大規模カルデラ形成噴火と活動の後カルデラ火山 —北海道南西部，洞爺カルデラと有珠火山の地質概説および露頭紹介—

長谷川 健* 松本 亜希子**
東宮 昭彦*** 中川 光弘**

Large-scale Caldera-forming Eruption and Active Post-caldera Volcano: General Geology and Representative Outcrops of Toya Caldera and Usu Volcano, Southwestern Hokkaido, Japan

Takeshi HASEGAWA*, Akiko MATSUMOTO**,
Akihiko TOMIYA*** and Mitsuhiro NAKAGAWA**

[Received 30 June, 2017; Accepted 19 August, 2017]

Abstract

Toya caldera, eastern Hokkaido, was formed approximately 110 ka, and has two post-caldera volcanoes, Nakajima and Usu volcano. Caldera-forming eruptions ejected a large-scale Toya pyroclastic flow, and related co-ignimbrite ash which covered a wide area in northern Japan. Usu volcano is one of the most active volcanoes in Japan, and has had repeated magmatic eruptions during historical time since AD 1663. The latest major eruption occurred in AD 2000. General geology and representative outcrops of eruptive deposits from Toya caldera and its post-caldera volcanoes are introduced, on the basis of a training field course at the 6th IAVCEI Collapse Caldera Workshop held in September 2016.

Key words : Toya caldera, Usu volcano, historical eruptions, outcrops, field course

キーワード : 洞爺カルデラ, 有珠火山, 歴史時代噴火, 露頭, フィールドコース

I. はじめに

北海道南西部に位置する洞爺カルデラは，約 11 万年前に形成されたほぼ円形（直径約 10 km）のカルデラである（図 1）。現在のカルデラには，中央部に中島火山，南縁部に有珠火山，と二つの

後カルデラ火山を認めることができる（図 2）。有珠火山は，歴史時代において西暦 1663 年からマグマ噴火を頻発している国内有数の活火山（気象庁の定める活火山ランク A）で，最新の噴火は西暦 2000 年に発生した。本稿は，2016 年 9 月に行われた第 6 回国際陥没カルデラワークショップ

* 茨城大学理学部

** 北海道大学大学院理学院自然史科学専攻

*** 産業技術総合研究所地質調査総合センター

* Department of Earth Sciences, College of Science, Ibaraki University, Mito, 310-8512, Japan

** Department of Natural History Sciences, Graduate School of Science, Hokkaido University, Sapporo, 060-0810, Japan

*** Geological Survey of Japan, The National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Tsukuba, 305-8567, Japan

図 1 北海道南西部における第四紀火山分布図。黒三角は活火山。

Fig. 1 Index map of southwestern Hokkaido. Quaternary volcanoes are shown as triangles (black triangles are active volcanoes).

ブ (Collapse Caldera Workshop : IAVCEI の小委員会) のトレーニング・コース野外実習の対象とした洞爺カルデラおよび有珠火山の噴出物（とくに爆発的噴火による堆積物）について、地質と岩石を概説し、実際に観察した露頭の紹介・解説を付したものである。

II. 地質概説

北海道は千島弧と東北日本弧の会合部にあたり、後期中新世から開始した島弧火山活動が、活動域を移動させながら現在に至っている（例えば、広瀬・中川, 1999）。第四紀の火山活動域は、南西北海道、大雪-十勝および阿寒-知床の火山地域と、それらから離れた利尻火山であり（中川ほか, 1995）、南西北海道には、洞爺、支笏およびクッタラといったカルデラ火山群が存在する。ここでは約 11 万年前の洞爺カルデラ形成噴火を皮切りに、クッタラカルデラそして支笏カルデラで大規

図 2 南西方向上空より望む有珠火山。外輪山のなかに小有珠、大有珠および有珠新山が形成されている。手前には銀沼火口が認められる。

Fig. 2 Overview of Utsu volcano from SW direction. Ousu, Kousu and Utsu-shinzan domes with Ginnuma crater are recognized within the summit (somma).

模噴火が相次いで発生した。この 3 カルデラ形成噴火の噴出量により、南西北海道全域のマグマ噴出率は、約 11 万年前以降で急増する結果となっている。

1) 基盤地質および洞爺火砕流

洞爺カルデラの基盤地質は、中新世の火山岩類、鮮新世の安山岩類、そして前期～中期更新世の凝灰岩類および堆積岩類である（例えば、太田, 1956; 八幡・野呂田, 2003）。洞爺カルデラの南縁付近には、いずれも給源不明の壮瞥火砕流（流紋岩質）とそれを覆う滝ノ上火砕流堆積物（安山岩質）が露出し、それぞれ 1.59 ± 0.33 Ma と 0.90 ± 0.15 Ma の TL 年代が得られている（高島ほか, 1992）。

洞爺火砕流堆積物（以下、堆積物を省略）は、洞爺カルデラの形成に伴って噴出したデイサイト～流紋岩質の大規模火砕流である。多くの先行研究（例えば、太田, 1956; 近堂, 1963; 湊, 1966; 鈴木ほか, 1970; 横山ほか, 1973; Lee, 1996）において、顕著な時間間隙を介さない上下の火砕流ユニットに分けられており、これらはいずれも非溶結である。また両者の間には、降下火砕物（洞爺

降下火砕堆積物)の存在も認められている。これら噴出物の総体積は 150 km^3 以上と見積もられる(町田ほか, 1987)。上部ユニットがより大規模で、洞爺カルデラ周辺に広大な火砕流台地を形成する。その分布域から、南方は太平洋へ流入し、北西方は当時すでに存在していたニセコ火山の南麓と北麓に分岐して流れ、日本海に到達したと考えられる。上部ユニットが粗粒な軽石礫を多く含むのに対し、下部ユニットはおもに火山豆石を含む破砕度の高い火山灰からなることから、本噴火は、マグマ水蒸気噴火にはじまり、次第に本格的なマグマ噴火に移行して、最盛期を迎えたと考えられる(Lee, 1996)。つまり、下部の火砕流ユニットはマグマ水蒸気噴火により発生したと解釈される。また、上部ユニットの基底部に認められる石質岩片濃集層(Lag breccia: Walker, 1985)の構成物が多種にわたることから、最盛期は複合火口による火砕流噴出～カルデラ陥没が生じたと考えられる(Lee, 1996)。火砕流に伴って発生した co-ignimbrite ash (洞爺火山灰: Toya) は、北海道南部から遠方は東北地方中部まで到達が確認されており、約 11 万年前の時間面を示す有用な広域テフラとなっている(例えば、町田・新井, 2003)。奥村(1991)は、北海道東部において、115–120 ka とされる屈斜路軽石流堆積物 IV (勝井・佐藤, 1963; Hasegawa *et al.*, 2016) のすぐ上位を Toya が覆う関係を見いだした。最近では、Toya は、下北半島沖の深海底コア(C9001)でも発見されており、年代モデルをもとに 106 ka (MIS 5d) と推定されている(Matsu'ura *et al.*, 2014)。

2) 後カルデラ火山：中島火山と有珠火山

中島火山は、洞爺カルデラの形成後 6 万年以上の休止期を経て、カルデラ盆中央部に成長した後カルデラ火山で、おもに普通角閃石を含む安山岩質～デイサイト質の溶岩ドーム群(潜在ドーム含む)およびタフコーンからなる(Goto *et al.*, 2015)。ドーム群の形成に伴い、大小規模(最大で $\text{VEI} = 4$)の爆発的噴火も発生しており、最初の爆発的噴火では、長流川降下軽石(約 5 万年前)をカルデラ東方に堆積させた(春日井

ほか, 1990; 町田・新井, 2003; Miyabuchi *et al.*, 2014)。中島火山の活動終了後、カルデラ南縁で有珠火山の活動がはじまった。

有珠火山は、主要部をなす成層火山体(外輪山)と多数の溶岩ドーム(潜在ドーム含む)および側火山からなる(図 3)。成層火山(外輪山)は、度重なる玄武岩～玄武岩質安山岩の溶岩およびスコリアの噴出によって形成された(例えば、Oba, 1966; Goto *et al.*, 2013)。この間、北東麓では、側火山(スコリア丘)であるドンコロ山の形成も伴った。有珠火山の南麓一帯には善光寺岩屑なだれと呼ばれる岩屑なだれ堆積物および流れ山地形が認められる。その堆積年代は 3～2 万年前や 8～7 千年前など諸説があるが(例えば、曾屋ほか, 2007; Miyabuchi *et al.*, 2014; 藤根ほか, 2016)、いずれにせよ山体形成史において山頂部南斜面の大規模崩壊イベントが発生したことが推定される。その後、しばらく顕著な噴火活動はなく、有珠火山は長い休止期を経たが、西暦 1663 年に噴火活動を再開した。それ以降、有珠火山の歴史時代のマグマは、それまでの玄武岩質と異なる流紋岩質であり、噴火様式も大きく変化する。

3) 有珠火山歴史時代噴火

3-1) 噴火様式・噴火推移

主要な歴史時代噴火は、西暦 1663, 1769, 1822, 1853, 1910, 1943–45, 1977–78 年そして 2000 年に発生しており、これらはいずれもマグマの噴出を伴う(表 1)。また、1769 年噴火の前に、比較的小規模なマグマ噴火(pre-1769 噴火)も認識されている(中川ほか, 2005)。最初の 1663 年噴火は、歴史時代で最大規模であり、総噴出量は 2.5 km^3 と見積もられている(曾屋ほか, 2007)。古記録の解読から、同年 8 月 13 日(旧暦七月十一日)に火山性地震が発生し、8 月 16 日に噴火が開始、翌日 17 日に噴火はクライマックスに達し、巨大な噴煙柱が形成されたことが読みとれる(中村ほか, 2005)。この時のプリニー式噴火堆積物は、有珠 b 降下軽石層(Us-b)(横山ほか, 1973)と呼ばれ、給源から東方～南東方に広く伸びた分布域を示し、日高地方にまで到達が確認されている(例えば、中村ほか, 2005)。

Fig. 3 Geological map of the area around Usu volcano after Soya *et al.* (2007). Solid blue and dashed blue lines enclose lava domes and crypt domes recorded in historical time. Black lines show the region with craters at the AD2000 eruption.

表 1 有珠火山歴史時代噴火の概要 (中川ほか, 2005 および曾屋ほか, 2007 をもとに作成).

Table 1 Summary of historical eruptive activity of Usu volcano, modified from Nakagawa *et al.* (2005) and Soya *et al.* (2007).

Eruption	Era	Dormancy (Years)	Tephra (volume; km ³ *)	Formation of dome	Vent location
2000	Heisei 12		ash and pumice fall (0.001)	cryptodome	NW flank
		-22-			
1977-1978	Showa 52-53		pumice and ash fall (0.0905)	Usu-shinzan cryptodome**	summit
		-32-			
1943-1945	Showa 18-20		ash fall (phreatic?) (0.004)	Showa-shinzan lava dome (spine)	E flank
		-33-			
1910	Meiji 43		ash fall (phreatic?) (0.004)	Meiji-shinzan cryptodome	N flank
		-57-			
1853	Kaei 6		pyroclastic flow (0.01) pumice and ash fall (0.35)	Ousu lava dome	summit
		-31-			
1822	Bunsei 5		pyroclastic flow (0.09) pumice and ash fall (0.28)	Ogariyama lava dome (?)	summit
		-53-			
1769	Meiwa 6		pyroclastic flow (0.03) pumice and ash fall (0.11)	Kousu lava dome (?)	summit
		-70?-			
pre-1769	?		pyroclastic surge (nd) pumice and ash fall (nd)	?	summit
		-30?-			
1663	Kanbun 3		base surge (0.6) pumice and ash fall (1.85) pyroclastic surge and pfa (nd)	?	summit

nd, no data

* Data are from Katsui *et al.* (1981, 1988) and Kadomura *et al.* (1988).

** The Growth of dome had continued until 1984 (Kadomura *et al.* 1988).

その後に発生したベース・サージによる堆積物は、山麓部で1～3 m、山腹部では数十 m の厚さに達する。この噴火で山頂部に直径2 km 弱の大型の火口ができた可能性がある。本噴火による一連の火砕堆積物は、後述する関内の露頭で良好に露出し、よく観察することができる。

以降の噴火は、1663 年噴火でできた山頂火口内あるいは山腹火口から発生した。これらの噴火は数十年程度の休止期を挟んで、西暦2000 年まで8 回繰り返された。噴火の規模はいずれも1663 年噴火の1/10 以下であるが、火砕流・火砕サージまたは降下軽石の噴出を伴い、ドームを形成して収束するという噴火様式でおおむね共通する。1769, 1822, 1853 年の噴火では山頂火口から噴火が発生し、それぞれの噴火で、同火口内に

小有珠溶岩ドーム、オガリ山潜在ドームおよび大有珠溶岩ドームを形成したと考えられている。1910 年以降の噴火は、山麓（とくに北麓～北東麓）で発生する場合が多く、火砕噴火の後に明治新山、昭和新山、有珠新山などのドームを形成した。西暦2000 年の噴火は、北西山麓の西山および金毘羅山から発生した。多数の火口群を形成し、火砕サージやラハールも発生した（例えば、宇井ほか, 2002）。以上の歴史時代噴火は、ほとんど例外なく火山性地震や地殻変動などの前兆現象が明瞭であり、最新の2000 年噴火では犠牲者を一人も出すことなく住民が避難することができた。有珠火山2000 年噴火については日本火山学会発行の学術雑誌『火山』の特集号（第47 巻第3～5 号）をはじめ多数の詳細な報告がある。

3-2) 岩石学的特徴とマグマ系モデル

有珠火山の歴史時代噴火のマグマは、低カリウム系列の流紋岩およびデイサイトである。斑晶鉱物組み合わせは斜長石・直方(斜方)輝石・鉄チタン酸化物であり、噴火年代によってごく少量の単斜輝石・角閃石・石英を含むことがある(Matsumoto and Nakagawa, 2010)。斜長石・直方(斜方)輝石斑晶コア組成において、1663年噴出物はバイモーダルな組成分布を示すのに対し、pre-1769年噴火以降の噴出物は中間組成の斑晶が認められ、全体として幅広い組成分布を示す(Tomiya and Takahashi, 1995, 2005)。一方、全岩化学組成では、各噴火において、全岩SiO₂量の組成幅が2 wt.%以下と狭く、歴史時代を通してSiO₂量が減少する傾向にある(図4: 中川ほか, 2005)。

これら噴出物の岩石学的特徴から、1663年に流紋岩質マグマ溜りに苦鉄質マグマが混合することで噴火し、それ以降の噴火ではその混合マグマが主体となって噴出しているというマグマ供給系モデルが提示されている(Tomiya and Takahashi, 1995, 2005; Tomiya *et al.*, 2010)。また、1663年噴火については、後述の関内の露頭にお

図4 有珠歴史時代噴火における本質物質の全岩化学組成SiO₂量の時間変化(中川ほか, 2005のFig. 11)。

Fig. 4 Temporal variation of bulk SiO₂ contents of Usu historical juvenile materials (Nakagawa *et al.*, 2005).

いて、噴火層序に基づいた詳細な岩石学的検討が行われており、1663年噴出物中に中間組成の斑晶鉱物が見いだされ、これが初期の噴出物により多く含まれることから、1663年噴火は混合マグマがマグマ溜り上部に存在する成層マグマ溜りからの噴火であった可能性が指摘された(松本ほか, 2005)。また、Matsumoto and Nakagawa (2010)では、岩石学的・地球化学的特徴より、歴史時代噴出物が17世紀・18-19世紀・20世紀の3つのグループに区分でき、それぞれで異なる珪長質マグマが活動したことを指摘している。

III. 露頭の紹介と説明

ここでは、上述した噴火堆積物や火口を実際に観察できる露頭について紹介・解説を行う(図5)。

① STOP 1. 洞爺火砕流：上部・下部ユニットの遠望—北の湘南橋(北緯42度30分28秒，東経140度51分47秒)

洞爺カルデラから南方約10 km地点で、この橋から眺望する長流川の対岸の崖には、洞爺火砕流が形成する台地の断面が露出する(図6)。比高約30 mの崖には、層厚数mでマントルベディングする洞爺降下火砕堆積物が認められ、これを介して上位には上部ユニットが、下位には細粒火山灰からなる下位ユニットが堆積する様子が遠望できる。いずれも非溶結の岩相を示す。上部ユニットは基底部に石質岩片の濃集層も認められる。

② STOP 2. 洞爺火砕流：上部ユニットの堆積構造と構成物—伊達市上館山町の土取場(北緯42度29分55秒，東経140度51分52秒)

カルデラ南方11 km地点の土取場である。STOP 1で遠望した火砕流台地の上部にあたり、比高約15 mにおよぶ洞爺火砕流が観察できる。塊状、基質支持で、円磨された軽石を多く含み、火砕流堆積物に典型的に見られる吹き抜けパイプ、炭化木が認められる。石質岩片濃集層が少なくとも2層準で認められ、上部ユニットは複数のflow unitからなると考えられる(図7A)。含まれる軽石には鉱物組み合わせがやや異なる複数

図 5 観察地点の位置図.

Fig. 5 Index map showing stop points.

図 6 STOP 1 の露頭写真. 露頭の解説は本文参照 (以下同様).

Fig. 6 Photograph of STOP 1. See text for detail.

のタイプがあり、まれに縞状軽石や灰色軽石も認められる (図 7B)。軽石に含まれる主要な斑晶鉱物は、石英、直方 (斜方) 輝石、斜長石であるが、タイプにより、普通角閃石、単斜輝石あるいはカミングトン閃石を含む場合もある。また、土取場に降る途中の切り割り露頭には、洞爺火砕

流より上位の複数のテフラ層が堆積している。ここでは、有珠火山 1663 年噴火の堆積物は薄く、Us-b は層厚 5 cm 程度の細粒火山灰層である。

③ STOP 3. 有珠火山 1663 年噴火の堆積物—
にしきない
西関内 (北緯 42 度 31 分 22 秒, 東経 140 度 52 分 52 秒)

黒色土壌 (クロボク) の上位に有珠火山 1663 年噴火の一連の噴火堆積物が確認できる。その層厚は約 2 m である (図 8)。クロボク層のなかには、白頭山 10 世紀噴火の火山灰 (B-Tm) と北海道駒ヶ岳 1640 年噴火による降下火山灰 (Ko-d) が発見でき、有効な時間指標となる。1663 年噴火堆積物は、下位から、火山豆石を含み細粒な降下火山灰やベース・サージからなる Unit-A, 粗粒な降下軽石である Unit-B (Us-b), 平行層理をみせる降下火山灰層である Unit-C, 石質岩片に富む Unit-D, 細粒火山灰からなる Unit-E, そして降下火砕物とベース・サージ堆積物の互層からなる Unit-F および G である (図 9)。Unit-B の層厚は 35 cm 程度で、明瞭な上方粗粒化が見られ、上部ほど灰色軽石に富む傾向が顕著であ

図 7 STOP 2 の露頭写真. A : 洞爺火砕流上部ユニット, 少なくとも 2 か所のレベルに石質岩片濃集層が認められる. B : 縞状軽石 (長径は約 20 cm).

Fig. 7 Photographs of STOP2. A: Lithic concentrations can be recognized in the upper unit of Toya pyroclastic flow deposit. B: Close up of banded pumice (20 cm in diameter).

図 8 STOP 3 の露頭写真. A : 全体写真. B : Unit-F の基底部に見られる火山弾とサグ構造. C : Unit-G の火山豆石. 写真縦幅は約 20 cm.

Fig. 8 Photographs of STOP 3. A: Overview of 1663 eruption deposits. B: Volcanic bomb and its impact sag structure at the base of Unit-F C: Accretionary lapillis in the Unit-G (Height of this photo is 20 cm).

る。本露頭は Us-b のほぼ分布主軸上にあるのに対し、STOP 2 は主軸から外れているため、両地点は南北に 3 km ほどしか離れていないが層厚・

粒径などの岩相変化が著しい。Us-b に限らず 1663 年の火砕噴火層序を連続的かつ間近に観察できるので、本露頭は堆積物の構造や粒度・構成

図 9 STOP 3 の柱状図および各層準の構成鉱物量比。中村ほか (2005) の図 4。丸が付された試料は軽石のみを分析した試料で、それ以外は軽石と基質部の混合あるいは軽石を含まない試料。

Fig. 9 Columnar section with components of minerals at the STOP 3 outcrop after Nakamura *et al.* (2005). Circled sample numbers indicate pumice clast samples, and others are samples of matrix or mixture of matrix and pumices.

物量比の変化から噴火推移を考察するのに適している。本噴火で有珠山頂火口も形成されたと考えられ、その形成プロセスと噴火堆積物との対応関係も議論できる。

④ STOP 4. 有珠火山の山頂火口と昭和新山
昭和新山ロープウェイの有珠山頂駅から、有珠

山頂火口の火口原やそれを埋積するように成長したドーム群などの地形を眺望できる。小有珠溶岩ドームと大有珠溶岩ドームの間に成長した有珠新山は 1977～1978 年の噴火で 180 m 上昇した (図 10)。直径約 400 m の銀沼火口は、1978 年の水蒸気噴火・マグマ水蒸気噴火で形成された複

図 10 有珠火山山頂部で見られる銀沼火口と有珠新山。いずれも 1977-1978 年噴火で形成された (1996 年 8 月 1 日東宮撮影)。

Fig. 10 Ginnuma Crater and Usu-shinzan cryptodome at the summit of Usu volcano. The crater and dome were formed in 1977-1978 eruptions (Taken by Tomiya, A., 1st Aug, 1996).

合火口である (Yoshida and Nishimura, 2004)。

昭和新山周辺部は、1943 年に噴火がはじまる前は畑で平坦であったが、1945 年までの間に最大で約 250 m 隆起し、ドームが形成された (Mimatsu, 1995)。昭和新山に目を向けると、一段低い屋根山部 (潜在ドーム) と、そこを突き抜けて上昇した中心部のマグマ栓部 (プラグ) が明瞭に認識できる (図 11)。屋根山表面には当時の表層を構成していた地層 (成層火山噴出物や堆積岩) が残され、マグマ栓部は天然の煉瓦 (マグマの熱で焼かれた泥岩) に覆われる。この成長過程は、当時壮瞥町の郵便局長であった三松正夫によって詳細に記録され、三松ダイアグラムとして世に名を残している。

⑤ STOP 5. 有珠火山 2000 年噴火：金比羅山および西山山麓散策路

金比羅山および西山山麓は、2000 年噴火で活動した 2 つの主要な火口域にあたる。火口群および被災地域を見学できるように当時の建造物等が保存され、散策路も作られている。西山山麓火口域は、噴火開始 (2000 年 3 月 31 日) から活動し、多数の火口を形成した。噴火に伴って大きな地殻変動も起こり、最終的には最大で 70 m 隆起して、新しい潜在ドームの成長と、せき止めによる池が形成された。隆起部では地溝状の正断層が無数に形成された。金比羅山火口周辺では、4 月 1 日に活動が開始し、約 30 の火口から噴火・

図 11 1943-1945 年噴火で形成された昭和新山。STOP 4 (西方) から眺望 (吉本充宏氏撮影)。

Fig. 11 Overview of Showa-shinzan formed during the 1943-1945 eruptions. Photo taken from STOP 4 (western direction) (Taken by Yoshimoto, M.).

図 12 有珠 2000 年噴火で活動した西山火口群周辺の写真。

Fig. 12 Damaged area around Nishiyama craters following the Usu 2000 eruption.

爆発が発生した。比較的大きな火口は K-A, K-B と称され、K-B 火口の活動は噴火の最後まで続いた。4 月 9 ~ 10 日にかけては熱泥流が繰り返し発生し、国道や建造物を破壊した。これらの堆積物や火山弾および被害を受けた建物を観察できる (図 12)。

謝 辞

本特集号世話人である産総研地質調査センターの下司信夫氏には本稿執筆の機会をいただいた。査読者である金子克哉氏と匿名査読者、および本誌編集委員会の助言により本稿が改善された。ここに記して御礼申し上げます。

文 献

- 藤根 久・遠藤邦彦・鈴木正章・吉本充宏・鈴木 茂・中村賢太郎・伊藤 茂・山形秀樹・Lomtadze Zaur・横田彰宏・千葉達朗・小杉 康 (2016): 有珠山善光寺岩屑なだれの発生年代の再検討—有珠南麓の過去2万年間の環境変遷との関連で—。第四紀研究, **55**, 253-270. [Fujine, H., Endo, K., Suzuki, M., Yoshimoto, M., Suzuki, S., Nakamura, K., Itoh, S., Yamagata, H., Lomtadze, Z., Yokota, A., Chiba, T. and Kosugi, Y. (2016): Reexamination of the chronological position of Zenkoji debris avalanche of Usu volcano in south Hokkaido, Japan: In relation to paleoenvironmental changes during the past 20ka on the Usu coast. *Quaternary Research (Daiyonki Kenkyu)*, **55**, 253-270. (in Japanese with English abstract)]
- Goto, Y., Sekiguchi, Y., Takahashi, S., Ito, H. and Danhara, T. (2013): The 18-19ka andesitic explosive eruption at Usu volcano, Hokkaido, Japan. *Bulletin of the Volcanological Society of Japan*, **58**, 529-541.
- Goto, Y., Matsuzuka, S., Kameyama, S. and Danhara, T. (2015): Geology and evolution of the Nakajima Island inferred from aerial laser mapping and geological field surveys. *Bulletin of the Volcanological Society of Japan*, **60**, 17-33.
- Hasegawa, T., Matsumoto, A. and Nakagawa, M. (2016): Evolution of the 120 ka caldera-forming eruption of Kutcharo volcano, eastern Hokkaido, Japan: Geologic and petrologic evidence for multiple vent systems and rapid generation of pyroclastic flow. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **321**, 58-72.
- 広瀬 亘・中川光弘 (1999): 北海道中～東部の新第三紀火山活動: 火山学データおよび全岩化学組成からみた島弧火山活動の成立と変遷。地質学雑誌, **105**, 247-265. [Hirose, W. and Nakagawa, M. (1999): Neogene volcanism in Central-Eastern Hokkaido: Beginning and evolution of arc volcanism inferred from volcanological parameters and geochemistry. *Journal of the Geological Society of Japan*, **105**, 247-265. (in Japanese with English abstract)]
- 門村 浩・岡田 弘・新谷 融 (1988): 有珠山—その変動と災害—。北海道大学図書刊行会, 257p. [Kado-mura, H., Okada, H. and Araya, W. (1988): 1977-82 Volcanism and Environmental Hazards of Usu Volcano. Hokkaido University Press, 257p. (in Japanese)]
- 春日井昭・前田寿嗣・岡村 聡 (1990): クッタラ・支笏両火山のテフラの層序と編年 (2)。北海道教育大学紀要2B, **40**, 111-126. [Kasugai, A., Maeda, T. and Okamura, S. (1990): Tephrostratigraphy and chronology of tephra erupted from Kuttara and Shikotsu volcanoes, southwestern Hokkaido, Japan (2). *Journal of Hokkaido University of Education, Section 2B*, **40**, 111-126. (in Japanese)]
- 勝井義雄・佐藤博之 (1963): 5万分の1地質図幅「藻琴山」および同説明書。北海道開発庁, 42p. [Katsui, Y. and Satoh, H. (1963): *Explanatory Text of the Geological Map of Japan, Scale 1: 50,000, "Mokoto-yama"*. Hokkaido Development Agency, 42p. (in Japanese with English abstract)]
- Katsui, Y., Yokoyama, I. and Murozumi, M. (1981): Usu volcano. in *Field Excursion Guide to Usu and Tarumai Volcanoes and Noboribetsu Spa* edited by Katsui, Y., Volcanological Society of Japan, 1-37.
- 勝井義雄・河内晋平・新井田清信 (1988): 有珠山の噴火予測。災害予測および防災の問題。科学研究費補助金 (重点領域2) 研究成果報告書 (昭和62年度) (研究課題番号62601501) (西南北海道における火山災害予測と防災に関する基礎的研究)。22p. [Katsui, Y., Kouchi, S. and Niida, K. (1988): Problems of the predictions of eruption and disaster, and the mitigation of disaster on Usu volcano. *Report of the Grant-Aid for Scientific Research (no. 62601501) by Ministry of Education, Culture, Sports Science and Technology in Japan*, 22p. (in Japanese)]
- 近堂祐弘 (1963): 北海道有珠火山周辺における第四紀火山砕屑物の粘土鉱物学的研究。地質学雑誌, **69**, 362-377. [Kondo, Y. (1963): Clay mineralogical study on Quaternary pyroclastic deposits of the Usu volcanic district, Hokkaido. *Journal of the Geological Society of Japan*, **69**, 362-377. (in Japanese with English abstract)]
- Lee, I.W. (1996): Component analysis of lag breccia in the youngest Toya pyroclastic flow deposit: Southwest Hokkaido, Japan. *Bulletin of the Volcanological Society of Japan*, **41**, 31-34.
- 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. [Machida, H. and Arai, F. (2003): *Atlas of Tephra in and around Japan*. University of Tokyo Press, 336p. (in Japanese)]
- 町田 洋・新井房夫・宮内崇裕・奥村晃史 (1987): 北日本を広くおおむね洞爺火山灰。第四紀研究, **26**, 129-145. [Arai, F., Machida, Y., Miyauchi, T. and Okumura, K. (1987): Toya ash—A widespread late quaternary time-marker in northern Japan. *Quaternary Research (Daiyonki Kenkyu)*, **26**, 129-145. (in Japanese with English abstract)]
- Matsumoto, A. and Nakagawa, M. (2010): Formation and evolution of silicic magma plumbing system: Petrology of the volcanic rocks of Usu volcano, Hokkaido, Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **196**, 185-207.
- 松本亜希子・中川光弘・中村有吾 (2005): 有珠火山1663年噴火のマグマ供給系の再検討。火山, **50**, 455-473. [Matsumoto, A., Nakagawa, M. and Nakamura, Y. (2005): Re-examination of the magma plumbing system beneath Usu volcano, Hokkaido, Japan, during the 1663 eruption. *Bulletin of the Volcanological Society of Japan*, **50**, 455-473. (in Japanese with English abstract)]

- Matsu'ura, T., Kimura, H., Komatsubara, J., Goto, N., Yanagida, M., Ichikawa, K. and Furusawa, A. (2014): Late Quaternary uplift rate inferred from marine terraces, Shimokita Peninsula, northeastern Japan: A preliminary investigation of the buried shoreline angle. *Geomorphology*, **209**, 1-17.
- Mimatsu, M. (1995): *Showa-Shinzan Diary: Expanded Reprint: Complete Records of Observation of the Process of the Birth of Showa-Shinzan*. Executive Committee of the 50th Anniversary of Mt. Showa-Shinzan, Sobetsu Town office, Hokkaido, 177p.
- 湊 正雄 (1966): 洞爺軽石流の噴出年代, 日本の第四紀層の ¹⁴C 年代. 地球科学, **82**, 42-43. [Minato, M. (1966): Age of the Toya pumice flow, ¹⁴C ages of Quaternary volcanoes in Japan. *Chikyū Kagaku*, **82**, 42-43. (in Japanese with English abstract)]
- Miyabuchi, Y., Okuno, M., Torii, M., Yoshimoto, M. and Kobayashi, T. (2014): Tephrostratigraphy and eruptive history of post-caldera stage of Toya volcano, Hokkaido, northern Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **281**, 34-52.
- 中川光弘・丸山裕則・船山 淳 (1995): 北海道第四紀火山の分布と主成分化学組成の広域変化. 火山, **40**, 13-31. [Nakagawa, M., Maruyama, H. and Funayama, A. (1995): Distribution and spatial variation in major element chemistry of Quaternary volcanoes in Hokkaido, Japan. *Bulletin of the Volcanological Society of Japan*, **40**, 13-31. (in Japanese with English abstract)]
- 中川光弘・松本亜希子・田近 淳・広瀬 亘・大津 直 (2005): 有珠火山の噴火史の再検討: 寛文噴火 (1663 年) と明和噴火 (1769 年) に挟まれた 17 世紀末の先明和噴火の発見. 火山, **50**, 39-52. [Nakagawa, M., Matsumoto, A., Tajika, J., Hirose, W. and Ohtsu, T. (2005): Re-investigation of eruption history of Usu volcano, Hokkaido, Japan: Finding of pre-Meiwa eruption (late 17th century) between Kanbun (1663) and Meiwa (1769) eruptions. *Bulletin of the Volcanological Society of Japan*, **50**, 39-52. (in Japanese with English abstract)]
- 中村有吾・松本亜希子・中川光弘 (2005): 噴出物から推定した有珠山 1663 年噴火の推移. 地学雑誌, **114**, 549-560. [Nakamura, Y., Matsumoto, A. and Nakagawa, M. (2005): Tephrochronological study of the AD1663 eruption of Usu volcano, western Hokkaido, northern Japan. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **114**, 549-560. (in Japanese with English abstract)]
- Oba, Y. (1966): Geology and petrology of the Usu volcano, Hokkaido Japan. *Journal of the Faculty of Science, Hokkaido University, Series IV*, **13**, 185-236.
- 太田良平 (1956): 5 万分の 1 地質図幅「虻田」および同説明書. 地質調査所, 76p. [Ohta, R. (1956): *Explanatory Text of the Geological Map of Japan, Scale 1: 50,000, "Abuta"*. Geological Survey of Japan, 76p. (in Japanese with English abstract)]
- 奥村晃史 (1991): 北海道の第四紀テフラ研究. 第四紀研究, **30**, 379-390. [Okumura, K. (1991): Quaternary tephra studies in the Hokkaido district, northern Japan. *Quaternary Research (Daiyonki Kenkyū)*, **30**, 379-390. (in Japanese with English abstract)]
- 曾屋龍典・勝井義雄・新井田清信・堺 幾久子・東宮昭彦 (2007): 有珠火山地質図 (第 2 版) 1:25,000. 地質調査総合センター. [Soya, T., Katsui, Y., Niida, K., Sakai, K. and Tomiya, A. (2007): *Geological Map of Usu Volcano (Version 2) Scale 1:25,000*. Geological Survey of Japan. (in Japanese)]
- 鈴木 守・松井公平・東 三郎・大場与志男 (1970): 伊達町の地質. 伊達町, 69p. [Suzuki, M., Matsui K., Higashi, S. and Oba, Y. (1970): *Geology of Date Machi (Date Machi No Chishitsu)*. Date Machi, 69p. (in Japanese)*]
- 高島 勲・山崎哲良・中田英二・湯川公靖 (1992): 北海道洞爺湖周辺の第四紀火砕岩および火山岩の TL 年代. 岩鉱, **87**, 197-206. [Takashima, I., Yamazaki, T., Nakata, E. and Yukawa, K. (1992): TL age of the Quaternary volcanic rocks and pyroclastic flow deposits around the Lake Toya, Hokkaido, Japan. *Journal of Mineralogy, Petrology and Economic Geology*, **87**, 197-206. (in Japanese with English abstract)]
- Tomiya, A. and Takahashi, E. (1995): Reconstruction of an evolving magma chamber beneath Usu volcano since the 1663 eruption. *Journal of Petrology*, **36**, 617-636.
- Tomiya, A. and Takahashi, E. (2005): Evolution of the magma chamber beneath Usu volcano since 1663: A natural laboratory for observing changing phenocryst compositions and textures. *Journal of Petrology*, **46**, 2395-2426.
- Tomiya, A., Takahashi, E., Furukawa, N. and Suzuki, T. (2010): Depth and evolution of a silicic magma chamber: Melting experiments on a low-K rhyolite from Usu volcano, Japan. *Journal of Petrology*, **51**, 1333-1354.
- 宇井忠英・中川光弘・稲葉千秋・吉本充弘・総合観測班地質グループ (2002): 有珠山 2000 年噴火の推移. 火山, **47**, 105-117. [Ui, T., Nakagawa, M., Inaba, C., Yoshimoto, M. and Geological Party, Joint Research Group for the Usu 2000 Eruption (2002): Sequence of the 2000 eruption, Usu volcano. *Bulletin of the Volcanological Society of Japan*, **47**, 105-117. (in Japanese with English abstract)]
- 八幡正弘・野呂田晋 (2003): 西北海道, 虻田地域における更新世熱水活動. 北海道立地質研究所報告, **74**, 1-14. [Yahata, M. and Norota, S. (2003): Pleistocene hydrothermal activity in Abuta area, West Hokkaido, Japan. *Report of the Geological Survey of Hokkaido*, **74**, 1-14. (in Japanese with English abstract)]
- 横山 泉・勝井義雄・大場与志男・江原幸夫 (1973): 有珠山 火山地質・噴火史・活動の現況及び防災対策. 北海道防災会議, 254p. [Yokoyama, I., Katsui, Y.,

- Ohba, Y. and Ehara, Y. (1973): *Volcanic Geology, Eruption History, Volcanic Activity and Disaster Prevention, "Usuzan" (Usuzan Kazan Chishitsu Fun-kashi Katsudo No Genkyo Oyobi Bosai Taisaku)*. Hokkaido Disaster Management Council, 254p. (in Japanese)*]
- Yoshida, M. and Nishimura, Y. (2004): Temporal variation of eruption rate during the 1978 activity of Usu volcano, northern Japan, revealed by the eruptive deposits and volcanic tremor. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **135**, 285–298.
- Walker, G.P.L. (1985): Origin of coarse lithic breccias near ignimbrite source vents. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **25**, 157–171.
- * Title etc. translated by T.H.