

## 大規模カルデラ噴火の前兆現象 -鬼界カルデラと始良カルデラ-

小林哲夫\*・奥野 充\*\*・長岡信治\*\*\*・宮縁育夫\*\*\*\*・井口正人・味喜大介

\* 鹿児島大学大学院理工学研究科

\*\* 福岡大学理学部

\*\*\* 長崎大学教育学部

\*\*\*\* 熊本大学教育学部

### 要 旨

カルデラ噴火に先行する地学現象について調査した。鬼界カルデラでは、1) 少なくとも 8000 年間にわたる断続的なブルカノ式噴火、2) 数百年前の山体崩壊、3) 約百年前の脱ガスした流紋岩質溶岩の噴出、4) 噴火中から噴火後にかけて 2 回の巨大地震の発生が認められた。これらの現象は、カルデラ噴火の前に長い休止期間が必ずしも必要ではないこと、カルデラ噴火の引き金は苦鉄質マグマの混合ではなく、脱ガスしたマグマの噴出であったこと、2 回の巨大地震の発生は応力解放のためであることが推定された。一方、始良カルデラでは顕著な前兆現象は見出されなかった。しかし現在のカルデラ周辺の地盤は過去数千年にわたり 1.3 mm/年の割合で上昇しており、この上昇傾向が 3 万年前のカルデラ噴火直後から継続していると仮定すると、現在のカルデラには数 10 km<sup>3</sup> のマグマが蓄積されており、現在も蓄積中であることが推定された。

キーワード：前兆現象，鬼界カルデラ，始良カルデラ，地殻応力場

### 1. はじめに

噴火に至る過程で発生するさまざまな前兆現象の解明は、噴火のメカニズムを理解するうえで最も重要な研究課題である。最近の大噴火では、多方面からの研究がなされ、その実体が徐々に解明されつつある。たとえば本格的なマグマ噴火に至る過程では、群発地震、山体の膨張・崩壊、噴気活動の活発化や水蒸気噴火の発生などが知られている。大規模なカルデラ噴火においても、同様な地学現象が時系列的に発生し噴火に至るものと推定されるが、それらの証拠は噴火時に破壊されたり、厚いテフラに覆われてしまうことが多いため、詳細な研究はほとんどなされていないのが現状である。

本研究では、完新世に発生した鬼界カルデラの噴火を主な研究対象とし、カルデラ噴火に至るプロセスの 1 つのモデルを提唱する。あわせて鬼界および始良カルデラの現状をどうとらえるべきかについても言及する。

### 2. 鬼界カルデラにおける前兆現象

鬼界カルデラは鹿児島県薩摩半島から南方へ約 40 km に位置する海底カルデラであり、カルデラ縁上に薩摩硫黄島や竹島などの小島が点在する。Fig. 1 はカルデラ地形の全貌である。

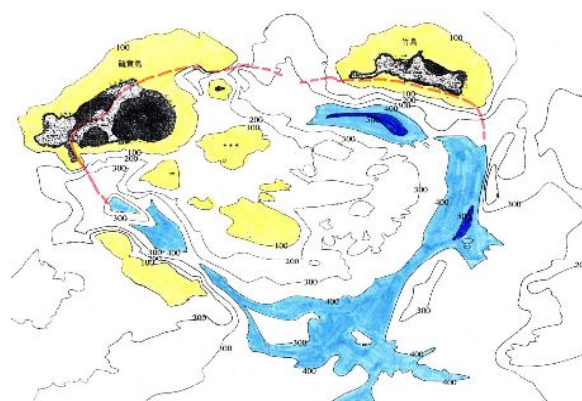


Fig. 1 Bathymetric map of Kikai caldera (Japan Coast Guard, 2000)

カルデラは北西-南東にのびた円形をしているが、特に南側には二重のカルデラ縁を示唆する海底地形が存在する。中心部には大きく隆起したドーム状の地形（再生ドーム）が認められる。それゆえカルデラのタイプではバイアス型に分類される。

鬼界カルデラは他のカルデラと同じく、複数回の大規模火砕流噴火を繰り返してきた（小野ら, 1982）。最も新しいカルデラ噴火は 7.3 cal ka BP（奥野, 2002）に発生した「アカホヤ噴火」である。鬼界カルデラは海底カルデラであり、噴火の全体像を構築するための地質学的データに乏しいと思われていた。しかし最近の研究で、噴火前から噴火後に至る長期にわたり、噴火と関連するさまざまな地学現象が見出されるようになった（成尾・小林, 2002; 小林ら, 2006; 小林, 2008 a, b）。Fig. 2 はこれら研究の成果を総括したものであり、重要な地学現象を時系列にそって表記した。

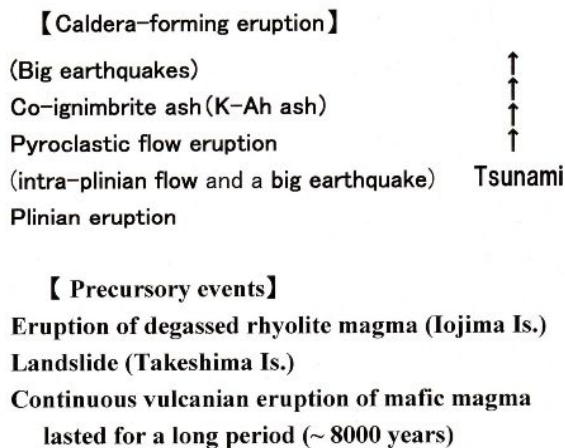


Fig. 2 Sequence of precursory events and Akahoya eruption of Kikai caldera

以下にアカホヤ噴火と成因的な関係があると推定された地学現象について記載する。なお本論中の年代は奥野（2002）による暦年較正年代であり、以下の文中では暦年較正年代を意味する cal BP を省略し、7.3 ka のように表記する。

## 2.1 苦鉄質マグマの長期にわたる噴出

一般にカルデラ噴火の前には長い休止期が想定され、その間に大規模な珪長質マグマ溜りが形成されるものと考えられている。しかしアカホヤ噴火の前にはブルカノ式噴火が断続的に発生していた。その噴出物は籠港（こもりこう）テフラと呼ばれる砂質火山灰の累層であり、薩摩硫黄島の平家城では 10 m 以上の厚さがある。多数の腐植質土壌のほか、桜島火山起源の薩摩テフラ（12.8 ka）を挟在する。本テフラ累層の下部と上部に挟在する腐植土の <sup>14</sup>C 年

代は 16 ka と 9 ka である。しかし本テフラ層はアカホヤ噴火にかなり近い年代まで活動していたと考えられ、実際の活動期間は 8000~9000 年におよぶものと推定される。

## 2.2 地すべり崩壊の発生

地すべり崩壊はカルデラ縁の一部である竹島において認められた（竹島崩壊堆積物）。堆積物は熱水変質した粘土質の基質中に、一部変質した流紋岩の岩塊や非変質・非溶結の長瀬火砕流堆積物のブロックが包含されている。上位の降下軽石層との間の腐植土壌の厚さから、崩壊はカルデラ噴火の数 100 年前に発生したと推定される。

## 2.3 脱ガスしたマグマの噴出

脱ガスしたマグマの噴出は薩摩硫黄島付近で発生した。そのテフラは降下軽石層の直下に、わずかの厚さの土壌を介して存在する薄い流紋岩質テフラであり、薩摩硫黄島の西端の長浜溶岩に対比される。長浜溶岩の表面は、土壌を介さずに降下軽石に覆われている。また岩塊の隙間は軽石が充填しているが、溶岩の熱による軽石への影響は認められない。それゆえプリニー式噴火の発生時には、溶岩は軽石に熱的影響を与えない程度に冷却していたことになる。テフラの層準も考慮すると、この溶岩の噴出はプリニー式噴火の 100 年前程度と推定される。地質学的な見地からは、両者はごく短期間に連続的に発生したことになる。長浜溶岩は、アカホヤ噴火のマグマとほぼ同じ化学組成であり、噴火直前で肥大化した珪長質マグマ溜り上部の脱ガスのすすんだ部分から噴出したものと考えられる。

## 2.4 大規模地震と津波の発生

カルデラ噴火の最中（～噴火後）に少なくとも 2 回の大地震が発生した（成尾・小林, 2002）。また津波の発生も推定されている。これらの現象は必ずしもカルデラ噴火の前兆現象には当てはまらないが、噴火の全体像を理解するうえで重要な地学現象である。

最初の地震は特に激しい震動を伴い、その痕跡はカルデラに近い屋久島、種子島、口永良部島では、噴礫脈あるいは地割れとして認められる。噴礫とは海岸段丘を構成する円礫～亜円礫が、その上位のローム層の割れ目に沿って玉突き状に地表に押し出されたものである。この噴礫は火砕流本体に被覆されているが、それを貫いた例は見られない。また火砕流の基底に存在する特異な岩片集積層（GL: ground layer）が地割れを充填している現象が、口永良部島や屋久島など広い範囲に認められており、これら地

割れや噴礫の発生は、火砕流がその場に到達するよりも前に発生したことは明らかである。さらに初期の降下軽石層に着目すると、その基底のみ激しく変形した波状構造を示している。このことは最初の大地震は降下軽石と火砕流噴火の間に発生したことを意味している。

また火砕流噴火によって生じたアカホヤ火山灰の堆積の途中にも、南九州の広範囲で地震による液状化（噴砂）が発生している。さらにアカホヤ火山灰の堆積後にも、霧島火山地域ではがけ崩れや湖底堆積物のスランプ変形などが認められ、噴火後も長期にわたり地震が発生したことがわかる。噴火に関連して大規模な津波が発生しているが、津波堆積物とテフラの関係については現在調査中であり、詳細については追って公表する予定である。

## 2.5 噴火の引き金

鬼界カルデラで見る限り、カルデラ噴火にとって長い休止期間は必須の要素とはなっていない。逆にカルデラ地域での活発な火山活動の継続は、地殻物質の部分熔融を促進し、珪長質マグマを生産・蓄積するため、カルデラ噴火の遠因となっているものと推測させる。

アカホヤ噴火の直接的な引き金についての証拠は得られていないが、噴火の数百年前には山体崩壊が発生し、約 100 年前には脱ガスした同質の溶岩が噴出している。この溶岩の噴出がマグマの発泡を促し、プリニー式噴火の引き金となった可能性が高い。噴火の引き金としては、玄武岩質マグマが珪長質なマグマ溜りに入り込む「マグマの混合」（Sparks et al., 1977）が一般に受け入れられているが、アカホヤ噴火で見られるマグマ混合現象は、噴火が進行するにつれより深部に存在していた苦鉄質マグマが吸い込まれた結果生じたものであり、噴火の引き金とはなっていない（小林ら, 2006 ; 小林, 2008b）。

アカホヤ噴火に先行した脱ガスした流紋岩質溶岩の噴出は、それまで巨大なマグマ溜りを微妙なバランスの下に維持していた地殻応力場の変化に起因するとみなすべきであろう。

アカホヤ噴火の最中に発生した最初の地震は特に規模の大きな激震であり、プリニー式噴火と火砕流噴火の間に発生した。それゆえこの大地震は、マグマ（降下軽石）の放出に伴う応力解放によって発生したものと考えられるが、その激震がまたマグマ中の気泡の発泡を促進し、その後続く非常に爆発的な火砕流噴火を引き起こしたものと推定された。

このようにアカホヤ噴火の発生から終息にいたる過程で発生した様々な地学現象は、カルデラを取り巻く地殻応力と密接に関連していたようである。

## 3. 始良カルデラにおける前兆現象

始良カルデラは鹿児島湾の奥部に位置しており、現在は水没した状態となっている（Fig. 3）。約 3 万年前、日本で最大規模の始良火砕噴火が発生し、南九州一帯に広大な火砕流台地（シラス台地）が形成された。桜島火山はその後に出現した後カルデラ火山であり、現在も盛んに活動を続けている。

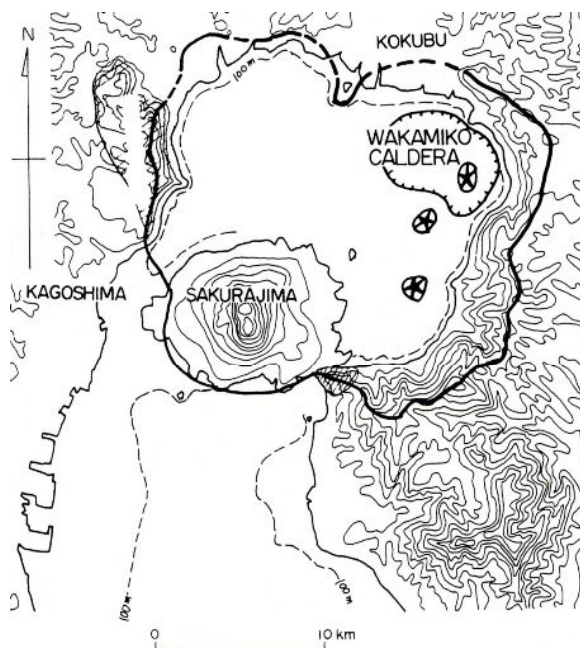


Fig. 3 General topographic map around Kagoshima Bay (simplified from Aramaki, 1984). Thick line is the rim of Aira caldera proposed by Matumoto (1943). Stars represent submerged post caldera lava domes.

始良火砕噴火は、まずプリニー式噴火（大隅降下軽石の噴出）で始まり、ついで妻屋火砕流、最後に大規模な入戸火砕流（亀割坂角礫を含む）を噴出した（Aramaki, 1984）。福島・小林（2000）はプリニー式噴火の初期に、噴煙柱崩壊型の小規模火砕流（intra-plinian flow）が頻発したことを明らかにし、垂水火砕流堆積物と命名した。初期の大隅降下軽石と垂水火砕流の噴火地点は、現在の桜島火山の位置（Aramaki, 1984; Kobayashi et al., 1983）であったが、その後、主要な火口は北東に移り、最大規模の入戸火砕流の噴火は福山沖の若尊カルデラで発生した（Nagaoka, 1988）。

シラス台地は広大な地域を厚く覆っているためか、先駆的現象の顕著な事例は見つかっていない。しかし十万年間という長い時間スケールでみると、始良カルデラの内部～周辺で、7500年に一度の頻度で噴火が発生し、始良火砕噴火直近の3000年間は1000年に一度の割合に急増している（長岡ら, 2001）。Fig.

4は最近10万年間のマグマの噴出量を示す階段ダイアグラムである。直近の前兆現象ではないが、大規模なカルデラ噴火にむかって徐々にマグマの噴出頻度が増しているのは、注目すべき現象である。

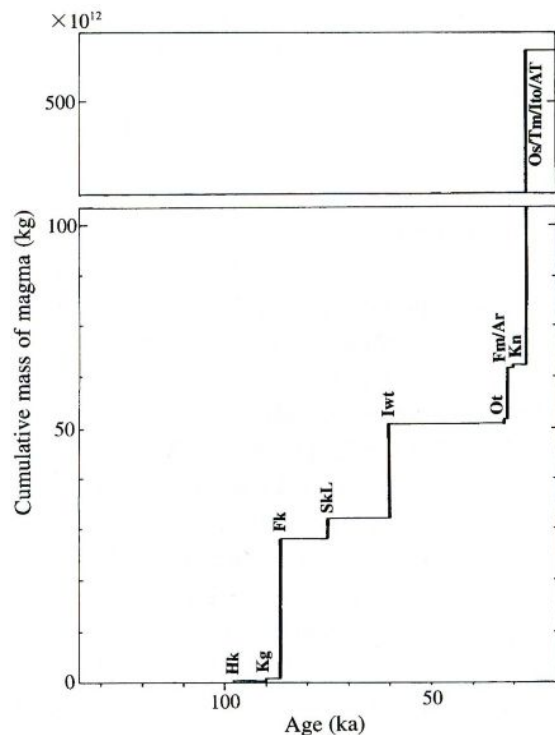


Fig. 4 Cumulative discharge mass of magma from Aira caldera during 100-27 ka (see Nagaoka et al., 2001)

#### 4. カルデラの現状

鬼界カルデラでは、カルデラの中央部に再生ドームが存在しており、アカホヤ噴火 (7.3 ka) 以降、急激にマグマが充填し膨張したものと推定される。アカホヤ噴火以降に出現した火山が再生ドームの部分にあるかどうかは不明であるが、想定される環状割れ目に沿って薩摩硫黄岳、稲村岳、昭和硫黄島が誕生している。薩摩硫黄岳は流紋岩質の成層火山であり、6 kaには海面上に出現し現在も活動中である。稲村岳は4-3 kaの短期間活動した玄武岩～安山岩質の小型成層火山である。昭和硫黄島は1934-1935年に海底から出現した流紋岩質の溶岩ドームである。陸上に噴出した岩石は玄武岩と流紋岩が卓越したバイモーダルな産出頻度を示す。

このような現状はアカホヤ噴火前の状況と類似した側面もある。すなわち苦鉄質マグマの噴出などは共通した現象と認められ、大きな流紋岩質マグマ溜りとは異なるマグマ供給系が存在するのであろう。しかし流紋岩質マグマはカルデラ中心のマグマ溜りから供給されているのであろうが、その噴出がカルデラ噴火に結びつくか否かの判断は難しい。

いずれにせよアカホヤ噴火からまだ1万年も経っていないが、カルデラ中央には再生ドームが形成されており、次のカルデラ噴火が差し迫りつつあるものかどうか、多面的な研究が望まれる。

一方、始良カルデラでは、後カルデラ火山である桜島火山の活動が中心であり、その噴火史 (発達史) は古期北岳、新期北岳、南岳の3つのステージに区分される。古期北岳の活動は26 kaから24 kaまでの比較的短期間であり、その後長期にわたる穏やかな時期があった。新期北岳の活動は13 kaから始まり5 kaまで続き、約4 kaからは南岳の活動へと変化した。南岳が成長する過程では、断続的なブルカノ式噴火が3000年間にわたり継続し、山麓一帯には厚い火山砂が堆積した (小林, 1986)。このテフラ層は鬼界カルデラの籠港テフラ層と酷似しており、また1955年以降現在まで続く南岳の山頂火口および昭和火口の噴火でも同様な火山砂層が形成されている。

なお古期と新期北岳の活動の間の19 kaに、高野ベースサージ (TBS) が発生している。このテフラの正確な噴火地点は不明であるが、マグマの組成は桜島とは異なり、むしろ始良カルデラのものに類似する。安永噴火時に出現した新島を構成する新島軽石に酷似するが、完全に対比されているわけではない。いずれにせよ、桜島の誕生以降に、始良カルデラのマグマが噴出したということは、始良カルデラと桜島火山のマグマ溜りは分離した存在であることを意味している。

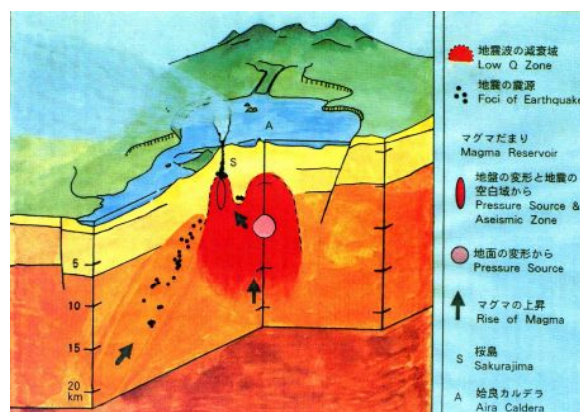


Fig. 5 Illustration of magma plumbing system of Sakurajima volcano (see Kamo, 1989)

Fig. 5は桜島火山のマグマ供給系のモデルである (Kamo, 1989)。このモデルでは桜島火山のマグマ溜りは1つではなく、主要なマグマ溜りは始良カルデラの中心付近の海面下5 km以深に存在しており、そこから桜島直下の浅いマグマ溜り (火口直下数 km) に移動し、ついに噴火すると推定されている。しかし上述したように、カルデラ中心のマグマ溜りには

珪長質なマグマが蓄積されており、桜島で噴出する安山岩質マグマは、その脇を経て桜島直下に移動していると考えられるべきである。すなわち桜島においても鬼界カルデラと同様に、カルデラ中央部には大き

な珪長質なマグマ溜りが存在し、安山岩質マグマはそこよりやや深い周辺部に別個のマグマ溜りとして存在しているというイメージが最も現実的なモデルではないかと考える。

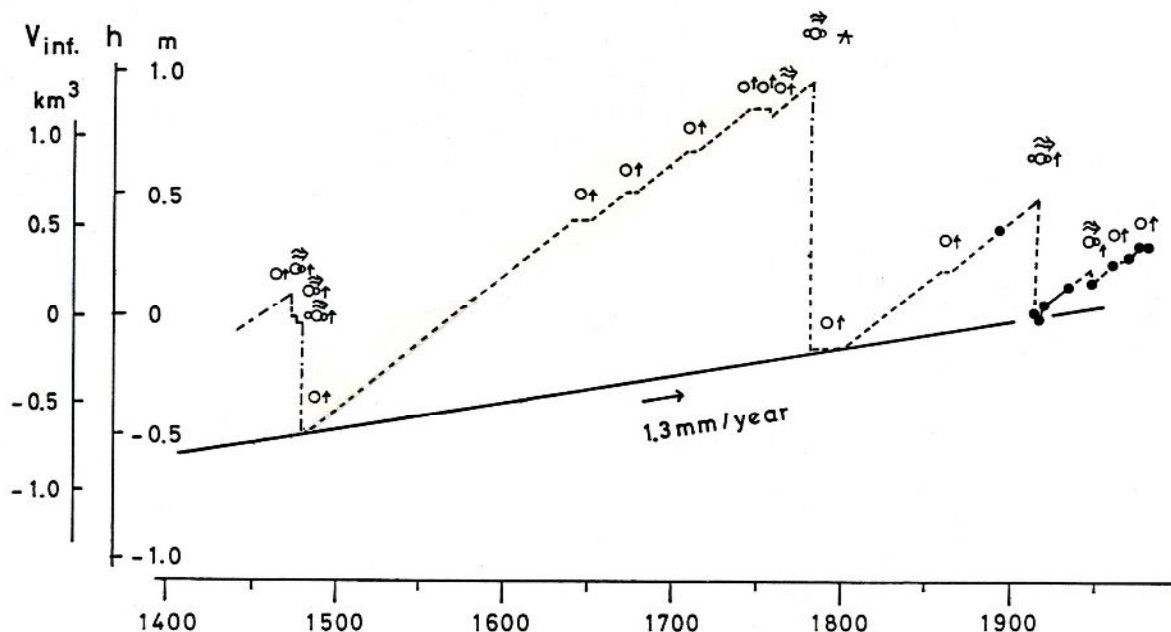


Fig. 6 Estimated elevation change at the rim of Aira caldera through historical time (Kamo and Ishimara, 1980; Izumi et al., 1991). “ $V_{inf}$ ” and “ $h$ ” represent the inflated volume of pressure source beneath the Aira caldera at a depth of 10 km and elevation change of the western rim of the caldera relative to Kagoshima city, respectively.

加茂・石原(1980)は桜島火山の噴火に伴う始良カルデラ周辺の地盤の変動を調べ、15世紀まで遡った歴史時代の地盤変動量を推定した(Fig. 6)。その結果、噴火で放出したマグマ量に比例して地盤が急激に沈降するが、その後マグマが一定の割合で供給(1000万 $m^3/year$ )されるために、徐々に隆起回復するという規則性が見出された。しかし噴火後に地盤が元の高さまで沈降することはない、全体の地盤は1.3 mm/yearの割合で隆起を続けている(泉ら, 1991)。このことは、のこぎりの歯のような地盤の大きな変動は桜島火山のマグマ溜りの膨縮を反映したものであり、始良カルデラ一帯の着実な地盤の上昇傾向(1.3 mm/年)は地下深部(始良カルデラ)で珪長質マグマが蓄積され続けていることを示唆している。

泉ら(1991)によると、この変化傾向が過去7000年間継続したと仮定しても、他の地学現象と大きな矛盾は生じない。もし珪長質マグマが過去3万年の間、この割合で蓄積されてきたと仮定すると、現在の始良カルデラには一定量のマグマ(数10 $km^3$ 程度か?)が蓄積されていることになる。

## 5. おわりに

カルデラの地下では、噴火を引き起こす巨大な珪長質なマグマ溜り、そのマグマを生産する熱源としての苦鉄質なマグマ溜り、さらには後カルデラ火山活動(あるいはカルデラ噴火に先行する火山活動)のマグマ溜りが互に独立して存在しているものと考えざるをえない。それゆえ表面的な火山活動が活発であればカルデラ噴火はおこらないというのは迷信であり、地下深部では地殻物質を溶かしながら珪長質マグマを盛んに生産していると考えられるべきである。カルデラ噴火の将来予測のためにも、カルデラの実態についての更なる研究が望まれる。

## 謝辞

本研究は京都大学防災研究所の平成20・21年度一般共同研究(課題番号20G-10)として実施されたものである。本稿のテーマの一部は、西村光史(産業技術総合研究所)、成尾英仁(鹿児島県武岡台高等

学校), 稲倉寛仁(西日本技術開発株式会社)の方々との共同研究でもある。記して感謝いたします。

### 引用文献

泉 拓良・小林哲夫・松井 章・諏訪 浩・江頭庸夫・加茂幸介(1991): 桜島における縄文人の生活と火山災害 - 桜島・武貝塚の発掘調査-. 京大防災研年報, 34号 A, 81-190.

奥野 充(2002): 南九州に分布する最近3万年間のテフラの年代学的研究. 第四紀研究, 第41巻, 4号, 225-236.

小野晃司・曾屋龍典・細野武男(1982): 薩摩硫黄島地域の地質. 地域地質研究報告(5万分の1地質図幅), 地質調査所, 80p.

海上保安庁水路部(2000) 薩摩硫黄島地磁気解析報告書. 51p.

加茂幸介・石原和弘(1980): 地盤変動からみた桜島の火山活動. 桜島地域学術調査協議会調査研究報告, 鹿児島県, 19-28.

小林哲夫(1986): 桜島火山の断続噴火によって形成された火山灰層. 鹿児島大学南科研資料センター報告特別号, No.1, 1-12.

小林哲夫(2008a): 鬼界カルデラ・竹島の火山地質. 日本火山学会講演予稿集 2008年度秋季大会, 138p.

小林哲夫(2008b): カルデラの研究からイメージされる新しい火山像—マグマの発生から噴火現象までを制御するマントル—地殻の応力場—. 月刊地球 総特集 カルデラ生成噴火—準備過程の理解に向けて—, 海洋出版, 号外 60号, 65-76.

小林哲夫・奥野 充・成尾英仁(2006): 鬼界カルデラ 7.3 cal kyr BP 噴火—カルデラ噴火における玄武岩質マグマと地殻応力の役割—. 月刊地球, 第28巻, 2号, 75-80.

長岡信治・奥野 充・新井房夫(2001): 10万~3万年前の始良カルデラ火山のテフラ層序と噴火史. 地質雑, 第107巻, 7号, 432-450.

福島大輔・小林哲夫(2000): 大隅降下軽石に伴う垂水火砕流の発生・堆積様式. 火山, 第45巻, 4号, 225-240.

Aramaki, S. (1984): formation of the Aira caldera, southern Kyushu, -22,000 years ago. J. Geophys. Res., Vol. 89, No. B10, 8485-8501.

Kamo, K. (1989): A dialogue with Sakurajima Volcano. Proceedings of Kagoshima International Conference on Volcanoes 1988. 3-13.

Kobayashi, T., Hayakawa, Y., and Aramaki, S. (1983): Thickness and grain-size distribution of the Osumi pumice fall deposit from the Aira caldera. Bull. Volcanol. Soc. Japan, Vol. 28, No. 4, 124-139.

Matumoto, T. (1943): The four gigantic caldera volcanoes of Kyushu. Jap. J. Geol. Geogr., Vol. 19, Spec. No., 57p.

Nagaoka, S. (1988): Late Quaternary tephra layers from the caldera volcanoes in and around Kagoshima Bay, southern Kyushu, Japan. Geogr. Rep. Tokyo Metropolitan Univ., No. 23, 49-122.

Sparks, R.S.J., Sigurdsson, H., and Wilson, L. (1977): Magma mixing: a mechanism for triggering acid explosive eruptions. Nature, Vol. 267, 315-318.

### Precursory Events of Large-scale Caldera-forming Eruption - Examples at Kikai and Aira Calderas -

Tetsuo KOBAYASHI\*, Mitsuru OKUNO\*\*, Shinji NAGAOKA\*\*\*,  
Yasuo MIYABUCHI\*\*\*\*, Masato IGUCHI and Daisuke MIKI

\* Graduate School of Science & Engineering, Kagoshima University, Japan

\*\* Faculty of Science, Fukuoka University, Japan

\*\*\* Faculty of Education, Nagasaki University, Japan

\*\*\*\* Faculty of Education, Kumamoto University, Japan

### Synopsis

The precursory events of caldera forming eruptions at Kikai and Aira calderas in Kyushu were investigated. Examples at Kikai caldera are 1) intermittent vulcanian eruptions of mafic magma for ca 8000

years, 2) sector collapse of the volcano, 3) eruption of degassed rhyolitic magma shortly before the climactic eruption, and 4) severe ground shaking occurred twice during the eruption. These pieces of evidence suggest, 1) the preceding long, dormant period is not necessary for a caldera-forming eruption, and 2) the trigger of the climactic eruption was not the mixing of coexisting mafic and felsic magmas, but was closely related to the decompression of felsic magma. We could not find any precursory event at Aira caldera, but if a steady uplift of 1.3 mm/year measured around the Aira caldera had continued since the 30 ka Aira eruption, felsic magma of several tens km<sup>3</sup> volume would have already accumulated in the magma reservoir.

**Keywords:** precursory event, Kikai caldera, Aira caldera, crustal stress field