

岩石学的特徴を利用した対比・同定の有効性：北海道東部、
阿寒・屈斜路火山における大規模火砕流堆積物の露頭情報

長谷川 健*・中川 光弘**

(2014年7月1日受付, 2014年9月8日受理)

Effective Method for Tephra Correlation on the Basis of Petrological Characteristics:
Outcrop Database of Large Scale Pyroclastic Flow Deposits
around Akan and Kutcharo Volcanoes, Eastern Hokkaido, Japan

Takeshi HASEGAWA* and Mitsuhiro NAKAGAWA**

This paper introduces a practical use of outcrop data in determining the correlation, stratigraphy and distribution of large-scale pyroclastic flow deposits (PFL). The studied area is the Akan and Kutcharo volcanic zone in Eastern Hokkaido, Japan, which have had a long and complex history of more than 20 caldera-forming eruptions during the Quaternary. A database of the stratigraphy and glass chemistry for the more than 20 PFL can be established by studying a sufficient number of representative outcrops. We found representative outcrops where stratigraphic relationships between several PFL can be observed at the same time. We analyzed glass chemistry of juvenile pumices (> 10 clasts) of the PFL. The database enables to identify all exposed PFL in this area, thus allowing us to draw detailed maps of the distribution for each PFL. The database can be also used for correlation and chrono-stratigraphic determination of reworked volcanic deposits, such as terrigenous marine deposits in Kushiro region, located on the plains at the foot of Akan and Kutcharo volcanoes.

Key words: large-scale pyroclastic flow deposits, Akan and Kutcharo volcanoes, glass chemistry, correlation, chrono-stratigraphy

1. はじめに

噴出量が10km³を超える大規模な火砕流堆積物(以下、堆積物を省略)は、平均層厚も10m以上に及ぶ場合が多く、ひとつの露頭では、その上下層準を確認できないことが多い。北海道東部の阿寒・屈斜路火山地域では、第四紀を通じて20回以上もの大規模火砕流を繰り返し噴出しており、これらはほぼ共通して白色～灰色の輝石デイトサイトないしは流紋岩と、岩相も類似する(Hasegawa *et al.*, 2012)。このような地域において、上下層準が確認できない、1層の火砕流からなる露頭に遭遇した場合、その識別・同定は容易ではない。本稿では、阿寒・屈斜路火山地域において、多数の露頭で火砕流の識別・同定

を行い、分布・層序を明らかにする際、露頭情報をどのように活用したかを紹介する。さらに、大規模火砕流の新たな露頭情報活用法の一例も提案したい。

2. 地質概説

阿寒・屈斜路火山の位置する北海道東部は、千島弧の南西部にあたる。ここでは千島海溝に対して太平洋プレートが斜めに沈み込み(Kimura, 1986)、海溝の伸びとほぼ平行して、知床半島から阿寒地域まで第四紀の火山列(阿寒―知床火山列)が形成されている。阿寒および屈斜路火山は、この火山列南西部に位置する第四紀のカルデラ火山である(Fig. 1)。両カルデラは隣接して存在

* 〒310-8512 茨城県水戸市文京2-1-1

茨城大学理学部

Department of Earth Sciences, College of Science, Ibaraki University, 2-1-1 Bunkyo, Mito 310-8512, Japan.

** 〒060-0810 北海道札幌市北区北10条西8丁目
北海道大学大学院理学研究院自然史科学部門

Department of Natural History Sciences, Graduate School of Science, Hokkaido University, N10 W8, Kita-ku, Sapporo 060-0810, Japan.

Corresponding author: Takeshi Hasegawa
e-mail: hasegawt@mx.ibaraki.ac.jp

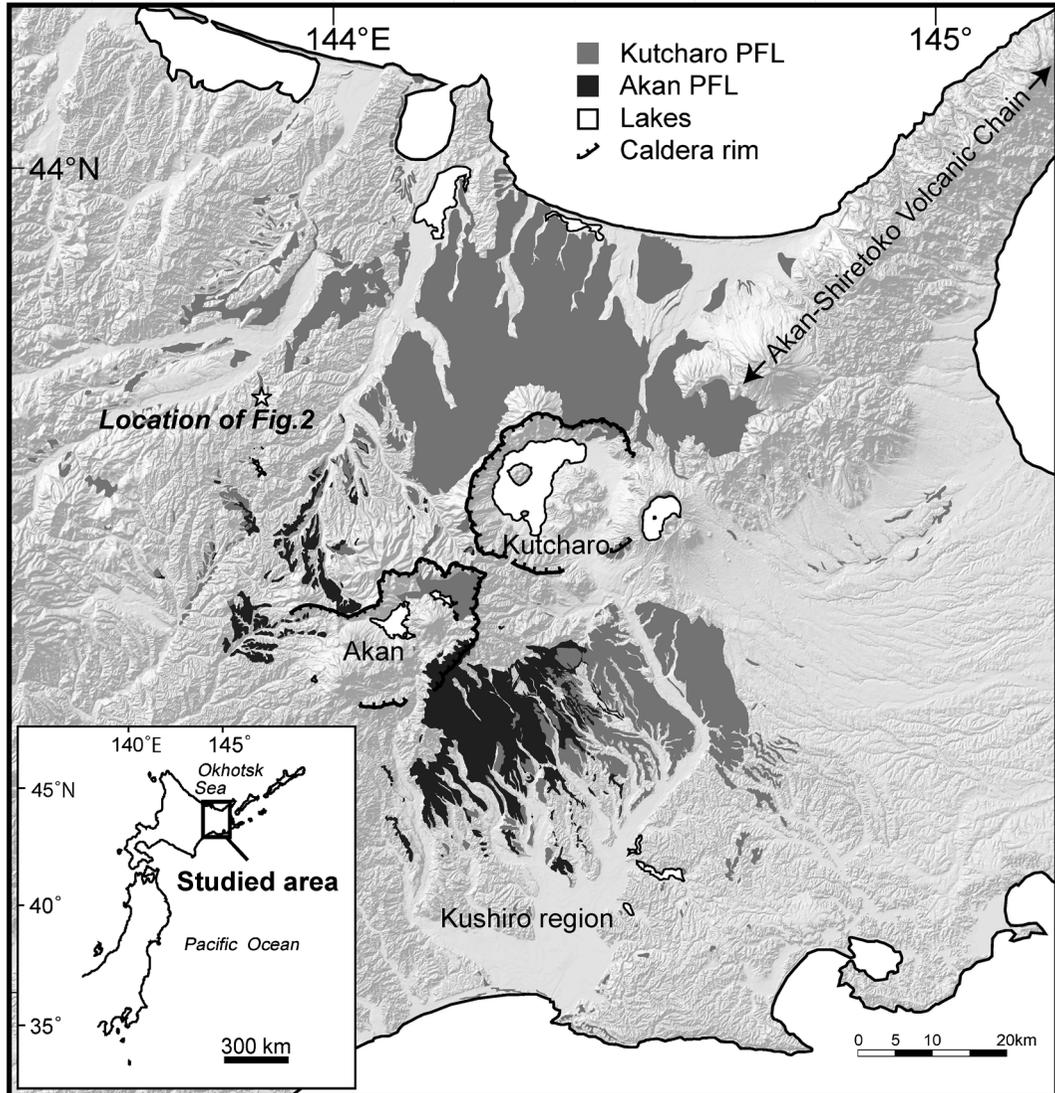


Fig. 1. Map showing the distribution of Akan and Kutcharo pyroclastic flow deposits (PFL) on a shaded relief map demonstrating digital topography of Eastern Hokkaido illuminated by sunlight from the NW direction. Star indicates the location of the outcrop of Fig. 2 (Kitami-Kaisei).

し、ともに長径 20 km を超える。カルデラ形成時に噴出した火砕流は、主にカルデラの周縁約 20~30 km の範囲に分布する。特に大規模な火砕流 ($> 100 \text{ km}^3$) は、50~60 km 以上も流走し、北方のオホーツク海や南方の太平洋に達している。阿寒カルデラは、約 170 万年前に活動を開始し、約 15 万年前までの間に、少なくとも 15 回の大規模火砕流を発生した。屈斜路カルデラは、約 40 万年前から活動を開始し、一部阿寒カルデラと活動を並行させながら、約 3 万年前までの間に 8 回の大規模火砕

流を発生している。

3. 火砕流対比の手順

火砕流に限らず、テフラの対比・同定には、本質物質の岩石学的特徴を用いるのが有効的である。本研究では、岩石学的特徴による対比に際して、まず、なるべく多くの火砕流が一箇所で観察できるような好露頭を見つけ、そこを「対比模式地」とした。火砕流は給源近くで層厚が大きく、遠方では薄くなるので、対比模式地は給

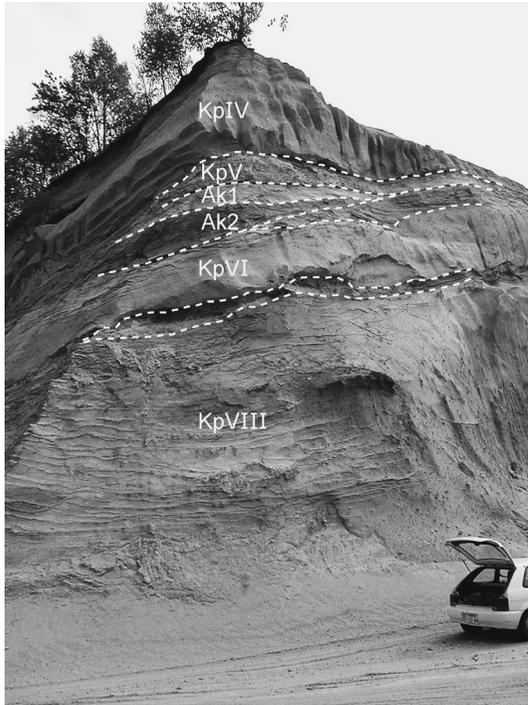


Fig. 2. An outcrop of Kitami-Kaisei (star in Fig. 1) (reprinted from the Fig. 10 of Hasegawa and Nakagawa, 2007). Kp and Ak are pyroclastic flow deposits from Kucharo and Akan volcano, respectively. Note that at this outcrop, deposits from the two volcanoes inter-finger (e.g., Ak2 and Ak1 occur between KpVI and KpV). Kp I (chemical compositions of which are shown in Fig 3) extends to the left of the picture between the tree line and the top of Kp IV. The unlabelled layer between KpVIII and KpVI is reworked material of KpVIII. (car for scale)

源から離れた遠方地域に存在する場合が多い。たとえば、20 万年前以降に噴出した阿寒・屈斜路火砕流の最も良い対比模式地は、給源から約 40 km 北西に離れた北見開成に存在する (Fig. 1 の星印の位置)。この露頭では、下位から屈斜路軽石流 VIII (Kp VIII)、同 VI (Kp VI)、阿寒火砕流 2 (Ak2)、同 1 (Ak1)、屈斜路軽石流 V (Kp V)、同 IV (Kp IV) そして同 I (Kp I) と、7 層の火砕流が一度に観察できる (Fig. 2)。このような対比模式地で、各火砕流の本質物質 (軽石) を、無作為に 10 個以上採取する (本質物質のタイプが複数あれば、それぞれについて 10 個以上)。北見開成の露頭で採取した各火砕流試料について、火山ガラスの主成分化学組成の代表的分析値を Fig. 3 および Table 1 に示す。分析装置や分析条件については、長谷川・中川 (2007) を参照されたい。各火砕流の火

Table 1. All data are normalized to 100%. FeO*, total iron calculated as FeO.

	wt%	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO*	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
Kp I	77.92	0.39	12.43	1.58	0.00	0.36	1.43	3.54	2.35	
	78.27	0.46	12.53	1.68	0.01	0.28	1.30	3.39	2.28	
	77.79	0.38	12.48	1.62	0.01	0.28	1.47	3.69	2.28	
	78.05	0.27	12.25	1.71	0.00	0.32	1.41	3.66	2.34	
	78.16	0.36	12.44	1.61	0.00	0.35	1.35	3.44	2.29	
	78.08	0.36	11.88	1.40	0.19	0.39	1.46	4.02	2.22	
	77.98	0.44	11.96	1.52	0.05	0.36	1.37	4.03	2.29	
	77.99	0.35	12.21	1.45	0.08	0.27	1.33	4.01	2.30	
	77.69	0.29	12.12	1.56	0.10	0.38	1.49	3.97	2.39	
	77.86	0.33	12.11	1.64	0.12	0.52	1.31	4.01	2.30	
Kp IV	77.90	0.32	11.89	1.31	0.20	0.44	1.36	4.19	2.40	
	78.16	0.18	12.03	1.47	0.24	0.29	1.27	4.06	2.30	
	78.01	0.29	11.79	1.58	0.11	0.42	1.41	4.05	2.33	
	77.93	0.39	12.28	1.71	0.02	0.36	1.22	4.15	1.93	
	77.89	0.41	12.27	1.82	0.00	0.40	1.27	4.03	1.90	
	77.85	0.41	12.13	1.71	0.03	0.46	1.39	4.07	1.95	
	77.93	0.30	12.01	1.82	0.29	0.37	1.17	4.14	1.96	
	77.91	0.24	12.53	1.55	0.01	0.39	1.16	4.36	1.84	
	78.17	0.35	12.10	1.70	0.00	0.46	1.24	4.18	1.80	
	78.00	0.51	12.08	1.87	0.00	0.41	1.36	4.01	1.77	
Kp V	77.67	0.38	12.04	2.05	0.07	0.45	1.27	4.29	1.78	
	78.11	0.44	12.11	1.78	0.00	0.32	1.24	4.06	1.95	
	78.10	0.32	12.12	1.68	0.15	0.34	1.13	4.25	1.91	
	77.85	0.31	12.23	1.75	0.21	0.39	1.18	4.13	1.95	
	77.93	0.31	12.16	1.92	0.07	0.36	1.27	4.12	1.87	
	75.83	0.59	12.76	2.12	0.15	0.50	1.74	4.40	1.93	
	75.75	0.44	12.71	2.10	0.16	0.62	1.70	4.63	1.89	
	76.08	0.57	12.46	2.29	0.07	0.47	1.68	4.52	1.86	
	76.25	0.51	12.73	2.05	0.09	0.53	1.72	4.24	1.87	
	75.42	0.63	12.86	2.14	0.15	0.50	1.74	4.62	1.93	
Ak1	75.83	0.40	12.88	2.10	0.17	0.50	1.72	4.42	1.98	
	76.01	0.56	12.69	2.17	0.13	0.47	1.76	4.21	1.99	
	76.09	0.34	12.89	2.30	0.00	0.53	1.67	4.32	1.86	
	76.20	0.35	12.71	1.89	0.18	0.61	1.77	4.33	1.98	
	76.06	0.34	12.68	2.20	0.17	0.47	1.75	4.36	1.98	
	77.03	0.44	12.14	2.10	0.00	0.38	1.45	3.76	2.70	
	77.31	0.36	11.89	2.11	0.00	0.38	1.44	3.92	2.60	
	76.93	0.36	12.12	1.82	0.09	0.47	1.57	3.91	2.74	
	77.31	0.40	11.98	1.98	0.00	0.40	1.39	3.73	2.82	
	76.95	0.33	12.22	1.96	0.19	0.36	1.43	3.92	2.64	
Ak2	77.04	0.43	12.13	1.70	0.14	0.45	1.48	3.97	2.65	
	77.73	0.23	12.15	1.51	0.01	0.30	1.53	3.82	2.72	
	77.12	0.54	11.98	2.02	0.17	0.31	1.45	3.74	2.67	
	77.38	0.34	12.08	2.15	0.00	0.30	1.47	3.74	2.55	
	77.40	0.37	12.06	1.68	0.17	0.37	1.45	3.90	2.56	
	77.30	0.43	12.16	1.94	0.00	0.43	1.41	3.76	2.56	
	77.29	0.46	12.25	1.91	0.00	0.35	1.45	3.76	2.53	
	74.37	0.33	12.87	3.44	0.21	0.36	1.73	3.87	2.82	
	74.27	0.43	12.97	3.50	0.00	0.32	1.64	4.13	2.74	
	74.04	0.38	13.22	3.44	0.00	0.38	1.78	4.03	2.74	
Kp VI	73.55	0.50	13.02	3.65	0.04	0.47	1.88	4.14	2.74	
	73.74	0.37	12.96	3.55	0.09	0.48	1.83	4.14	2.85	
	65.90	1.22	14.52	6.32	0.16	1.83	4.21	3.80	2.04	
	64.80	1.24	14.72	6.60	0.17	2.29	4.43	3.83	1.91	
	64.49	1.29	15.02	6.94	0.11	2.05	4.38	3.77	1.94	
	67.75	1.08	14.22	5.39	0.08	1.59	3.76	3.95	2.18	
	64.74	1.26	14.95	6.72	0.26	2.02	4.54	3.61	1.91	
	73.96	0.48	12.81	3.86	0.04	0.34	1.80	3.87	2.84	
	73.94	0.58	13.20	3.50	0.05	0.33	1.66	3.99	2.76	
	73.90	0.44	13.10	3.39	0.14	0.48	1.76	4.04	2.74	
Kp VIII	73.83	0.48	13.16	3.58	0.16	0.46	1.75	3.99	2.58	
	73.65	0.43	13.58	3.53	0.08	0.43	1.64	3.92	2.74	
	77.21	0.23	12.38	1.67	0.22	0.44	1.50	4.34	2.02	
	77.12	0.50	12.47	1.50	0.01	0.51	1.59	4.16	2.13	
	76.62	0.34	12.60	1.54	0.18	0.59	1.59	4.34	2.20	
	76.82	0.35	12.91	1.76	0.07	0.40	1.48	4.15	2.05	
	76.99	0.39	12.65	1.65	0.07	0.50	1.59	3.97	2.18	
	77.17	0.36	12.74	1.56	0.10	0.42	1.59	3.94	2.12	
	76.92	0.55	12.53	1.66	0.20	0.40	1.61	3.96	2.17	
	77.29	0.38	12.53	1.76	0.06	0.35	1.47	4.02	2.14	
Kp VII	77.30	0.45	12.72	1.46	0.00	0.32	1.44	4.11	2.19	
	77.02	0.34	12.67	1.84	0.16	0.34	1.45	3.94	2.24	
	77.01	0.40	12.73	1.76	0.04	0.37	1.44	4.09	2.15	
	77.29	0.38	12.78	1.60	0.00	0.33	1.41	4.13	2.08	
	77.25	0.36	12.55	1.82	0.01	0.39	1.40	4.03	2.18	
	78.38	0.27	12.13	1.39	0.04	0.38	1.22	3.51	2.68	
	77.84	0.28	12.58	1.48	0.06	0.35	1.24	3.84	2.53	
	78.09	0.32	12.12	1.66	0.11	0.32	1.18	3.67	2.53	
	78.11	0.43	12.25	1.30	0.19	0.26	1.11	3.83	2.52	
	78.06	0.29	12.08	1.56	0.12	0.22	1.13	3.89	2.65	
Kp VIII	78.16	0.34	12.13	1.57	0.09	0.25	1.18	3.74	2.53	
	77.89	0.40	12.14	1.51	0.14	0.35	1.19	3.87	2.50	
	78.03	0.33	12.16	1.60	0.00	0.33	1.13	3.86	2.56	
	78.17	0.37	12.19	1.44	0.10	0.21	1.12	3.91	2.49	
	78.05	0.37	12.19	1.50	0.13	0.25	1.24	3.80	2.47	
	77.91	0.34	12.18	1.60	0.00	0.37	1.19	3.87	2.54	
	78.18	0.36	12.25	1.37	0.00	0.36	1.28	3.74	2.46	

山ガラス組成は、K₂O のハーカー図上でほとんど重なることがなく、それぞれ異なる範囲を示すことが分かる。なお、ひとつの火砕流の組成範囲が、分析装置の偶然誤

差*を超えて広がりを持っている場合は、マグマの不均質性を示していると考えられる。

さらに調査を進め、なるべく多くの層準を網羅できるように対比模式地を増やしてゆき、記載と火山ガラス組成分析を繰り返すことで、その地域における火砕流の層序・岩相とガラス組成のデータベースを構築できる。本地域では、黒色のスコリア流やかんらん石、角閃石を含む火砕流が特徴的であり、これらが対比模式地をつなげる際の有効な鍵層となった。また、本地域では1層の火砕流しか見えない露頭を200以上確認したが、上記のデータベースを用いることで、これらの対比・同定も比較的容易に検討できた。すなわち、岩相、層序、分布などの地質学的情報に加え、本質物質の鉱物組合せそしてガラス組成を併用して、未知の火砕流がデータベース中のいずれの火砕流の組成範囲内に収まるかを検討すればよい。火山ガラス組成について言えば、主成分元素は、 SiO_2 、 TiO_2 、 Al_2O_3 、 FeO^* 、 MgO 、 MnO 、 CaO 、 Na_2O 、 K_2O などが検討可能であるので、すべての元素の値(wt.%)が一致する火砕流となると、ほとんど1つか2つに絞ることができる(P_2O_5 は機器の分析精度の問題により、分析していない)。こうして火砕流の対比を進めることで、詳細な火砕流分布図を完成させることが可能となる。さらに、各火砕流の空間的な広がりが明らかになれば、それらの層厚、粒径、溶結度などの側方変化を見ることができ、比較的容易に給源地域を確定することができる。

4. データベースの応用例

対比模式地データベースは、二次堆積テフラにも応用が可能である。阿寒・屈斜路火砕流が形成する台地の南方に位置する低地(釧路地域)には、第四紀の海成層である釧路層群(今西, 1953; など)が広く分布する。釧路層群に含まれる大量の二次堆積テフラは、岩相・岩質および地理的位置関係からみて、阿寒・屈斜路火山に由来することが指摘されていた(たとえば、奥村, 1991)。長谷川ほか(2011)は、従来広義で使われていた釧路層群を整理して、その一部を釧路層(累層)と再定義した。そして、釧路層を構成する各部層から、それぞれ無作為に多数(10個以上)の軽石・溶結凝灰岩礫を採取し、その火山ガラス組成を、上記データベースと比較検討することで、釧路層の年代論を整理した。例えば、釧路層上部にあたる塘路部層と下部にあたる達古武部層から得た軽石・溶結凝灰岩礫のガラス組成を見ると、塘路部層中の礫はすべてAk13由来、達古武部層ではAk14~Ak17

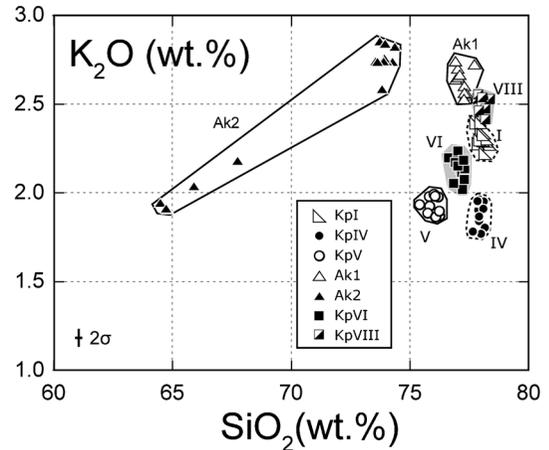


Fig. 3. K_2O - SiO_2 variation diagram of matrix glass for juvenile materials from each pyroclastic flow deposit at the outcrop of Kitami-Kaisei as in Fig. 2. All data are normalized to 100%.

の軽石礫が層全体に混在することから、塘路部層はAk13の大規模噴火直後(あるいは同時期)、達古武部層はAk14噴火後~Ak13噴火前の堆積層であると結論できる(Fig. 4)。Ak14は、テフクロノロジーによって、すでに1.3~1.46 Maの年代が得られているため(長谷川ほか, 2008)、釧路層にそれらの年代を導入することができた。このように、テフラの供給源となる火砕流の層序・年代が確立され、それらの岩石学的データベースも構築されていれば、二次堆積テフラであっても、含まれる軽石礫等について十分な分析値を得ることによって対比・編年を検討することが可能であることが分かる。

5. 大規模火砕流における露頭情報活用法の提案: 火砕流の流走距離と石質岩片の平均最大粒径の相関関係

阿寒地域の多数の露頭間で、各火砕流を対比・同定した結果として、Fig. 5のような図を作成することができる(長谷川・中川, 2007のFig. 18に加筆)。この図は、阿寒火砕流について、給源からの距離と、Layer 2(火砕流本体部: Sparks *et al.*, 1973)に含まれる石質岩片の平均最大粒径(露頭内で確認した最大の3粒子の平均径)との関係を表したものである。Aramaki (1984)などが同様の図で示した通り、給源からの距離が大きくなるにつれて、火砕流に含まれる石質岩片の平均最大粒径は顕著に小さくなる傾向が見取れる。給源から20 km付近に見られる減少傾向の変曲点は、地形の変換点あるいはフローユニットの減少過程などを反映している可能性があ

*測定ごとに不規則にばらつく誤差。これに対し、測定ごとに、真の値に対して系統的にずれて生じる誤差を系統誤差と呼ぶ。一般的に偶然誤差は補正・除去が難しい。

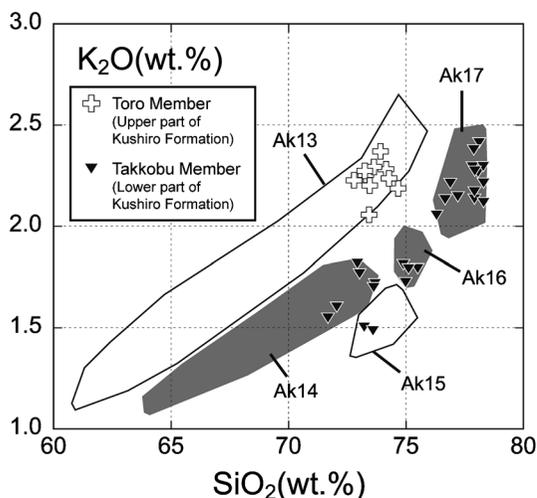


Fig. 4. Representative glass compositions from samples of pumice clasts and welded tuffs from the Kushiro Formation (modified from the Fig. 7 of Hasegawa *et al.*, 2011). Compositional fields of Akan tephras (Ak13–Ak17: (Hasegawa and Nakagawa, 2007) are also shown. All data are normalized to 100%.

るが、現時点で詳細は不明である。

Fig. 5 から読み取れる傾向はそれだけではない。阿寒火砕流には、噴出量が 100 km³以上の Ak2 から、数 10 km³の Ak4, Ak7, Ak13, 続いて 10 km³前後の Ak1, Ak10, Ak17, そして 10 km³以下の Ak5, Ak16 まで、さまざまな規模の火砕流が存在する。各火砕流の噴出量は分布域に平均層厚を乗じて求めたものである (長谷川ほか, 2006; Hasegawa *et al.*, 2012)。これらについて、給源から同程度の距離における石質岩片の平均最大粒径を見ると、大規模なものほどその値が大きいくことが分かる。その結果、たとえば Fig. 5 に示したように、VEI=6 のおおよその境界線を図上に引くことができる。石質岩片の最大径と規模との間に見られるこの傾向は、福島県南部地域において約 1 Ma ごろに立て続けに噴出した白河火砕流群にも見出すことができる (吉田・高橋, 1991 の Fig. 11 : 西郷火砕流 (>38 km³) と天栄火砕流 (>10 km³) を比較すると、同じ地点における石質岩片最大粒径は、より大規模な前者でより大きい)。石質岩片の礫種、火砕流の運動エネルギー、流走地形などを詳しく解析する必要があるが、今後、国内外のいろいろな地域の火砕流を対象に石質岩片の平均最大粒径データを蓄積することで、上記の傾向を検討し、露出が限られる火砕流の噴出量概算などに応用できる可能性がある。しかし、石質岩片の平均最大粒径を測定する際は、露頭のどの範囲において、

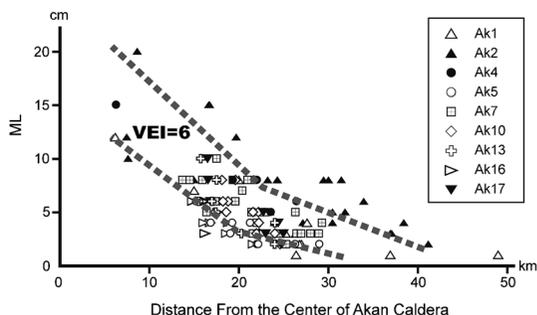


Fig. 5. Diagram showing the relationship between the distance from the center of Akan caldera and the average of 3 largest lithic fragments found in surface of the outcrop (ML) of Akan pyroclastic flow deposits (modified from the Fig. 18 of Hasegawa and Nakagawa, 2007). All data comes from outcrops in southeastern side of Akan caldera except for Ak1 and Ak2. VEI=6 eruptions are plotted between two dashed lines.

いくつかの粒子の平均を出したかによって値が変化するとと思われるので、露頭データベースの蓄積にあたっては、この点を統一するのが理想的である。

謝 辞

本論は、編集委員の伴雅雄氏および査読者である三浦大助氏、長橋良隆氏の有意義かつ建設的なコメントによって大きく改善されました。ここに深く感謝の意を表します。

引用文献

- Aramaki, S. (1984) Formation of Aira caldera southern Kyushu, ~22,000 years ago. *Jour. Geophys. Res.*, **89**, 8485–8501.
- 長谷川健・石井英一・中川光弘 (2006) 降下軽石層に含まれる石質岩片から類推する阿寒カルデラの形成過程, *月刊地球*, **28**, 283–289.
- 長谷川健・石井英一・中川光弘 (2008) 北海道東部阿寒火砕堆積物中に挟在する複数の広域火山灰層と北海道中央部に分布する大規模火砕流堆積物との対比, *地質雑*, **114**, 366–381.
- 長谷川健・中川光弘 (2007) 北海道東部、阿寒カルデラ周辺の前一中期更新世火砕堆積物の層序, *地質雑*, **113**, 53–72.
- 長谷川健・中川光弘・伊藤順一・山元孝広 (2011) 北海道東部、釧路地域に分布する第四系の年代：高分解能テフラ層序に基づく対比と編年, *地質雑*, **117**, 686–699.
- Hasegawa, T., Nakagawa, M., Kishimoto, H. (2012) The eruption history and silicic magma systems of caldera-forming eruptions in eastern Hokkaido, Japan. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, **107**, 39–43.
- 今西 茂 (1953) 北海道釧路国阿寒地方の地質について, *東北大学地質古生物教室邦文報告*, **44**, 47 p.

Kimura, G. (1986) Oblique subduction and collision: Forearc tectonics of the Kuril Arc. *Geology*, **14**, 404-407.
奥村晃史 (1991) 北海道地方の第四紀テフラ研究. 第四紀研究, **30**, 379-370.
Sparks, R. S. J., Self, S. and Walker, G.P.L. (1973) Products

of ignimbrite eruptions. *Geology*, **1**, 115-118.
吉田英人・高橋正樹 (1991) 白河火砕流東部地域の地質. 地質雑, **97**, 231-249.

(編集担当 伴 雅雄)