

SEM-EDS による火山ガラス化学組成分析: ボーリングコア試料中の火砕流堆積物を例に

(株)四国総合研究所 土木技術部 潮田 雅司
(株)ナイバ 技術部 長田 朋大
(株)ナイバ 技術部 中村 千怜
四国電力(株) 土木建築部 大西 耕造

キーワード: 火山ガラス
SEM-EDS
Aso-4 火砕流
耶馬溪火砕流

Key Words: Volcanic glass
SEM-EDS
Aso-4 pyroclastic flow
Yabakei pyroclastic flow

Chemical composition analysis of volcanic glass using SEM-EDS:

Examples of pyroclastic flow deposits in a borehole core sample

Shikoku Research Institute, Inc., Civil Engineering Department

Masashi Ushioda

NAIBA Co.,Ltd., Engineering Department

Tomohiro Nagata, Chisato Nakamura

Sikoku Electric Power Co. Inc., Civil & Architectural Engineering Department

Kozo Oonishi

Abstract

The chemical composition analysis of volcanic glass is useful not only to discuss the chemical evolution of magma, but also to correlate pyroclastic flow deposits and tephra samples. We calibrated SEM-EDS for the analysis of major element compositions of volcanic glass. Analysis of standard glass samples shows that the accuracy and precision of SEM-EDS analysis are good enough to correlate with tephra samples. Two pyroclastic flow deposits in a borehole core sample collected from the middle terrace of the Nakatsu Plain in Nakatsu City, Oita Prefecture, Japan, were also measured. The chemical composition of the volcanic glass and the type of components indicate that the upper pyroclastic flow deposit is an Aso-4 pyroclastic flow. The lower pyroclastic flow deposits below the river sediments may be the Yabakei pyroclastic flow, according to the same analysis.

1. はじめに

火山岩は石基と斑晶の集合体であり、ミクロに見ると石基にはマイクロメートルスケールの結晶や火山ガラスが含まれる一方、斑晶においても累帯構造などが見られる。化学組成の微小領域（局所）分析により、マグマの化学進化やマグマの上昇など物理過程の情報を引き出すことが可能となる。また、火山のテクトニックセッティングの違いや、化学進化の違いなどにより火山、そして噴火ごとに化学組成に個性を生じさせる。つまり、火山ごと、噴火ごとに火山ガラスの化学組成が異なることから、遠方に到達した火山灰中に含まれる火山ガラスの化学組成の違いを用いた給源火山・噴火イベントの特定も広く行われている（愛媛県宇和盆地の UT コアにおける例: Tsuji et al. 2018¹⁾）。

火山岩の局所化学組成分析を行うために、これまで電子線マイクロプローブが幅広く用いられてきた。この装置は、走査電子顕微鏡（SEM）に X 線分光器を組み合わせたもので、試料表面に電子線を照射することで試料表面の化学組成に応じた特性 X 線が生じ、その特性 X 線のピーク強度から化学組成を求める。X 線分光器は以前は分光結晶を用いた WDS（波長分散型 X 線分光器）が主流であったが、近年の半導体検出器の進歩により EDS（エネルギー分散型 X 線分光器）も広く使用されるようになった。WDS は波長分解能（つまりエネルギー分解能）が高く精度の良い分析が行われる一方、EDS はエネルギー分解能に劣るが単位電流あたりの X 線励起効率が良い。したがって試料への電子線によるダメージを回避しなければならない場合において、比較的低電流で分析を行うことの出来る利

点がある。火山岩における分析対象の 1 つである火山ガラスは電子線に弱いことから、EDS による分析が有効である。株式会社四国総合研究所において導入された SEM-EDS を用い、火山ガラス分析を精度良く実施できたことから、分析条件等を紹介すると共に、大分県中津平野や愛媛県宇和盆地で採取されたボーリングコアに含まれる火山噴出物試料の化学組成分析および噴火イベントとの対比を行った。

2. 分析手法と分析試料

2.1 局所化学組成分析

化学組成分析には、インレンズショットキー電界放出電子銃を備えた走査顕微鏡（JEOL JSM-IT700HR）と、EDS として Oxford Ultim Max 100 を用いた。なお、この SEM には EBSD（Oxford Nordlys Max）も備えられている。加速電圧は火山岩の主要元素である Fe まで十分励起可能な 15kV とし、照射電流値は試料へのダメージ（特にアルカリ元素の励起効率の減少）を極力回避するために 0.3nA とした。試料へのダメージ軽減には電子線をデフォーカスさせ電子密度を減少させることが有効な手段の 1 つであるが、使用した電子顕微鏡の仕様上、デフォーカスさせて試料に照射する電子線径を任意の大きさに変更することは操作が煩雑となり容易ではないため、フォーカスさせた電子線を直径およそ 10 μ m の円形内で走査させて測定を行った。測定時間は 60 秒とした。

化学組成定量分析のために、各元素のキャリブレーションには、Si に SiO₂、Ti に TiO₂、Al に Al₂O₃、Mn に MnO-Fe₂O₃、Mg に MgO、Ca に CaSiO₃、K と P に KTiPO₅ の合成鉱物を用い、Fe に Hematite、Na に

Table 1 Sample list for SEM-EDS analysis.

Sample			Annotation
NKT-4 core	8.50 m	N33°33'22.07", E131°12'12.56"	pyroclastic flow deposit
	21.63 m		pyroclastic flow deposit
	22.62 m		pyroclastic flow deposit
	23.81 m		pyroclastic flow deposit
	23.90 m		pyroclastic flow deposit
UT-iwk core	8.53-8.55 m	N33°23'28.46", E132°28'21.33"	Aso-4
	2101207		Yabakei pyroclastic flow deposit (non-welded)
	2101213		Imaichi pumice fall

Albite の天然鉱物を用いた。Hematite (92649 : McGuire et al. 1992²⁾) はハーバード大学鉱物博物館所蔵のものを、それ以外は日本電子製のものを用いた。定量分析を行う際の補正法として、 $\phi(\rho Z)$ 法を採用した。

2.2 標準試料

化学組成分析値の精度・確度をチェックするために、化学組成が既知のガラス標準試料と角閃石

標準試料の繰り返し測定を行った。ガラス標準試料として Lipari Obsidian (ID3506 : Kuehn et al. 2011³⁾) と MPI-DING reference glasses (Jochum et al. 2006⁴⁾)、Soda-lime glass (SRM620 : NIST) を用い、角閃石標準試料として Kaersutite (131928 : McGuire et al. 1992²⁾) を用いた。

2.3 ボーリングコア試料と火山近傍噴出物試料

化学組成分析を行った試料を Table 1 に示す。

Table 2 Analytical results of Standard materials.

	Analysis period (YY/MM/DD)	(wt.%)	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO*	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Total
SRM620	21/8/4-21/11/17	Preferred Value	72.08		1.80			3.69	7.11	14.39	0.41		99.48
Soda-lime glass		This study	72.16	0.02	1.74	0.05	UDL	3.75	7.21	14.40	0.38	UDL	99.71
NIST		1σ (n=61)	0.35	0.04	0.05	0.07		0.05	0.09	0.13	0.03		
Lipari obsidian (ID3506)		Preferred Value	74.10	0.07	13.10	1.55	0.07	0.04	0.73	4.07	5.11	0.01	98.85
Kuehn et al. (2011)	21/8/4-21/11/18	Uncertainty at 95% confidence level	1.40	0.02	0.50	0.05	0.03	0.02	0.06	0.22	0.27	0.02	
		This study	74.01	0.07	12.97	1.58	0.06	0.04	0.78	4.10	5.23	UDL	98.83
		1σ (n=74)	0.39	0.04	0.10	0.08	0.05	0.03	0.04	0.06	0.07		
Kaersutite (131928)	21/8/4-21/11/17	Preferred Value	39.60	5.19	14.78	11.82	0.12	12.42	10.42	2.82	1.43		98.60
McGuire et al. (1992)		This study	40.12	5.17	14.34	11.92	0.11	12.58	10.34	2.84	1.49	UDL	98.91
		1σ (n=65)	0.24	0.11	0.11	0.16	0.06	0.12	0.09	0.05	0.04		
KL2-G (MPI-DING)	21/8/17	Preferred Value	50.30	2.56	13.30	10.70	0.17	7.34	10.90	2.35	0.48	0.23	98.33
Tholeiitic basalt from Kilauea (east rift 1983)		Uncertainty at 95% confidence level	0.30	0.09	0.20	0.10	0.01	0.09	0.20	0.08	0.01	0.03	
Jochum et al. (2006)		This study	50.52	2.65	13.31	10.89	0.15	7.49	11.12	2.34	0.51	0.22	99.21
		1σ (n=10)	0.25	0.05	0.13	0.11	0.06	0.09	0.09	0.05	0.04	0.04	
ML3B-G (MPI-DING)	21/8/17	Preferred Value	51.40	2.13	13.60	10.90	0.17	6.59	10.50	2.40	0.39	0.23	98.31
Tholeiitic basalt from Mauna Loa (1975 flow)		Uncertainty at 95% confidence level	0.60	0.09	0.20	0.10	0.01	0.08	0.10	0.06	0.00	0.03	
Jochum et al. (2006)		This study	51.68	2.15	13.65	11.24	0.14	6.75	10.56	2.39	0.39	0.20	99.15
		1σ (n=10)	0.13	0.07	0.07	0.07	0.05	0.09	0.06	0.07	0.03	0.07	
StHs6/80-G (MPI-DING)	21/8/17	Preferred Value	63.70	0.70	17.80	4.37	0.08	1.97	5.28	4.44	1.29	0.16	99.79
Andesitic ash from the St. Helens eruption		Uncertainty at 95% confidence level	0.50	0.02	0.20	0.07	0.004	0.04	0.09	0.14	0.02	0.02	
Jochum et al. (2006)		This study	62.96	0.71	17.61	4.35	0.06	1.97	5.32	4.68	1.33	0.11	99.10
		1σ (n=10)	0.25	0.06	0.09	0.07	0.05	0.04	0.09	0.04	0.03	0.05	
GOR132-G (MPI-DING)	21/8/17	Preferred Value	45.50	0.31	11.00	10.10	0.15	22.40	8.45	0.83	0.03	0.04	98.81
Komatiite from Gorgona island		Uncertainty at 95% confidence level	0.40	0.01	0.20	0.10	0.01	0.20	0.12	0.04	0.003	0.01	
Jochum et al. (2006)		This study	45.36	0.30	10.80	10.21	0.18	22.67	8.56	0.80	0.05	UDL	98.92
		1σ (n=10)	0.20	0.05	0.11	0.15	0.05	0.11	0.08	0.04	0.02		
TI-G (MPI-DING)	21/8/17	Preferred Value	58.60	0.76	17.10	6.44	0.13	3.75	7.10	3.13	1.96	0.17	99.13
quartz-diorite from Italian Alps		Uncertainty at 95% confidence level	0.40	0.02	0.20	0.06	0.01	0.04	0.09	0.09	0.04	0.03	
Jochum et al. (2006)		This study	58.54	0.73	17.18	6.59	0.11	3.86	7.21	3.18	2.01	0.12	99.53
		1σ (n=10)	0.11	0.05	0.10	0.08	0.04	0.04	0.09	0.05	0.05	0.04	

• UDL means “under detection limit”.

• FeO* is calculated assuming that all iron ions are divalent.

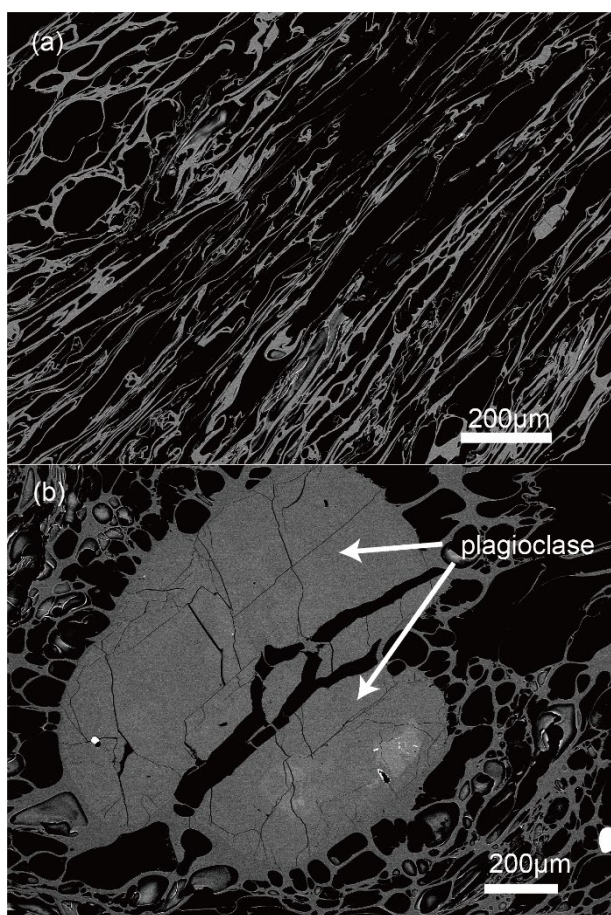


Fig.1 Backscattered electron images of (a) NKT-4 8.51 m and (b) NKT-4 23.81 m pumice.

ボーリングコア試料は、大分県中津市中津平野における中位段丘上で採取された NKT-4 コア（全長 24m）中の火砕流堆積物と見られる層準（上部火砕流堆積物：深度 5.57-8.87m、下部火砕流堆積物：深度 20.77-24.00m）から軽石試料を採取した。上部火砕流堆積物の上位には粘土層、粘土混じり砂層もしくは砂礫層が分布し、地表付近には土壌（ローム層）が見られる、上下の火砕流堆積物の間には、上位から粘土層、玉石混じり砂礫層、砂層、玉石混じり砂礫層の順に旧河川堆積物が挟まる。

また、NKT-4 コア中の火砕流堆積物との対比を目的として、中津周辺地域で 20 万分の 1 地質図幅（石塚・他 2009⁵⁾）を基に、ボーリング掘削地点まで到達した可能性のある猪牟田カルデラ起源の耶馬溪火砕流堆積物（Kamata 1989⁶⁾）、と今市火砕流噴火イベントの一連の噴出物である下位の降下軽石（今市プリニアン：鎌田・他 1994⁷⁾）を採取した。耶馬溪火砕流の噴出年代は、 $1.00 \pm 0.04\text{Ma}$ （檀原・他 1997⁸⁾）、今市火砕流の噴出年代は 0.83

$\pm 0.02\text{Ma}$ （宇都・他 1999⁹⁾）である。さらに、愛媛県西予市宇和盆地で採取された UT-iwk コア中に含まれる Aso-4 火山灰（中村・他 2020¹⁰⁾、Ushioda et al. 2021¹¹⁾）においても火山ガラスの化学組成分析を行い、NKT-4 コア試料と対比検討を行った。Aso-4 噴火の噴出年代は、 $89 \pm 7\text{ka}$ （松本・他 1991¹²⁾）である。火砕流堆積物中の軽石もしくは降下軽石試料は、超音波洗浄後 110°C のオーブンで乾燥させた。内径 2.5cm の型を用いてエポキシ樹脂で真空含浸を行い、樹脂包埋マウントの片面研磨を行い $1\mu\text{m}$ のダイヤモンドペーストで鏡面に仕上げた。火山灰試料は超音波洗浄によりシルト以下細粒分を除去した後、スライドガラス上に粒径 $125\text{-}250\mu\text{m}$ で揃えた粒子をエポキシ樹脂で固定し、軽石試料と同様に鏡面に仕上げた。

3. 分析結果

3.1 標準ガラス・角閃石

標準試料を繰り返し測定した結果を Table 2 に示す。SRM620、Lipari obsidian、Kaersutite については、2021 年 8 月 4 日から 2021 年 11 月 17 日までの期間で各 SEM-EDS 使用日に未知試料分析前に測定したものを平均した。この期間における分析値は、分析誤差を超えた経時変化は確認できない。これらの分析値は推奨値と概ね良い一致を示した。MPI-DING reference glasses の 2021 年 8 月 17 日における測定値を上と同様に平均したところ、これらも概ね推奨値と一致したが、StHs6/80-G は推奨値よりも Na_2O において若干高い値を示した。

3.2 ボーリングコア試料・火山近傍露頭試料

本研究により分析を行ったボーリングコア試料と火山近傍露頭試料の火山ガラス分析結果を Table 3 に示す。NKT-4 コア上部の火砕流堆積物と見られる層準 5.57-8.87m から採取された深度 8.50m の試料は、軽石が混じるものの基質はバブルウォール型火山ガラスに富み、マフィック鉱物として最大数 mm となる角閃石結晶を多く含み、次いで直方輝石・単斜輝石を含む。NKT-4 コア下部の火砕流堆積物である深度 20.77-24.00m の試料においては、軽石は最大 4cm ほどのものが確認でき、基質はバブルウォール型火山ガラスを少量含むものの軽石型火山ガラスに富む。マフィック鉱物と

して角閃石・直方輝石を同程度含むが、NKT-4 コア上部火砕流堆積物で見られるような数 mm を越えるサイズの角閃石は見られない。両者とも黒雲母は確認できなかった。樹脂に包埋した軽石試料の断面を見ると、発泡の良い軽石の組織が確認でき、せん断変形を受けたようなチューブ状組織が見られるものもある (Fig. 1)。軽石に含まれる火山ガラスの化学組成分析を行ったところ、NKT-4 コア上部 8.50m においては SiO₂ で 70 から 72wt. %、NKT-4 コア下部においては SiO₂ で 76 から 78wt. % 前後であった (Fig. 2)。

UT-iwk コア中に含まれる視認テフラである Aso-4 火山灰に対し火山ガラスにおいても同様に

化学組成分析を行ったところ、SiO₂ で 70 から 72wt. % となり、NKT-4 コア上部 8.50m における火山ガラス化学組成と概ね一致した。非溶結耶馬溪火砕流堆積物 (210120-7) 中の軽石と、今市降下軽石 (210121-3) の火山ガラスの化学組成分析を行ったところ、210120-7 は SiO₂ で 78wt. % 前後、210121-3 は SiO₂ で 70 から 72wt. % となった。

4. 考察

4.1 標準ガラス推奨値と分析結果の違い

本研究による標準ガラス試料の分析値と推奨値を比較するとほとんどが良い一致を示すが、一部 (StHs6/80-GのNa₂Oなど) で若干の分析値の違い

Table 3 Analytical results of volcanic glasses in boring and outcrop samples.

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO*	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Total
NKT-4 8.50 m											
	67.77	0.42	14.43	1.73	0.11	0.43	1.39	4.74	4.34	0.04	95.40
1σ(n=12)	0.79	0.05	0.30	0.17	0.04	0.07	0.23	0.11	0.20	0.04	
100% normalized	71.04	0.44	15.12	1.81	0.11	0.45	1.46	4.97	4.55	0.04	100.00
NKT-4 21.63 m											
	72.33	0.20	11.65	1.04	0.09	0.18	1.08	3.28	4.22	0.00	94.07
1σ(n=10)	1.80	0.06	0.23	0.10	0.04	0.02	0.08	0.25	0.20	0.00	
100% normalized	76.89	0.22	12.38	1.11	0.09	0.19	1.15	3.48	4.48	0.00	100.00
NKT-4 22.62 m											
	72.47	0.18	11.56	1.02	0.05	0.18	1.01	3.36	4.00	0.00	93.84
1σ(n=14)	0.70	0.04	0.16	0.08	0.06	0.02	0.04	0.16	0.17	0.00	
100% normalized	77.23	0.19	12.32	1.08	0.05	0.19	1.08	3.59	4.27	0.00	100.00
NKT-4 23.81 m											
	72.74	0.21	11.36	0.93	0.04	0.15	0.95	3.17	4.25	0.00	93.80
1σ(n=12)	0.60	0.04	0.16	0.10	0.05	0.02	0.06	0.15	0.11	0.00	
100% normalized	77.54	0.22	12.11	0.99	0.05	0.16	1.02	3.38	4.53	0.00	100.00
NKT-4 23.90 m											
	72.64	0.21	11.66	0.97	0.06	0.18	1.09	3.35	4.07	0.00	94.24
1σ(n=12)	0.91	0.06	0.22	0.05	0.05	0.03	0.08	0.10	0.10	0.01	
100% normalized	77.09	0.22	12.37	1.03	0.06	0.19	1.16	3.55	4.32	0.00	100.00
210120-7 pumice in Yabakei pyroclastic flow											
	75.12	0.24	11.80	0.64	0.04	0.07	0.99	2.98	4.57	0.00	96.44
1σ(n=11)	0.49	0.04	0.12	0.16	0.04	0.03	0.12	0.06	0.13	0.01	
100% normalized	77.89	0.25	12.23	0.66	0.04	0.07	1.03	3.09	4.74	0.00	100.00
210121-3 Imaichi pumice fall											
	66.88	0.50	13.67	2.35	0.06	0.45	1.66	4.03	4.39	0.03	94.02
1σ(n=11)	0.75	0.05	0.35	0.14	0.04	0.05	0.13	0.10	0.06	0.03	
100% normalized	71.14	0.53	14.54	2.50	0.06	0.48	1.77	4.28	4.67	0.04	100.00
UT-iwk Aso-4 8.53-8.55 m											
	67.71	0.43	14.01	1.67	0.10	0.41	1.19	4.59	4.43	0.08	94.61
1σ(n=14)	0.57	0.07	0.38	0.40	0.06	0.06	0.22	0.18	0.31	0.05	
100% normalized	71.56	0.46	14.81	1.76	0.10	0.43	1.26	4.86	4.68	0.09	100.00

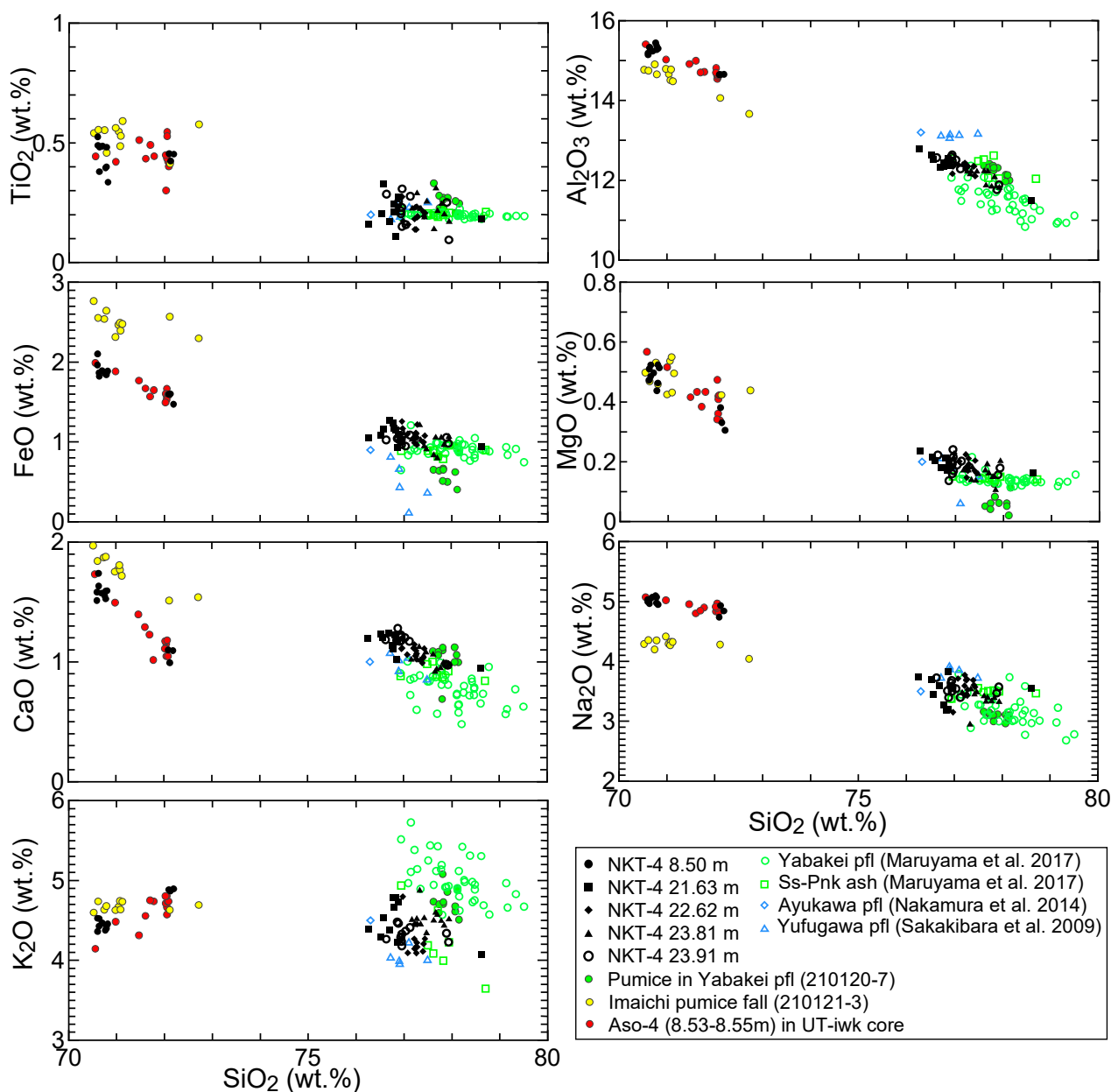


Fig. 2 Volcanic glass compositions in borehole core and outcrop samples. “Pfl” means pyroclastic flow.

が生じた。MPI-DING reference glassesの推奨値を公表したJochum et al. (2006)⁴⁾は、岩石試料を高温下で熔融・急冷して標準ガラスを作成し、世界中の地球化学研究室へ分析依頼したものを平均して推奨値としている。このとき、幅広い化学組成範囲で多くのガラスが作成されたが、Jochum et al. (2006)⁴⁾によるStHs6/80-Gと流紋岩組成のガラスATHO-Gの全岩化学組成分析結果と、電子線マイクロプローブを用いた局所化学組成分析結果を比較すると、有意に全岩化学組成分析結果の方がNa₂O分析値が高い。この傾向はATHO-Gの方が顕著である。この傾向は、比較的SiO₂成分に富む

ガラスにおいて、電子線を照射したことによる試料表面イオンのマイグレーション現象による影響であると解釈することができ、マイグレーションをおこしやすいNaのX線カウントが減少したと考えられる。マイグレーションを経た分析では、逆にガラスの化学組成の大部分を占めるSiとAlが相対的に若干増加した。電子線を照射することによるNaの定量値は基本的にマイグレーションの影響によって真の値よりも減少するセンスである。本研究による分析値はJochum et al. (2006)⁴⁾における各標準ガラスの推奨値のNa₂O量と同等もしくは若干高い結果であることから、本研究におけ

る標準ガラス分析時にマイグレーションの影響をほぼ受けず分析条件で分析を実施することが出来たと解釈することが出来る。以上により、全ての主要元素において精度・確度良く分析が行えることを確認した。

4.2 NKT-4 コア試料中に含まれる火山ガラスの対比

NKT-4 コア上部 (8.50m) の火山ガラス化学組成分析結果は、UT-iwk コア中に含まれる Aso-4 火山灰の化学組成範囲とほぼ一致する。中津平野から比較的近い猪牟田カルデラ起源の今市火砕流堆積物 (本研究で分析に用いたのは一連の噴出物の降下軽石) 中の火山ガラスも化学組成範囲が Aso-4 火山灰と非常に近い。ただし、Aso-4 と今市降下軽石を比較すると、今市降下軽石は FeO や CaO で若干高く、Na₂O で低い傾向があり、かつ、NKT-4 コア 8.50m と UT-iwk コアの Aso-4 火山灰は最大数 mm の角閃石結晶に富むのに対し、今市降下軽石は角閃石結晶を少量含むものの Aso-4 ほど大きくないという記載岩石学的特徴の違いから、NKT-4 コア上部の火砕流堆積物は Aso-4 火砕流に対比出来る。これは、中津平野から山国川を上った中津市三光臼木鮎埴地域で Aso-4 火砕流堆積物が地表付近で見つかっていること (石塚・他 2009⁵⁾) から整合的である。

NKT-4 コア下部の火砕流堆積物は、上部と比べて地質情報に乏しく、対比難度は高い。NKT-4 コアの上部火砕流と下部火砕流堆積物の間は旧河川堆積物が約 12m の層厚で堆積しているため、Aso-4 と対比される上部火砕流との時代間隙は大きいと考えられるが、年代の推定は難しい。また、中津市周辺地域の火山を起源とする火砕流として、猪牟田カルデラ起源の耶馬溪火砕流と今市火砕流 (これは化学組成的に明瞭に除外される)、湯布院周辺起源とされる由布川火砕流や鮎川火砕流 (星住・他 1988¹³⁾) などが対比候補として挙げられ、より複雑である。由布川火砕流の噴出年代はおよそ 0.60Ma (e. g., 星住・鎌田 1991¹⁴⁾、竹村・檀原 1993¹⁵⁾、峯元・他 2000¹⁶⁾) であり、その下位の鮎川火砕流は誓願寺軽石 (広域テフラ Se-Tg) と対比される可能性が指摘されており (吉川・他 1997¹⁷⁾)、その噴出年代は 0.61~0.62Ma (MIS16) (町田・新井 2003¹⁸⁾) である。NKT-4 コア下部火砕流中の火山ガラス組成は本研究で測定した耶馬溪火砕流堆積物の火

山ガラス組成と一部の組成範囲が重なる一方、SEM-EDS ではなく LA-ICP-MS で火山ガラスを測定した Maruyama et al. (2017)¹⁹⁾ は、さらに広い化学組成範囲をとる。これは耶馬溪火砕流の広域火山灰である Ss-Pnk の分析値においても同様である。SEM-EDS を用いて由布川火砕流堆積物中の火山ガラスを測定した榊原・他 (2009)²⁰⁾ や鮎川火砕流堆積物中の火山ガラスを測定した Nakamura et al. (2014)²¹⁾ におけるガラスの化学組成も、NKT-4 コア下部の火砕流中の火山ガラス組成範囲と近い。しかし、由布川火砕流・鮎川火砕流は共に黒雲母を主要なマフィック鉱物として含むため、黒雲母を含まない NKT-4 コア下部火砕流とは対比されない。以上を踏まえると、NKT-4 コア下部の火砕流堆積物は耶馬溪火砕流に対比される可能性がある。今後、ジルコンを用いた年代測定や火山ガラスの微量元素組成分析により、確実に対比されることが期待される。

5. まとめ

新規導入した SEM-EDS の火山ガラス測定手法を確立し、標準試料分析結果から火山ガラスの起源を検討する上で十分な精度・確度があることを確認した。NKT-4 コアにおいて上部・下部の 2 枚の火砕流堆積物が見られ、岩相観察、火山ガラスの化学組成分析から上部は Aso-4 火砕流堆積物に対比され、下部は耶馬溪火砕流堆積物に対比される可能性がある。

[謝辞]

本研究は、四国電力(株)土木建築部殿より委託を受け実施した。愛媛大学社会共創学部の榊原正幸教授には火山ガラスの SEM-EDS 分析について助言を受けた。ここに記し、感謝の意を示す。

[参考文献]

- 1) Tsuji T, Ikeda M, Furusawa A, Nakamura C, Ichikawa K, Yanagida M, Nishizaka N, Ohnishi K, Ohno Y (2018) : 「High resolution record of Quaternary explosive volcanism recorded in fluvio-lacustrine sediments of the Uwa basin, southwest Japan」 *Quat. Int.*, 471, 278-297.

- 2) McGuire AV, Francis CA, Dyar MD (1992): 「Mineral standards for electron microprobe analysis of oxygen」 *Am. Mineral.*, 77 (9-10), 1087-1091.
- 3) Kuehn SC, Froese DG, Shane PA, Participants I. I. (2011): 「The INTAV intercomparison of electron-beam microanalysis of glass by tephrochronology laboratories: results and recommendations」 *Quat. Int.*, 246 (1-2), 19-47.
- 4) Jochum KP, Stoll B, Herwig K, Willbold M, Hofmann AW, Amini M, ..., Woodhead JD. (2006): 「MPI - DING reference glasses for in situ microanalysis: New reference values for element concentrations and isotope ratios」 *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 7, Q02008.
- 5) 石塚吉浩・尾崎正紀・星住英夫・松浦浩久・宮崎一博・名和一成・実松健造・駒澤正夫 (2009): 「20 万分の 1 地質図幅「中津」, 産業技術総合研究所.
- 6) Kamata H (1989): 「Shishimuta caldera, the buried source of the Yabakei pyroclastic flow in the Hohi volcanic zone, Japan」 *Bull. Volcanol.*, 51 (1), 41-50.
- 7) 鎌田浩毅・檀原徹・山下透・星住英夫・林田明・竹村恵二 (1994): 「大阪層群アズキ火山灰および上総層群 Ku6C 火山灰と中部九州の今市火砕流堆積物との対比: 猪牟田カルデラから噴出した co-ignimbrite ash」 *地質学雑誌*, 100 (11), 848-866.
- 8) 檀原徹・鎌田浩毅・岩野英樹 (1997): 「中部九州の耶馬溪火砕流堆積物と大阪層群ピンク火山灰のジルコンのフィッショントラック年代」 *地質学雑誌*, 103 (10), 994-997.
- 9) 宇都浩三・石塚治・内海茂・鎌田浩毅・檀原徹 (1999): 「大規模火砕流堆積物および広域テフラのレーザー加熱 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代測定: 北東九州耶馬溪火砕流 (ピンク火山灰) および今市火砕流」 *地球惑星科学関連学会合同大会予稿集*, Vc-015.
- 10) 中村千怜・辻智大・池田倫治・西坂直樹・大西耕造・榊原正幸 (2020): 「四国西部宇和盆地における阿蘇 4 降下テフラ層厚の妥当性」 *JpGU-AGU Joint Meeting 2020*, SVC46-P03.
- 11) Ushioda M, Nakamura C, Tsuji T, Ikeda M, Ohnishi K, Nishizaka N (2021): 「Tephra from large eruption in Kyushu area observed in UT-iwk core from Uwa basin, western Shikoku」 *5th International Workshop on Rock Mechanics and Engineering Geology in Volcanic Fields*, OS1-2.
- 12) 松本哲一・宇都浩三・小野晃司・渡辺一徳 (1991): 「阿蘇火山岩類の K-Ar 年代測定—火山層序との整合性と火砕流試料への適用—」 *日本火山学会 1991 年度秋季大会講演予稿集*, 73.
- 13) 星住英夫・小野晃司・三村弘二・野田徹郎 (1988): 「別府地域の地質」 *地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅)*, 地質調査所, 131p.
- 14) 星住英夫・鎌田浩毅 (1991): 「由布川火砕流の噴出年代」 *火山*, 36 (4), 393-401.
- 15) 竹村恵二・檀原徹 (1993): 「由布川火砕流のフィッショントラック年代」 *火山*, 38 (2), 63-66.
- 16) 峯元愛・竹村恵二・檀原徹 (2000): 「大分県日出地域に露出する敷戸および由布川火砕流堆積物のフィッショントラック年代」 *火山*, 45 (5), 289-293.
- 17) 吉岡敏和・星住英夫・宮崎一博 (1997): 「大分地域の地質」 *地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅)*, 地質調査所, 65p.
- 18) 町田洋・新井房夫 (2003): 「新編火山灰アトラス」, 東京大学出版会.
- 19) Maruyama S, Danhara T, Hirata T (2017): 「Re-identification of Shishimuta-Pink tephra samples from the Japanese Islands based on simultaneous major-and trace-element analyses of volcanic glasses」 *Quat. Int.*, 456, 180-194.
- 20) 榊原正幸・中村千怜・岩崎仁美・池田倫治・佐野栄・檀原徹 (2009): 「愛媛県野村町北部の中期更新世平野火山灰の FT 年代お

よび岩石学的研究」 火山, 54 (6) , 241-251.

- 21) Nakamura C, Sakakibara M, Sano S, Kurniawan IA (2014) : 「Trace element compositions of glass from Middle Pleistocene volcanic ash in Western Shikoku, Japan」 Proceeding of International Conference of Transdisciplinary Research on Environmental Problem in Southeastern Asia 2014, 43-52