

# 地質学的手法で見た溶岩流の破壊の痕跡

Tuffen et al. (2003)とTuffen and Dingwell (2005)の  
レビューとその背景

Keywords: dike (岩脈), tuffisite vein (火砕岩脈),  
share stress (剪断応力), brittle, ductile deformation, strain rate (歪み速度),  
healing (annealing, sintering)

火山センター 野口 聡



# 火山帯の地下構造

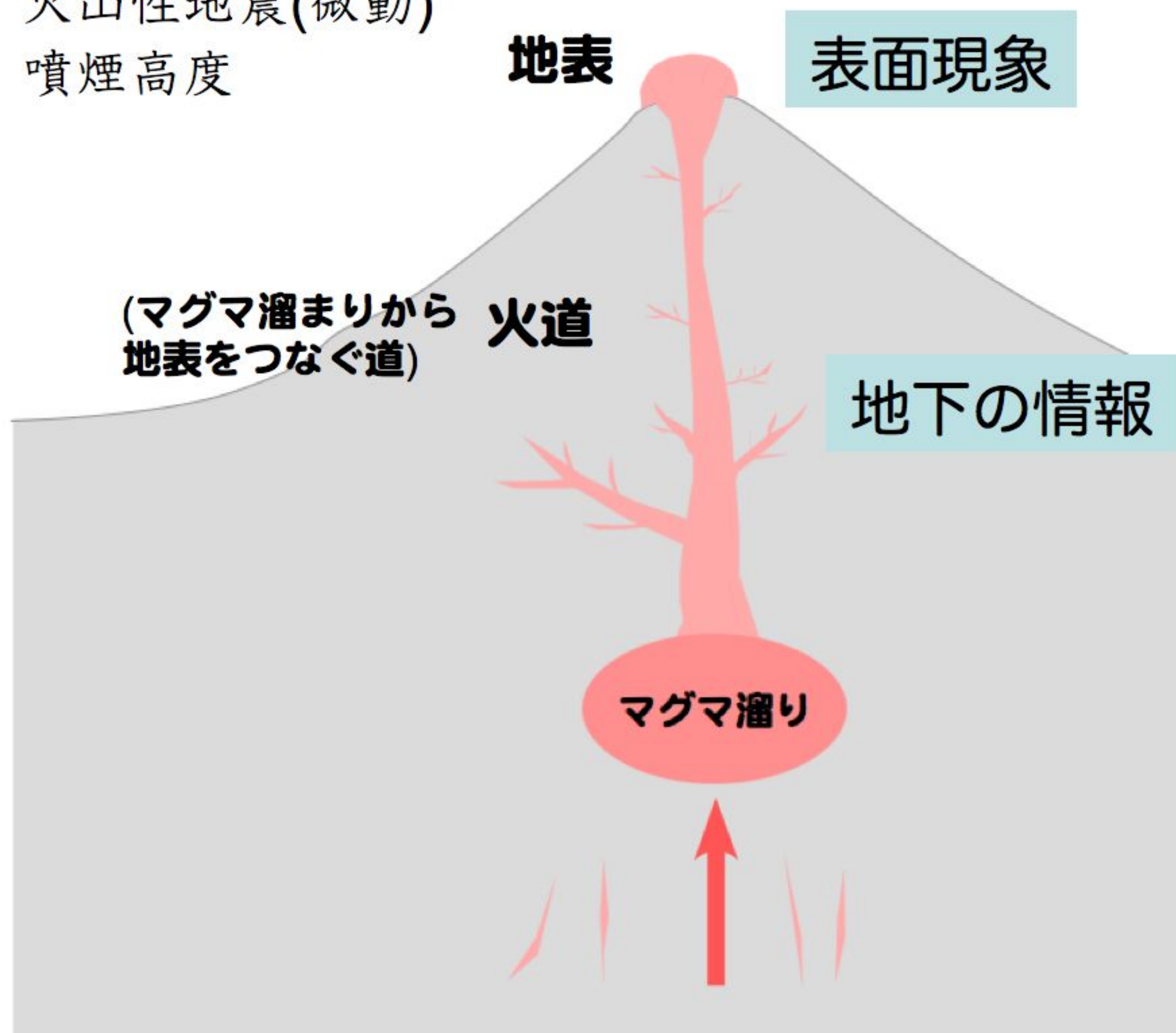
マグマの発生から上昇まで

## 観測情報

マグマ噴出率  
地殻変動  
火山性地震(微動)  
噴煙高度

## 地質学的情報

地表に放出された噴出物の解析  
地表に露出した火道断面の観察



物質科学(地質学)的手法からどこまで  
マグマの運動を理解することができるか?

これまでの物質科学研究のレビュー

1. 火道中のマグマの流体力学的振る舞い  
噴火様式の多様性の成因について  
・噴出物の解析  
・岩脈の露頭観察
2. マグマ供給系の理解  
マグマの発生・上昇、マグマ溜りの蓄積

マグマの発生・上昇



# 今日と来週の話

Tuffenの論文までの道筋

## 1. 火山噴火のダイナミクスについて

これまでの理論、実験、物質科学的研究について

物質科学研究のレビュー

火道壁付近の剪断応力

## 2. 火道の研究 (地質学的研究)

岩脈(火道)と火砕岩脈(tuffisite vein)に関するこれまでの研究

実際の火道の様子

火道掘削と実際のコアの観察

Inyo domeとUnzen conduit drilling

岩脈と火砕岩脈の観察

## 3. クラックの形成

脆性破壊と塑性変形: アナログ実験 割れ目噴火の形成 (定性的な話)

脆性破壊と塑性緩和

## 4. Tuffenらの論文

Tuffen et al. (2003)

Tuffen and Dingwell, (2005)のレビュー

(Repeated Fracture and Healing [RFH] processについて)

地震発生とRFH process

断層の脆性破壊と塑性変形



# 火山噴火のダイナミクス~これまで



Unzen 1990-1995

太田一也撮影



St. Helens 1980

USGS

**火山噴火:** マグマと火山ガスが様々な量比、タイミングで噴出する複雑な現象

## 火山噴火の噴火様式

揮発性物質を含むマグマの振る舞い



## マグマの発泡、脱ガスの競合

Jaupart and Allegre (1991); Woods and Koyaguchi (1994)  
マグマの上昇に伴う発泡 → 粘性、水の拡散に強く依存する  
結晶化による粘性増加 → 噴出率を大きく変動させる  
Melnik and Sparks (1999); Wylie et al. (1999)

理論的研究が進んでいる

## Eruption style

噴出物の情報

爆発的な噴火  
(軽石などの噴出)

脱ガスが不完全だと・・・

溢流型噴火 十分な脱ガス  
(溶岩流の流出)

火道内部の情報の推定  
噴火のダイナミクスの理解  
(物質科学研究)

Bubble

Crystal

連結をした気泡を通り  
脱ガス

結晶の成長  
(タイムスケールの情報  
を保持している)

気泡の成長・合体

結晶化(核形成)

水の析出(発泡)  
→ liquidusの上昇

気泡の核形成

マグマ溜まり  
揮発性成分( $H_2O$ )



# 減圧発泡・結晶化実験

## マグマ物質を用いた減圧発泡・脱ガス実験

- ・発泡・脱ガスに関する素過程  
気泡の合体プロセス、浸透脱ガスに関する研究  
多数

- ・マグマ浸透率と組織

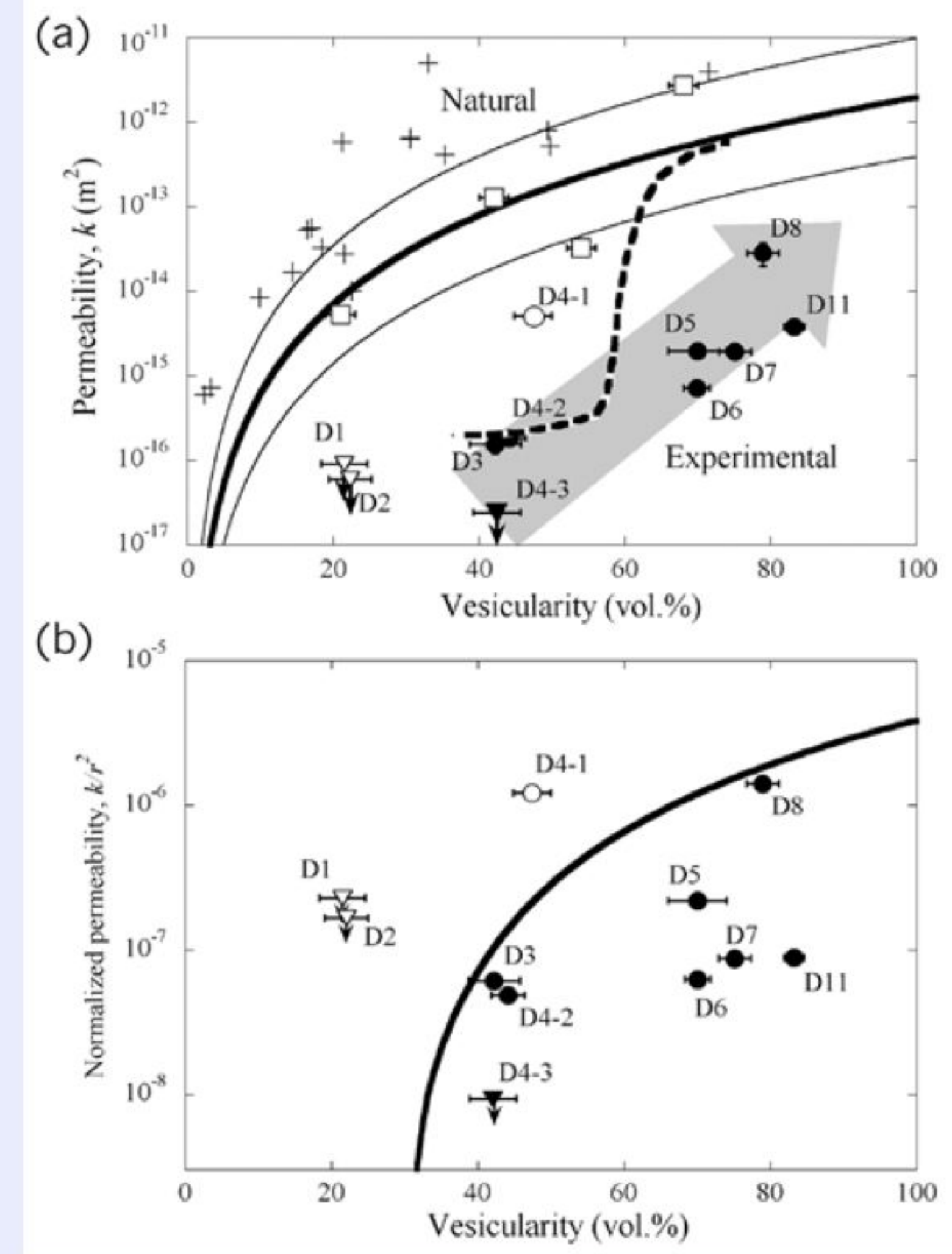
Saar and Manga, (1999); Takeuchi et al. (2005)

## 結晶化実験

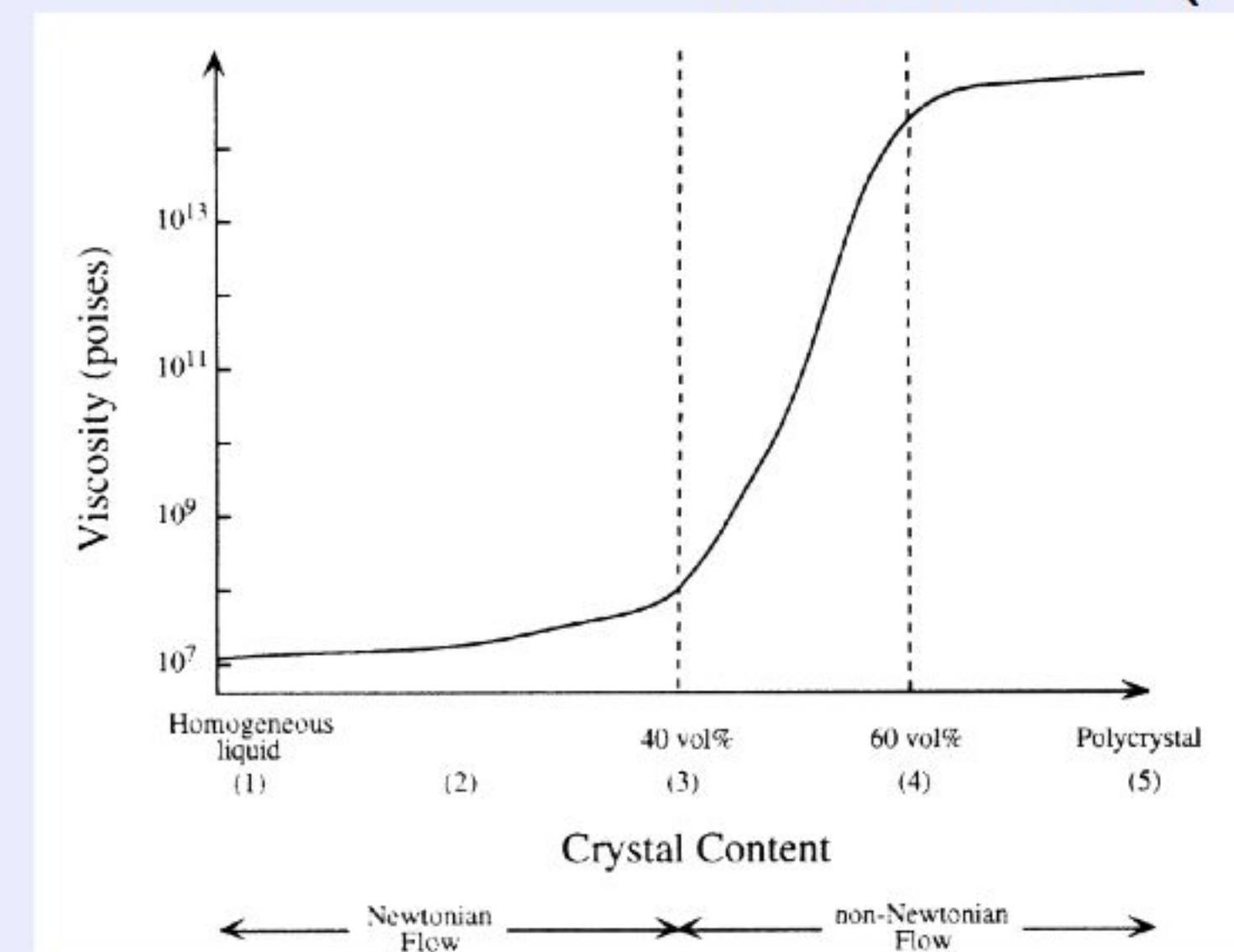
### 結晶化を与えるマグマのレオロジーの変化

- ・結晶化によるマグマ物性(粘性)の変化  
Lejune and Richet (1995)
- ・マイクロライトの結晶核形成・成長速度  
Hammer and Rutherford (2002); Couch et al. (2003)など

理論モデルとの検証が行われている



Takeuchi et al. (2005)



Lejune and Richet (1995)



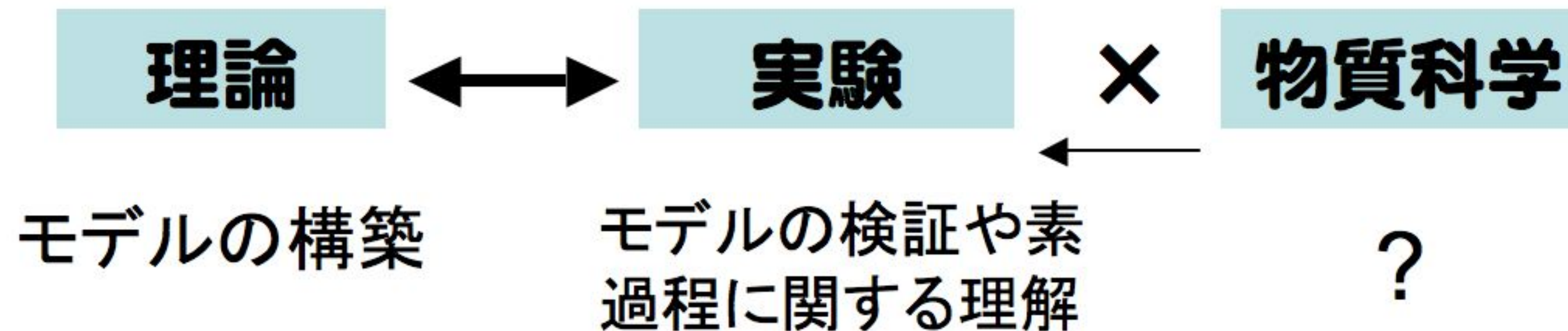
# 物質科学

上記の分野に比べて遅れをとっている

理由: 噴出物がマグマ上昇過程の最後の履歴しか保持していない  
堆積後に複雑なプロセスを経てマグマが固結する

噴出物の情報と地下の情報をそのまま結びつけるのが難しい

## 火山学の構図



天然の観察事実からの裏付けが圧倒的に乏しい



# 物質科学的手法

## 1. 火山噴出物の情報から地下のマグマの情報を推定する。

噴出物から噴火のダイナミクスについて制約を与えるような研究

1-1. マグマの上昇速度の推定 Rutherford and Hill, (1993)

1-2. 噴煙高度、マグマ噴出率、爆発地震などと噴出物の組織の関係

1-3. マグマ破砕時の圧力やtextureなどの解析から火道の流動分布を推定する。

## 2. 地表に露出した火道断面や掘削を行う。

精度の良い観察事実

2-1. 実際の火道や母岩(火道壁)の観察

マグマ供給系から脱ガス過程の振る舞いまで

2-2. 火道の掘削

Inyo dome, Eichelberger et al. (1986), Swanson et al. (1989), Heiken et al.(1989)

雲仙火山の掘削

Nakada et al. (2007), Goto et al. (2007), Noguchi et al.(2007)



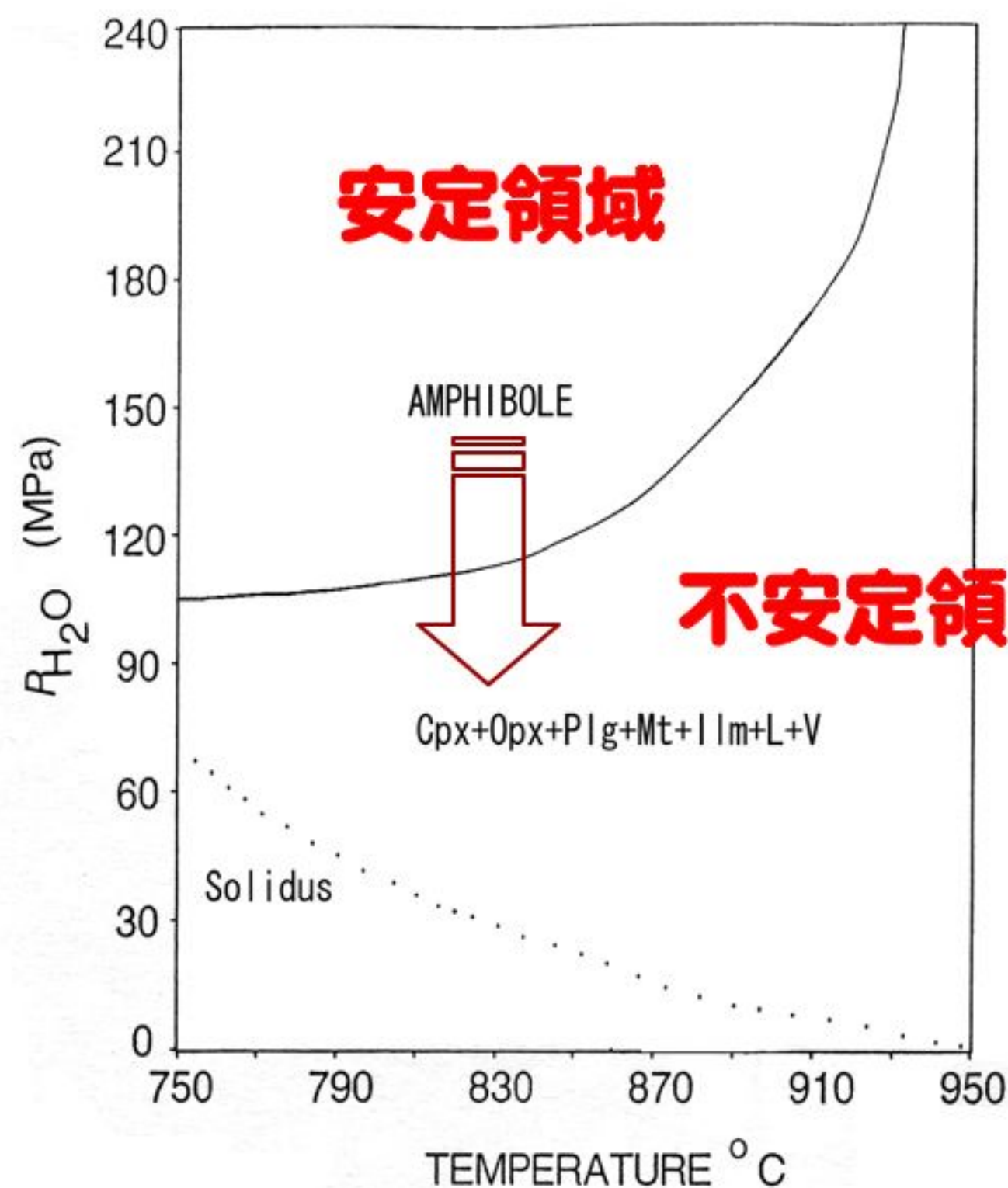
# 1. 火山噴出物から地下のマグマの情報を推定する

## 1-1. マグマの上昇速度

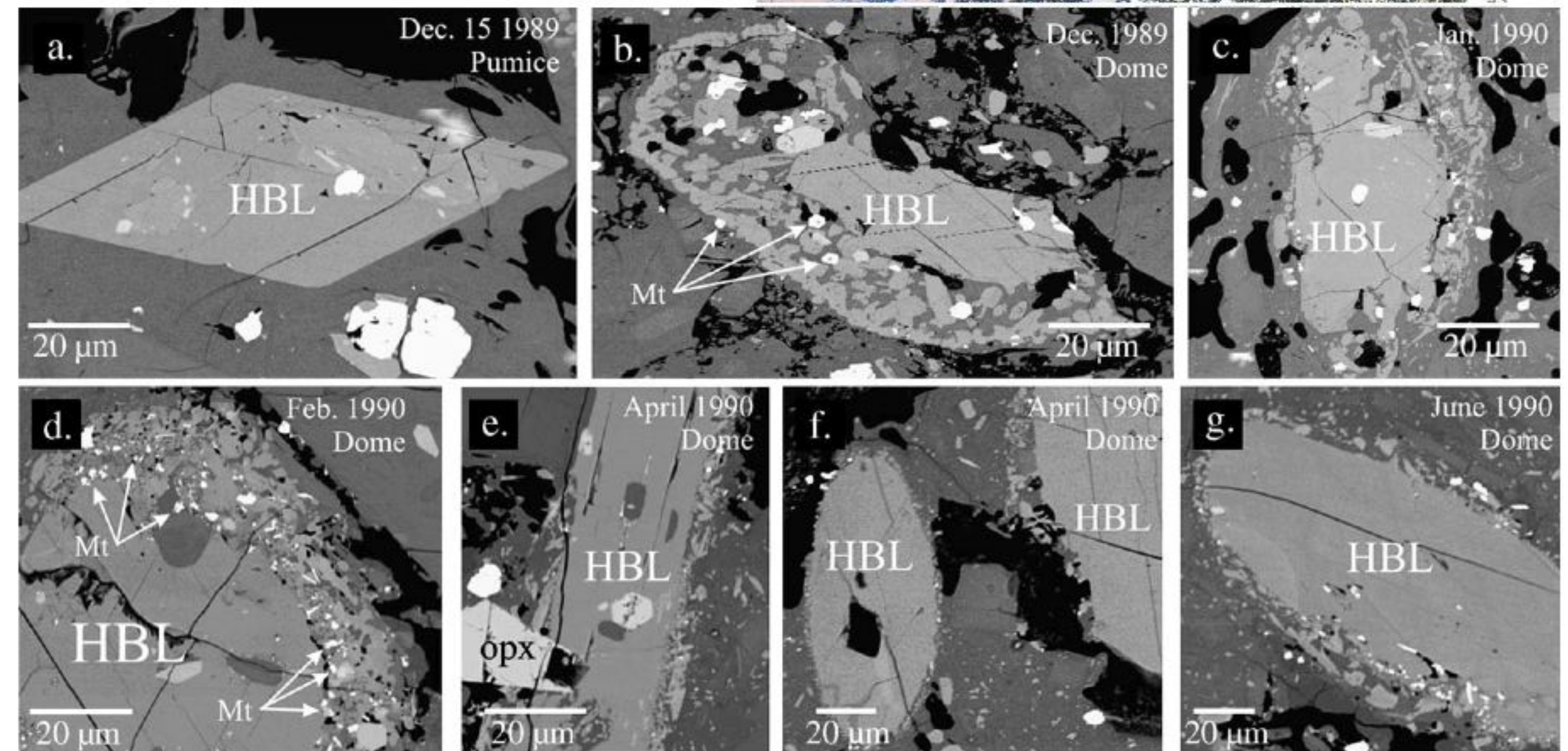
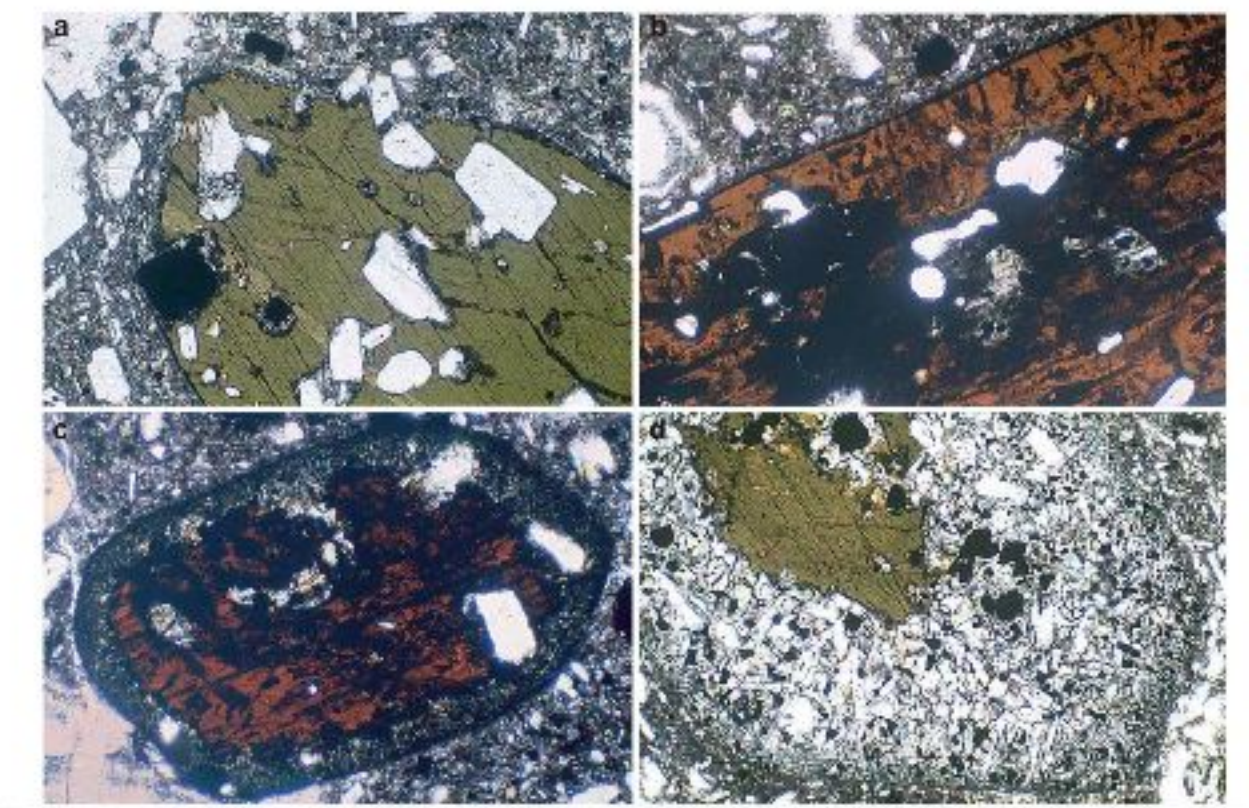
角閃石斑晶の反応縁リム幅から  
マグマの上昇速度を推定する

Rutherford and Hill, (1993); Devin and Rutherford,  
(1998); Buckley et al. (2007); その他多数

**実験から角閃石の反応縁リム幅の成長速度  
を見積もり、マグマの上昇速度を推定する**



amphibole stability field at St. Helens 1980  
Rutherford and Hill (1993)



Browne and Gardner, (2006)  
Buckley et al. 2007

## マグマの上昇速度

St. Helens: 9.7–18 mm/s Rutherford and Hill, (1993)  
Montserrat: 20 mm/s  
Black butte (dacite dome): 4–6 mm/s MacCanta et al. (2007)  
番外(地表のドームの噴出率と沸き出し口の面積から)  
Unzen 1991–1995 1–4 mm/s Nakada et al. (1995)

Breakdown rimが生成される条件(上昇速度が遅い)でのみ使える



# 1. 火山噴出物から地下のマグマの情報を推定する。

(火道壁の剪断)

## 1-2. 噴出物の情報からマグマの流動振る舞いについて

Polacci et al. (2001): Polacci (2005); Castro and Mercer, (2004); Noguchi et al. (2006)

### 高粘性マグマにおける噴火噴出物の組織の多様性について

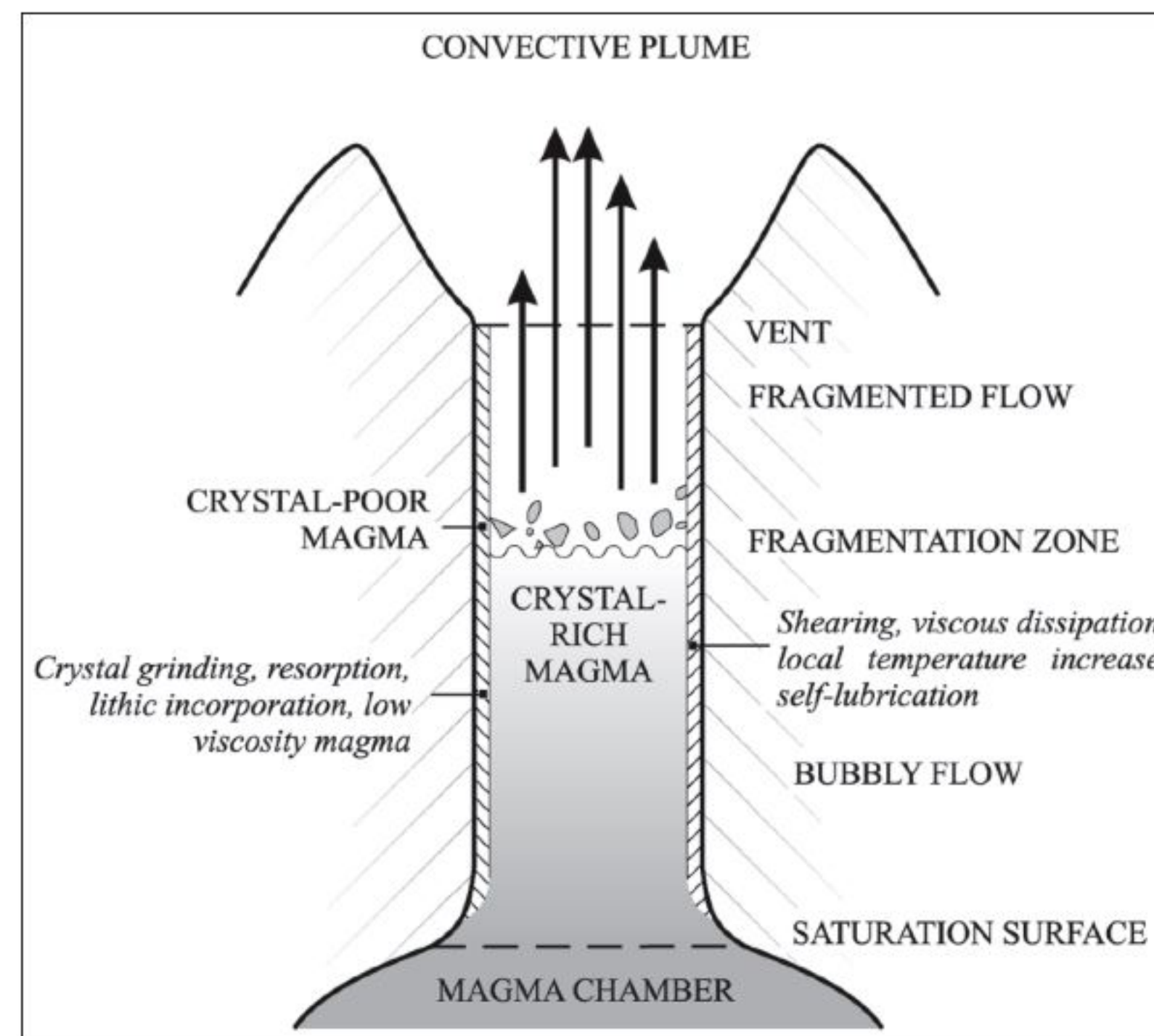
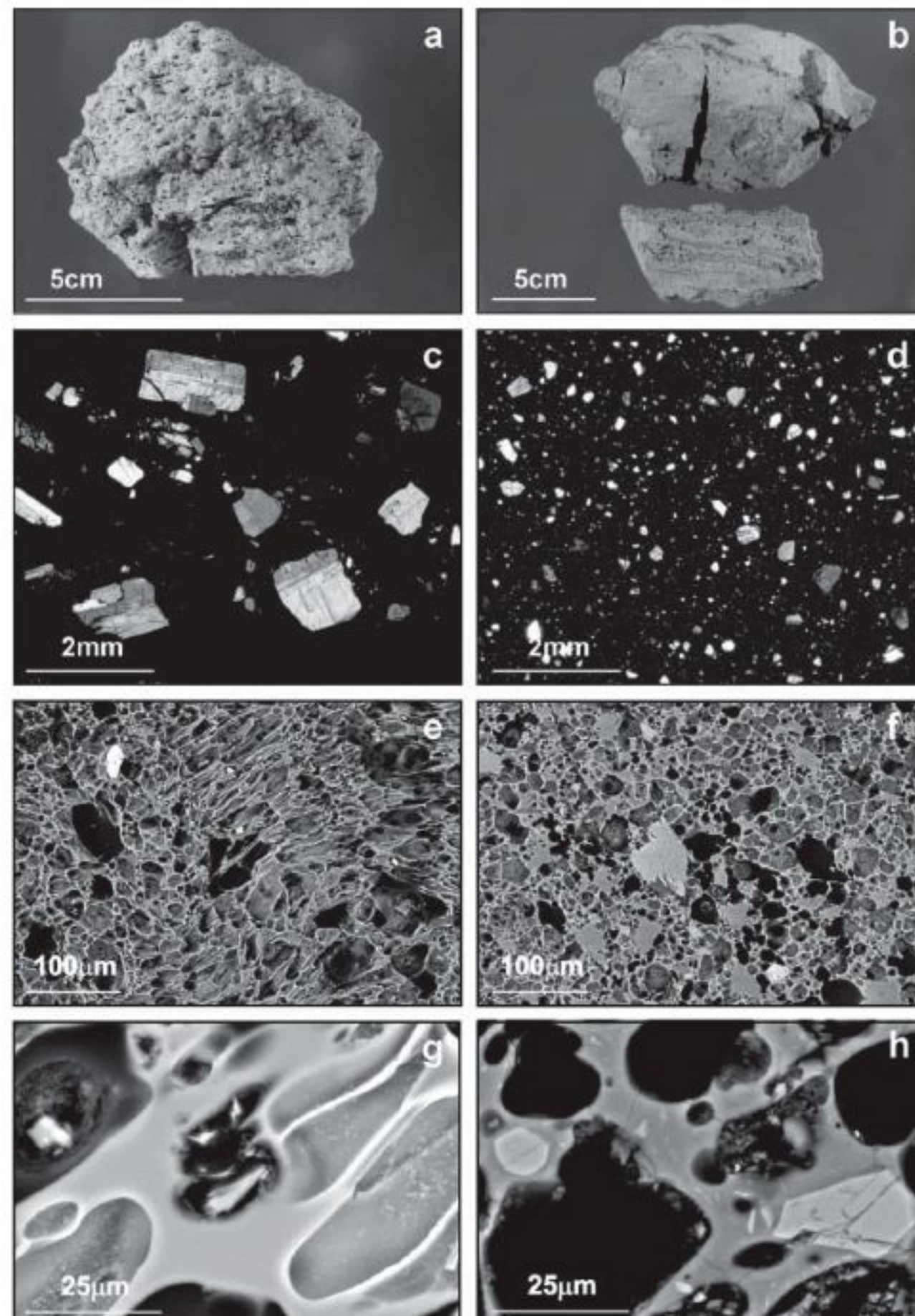
白色軽石(80–95%)

Microlite含まない

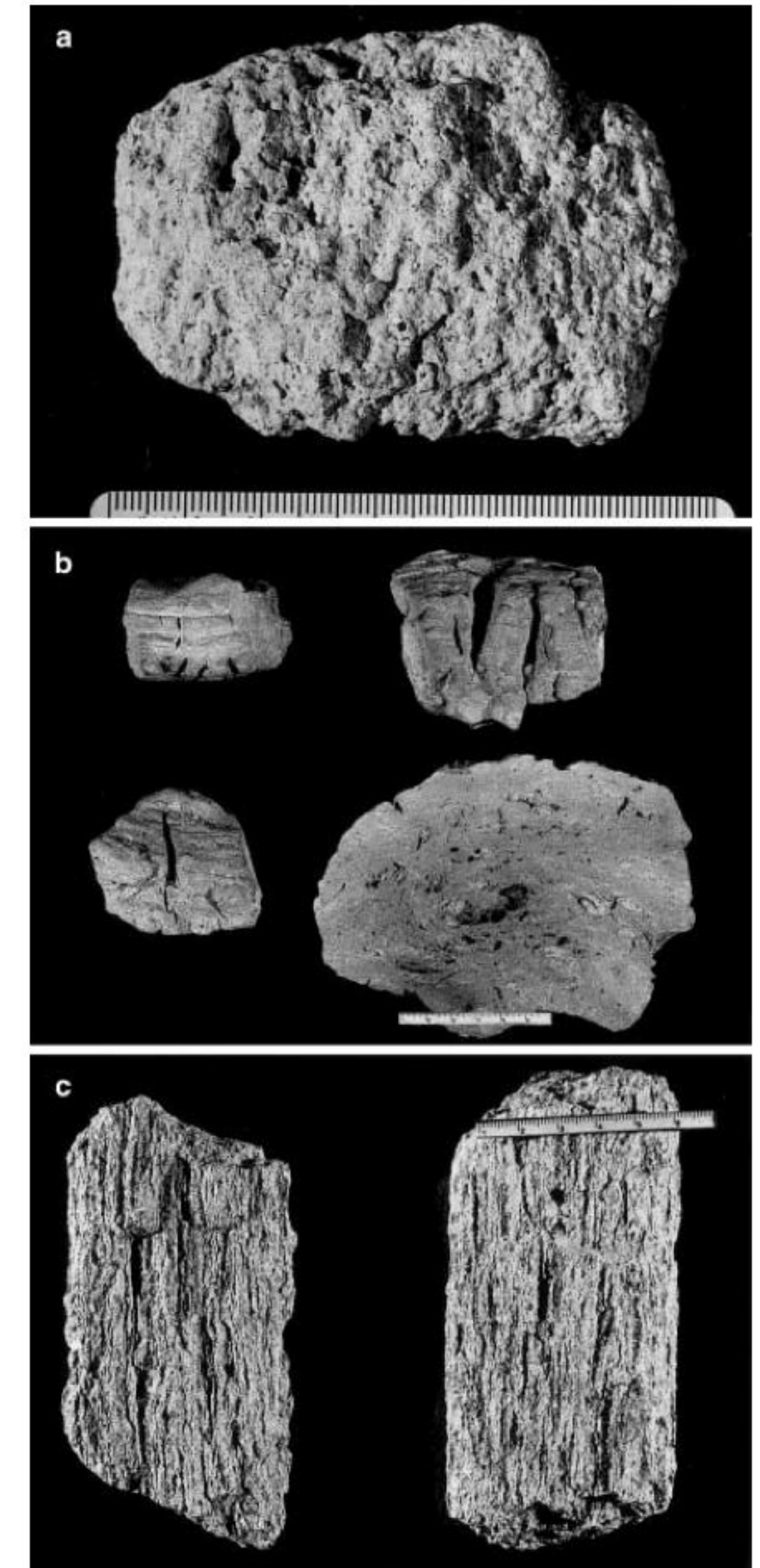
灰色軽石(5–20%)

Microlite大量に含む

破片状の結晶が多く含まれる



Polacci (2005)



Polacci et al. (2001)



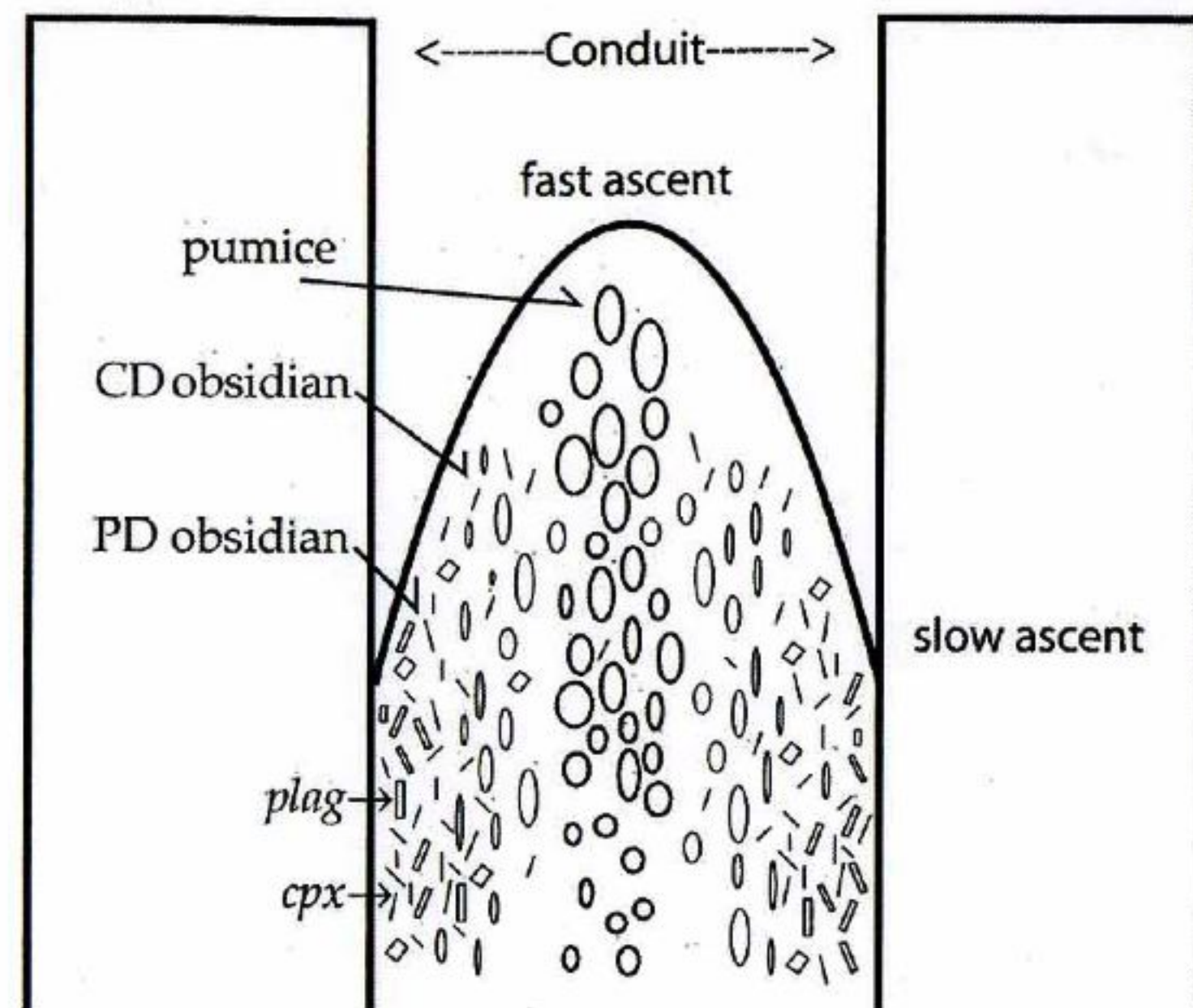
# 火道中のマグマの流動振る舞い

## 噴出物中の組織解析

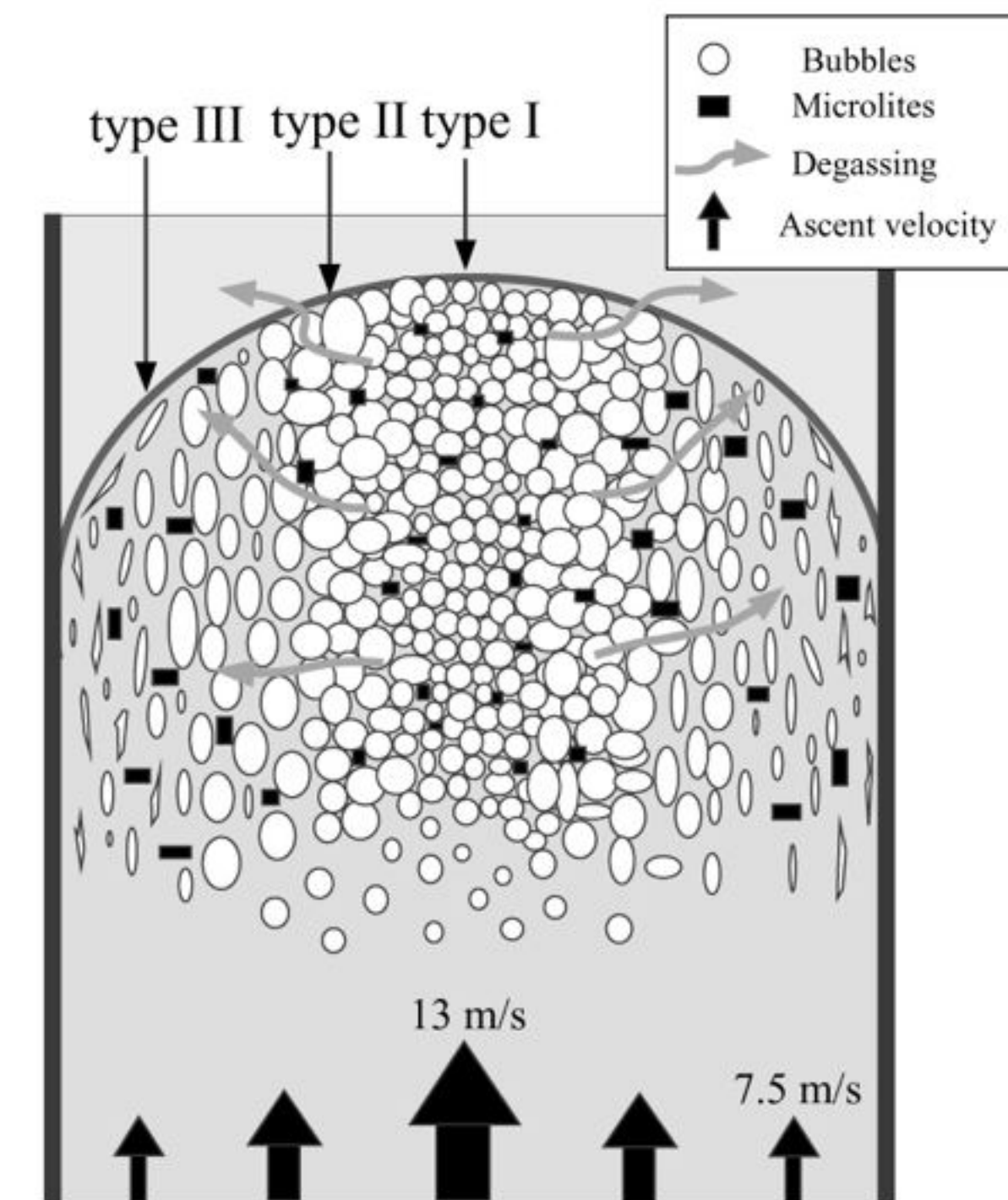
噴出物の組織の多様性について

火道中で速度勾配が生じることで説明できる

火道壁側の剪断により、気泡が変形する  
火道壁方向に脱ガスが進んだ。



Castro and Mercer, (2004)



Noguchi et al. (2006)



# 1-3. 噴出物の組織と観測情報

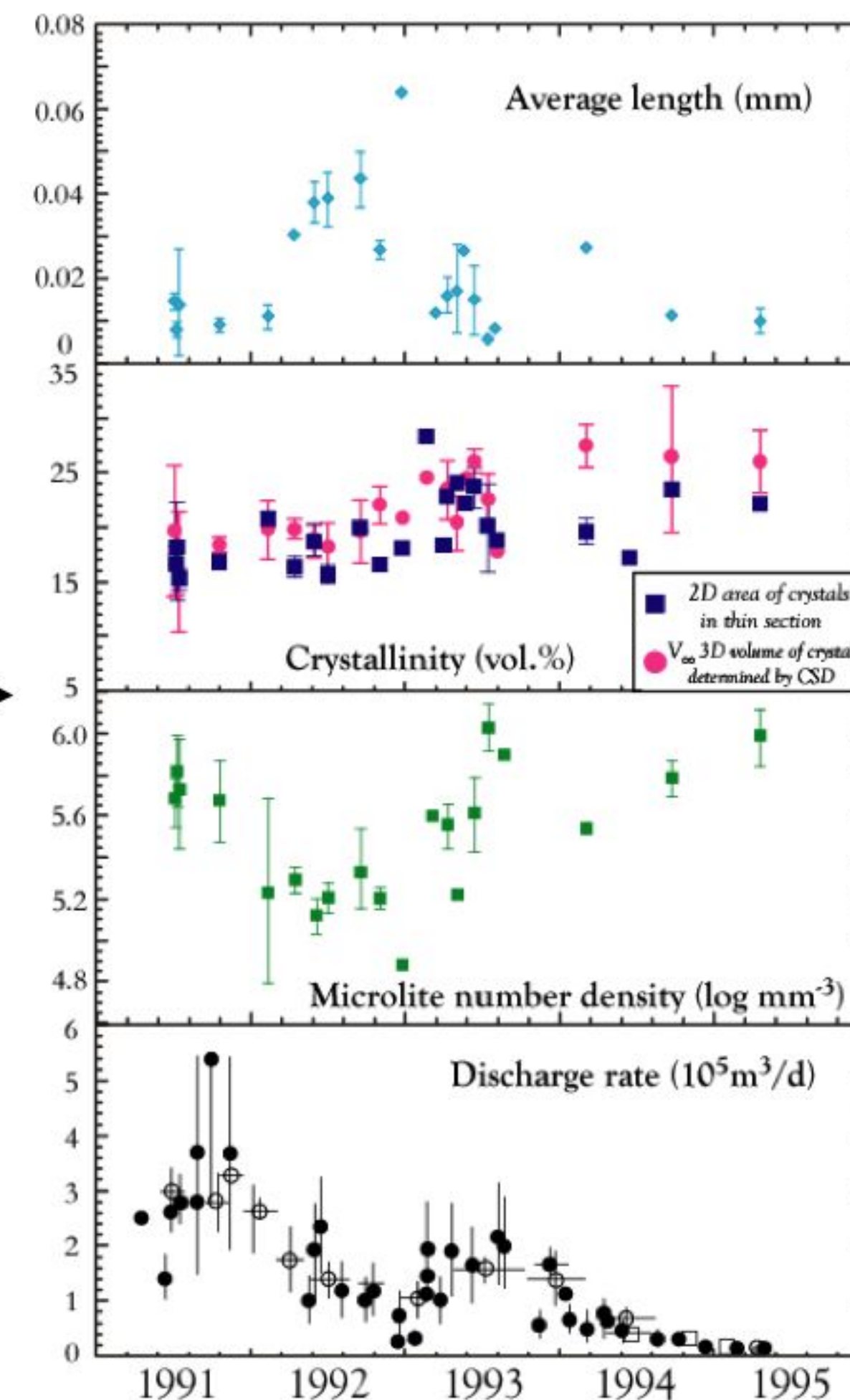
## 火山灰の組織と噴煙高度、爆発地震の関係

あまり研究されていない

噴煙高度と火山灰: 嶋野 2006年火山学会

爆発地震と火山灰の関係: 三輪 2006年火山学会

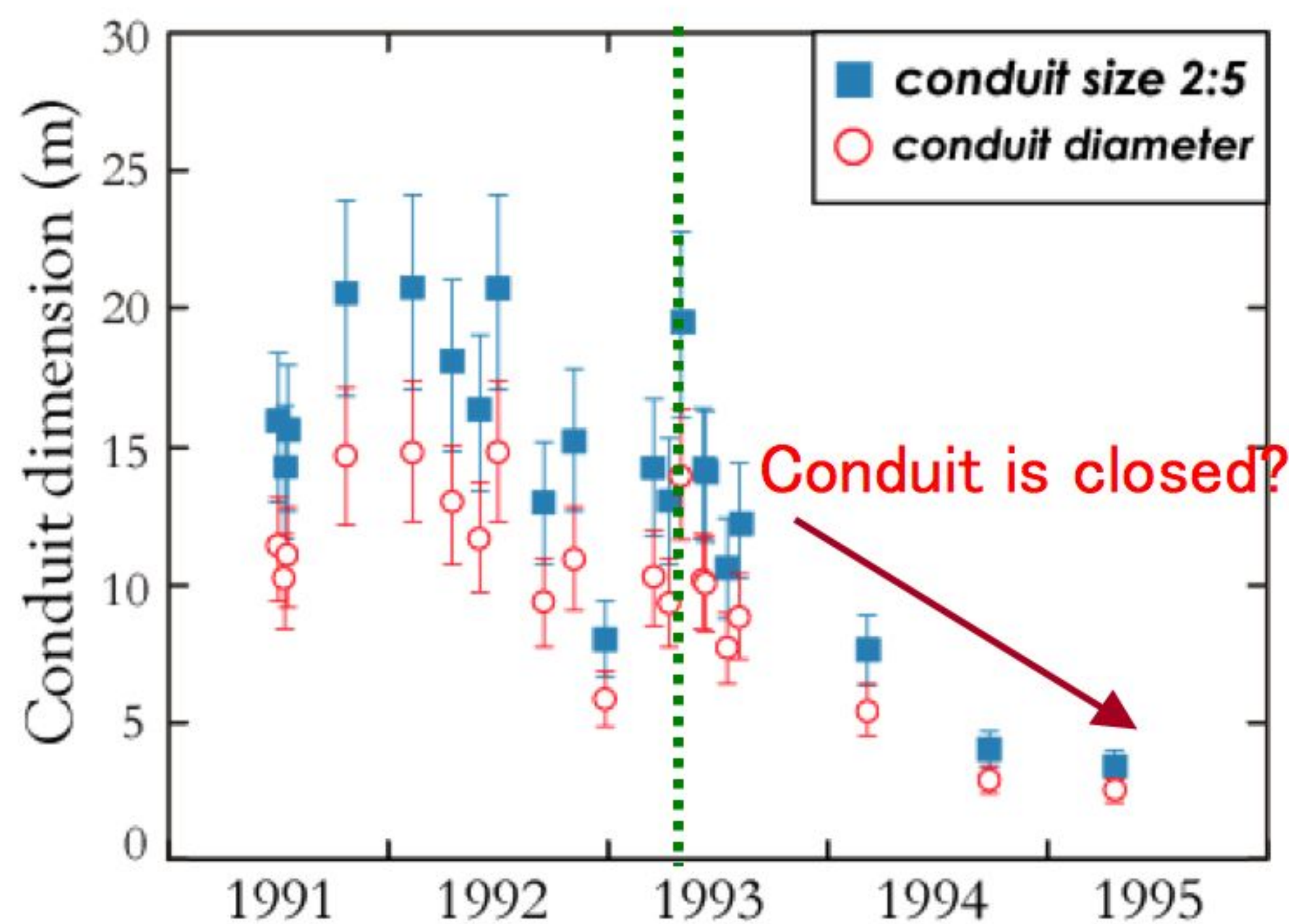
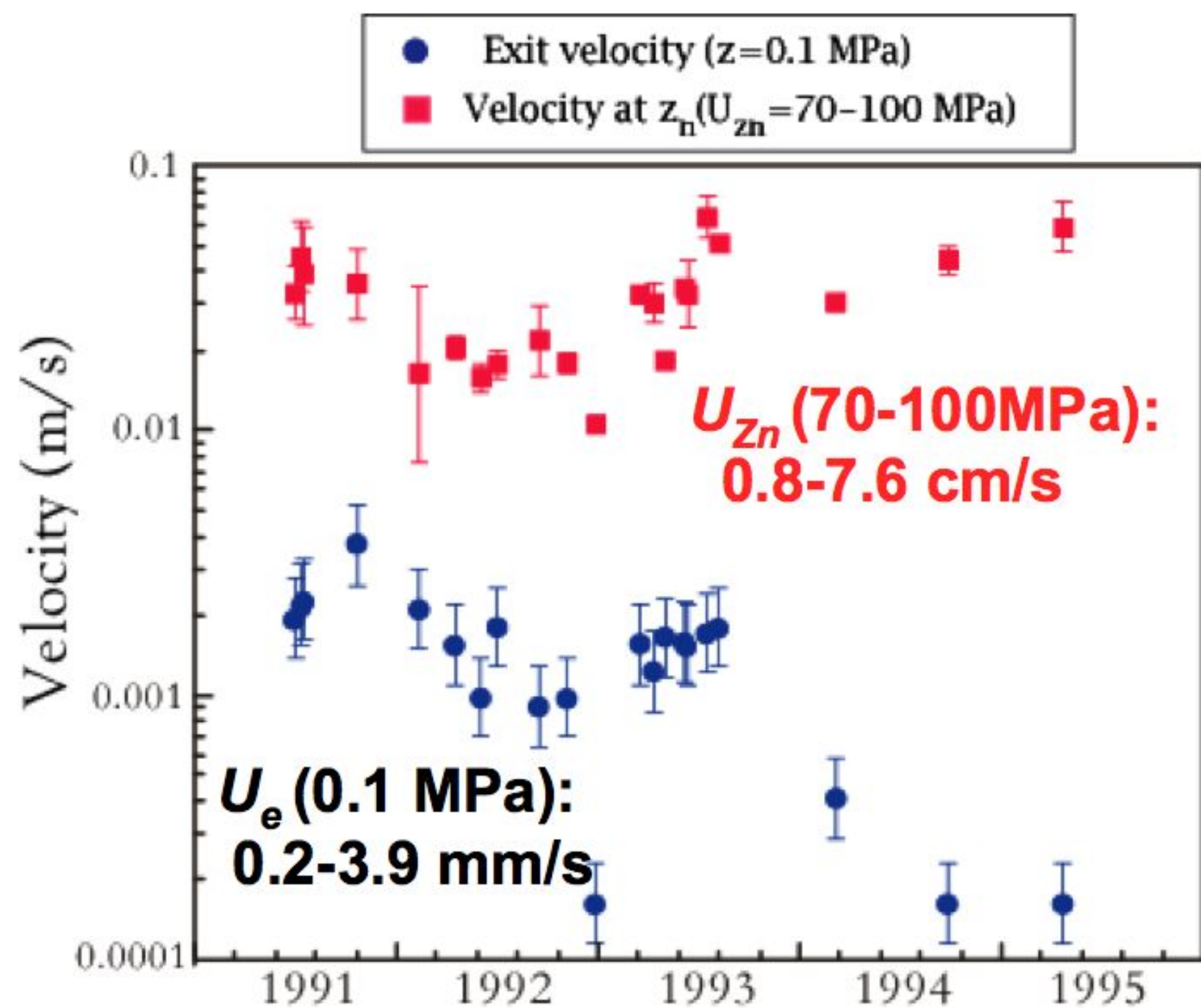
## 噴出物の結晶組織とマグマ噴出率の関係



Noguchi et al. (2007)



# マグマ噴出率と結晶組織について



microliteがどの深度で生成し、その生成深度のマグマの上昇速度、火道サイズ時間変化を考察した。

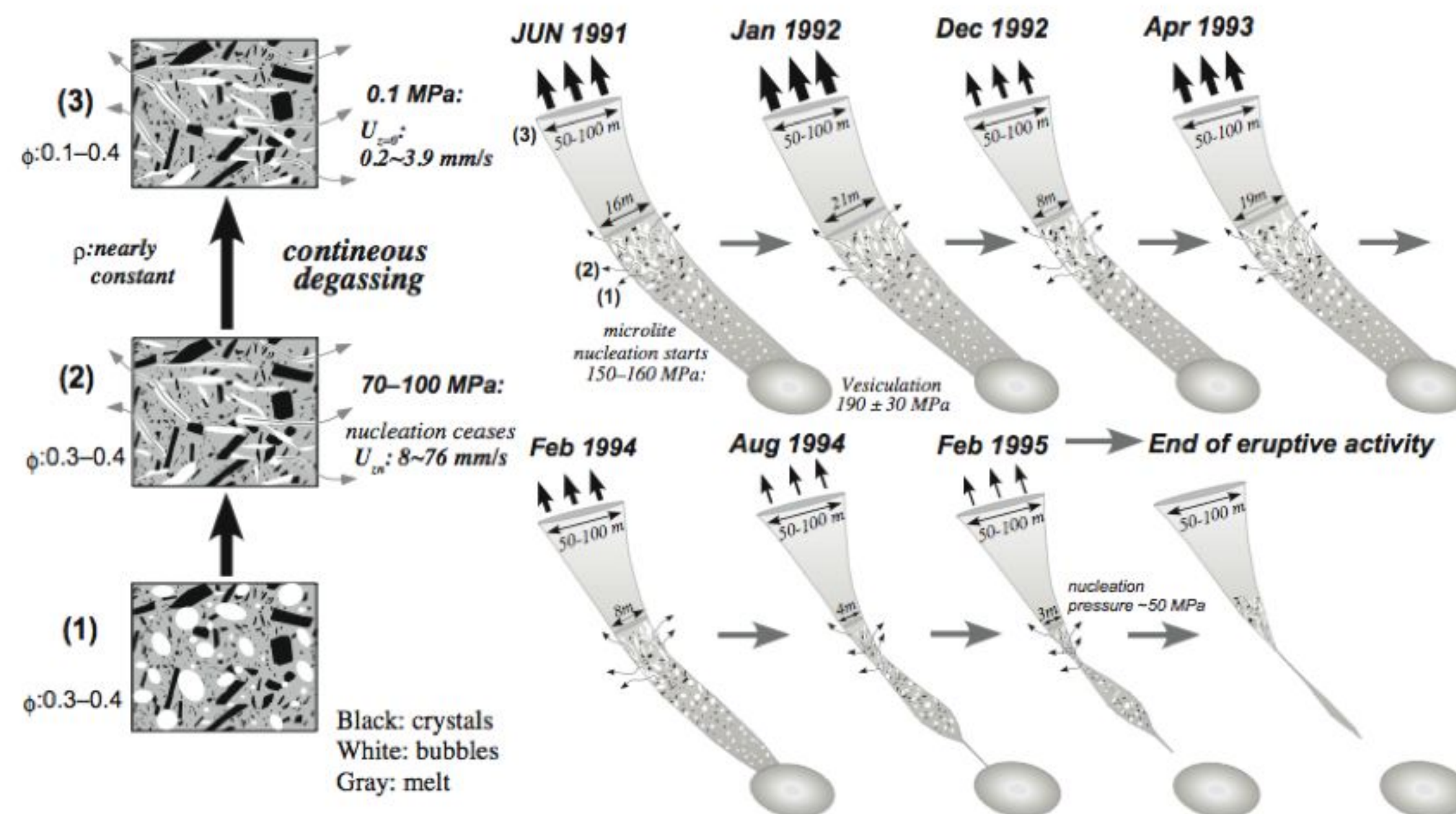
斜長石の組成分析→**圧力の推定**

結晶数密度脱水速度計→**上昇速度の推定**

Toramaru et al. (2007)

マイクロライト: 地下3-4 kmで生成、  
上昇速度 0.8-7.6 cm/s

質量保存則を用いて火道断面積を推定した。





## 2. 地表に露出した火道断面の地質学的解析

### 2-1. 実際の火道や母岩(火道壁)の観察

岩脈の形成: クラックに充填された液体(マグマ)

クラックの発生機構については3で話す

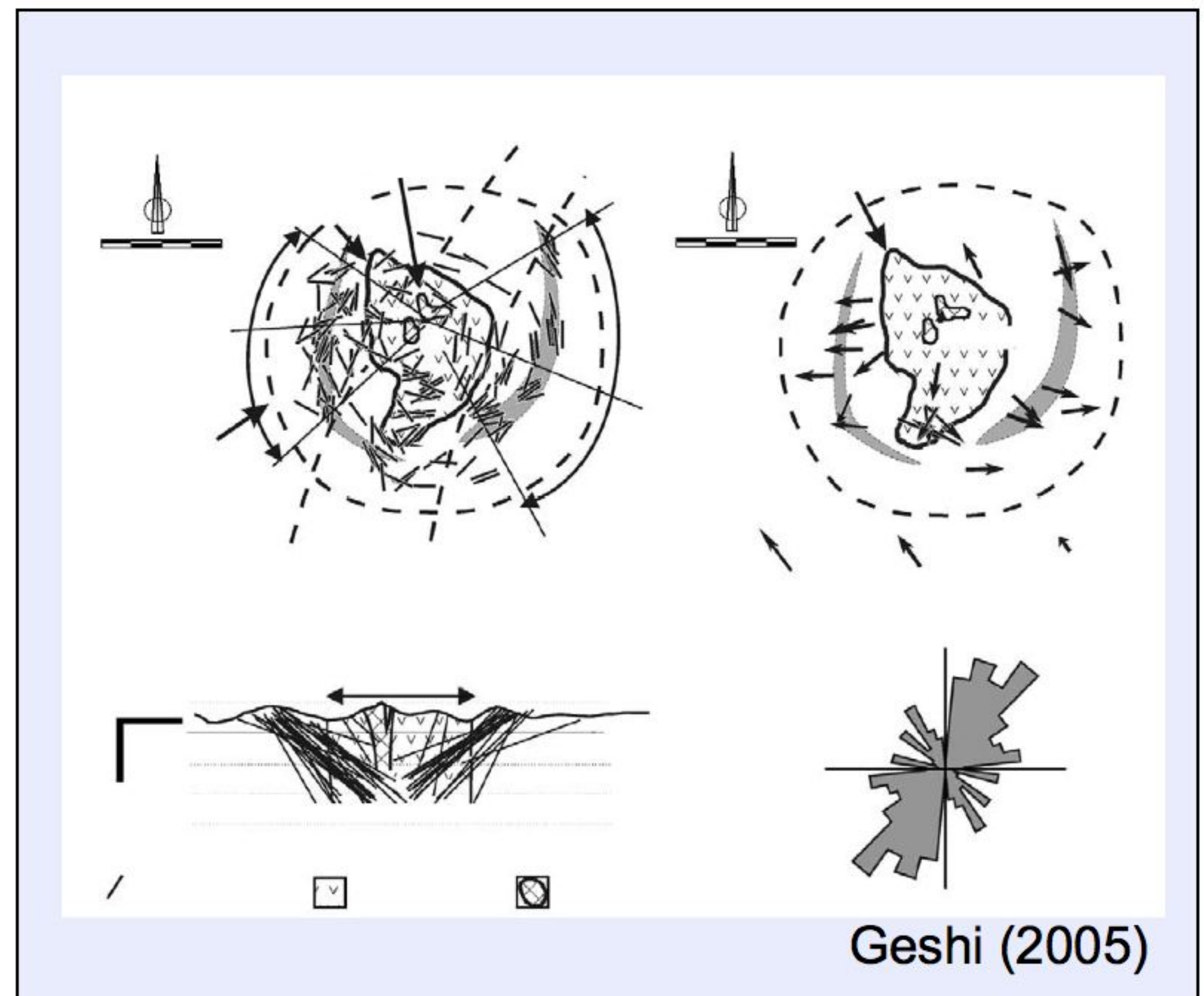
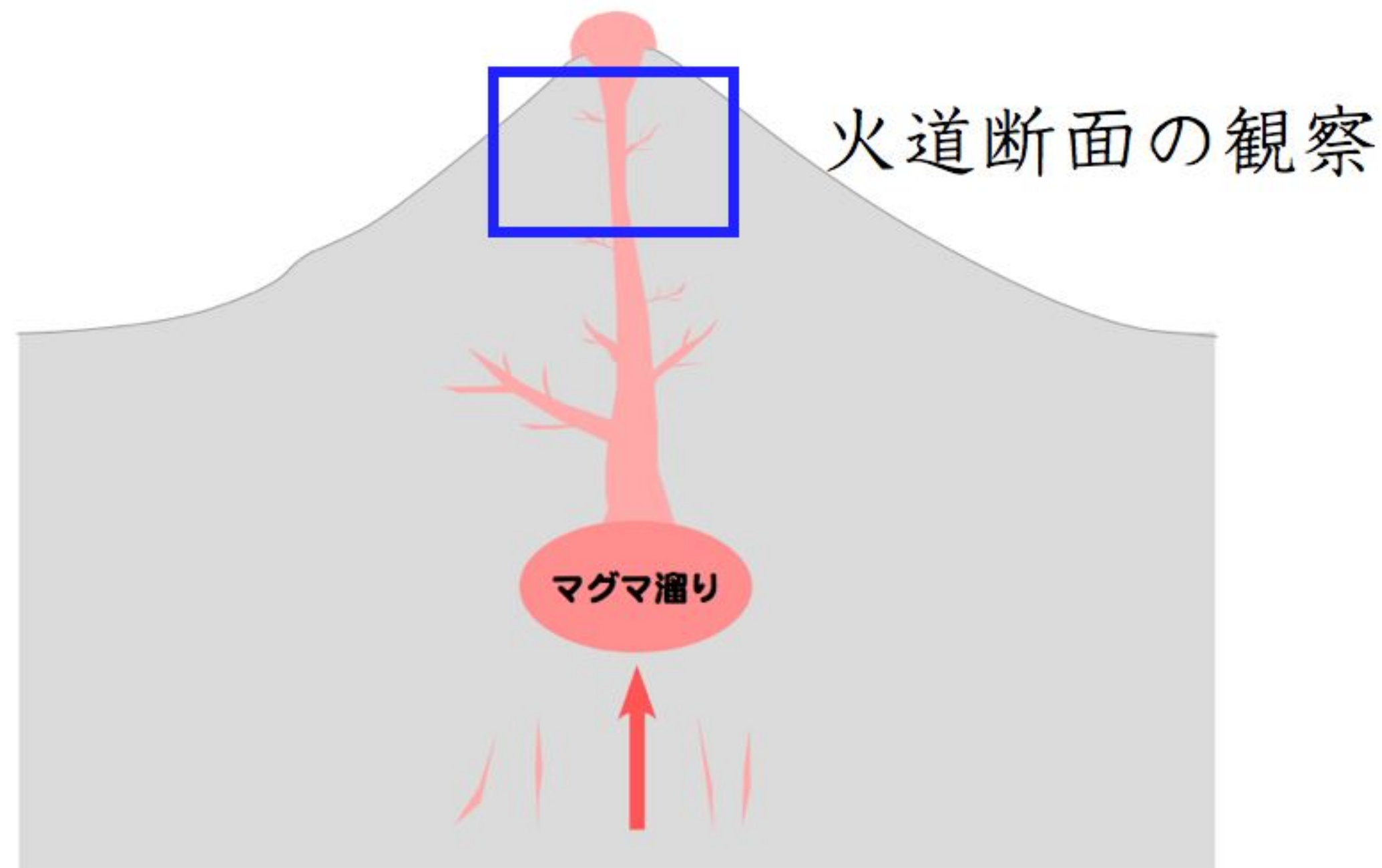
#### 1. 火山帯の広域応力場、tectonics、岩脈の形成過程について

マグマ供給系の理解

Takada, 1989; Takada, 1994; Geshi, 2001, 2005

#### 2. 岩脈中の気泡・結晶組織の観察

マグマ上昇プロセスの理解にむけて





# 岩脈の解析

Mule creek vent (New Mexico, USA)

19–21 Ma, 流紋岩質火山

Stasiuk et al. (1996)

## 岩脈の組織

tuffisite vein(火砕岩脈)

火道壁から母岩にかけて(火道に垂直方向)  
岩脈の中心(火道に水平方向)

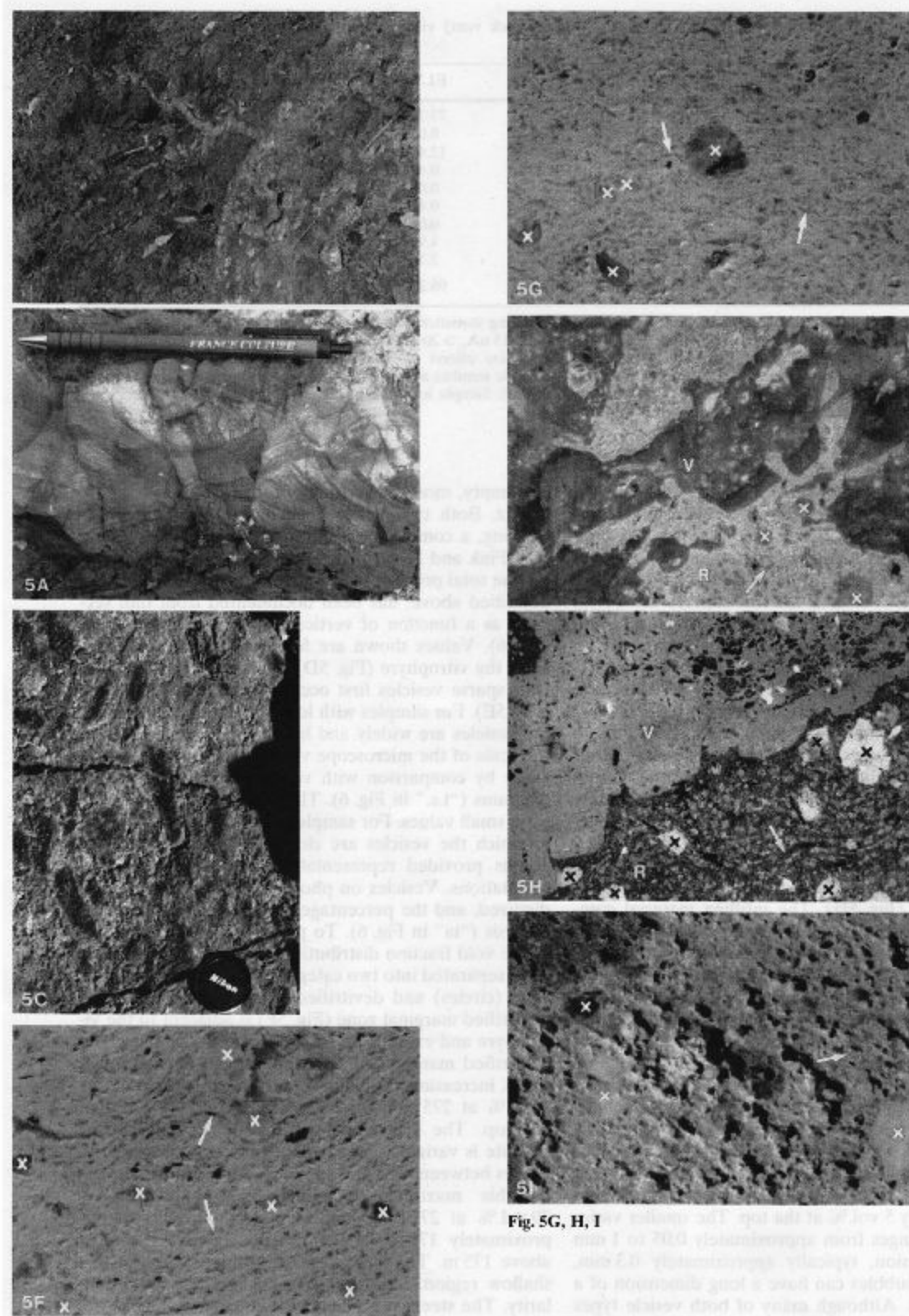
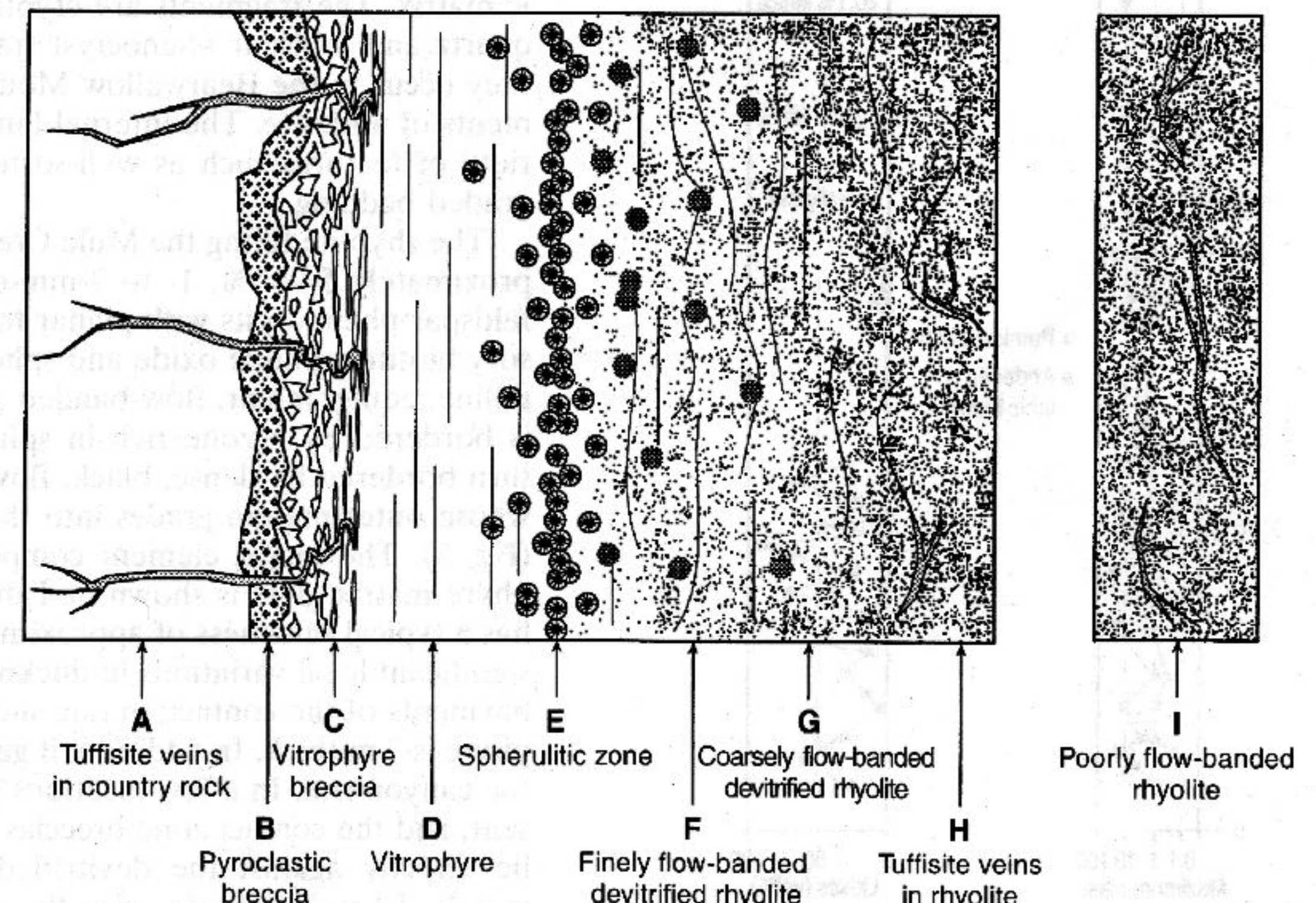
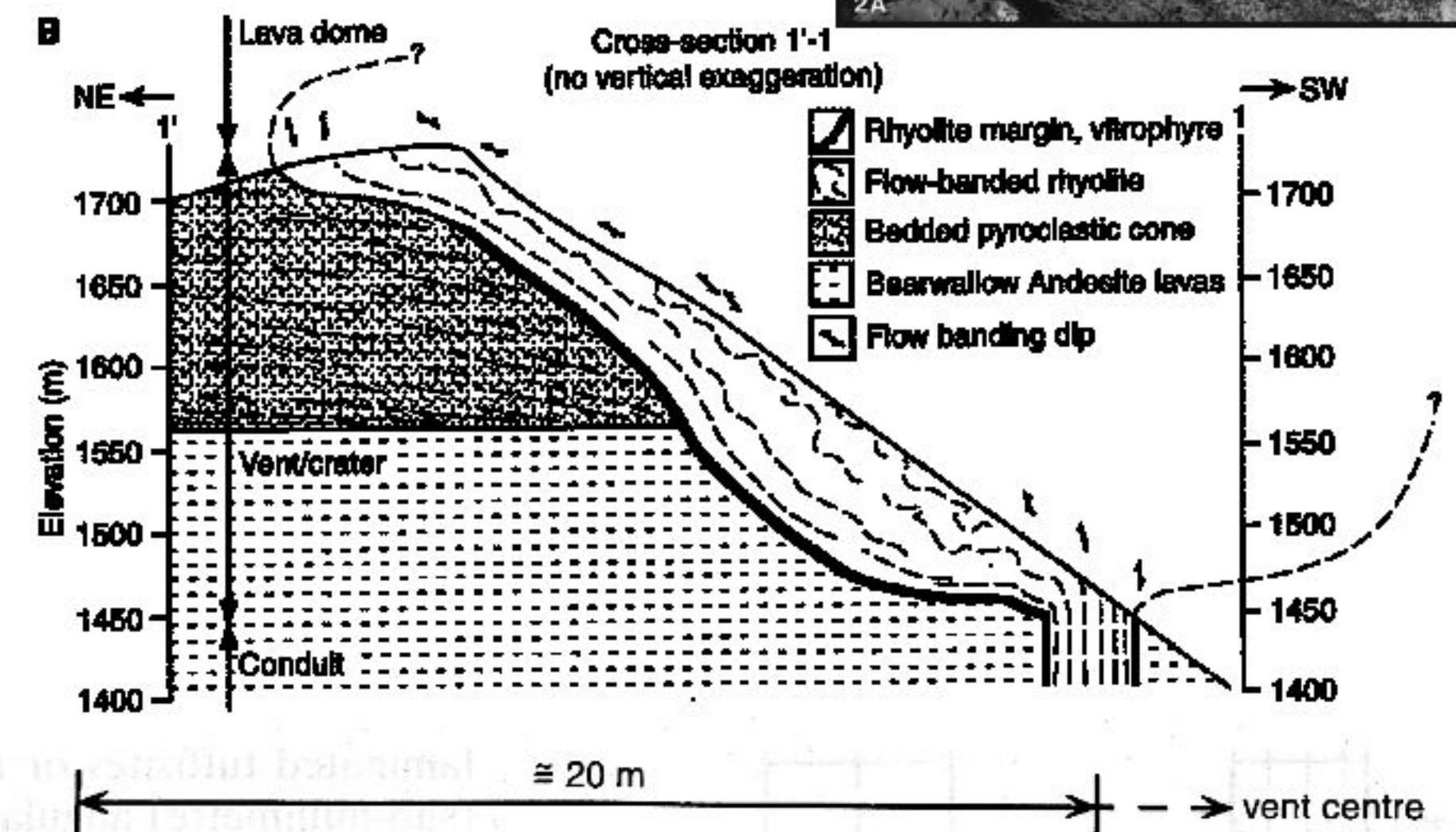


Fig. 5G, H, I

Fig. 5A, C, F



火道の断面



# 水の量の測定

初期含水量: 2.5–3.0 wt. %

閉鎖系発泡度を考えると、地表付近  
(この場合だと200m付近)で100%近  
くなる

岩脈の発泡度:

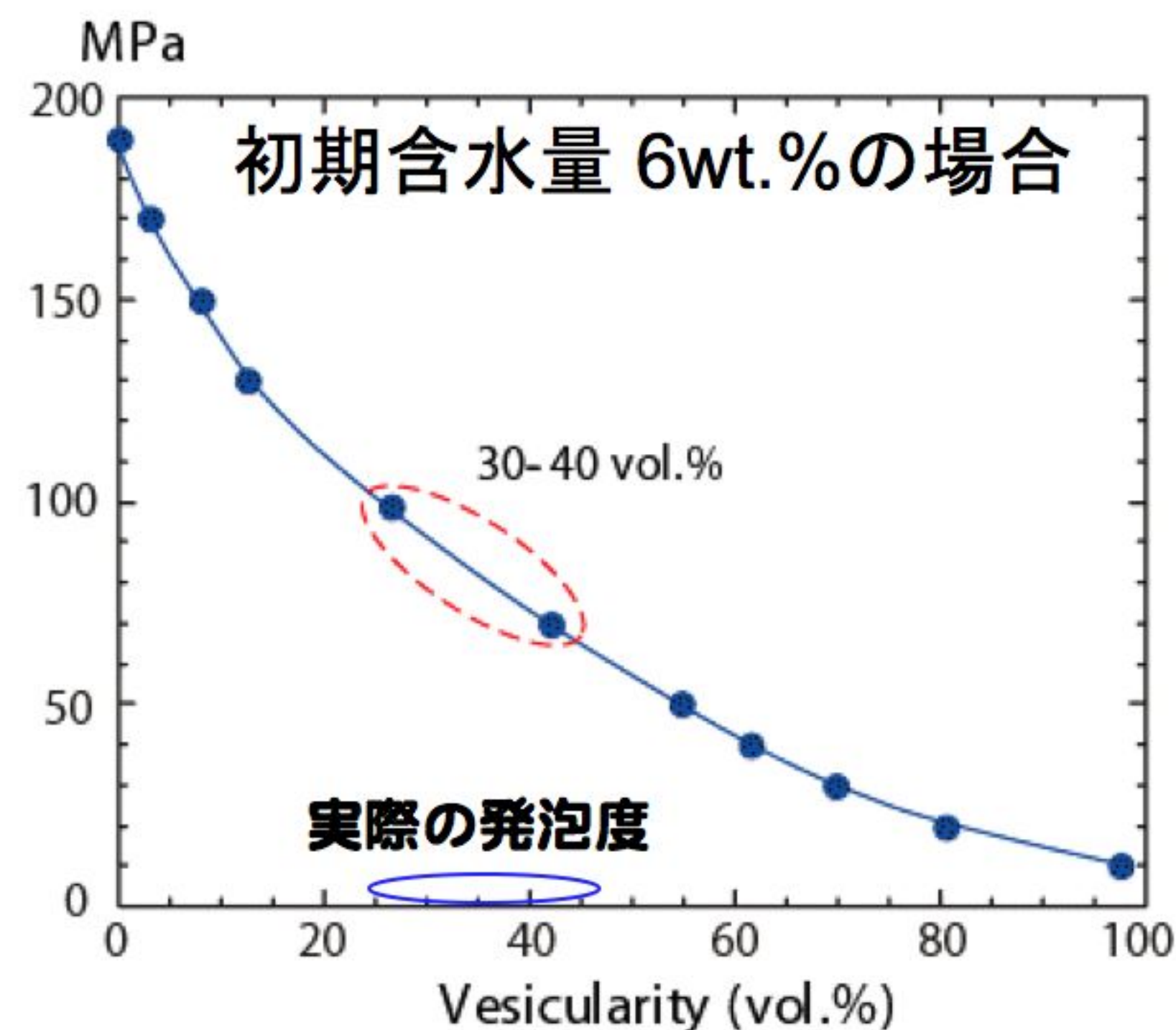
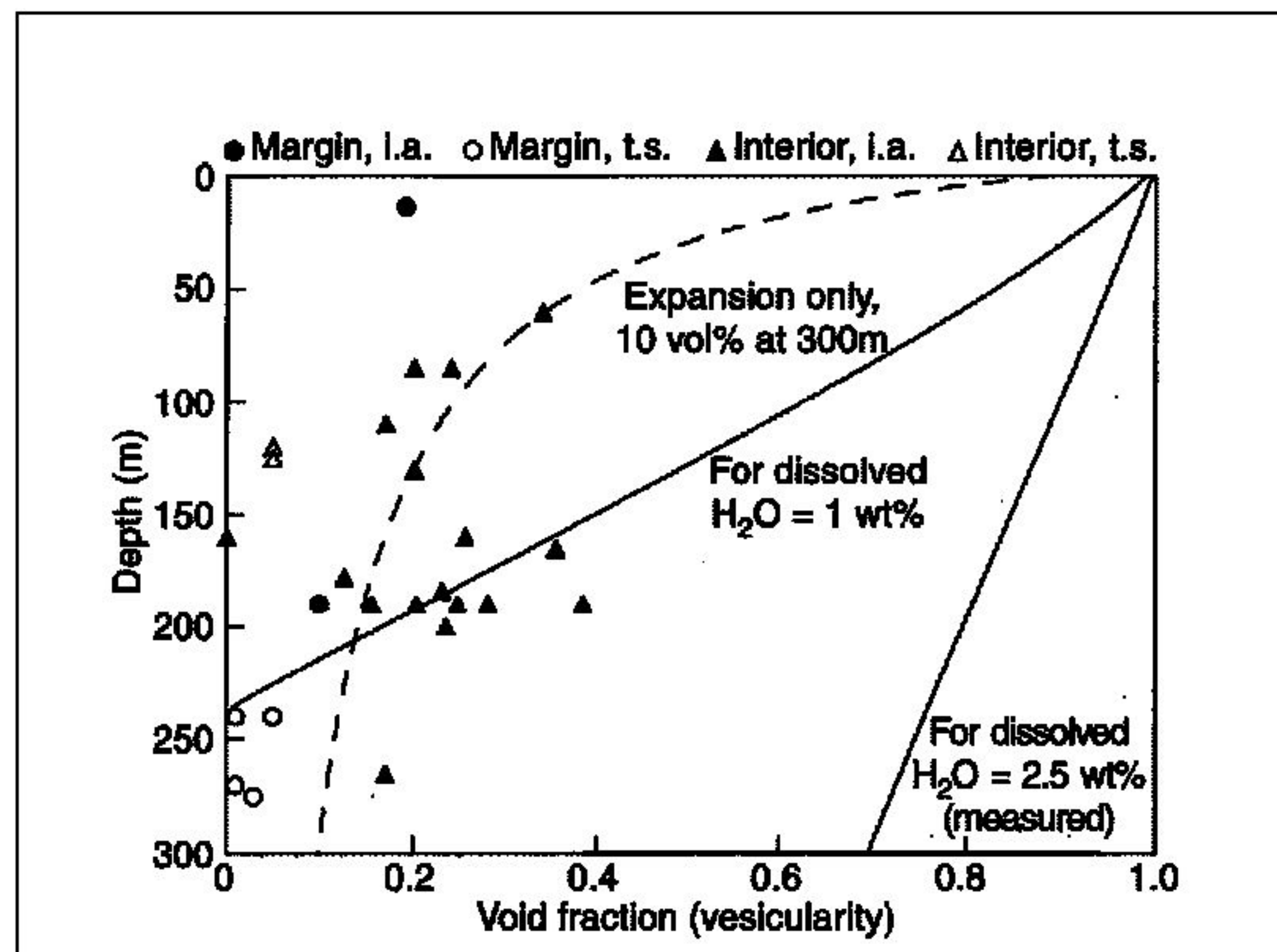
中心側; ~ 0%

縁側: 20–40%

## 気泡が系外へ散逸した?

Tuffisite vein:

ガスと一緒に火山灰が取り込まれた  
脱ガスの証拠!?





### Big glass mountain

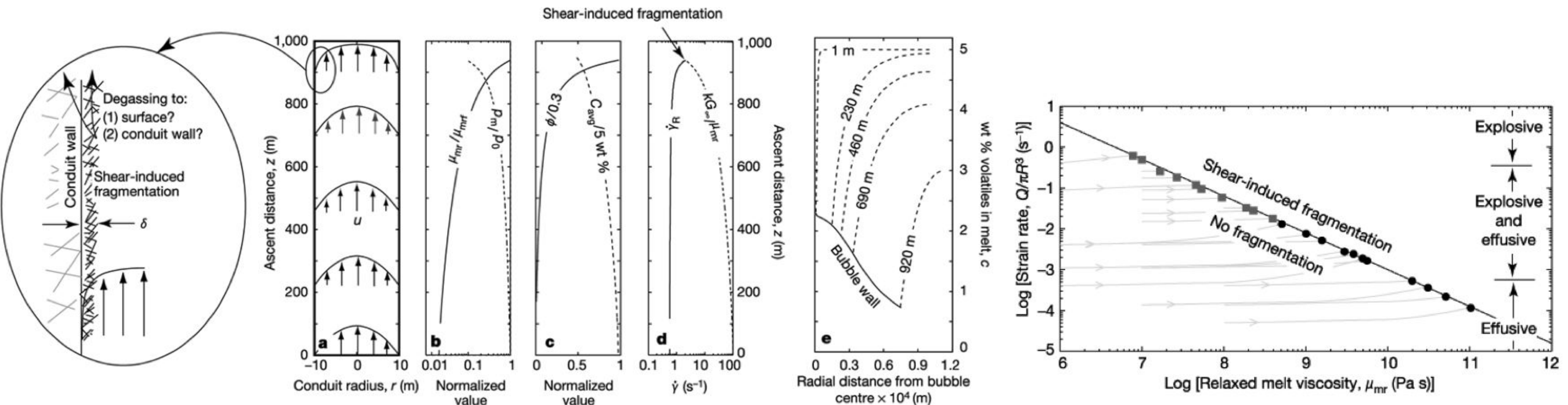
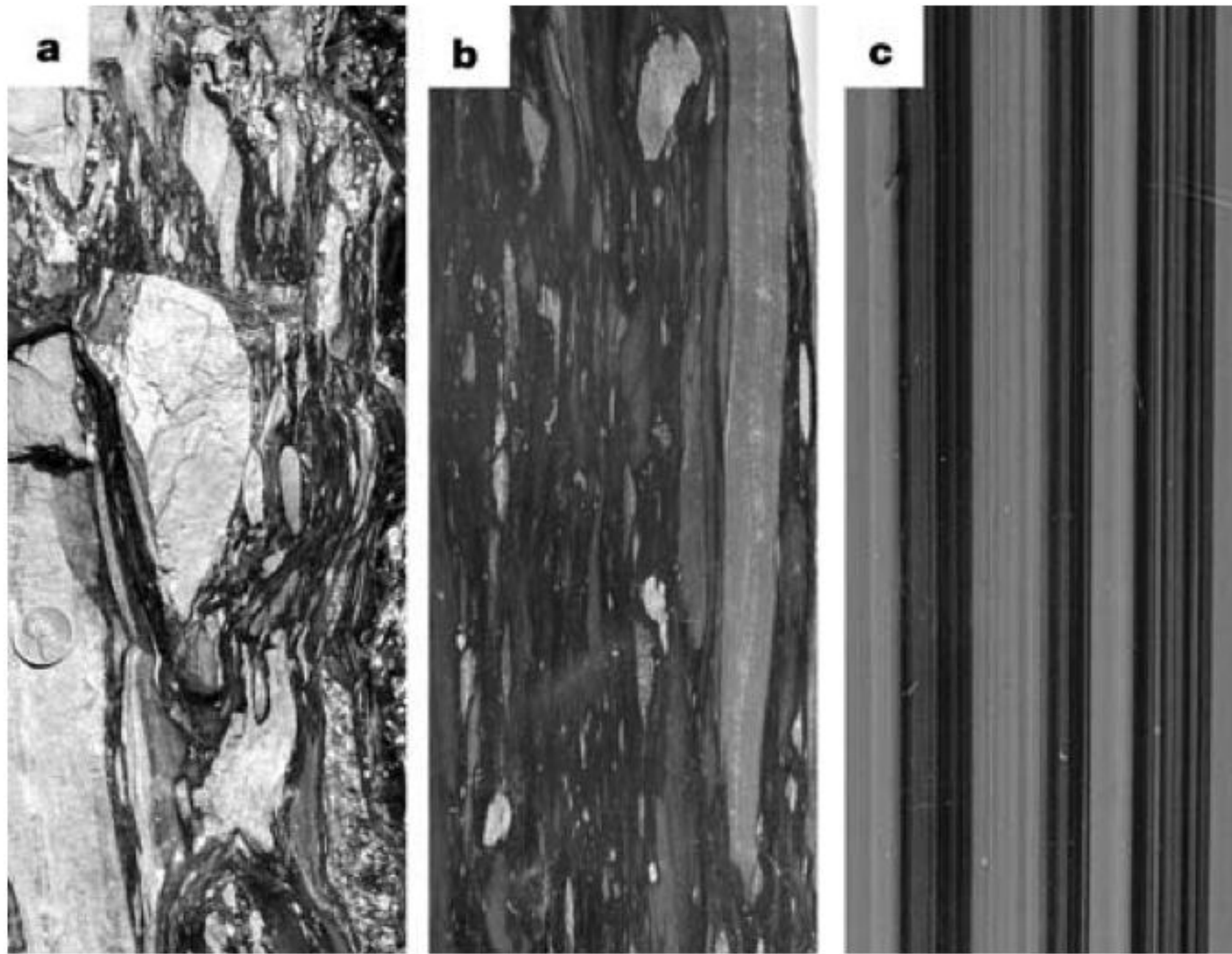
黒曜岩に見られる流理構造

火道壁付近でマグマが破碎(shear induced fragmentation)と溶結を繰り返して形成される。

歪み速度, メルト粘性

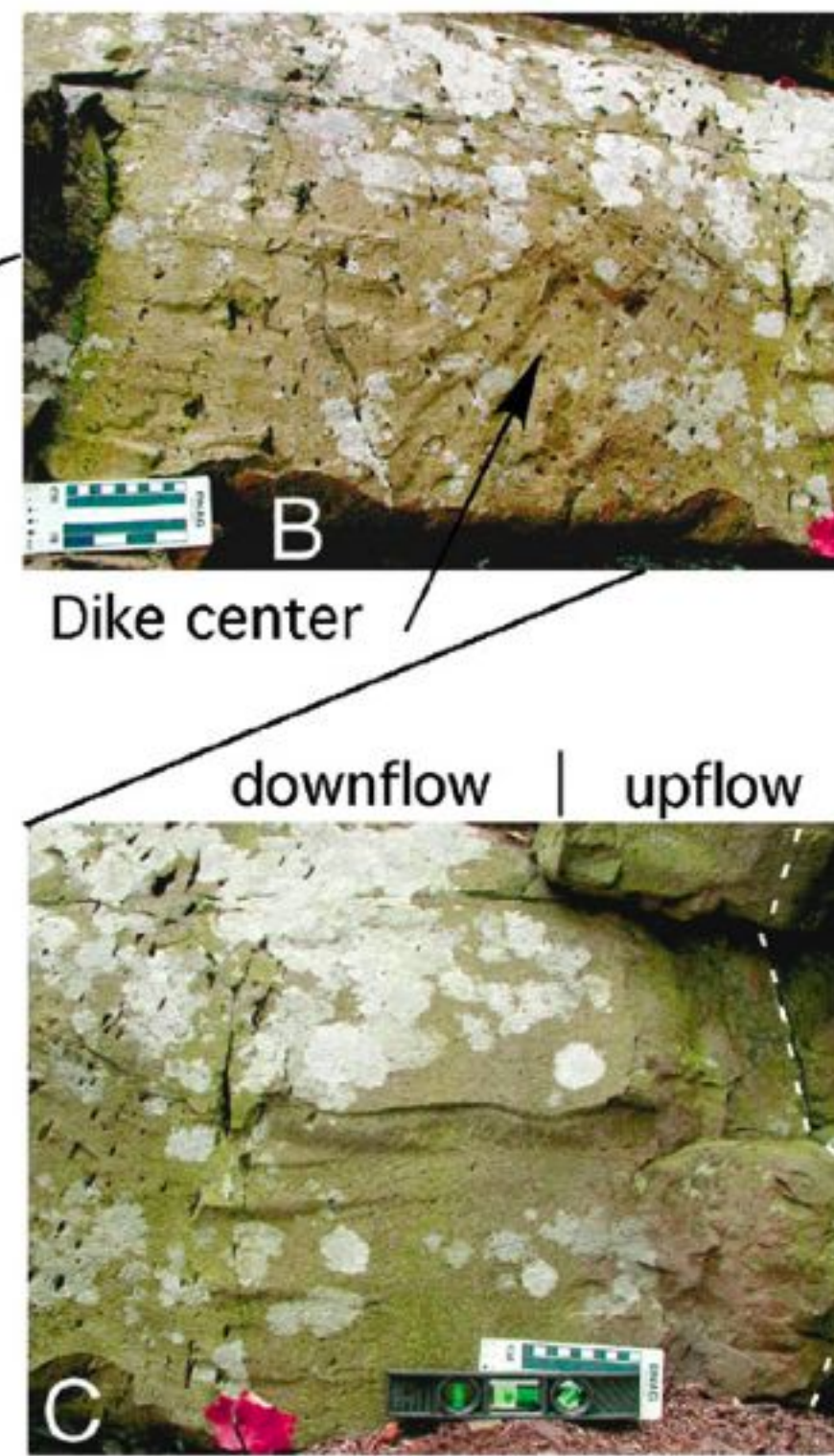
爆発的噴火, 非爆発的噴火に関わらず、破碎が起こる

火道壁付近のフラクチャーネットワークが脱ガス効率を高めている可能性がある





# 岩脈中の気泡組織の観察

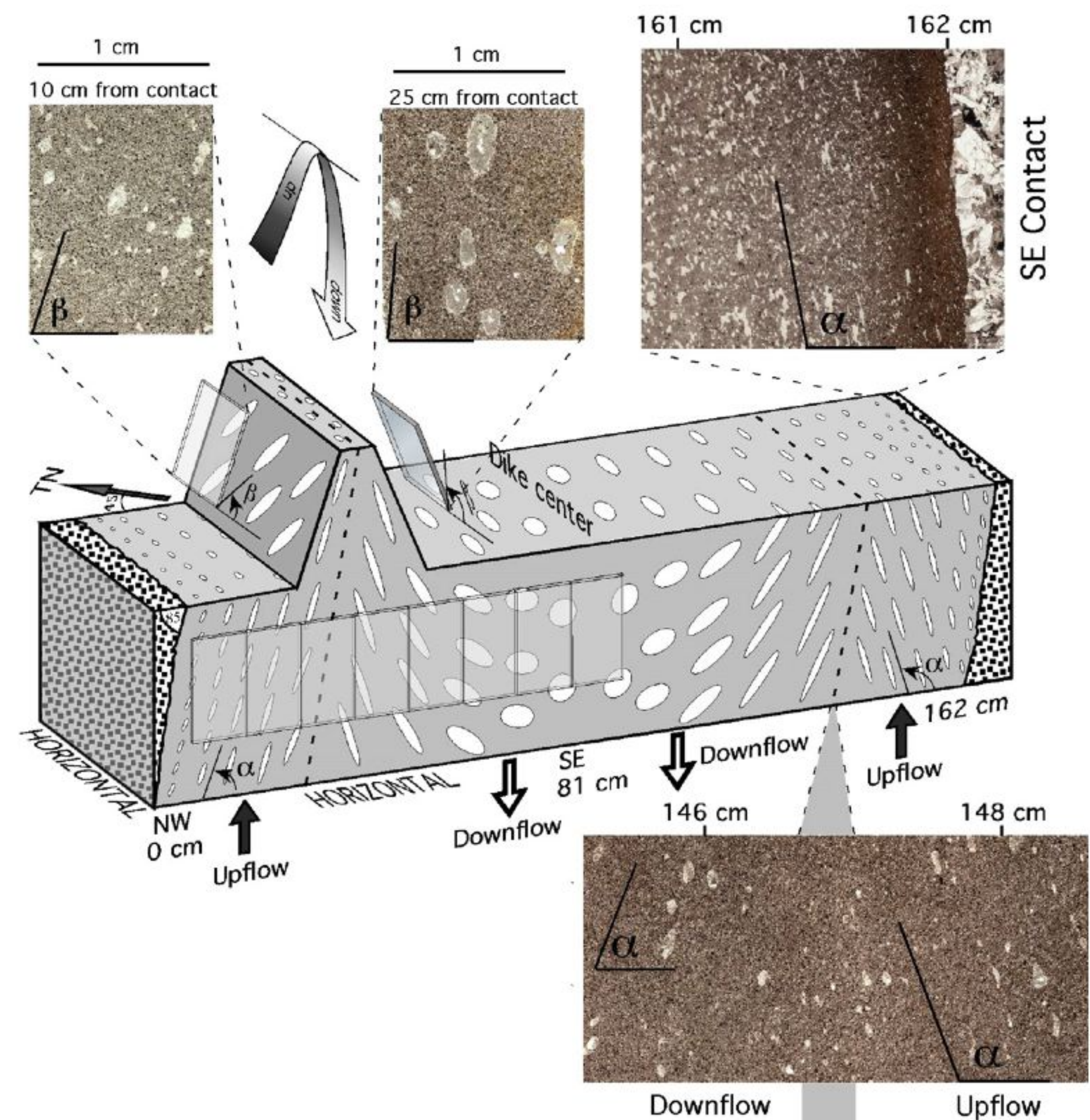


火道壁付近の気泡組織, magnetite:  
火道に沿って平行に配列している  
火道中心:  
気泡が比較的球状  
Dikeと平行に配列  
magnetiteの配列はflow directionに垂直

152–169 Maの basalt dike 幅1.6 m

火道の縁から中心の気泡組織の観察と  
AMS(帯磁率)測定を行った。

Philpotts and Philpotts (2007)





# 岩脈の解析(結晶化)

Gray (1970,1978); Davis and McPhie (1996)

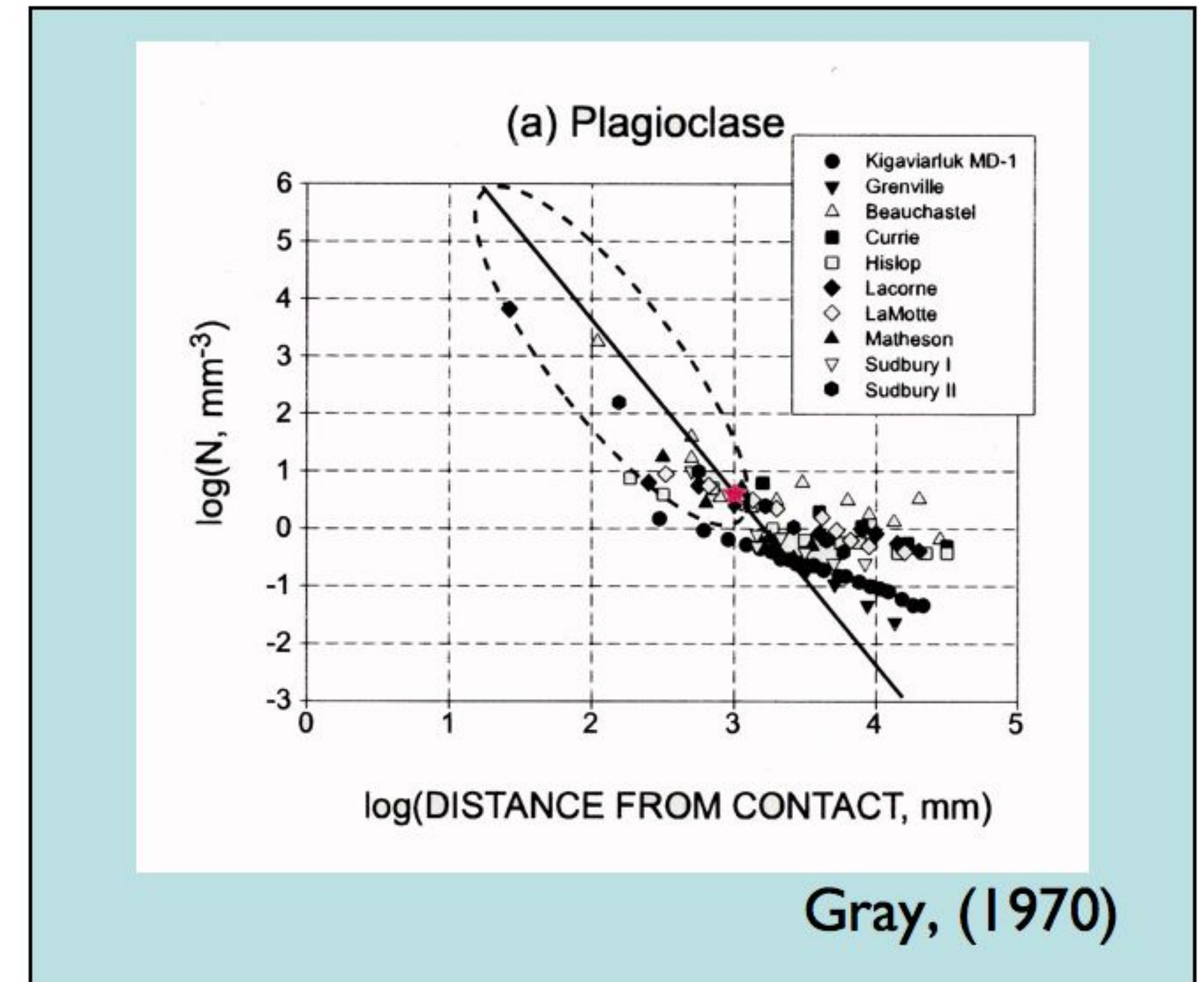
結晶成長速度、核形成速度に関する素過程を扱っている

マグマの冷却速度と結晶化の関係

**結晶数密度(単位体積あたりの数)が距離の $n$ 乗で効いてくる(鉱物によって $n$ が異なる)  
(冷却速度が距離の対数で効いてくる)**

その他: 完晶質組織の成因に関する研究  
脱ガラス化やannealingなどについて

火道断面でも堆積後の変質が強い場合、マグマが堆積した直後の情報を知る事がかなり難しくなる。



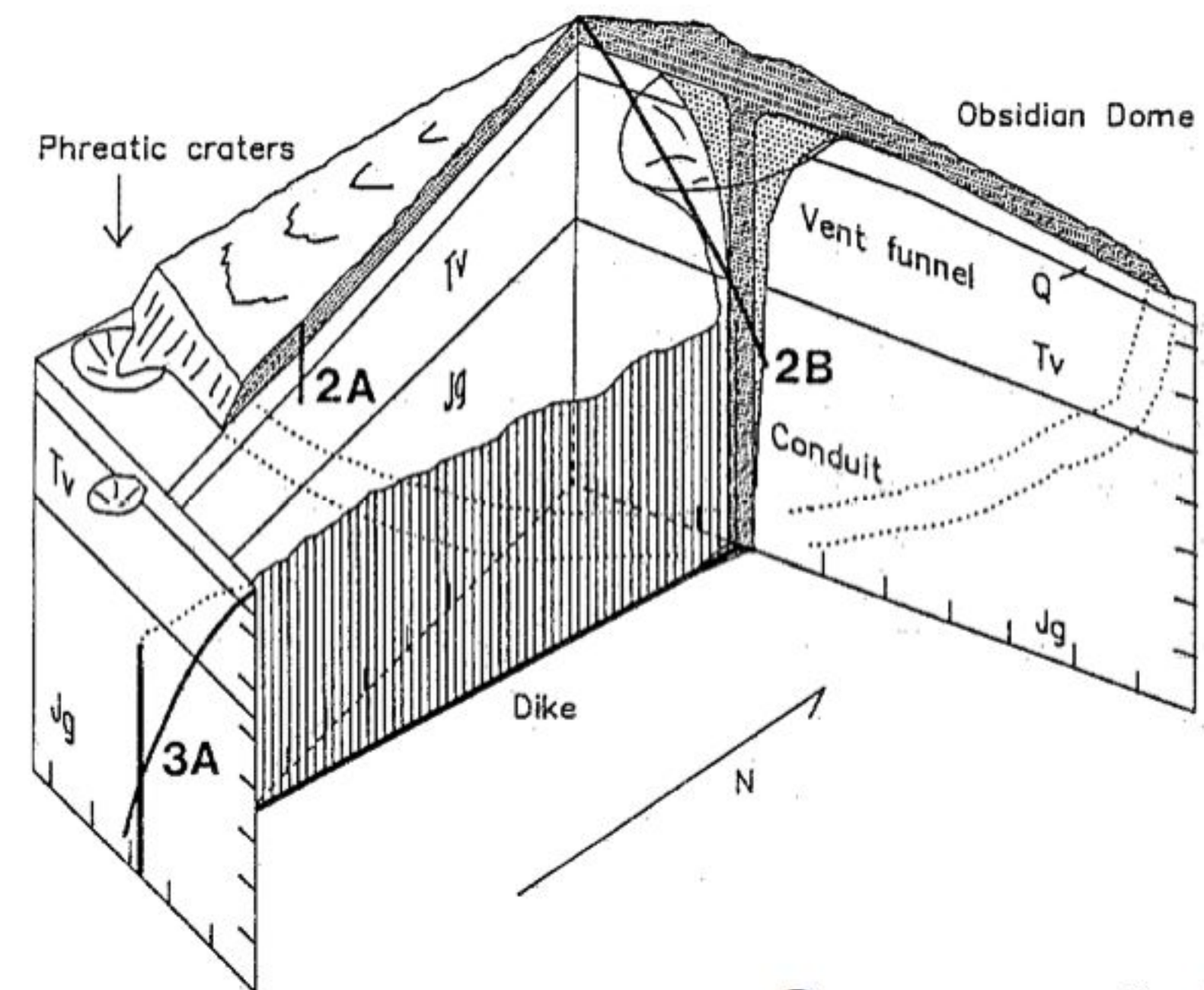


## 2-2 火道の掘削

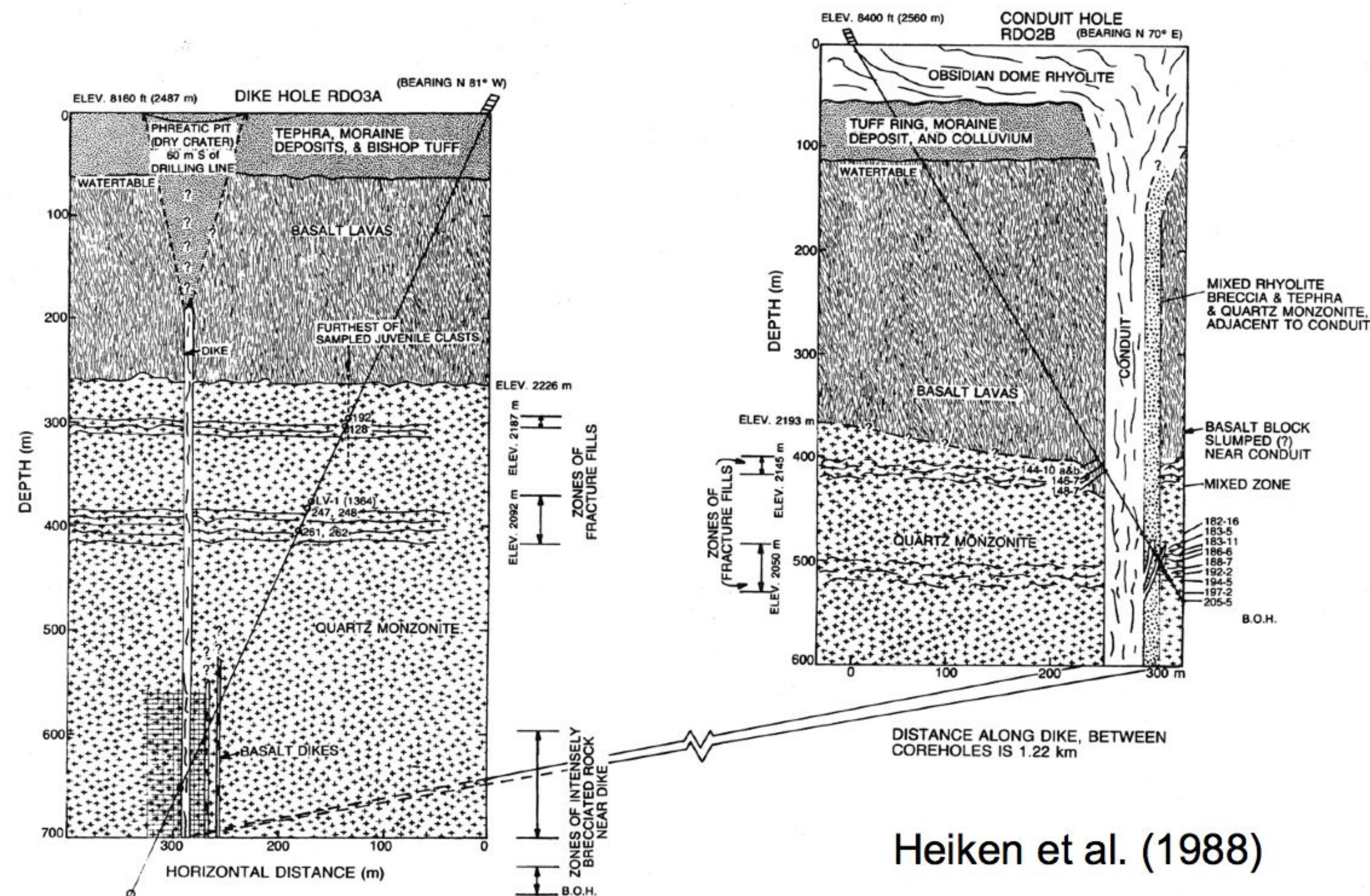
### Inyo dome

600年前に噴火したobsidian dome

火道直径51 m (南北方向に伸びた岩脈)



Swanson et al. (1989)



火道壁(母岩)

- ・石英モンゾニ岩  
(石英を少量含み、カリ長石  
斜長石を主体とする深成岩)
- ・Welded basaltic scoria

Dike: 完晶質、斑晶比較的少ない

火道壁: 火砕物を含むveinが多く  
認められた

Heiken et al. (1988)

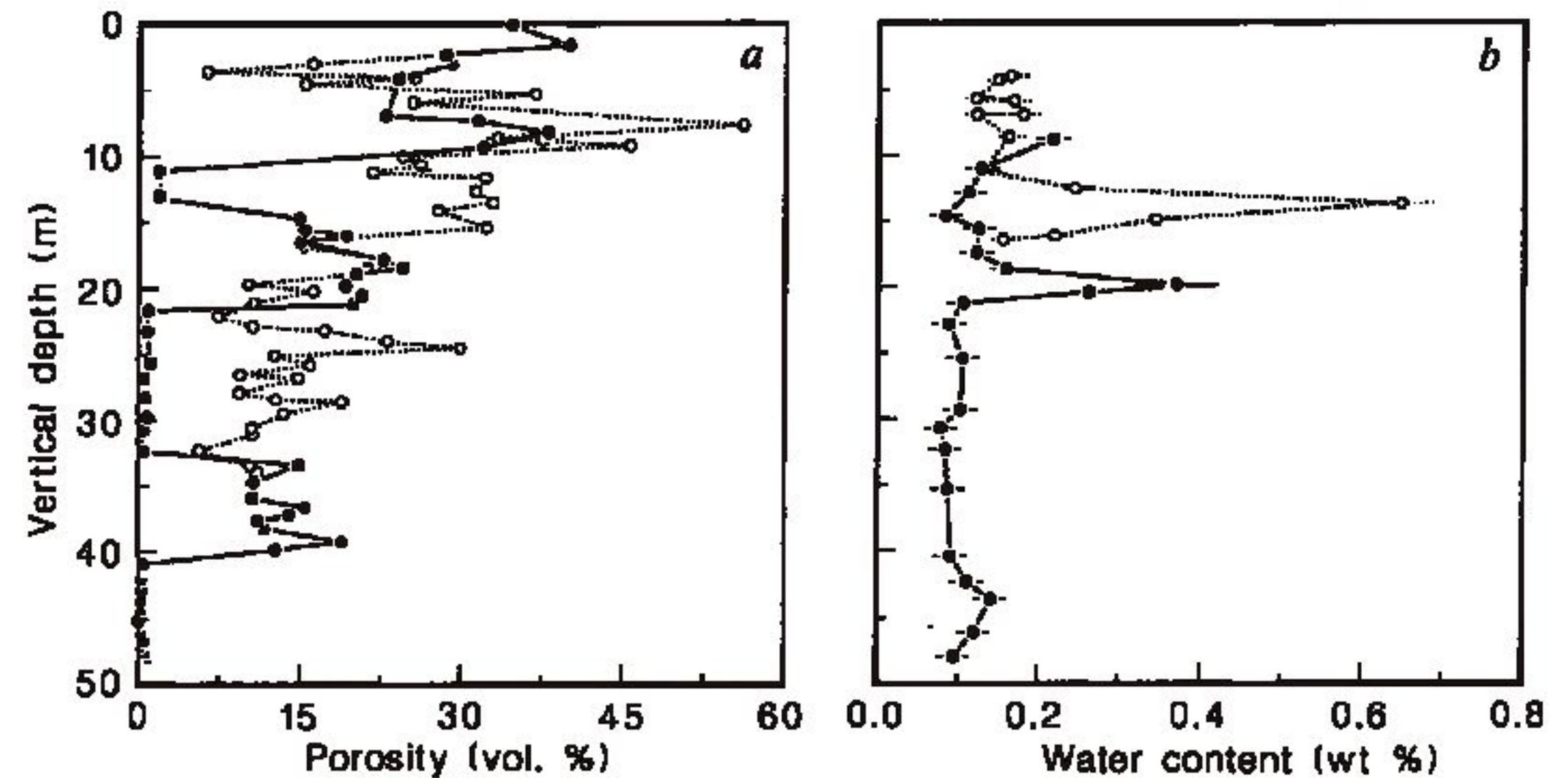


# Permeable flow model

## Inyo domeの掘削

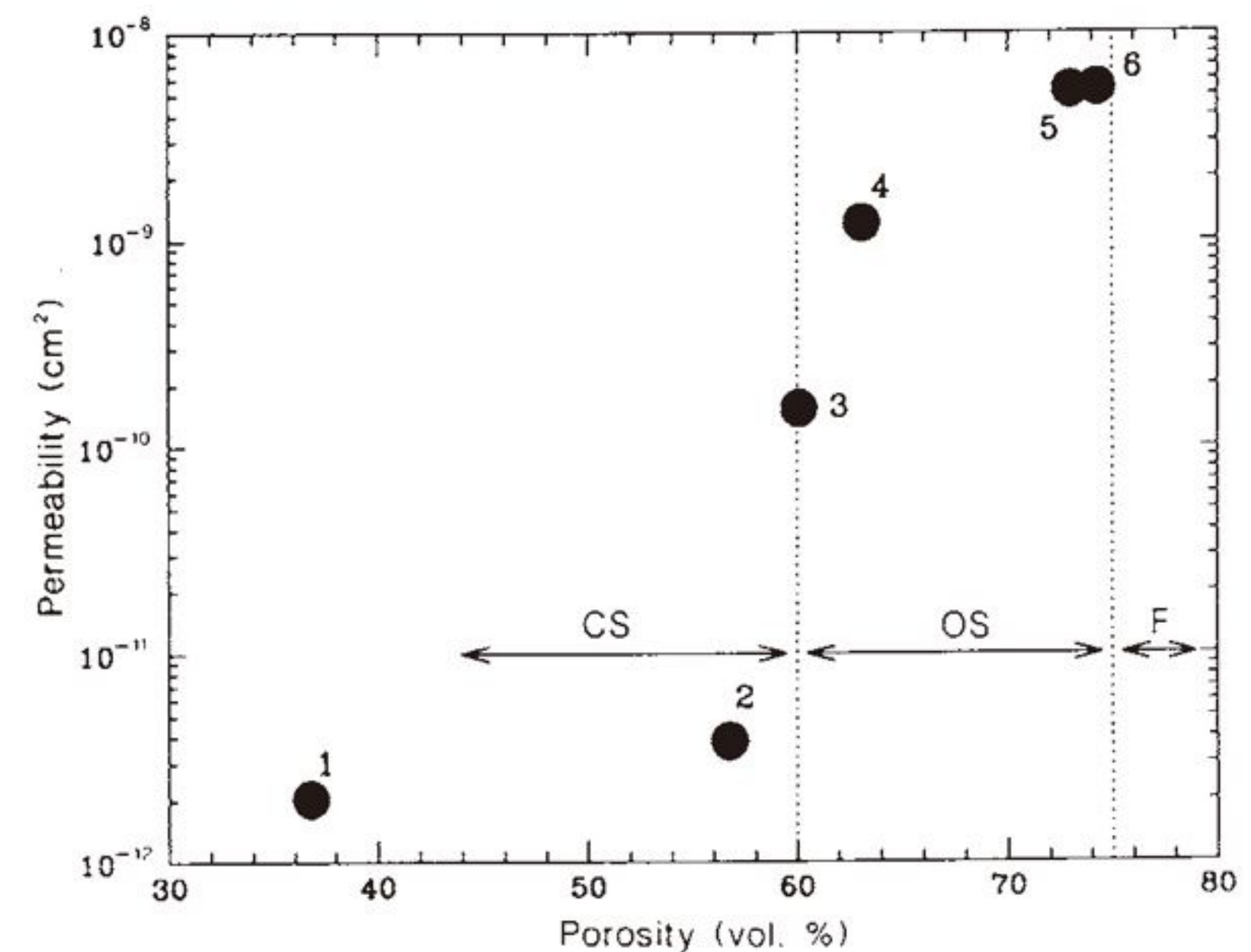
Eichelberger et al. (1986)

### Inyo domeの火道壁付近の気泡組織



浸透率が60%を超えると急激に増加する

→マグマの爆発的・非爆発的噴火は気泡を介した浸透脱ガスに影響される。



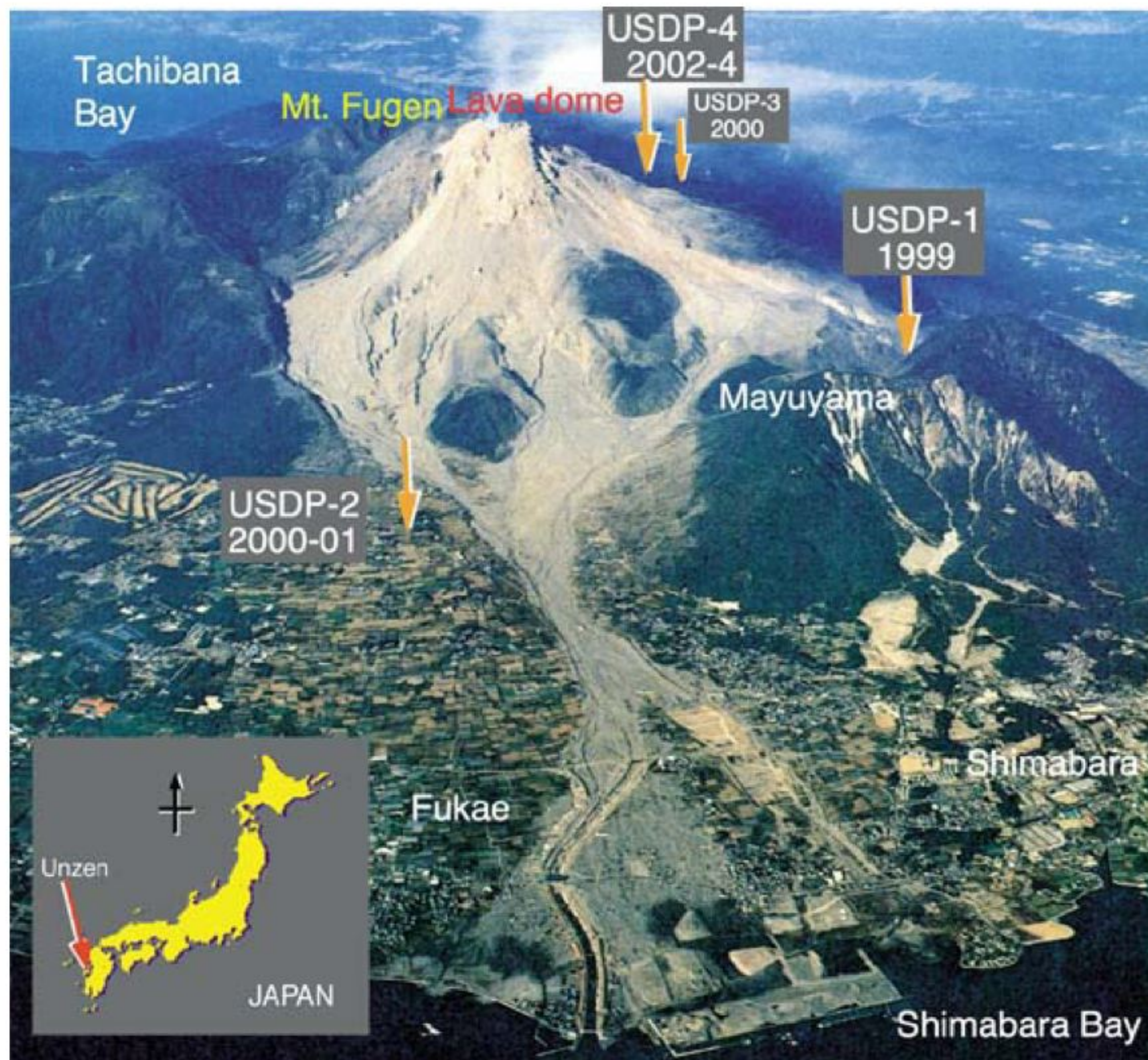
Eichelberger et al. (1986)



# 雲仙火道掘削

Unzen Scientific Drilling Project  
2002年4月~2004年7月まで

噴火間もない火山帯内部を掘削した  
世界で初の試み

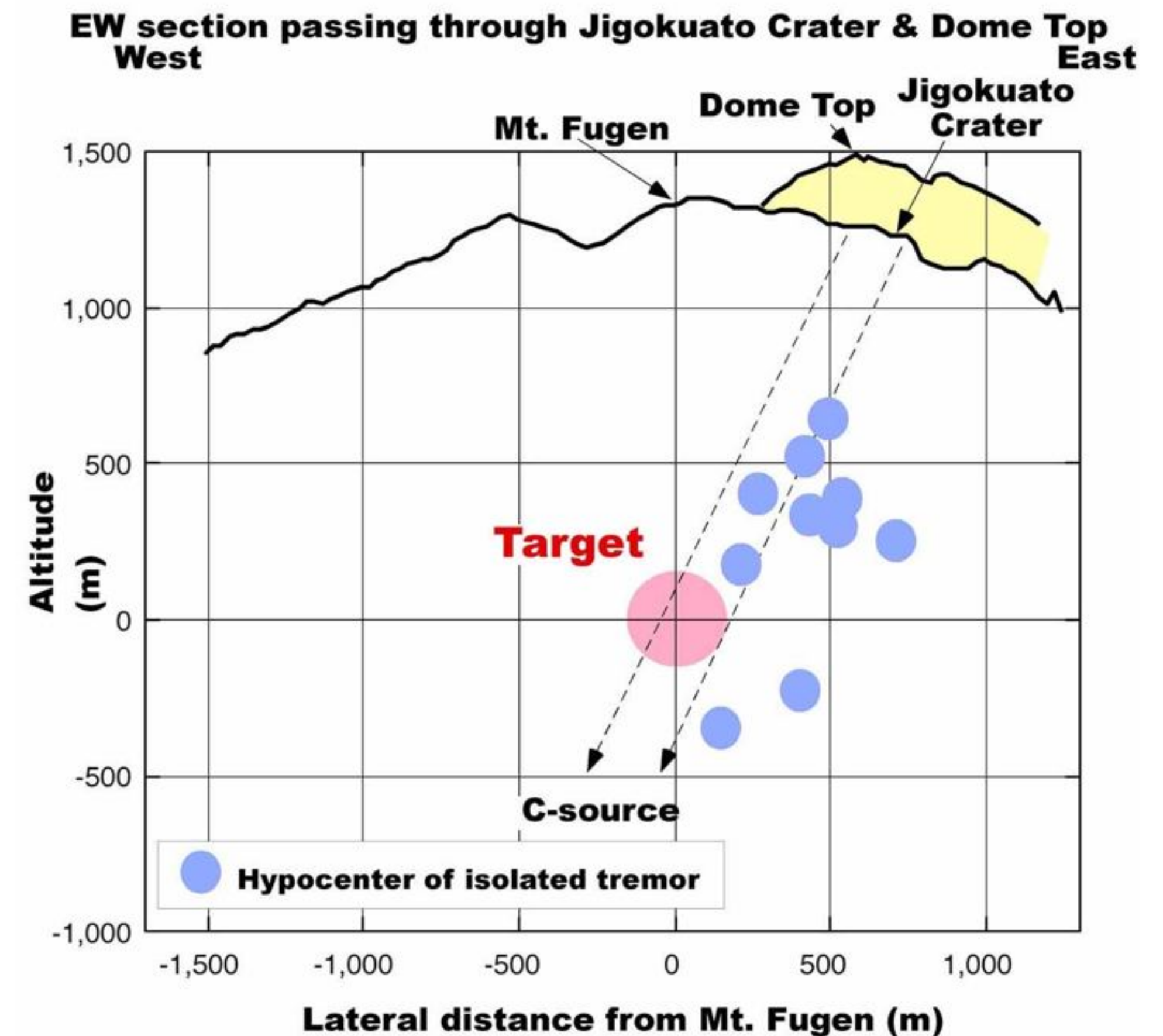
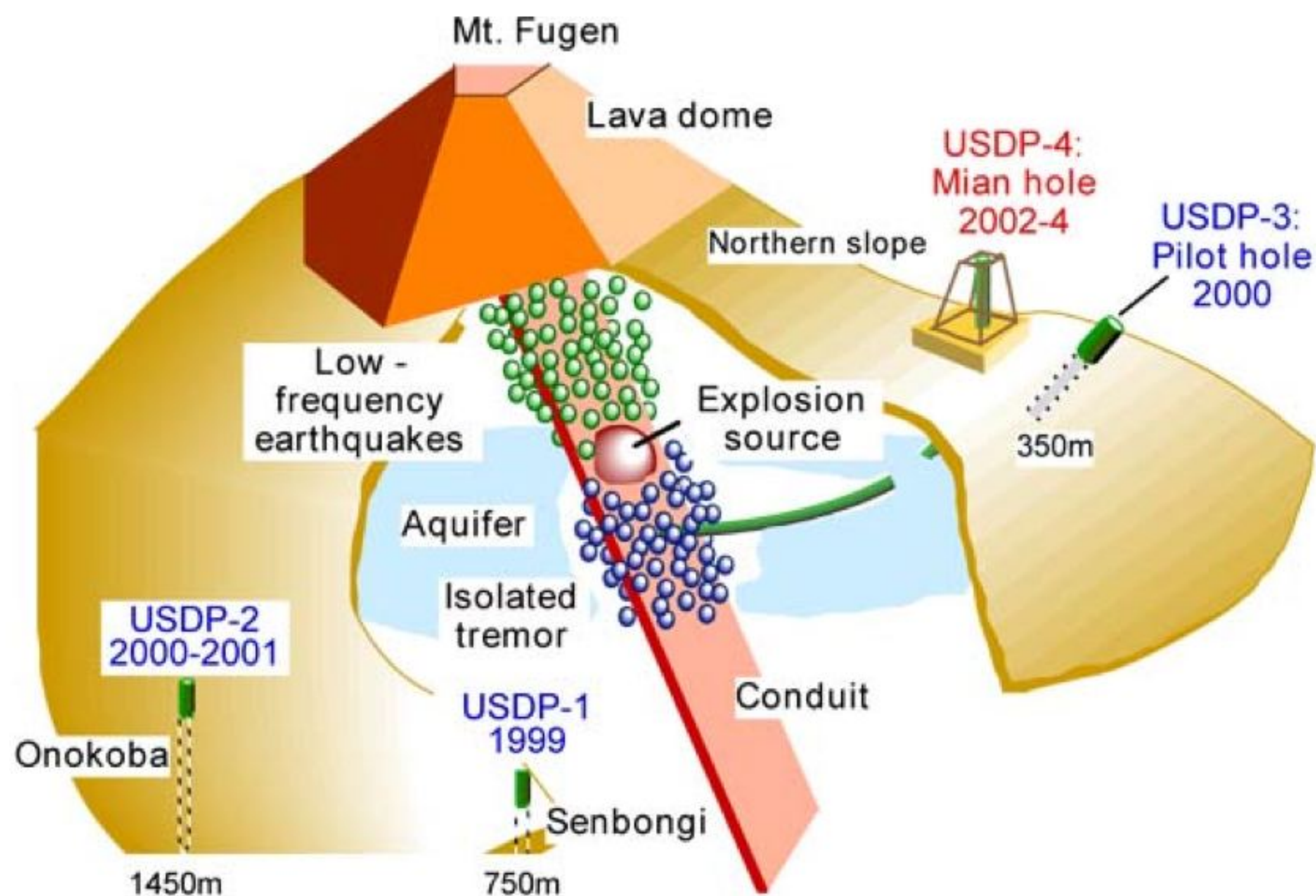


USDP-4 掘削サイト



# 火道掘削の目的

- ・地表付近の脱ガスの振る舞い
- ・結晶化プロセス
- マグマの上昇機構→数値モデルの構築
- ・孤立型微動の成因(海拔0 m付近で何が生じているか?)



我々が直接観察することができない地下のマグマの流動過程の実態を明らかにすることができる



# Pressure source model

## 岩石学的制約について

ガラス包有物、実験岩石学手法

**Post-mixing magma:** ( $190 \pm 30$  MPa; 7-8 km)

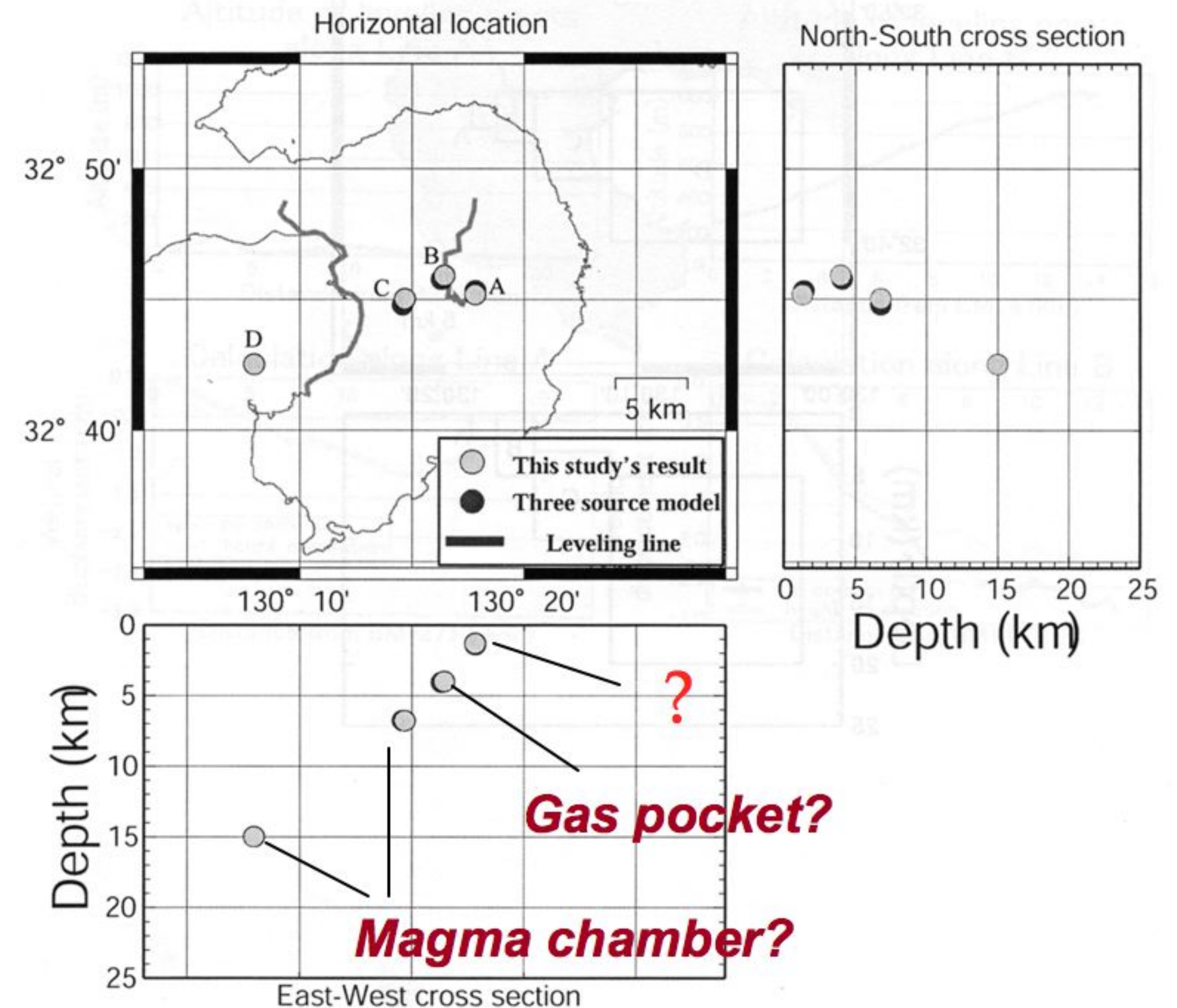
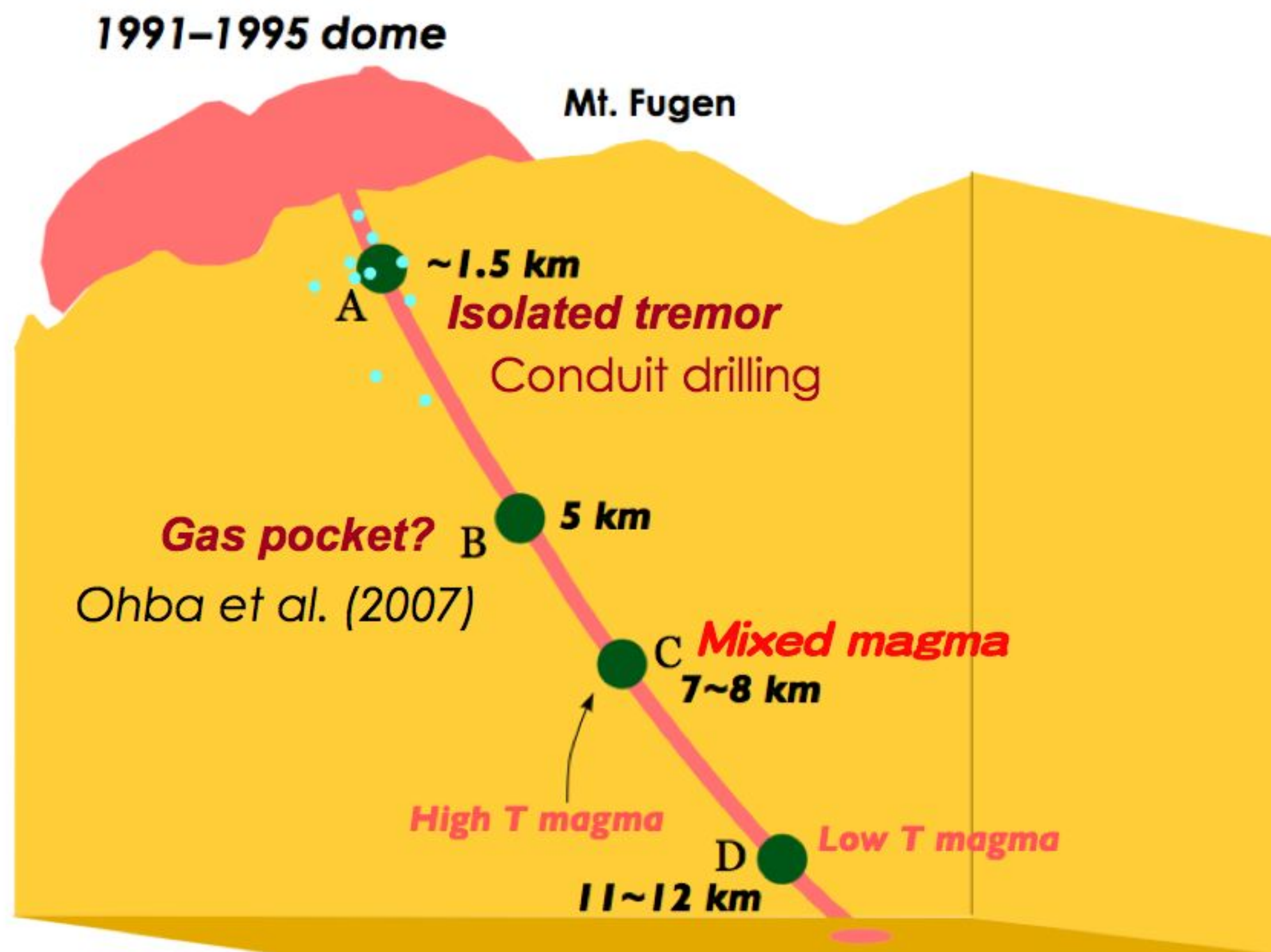
**Low T magma:** (290 MPa 11-12 km)

**Magma chamber?**

山頂付近でのCO<sub>2</sub>濃度の測定  
高濃度のCO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O比が観測された。  
Gas pocket or pipe?

**(120 MPa; 5 km)**

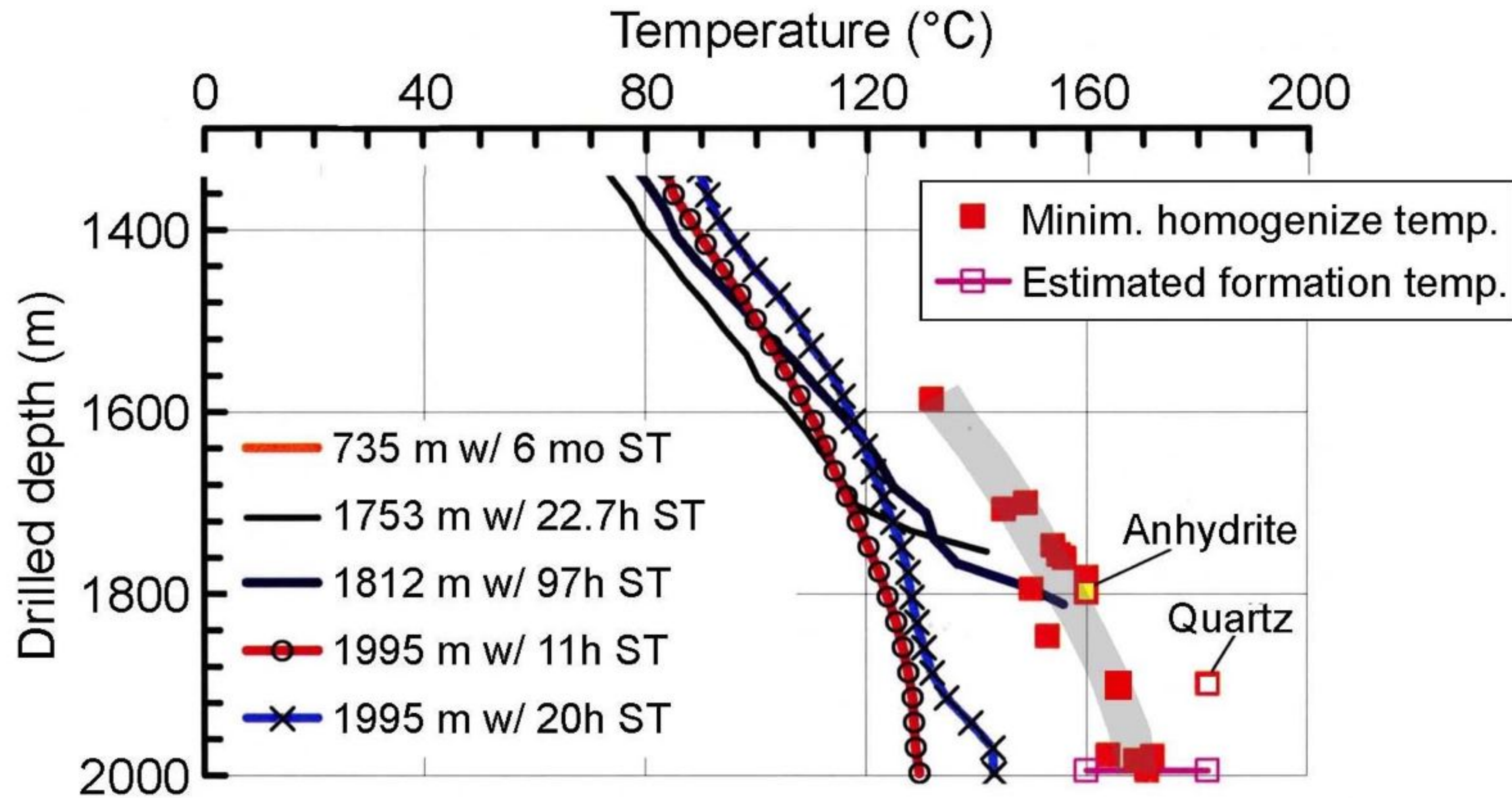
Ohba et al. (2007)



Kohno et al. (2007)



# 掘削深度における温度

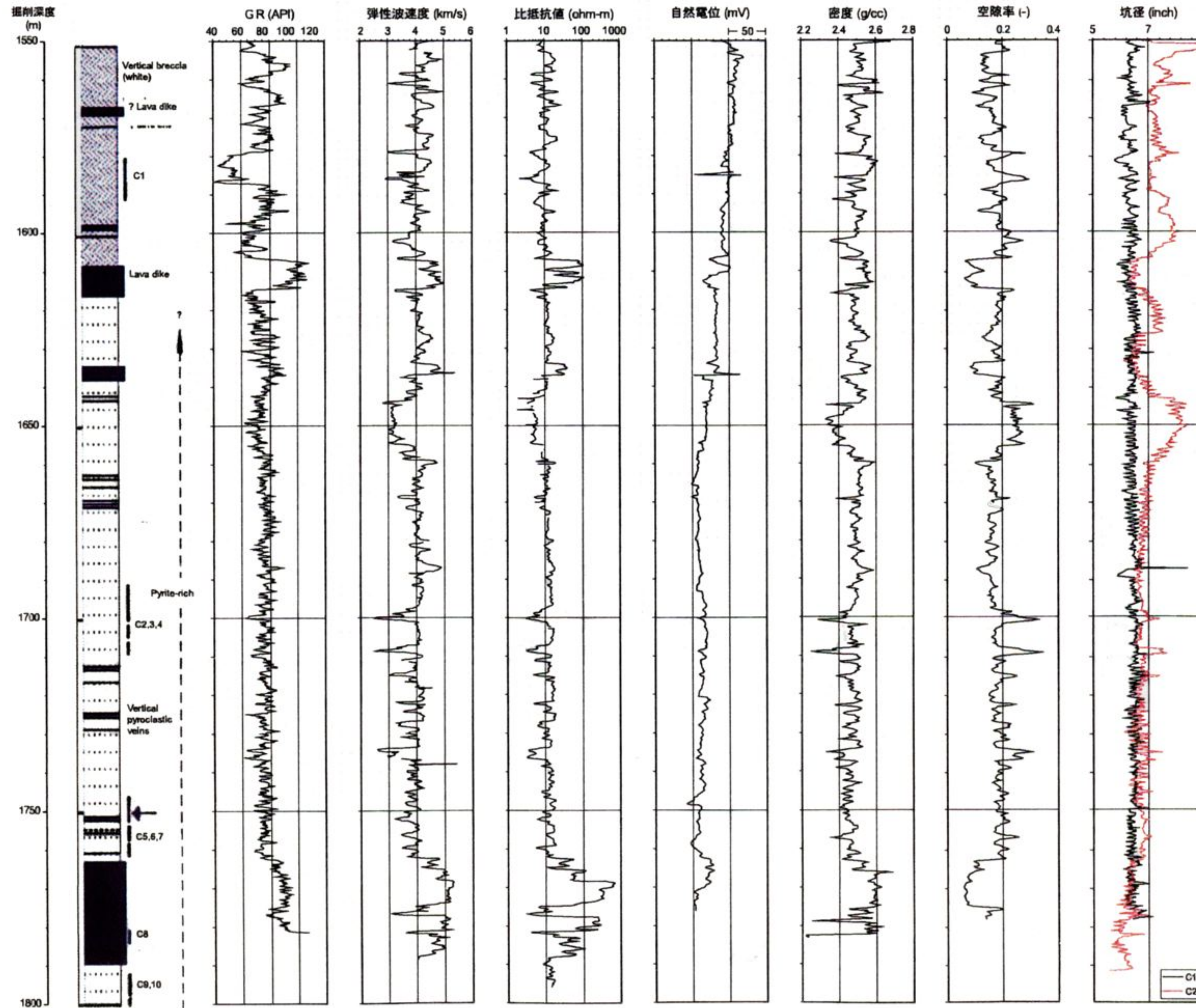


掘削後に行われた温度測定(左側の4曲線。掘削深度と待機時間STを示す)。  
推定温度は回復温度を用いたホーナー法による推定。  
最下部の岩脈の温度は180°C前後と推定される。



# 物理検層

溶岩岩脈部分では、低空隙率、高密度である



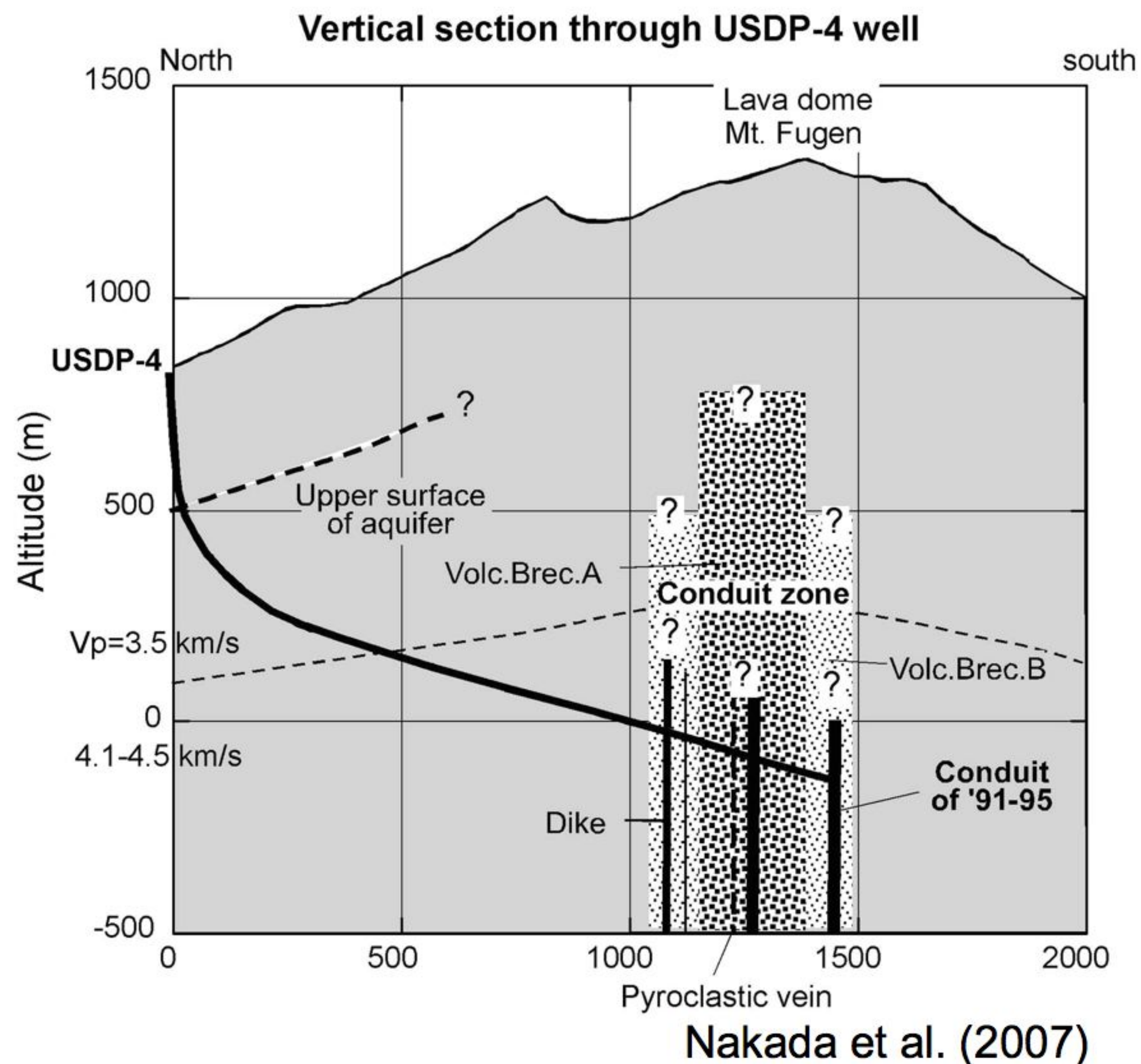
USD-4 深度1,812m掘削時の坑井内検層結果



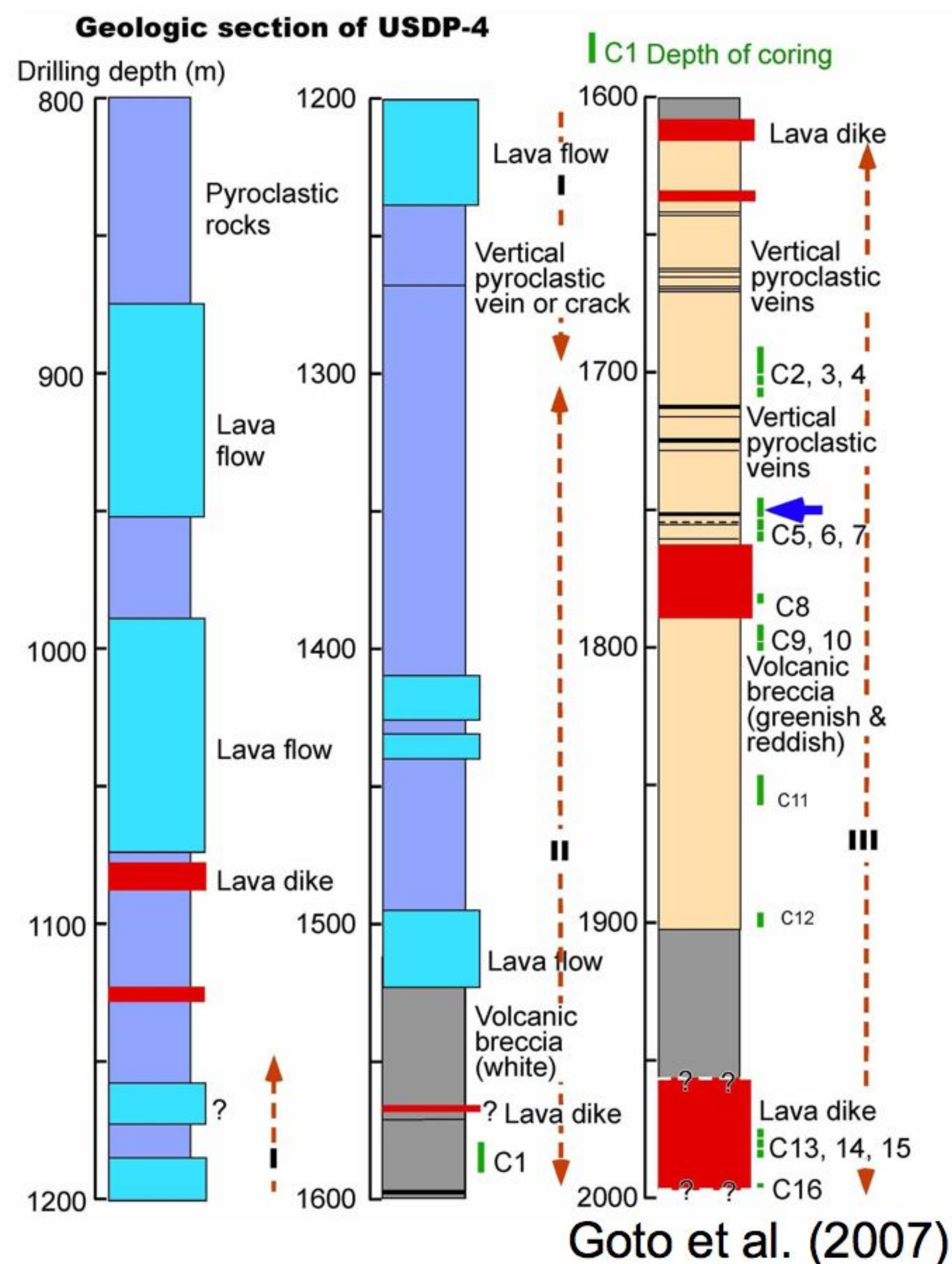
# 掘削概要

掘削深度: 約2000m

スポットコア16本、それ以外はカッティングスを回収 (削りカス)



## 火砕岩脈無数に認められる





# 1954-1995.75 m dike(岩脈の部分)



C13 1-5

Fracture zone



C13 (1975.1-1977.4 m)

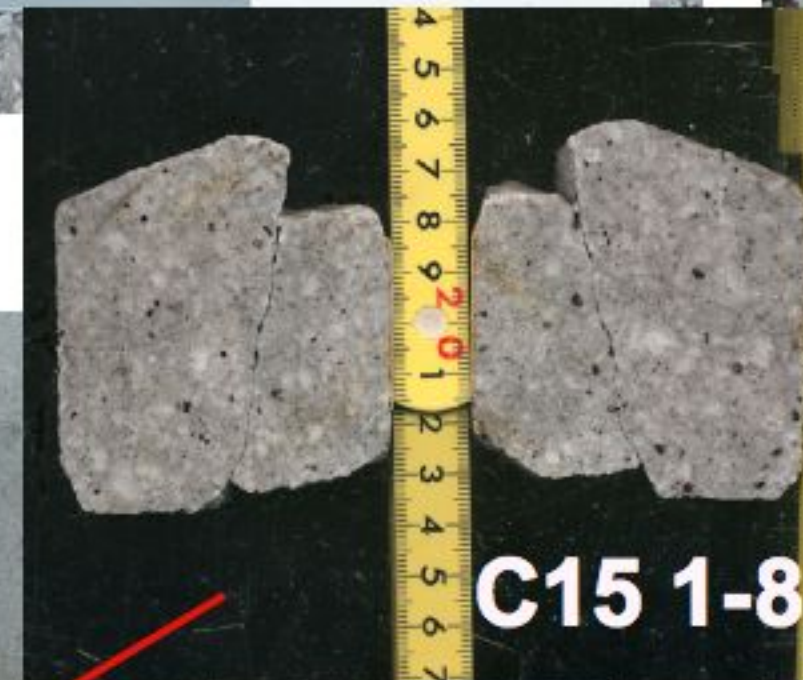
Perlitic fracture (C14-1-1)



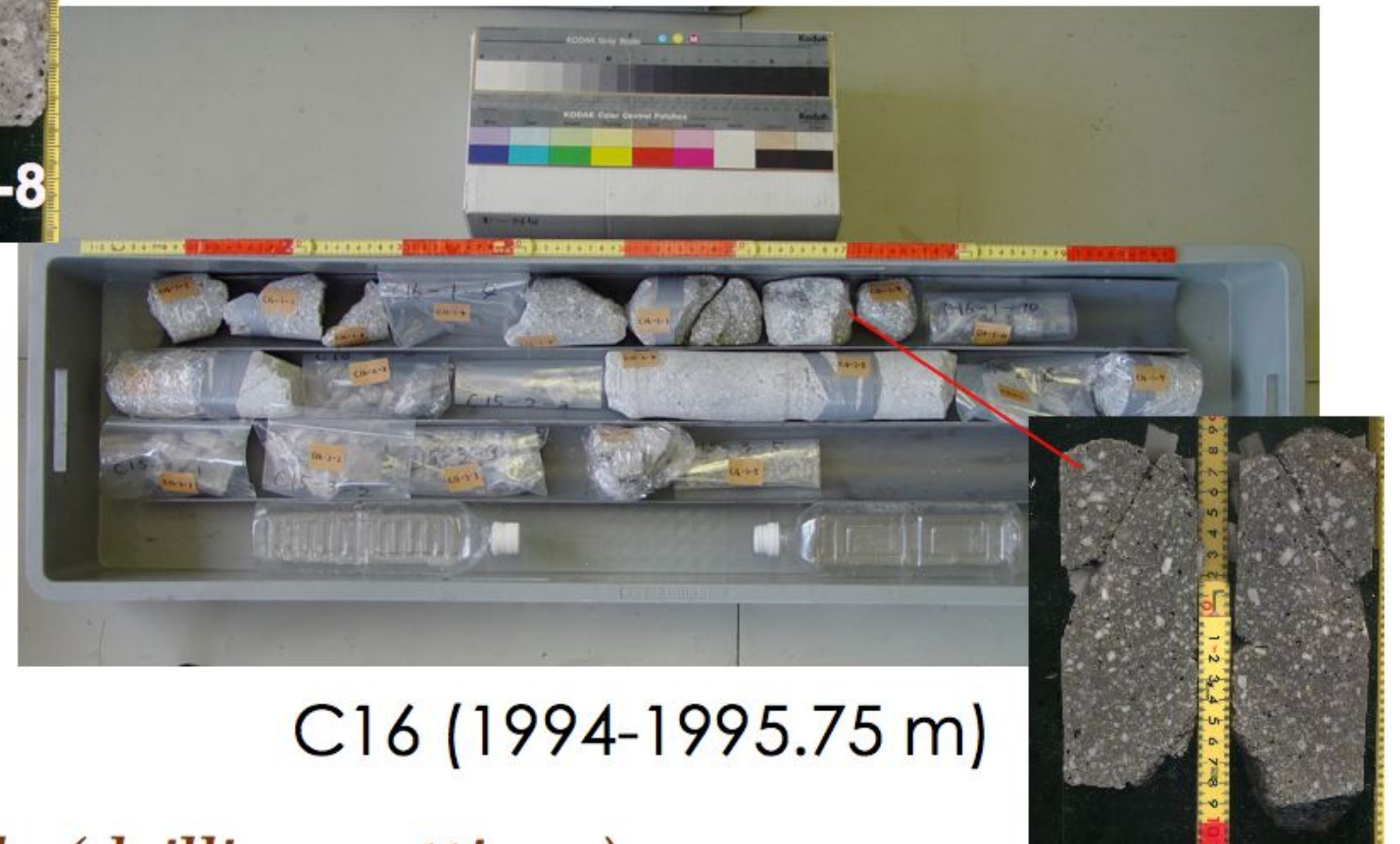
C14 (1977.4-1980.7 m)



C15 (1980.7-1984.2 m)



C15 1-8



C16 (1994-1995.75 m)

1954-1975.1 m, 1984.2-1994 m sample (drilling cuttings)

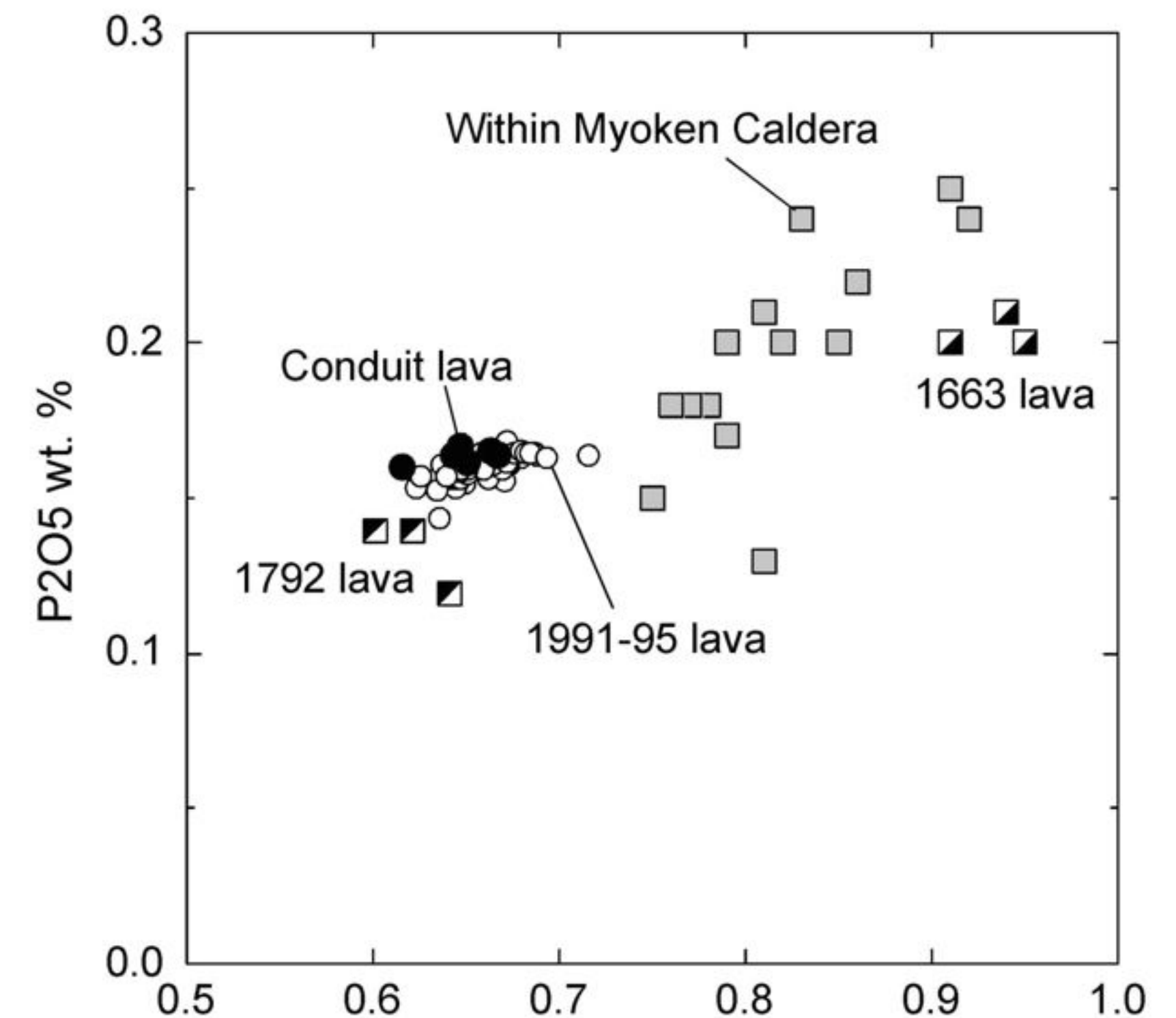
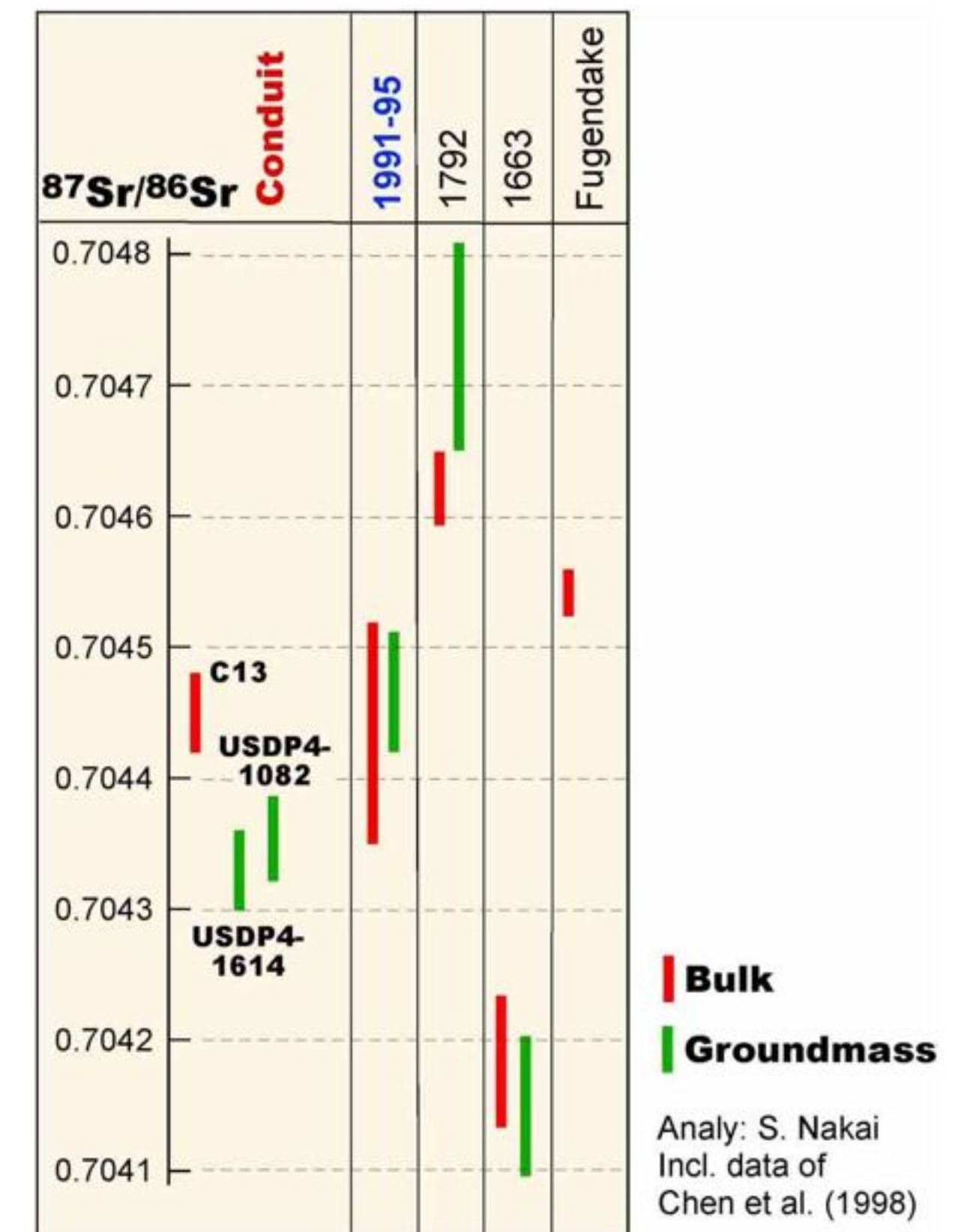
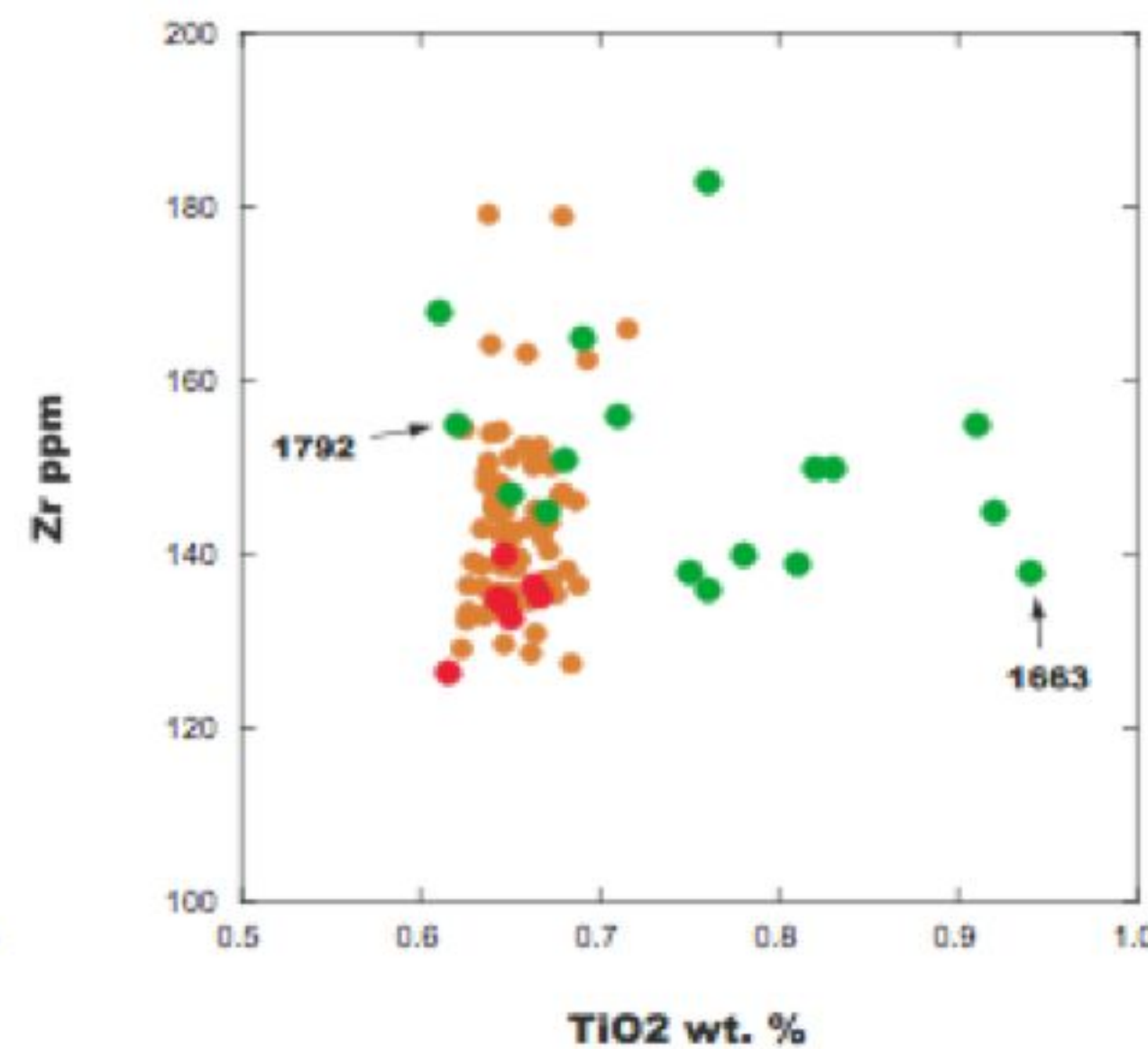
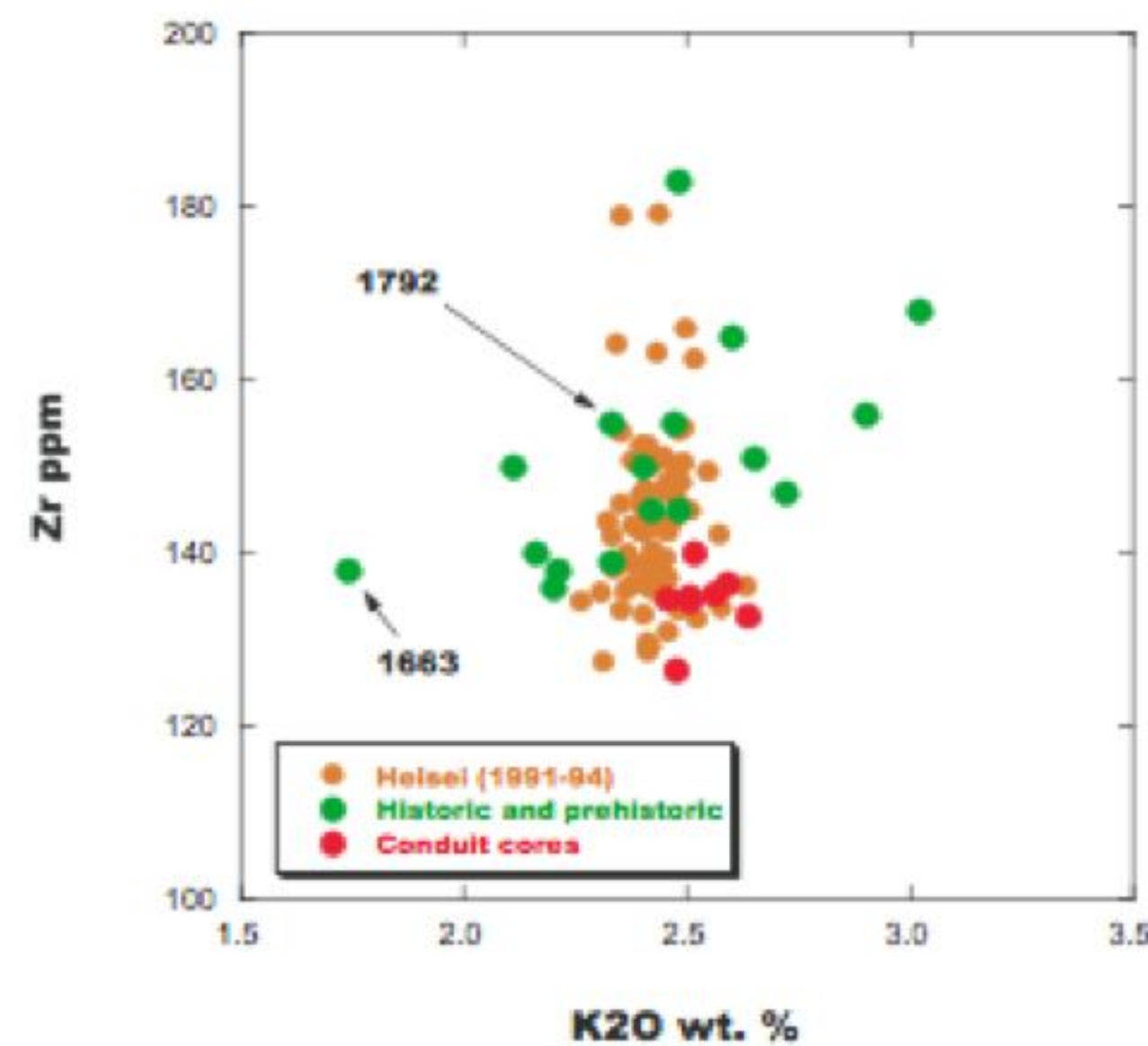
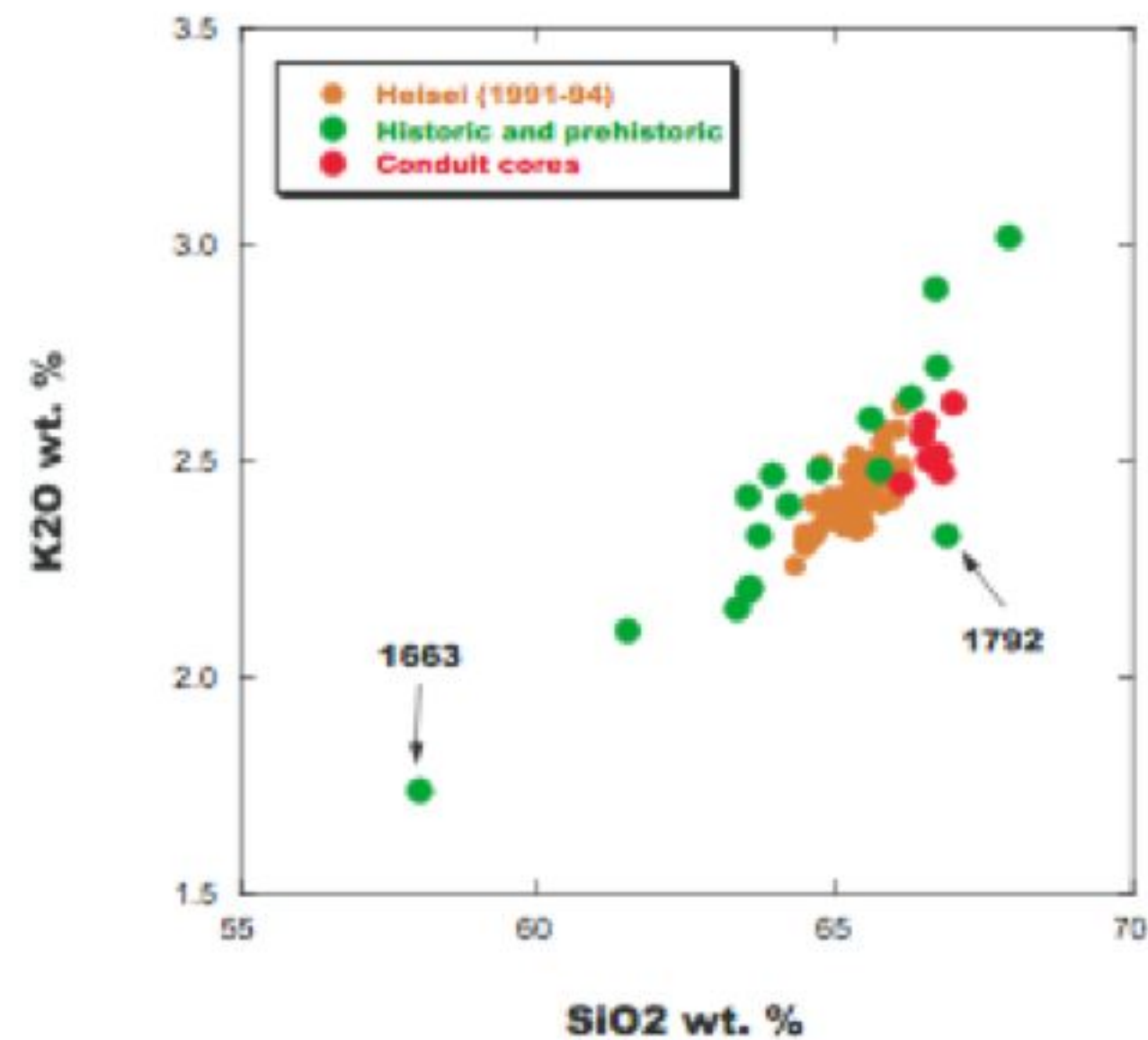
いくつかglassyな部分がありdikeの境界を見ている可能性がある  
複合岩脈の可能性!?



# 全岩化学組成

1954–1995.75 m dike 部分

平成噴火の化学組成と一致する





## 火道掘削でわかった事

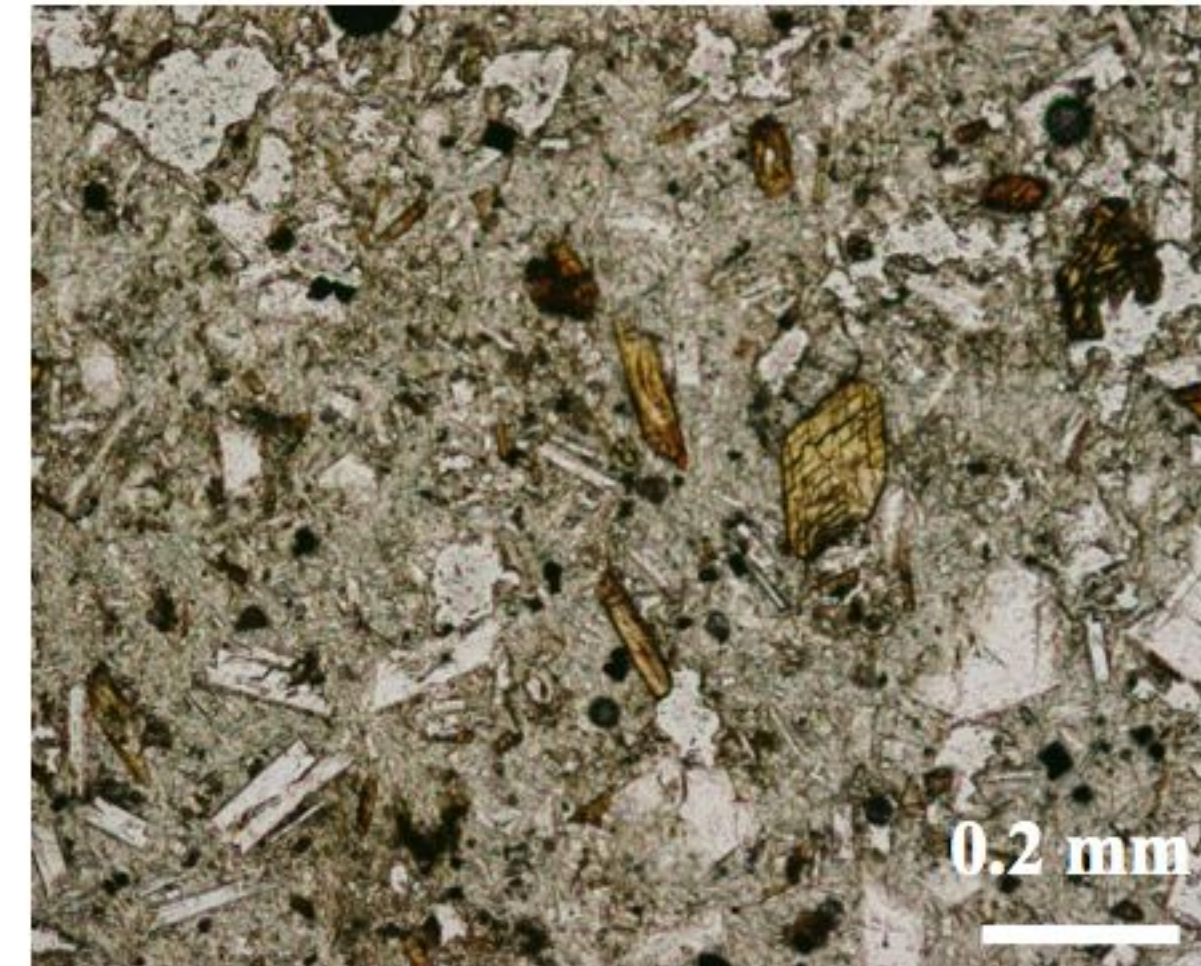
- ・ 雲仙火山下では火道が密集する火道域が存在する
- ・ 火道はパイプ状ではなく、板状岩脈である可能性が高い
- ・ 火砕岩脈が無数に観察された  
→ 海拔0m付近の孤立型微動の原因は火砕岩脈の形成に伴う
- ・ 火道試料、母岩ともに低発泡度であった(<20 vol.%)  
脱ガスが低発泡度で起こった？
- ・ 4本の岩脈のうち、最後の1954–1995.75 m dikeは平成噴火の化学組成に非常に類似している。



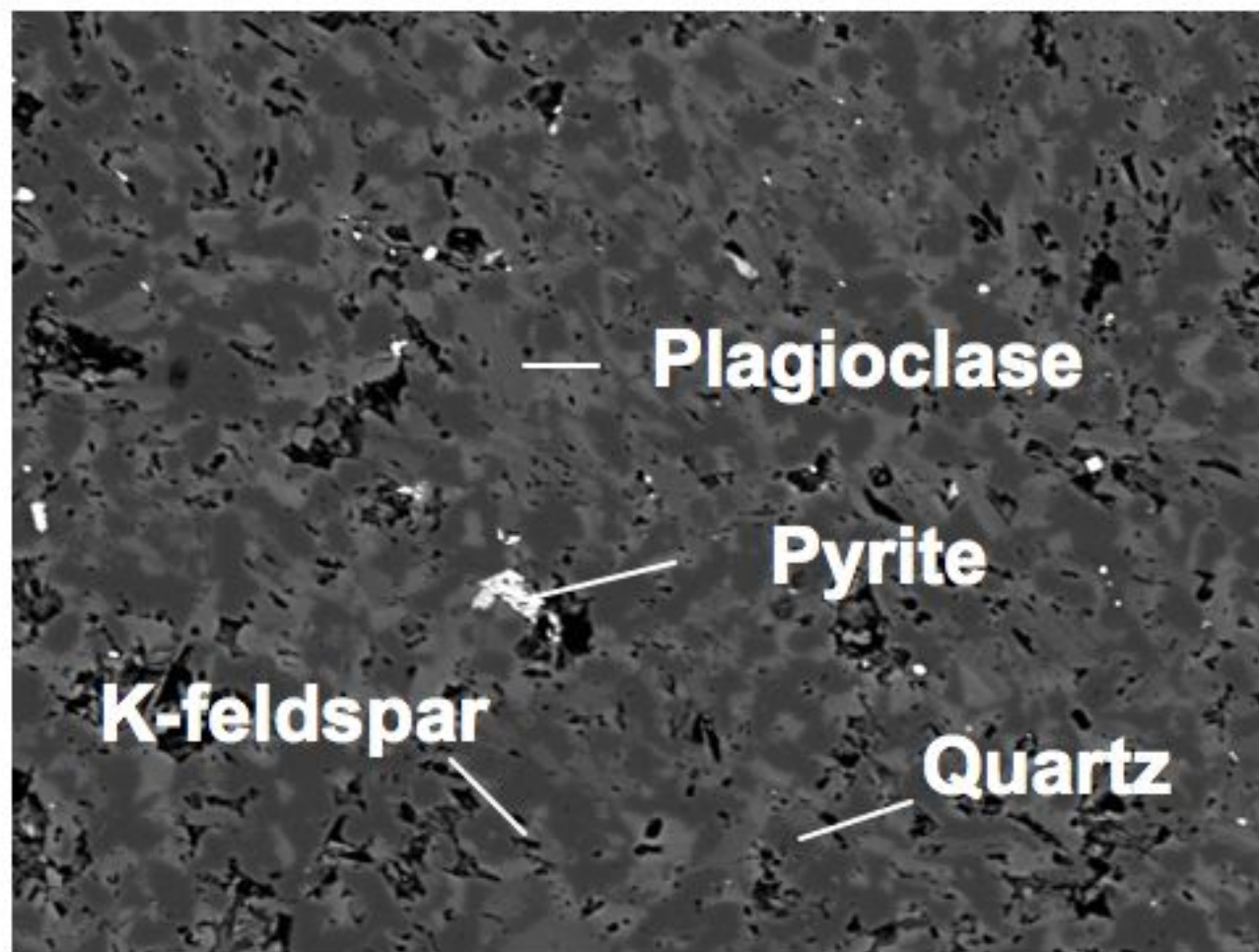
# 岩石組織



平成噴火

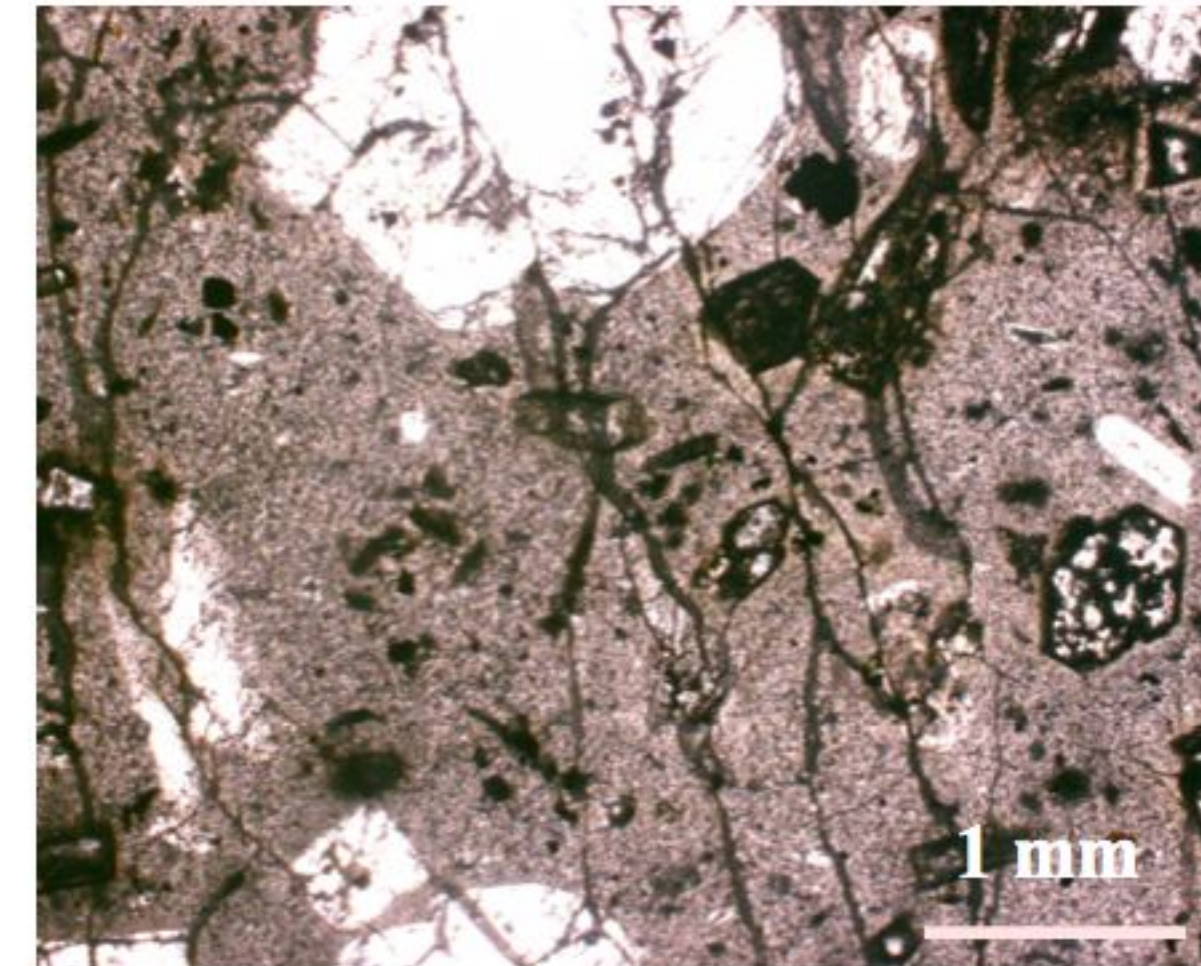


平成噴火  
Qz斑晶含む



C16-2-7 (1995m)  
火道試料

width: 300 μm



火道試料  
Qz斑晶含まない

## Groundmass:

斜長石(針状)、石英、カリ長石(モザイク状)、黄鉄鉱

等粒状:モザイク状の *quartz*, *feldspar*, *pyrite*  
*micro-crystalline*, *crypt-crystalline texture*  
(数  $\mu\text{m}$ ~数十  $\mu\text{m}$ の結晶から構成される)

完晶質(originalの組織ではない)

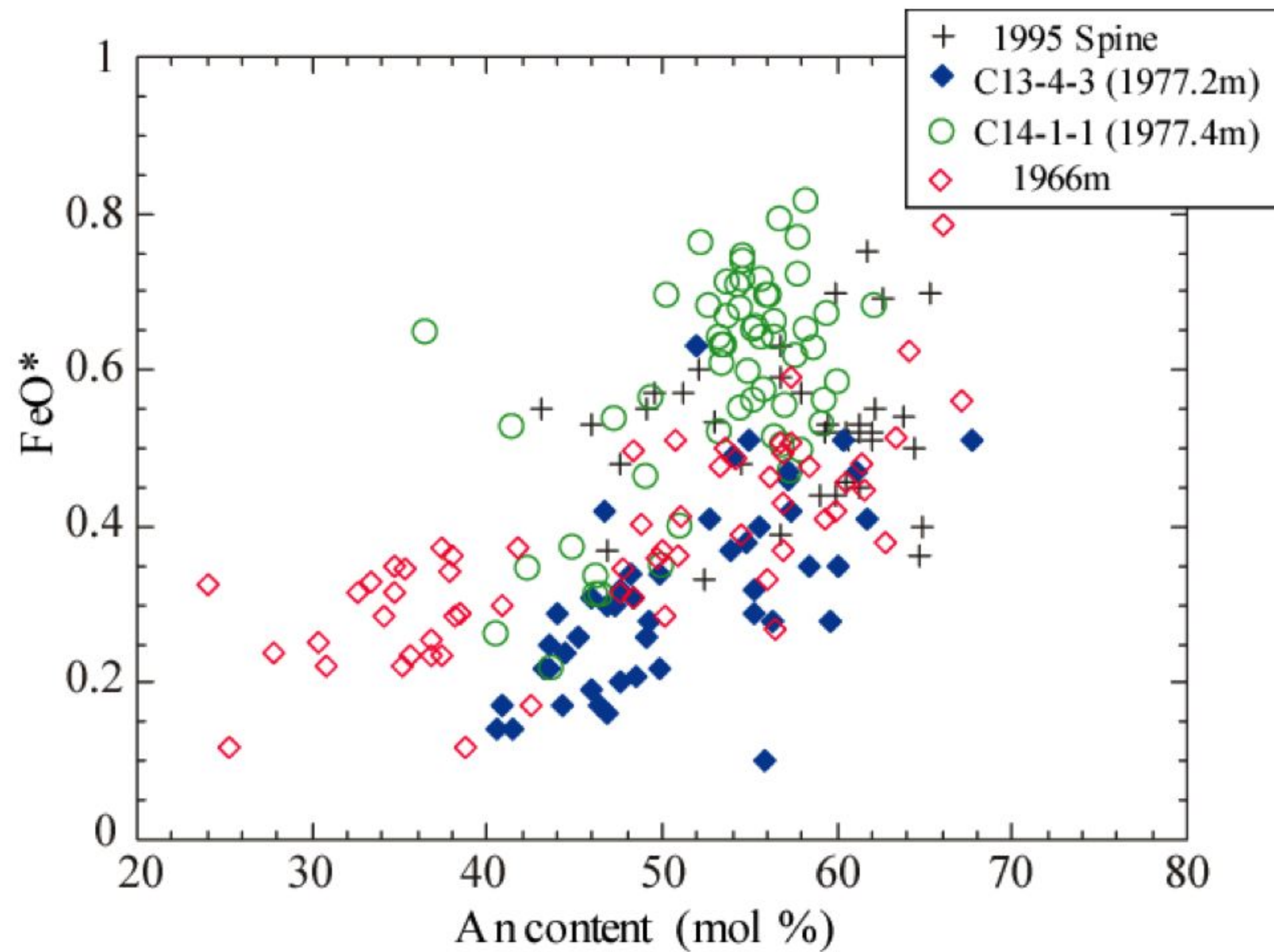
ガラス(メルト部分)が二次的に結晶化した

鉱物が変質している

明らかに平成噴火試料と火道試料  
のtextureと鉱物組み合わせが異なる



# 斜長石の化学組成



火道試料: Fe, An量に乏しい  
明らかに平成噴火とは異なる



# 斑晶中のQzの存在

雲仙火山では普遍的に認められる

つまり平成噴火に限らず、いずれの噴火でもQzは含まれるはずである。

## Qzが溶けた？

### 1. 熱水反応に伴う溶解

Qzの溶解速度(温度、溶液にもよるが)  
鉱物の中で一番溶けるのに時間がかかる

→Qzだけ溶けるのは考えにくい

### 2. 非平衡メルト(高温マグマ)により

Qzのみ溶解する場合(他の鉱物が溶けない)

特殊な条件を考える

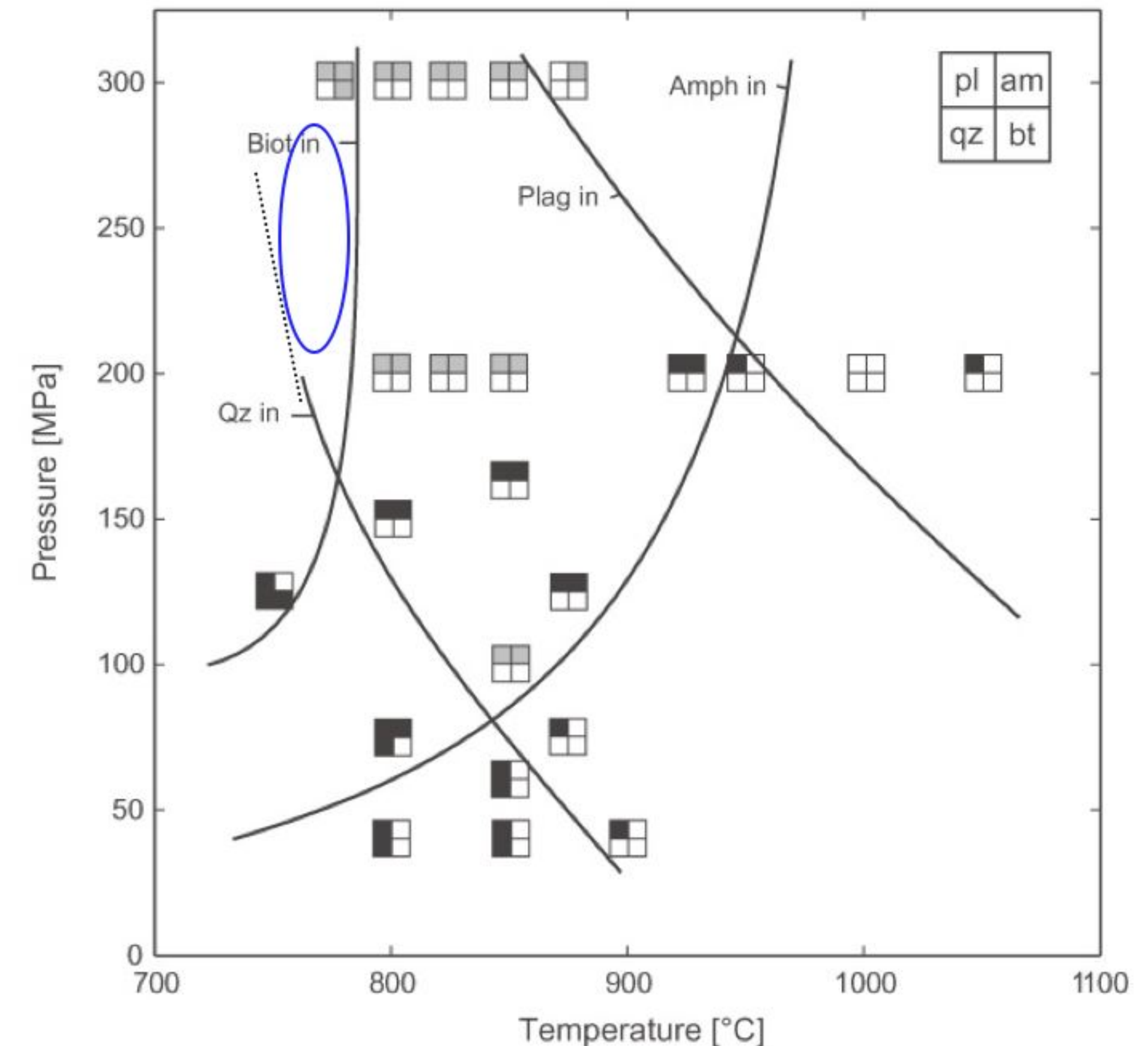
Qzのリキダス、Btのサブリキダスの間(775-800°C)

Post-mixing magma (880°C)

雲仙のマグマ: 3ヶ月から1年半程度かけてマグマが上昇してきたにも

関わらず、Qz斑晶は残っている。→完全に溶けるには相当時間がかかるのでは？

## Qzの生成条件



Holtz et al. (2005)



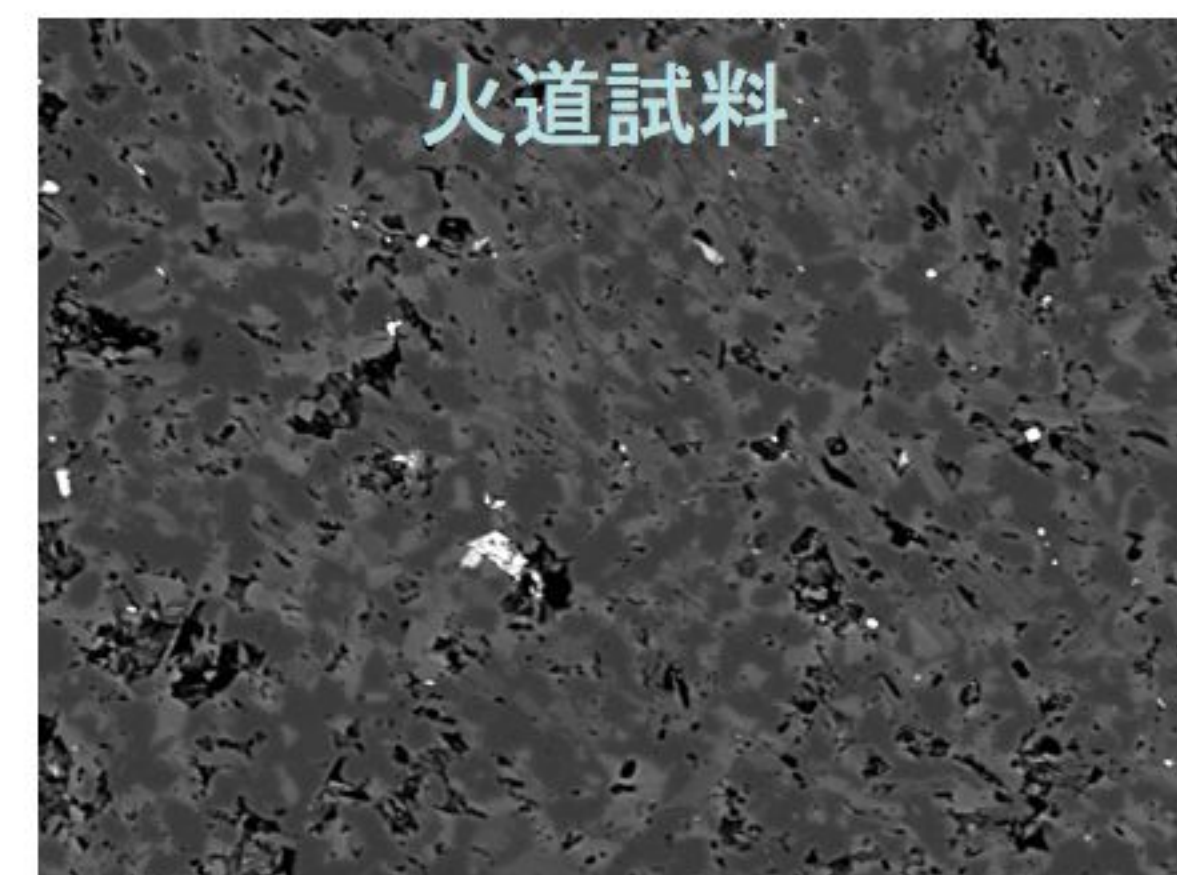
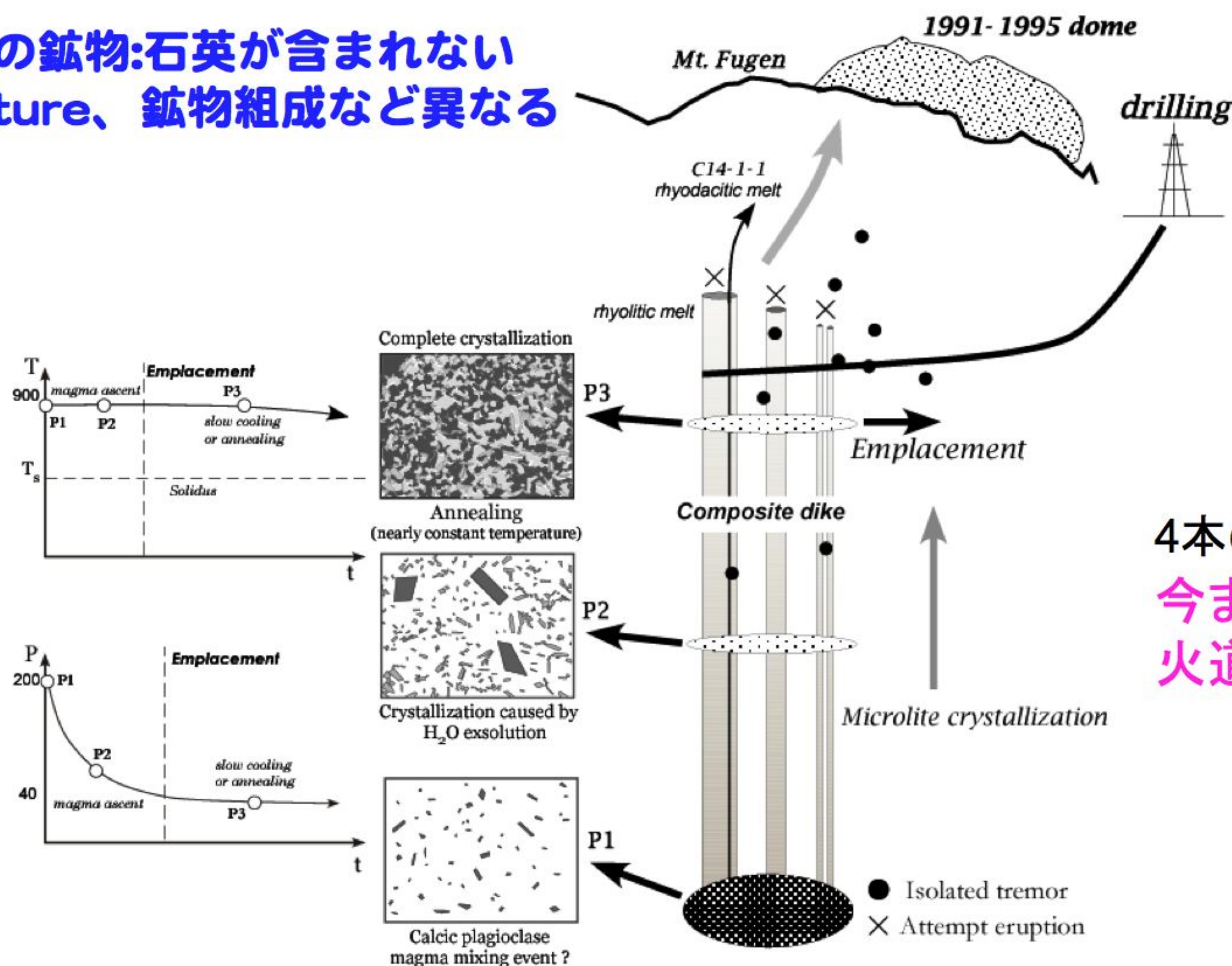
# 火道試料のマグマ上昇過程

火砕岩脈が無数に観察された

→孤立型微動の成因に関係している可能性がある。

解析の結果:岩脈4本ともこれまでの有史時代の雲仙火山の特徴と極めて異なる

斑晶の鉱物:石英が含まれない  
Texture、鉱物組成など異なる

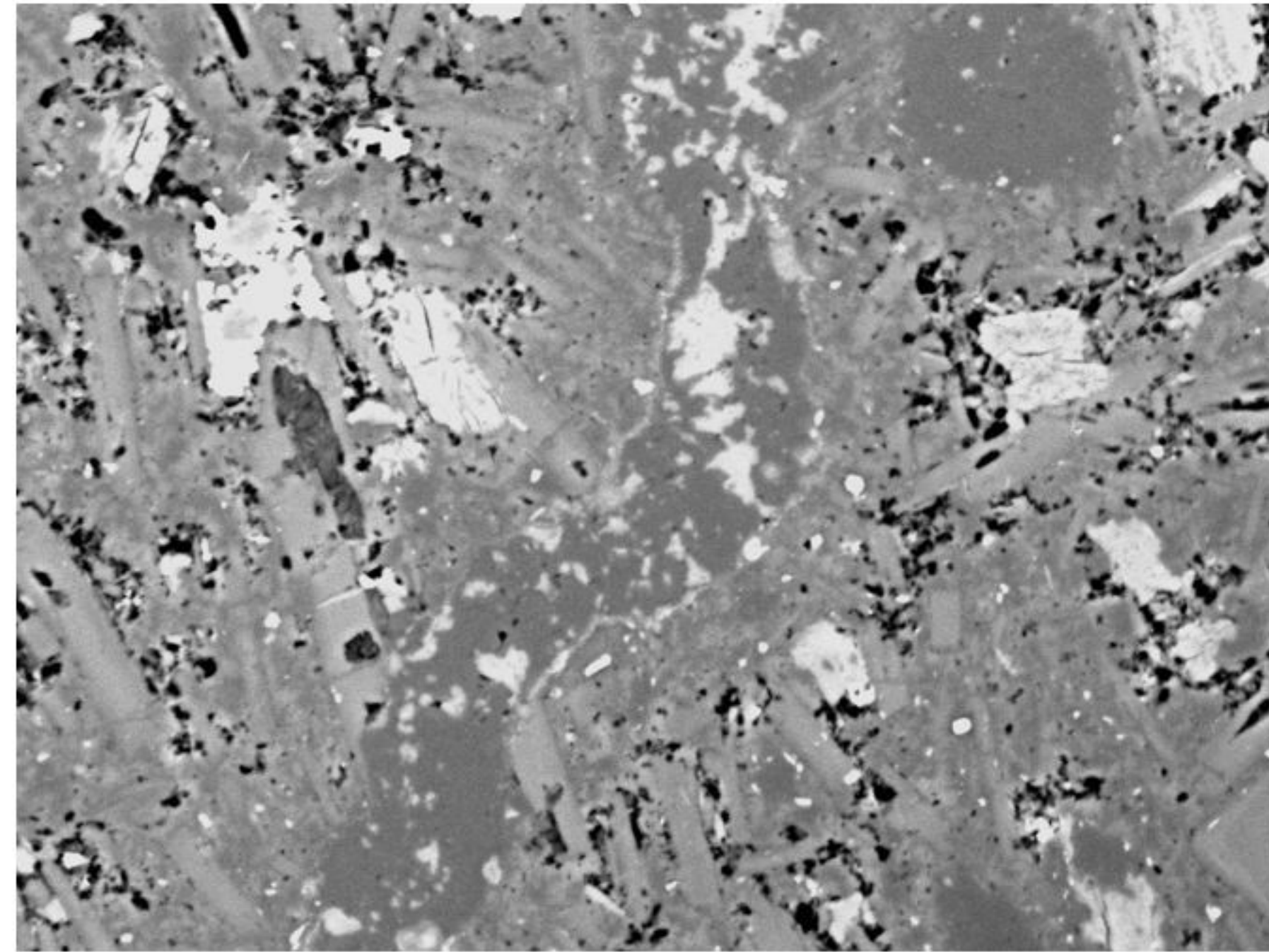
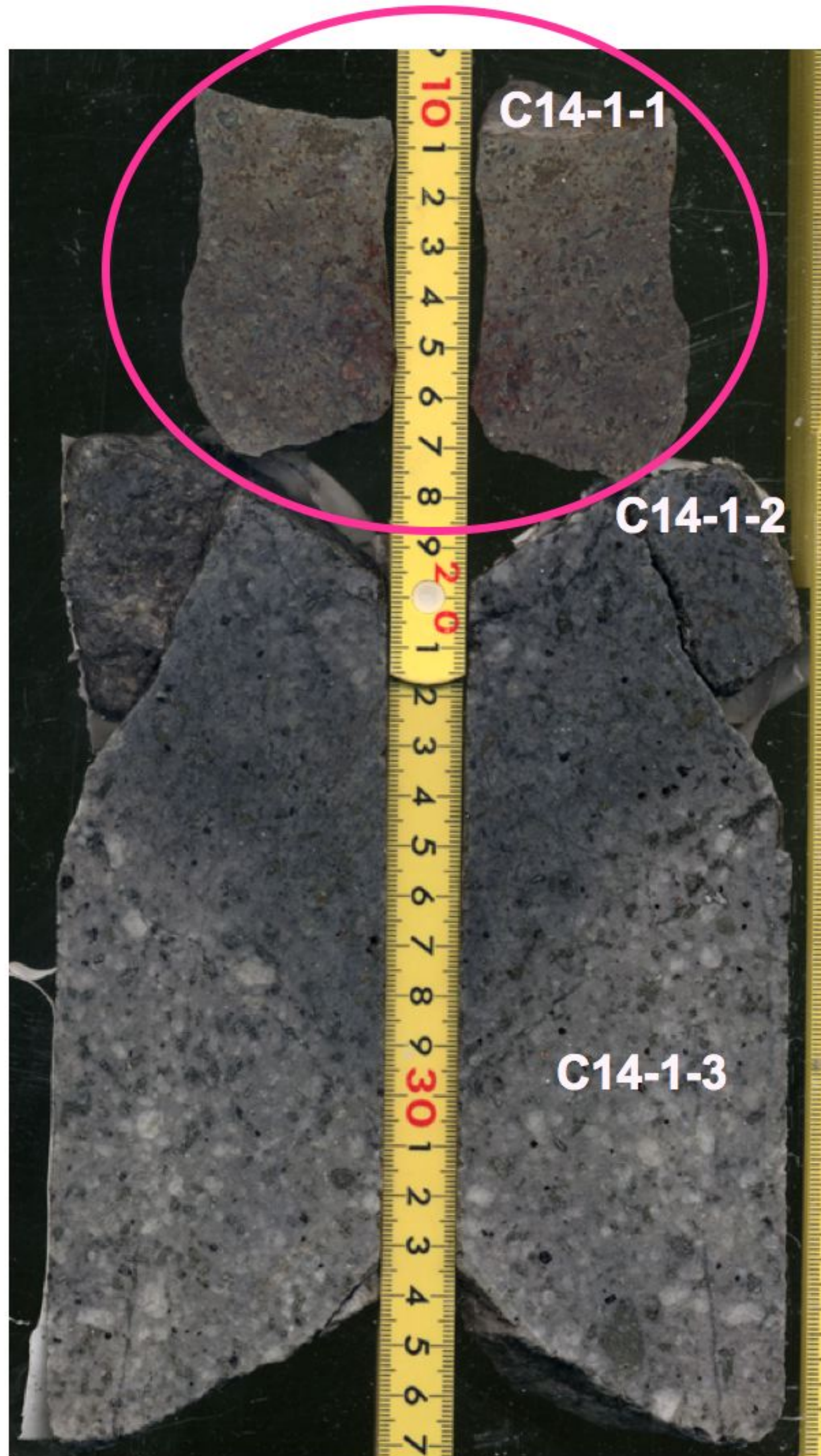


4本の岩脈とも噴火未遂!?

今まで地表に出て来れなかった火道を見ている可能性がある。



# C14-1-1試料について



C14-1-1

50  $\mu\text{m}$

## C14-1-1試料の組成、組織:

これまでの雲仙デーサイト(平成噴火)の特徴と非常に類似している  
境界がはっきりしない

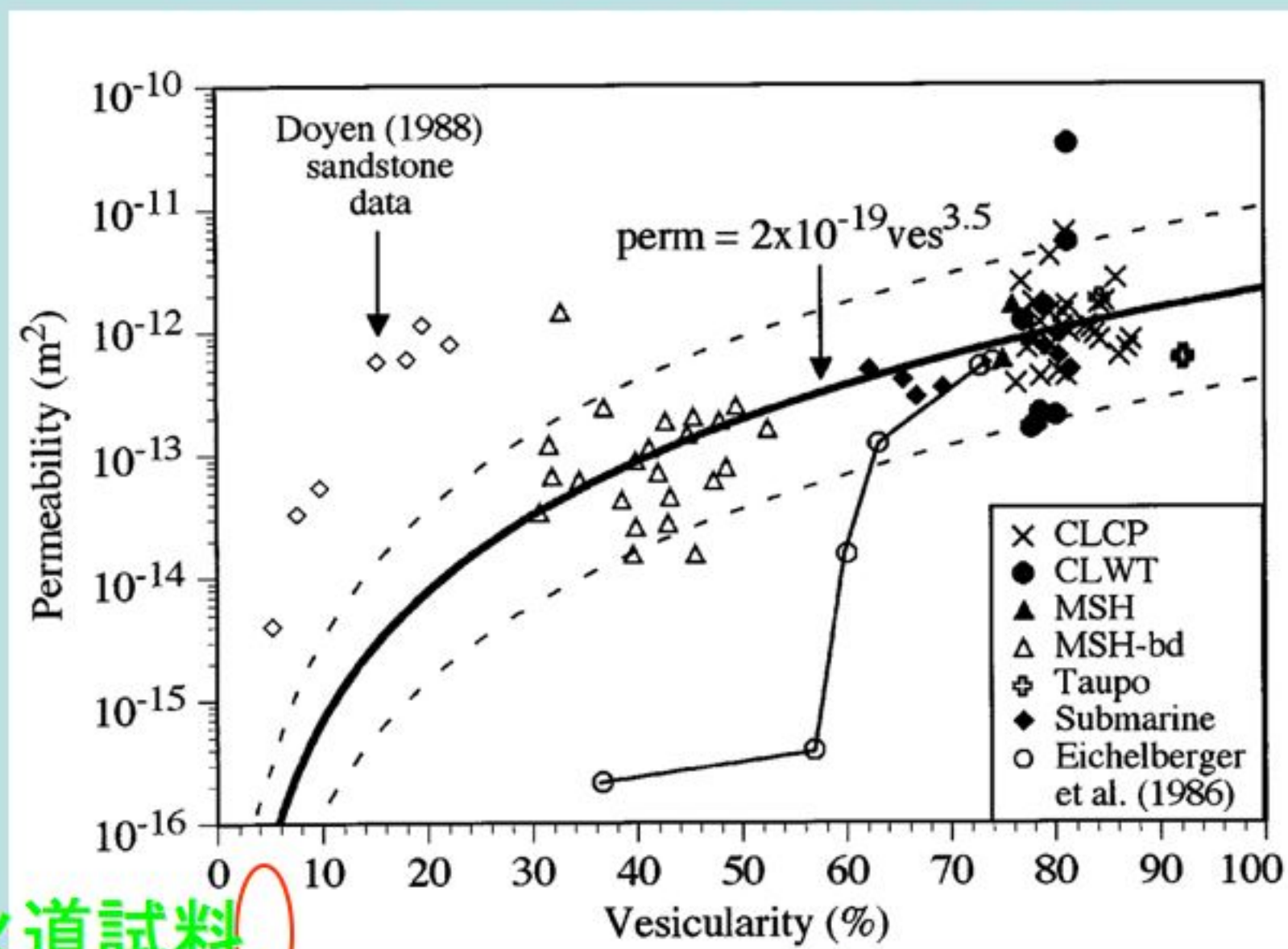
組織、組成の違いから考えると、C14-1-2と同一の  
マグマとは考えにくい

周囲の組織の観察を行うと、C14-1-1のマグマは  
独立に貫入した可能性がある。



# 発泡組織 (C14-1-1)

## 噴出物の発泡度・浸透率



Klug and Cashman (1996)

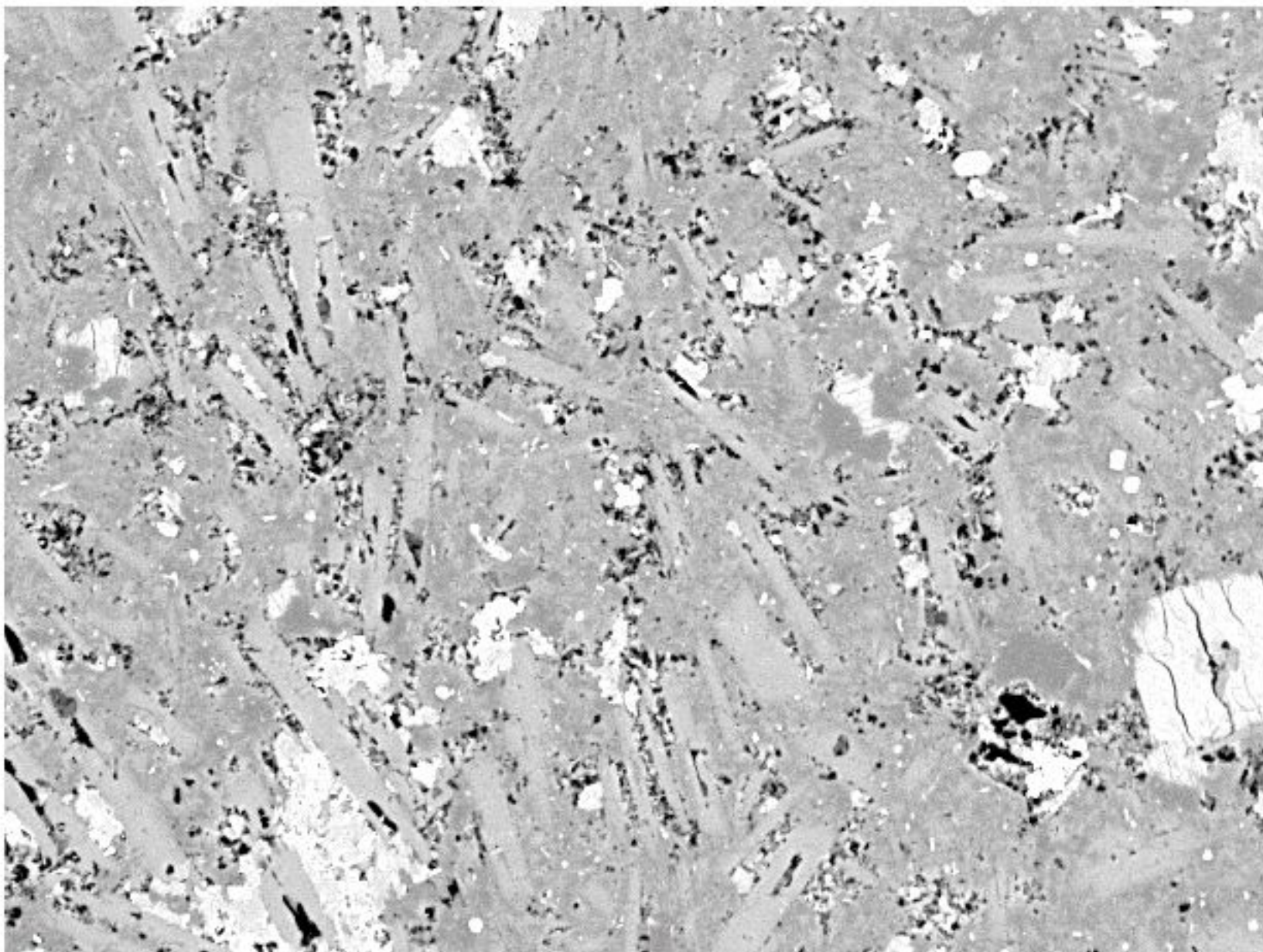
火道試料の浸透率:C1,C12,C13,C14

$10^{-17} \sim 10^{-19} \text{ m}^2$

Watanabe et al., (2006)

堆積直後の組織を保持していない可能性はあるが(例えば気泡の収縮、結晶化による発泡など)、それにしても発泡度が低い。

低発泡度のマグマが上昇している



他の火道試料に比べて比較的よく発泡している

数 $\mu\text{m}$ 程度の孤立した気泡が連結している。



### 3. クラックの形成 岩脈: クラックに充填されたマグマ

クラックの素過程についてアナログ実験から理解する

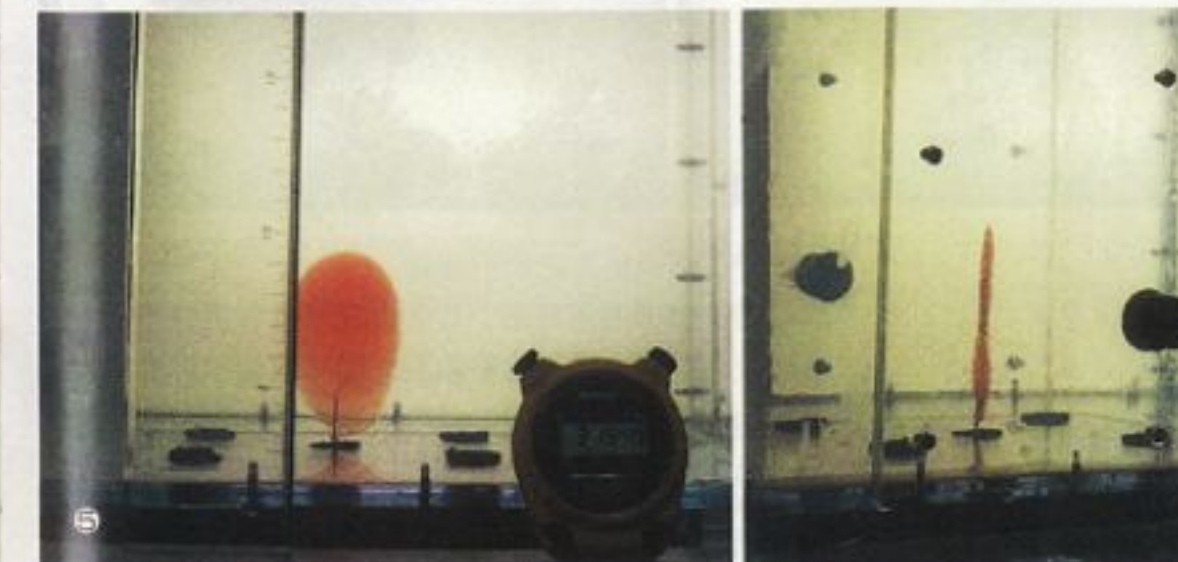
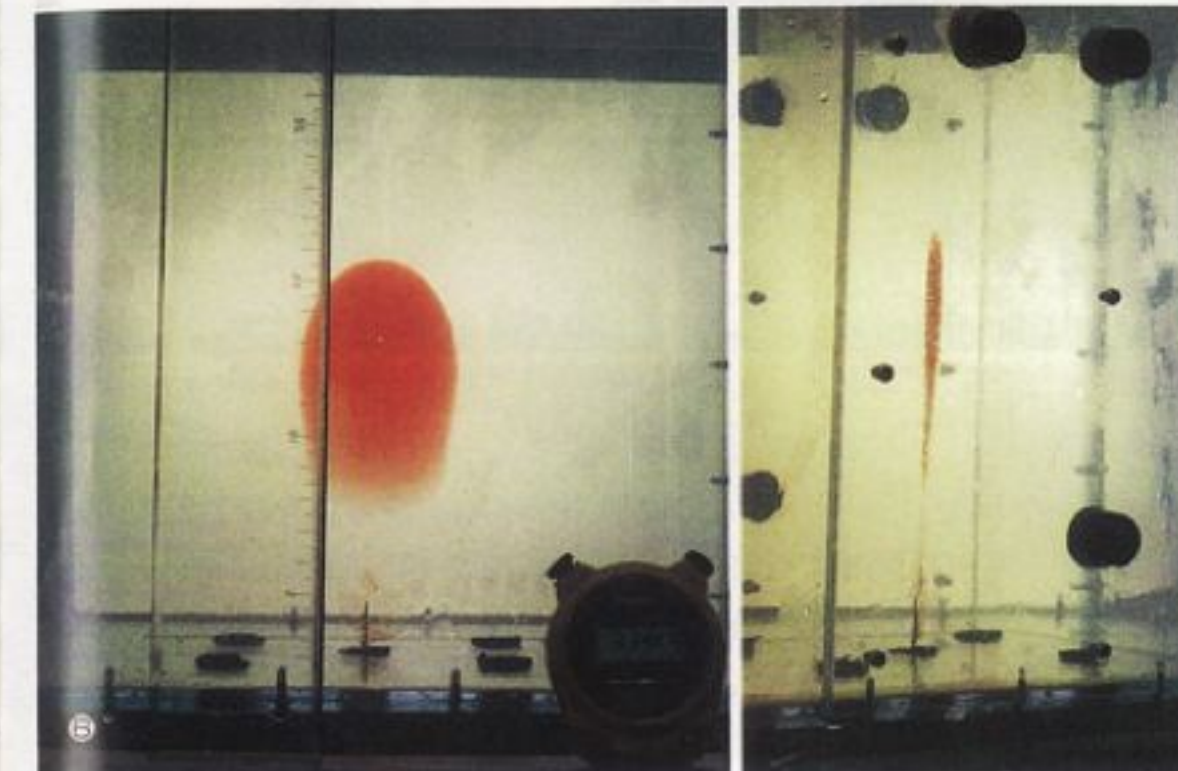
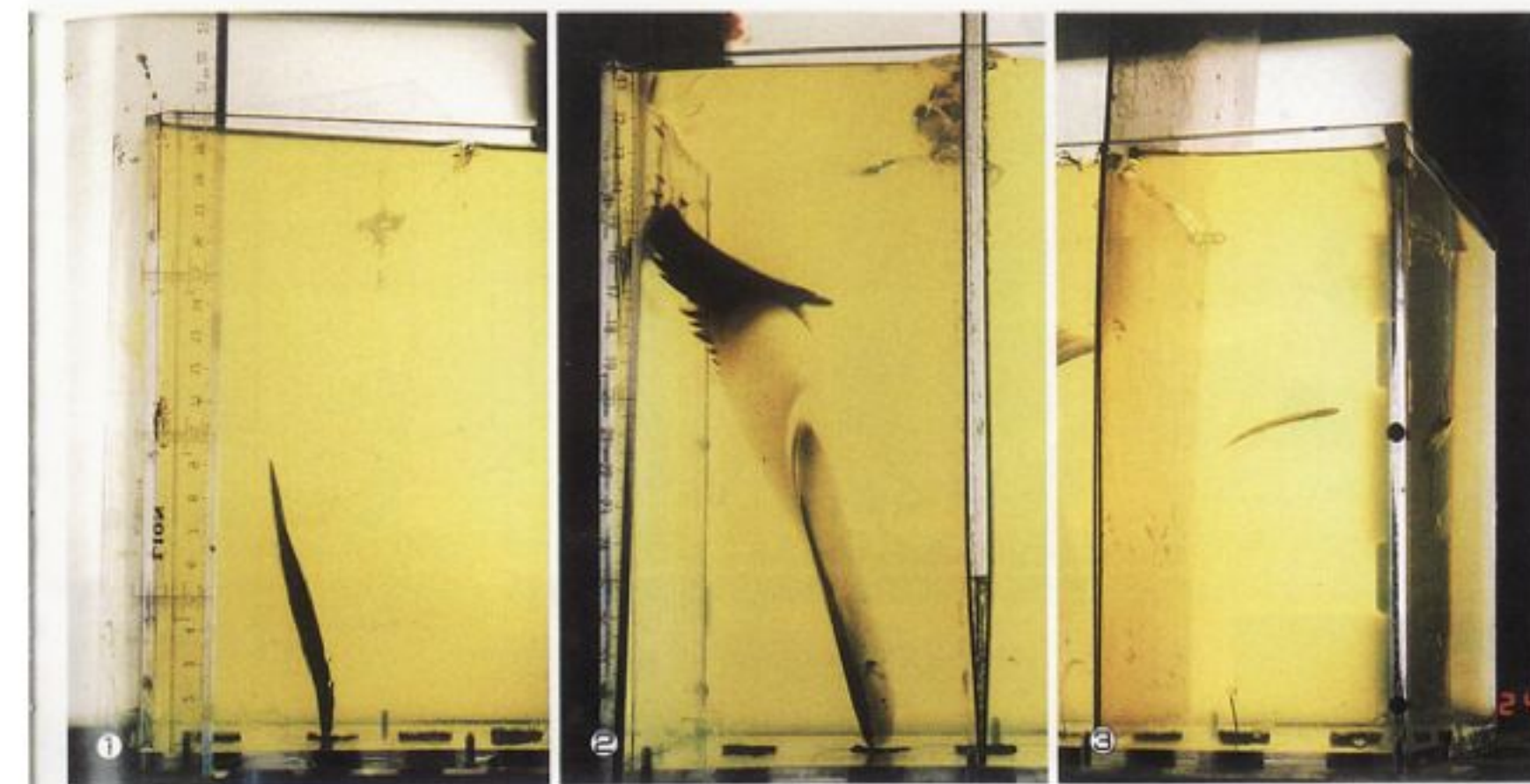
#### クラックの発生(脆性破壊)

差応力( $\sigma_1 - \sigma_3$ )(剪断応力), 弾性歪み  
破壊強度を超えると...

クラックの先端: 応力が集中する  
ゼラチンだと塑性緩和が起こってしまう

#### アナログ実験:

岩石中で発生するクラックの挙動が必ずしも再現できないものの定性的にクラックの特性について理解出来る。



クラック上昇のアナログ実験

高田 亮

透明なゼラチンに注射器で液体を注入してクラック(割れ目)を作り、マグマ上昇のアナログ実験を行なう。みえないマグマ上昇の素過程のいくつかをみる事ができる。

応力配置とクラック面の向き

①最小圧縮主応力軸が水平となるような応力状態で、ゼラチンと同じ密度の液体(水で薄めたグリセリン)を注入する。垂直なクラックが成長する。  
②垂直なアクリル板を挿入し、最小圧縮主応力軸が鉛直、最大圧縮主応力軸が水平な応力状態に①のクラックをおく。上部の先端で水平に曲がり、両端から雁行状の小さい水平なクラック群が派生する。  
③最小圧縮主応力軸が鉛直、最大圧縮主応力軸が水平な応力状態で、ゼラチンより軽い空気注入する。水平なクラックが形成される。

クラックの成長、分離、上昇

左はクラックの正面、右は側面の写真。  
④成長しつつある準静的クラック。赤く着色したシリコン油(ゼラチンより軽い)を針先から供給している。  
⑤クラックの高さが約6cmになると、浮力の効果が大きくなって上昇を始める。ただし液体は供給口とつながっている。  
⑥高さ8cmに成長し、上昇を続ける。



# クラックの特性

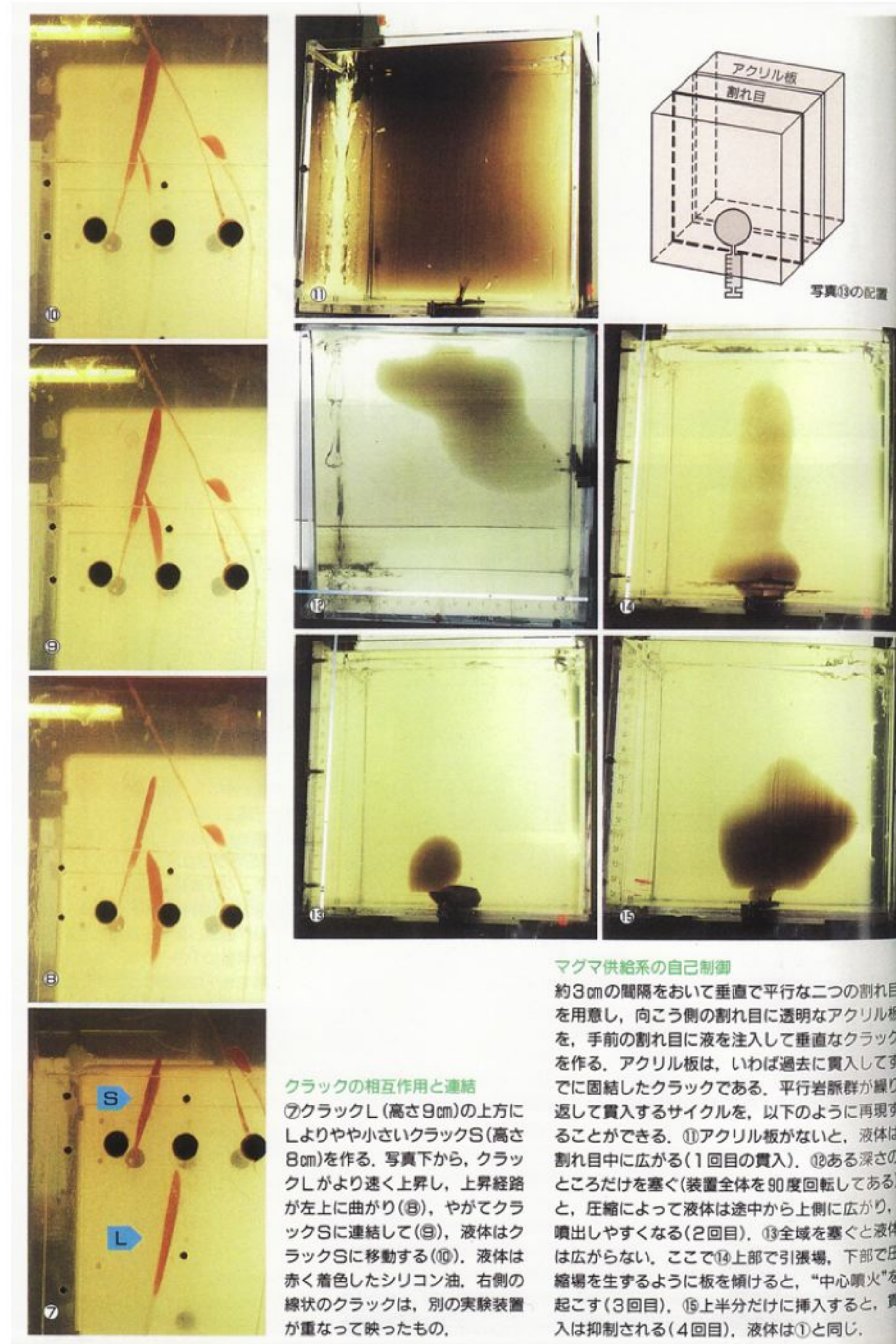
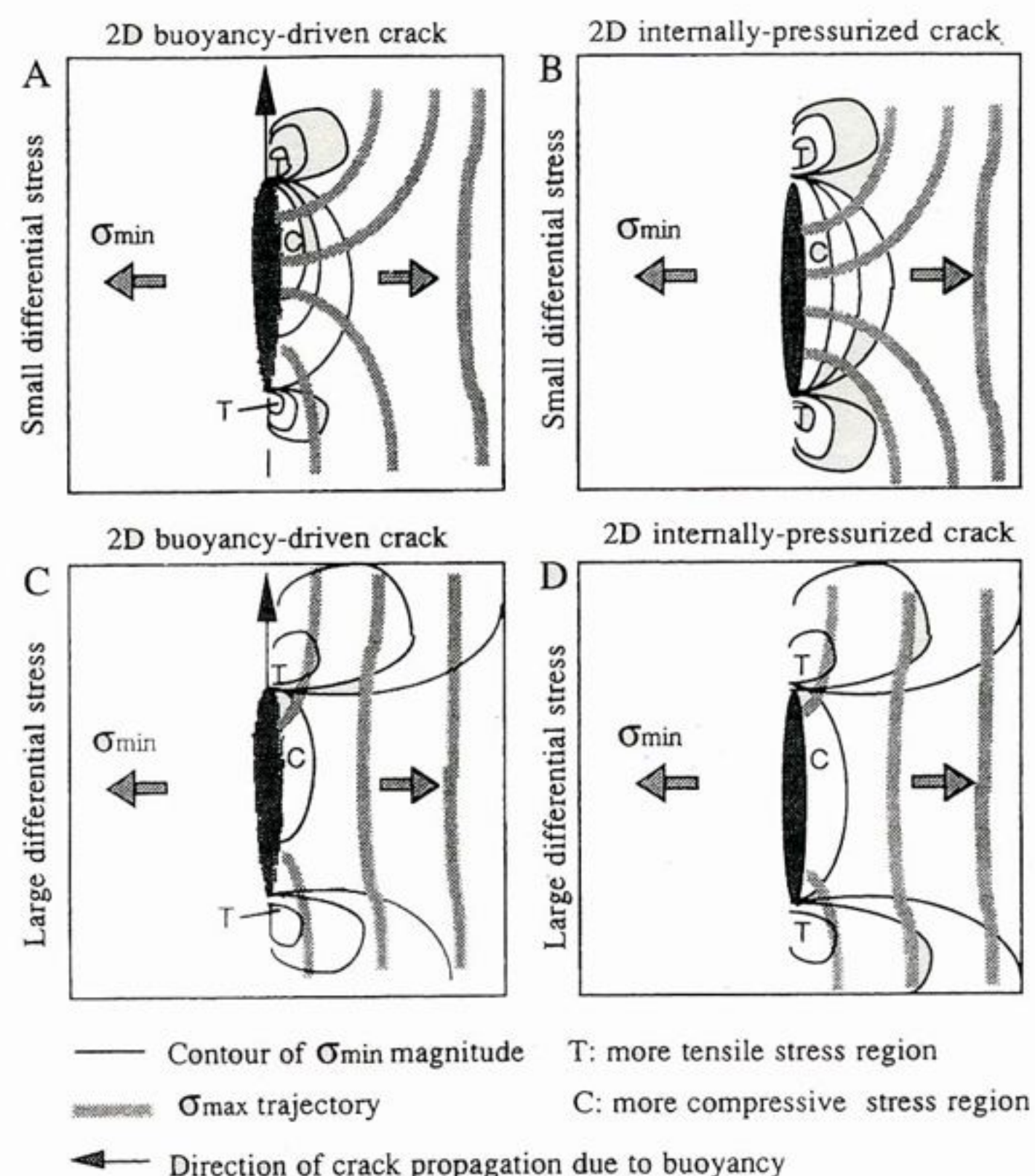
## 1. 周囲の応力場に強く依存する。

クラックの面: 最小圧縮応力  $\sigma_3$  に垂直になると安定  
Anderson, (1957)

## 2. クラックの相互作用

差応力が小さいとクラックが合体しやすい  
逆

逆に差応力が大きいと合体しにくい





# アナログ実験

昨年の学生実験: マグマの上昇と割れ目噴火

低粘性、低密度  
密度差が大きい



中粘性、中密度  
密度差が小さい





# まとめ

## 地質学的研究

- ・火道断面の観察から火道壁側に剪断応力が生じている事が報告されている
- ・また火砕岩脈が母岩側に卓越する事がしばしば観察されている

## クラックの特性

- ・応力場に支配されやすい
- ・局所応力場によるクラックの相互作用がある

## Tuffenらの論文

火道壁付近での剪断応力、弾性歪みの蓄積→脆性破壊  
Fractureのネットワークの形成→スリップ→sintering  
→温度上昇→塑性変形(転位)→温度低下→繰り返し