

サイエンスカフェin静岡
第165話
(2023/7/6)

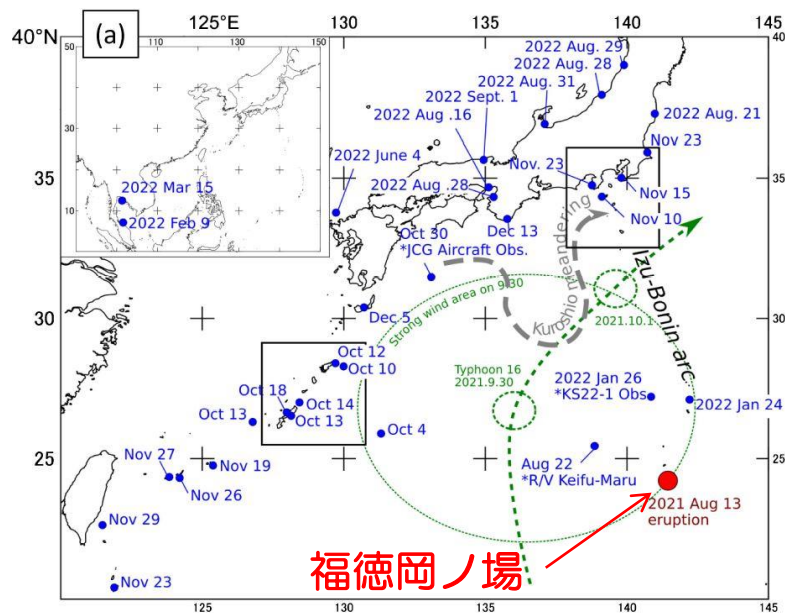
岩石・鉱物から火山を探る

静岡大学理学部地球科学科
准教授 石橋 秀巳
(岩石学・火山学)

福徳岡ノ場2021年噴火 (海上保安庁)

2021-22年輕石漂着事件

- 2021年10月以降、日本沿岸地域に多量の軽石が漂着した（11月には伊豆諸島まで、2022年には北海道まで到達）
- 給源は、静岡の南南東約1200kmにある海底火山“福德岡ノ場”



福德岡ノ場2021年噴火軽石の漂流経路（吉田ほか, 2022）



沖縄島に漂着した軽石（吉田ほか, 2022）

(a)



写真提供：海上自衛隊第21航空群

(a) 硫黄島から撮影された噴煙柱（産総研HP）

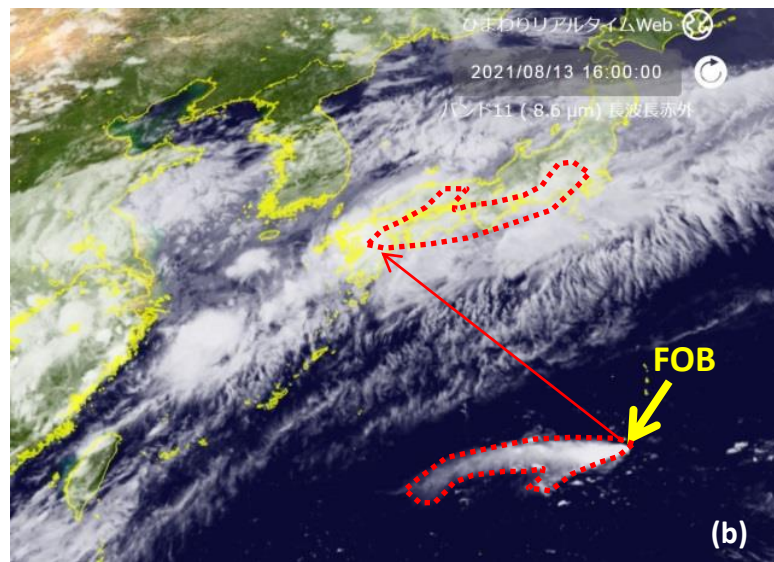
福德岡ノ場2021年噴火

2

- 2021/8/13-15に発生
- 噴煙柱高度～16-19km
- マグマ噴出量～0.1-0.5km³ (Maeno et al., 2022)

桜島1914年噴火：1.58km³
 北海道駒ヶ岳1929年噴火：
 0.14km³

この規模・様式の噴火は国内で約90年ぶり



(b)

(b) ひまわり8号の2021/8/13/16時の映像。赤線：噴煙を移動したもの

火山国 日本

3

- 世界の活動的火山の～7%が日本に集中
- 国土の面積の～30%は火山噴出物の影響下にある
- 御嶽山2014年噴火程度の小規模噴火がほぼ毎年、伊豆大島1986年噴火程度のやや大きい噴火も10年に1回ぐらい発生する

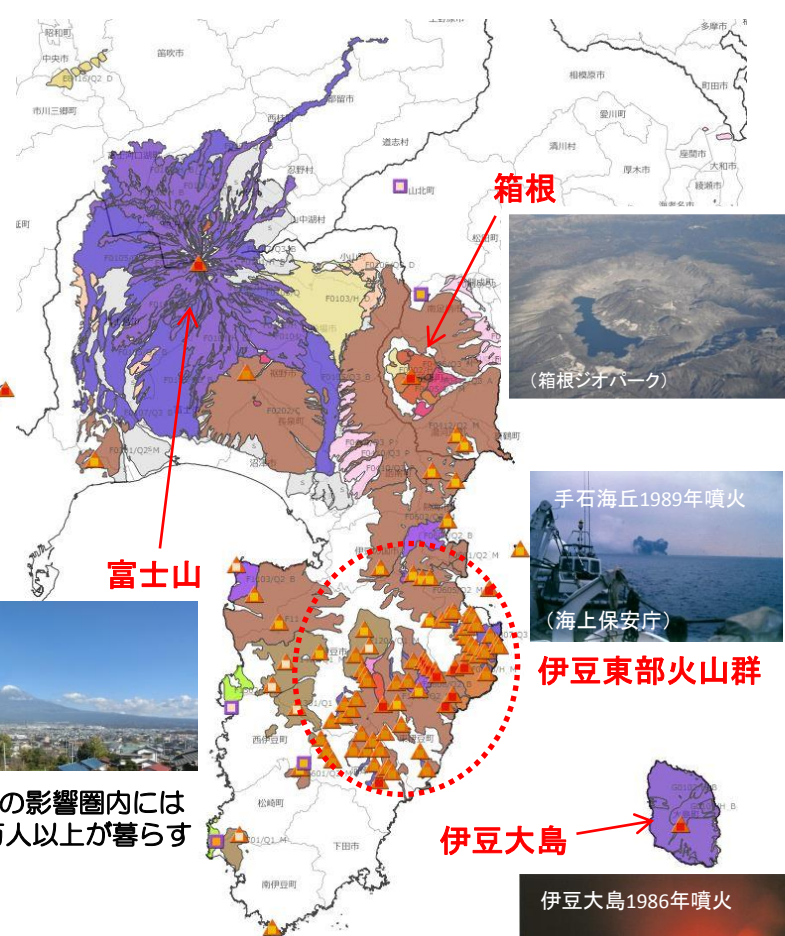
日本は世界有数の火山国

- 静岡県東部は火山密集地域
- 100万年以上前から現在まで火山活動が継続（今後も続く）

※火山国で暮らしていくには、火山について知る必要がある

500 km

日本の活動的火山の分布（地質図Navi）



富士山



富士山の影響圏内には100万人以上が暮らす

箱根

(箱根ジオパーク)

手石海丘1989年噴火

(海上保安庁)

伊豆東部火山群

伊豆大島

伊豆大島1986年噴火

(日本火山学会)

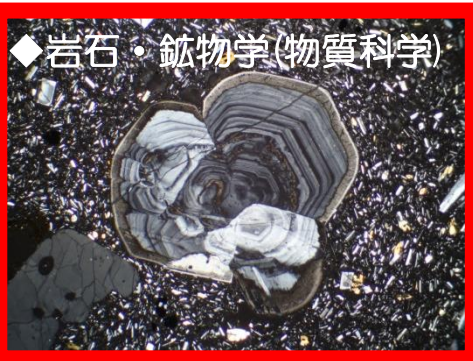
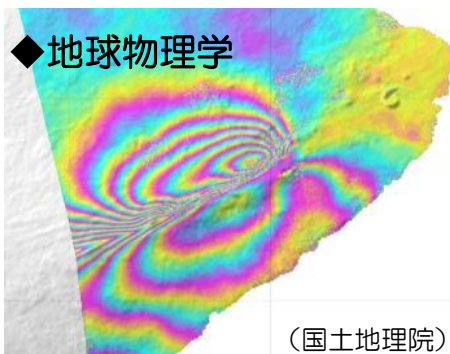
静岡県東部の第四紀火山と火山噴出物の分布（産総研地質図Navi）

天にオーロラ 地に火山：ダイナミックで魅力的な火山現象 4



火山学 ～ 火山を研究する学問

マグマの発生～噴火のメカニズム、火山の現状と歴史、人類社会に及ぼす影響も含む様々な視点から火山現象を研究するマルチディシプリナリーな学問



※岩石・鉱物から火山を探る話をします。

何故、岩石・鉱物を研究するのか？

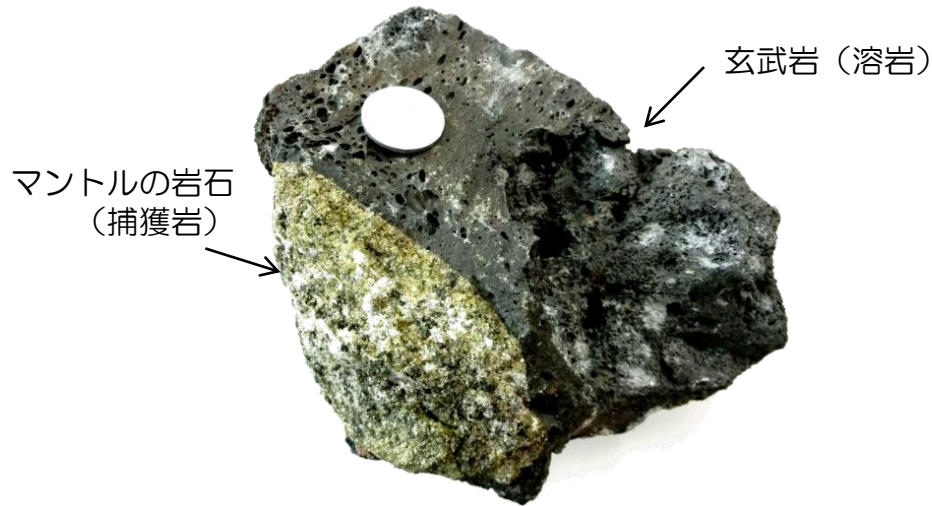
岩石・鉱物は我々が直接見ることのできない **過去** と **地下** の情報を有する

◆ 過去に何が起きたのか？



- 岩石・鉱物（化石を含む）は、有史以前に地球で起きた自然現象を記録する、**ほぼ唯一の記憶媒体**
- 人類が未経験の自然現象も発見されている

◆ 地下で何が起きているのか？

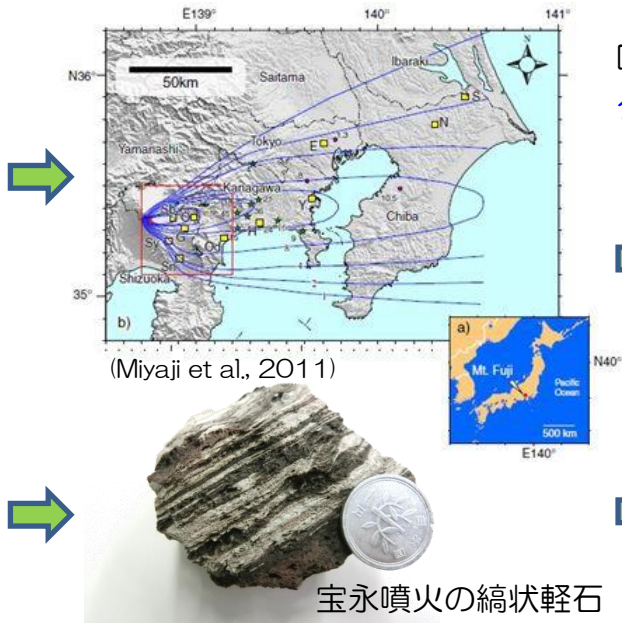


- 岩石・鉱物は、地下でおこる自然現象によって形成するため、その現象に関する情報を記録している
- **人類未踏の地下深部**（深さ>~12km）の岩石も、火山によって地表にもたらされている

火山噴出物の堆積分布や構成物から、過去の噴火の様子を推定できる

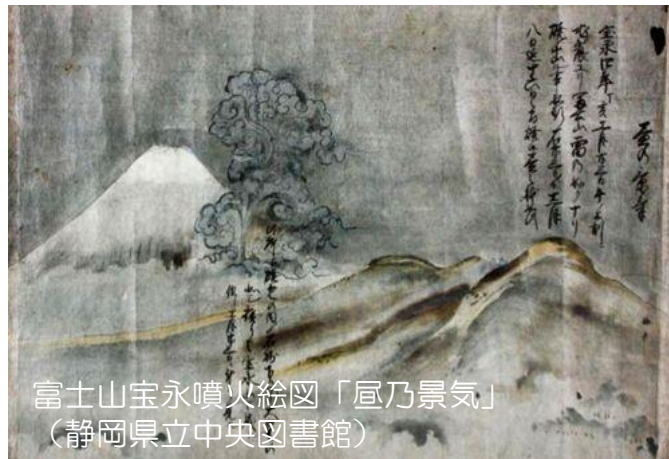


火山噴出物の地層調査



噴出物から、**マグマの化学組成**・**状態**・**物性**・**年代**などがわかる

噴出物の堆積分布・堆積構造から**噴火のタイプ**や**規模**、**強度**（激しさ）がわかる



富士山宝永噴火絵図「嵐乃景気」
（静岡県立中央図書館）

両者の情報を統合することで、過去の噴火を復元できる

噴火の規模と頻度

過去の噴火記録を蓄積することで、**噴火の規模と発生頻度（確率）**の関係がわかる

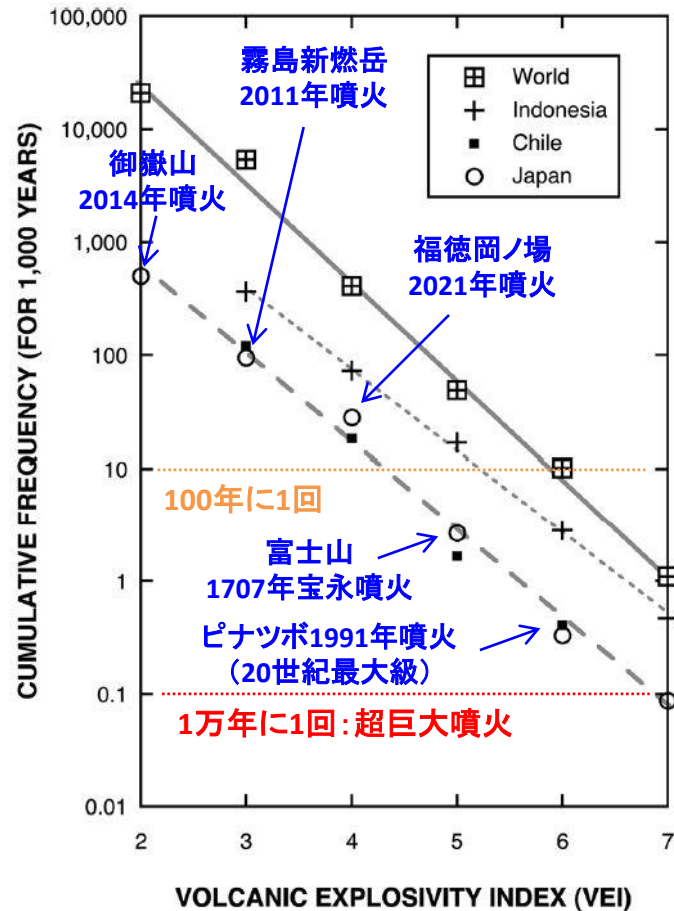
噴火規模 噴出したマグマの体積で定量される
VEI (Volcanic Explosivity Index: 火山爆発指数)

$$VEI = \log_{10} V (m^3) - 4 \quad (\text{Newhall \& Self, 1982})$$

噴火頻度 噴火規模と頻度にはべき乗則の関係
VEI が1上がると頻度は~1桁下がる

超巨大噴火 $VEI > 7$ の著しく大規模な噴火

日本国内に限っても1万年に1回程度の頻度で発生してきた



噴火の規模と発生頻度の関係 (中田, 2015)

【例】Aso-4 噴火

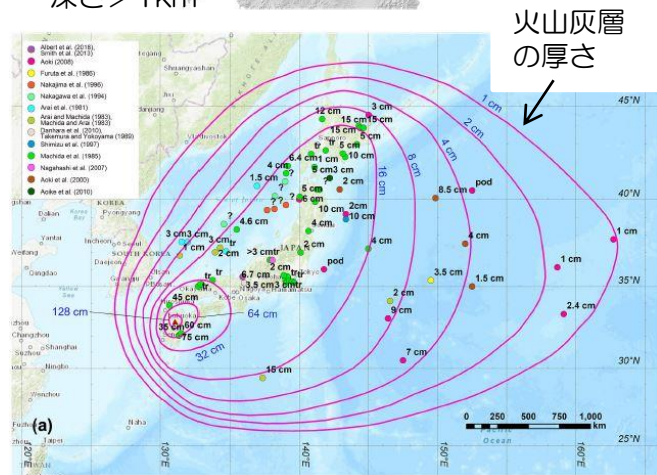
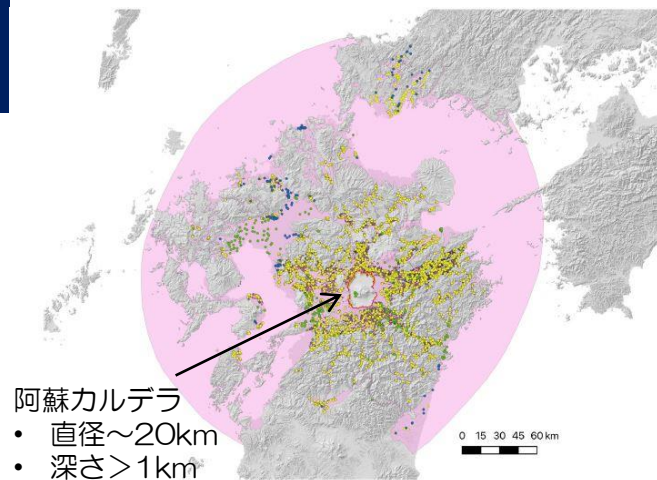
- ~9万年前に阿蘇で発生した日本最大級噴火 (VEI 8)
- $>10^3\text{km}^3$ のマグマを、数日~数ヶ月以内に噴出
(Takarada & Hoshizumi, 2020)
- 直径~18-25km、深さ $>1\text{km}$ の陥没カルデラを形成
- 火砕流が半径~100kmの領域を覆いつくし、日本全土が火山灰に厚く ($>10\text{cm}$) 埋没した



20世紀最大級のピナツボ火山1991年噴火



火砕流の例 (マヨン火山1984年噴火)



Aso4噴火の火砕流到達範囲 (上) と火山灰の等層厚線図 (下) (Takarada & Hoshizumi, 2020)



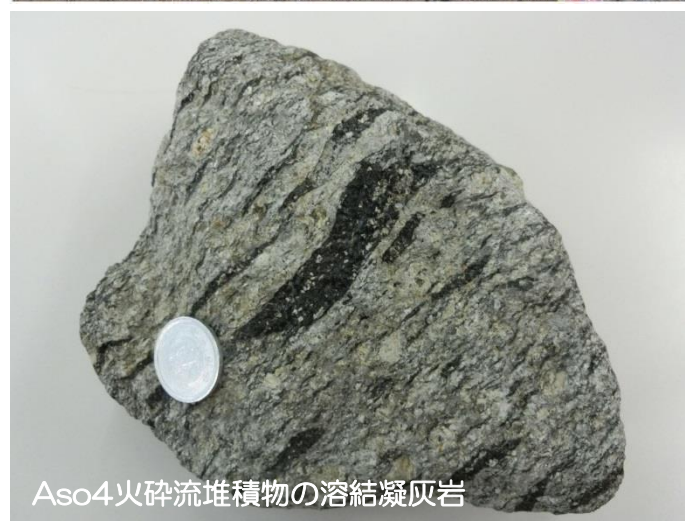
北から眺めた阿蘇カルデラ：南北25km、東西18km（菅野拓矢氏撮影）



北海道斜里町のAso4火山灰層
(Takarada & Hoshizumi, 2020)



Aso4火砕流堆積物露頭。カルデラ中心から東に35km地点（原尻の滝）

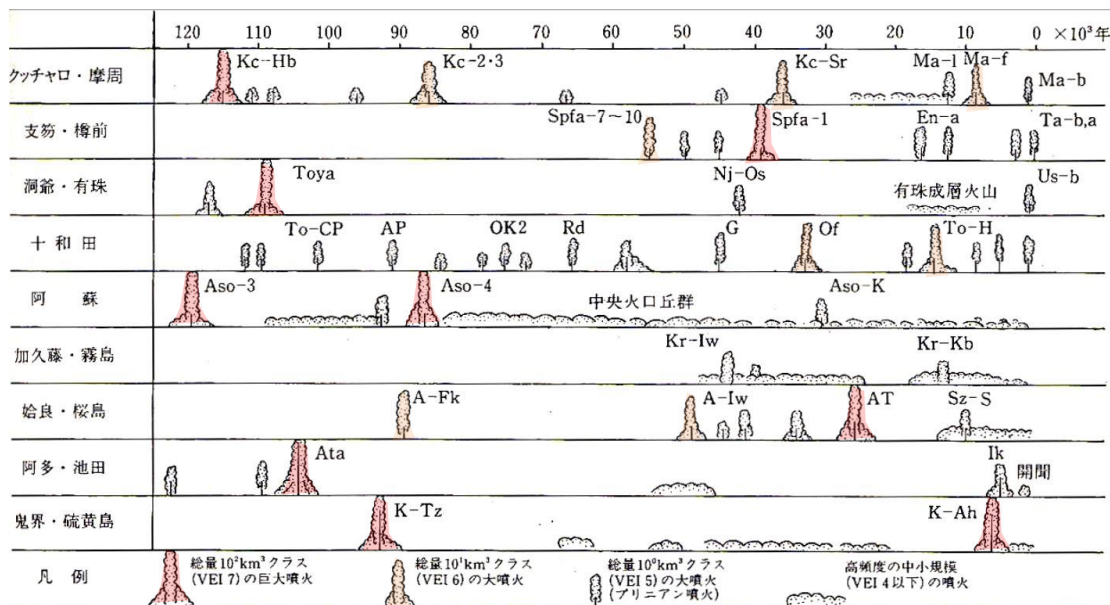


Aso4火砕流堆積物の溶結凝灰岩

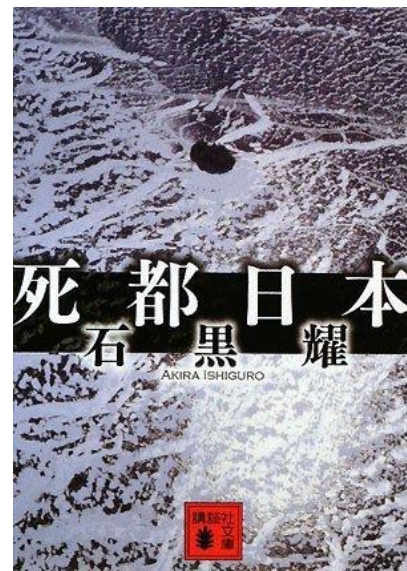
超巨大噴火

- 超巨大噴火を発生した火山は、国内に複数ある（主に九州と北海道）
- 最新の超巨大噴火は～7300年前の鬼界アカホヤ噴火（南九州の縄文文明が壊滅）

日本沈没は起こらないが、日本埋没はいつ起こっても不思議はない（藤井敏嗣東大名誉教授）



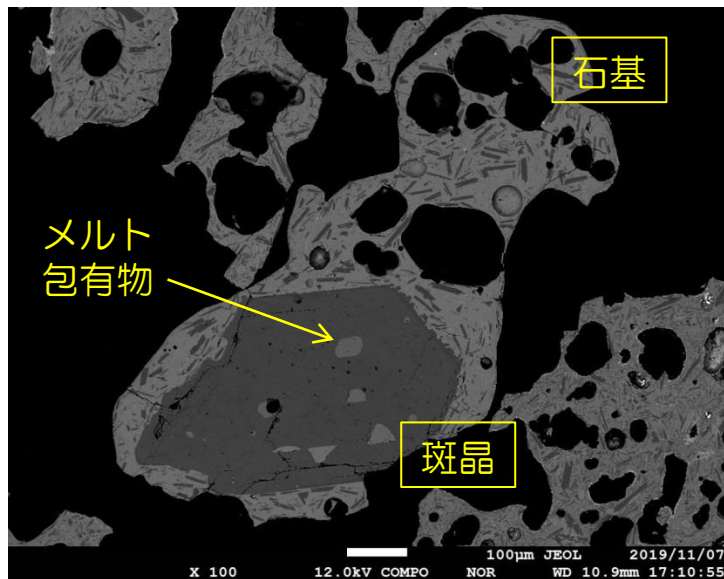
国内の代表的なカルデラ火山で発生した巨大噴火（町田・新井，2003）



現代に日本で超巨大噴火が発生したらどうなるか？をシミュレーションした小説「死都日本」（2002）

地下で何がおこっているかを探る

岩石の形成過程の解明 ≡ 地下で起こっている自然現象の解明

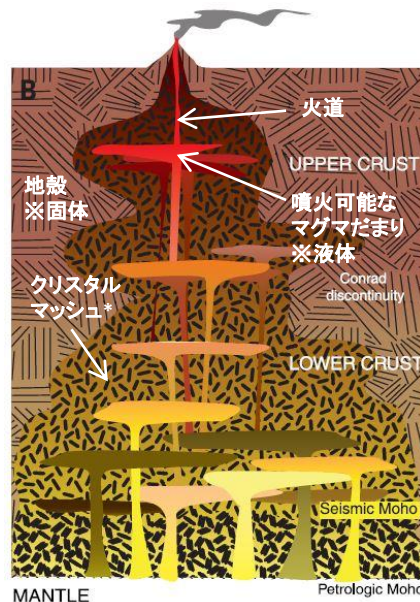


伊豆大島1986B噴火の火山灰の電子顕微鏡写真

鉱物・ガラスの化学組成・組織

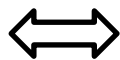
石基の組織的特徴は
マグマの火道上昇～
噴火時に形成する

斑晶は火道上昇開始前
から存在した結晶で、
マグマだまりの情報を
記録している



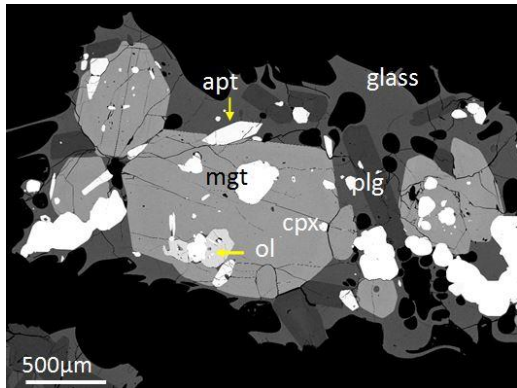
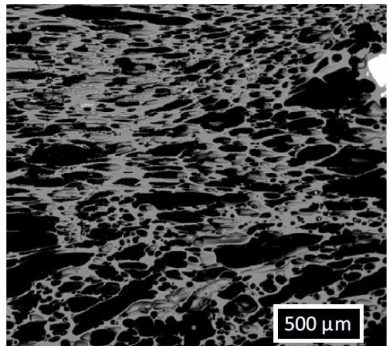
マグマ供給系モデル (Cashman et al., 2017)

*クリスタルマッシュ
結晶量 > ~50%
部分的に融けているが、
全体として固体的



マグマだまり・火道における
マグマの状態・物性やその変遷

噴火前のマグマの状態を探る：福徳岡ノ場2021年噴火 13



- 灰色部分と暗色包有物でメルト（ガラス）の化学組成が同じ (e.g., Yoshida et al., 2022)
- 暗色包有物中の鉱物は種類ごとに化学組成がほぼ均一（メルトと平衡共存していた）



メルトと鉱物の化学組成から、平衡共存条件（噴火前の状態）を見積もることができる

灰色部分の電子顕微鏡写真結晶をほとんど含まない (Yoshida et al., 2023)

チョコチップ部分（暗色包有物）は斑晶に富む：かんらん石 (olv), 斜長石 (plg), 単斜輝石 (cpx), 磁鉄鉱 (mgt), アパタイト (apt), メルト (ガラス glass)



FOB2021年噴火の主要な噴出物「灰色軽石」

メルト-斜長石-単斜輝石共存条件の実験式

$$H_2O(\text{wt. \%}) = 46.22 - 0.33 \ln \frac{A n^{Pl}}{(X_{Ca}^{liq} X_{Al}^{liq} X_{Si}^{liq})^2} - 0.035T - 12.31 A b^{Pl} - 1.31 \frac{X_{Na}^{liq}}{(X_{Na} + X_K)^{liq}}$$

(Masotta & Mollo, 2019)

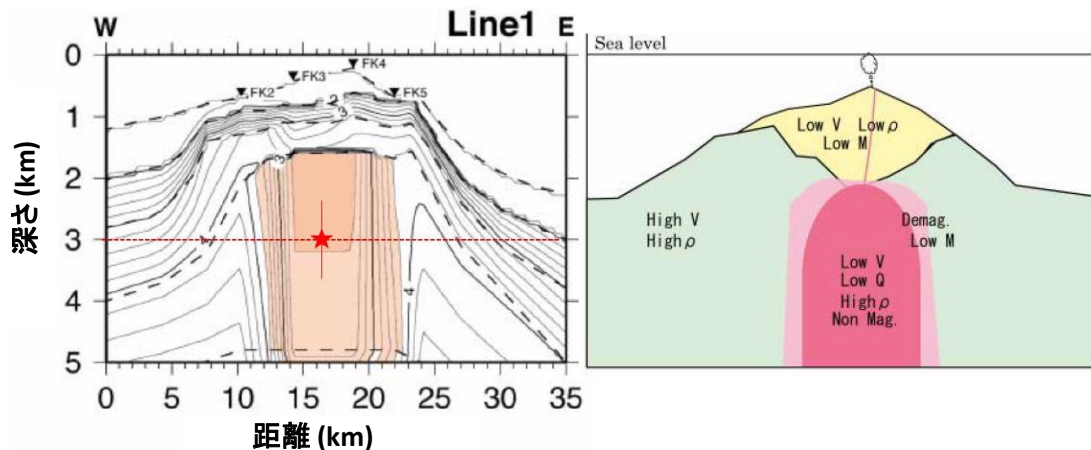
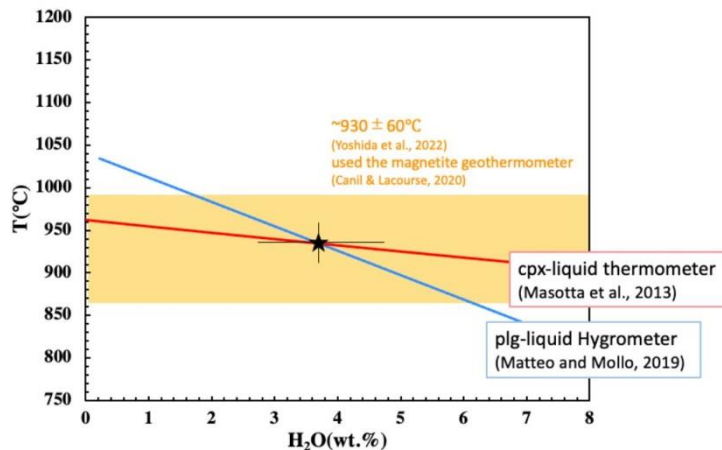
$$\frac{10^4}{T(K)} = a + b \ln \left(\frac{X_{Jd}^{cpx} X_{CaO}^{liq} X_{Fm}^{liq}}{X_{DiHd}^{cpx} X_{Na}^{liq} X_{Al}^{liq}} \right) + c(H_2O^{liq}) + d(X_{CaO}^{liq} X_{SiO_2}^{liq}) + e \ln(X_{TiO_2}^{liq})$$

$$+ f(X_{NaO_{0.5}}^{liq} + X_{KO_{0.5}}^{liq}) + g(Mg\#^{liq}) + h \ln(X_{EnFs}^{cpx}) + iP(\text{kbar})$$

(Masotta et al., 2013)

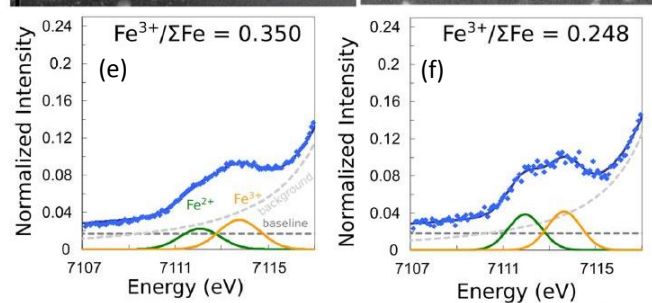
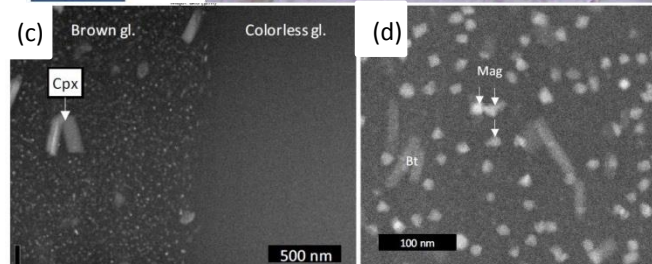
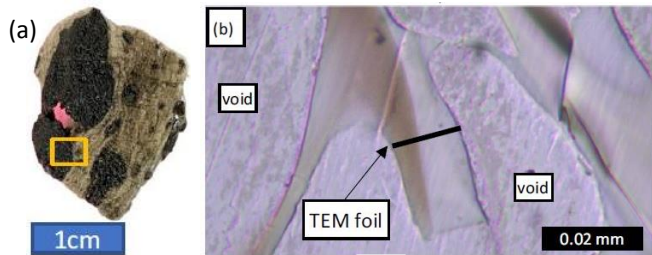
噴火前のマグマの状態を探る：福徳岡ノ場2021年噴火 14

- FOB2021 マグマの噴火前の状態（野々山ほか, 2023JpGU）：
温度 $\sim 935^\circ\text{C}$ 、メルト含水量 $\sim 3.7\text{wt}\%$ 、圧力 $\sim 69\text{MPa}$ （深さ $\sim 2.9\text{km}$ ）
- 見積もられた深さは、地球物理学の先行研究で示唆された部分熔融領域と一致した
- 福徳海底カルデラを埋める低密度層に、マグマだまりの深さが影響を受けている



メルト-斜長石-単斜輝石の化学組成関係から見積もったFOB2021 マグマの噴火前の温度・含水量条件（野々山ほか, 2023JpGU）

地球物理学的探査による福徳岡ノ場周辺の地下構造モデル（小野寺他, 2003）との比較。橙色部分は部分熔融していると解釈されていた領域。



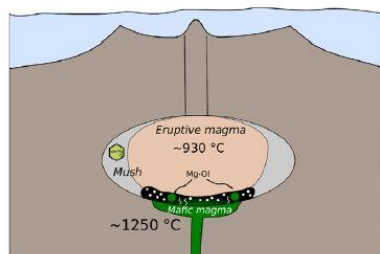
(a) 分析試料、(b) 褐色ガラス（黒色部）と無色ガラス（灰色部）の境界、(c) 境界付近の透過電子顕微鏡像、(d) 褐色ガラスの拡大、(e, f) 褐色・無色ガラスのX線吸収スペクトル (Yoshida et al., 2023)

Oxidation-induced nanolite crystallization triggered the 2021 eruption of Fukutoku-Oka-no-Ba, Japan

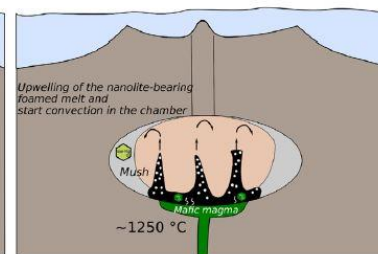
Kenta Yoshida^{1✉}, Akira Miyake², Shota H. Okumura², Hidemi Ishibashi³, Satoshi Okumura⁴, Atsushi Okamoto⁵, Yasuhiro Niwa⁶, Masao Kimura⁶, Tomoki Sato¹, Yoshihiko Tamura¹ & Shigeaki Ono¹

Scientific Reports | (2023) 13:7117 | <https://doi.org/10.1038/s41598-023-34301-w>

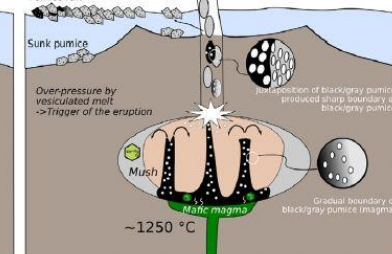
(a) Injection of mafic magma and nanolite formation enhanced bubble nucleation in black pumice



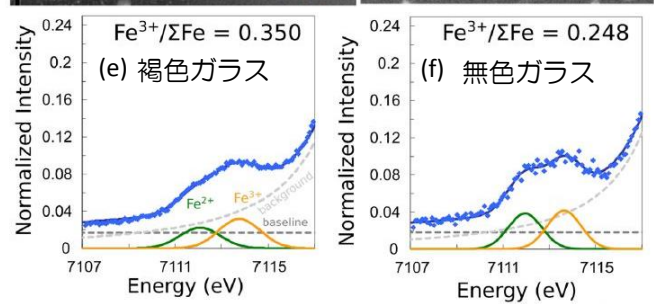
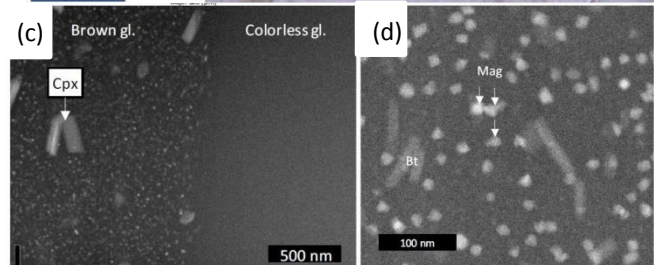
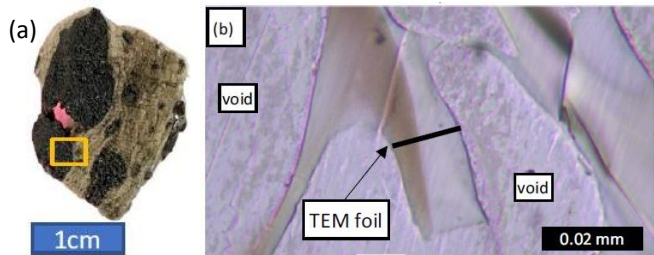
(b) Nanolite-bearing foamed black melt start upwelling and induced convection



(c) Convection-induced overpressure triggered explosive eruption

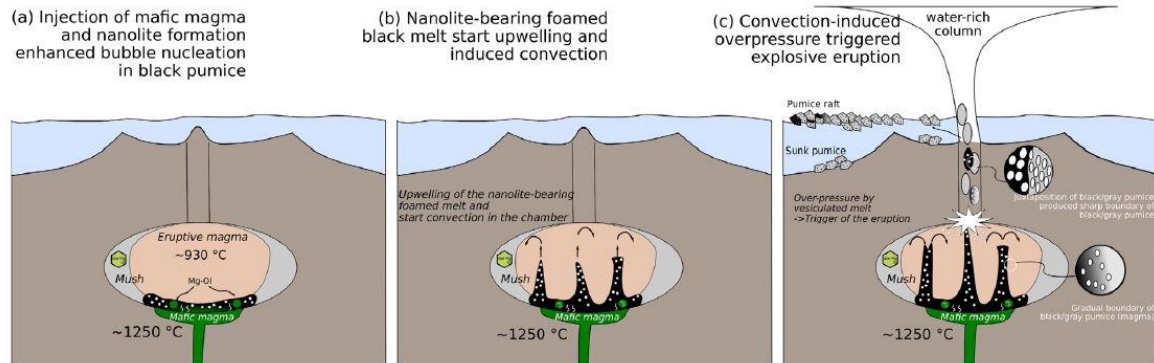


福徳岡ノ場2021年噴火のトリガーマカニズム (Yoshida et al., 2023)



- 黒色の原因は多量のナノスケール鉱物（ナノライト）
- ナノライトには磁鉄鉱や黒雲母が含まれ、メルトがH₂Oに富む高圧条件（>50MPa）で形成された
- 灰色部と黒色部でメルト（ガラス）組成に差がないが、黒色部の方がより酸化されている

H₂O流体が噴火直前に深部より供給され、マグマだまり底部のメルトが酸化され、ナノライトを形成したことをきっかけに、マグマの発泡が起こり噴火をトリガーした



(a) 分析試料、(b) 褐色ガラス（黒色部）と無色ガラス（灰色部）の境界、(c) 境界付近の透過電子顕微鏡像、(d) 褐色ガラスの拡大、(e, f) 褐色・無色ガラスのX線吸収スペクトル (Yoshida et al., 2023)

福徳岡ノ場2021年噴火のトリガーマカニズム (Yoshida et al., 2023)

Lithos 324–325 (2019) 315–324

Contents lists available at ScienceDirect

Lithos

journal homepage: www.elsevier.com/locate/lithos



ELSEVIER



Ultra-magnesian olivine-bearing ultramafic lava blocks within Cenozoic accretionary sediments at **Shizuoka**, Japan: Implications for young, hot plume activity beneath the western Pacific Plate

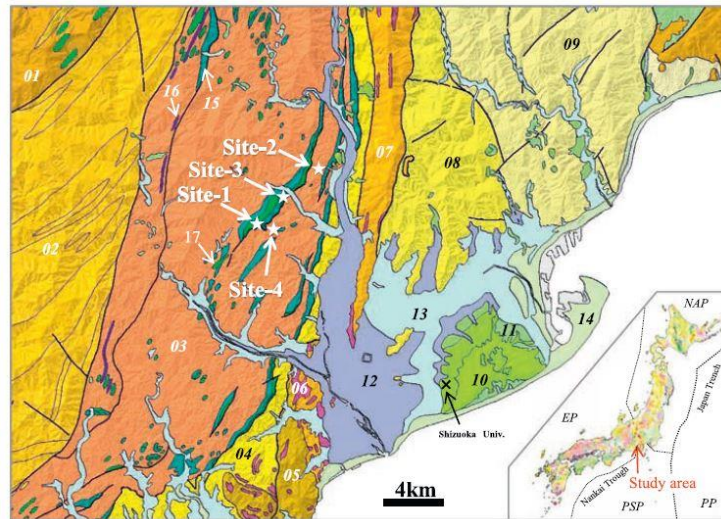
Yoshihiro Nakamura ^{a,b}, Hidemi Ishibashi ^{a,*}, Atsushi Yasuda ^c, Natsumi Hokanishi ^c, Junji Yamamoto ^d

^a Department of Geosciences, Faculty of Science, Shizuoka University, Ohya 836, Suruga-ku, Shizuoka, 422-8529, Japan

^b Asia Air Survey Co., LTD, Japan

^c Earthquake Research Institute, University of Tokyo, Japan

^d Hokkaido University Museum, Japan

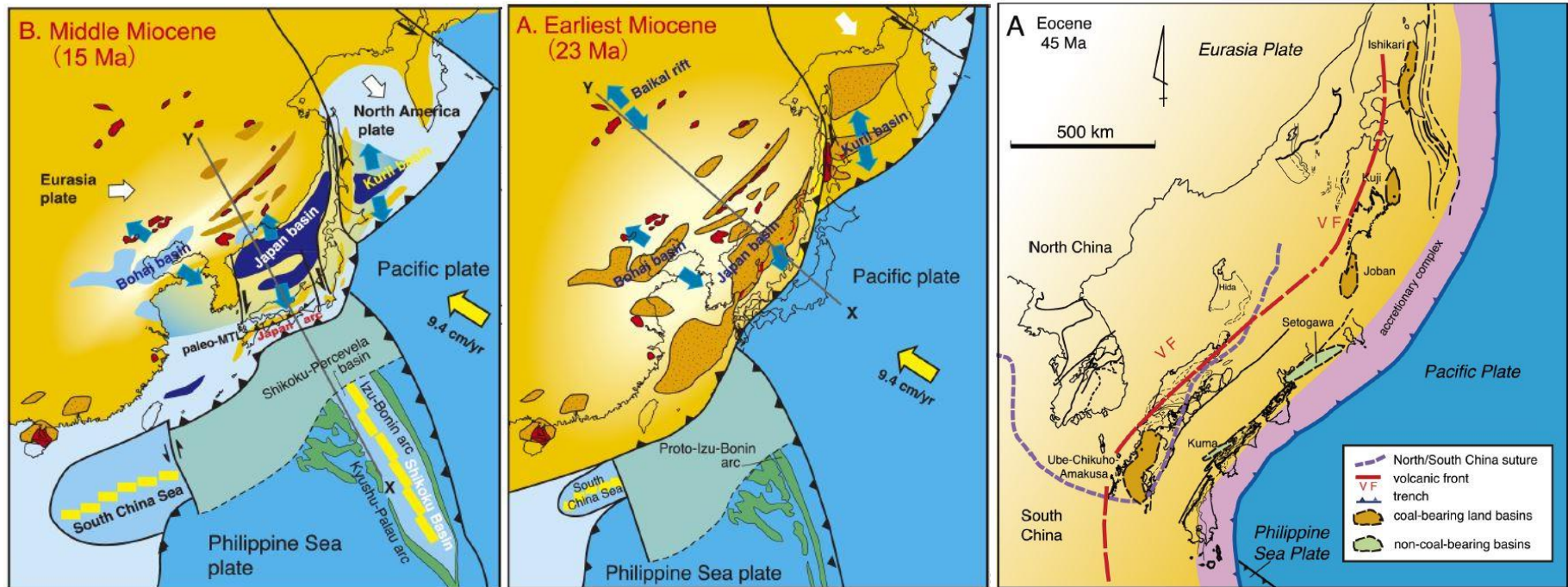


- 安倍川上流の約4千万年前の地層から見つかった溶岩の形成条件を調べたら、世界でもトップクラスの高温のマグマだった
- 4千万～1億年前頃に、太平洋プレート北西部の地下のマントルで、未知の活動（マントルプルームの上昇）があった可能性が示唆された

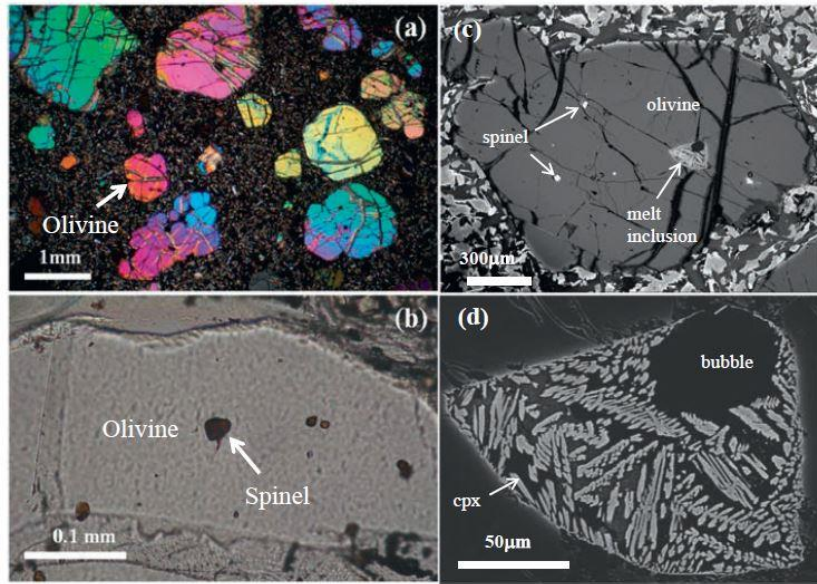
4千万年前の静岡は、現在とはテクトニック環境が大きく異なる

- まだ日本海が開いていない（ユーラシア大陸の一部）
- フィリピン海プレートではなく、太平洋プレートが直接沈み込んでいた

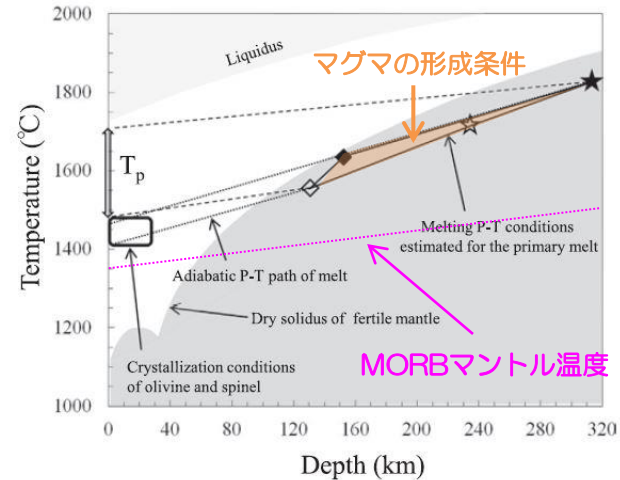
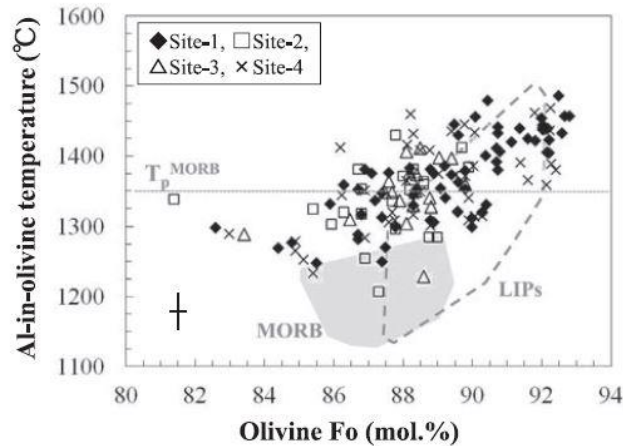
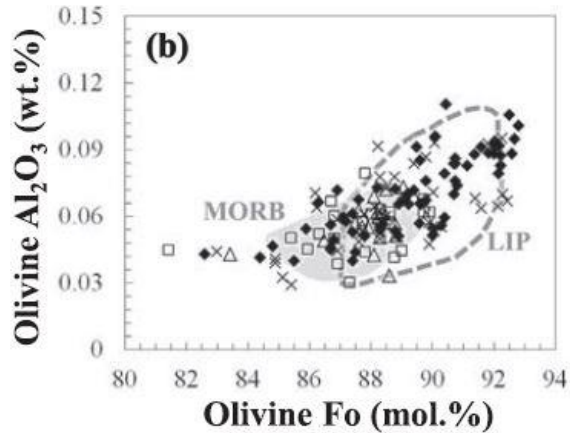
安倍川上流の地層：太平洋プレート上の堆積物が沈み込む際に大陸に付加した

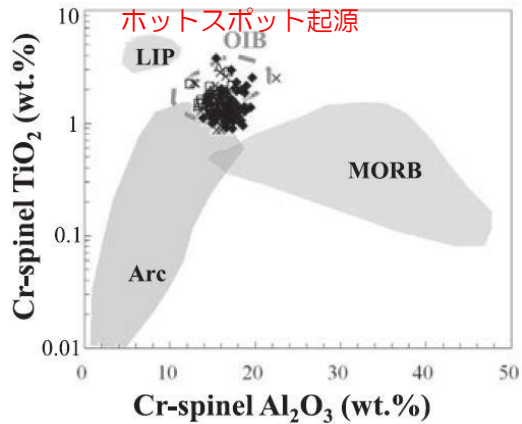


日本周辺のテクトニクス環境の変遷（磯崎ほか, 2011）。左から1500万年前、2300万年前、4500万年前



- かんらん石中の Al_2O_3 濃度が温度に依存して変化する（温度計になる）
- かんらん石の結晶化温度（ $>1400^\circ\text{C}$ ）
- ※「日本で最も熱かった石」の有力候補
- 一般的な上部マントル（ $T_p \sim 1350^\circ\text{C}$ ）に比べて、マグマの形成温度（＝起源マントルの温度）が著しく高い

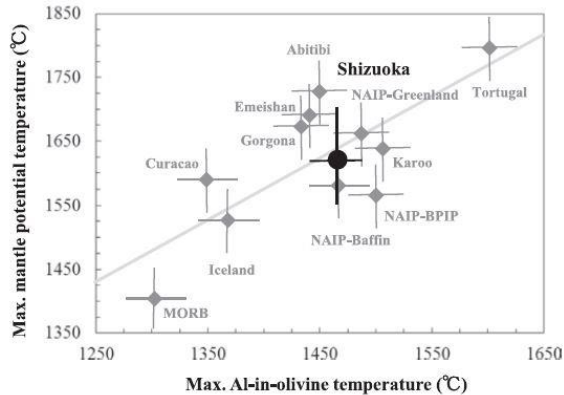




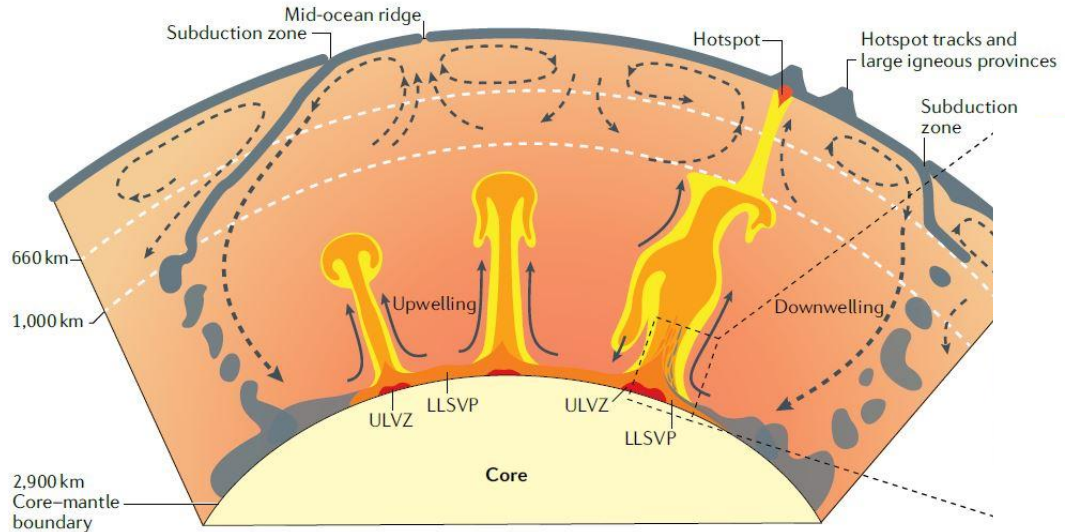
- クロムスピネルの化学組成→ホットスポット起源
- 世界のホットスポット起源のマグマと同程度の温度

- 下部マントルから上昇するマントルプルームと関連
- 4千万～1億年前、太平洋プレート北西部のマントルで未知のプルーム活動があった

クロムスピネルの化学組成に基づく
テクトニックセッティングの推定



世界の代表的なホットスポット起源マグマ
との温度の比較



マントルプルームとホットスポット (Koppers et al., 2021)

岩石・鉱物から火山を探る

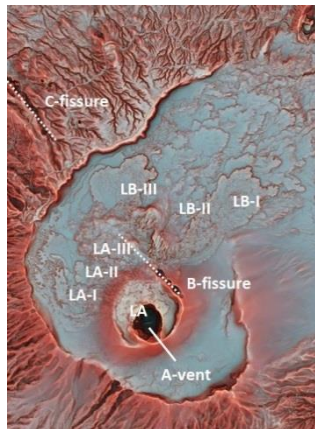
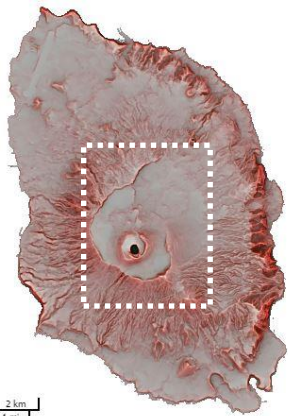
後半

鉱物が引き起こす爆発的噴火

- 伊豆大島1986年噴火を例に -



伊豆大島1986年噴火（11月15-23日）



- 15日：A火口で溶岩噴泉を発生、火口に溶岩湖形成
- 17日：溶岩湖から溶岩が溢流、ストロンボリ式噴火
- 21日：三原山の北に新しい火口列（B・C火口）開口
B火口で激しい爆発的噴火（B噴火）発生
C火口で溶岩流が流出 ⇒ 全島避難
- 23日：噴火が収束（マグマ噴出量 $\sim 0.053\text{km}^3$ ）

（遠藤他, 1988）

山頂カルデラ周辺の赤色立体地図（アジア航測、産総研地質図Navi）

1986B噴火



火山学会伊豆大島1986年噴火絵葉書

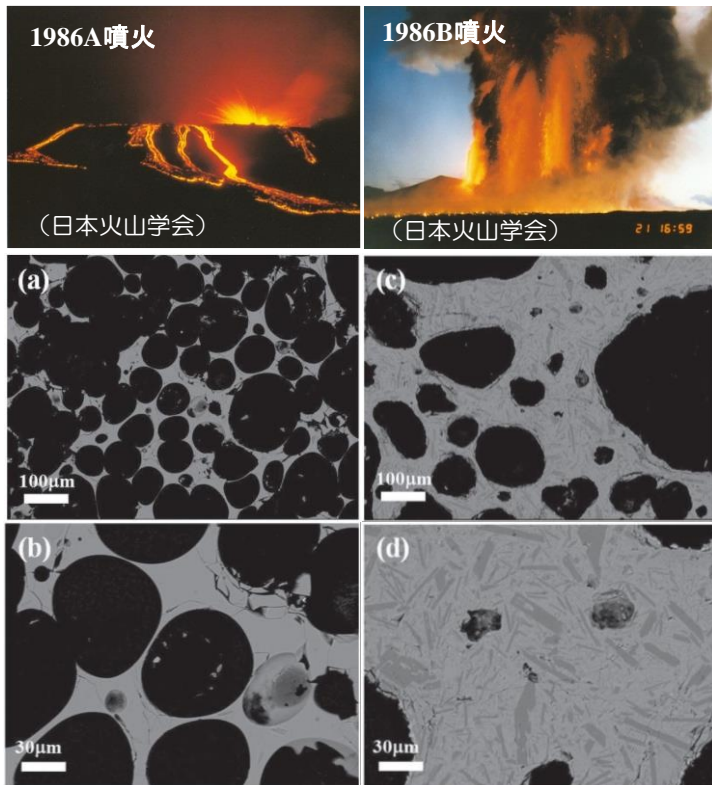
1986B噴火



1986A噴火



伊豆大島1986年A噴火とB噴火の比較



伊豆大島1986年A・B噴火の噴火様式と噴出物の組織の特徴。
 A噴火 (a, b) 石基結晶に乏しく、気泡が丸い
 B噴火 (c, d) 石基結晶に富み、結晶の配列は見られず、
 気泡の形状が歪つ (石橋・種田, 2018)

	A噴火	B噴火
噴火様式	比較的穏やかな爆発を伴う溶岩流出	激しい爆発的噴火 噴煙柱高度 > 10km*
マグマ組成	玄武岩質安山岩** (ほぼ同じ化学組成)	
温度	1100-1150°C**	1070-1100°C**
斑晶	数vol%	< 1vol%
石基結晶量	< 数vol%	~30-40vol%
気泡	輪郭が滑らかで丸い	輪郭に凹凸、歪つ

*JMA(1987)、**藤井他(1988)

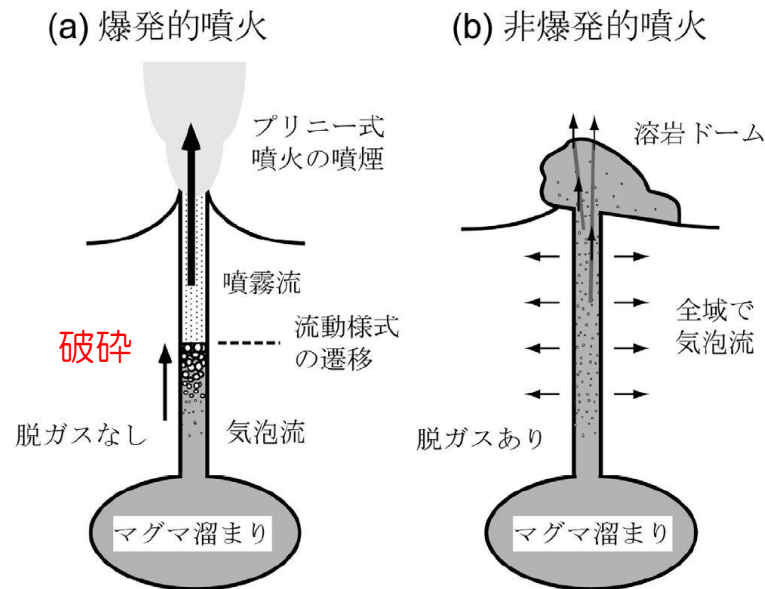
- A噴火とB噴火で、噴火前条件がほぼ同じ
- 噴火様式が大きく異なる (Bが爆発的)
- 噴出物の特徴が異なる (Bが石基結晶に富む)

石基結晶が噴火様式に影響を及ぼしている？

爆発的噴火の発生メカニズム：破碎の重要性

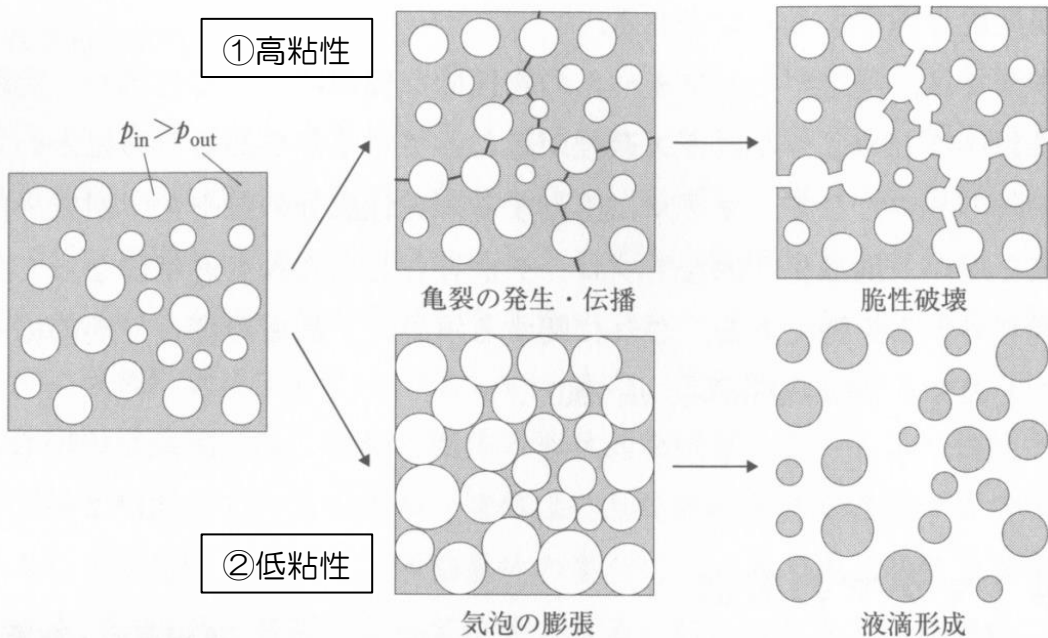
- 破碎：気泡を含む連続液体の流れ（気泡流）が、液滴／岩片の浮かぶガスの流れ（噴霧流）に遷移する現象
- 火道を上昇するマグマが“**破碎**”を起こすと、爆発的噴火が発生する
※爆発によってマグマが破碎するのではない
- 噴霧流に遷移すると、流れの急激な加速と膨張が可能となり、爆発が発生する
- 破碎が起こらないと気泡流のまま低速で上昇
⇒ガスが抜けてしまい、非爆発的噴火に至る

“**破碎**”がおこるかどうか、噴火様式（爆発／非爆発）をコントロールする



マグマの破砕メカニズム

- ① 高粘性マグマ：気泡周辺に集中した応力が閾値（ $\sim 10^7 \text{Pa}$ ）を超えると、メルトがガラス（固体）的にふるまい、脆性破壊する
- ② 低粘性マグマ：流体の慣性力が粘性力を超えるとちぎれる（慣性破砕）



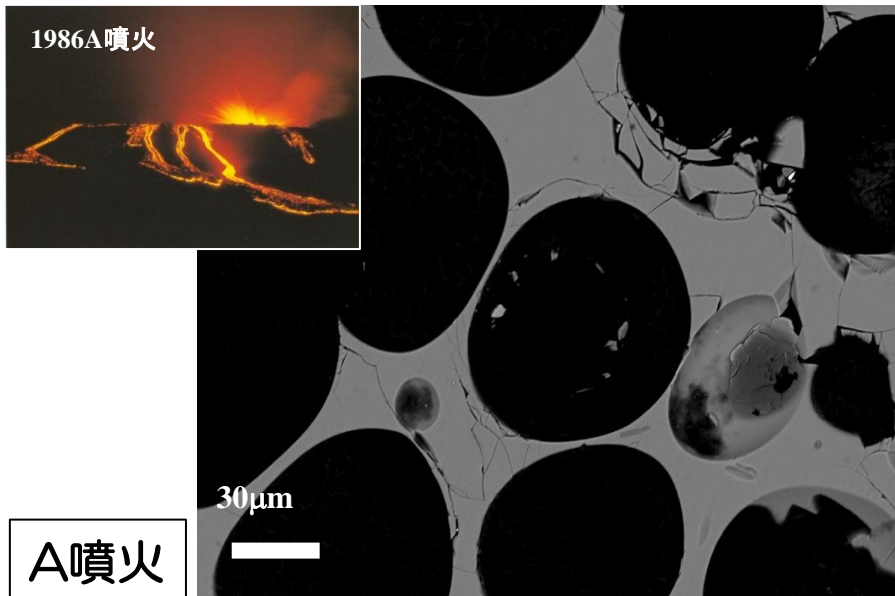
脆性破砕

- 固体的に割れる
- 破砕後に変形せず
- 角ばった火山灰
- 噴火の爆発性が強



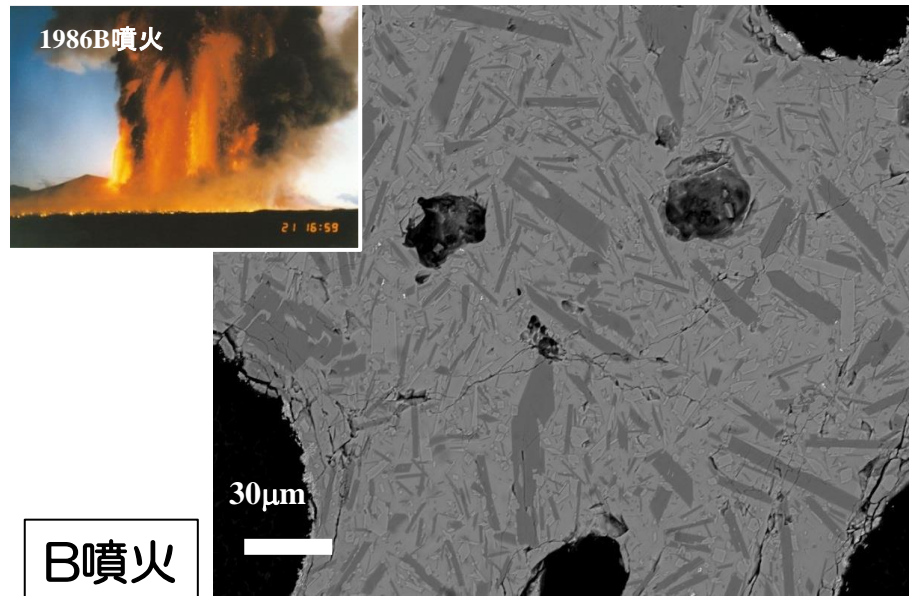
慣性破砕

- 液体的にちぎれる
- 破砕後も変形する
- 不定形な火砕物
- 噴火の爆発性が弱



- 石基結晶がほとんど含まれない
- 気泡の輪郭が滑らかで丸い
- メルトが低粘性 ($\sim 10^{2-3} \text{Pa s}$)

液体のまま破碎した (慣性破碎)

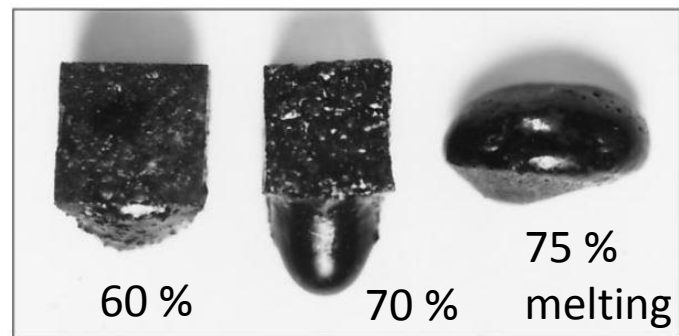
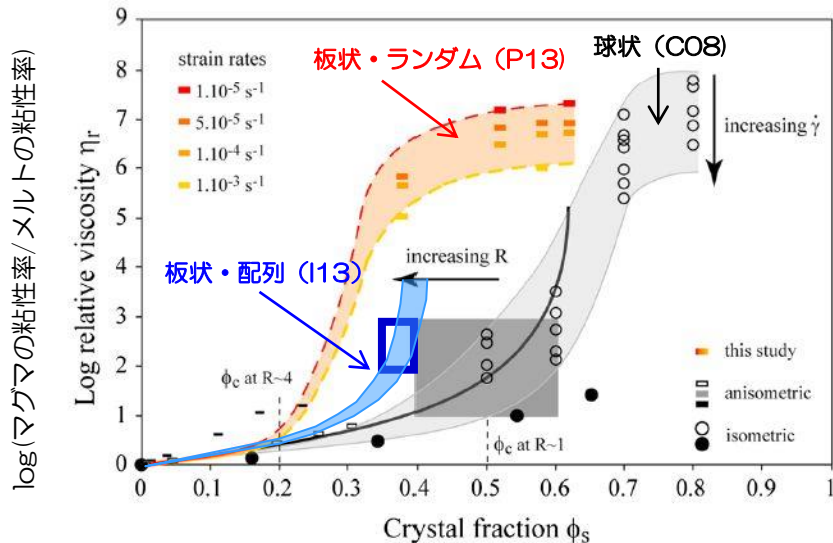


- 石基結晶に富む ($\sim 30-40 \text{vol}\%$)
- 結晶方位がランダム (流れていない)
- 気泡の形が歪つ (形状緩和していない)

結晶形成後に流動していない (固体的)

結晶が引きおこすマグマの液体（粘性）-固体（脆性）遷移

- 結晶量がある閾値 ϕ_c に達すると、急激に粘性率が増加し、マグマの力学的挙動が固体的に変化する
 ※結晶が互いの運動を邪魔しあい、全体の変形を抑制
- 斜長石結晶を多く含む場合： $\phi_c \sim 30-40\%$



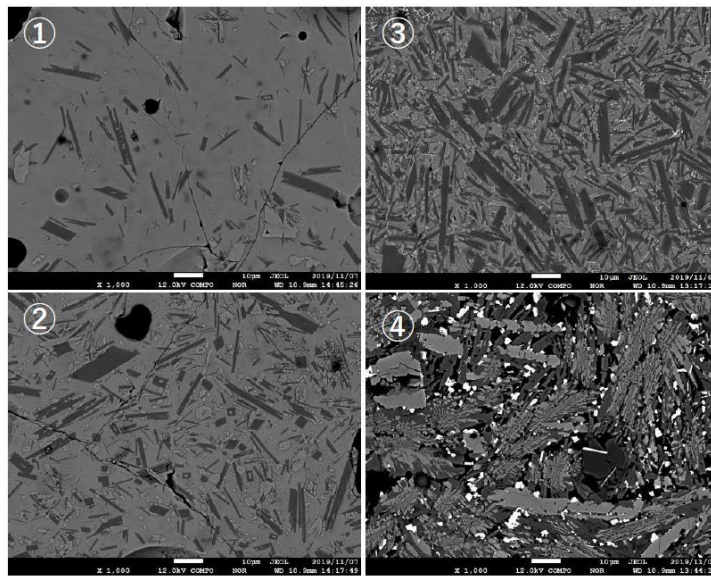
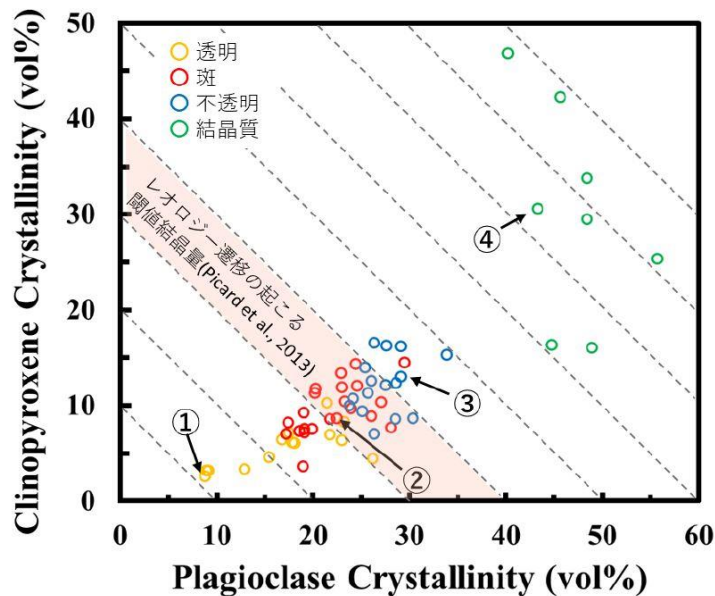
結晶の形状と配列が相対粘度に及ぼす影響 (Picard et al., 2013; Ishibashi, 2013AGU)

米国Holyoke玄武岩の溶融変形実験 (Philipotts & Carroll, 1996). 立方体の溶岩を宙に浮かせて溶融.

B噴火のマグマ破砕は結晶が引きおこした

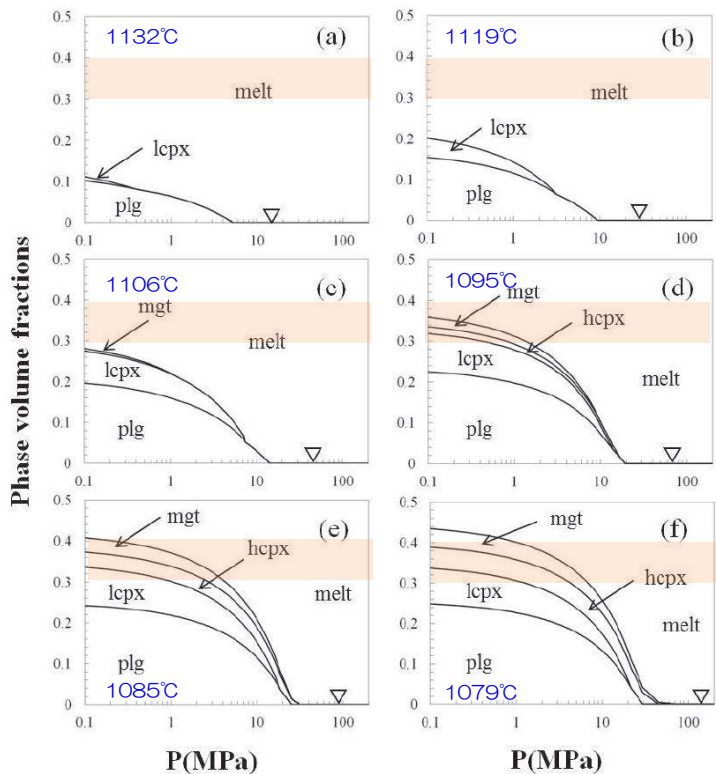
- B噴火のマグマの石基結晶量は、大部分が30-40vol%に集中する
- 石基結晶の方位や気泡の形状 ⇒ 結晶形成時にマグマは固体的であった

結晶量が ϕ_c に到達するとマグマが固体化し、脆性破砕がおこった

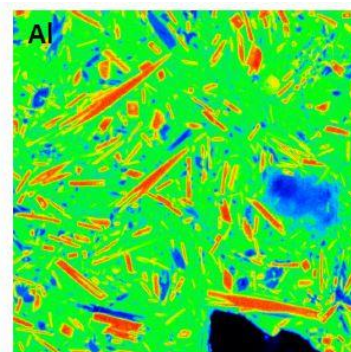
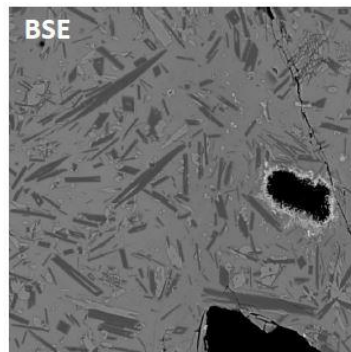


伊豆大島1986年B噴火のスコリアの石基結晶量の実測値 (左) と電子顕微鏡写真 (右) (宮下他, 2022JpGU) .

A噴火とB噴火の違いを生じた原因



- マグマが高温 (>1100°C) だと、1気圧まで減圧しても石基結晶量は ϕ_m に到達しない
⇒ Aマグマが石基結晶に乏しい原因
- マグマが低温 (<1100°C) だと石基結晶量が ϕ_m に達するが、その時の圧力は<10MPa
⇒ Bマグマは、深度<数百mの浅部で破砕
- 石基斜長石の化学組成が均一
⇒ 石基結晶は狭い圧力範囲で一気に形成

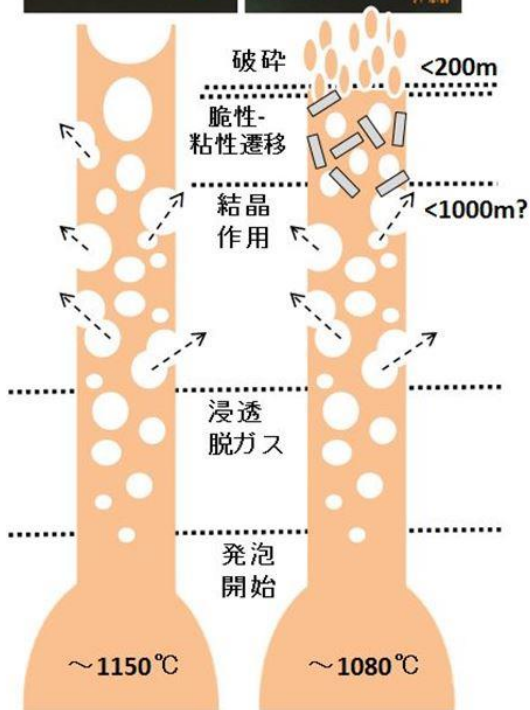


Bスコリアの石基のAl濃度マップ。赤い結晶が斜長石、青い結晶が輝石、緑はメルト。石基斜長石の化学組成は均一で、このことは比較的狭い圧力範囲で形成したことを示唆する

伊豆大島1986年噴火のマグマの等温減圧結晶作用の熱力学シミュレーション結果 (石橋・種田, 2018)。plg: 斜長石、lcp: 低Ca輝石、hcp: 高Ca輝石、mgt: 磁鉄鉱、オレンジの領域は液体-固体遷移のおこる閾値結晶量 (Picard et al., 2013)

A噴火とB噴火の違いを生じた原因

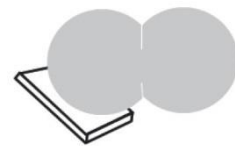
高 ← 温度 → 低



高温マグマ

- 温度が高いため、石基結晶がほとんどできない
- 流動が容易で脱ガスもしやすい

⇒ 穏やかな噴火様式

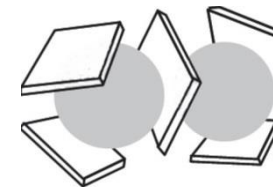


Microlite-poor

低温マグマ

- 火道浅部で石基結晶が急速成長し、マグマが高粘性化
- 脱ガスが阻害+マグマが脆性破碎

⇒ 激しい爆発的噴火



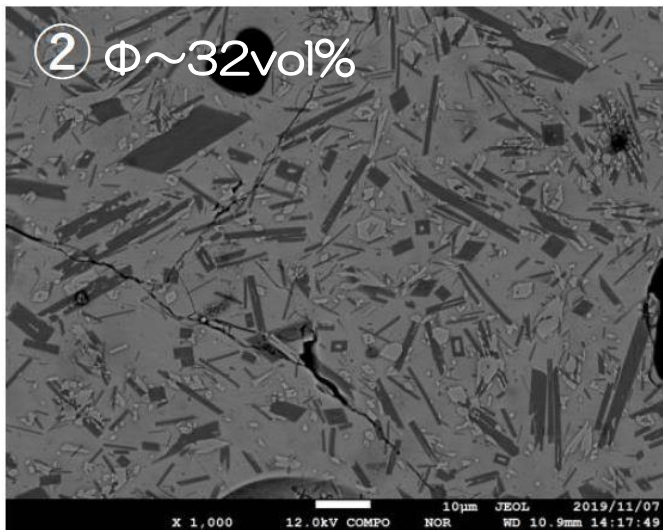
Microlite-rich



- 火道上昇中の結晶作用が、マグマの爆発性を強めた
- 根本的な支配的要因（のひとつ）は、**マグマの温度**

まだ、よくわかっていないこと

(1) 何故、石基結晶の中に割れているものがほとんどみられないのか？

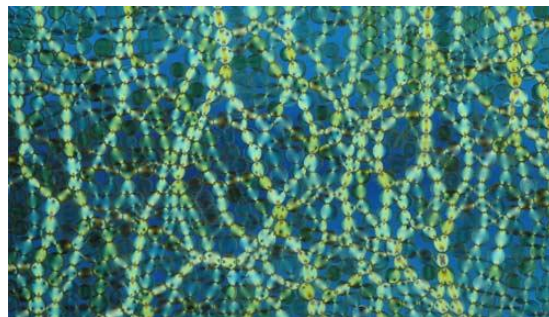


伊豆大島1986年B噴火のスコリアの電子顕微鏡写真（宮下他, 2022JpGU）。割れている結晶がほとんどみつからない。

仮説1：結晶の隙間のメルトに応力が集中し、メルト部分のみが破砕した

(Vasseur et al., 2023)

仮説2：マグマ中の結晶のうち、応力鎖に属する結晶のみが破砕した



応力鎖の例

<https://www.aps.org/about/physics-images/archive/chains.cfm>

(2) 何故、石基結晶の量にバリエーションがみられるのか？

(3) 何故、B噴火の噴出物は堆積後に溶結・再流動したのか？

(1) 観察・分析データから何があったかを解読していく過程には“謎解き”的な楽しさがある

その他にもいろいろな種類の噴出物がそれぞれにちがった経歴を秘めかくして静かに横たわっている。一つ一つが貴重なロゼッタストーンである。その表面と内部にはおそらく数百ページにも印刷し切れないだけの「記録」が包蔵されている。悲しいことにはわれわれはまだ、そのヒエログリフ聖文字を読みほごす知能が恵まれていない。（寺田寅彦「小浅間」, 1935）

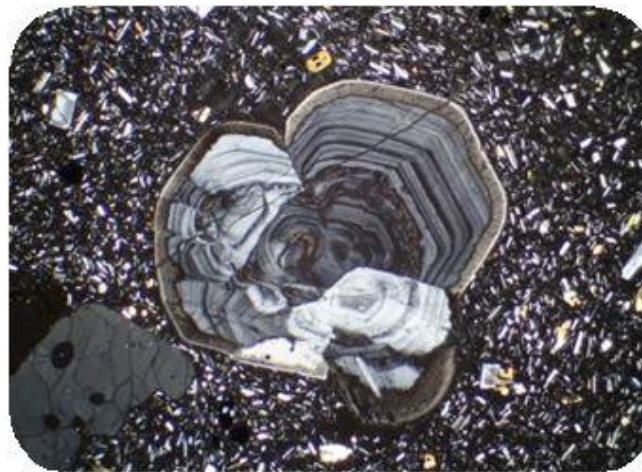
※現在では、いくらか解読可能になった

(2) 岩石・鉱物には、物理・化学の法則性がわかりやすく表れるという楽しさがある

現在の岩石学・鉱物学は、図鑑の世界ではなく、物質科学の一分野である



福徳岡ノ場2021年噴火の漂着軽石



雲仙平成噴火の斜長石にみられる波動累帯構造