

観測データに有意な変化があったと
判断する目安について

令和元年11月27日

原子力規制庁

本日の説明内容

1. 「観測データに有意な変化があったと判断する目安」の位置付け
2. 「観測データに有意な変化があったと判断する目安」作成の検討方針
3. 「観測データに有意な変化があったと判断する目安」(案)
4. 原子炉火山部会の関与について

参考1. 監視項目を抽出するにあたり参考とした観測事例

- ・ピナツポ(フィリピン)【1991/6/12、VEI:6】
- ・セントヘレンズ(米国)【1980/5/18、VEI:5】
- ・エルチチョン(メキシコ)【1982/4/4、VEI:5】
- ・桜島(大正噴火)【1914/1/12、VEI:4】

参考2. 九州電力(株)の「川内原子力発電所及び玄海原子力発電所火山活動のモニタリング評価結果」及び気象庁の火山情報など

1. 「観測データに有意な変化があったと
判断する目安」の位置付け

1. 「観測データに有意な変化があったと判断する目安」の位置付け

原子炉火山部会 第5回会合(平成31年3月22日開催) 資料2、修正・加筆

原子力規制委員会から調査審議事項として指示のあった「原子力規制委員会が策定する原子炉の停止等に係る判断の目安」は、巨大噴火の兆候を把握するものであるとの誤解を生じていたので、以下のとおりその位置付けを再確認する。

- 原子力規制委員会は、川内原子力発電所及び玄海原子力発電所の新規規制基準適合性に係る審査において、過去に巨大噴火*を発生させたカルデラについては、噴火履歴の特徴及び地下構造から、火山の現在の活動状況は巨大噴火が差し迫った状態ではないこと等から、原子力発電所の運用期間中に巨大噴火が発生する可能性は十分小さいと判断している。また、運用期間中に考慮する最大規模の火山事象として、最後の巨大噴火以降の最大の噴火規模(例えば、始良カルデラの場合は桜島薩摩噴火)を考慮しても、設計対応不可能な火山事象が川内原子力発電所及び玄海原子力発電所の敷地に到達する可能性は十分小さいと判断している。

〔ここで対象とする設計対応不可能な火山事象とは、「火砕物密度流」である。なお、設計対応不可能な火山事象が原子力発電所に到達する可能性が十分小さいと評価できない場合は、原子力発電所の立地は不適と考えられる。〕

- 上記のように、許可時に「運用期間中の巨大噴火の可能性が十分小さい」と評価した火山であっても、この評価とは別に、設計対応不可能な火山事象が原子力発電所の敷地に到達した可能性が否定できない火山に対して、評価時からの状態の変化の検知により評価の根拠が維持されていることを確認することを目的として、運用期間中のモニタリングを行う必要がある。モニタリングにより観測データの有意な変化を把握した場合には、事業者は状況に応じた判断・対応を行う必要がある。

- 原子炉火山部会においては、「観測データに有意な変化があったと判断する目安」として検討を行う。

*)ここでいう「巨大噴火」とは、地下のマグマが一気に地上に噴出し、大量の火砕流によって広域的な地域に重大かつ深刻な災害を引き起こすような噴火であり、噴火規模としては、数10km³程度を超えるような噴火を指している。(参考資料2、原子力発電所の火山影響評価ガイドにおける「設計対応不可能な火山事象を伴う火山活動の評価」に関する基本的な考え方について(原子力規制委員会、平成30年3月7日、資料6))

2. 「観測データに有意な変化があったと判断する目安」作成の検討方針

2. 「観測データに有意な変化があったと判断する目安」作成の検討方針

第5回原子炉火山部会における主な意見(1/2)

第5回原子炉火山部会において、「観測データに有意な変化があったと判断する目安」は、過去30年～40年程度の観測データの最大値等を考慮し数値化して設定することを提案したが、その際の原子炉火山部会における主な意見は以下のとおり。

- ① この部会で検討すべきは、ある程度の規模(例えば、桜島でいうと桜島大正噴火規模)の噴火があって、その後どうなるかという視点で目安を考えるべきであり、個々の火山活動をベースとしたような判断、あるいは目安ではない。(宮町委員)
- ② カルデラ噴火というのは、何かそれまでとは全く違うフェーズの変化が起きたり、通常のレベルでは起こっていないところで突然起こり出したりするなど、地下において物質的に何か変化が開始され、長期的にそれがどんどん拡大していくような傾向が見られるなど、そういったことが、ある程度大規模な噴火に結びつく可能性があると考えられるので、そのような観点で目安を再考してはどうか。(小林部会長、村上部会長代理)
- ③ 時空間的にどう変化するかということがおそらく重要な見方である。通常のレベルでは起こっていないところで突然起こり出したということは、地下において質的に何か変化が開始されたという、それが一時的に終わってれば別に問題はないが、長期的にそれがどんどん拡大していくような傾向にあるとか、そういうことが恐らく、カルデラ噴火を対象にしたことではないが、ある程度大規模な噴火に結びつく可能性が非常に多い、あるいは可能性があると思うので、このような観点で目安というなりというものを作成すべきである。(宮町委員)
- ④ (監視レベルの段階設定において、)注意、警戒①、警戒②とあるが、これは結局、一言で言うと、全部準備だなど。注意、警戒①は準備だけでよくて、警戒②と判断する目安、桜島ですと、噴火の後の水準測量の変化、例えば火砕流はどのぐらい出たとか、そういうものを注意して検討すればいいという流れではだめなのか。(棚田委員)

2. 「観測データに有意な変化があったと判断する目安」作成の検討方針

第5回原子炉火山部会における主な意見(2/2)

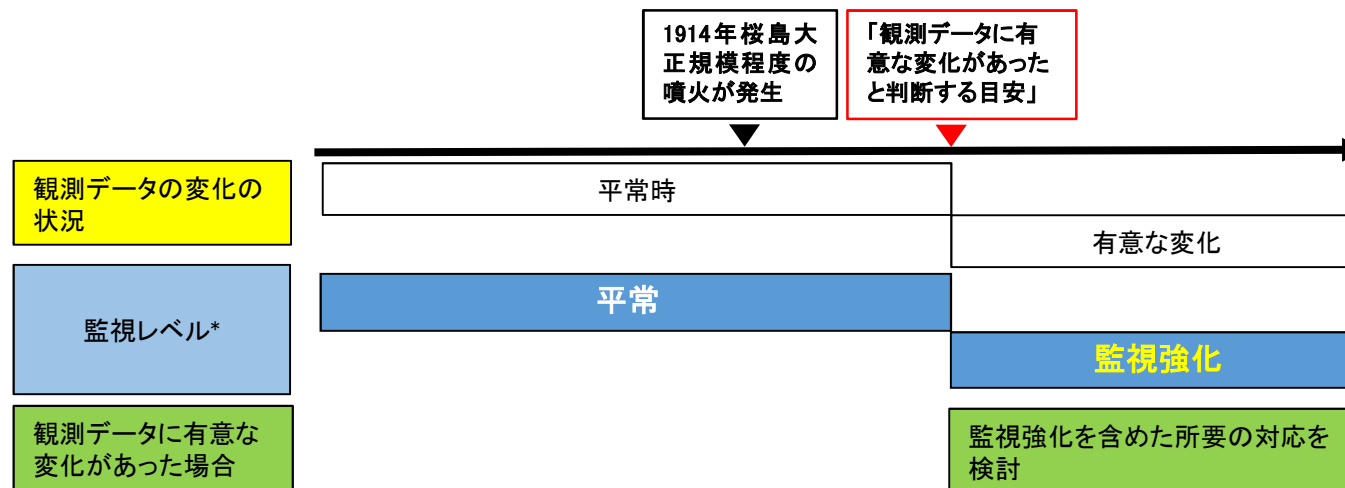
- ⑤ 物理的な現象を何か数式に乗せて、レベルを決めるというのは、これはもうまず無理である。当然ながら、火山というのはそれほど知見が累積されているわけではないので、これは難しい。それでは、どういったレベルが考えられるのかということを検討した場合、過去の観測データに着目すると、有意かなと思われるものを今回抽出して値そのものを、あくまで例示という形で提示した。こういった値そのものに何か物理的、あるいは、科学的に根拠があるのかと言われると、それは単に過去のデータから引っ張ってきただけなので、何かルールにのっとって決めるというのは難しい。このレベル自体は何らかの原子炉の停止とかという決まったアクションをするためのトリガーではなく、イメージとしては観測データや火山の活動状況に気を使わないといけないことが起こったので、火山専門家である皆様に集まっていただいて、火山部会で検討するような、そういった物差しというふうなことを考えていった場合に、監視項目というのは、当然ながら、ある程度決めておいたほうがいいと考えている。(事務局)

2. 「観測データに有意な変化があったと判断する目安」作成の検討方針

「観測データに有意な変化があったと判断する目安」作成の新たな検討方針

第5回原子炉火山部会において、「観測データに有意な変化があったと判断する目安」は、過去30年～40年程度の観測データの最大値等を考慮し数値化して設定することを提案したが、原子炉火山部会における審議を踏まえて、火山モニタリングにおいて観測されているデータの時空間的变化に着目し、それらの急激な増減や消長、あるいは、傾向やフェーズの著しい転換等の観点、並びに、火山噴出物の組成(質的)変化の観点から作成することとする。したがって、この目安自体は、傾向の変化に着目した目安である。

「観測データに有意な変化があったと判断する目安」のレベル



*)監視レベルは、一方的に移行するものではない。

- カルデラ内に位置する活火山の活動が巨大噴火に移行するとは限らないこと、また、巨大噴火の噴火プロセスに関する科学的知見がまだ不十分であるという現状に鑑み、これまで提示していた噴火規模と直接関連付けた監視レベルの段階設定はしない。
- 「観測データに有意な変化があったと判断する」レベルは、例えば、1914年桜島大正噴火規模程度の噴火が発生し、その後、観測データが想定される変化量を超えて変化し、また、複数の監視項目の観測データにおいて、この有意な変化が継続的にあらわれている場合が考えられる。(なお、必ずしも1914年桜島大正噴火規模を上回ることを想定しているものではない。)

3. 「観測データに有意な変化があった
と判断する目安」(案)

3. 「観測データに有意な変化があったと判断する目安」(案)

「観測データに有意な変化があったと判断する目安」作成方針

原子炉火山部会 第5回会合(平成31年
3月22日開催) 資料3、修正・加筆

- (方針1)「観測データに有意な変化があったと判断する目安」を考えるにあたり、第3回原子炉火山部会で抽出した監視項目を以下の観点から、「①主な監視項目」及び「②その他の監視項目」に分ける。

①主な監視項目: 平常時からの変化を把握できるように連続的にデータ取得を行う項目

・「地震活動」、「地殻変動・地盤変動(GNSS、水準測量、傾斜計・伸縮計)」、「火山ガス」

②その他の監視項目: ①主な監視項目に有意な変化の可能性がある場合、状況に応じて情報収集やデータ取得を行う項目。

・「噴出物」、「噴火規模」、「地下構造」

なお、公的機関の既存観測網によるデータの収集・分析に基づき、気象庁の火山情報や公的機関の評価は行われているため、これらの情報も参考とする。

- (方針2)「観測データに有意な変化があったと判断する目安」は、火山モニタリングにおいて観測されているデータの時空間的变化に着目し、それらの急激な増減や消長、あるいは、傾向やフェーズの著しい転換等の観点、並びに、火山噴出物の組成(質的)変化の観点から作成する。
- (方針3) 「観測データに有意な変化があったと判断する目安」作成においては、①監視項目を抽出するにあたり参考とした観測事例、②九州電力(株)から提出される「川内原子力発電所及び玄海原子力発電所 火山活動のモニタリング評価結果」を参考とする。また、気象庁の火山情報及び公的機関の評価や、最新の科学的知見も参考とする。

3. 「観測データに有意な変化があったと判断する目安」(案)

「①主な監視項目」におけるチェックポイント

原子炉火山部会 第5回会合(平成31年
3月22日開催) 資料3、修正・加筆

地震活動

□ 1. 既往の地震発生領域(震源分布)の拡大又は消滅、あるいは、新たな地震発生領域の出現

□ 2. 地震発生数の急激な変化(増加又は減少)

【解説】

1. 既往の地震発生領域の空間的变化に着目し、震源分布の拡大や消滅、新たな地震発生領域の出現を注視する。なお、地震活動が一時的、あるいは短期間で終息している場合は、特段の対応を必要としない(参考2. P47、P48)。
2. なお、対象として必ずしも適するものではないが、ピナツボの噴火では、噴火の数ヶ月前に、火山性-構造性地震が発生し、時間とともに増加する傾向や、主噴火が近くなると、火山性-構造性地震の震源が浅くなり、火山性微動も観測されるようになった事例もある(参考1. P19、P20、P26)。

地殻変動・地盤変動(GNSS、水準測量、傾斜計・伸縮計)

□ 1. GNSS連続観測による基線長の急激な傾向の変化(増加又は減少)、水準測量による地盤の急激な傾向の変化(増加又は減少)

□ 2. 傾斜計・伸縮計による地盤の急激な傾向の変化

□ 3. 既往の地殻変動とは異なる場所での地殻変動(GNSS、水準測量)の変化

【解説】

1. GNSS連続観測による基線長に、既往の増加(伸長)又は減少(収縮)傾向に比較して、それらに急激な変化が生じていなか時間変化に着目する(参考2. P49、P50)。
2. 広域的な水準測量において、既往の上下変動に比較して、急激な変化が生じていないか時間変化に着目する(参考2. P52、P53)。なお、対象として必ずしも適するものではないが、セントヘレンズの噴火では、傾斜計や写真測量により、マグマ貫入に伴うとみられる顕著な山体膨張が観測されている(参考2. P27、P28)。
3. GNSS連続観測による基線長や水準測量による既往の水平及び上下変動に着目し、これまで変化が見られなかった場所での伸長及び収縮がないかを注視する。なお、伸長及び収縮が一時的、あるいは短期間で終息している場合は、特段の対応を必要としない(参考2. P49~P52)。

3. 「観測データに有意な変化があったと判断する目安」(案)

「①主な監視項目」におけるチェックポイント

原子炉火山部会 第5回会合(平成31年
3月22日開催) 資料3、修正・加筆

火山ガス

- 1. 既往の火山ガス放出場所の拡大又は消滅、あるいは、放出場所の出現(新たな火口や火道の形成など)
- 2. 火山ガスの放出量に急激な傾向の変化(増加又は減少)

【解説】

1. 既往の火山ガス放出場所の拡大や消滅に着目し、新たな火口や火道の形成など、放出場所の変化に着目する(参考2. P55)。
2. なお、対象として必ずしも適するものではないが、ピナツボ及びセントヘレンズの噴火では、噴火前からSO₂ガスが観測され、噴火活動の進展とともに増加することが観測されていた事例もある(参考1. P45)。

3. 「観測データに有意な変化があったと判断する目安」(案)

「②その他の監視項目」におけるチェックポイント

原子炉火山部会 第5回会合(平成31年
3月22日開催) 資料3、修正・加筆

噴出物

□ マグマ成分の質的変化(例えば、玄武岩質ないし安山岩質から流紋岩質への変化)

【解説】

1. 例えば、関口・他(2014)は始良カルデラ火山で、10万年前から現在までに活動した火山噴出物の化学組成の変化を調べた(全岩化学組成分析、鉱物組成分析)結果、3つのマグマ活動サイクルを見出すとともに、このうち最初と2回目のサイクルは、苦鉄質マグマの噴出のあと珪長質マグマが噴出し、最後に珪長質なマグマを大量に噴出する巨大噴火で終わっているとしている。第2サイクルの巨大噴火(29ka)と、それより5千~2千年前に噴出した小規模なテフラ噴火のマグマは、化学組成にほとんど違いが認められなかった。現在の桜島火山の活動は第3サイクルに入っていると考えられ、まだ珪長質マグマの巨大マグマ溜まり成長過程には移行していないと解釈できるとしている(参考2. P54)。なお、珪長質マグマへの質的な変化が生じたからといって、必ずしも巨大噴火の発生に至るものではない。
2. 降下火砕物の分布及び構成粒子・化学組成は、噴火の形態や様式を把握するとともに、今後の噴火活動の推移を判断する目安となる(参考2. P58、P59)。

噴火規模

□ 噴火した場合、噴煙柱高度がVEI5に相当する噴煙柱高度25kmを超えたか

【解説】

噴煙柱高度、噴火のタイプ、噴火継続時間、噴出物の量等からの総合的な判断指標。なお、必ずしも1914年桜島大正噴火規模を上回ることを想定しているものではない(参考2. P53)。

3. 「観測データに有意な変化があったと判断する目安」(案)

「②その他の監視項目」におけるチェックポイント

原子炉火山部会 第5回会合(平成31年
3月22日開催) 資料3、修正・加筆

地下構造

□ 地震波速度構造や比抵抗構造により、上部地殻(数km以浅)に推定される低速度及び低比抵抗領域の拡大又は消滅、あるいは、新たな低速度及び低比抵抗領域の出現

【解説】

1. 探査深度や分解能等の技術的課題や海域での調査の困難さはあるものの、まずは場として平常時の地下構造を把握しておく必要がある。その上で、①主な監視項目における地震活動や地殻変動において、有意な変化の可能性がある場合、状況に応じて地下構造調査を行う(参考2. P60、P61)。
2. 地震波速度(V_p 、 V_s)及び比抵抗は、岩石の種類、流体の飽和度、温度及び圧力により変化するため、地下の流体や高温異常の空間分布を把握するための重要な手掛かりとなる。一般に、低 V_p かつ高 V_p/V_s 領域は、マグマ等の流体の存在を示唆し、低 V_p かつ低 V_p/V_s 領域は、水の存在を示唆する(Nakajima et al.,2001)。また、比抵抗は、地震波速度と比較して、マグマ等の流体や水の存在に対して感度は高いという長所はあるが、両者の区別を行うことが難しいという短所もある。

なお、ここで示した「観測データに有意な変化があったとする目安」については、科学的知見の蓄積に伴い、今後見直すこともあり得る。

4. 原子炉火山部会の関与について

4. 原子炉火山部会の関与について

原子炉火山部会 第5回会合(平成31年3月22日開催) 資料2、修正・加筆

- 原子力規制庁は、以下によりモニタリングにおける「観測データに有意な変化があったと判断する目安」に該当したものと判断する。
 - ✓ 単独ではなく複数の監視項目の観測データに有意な変化があった場合とする。
 - ✓ 「①主な監視項目(地震活動、地殻変動・地盤変動(GNSS、水準測量、傾斜計・伸縮計)、火山ガス)」及び「②その他の監視項目(噴出物、噴火規模、地下構造)」に加え、気象庁の火山情報や公的機関の評価も参考とする。

- 原子炉火山部会は、個別の監視項目における「観測データに有意な変化があったと判断する目安」に該当したものとす原子力規制庁の判断を確認するとともに、必要に応じ留意事項等を助言する。

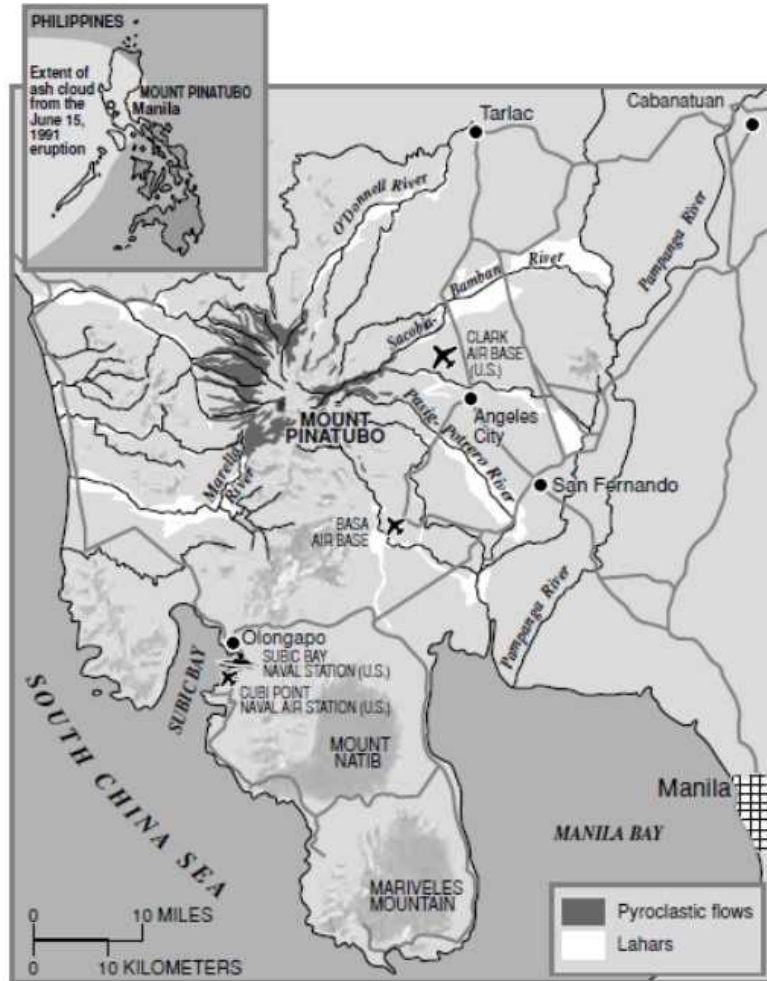
参考1. 監視項目を抽出するにあたり 参考とした観測事例

- ・ピナツボ(フィリピン) 【1991/6/12、VEI:6】
- ・セントヘレンズ(米国) 【1980/5/18、VEI:5】
- ・エルチヨン(メキシコ) 【1982/4/4、VEI:5】
- ・桜島(大正噴火) 【1914/1/12、VEI4】

ピナツボ(1/6)

-噴火の概要-

原子炉火山部会 第3回会合(平成30年
4月13日開催) 資料3、再掲



- 初発噴火1991年6月12日UT
 - ✓プリニー式噴火
 - ✓噴煙柱高度 20 km<
 - ✓火砕流6km
- 主噴火1991年6月15日13:42(05:42UT)
 - ✓プリニー式噴火 VEI:6
 - ✓噴煙柱高度 35 km
 - ✓火砕流及びサージ 火口から16km到達、面積 100 km²<覆う
 - ✓降灰最大距離 500 km<、体積3km³<

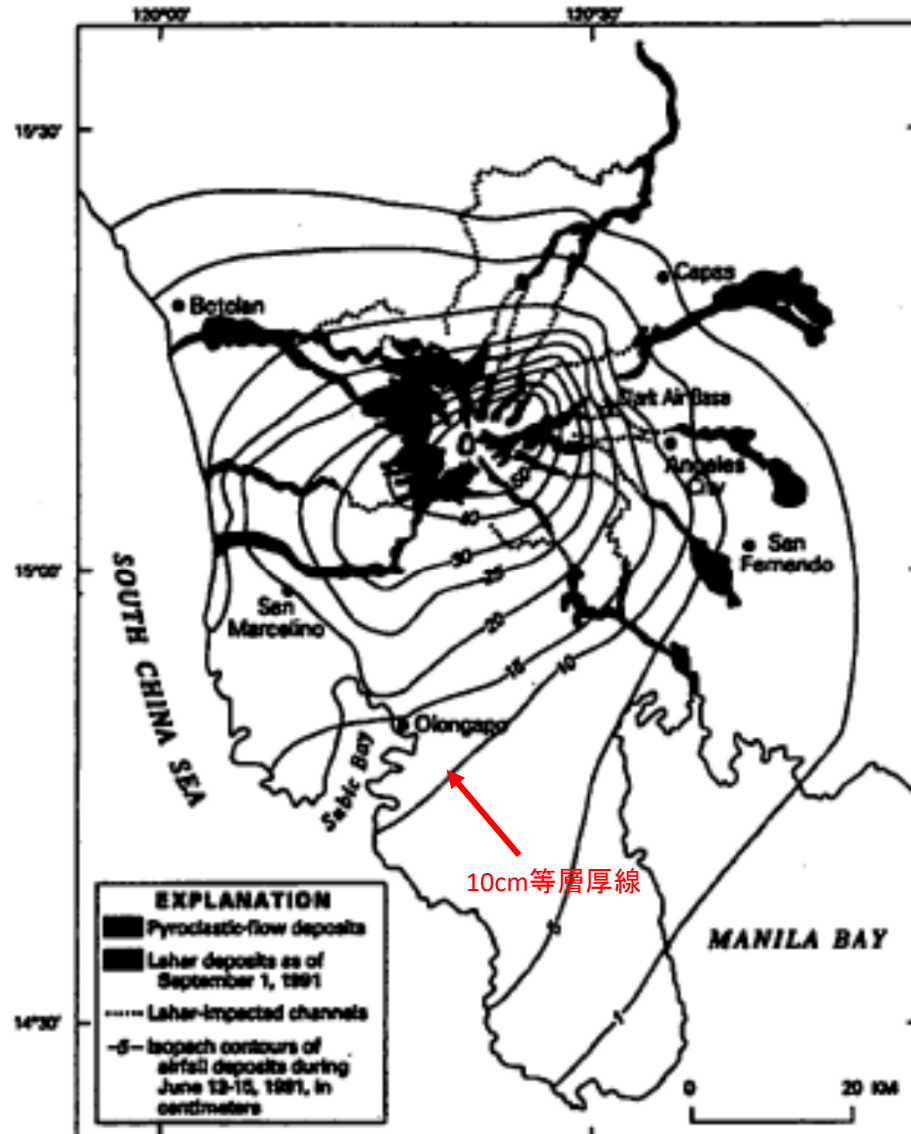
The June 15, 1991, explosive eruption of Mount Pinatubo, Philippines, was the second largest volcanic eruption of this century and by far the largest eruption to affect a densely populated area. The eruption produced high-speed avalanches of hot ash and gas (pyroclastic flows), giant mudflows (lahars), and a cloud of volcanic ash hundreds of miles across. (U.S. bases have reverted to Philippine control since 1991.) (Newhall et al., 1997)

ピナツボ火山の位置、1991年6月15日主噴火の火砕流及びラハール。台風の影響もあり、火山灰は西方の南シナ海へ広く飛散した(左上図)。(Newhall et al., 1997)

ピナツボ(2/6)

- 噴火の概要(火砕流・ラハール・降灰) -

原子炉火山部会 第3回会合(平成30年
4月13日開催) 資料3、再掲



1991年6月火砕流・ラハールの分布と降下火砕物の等層厚線図(Pinatubo Volcano Observatory Team, 1991)

Isopach map of 1991 tephra deposits in west-central Luzon, and extent of valley-filling pyroclastic flows around Mount Pinatubo.(Pinatubo Volcano Observatory Team, 1991)

主噴火までの経過

- 1年前の1990/07/16に100kmNEでM7.8のフィリピン地震。2-3週後にピナツボで噴気・地すべりが生じており、地殻が圧縮されマグマの絞り出しにつながったとの見方がある。
- 1991/04/02に噴火して以降、火山性・構造的な地震が漸増、震源も6月には山頂下5kmに浅くなる。初発噴火5日前に地震が急増。
- 5月からSO₂ガスが観測され、噴火2週間前に急増。
- 一方で初発噴火前1週間の地殻変動は単調。
- **初発噴火**(1991/06/12UT) 以後主噴火まで噴火・地震多。
- **主噴火**(1991/06/15/13:42(05:42UT))に噴火、15-16時頃極大、9時間継続。13:42以降非常に強い地震続く。

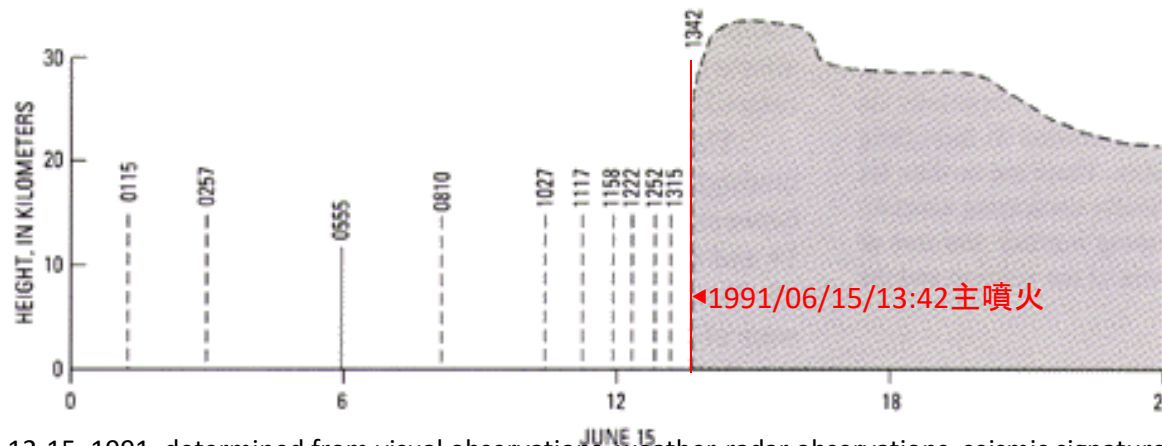
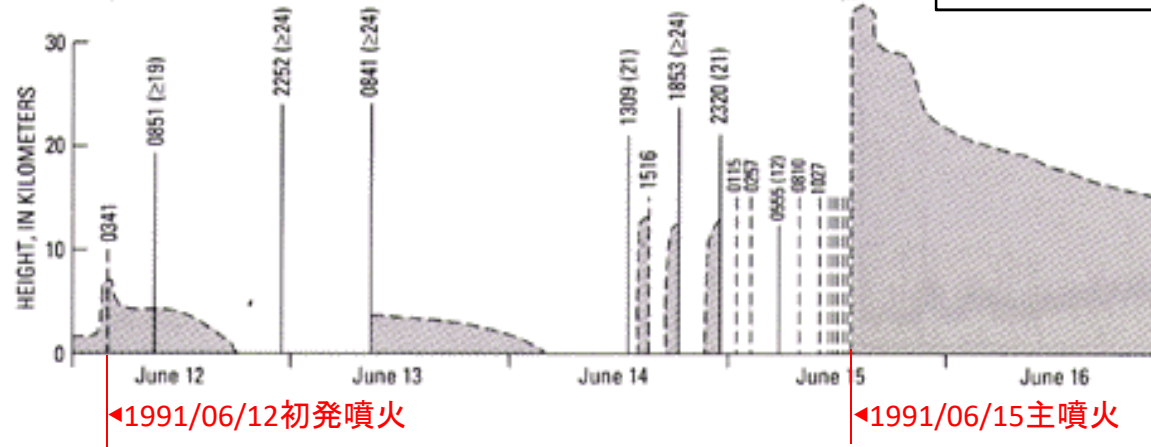
ピナツボ(3/6)

噴火の頻度

6/12初発噴火から6/16までの噴火の頻度と噴煙柱高度、及び6/15の詳細。主噴火前に噴火頻度が増した。
(Wolfe and Hoblitt, 1996)

-主噴火の前の現象(1)-

原子炉火山部会 第3回会合(平成30年4月13日開催) 資料3、再掲



Chronology of explosive eruptions of June 12-15, 1991, determined from visual observations, weather-radar observations, seismic signatures, and, on June 15, data from a recording barograph in the Clark weather station. Events of June 15 are shown in the lower diagram with an expanded time axis. Vertical spikes correspond to individual brief explosions, each of which produced a tephra plume. Time given with each spike is the time of the explosion onset determined from seismic-drum records. Solid spikes record explosions for which weather-radar observers provided realtime tephra-column heights (given in parentheses). Upper limit of radar observations was 19 km at Cubi Point Naval Air Station and 24 km at Clark Air Base. Dashed spikes record explosions for which we received no realtime radar measurements of plume height. Shading portrays known continuous tephra emission. (Wolfe and Hoblitt, 1996)

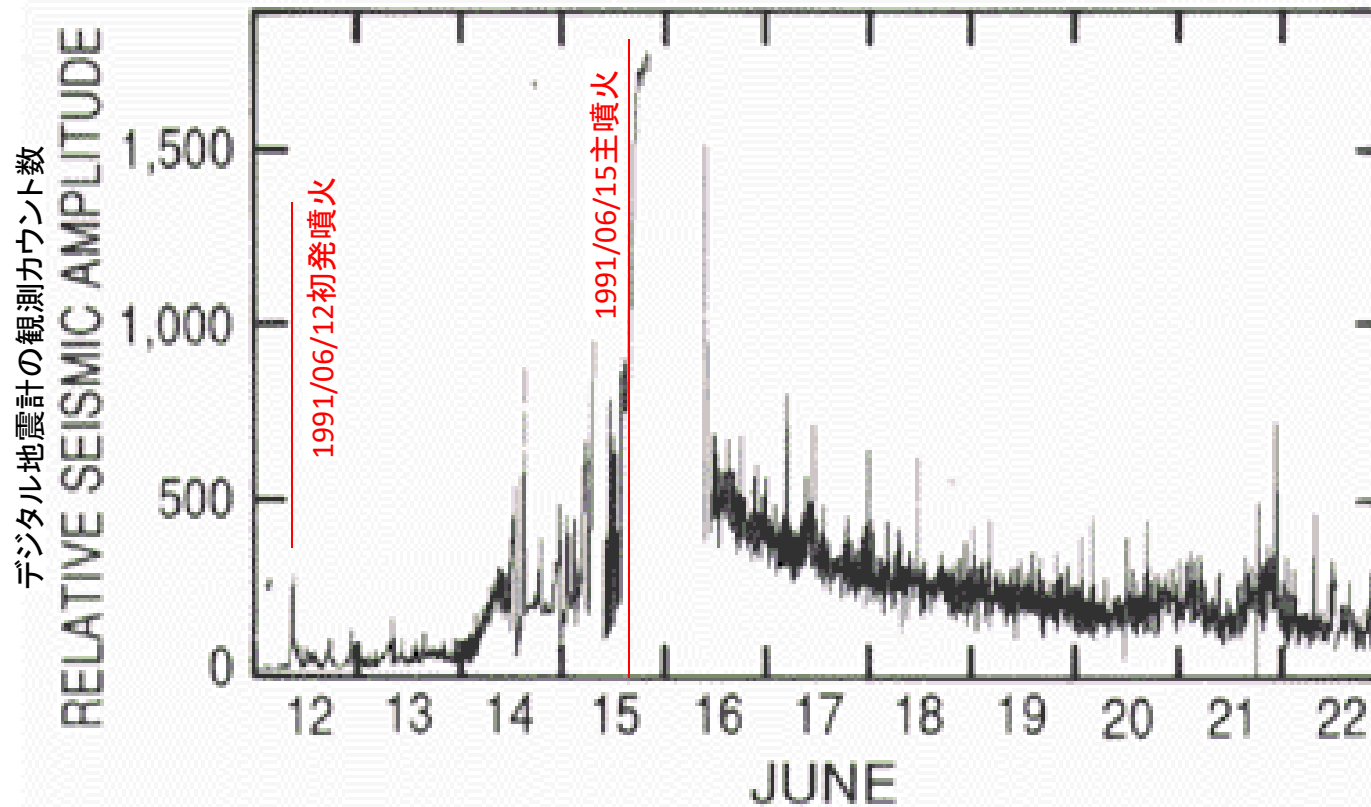
ピナツボ(4/6)

地震

-主噴火の前の現象(2)-

原子炉火山部会 第3回会合(平成30年
4月13日開催) 資料3、再掲

主噴火の前日から地震が漸増し、6月15日13:42に地震計が振り切れ主噴火が始まった。(Wolfe and Hoblitt 1996)



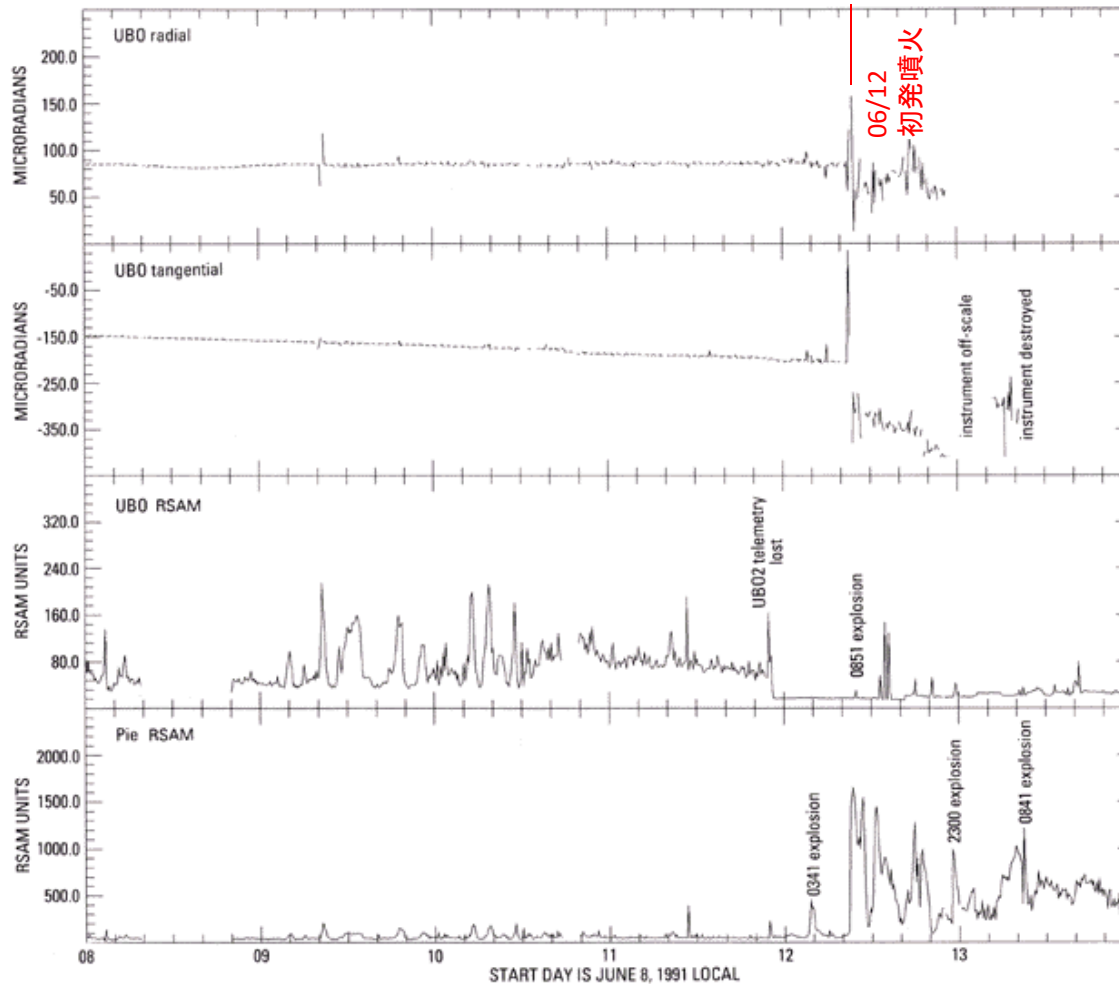
RSAM (realtime seismic-amplitude measurement; Endo and Murray, 1991) data for period of June 12-22, 1991. Vertical axis shows digital counts representing time-averaged voltage from the output of the seismic-data acquisition system. Plot shows individual explosions (compare with fig. 10) and, especially on June 14, increasing seismic-energy release related to increasing size and number of long-period earthquakes. There are no data for late June 15 and early June 16. Exponentially decreasing seismicity on and after June 16 reflects diminishing number and size of earthquakes recording structural adjustment of the volcano and the rock beneath it. (Wolfe and Hoblitt 1996)

ピナツボ(5/6)

-主噴火の前の現象(3)-

原子炉火山部会 第3回会合(平成30年
4月13日開催) 資料3、再掲

地殻変動と地震動



1991年6月8日～13日の傾斜と地震動

図の上2段が傾斜計観測値、下2段が地震動観測値。4・5月と異なり初発噴火の直前1週間は、傾斜計に目立った変化がなかった。その一方、地震動は活発。(Evert et al. 1996)

Last 5 days of operation of the UBO tiltmeter with Real-time Seismic Amplitude Measurement (RSAM) data from UBO and PIE (fig.1) seismometers, east side of Mount Pinatubo. Note generally flat tilt from June 8 through June 11 compared to RSAM data on same days. Peaks in RSAM data correspond to periods of tremor. (Evert et al. 1996)

ピナツボ(6/6)

引用文献

原子炉火山部会 第3回会合(平成30年
4月13日開催) 資料3、再掲

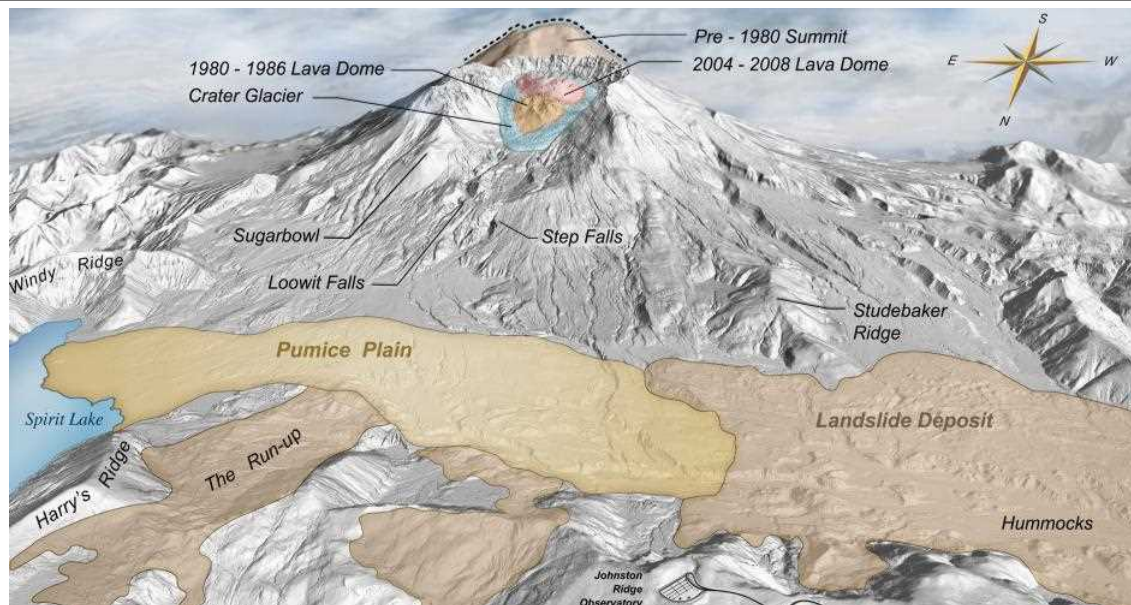
- Ewert J.W., Lockhart A., Marcial S., and Ambubuyog G. (1996) Ground deformation prior to the 1991 eruptions of Mount Pinatubo. Newhall C. and Punongbayan R. (Eds), Fire and Mud, <https://pubs.usgs.gov/pinatubo/ewert/>
- Hoblitt R., Wolfe E., Scott W., Couchman W., Pallister J., and Javier D. (1996) The Preclimactic Eruptions of Mount Pinatubo, June 1991. Newhall C. and Punongbayan R. (Eds), Fire and Mud, <https://pubs.usgs.gov/pinatubo/hoblitt2/>
- 小屋口剛博・徳野正己・Eddie LISTANCO (1991) フィリピン, ピナツボ火山の噴火, 1991年6月15日. 火山, 36, 447-451.
- Newhall C., Hendley J.II, and Stauffer P. (1997, 2005) The Cataclysmic 1991 Eruption of Mount Pinatubo, Philippines. U.S. Geological Survey Fact Sheet 115-97.
- Newhall C. and Punongbayan R. (Eds) (1996) Fire and Mud: Eruptions and Lahars of Mount Pinatubo, Philippines, University of Washington Press, 1126p.
- 大倉敬宏・安藤雅孝(1994) 1991年ピナツボ火山噴火は1990年フィリピン地震に引き起こされたか? 地学雑誌, 103, 464-470.
- Pinatubo Volcano Observatory Team (1991) Lessons from a major eruption: Mt. Pinatubo, Philippines. EOS, 72, 545; 552-555.
- Wolfe E. and Hoblitt R. (1996) Overview of the Eruptions. Newhall C. and Punongbayan R. (Eds), Fire and Mud, <https://pubs.usgs.gov/pinatubo/wolfe/>

セントヘレンズ(1/7)

-噴火の概要-

原子炉火山部会 第3回会合(平成30年
4月13日開催) 資料3、再掲

- 初発噴火1980年3月27日UT
 - ✓ 水蒸気噴火
- 主噴火1980年5月18日08:32(15:32UT)
 - ✓ M5.1地震により山頂溶岩ドームで巨大地すべり2.8km³が発生、水蒸気爆発からプリニー式噴火を急激に誘発
 - ✓ プリニー式噴火 VEI:5
 - ✓ 噴煙柱高度 20 km<
 - ✓ Lateral blastが火口から20-30km、火砕流が8 km、融雪火山泥流が80km到達
 - ✓ 降灰量520百万トン面積600km²

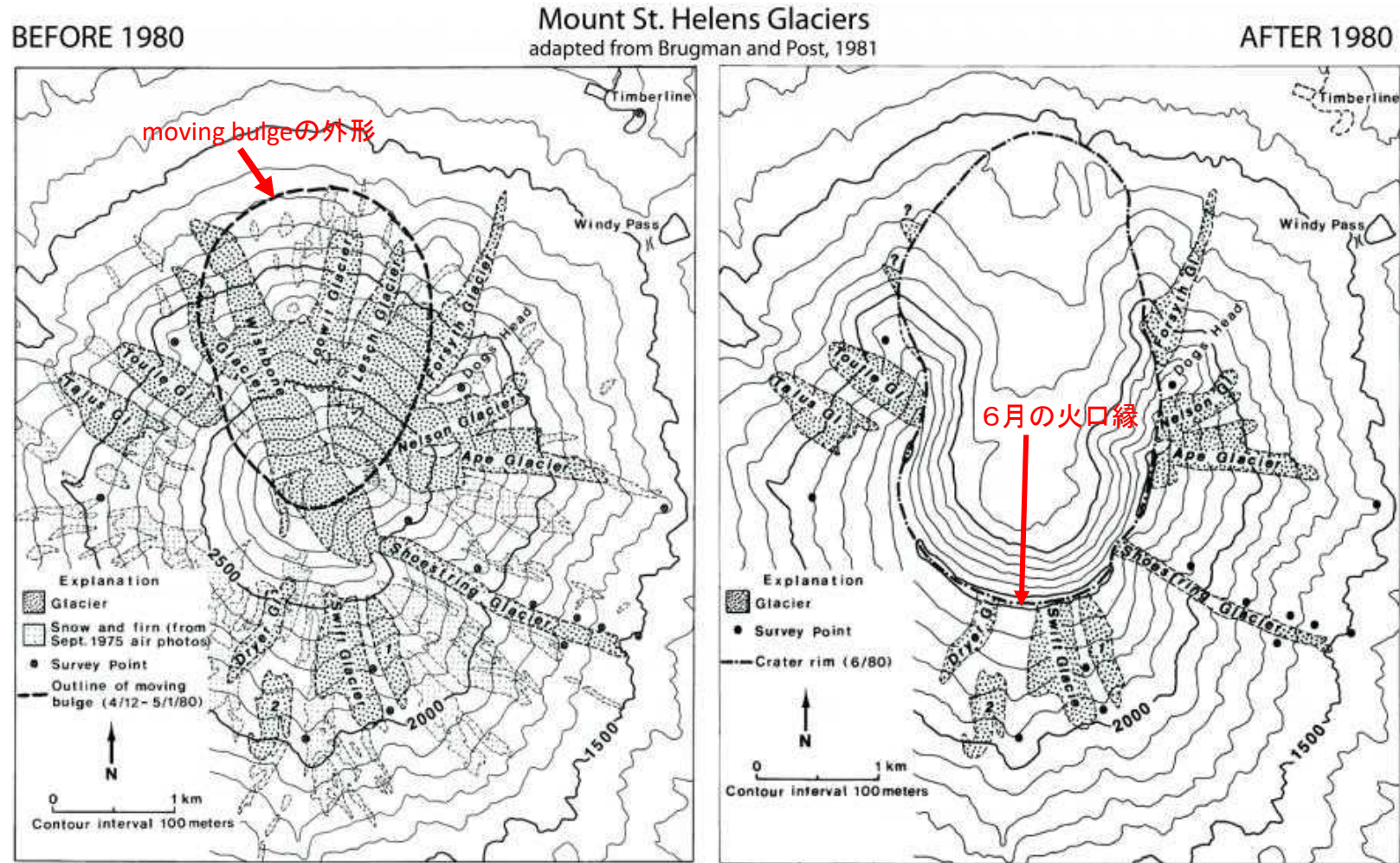


2008年の地形・堆積物の概況(USGS HP)

セントヘレンズ(2/7)

-噴火の概要(火口の変遷)-

原子炉火山部会 第3回会合(平成30年
4月13日開催) 資料3、再掲



1980年5月18日主噴火前のmoving bulgeの外形と噴火後の火口縁(USGS HP)

セントヘレンズ(3/7)

-主噴火前に観測された現象(概要)-

原子炉火山部会 第3回会合(平成30年
4月13日開催) 資料3、再掲

- 1980/03/15～03/20 地震徐々に増加。
- 1980/03/20UT マグニチュード4.2の地震を火山直下浅部に初観測し、その後小規模構造性地震が漸増。
- 2日前にマグニチュード2.6以上の地震急増。
- **初発噴火**(1980/03/27UT) に地震数ピークとなり以後主噴火まで地震の総数は漸減するが規模の大きなものの割合が増える。この間の群発地震は、規模が大きく浅く、急な立ち上がりの初動P波を有するが明瞭なS波を欠く(遠地観測点では高周波成分が減衰)
- **主噴火**(1980/05/18,08:32(15:32UT))

(Endo et al., 1981)

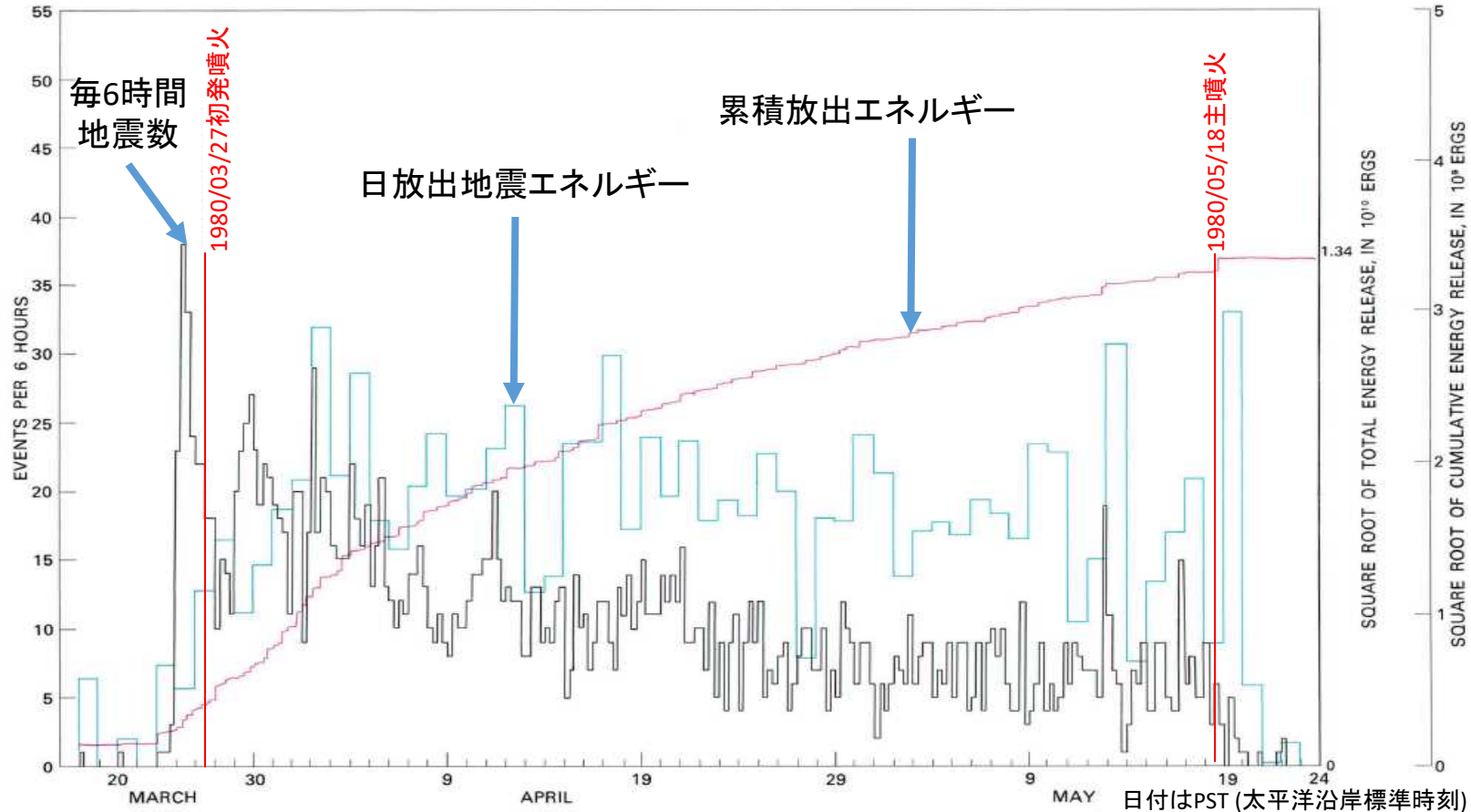
※傾斜計には明瞭な主噴火前後の変化を認めず

(Dvorak et al., 1981)

セントヘレンズ(4/7)

-主噴火前に観測された現象(地震)-

原子炉火山部会 第3回会合(平成30年
4月13日開催) 資料3、再掲



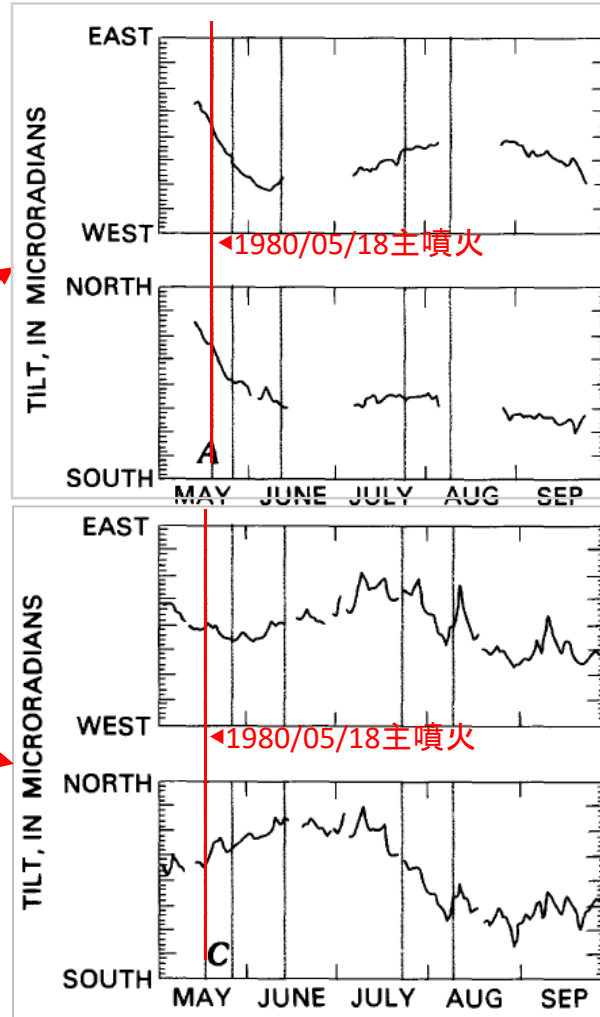
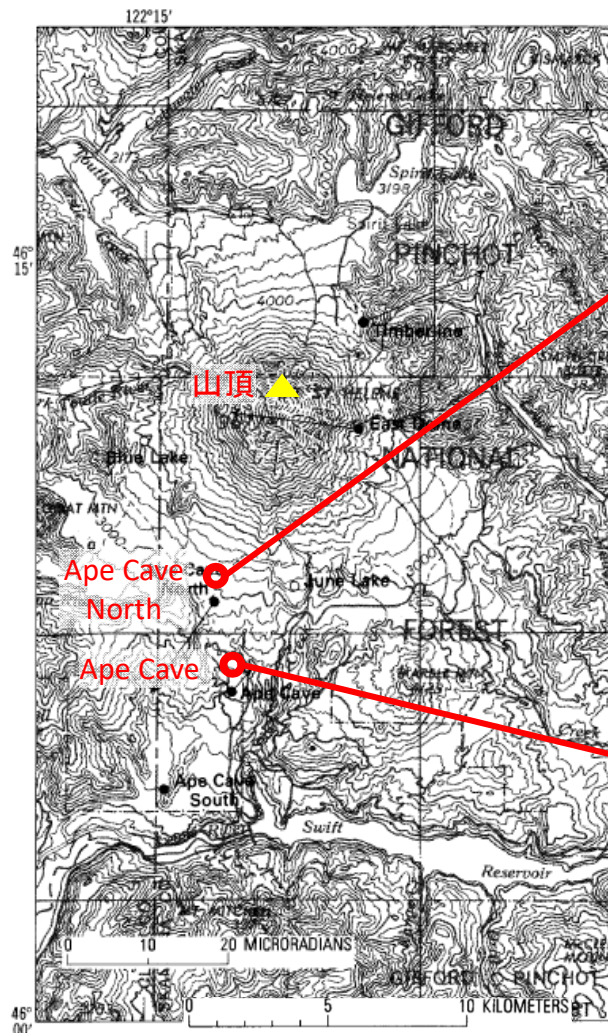
1980年3月20日から5月24日(UTC)までのマグニチュード2.5より大きな地震数(黒線)、日放出地震エネルギー(青線)及び累積放出エネルギーの平方根(赤線)。放出エネルギーの増加から、3月27日の初発噴火以後、大きなマグニチュードの地震が増えていることが図からわかる。5月24日の総放出エネルギーの平方根は 1.34×10^{10} ergs。(Endo et al., 1981)

Figure 54.—Counts of earthquakes larger than magnitude 2.5 (black line), daily earthquake energy release (blue line), and square root of cumulative energy release (red line) from March 20 to May 24, 1980, UTC. The plot emphasizes significant increase in large-magnitude earthquakes after first eruption on March 27, as indicated by increase of energy release. Square root of total energy release, as of May 24, was 1.34×10^{10} ergs.

セントヘレンズ(5/7)

-主噴火前に観測された現象(傾斜計)-

原子炉火山部会 第3回会合(平成30年
4月13日開催) 資料3、再掲



日付はPST(太平洋沿岸標準時刻)

セントヘレンズ山周辺の3ステーションでの傾斜(2方向)の日平均。東または北への下向き傾斜を正とする。縦の線は主たる噴火活動を示す。データの隙間は使用可能なデータが得られなかった時期を示す。A. Ape Cave Northステーションからのデータ、C. Ape Caveステーションからのデータ。

なお、図B (June Lakeステーションからのデータ)は主噴火前後のデータが無いことから、引用を省略した。

“No long-term changes in tilt are directly associated with major eruptive activity including the large May 8 eruption.”とされる。

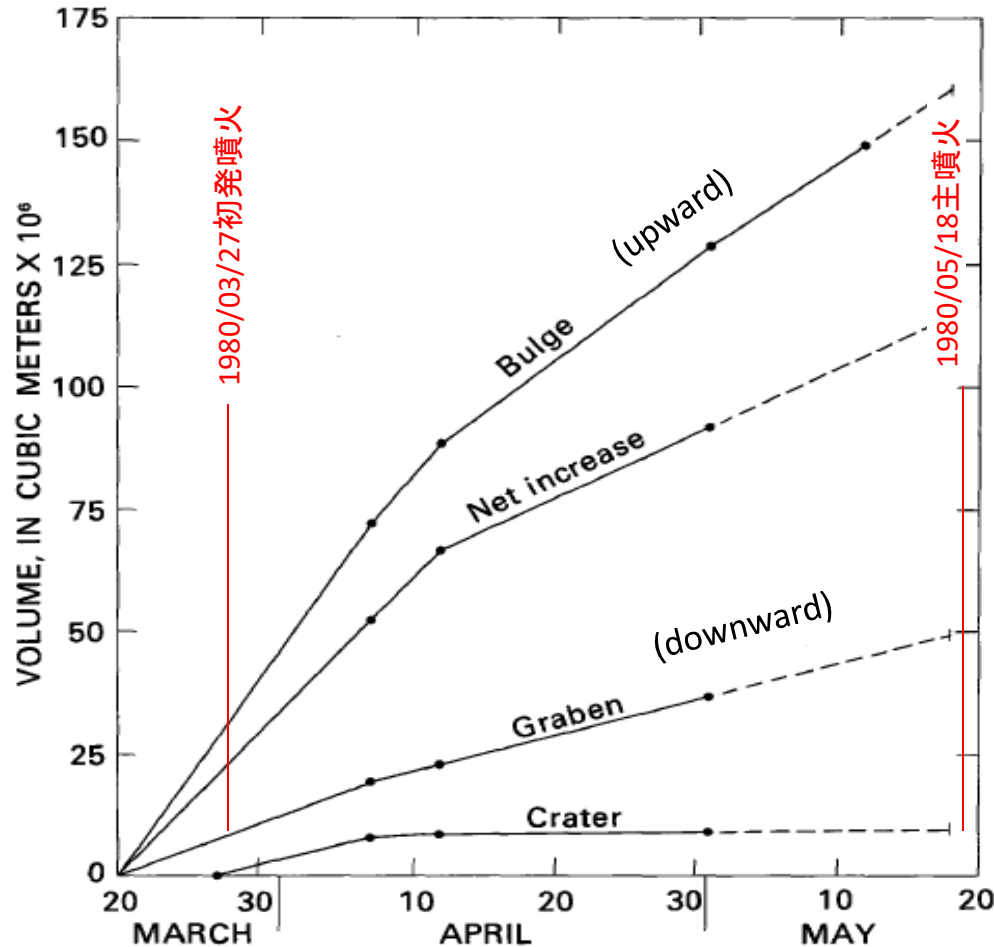
(Dvorak et al., 1981)

Figure 103.—Daily averages of tilt (in two directions) at each of three stations near Mount St. Helens. A downward tilt to east or north is defined as positive. Vertical lines indicate major eruptive activity. Gaps in the data indicate times when no usable data were collected. A, data from Ape Cave North station; B, from June Lake station; C, from Ape Cave station.

セントヘレンズ(6/7)

-主噴火前に観測された現象(写真測量)-

原子炉火山部会 第3回会合(平成30年
4月13日開催) 資料3、再掲



日付はPST (太平洋沿岸標準時刻)

Figure 71.—Volume changes of Mount St. Helens, March 20 to May 18, 1980. Dashed lines are estimates (where features are not discernible on photos due to cloud cover).

1979年8月(噴火前)、1980年4月7日、4月12日、5月1日、5月12日、6月1日の航空写真をもとに地図を作成。
標高の絶対誤差は20 ft、地図間の相対誤差は5 ft以下と見積もられている。

これをもとに1980年3月20日から5月18日までのセントヘレンズ火山の体積の変化を示す。破線は推定(雲により写真判読不能)。

成長速度曲線を過去に投影すると、3月20日の地震活動開始より前に膨張(Bulge growing)は開始していなかったことが示唆される。

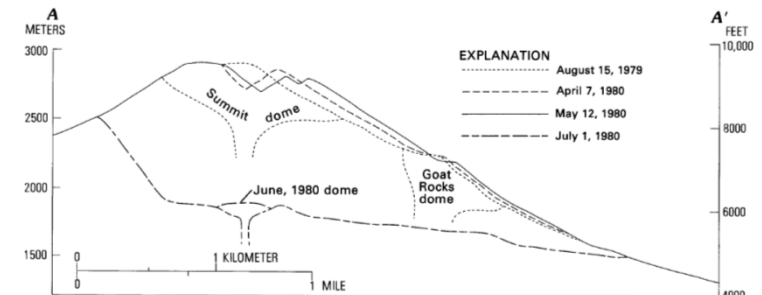


Figure 73.—South-north profiles of Mount St. Helens, August 1979 to July 1980. Scale slightly reduced from figure 68.

山頂を通る時系列南北断面

(Moore and Albee, 1981)

ピナツボ(7/7)

引用文献

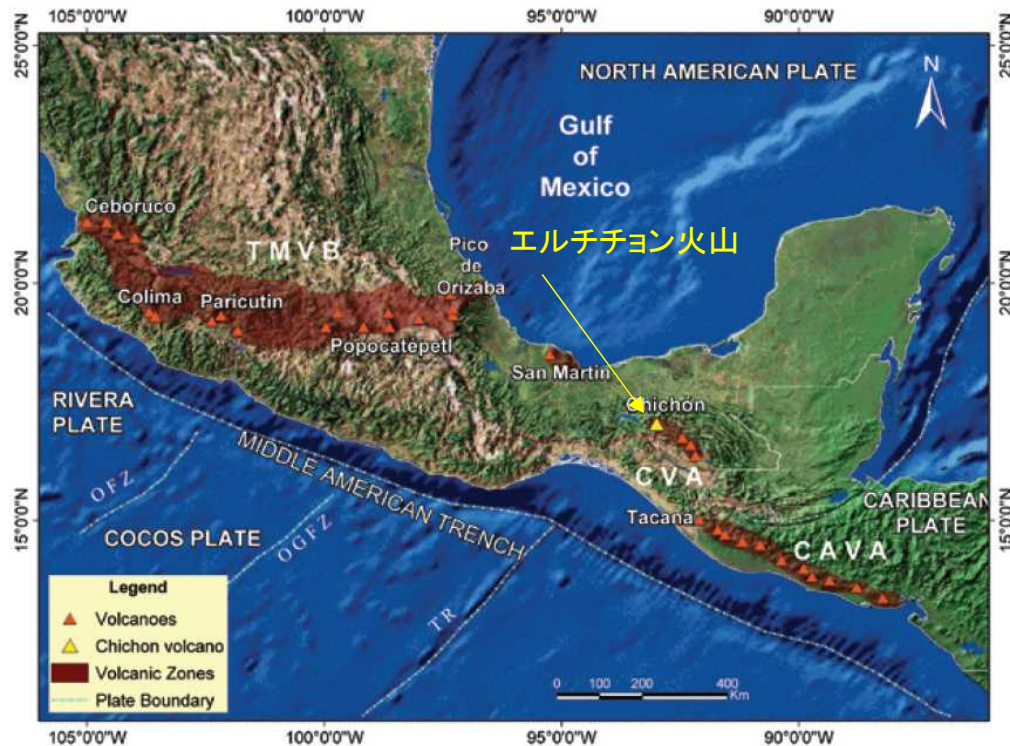
原子炉火山部会 第3回会合(平成30年
4月13日開催) 資料3、再掲

- Brantley, S. and Myers, B. (2000) Mount St. Helens—From the 1980 Eruption to 2000. USGS Fact Sheet, 036-00.
- Christiansen, R. and Peterson, D. (1981) Chronology of the 1980 eruptive activity. Lipman P. and Mullineaux D. (eds), USGS Professional Paper, 1250, 17-30.
- Dvorak, J., Okamura, A., Mortensen, C. and Johnston, M. J. S. (1981) Summary of electronic tilt studies at Mount St. Helens. Lipman P. and Mullineaux D. (eds), The 1980 eruptions of Mount St. Helens, Washington, USGS Professional Paper 1250, 169-174.
- Endo, E., Malone, S. D., Noson, L.L. and Weaver, C. S. (1981) Locations, magnitudes, and statistics of the March 20 - May 18 earthquake sequence. Lipman P. and Mullineaux D. (eds), The 1980 eruptions of Mount St. Helens, Washington, USGS Professional Paper 1250, 93-107.
- Lipman, P. and Mullineaux, D. (eds)(1981) The 1980 eruptions of Mount St. Helens, Washington. USGS Professional Paper 1250, 844p.
- Moore, J. G. and Albee, W. C. (1981) Topographic and structural changes, March - July 1980—photogrammetric data. Lipman P. and Mullineaux D. (eds), The 1980 eruptions of Mount St. Helens, Washington, USGS Professional Paper 1250, 123-134.

エルチチョン(1/7)

-噴火の概要-

原子炉火山部会 第3回会合(平成30年
4月13日開催) 資料3、再掲



エルチチョン火山の位置 (Limon-Hernandez and Macias, 2009)

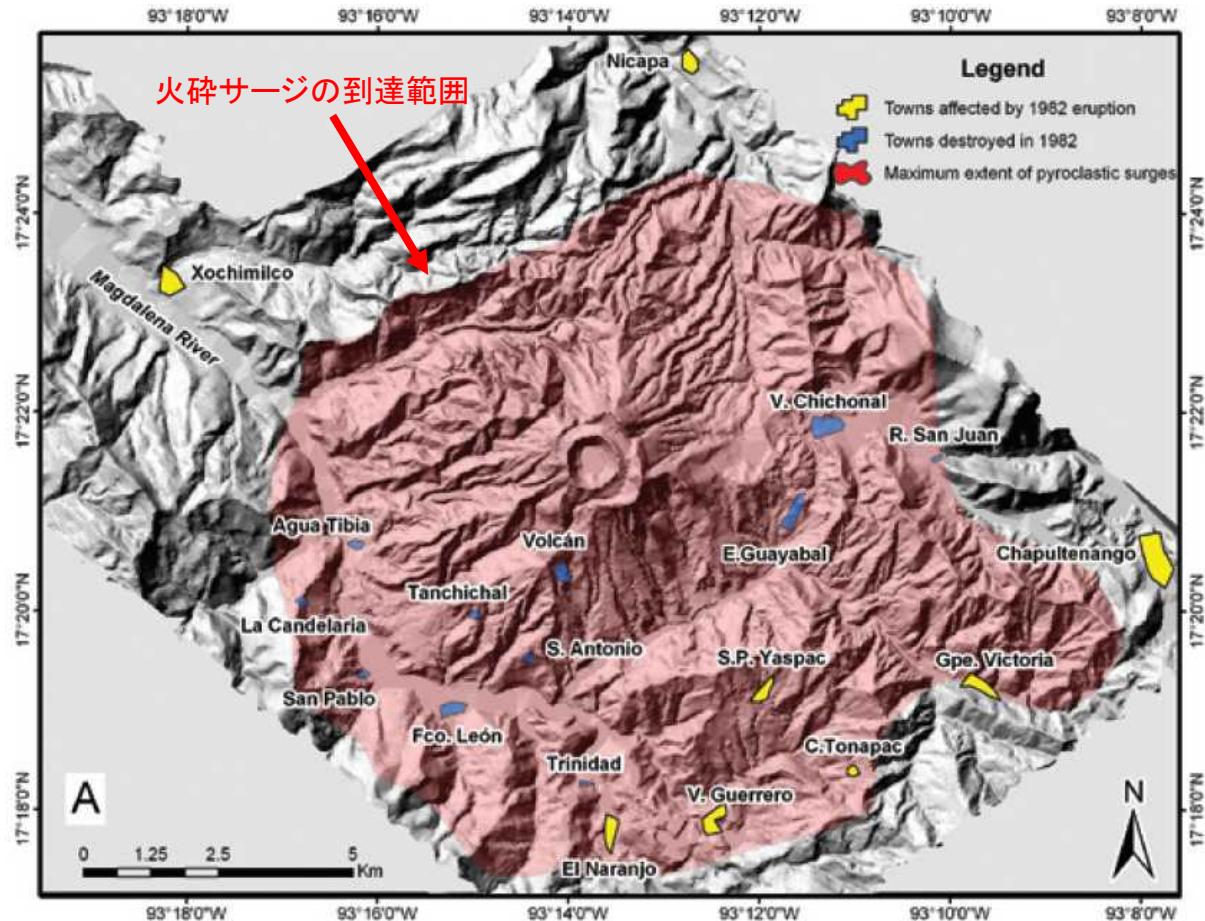
- 初発噴火1982年3月29日 UT
 - ✓プリニー式噴火
 - ✓噴煙柱高度 18.5 km
 - ✓火砕流及びサージ 無し
 - ✓降灰 30,000 km²
- 主噴火1982年4月4日 UT
 - ✓プリニー式噴火
 - ✓噴煙柱高度 32 km
 - ✓火砕流及びサージ 火口から10 km到達、面積 100 km²覆う
 - ✓降灰 0.5 mmの等層厚線最大距離 320 km

Fig. 1. Tectonic setting of southern Mexico and Central America showing the Cocos, North America and Caribbean plates. El Chichón volcano located in southern Mexico, represents the active volcano of the Chiapanecan Volcanic Arc (CVA). Other important volcanic and structural features are found in the Trans-Mexican Volcanic Belt (TMVB), and the Central America Volcanic Arc (CAVA). Other abbreviations are: OFZ = Orozco Fracture Zone, OGFZ = O'Gorman Fracture Zone, and TR = Tehuantepec Ridge.

エルチヨン(2/7)

-噴火の概要(火砕サージ)-

原子炉火山部会 第3回会合(平成30年
4月13日開催) 資料3、再掲



1982年4月4日主噴火の火砕流及びサージにより完全または部分的に消滅した町。
B及びCは引用を省略。(Limon-Hernandez and Macias, 2009)

Fig. 3. A) Digital elevation model of El Chichón volcano, showing the towns that were completely or partially obliterated by pyroclastic flows and surges produced on April 3, 1982. B) Aerial view of the total destruction of the town of Francisco León and remains of the church. Photograph by Rosa Plá Cortés taken in April 1982. C) Aerial view from the west of the town of Chapultenango, showing the collapse roofs of the church and some houses. Photograph by Federico Fregoso, April 1982.

エルチヨン(3/7)

-噴火の概要(降灰)-

原子炉火山部会 第3回会合(平成30年
4月13日開催) 資料3、再掲



1982年3月から4月にまたがる1週間の噴火による降灰の0.5 mm等層厚線 (De la Cruz-Reyna and Martin Del Pozzo, 2009)

Fig. 1. Location of El Chichón in southeastern Mexico. The line shows the 0.5 mm isopach produced by ashfall from the week-long eruption in March-April 1982.

エルチヨン(4/7)

-主噴火前に観測された現象(地震)-

- 1981/01 ~ Hybrid type地震
- 7日前 ~ LP type (群発あり) 混じる
- 1時間前 静穏期
- 初発噴火(1982/03/29UT) ~ LP type (群発あり)、VT type、静穏期混じる
- 1.5時間前 静穏期
- 主噴火 (1982/04/04UT)

(Jumenez et al. , 1999)

1982年エルチヨン火山噴火に関する地震活動における典型的な地震波形と分類名

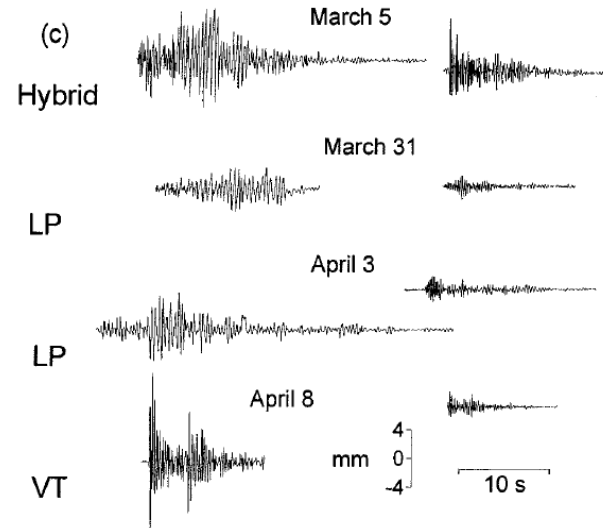
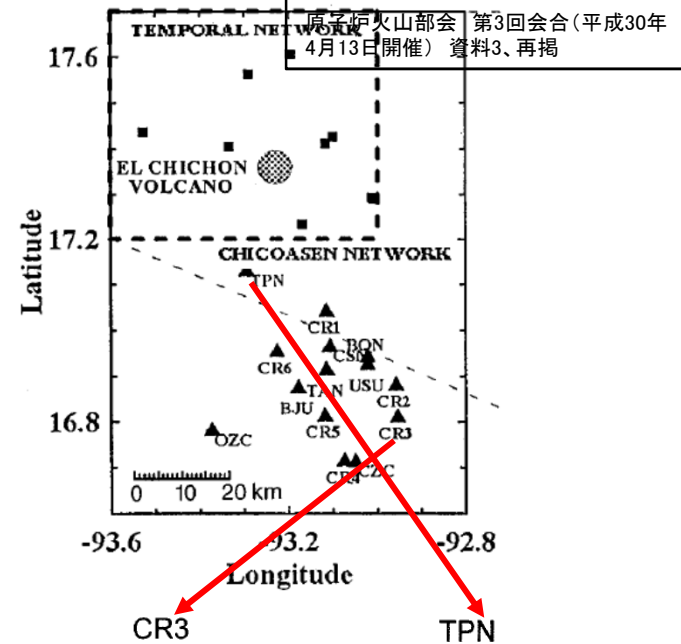
LP type: 急な立ち上がりの初動はあるが明瞭なS波が無い継続時間が長い地震、

VT type: 短周期成分を含む構造的な地震、

Hybrid type: LPとVT両方の特徴を有する地震。

(a)及び(b)は引用を省略。

Fig. 3 Typical earthquakes from the seismic activity related to the 1982 eruptions of El Chichón Volcano. Nomenclature after: (a) Havskov et al. (1983); (b) Yokoyama et al. (1992); (c) this paper following Lahr et al. (1996)

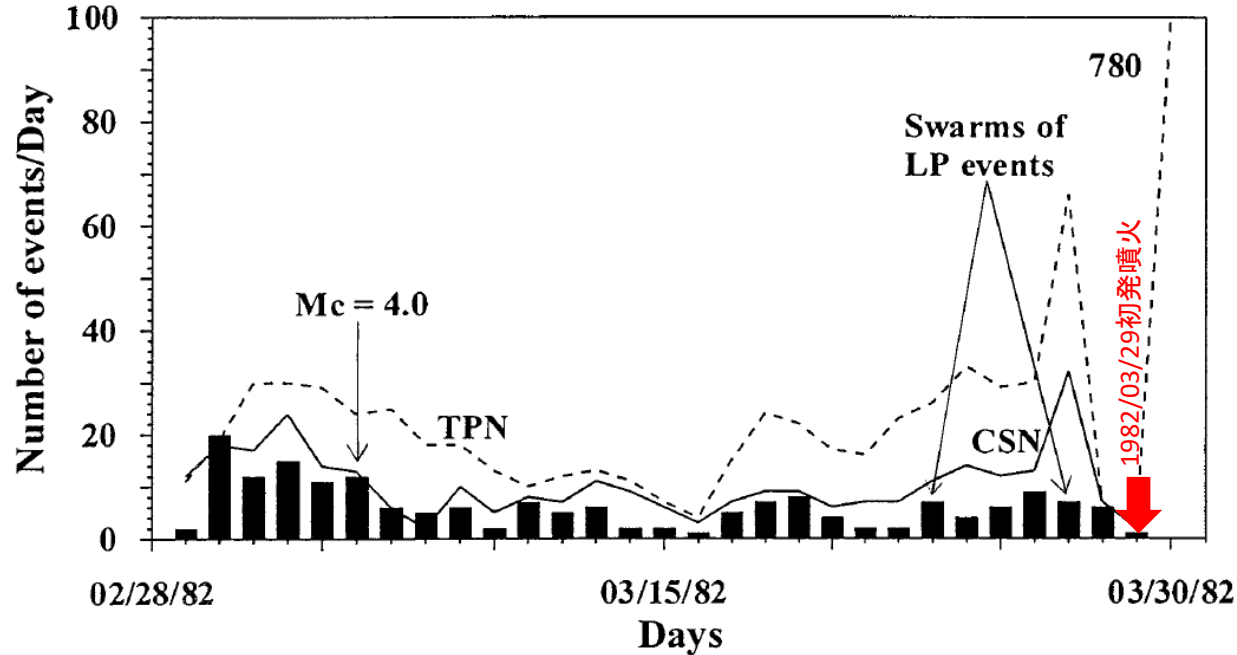


(Jumenez et al. (1999))

エルチヨン(5/7)

-主噴火前に観測された現象(初発噴火まで)-

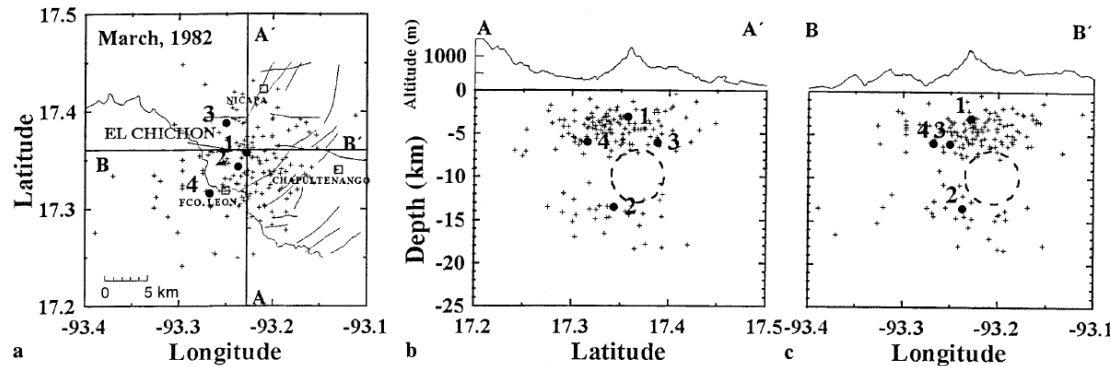
原子炉火山部会 第3回会合(平成30年
4月13日開催) 資料3、再掲



3月1日~28日のTPNステーション
(破線 $M_c > 1$)、CSNステーション(実
線 $M_c > 2$)及び震源決定された(棒
グラフ)地震数

Fig. 8 Number of events re-
corded by TPN ($M_c > 1$) and
CSN ($M_c > 2$) stations (*dashed*
lines and *solid lines*, respec-
tively) and located events
(*bars*) between 1 and 28
March 1982

日付は UT



3月1日~29日の震源 ($M_c > 1.8$) 分布

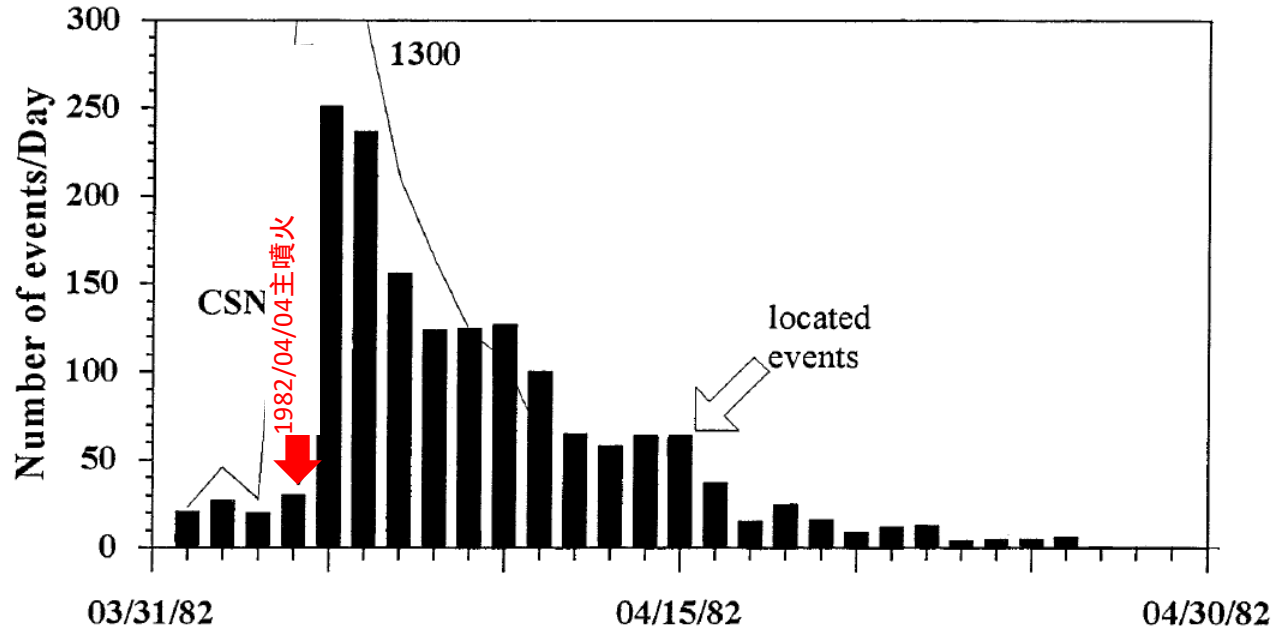
Fig. 10a-c. Foci of seismic events of El Chichon volcano ($M_c > 1.8$), from 1 to 29 March 1982. Most of the events were southeast of the volcano at depths between 7 and 13 km. Numbers 1-4 show the foci of the largest earthquakes. The *lines* in the plan view are the major faults in the area (after A. García-Palomo, unpublished data)

(Jumenez et al. (1999))

エルチヨン(6/7)

-主噴火前に観測された現象(主噴火前後)-

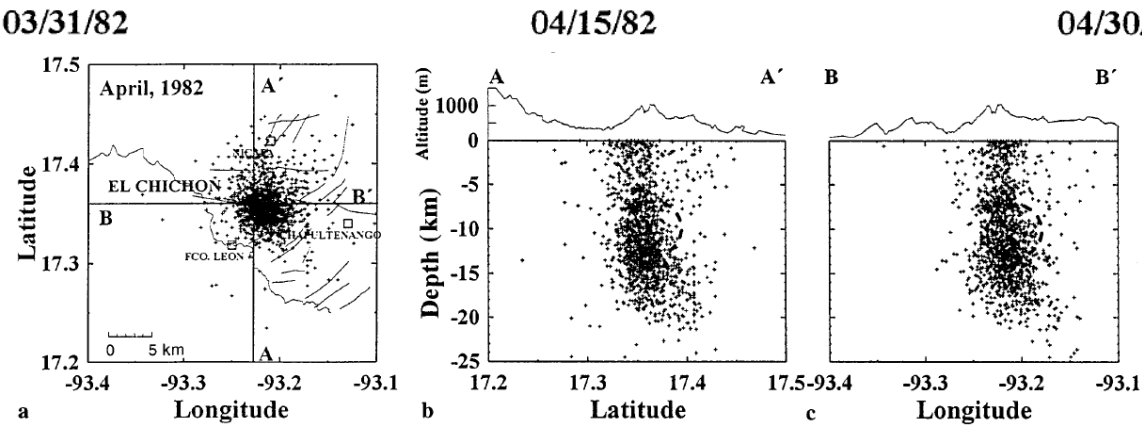
原子炉火山部会 第3回会合(平成30年
4月13日開催) 資料3、再掲



4月のCSNステーション(実線 $M_c > 2$)
及び震源決定された(棒グラフ)地
震数

Fig. 12 Histogram of the post-
eruptive seismic activity of El
Chichon volcano during April
1982. *Continuous line* events
detected by CSN ($M_c > 2$).
Bars events located with the
temporal network ($M_c > 0.7$)

日付は UT



4月4日~27日の震源 ($M_c > 1.0$) 分布

Fig. 13 Foci of 1523 volcano-tectonic events ($M_c > 1.0$) located
after the last eruption of El Chichon volcano (4-27 April 1982)

(Jumenez et al. (1999))

エルチチョン(7/7)

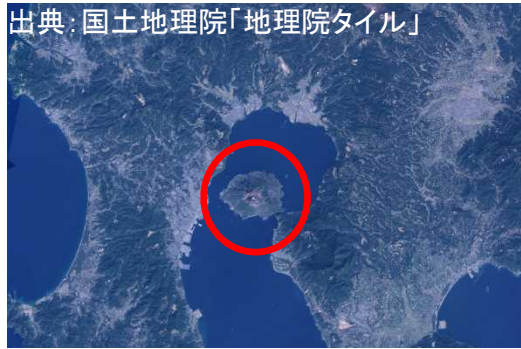
引用文献

原子炉火山部会 第3回会合(平成30年
4月13日開催) 資料3、再掲

- De laCruz-Reyana, S. and Martin Del Pozzo, A. L. (2009) The 1982 eruption of El Chichon volcano, Mexico: Eyewitness of the disaster, *Geofisica Internacional*, 48 (1), 21–31.
- Jimenez, Z., Espindola, V. H. and Espindola, J. M. (1999) Evolution of the seismic activity from the 1982 eruption of El Chichon volcano, Chiapas, Mexico, *Bull. Volcanol.*, 61, 411–422.
- Limon-Hernandea, C. and Macias, J.L. (2009) Volcanic hazards and risk perception at the “Zoque” community of Chapultenango: El Chichon volcano, Chiapas, Mexico, *Geofisica Internacional*, 48 (1), 113–132.

桜島(1/5)

出典: 国土地理院「地理院タイル」

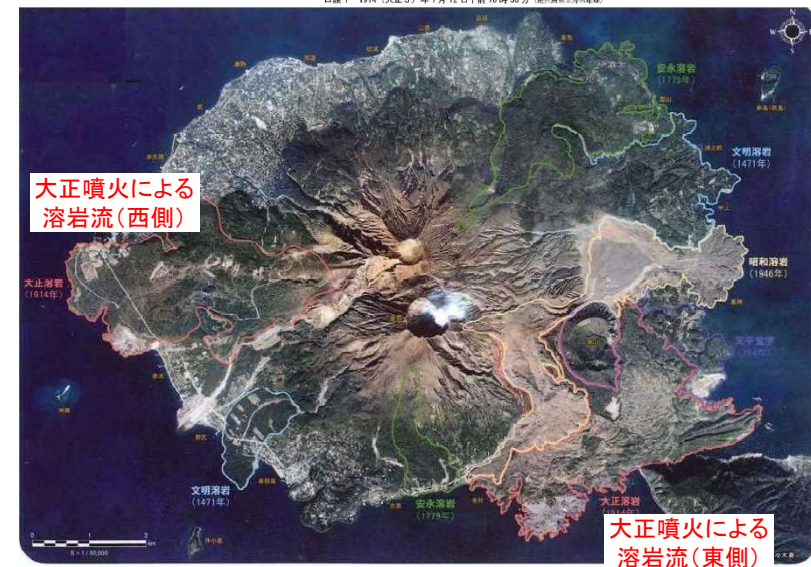


-1914年桜島大正噴火の概要-

- 1914年1月12日 10:05JST(1:05UT)
- プリニー式噴火 VEI4 (2 km³)
- 噴煙柱高度 10 km
- 溶岩流出
 - 東西方向に最大4.8km流れる
 - 体積 1.34 km³



口絵 14 桜島全景(2010年2月撮影)(提供:国土交通省大隅河川国道事務所)



口絵 13 桜島の年代別溶岩流の分布
(画像:国際航業(株)、溶岩分布図:小林哲夫・佐々木寿)

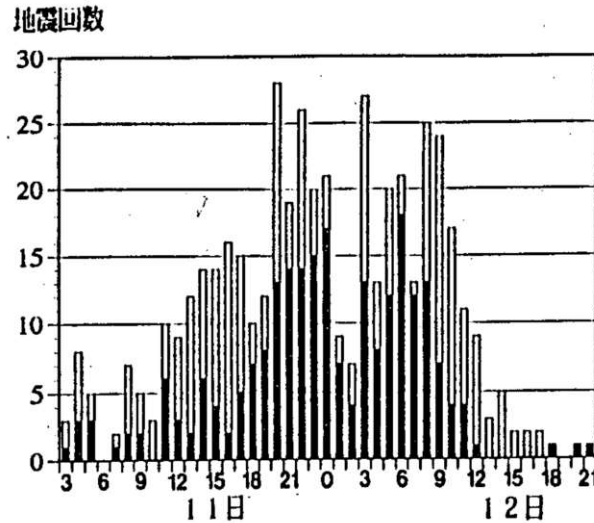
桜島

- 鹿児島湾(錦江湾)最北部にある
始良カルデラ南縁部に生じた成層火山
- 3峰(北岳, 中岳, 南岳)と
側火山(権現山, 鍋山, 引ノ平など)からなる

桜島(2/5)

噴火前の地震活動 -噴火数日前から噴火開始当日-

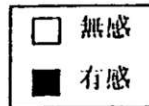
原子炉火山部会 第3回会合(平成30年
4月13日開催) 資料3、再掲



第1図 大正3年の桜島大噴火の前兆地震の推移(大森のデータに基づく) 1月11日から12日にかけての地震回数
(宇平, 1994; Omori(1920)のデータによる)

※1914年大正噴火における最大地震 噴火開始から約8時間半後に発生

- 1914/01/12 18:29
- 震源: 桜島付近
- M7程度
- 最大震度: 6



1914年大正噴火前の地震

(Omori, 1920; 宇平, 1994; 林, 2003)

- 前日の1月11日3時以降の火山性地震の群発
※桜島島内では9日16時以降に有感地震?(山科, 1998)
 - 記録された初発地震: 1914/01/11 AM 3:41
 - 噴火開始12日10:05までに420回の地震
 - 無感地震と有感地震との日はほぼ1:1
 - 一時的に有感地震が上回る

表3 大正噴火に先立つ地震活動の推移-震度からの推定と表面波マグニチュードの比較-

期間	年月日・時刻 ¹⁾	体感された地震動から推定した地震活動の状況 ²⁾³⁾	主な地震について地震計から求められた表面波マグニチュード ³⁾⁴⁾
I	1914年1月 9日16時頃~10日 [約2~3日前]	マグニチュード(M)2級以下の地震の活動	なし
II	11日午前[約1日前]	M5程度の地震1回, M4程度の地震数回を含む地震活動	04時03分 Ms4.8, 05時09分 Ms5.0 10時03分 Ms5.1
III	11日午後[約半日前]	M5程度の地震数回, M4程度からM4級の地震十数回を含む地震活動	12時48分 Ms4.9, 15時01分 Ms4.9 18時29分 Ms5.0, 20時29分 Ms5.0 21時14分 Ms5.1, 22時29分 Ms4.9
IV	12日10時まで [噴火直前数時間]	M4級の地震数回, M3級の地震十回程度を含む地震活動.	06時09分 Ms5.2, 08時33分 Ms5.0

1) [括弧内]は、噴火開始時との時間。

2) M〇級は小数点以下を切り捨てて、M〇程度とは小数点以下を四捨五入して、M〇となる地震の規模。

3) ゴシック体は鹿児島測候所で震度5(当時の震度階級を表1により換算)を観測した地震。期間IIIについては、「M5程度の地震数回」のうちの1回が震度5。最右列の地震との対応は、Abe(1979)には明示されておらず、3.5に示した解釈による。

4) Abe(1979)による。表2の時刻とは数分のずれがあると考えられる。

(林, 2003)

桜島(3/5)

-噴火後の地殻変動(比高)-

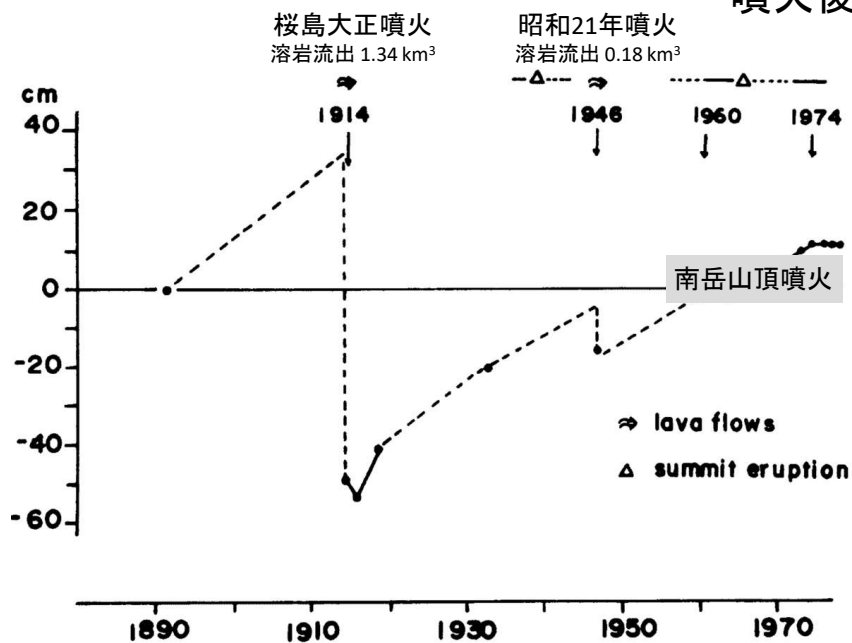


Fig. 1. Change of height of BM.2474 referred to BM.2469 shown in Fig. 2.

1914年大正噴火後の地殻変動

宇平(1994)より

- 著しい平均海面の上昇
i.e.鹿児島湾で著しい沈降
鹿児島港(右図の地点K)
- 噴火後3カ月: 約 40 cm
- 翌1915年2月: 約 70 cm

1965~1976年における桜島の地殻変動

山頂噴火活動が活発化すると

- 活発化 → 上昇傾向
- 最盛期 → 上昇停止
- 静穏化 → 若干下降

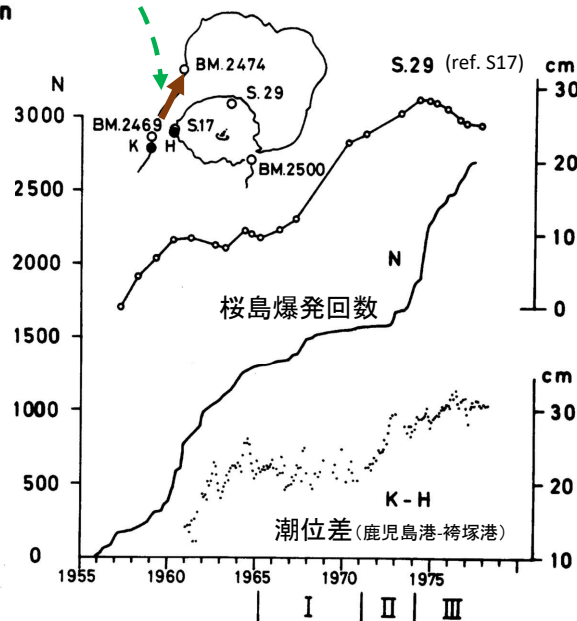


Fig. 2. Change of height of BM.S29 referred to BM.S17 (upper), accumulated numbers of volcanic explosions at the summit crater of Sakurajima Volcano (middle) and differences between the monthly mean sea level at Hakamagoshi harbor and that at Kagoshima harbor, represented by K-H (lower). The increase of K-H means that the ground of Hakamagoshi uplifts relatively to that of Kagoshima.

原子炉火山部会 第3回会合(平成30年4月13日開催) 資料3、再掲

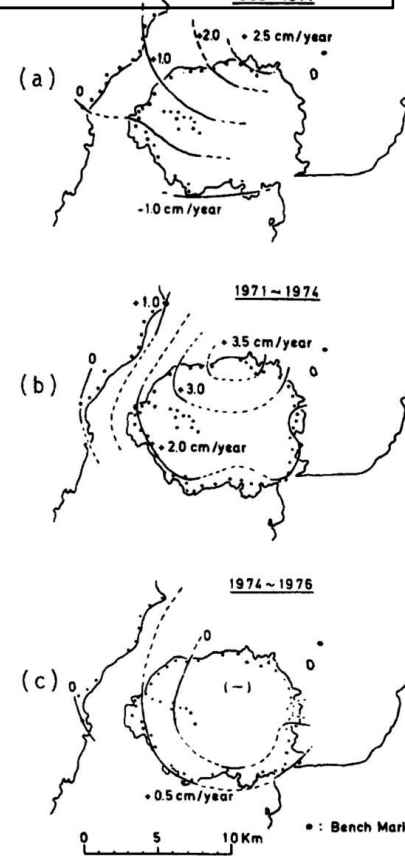


Fig. 3. Distributions of the rates of vertical displacements around Sakurajima Volcano in each period shown in Fig. 2.

桜島(4/5)

Curves are lines of equal depression respectively of 500; 300; 100; and 50 mm. The figures in red denote the height change: (-), depression; (+), elevation. The number enclosed in brackets is that of a B.M.

Fig. 42. Map showing the Differences in Height of the Bench-Marks in S. Kyushu before and after the Sakura-jima Eruption of 1914.

細島(水準測量の基準点)

原子炉火山部会 第3回会合(平成30年4月13日開催)資料3、再掲

-噴火前後の水準測量結果と潮位観測

大正噴火後の観測結果

- 水準測量(BM2469)
 - 1914/07: 40.7cm沈降
 - 1915/02: 41.1cm沈降
- 潮位(鹿児島港): vs. 1903-1905の月別平均
 - 1915/02: 68.2cm上昇(vs. 1903-05/02平均)

これらの観測結果の差異が桜島大正噴火前の地盤の上昇を示唆

大正噴火前の潮位

- 1909年には1903-1904年に対し6cm低下

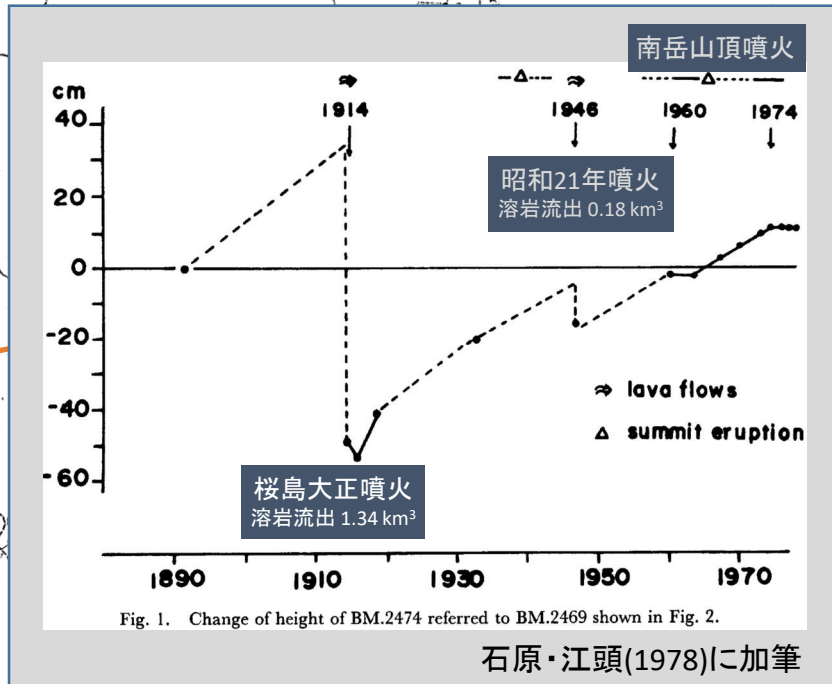


Fig. 1. Change of height of BM.2474 referred to BM.2469 shown in Fig. 2.

石原・江頭(1978)に加筆

大正噴火後における50cm沈降の等高線

大正噴火後における30cm沈降の等高線

Boundary of provinces.

Omori(1916)

Scale. 10 20 30 km

桜島(5/5)

引用文献

原子炉火山部会 第3回会合(平成30年
4月13日開催) 資料3、再掲

中央防災会議「災害教訓の継承に関する専門調査会」(2010) 1914桜島噴火報告書, 169p.

国土地理院(2018) 地理院タイル <http://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html> (2018年2月20日取得)

林豊(2003) 大正三年桜島噴火に先立って発生した地震の規模の推定, 歴史地震, 第19号, 101-107.

石原和弘・江頭庸夫(1978) 桜島火山近傍の垂直地盤変動と山頂噴火活動の関係について, 京都大学防災研究所年報, 第21号B-1, 153-162.

Omori.F. (1916) The Sakura-jima Eruptions and Earthquakes. II. On the sound and Ash-precipitaion Areas of, and on the Level Change caused by, the Eruptions of 1914, with Historical Sketches of Earlier Sakura-jima Outbursts., Bull. Imp. Earthq. Inv. Comm., 8(2), 35-179.

Omori.F. (1920) The Sakura-jima Eruptions and Earthquakes. V. Seismographical Observations of the Fore-shocks, After-shocks, and After-outbursts of the Great Sakura-jima Eruption of 1914., Bull. Imp. Earthq. Inv. Comm., 8(5), 353-466.

宇平幸一(1994) 大正噴火以後の桜島の活動史, 験震時報, 第58巻, 49-58.

山科健一郎(1998) 資料からみた1914年桜島大正噴火の開始と噴火に先立つ過程, 火山, 第43巻, 第5号, 385-401.

観測事例の特徴について(1/4)

— 噴火に伴い観測された事象(地震活動) —

原子炉火山部会 第3回会合(平成30年
4月13日開催) 資料3、再掲

火山名	ピナツボ (フィリピン)	セントヘレンズ (米国)	エルチヨン (メキシコ)	桜島 (大正噴火)
地震活動	<ul style="list-style-type: none"> • 1年前の1990.7.16に山体の北東約100kmで、フィリピン地震(M7.8)が発生。ピナツボで地すべり・噴気・地震を生じたことが噴火の引き金になったとの見方がある。 • 4月2日の水蒸気噴火以降地震活動が始まり、<u>M3以下の火山性-構造性地震が40-140回/日。</u> • 5月から震源が浅くなり火山性微動も観測された。<u>震源は山頂の北北西5km深さ2-6km。</u> 	<ul style="list-style-type: none"> • <u>3月15日～20日地震が発生し、徐々に増加。3月20日にM4.2の地震が火山直下浅部に初めて観測され、その後小規模な構造性地震が漸増。</u> • <u>初発噴火(27日UT)2日前にM2.6以上の地震が急増。27日UTに地震発生数がピークとなり以後主噴火(5月18日UT)まで地震の総数は漸減するが規模の大きなものの割合が増える。この間の群発地震は、規模が大きく浅く、急な立ち上がりの初動P波を有するが明瞭なS波を欠く。</u> 	<ul style="list-style-type: none"> • 初発噴火までHybrid type(1981/01に最初の記録)、初発噴火7日前からLP type(群発あり、微動伴うことが多い)が混じりはじめ、初発噴火直前(1時間前)に静穏期あり、初発噴火後、主噴火までLP(群発あり)、VT type静穏期が混じりあい、主噴火直前に1.5時間の静穏期があった。 	<ul style="list-style-type: none"> • 1月9日(3日前)から桜島島内で有感地震が始まり、1月11日(前日)から鹿児島(鹿児島測候所)でも、地震が記録される。<u>噴火前までに、有感・無感合わせて420回の地震が記録された。</u> • <u>噴火直前には有感地震が減り、無感地震の割合が増えた。</u> • 噴火開始から約8時間半後(1月12日18:29)にM7クラスの地震発生。最大震度6(当時の基準で烈震)相当のゆれ。

➤ 地震活動は、噴火前に火山性-構造性の地震が発生し、事象の進展とともに多くなり、主噴火が近づくにつれて、震源が浅くなる傾向もみられる。監視項目としては、極めて有効な指標と考えられる。

観測事例の特徴について(2/4)

－噴火に伴い観測された事象(地殻変動)－

原子炉火山部会 第3回会合(平成30年
4月13日開催) 資料3、再掲

火山名	ピナツボ (フィリピン)	セントヘレンズ (米国)	エルチチヨン (メキシコ)	桜島 (大正噴火)
地殻変動	<ul style="list-style-type: none"> • 1990.7.16地震でピナツボの地下では10^{-6}の収縮ないし+1barの圧縮が生じ、玄武岩マグマの押し出しがあったと推定されている。 • 3か月前の3月～4月にピナツボ北麓地下32kmからマグマが上昇、噴気・3火口を生じた。 • <u>傾斜計データでは、4・5月にはインフレーション傾動、6月5日～7日に山体膨張が見られたが、6月12日初発噴火の直前1週間は傾斜計データに目立った変化がなかった。</u> 	<ul style="list-style-type: none"> • 写真測量によると、火山北側山腹の膨張は3月20日UTに始まったと推定される。この膨張は4月初旬まで急速で、その後減速し、そのままほぼ一定となって5月18日UTの主噴火に至る。 • 傾斜計は初発噴火後に設置されたので、それまでのデータは無く、稼働を始めた5月上中旬の2週間は山体中心から4-6km離れた点の傾斜計でインフレーション、それより遠い傾斜計で若干のデフレーションが観測されるが、5月18日UTの主噴火前後で変化は認められなかった。 	<ul style="list-style-type: none"> • 不明 	<p>【事後調査から判明した噴火前の状況】</p> <ul style="list-style-type: none"> • 鹿児島港において、潮位が1903-1904年に対して、1909年には6cm低下していた。地盤の隆起を示唆。 <p>【噴火後】</p> <ul style="list-style-type: none"> • <u>水準測量結果から、鹿児島港近くで約40cmの沈降を確認。</u>(基準は宮崎県細島港。) • 鹿児島港における潮位も噴火前に対して上昇し、沈降を示唆した。

➤ 地殻変動は、セントヘレンズにおいて、傾斜計や写真測量により、マグマ貫入に伴うとみられる顕著な山体膨張が観測されていること、また、桜島大正噴火では、噴火後の水準測量結果から、顕著な地盤の沈降が認められていることから、マグマ溜まりの位置や大きさを推定するのに有効な指標である。

観測事例の特徴について(3/4)

－噴火の概要と噴火に伴う地質学的事象－

原子炉火山部会 第3回会合(平成30年
4月13日開催) 資料3、再掲

火山名	ピナツポ (フィリピン)	セントヘレンズ (米国)	エルチヨン (メキシコ)	桜島 (大正噴火)
主噴火開始 (爆発指数)	1991.6.15 13:42 VEI:6	1980.5.18 08:32 VEI:5	1982.4.4UT VEI:5	1914.1.12 10:05 VEI:4
初発噴火	<ul style="list-style-type: none"> 4月2日、北斜面で水蒸気爆発 6月12日山頂でPlinian噴火し噴煙柱20km以上 	<ul style="list-style-type: none"> 3月27日、山頂火口で水蒸気爆発 	<ul style="list-style-type: none"> 3月29日、噴煙柱高度18.5 km 降灰30,000km² 	なし
噴火継続時間	9時間	約1日	2時間弱	約13～14日
噴火のタイプ	Plinian 噴出量5km ³	水蒸気爆発、 次いでPlinian	Plinianまたは Phreatoplinian	Plinian
噴煙柱高度	<u>35km</u>	<u>20km超</u>	<u>32km</u>	<u>8km～10km</u>
火山灰の降灰 (分布)状況	<ul style="list-style-type: none"> 全方位へ200km以上拡散(主に南西方へ)。直径500kmに降灰 デイサイト 	<ul style="list-style-type: none"> 600km²が火山灰で降灰 デイサイト質 	<ul style="list-style-type: none"> 最大到達距離320 km 粗面安山岩 	<ul style="list-style-type: none"> 桜島ほぼ全域: >20cm、大隅半島の半分:>10 約2km³の溶岩流
火砕物密度流 (到達距離)	<ul style="list-style-type: none"> 到達距離16km、面積<u>100km²以上</u> 	<ul style="list-style-type: none"> <u>北8kmまで到達</u> 	<ul style="list-style-type: none"> <u>火砕流及びサージは火口から10 km到達し、面積100 km²を覆う</u> 	<ul style="list-style-type: none"> <u>火砕流とともに溶岩流出</u> 体積:1.34km³ 面積:22km²

- 噴煙柱高度は、敷地への降灰量の有無を判断(予想)する上で重要な項目である。
- 火砕物密度流(サージ及び火山泥流を含む)及び溶岩の分布範囲は、敷地との離隔距離を把握する上で重要な項目である。

観測事例の特徴について(4/4)

－噴火に伴い観測された事象(その他)－

原子炉火山部会 第3回会合(平成30年
4月13日開催) 資料3、再掲

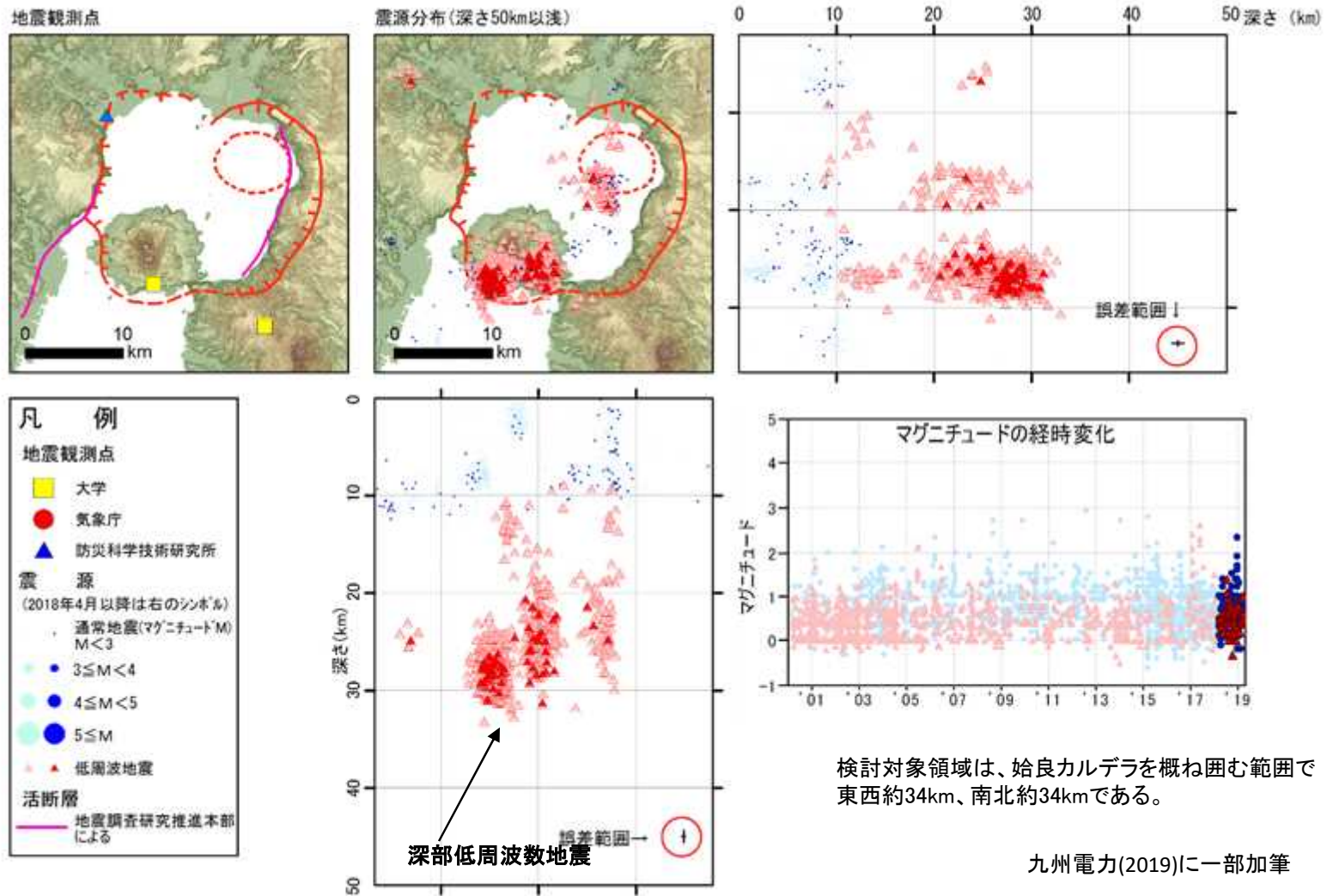
火山名	ピナツポ (フィリピン)	セントヘレンズ (米国)	エルチヨン (メキシコ)	桜島 (大正噴火)
その他	<ul style="list-style-type: none"> ・ (火山ガス)5月からSO₂ガスが増加。5月13日から28日までに500t/日から5,000t/日に10倍増、マグマの上昇の表われと解釈。6月5日に260t/日に急減。 ・ (溶岩ドーム)5月末から6月11日まで火口の溶岩ドームが成長。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ (火山ガス)SO₂は、水蒸気噴火期間0-40t/日と少なく、5月18日噴火後も130-260t/日だったが、6月6日には1,000t/日に急増して以降12月まで同レベル(500~3,400t/日) 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 初発噴火直前の噴気活動の増強あり(近隣住民の情報)。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 前年11~12月に井戸の水位低下などが一部の集落でみられた。 <p>【当日噴火直前】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 井戸から水噴出 ・ 桜島北麓で湧水増大 ・ 有村付近一帯海岸で温湯冷泉湧出 ・ 有村温泉(浴槽)に臭気ある泥水噴出

➤ 火山ガス(特に、SO₂)は、事象の進展に伴い、噴出量が顕著に増加する傾向がみられる。

参考2. 九州電力(株)の「川内原子力発電所及び
玄海原子力発電所 火山活動のモニタリング
評価結果」及び気象庁の火山情報など
(始良カルデラを例にした場合)

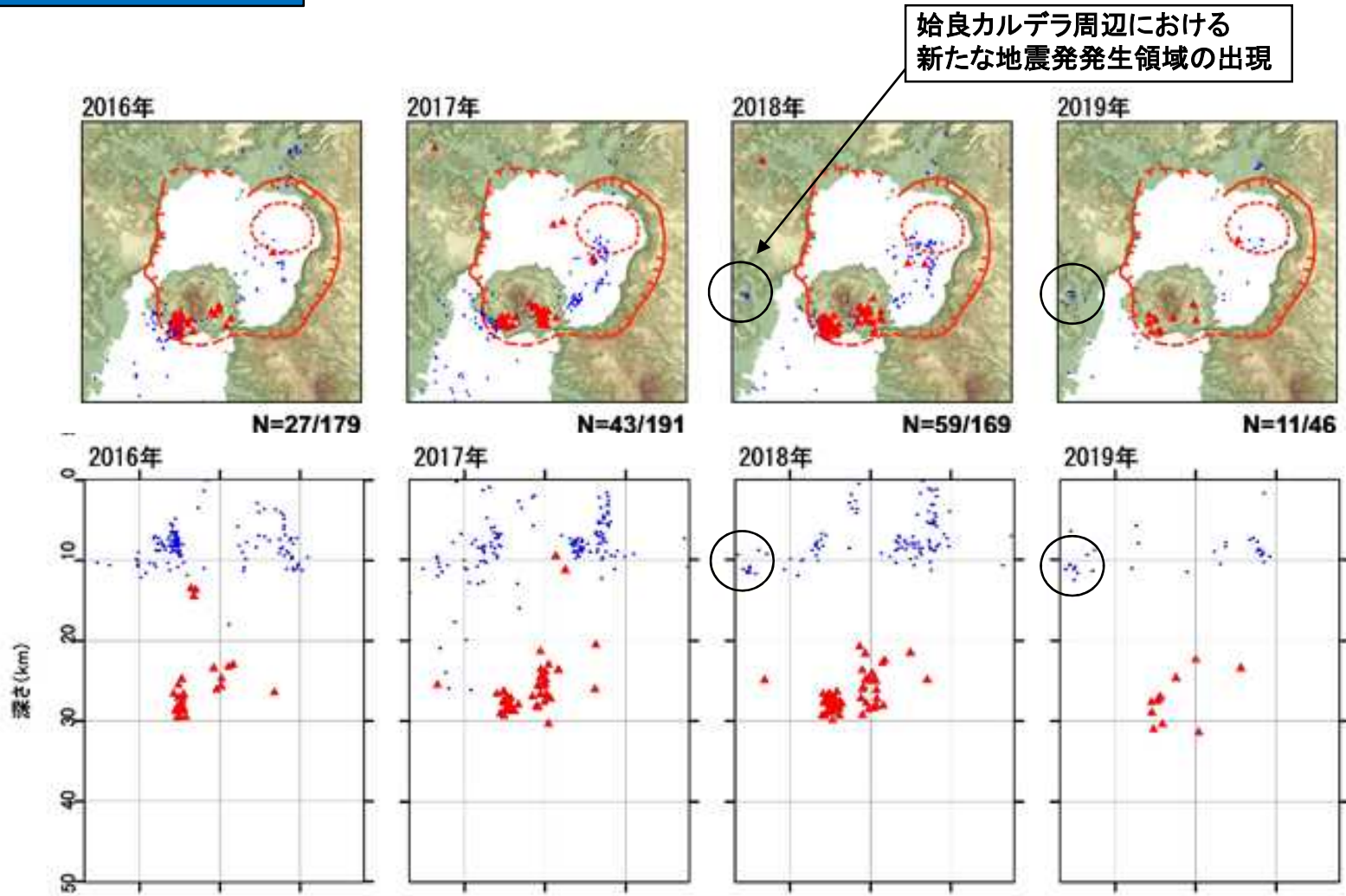
地震活動(1/2)

発生場所(震源分布)



地震活動(1/2)

発生場所(震源分布)

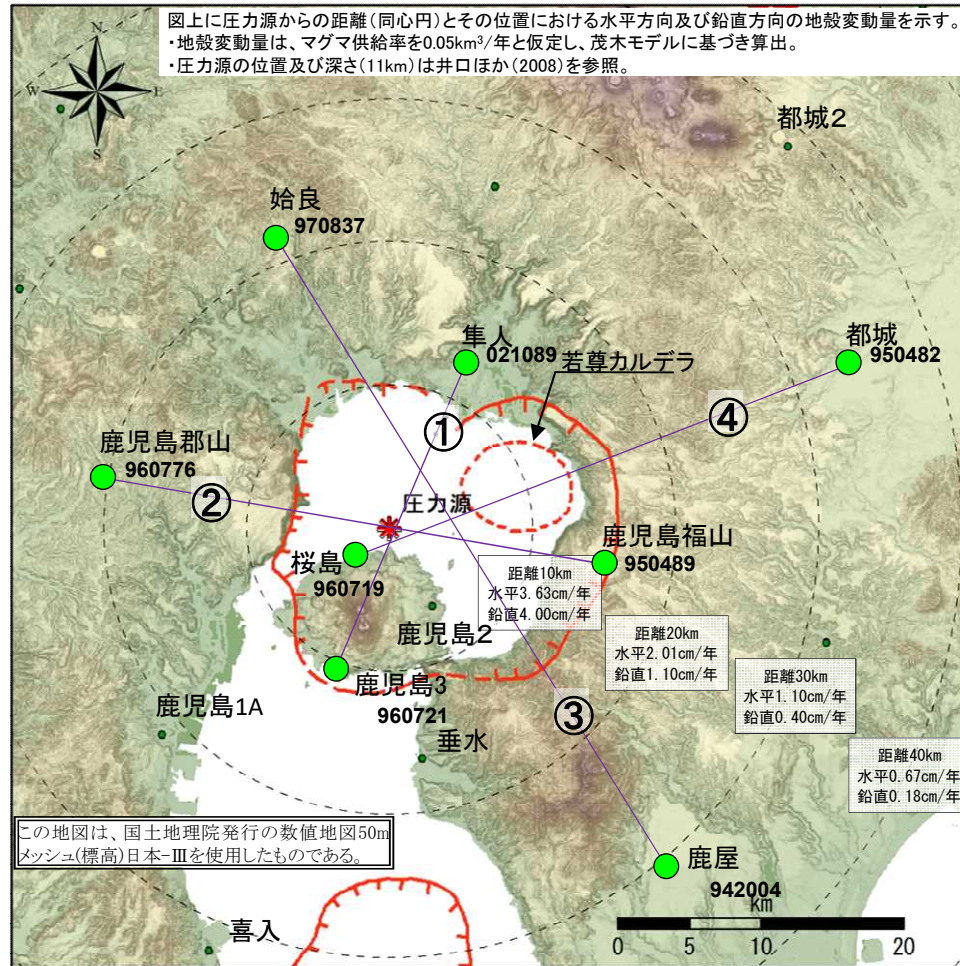


始良カルデラ周辺における
新たな地震発発生領域の出現

九州電力(2019)に一部加筆

地殻変動(1/4)

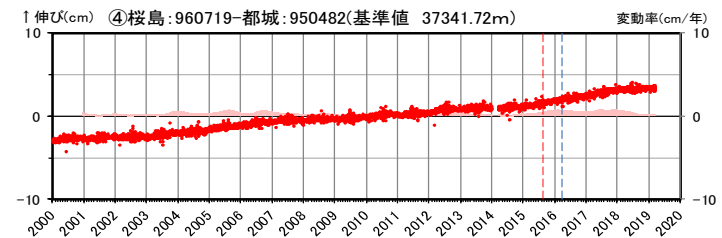
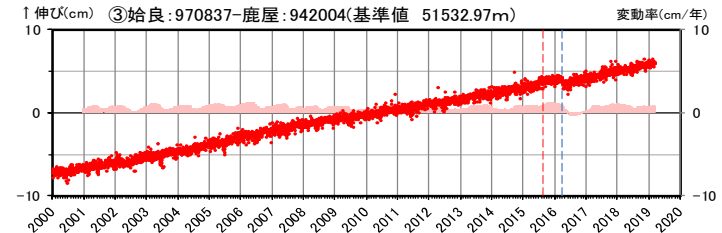
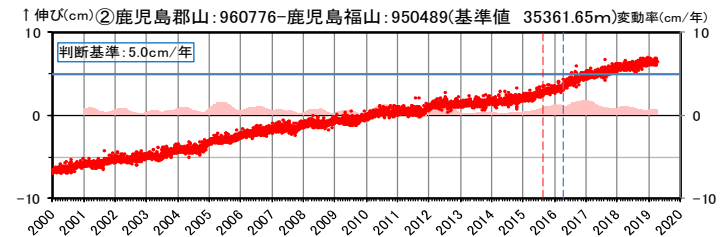
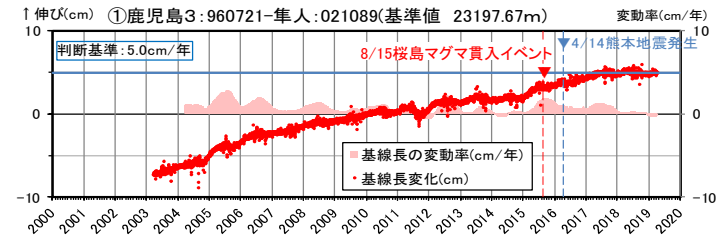
GNSS連続観測による基線長変化



● GNSS観測点

※1 2010年1月1日の基線長を基準値とし、基準値からの変化量を表示

※2 変動率は過去1年間のデータを用いて求めた近似式により算出



基線①～④の時系列変化

九州電力(2019)より抜粋

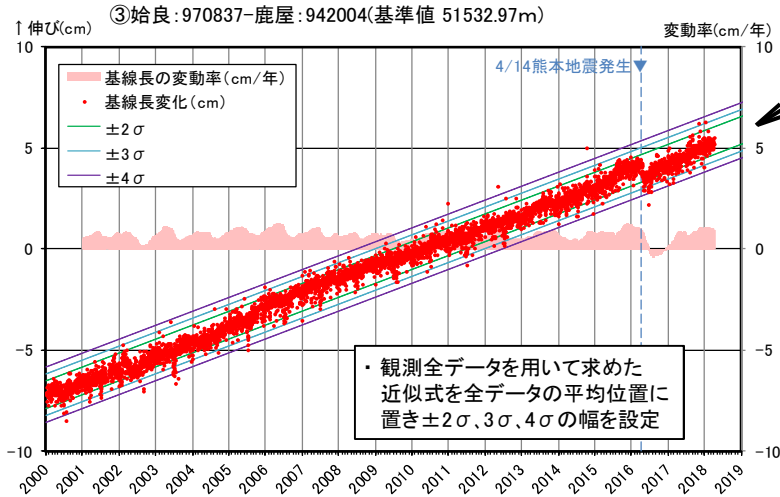
(九州電力の評価)

- ・ 始良カルデラ周辺の多くの基線で、マグマ供給を示唆する広範囲な伸びの傾向が認められが、2018年度の基線長の変動率に有意な変化は認められない。
- ・ 基線①, ②の変動率は、警戒監視の移行判断基準値(マグマ供給率0.05km³/年≒基線長変動率5cm/年)に達していない。

地殻変動(2/4)

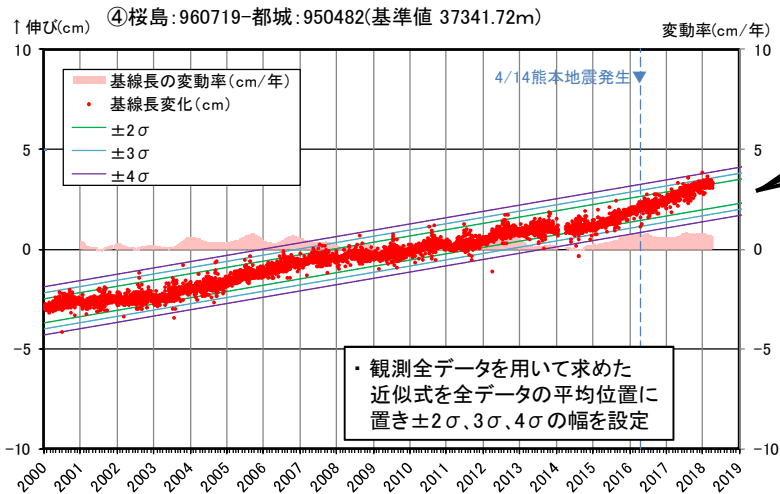
GNSS連続観測による基線長変化

原子炉火山部会 第5回会合(平成31年
3月22日開催) 資料3、修正・加筆



傾斜が顕著になる

現在の傾き



傾斜が顕著になる

現在の傾き

基線③~④の時系列変化

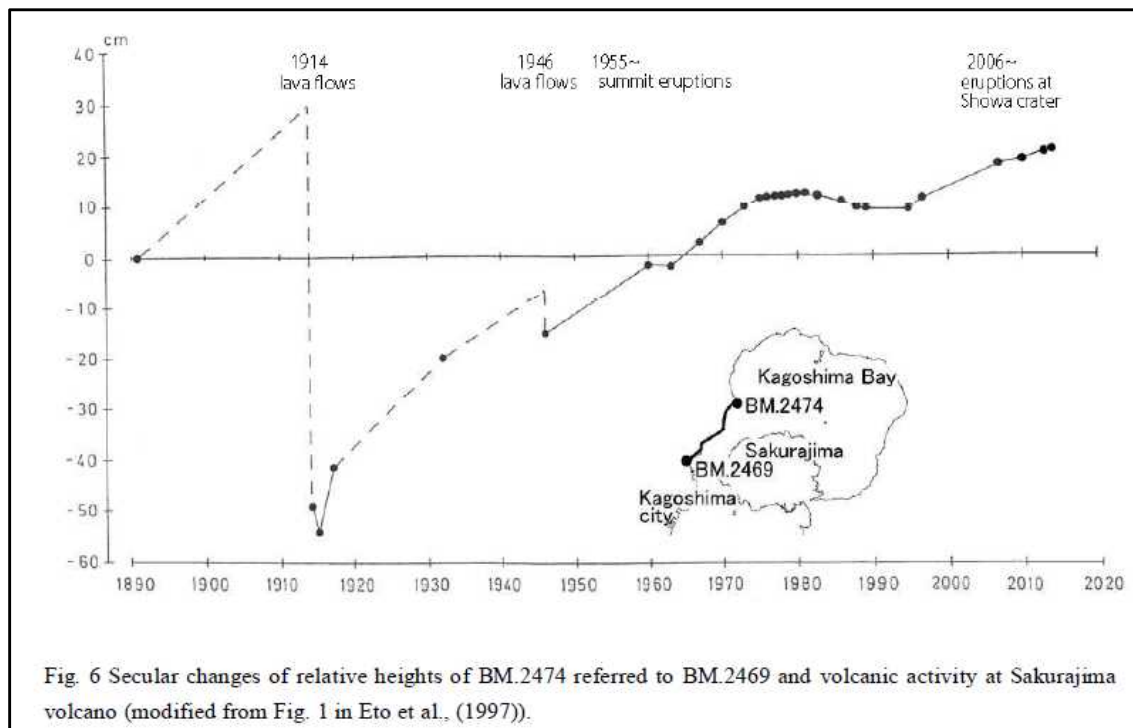
九州電力(株)提出資料に一部加筆

地殻変動(3/4)

水準測量による地盤の上下変動

原子炉火山部会 第5回会合(平成31年
3月22日開催) 資料3、再掲

水準測量による始良カルデラ周辺域の地盤上下変動



BM.2469(旧鹿児島県庁)を基準としたBM.2474(大崎鼻)の比高の経年変化

山本ほか(2014)

このルートにおいては、1891年から120年近くの長きにわたり水準測量が存在しており、途中1914年の桜島大正噴火や1946年の昭和噴火の溶岩流出を経験している。

桜島大正噴火後の100年間で、始良カルデラの地下のマグマ溜まりにおけるマグマの貯留に伴ったBM.2474付近の地盤隆起が進み、2013年11月の時点では、大正噴火の直前において推定されている比高(佐々、1957)の9割程度を回復した状態となっていることが見て取れる。

これらの隆起状態を鑑みると、山本ら(2013)でも指摘されたように、現在は、1970年代後半以降に生じた活発な山頂噴火活動と同様な活動を起こすだけのポテンシャルをすでに持っている状態であり、また大正大噴火と同様な規模の噴火活動を起こすポテンシャルも獲得しつつある状態であると推定される。

一方で、桜島中央部付近の地盤が沈降傾向、すなわち桜島中央部直下のマグマ溜まりにおいてマグマの放出量が供給量を上回ってきている。これがさらに進行すれば、始良カルデラ地下のマグマ溜まりにおいてもマグマの放出が卓越する状態となる可能性がある。桜島中央部付近の地盤沈降は、1970年代後半以降に生じたような活発な山頂噴火活動と同様な活動への移行の初期状態を示しているのかもしれない。

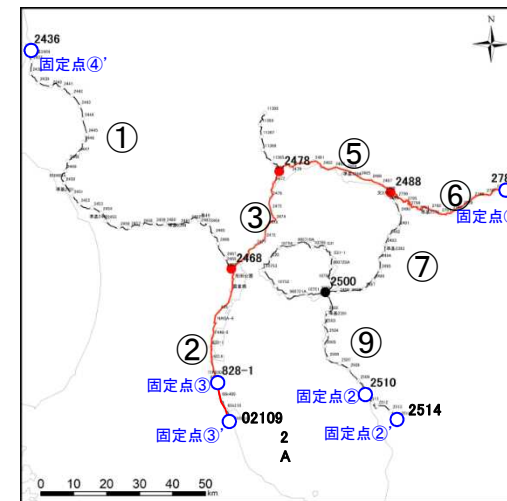
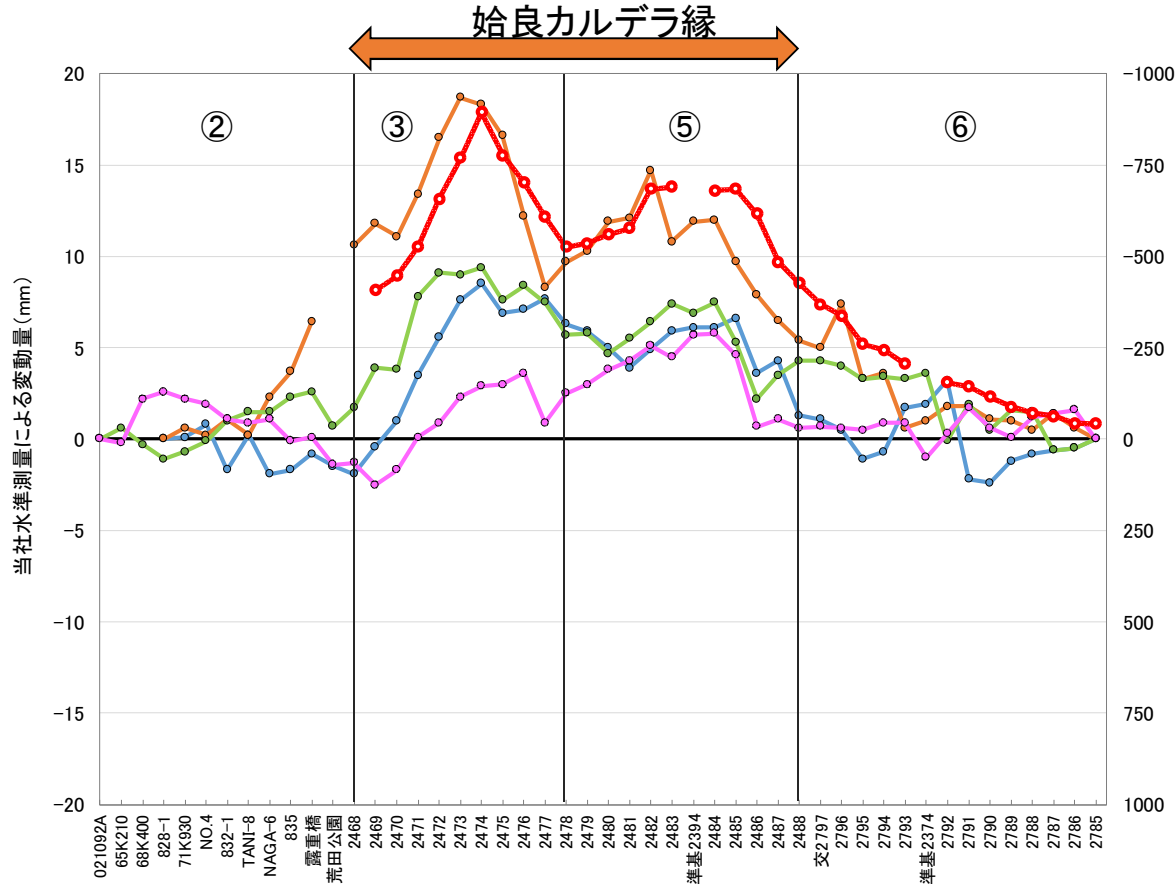
地殻変動(3/4)

水準測量による地盤の上下変動

水準測量による始良カルデラ周辺域の地盤上下変動

- ・ 桜島大正噴火(1914年)による変動量と当社水準測量による変動量の比較を行った。
- ・ 桜島大正噴火による沈下と現在の隆起に同様の傾向が見られた。

※鉛直変動の傾向を見るため、桜島大正噴火の鉛直変動の軸(反転)と変動量を調整し表示



3点固定: 固定点①、固定点②、固定点③
 4点固定: 固定点①、固定点②'、固定点③'、固定点④'

- 1) 出典: Oomori (1916)
- 2) 桜島大正噴火前後の水準測量対象期間
 噴火前: 1892年2月、4月、1895年1月、1900年3月
 噴火後: 1914年6~8月、12月
- 3) 垂直変動量の標高固定点
 No. 「付4」 (宮崎県日向市細島) の水準点

- 2015年度 (mm/9ヶ月) [(2015.11) - (2015.2)]
- 2016年度 (mm/年) [(2016.11) - (2015.11)]
- 2017年度 (mm/年) [(2017.11) - (2016.11)]
- 2018年度 (mm/年) [(2018.11) - (2017.11)]
- 桜島大正噴火による変動量 (mm) * 1), 2), 3)

九州電力(2019)より抜粋

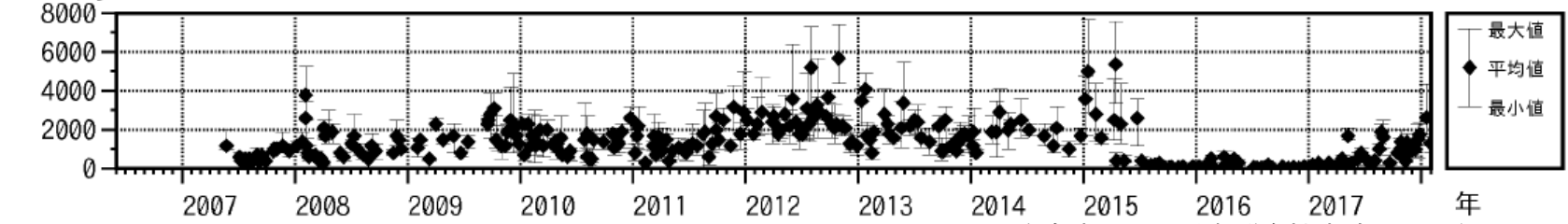
水準測量による垂直変化量の比較【基線②-③-⑤-⑥】

火山ガスと噴火規模

原子炉火山部会 第5回会合(平成31年
3月22日開催) 資料3、再掲

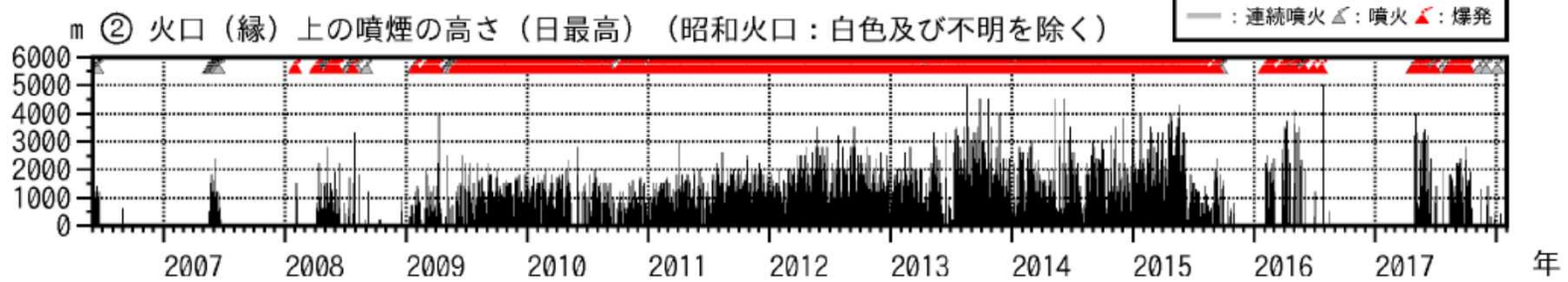
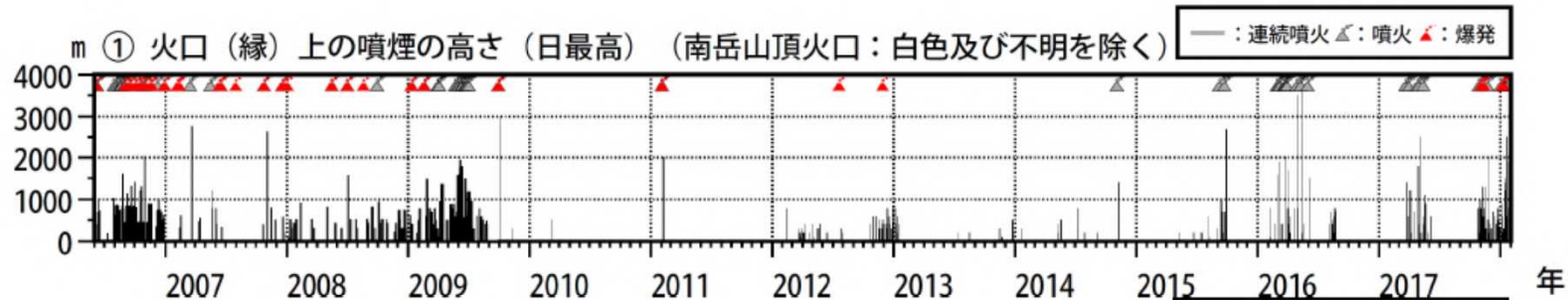
火山ガス(二酸化硫黄)

ton/day 火山ガス(二酸化硫黄)の放出量



気象庁 火山活動解説資料(桜島)2018年1月による

噴火規模(噴煙柱高度)



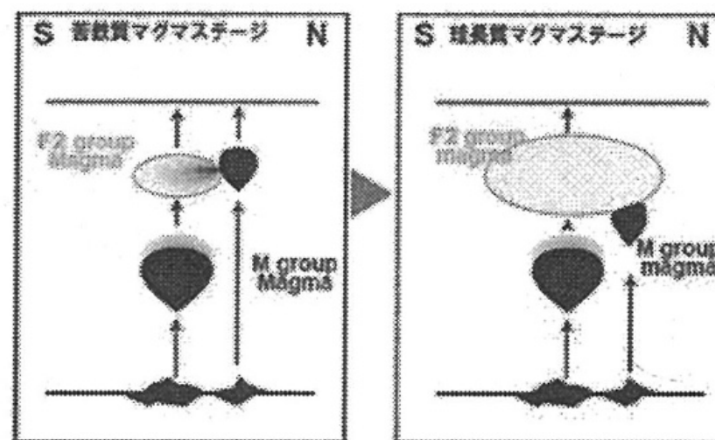
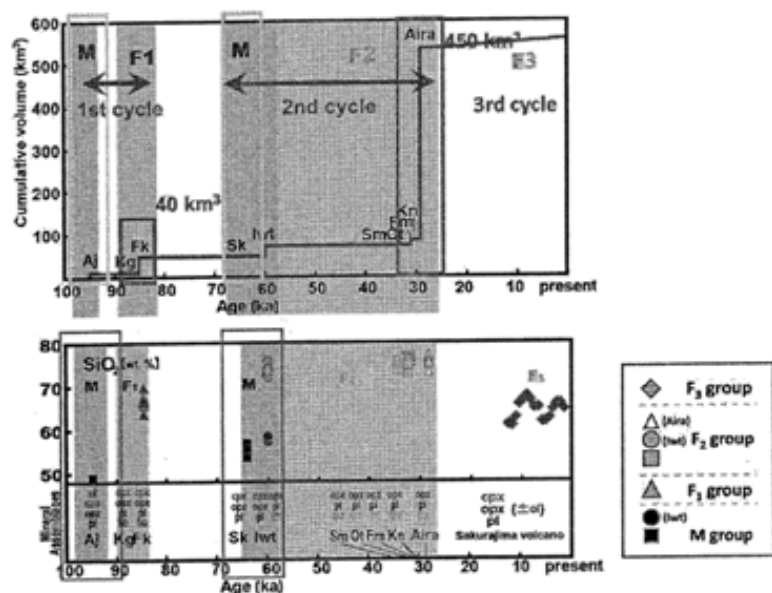
気象庁 火山活動解説資料(桜島)2018年1月による

噴出物(1/6)

始良カルデラ火山のマグマ組成の時間変化

原子炉火山部会 第4回会合(平成30年
8月10日開催) 資料4、再掲

- 関口・他(2014)は始良カルデラ火山で、10万年前から現在までに活動した火山噴出物の化学組成の変化を調べた(全岩化学組成分析、鉱物組成分析)結果、3つのマグマ活動サイクルを認めている。このうち最初と二回目のサイクルは、苦鉄質マグマの噴出のあと珪長質マグマが噴出し、最後に珪長質なマグマを大量に噴出する巨大噴火で終わっている。
- 第二サイクルの巨大噴火(29ka)と、それより5千~2千年前に噴出した小規模なテフラ噴火のマグマは、化学組成にほとんど違いが認められなかった。現在の桜島火山の活動は第3サイクルに入っていると考えられ、まだ珪長質マグマの巨大マグマ溜まり成長過程には移行していないと解釈できるとしている。



関口・他(2014)

始良火山のマグマ組成時間変化(左図)と第2サイクルのマグマ供給系の概念図(右図)

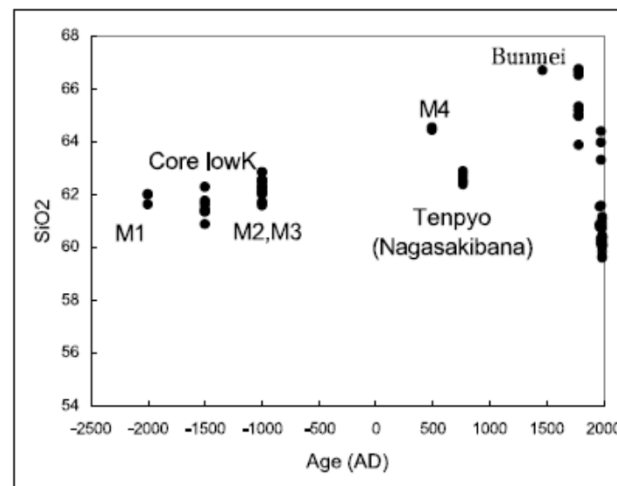
時間とともに苦鉄質マグマのステージから珪長質マグマのステージに変化している。初期の頃は珪長質マグマは規模が小さく、マントル起源の苦鉄質マグマがそのまま地表に出ることができる。巨大な珪長質マグマ溜まりができると、巨大噴火前に「漏れ出し」が何度か起こった。

噴出物(2/6)

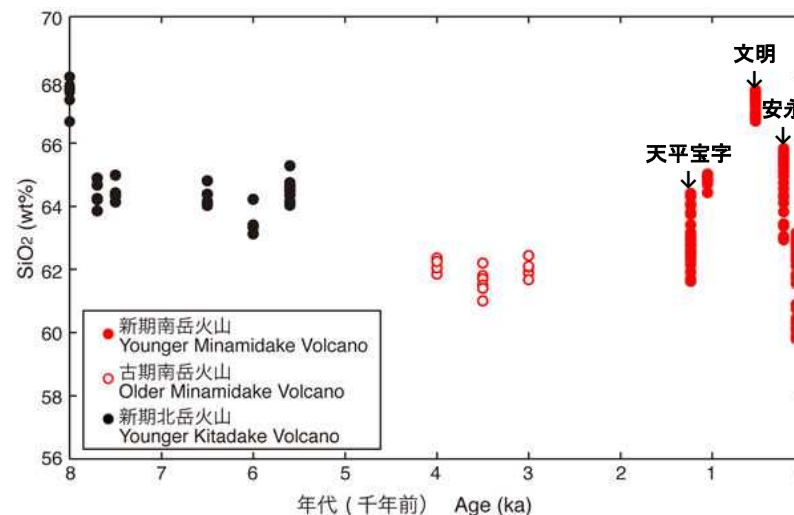
桜島火山の噴出物組成の変化(1)

- 桜島火山から噴出した溶岩・火砕物は、中カリウム系列の安山岩～デイサイトからなる。その組成は噴出時期により明瞭に異なっており、新期北岳火山はデイサイト、古期南岳火山は安山岩、新期南岳火山の天平宝字噴火では安山岩～デイサイト、文明噴火で最も珪長質なデイサイトが噴出した後、安永噴火からは噴出物のSiO₂含有量が減少するようになり、大正・昭和噴火では安山岩が噴出している。
- また、同じSiO₂量で比較した場合、新期南岳火山噴出物は、新期北岳火山・古期南岳火山噴出物に比べ、K₂O, Rb, Baなどの液相濃集元素には差は認められないものの、系統的にTiO₂, FeO, Na₂O, P₂O₅, Zr, Yに富み、逆にMgO, CaOに乏しい(宇都ほか, 2005)。
- したがって、新期南岳の活動開始時にマグマ供給系の変化があったことになる。同様な変化は、Zr/Thのような微量成分比でも顕著で、その比は古期北岳火山噴出物から古期南岳火山噴出物まで穏やかに減少した後、新期南岳火山噴出物で急上昇する傾向が認められる。ただし、新期北岳溶岩中の苦鉄質包有物は、これらと比べ最も高いZr/Th比を有している。⁸⁷Sr/⁸⁶Sr同位体比については、SiO₂量と正の相関が認められるため、単純に時間変化を議論することはできないものの、全体傾向としては時代とともに同比が減少する傾向がある。桜島火山では、新期北岳溶岩中の苦鉄質包有物が最も低い⁸⁷Sr/⁸⁶Sr同位体比を有している。

小林・他(2013)



過去4千年間の桜島火山噴出物のSiO₂量の時間変化
宇都・他(2005)



桜島火山噴出物のSiO₂量の時間変化

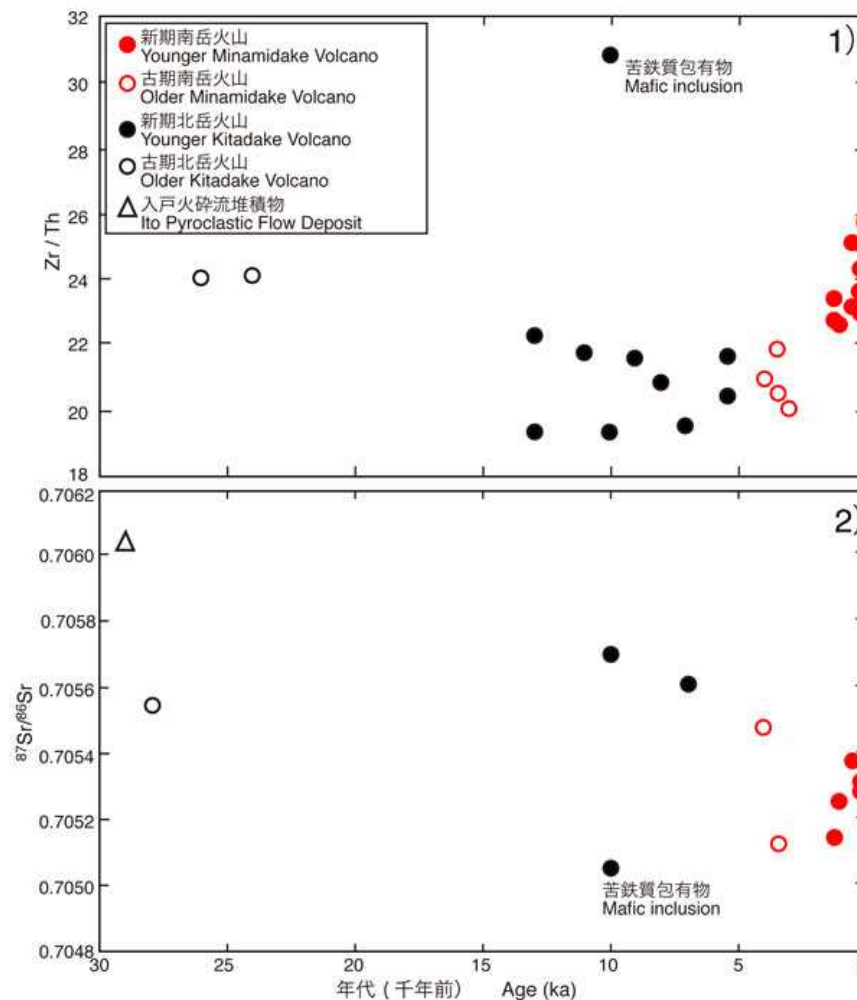
小林・他(2013)に加筆

噴出物(3/6)

桜島火山の噴出物組成の変化(2)

- 桜島火山のマグマ供給系の発展を考える上で重要なものは、始良カルデラのマグマ溜まりの存在である。カルデラ形成時には入戸火砕流堆積物で代表される $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位体比が高くZr/Th比の低い地殻起源の珪長質マグマが噴出しており、その後もカルデラ下に存在していたことは、約1.6万年前に若尊カルデラから噴出した新島火砕流が示唆している。一方、苦鉄質端成分としては、新期北岳溶岩中の苦鉄質包有物で代表される $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位体比が低くZr/Th比の高いマントル起源の苦鉄質マグマが存在する。
- 桜島火山では、両者の混合で中間組成の安山岩～デイサイトマグマが形成されているとみられ、大局的には時代が新しくなるほど、マントル起源苦鉄質マグマの混合系に占める割合が大きくなったとみられる(宇都ほか, 2005)。ただし、珪長質端成分の化学組成は単純ではなく、噴火時期毎に起源が異なるものに入れ替わっていたらしい(高橋ほか, 2011)。
- そのような中でも、大正噴火と昭和噴火から今現在に続く噴出物の化学組成は同一変化トレンドを構成していることと、大正噴火以降の始良カルデラを中心として隆起が起きていることからすると、大正噴火をもたらしたマグマ溜まりへの苦鉄質マグマの蓄積は継続しているものとみられる。

小林・他(2013)



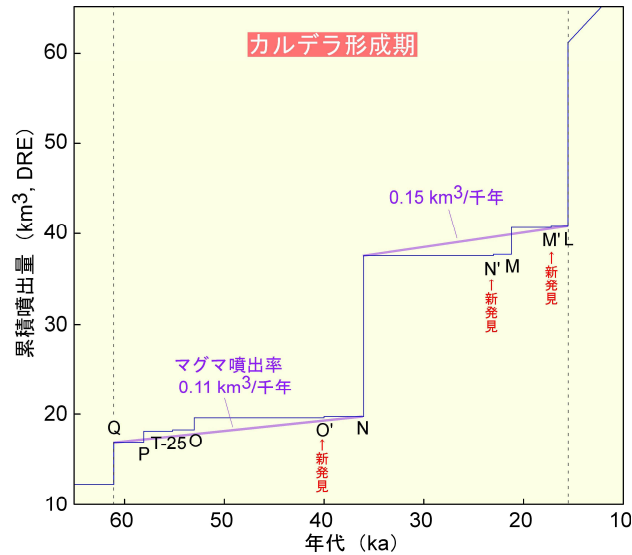
1) 桜島火山噴出物のZr/Th比の時間変化(上図)

2) 桜島火山噴出物及び始良カルデラ噴出物 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比の時間変化(下図)

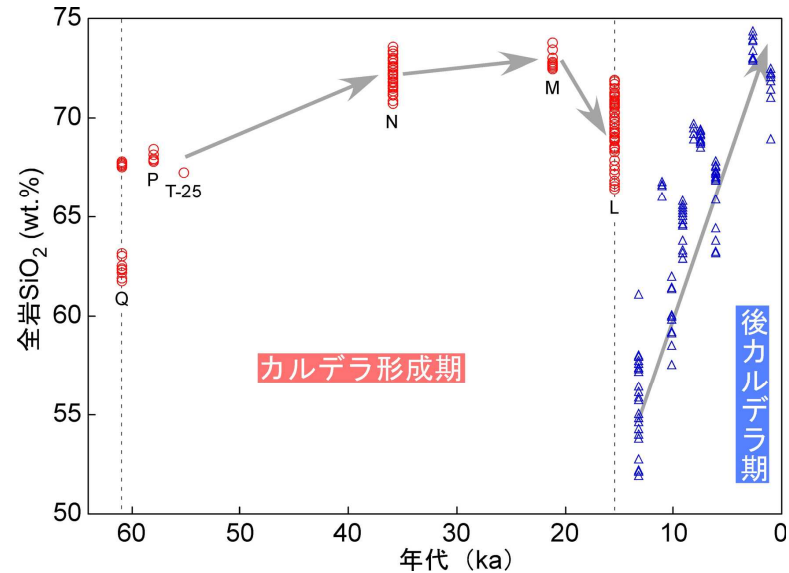
小林・他(2013)

噴出物(4/6)

十和田火山の噴出物組成の変化



カルデラ形成期の階段ダイヤグラム



カルデラ形成期～後カルデラ期噴出物の全岩SiO₂量時代変化図

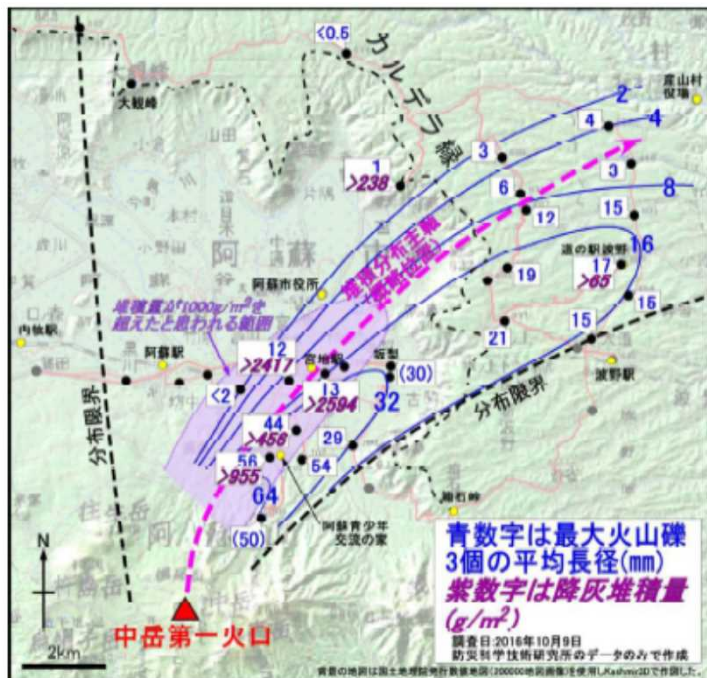
原子力規制庁(2018)

- カルデラ形成期では、噴火エピソードQ で安山岩～デイサイトマグマが噴出した後、全岩SiO₂が時代とともに微増し、N とM では流紋岩マグマが噴出するに至った。その後、Lではやや苦鉄質になるものの、デイサイト～流紋岩に至る比較的幅広い組成のマグマが噴出した。このように、カルデラ形成期においては、一貫してデイサイト～流紋岩マグマ主体の活動となっている。組成変化も顕著ではないので、比較的安定したマグマ系の存在が示唆される。しかし、後カルデラ期に入ると、マグマ組成は急激に玄武岩質安山岩へと変化し、その後、多少のぶれがあるものの、1万5千年間かけて徐々に玄武岩質安山岩から流紋岩へと変化する傾向を示す。カルデラ形成期から後カルデラ期を通して見てみると、カルデラ形成期直後に大きな不整合があり、後カルデラ期では短期間で急速な組成変化が起こっている。このことから、カルデラ形成期と後カルデラ期では、マグマ系そのものが別物になっている可能性が高い。その要因としては、噴火エピソードLの大規模カルデラ噴火において、カルデラ形成期に持続していた珪長質マグマ溜まりが完全崩壊することにより、浅部マグマ系が劇的に変化し、玄武岩質安山岩マグマが上昇できるようになったことが考えられる。

噴出物(5/6)

阿蘇山中岳2016年10月8日の噴火の火山灰分布調査(1/2)

原子炉火山部会 第5回会合(平成31年3月22日開催) 資料3、再掲



- 10月9日に防災科研が実施した調査では、中岳火口の北側～北東側の地域で火山灰や火山礫の堆積が確認された。しかし10月8日夜の激しい雨によりかなりの火山灰が既に再堆積・流出しており、正確な分布や降灰堆積量は求めることが困難であった。
- いくつかの地点での残存堆積物の測定や定性的な路上観察によると、火口から約6.5km離れた阿蘇市宮地駅周辺で2,500g/m²以上、12～14km程離れた北東カルデラ縁外側で数百g/m²以上の堆積があったとみられ、降灰の堆積分布主軸は中岳火口から北東の阿蘇市宮地駅付近を通り産山村南部へ抜ける位置にあったと推測される。
- 粒子の大きさ分布は堆積分布主軸よりも南側に最大軸があり、火口から4～5km離れた阿蘇青少年交流の家周辺で長径5cmを超える大きな火山礫が存在した。約8km離れた坂梨付近で約3cm、火口から約13km離れた道の駅波野付近では約2cmの大きさの火山礫があった。

防災科学技術研究所火山研究推進センター(2016)

図1: 堆積量・粒径サイズ分布図(暫定版)。



図4: 阿蘇青少年交流の家西方の火山礫。



図5: 宮地駅南西方のアゼリア 21 付近の状況。

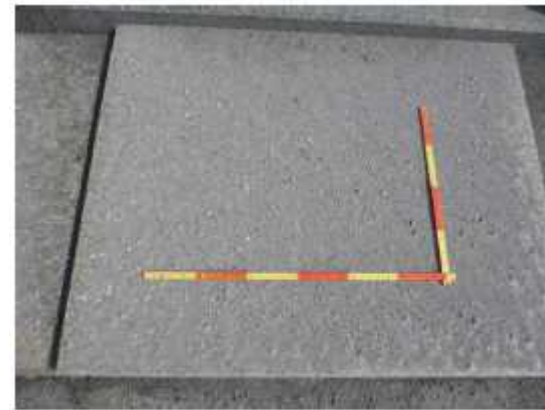


図6: 宮地駅東方の堆積状況(2594g/m² 残存)。

噴出物(6/6)

阿蘇山中岳2016年10月8日の噴火の 火山灰分布調査(2/2)

原子炉火山部会 第5回会合(平成31年
3月22日開催) 資料3、再掲

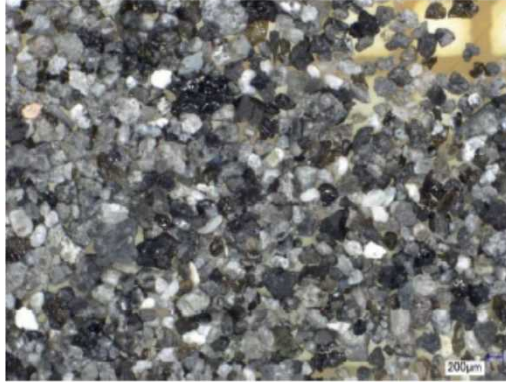


図1. 火山灰粒子の光学顕微鏡像, 左)全体像, 右)未変質な茶褐色～黒色発泡ガラス.

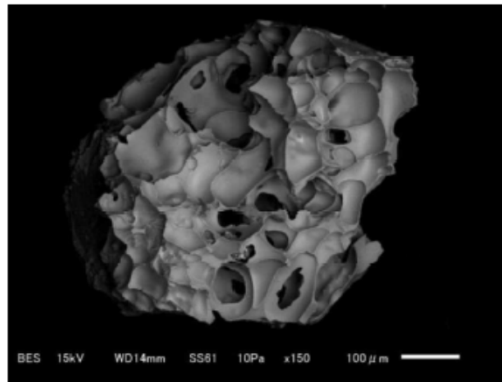
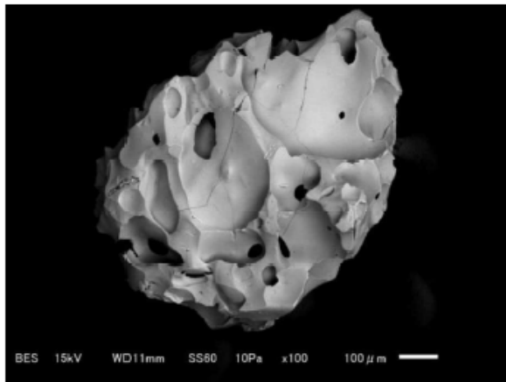


図2. 新鮮なガラスの走査電子顕微鏡像, 左)亀裂を有する粒子, 右)気泡に富む粒子.

➤ 2016年10月8日午後1時46分頃の阿蘇中岳第一火口からの噴火で放出された火山灰と火山礫(阿蘇市一宮宮地で採取)を光学顕微鏡および走査電子顕微鏡で観察した。その結果、この噴火の火山灰は、変質した岩片が大半を占め、地下深部からの新鮮なマグマの噴出を示すガラス粒子を10%程度含むことがわかった。また、火山礫は様々な程度の変質を受けた岩片・火山灰が組み合わさった凝灰岩を起源とすることが分かった。

➤ 火山灰は白色～灰色を呈する変質岩片(70-80%)、部分的に変質した茶褐色～黒色ガラス片や結晶(約10%)、未変質で新鮮な茶褐色～黒色ガラスとそれを伴う結晶片(約10%)からなる。新鮮な茶褐色～黒色ガラスは、網目状の亀裂をしばしば有する。この亀裂はガラスが急冷された際の熱収縮によると考えられる。また、このガラスには径20-300 μ m程度の気泡が含まれる。このことから、新鮮な茶褐色～褐色ガラスは地下深部からのガスを含んだマグマ起源であると考えられる。

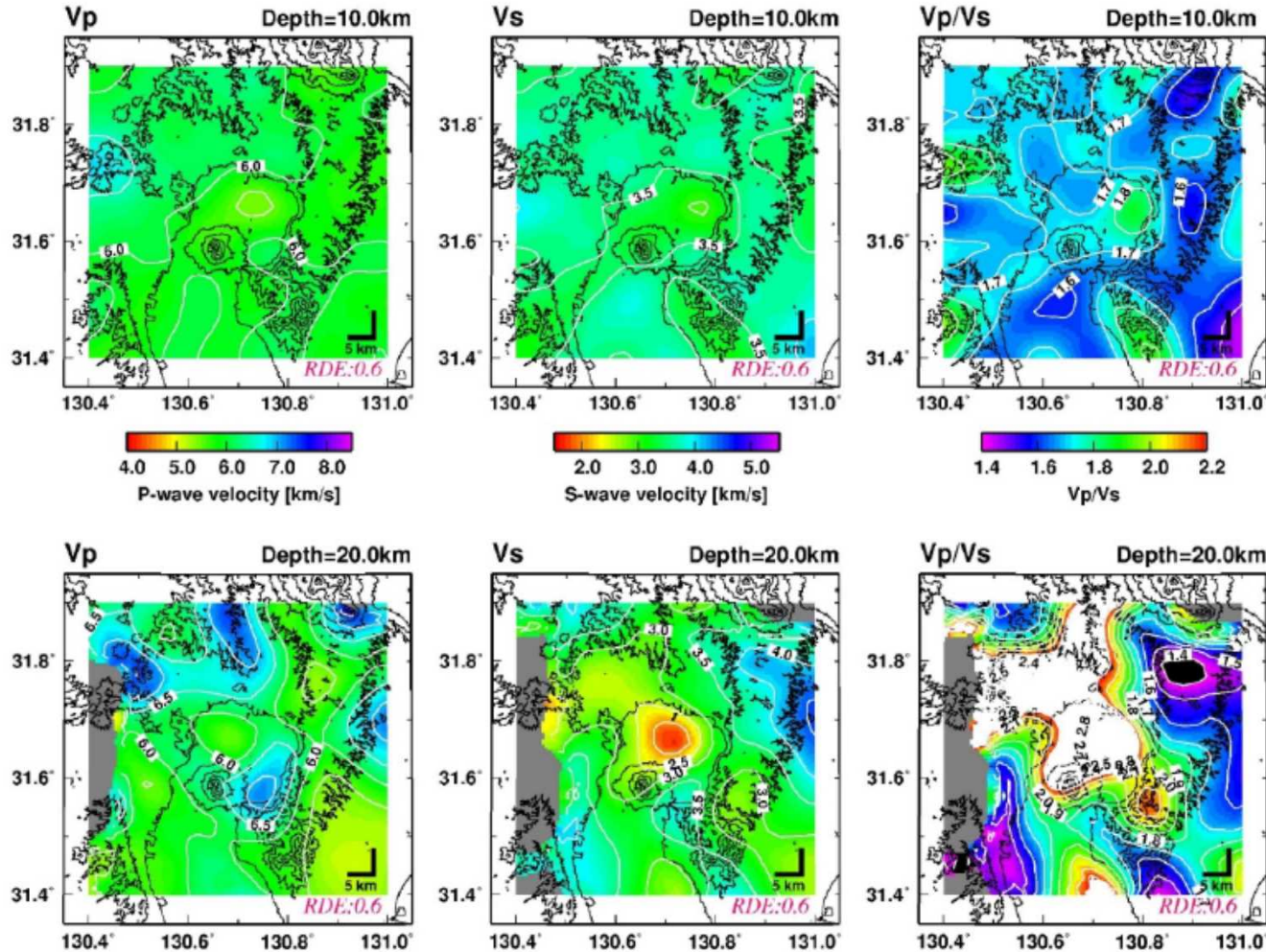
防災科学技術研究所・産業技術総合研究所(2016)

地下構造(1/2)

地震波速度構造

原子炉火山部会 第5回会合(平成31年
3月22日開催) 資料3、再掲

始良カルデラ周辺の地震波トモグラフィー解析結果



- 125 個の地震データに基づく始良カルデラ周辺の地震波トモグラフィー解析結果(79観測点、始良カルデラ周辺約40km)
- 深さ20kmにおいては不均質が顕著である、P波(Vp)、S波(Vs)とも低速度になっているが、特に、S波は2km/s以下の値が得られており、速度の低下が顕著である。
- S波の速度低下が著しい部分は、カルデラ全体に及ぶようなものではなく、中央部に集中している。

原子力規制庁(2017)

地下構造(2/2)

比抵抗構造

始良カルデラ周辺の比抵抗構造解析結果

原子炉火山部会 第5回会合(平成31年
3月22日開催) 資料3、再掲

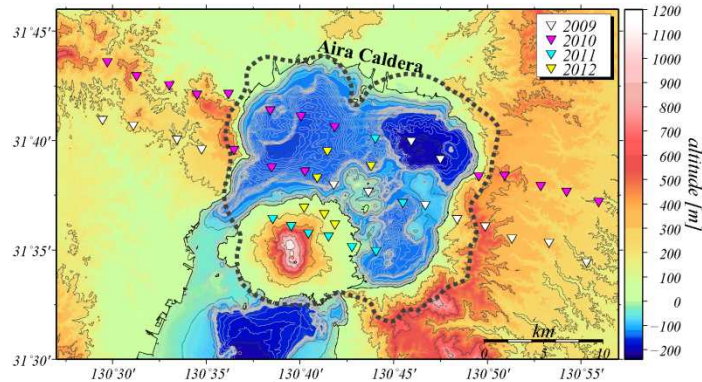


図2: 観測点配置図2009年からの4年間で海域16点、陸域28点の合計44点でMT法による電磁場観測を行った。

始良カルデラ直下のマグマ溜まりを示唆する最近の地殻変動源の位置は、低比抵抗体と高比抵抗体の境界付近にあり(図5(b)星印)、低比抵抗体がマグマ供給に関連しているという解釈と矛盾しない。また、南九州地域で推定されている地震波速度構造(Alanis et al., 2012)では、桜島直下の深さ20kmにマグマの存在を示唆する高 V_p/V_s 領域が見つかった。分解能が異なるため、単純には比較できないが、低比抵抗領域に対応している。2008年に実施された人工地震探査に自然地震のデータを加えて解析された地震波速度構造(為栗・他, 2011)では、深さ4kmで始良カルデラ内にP波速度が周囲より遅い低速度領域が見られるが、深さ8kmでは若尊~桜島にかけて高速度領域が検出されている。この高速度領域は低比抵抗領域に対応しているように見えるが、その原因はこれまでのところ不明である。

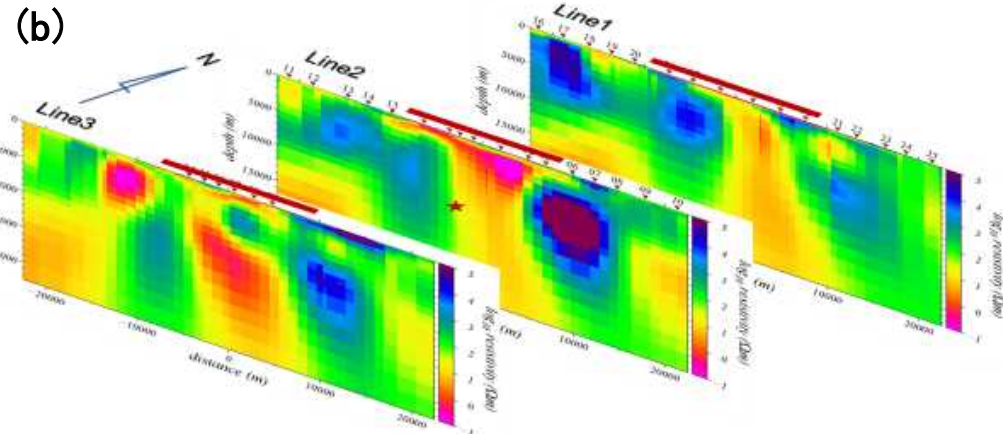
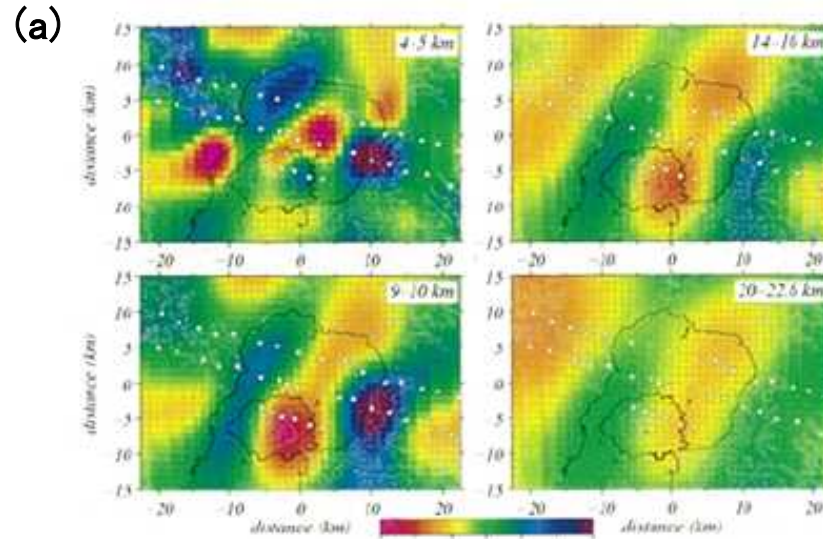


図5(a): 3次元比抵抗構造モデルの深さ5km, 10km, 15km, 20kmにおける水平断面図. (b)カルデラを横断する測線に沿った断面図. 星印は、最近の地殻変動観測から推定された減圧源の位置(Yamamoto et al., 2013).

神田ほか(2013)

気象庁の火山情報

噴火警戒レベル

原子炉火山部会 第5回会合(平成31年
3月22日開催) 資料3、再掲

桜島の噴火警戒レベル判定基準(レベル5)

【大規模噴火が切迫】

- ・山腹噴火が発生もしくは切迫
山腹からの噴火が開始するか、極めて顕著な山体膨張(島内の傾斜計のいずれかで100マイクロラジアン)が観測され、大きな地震活動(マグニチュード5ならば1回、マグニチュード4ならば2回)が伴った場合は、大規模噴火発生の可能性が切迫していると考え、全島を警戒範囲とする。
- ・火砕流が居住地域近く(居住地まで数100m)に到達
- ・溶岩流が居住地域(居住地まで概ね100m)に接近

【これまで見られたような噴火(ブルカノ式噴火)の激化】

- ・大きな噴石が火口から2.5km以上に飛散
- ・火砕流が居住地域近く(居住地まで数100m)に到達

引用文献

(地震活動及び地殻変動)

原子炉火山部会 第5回会合(平成31年
3月22日開催) 資料3、再掲

国土地理院(2015) 平成27年(2015年)桜島の火山活動に伴う地殻変動(作成2015年8月19日)、<http://www.gsi.go.jp/cais/topic150818-index.html>

九州電力株式会社(2018)川内原子力発電所及び玄海原子力発電所火山活動のモニタリング評価結果(平成29年度報告)(原子炉安全専門審査会 原子炉火山部会 第4回会合(平成30年8月10日開催) 添付資料)

山本圭吾・松島健・吉川慎・大倉敬宏・横尾亮彦・相澤広記・井上寛之・三島壮智・内田和也・園田忠臣・関健次郎・小松信太郎・堀田耕平・高橋温志・豊福隆史・浅野晴香・成田次範(2014) 水準測量によって測定された桜島火山および始良カルデラ周辺域の地盤上下変動-2013年10月および11月測量の結果-, 京都大学防災研究所年報, 57B, 116-124.

Hidayati, S., Ishihara, K., and Iguchi, M. (2007) Volcano-tectonic earthquakes during the stage of magma accumulation at the Aira Caldera, Southern Kyushu, Japan. Bull. Volcanol. Soc. Japan, 52, 289-309.

Hotta, K., Iguchi, M., Ohkura, T. and Yamamoto, K. (2016) Multiple-pressure-source model for ground inflation during the period of high explosivity at Sakurajima volcano, Japan - Combination analysis of continuous GNSS, tilt and strain data -, Jour. Volcanol. Geotherm. Res., 310, 12-25.

(火山ガス及び噴火規模)

福岡管区気象台 地域火山監視・警報センター・鹿児島地方気象台(2019) 桜島の火山活動解説資料(平成30年1月)、気象庁.

(噴出物)

原子力規制庁(2018) 平成29年度原子力施設等防災対策等委託費(火山影響評価に係る技術知見の整備)成果報告書.

小林哲夫・味喜大介・佐々木 寿・井口正人・山元孝広・宇都浩三(2013) 桜島火山地質図(第2版), 1:25,000, 産業技術総合研究所地質調査総合センター.

関口悠子・長谷中利明・森康(2014) 始良カルデラ火山に見られる3回のマグマ活動サイクル, 月刊地球, 36(8), 303-309.

宇都浩三・味喜大介・Hoang NGUYEN・周藤正史・福島大輔・石原和宏(2018) 桜島火山マグマ化学組成の時間変化, 京都大学防災研究所年報, 48B, 341-347.

引用文献

(噴出物)

原子炉火山部会 第5回会合(平成31年
3月22日開催) 資料3、再掲

防災科学技術研究所火山研究推進センター(2016) 阿蘇中岳2016年10月8日噴火の火山灰分布調査(平成28年10月11日),
http://www.bosai.go.jp/saigai/2016/pdf/20161011_03.pdf

防災科学技術研究所・産業技術総合研究所(2016) 噴出物から見た阿蘇中岳2016年10月8日の噴火(平成28年10月11日),
http://www.bosai.go.jp/saigai/2016/pdf/20161011_02.pdf

(地下構造)

原子力規制庁(2017) 平成28年度原子力施設等防災対策等委託費(火山影響評価に係る技術的知見の整備)成果報告書.

科学研究費助成事業(科学研究費補助金)研究成果報告書 基盤研究(B)「海域に推定されるマグマ供給系の地下構造調査による実体解明(研究代表者 神田径), 課題番号21310116, (2013) <https://kaken.nii.ac.jp/ja/grant/KAKENHI-PROJECT-21310116/>