



北海道大学

# 火山噴火の仕組みと火山災害

—原子力規制人材育成事業コンテンツ(解説教材)—

北海道大学 大学院理学研究院  
附属地震火山研究観測センター

教授 青山 裕

## はじめに

- 世界に**約1500あるとされる活火山のおよそ7%が日本に分布し**, 都市圏や重要施設へ影響を与える恐れのある火山が複数存在する.
- **マグマ活動を起因とする火山噴火は極めて多様な現象であり**, 噴火に伴って発生する**災害も幅広い**.
- 社会インフラが高度に発達した現代の日本社会は, 火山学的に大噴火と位置づけられる規模の噴火活動に伴う火山災害を経験したことがなく, 社会生活等への具体的な影響は未知数.
- 原子力規制庁が定めた火山影響評価ガイドでは, 原子力発電所に**影響を与える可能性のある火山事象として13の火山現象**が挙げられており, うち**5つは設計対応不可能な事象**に位置づけられている.



# 目次

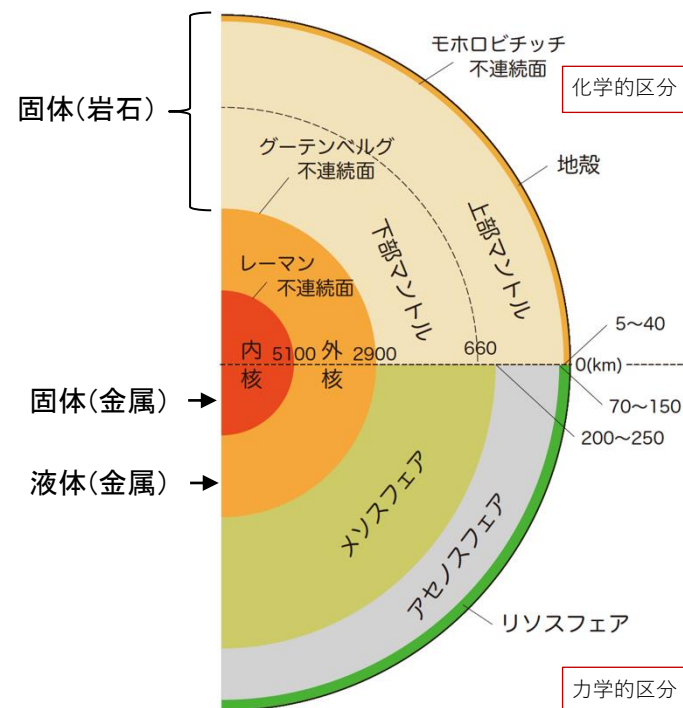
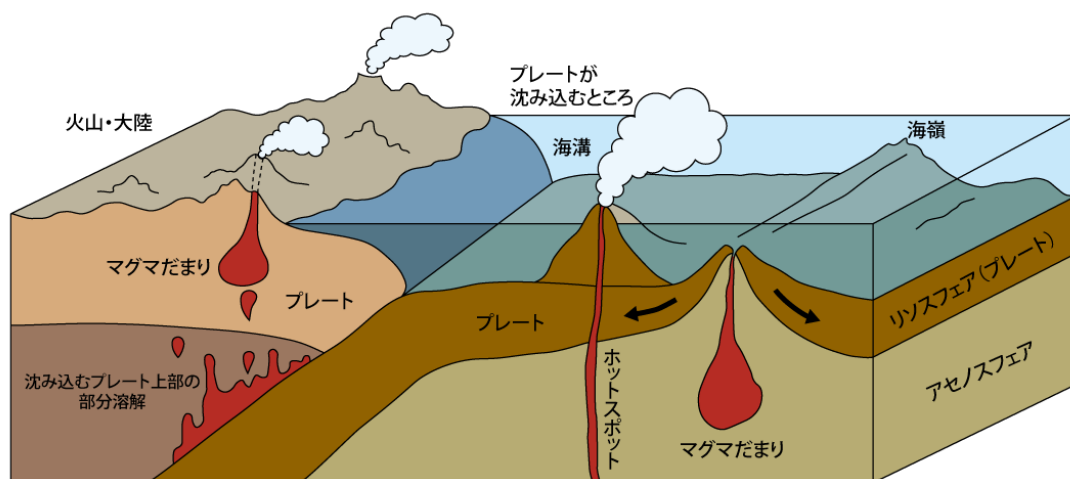
1. マグマの生成と上昇・多様性の獲得
2. 火山噴火の仕組み
3. 日本の活火山と災害事例
4. 巨大噴火(カルデラ生成規模の噴火)
5. 噴火予測や活動監視の現状と取り組み



# マグマが生成する地域

融解した岩石であるマグマが生成される場所は、かんらん岩を主成分とする固体のマントル内部.

固体内部の一部分だけが融けて液体が生成するのは不思議なことであり、特殊な条件が整わないとマグマは生成しない.



マグマの生成条件が整う地域

- プレートの発散境界
- プレートの収束境界
- ホットスポット



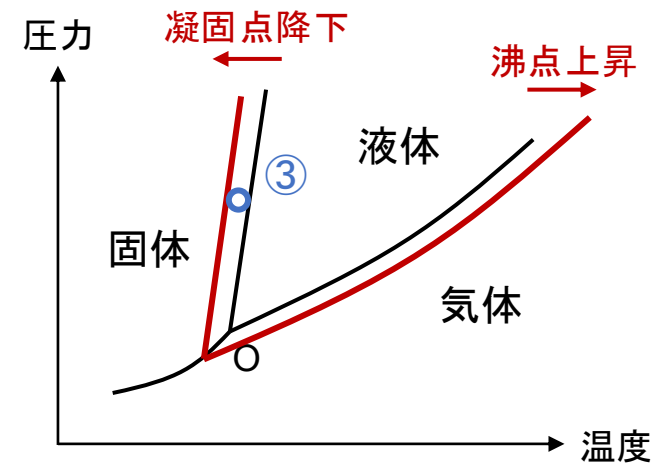
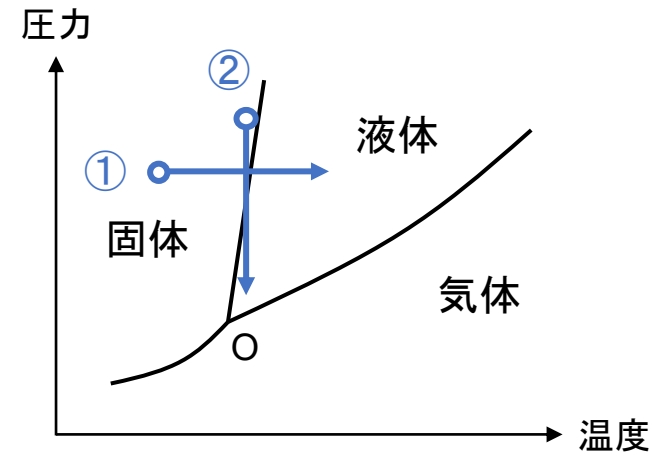
# 相変化に関する性質の復習

一般的な固体物質が液体になるには

- ① 温度を上げる
- ② 圧力を下げる
- ③ 不純物が含まれることで、融解曲線が変化する

岩石の融解も同様に考えられるが、上記プロセスの①がマントル内の一部分で自然に生じることは考えにくい。

一般的な物質の状態図



# かんらん岩の融解

- 【無】の青線: 水(不純物)を含まないかんらん岩の融解曲線
  - 同じ深さ(圧力)で比べた時に, 大陸・海洋の地下温度よりも, かんらん岩の融解温度の方が高い
- ⇒ 通常状態の地球内部では, マントルのかんらん岩は融解しない

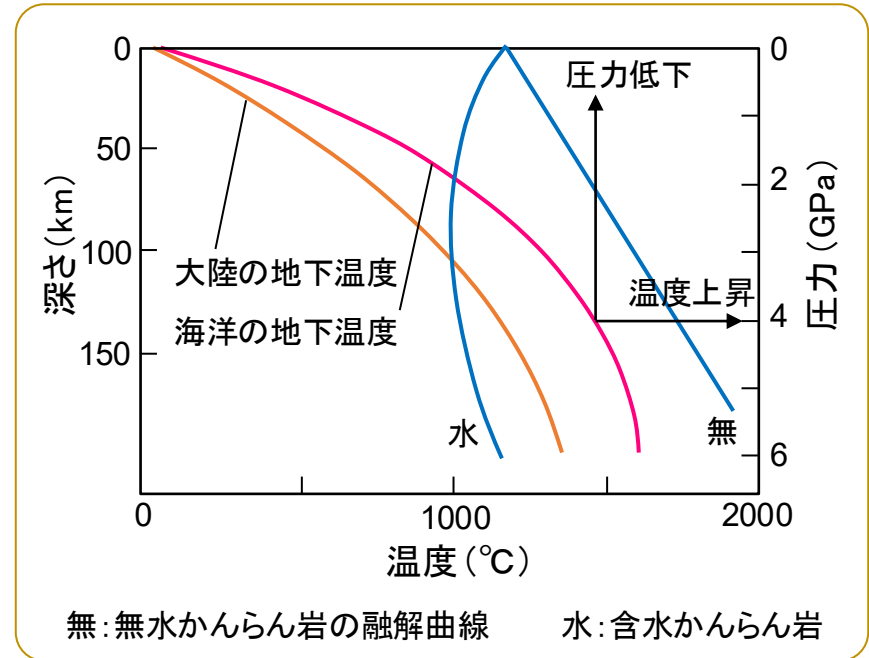
① 温度上昇... × (起こらない)

② 圧力低下... 温度を下げずに上昇

- かんらん岩が大きく温度を下げずに浅い部分へ移動してくると融解条件を満たす

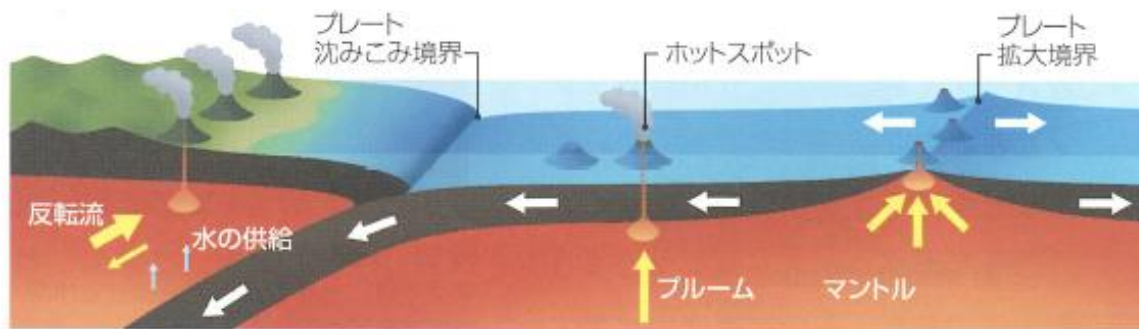
③ 不純物の含有

- 【水】の青線: 水(不純物)に飽和したかんらん岩の融解曲線
- かんらん岩の融解温度が大きく低下するため, ある深度で融解条件を満たす

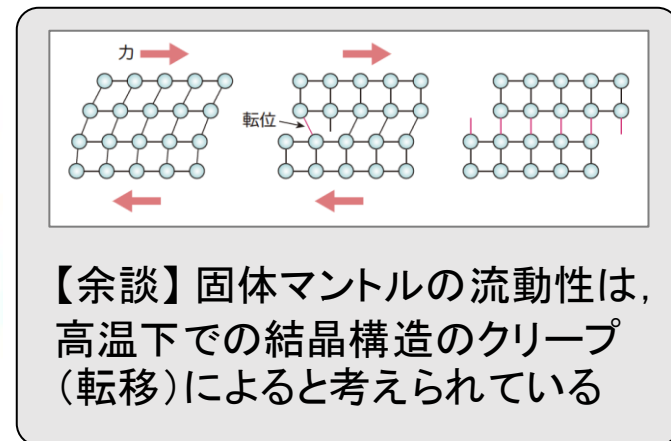


# 融解条件が整う地域の概要

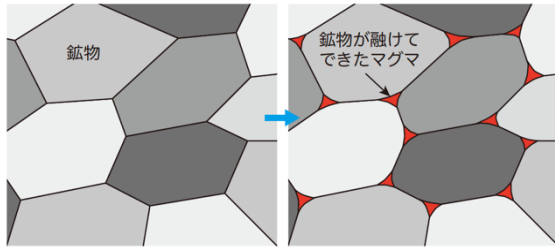
- プレートの発散境界  
プレートが離れていく部分を埋めるようにマントルが地表近くまで上昇する(圧力低下)
- プレートの収束境界  
沈み込む海洋プレートが持ち込んだ水が、深さ100kmほどの圧力になると大陸地殻下のマントル内に吐き出されて、沈み込むプレートの反流として上昇するマントルに付加される(融点降下・圧力低下)
- ホットスポット  
局所的にマグマがマントル深部から急速に上昇する特異な地域(圧力低下)



【1】 出典：『もういちど読む数研の高校地学』，数研出版株式会社，p. 81 図52



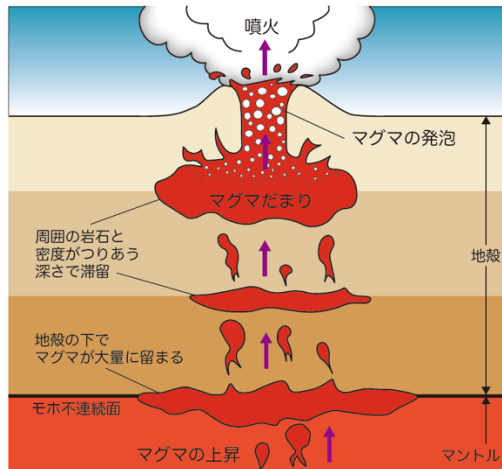
# マグマの生成と上昇



- かんらん岩の鉱物結晶の境界でマグマが生成
- このマグマを「**本源マグマ**」と言い、発散境界でも収束境界でも本源マグマの組成は大きく変わらない

- 結晶境界のマグマがある程度集積すると、鉱物に比べて密度が小さいため**浮力によって鉱物の隙間を上昇**していく

➡ 浮力が失われる場所でマグマは滞留・蓄積する:「マグマだまり」



- 下部地殻 ( $3.0\text{g/cm}^3$ ) と上部マントル ( $3.3\text{g/cm}^3$ ) は顕著な密度境界面 (モホ不連続面) であり、**マグマは地殻の下面に大規模に滞留**していると考えられる
- 冷却や分化により密度が軽くなるとマグマは地殻内へ上昇し、滞留と上昇を繰り返しながら地表へ向かう

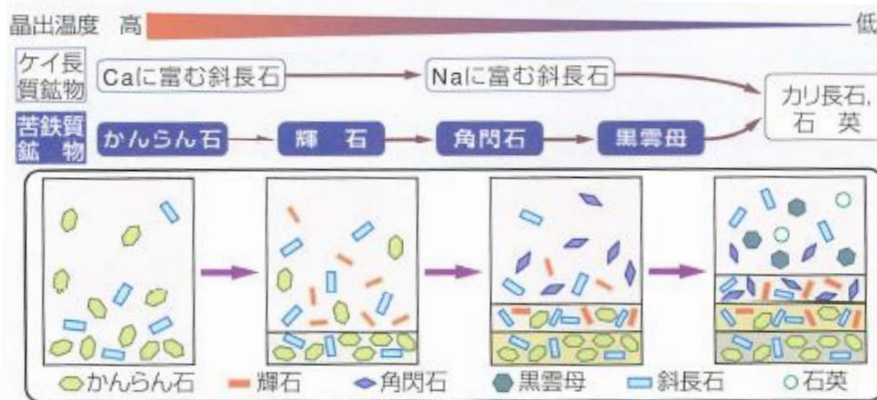
# マグマの多様性の獲得

日本のような収束境界の火山では、多様性に富んだ組成のマグマが噴出する

← 地殻の中を時間をかけて上昇してくるため

【※】発散境界では本源マグマに近い組成の玄武岩質マグマが噴出する

## ① マグマの分化



[2] 出典：『もういちど読む数研の高校地学』，数研出版株式会社，p. 86 図A

- マグマは多様な成分の混合物であるため、冷えてくると融解温度の高い鉱物から順に析出する
- 一部の元素が選択的に鉱物となることで、残りの液体部分(マグマ)の組成も変化する

『結晶分化作用(分別結晶作用)』という

時間をかけて結晶分化が進むほど、 $\text{SiO}_2$ の含有比が増加し粘性が高く、温度・密度の低いマグマとなる

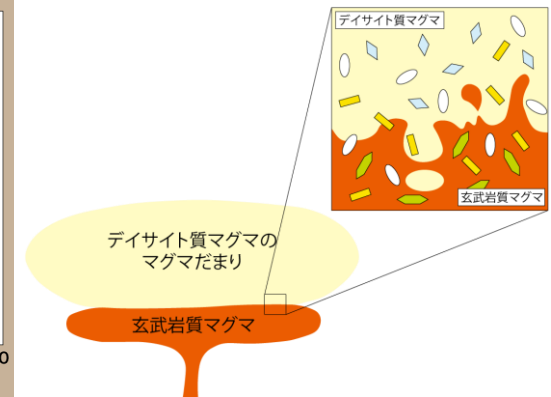
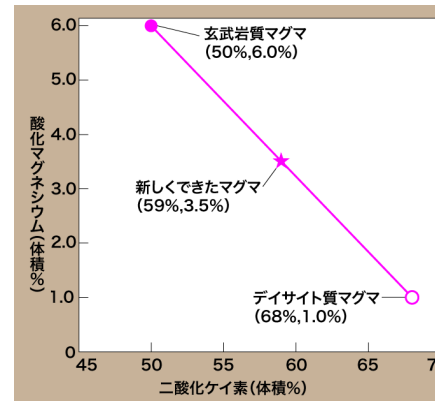
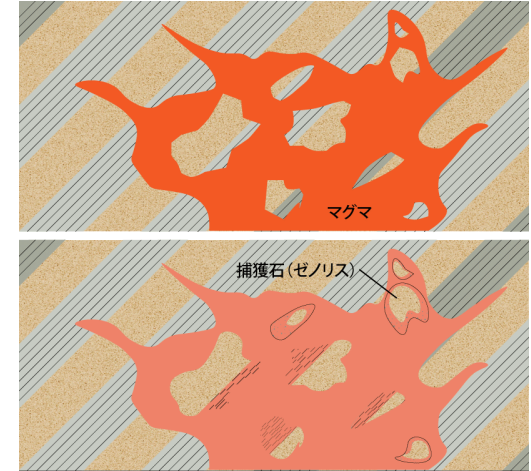
# マグマの多様性の獲得

## ②混成作用・同化作用

- マグマが**地殻の岩石を融かし込んでマグマ自身の組成を変化させる**
- 地殻下面で大規模に起きていると考えられるほか、マグマ溜りの外縁部などでも生じる

## ③マグマ混合

- マグマ溜り内にある**分化の進んだマグマに、下から未分化(より本源マグマに近い組成を持つ)のマグマが注入されて組成が変わる**
- 混合したマグマの中間的な組成のマグマができる



結晶分化よりも、混成作用やマグマ混合の寄与が大きいと考えられる

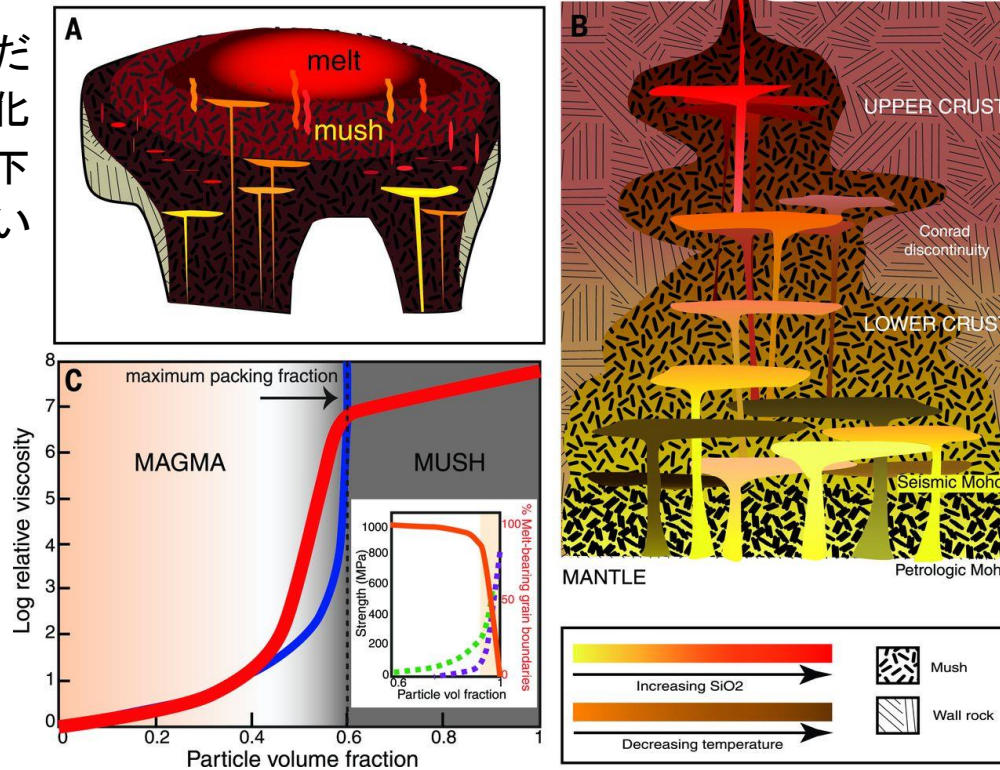


# マグマ供給系とマグマだまりのイメージ

地殻内のマグマは上昇するにつれて結晶化が進み、**大部分は流動性に乏しいおかゆ状 (mush)** で、その中心に液体マグマ (melt) が存在すると考えられる

地殻上部のマグマだまりは、mushと分化の進んだmelt. その下から分化程度の低いマグマが供給される

マグマ中の結晶分率が4割を超えると急速に粘性が上がり、6割を超えるとmush状となる



地殻内のあちこちでマグマは滞留するため、マグマだまりは何層も存在し、それらをつなぐ上昇路も多数存在する。浅いマグマだまりほどマグマの分化が進んでいる

[3] From Cashman et al., Vertically extensive and unstable magmatic systems: A unified view of igneous processes, SCIENCE, 2017, Vol.355, No.6331. Reprinted with permission from AAAS.

結晶化が進んで結晶分率が増えると、固体の結晶同士の衝突が起こるため急速に流動性が低下する

# 目次

1. マグマの生成と上昇・多様性の獲得
2. 火山噴火の仕組み
3. 日本の活火山と災害事例
4. 巨大噴火(カルデラ生成規模の噴火)
5. 噴火予測や活動監視の現状と取り組み

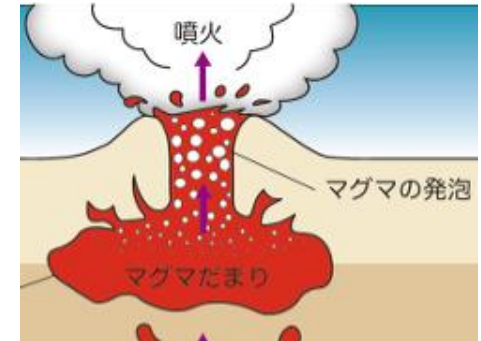


# 滞留したマグマの最後の上昇

地表面下の数kmまで上昇すると、地表付近の地殻密度が小さいために、冷却や分化による密度変化では上昇できなくなってマグマは滞留する

地表へ向かう駆動力

- 深部からのマグマ注入による**マグマ溜りの過剰圧**
- **揮発性物質の発泡**による体積増加と密度低下  
↳ マグマに溶解した水や二酸化炭素など



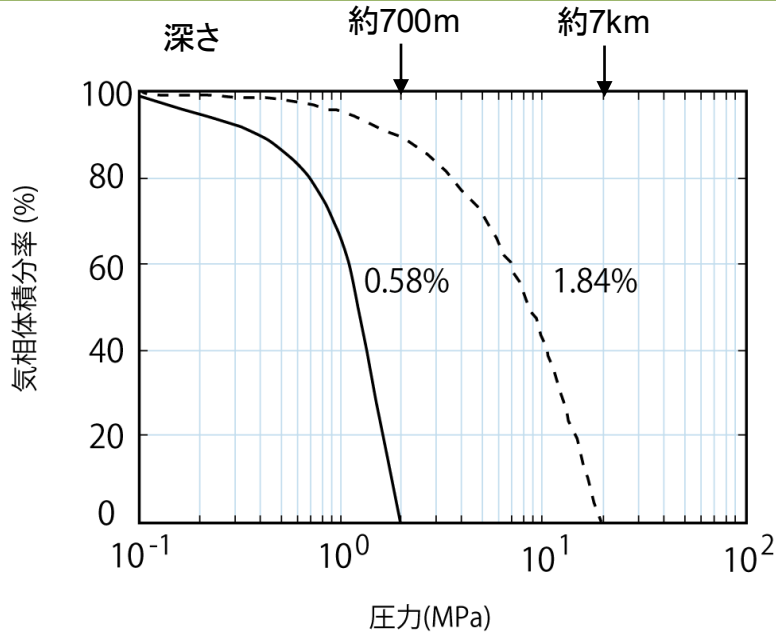
地下10kmの圧力は、  
大気圧の約3000倍

過剰圧による押し出しや、発泡によるマグマ体積の増加で、火道内へのマグマ上昇が始まると、

「減圧」→「発泡」→「体積増加」→「上昇」→「減圧」→「発泡」→・・・  
というフィードバックが働き、気液混合物となって急速に上昇する



# マグマの発泡と流動様式



水に飽和したマグマが減圧した場合の、  
気相体積分率の変化

2MPaの圧力下だと水は0.58% (質量分率)

20MPaの圧力下だと水は1.84% (質量分率)

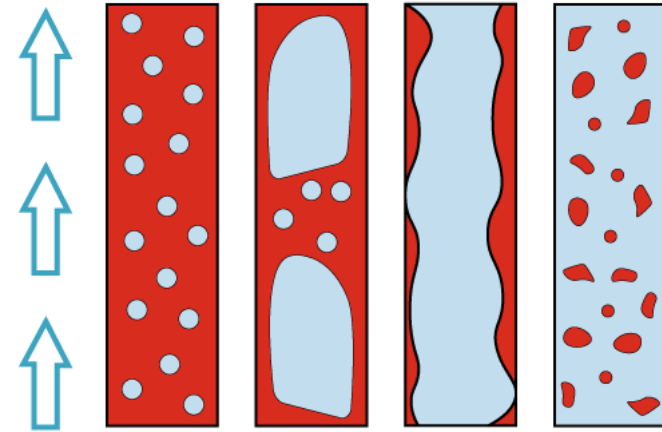
気泡が離脱しない条件でマグマが大気圧  
(0.1MPa)まで減圧すると、気相体積分率  
が100%近くに達する

## 気液混相流の流動様式

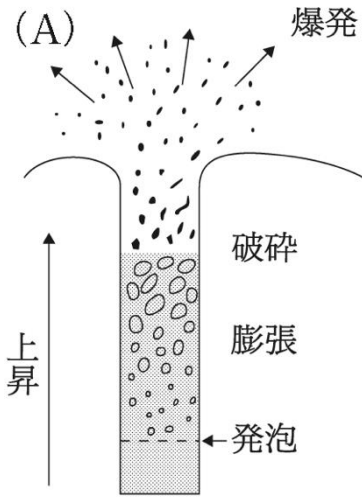
ガス分率が増える順に

気泡流 → スラグ流 → 環状流 → 噴霧流

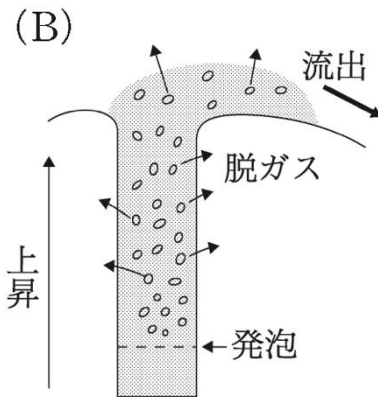
流紋岩質やデイサイト質のような**高粘性のマグマ**では、  
スラグ流や環状流のように**気泡がマグマから離脱で  
きず**、マグマの連続性が失われて噴霧流となる



# マグマ噴火の様式と脱ガス



- 気相がマグマから離脱しない場合(A)
  - マグマの上昇に伴って気相の体積分率が大きくなり、限界を超えると液相の連続性が保てなくなり『破碎』して噴霧流へ移行する
    - 「**爆発的な噴火**」
  - マグマの上昇速度が速い、粘性が高い場合



- 気相が効率的にマグマから離脱する場合(B)
  - マグマが破碎するほどに気相の体積分率が大きくなり、連続性を保った液体としてのマグマが流出する
    - 「**非爆発的な噴火**」(溢流的な噴火)
  - マグマの上昇速度が遅い、粘性が低い場合

マグマからの脱ガス効率とマグマ上昇速度のバランスが効いている

【4】出典：兼岡一郎，井田喜明，『火山とマグマ』，東京大学出版会，1997.

# 噴出後のマグマのふるまい

- 溢流的噴火の場合
  - 低粘性マグマの噴出
    - ⇒ 溶岩流として流下
    - ⇒ 火口周辺にスコリア丘
  - 高粘性マグマの噴出
    - ⇒ 溶岩ドームを形成
    - ⇒ ドームを破壊する爆発的噴火をしばしば伴う
    - ⇒ 溶岩ドーム崩壊に伴う火砕流



雲仙普賢岳の溶岩ドーム



クリュチェフスカヤ火山のスコリア丘



雲仙普賢岳の火砕流

【5】 出典：気象庁ホームページ  
 (https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/kazan/kazanyougo/katsudo.html)

# 噴出後のマグマのふるまい

- 爆発的噴火の場合
  - ⇒ 噴石の飛散
  - ⇒ 噴煙上昇
  - ⇒ 火砕流をしばしば伴う
  - ⇒ 遠方までおよぶ降下火砕物



桜島のブルカノ式噴火



福徳岡ノ場のプリニー式噴火  
撮影高度の6000mを優に超える噴煙高度

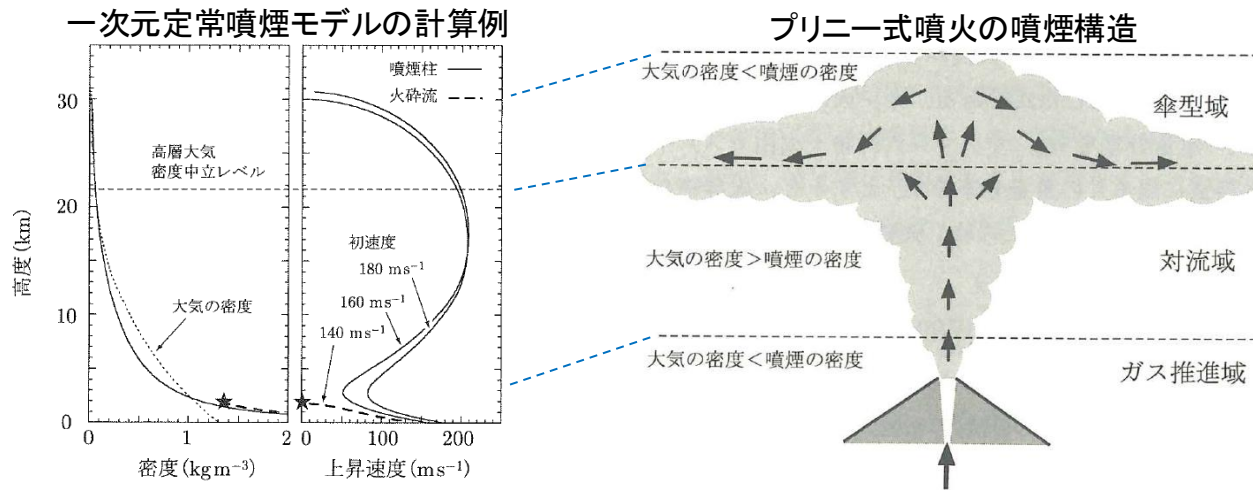
軽石や火山灰のような固形物が上空10km  
以上にまで上がるのは不思議なこと

投げ上げ運動では、秒速100m(時速360km)で真上  
に飛び出しても、高さ500mほどまでしか到達しない

[6] 出典：海上保安庁ホームページ  
(<https://www1.kaiho.mlit.go.jp/kaiikiDB/kaiyo24-2.htm>)



# 噴煙上昇のメカニズムと火砕流の発生



左【7】右【8】 出典：小屋口剛博，『火山現象のモデリング』，東京大学出版会，2008。

★マグマは**熱い**・・・  
軽石や火山灰は**900°C**  
**以上**の高温で噴出する

## ①ガス推進域

- 噴出直後の噴煙の密度は大気より大きいので重力で減速
- 噴煙境界の乱流で**取り込まれた大気が火砕物の熱で急速に膨張**し，噴煙密度が急速に低下

## ②対流域

- 大気より低密度になった噴煙は高速度を維持して上昇

## ③傘型域

- 大気との密度中立レベルを超えると速度が減少．中立レベルの高度に傘型域の噴煙が広がる

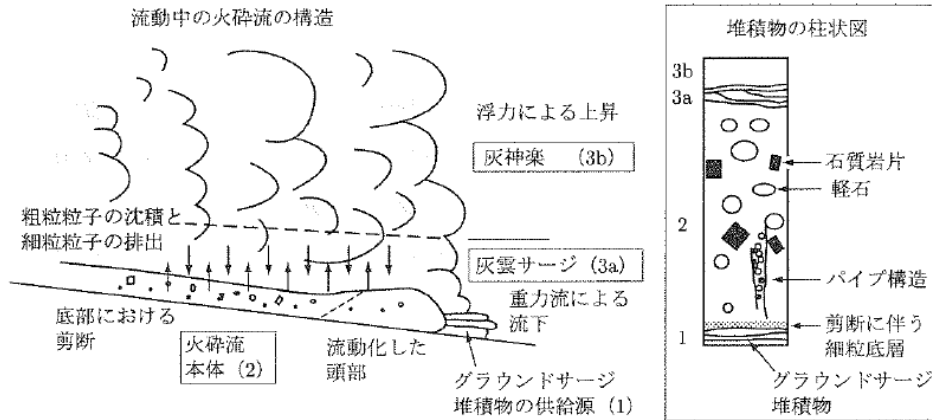
**大気取り込みが不十分だと噴煙柱として上昇できずに火砕流となる**

↑ 遅い初速度・大きすぎる火口径など



# 火砕流の構造と堆積

(a)火砕流の内部構造と堆積構造の対比

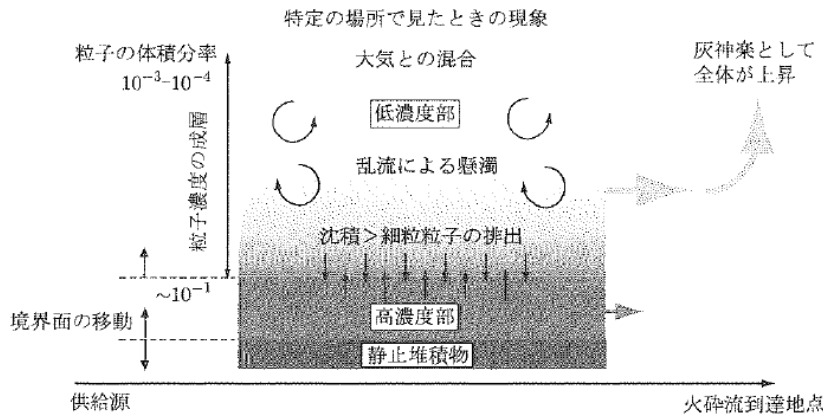


## 火砕流の構造:

流下するにつれて粗粒粒子の沈降と細粒粒子の上方排出が進む

- 微細粒子が浮力を得て、粒子の体積分率が低い**灰神楽**となり**上昇する上部**
- 粒子の体積分率が大きく、**重力に従って斜面を流下する下部**

(b)累進堆積作用に基づいた描像



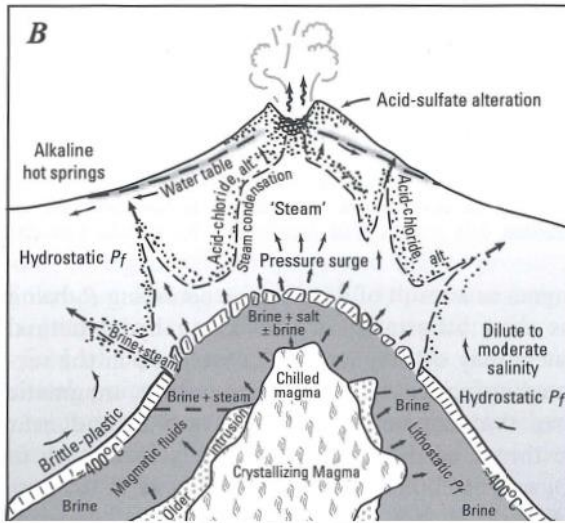
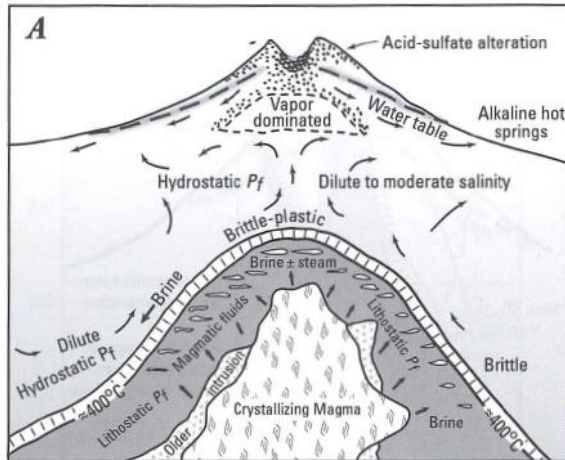
**高密度・高温・高速度のため破壊力が大**

火砕流堆積物の堆積構造と流下時の観察から描かれる内部構造. 時間スケールが100秒程度の火砕流を説明

一定距離の火砕流が長時間続く場合の堆積作用を説明する内部構造. 均質で厚い火砕流堆積物の形成を説明

上【9】下【10】出典：小屋口剛博，『火山現象のモデリング』，東京大学出版会，2008.

# 水蒸気噴火



← 熱水系が発達した火山の想像図(深さ3km程度まで)

- 火山体の内部では, 暖められた天水やマグマ由来の水が熱水となって循環している
- 400°C程度の場所には「脆性領域」と「塑性領域」の境界があり, ここでは鉱物の沈積や塑性変形によって薄いself-sealed zoneが形成される(図A).

このsealed zoneが破れると, 下部に蓄えられた熱や高温高圧の塩水が上部の脆性領域へ漏れ出すことで急激に気化し, 地表へ噴き出すと「水蒸気噴火」(図B). 液→気の相変化に起因するため, 山体を構成していた岩石を爆発的に吹き飛ばすことも多い.

sealed zone の内部にあるマグマの破片も同時に噴出すれば, 「マグマ水蒸気噴火」と判断される.

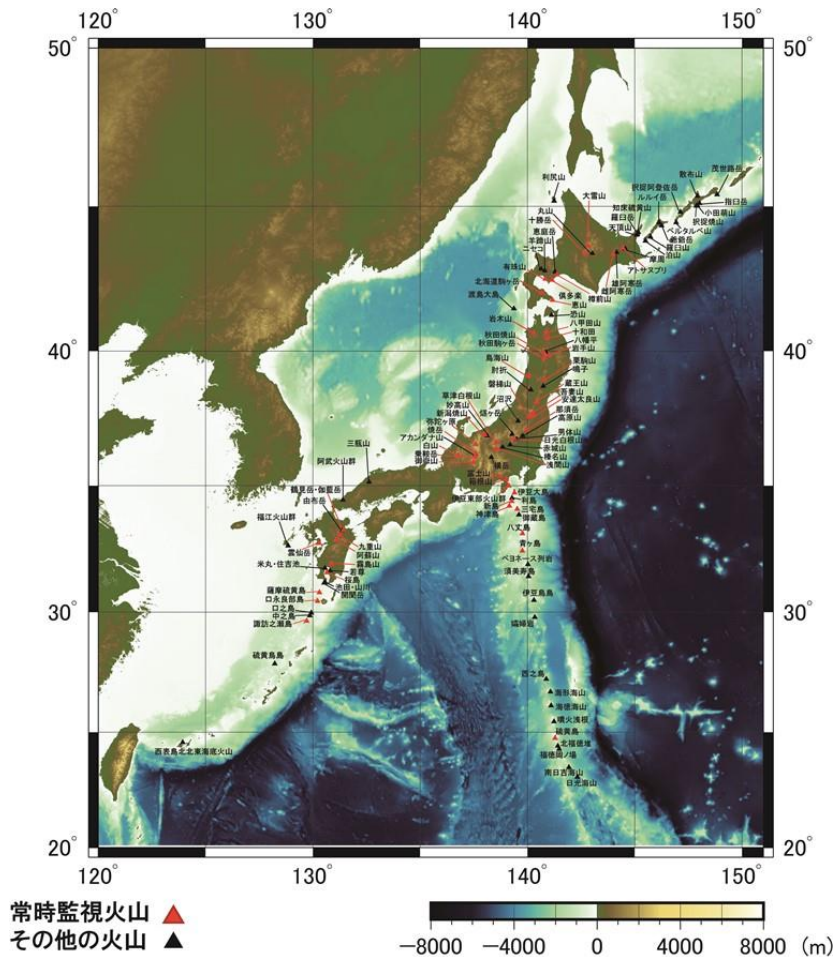
マグマ噴火の前駆現象となる水蒸気噴火もある

# 目次

1. マグマの生成と上昇・多様性の獲得
2. 火山噴火の仕組み
3. 日本の活火山と災害事例
4. 巨大噴火(カルデラ生成規模の噴火)
5. 噴火予測や活動監視の現状と取り組み



# 日本の火山の噴火様式の地域的特徴



日本の活火山分布図

プレート収束境界にある日本には、分化の進んだ安山岩質マグマ～流紋岩質マグマを噴出する火山が多い

- 北海道～東北～中部
- 九州～南西諸島

→ 爆発的噴火や溶岩ドーム噴火など

富士山以南の伊豆諸島の火山は、分化の程度が低い玄武岩質マグマを噴出することが多い。地殻の薄いフィリピン海プレート内に位置することも一因。

→ ハワイ式噴火やストロンボリ式噴火など

同じ火山でも、マグマの性質は時間(活動期)によって変化する

# 20世紀以降の犠牲者が多い噴火災害

噴火年月日	火山名	犠牲者(人)	備考
1900年7月17日	安達太良山	72	火口の硫黄採掘所全壊(水蒸気噴火)
1902年8月上旬	伊豆鳥島	125	全島民死亡(水蒸気噴火)
1914年1月12日	桜島	58~59	噴火・地震による「大正大噴火」(プリニー式噴火・溶岩流)
1926年5月24日	十勝岳	144(含不明)	融雪型火山泥流による「大正泥流」
1940年7月12日	三宅島	11	火口が居住地に開口し、火山弾・溶岩流などによる
1952年9月24日	ベヨネーズ列岩	31	海底噴火(明神礁)。海保観測船第5海洋丸遭難により全員殉職
1958年6月24日	阿蘇山	12	噴石による
1991年6月3日	雲仙岳	43(含不明)	火砕流による(溶岩ドーム崩壊)
2014年9月27日	御嶽山	63(含不明)	噴石等による(水蒸気噴火)

気象庁編 日本活火山総覧(第4版)に基づく

## 「設計対応不可能な火山事象」が発生した噴火事例

火口開口・溶岩流の災害事例 ⇒ 三宅島1940年噴火

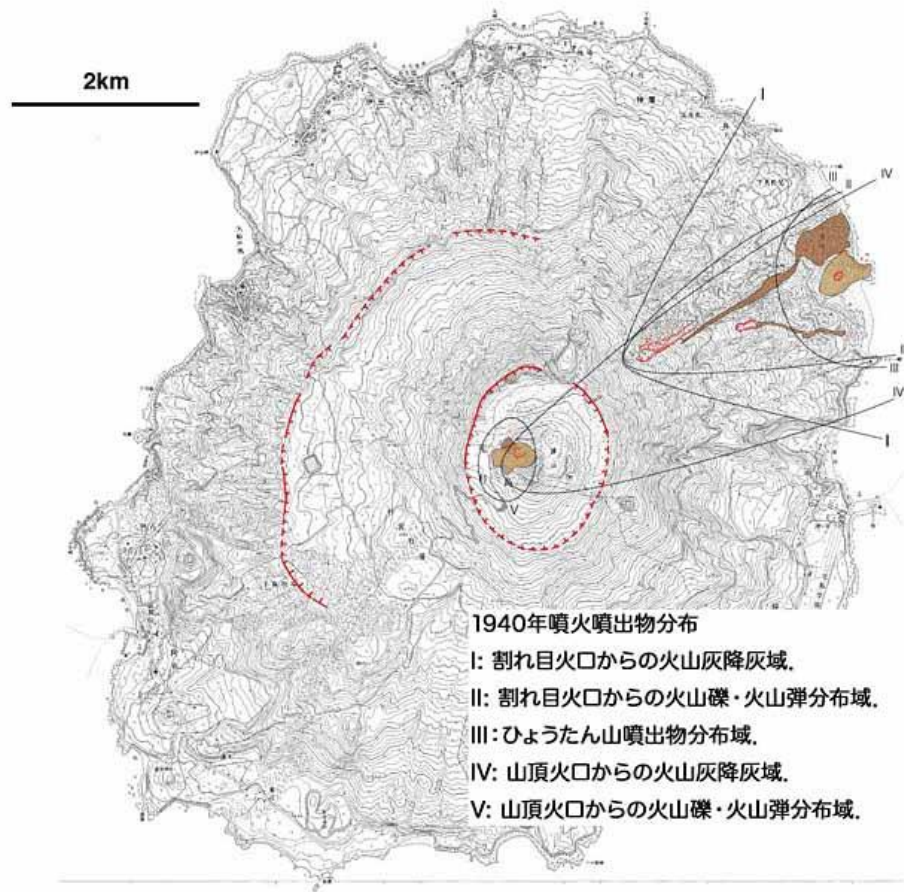
火砕流による災害事例 ⇒ 雲仙岳1991年噴火

岩屑なだれによる災害事例 ⇒ 磐梯山1888年噴火

地殻変動による災害事例 ⇒ 有珠山1977年噴火



# 火口開口・溶岩流の事例(三宅島1940年)



【13】 出典：産総研地質調査総合センターウェブサイト

([https://gbank.gsj.jp/volcano/Act\\_Vol/miyakejima/v02/top/html\\_data/geology/shinmio/sm\\_1940.html](https://gbank.gsj.jp/volcano/Act_Vol/miyakejima/v02/top/html_data/geology/shinmio/sm_1940.html))

津屋弘達 (1941a) 昭和15年7月三宅島噴火調査概報. 地震第1輯, vol.12, p.435-484.

津屋弘達 (1941b) 昭和15年7月三宅島噴火再調査報告 (I), (II). 地震第1輯, vol.13, p.1-21, p.37-48.

7月12日19時30頃, 北東山腹の標高200m付近より噴火. 割れ目火口が山腹の上下方向へ延び, 約1時間後には島下集落を覆って海岸へ到達.

約22時間の間に, 溶岩・火山弾・スコリアが放出され, スコリア丘(ひょうたん山)を形成. 13日からは山頂でも噴火開始.

(気象庁HP記載に基づく)

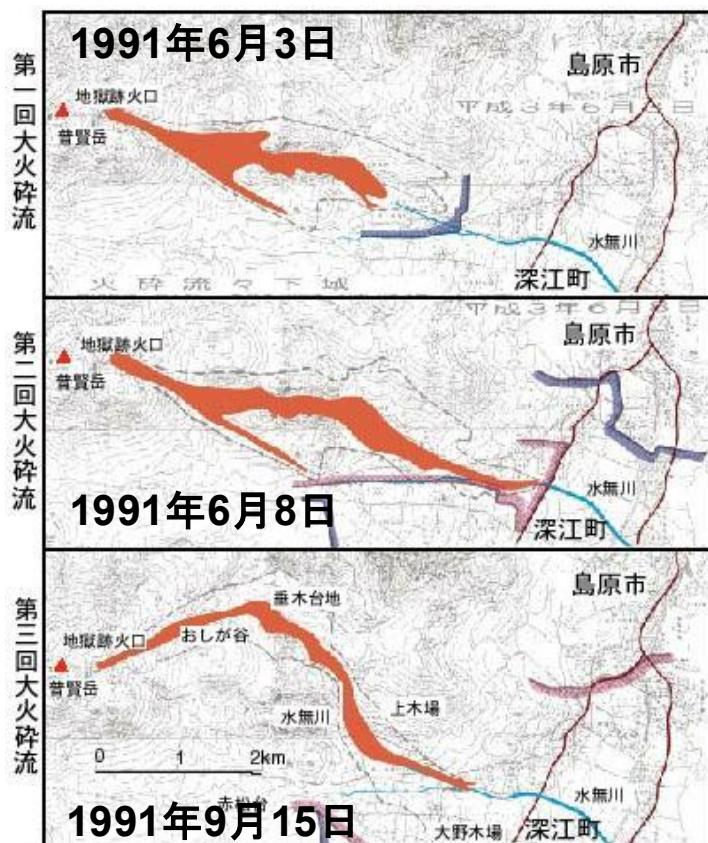


【14】 出典：産総研地質調査総合センターウェブサイト

([https://gbank.gsj.jp/volcano/Act\\_Vol/miyakejima/v02/top/html\\_data/geology/shinmio/sm\\_1940.html](https://gbank.gsj.jp/volcano/Act_Vol/miyakejima/v02/top/html_data/geology/shinmio/sm_1940.html))



# 火砕流の事例(雲仙岳1991年)



1990年11月17日の水蒸気噴火で始まった噴火活動は、1991年5月20日から山頂溶岩ドームの生成へと推移し、ドームが部分的に崩壊することによる火砕流が頻発した。火砕流は東麓の上木場地区や安中地区を壊滅させた。噴火活動は1995年2月まで続いた。

1991年6月3日 死・不明:43名, 負傷:9名, 焼失家屋:179棟  
 1991年6月8日 焼失家屋:207棟  
 1991年9月15日 焼失家屋:218棟



左【15】中【16】右【17】出典：九州大学インターネット博物館「雲仙普賢岳の噴火とその背景」（【16】は京都大学 小野博尉 撮影）

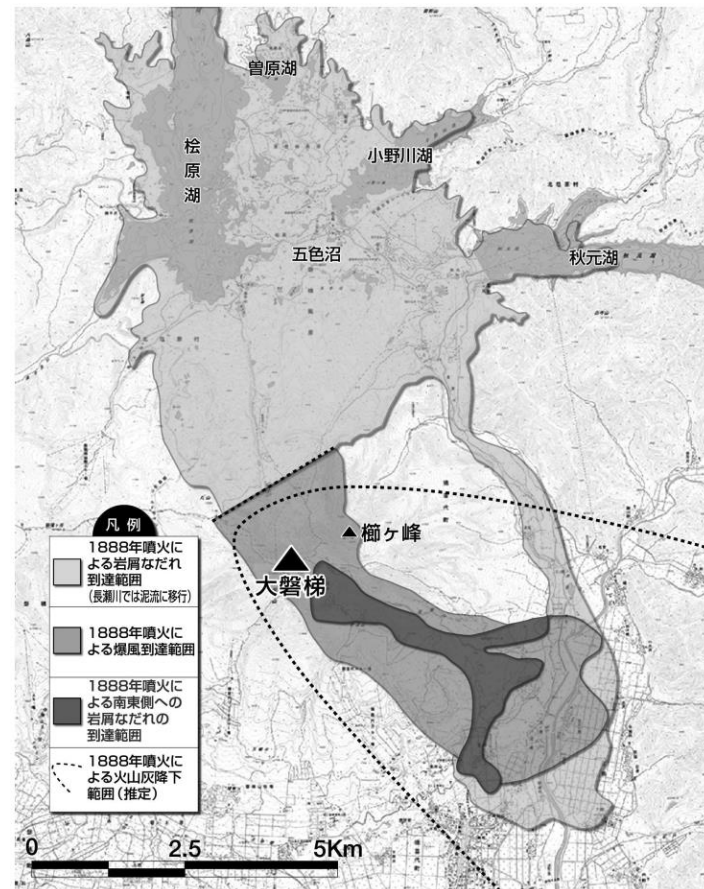
# 岩屑なだれの事例（磐梯山1888年）

【※】磐梯山1888年噴火の推移については諸説あり，現在進行形の研究課題

7月15日8時前に始まった水蒸気噴火で小磐梯山が崩壊し，北麓と南東麓へ岩屑なだれが流下．北麓への流下距離は10kmにおよび，複数の集落が埋没したあとには，河川のせき止めにより裏磐梯の湖沼群が形成された．死者・不明者465名のうち，遺体が発見されたのは87名にとどまる．  
 (災害教訓の継承に関する専門調査会報告書「1888磐梯山噴火」に基づく)



【18】出典：磐梯山ジオパークホームページ



【19】出典：内閣府ホームページ「防災情報のページ」  
 ([https://www.bousai.go.jp/kyoiku/kyokun/kyoukunnok-eishou/rep/1888\\_bandaisan\\_funka/index.html](https://www.bousai.go.jp/kyoiku/kyokun/kyoukunnok-eishou/rep/1888_bandaisan_funka/index.html))

# 地殻変動の事例(有珠山1977年)

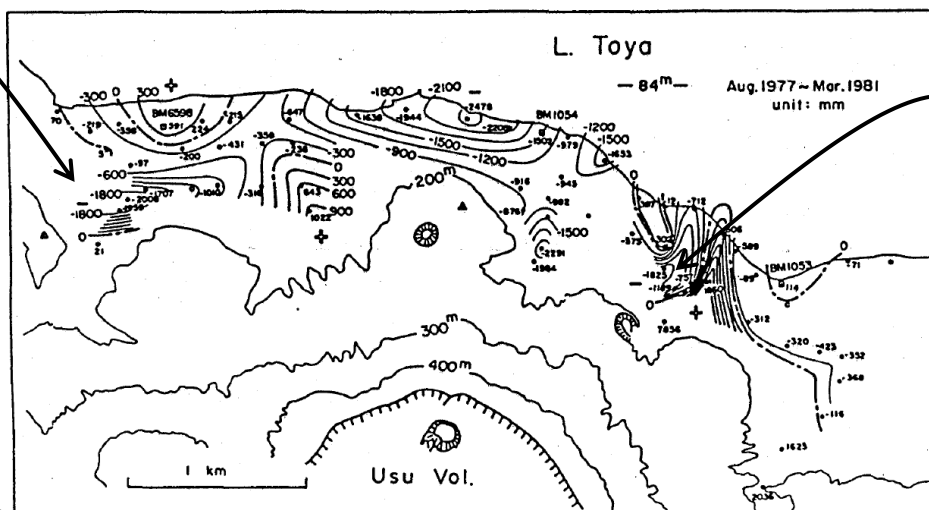
8月7日9時過ぎから繰り返された4回のプリニー式噴火で始まった噴火活動は、山頂火口原内における新しい潜在溶岩ドーム「有珠新山」の生成へと移行した。溶岩ドームの成長は1982年3月まで継続し、火口原内の地形は大きく変化するとともに、山頂火口原の北縁は100m以上も外側(洞爺湖畔側)へせり出した。

山麓でも潜在溶岩ドームの成長に伴う地盤の変形が進行し、地殻変動が大きかった地域や断層上に位置した建物は大きく損壊した。

木の実沢アパート



【20】 出典：門村浩撮影, 北海道地区自然災害科学資料センター報告, Vol.6 (1991年3月), V.1977年有珠山噴火被害, スライド番号5-34. ([https://www.hokkaido-nds.org/research\\_bulletin.html](https://www.hokkaido-nds.org/research_bulletin.html))



【21】 出典：「北海道の火山活動とその観測報告(1985年10月~1987年4月)」第6図, 北海道大学理学部有珠火山観測所, 『火山噴火予知連絡会会報』, 第39号, pp. 203-230

三恵病院



【22】 出典：そうべつ観光協会ホームページ (<https://sobetsu-kanko.com/spot/1977koen>)



# 大規模降灰で想定される現代社会への影響

内閣府中央防災会議：

- 令和2年4月 富士山噴火をモデルケースとした広域降灰の影響と対策をとりまとめ  
⇒ 富士山の宝永噴火相当(VEI5)の噴火規模を想定

## 大規模噴火時の広域降灰対策について

一首都圏における降灰の影響と対策一

～ 富士山噴火をモデルケースに ～

( 報 告 )

令和2年4月

中央防災会議 防災対策実行会議

大規模噴火時の広域降灰対策検討ワーキンググループ

【23】 出典：「防災情報のページ」（内閣府ホームページ）  
(<https://www.bousai.go.jp/kazan/kouikikouhaiworking/index.html>)

項目	火山灰の堆積厚					
	微量	0.3cm～	3cm～	10cm～	30cm～	45cm～
電力			<ul style="list-style-type: none"> <li>降灰による送電線の絶縁低下により停電</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>火力発電所は、吸気フィルターの交換頻度の増加により発電量が低下する</li> <li>火力発電所が停止するなどで供給量が大幅に低下し、需要抑制や電力融通等の対応でも必要な供給力が確保しきれない場合停電に陥る。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>倒木による電線の切断により停電が発生</li> </ul>	
通信	<ul style="list-style-type: none"> <li>噴火直後、大量のアクセスにより電話がつながりにくくなる</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>携帯電話のアンテナへの火山灰付着により通信障害が生じる</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>基地局の窓ガラスに不具合が生じると、通信が正常にできなくなり、通信障害が生じる</li> </ul>	
ライフライン			<ul style="list-style-type: none"> <li>【停電による影響】</li> <li>情報通信機器等の機能停止、通信支障。</li> <li>携帯電話では、非常用発電設備の燃料切れが生じた基地局で停電。</li> <li>固定電話の使用不能（商用電源を使わない電話機では可）。</li> </ul>			
上水道			<ul style="list-style-type: none"> <li>【堆積厚に上らない影響】</li> <li>火山灰が原水に混ざり水質が悪化し、浄水施設の処理能力を超えることで、水道水が飲用に適さなくなる、または断水する可能性がある。</li> <li>水質悪化が増加することにより水不足が生じる可能性がある。</li> <li>連続していた火山灰が雨水と共に原水に流入し、沈砂池や沈砂池等に堆積することによる浄水施設の処理能力の低下。</li> </ul>			
下水道			<ul style="list-style-type: none"> <li>【停電による影響】</li> <li>停電エリアでは、浄水場及び配水施設（ポンプ）等が運転停止するとともに、非常用発電設備を有する施設においても燃料切れが生じれば運転が停止し、排水が滞りやすくなる。</li> </ul>			
建物			<ul style="list-style-type: none"> <li>【堆積厚に上らない影響】</li> <li>沈砂池の埋積、ろ過材の目詰まり等により、下水処理場の処理能力が低下、機能不全となって、下水道の使用が制限される可能性がある。</li> <li>下水管線（雨水）の閉塞により、閉塞上流から雨水があふれる。</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>【停電による影響】</li> <li>停電エリアで非常用発電設備の燃料切れとなる処理施設・ポンプが発生。下水道の使用が制限される。</li> </ul>

同報告書の図1-2

【24】 出典：「防災情報のページ」（内閣府ホームページ）  
(<https://www.bousai.go.jp/kazan/kouikikouhaiworking/index.html>) を加工して作成

数mm程度の降灰で、送電網の絶縁低下に伴う停電を起点とした影響が想定されている

# 目次

1. マグマの生成と上昇・多様性の獲得
2. 火山噴火の仕組み
3. 日本の活火山と災害事例
4. 巨大噴火(カルデラ生成規模の噴火)
5. 噴火予測や活動監視の現状と取り組み



# 火山学的な意味での巨大噴火

VEI6以上の噴火規模になると、定性的な規模表現で“colossal”という英単語が用いられる「巨大噴火」の領域となり、カルデラの形成を伴う事象が多い。

VEI	0	1	2	3	4	5	6	7	8
規模	非爆発的噴火	小規模	中規模	やや大規模	大規模	非常に大規模			
テフラ体積 (m <sup>3</sup> )	$1 \times 10^4$	$1 \times 10^6$	$1 \times 10^7$	$1 \times 10^8$	$1 \times 10^9$	$1 \times 10^{10}$	$1 \times 10^{11}$	$1 \times 10^{12}$	
噴煙高度 (km) 火口上 海面上	<0.1	0.1-1	1-5	3-15	10-25		>25		
噴火のタイプ	← ハワイ式 →	← ストロンボリ式 →		← ブルカノ式 →		← プリニー式 →		← ウルトラプリニー式 →	
噴火継続時間		<1 時間		← 1-6 時間 →	← 6-12 時間 →		>12 時間		
対流圏への供給	微小	少量	中程度	大量					
成層圏への供給	なし	なし	なし	時にあり	必ずあり	顕著			

(Newhall and Self, 1982, を邦訳)

## 過去1万年の国内火山でのVEI6以上の噴火

鬼界 約7300年前 VEI7 ⇒ 鬼界カルデラの生成  
 摩周 約7600年前 VEI6 ⇒ 摩周カルデラの生成  
 桜島 約8000年前 VEI6

Newhall, C. G., & Self, S. (1982). The volcanic explosivity index (VEI) an estimate of explosive magnitude for historical volcanism. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 87(C2), 1231-1238. を翻訳し引用



# 日本のカルデラ分布

日本の代表的なカルデラは、

- 北海道～東北北部
- 九州

に多く分布しており、カルデラ噴火の後に生成した「後カルデラ火山」が活火山として活動している。

## 後カルデラ火山の例

摩 周: 摩周岳

屈 斜 路: アトサヌプリ

阿 寒: 雄阿寒岳, 雌阿寒岳

支 笏: 樽前山, 恵庭岳

洞 爺: 有珠山

阿 蘇: 中岳

始 良: 桜島

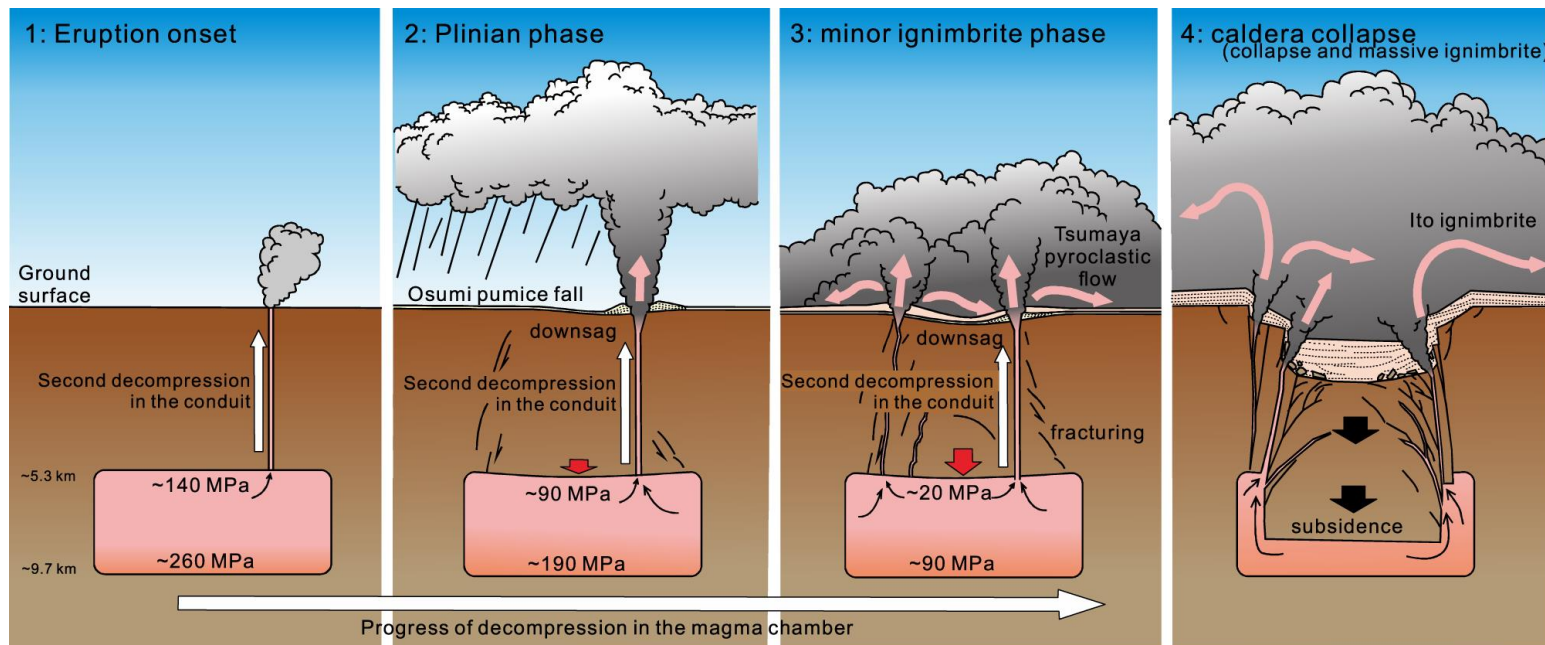
鬼 界: 薩摩硫黄島

【※】同じカルデラで巨大噴火を複数回しているものもある

直径10km以上あるいは過去十数万年以内のVEI6以上の噴火によって形成されたカルデラ



# カルデラ形成を伴う噴火の進展イメージ (Geshi+ 2021)



始良カルデラにおける2.9万年前の巨大噴火 ( $400\text{km}^3$ : VEI7) の進展イメージ

【25】 出典 : Geshi, N., Yamasaki, T., Miyagi, I. et al. Magma chamber decompression during explosive caldera-forming eruption of Aira caldera. *Commun Earth Environ* 2, 200 (2021)., CC BY 4.0

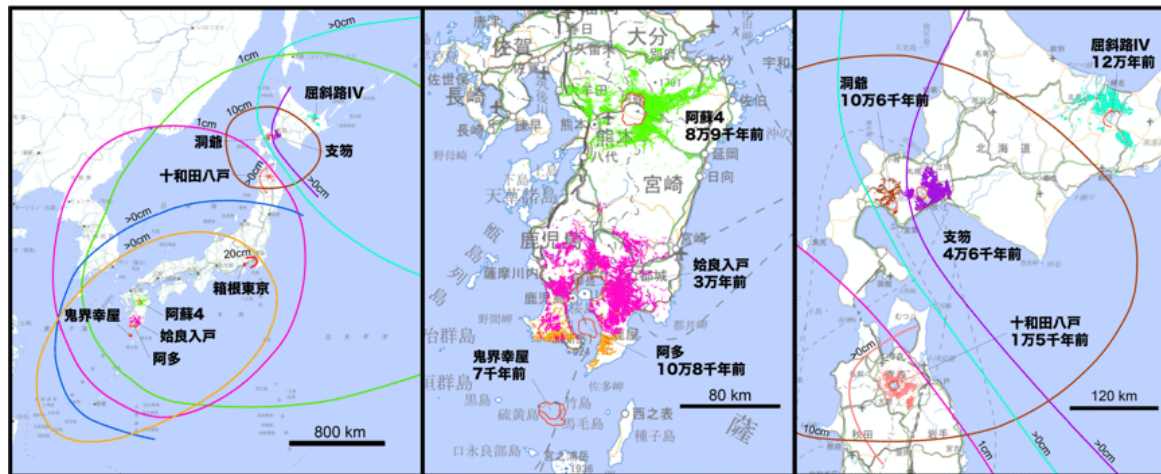
1. 粘性の高いマグマを蓄えた巨大なマグマ溜りから噴火が始まる
2. 大規模プリニー式噴火へ移行し ( $40\text{km}^3$ ), マグマ溜りの圧力が下がって天井部の沈下が始まる
3. 沈下に伴う亀裂が円筒状に発達し, 火砕物が亀裂から噴き出す (妻屋火砕流:  $10\text{km}^3$ )
4. 大規模なピストン状の沈下が起こり, 大量の火砕物が放出される (入戸火砕流:  $350\text{km}^3$ )

★花粉化石はこの一連の噴火が1~2ヶ月継続したことを示唆



# カルデラ噴火の影響範囲と堆積物

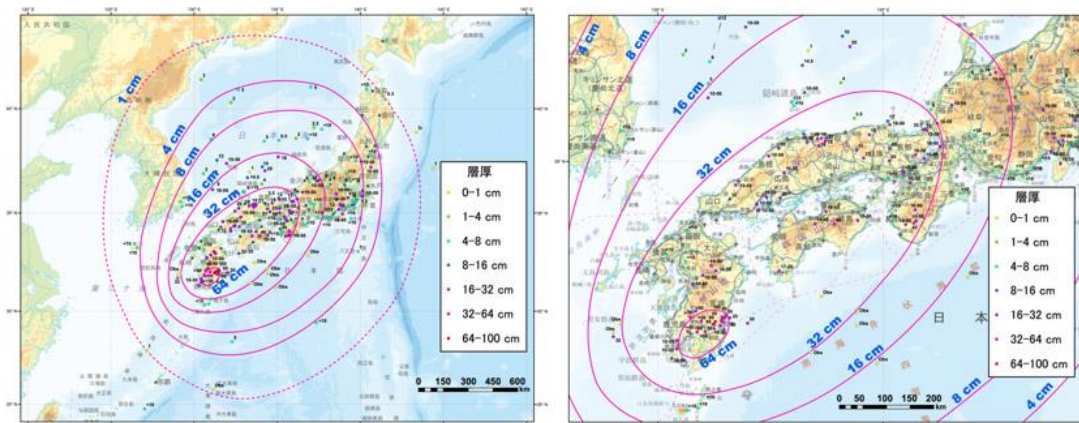
過去12万年間に噴出した主な大規模火砕流とその降下火山灰についての分布



降下火砕物分布は全国規模

札幌市南区(石山緑地)にある支笏カルデラ噴火の痕跡。距離20km程度で15m以上の火砕流堆積物。雲仙岳の火砕流事例とは規模が全く違う。

入戸火砕流に伴う火山灰の分布図



【28】出典：ようこそSAPPORO観光写真ライブラリー

左上【26】左下【27】出典：産総研地質調査総合センターウェブサイト

([https://www.aist.go.jp/aist\\_j/press\\_release/pr2022/pr20220125\\_2/pr20220125\\_2.html](https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2022/pr20220125_2/pr20220125_2.html))

【※】VEI6以上の巨大噴火を想定した対策は検討されていない



北海道大学

# 目次

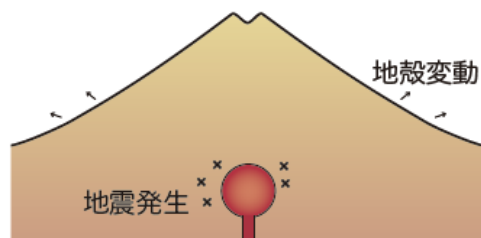
1. マグマの生成と上昇・多様性の獲得
2. 火山噴火の仕組み
3. 日本の活火山と災害事例
4. 巨大噴火(カルデラ生成規模の噴火)
5. 噴火予測や活動監視の現状と取り組み



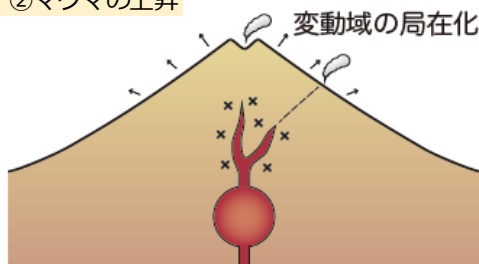
# 噴火予測へのアプローチ

## 観測データに基づく手法(地球物理学・地球化学的手法)

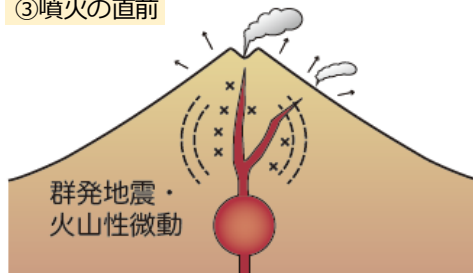
①マグマの蓄積



②マグマの上昇



③噴火の直前



噴火前にはマグマ蓄積による地盤変動があり、噴火に向けてマグマが動き出すと地震活動や熱活動の活発化、火山ガス組成の変化など多様な現象が起こる

### 長所

- 進行中の火山内部の現象を時々刻々とらえることができる
- 近代観測が始まってから噴火を繰り返している火山では、過去の噴火推移やその当時の観測データと比較しながら活動推移予測ができる(経験の利用)

### 短所

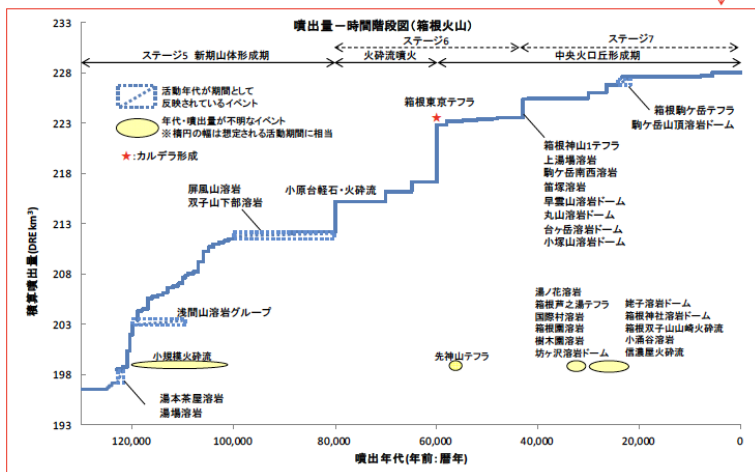
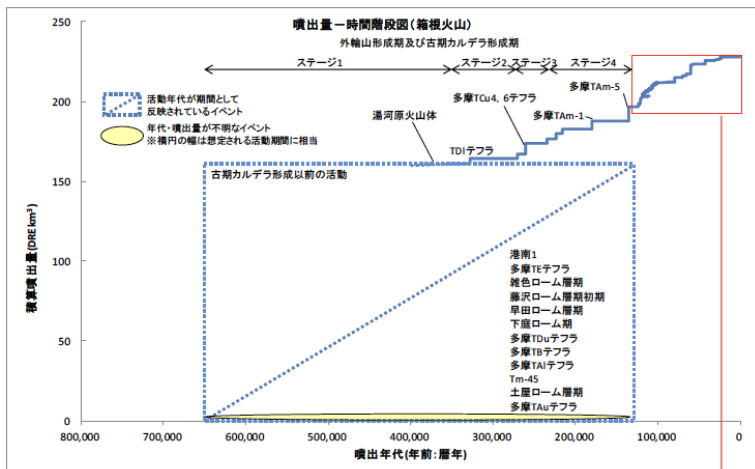
- 近代観測によるデータの蓄積はたかだか60年程度しかない
- 地下で何らかの変化が起こらないと信号をとらえられない

現状では「短期予測・評価」に適している



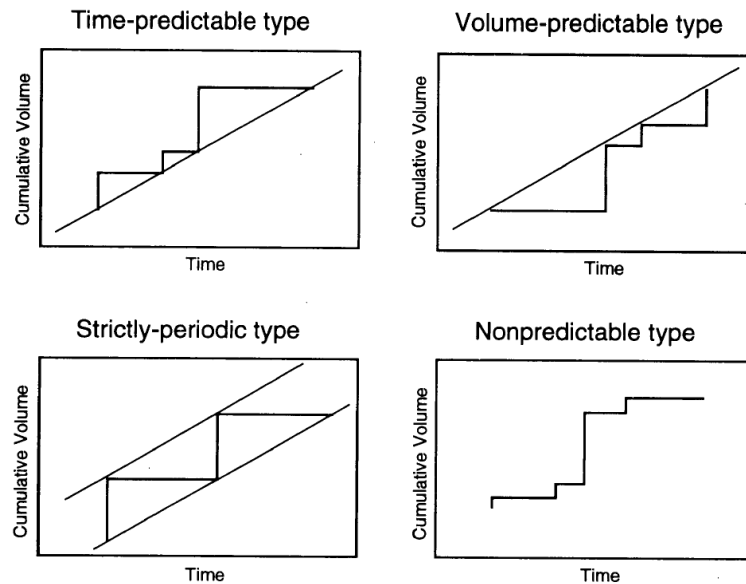
# 噴火予測へのアプローチ

## 噴火履歴に基づく手法(地質学的手法)



箱根火山の噴出量-時間階段図

地質調査に基づく長期噴出履歴の復元  
 長所: 痕跡があれば大昔まで遡れる  
 短所: 噴出量・時間の双方に推定誤差を抱える



【30】 出典: 小山真人, 吉田浩, 「噴出量の累積変化からみた火山の噴火史と地殻応力場 (< 特集> 火山活動と地殻応力場)」, 『火山』, 1994, 39巻, 4号, pp. 177-190

「長期予測・評価」に適している

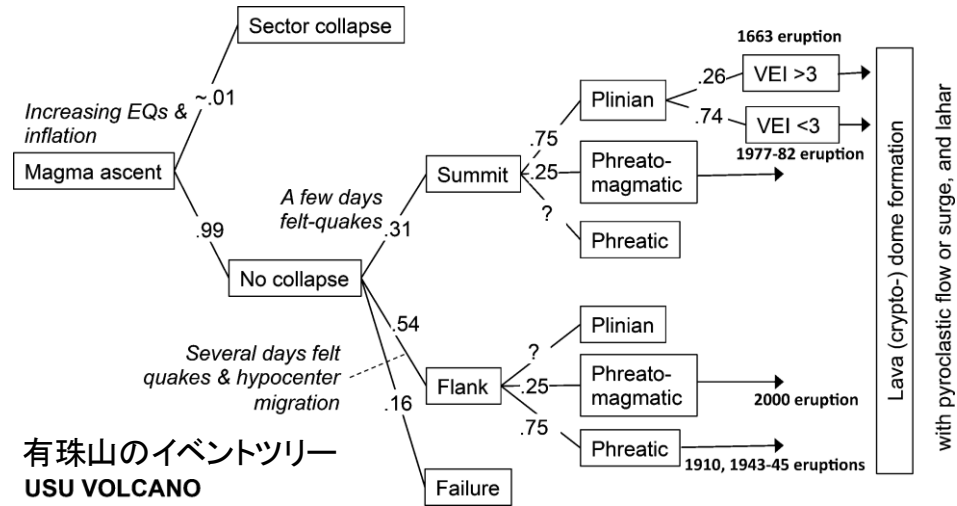
【29】 出典: 産総研地質調査総合センターウェブサイト  
 (<https://www.gsj.jp/data/openfile/no0613/39Hakone.pdf>)

# 噴火予測へのアプローチ

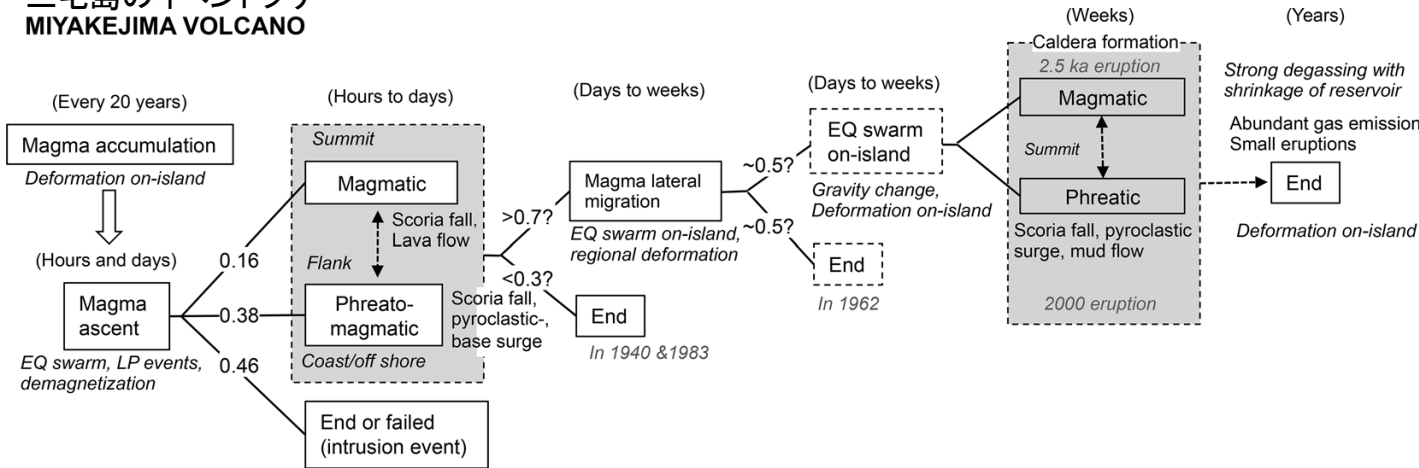
## 火山活動推移のイベント・確率ツリー

過去の噴火事例から、噴火活動進展の分岐を確率的に表現して予測に役立てる試み。一部の火山でしか整備が進んでいない。

VEI6に達するような巨大噴火へ進む過程は解明されていないため、取り込まれていない



## 三宅島のイベントツリー MIYAKEJIMA VOLCANO



右上【31】下【32】出典：中田節也，「噴火シナリオと確率論的予測（＜特集＞日本火山学会60周年「火山学の最新動向と今後の展望」）」，『火山』，2016，61巻，1号，pp. 199-209

# 火山学的な噴火予測の現状

★気象予報のような物理モデルに基づく予測には到達しておらず経験頼み

短期予測の時間スケール: 数分～数日

人間による構造物の寿命: 数十年～数百年

電力施設を含む社会インフラや人間の時間スケールはココ

長期予測の時間スケール: 数百年～数万年

• これまでの火山研究の成果として…

○ 最近30年間に噴火した大部分の火山で、噴火前(数ヶ月～直前)に何らかの異常をとらえることに成功している。

**十分な観測を行えば、ほとんどの噴火は短期的な前兆をとらえられる**

× 異常がとらえられても、本当に噴火するかどうか、時期、場所、様式、規模、推移を予測する科学的手法は確立されていない。予測技術は発展途上。

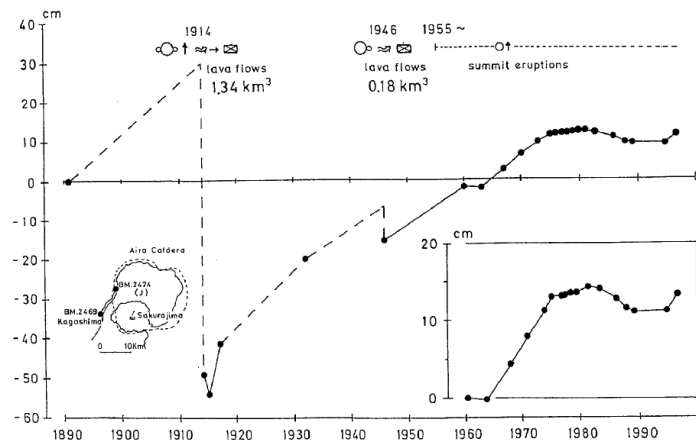
**経験則に基づき噴火予測が行える火山は限られる(経験が仇になることも)**



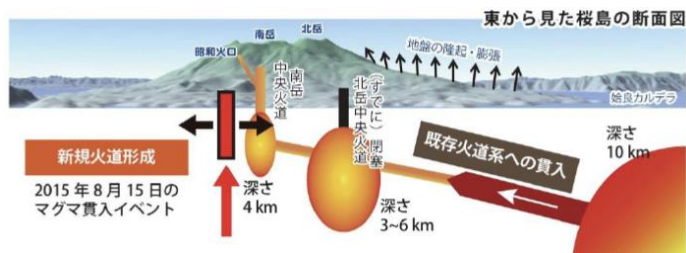
# 火山の状態を知るためのアプローチ例

## 地盤変動観測(測地学的)

長期的な測量・測位から、地下のマグマだまりや上昇経路に関する情報を得る



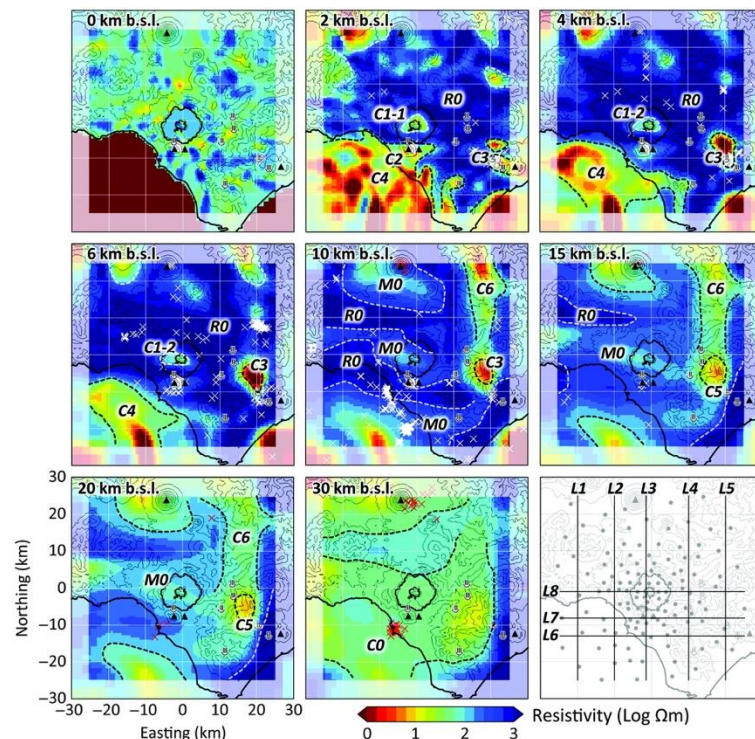
水準測量による始良カルデラ西岸の上下変動



地盤変動等から推測される桜島のマグマ供給系

## 地下構造探査(地震学的・電磁気学的)

地震波の速度異常や地下の電気伝導度分布から、マグマだまりの描像を得る



洞爺カルデラの電気伝導度探査の例

左上【33】出典：江頭庸夫，高山鐵朗，山本圭吾，Muhamad HENDRASTO，味喜大介，園田忠臣，「始良カルデラの地盤の再隆起-1991年12月～1996年10月-」，『京都大学防災研究所年報』，第40号，1997年，pp. 49-60

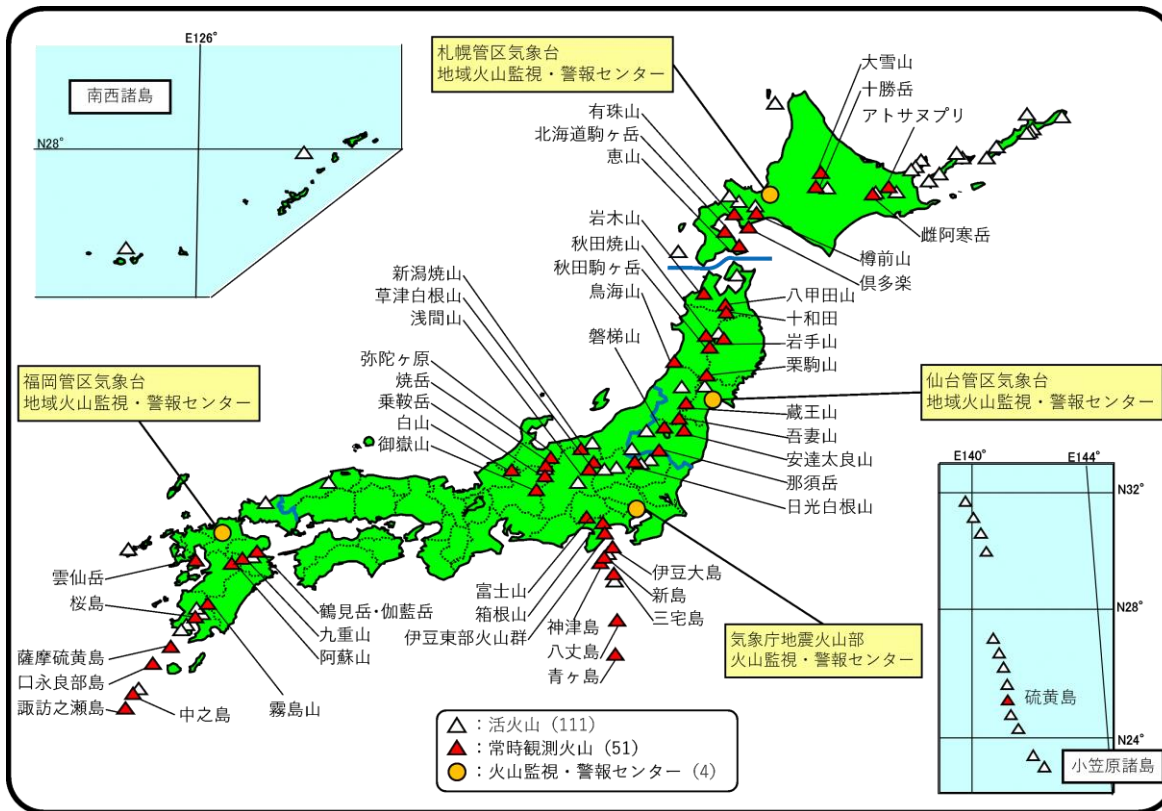
左下【34】出典：「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」平成27年度 年次報告（文部科学省 科学技術・学術審議会測地学分科会地震火山部会）（[https://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11402417/www.mext.go.jp/b\\_menu/shingi/gijyutu/gijyutu6/toushin/attach/1388086.htm](https://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11402417/www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu6/toushin/attach/1388086.htm)）

右【35】出典：Shogo Komori, Shinichi Takakura, Yuji Mitsuhashi, Toshiyuki Yokota, Toshihiro Uchida, Masahiko Makino, Yosuke Kato, and Kazuya Yamamoto, (2024), "Three-dimensional resistivity structure in Toya caldera region, Southwest Hokkaido, Japan — Constraints on magmatic and geothermal activities," GEOPHYSICS 89: B31-B50., CC BY 4.0



# 火山活動の監視と情報発表

- 気象庁の監視観測網，大学等の研究観測網で観測データが収集される
- 観測対象となっているのは，**全国111活火山のうちの51火山**



火山活動の状況に応じて、各地域のセンターから予報・警報を発表

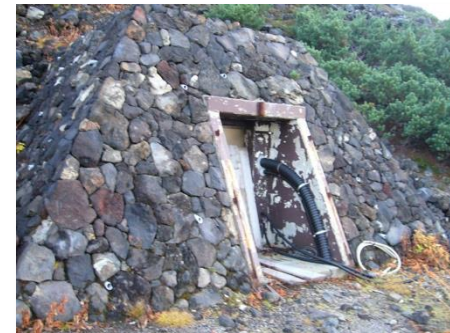
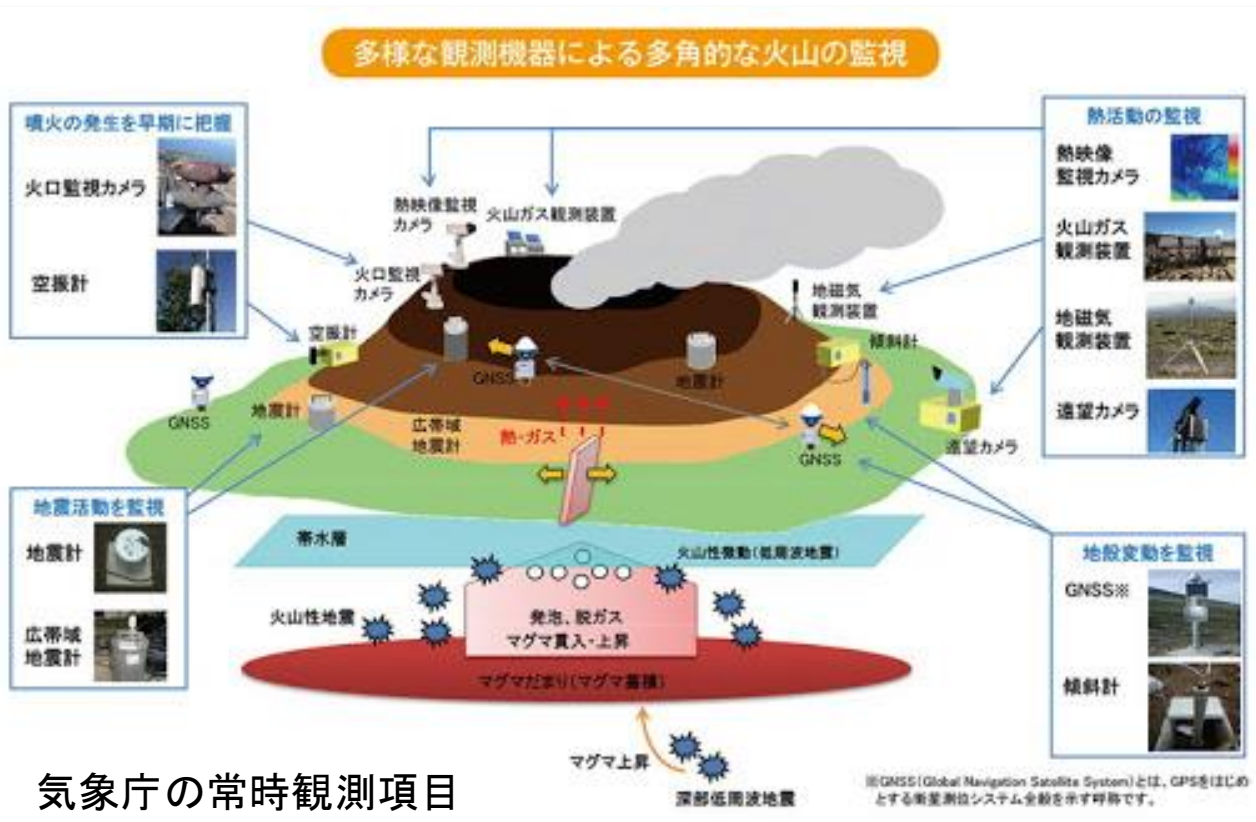
観測されていない活火山も多数存在。

これらの火山では活動評価の基礎となるデータがない

[36] 出典：気象庁ホームページ (<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/intro/gyomu/index92.html>)



# 火山の常時観測



十勝坑道観測点(十勝岳)



南西外輪観測点(有珠山)

[37] 出典：気象庁ホームページ (<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/hakusho/2016/index2.html>)

気象庁の観測項目に加え、大学等の研究機関ではさらに多様な研究目的の観測を実施

- ひずみ計
  - 微気圧計
  - 全磁力計
  - 地電位計
  - レーダー
  - ガス観測
  - 温泉観測
  - 水準観測
  - SAR観測
- 等々・・・

# 火山活動に関する予報・警報

## 気象業務法(第十三条)に基づく警報・予報業務

噴火警戒レベルが導入されている火山では、警報・予報に5段階の噴火警戒レベルが付される

噴火警戒レベル表

種別	名称	対象範囲	噴火警戒レベルとキーワード		説明			
					火山活動の状況	住民等の行動	登山者・入山者への対応	
特別警報	噴火警報 (居住地域) 又は 噴火警報	居住地域 及び それより 火口側	レベル 5	避難		居住地域に重大な被害を及ぼす噴火が発生、あるいは切迫している状態にある。	危険な居住地域からの避難等が必要(状況に応じて対象地域や方法を判断)。	
			レベル 4	高齢者等 避難		居住地域に重大な被害を及ぼす噴火が発生すると予想される(可能性が高まってきている)。	警戒が必要な居住地域での高齢者等の要配慮者の避難、住民の避難の準備が必要(状況に応じて対象地域を判断)。	
警報	噴火警報 (火口周辺) 又は 火口周辺警報	火口から 居住地域 近くまで  火口周辺	レベル 3	入山規制		居住地域の近くまで重大な影響を及ぼす(この範囲に入った場合には生命に危険が及ぶ)噴火が発生、あるいは発生すると予想される。	通常の生活(今後の火山活動の推移に注意。入山規制)。状況に応じて高齢者等の要配慮者の避難の準備等。	登山禁止・入山規制等、危険な地域への立入規制等(状況に応じて規制範囲を判断)。
			レベル 2	火口周辺 規制		火口周辺に影響を及ぼす(この範囲に入った場合には生命に危険が及ぶ)噴火が発生、あるいは発生すると予想される。	通常の生活。(状況に応じて火山活動に関する情報収集、避難手順の確認、防災訓練への参加等)。	火口周辺への立入規制等(状況に応じて火口周辺の規制範囲を判断)。
予報	噴火予報	火口内等	レベル 1	活火山で あることに 留意		火山活動は静穏。火山活動の状態によって、火口内で火山灰の噴出等が見られる(この範囲に入った場合には生命に危険が及ぶ)。	特になし(状況に応じて火口内への立入規制等)。	

居住地域への  
注意喚起

レベル4以上は  
居住地域への影響

火口近傍への  
注意喚起

レベル2以上は警報

[38] 出典：気象庁ホームページ ([https://www.jma.go.jp/jma/kishou/now/kazan/level\\_toha/level\\_toha.html](https://www.jma.go.jp/jma/kishou/now/kazan/level_toha/level_toha.html))

# さいごに

## 原子力発電所の火山影響評価ガイド

平成25年6月  
原子力規制委員会

【40】出典：「原子力発電所の火山影響評価ガイド」（平成25年6月）（原子力規制委員会）  
([https://www.nra.go.jp/disclosure/committee/kettei/02/kisei\\_nai.html](https://www.nra.go.jp/disclosure/committee/kettei/02/kisei_nai.html))

## 原子力発電所への火山影響の評価フロー

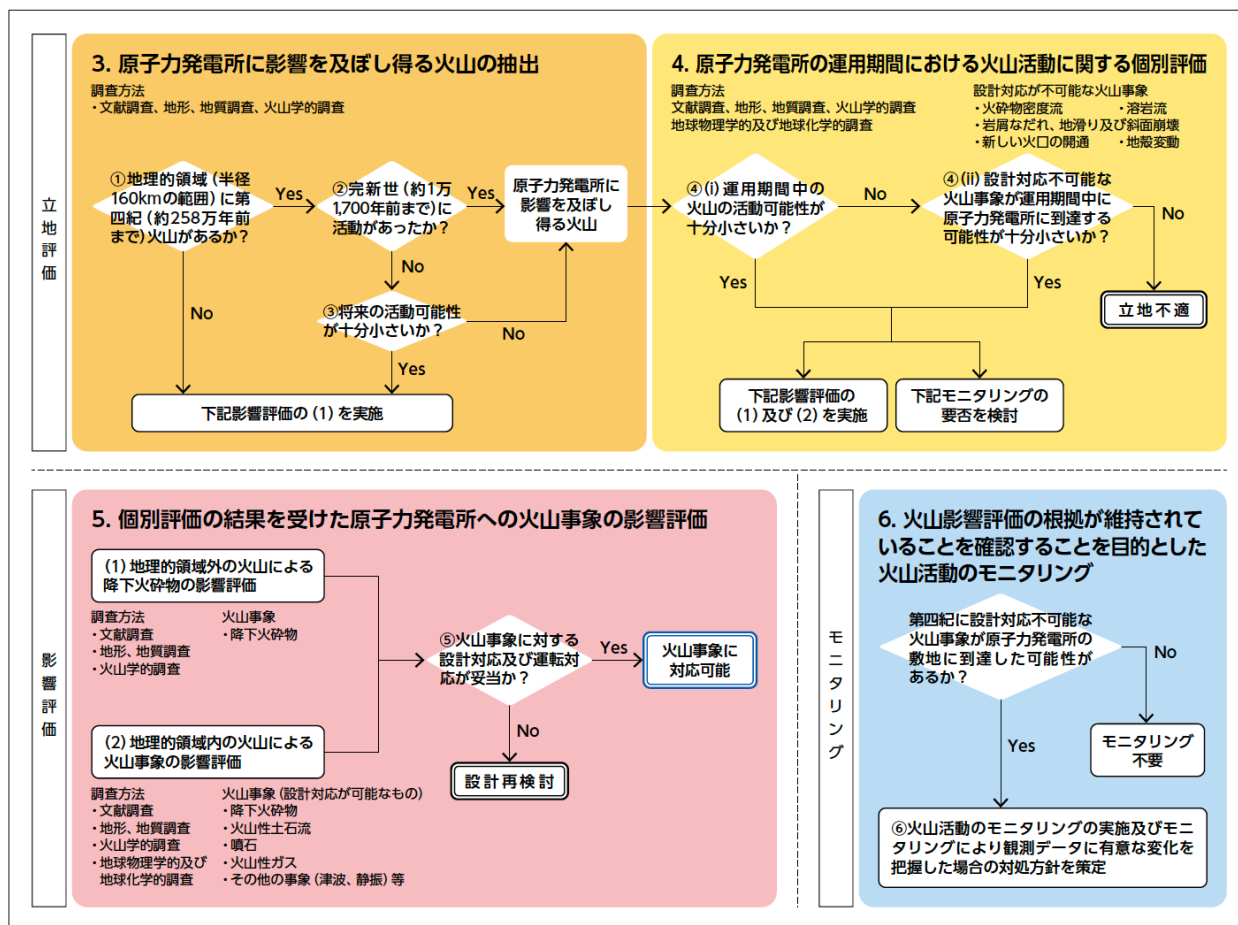


図1 原子力発電所の火山影響評価ガイド（2019年改正版）に付された火山リスク評価の流れ

【39】出典：小山真人，「火山学の知見が活かされない原発の規制基準」，『学術の動向』，2020，25巻，12号，pp. 54-57



## さいごに

## 「原子力発電所の火山影響評価ガイド」に対する意見の例

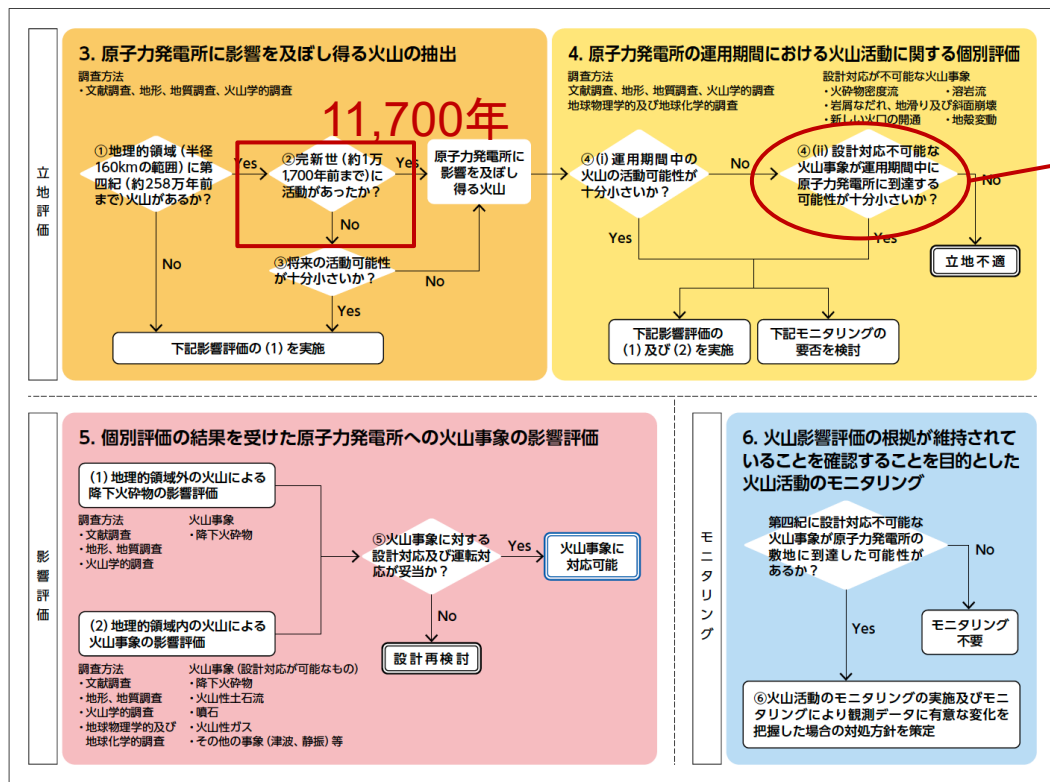


図1 原子力発電所の火山影響評価ガイド (2019年改正版) に付された火山リスク評価の流れ

設計対応不可能な火山事象が原発に到達する可能性が十分小さいか?

- 断層評価  
後期更新世以降 (約12~13万年前) 以降の活動が否定できない断層等の上への原発の立地を不適とする



火山の大規模火砕流の評価基準が、地震断層の評価基準と異なるのではないか? (小山, 2020)

巨大噴火に至る推移を観測した事例はなく、観測に基づく中長期予測手法は未確立  
 ➡ 巨大噴火の発生可能性、モニタリングによる予測・評価の可能性をどう考えるか

# まとめ

- 電力施設に影響を与える火山噴火は、時空間スケールが極めて多様な現象であり、結果として生じる災害もまた多様です。
- 噴火タイプの多様性は、主にマグマの性質の多様性や揮発性物質の振る舞いの違い、マグマ噴出率の違いによってもたらされます。
- VEI5クラスの大規模噴火を想定した対策の検討が行われるようになったばかりで、VEI6以上の巨大噴火を想定した検討はなされていません。
- 巨大噴火の可能性を探るために、長期間にわたる地盤変動観測や地下構造探査が行われ、マグマ蓄積に関する情報を集めています。



# 出典一覧

No.	ライセンス	出典情報
【1】	✙	『もういちど読む数研の高校地学』, 数研出版株式会社, p. 81 図52
【2】	✙	『もういちど読む数研の高校地学』, 数研出版株式会社, p. 86 図A
【3】	✙	From Cashman et al., Vertically extensive and unstable magmatic systems: A unified view of igneous processes, SCIENCE, 2017, Vol.355, No.6331. Reprinted with permission from AAAS.
【4】	✙	兼岡一郎, 井田喜明, 『火山とマグマ』, 東京大学出版会, 1997.
【5】	✙	気象庁ホームページ ( <a href="https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/kazan/kazanyougo/katsudo.html">https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/kazan/kazanyougo/katsudo.html</a> )
【6】	✙	海上保安庁ホームページ ( <a href="https://www1.kaiho.mlit.go.jp/kaiikiDB/kaiyo24-2.htm">https://www1.kaiho.mlit.go.jp/kaiikiDB/kaiyo24-2.htm</a> )
【7】	✙	小屋口 剛博, 『火山現象のモデリング』, 東京大学出版会, 2008.
【8】	✙	小屋口 剛博, 『火山現象のモデリング』, 東京大学出版会, 2008.
【9】	✙	小屋口 剛博, 『火山現象のモデリング』, 東京大学出版会, 2008.
【10】	✙	小屋口 剛博, 『火山現象のモデリング』, 東京大学出版会, 2008.

# 出典一覧

No.	ライセンス	出典情報
【11】	+	Hydrothermal systems and volcano geochemistry, Robert O. Fournier, VOLCANO DEFORMATION, Springer Nature, 2007, reproduced with permission from SNCSC
【12】	+	「日本の活火山分布図 Map of Active Volcanoes in Japan」 (気象庁ホームページより)
【13】	+	産総研地質調査総合センターウェブサイト ( <a href="https://gbank.gsj.jp/volcano/Act_Vol/miyakejima/v02/top/html_data/geology/shinmio/sm_1940.html">https://gbank.gsj.jp/volcano/Act_Vol/miyakejima/v02/top/html_data/geology/shinmio/sm_1940.html</a> ) 津屋弘達 (1941a) 昭和15年7月三宅島噴火調査概報. 地震第1輯, vol.12, p.435-484. 津屋弘達 (1941b) 昭和15年7月三宅島噴火再調査報告 (i), (ii). 地震第1輯, vol.13, p.1-21, p.37-48.
【14】	+	産総研地質調査総合センターウェブサイト ( <a href="https://gbank.gsj.jp/volcano/Act_Vol/miyakejima/v02/top/html_data/geology/shinmio/sm_1940.html">https://gbank.gsj.jp/volcano/Act_Vol/miyakejima/v02/top/html_data/geology/shinmio/sm_1940.html</a> )
【15】	+	九州大学インターネット博物館「雲仙普賢岳の噴火とその背景」
【16】	+	九州大学インターネット博物館「雲仙普賢岳の噴火とその背景」 (京都大学 小野博尉 撮影)
【17】	+	九州大学インターネット博物館「雲仙普賢岳の噴火とその背景」
【18】	+	磐梯山ジオパークホームページ
【19】	+	内閣府ホームページ「防災情報のページ」 ( <a href="https://www.bousai.go.jp/kyoiku/kyokun/kyoukunnokeishou/rep/1888_bandaisan_funka/index.html">https://www.bousai.go.jp/kyoiku/kyokun/kyoukunnokeishou/rep/1888_bandaisan_funka/index.html</a> )
【20】	+	門村浩撮影, 北海道地区自然災害科学資料センター報告, Vol.6 (1991年3月), v.1977年有珠山噴火被害, スライド番号5-34. ( <a href="https://www.hokkaido-nds.org/research_bulletin.html">https://www.hokkaido-nds.org/research_bulletin.html</a> )

# 出典一覧

No.	ライセンス	出典情報
【21】	✙	北海道大学理学部有珠火山観測所 火山噴火予知連絡会会報 第39号 P203-230 北海道の火山活動とその観測報告(1985年10月～1987年4月) 第6図
【22】	✙	そうべつ観光協会HP ( <a href="https://sobetsu-kanko.com/spot/1977koen">https://sobetsu-kanko.com/spot/1977koen</a> )
【23】	✙	「防災情報のページ」 (内閣府ホームページ) ( <a href="https://www.bousai.go.jp/kazan/kouikikouhaiworking/index.html">https://www.bousai.go.jp/kazan/kouikikouhaiworking/index.html</a> )
【24】	✙	「防災情報のページ」 (内閣府ホームページ) ( <a href="https://www.bousai.go.jp/kazan/kouikikouhaiworking/index.html">https://www.bousai.go.jp/kazan/kouikikouhaiworking/index.html</a> ) を加工して作成
【25】		Geshi, N., Yamasaki, T., Miyagi, I. et al. Magma chamber decompression during explosive caldera-forming eruption of Aira caldera. <i>Commun Earth Environ</i> 2, 200 (2021)., CC BY 4.0
【26】	✙	産総研地質調査総合センターウェブサイト ( <a href="https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2022/pr20220125_2/pr20220125_2.html">https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2022/pr20220125_2/pr20220125_2.html</a> )
【27】	✙	産総研地質調査総合センターウェブサイト ( <a href="https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2022/pr20220125_2/pr20220125_2.html">https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2022/pr20220125_2/pr20220125_2.html</a> )
【28】	✙	ようこそSAPPORO観光写真ライブラリー
【29】	✙	産総研地質調査総合センターウェブサイト ( <a href="https://www.gsj.jp/data/openfile/no0613/39Hakone.pdf">https://www.gsj.jp/data/openfile/no0613/39Hakone.pdf</a> )
【30】	✙	小山真人, 吉田浩, 「噴出量の累積変化からみた火山の噴火史と地殻応力場 (<特集> 火山活動と地殻応力場)」, 『火山』, 1994, 39巻, 4号, pp. 177-190

# 出典一覧

No.	ライセンス	出典情報
【31】	+	中田節也, 「噴火シナリオと確率論的予測 (<特集> 日本火山学会 60 周年 「火山学の最新動向と今後の展望」)」, 『火山』, 2016, 61巻, 1号, pp. 199-209
【32】	+	中田節也, 「噴火シナリオと確率論的予測 (<特集> 日本火山学会 60 周年 「火山学の最新動向と今後の展望」)」, 『火山』, 2016, 61巻, 1号, pp. 199-209
【33】	+	江頭庸夫, 高山鐵朗, 山本圭吾, Muhamad HENDRASTO, 味喜大介, 園田忠臣, 「始良カルデラの地盤の再隆起-1991年12月～1996年10月-」, 『京都大学防災研究所年報』, 第40号, 1997年, pp. 49-60
【34】	+	「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」平成27年度 年次報告 (文部科学省 科学技術・学術審議会測地学分科会地震火山部会) ( <a href="https://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11402417/www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu6/toushin/attach/1388086.htm">https://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11402417/www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu6/toushin/attach/1388086.htm</a> )
【35】		Shogo Komori, Shinichi Takakura, Yuji Mitsuhata, Toshiyuki Yokota, Toshihiro Uchida, Masahiko Makino, Yosuke Kato, and Kazuya Yamamoto, (2024), "Three-dimensional resistivity structure in Toya caldera region, Southwest Hokkaido, Japan — Constraints on magmatic and geothermal activities," GEOPHYSICS 89: B31-B50., CC BY 4.0
【36】	+	気象庁ホームページ ( <a href="https://www.jma.go.jp/jma/kishou/intro/gyomu/index92.html">https://www.jma.go.jp/jma/kishou/intro/gyomu/index92.html</a> )
【37】	+	気象庁ホームページ ( <a href="https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/hakusho/2016/index2.html">https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/hakusho/2016/index2.html</a> )
【38】	+	気象庁ホームページ ( <a href="https://www.jma.go.jp/jma/kishou/know/kazan/level_toha/level_toha.html">https://www.jma.go.jp/jma/kishou/know/kazan/level_toha/level_toha.html</a> )
【39】	+	小山真人, 「火山学の知見が活かされない原発の規制基準」, 『学術の動向』, 2020, 25巻, 12号, pp. 54-57
【40】	+	「原子力発電所の火山影響評価ガイド」(平成25年6月)(原子力規制委員会) ( <a href="https://www.nra.go.jp/disclosure/committee/kettei/02/kisei_naiki.html">https://www.nra.go.jp/disclosure/committee/kettei/02/kisei_naiki.html</a> )