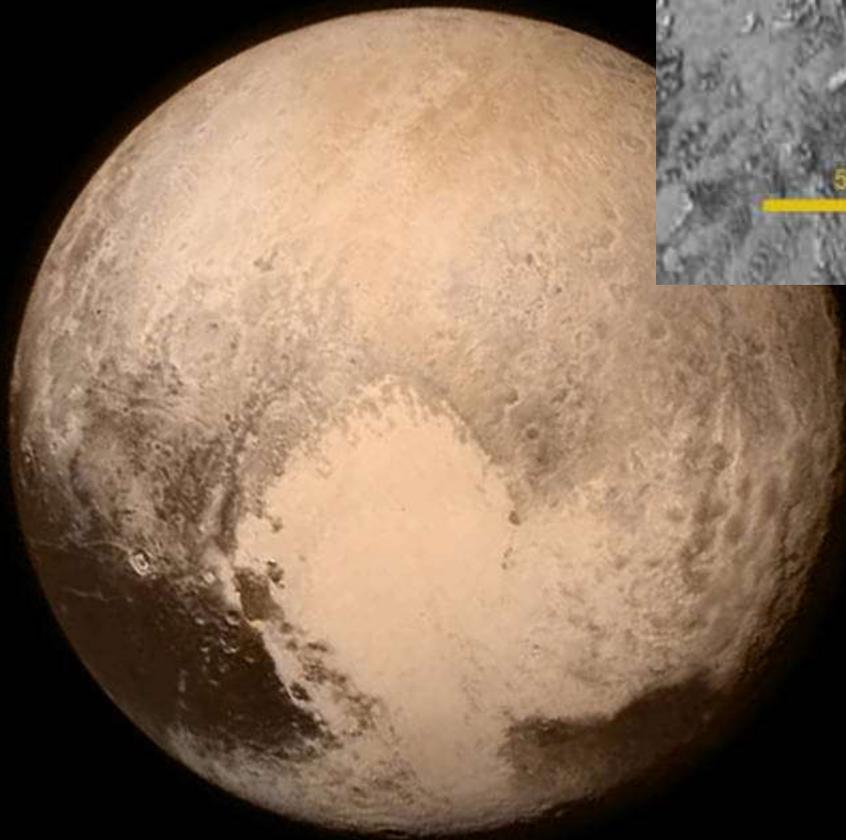
# Triton

moon of Neptune

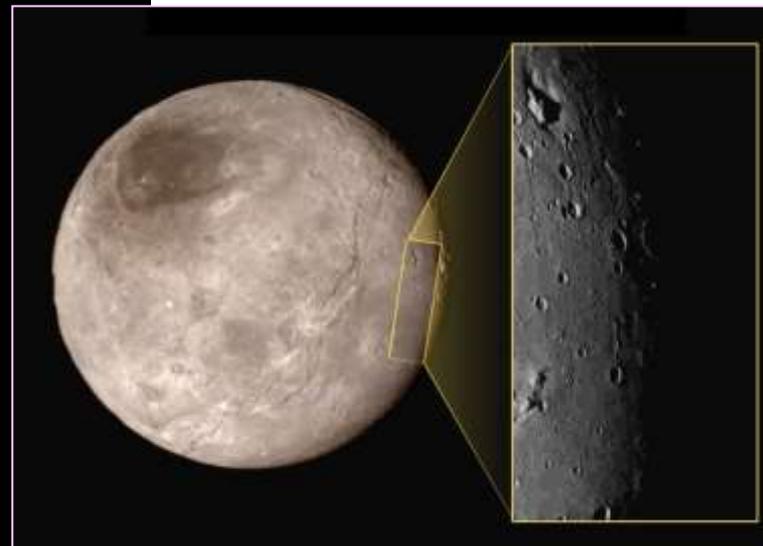


Nitrogen geyser

# Pluto

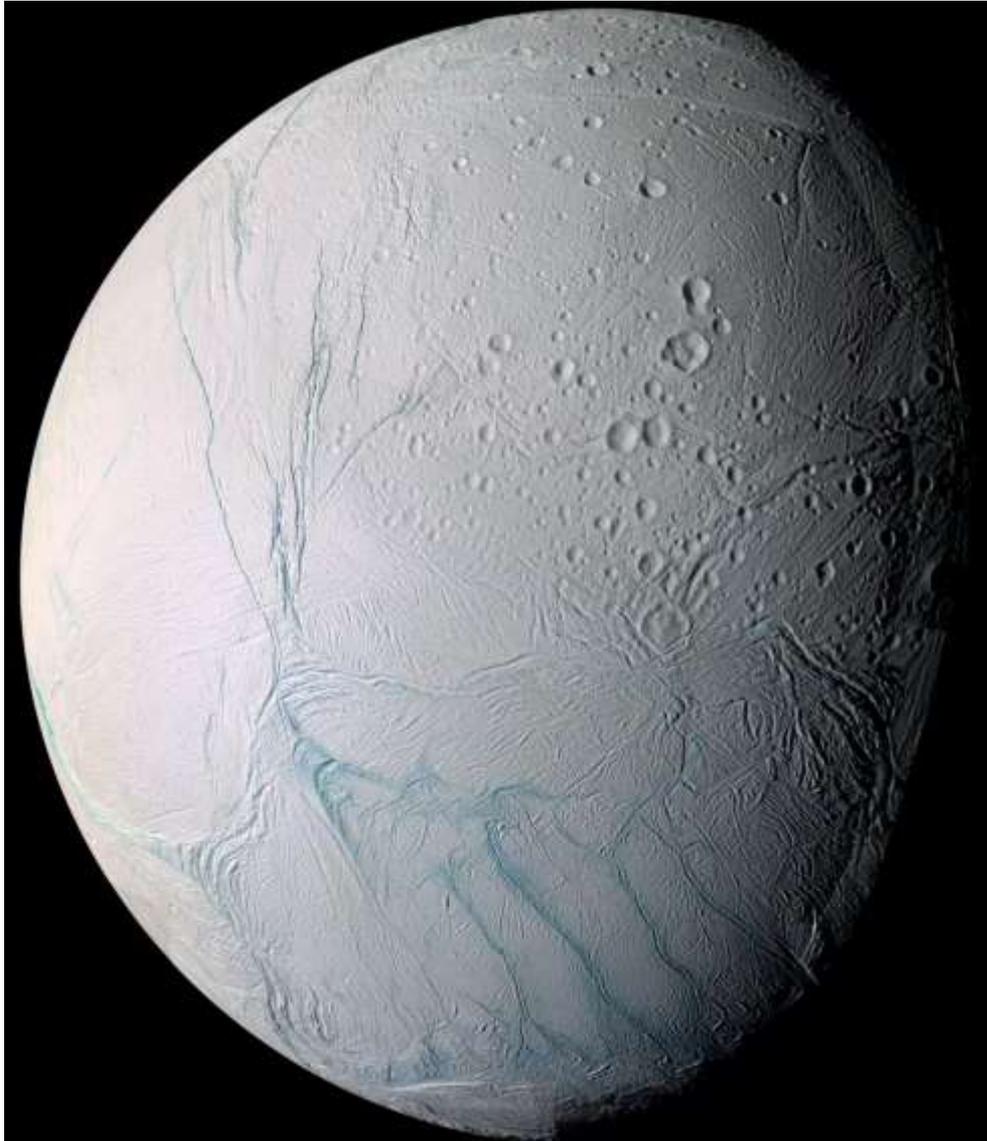


## Charon

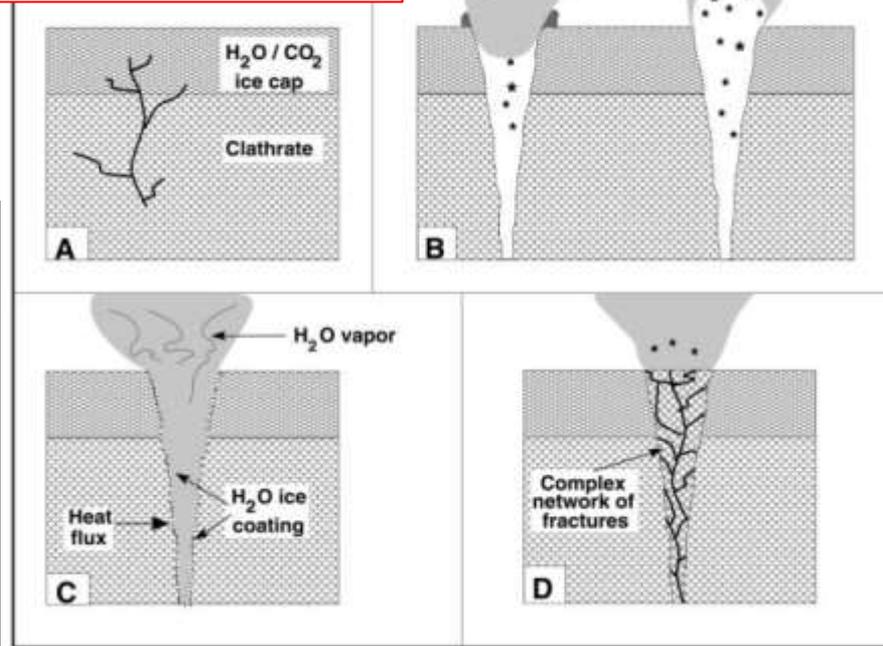


# Enceladus

moon of Saturn

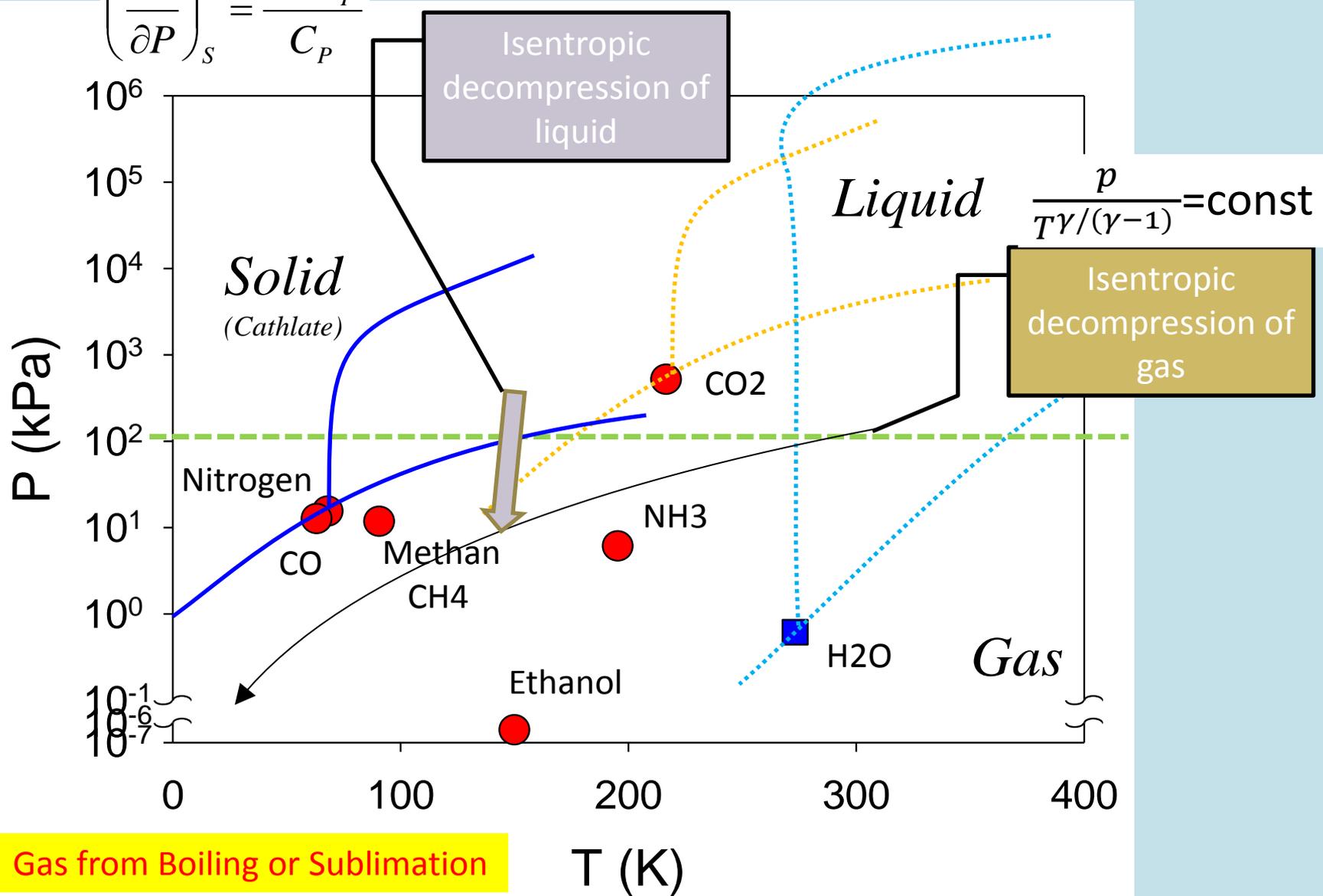


Kieffer et al (2006)



# Phase diagram with triple points

$$\left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_s = \frac{VT\alpha_P}{C_P}$$



Gas from Boiling or Sublimation

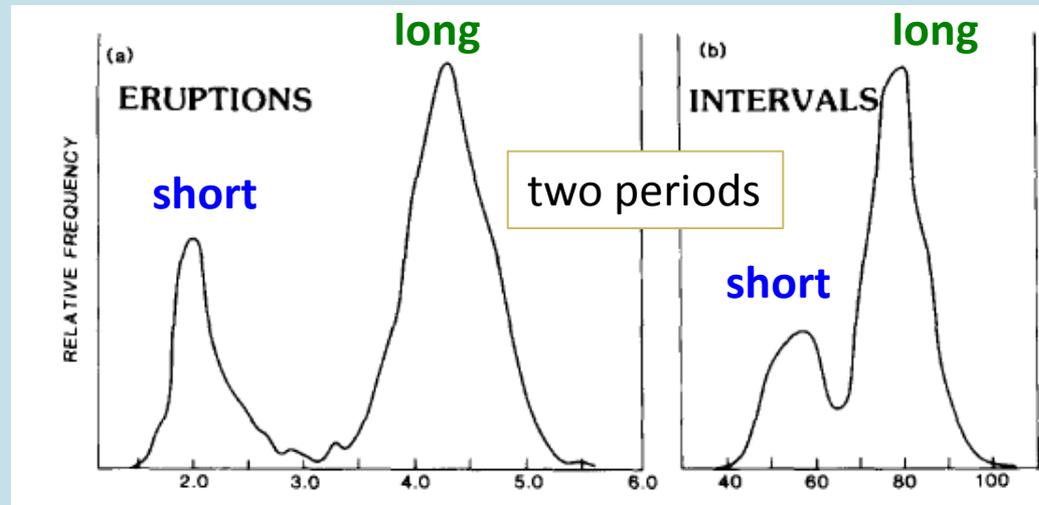
# Castle geyser, Yellowstone, USA



# Long-term behavior of natural geysers : Time-predictability

Old Faithful, Yellowstone

It's a very lucky case with the simplest system of mass and energy conservation



$$I \approx 10D + 30 \quad [\text{min}] \quad (\text{Kieffer, 1984})$$

$I$  : interval = eruption to eruption

$D$  : duration = one eruption

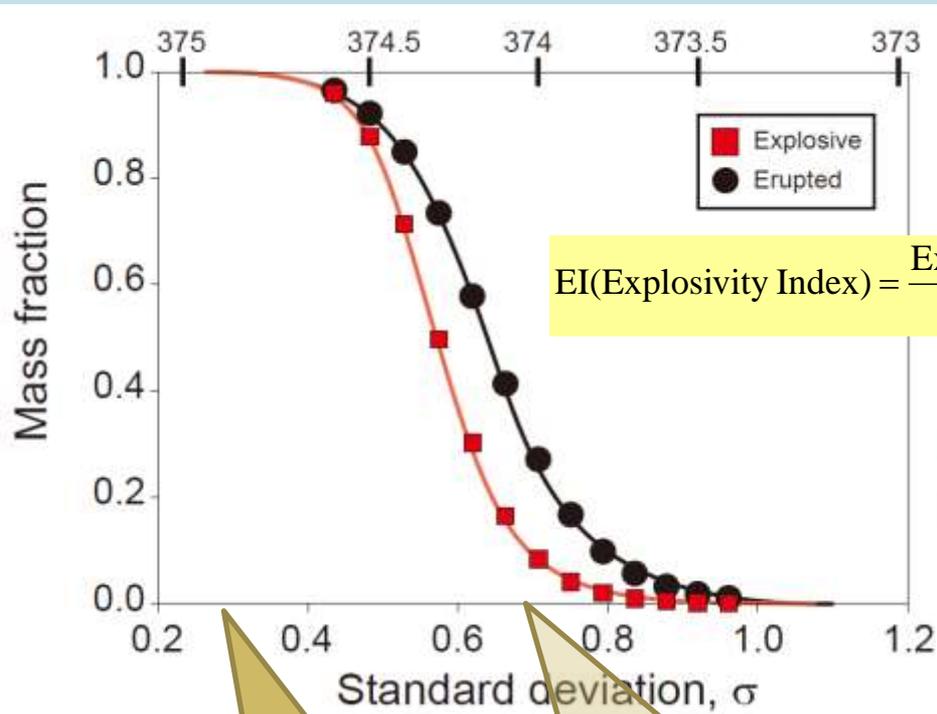
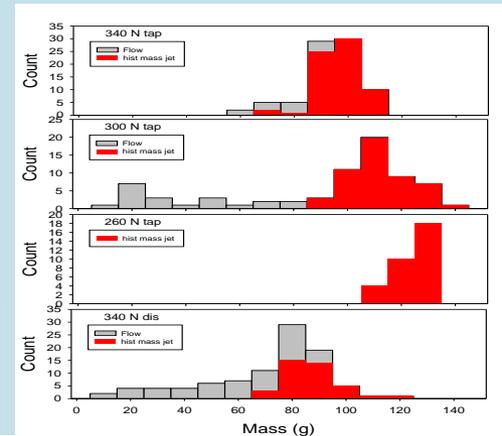
Proxy of erupted mass

# Temp. variation

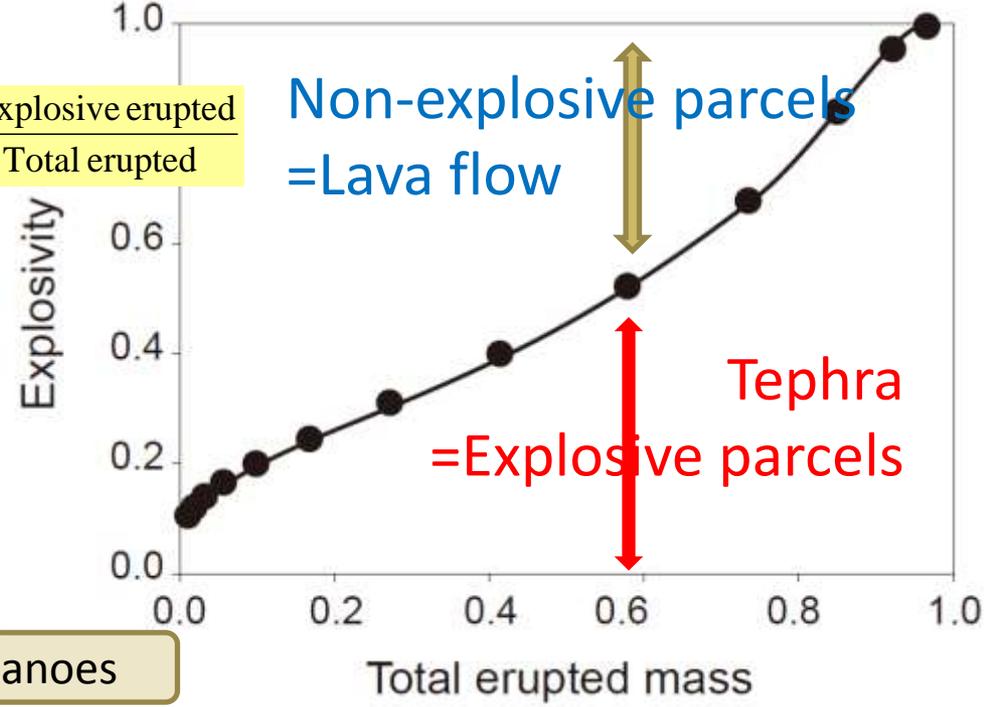
# Tephra/Lava ratio

Erupted mass fraction is negatively correlated with  $\sigma$ .

Explosivity increases with erupted mass fraction.



$$EI(\text{Explosivity Index}) = \frac{\text{Explosive erupted}}{\text{Total erupted}}$$



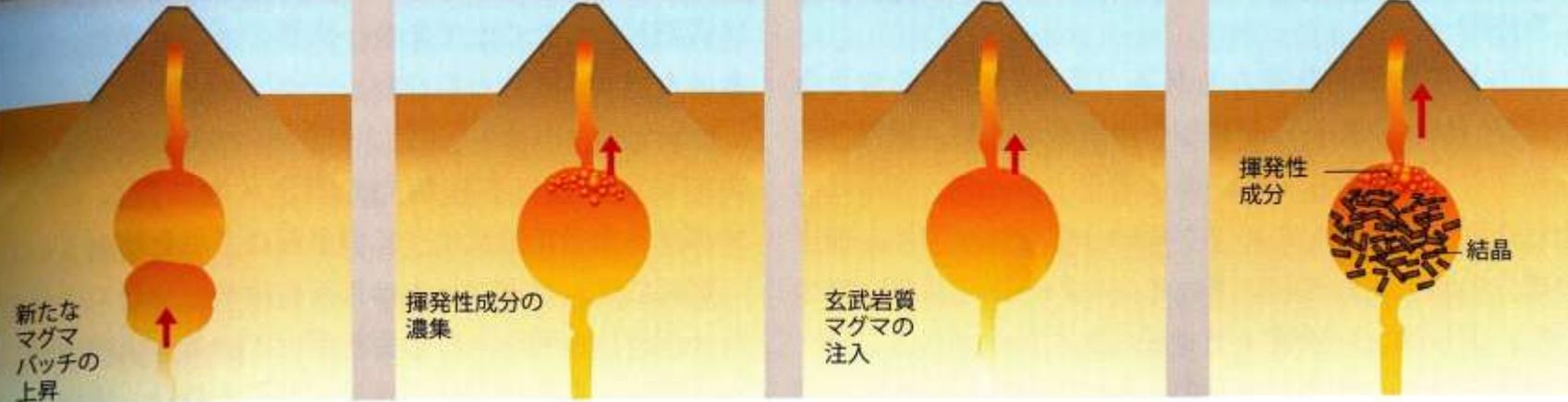
Caldera formation

Typical andesitic volcanoes

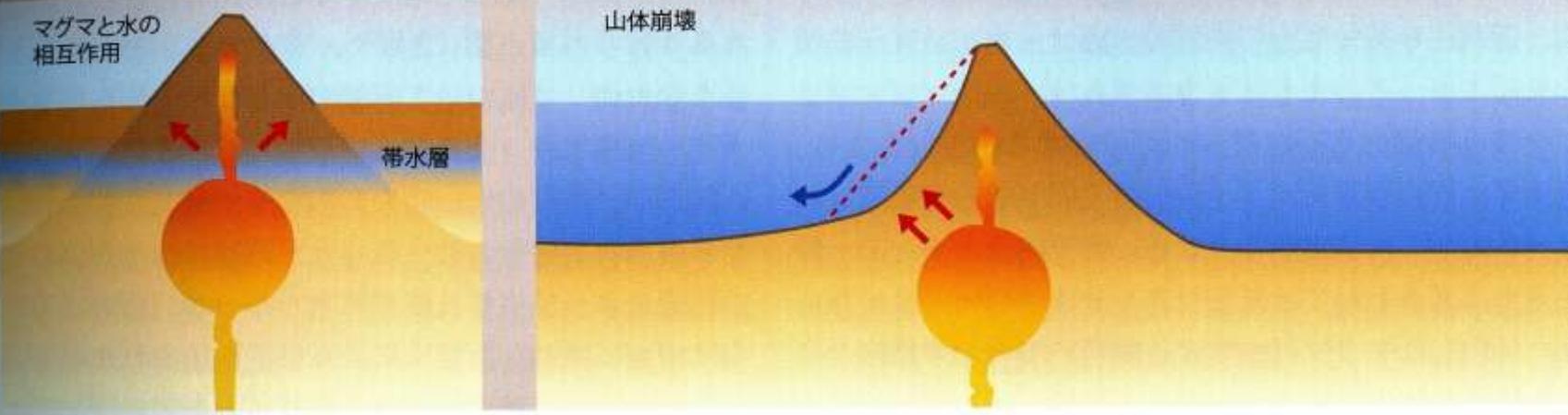
Large mass with small tephra/lava flow ratio implies large volume remaining in chamber.

マグマだまりの増圧と噴火の開始

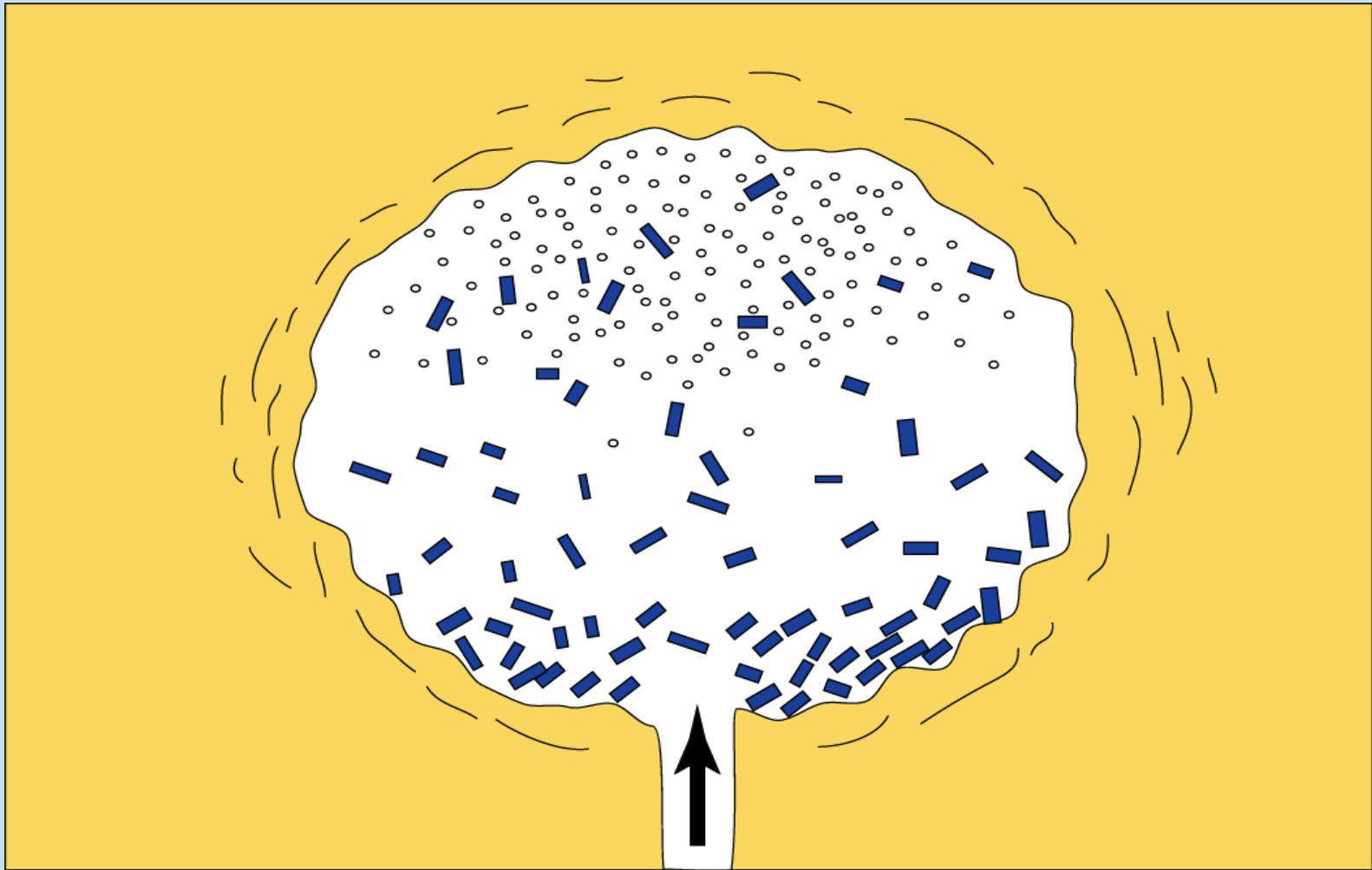
内部強制力



内部及び外部強制力



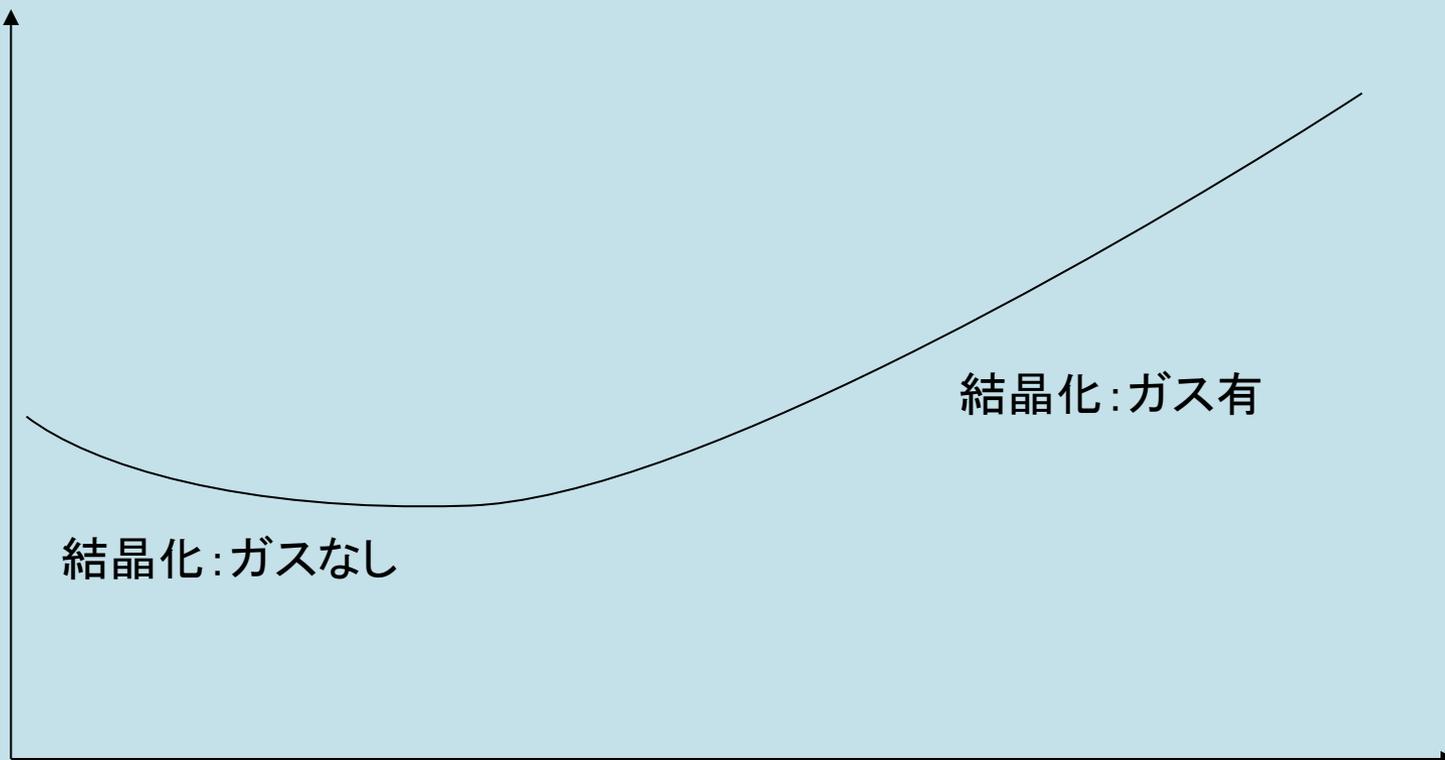
# マグマだまりの増圧の2つの要因



1. 結晶化→液中の揮発性成分増加→気泡形成→マグマだまりの増圧
2. マグマの注入

# 結晶化と増圧

$P$  : *pressure*(圧力)



結晶化: ガスなし

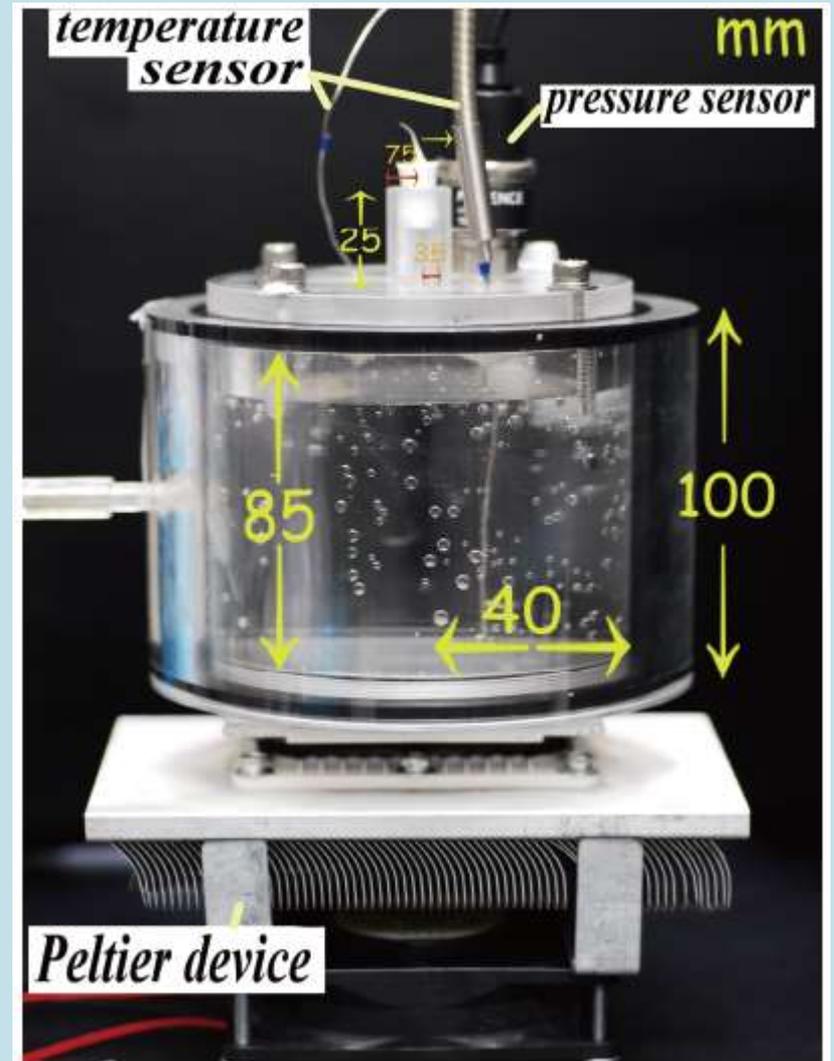
結晶化: ガス有

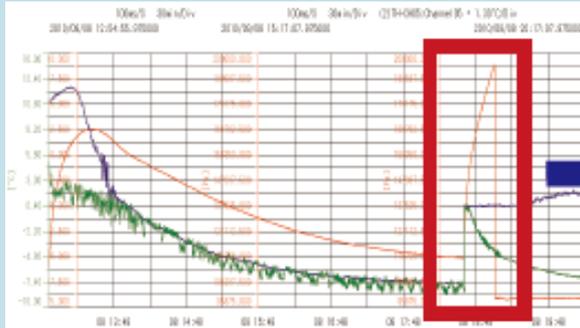
$t$  : *time*(時間)

# 炭酸水の冷却結晶化実験

吉開裕亮(現気象庁) 君卒論

- 冷却と結晶化
- 結晶化とガスの挙動
- 増圧の要因
- 噴出減圧と結晶化

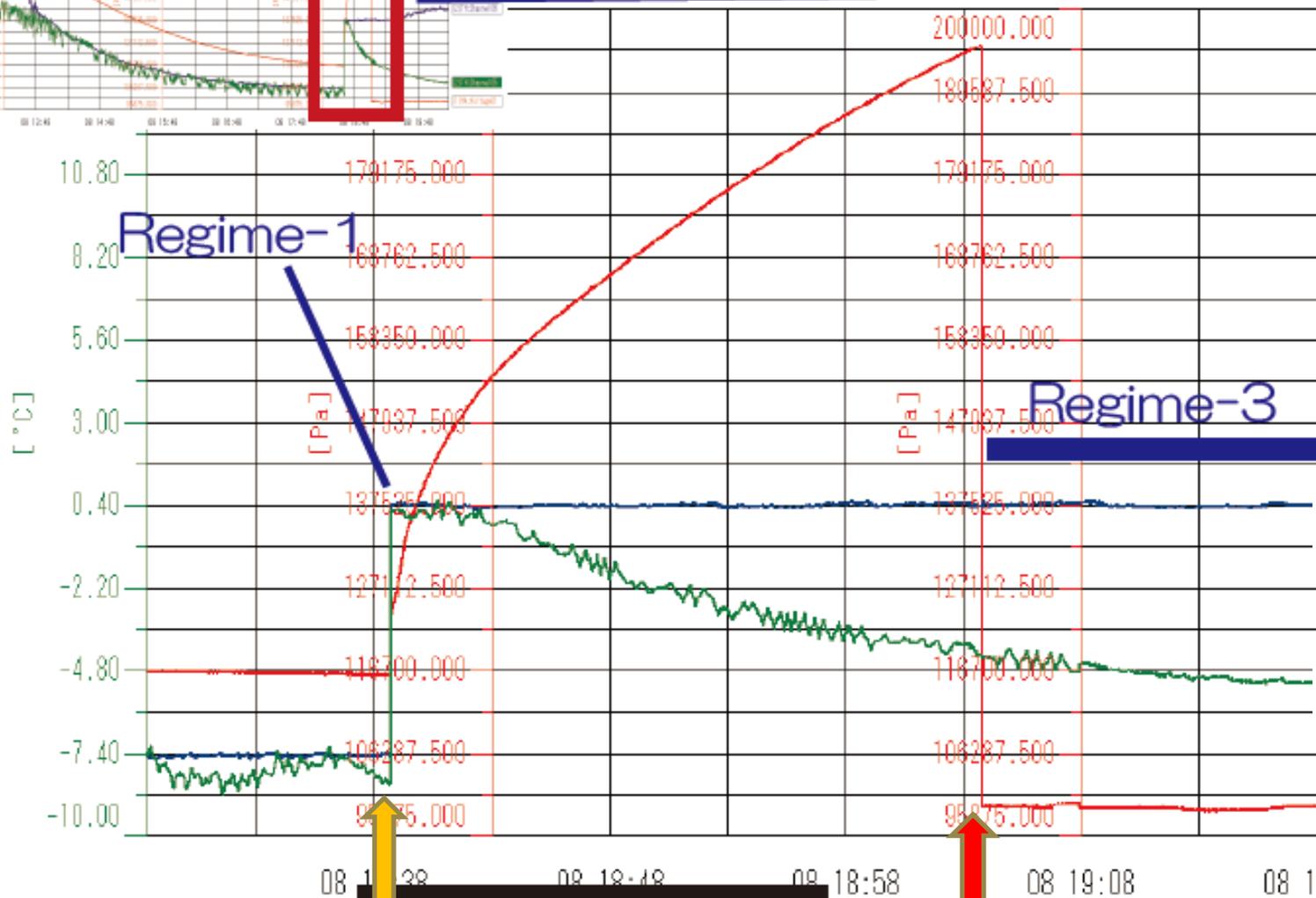




5min/Div (2)TH-CH05:Channel05 = 1.30°C/Div

Regime-2

2010/09/08 19:18:37.975000



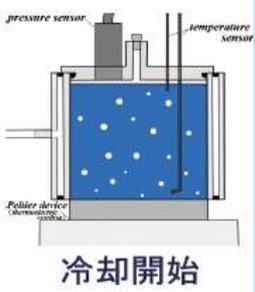
上面温度

底面温度

压力

結晶化開始

Eruption

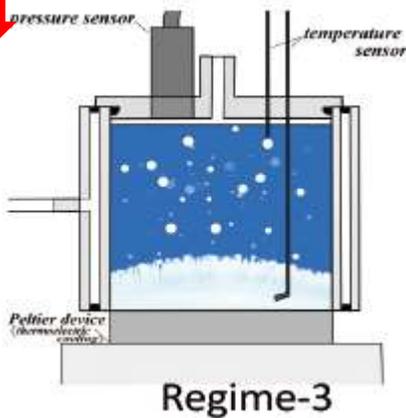
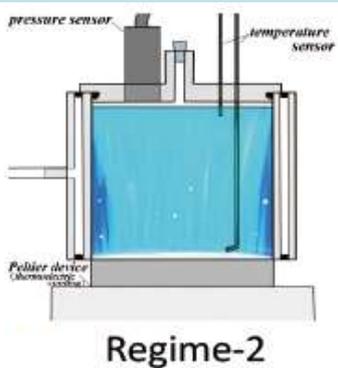
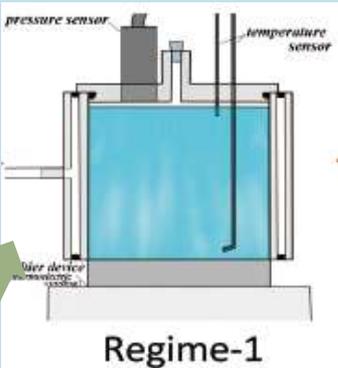


Regime-1  
過冷却結晶化  
(氷A)

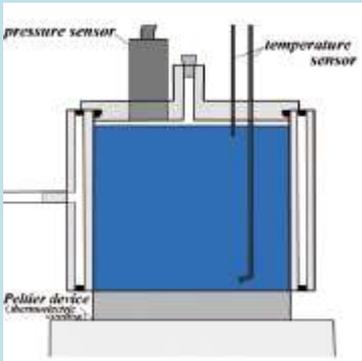
Regime-2  
氷Aの融解  
氷Bの結晶化

Regime-3  
氷Cの結晶化

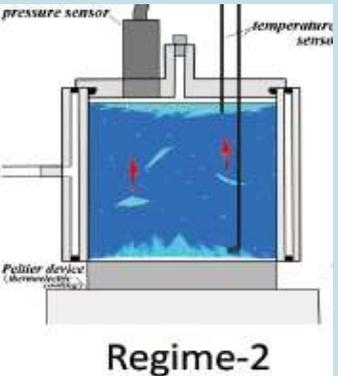
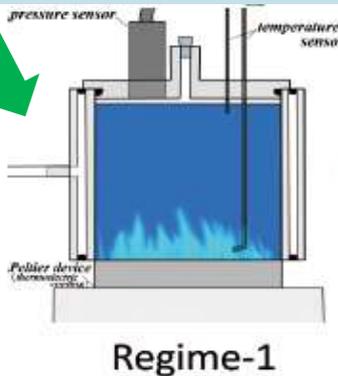
Eruption



過冷却度:大

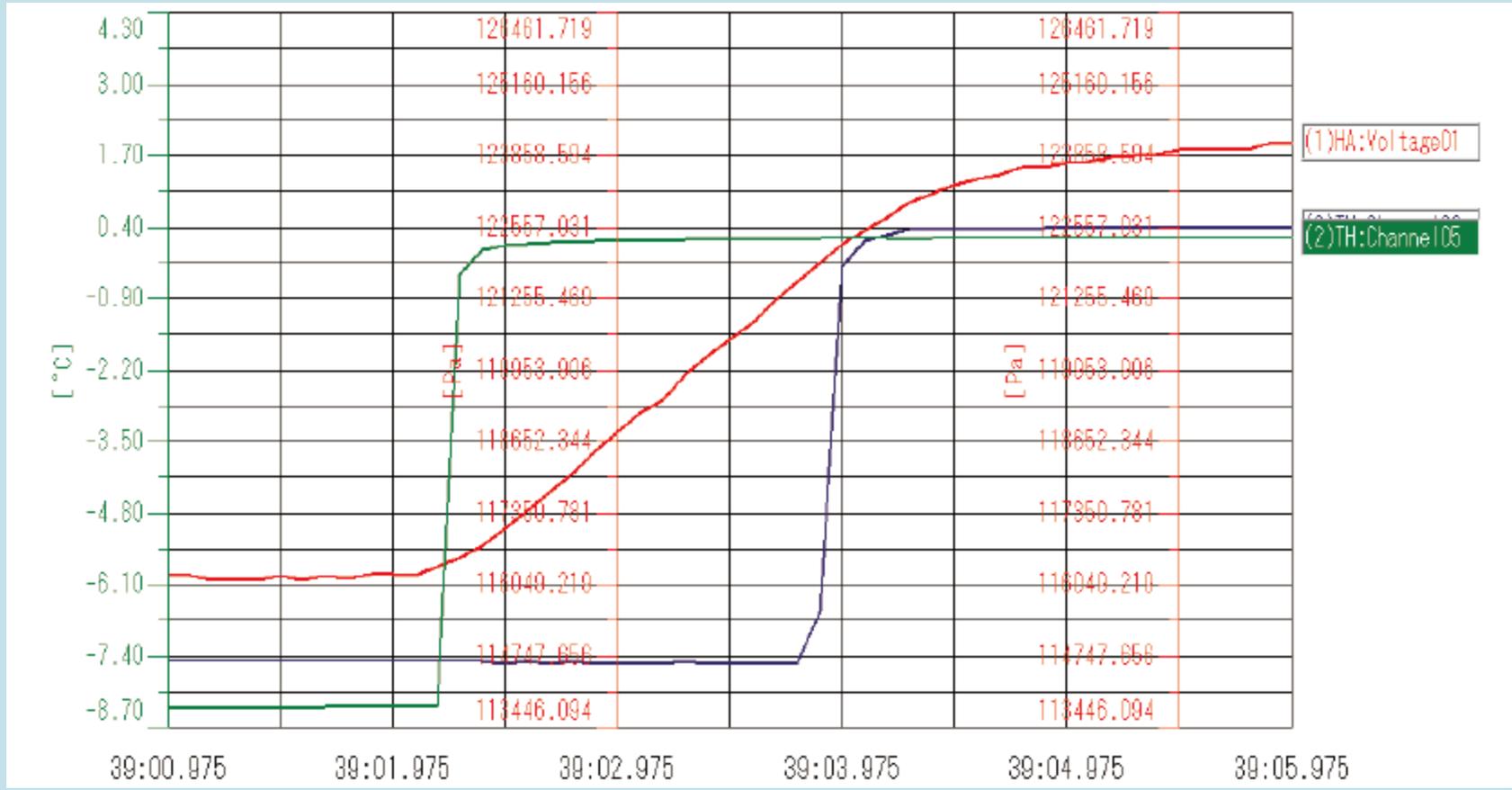


過冷却度:小  
(擾乱を与える)



過冷却結晶化(氷Aの生成) ムービー18秒

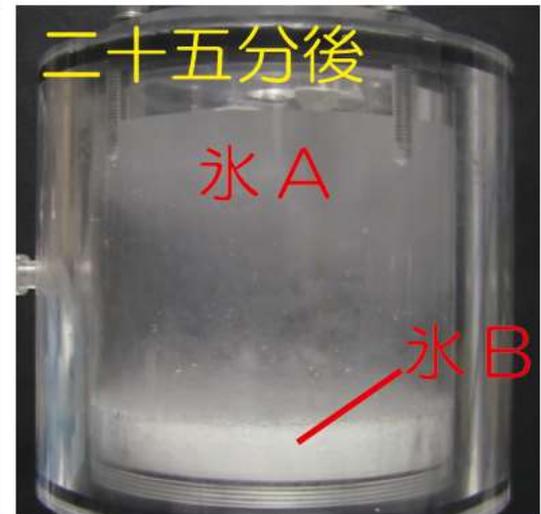
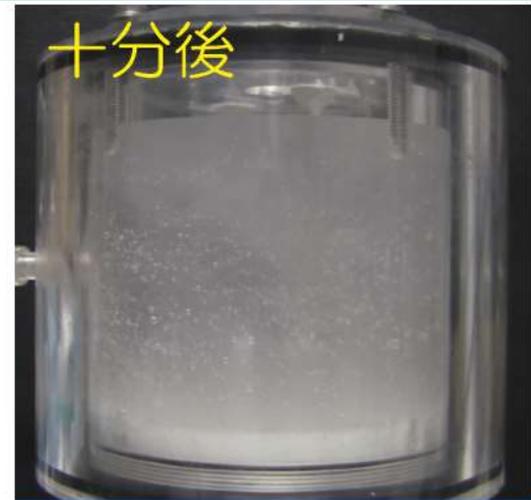
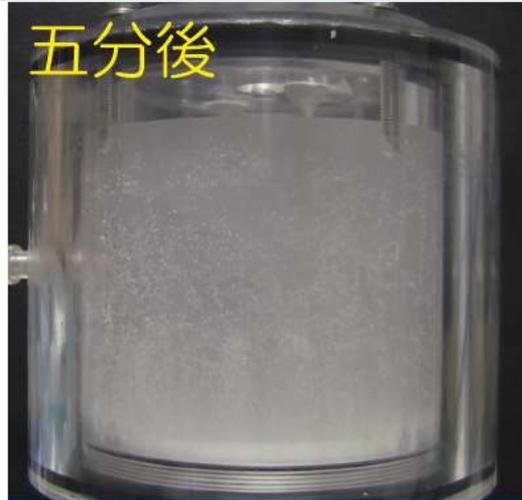
Regime-1



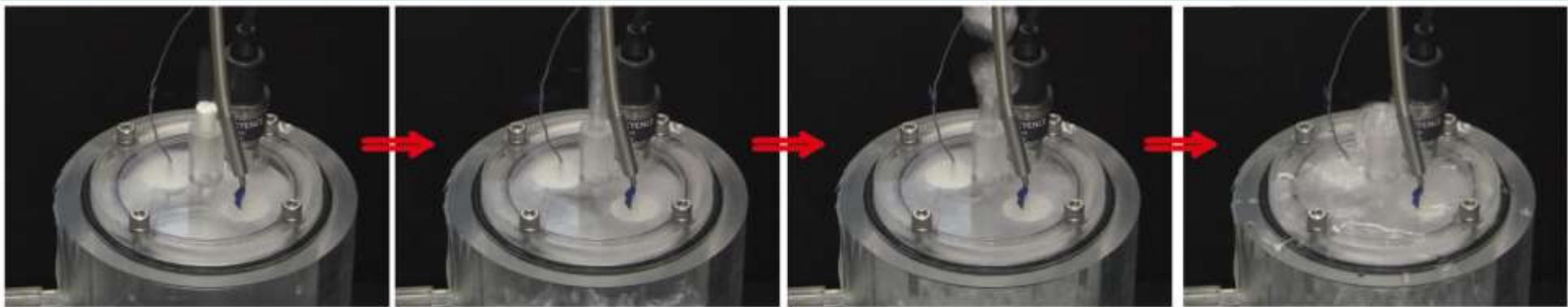
Time (min:sec.ms)

# 氷Aの融解と平衡結晶化(氷Bの生成) 増圧ステージ

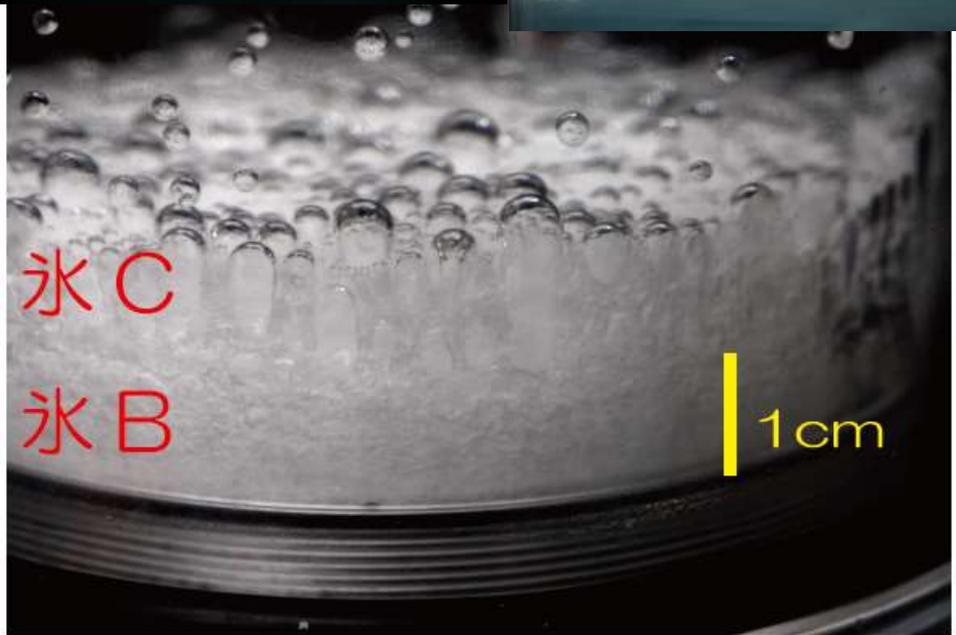
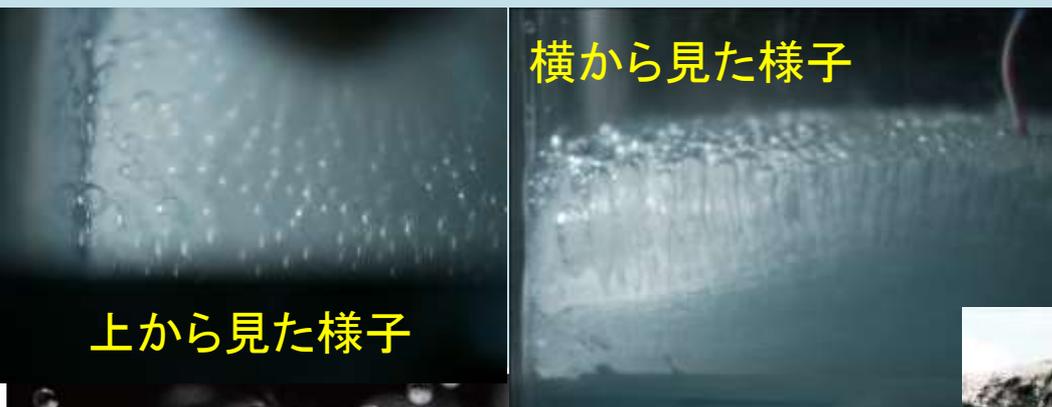
Regime-2



# Eruption stage



ムービー



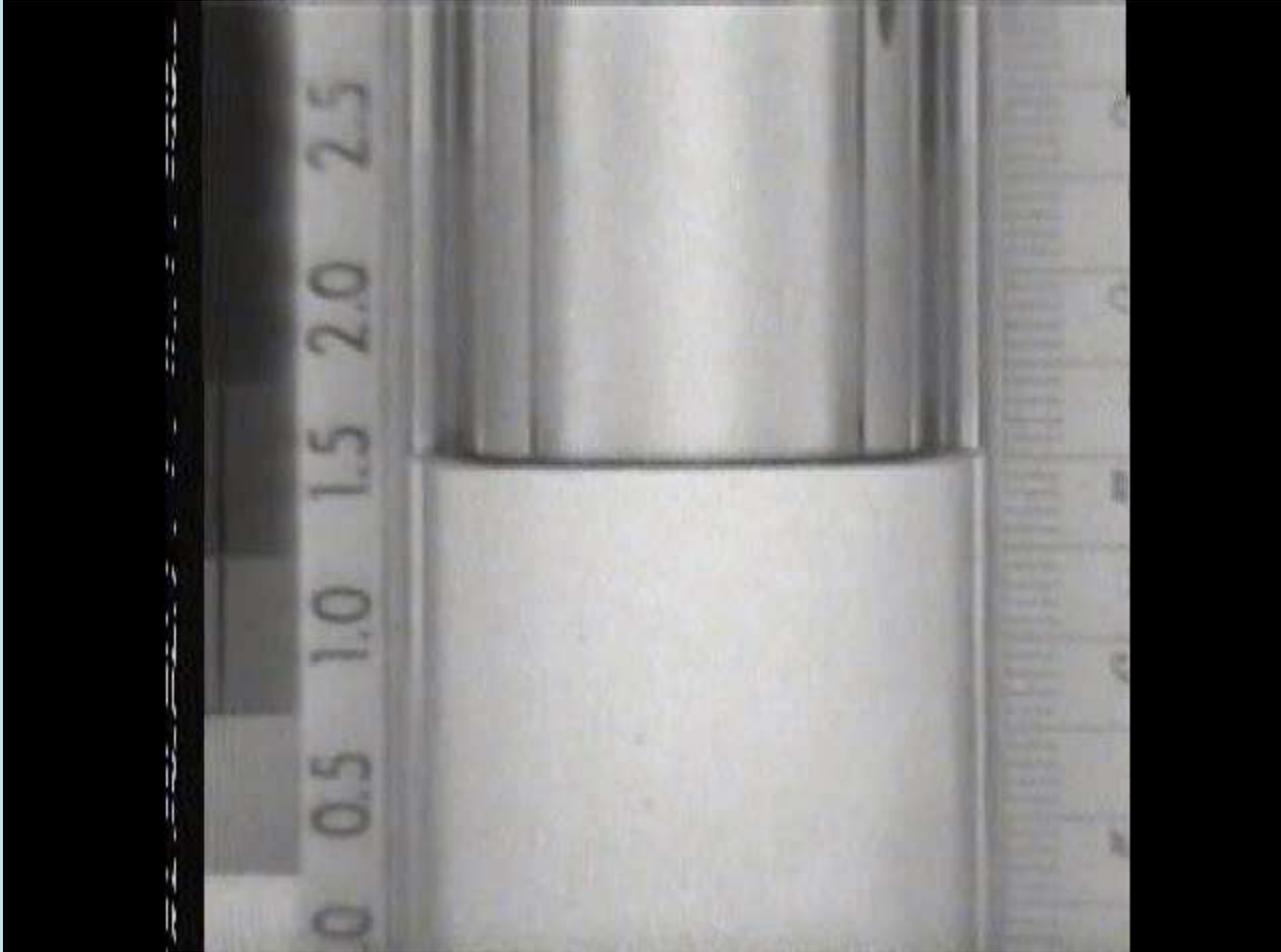
Rhum, Scotland



Hillの実験1 ( $P_0=5.67\text{bar}$ ,  $P_A=0\text{bar}$ )

# 最も爆発的な噴火

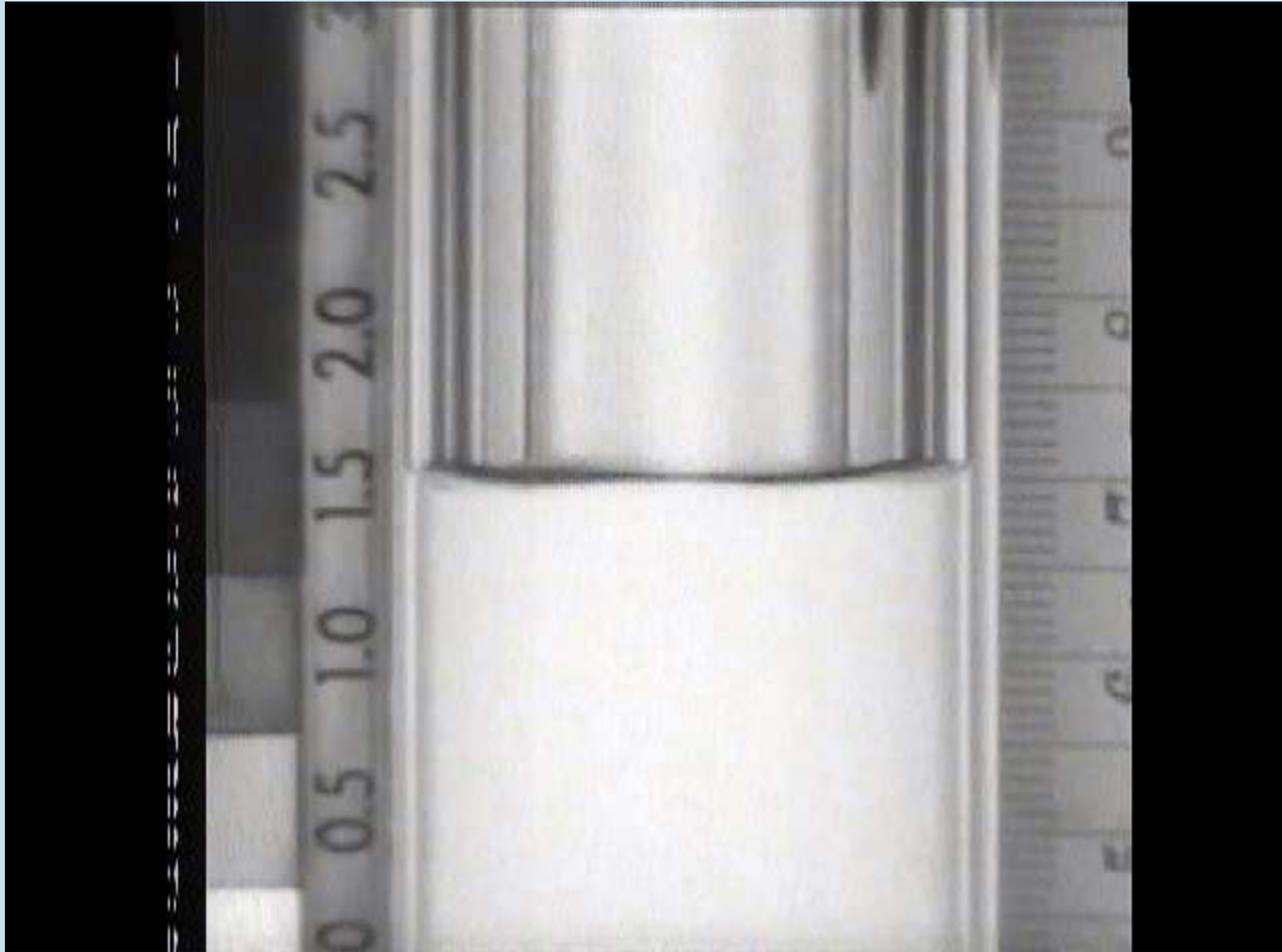
Fleon



$1\text{cm}/15\text{ms}=0.015\text{秒}$

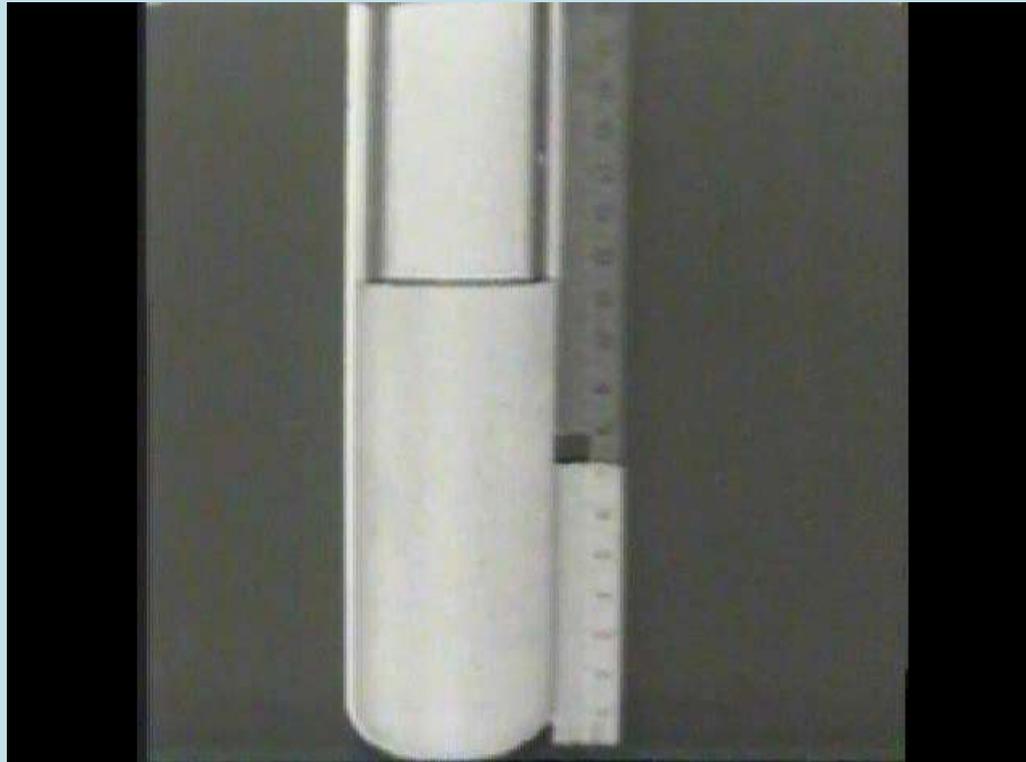
初期 $10^8\text{Pa/s}$ で液体は0気圧に  
その後、1気圧に維持されている

# Hillの実験2 ( $P_0=1.82\text{bar}$ , $P_A=1/3P_0$ )



# Maderの実験1 ( $P_0=6.54\text{bar}$ , $P_A=0.07\text{bar}$ )

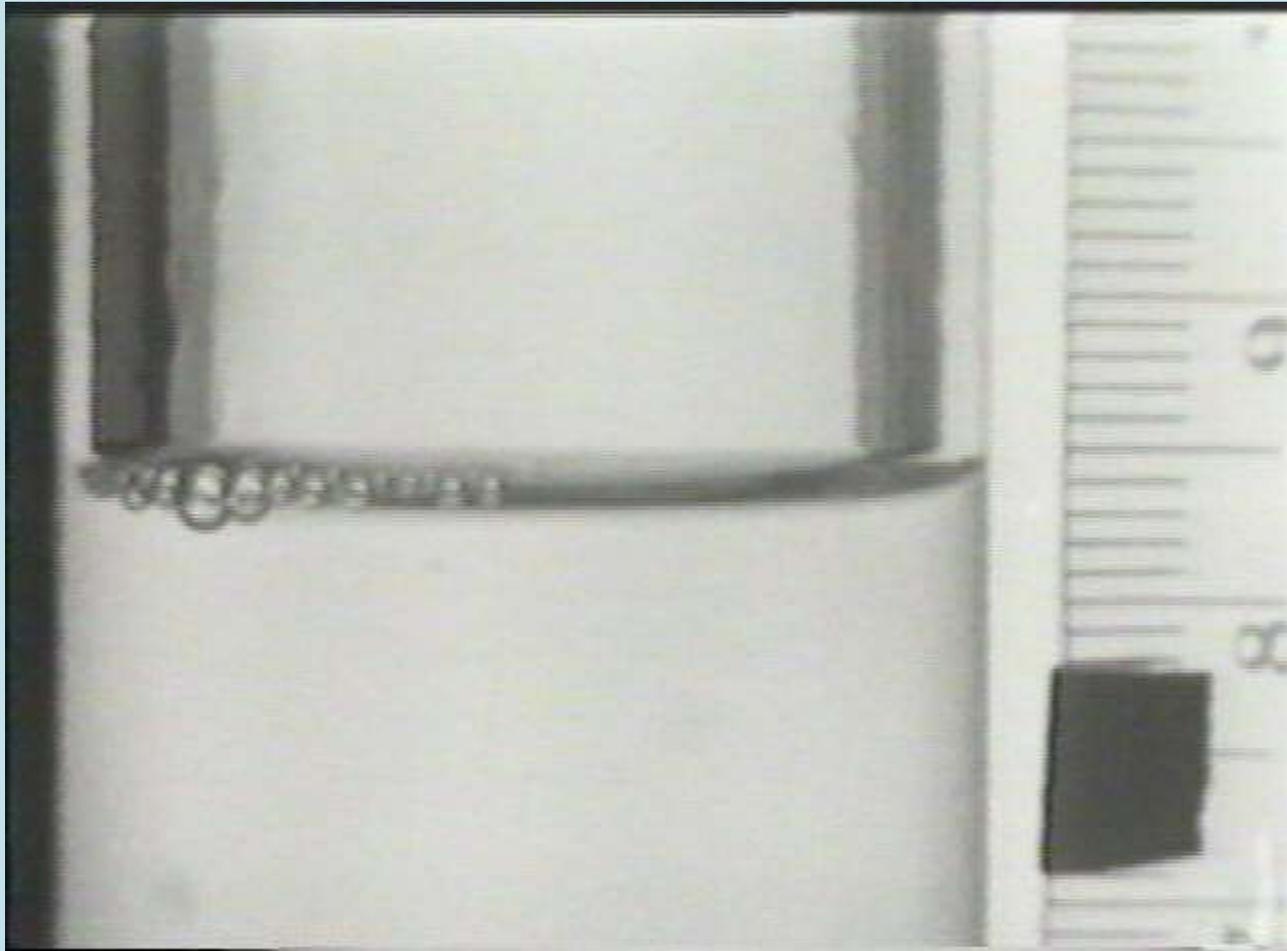
Viscous liquid with CO<sub>2</sub>



Maderの実験2 ( $P_0=4.96\text{bar}$ ,  $P_A=0.11\text{bar}$ )

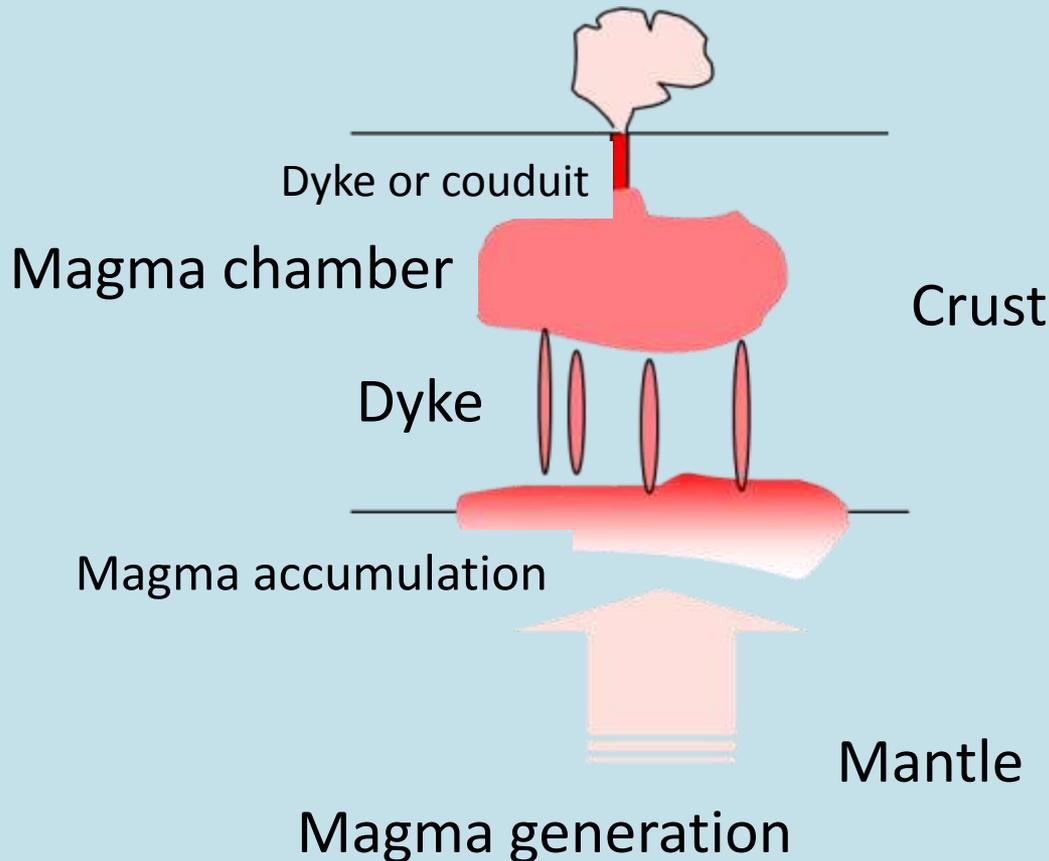
# 気泡流

Viscous liquid with CO<sub>2</sub>

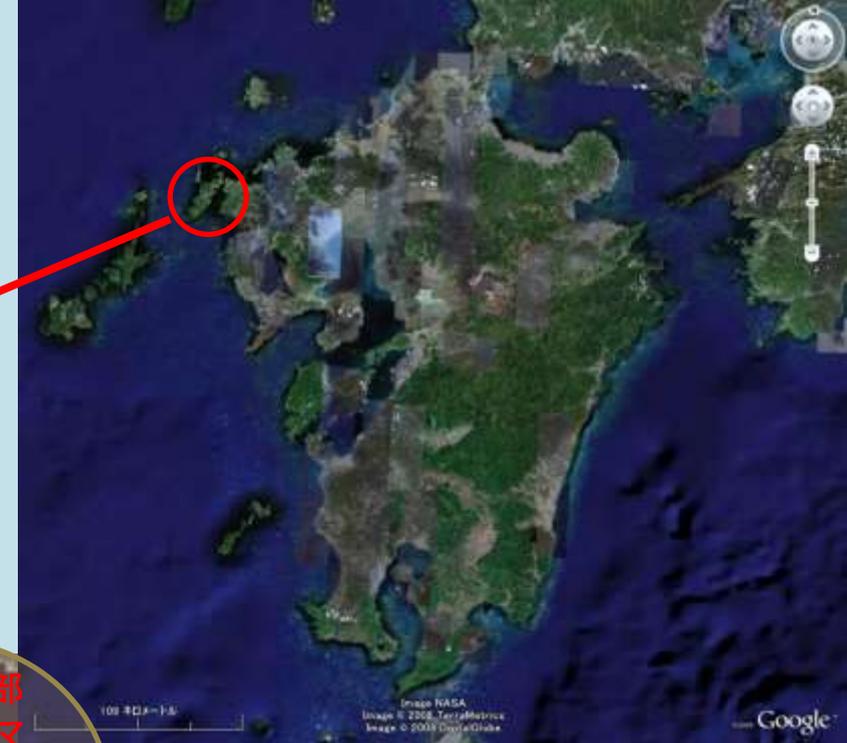
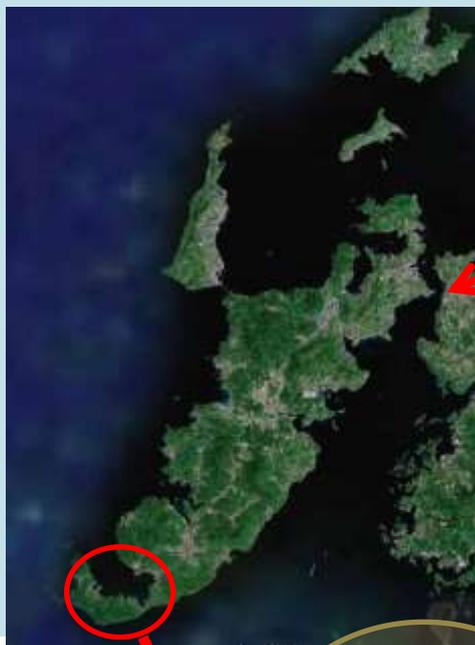


# Transportation of magmas in the crust

## dyke & magma chamber



# 岩脈 (dyke)



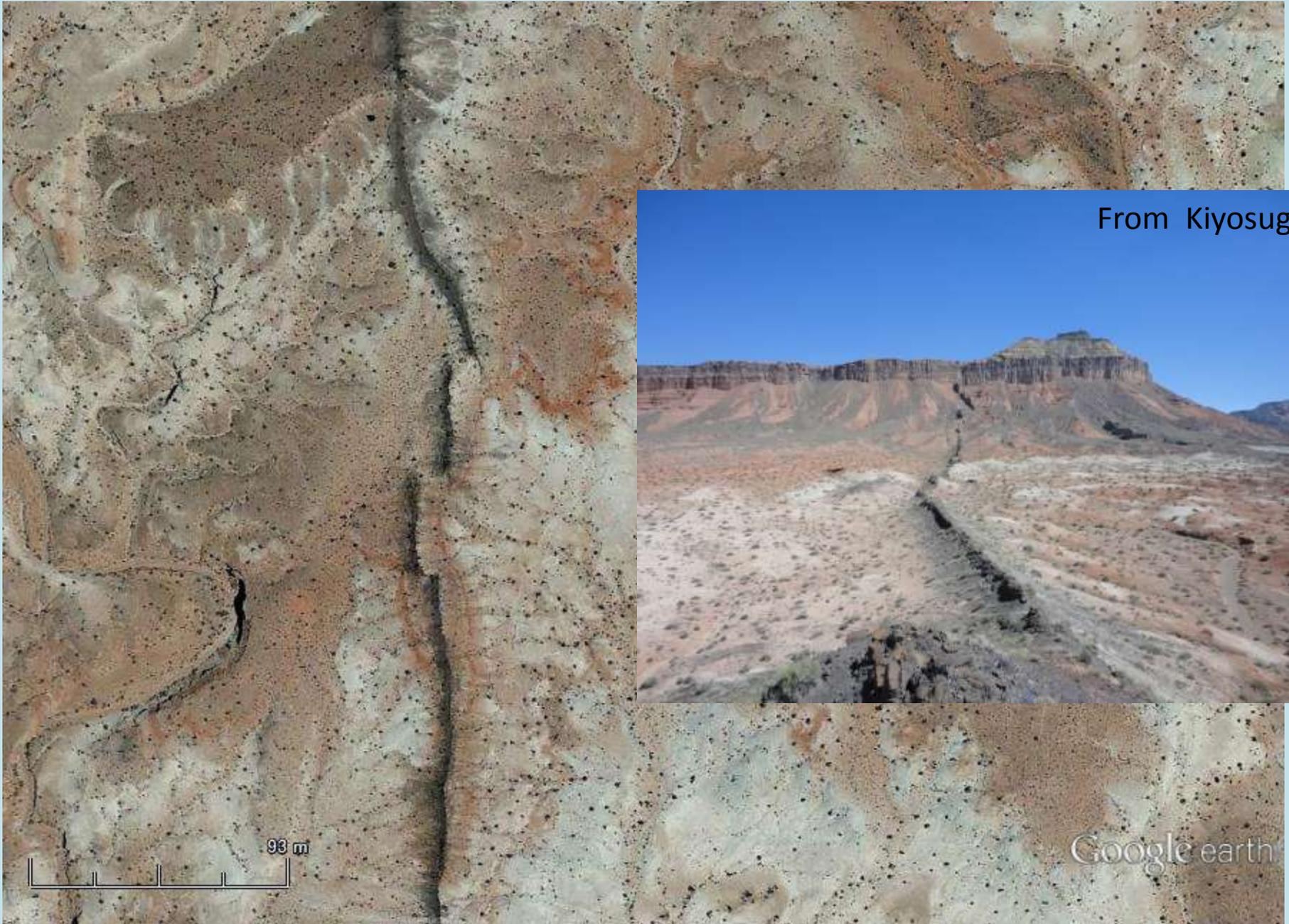
この中心部分の下にマグマだまりがあり、そこから放射状に岩脈が出た

こういう突き出たところは次のスライドのような岩脈





Google Earth  
38.593998, -111.114714



From Kiyosugi

Google earth

93 m



マグマだまりについて

# マグマだまりの存在の証拠

表 3.1 マグマ溜りの存在とその性質を示す証拠. [中村, 1975 による]

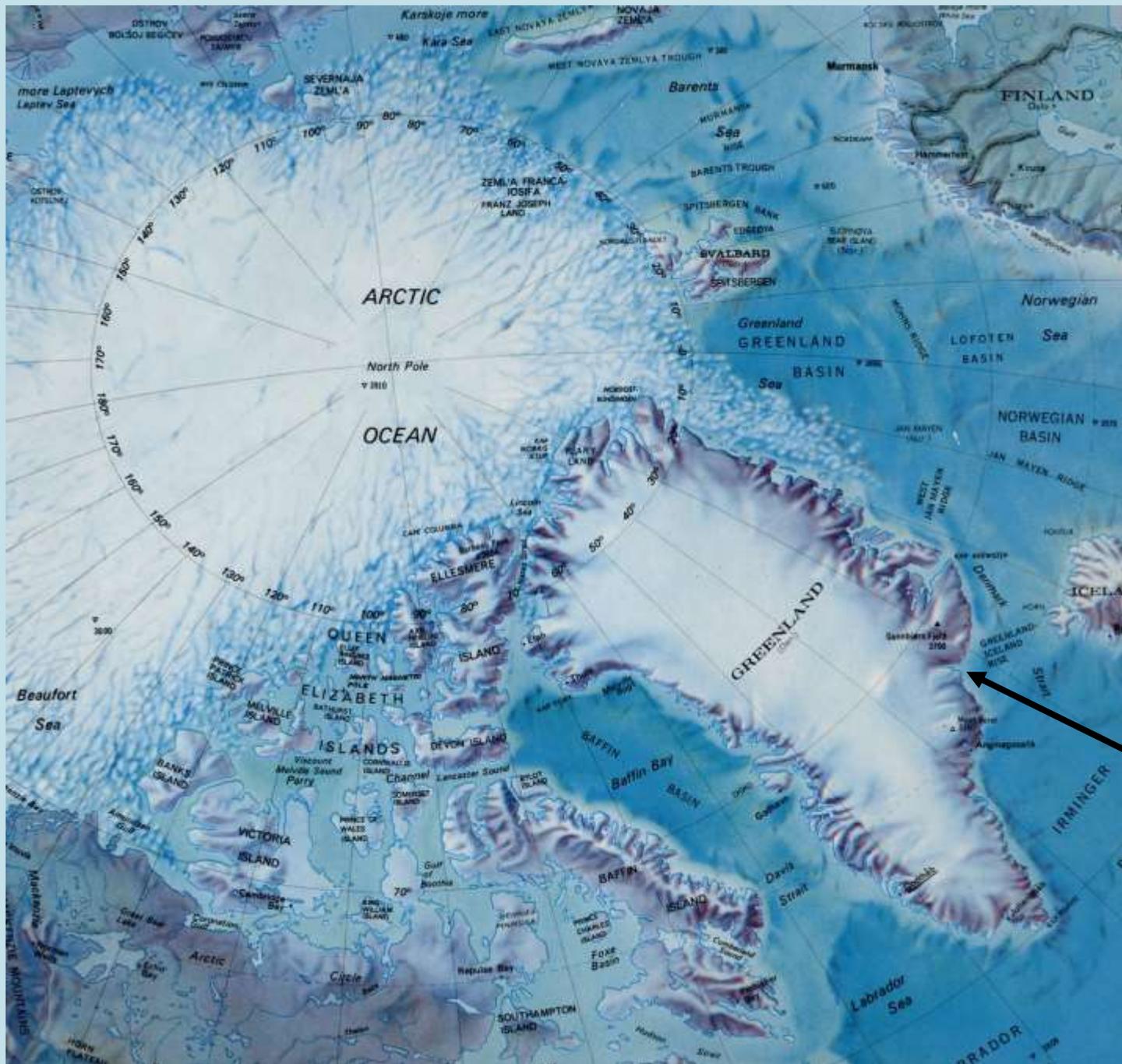
情報の種類	事 項
A (D)	1. 短時間に大量のマグマが噴出する.
A	2. 複成火山における噴火の間欠的繰り返し.
A E	3. 1回の噴火で噴出物の化学組成および鉱物組成が変化する.
(A) (D)	4. 大陥没カルデラの存在.
A B C D E	5. 浸食開析されたかつての火山地域にある大深成岩体.
A B	6. リングダイクとコーンシート.
A B	7. 火山噴出物中の捕獲岩のパイロ変成作用.
A (C)	8. 造山帯の中心火山と台地玄武岩との間にみられる分化トレンドの相違.
A E	9. 小貫入岩体の組成の不均一性.
B	10. 鉱物の相平衡を用いた圧力の推定.
(B)(C)	11. 火山周辺での等震度線の不規則性.
B D	12. 噴火に伴う重力変化.
B	13. 火山の地下の温度勾配.
A D	14. 潮汐力によるマグマのしほり出しと吸い込み.
A B D	15. 噴火に伴う地殻変動 (インフレーション・デフレーション).
B D	16. 噴火に伴う磁場変化.
B C D	17. 地震の多い活火山地域の中の無地震帯.
A B C D	18. S波の遮蔽とP波の高周波成分の減衰.
A D	19. 火山性微動.

A : 存在, B : 深さ, C : 形, D : 体積, E : 内部構造.

マグマだまりの化石

Skaergaard Layered Intrusion

層状分化岩体の例



Skaergaard

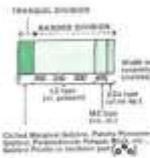


 Gabbrofeld

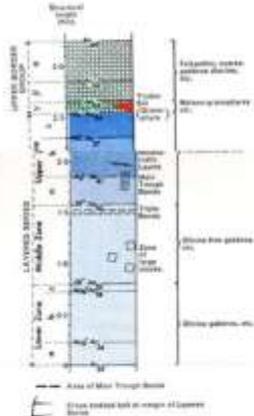
Image © 2008 DigitalGlobe  
Image © 2008 TerraMetrics

 Brodretoppen © 2006 Google™

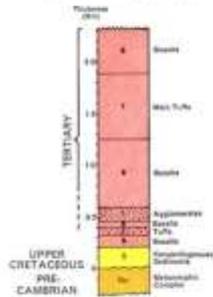
**LEGEND**  
**SKAERGAARD INTRUSION**  
 Marginal Border Group



**Layered Series and Upper Border Group**



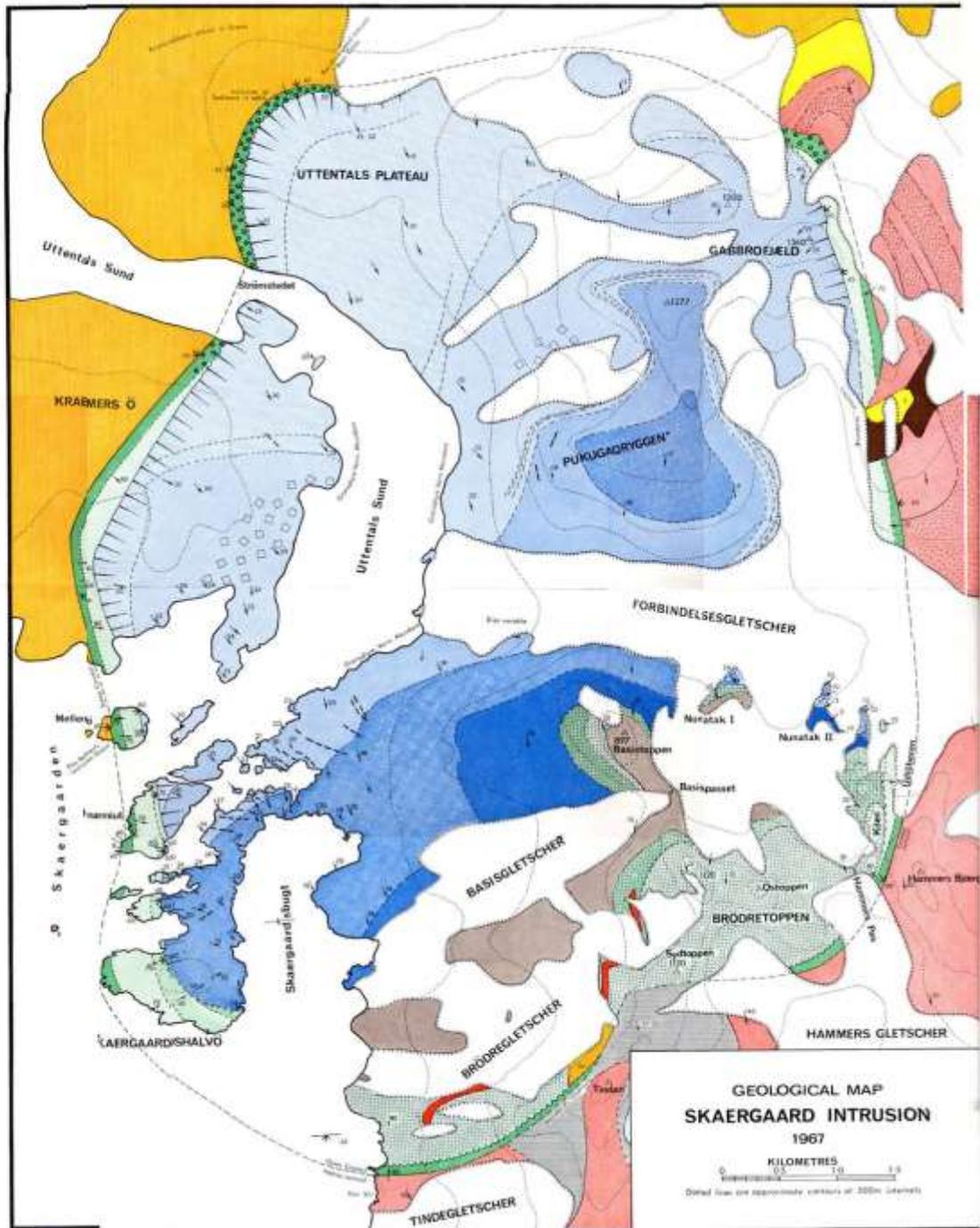
**COUNTRY ROCKS**



**POST SKAERGAARD TERTIARY INTRUSIONS**



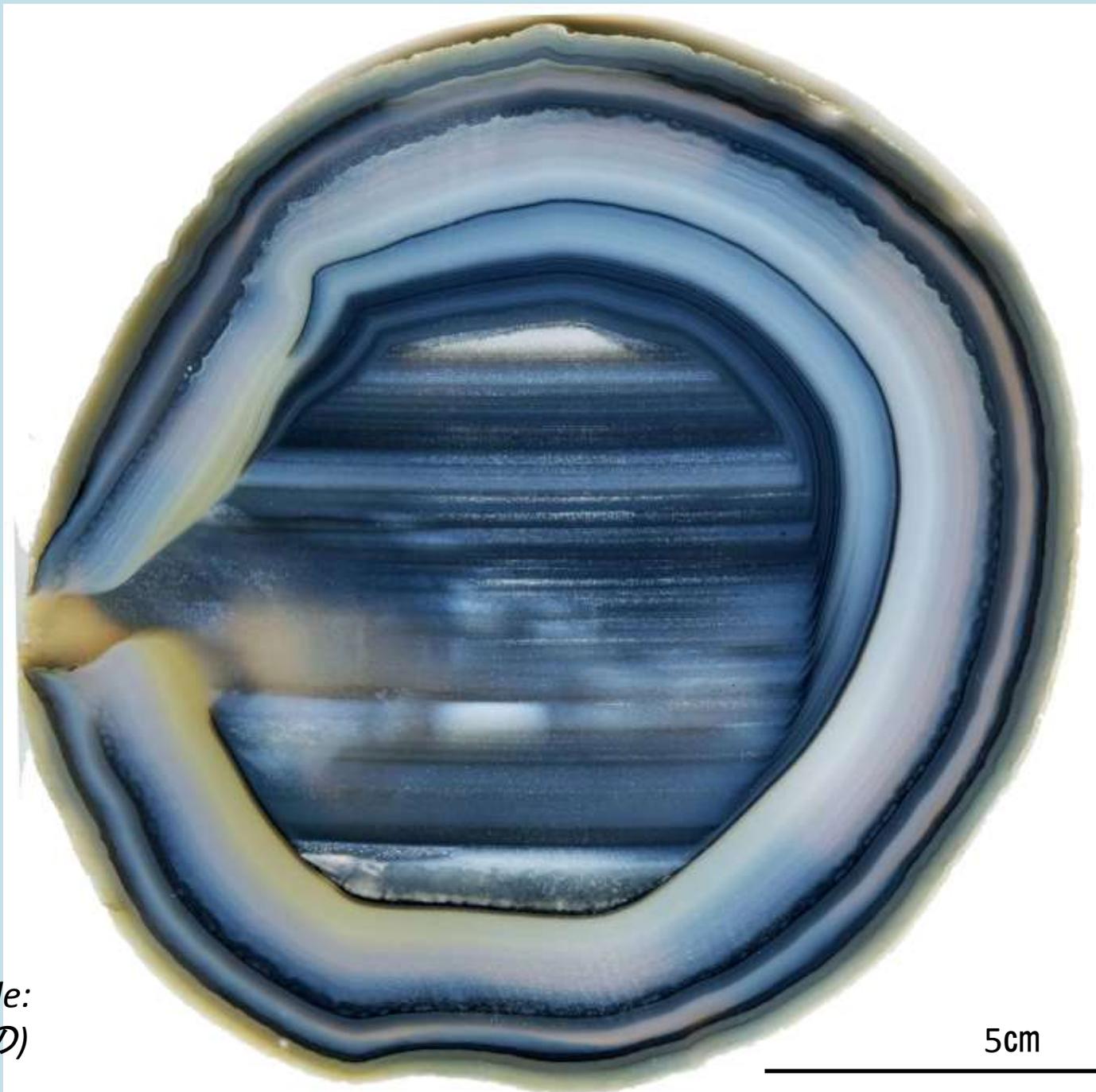
- Observed Boundaries
- - - Inferred Boundaries
- Merging Boundaries
- ∠ Dip of Banding, Layering and Basalts
- κ Dip of Contacts



**GEOLOGICAL MAP**  
**SKAERGAARD INTRUSION**  
 1967

KILOMETRES  
 0 1.0 2.0

Dotted lines are approximate contours at 200m intervals



メノウ  
Lithophysa  
(晶洞Geode:  
中空のもの)

5cm