

フンガトンガ・フンガハアパイ火山の 2022年噴火概要

石峯 康浩^{1,2}

1: 山梨県富士山科学研究所（主幹研究員）

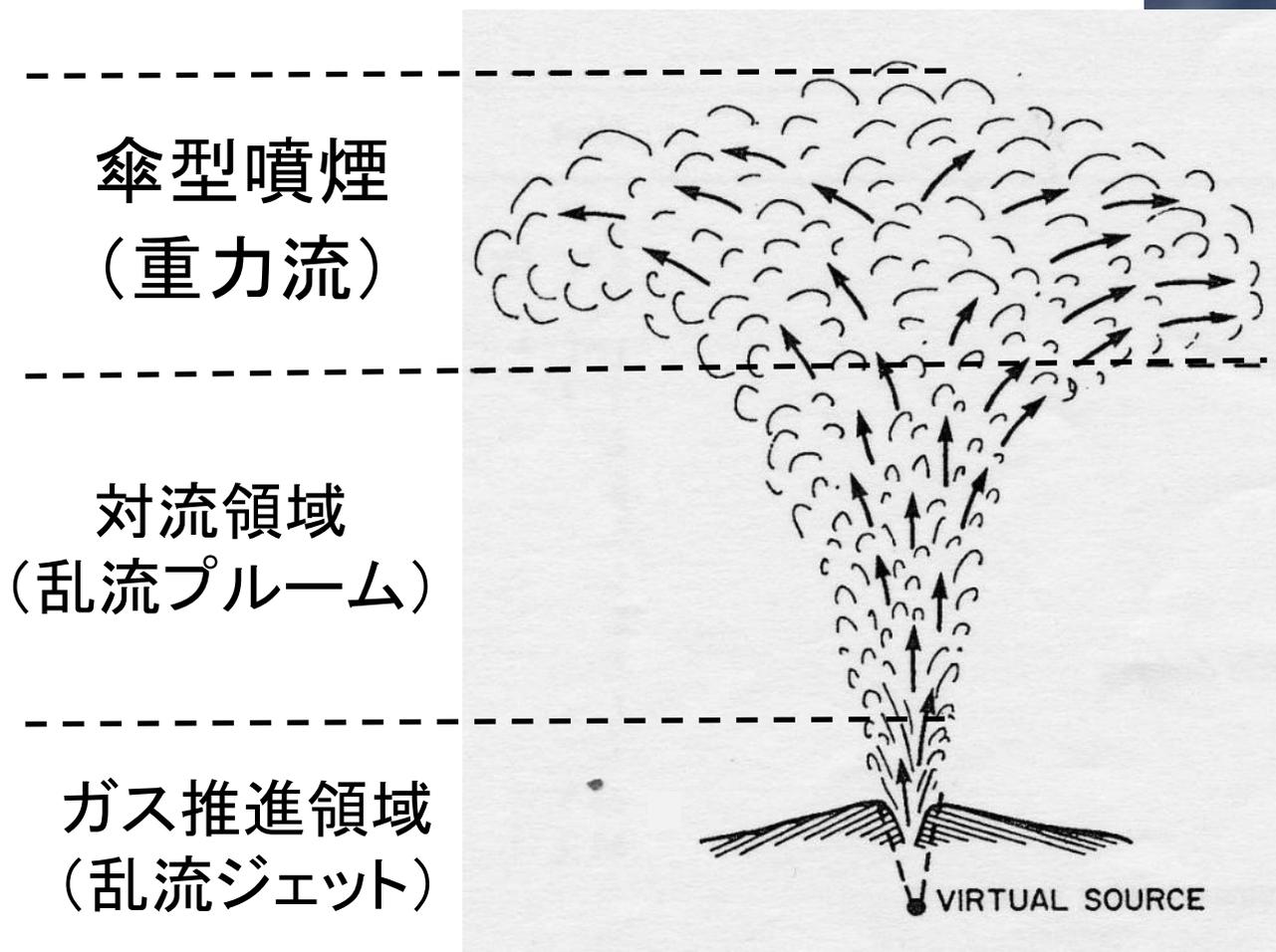
ishimine@mfri.pref.yamanashi.jp

2: 理化学研究所（客員研究員）



大規模な火山噴火（プリニー式噴火）で発生する噴煙とは？

© CENTRO INFORMACIÓN MONITOREO ALERTA TEMPRANA CHILE



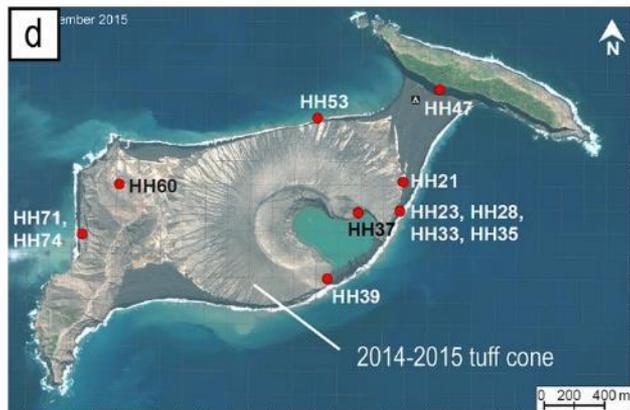
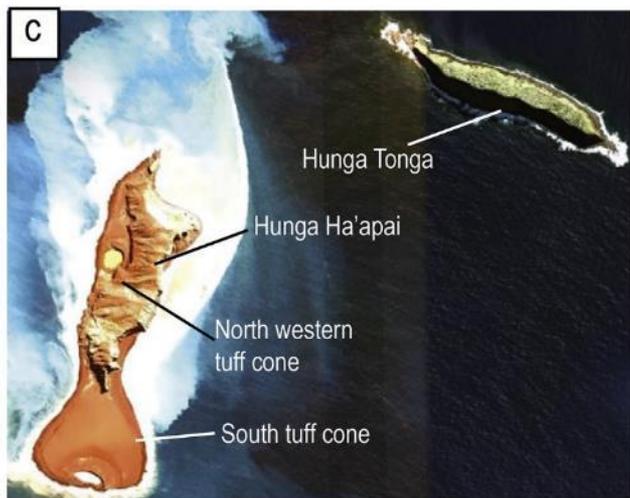
典型例の実映像（チリ・カルブコ火山2015年噴火）



© CENTRO INFORMACIÓN MONITOREO ALERTA TEMPRANA CHILE

一般に一回の噴火で1億 m^3 以上の噴出物を放出すると大規模噴火と呼ぶ。
上の噴火は噴出量4億 m^3 、噴煙高度17km、継続時間6時間。

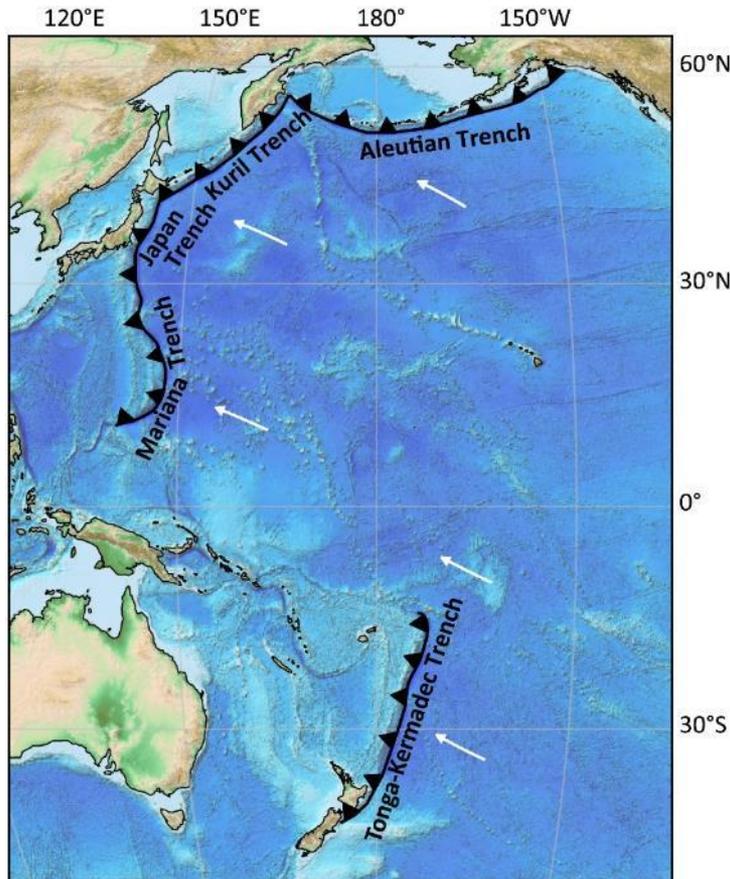
フングトンガ・フンガハアパイ火山とは？



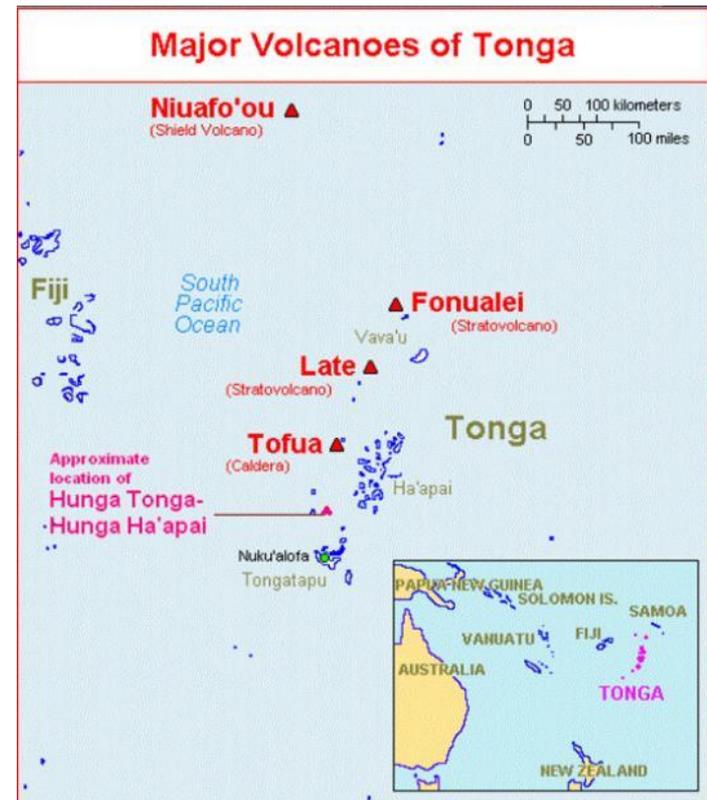
写真は Colombier et al. (JGR Solid Earth 2018)より引用

フングトンガ・フンガハアパイ火山はトンガ王国にある火山島。もともとはフングトンガ島とフンガハアパイ島に分かれていた(左上c図)が、2014年から2015年にかけて発生した噴火でつながり、一つの島になった(左下d図)。e図は2014-2015年当時の典型的な噴火

フンガトンガ・フンガハアパイ火山の位置



©Legemaat et al. (Tectonics, 2018; 37:2647–2674)

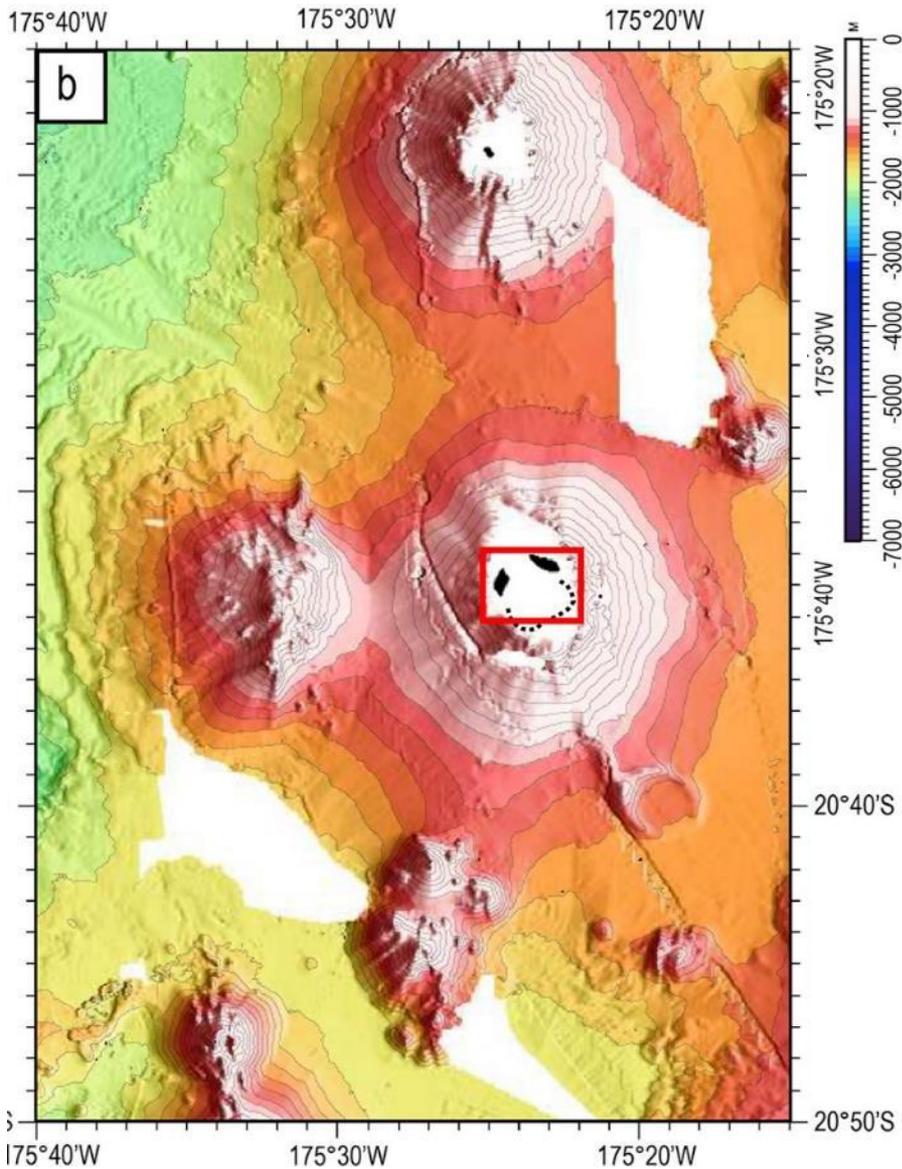


©Smithsonian Institution

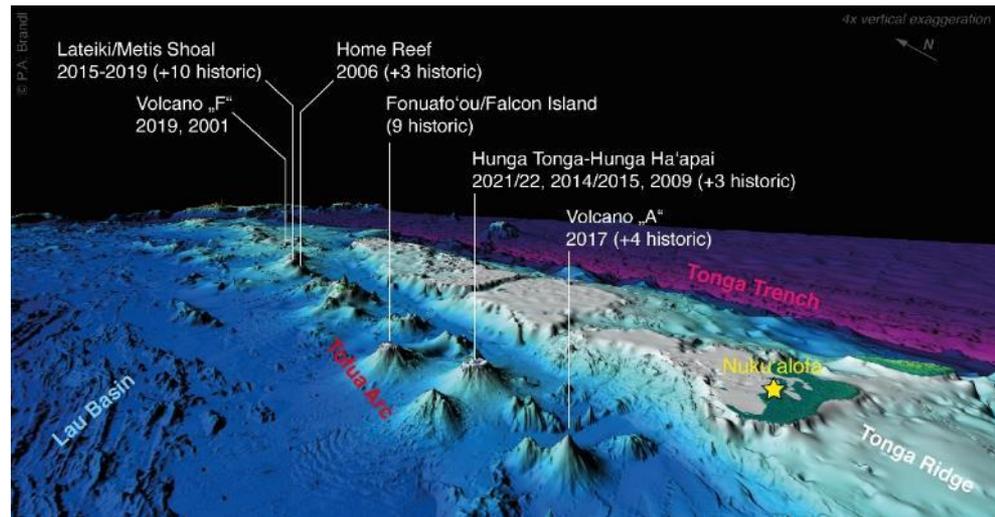
(<https://volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=243040>)

トンガ王国はオーストラリア大陸西方約3000キロにある島国。ニュージーランド西岸に連なるトンガ・ケルマディック・トレンチが沈み込むことでできた島弧の一部。多くの活火山がある。スミソニアン博物館によると活火山は20(世界17位)。ただし、無名の海底火山も多数。

周辺地形



フンガトンガ・フンガハアパイ火山周辺には活動が活発な火山が多数、集中している。



上図出典: Philipp A. Brandi @twitter

左図出典: Colombier et al. (JGR Solid Earth 2018; <https://doi.org/10.1029/2017JB015357>)

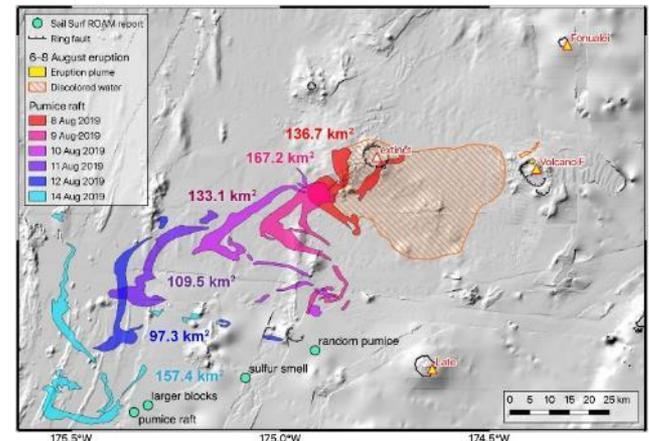
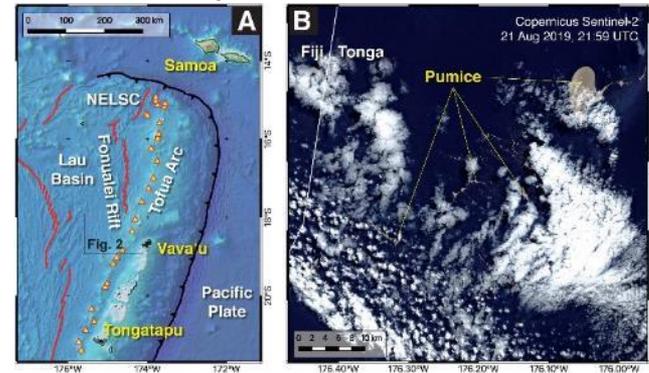
フンガトンガ・フンガハアパイ火山以外の トンガにおける最近の噴火

ホームリーフ火山の2006年噴火



©Smithsonian Institution (上2枚とも)
<https://volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=243080>

無名の火山(“Volcano F”, #243091 or #0403-091)の2001年 & 2019年噴火

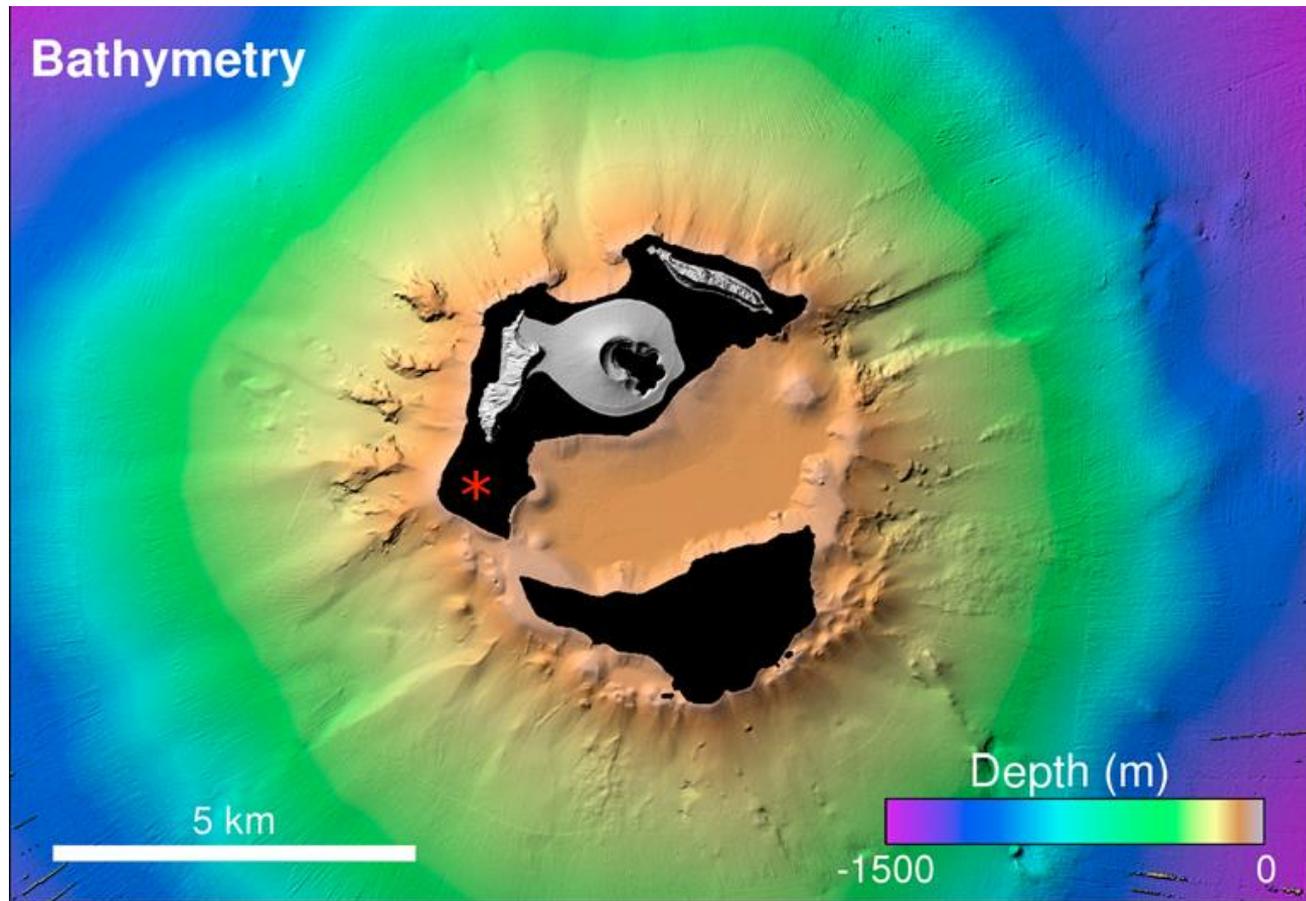


©Brandl et al. (JVGR, 2020; 上2枚とも)
<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2019.106695>

トンガでは、近年でも多くの火山が噴火している。海底火山や島になりたての火山が多く、2021年の福島岡ノ場火山噴火のような大量の“漂着軽石”を発生させる事例が発生している。 7

フンガトンガ・フンガハアパイ火山を 包括する火山体の全体像

© Garvin et al. (GRL, 2018: <https://doi.org/10.1002/2017GL076621>)



海底の基底面より直径約15kmの底面のコーン地形の頂上部分に直径約6kmのカルデラができています。その外輪山に相当する部分の一部が噴火前には海上に出ていた。

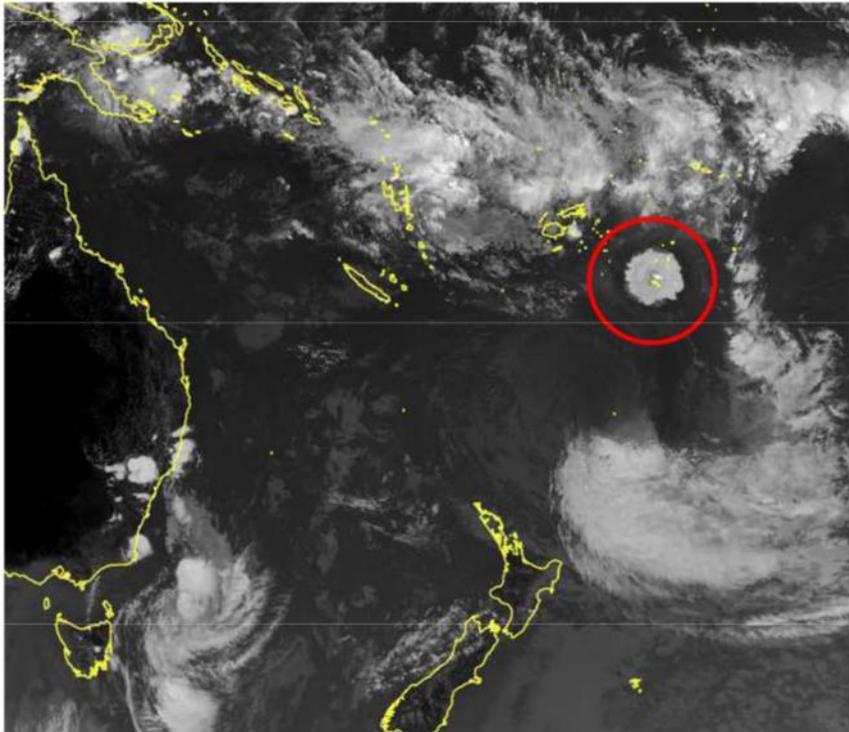
確認されている過去の噴火

発生時期	VEI
1912年4月29日 ~	2
1937年 ~	2
1988年6月1日 ~ 6月3日	0
2009年5月17日 (?) ~ 5月22日±1日	2
2014年12月19日 ~ 2014年1月23日±3日	2
2021年12月20日 ~ 2022年1月14日	?
2022年1月15日	5? 6?

(Smithsonian Institution HPの情報の一部加筆)

フンガトンガ・フンガハアパイ火山の 2022年1月15日噴火

■フンガ トンガ-フンガ ハアパイ火山の噴火の衛星画像
(2022年1月15日14時00分時点:赤外画像)



2022年1月16日気象庁報道資料



15日噴火の前日(1/14)に撮影された噴煙
©Tonga Geological Services

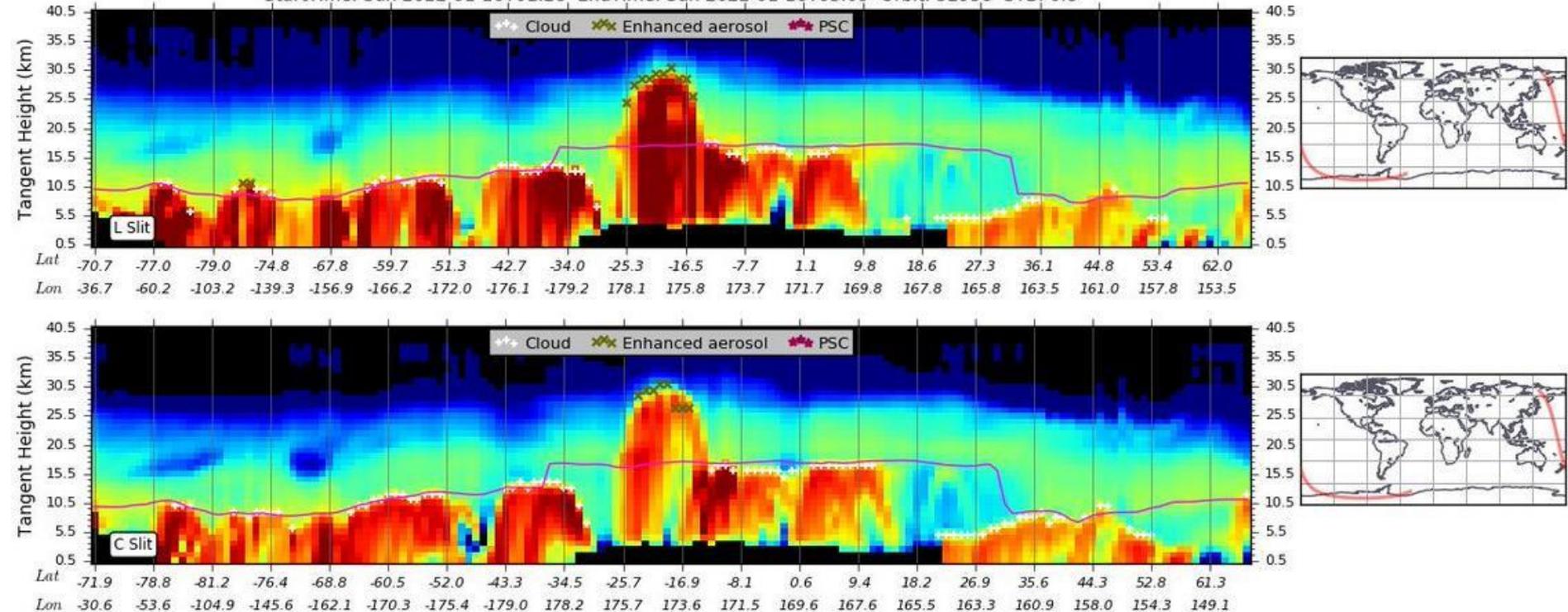
日本時間の1月15日午後1時すぎに噴火が発生。直径300km近い噴煙が人工衛星(気象衛星ひまわり8号)で観測された。

噴煙高度の見積もり

人工衛星による雲頂観測では、噴煙の最高点は約30km

Aerosol Extinction Values Retrieved at 997 nm(km^{-1})

StartTime: Sun 2022-01-16T01:28 EndTime: Sun 2022-01-16T03:09 Orbit: 52958 STB: 0.8



NASAの観測衛星Suomi NPPに搭載されたオゾン層観測装置 (OMPS) で捉えられたエアロゾル分布
<https://mobile.twitter.com/andrewcraigupp/status/1483279359100481546>より引用

フンガトンガ・フンガハアパイ火山の 2022年1月15日噴火

©国連訓練調査研究所 <https://www.unitar.org/maps/map/3433>



衛星観測により、噴火で陸域がすべて消滅したことが確認されている。

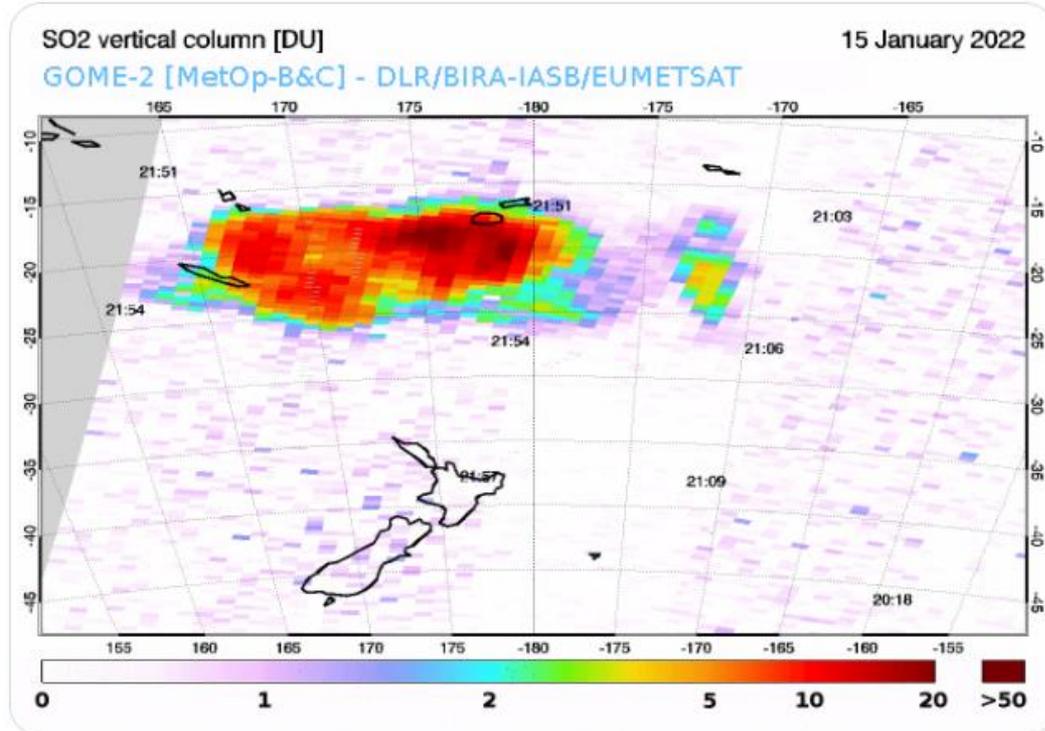
火山ガス放出量の見積もり



Prof. Simon Carn @simoncarn · 1月16日

First look at SO₂ in the Jan 15 #eruption cloud measured by @eumetsat MetOp/GOME-2. So far, the SO₂ columns do not appear to be extreme; generally <20 Dobson Units (DU). For a Pinatubo-scale event we'd expect SO₂ columns >100 DU. More data soon.

Source: sacs.aeronomie.be/nrt



16

293

478



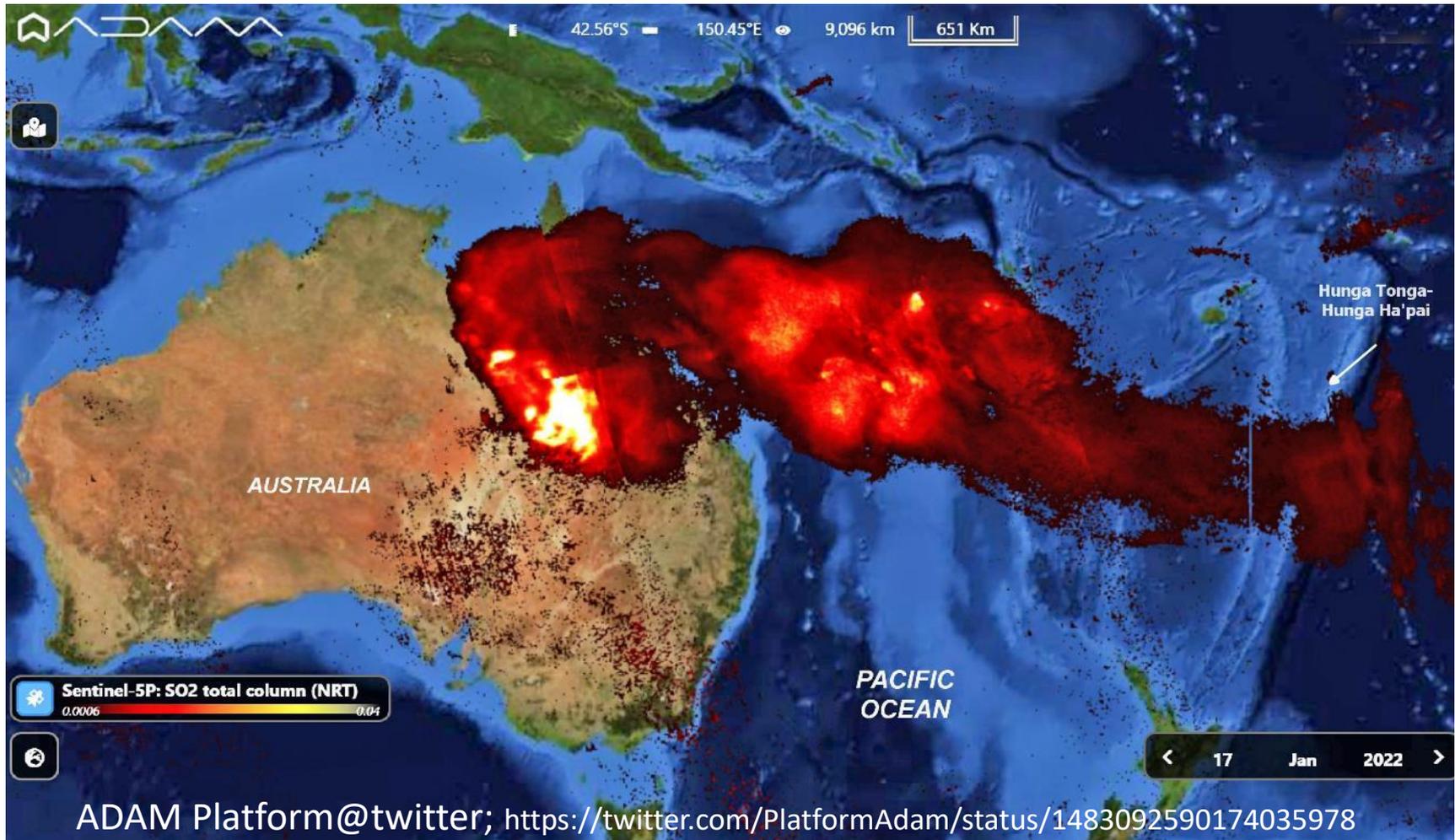
<https://twitter.com/simoncarn/status/1482541762564481026>

火山ガスの衛星観測の専門家として世界的に有名なカーン博士の見積もり(暫定値)によると二酸化硫黄の放出量はピナツボ火山1991年噴火の1/40以下。

(参考)

火山ガスの主成分は、水蒸気と二酸化炭素だが、大気中で硫酸ミストに変化する二酸化硫黄が気候への影響が大きいいため、重要視される。

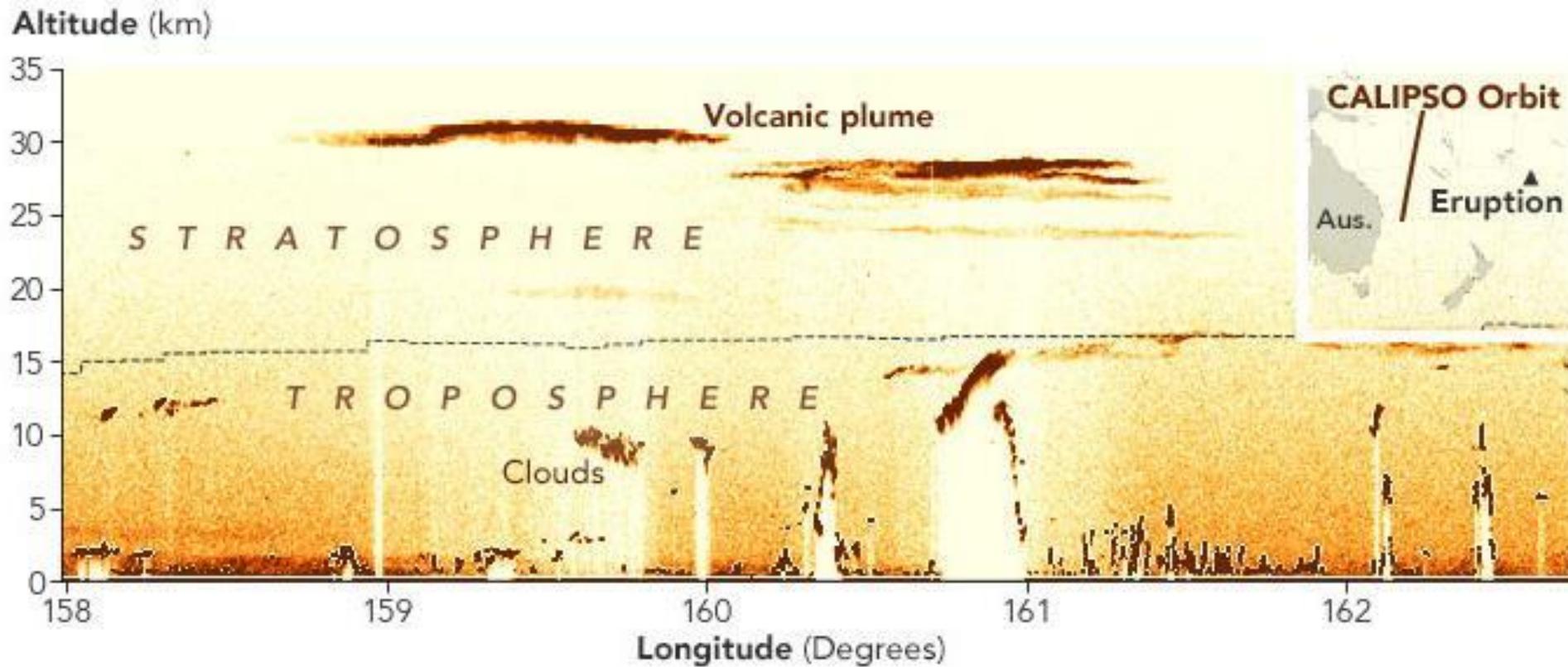
火山ガスの衛星観測



二酸化硫黄ガスは、紫外線を強く吸収する特性があるため、人工衛星で定量観測が容易であるという利点もある。

火山ガスの衛星観測

CALIPSOで捉えられた上空約30kmの噴煙。
同観測によると、今回の噴煙の最高到達高度は39.7km



出典: NASA Earth Observatory

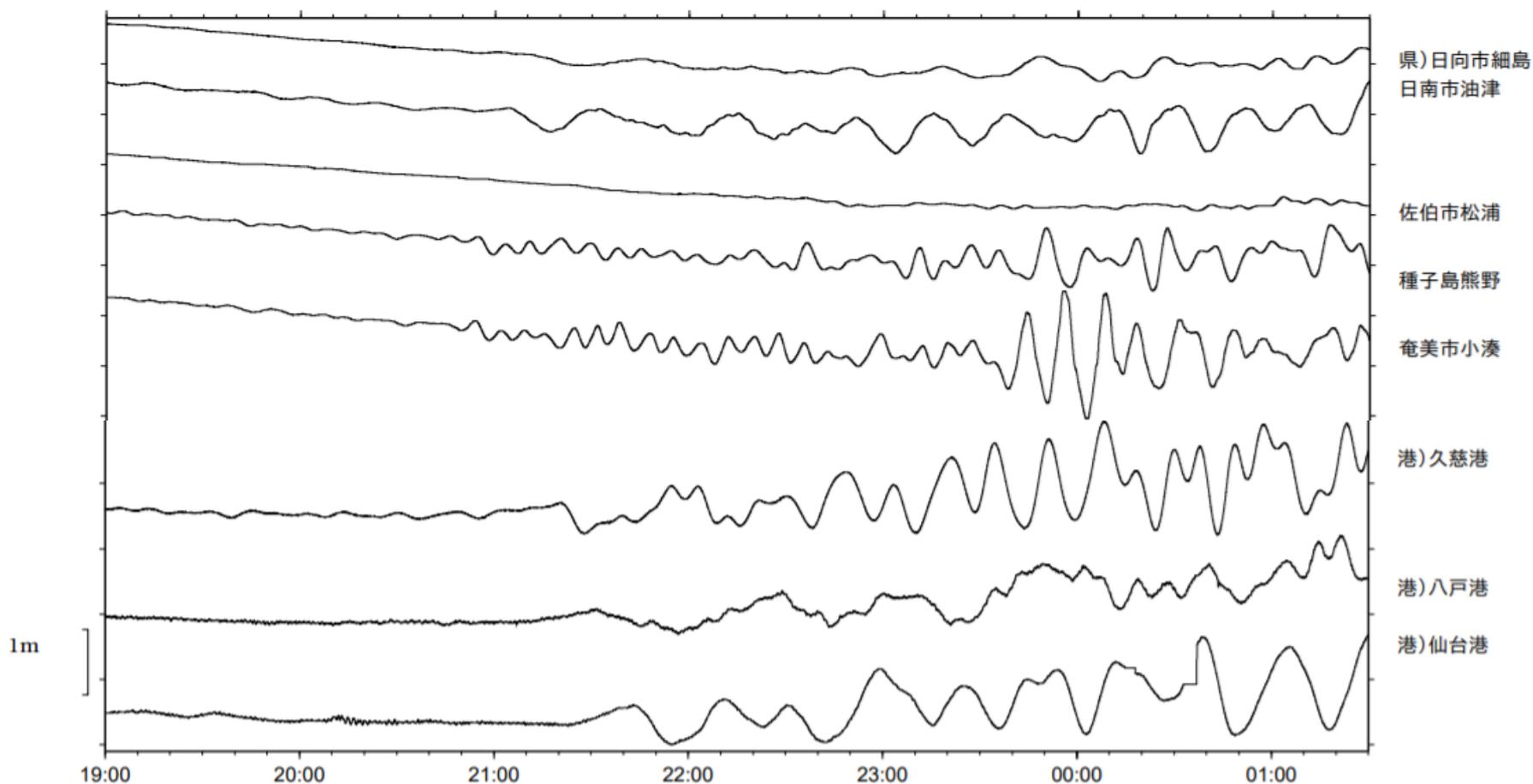
(<https://earthobservatory.nasa.gov/images/149347/hunga-tonga-hunga-haapai-erupts>)

トンガ王国の首都・ヌクアロファの様子 (フンガトンガ・フンガハアパイ火山の南約70km)



今回の噴火の特異な点：広域での津波の発生

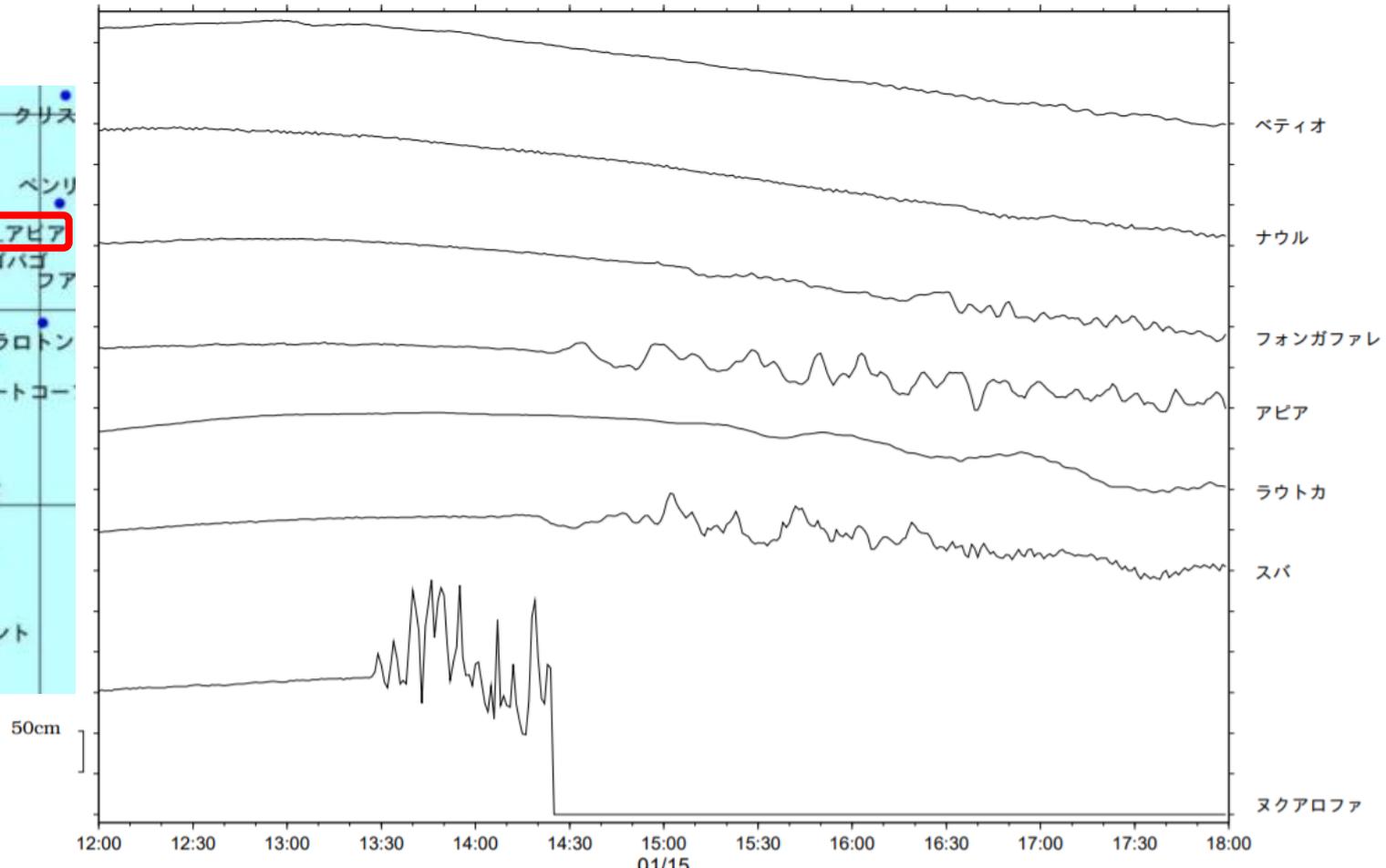
“通常でない”津波が観測された主な国内観測点での潮位変動



2022年1月16日気象庁報道資料より作成

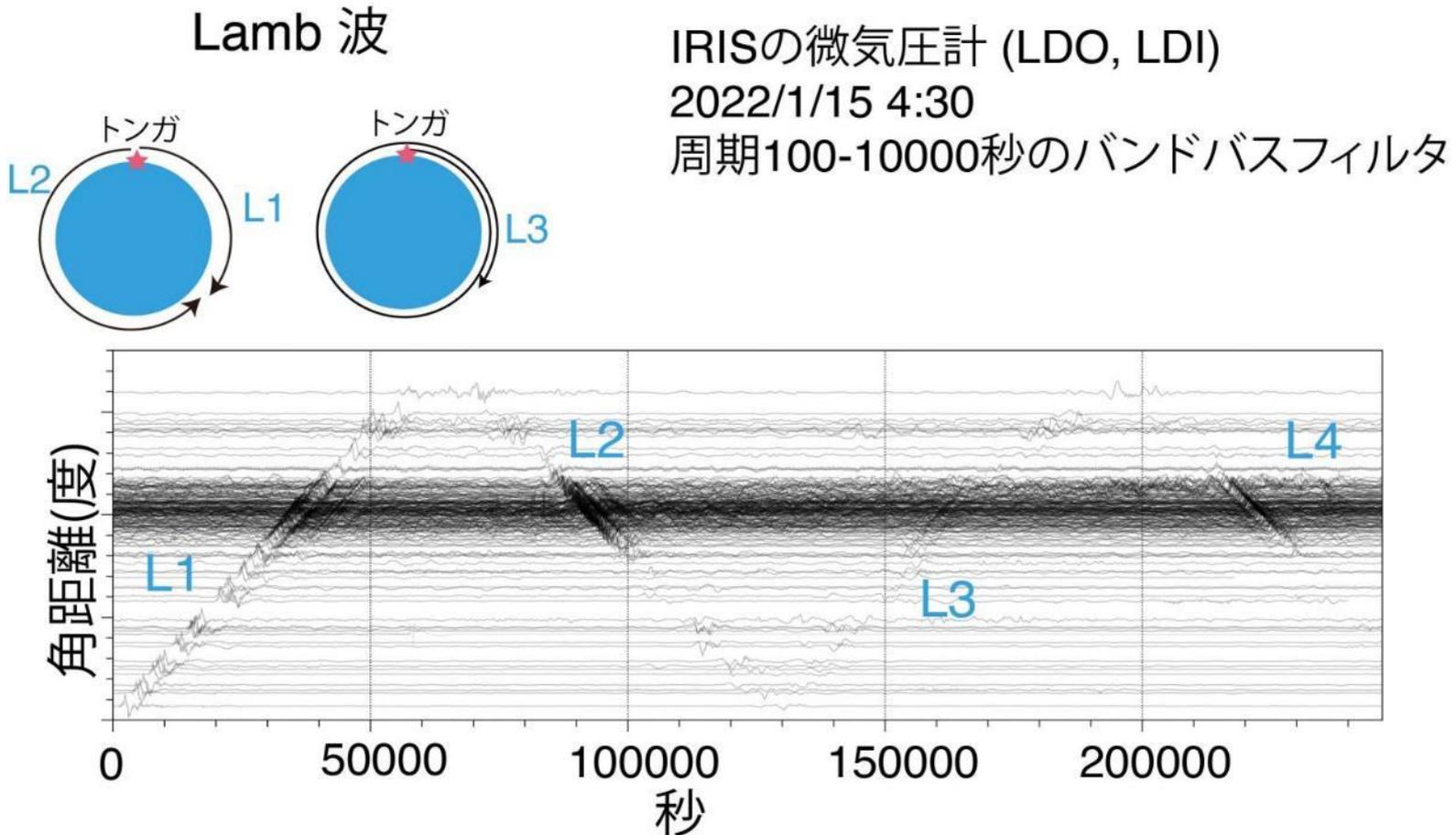
今回の噴火の特異な点：広域での津波の発生

“通常の”津波が観測されたトンガ付近での潮位変動

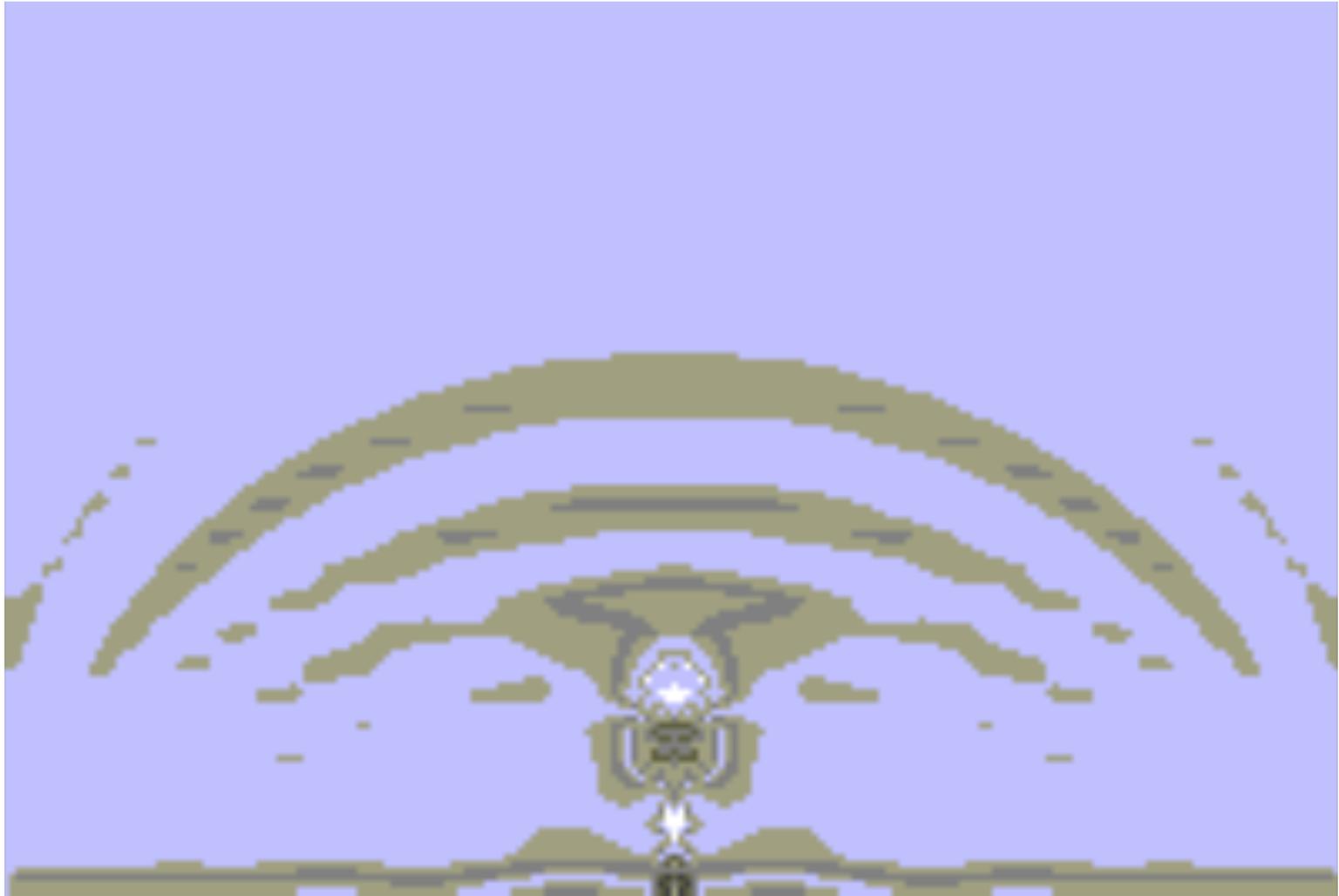


今回の噴火の特異な点：全球的な微気圧変動

世界中の微気圧計で地球を2周(?)する大気Lamb波を捕捉

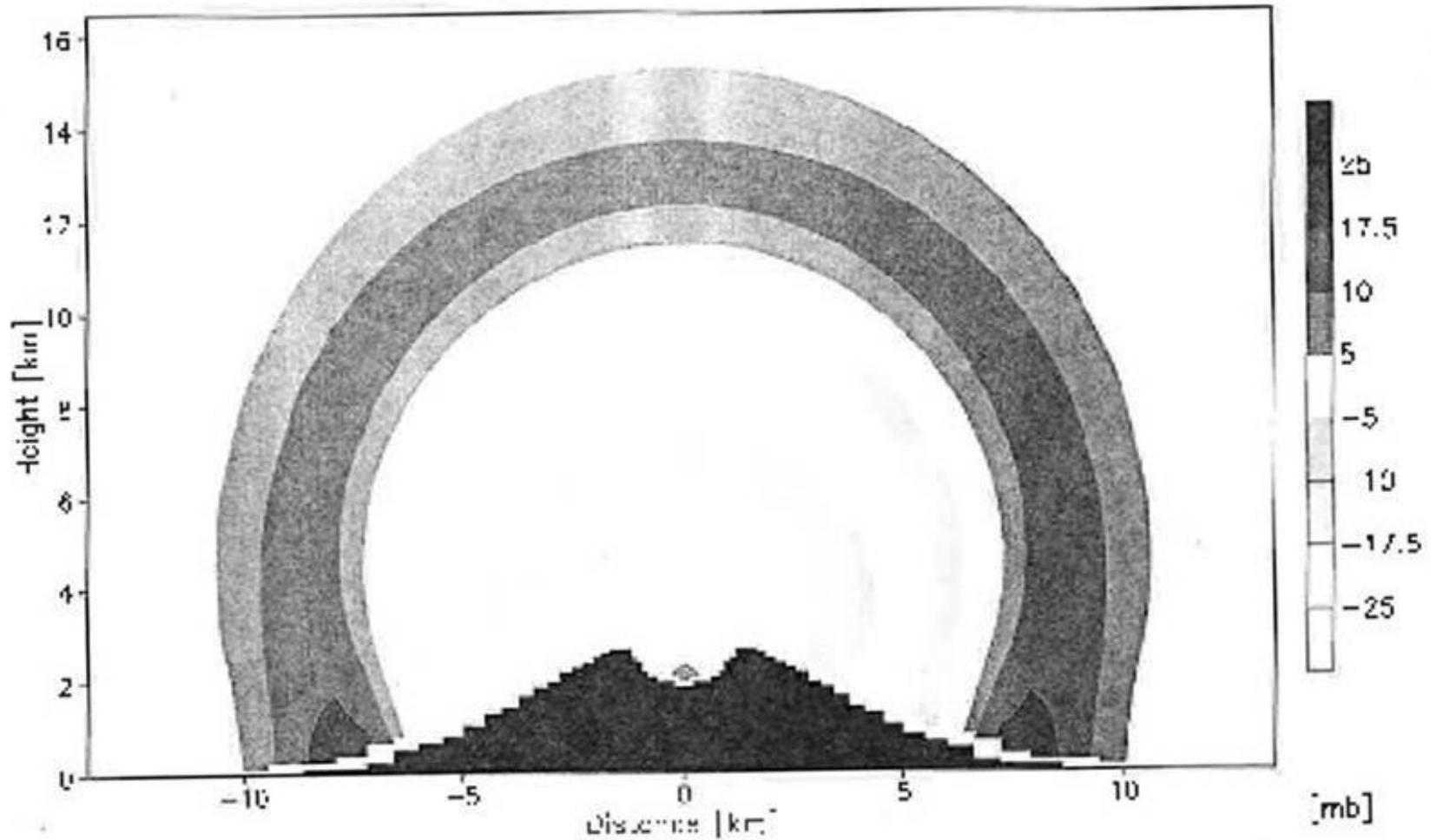


噴煙における音波のソース (?)



数値計算による噴火開始?秒における圧力変動分布 (石峯博士論文 2000)

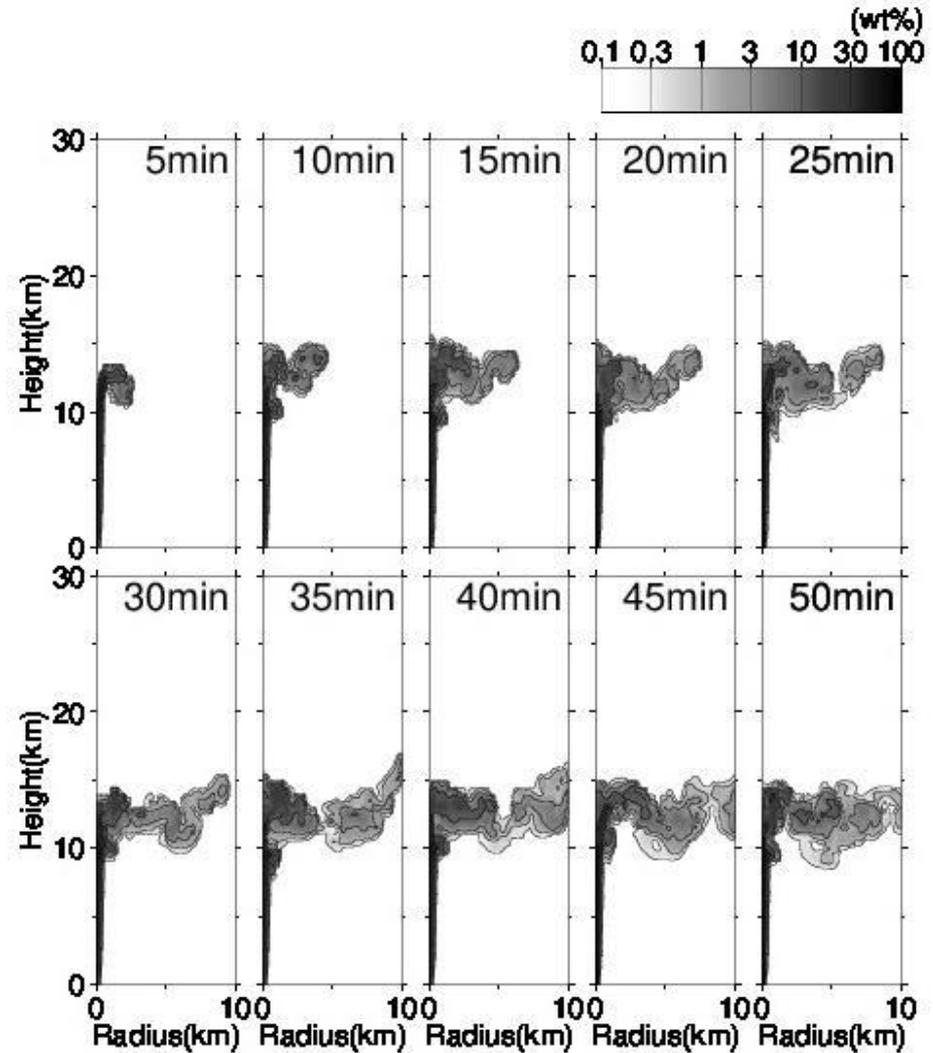
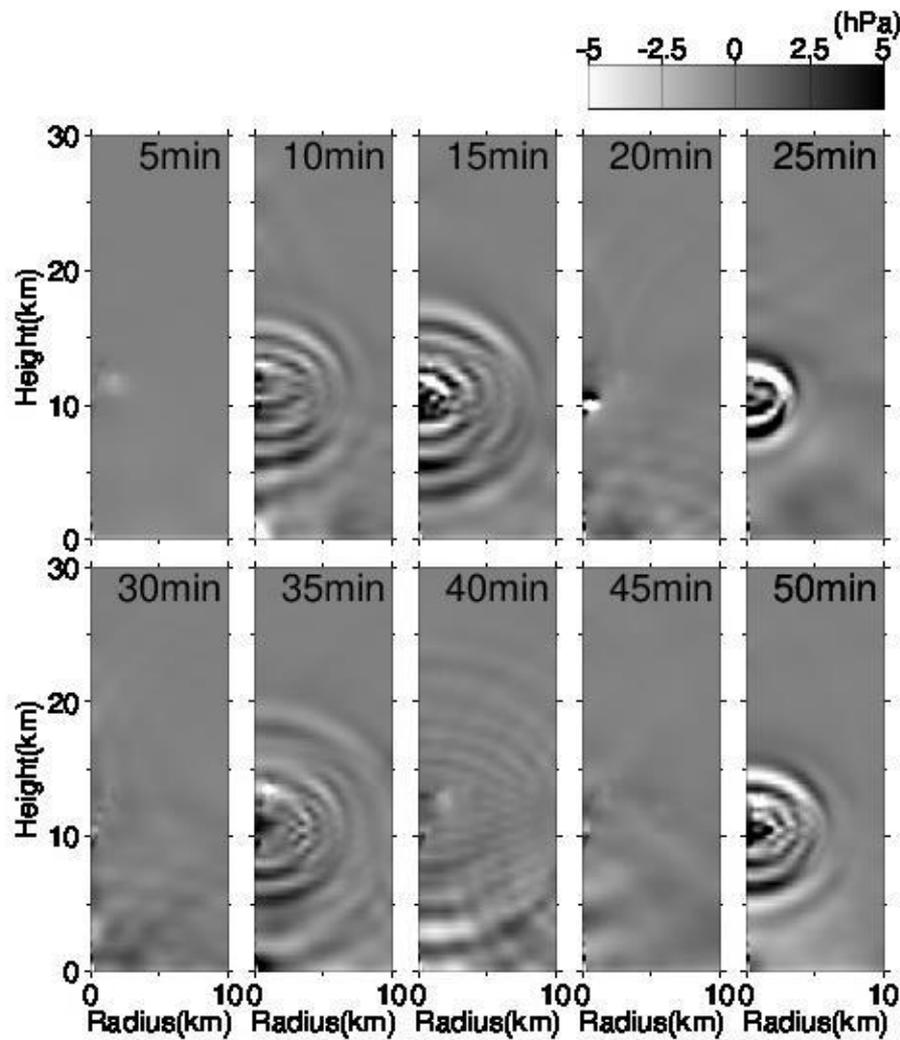
噴煙における音波のソース (?)



数値計算による噴火開始30秒における圧力変動分布

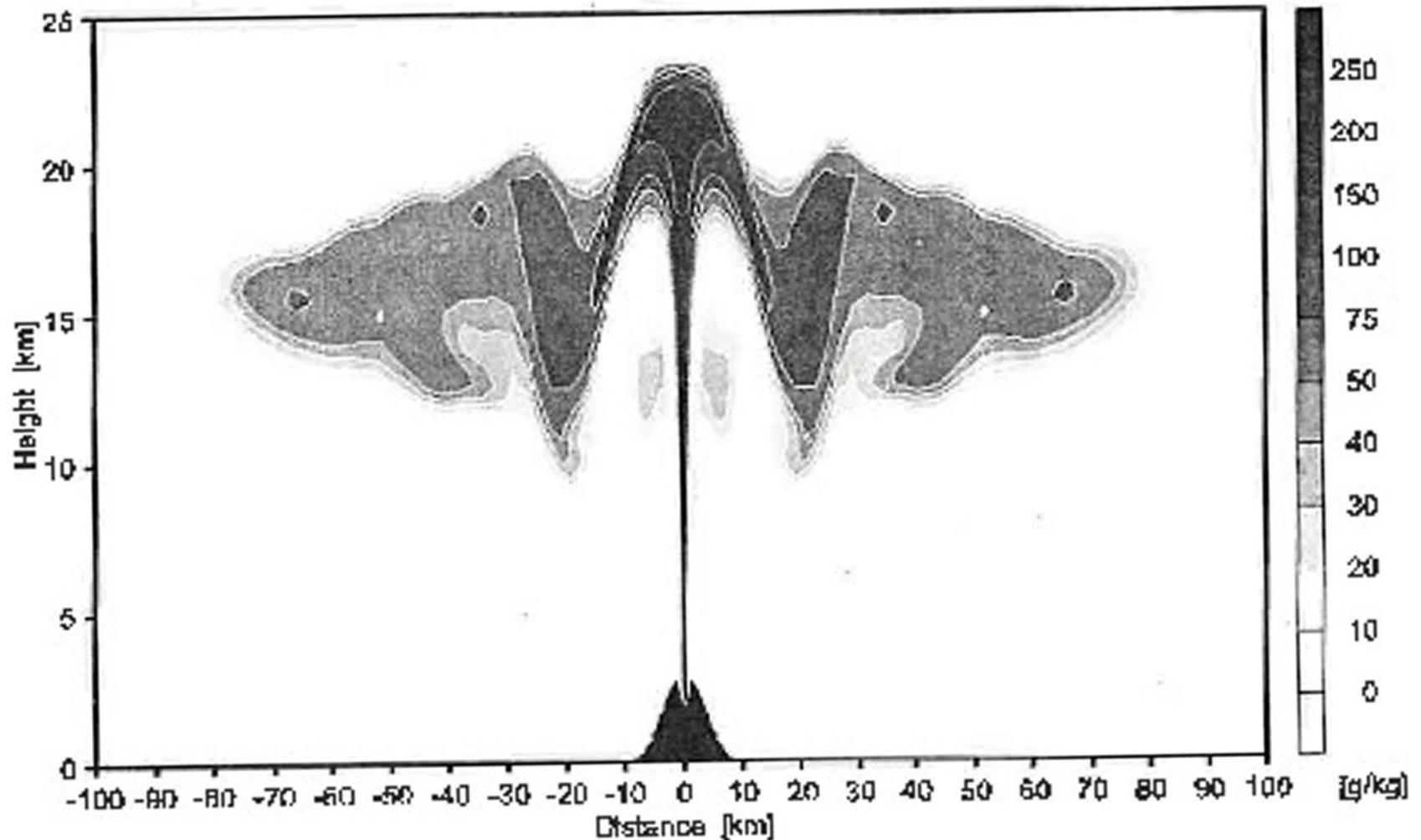
(Oberhuber et al. JVGR, 1998; [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(98\)00099-7](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(98)00099-7))

噴煙における音波のソース (?)



数値計算による噴煙内外の圧力変動と火山灰粒子の断面分布 (石峯博士論文 2000)

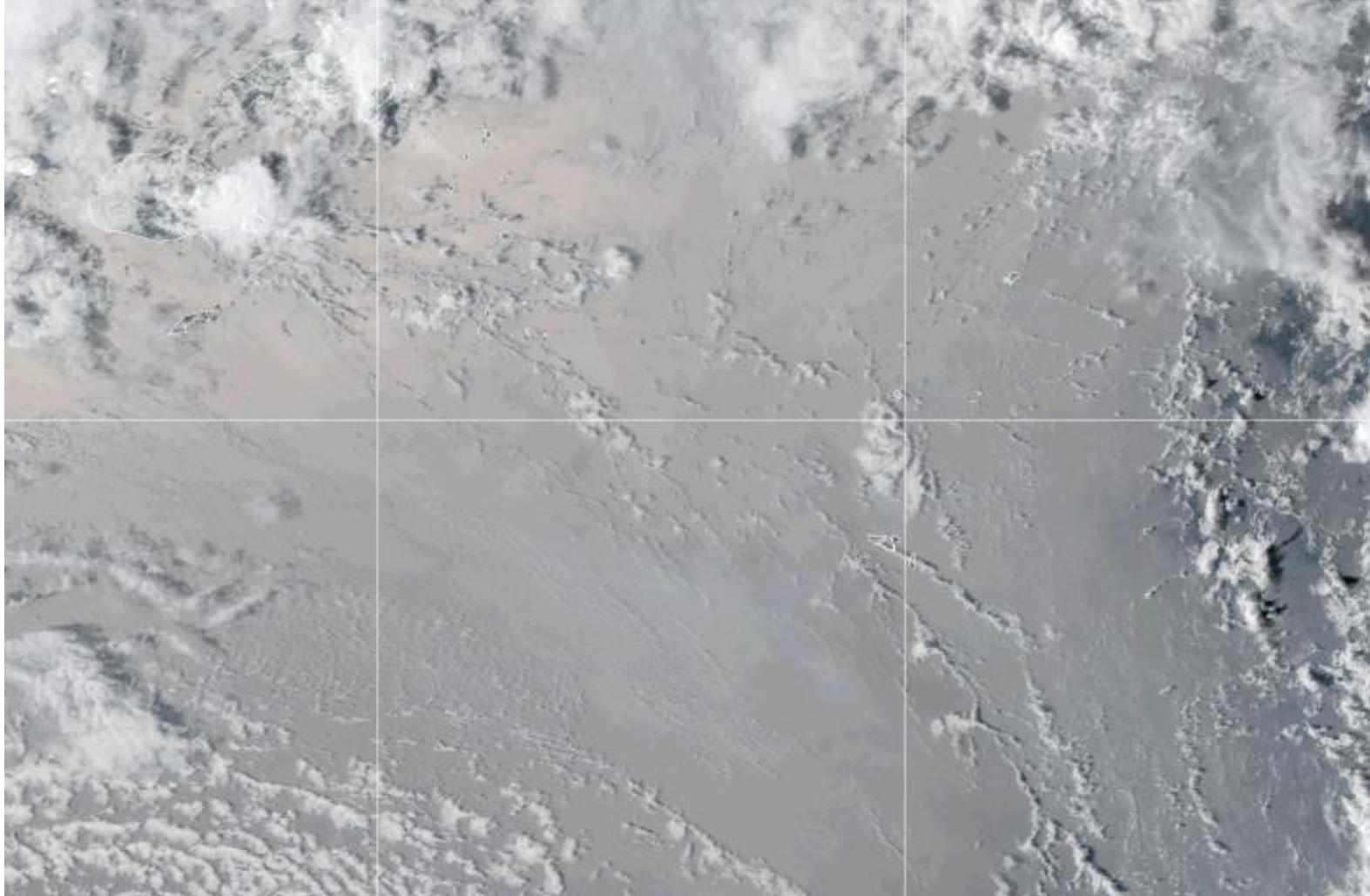
噴煙における音波のソース (?)



数値計算による噴火開始25分における火山灰濃度分布

(Oberhuber et al. JVGR, 1998; [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(98\)00099-7](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(98)00099-7))

噴煙における音波のソース (?)



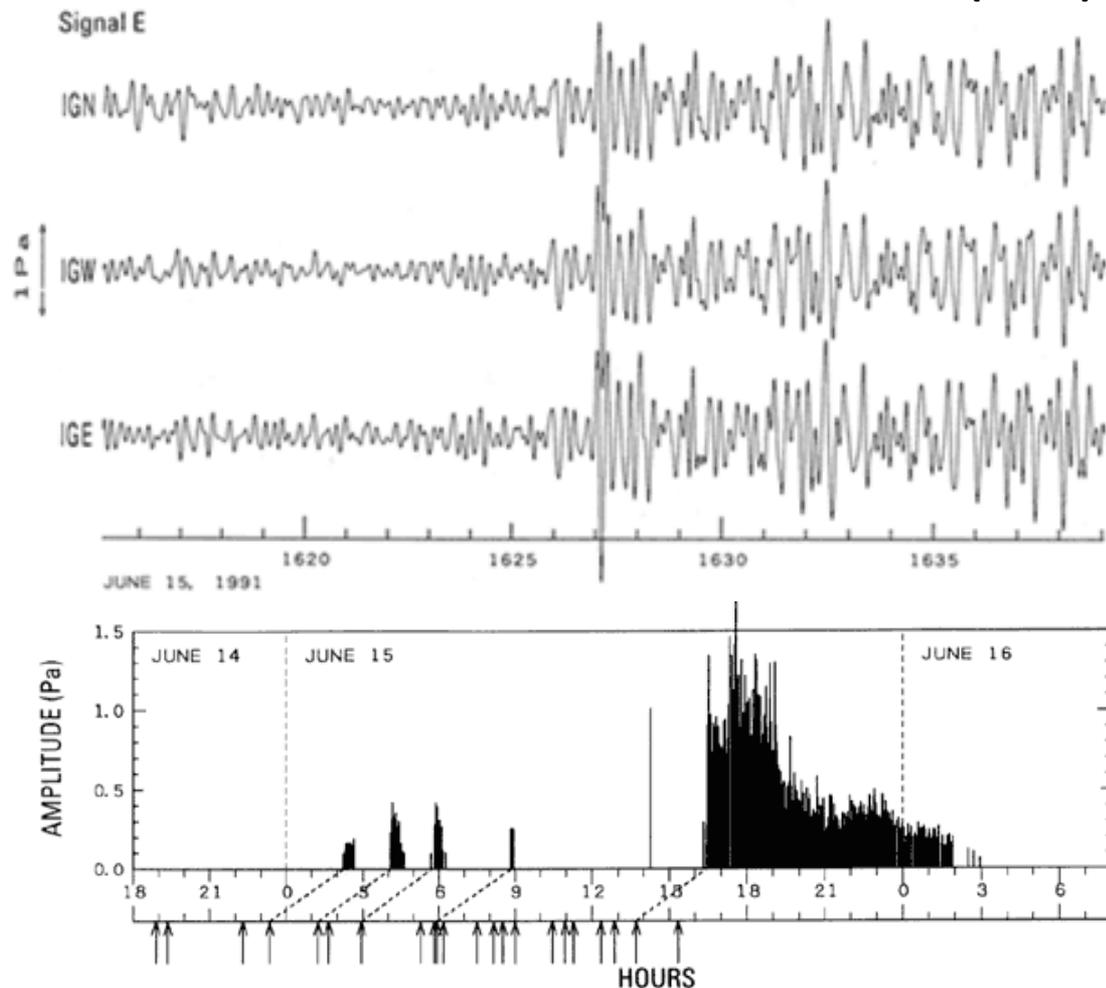
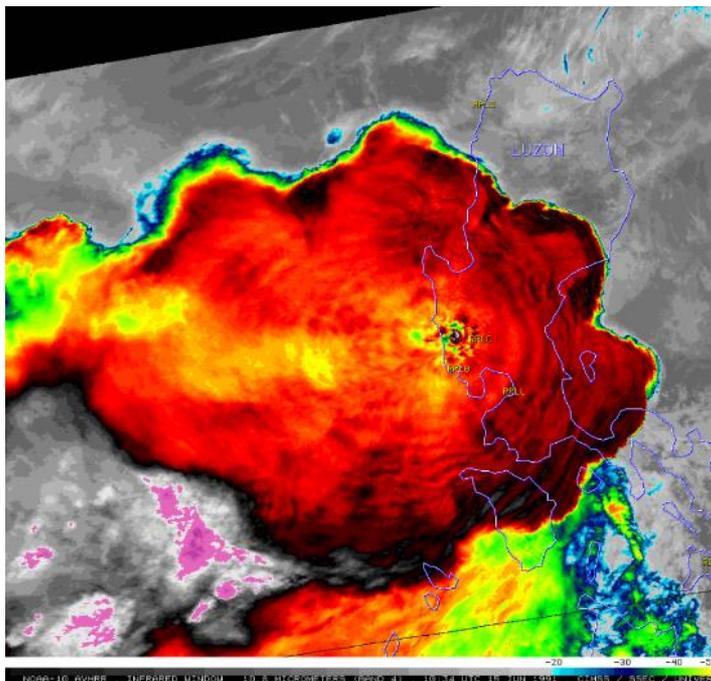
出典: NASA Earth Observatory

(<https://earthobservatory.nasa.gov/images/149347/hunga-tonga-hunga-haapai-erupts>)

ピナツボ火山1991年噴火で 観測された微気圧変動

Tahira et al. (1996)

NOAA-10 AVHRR Infrared Window



ピナツボ1991年噴火の衛星画像(左)と日本で観測された微気圧変動(Tahira et al. 1996)

(参考) ピナツボ火山1991年噴火の概要

フィリピン・ルソン島にあるピナツボ火山では1991年に20世紀最大と言われる噴火を起こした。マグマ噴出量は約7.5km³(うち7km³は火砕流として堆積)、二酸化硫黄ガスの放出量は17メガトンに達し、北地球の平均気温を0.5-0.6°C、下げたと見積もられている。



6月12日の噴火(最大噴火の3日前、噴煙到達高度約20km) ©AFP/Arlan Naeg

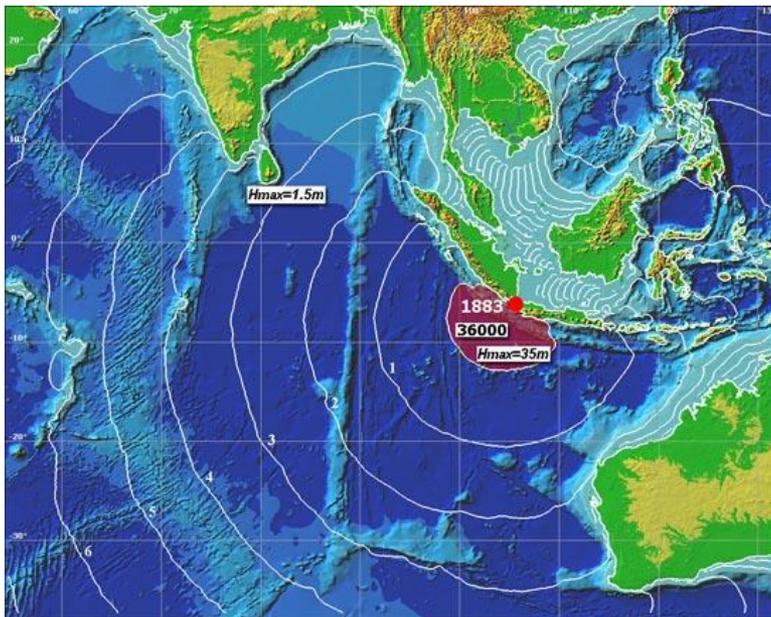


火口から40kmの米海軍基地で火山灰に埋まった車。6月19日撮影。 ©AFP/JOSE DURAN

クラカタウ火山1883年噴火における津波と 関連した大気-海洋共鳴波の研究

インドネシア・クラカタウ火山はの1883年噴火では、最大波高30m以上の大津波が発生してインド洋全域に伝播、約36000人が犠牲になった(下図)。

Harkrider & Press (1967)は、このような噴火において、微気圧変動と潮位変動のカップリングが観測されうることを理論的に提案した(右図)。



<http://earthjay.com/>よりダウンロード

Harkrider & Press (GJI, 1967)

<https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1967.tb02150.X>

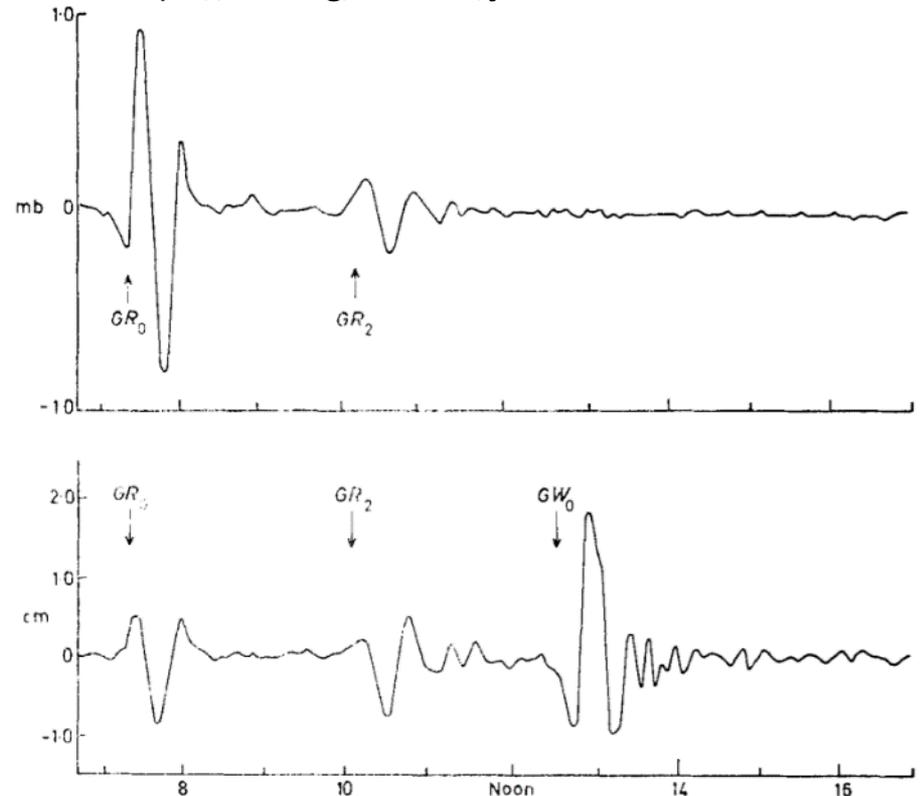
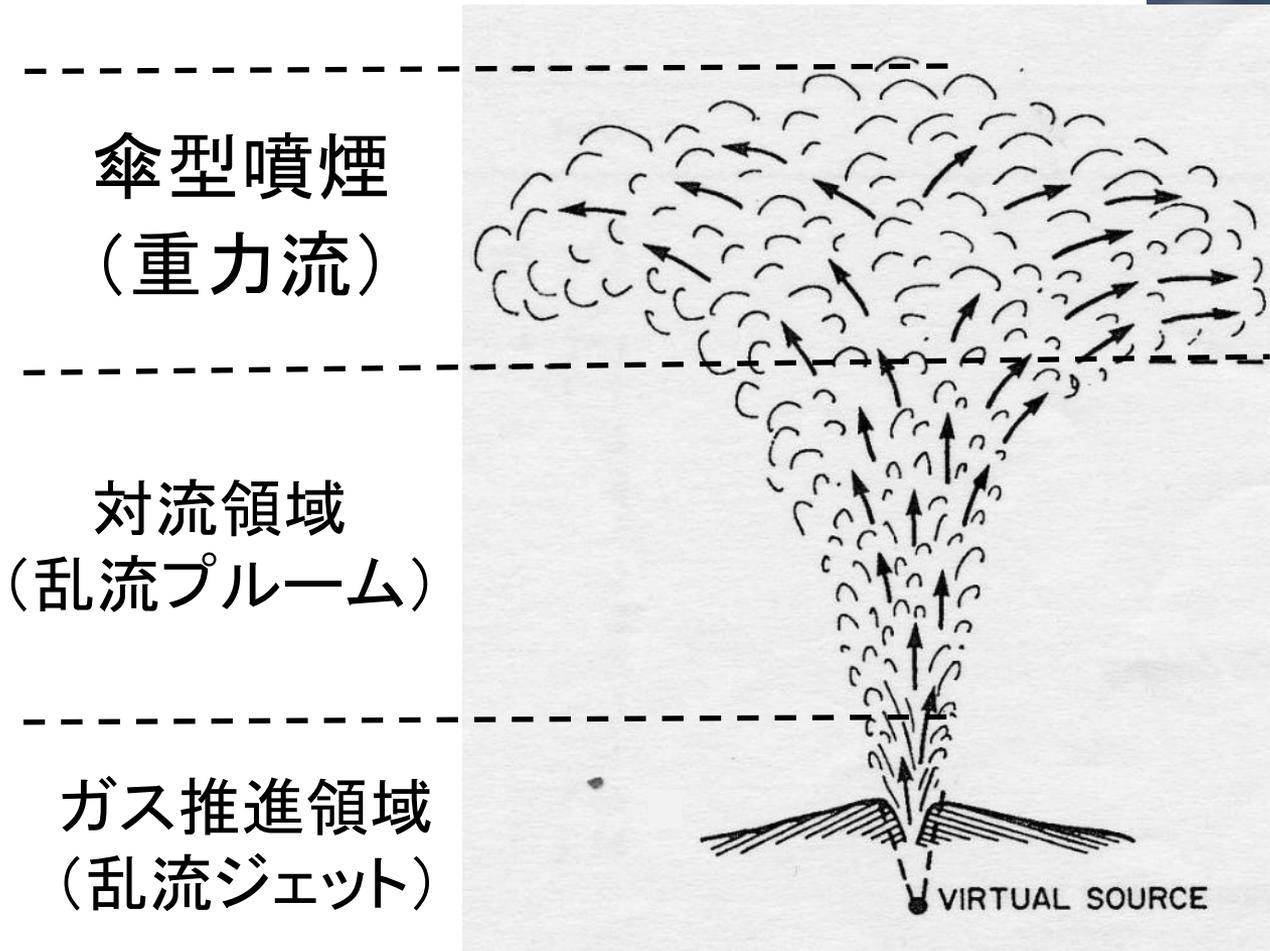


FIG. 8. Synthetic barogram (upper) and marigram (lower) for San Francisco. Source time function is a single-cycle sine wave of 40 minute period. Time is local time, 1883 August 27.

火山の大規模噴煙の基礎（おさらい）

© CENTRO INFORMACIÓN MONITOREO ALERTA TEMPRANA CHILE



Sparks (Bull. Volcano., 1986, 48,3-15)

火山の大規模噴煙の基礎（おさらい）

傘型領域（重力流）

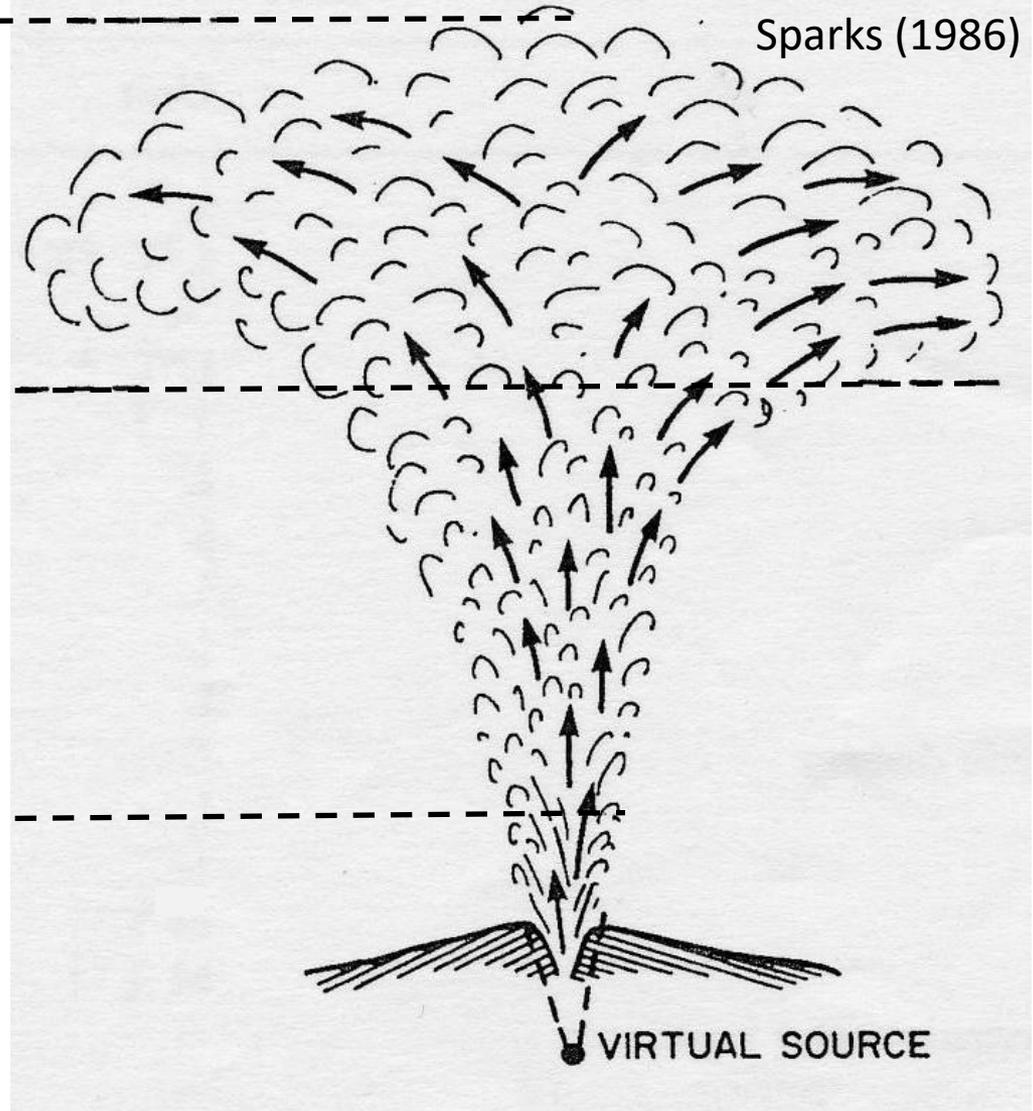
成層大気中で、噴煙の密度が大気と同じ高さに沿って水平方向に流れ広がる部分

対流領域（乱流プルーム）

噴煙に巻き込まれた大気が火砕物の熱によって膨張し、周りより軽くなったことで、浮力によって上昇する部分

ガス推進領域（乱流ジェット）

火口から噴出した勢い（初期運動量）によって上昇する部分



噴煙の高度が重要視される背景

- 噴煙高度は噴火規模を同定する目安の一つ
- 観測が容易で、噴煙の噴出率を迅速に推定できる
- 火山灰の飛散方向や範囲にも大きな影響
- VEI(火山爆発指数)の値を決める重要な観測量

朝倉書店「火山の事典」より引用

VEI	0	1	2	3	4	5	6	7	8
記述(日本語)	非爆発	小爆発	中爆発	中～大爆発	大爆発	巨大爆発			
記述(英語)	non-explosive	small	moderate	mod large	large	very large			
噴出量 (m ³)	<10 ⁴	10 ⁴ ~10 ⁶	10 ⁶ ~10 ⁷	10 ⁷ ~10 ⁸	10 ⁸ ~10 ⁹	10 ⁹ ~10 ¹⁰	10 ¹⁰ ~10 ¹¹	10 ¹¹ ~10 ¹²	>10 ¹²
噴煙柱の高度 (km)	<0.1	0.1~1	1~5	3~15	10~25	>25			
定性的記述(英語)	gentle	effusive	explosive	cataclysmic severe	paroxysmal violent	colossal terrific			

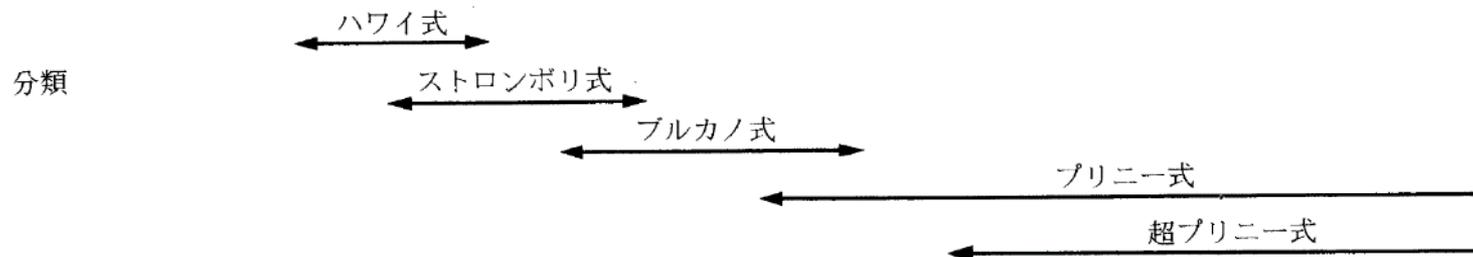
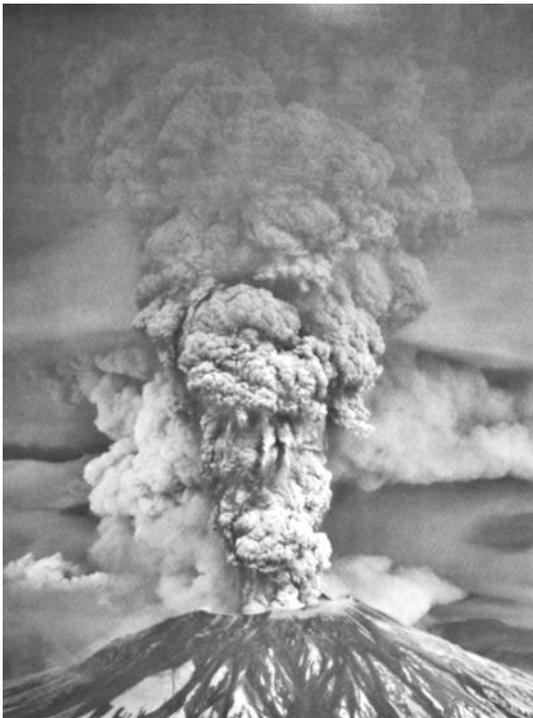


図 4.2.1 火山爆発指数

噴煙モデルの基本的な枠組み

定常的とみなせるような
火山噴煙

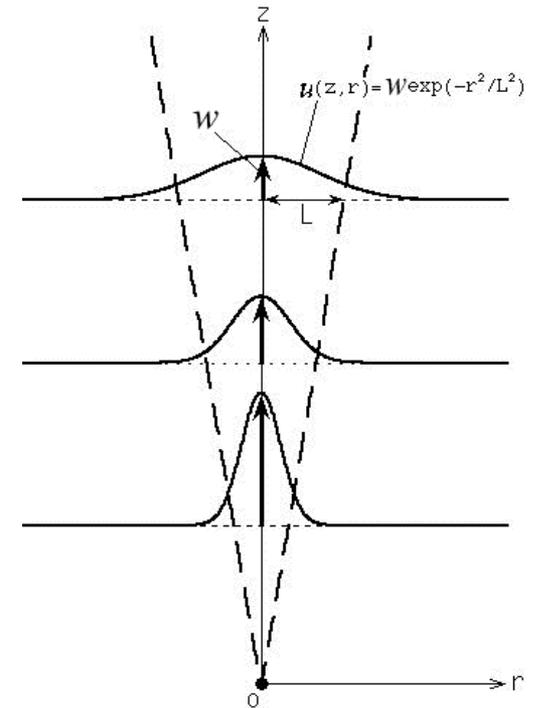


≡

強制プリューム
(Forced Plume)



≡



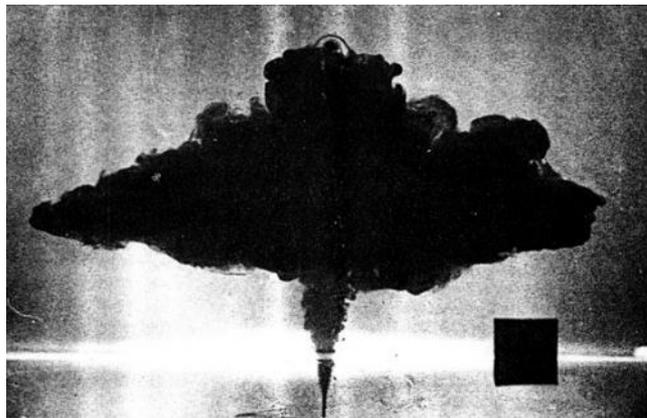
噴煙が最高到達高度に達した後、十分に長い時間、一定の噴出率で噴火が継続すれば定常的とみなす。すなわち実質的にプリニー式噴火にのみ適用できる定式化

乱流プルームと乱流ジェットとの中間的な流れは強制プルームまたはボイエント・ジェットと呼ばれる。

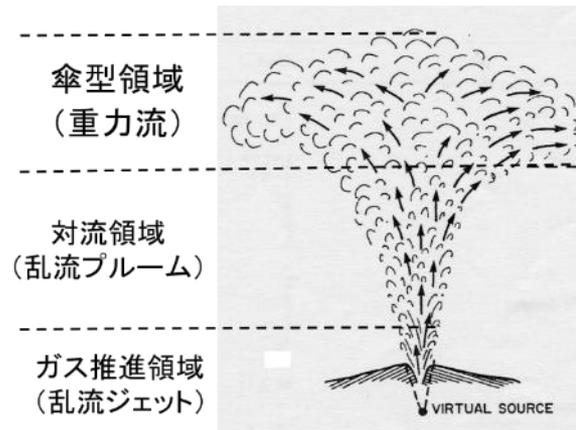
軸対称(円錐状)で運動特性が軸上の速度や密度で表現できると仮定して定式化する。

噴煙の到達高度（傘型噴煙が広がる高さ）

成層流体（下層が重くて、上層が軽くなるように密度成層している流体）中の乱流プルームは噴出直後は周りより軽いが、やがて密度が等しい層に達し、その高さ付近で水平方向に広がる。このような高さを**浮力中立高度**と呼ぶ。



水槽実験における乱流プルーム



噴煙柱の概念図 (Sparks, 1986)



カルブコ火山の噴煙柱

一方、成層流体でも水平方向に広がり始めるより下部では、乱流プルームは一樣流体中とほぼ同様の運動をすることが知られており、これまで求めてきた解が良い近似として使える。

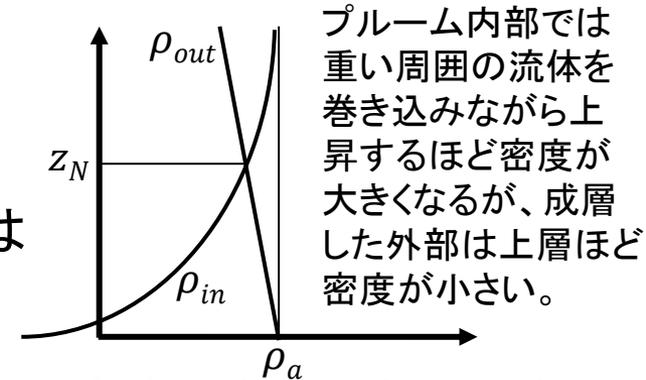
噴煙の到達高度から分かること

噴煙内の密度は

$$\rho_{in} = \rho_a - \rho_a \frac{5}{6\varepsilon g} \left(\frac{10B^{*2}}{9\varepsilon} \right)^{1/3} z^{-5/3} \quad \dots \textcircled{1}$$

で近似できる。プルームの外の成層した流体の密度は

$$\rho_{out} = \rho_a + \frac{d\rho_a}{dz} z \quad \dots \textcircled{2}$$



で表される。この二つの密度が一致する高さが浮力中立高度であり、噴煙の広がる高さにはほぼ一致する。①②が一致する高さを z_N とおくと、

$$-\rho_a \frac{5}{6\varepsilon g} \left(\frac{10B^{*2}}{9\varepsilon} \right)^{1/3} z_N^{-5/3} = \frac{d\rho_a}{dz} z_N$$

$$z_N^{8/3} = -\frac{5\rho_a}{6\varepsilon g \frac{d\rho_a}{dz}} \left(\frac{10B^{*2}}{9\varepsilon} \right)^{1/3} = \frac{5}{6} \left(\frac{10}{9} \right)^{1/3} \frac{\rho_a}{(-g \frac{d\rho_a}{dz})} \varepsilon^{-4/3} B^{*2/3}$$

$$z_N = \left(\frac{5}{6} \right)^{3/8} \left(\frac{10}{9} \right)^{1/8} \left(-\frac{g}{\rho_a} \frac{d\rho_a}{dz} \right)^{-3/8} \varepsilon^{-1/2} B^{*1/4}$$

すなわち、浮力中立高度 z_N が浮力フラックス B^* の $1/4$ 乗に比例することを得る。逆の言い方をすると、浮力フラックスが浮力中立高度の 4 乗に比例するということである。

大規模なマグマ噴火（プリニー式噴火）の 発生メカニズム

火山ガスが
爆発的噴火を引き起こす!!

火山ガスの大部分は水蒸気

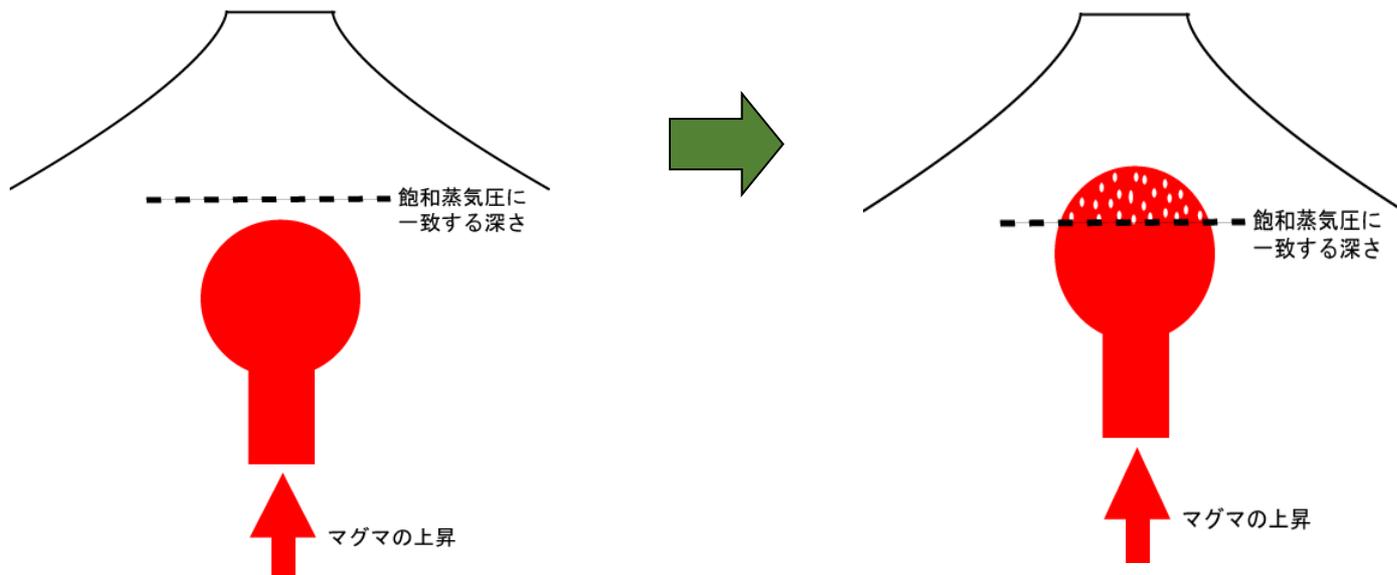
代表的な火山のガス組成(mol %)

日下部・松葉谷（火山, 1986）を基に作成

火山名	ガス名	水蒸気 H ₂ O	二酸化炭素 CO ₂	二酸化硫黄 SO ₂	硫化水素 H ₂ S	塩化水素 HCl
有珠山(北海道)		96.0	2.64	0.22	0.54	0.16
薩摩硫黄島(鹿児島県)		98.1	0.47	0.82	0.05	0.49
マウナロア(ハワイ)		73.4	4.15	21.0	0.56	0.16
スルツェイ(アイスランド)		86.2	6.47	1.8	-	0.40

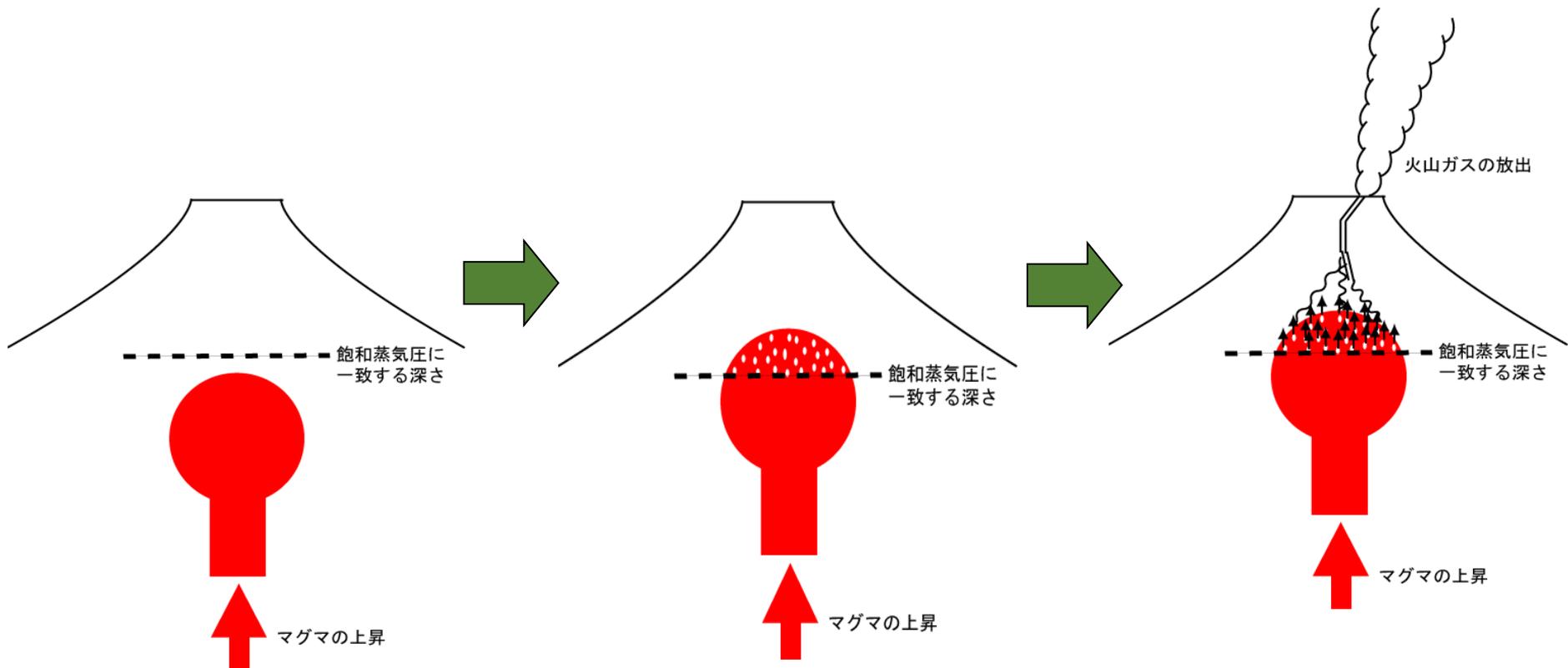
地下のマグマの重さのうち約5%は、中に溶けているガス成分。圧力が大きい地下深くでは、マグマ中に溶けているが、地表近くまで上昇すると、圧力が小さくなるので、ガス成分は気泡になる。

マグマ中のガスは浅いところで発泡する



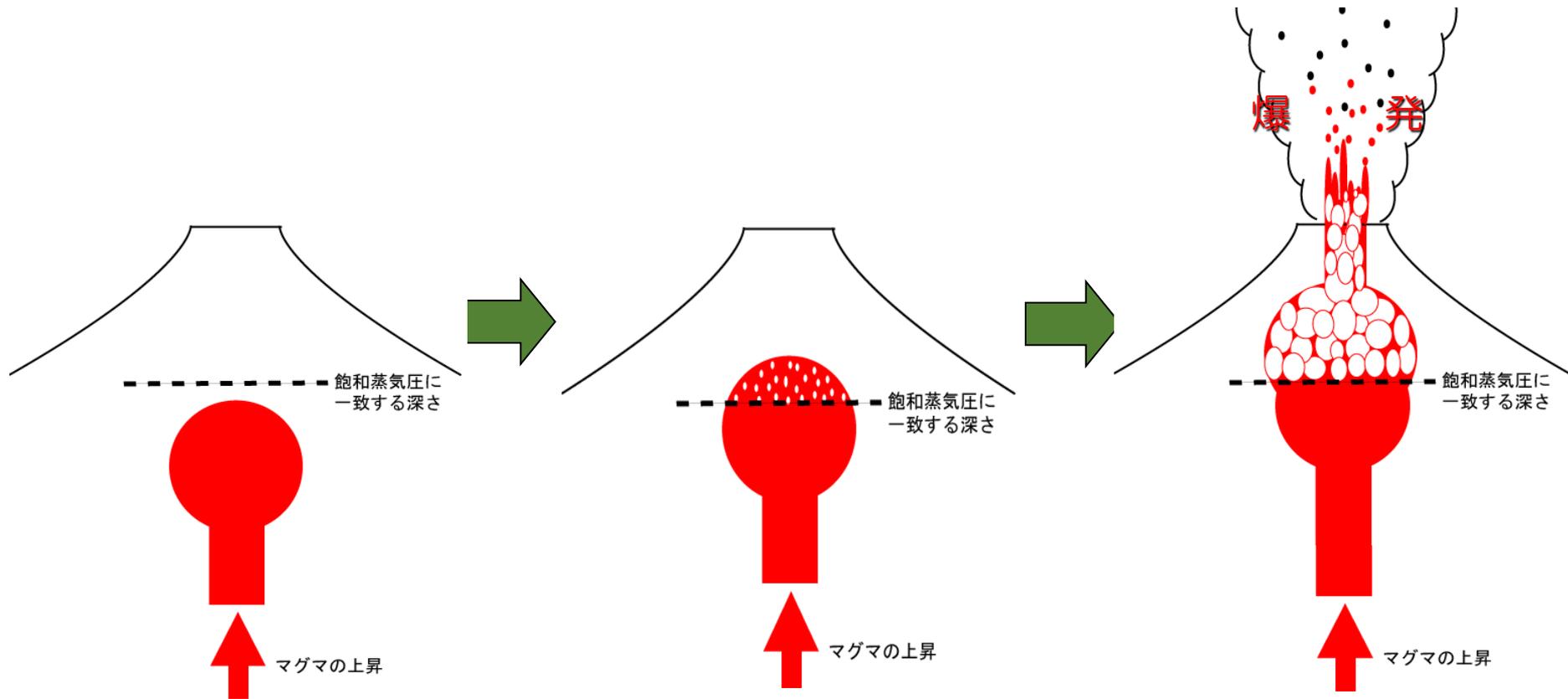
溶岩流を流すマグマも爆発するマグマも，地下にあるときのガス成分の量は，だいたい同じ。

泡が抜けやすいと…



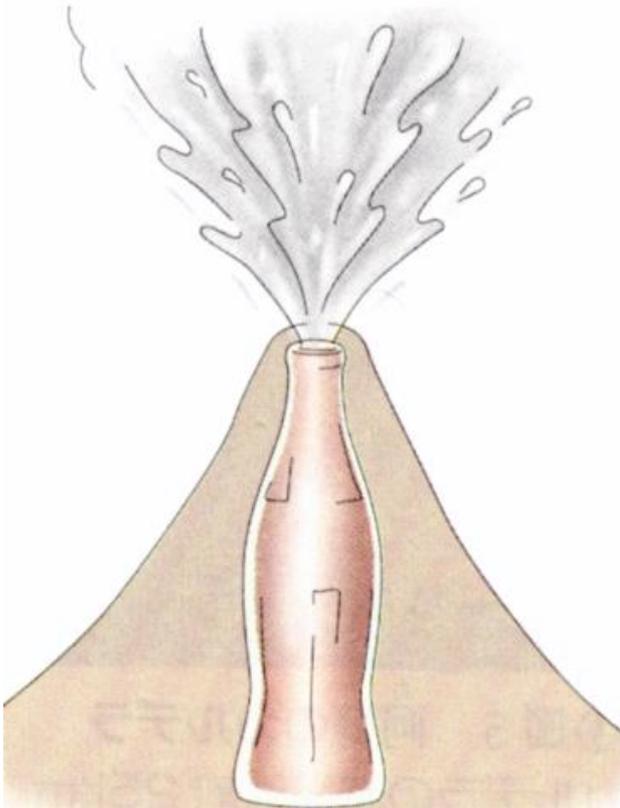
溶岩流を流す火山のマグマは粘りけが小さくて、泡が抜けやすい。

泡が抜けにくいと…



爆発的な噴火を起こす火山のマグマは粘りけが大きくて、泡が抜けにくい。

つまり、火山が爆発を起こすのは…



火炭酸飲料をよく振った後、
すぐ栓を抜くと勢いよく噴き
出すのと原理は同じ。

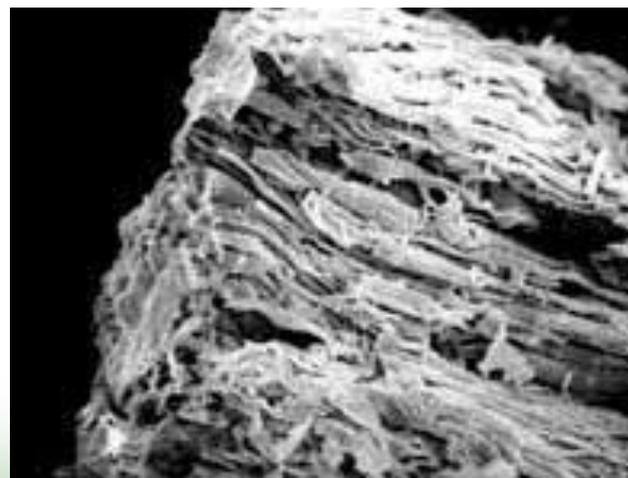
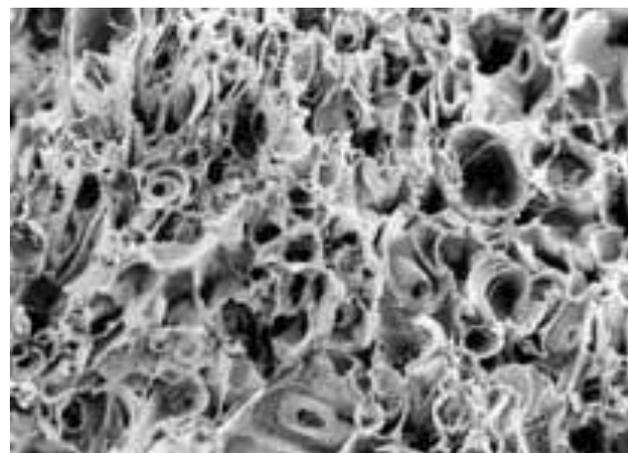
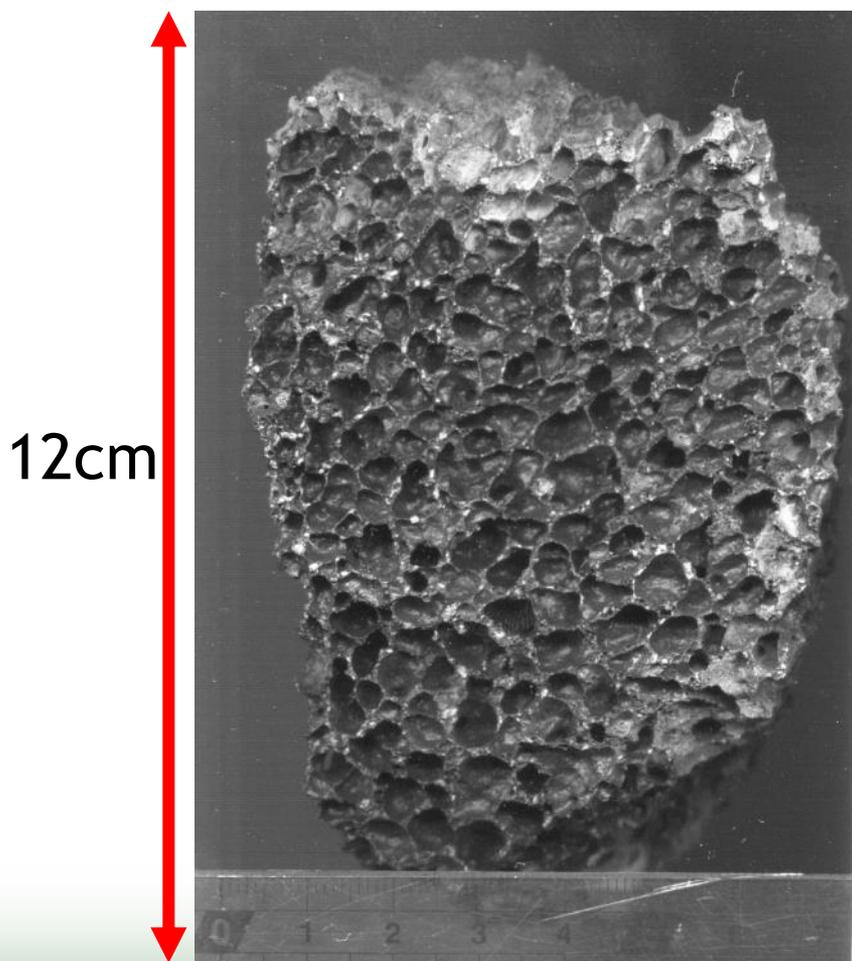


≡



火山爆発は、地球のビールかけ？

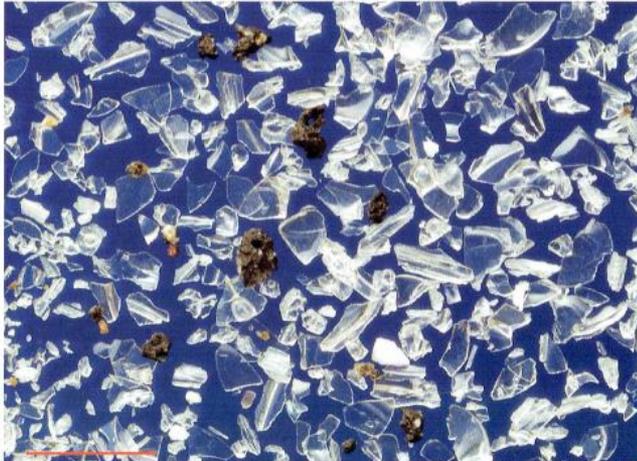
泡構造が残った大きめの噴出物



泡だらけになった溶岩が急に噴き出す
途中で粉々にくだけると火山灰になる。

粉々にくだけて遠方に降った火山灰

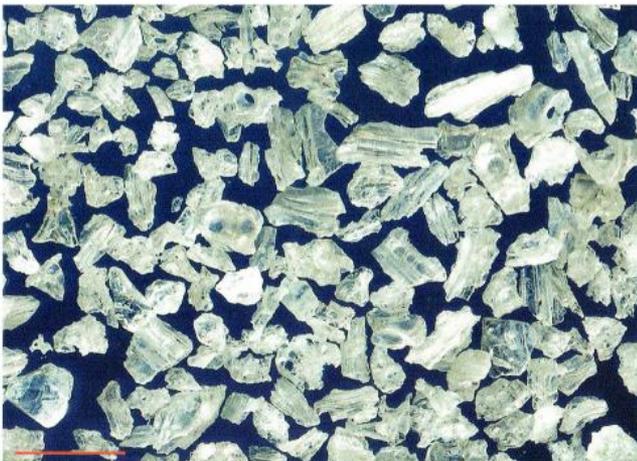
町田 (1992) 「新編火山灰アトラス」より引用



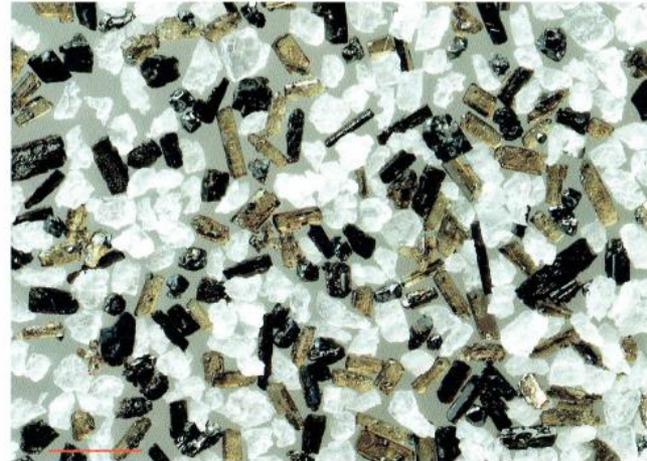
21: 美しいバブル型火山ガラスを主とする始良Tnテフラ (平塚市土屋) (21~24は寺平 宏氏によるテフラの顕微鏡写真, 赤のバーは1mmの長さを示す)



22: 遠隔地の海底に堆積した極脇テフラ (上総層群笠森18, 千葉県長南町)



23: 主に軽石型火山ガラスからなる恵比須峠福田テフラ (長野県喬木村)



24: 軽石型火山ガラスが粘土化し, 特徴的な斑晶鉱物がみられる大山倉吉テフラ (岐阜県神岡町)

まとめ

- トンガは、太平洋プレートの沈み込みに伴い火山が形成される地域で、近年も噴火が多発している。
- フンガトンガ-フンガハアパイ火山は、過去30年間、噴火を繰り返している非常に活動的な火山であり、1月15日直前(2日前まで)も噴火していた。
- 1月15日噴火では、大きな傘型噴煙を形成したため、火山学者の多くが噴火直後から関心を示したが、現地からは情報がほとんど発信されてないため、噴火に関する情報の多くは衛星観測に基づくものである。
- 噴火位置から5000km以上離れた太平洋沿岸の広域で特異な津波が発生したが、その発生メカニズムについては今後、詳細な検討が必要である。