

南九州，池田火山の噴火史

稲倉 寛仁*・成尾 英仁**・奥野 充***・小林 哲夫****

(2014年9月1日受付, 2014年10月16日受理)

Eruptive History of Ikeda Volcano, Ibusuki Area, Southern Kyushu, Japan

Hirohito INAKURA*, Hideto NARUO**, Mitsuru OKUNO*** and Tetsuo KOBAYASHI****

We made a detailed geological study to understand the eruptive history of the Ikeda volcano, which includes the Ikeda caldera, maars and lava domes. The pre-caldera activity began at about 20 cal kBP with the Iwamoto ash fall deposit. The Senta lava was also effused before the Kikai-Akahoya tephra (7.3 cal kBP). The caldera-forming eruption began at 6.4 cal kBP with a phreatic explosion that produced the Ikezaki ash fall and surge deposits. This was soon followed by the magmatic eruptions that produced the Osagari and Mizusako scoria fall deposits and the Ikeda pumice fall deposit. During the climactic stage, the Ikeda ignimbrite was erupted and covered portions of the coastal area. Immediately after the caldera-forming event, four maars were formed along the fissure vent southeast of the caldera. The Yamagawa maar, which is the largest and is located at the southeastern end of the fissure vent, erupted a pumiceous base surge (the Yamagawa base surge), while the other maars ejected small amounts of accessory or accidental materials. During the late stage of the Ikeda eruption, a phreatomagmatic eruption occurred at the bottom of the caldera floor, which formed the widespread Ikedako ash fall deposit. The central lava dome was formed during the late stage of this eruption. After the Ikedako ash fall, secondary explosions of the Ikeda ignimbrite occurred mainly along the coastal area, generating small base surge deposits. About 2,000 years after the caldera-forming eruption at 4.8 cal kBP, new magmatic activity began on the margin of the caldera rim, and formed the Nabeshimadake lava dome.

Key words: Ikeda caldera, caldera-forming eruption, ignimbrite, secondary explosion

1. はじめに

南九州を南北に連なる鹿児島地溝（露木，1969）内には、北から加久藤・小林、始良および阿多の大型カルデラが並んでおり、その南方沖には鬼界カルデラが存在する（Fig. 1A）。阿多カルデラは、Matumoto（1943）により105 ka（町田・新井，2003）に噴出した阿多火砕流堆積物（略称 Ata-Pfl）の分布とともに提唱された。その後、荒牧・宇井（1966）は、Ata-Pflの噴出源をその北方の海域

に求め、その海底カルデラ（早坂，1987）を阿多カルデラとした。町田・他（2001）は、これらをそれぞれ阿多南部カルデラと阿多北部カルデラとした。Fig. 1Bに指宿地域の代表的な火山地形を示す。阿多南部カルデラの西半分に相当する薩摩半島南端の指宿地域には、小型の池田カルデラ（直径約4 km）が存在する。池田カルデラ形成時に噴出した火砕流は西側の鬼門平断層崖と東側の火山地域に挟まれた低地を埋め、平坦な火砕流台地を形

* 〒810-0004 福岡市中央区渡辺通 1-1-1

西日本技術開発株式会社調査解析部

Survey and Analysis Department, West Japan Engineering Consultants Incorporation, 1-1-1 Watanabe-dori, Chuo-ku, Fukuoka 810-0004, Japan.

** 〒890-0022 鹿児島市小野町 3175

鹿児島県立武岡台高等学校

Takeokadai Senior High School, 3175 Ono-machi, Kagoshima 890-0022, Japan.

*** 〒814-0180 福岡市城南区七隈 8-19-1

福岡大学理学部地球圏科学科・産学官連携研究機関
国際火山噴火史情報研究所

Department of Earth System Science, Faculty of Science,

also AIG Collaborative Research Institute for International Study on Eruptive History and Informatics (ACRIFIS-EHAI), Fukuoka University, 8-19-1 Nanakuma, Jonan-ku, Fukuoka 814-0180, Japan.

〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-35

鹿児島大学大学院理工学研究科地球環境科学専攻
Department of Earth and Environmental Sciences, Graduate School of Science and Engineering, Kagoshima University, 1-21-35 Korimoto, Kagoshima 890-0065, Japan.

Corresponding author: Hirohito Inakura

e-mail: h-inakura@wjec.co.jp

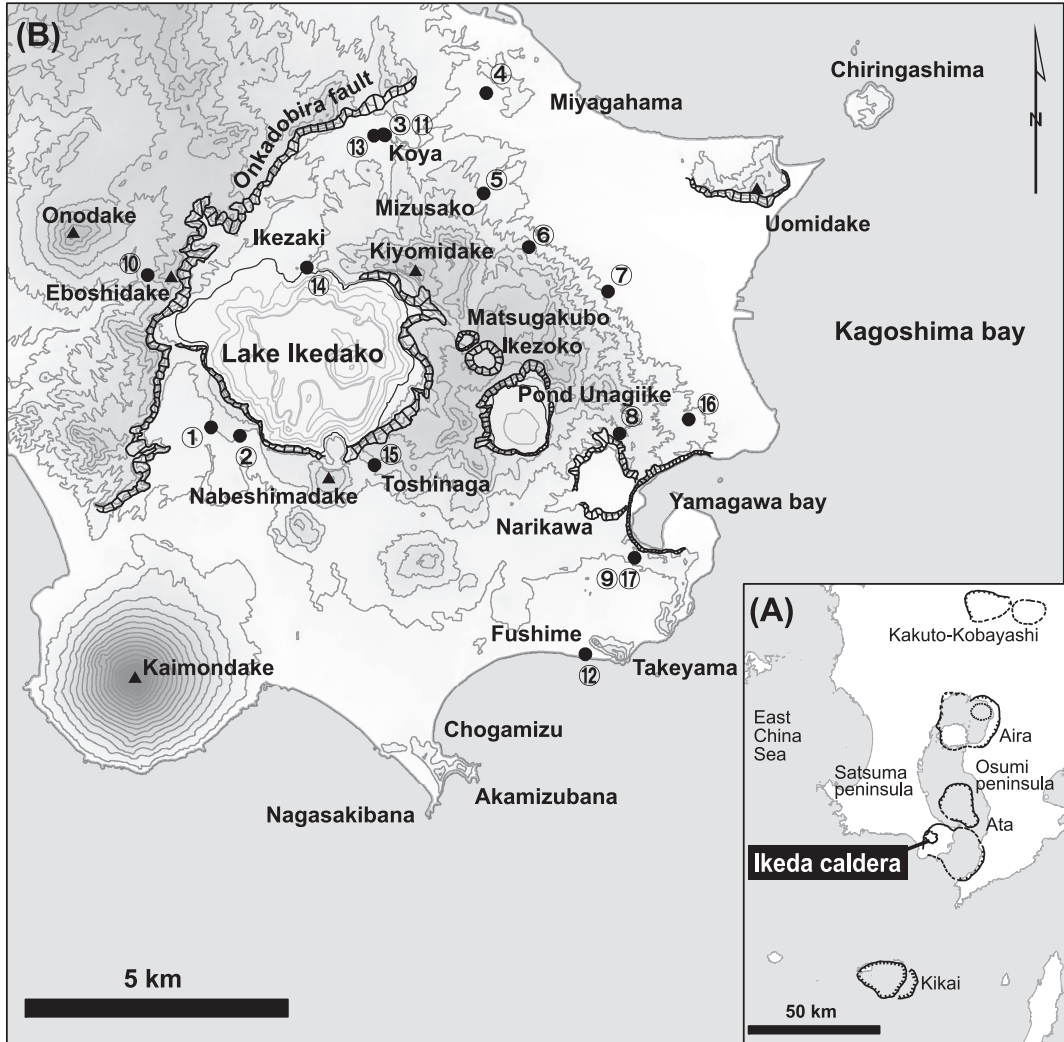


Fig. 1. Index Maps. (A) Distribution of caldera volcanoes in southern Kyushu, (B) Topographic map of the Ikeda caldera and surrounding area. The circled numbers indicate the locations of the columnar sections in Figs. 4 and 5. The contour interval is 50 m.

成している。現在、池田カルデラの大部分は池田湖（水深 233 m）となっており、湖底には形態から溶岩ドームと考えられる小規模な火山体（底径約 0.9 km, 比高約 150 m）が存在する（Matumoto, 1943 など）。池田カルデラの東側には北西から南東方向へ、まつがくぼ（直径約 0.2 km）、いけぞこ（直径約 0.5 km）、うなぎいけ（直径約 1.2 km）、なりかわ（直径約 1.1 km）およびやまがわ（直径約 1.5 km）のマル地形が直線状に配列している。さらに池田カルデラ南縁には鍋島岳（標高 256 m）がある（小林, 1984; 奥野・小林, 1991）。このように指宿地域には、池田カルデラの他にも多様な火山地形が見られる。

池田カルデラ形成噴火については、成尾・小林（1980, 1984）や小林・成尾（1982）が噴火現象と推移の概略を提示しており、岩倉・他（2001）は、粒度分析をもとに池田火砕流堆積物（略称 Ik-Pfl; 宇井, 1967）の噴出・堆積機構を論じている。成尾・小林（1995）は池田湖降下火山灰堆積物（略称 Ik-Ika; 成尾・小林, 1984）中に産出する碎屑岩脈の成因を議論した。Yokoyama（1981）は、このカルデラ噴火に関係するベースサージについて言及した。川辺・阪口（2005）は、池田カルデラ形成噴火およびその前後の角閃石を含むマグマを噴出した火山活動を池田火山の活動として一括した。このカルデラ形成噴火は

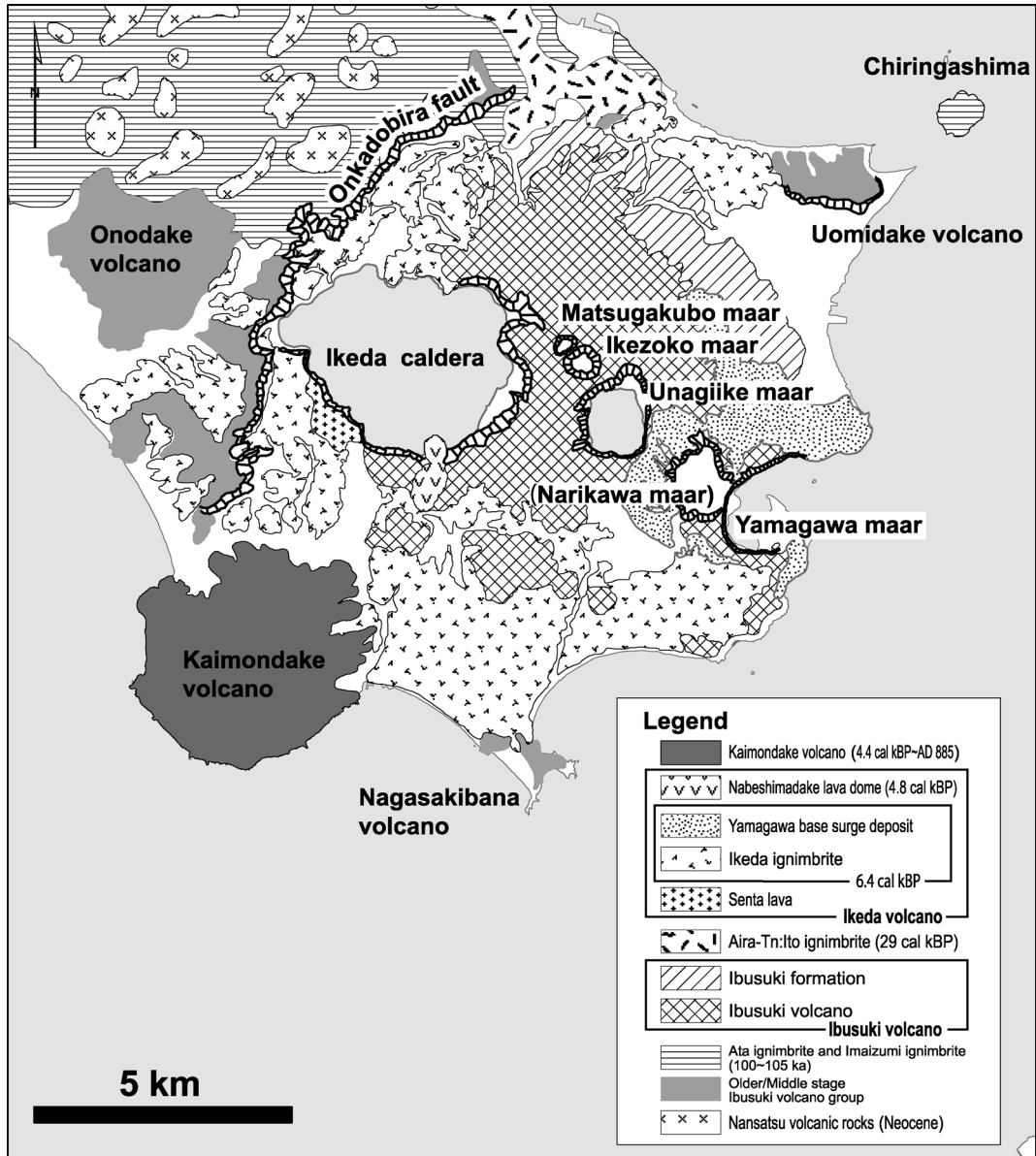


Fig. 2. Geological map of the Ikeda caldera and surrounding area modified from Ui (1967), Nagaoka (1988), and Kawanabe and Sakaguchi (2005).

比較的規模が小さいため、その推移を詳しく検討するのに適していると考えられる。本論では、火山地質調査にもとづいて、カルデラ形成を含む池田火山の噴火史を明らかにする。

2. 噴火史概略

指宿地域の地質・噴火史に関する先駆的な研究を行ったのは太田(1966)であり、宇井(1967)は阿多火砕流以

降の火山噴出物を詳細に記載している。川辺・阪口(2005)は5万分の1地質図幅「開聞岳地域の地質」を作成した。池田カルデラを含む指宿地域の地質図を Fig. 2 に、池田カルデラ形成前後の層序表を Fig. 3 に示す。なお、本地域内のテフラの噴火年代については奥野・他(1996)および奥野(2002)を参照した。

指宿地域で最も古い火山岩は、鬼門平断層崖から北西に分布する後期中新世から鮮新世の南薩火山岩類であ

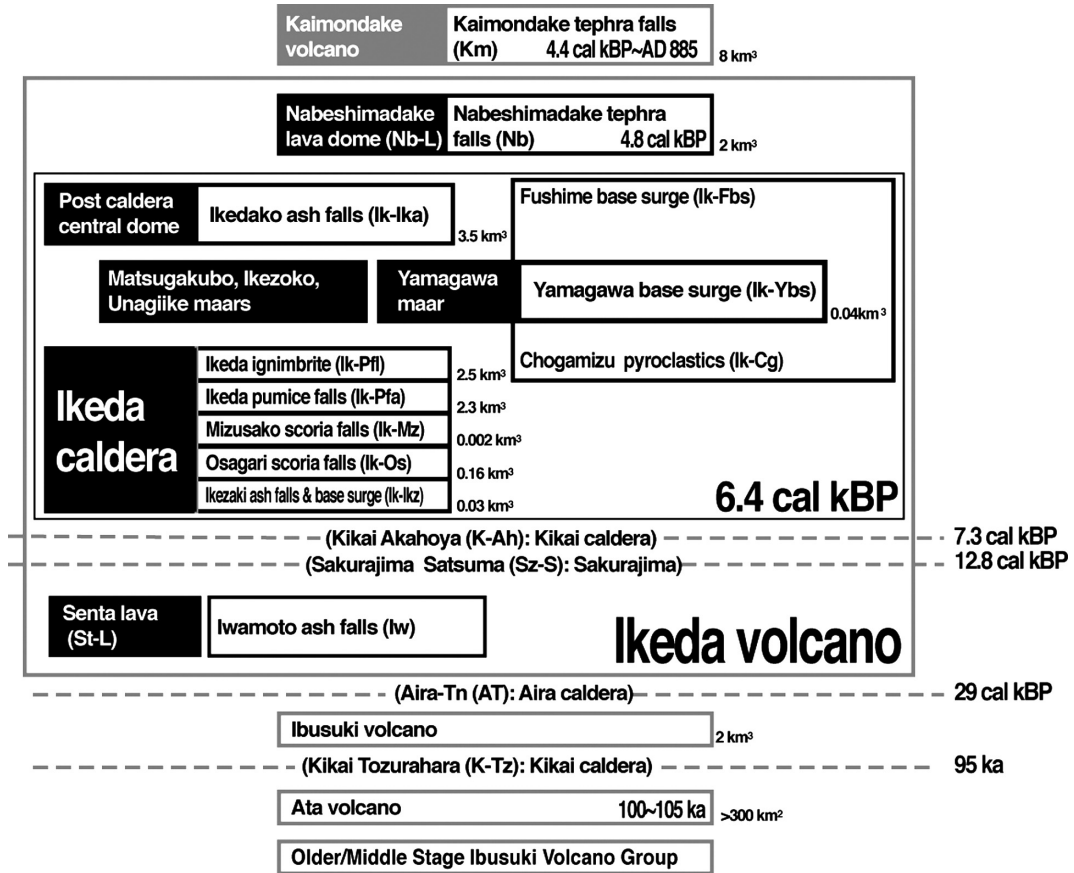


Fig. 3. Geologic units in the Ikeda caldera area modified from Ui (1967), Nagaoka (1988), and Kawanabe and Sakaguchi (2005).

る。鬼門平断層崖は阿多南部カルデラの輪郭に相当し、海岸付近の古い山体である魚見岳や長崎鼻もカルデラ縁の一部に相当する (Matumoto, 1943)。鬼門平断層崖の西側に位置する大野岳は地形的には若い、実際は Ata-Pfi よりも古い (藤野・小林, 1999)。川辺・阪口 (2005) はこれらすべてを中期指宿火山群の火山とした。カルデラ縁の外側の北東方向に分布する今泉火砕流堆積物 (略称 Im-Pfi: 宇井, 1967) と大隅半島側に分布する田代火砕流堆積物 (略称 Ts-Pfi: 阪口・宇井, 1979, 1983) は、ともに Ata-Pfi を覆うが、大きな時間間隙の証拠が認められないことから、川辺・阪口 (2005) は両者も阿多火山の噴出物とみなした。

鬼門平断層崖の南東側に分布する火山岩類は、指宿火山と総称される。阿多カルデラの内部で後期更新世に誕生した火山群であり、岩石の大半は輝石安山岩・デイサイトである。指宿火山の下位には広域テフラである 95 ka の鬼界葛原テフラ (K-Tz: 町田・新井, 1983) が薄く

分布する。指宿火山の上位には 29 cal kBP の始良カルデラ起源の大隅降下軽石堆積物 (略称 A-Os) と入戸火砕流堆積物 (略称 A-Ito: 荒牧, 1969) が分布し、両者は始良 Tn テフラ (AT: 町田・新井, 1976) の主要な構成物である。

池田火山の活動は、岩本降下火山灰堆積物 (略称 Iw: 成尾, 1992) や仙田溶岩 (略称 St-L: 宇井, 1967) の噴出に始まり、6.4 cal kBP に池田カルデラを形成した。この活動期間中に、12.8 cal kBP の桜島薩摩テフラ (Sz-S: 町田・新井, 2003; 小林, 1986 の P14) と鬼界カルデラ起源の 7.3 cal kBP の幸屋火砕流堆積物 (宇井, 1973) に代表される鬼界アカホヤテフラ (K-Ah: 町田・新井, 1978) が堆積した。池田カルデラ形成噴火時の活動は、まず水蒸気噴火で始まり、その後マグマ噴火 (〜水蒸気マグマ噴火) へと推移し、最盛期には火砕流噴火が発生し、池田カルデラが形成された。

4.8 cal kBP にはカルデラ南縁に鍋島岳が形成されたが

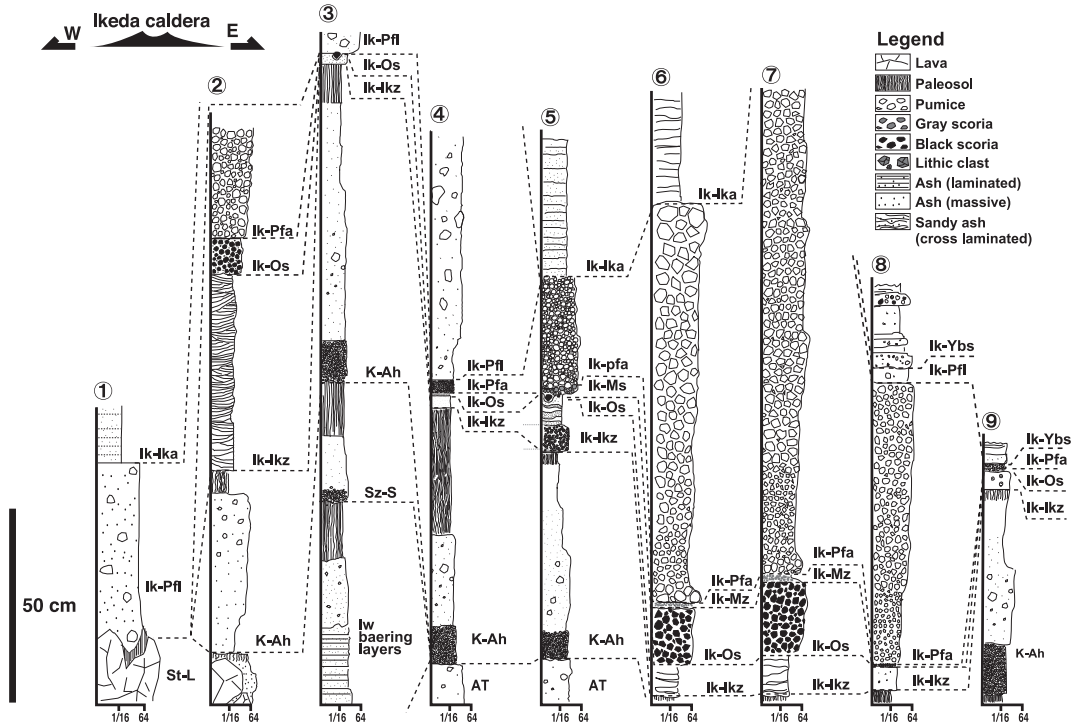


Fig. 4. Columnar sections of the outcrops around the Ikeda caldera. The locations are shown in Fig. 1B. The grain size at each position is indicated at the bottom of the columnar section. Values are in millimeters.

(奥野・小林, 1991), この活動を最後に火山活動の場は開聞岳に移行した(藤野・小林, 1997).

3. 地質記載

池田火山の各噴出物について、カルデラ形成噴火前、カルデラ形成噴火期、カルデラ形成噴火後に分けて記載する。なおテフラ粒子の最大平均粒径は、露頭での最大3個の粒子の平均値を用い、軽石をMP、スコリアをMS、岩片をMLの記号で表記した。また各噴出物の見かけ噴出量は、降下火砕物についてはHayakawa (1985)の経験式 $V=12.2TS$ 、火砕流堆積物と火砕サージ堆積物については分布面積と平均層厚の積で求めた。代表的な露頭のテフラ柱状図をFig. 4とFig. 5に示す。

3-1 カルデラ形成噴火前の噴出物

3-1-1 岩本降下火山灰堆積物 (Iw)

Iwは、Sz-SとATとの間に挟在する軽石質降下火山灰堆積物である。特徴的に角閃石を含み、その他にも火山ガラス、黒曜石岩片、風化岩片、両輝石および斜長石を含む。鹿児島湾周辺に薄く広く分布するが、池田カルデラ付近では粗粒でかつ層厚も増すことから、給源は池田カルデラ付近と考えられる。調査地域内では、水迫

幸屋、多羅ヶ迫、岩本および小牧ⅢAの各遺跡でIwが確認されている(Fig. 6: 指宿市教育委員会, 2001, 2009; 鹿児島県立埋蔵文化センター, 1996)。

水迫遺跡では、古土壤中に軽石質火山灰層として挟在する(Fig. 7)。層厚は10cm, MPは5cm, MLは1cmである。しかし、それ以外の地域では純層としての明瞭な軽石質降下火山灰堆積物ではなく、土壌や水成層中に細粒軽石片などが混在した産状を示す。例えば地点③(幸屋)では、Iwは火山灰質土壌とシルト質水成層中に混在した状態で産出する(Fig. 4)。

3-1-2 仙田溶岩 (St-L)

St-Lは池田カルデラの南西縁に分布する灰色で緻密・均質なデイサイト質溶岩である(Fig. 2)。角閃石斑晶を特徴的に含み、St-Lの露頭の大半は池田火砕流堆積物に直接覆われる。しかし、地点②(Fig. 4)ではSt-Lは古土壌を挟んでK-Ahに覆われる。

3-2 カルデラ形成噴火期の噴出物

池田カルデラ形成噴火で噴出した一連の火砕物は、下位から池崎サージ堆積物・降下火山灰堆積物、尾下降下スコリア堆積物、水迫降下スコリア堆積物、池田降下軽石堆積物、池田火砕流堆積物(児ヶ水火砕堆積物を含む)。

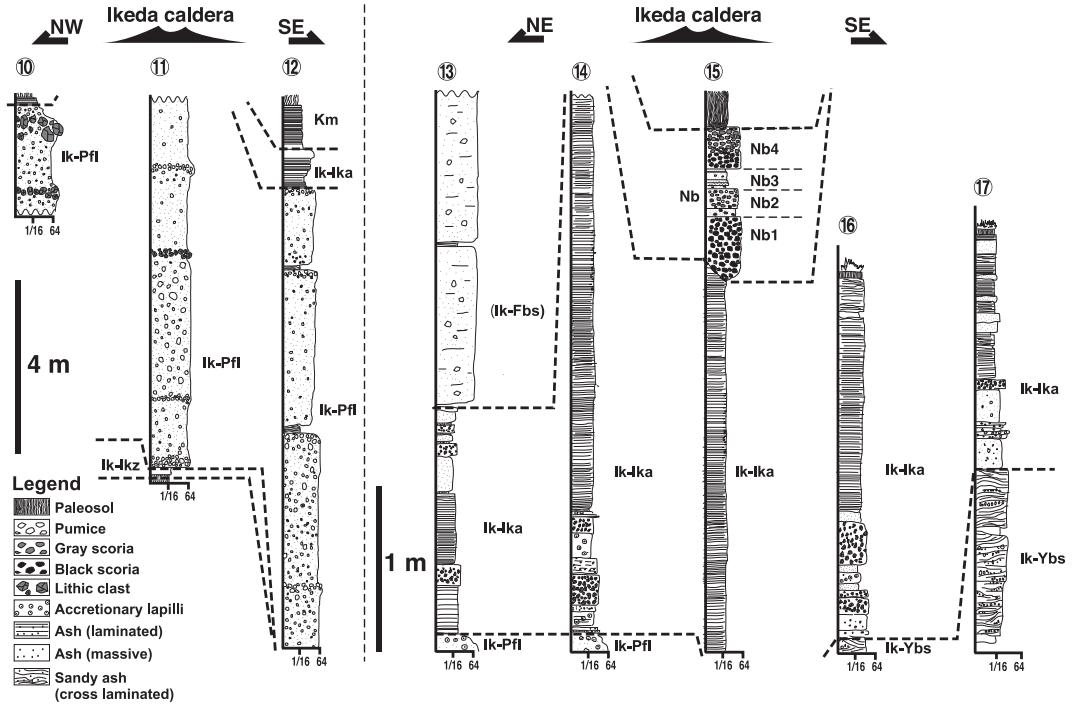


Fig. 5. Columnar sections of the outcrops of the Ikeda caldera. The locations are shown in Fig. 1B. The grain size at each position is indicated at the bottom of the columnar section. Values are in millimeters.

やまがわ
山川ベースサージ堆積物・その他のマール噴出物、池田湖降下火山灰堆積物および伏目ベースサージ堆積物がある (Figs. 4, 5, 8-16)。これらの中には土壌など長い時間間隙を示す証拠は認められず、池田湖テフラ (Ik) と総称される (町田・新井, 2003)。降下テフラの等層厚線図を Fig. 17 に示す。

3-2-1 池崎サージ堆積物・降下火山灰堆積物 (Ik-Ikz)

池崎サージ堆積物・降下火山灰堆積物 (略称 Ik-Ikz: 成尾・小林, 1980) は、古土壌を挟み K-Ah を覆う。カルデラ内を給源として、東側に伸びる分布軸をもち大隅半島まで楕円状に分布する (Fig. 17A)。地点③, ④, ⑧, ⑨では明瞭な内部構造を示さない塊状の降下火山灰堆積物であるが、層厚の増した地点⑤, ⑥, ⑦, ではクロスラミナが発達し、層厚変化が顕著なサージ堆積物となる (Fig. 8)。特に地点⑤ (水迫) では、サージ堆積物の下位に降下火山灰堆積物をとまない (Figs. 8 and 9)、下位から橙褐色の細粒火山灰の薄層、直径 1 cm 前後の火山岩の垂円礫～垂角礫を多く含む粗粒火山灰、細粒～中粒火山灰のサージ堆積物からなる。

Ik-Ikz には新鮮な本質物質は認められず、その構成物は粒度に関係なく、花崗岩類や変質安山岩などの異質岩片、その岩片に由来する長石、石英、黒雲母、輝石および

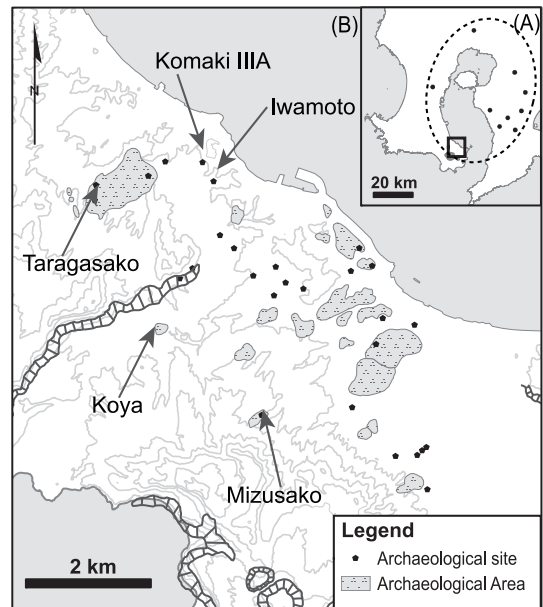


Fig. 6. Maps showing the regional distribution of the Iwamoto ash fall deposit (A) and the local distribution of the archaeological sites near the Ikeda caldera (B: Ibusuki Board of Education, 2009). Iwamoto ash fall deposit is identified in the named site in (B).

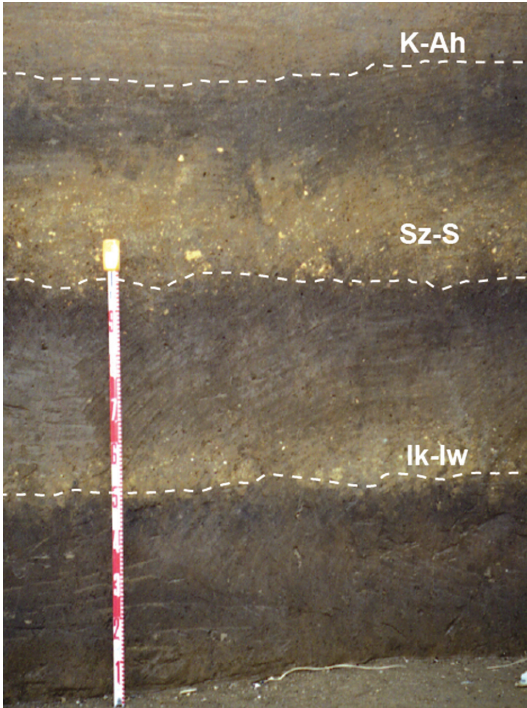


Fig. 7. Photograph of the geological profile at the Mizusako archaeological site. The Kikai-Akahoya tephra (K-Ah), Sakurajima-Satsuma tephra (Sz-S), and Iwamoto ash fall deposit (Iw) are clearly intercalated by paleosol. The scale segments are 20 cm.

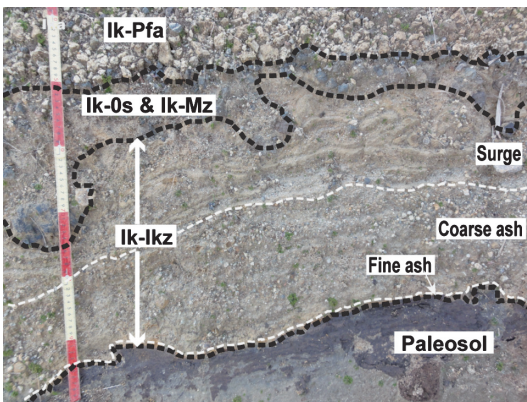


Fig. 8. Photograph of the Ikezaki ash, which is divided into three subunits. The scale segments are 10 cm.

び角閃石等の結晶片からなる。水蒸気噴火のテフラではあるが噴出量は 0.03 km^3 であり、水蒸気噴火としては大規模な部類に属する。

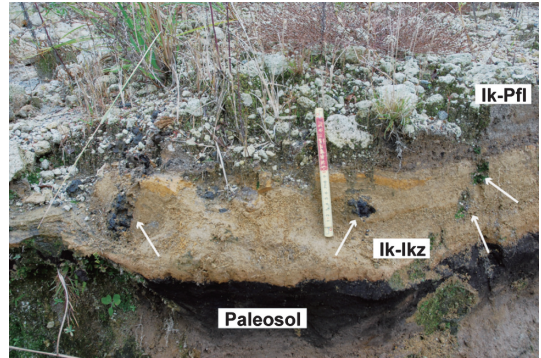


Fig. 9. Photograph showing the occurrence of Osagari scoria fall deposit (white arrows) scattered in the Ikezaki ash fall and surge deposits (Ik-Ikz). The scale segments are 10 cm.

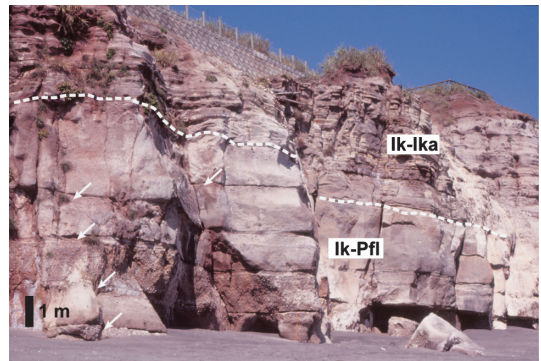


Fig. 10. Photograph of the Ikeda ignimbrite (Ik-Pfl) at a littoral area (Fig. 5, Loc. 12). The Ik-Pfl is frequently divided by thin sandy (or crystal- and lithic-rich) layers (white arrows).

3-2-2 尾下降下スコリア堆積物 (Ik-Os)

Ik-Ikz を直接覆う尾下降下スコリア堆積物 (略称 Ik-Os: 宇井, 1967) は、主に発泡の悪い黒色スコリアからなり、花崗岩類の岩片やそれに由来する石英や黒雲母を含む。カルデラ内を給源とし、東北東に伸びる分布軸をもち、大隅半島まで狭い幅で分布する (Fig. 17B)。分布軸上の給源に近い地点⑦ (Fig. 4) では、層厚は 15 cm、MS は 2 cm であるが、分布軸から離れるにつれ層厚は急激に減少する。カルデラ近傍ではサッグ構造が認められるが、分布軸から離れた地点③ (幸屋) でも、粒径 10 cm 程の大きなスコリア礫が Ik-Ikz 中にサッグ構造をつくっている (Figs. 8 and 9)。この大型のスコリア礫は、給源から直接放出された弾道噴出物と考えられる。Ik-Os の噴出量は 0.16 km^3 である。

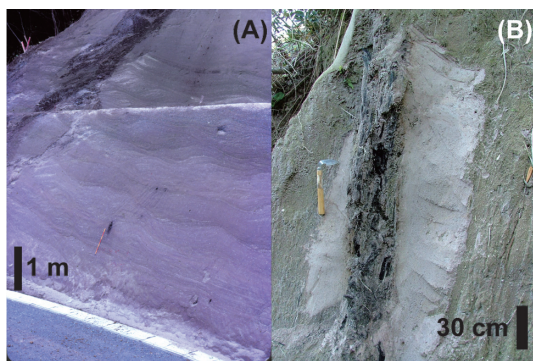


Fig. 11. Photograph of the Chogamizu pyroclastic deposit (Ik-Cg) at Chogamizu (A) and a charred tree trunk in the deposit (B).

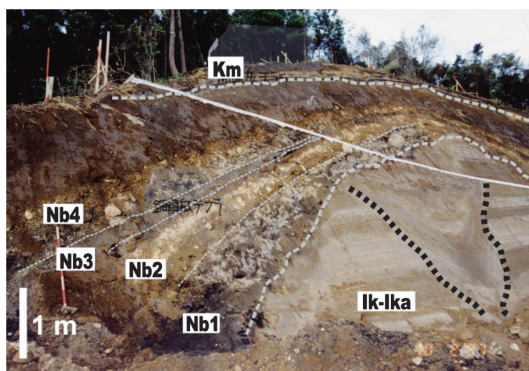


Fig. 14. Photograph of the Nabeshimadake tephra (Nb) and underlying Ikedako ash fall deposit (Ik-Ika). A large slump structure (black dotted line) is seen in the Ik-Ika.

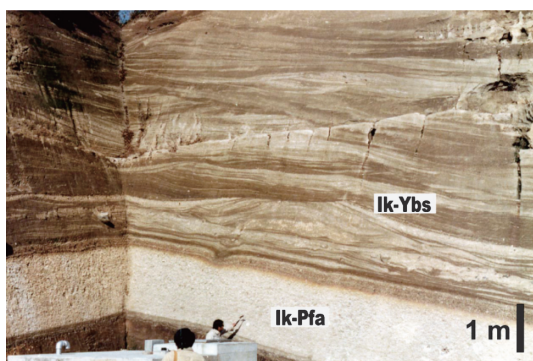


Fig. 12. Photograph of the Yamagawa base surge deposit (Ik-Ybs) underlain by the Ikeda pumice fall deposit (Ik-Pfa) about 2 km north of the Yamagawa maar.

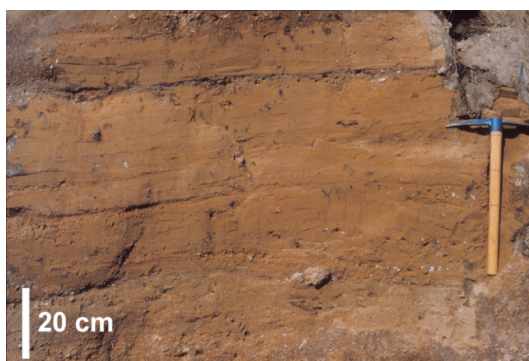


Fig. 15. Photograph of the Fushime base surge deposit (Ik-Fbs) at Fushime derived from littoral explosions of the Ikeda ignimbrite. Sag structures are observed in some horizons of the deposit.



Fig. 13. Photograph of a thick Ikedako ash fall deposit (Ik-Ika) at Senta. Disturbed structures such as slumping (black dotted line) and clastic dikes (white arrows) are formed in the ash deposit.

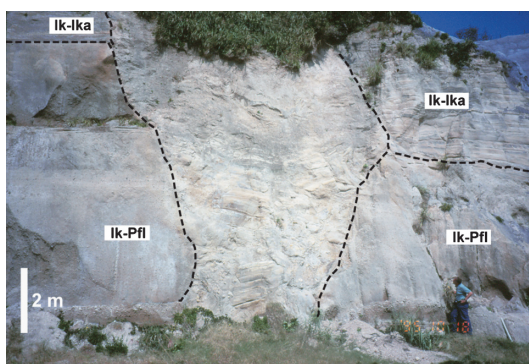


Fig. 16. Photograph of a secondary explosion vent. Blocks of Ikeda ignimbrite (Ik-Pfi) and Ikedako ash fall deposit (Ik-Ika) filled the vent.

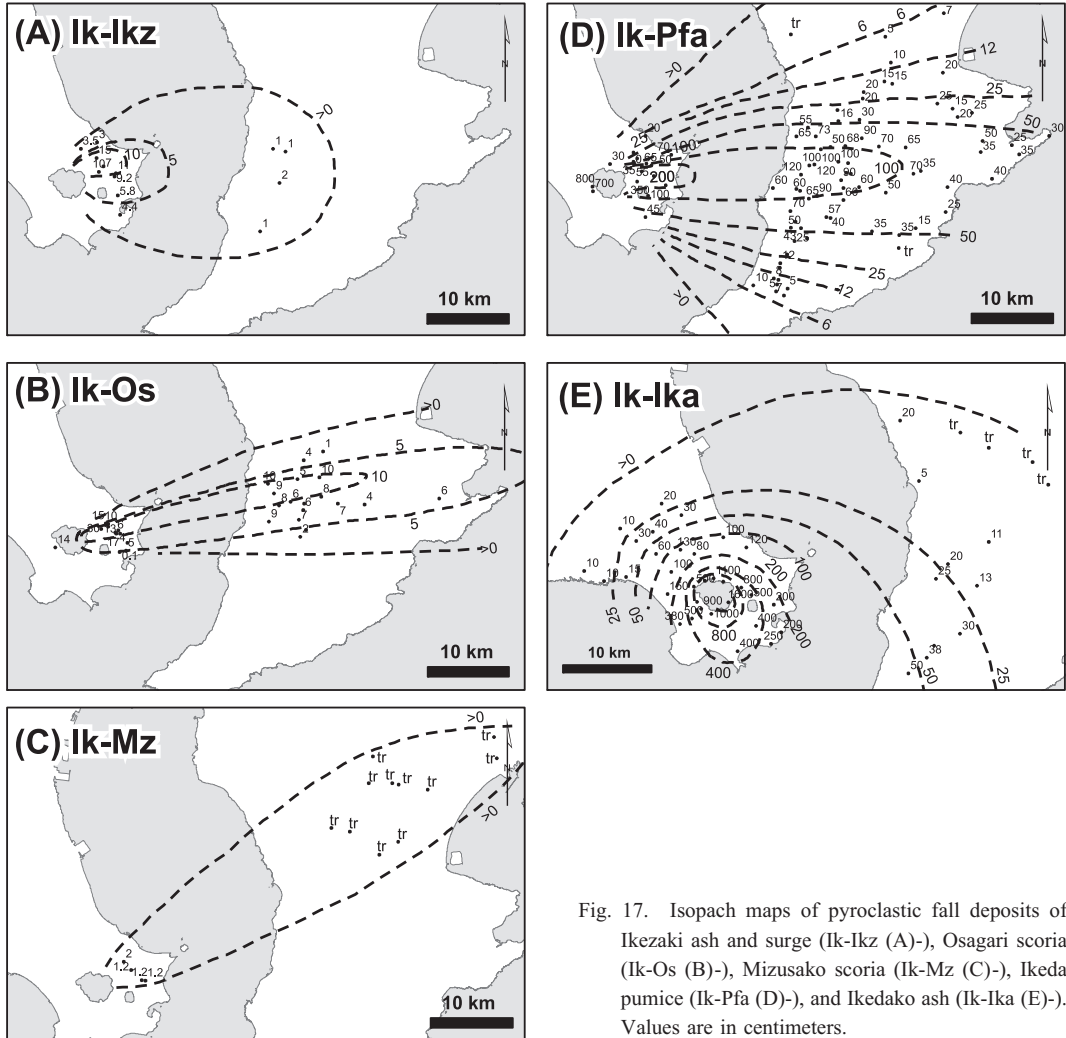


Fig. 17. Isopach maps of pyroclastic fall deposits of Ikezaki ash and surge (Ik-Ikz (A)-), Osagari scoria (Ik-Os (B)-), Mizusako scoria (Ik-Mz (C)-), Ikeda pumice (Ik-Pfa (D)-), and Ikedako ash (Ik-Ika (E)-). Values are in centimeters.

3-2-3 水迫降下スコリア堆積物 (新称; Ik-Mz)

Ik-Os と池田降下軽石堆積物 (略称 Ik-Pfa: 宇井, 1967) の間には、発泡度が悪く、やや丸みをおびた大型の灰色スコリアが薄層もしくは個々の粒子として存在する。これを水迫降下スコリア堆積物 (略称 Ik-Mz) と命名する。池田カルデラ付近から大隅半島までの狭い範囲で分布し、その分布軸は上下のテフラとは異なり北東側に伸びる (Fig. 17C)。カルデラ付近の地点⑤では、層厚は1~2 cm と薄く、灰色スコリアのMSは1 cm である。給源から離れた大隅半島側では明瞭な層をなさないものの、粒径1 cm 程度の丸みをおびた灰色スコリアが、Ik-Ikz の直上あるいはIk-Pfa の直下に点在する。この灰色スコリアは、やや南下した大隅半島中部に分布するIk-Os と比べ、明らかに粒径が大きい、また発泡度が低く、その形態も

丸みを帯びていることから、水蒸気マグマ噴火の産物と考えられる。給源は池田カルデラと推定されるが、大隅半島に産出するスコリアに相当する大きな噴出物がカルデラ近傍に存在しないことから、カルデラから離れた鹿児島湾内のどこかに別の給源を仮定しないと説明がつかない。今のところ海域での噴火地点は特定できてないが、陸域と海域の2ヶ所で同時に噴火が発生したと可能性がある。噴出量は 0.002 km^3 である。

3-2-4 池田降下軽石堆積物 (Ik-Pfa)

Ik-Pfa は、Ik-Os もしくはIk-Mz を直接覆う。主に発泡の悪い白色軽石からなるが、灰色軽石や縞状軽石も含まれる。白色軽石はK-Ah やAT起源の軽石と比較すると、斑晶量が非常に多く、石英・斜長石・角閃石のほか少量の斜方輝石や不透明鉱物等を含む。灰色軽石には他

の斑晶よりも大きなカンラン石斑晶を伴うことがある。

Ik-Osと同様にカルデラ内を給源とし、東方に伸びる分布軸をもち大隅半島の広い範囲に分布する。その分布幅はIk-Osと比較してはるかに広く、カルデラ西側にも分布している (Fig. 17D)。分布軸上の給源に近い地点⑦で、層厚は1.5m、MPは4cmである。噴出量は 2.3 km^3 である。

3-2-5 池田火砕流堆積物 (Ik-Pfl)

Ik-Pflは、Ik-Pfaを直接覆い、明褐色の火山灰基質と主に白色軽石からなる。白色軽石はIk-Pfaと同様に発泡が悪く、多斑晶である。また、白色軽石以外に縞状軽石や灰色軽石も存在する。灰色軽石には他の斑晶よりも大きなカンラン石斑晶を伴うことがある。カルデラを中心に薩摩半島南端のほぼ全域に分布し、カルデラ南部に火砕流台地を形成している (Fig. 2)。層相は多様であり、給源の近傍では弱溶結部も存在するが、大部分の分布域では非溶結の火砕流堆積物である。

カルデラ北西の鬼門平断層崖を乗り越えた鳥帽子岳付近の地点⑩ (Fig. 5) では、基質部分は細粒物質に乏しい。地点⑩に隣接する鳥越トンネルの西側出口付近の露頭では、大型の岩片 (粒径数10cm以上) を大量に含み、基質に乏しいIk-Pflが存在する。層厚は10m以上に達し、給源近傍で堆積したラグプレッチャの特徴を示す (岩倉・他, 2001)。カルデラ北東の地点⑪では、大きな軽石もしくは岩片が複数の層準に濃集しており、火砕流堆積物を多数のフローユニットに識別することができる。

カルデラ南東の伏目から西南方向に湾曲する海岸の崖に露出するIk-Pflは、粗粒砂からなる薄層 (層厚は10cm未満) を頻繁に挟んでいる。この薄層は上下の境界が鮮明で、ほとんど粗粒砂サイズの岩片・結晶片からなり軽石片をほとんど含まないことから、通常の火砕流堆積物の境界部とはまったく層相が異なっている。地点⑫ではIk-Pflの崖に数m間隔で砂層が挟在するが、場所によっては1m程度の狭い間隔で挟在することもある (Fig. 10)。

伏目に建設された山川地熱発電所の地熱調査坑井データでは、Ik-Pflの層厚は2次堆積物も含め約100mにも達する (新エネルギー総合開発, 1986)。陸域の分布面積は約 50 km^2 であり、平均層厚を50mと仮定すると噴出量は約 2.5 km^3 である。

3-2-6 児ヶ水火砕堆積物 (新称; Ik-Cg)

カルデラ南東の赤水鼻の児ヶ水港に下る道沿いには、主に明褐色の火山灰からなり大径の軽石をほとんど含まない細粒な火砕堆積物が、基盤岩に張り付くように分布する (Fig. 11A)。軽石はIk-Pflと同質の白色軽石が主体であり、縞状軽石も存在する。堆積物は大部分が塊状で

あるが、部分的に波状の構造が発達し、細粒の軽石がその基底部分に濃集する。この堆積物は海を埋めたIk-Pflとほぼ同じ層準にあり、当時の陸域に堆積した同時異相と推定される。炭化した立木が存在することもあり (Fig. 11B)、高温の流動堆積物であることは確かであるが、成因を特定できないため児ヶ水火砕堆積物 (略称Ik-Cg) と仮称する。なお、Ik-Pflとの上下関係が分かる露頭は確認できていない。

3-2-7 山川ベースサージ堆積物 (Ik-Ybs) ・その他のマール噴出物

山川ベースサージ堆積物 (略称Ik-Ybs; Yokoyama, 1981) は、Ik-PfaもしくはIk-Pflを直接覆う (Fig. 12)。主要構成物である軽石は白色軽石が主体であり、Ik-PfaやIk-Pflの軽石と同様に発泡が悪く、多斑晶で、斑晶鉱物の組み合わせも同じである。Ik-Ybsは山川湾を給源とし、その周辺の半径数km以内に分布する (Fig. 2)。給源付近では層厚が10m以上で、放出岩塊によるサッグ構造が顕著である。堆積物は上下2層が識別され、下部層は、軽石や石質岩片に富む粗粒層と火山灰からなる細粒層が弱く斜交した互層である。上部層は主に細粒火山灰からなりクロスラミナが顕著である。給源から2km以上離れると、層厚および岩片の大きさは急激に減少する。陸域の分布面積は 7 km^2 であり、平均層厚を5mと仮定すると、噴出量は 0.04 km^3 である。

山川湾 (山川マール) からカルデラへ向かう北西方向には、成川、鰻池、池底および松ヶ窪のマール地形が直線上に配列している (Fig. 2)。このうち「成川マール」は地形的にも他のマールと比べ侵食の程度が著しく、また直接的な噴出物も確認できていない。そのため池田カルデラ噴火よりも古い時代の火口地形と判断し、以下の議論では言及しない。上記した4つのマールのうち、明瞭な本質物質 (軽石) を噴出したのは山川マールだけである。他の松ヶ窪、池底および鰻池マールの噴出物は類質物質が主体であり、火口周辺には火山岩塊と主体とする噴出物が最大10m程度の厚さで堆積している。これらの噴出物はいずれもIk-Pfaを覆い、Ik-Ikaに覆われるため、4つのマールはほぼ同時期に割れ目火道に沿って形成されたと考えられる。

3-2-8 池田湖降下火山灰堆積物 (Ik-Ika)

Ik-Ikaはラミナの発達した細粒火山層である。カルデラを中心とした楕円状の分布を示すが、南東方向に伸びる分布軸をもつ (Fig. 17E)。カルデラ縁では層厚が10m以上にも達するが、全体に細粒で火山豆石に富むのが特徴である。しかしその下部は層相が多様で細粒石質岩片に富む層、火山豆石を含む層、結晶に富む層および塊状火山灰層などからなる (Fig. 5; 地点⑬~⑰)。カルデラ

近傍の Ik-Ika 中には、多くの碎屑岩脈やスランプなどの攪拌構造が認められる (Figs. 13 and 14: 成尾・小林, 1995). これらの変形構造は Ik-Ika の上部に及んでいるものが多く、Ik-Ika の噴出末期～終了後で、Ik-Ika が未固結状態の時に発生した地震によって形成されたものと推定されている。こうした産状から、Ik-Ika はカルデラ底で発生した水蒸気マグマ噴火の産物と考えられ、噴出量は約 3.5 km³ である。

3-2-9 伏目ベースサージ堆積物 (新称; Ik-Fbs)

伏目から南西方向に湾曲する海岸には、高さが 20 m ほどの Ik-Pfa の崖が連なっている。その崖の上には Ik-Ika と開聞岳のテフラ群 (略称 km) がほぼ水平に堆積しているが、台地を掘り下げた工事現場では両者の間に層厚が約 2 m でクロスラミナの発達した火砕堆積物が見いだされた (Fig. 15)。明褐色の火山灰基質と白色軽石からなり、基質部には直径 5 mm 以下の火山豆石が多数含まれる。また数 cm 大の岩片によるサッグ構造などベースサージ特有の層相を呈するため、伏目ベースサージ堆積物 (略称 Ik-Fbs) と命名する。Ik-Cg とは、粒度組成も堆積構造も異なっている。

その露頭の側方の Ik-Pfl の崖には、最大幅が数 10 m にも及ぶ 2 次爆発の火道断面が存在する (藤野・小林, 1999)。Fig. 16 は 2 次爆発の火道の一例である。漏斗状の火道内部には、Ik-Pfl と Ik-Ika の大小のブロック (数 10 cm～数 m 大) が充填している。このような火道の断面は、この海岸の崖で数多く見出される。それゆえ、Ik-Fbs は Ik-Pfl の 2 次爆発によって生じたものと判断できる。

カルデラ北東の宮ヶ浜^{みやがはま}の海岸に面した台地上にも、火山豆石を含む薄い火砕物が分布しており、これも 2 次爆発に由来するものと考えられる。さらにその内陸部 (地点⑬, Fig. 5) でも、Ik-Ika の上位に Ik-Pfl と類似した堆積物が見られる。沿岸部と比較して相対的に標高の高い地点であるため、旧河川を埋め立てた Ik-Pfl の 2 次爆発に由来する可能性がある。

3-3 カルデラ形成噴火後の噴出物

3-3-1 鍋島岳テフラ (Nb)

鍋島岳テフラ (略称 Nb) は、Ik-Ika を不整合に覆う (Fig. 14)。奥野・小林 (1991) によると軽石、スコリア、火山灰、類質岩片などからなる 4 つのユニット (Nb1～4) からなり、水蒸気噴火～マグマ噴火のサイクルを 2 回繰り返している。鍋島岳に近い地点⑮^{としなが} (利永: Fig. 5) では、各ユニットは更に複数のサブユニットに区分できる。後述の鍋島岳溶岩ドームの上位には Nb が見られないことから、鍋島岳の活動はテフラを噴出する爆発的噴火から始まり、その後溶岩を流出して終了したと考えられる。

3-3-2 鍋島岳溶岩 (Nb-L)

鍋島岳は池田カルデラの南縁に噴出した溶岩ドームであり、その北側の一部はカルデラ内に滑落している。奥野・小林 (1991) は異なる 3 つの溶岩地形を識別し、饅頭型の地形が保存された南側部分を本来の溶岩ドームの地形、カルデラ内に広がる凹凸の激しい溶岩部を滑落部分、滑落崖の亀裂部分に突出した地形を火道上の火山岩尖と考えた。岩石は角閃石を含む斑晶量の多い塊状溶岩からなる。暗灰色～黒灰色の苦鉄質包有物が存在し (種子田, 1944)、大きいものでは径数 10 cm にも及ぶ。溶岩ドームを切り込んだ工事現場の露頭では、赤褐色の高温酸化した溶岩と新鮮な灰色溶岩が交互に繰り返される縞状構造が観察された。

4. 議 論

4-1 池田火砕流の堆積環境と 2 次爆発の発生時期

Ik-Pfl 堆積当時の薩摩半島付近の海水準は、現在とほぼ同じである (中田・他, 1994)。したがって伏目の地熱発電所の周辺は、Ik-Pfl 堆積時には海域であったと判断される。地熱発電所の坑井データによると、当時の水深は 100 m に満たない程度だったと推定される。

Ik-Pfl の軽石は発泡が悪く斑晶量も多いことから、火砕流としては密度が大きい。そのため海域に達した本体部分は海面上の長い距離を流走することなく、海域を急速に埋めたてデルタ状の地形を形成した可能性が高い。この沿岸域に分布する火砕流堆積物中に挟在する粗粒砂の薄層は、火砕流が海に突入した反動で生じた小規模な津波によりデルタ表面が洗われた痕跡と推測される。また陸域にあたる児ヶ水～赤水鼻付近には、細粒な Ik-Cg が集積した。堆積時には高温であったことから、海面上を移動した細粒な火砕流の本体か、あるいは火砕流から分離した火砕サージであった可能性が考えられる。いずれにせよ堆積物中の炭化木は倒れておらず、その流動圧は火砕流本体ほど大きくはなかったと考えられる。一方、Ik-Fbs は Ik-Pfl の 2 次爆発によるものであるが、Ik-Pfl の上位の Ik-Ika を覆って堆積しており、火砕流の定置からある程度の時間を経て発生したことがわかる。フィリピン・ピナツボ火山の 1991 年噴火では、噴火から数ヶ月後にも 2 次爆発が発生している (Torres *et al.*, 1996)。伏目海岸では Ik-Pfl の厚さが 100 m もあることから、2 次爆発は 1 年以上にわたり発生したかもしれない。なお、藤野・小林 (1997) は、開聞岳火山の北側山麓にある小丘を Ik-Pfl の 2 次爆発による火砕丘の残丘と記載した。また開聞岳から長崎鼻にかけての平野部にも小丘が幾つか見られ、これらも Ik-Pfl の 2 次爆発による火砕丘の痕跡と推定される。しかし 2 次爆発の発生が火砕流の定置直

後であったのか、あるいは伏目ベースサージほどの時間間隙があったのかについては不明である。

4-2 火口径と噴出量の関係

Sato and Taniguchi (1997) は火口径 (D) と噴出量 (V) には相関があり、マグマ噴火で $D = 0.11 V^{0.42}$ 、マグマ水蒸気噴火で $D = 0.97 V^{0.36}$ の経験式で表現できると報告している。Fig. 18 はこのグラフに池田カルデラ、山川マール、鰻池マールおよび池底マールの火口径と噴出物量をプロットしたものである。この図でプロットした池田カルデラの噴出量は、Ik-Ikz, Ik-Os, Ik-Mz, Ik-Pfa および Ik-Pfl の噴出量を合計した値である。火口周辺にしか噴出物が認められない松ヶ窪、池底および鰻池のマールについては、噴出量を一律に 0.0001 km^3 と仮定しプロットした。

池田カルデラと山川マールの噴出量は、関係式から想定される噴出量よりも小さい。この噴出量には海域に堆積した部分が含まれておらず、実際の噴出量に比べると過小な見積りとなっているためであろう。Fig. 18 で注目すべき点は、山川と鰻池の火口径がほぼ同じ大きさにもかかわらず、鰻池マールの噴出量が極端に少ないことである。すなわちマール群はほぼ同時期に噴出したことは確かであるが、鰻池の火口径だけが極端に大きい。これらのマール群はほぼ直線上に並んでおり、その両端の池田カルデラと山川マールで多量のマグマが噴出したために、割れ目火道上の鰻池の地点で規模の大きな陥没が生じた可能性を否定はできない。

顕著な噴出物を伴わずに火口地形を形成した例は、歴史時代にも幾つか知られている。たとえば 2000 年の三宅島噴火では、中心火道から派生した割れ目を通じてマグマが側方に移動したため、山頂部が陥没した (中田・他, 2001; Nakada *et al.*, 2005)。また 1912 年のカトマイ火山の火砕流噴火では、主要な火口ではなかった山頂にカルデラが形成されたのもその好例である (Curtis, 1968; Hildreth, 1983)。

4-3 池田火山の噴火史

カルデラ南西縁に分布する St-L は、Ik との間に明瞭な古土壌を挟むため、Ik との間にかかなりの時間差が存在するものと推定される。しかし大半の露頭では、Ik-Pfl または Ik-Pfa が St-L を直接覆っていることから、カルデラ形成噴火当時、St-L の表面は侵食された岩山状態だったと推定される。St-L は池田カルデラの軽石と同じ斑晶組合せである (宇井, 1967)。一方、カルデラ周辺に分布する Iw は、カルデラ近傍で層厚を増し、St-L と同様に角閃石を含むことおよび層準がほぼ一致することから、St-L の噴出に伴うテフラの可能性が高い。Iw の噴出年代は、上位の Sz-S (12.8 cal kBP) と下位の AT (29 cal kBP)

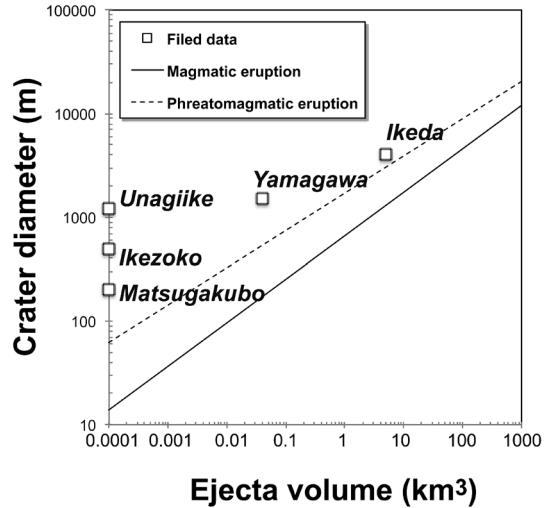


Fig. 18. Relationship between crater diameter and ejecta volume (Sato and Taniguchi, 1997). The ejecta volumes of the Matsugakubo, Ikezoko, and Unagiike maars are uniformly plotted as 0.0001 km^3 .

に挟まれた古土壌の厚さから、約 20 cal kBP と推定した。このように約 20 cal kBP に、現在の池田カルデラの付近で、Iw や St-L が相次いで噴出した。両者はそれ以前の指宿火山の噴出物とは異なり、斑晶として角閃石を保持していた。

その噴火から 1 万年以上経過した 6.4 cal kBP に、池田カルデラを形成する噴火が始まった。最初の Ik-Ikz の噴火は小規模な水蒸気噴火で始まったが、次第に粗粒なラピリーサイズの岩片を噴出するようになり、最後はベースサージ噴火となった。しかしこの段階でも本質物質は噴出していない。大量の地下水が上昇したマグマで急速に加熱され、爆発的な噴火が誘発されたのであろう。

その後はマグマ噴火 (~水蒸気マグマ噴火) となり、Ik-Os, Ik-Mz および Ik-Pfa を噴出した。これらは相次いで噴出したものであるが、Ik-Mz は池田カルデラ以外にも別の給源がある可能性がある。Ik-Os と Ik-Mz はスコリアが噴出したが、Ik-Pfa と Ik-Pfl は軽石主体の珪長質噴火へと変化しカルデラが形成されたことから、マグマ供給系においてマグマの組成や噴出量の急変をもたらす何らかの変化が発生したのであろう。

池田カルデラは直径が 4 km ほどの小型のカルデラであるが、噴出した Ik-Pfl は周辺の山麓から海域一帯を埋め立て、平坦な火砕流台地を形成した。火砕流の埋め立てによりデルタ地形が出現すると、その表面は波浪による薄い砂層が取り残され、それをまた火砕流が覆うという繰り返により、砂層を挟む異なる火砕流堆積物

が出現したのであろう。その集積過程で、湾岸の陸域には細粒なテフラが流入し、全体に細粒な Ik-Cg が形成された。

火砕流噴出後には、池田カルデラから南西方向に伸びる割れ目火道で噴火が発生し、松ヶ窪、池底、鰻池および山川のマールが形成された。このうち本質物質(軽石)を噴出したのは山川マールだけである。鰻池マールは噴出量に比較して火口径が大きく、爆発だけでなく、規模の大きな陥没により火口が拡大した可能性が高い。

その後、カルデラ中央部で Ik-Ika を噴出する水蒸気マグマ噴火が発生し、湖底には溶岩ドームが形成された。Ik-Ika の末期には強い地震が発生し、多数の碎屑岩脈が形成された。また沿岸部では Ik-Pfl の 2 次爆発が発生し、Ik-Fbs 等が噴出した。

カルデラ形成噴火の約 2000 年後には、カルデラ南縁に鍋島岳が形成された。初期は軽石・スコリアの噴火であったが、後半は溶岩を噴出した。溶岩ドームの一部はカルデラ壁の崩壊に伴い、カルデラ内に滑落し、特異な表面形態の溶岩となった。

5. ま と め

池田カルデラを形成した噴火は、南九州の 4 大カルデラの噴火と比べれば小規模である。しかし、スコリアと軽石が噴出しており、広いマグマ組成であったことが推定される。噴火様式は水蒸気噴火からマグマ噴火まで多様である。マグマ噴火ではプリニー式(～準プリニー式)噴火、火砕流噴火が発生し、水蒸気マグマ噴火も発生した。また、海域や河川沿いでは火砕流堆積物の 2 次爆発も頻発した。このように多様な噴火が発生したのは、マグマ組成の多様性のみならず、噴火地点は水が豊富に存在する地形・地質の場であったことが重要な要素であったと考えられる。

謝 辞

西日本技術開発(株)の関係者には、研究を進める上で多大な援助をいただいた。北海道大学の中川光弘教授には、稲倉の在学中にご指導いただいた。指宿市教育委員会の下山 覚氏(故人)および同埋蔵文化財担当の方々、鹿児島県立埋蔵文化財センター職員の方々には、多くの遺跡でのテフラ観察に便宜をはかっていただいた。査読では電力中央研究所の三浦大助博士、ダイヤコンサルタント(株)の筒井正明博士および編集担当の熊本大学の宮縁育夫博士から、有益なコメントを頂き本稿は大幅に改善された。またニュージーランド・クライストチャーチ市協議会の Ma. Hannah T. Mirabueno 博士および英国・ブリストル大学の Sue Mahony 博士には英文校閲をしてい

ただいた。以上の方々に心から感謝します。

引用文献

- 荒牧重雄(1969) 鹿児島県国分地域の地質と火砕流堆積物。地質雑, 75, 425-442.
- 荒牧重雄・宇井忠英(1966) 阿多火砕流と阿多カルデラ。地質雑, 72, 337-349.
- Curtis, G. H. (1968) The stratigraphy of the ejecta from the 1912 eruption of Mount Katmai and Novarupta, Alaska. In *Studies in Volcanology* (Coats, R. R., Hay, R. L. and Anderson, C. A. eds), 153-210. *Geol. Soc. Am. Mem.*, 116.
- 藤野直樹・小林哲夫(1997) 開聞岳火山の噴火史。火山, 42, 195-211.
- 藤野直樹・小林哲夫(1999) 池田湖・開聞岳。高橋正樹・小林哲夫編フィールドガイド日本の火山 5。築地書館, 122-139.
- Hayakawa, Y. (1985) Pyroclastic geology of Towada Volcano. *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 60, 507-592.
- 早坂祥三(1987) 鹿児島湾の地質構造。松本徹夫・長谷良隆・竹下 寿・早坂祥三・古川博恭編「九州の後期新生代火山活動をめぐる諸問題」地研専報, 33, 225-233.
- Hildreth, W. (1983) The compositionally zoned eruption of 1912 in the Valley of Ten Thousand Smokes, Katmai National Park, Alaska. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 18, 1-56.
- 指宿市教育委員会(2001) 水迫遺跡 I。指宿市埋蔵文化財発掘調査報告書, 34, 299-305.
- 指宿市教育委員会(2009) 幸屋遺跡・多羅ヶ迫遺跡。指宿市埋蔵文化財発掘調査報告書, 46, 63 p.
- 岩倉雅治・鎌田桂子・小林哲夫(2001) 粒度分布と構成物量比からみた池田火砕流の堆積機構。火山, 46, 117-120.
- 鹿児島県立埋蔵文化財センター(1996) 小牧 III A 遺跡, 岩本遺跡。鹿児島県立埋蔵文化財センター発掘調査報告書, 15, 25-31.
- 川辺禎久・阪口圭一(2005) 開聞岳地域の地質。地域地質研究報告(5 万分の 1 地質図幅)。産総研地質調査総合センター, 82 p.
- 小林哲夫(1984) 池田カルデラの鍋島岳溶岩円頂丘。日本火山学会(編)「空中写真による日本の火山地形」。東京大学出版会, 52-53.
- 小林哲夫(1986) 桜島火山の形成史と火砕流。文部省科学研究費自然災害特別研究, 計画研究「火山噴火に伴う乾燥粉体流(火砕流等)の特質と災害」(代表者: 荒牧重雄)研究成果報告書, 137-163.
- 小林哲夫・成尾英仁(1982) 鹿児島県指宿地域の火山活動とカルデラ地形。火山, 27, 345.
- 町田 洋・新井房夫(1976) 広域に分布する火山灰—始良 Tn 火山灰の発見とその意義—。科学, 46, 339-347.
- 町田 洋・新井房夫(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.
- 町田 洋・新井房夫(1983) 鬼界カルデラ起源の新広域テフラと九州における更新世後期大火砕流の噴出年代。火山, 28, 206.

- 町田 洋・新井房夫 (2003) 新編火山灰アトラス「日本列島とその周辺」。東京大学出版会, 336p.
- 町田 洋・太田陽子・河名俊男・森脇 広・長岡信治 (2001) 日本の地形 7 九州・南西諸島。東京大学出版会, 355p.
- Matumoto, T. (1943) The four gigantic caldera volcanoes of Kyusyu. *Japan J. Geol. Geogr.*, **19**, Special number, 1-59.
- Nagaoka, S. (1988) The late Quaternary tephra layers from caldera volcanoes in and around Kagoshima Bay, southern Kyushu, Jap. *Geogr. Rep. Tokyo Metro. Univ.*, **23**, 49-122.
- 中田節也・長井雅史・安田 敦・嶋野岳人・下司信夫・大野希一・秋政貴子・金子隆之・藤井敏嗣 (2001) 三宅島 2000 年噴火の経緯。山頂陥没口と噴出物の特徴。地学雑, **110**, 168-180.
- Nakada, S., Nagai, M., Kaneko, T., Nozawa, A. and Suzuki-Kamata, K. (2005) Chronology and products of the 2000 eruption of Miyakejima Volcano. *Bull. Volcanol.*, **67**, 205-218.
- 中田正夫・前田保夫・長岡信治・横山祐典・奥野淳一・松本英二・松島義章・佐藤裕司・松田 功・三瓶良和 (1994) ハイドロアイススタシーと西九州の水中遺跡。第四紀研究, **33**, 361-368.
- 成尾英仁 (1992) 西丸尾遺跡の地質と火山噴出物。鹿児島県埋蔵文化財発掘調査報告書 (64), 鹿児島県教育委員会, 243-252.
- 成尾英仁・小林哲夫 (1980) 池田カルデラの火山活動。火山, **25**, 306.
- 成尾英仁・小林哲夫 (1984) 池田カルデラ形成時の降下火砕物。火山, **28**, 148.
- 成尾英仁・小林哲夫 (1995) 噴火によって生じたクラスティックダイク。鹿児島大理紀要 (地学・生物学), **41**, 287-299.
- 奥野 充 (2002) 南九州に分布する最近約 3 万年間のテフラの年代学的研究。第四紀研究, **41**, 225-236.
- 奥野 充・小林哲夫 (1991) 鍋島岳火山の地質。鹿児島大理紀要 (地学・生物学), **24**, 23-35.
- 奥野 充・成尾英仁・中村俊夫・小林哲夫 (1996) 南九州、池田湖テフラ層に関連する試料の加速器¹⁴C年代。名古屋大学古川総合研究資料館報告, **12**, 49-55.
- 太田良平 (1966) 鹿児島県指宿地方地質調査報告。地質調査所月報, **17**, 129-139
- 阪口圭一・宇井忠英 (1979) 鹿児島県根占地域の火砕流堆積物の再検討。火山, **24**, 187.
- 阪口圭一・宇井忠英 (1983) 火砕流流走中の異質岩片の取り込み—田代火砕流堆積物による検討—。火山, **28**, 317-320.
- Sato, H. and Taniguchi, H. (1997) Relationship between crater size and ejecta volume of recent magmatic and phreatomagmatic eruptions: Implication for energy partitioning. *Geophys. Res. Lett.*, **24**, 205-208.
- 新エネルギー総合開発 (1986) 地熱開発促進調査報告書 **11**, 池田湖周辺地域, 685p
- 種子田定勝 (1944) 鍋島熔岩及び其の捕獲岩様岩石に就いて。岩鉱, **17**, 129-139.
- Torres, R. C., Self, S. and Martinez, M. M. L. (1996) Secondary pyroclastic flows from the June 15, 1991, ignimbrite of Mount Pinatubo. In *Fire and Mud: Eruptions and Lahars of Mount Pinatubo, Philippines* (Newhall, C. G. and Punongbayan, R. S. eds), 665-678, Philippine Institute of Volcanology and Seismology, Queson City and Univ. Washington Press, Seattle.
- 露木利禎 (1969) 九州地方における温泉の地質学的研究 (第 5 報) 鹿児島地溝内の温泉—特に温泉貯留体について。鹿児島大理紀要 (地学・生物学), **2**, 85-101.
- 宇井忠英 (1967) 鹿児島県指宿地方の地質。地質雑, **73**, 477-490.
- 宇井忠英 (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.
- Yokoyama, S. (1981) Base surge deposits in Japan. In *Tephra Studies* (Self, S. and Sparks, R. S. J. eds), 427-432. D. Reidel Publishing Company, The Netherlands.

(編集担当 宮縁育夫)