

幸屋火砕流堆積物及びその給源近傍相のガラス組成と堆積様式

藤原 誠*・鈴木桂子**

(2011年7月11日受付, 2013年8月23日受理)

Glass Composition and Emplacement Mode of Koya Pyroclastic Flow Deposit
and Its Proximal Equivalent

Makoto FUJIHARA* and Keiko SUZUKI-KAMATA**

Koya pyroclastic-flow deposit from the 7.3 ka event of Kikai caldera is a low-aspect ratio ignimbrite (LARI). The pyroclastic flow was considered to traveled across the sea and reaches up to the adjacent islands and the mainland of south Kyushu which is about 40–80 km away from the caldera. Representing the proximal facies of Koya pyroclastic-flow deposit, Takeshima pyroclastic-flow deposit comprises three or more flow units with a maximum thickness of 30 m. However, in contradiction with the distal deposits collectively called Koya pyroclastic-flow deposit that consist of one exclusively very thin flow unit.

Koya and Takeshima pyroclastic-flow deposits are underlain by pumice-fall deposits and overlain by ash-fall deposits (Akahoya ash). These pyroclastic units represent 7.3 ka Akahoya eruption from the Kikai caldera and commonly contains highly silicic glass shards and pumice of c. 75 wt% SiO₂.

Koya pyroclastic-flow and Akahoya ash-fall deposits characteristically contain a lesser amount of glass shards and pumice fragments of lower silica content (c. 65 wt%). Contribution of the less silicic component to the deposits increases upwards from the basal to middle level of the deposit. This vertical variation likely indicates the progressive aggradation of pyroclasts. Less silicic glass fragments are almost absent from the upper part at one proximal place and exceptionally poor at some, distal and proximal places, perhaps reflecting heterogeneous contribution of the less silicic component to the source magma and/or locally different erosional and depositional conditions within the flow.

Key words: Koya pyroclastic flow, low-aspect ratio ignimbrite, progressive aggradation

1. はじめに

幸屋火砕流堆積物は、薩摩・大隅両半島南部の広い範囲に極めて薄く堆積している特異な火砕流堆積物である(宇井, 1967, 1973)。Walker *et al.* (1980) は、このように層厚が薄く、広い範囲に分布する火砕流堆積物を Low-aspect ratio ignimbrite と呼び、宇井・Walker (1983) はこれに拡散型大規模火砕流堆積物の訳語を用いた。拡散型大規模火砕流の例としては、Taupo ignimbrite (Wilson, 1985), Campanian ignimbrite (Fisher *et al.*, 1993) および阿蘇4-鳥栖火砕流 (Watanabe, 1978, 1984; Suzuki-Kamata and Kamata, 1990) などが知られている。しかし、拡散型大規模火砕

流堆積物の記載例は少なく、その流動堆積機構についても様々なモデルが提唱されている (Walker *et al.*, 1981; Wilson and Walker, 1982; Suzuki-Kamata and Kamata, 1990 など)。

本論文では、幸屋火砕流堆積物とその給源近傍相である竹島火砕流堆積物を構成する火山ガラスの化学組成について垂直変化を調べ、これが給源近傍から遠方まで広い範囲で系統的に認められることを明らかにする。

2. 鬼界アカホヤ噴火噴出物の概略

幸屋火砕流堆積物は、鬼界カルデラを給源とし、先に

* 〒703-8252 岡山県岡山市中区中島2番地5
株式会社 蒜山地質年代学研究所
Hiruzen Institute for Geology & Chronology, Nakajima
2-5, Naka-ku, Okayama, 703-8252, Japan

** 〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1
神戸大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻

Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate
School of Science, Kobe University, Rokkodaicho 1-1,
Nada-ku, Kobe, 657-8501, Japan

Corresponding author: Makoto Fujihara
e-mail: fujihara@geohiruze.co.jp

述べた大隅・薩摩両半島南部地域のほか、種子島・屋久島などに広くに分布しており (Fig. 1), 直下に船倉降下軽石, 直上にはアカホヤ火山灰を伴う。竹島・薩摩硫黄島では, 船倉降下軽石とアカホヤ火山灰との間に竹島火砕流堆積物が挟在する。竹島火砕流堆積物は幸屋火砕流堆積物に比べて格段に厚く, 粗粒で岩相も異なるが, 化学組成など岩石学的特徴が似ていて層位も幸屋火砕流堆積物と同じであることから, 幸屋火砕流堆積物の給源近傍相とされている (町田・新井, 1978)。また, 竹島火砕流堆積物の下位では船倉降下軽石に挟まれて船倉火砕流が堆積している (Fig. 2)。これらは, 間には侵食間隙がなく, 7,300 年前 (福沢, 1995) に鬼界カルデラを形成した「鬼界アカホヤ噴火」によってもたらされた一連の堆積物である (小野・他, 1982)。

鬼界カルデラから噴出したマグマの化学組成については, 小野・他 (1982), 氏家・他 (1986), Furuta *et al.* (1986) 等により研究され, 玄武岩質～安山岩質 ($\text{SiO}_2=50\sim60$ wt%) と, デイサイト質～流紋岩質 ($\text{SiO}_2=66\sim76$ wt%) の bimodal な組成を持つことが明らかにされている。また, 火山ガラスの化学組成も bimodal な組成を持ち, 船倉降下軽石中の火山ガラスは $\text{SiO}_2=74\sim76$ wt%, 竹島火砕流堆積物中の火山ガラスは $\text{SiO}_2=66\sim76$ wt% である (佐藤, 1995, 上村, 1995)。

3. 鬼界アカホヤ噴火噴出物の産状

一連の噴出物の最下部に見られる船倉降下軽石は, 黄白色で比較的良好な淘汰した淘汰の良い軽石からなり, 給源から北東方向に分布軸を持つ (町田・新井, 2003)。給源から約 50 km に当たる大隈半島南端 (Fig. 1 の os-1 地点) は船倉降下軽石の分布軸上に位置し, その地点の船倉降下軽石の粒径は数 cm で層厚は 40 cm を超える。給源から約 70 km 離れた地点 (os-8～os-10 地点) では, 船倉降下軽石は層厚が 20～40 cm, 粒径は数 mm まで減少する。分布軸から離れた薩摩半島では, 船倉降下軽石の層厚は数 cm～30 cm と薄く, 粒径も数 mm～1 cm と細かい (Fig. 3)。船倉降下軽石は厚さが 30 cm を超えるような地点では, 弱い逆級化構造を示す。

カルデラ縁にあたる薩摩硫黄島における船倉降下軽石の分布は北東部に限られるが, これを構成する軽石の粒径は数 cm で, 層厚は約 1 m である。竹島では粒径約 10 cm の角ばった軽石が逆級化もしくは正級化した層をなし, これらが交互に複数重なっており, 全体の層厚は 1 m を超す。

船倉火砕流堆積物は, 竹島では, 層厚 1～2 m 前後で窪地を埋めるようにレンズ状に堆積しており, 全体的に溶結しているが非溶結の所もある。竹島北東部 (tk-3 地点)

では, 数枚の船倉火砕流堆積物が船倉降下軽石の間に挟在し, これらがイントラプリニアンであることが確認できる (Fig. 3)

竹島・薩摩硫黄島に分布する竹島火砕流堆積物は, 非溶結塊状で谷を埋めるように堆積している。竹島火砕流堆積物は, 竹島東部で最も厚く 20 m を超えるが, 竹島西部及び薩摩硫黄島では 1～4 m 程度まで薄くなる。堆積物中の軽石の中には白色に黒色の縞が混ざった縞状軽石もしばしば認められる。また, 竹島火砕流堆積物は少量の黒曜岩を含み, 黒曜岩の周縁部を持つ白色軽石も見られる。竹島の一部 (Fig. 1 の tk-1 地点) では, 細粒火山灰に枯渇し, 軽石, 粗粒な結晶および外来岩片から成る厚さ約 40 cm のユニットを挟んで, 明瞭な境界を持った 3 枚のフローユニットに区分できる所がある (Fig. 4)。また, 火砕流堆積物中段や基底部に外来岩片の濃集部が認められる所もある (tk-3 地点)。薩摩硫黄島では, 火砕流堆積物の基底部に角ばった外来岩片を多量に含み, 細粒火山灰に枯渇した lag breccia (Walker, 1985) が認められる (iw-1 地点)。

給源から 50 km 以上離れた九州本土に分布する幸屋火砕流堆積物は, 1 m 以下の厚さであり, 地形に左右されずに薄く連続的に堆積しているのが特徴である。幸屋火砕流堆積物は, ほぼ全域で風化し, 淡黄色に変色していることが多い。幸屋火砕流堆積物の基底部には外来岩片や遊離結晶に富み細粒火山灰に枯渇した厚さ数 cm の層が上部の火砕流堆積物と明瞭な境界を持って存在することがある。この層は連続性が弱く, レンズ状を呈し露頭内で途切れてしまう場合もある。この薄い層は Walker *et al.* (1981) の“Ground layer”に相当する。幸屋火砕流堆積物本体には軽石の濃集部や弱い成層構造が確認できることがあるが, 軽石の濃集部および弱い成層構造とも, 連続性は無く, 露頭内で途切れてしまう。この軽石濃集部は, 認められる位置も火砕流堆積物内の上部～下部まで変化し, 軽石濃集部の上下にユニット境界は認められない。薩摩半島, 大隈半島南端部では, 幸屋火砕流堆積物は池田カルデラ噴出物に覆われており, 白色～淡青色の新鮮な堆積物が残存する。これは, 幸屋火砕流が堆積して約 1,000 年後に池田カルデラ形成時の噴出物が堆積したためと考えられる (奥野, 2002)。

アカホヤ火山灰は, 幸屋火砕流堆積物を覆い正級化するガラス質の火山灰で, 南九州において厚さは多くの場合 30 cm 以下だが, 他の火山灰などによって覆われ保存状態が良い所では 1 m に達し (Fig. 3 の iw-1, iw-3), 幸屋火砕流堆積物よりも厚く堆積していることもある。アカホヤ火山灰層の最下部は粗粒な軽石のほか, 幸屋火砕流堆積物と同様の縞状軽石を含むことがある。

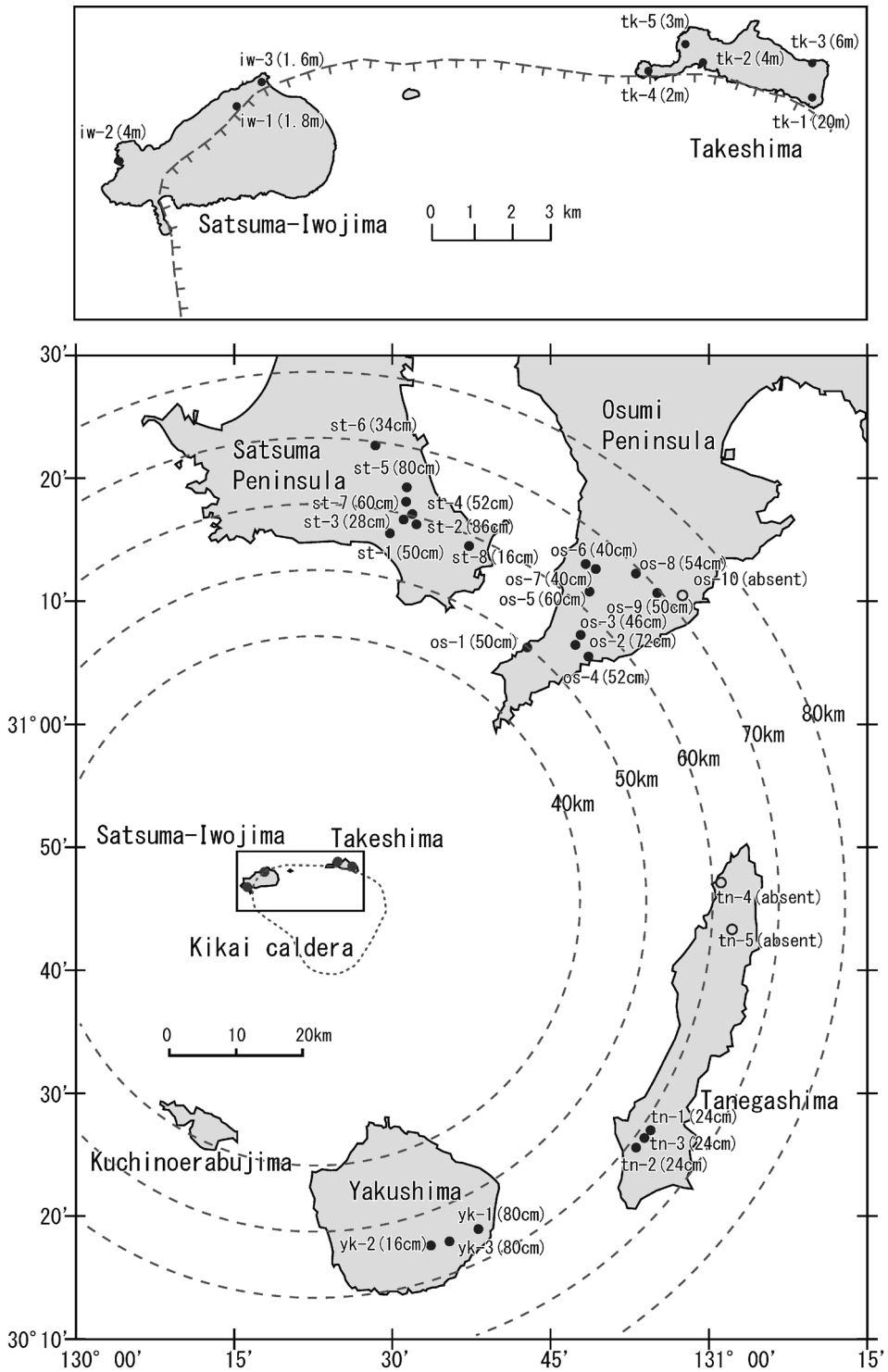


Fig. 1 Locality map of measured stratigraphic sections of Akahoya Eruption products from Kikai caldera in south Kyushu. Open circles show locations that Koya/Takeshima pyroclastic-flow deposit is absent. Dashed line shows run-out distance from the caldera center of Kikai caldera.

Takeshima & Iwojima	South Kyushu & Tanegashima	Yakushima
Aka-hoya ash fall		
Takeshima	Koya pyroclastic flow	
Funakura pyroclastic flow		
Funakura pumice fall		

Fig. 2 Stratigraphy of Aka-hoya Eruptive products. Funakura pyroclastic-flow deposit is found only on the Takeshima Island. (Adapted from Ono *et al.*, 1982)

4. アカホヤ噴火噴出物に含まれる火山ガラスの化学組成分析

4-1 手法

各露頭において噴出物ごとに約 1 kg の試料を採取した。竹島火砕流堆積物・幸屋火砕流堆積物については、露頭内で垂直方向に、薩摩・大隅両半島、屋久島では、20~40 cm 間隔で 2~3 箇所、薩摩硫黄島・竹島では、30~100 cm 間隔で 4~5 箇所等間隔に試料を採取した。試料は超音波洗浄を行った後、軽石およびマトリックス部を取り分け、それぞれを樹脂で固めて研磨薄片を作成、火山ガラス片と軽石を構成するガラスの組成を分析した。分析数は、試料ごとに数十~百個程度である。分析には神戸大学所有の日本電子製 Electron Probe Micro Analyzer (JEOL-8900 EPMA) を用いた。分析条件は、加速電圧 15 kV、照射電流 12 nA、ビーム径 10 μ 、分析時間はピーク 20 秒、バックグラウンド 10 秒とし、補正は B&A 法 (Bence and Albee, 1968) で行った。分析値のトータルが 95% に満たない場合は、変質している可能性が高いとして除外し、それ以外の値は 100% に換算して議論する。

4-2 結果

鬼界アカホヤ噴火の噴出ステージごとの噴出物 (船倉降下軽石、船倉火砕流、幸屋・竹島火砕流、アカホヤ火山灰) の火山ガラス片および竹島火砕流堆積物中の縞状軽石黒色ガラスの SiO_2 分析値の頻度分布を Fig. 5 に示す。いずれの場合も SiO_2 含有量は 74~78 wt% の狭い範囲に集中するが、竹島火砕流堆積物・幸屋火砕流堆積物及びアカホヤ火山灰は $\text{SiO}_2=65$ wt% 前後の SiO_2 の低い火山ガラス片を含む。また、竹島火砕流堆積物中に含まれる縞状軽石の黒色ガラスも $\text{SiO}_2=65$ wt% 前後の低い値を示す。

分析試料を採取した 10 地点における幸屋火砕流堆積物・竹島火砕流堆積物中の火山ガラス片および軽石を構成するガラスの SiO_2 含有量の垂直変化 (Fig. 6) を見る

と、どの層準でも $\text{SiO}_2=75$ wt% 前後の SiO_2 の高いガラスが卓越し、 $\text{SiO}_2=65$ wt% までの SiO_2 の低いガラスは、試料を採取した全地点の基底部と、st-4、os-6、yk-1 地点の全層準、tk-1 地点の最上部を除く各地の上位層準で確認できる。ここから、 $\text{SiO}_2=75$ wt% 前後の SiO_2 の高いガラスを高 SiO_2 ガラス (その起源を高 SiO_2 マグマ)、 $\text{SiO}_2=65$ wt% 前後の SiO_2 の低いガラスを低 SiO_2 ガラス (その起源を低 SiO_2 マグマ) として議論を進める。

5. 議 論

5-1 低 SiO_2 マグマの噴出タイミング

上述の分析結果は、船倉降下軽石および船倉火砕流堆積物から竹島・幸屋火砕流堆積物に至る一連の噴出物は $\text{SiO}_2=75$ wt% 前後の高 SiO_2 マグマ起源であることを示している。竹島火砕流堆積物・幸屋火砕流堆積物の上位層準及びアカホヤ火山灰に認められる $\text{SiO}_2=65$ wt% 前後の低 SiO_2 ガラスは、遅くとも大規模な火砕流噴火の途中には低 SiO_2 マグマが高 SiO_2 マグマに混入していたことを示唆する。薩摩硫黄島の竹島火砕流堆積物基底部の石質岩片濃集部は、大型の外來岩片を多量に含み細粒物が枯渇した lag breccia (Walker, 1985) で、共存する火山ガラス片はいずれも $\text{SiO}_2=75$ wt% 前後である。したがって、船倉降下軽石、船倉火砕流堆積物をもたらしたプリニー式噴火の後、火道が拡大して幸屋火砕流堆積物・竹島火砕流堆積物をもたらした大規模火砕流噴火が始まったことは確かであり、やがて低 SiO_2 マグマが高 SiO_2 マグマに混合して放出されるようになったと考えられる。佐藤 (1995) が指摘したこのマグマ混合は、Maeno and Taniguchi (2007) が議論しているように、カルデラ崩壊とほぼ同時に起こったと考えられる。

アカホヤ火山灰には、船倉降下軽石と船倉火砕流堆積物には存在しない縞状軽石と、幸屋火砕流堆積物・竹島火砕流堆積物と同様に低 SiO_2 と高 SiO_2 のガラスが認められ、これが幸屋火砕流起源の Co-ignimbrite ash であるとする説 (町田・新井, 1978) に矛盾しない。

5-2 堆積機構

Sparks (1976) は、火砕流の堆積機構として、火砕流全体が流動状態から一斉に停止・堆積する en masse freezing を提唱している。このモデルでは、流動時に一枚のフローユニット内で堆積物と同様の垂直・水平変化を生じていなければならず、幸屋・竹島火砕流堆積物のガラス化学組成の垂直変化を形成するのは難しい。幸屋・竹島火砕流堆積物のガラス化学組成の垂直変化は、これが流れから徐々に堆積物を落として累積的に堆積する Progressive aggradation (Fisher, 1966; Branney and Kokelaar, 1992) によって堆積したことを示している。この解釈

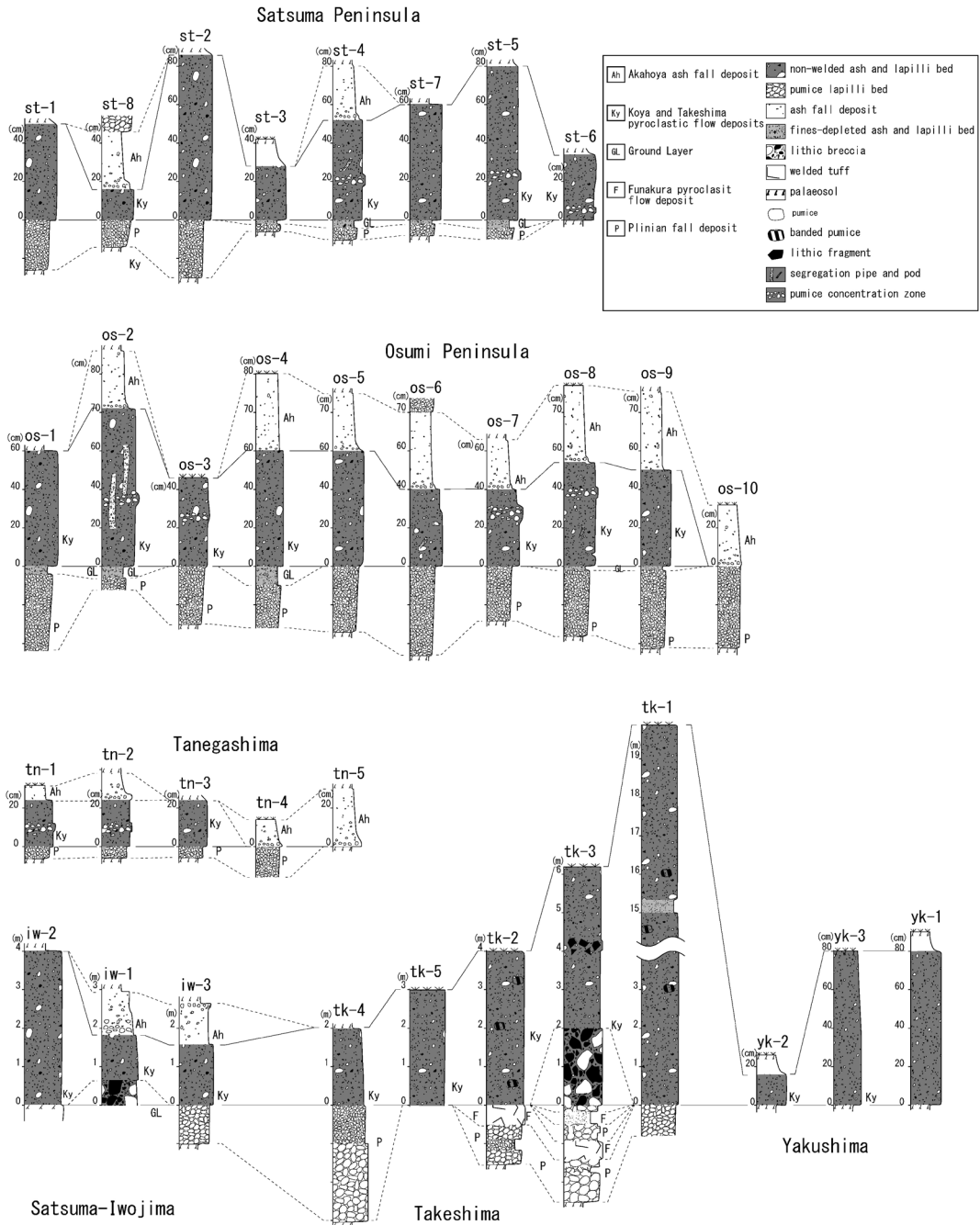


Fig. 3 Columnar sections of Akahoya eruption products. P is Funakura pumice-fall deposit, F is Funakura pyroclastic-flow deposit, GL is ground layer, Ky is Koya or Takeshima pyroclastic-flow deposit, Ah is akahoya ash-fall deposit. See Fig. 1 for the localities of columnar sections.

は、堆積学的特徴などからこれら火砕流堆積物を dilute density current deposit とした Maeno and Taniguchi (2007, 2009) の結論と調和的である。その堆積物が淘汰不良の

まま遠くまで堆積していることからすれば、幸屋火砕流は高速の乱流であったと考えられる。しかし、様々な組成のガラスが乱流の中で混合することが期待される遠方



Fig. 4 Photograph showing three flow units of Takeshima pyroclastic flow deposit on Takeshima Island. Thick massive units separated by thin fines depleted-poor unit. Scale is 1 m.

にあつて、os-8 や st-5 地点のように近傍相と同様、上部に低 SiO_2 ガラスが検出される場合と、os-6, st-5, yk-1 地点のように堆積物の下部だけでなく上部でも低 SiO_2 ガラスが検出されない場合がある。その原因は定かではないが、マグマ混合が不均質で、時間や場所によって流れの中でのガラス片の混合比が変化していた可能性、あるいは乱流内で削剥または堆積する条件が局所的に異なっていた可能性が考えられる。または、より細かく試料採取を行えば、最上部に低 SiO_2 ガラスが検出されるかもしれない。Tk-2 地点では、全層準で低 SiO_2 ガラス片が検出されているが、これは直下にあるべき船倉降下軽石と船倉火砕流堆積物を欠いていることから、これらとともに高 SiO_2 ガラス片のみからなる幸屋火砕流堆積物の基底部を後続の密度流が削剥した結果と考えられる。最上部で再び低 SiO_2 ガラスが検出されなくなる現象は、給原近傍にあつて最も幸屋火砕流堆積物が厚い tk-1 地点でのみ観察される。これが、噴火末期になって低 SiO_2 マグマの混入がほとんどなくなったことを示すのであれば、噴火規模が小さくてこれに対応する噴出物が遠くまで届かなかつたか、あるいは、アカホヤ火山灰が堆積するま

での間に乱流の中でそれ以前の噴出物と混合したことが考えられる。

アカホヤ火山灰層の最下部は、粒径約 1~4 cm の軽石を含んでおり、それらはアカホヤ火山灰上部の細粒部にかけて明瞭な正級化構造を示す。また、基底部の粗粒な軽石の中には、船倉降下軽石と船倉火砕流堆積物には存在しない縞状軽石が認められ、幸屋火砕流堆積物・竹島火砕流堆積物と同様に低 SiO_2 と高 SiO_2 のガラスを含む。したがって、アカホヤ火山灰は幸屋火砕流起源の Co-ignimbrite ash fall 堆積物だと言える。

以上の議論に基づいて、遠方相と近傍相の岩相ならびに堆積機構から、幸屋火砕流の堆積過程を考える (Fig. 7)。高 SiO_2 マグマの爆発的噴火で形成された噴煙柱から船倉降下軽石が堆積する最中に噴煙柱の一部が崩壊して船倉火砕流が発生し、カルデラ近傍にのみ堆積した。その後、火道拡大と共に噴煙柱が大きく崩壊し、より広範囲に拡がる火砕流が発生し、火砕流噴火初期の高 SiO_2 マグマから成る火砕流が海を渡り、遠近両方に幸屋火砕流堆積物と竹島火砕流堆積物が堆積した。噴火が継続する中で、高 SiO_2 マグマに低 SiO_2 マグマが混ざって噴出し、Progressive aggradation によって徐々に堆積した。そのため、幸屋・竹島火砕流堆積物は上部に低 SiO_2 ガラスを含む。その後、2 枚目、3 枚目のフローユニットを形成した火砕流が断続的に発生するが、遠方には到達せず、カルデラ近傍にのみ複数のフローユニットが形成された。

6. ま と め

堆積物中の火山ガラス組成を用いて、鬼界アカホヤ噴火噴出物について対比を行った。一連の噴出物に含まれる火山ガラスは $\text{SiO}_2 = 75 \text{ wt}\%$ 前後の高 SiO_2 ガラスと $\text{SiO}_2 = 65 \text{ wt}\%$ 付近の低 SiO_2 ガラスの 2 種類からなる。一連の噴出物に含まれる火山ガラスの大部分は高 SiO_2 ガラスから成るが、幸屋火砕流堆積物・竹島火砕流堆積物、アカホヤ火山灰中の火山ガラスおよび縞状軽石が $\text{SiO}_2 = 65 \text{ wt}\%$ 付近の低 SiO_2 値を示す。

幸屋火砕流噴出の初期には、 $\text{SiO}_2 = 75 \text{ wt}\%$ 前後の高 SiO_2 マグマのみが噴出し、カルデラリムの竹島火砕流堆積物の下部並びに、海を渡った九州本島に幸屋火砕流堆積物の下部が堆積した。幸屋火砕流噴出の途中で、 $\text{SiO}_2 = 65 \text{ wt}\%$ 前後の低 SiO_2 マグマが混合し始め、結果として幸屋・竹島火砕流堆積物上部以降には縞状軽石や低 SiO_2 火山ガラスが含まれた。幸屋火砕流からは低 SiO_2 マグマを含む細粒物が排出され Co-ignimbrite ash cloud を形成し、アカホヤ火山灰として堆積した。

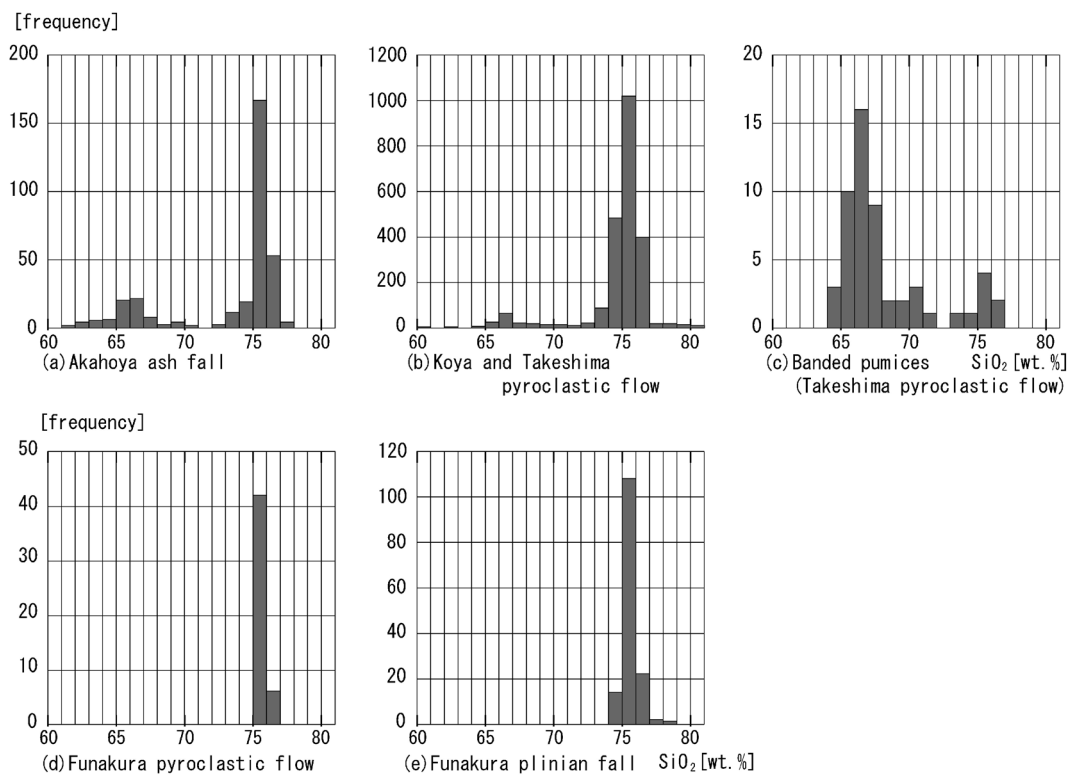


Fig. 5 Histograms of SiO₂ content in glass shards of Akahoya ash fall (a), Koya pyroclastic-flow deposit (b) and Funakura pyroclastic-flow deposit (d) and glassy domains of Banded pumices in Takeshima pyroclastic flow deposit (c). SiO₂ values are recalculated for the total weight to 100 wt%.

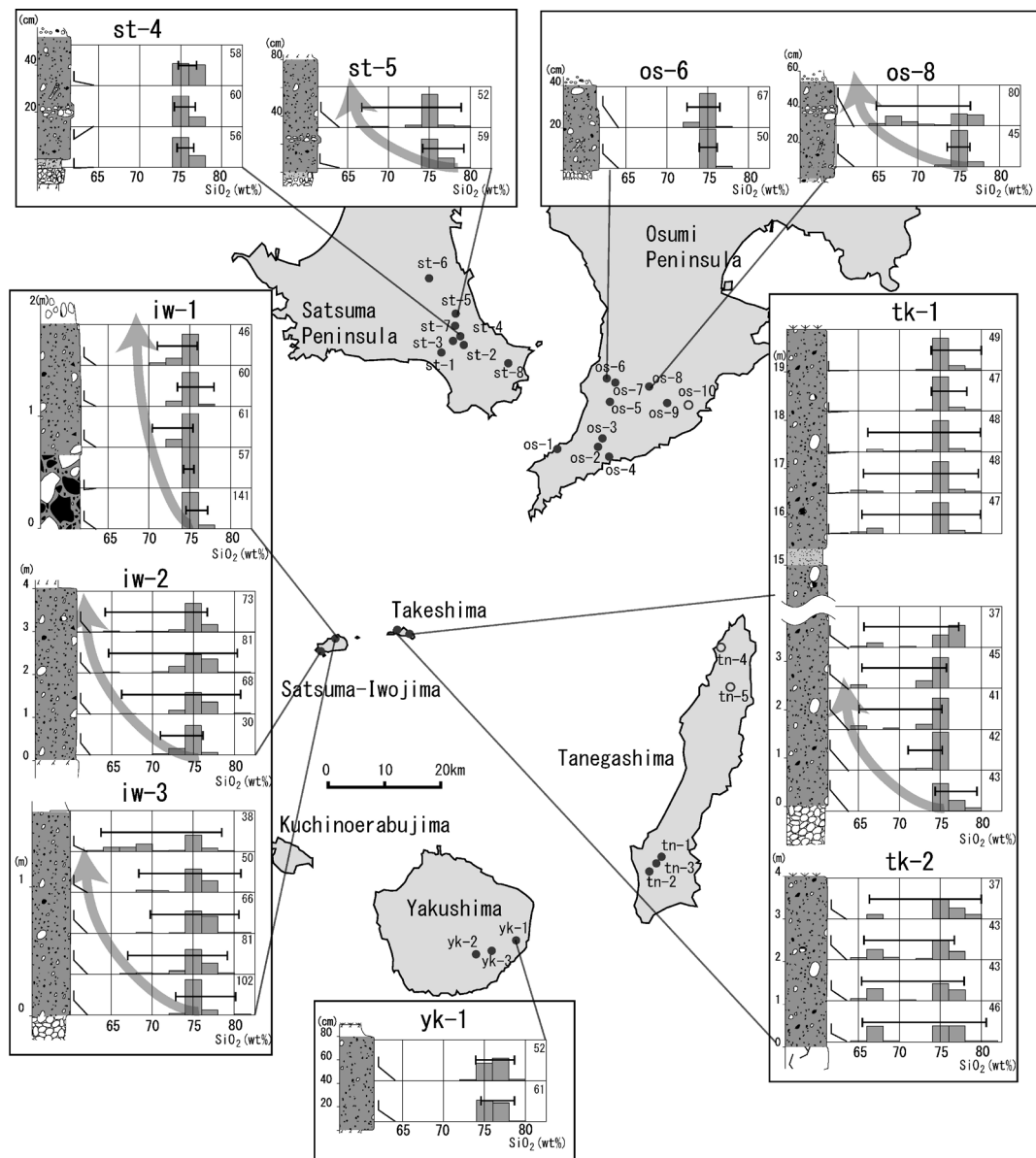


Fig. 6 Histograms showing the range of SiO₂ content in the glass shards of the Koya and Takeshima pyroclastic-flow deposits. Vertical axis shows levels of the samples were collected. Horizontal axis is SiO₂ wt% value. Whiskers show maximum and minimum SiO₂ wt%. Total number of measurement is shown on the upper right side of each histogram. Unit boundary divides lower unit from upper unit at the site tk-1. Arrows indicate decrease of Minimum SiO₂ content appears to decrease upwards as indicated by a grey solid arrow.

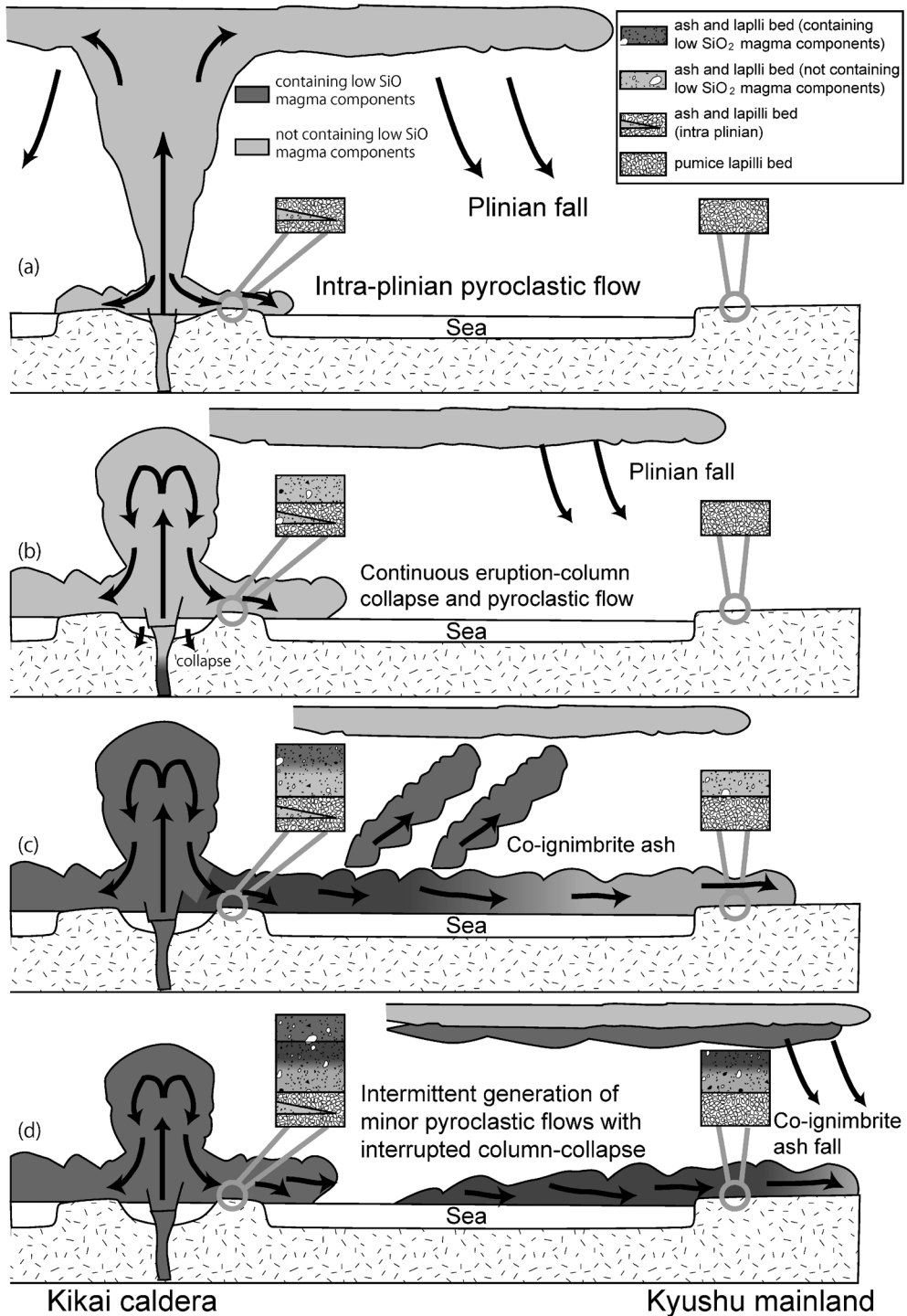


Fig. 7 Schematic depositional model of Koya/Takeshima pyroclastic flow. First, eruption column grew and partly collapsed to form pumice fall and intraplinian pyroclastic-flow deposits (a) followed by continuous eruption and column collapse to generate a dilute pyroclastic flow with increasing contribution of less silicic magma components to the pyroclasts (b and c). Changing eruption rate might have left minor flow units at proximal places to the Kikai caldera.

謝 辞

本研究を進めるにあたり、神戸大学の佐藤博明名誉教授にはご指導・ご助言頂き、EPMA 使用法についてもご指導頂いた。鹿児島大学の小林哲夫教授には露頭の情報を提供して頂いた。また、神戸大学火山地質学研究室の方々には、有益な議論をして頂いた。インド理科大学院の Sajeew Krishnan 博士には英文要旨の添削をして頂いた。鹿児島大学総合研究博物館の鹿野和彦教授には草稿の改善に多くの意見を頂いた。匿名の査読者、担当編集委員の産業技術総合研究所宮城磯治博士の指摘は草稿を改善した。以上の方々に感謝いたします。

引用文献

- Bence, A. E. and Albee, A. L. (1968) Empirical correction factors for the electron microanalysis of silicates and oxides. *Journal of Geology*, **76**, 382-403.
- Branney, M. J., and Kokelaar, B. P. (1992) A reappraisal of ignimbrite emplacement: changes from particulate to non-particulate flow during progressive aggradation of high-grade ignimbrite. *Bull. Volcanol.*, **54**, 504-520.
- Fisher, R. V., (1966) Mechanism of deposition from pyroclastic flows. *Amer. J. Sci.*, **264**, 350-363.
- Fisher, R. V., G. Orsi, M. Ort, and G. Heiken, (1993) Mobility of a large-volume pyroclastic flow - Emplacement of the Campanian ignimbrite, Italy. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **56**, 205-220.
- 福沢仁之 (1995) 天然の「時計」・「環境変動検出計」としての湖沼堆積物。第四紀研究, **34**, 135-149.
- Furuta, T., Fujioka, K., and Arai, F. (1986) Widespread submarine tephra around Japan - Petrographic and chemical properties. *Marine Geology*, **72**, 125-142.
- 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 (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.
- Maeno, F. and Taniguchi, H. (2007) Spatiotemporal evolution of a marine caldera-forming eruption, generating a low-aspect ratio pyroclastic flow, 7.3 ka, Kikai caldera, Japan: implication from near-vent eruptive deposits. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **167**, 212-238.
- Maeno, F. and Taniguchi, H. (2009) Sedimentation and welding processes of dilute pyroclastic density currents and fallout during a large-scale silicic eruption, Kikai caldera, Japan. *Sedimentary Geology*, **220**, 227-242.
- 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, **40**, 25-236.
- 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, **80**p.
- 佐藤博明 (1995) 火山噴出物の岩石組織からみたマグマ-水蒸気爆発。科学研究費補助金重点領域研究「蒸気爆発の動力学」平成 6 年度研究成果報告書, 29-33.
- Sparks R. S. J. (1976) Grain size variations in ignimbrites and implications for the transport of pyroclastic flows. *Sedimentology*, **23**, 147-188.
- Suzuki-Kamata, K. and Kamata, H. (1990) The proximal facies of the Tosu pyroclastic-flow deposit erupted from Aso caldera, Japan. *Bull. Volcanol.*, **52**, 325-333.
- 上村 浩 (1995) 鬼界アカホヤ噴出物の岩石組織に関する研究。広島大学卒業論文, 84p.
- 宇井忠英 (1967) 鹿児島県指宿地方の地質。地質雑, **73**, 477-790.
- 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.
- 宇井忠英・Walker, G. P. L. (1983) 拡散型大規模火砕流堆積物の流動堆積機構-幸屋火砕流での研究計画 (演旨)。日本地質学会第 90 年学術大会講演要旨, 311.
- 氏家 治・曾屋龍典・小野晃司 (1986) 九州南方, 鬼界カルデラ産火山岩類の主成分および Rb・Sr・Y・Zr 組成と起源。岩鉱, **81**, 105-115.
- Walker G.P.L. (1985) Origin of Coarse lithic Breccias near Ignimbrite source vents. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **25**, 157-171.
- Walker G. P. L., Heming R. F., and Wilson C. J. N. (1980) Low-aspect ratio ignimbrites. *Nature*, **283**, 286-287.
- Walker, G. P. L., Self, S. and Froggatt, P. C. (1981) The ground layer of the Taupo ignimbrite: a striking example of sedimentation from a pyroclastic flow. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **10**, 1-11.
- Watanabe, K. (1978) Studies on the Aso pyroclastic flow deposits in theregion to the west of Aso caldera, southwest Japan, I: *Geology. Mem. Fac. Educ., Kumamoto Univ.*, **27**, 97-120.
- Watanabe, K. (1984) An example of low-aspect ratio ignimbrite from aso caldera, Japan. *Progr. Rept. U.S.-Japan Cooperative Sci. Progr. Minist. Educ. Japan*, 18-20.
- Wilson C.J.N. (1985) The Taupo eruption, new zealand II. The Taupo ignimbrite. *Phil. Trans. Roy. Soc. London. A.*, **314**, 229-310.
- Wilson, C.J.N. and Walker, G.P.L., (1982) Ignimbrite depositional facies: the anatomy of a pyroclastic flow. *J. Geol. Soc. London.*, **139**, 581-592.

(編集担当 宮城磯治)