

「鬼界カルデラの地質研究 40 年でわかってきたこと」

小林哲夫（北海道総合地質学研究センター・京都大学防災研究所火山活動研究センター）

九州の四大カルデラ（北から阿蘇・姶良・阿多・鬼界）は Matumoto (1943)により世界的に有名になったが、そのなかで鬼界カルデラは最後に発見された海域のカルデラである。私が鬼界カルデラの調査を始めたのは 1983 年であり、小野・他 (1982)「薩摩硫黄島地域の地質」という総合的な地域地質研究報告が出版された直後であった。大半が水没したカルデラ火山なので、何か新しいことがわかるという展望はなかったが、約 40 年にわたる調査で多くのテーマとめぐり逢い、火山研究の醍醐味を味わうことができた。今回の発表では、地質調査で見出した研究テーマを分かりやすく紹介する。

1. 鬼界カルデラの発見～小野・他 (1982) までの成果

鬼界カルデラの発見 (Matumoto, 1943), 幸屋火砕流堆積物の発見 (宇井, 1973), 二重カルデラ縁の発見 (長井・他, 1977), アカホヤ火山灰の給源など (長友・庄子, 1977; 町田・新井, 1978), 陸域及び海底の地形・地質, 地球物理的な総合的調査研究がなされた (小野・他, 1982). 最新のカルデラ形成噴火はアカホヤ噴火 (7.3 cal ka BP: 奥野, 2002) とよばれ, 噴出物は下位から幸屋降下軽石 (K-KyP) と intra-plinian flow である船倉火砕流堆積物 (K-Fn), 竹島 (幸屋) 火砕流堆積物 (K-Ky) および熱雲状に舞い上がり広域に飛散したアカホヤ火山灰 (K-Ah) からなる。

2. カルデラ縁の地質調査 (1983～1984) と, いきなりの大ヒット

Walker, G. P. L. and Ui, T. (1984)の日米科学協力の共同研究で鬼界カルデラの研究が始まり, 小林・早川はカルデラ縁 (薩摩硫黄島, 竹島) の調査を担当した。薩摩硫黄島の大浦湾の大露頭は長浜溶岩を覆う最古の火砕流堆積物からなると記載されていたが, 最古の火砕流堆積物が実は最新のアカホヤ噴火の K-Fn の強溶結層であることを発見した。また K-Fn (+ K-KyP) と直下の長浜溶岩との境界には, 地質的な時間差を示す土壌や風化部などは存在しなかった。それゆえ長浜溶岩はカルデラ噴火の直前 (地質学的スケール) に噴出した溶岩であると考えた (Kobayashi and Hayakawa, 1984)。この前兆溶岩の発見は, 後にカルデラ噴火の予知・予測を追求するうえで, 最も重要な視点であると確信するようになった (5. 参照)。

池田カルデラ起源の降下テフラの研究 (成尾・小林, 1984) もほぼ同じ時期に着手したが, 1990 年ころに池田カルデラ形成後に周辺に厚く集積した火山豆石に富む火山灰 (池田湖火山灰層) に多くのクラスティック・ダイク (碎屑岩脈) が発生しているのに気づき, その成因を議論した (成尾・小林, 1995)。

3. アカホヤ津波の研究

成尾・小林 (2002) はアカホヤ噴火の最中に 2 度の強い地震が発生したことを明らかにした。地質的な証拠はアカホヤテフラと密接に関連した層準に発生した噴礫、噴砂等 (クラスティック・ダイク) である。そのような露頭は種子島や屋久島～大隅・薩摩半島南部に広がっていた。この論文を契機に、アカホヤ津波の研究も盛んになり、多くの研究が公表された。津波の主要因は地震との主張が多かったが、その震央はカルデラ域の地震だけでなく、海溝での地震との推定も多い (藤原・他, 2010 ; 七山・他, 2021a ; Nanayama et al., 2021b)。その他、爆発説、火砕流の海中突入説 (Geshi et al., 2017)、カルデラ崩壊説など多様である。しかし小林 (2008) は南九州地域の海岸付近の標高 30 m 以下の低地では、アカホヤテフラが大規模に侵食されていることから、最大の津波 (アカホヤ津波) はアカホヤ噴火終了から一定の期間を経て発生したカルデラ崩壊が主要因と議論した (小林, 2008, 2022a, c)。このようなカルデラ崩壊をイメージするのは難しいかもしれないが、噴火後はすぐには崩壊は起こらず、現在のカルデラ中央を中心に地盤沈降が発生し (down sag caldera: Walker, 1984)、地盤を支えきれなくなると、一気に崩壊する (piece meal caldera: Cole et al., 2005) というイメージである。いわゆる全体的な沈降 (down sag caldera) の時期から、瞬時の崩壊 (piece meal caldera) へと激変し、大規模なアカホヤ津波が発生したという考えである。

南部九州の海岸沿いの低地に縄文早期の貝塚などの遺跡が極端に少ないのも、アカホヤ津波の影響と推定した (小林, 2021)。また屋久島南東部には火砕流が到達せず、屋久サルが噴火災害を生き延びた原因 (下司, 2009) との主張に対しても、屋久島南東部にも火砕流は到達したが、アカホヤ津波で侵食された可能性を提起した。その結果、ヤクシマザルなど大型哺乳類は本当にアカホヤ噴火災害を生き延びたのかという問題に立ち返る必要があると考えるようになった (小林, 2021 ; 小林・東, 2023)。

4. カルデラ地形の成因

1970 年代半ばからは鬼界カルデラの海底地形・地質の調査や各種の物理探査がなされた。中村・他 (1986) は潜航調査も実施している。小野寺・他 (2009, 2010) は詳細な海底地形図をもとに地形・地質について議論している。その後は池上・他 (2012)、Ikegami et al. (2013) 等が、海底地形の成因について発表している。

カルデラの中央を占めるドーム状地形 (中央高地) については、小火山の集合体との見解が多かったが、Tatsumi et al. (2018) は比較的新しい時代に出現した世界最大級の溶岩ドームであると主張した。しかし石原 (1977) や小野寺・他 (2009, 2010) による重力探査の結果 (顕著な負の重力異常) が考慮されていない。ドーム状の地形はカルデラ底が隆起した再生ドームであり (小林, 2008; 小林・他, 2010)、ドーム上に存在する水冷溶岩 (Tatsumi et al., 2018) は、1934 年の昭和硫黄島誕生時の海底噴火で湧出した巨大軽石 (~30 m 大) の沈積物であることを例証し、巨大な溶岩ドーム説を否定した (小林, 2022a, c)。最近では Shimizu et al. (2024) が鬼界カルデラ周辺の海底には、アカホヤ噴火で発生した火砕流の一

部が海中に突入し、希薄な密度流（水中火砕流）として海底に広く分布すると主張した。しかし海底に集積するアカホヤテフラは地震や後のアカホヤ津波の影響（小林, 2022a）を受けているはずであり、上記論文にはそのような視点が欠如していると言わざるをえない。

5. カルデラ噴火の予知・予測への取り組み

Kobayahshi and Hayakawa (1984) で認識したアカホヤ噴火直前に噴出した長浜溶岩とよく似た事例が、Crater Lake caldera でも記載されていた (Bacon, 1983)。その実例はカルデラ形成噴火の直前に噴出した Cleetwood lava であり、溶岩上に集積したプリニー式降下軽石が下位の溶岩の熱で強溶結していた。溶岩の一部はカルデラ縁で断ち切れ、カルデラ内壁沿いに分布している。

そのような前兆的な溶岩主体の噴火は、他カルデラでも次々と見いだされるようになった。国内では阿蘇カルデラの Aso-4 噴火前の高遊原溶岩（小林・星住, 2017）、Aso-2 噴火前の玉来川溶岩～秋田溶岩（小林ほか, 2009）、海外では既知のクレータレイクカルデラ噴火前の Cleetwood lava, Llao Rock 等の溶岩 (Bacon, 1983, 2008) があり、フィリピンのイロシカルデラ噴火と Malobago dome の形成 (Kobayashi et al., 2014) も同様の関係であった。さらにインドネシアのバツールカルデラ噴火でも類似例が発見され（小林ほか, 2016）、始良カルデラ噴火でも類似例を発見している（小林・他, 2019）。このような事例が増えると、破局的なカルデラ噴火には必ず顕著な前兆現象が発生することが期待される。厚い殻に覆われたマグマが、何の前触れもなくいきなり破局的な噴火になる訳ではなさそうである。

カルデラ噴火と活断層での地震発生とは根本的な違いがあり、カルデラ噴火はどこで発生するかは自明のことである。最も重要なことは「いつごろ」噴火するのかがわかりさえすれば、カルデラ噴火の予知（予測）として十分であると考えている。カルデラ噴火へのプロセスについては、講演で詳しく発表する予定である。

引用文献

Bacon (1983) Eruptive history of Mount Mazama and Crater Lake caldera, Cascade Range, U. S. A. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **18**, 57-115.

Bacon (2008) Geologic Map of Mount Mazama and Crater Lake Caldera, Oregon. *USGS science for a changing world*, 1-45.

Cole et al. (2005) Calderas and caldera structures: a review. *Earth Science Reviews*, **69**, 1-26.

藤原・他 (2010) 大分市横尾貝塚に見られるアカホヤ噴火に伴う津波堆積物. 第四紀研究, **49**, 23-33.

下司 (2009) 屋久島を覆った約 7300 年前の幸屋火砕流堆積物の流動・堆積機構. 地学雑誌,

118, 1254-1260.

Geshi et al. (2017) Tsunami deposits associated with the 7.3 ka caldera-forming eruption of the Kikai Caldera, insights for tsunami generation during submarine caldera-forming eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **347**, 221-233.

池上・他 (2012) 反射法探査による鹿児島県・鬼界カルデラの陥没・崩壊構造. 日本地質学会第 119 年学術大会講演要旨, R7-O-1.

Ikegami et al. (2013) Near-vent morphology and dispersion timing of the climactic PDC in 7300 BP marine caldera formation of Kikai caldera in southern-off Kyushu Island, through seismic reflection survey. Abstract of IAVSEI 2013 Scientific Assembly, 818.

石原 (1977) 鬼界カルデラの重力異常. 地質調査所月報, **28**, 575-588.

小林 (2008) 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ー地殻の応力場—. 月刊地球, 号外 no. 60, 65-76.

小林 (2021) 鬼界カルデラの研究史にもとづくカルデラ噴火の全体像: カルデラ噴火の長期的予知・予測への将来展望. 国際火山噴火史情報研究集会講演要旨集, 2021-1, 9-67.

小林 (2022a) 鬼界カルデラ火山の研究史. 月刊地球, **44**, 178-194.

小林 (2022b) 鬼界カルデラの 7.3 cal ka BP 噴火に関連するアカホヤ津波の全体像. 火山, **67**, 335-350.

小林 (2022c) 鬼界カルデラの形成機構と中央ドーム状地形の成因. 国際火山噴火史情報研究集会講演要旨集, **2022-1**, 86-98.

Kobayashi and Hayakawa (1984) Geology of Kikai caldera (Source of the Koya Ignimbrite), Japan. *A progress report of the U.S.-Japan Cooperative Science Program "Volcanology of the Koya ash flow" (Walker, G.P.L. and Ui, T. eds.)*, 13-14.

小林・星住 (2017) 阿蘇—4 火砕流堆積物と高遊原溶岩が重なる露頭. 日本火山学会 2017 年度秋季大会講演予稿集, 19.

小林・東 (2023) 鬼界カルデラ研究の到達点と未解決な重要課題. 国際火山噴火史情報研究集会講演要旨集, **2023-1**, 61-85.

小林・他 (2009) Aso-2 火砕流噴火の直前に噴出した異常に高温の安山岩質マグマ. 日本火山学会講演予稿集, 19.

小林・他 (2010) 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—. 京都大学防災研究所年報, 第 53 号 B, 269-275.

Kobayashi et al. (2014) Eruptive sequence and characteristics of the Irosin ignimbrite, southern Luzon, Philippines. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **123**, 123-132.

小林・他 (2016) インドネシア, バリ島のバツール新期カルデラ形成噴火の推移. 国際火山噴火史情報研究集会講演要旨集, **2015-2**, 35-39.

- 小林・他 (2019) 3 万年前の始良カルデラ噴火の前兆として噴出した流紋岩溶岩. 日本火山学会秋季大会講演予稿集, 154.
- 町田・新井 (1978) 南九州鬼界カルデラから噴出した広域テフラ-アカホヤ火山灰. 第四紀研究, 17, 143-163.
- Matumoto (1943) The four gigantic caldera volcanoes of Kyusyu. *Japanese Journal of Geology and Geography*, 19, Special number, 1-57.
- 三島村・鬼界カルデラジオパーク (2017) 三島村・鬼界カルデラジオパークガイド. パンフレット, 三島村役場.
- 長井・他 (1977) 鬼界カルデラの海底地形・海底地質構造. 地理学会予稿集, no. 13, 194-195.
- 長友・庄子 (1977) アカホヤ, イモゴ, オンヂの対比ならびに噴出源について アカホヤの土壌肥料学的研究 (第 2 報). 日本土壌肥料学雑誌, 48, 1-7.
- 中村・他 (1986) 鬼界カルデラの海底地質調査-特に giant pumice の産状, 微地形の検討, 水温の測定について-. 海洋科学技術センター試験研究報告特集号, 第 2 回「しんかい 2000」研究シンポジウム, 137-155.
- 七山 (2021a) 宮崎平野で認められた 7.3 ka 津波堆積物および鬼界アカホヤ火山灰降下前後の古環境変化. 月刊地球/号外, no. 70, 76-88.
- Nanayama et al. (2021b) Great earthquake at 7.3 ka inferred from tsunami deposits in the Sukumo Bay area, Southwestern Japan. *Island Arc*, 30, e12422.
- 成尾・小林 (1984) 池田カルデラ形成時の降下堆積物 (演旨). 火山, 29, 148.
- 成尾・小林 (1995) 噴火によって生じたクラスティックダイク. 鹿児島大学理学部紀要 (地学・生物学), no. 28, 111-122.
- 成尾・小林 (2002) 鬼界カルデラ, 6.5 ka BP 噴火に誘発された 2 度の巨大地震. 第四紀研究, 41, 287-299.
- 奥野 (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, 41, 225-236.
- 小野・他 (1982) 地域地質研究報告 (5 万分の 1 図幅) 薩摩硫黄島地域の地質. 地質調査所, 80p.
- 小野寺・他 (2009) 海域火山基礎情報図「鬼界カルデラ」調査. 海洋情報部技報, no. 27, 92-97.
- 小野寺・他 (2010) 鬼界カルデラの重力・地磁気異常について. 海洋情報部研究報告 (技報), no. 46, 103-107.
- Shimizu et al. (2024) Submarine pyroclastic deposits from 7.3 ka caldera-forming Kikai-Akahoya eruption. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 448, 101817.

Tatsumi et al. (2018) Giant rhyolite lava dome formation after 7.3 ka supereruption at Kikai caldera, SW Japan. *Scientific Reports*, **8**, 2753.

宇井 (1973) 幸屋火砕流—極めて薄く拡がり堆積した火砕流の発見. 火山, **18**, 153-168.

Walker, G. P. L. (1984) Downsag calderas, ring faults, caldera size, and incremental caldera growth. *Journal of Geophysical Research*, **89**, 8407-8416.

Walker, G. P. L. and Ui, T. eds. (1984) Volcanology of the Koya ash flow. *A progress report of the U.S.-Japan Cooperative Science Program*, 27p.

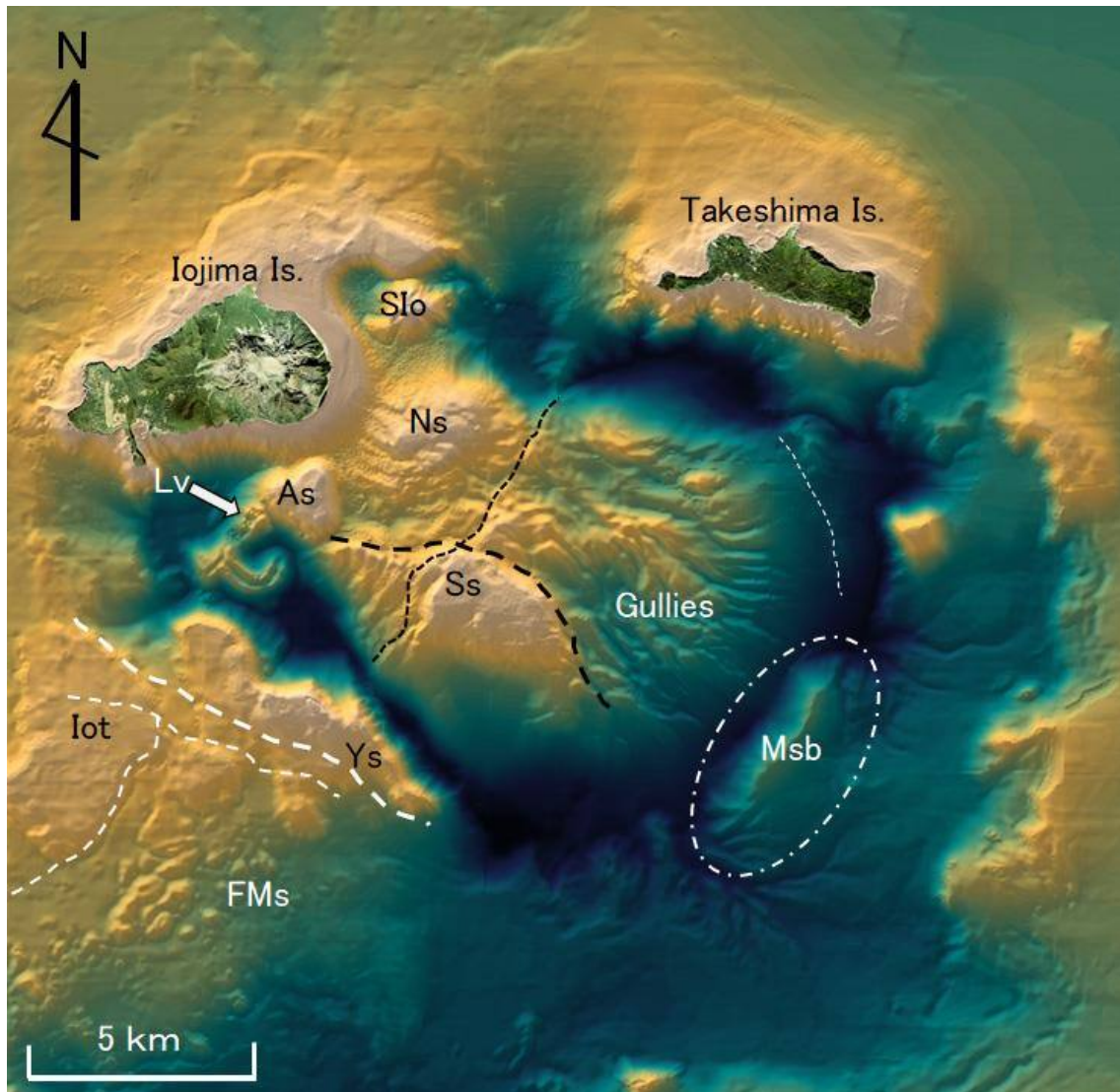
図・写真



1. 竹島から薩摩硫黄島を遠望, その先に黒島も見える.

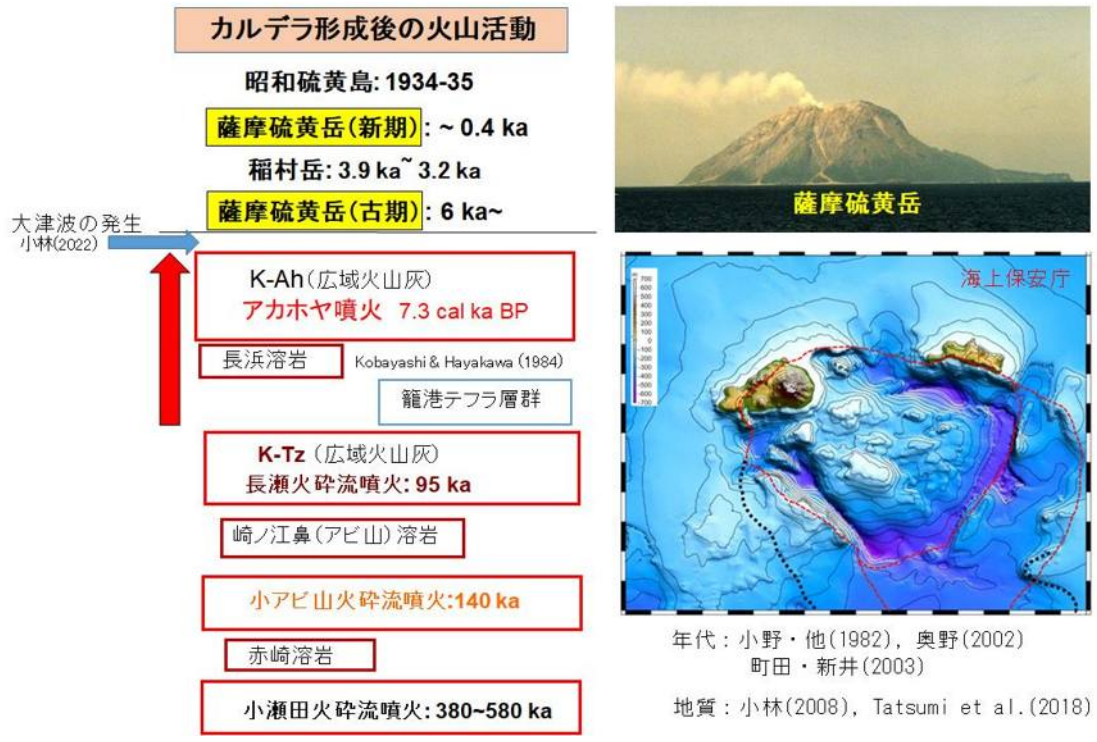


2. 硫黄島の大浦湾の大露頭. 鬼界カルデラ研究で, 最初に取り組み, 最も重要な露頭.
中央部の大部分を占める撓んだ塊状の地層が K-Fn の強溶結層. 右下が長浜溶岩.



3. 彩色立体海底地形図（三島村・鬼界カルデラジオパーク，2017）

Slo：昭和硫黄島，Ns：中曽根，As：浅瀬，Lv：海底溶岩流の噴火地点，Ss：シタキ曽根，Ys：ヤクロ瀬，Iot：硫黄礁，FMs：流れ山，Msb：巨大地すべり岩体あるいは下からの押し上げによる傾動地塊。境界線は特徴的な地形の境界で，黒破線は中央高地部分，白破線はカルデラ南西部における地形境界，南東の白色一点鎖線は傾動地塊？を囲んだ線。



4. 鬼界カルデラの噴火史 (小林・東, 2023)

赤破線: 小野・他 (1982) による二重カルデラ縁, 黒破線: Tatsumi et al. (2018) による二重カルデラ縁の外側縁 (内側縁は小野・他, 1982 と同じ).