

北海道東部太平洋沿岸域における完新世の降下火碎堆積物

古川 竜太*・七山 太*

(2005年10月11日受付, 2006年9月26日受理)

Holocene Pyroclastic Fall Deposits along the Pacific Coastal Region of Eastern Hokkaido

Ryuta FURUKAWA*, Futoshi NANAYAMA*

Volcanic eruptions and tsunami events in Hokkaido are mainly attributed by the subducting Pacific plate. Marsh and lagoon deposits along the Pacific coast of eastern Hokkaido contain depositional records of the Holocene large-scale tsunamis and explosive volcanic eruptions. Coring and sampling using the Geoslicer technique at 182 sampling sites from 10 areas revealed thickness of widespread pyroclastic fall deposits and extent of the area covered by tsunami deposits. The pyroclastic fall deposits constitute mostly fine volcanic ash less than 3 centimeter thick and are well-preserved indicating calm depositional environments. Source volcanoes and ages of the pyroclastic fall deposits are identified by the phenocryst assemblage, shape and major element composition of glass shards, and stratigraphy. The pyroclastic fall deposits of Tarumai-a (Ta-a), Tarumai-c (Ta-c) and Hokkaido-Komagatake-c2 (Ko-c2) from southwestern Hokkaido, and Baitoushan-Tomakomai (B-Tm) from northern Korea/China are abundant throughout the study area. The Usu-b (Us-b) and Tarumai-b (Ta-b) pyroclastic fall deposits from southwestern Hokkaido can only be found in the southern part of the study area. Most of the pyroclastic fall deposits have more extensive distributions suggesting underestimated eruptive volumes by previous researches.

Key words: pyroclastic fall deposit, Hokkaido, Holocene, Tarumai volcano, Hokkaido-Komagatake volcano

1. はじめに

北海道東部の太平洋沿岸地域に隣接する千島海溝では太平洋プレートが年間8–9 cmの速度で沈み込んでいる(DeMets, 1992)。プレートの沈み込みとともに大規模な地震は津波を発生させ、その津波堆積物は北海道東部の太平洋沿岸域の海跡湖や低湿地の完新統に記録されていることが判明している(Nanayama *et al.*, 2003; 西村・他, 2000など)。一方、北海道の第四紀火山活動は太平洋プレートの沈み込みに密接に関連しており(中川・他, 1995など)、完新世の爆発的噴火による降下火碎堆積物は北海道東部地域に広く分布する(北海道火山灰命名委員会, 1972; 山田, 1958など)。よって北海道東部太平洋沿岸域は、プレートの沈み込みに起因する大規模な地震活動と火山活動の双方を記録する可能性のある貴重なフィールドといえる。

このうち鍵層となる降下火碎堆積物の分布を調べるこ

とは、地質学的により詳細な等時間面を提供するだけでなく、降下火碎物をもたらす火山噴煙の拡散・堆積様式を明らかにする上でも重要である。北海道における降下火碎堆積物の研究は、主に農地開発のための土壤調査としてはじまったため(佐々木・他, 1971; 浦上・他, 1933; 山田, 1958など)、調査対象は内陸の段丘や丘陵地など、海岸から離れた地域が主体であった。また北海道東部は寒冷で積雪が少ないため、内陸部では土壤の凍結融解などによるクリオターベーションが活発である。このため薄い降下火山灰層や微細な堆積構造は保存されにくい傾向があり、火山噴出物の分布が過小評価されている可能性がある。一方、海岸沿いの低湿地では、泥炭層中に多くの砂礫層が挟在すること、湿地帯での踏査に困難を伴うことなどから、これまで火山噴出物の分布に関する十分な調査がおこなわれてきたとは言いがたい。遠藤・他(1989)、徳井(1989)は北海道東部に分布する完新世の

* 〒305-8567 茨城県つくば市東1-1-1-7
独立行政法人産業技術総合研究所地質調査総合センター
Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 1-1-1-7,

Higashi, Tsukuba 305-8567, Japan.

Corresponding author: Ryuta Furukawa
e-mail: furukawa-r@aist.go.jp

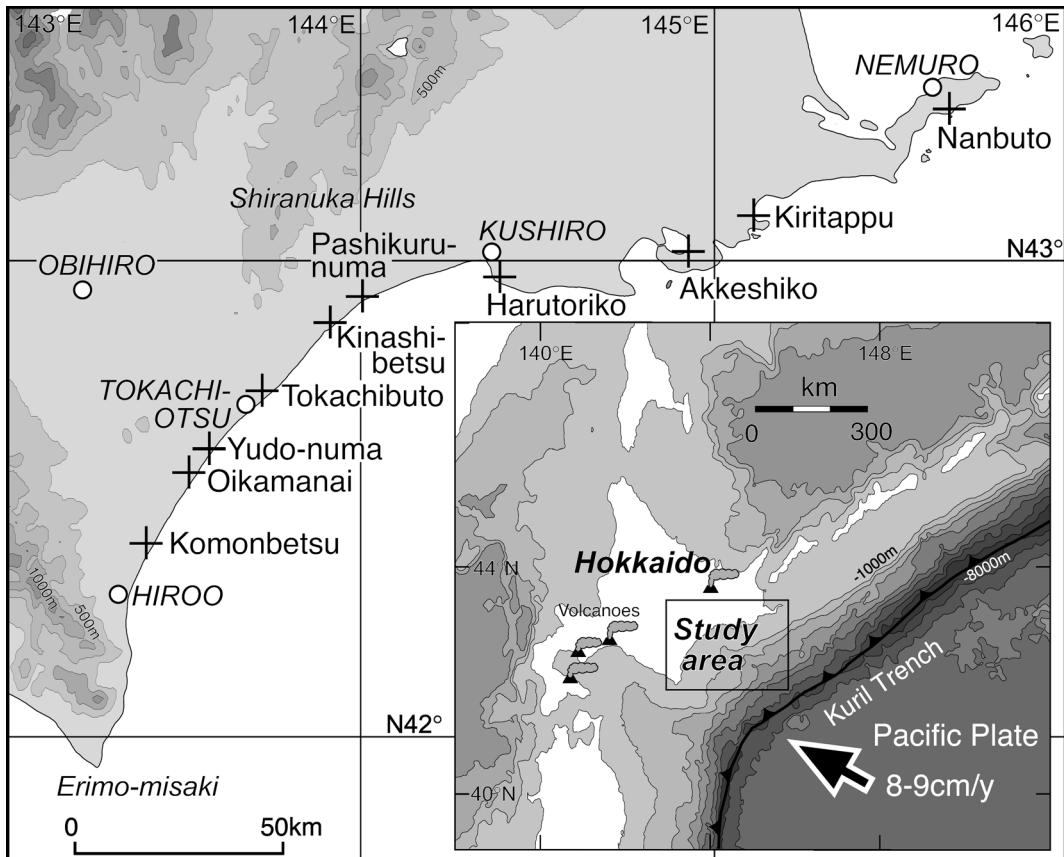


Fig. 1. Index map of eastern Hokkaido. Surveyed regions are shown as crosses. Inset map shows tectonic setting and surrounding volcanoes dispersed pyroclastic fall deposits to eastern Hokkaido.

降下火碎堆積物の多くが樽前山や白頭山など、遠方の火山を起源とすることを明らかにした。しかし、これらの調査でも北海道東部の太平洋沿岸域における降下火碎堆積物の分布状況は詳細には明らかになっていない。とくに樽前火山や北海道駒ヶ岳火山など、西南北海道にある給源火山から拡散した降下火碎堆積物には、分布範囲が太平洋の海域にかかるものが多い（北海道火山灰命名委員会, 1972, 1979; 中村・平川, 2004; 徳井, 1989など）。しかし、太平洋海底における降下火碎堆積物の分布は詳細には明らかではないことから、北海道東部の太平洋沿岸域における分布状況を正確に把握することが、降下火碎堆積物全体の分布状況を把握する上で重要である。

これまで我々は北海道東部地域における完新世の海跡湖や低湿地堆積物の検討をおこない、その堆積記録を明らかにしてきた。その結果、泥炭層や湖成層中には、津波などのイベント性堆積物とともに、複数の火山から飛来した降下火碎堆積物がきわめてよく保存されているこ

とを見い出した。これまでの成果は津波堆積物を中心に報告してきた（Nanayama *et al.*, 2003; 添田・他, 2004など）。ここでは降下火碎堆積物に焦点をあて、その産状と分布を詳細に明らかにする。

2. 調査地域の概要

調査対象地域は千島海溝に隣接する北海道東部の太平洋沿岸域の海跡湖および低湿地である（Fig. 1）。南西側の広尾から釧路にかけての平滑な海岸線では、第三系および第四系がつくる十勝平野および白糠丘陵がゆるやかに海に没する。それより東の釧路平野から根室半島にかけては、白亜系および古第三系が作る突出部と湾入部が繰り返す海岸線からなる。いずれの地域においても、海岸線付近に砂州が発達し、縄文海進期以降に内湾が閉塞されて縮小する過程で、海跡湖や低湿地が形成したとされる（磯部・他, 1999）。よって検討対象とする堆積物は縄文海進期以降のものが主体となる。

3. 試料採取

調査対象地域は10地域に大別でき、湿原、海跡湖、およびその周辺において表層直下の堆積層を調査した(Fig. 1)。試料採取にあたっては、検土杖および塩ビ管法(重野・他, 1999)により表層から深さ1~2m程度の円柱状試料を合計166地点、ジオスライサー(中田・島崎, 1997)をもちいて3m程の深度の試料を9地点、春採湖においては水上ボーリングにより12地点で最長13mの柱状試料を、それぞれ不攪乱・定方位で採取した。また地形効果などによる局所的な再移動の影響を考慮し、地域ごとに4地点以上で記載および試料採取をおこなった。

4. 分析手法

採取した堆積物中の火山碎屑物は超音波震盪機で洗浄し、過酸化水素水を加えて有機物を除去した。懸濁が著しい試料については、分散剤を使用して粘土画分の微細粒子を取り除いた。次に試料を乾燥し、ペトロボキシ154樹脂に包埋して研磨した後、鏡下観察および化学組成分析をおこなった。火山ガラスの主成分化学組成は産業技術総合研究所の波長分散型X線微小部分分析装置JXA-8900Rでおこなった。定量は9元素(Si, Ti, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K)を対象として、加速電圧15KeV、試料電流12nAで測定した。各元素のピーク計数時間は20秒、バックグラウンドは10秒とし、Naについてはそれぞれ6秒と3秒とした。電子線照射時にNaの移動による過少見積りを防ぐため、電子線を10μm四方の範囲で走査させて測定した。電子線の移動速度は600μm/秒である。測定値の補正是ZAF法によった。未知試料を分析する前に、鹿児島県国分町で採取した姶良Tn火山灰(町田・新井, 1976)を分析して、Furuta et al. (1986)などによる公表値と測定誤差以上の違いがないことを確認した。一般に火山ガラス中には測定対象元素以外にH₂Oや微量元素、微細な気泡などを含むため、分析値の合計が90wt.%以上となるものを有意な結果とした。今回は1試料につき10点以上の火山灰粒子を測定し、総量を100%に規格化したときの平均値と標準偏差を検討した。試料によっては充分な大きさの火山ガラスが得られず、分析点数が少ないものがある。また火山碎屑物層直下の有機質シルト層から、AMS法による放射性炭素年代を求めた。

5. 產状および記載岩石学的特徴

調査対象とした10地域(東から南部沼、霧多布、厚岸湖、春採湖、馬主来沼、キナシベツ、千勝太、湧洞沼、生花苗、小紋別)における代表的な堆積物の產状をFig. 2に示す。各地域での調査地点の詳細は七山・他(1999,

2000, 2001a, 2001b, 2002, 2003)に記載されている。産出する火山碎屑物の産出深度・層厚・色調・粒度・産状・記載岩石学的性質などの特徴をTable 1にまとめた。火山碎屑物の記載用語はFisher(1961), 荒牧(1979), および町田・新井(1992)に従う。記載岩石学的特徴は、火山ガラス片の形態・斑晶鉱物組み合わせについて検討した。ほとんどの火山碎屑物層では新鮮な角張った火山ガラス片が主体であり、その形態を町田・新井(1992)に従って泡(パブル)型Y字状(以下Byと略記する。以下同様)、軽石型スponジ状(Ps)、軽石型纖維状(Pf)、急冷破碎型フレーク状(Cf)の4種類に区分した。本研究で記載する急冷型フレーク状ガラスはいずれも茶色透明で角張った外形を示し、気泡をまれに含むものである。斑晶鉱物は試料中の新鮮で角張った結晶を対象として、しばしば破片状となっているものを含める。斑晶の周囲には無色透明で気泡を含む火山ガラスが取り巻くbubble-wall texture(Fisher, 1963)が遍在する。以下、調査した10地域について、東から西へ火山碎屑物の特徴を述べる。

南部沼(NB-GS1): 根室市街地南東の太平洋に面した海跡湖および湿原地域で、12地点で観察および試料採取をおこなった(七山・他, 2000)。NB-GS1は海岸から約1km内陸側の地点で採取した、長さ2.7mのジオスライサー試料である。試料では泥炭層中に上位から第1~5層の火山碎屑物が挟在する。第1~4層は厚さ4cm未満のいずれも分級のよい細粒火山灰で、主に火山ガラス片を主体として、斑晶鉱物を含む。各層とも内部に明瞭な堆積構造を持たず、無層理塊状である。層厚が膨縮したり、レンズ状に不連続な産状を示すものがあるが、南部沼地域全体を通じて同様な層厚で産出する(七山・他, 2000)。第1層はPs型の火山ガラス片を主体としており、特徴的にCf型を少量含む。第2層はPf型およびPs型火山ガラス片を主体とする。第1層と比べてPf型を多く含むこと、Cf型を含まないことで区別できる。第3層はBy型およびPf型火山ガラス片を主体として、Ps型およびCf型を含む。第4層は第1層と共に特徴を持つが、少量の普通角閃石斑晶を含む点で異なる。第5層はNB-GS1地点でのみ観察できた。分級のよい角張ったスponジ状の軽石火山礫からなり、最上部で細粒化する。層厚15cm以上で、軽石の最大粒径は7mm、石質岩片は1mm未満である。

霧多布(MG-GS1): 浜中町市街地西方のいわゆる霧多布湿原と呼ばれる低層湿原地帯で、55地点で観察および試料採取をおこなった(七山・他, 2000)。このうちMG-GS1は海岸線から約800m内陸側の地点で、長さ2.6mのジオスライサー試料である。試料では泥炭層中

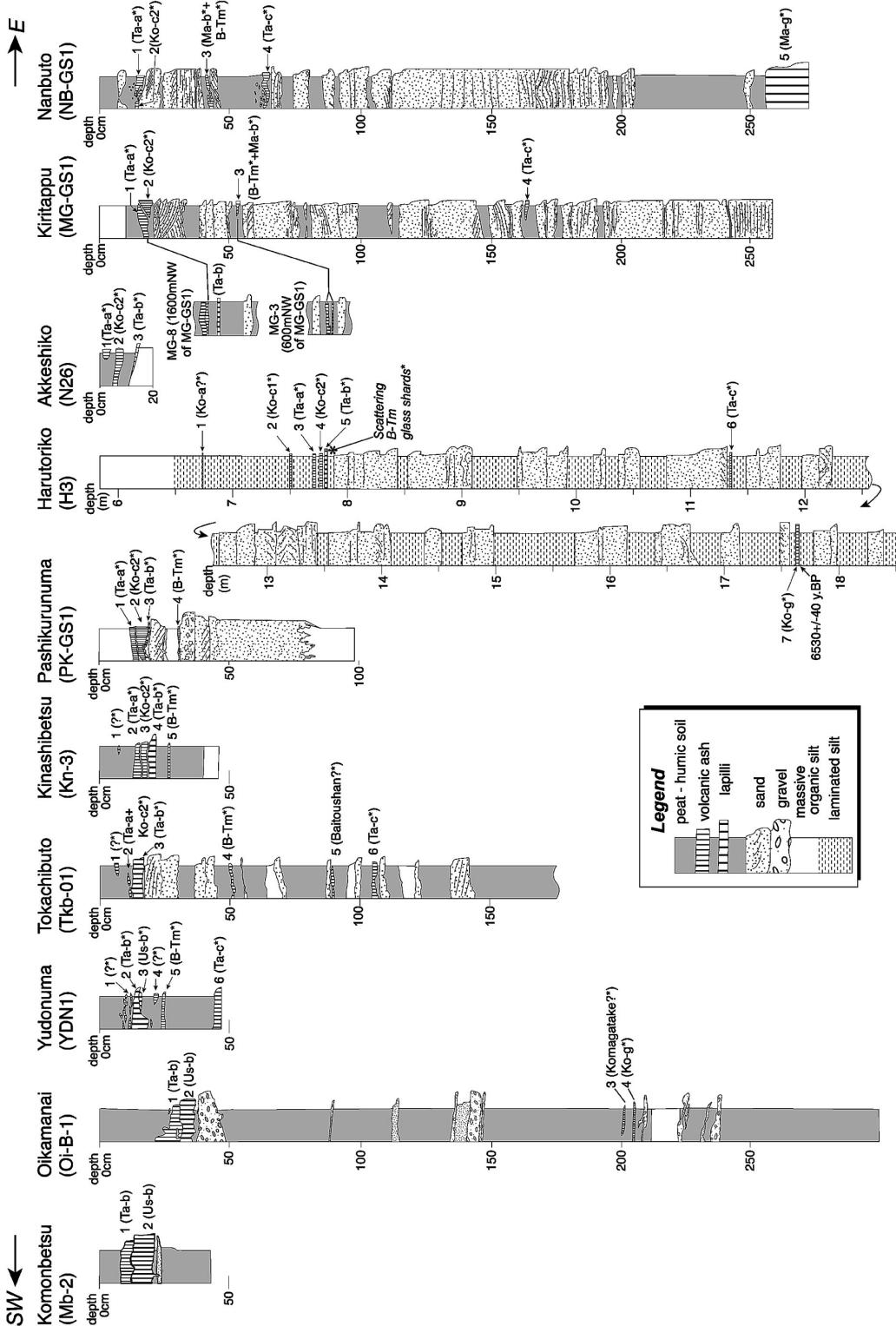


Fig. 2. Columnar sections of representative cores from the study area. Note the different scale in Harutoriko section. Correlation of dotted (*) volcanic ash layer is based on glass composition analysis. Sand and gravel beds are simply shown although they have various sedimentary facies (cf. Nanayama *et al.*, 1999).

に上位から第1～4層の細粒火山灰層を確認した。第1層はPs型火山ガラス片が主体で、Cf型を少量含む。第2層の火山ガラス片はPf型およびPs型を主体とする。MG-GS1試料における第2層は側方に急速に尖滅するが、他の地点でも普遍的に産出する。霧多布地域における全調査地点における第2層の層厚分布をFig. 3に示す。第2層の層厚は2～3cmに集中しており、位置や周囲の地形による顕著な変化を示さない。第1層および第4層も霧多布地域を通じて、ほぼ同様の層厚で産出する。MG-GS1地点の北西1.6kmの地点MG-8では、第2層の4cm下位に粗粒火山灰からなる薄層が挟在する(Fig. 2)。同様な粗粒火山灰層は55地点中9地点で産出した。この粗粒火山灰層は、Ps型火山ガラス片を主体として、斜方輝石および単斜輝石斑晶を含む。第3層はほとんどの地点で層厚0.5～1cmの細粒火山灰層として産出する。火山ガラス片はBy型およびPf型を主体として、Ps型およびCf型を含む。MG-GS1地点の600m西にあるMG-3地点では、同層準に2層の細粒火山灰が挟在する(Fig. 2)。上位層は厚さ約1cmで、褐灰色細粒火山灰である。下位層は厚さ0.5cm前後の灰白色細粒火山灰で、両者の間には厚さ1～2cmの泥炭層が挟在する。このような産状はMG-3地点だけで、その他の地点では1層の細粒火山灰が産出するのみであった。第4層は第1層と共通した特徴を持つが、普通角閃石を含む点で異なる。

厚岸湖(N26): 厚岸湖を取り巻く低湿地の11地点で観察および試料採取をおこなった。N26地点は厚岸湖南岸イクラウン川河口付近の低湿地である。ここでは泥炭層中に上位から第1～3層の火山碎屑物が挟在する。第3層より下位は青灰色の有機質シルト層である。第1層は厚さ約2cmの細粒火山灰で、側方に尖滅するが、厚岸湖地域では普遍的に厚さ2cm前後で産出する。火山ガラス片はPs型を主体として、Cf型を少量含む。第2層はPf型およびPs型の火山ガラス片を主体とする細粒火山灰である。第3層は粗粒火山灰で、Ps型の火山ガラス片を主体とする。この試料では側方に尖滅するが、この地域内では普遍的に産出する。

春採湖(H3): 釧路市街地南東の太平洋に隣接した海跡湖で、縄文海進期以降に成立したとされる(岡崎・他, 1988; 磯部・他, 1999)。春採湖では冬季に氷上からボーリングをおこない、12地点で湖底から試料を得た(七山・他, 2001a)。H3地点は湖のほぼ中央で、氷面下5.9mから19mにかけての試料である。湖底から深度約1mまでは軟質なヘドロで、明瞭な堆積構造を示さない。その下位からは、明灰色と暗灰色の葉理が発達する有機質シルト層が主体となる。有機質シルト層中には上位から第1層～第7層の火山灰が挟在する。第1層および第

2層はともに厚さ約0.5cmの細粒火山灰で、記載岩石学的特徴は共通している。火山ガラス片はPf型およびPs型を主体とする。第3層はPs型火山ガラス片を主体とする細粒火山灰で、Cf型をわずか含む。第4層は層厚1～3cmの細粒火山灰で、全体に緩い正級化構造を示す。最下部は結晶質な粗粒火山灰を含む(Fig. 4a)。Pf型およびPs型火山ガラス片を主体とする。第5層は層厚0.5～1.5cmの範囲で膨縮し、粗粒火山灰粒子が上半部と最下部に偏在する(Fig. 4a)。火山ガラス片はPs型が主体である。最下部付近には試料採取時の開口クラックが生じている。第6層は第3層と共通の特徴を持つが、普通角閃石を含む点で第3層と異なる。第7層は層厚1.5cm前後で、下部は粗粒火山灰、上部は細粒火山灰が主体である(Fig. 4b)。火山ガラス片はPf型およびPs型が主体である。第7層直下の有機質シルト層(H3-17.65m)からは 6530 ± 40 y.B.P. (Beta-147396)の放射性炭素年代値を得た。春採湖H3地点で産出した火山灰層に含まれる火山ガラス片のSEM像を示す(Fig. 5)。第2層、第4層、および第7層はPf型火山ガラス片を主体として、ガラス壁が薄いものが多い。第3層、第5層、第6層はPs型火山ガラス片が主体で、発泡が悪くガラス壁が厚いものが多い。第2、3、4、5層の各火山灰層は、春採湖地域を通じてほぼ同様な層厚で産出する。例として各調査地点での第3層の層厚分布をFig. 6に示す。第3層の層厚は2cm前後に集中しており、位置や周囲の地形による顕著な変化を示さない。また第5層の下位1～6cmの有機質シルト層は肉眼で確認できる火山灰層を挟在しない。この有機質シルト層を他の火山灰試料と同様に洗浄して、有機物および粘土粒子を除去すると微量の細粒火山灰粒子が残る。新鮮な火山ガラス片はPf型およびBy型で、結晶は斜方輝石、単斜輝石、普通角閃石、石英をわずかに含む。このうち火山ガラス片については他の試料と同様にEPMA分析をおこなった。

馬主来沼(PK-GS1): 白糠町と音別町の境界に位置する汽水湖および湿原地帯で、8地点で観察および試料採取をおこなった(七山・他, 2001b)。PK-GS1は海岸線から300m内陸側でのジオスライサー試料である。有機質シルト層中に上位から第1～4層の火山灰が挟在する。第1層から第3層の各境界には厚さ5mm前後の有機質シルト層が挟在する。各火山灰層はこの地域内では、ほぼ同様な層厚と層序関係で産出する。第1層はPs型火山ガラス片が主体で、Cf型をわずかに含む。第2層ではPf型およびPs型が主体である。第3層はPs型を主体とする粗粒火山灰である。第4層はPf型およびBy型火山ガラス片を主体として、普通角閃石およびアルカリ長石斑晶をわずかに含む。

Table 1. Lithofacies and petrological characteristics of volcanioclastic deposits in this study.

Location	Layer	Depth below ground level (cm)	Thickness (cm)	Color	Grain size	Texture	Shape of glass shard*1	Phenocryst assemblage*2	Correlated source volcano*3	Correlated pyroclastic fall deposit
Nanbuto (NB-GS1)	1	14-17	0-3	light tan brown	fine ash	massive	P _s , P _f , Cf	opx, cpx	Tarumai	Ta-a
	2	14-16	1-2	light tan	fine ash	massive	P _f , P _s	cpx, opx	Komagatake	Ko-c2
	3	43-46	1	brown tan	fine ash	massive	B _y , P _f , P _s , Cf	cpx, opx	Baitoushan and Mashu	B-Tm+Ma-b
	4	63-67	0-4	brown tan	fine ash	lenticular, massive	P _s , B _y , Cf	opx, cpx, hb	Tarumai	Ta-c
	5	260-	15+	dark tan	lapilli	clast supported	P _s	opx, cpx	Mashu	Ma-g
Kiritappu (MG-GS1)	1	15-18	2-3	brown tan	fine ash	massive	P _s , P _f , Cf	opx, cpx	Tarumai	Ta-a
	2	17-19	0-2	light gray	fine ash	massive	P _f , P _s	opx, cpx	Komagatake	Ko-c2
	3	54-55	0-1	gray tan	fine ash	massive	P _f , B _y , P _s , Cf	cpx, opx	Baitoushan and Mashu	B-Tm+Ma-b
Kiritappu (MG-8)	4	167-168	0-1	tan gray	fine ash	massive	P _f , B _y , P _s	opx, cpx, hb	Tarumai	Ta-c
	-	14-15	1	tan gray	coarse ash	massive	P _s , Pf	opx, cpx	Tarumai	Ta-b
Akkeshiko (N26)	1	2-4	2	tan gray	fine ash	massive	P _s , P _f , Cf	cpx, opx	Tarumai	Ta-a
	2	5-8	3	light gray	fine ash	massive	P _f , P _s	cpx, opx	Komagatake	Ko-c2
	3	13-15	0-1	tan gray	coarse ash	massive	P _s , Pf	opx, cpx	Tarumai	Ta-b
Harutoriko (H3)	1	671-671.5	0.5	light gray	fine ash	massive	P _f , P _s	opx, cpx	Komagatake	Ko-a
	2	751-751.5	0.5	light gray	fine ash	massive	P _f , P _s	opx, cpx	Komagatake	Ko-c1
	3	775-777	2	gray	fine ash	massive	P _s , Pf, Cf	opx, cpx	Tarumai	Ta-a
	4	778-781	1-3	light gray - gray	coarse ash (pumiceous)	normally graded	P _f , P _s	opx, cpx	Komagatake	Ko-c2
	5	784-786	0.5-1.5	light gray	varved silt	uneven thick, laminated	P _s , Pf	opx, cpx	Tarumai	Ta-b
	6 beneath-5	787-792	-	dark tan - gray	fine ash	scattered	B _y , Pf	(opx, cpx, hb, qz)	Baitoushan	B-Tm scatter
	6	1142-1143	0.5-1	gray	upper fine ash and lower coarse ash	massive	P _f , P _s , Cf	opx, cpx, hb	Tarumai	Ta-c
Pasifikunuma (PK-GS1)	7	1765-176.5	1.5	gray		normally graded	P _f , P _s	opx, cpx	Komagatake pre-historic	Ko-g
	1	13-16	3	brown gray	fine ash	massive	P _s , Pf, Cf	opx, cpx	Tarumai	Ta-a
	2	14-18	3	light gray	fine ash	massive	P _f , P _s	opx, cpx	Komagatake	Ko-c2
	3	18-19	1	brown gray	coarse ash	massive	P _s , Pf	opx-cpx	Tarumai	Ta-b
	4	31-32	0.5	gray	fine ash	massive	P _f , By	hb, af, qz	Baitoushan	B-Tm

Table 1. (continued)

Kinashibetsu (Kn-3)	1	9-11	0-2	brown gray	fine ash	discontinuous	Ps	opx, cpx, hb	-	-
	2	15-18	2-3	tan gray	fine ash	massive	Ps, Pf, Cf	opx, cpx	Tarumai	Ta-a
	3	19-22	2-3	light gray	fine ash	massive	Ps, Pf	opx, cpx	Komagatake	Ko-c2
	4	22-24	1-2	light gray	coarse ash	massive	Ps, Pf	opx, cpx	Tarumai	Ta-b
	5	28-29	0.5-1	light gray	fine ash	massive	By, Pf	opx, cpx, hb, qz, af	Baitoushan	B-Tm
Tokachihibuto (Trb-01)	1	6-7	0-1	brown tan	coarse ash	discontinuous	Ps	opx, cpx	-	-
	2	10-12	2	tan gray	fine to coarse ash	lenticular, massive	Ps, Pf, Cf	opx, cpx	Tarumai and Komagatake	Ta-a+Ko-c2
	3	13-17	4	light gray	coarse ash	massive	Ps, Pf	opx, cpx	Tarumai	Ta-b
	4	50-51	1	light gray	fine ash	massive	By, Pf	opx, cpx, hb, qz, af	Baitoushan	B-Tm
	5	89-90	1	light gray	fine ash	massive	By, Pf	opx, cpx, hb, qz	Baitoushan	?
	6	105-107	1-2	tan gray	fine ash	massive	Pf, Ps, Cf	opx, cpx, hb	Tarumai	Ta-c
Yudonuma (YDN1)	1	10-14	0-1	brown gray	fine ash	discontinuous	Pf, By, Ps	opx, cpx, hb	-	-
	2	14-20	2-6	tan gray	coarse ash	uneven thick, massive	Ps, Pf	opx, cpx	Tarumai	Ta-b
	3	16-17	0-1	gray white	coarse ash	lenticular, massive	Pf, Ps	opx, cpx, hb, qz	Usu	Us-b
	4	22-23	0-1	gray	fine to coarse ash	discontinuous	Ps, Pf	opx, cpx, hb, qz	-	-
	5	25-26	1	green gray	fine ash	massive	By	hb, opx, qz, af	Baitoushan	B-Tm
	6	48-	3+	brown gray	coarse ash	massive	Ps, Pf	opx, cpx, hb	Tarumai	Ta-c
Oikamana (Oj-B-1)	1	22-32	8	tan gray	coarse ash	swelling thickness, massive	Ps, Pf	opx, cpx	n.d.	Ta-b
	2	32-37	4	light gray	coarse ash	massive	Pf, Ps	opx, cpx, hb, qz	n.d.	Us-b
	3	200-201	1	light gray	fine ash	lenticular, massive	Pf, Ps	opx, cpx	Komagatake pre-historic	?
	4	204-205	1	light gray	fine ash	massive	Pf, Ps	opx, cpx	Komagatake pre-historic	Ko-g
	1	9-13	4	tan gray	coarse ash	massive	Ps, Pf	opx, cpx	n.d.	Ta-b
	2	13-21	8	light gray	coarse ash	massive	Pf, Ps	opx, cpx, hb, qz	n.d.	Us-b

*1: Listed in the order of abundance and the classification of glass shard is Ps: spongy pumice type; Pf: fibrous pumice type; By: Y-shaped bubble type; Cf: Flaky chilled type after Machida and Arai (1992)

*2: Listed in order of abundance and abbreviated as; cpx: clinopyroxene; opx: orthopyroxene; hb: hornblende; bt: biotite; qz: quartz; af: alkali feldspar. Plagioclase and opaque minerals are omitted as they are included in all samples.

*3: Discriminated by petrological characteristics.

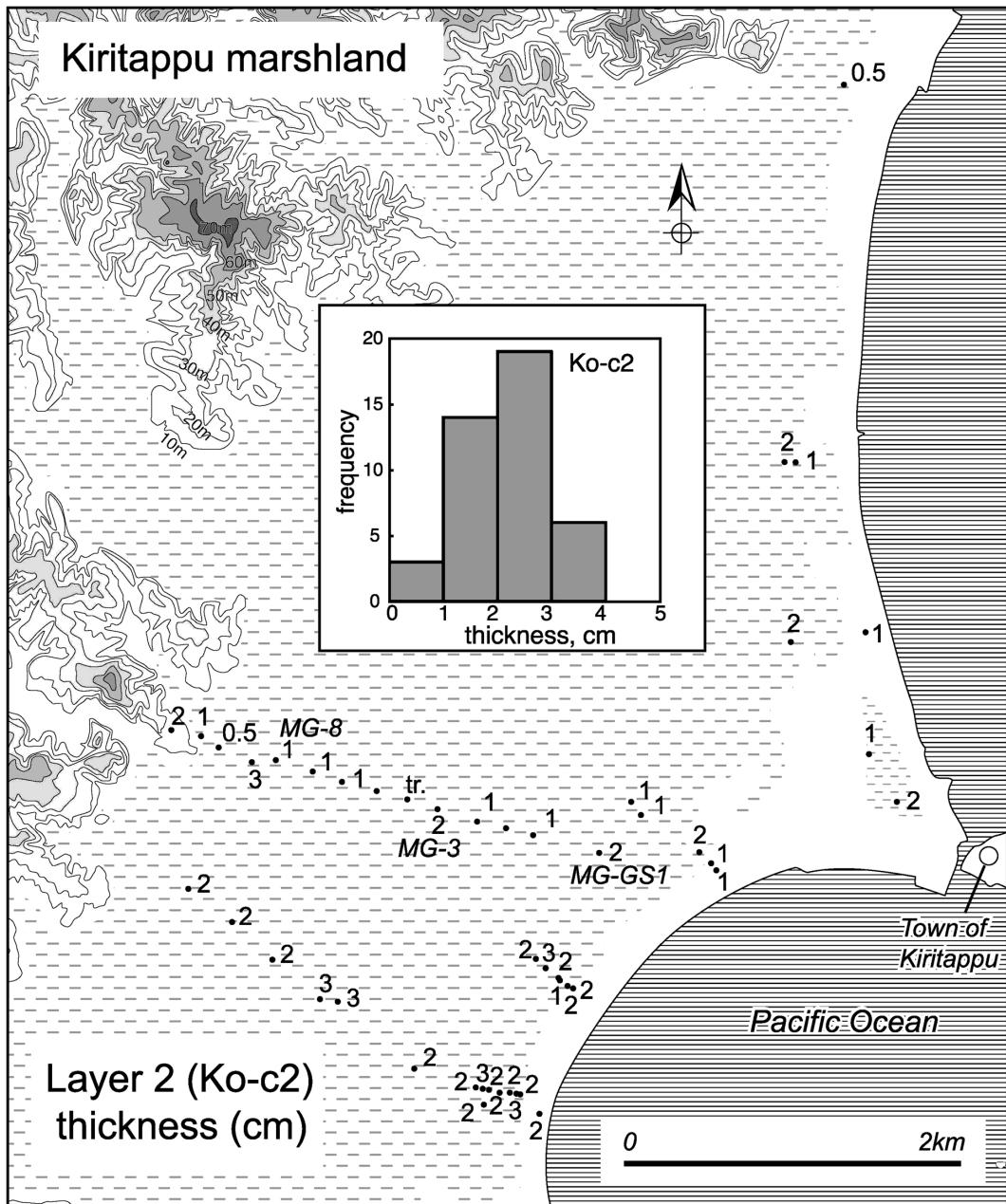


Fig. 3. Thickness of the layer 2 fine ash (Ko-c2) in the Kiritappu marshland. Topographic contour lines are drawn with 10 m interval and area of the marshland are shaded. Inset histogram shows frequency of layer 2 thickness in the Kiritappu area.

キナシベツ (Kn-3): 音別町の太平洋に面した湿原で、10地点から試料を得た(七山・他, 2001b)。Kn-3は海岸から約700 mの地点で、泥炭層中に上位から第1～5層の火山灰が挟在する。第1層は厚さ2 cm以下の細粒火山灰で、他の地点では産出しない。Ps型火山ガラス片を

主体として、斜方輝石、単斜輝石、普通角閃石を含む。第2層から第4層は、この地域内では普遍的に同様な産状で産出し、各境界には、それぞれ厚さ5 mm前後の泥炭層が挟在する。第2層はPs型火山ガラス片を主体として、Cf型ガラスを少量含む。第3層はPs型およびPf

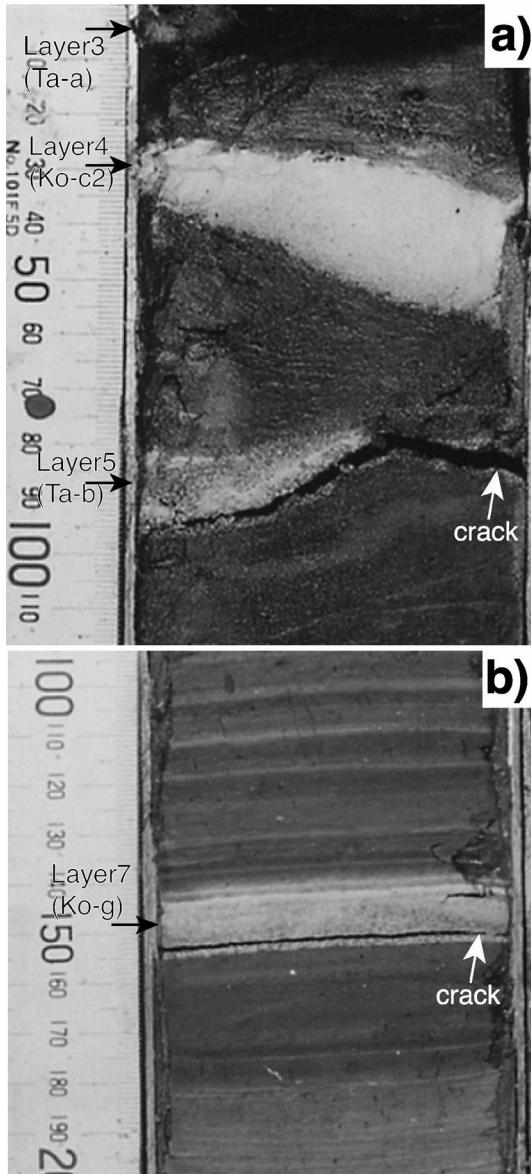


Fig. 4. Occurrences of pyroclastic fall deposits in sub-bottom samples from Lake Harutoriko (H3). Measures for the scale are graduated in millimeter. a) Dark brown organic silt is intervened by three volcanic ash layers in descending order: Layer 3 (Ta-a), only the bottom part of fine ash layer is shown and the upper part is cut by sampling interruption; Layer 4 (Ko-c2) consists of normally graded fine ash with crystal rich coarse ash bottom; Layer 5 (Ta-b), composed of coarse and fine pumiceous ash. b) Normally graded layer 7 (Ko-g) lies between varved clay. The Ko-g consists of light gray fine ash rich upper half and pumiceous coarse ash rich lower half. Cracks were presumably formed at the sampling.

型火山ガラス片を主体とする。第4層はPs型火山ガラス片を主体とする粗粒火山灰である。第5層はBy型およびPf型火山ガラス片を主体として、斜方輝石・斜方輝石・普通角閃石・石英などをわずかに含む。

十勝太 (Tkb-01): 浦幌町の十勝川河口右岸に広がる低湿地において、7地点で観察および試料採取をおこなった(七山・他, 2002)。Tkb-01地点では泥炭層中に上位から第1~6層の火山灰が挟在する。第1層は粗粒火山灰で、最大層厚1cmを示すが、側方には連続しない。Ps型火山ガラス片を主体として、斜方輝石および单斜輝石斑晶を含む。第2層は細粒~粗粒火山灰で、層厚2cm以下でレンズ状に断続して産出する。Ps型およびPf型火山ガラス片を主体とする。第3層はPs型およびPf型火山ガラス片を主体とする粗粒火山灰である。第4層および第5層はともにBy型およびPf型火山ガラス片を主体とする細粒火山灰である。斜方輝石、单斜輝石、普通角閃石を含む。第6層はPf型およびPs型火山ガラス片を主体として、Cf型を少量含む。斑晶として斜方輝石、单斜輝石、および少量の普通角閃石を含む。

湧洞沼 (YDN1): 豊頃町の太平洋岸に位置する汽水湖およびその周辺において、7地点で観察および試料採取をおこなった(七山・他, 2002)。YDN1地点は海岸線から約800mの地点で、泥炭層中に上位から第1~6層の火山灰層が挟在する。第1層はレンズ状の細粒~粗粒火山灰で、側方に連続しない。Pf型、By型、およびPs型火山ガラス片を主体として、斜方輝石、单斜輝石、および普通角閃石を含む。第2層は層厚2~6cmの粗粒火山灰で、Ps型火山ガラス片を主体とする。第3層は層厚1cm未満の粗粒火山灰で、Pf型およびPs型火山ガラス片を主体として、斜方輝石、单斜輝石、普通角閃石、および石英を含む。第2層との間に層厚5mm未満の有機質シルト層を挟む。第4層は第1層とほぼ同様の特徴を示す。第5層はBy型火山ガラス片を主体とする細粒火山灰で、普通角閃石、斜方輝石、石英、アルカリ長石を少量含む。第6層はPs型火山ガラス片を主体とする粗粒火山灰で、普通角閃石を少量含む。厚さ3cm以上で、下限は不明である。

生花苗 (Oi-B-1): 大樹町の太平洋岸に面する汽水湖周辺の湿地帯8地点で調査および試料を採取した(七山・他, 2002)。Oi-B-1は海岸線から約50mの地点で、深さ3mの泥炭層中に上位から第1~4層の火山灰が挟在する。第1層はPs型火山ガラス片を主体とする粗粒火山灰で、斜方輝石および单斜輝石斑晶を含む。第2層はPs型火山ガラス片を主体とする粗粒火山灰で、斜方輝石、单斜輝石、石英、および普通角閃石斑晶を含む。両者の境界には断続的に厚さ5mm未満の有機質シルト層が挟

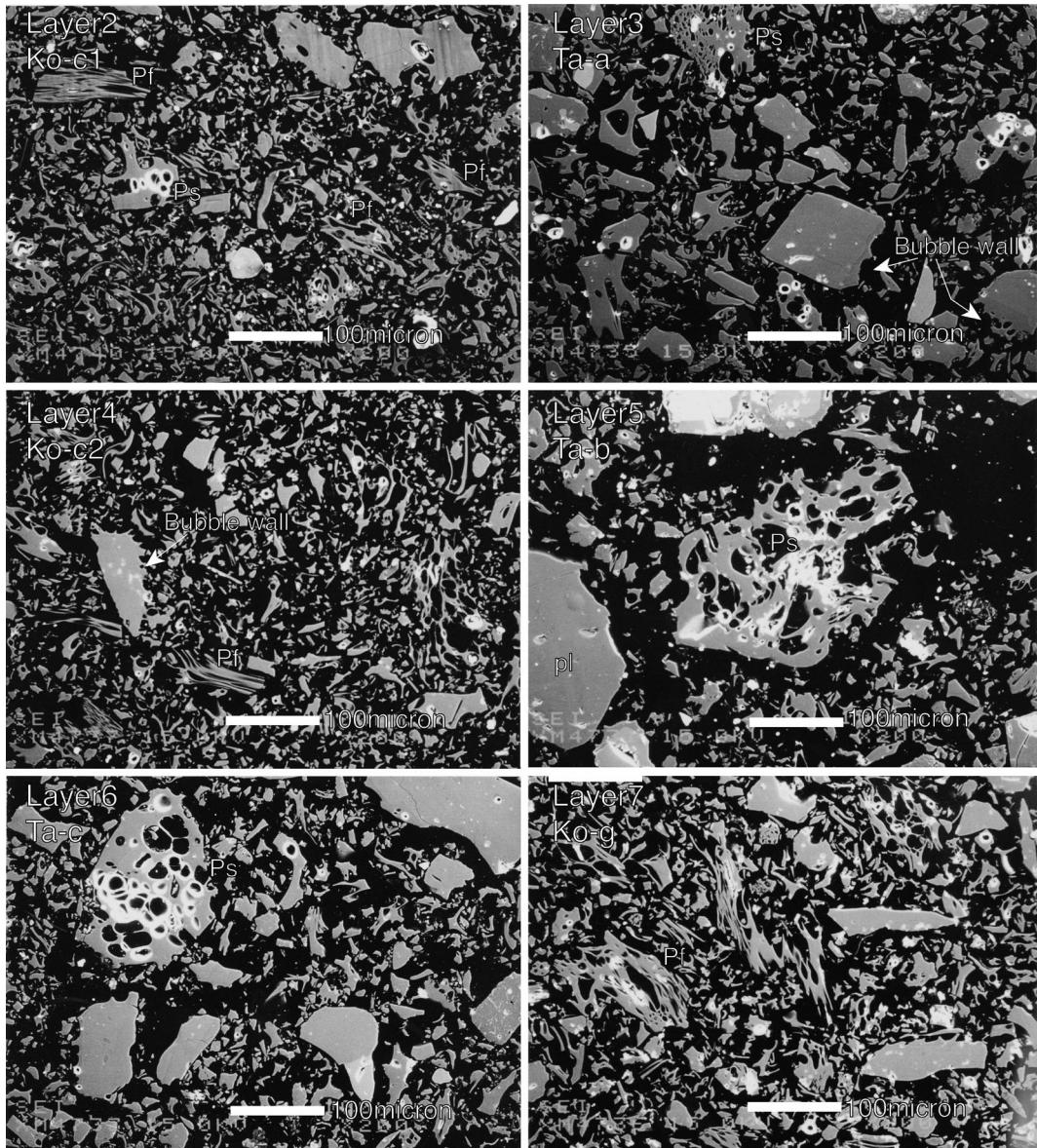


Fig. 5. SEM images of glass shards in volcanic ash layers from Lake Harutoriko (H3).

在する。それぞれ近隣の湧洞沼地域における第2層および第3層と産状および記載岩石学的特徴が共通する。第3層および第4層はともに層厚1cm前後の細粒火山灰であるが、第3層は側方に尖滅する。ともにPf型およびPs型火山ガラス片を主体として、斜方輝石および单斜輝石斑晶を含む。第4層は第3層に比べてやや粗粒で結晶に富む。

小紋別(Mb-2):広尾町の小紋別川河口左岸付近において、4地点で観察および試料採取をおこなった（七山・

他、2003）。Mb-2地点は海岸線から約200m内陸側で、泥炭層中に2層の火山灰が挟在する。上位の第1層は厚さ4cm前後のPs型火山ガラス片を主体とする粗粒火山灰で、斜方輝石および单斜輝石を含む。下位の第2層は厚さ8cm前後の粗粒火山灰で、Pf型火山ガラス片を主体として、斜方輝石、单斜輝石、普通角閃石、および石英を含む。両者の境界には厚さ1cm以下の泥炭層が断続的に挟在する。第1層および第2層はそれぞれ隣接する生花苗沼地域の第1層および第2層と共に通する産状お

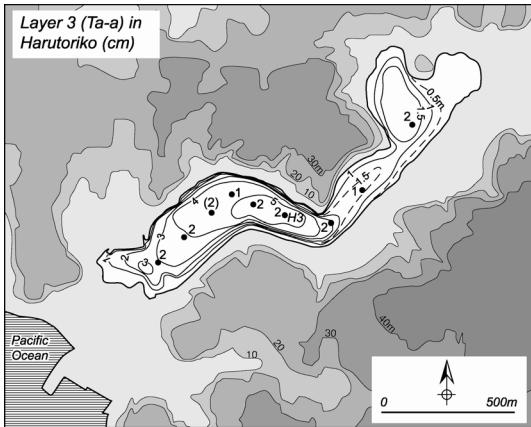


Fig. 6. Thickness distribution of fine ash layer 3 (Ta-a) in Lake Harutoriko. Bathymetric contours are 1 m interval (Okazaki *et al.*, 1988).

より記載岩石学的特徴を示す。

6. 火山ガラス片の化学組成とその給源

今回の調査で検出した火山碎屑物は、火山ガラス片の主成分化学組成によって給源火山を識別した。分析値は試料ごとの平均値および標準偏差を給源の候補となる火山と比較した (Table A1)。全ての元素で類似した組成を持つことを検証しているが、ここでは代表的な TiO₂-K₂O のプロット図を示す (Fig. 7)。火山ガラス片中の TiO₂ や K₂O 含有量は給源火山ごとの差が現れやすく (Larsen, 1981; Westgate and Evans, 1978)，結晶分別作用およびテクトニックセッティングを反映した火山のマグマ系の差異を表していると解釈できる。給源の候補となる火山のガラス組成は勝井・他 (1978), Furuta *et al.* (1986), 徳井 (1993), 宇井・他 (1997), 福沢・他 (1998) を参照した。

5 章で述べた火山碎屑物の多くは、初生的な降下火碎堆積物あるいは堆積後に内部構造の改変などを受けたが、降下火碎堆積物としての特徴を保存していると判断できるものである。それらは、各地域ごとに一様な岩相・層厚で産出すること、分級が良く角張った火山碎屑物粒子からなること、火山碎屑物中の斑晶鉱物が発泡したガラスをまとっている bubble-wall texture を持つこと、などの条件を満たす。各降下火碎堆積物の給源および噴火年代は岩相・層厚などの産状と層序関係、岩石学的特徴（火山ガラス形態、斑晶組み合わせ、および火山ガラス片の化学組成）を総合して判断した。以下、地域ごとに火山碎屑物の給源および対比の結果を述べる。なお対比の結果は Fig. 2 の柱状図中にも付記した。

南部沼：第 1 層および第 2 層は鉱物組み合わせは同じであるが、火山ガラス片の発泡形態および Cf 型の有無から区別できる。火山ガラス片の化学組成からは、第 1 層は樽前火山起源、第 2 層は駒ヶ岳火山起源である。両者が表層付近で数 cm 未満の泥炭をはさむ程度に近接して産出すること、周辺地域での分布状況（遠藤・他, 1989; 徳井, 1989 など）を考慮し、第 1 層は樽前 a 降下火碎堆積物（曾屋・佐藤, 1980; 浦上・他, 1933 など。以下、瀬尾・他, 1965 に従い Ta-a と略す）に対比した。Ta-a の噴火年代は西暦 1739 年である（山田, 1958 など）。第 2 層は駒ヶ岳 c2 降下火碎堆積物（北海道火山灰命名委員会, 1972; 山田, 1958 など。以下、佐々木・他, 1970 に従い Ko-c2 と略す）に対比した。噴火年代は 1694 年である（古川・他, 1997; 勝井・他, 1986）。第 3 層は摩周火山と白頭山火山起源の 2 種類の化学組成領域を示すガラスが混在し、Fig. 6 上では別個に示した。両者の比率はおよそ 1:5 である。また By 型と Cf 型火山ガラス片が混在し、複数起源の火山灰が混在することを示唆する。周辺地域での降下火碎堆積物の産出状況（町田, 1996; 徳井, 1989）を考慮すると、By 型火山ガラス片は白頭山・苦小牧火山灰（町田・他, 1981 など；以下、Machida and Arai, 1983 に従い B-Tm と略す）に、Cf 型火山ガラス片は摩周 b 降下火碎堆積物（山田, 1940 など；以下、勝井, 1962 に従い Ma-b と略す）にそれぞれ対比できる可能性がある。これらの降下火碎堆積物の噴火年代はいずれも 10 世紀で（福沢・他, 1998; 庄司・増井, 1974 など），両者は時間的に近接して堆積した可能性がある。摩周火山近傍では Ma-b が 2–4 cm の泥炭層をはさんで B-Tm を覆う（町田, 1996）。南部沼における第 3 層の層厚が地域内で一定しており、塊状無層理な内部構造を示すことを考慮すると、第 3 層は B-Tm および Ma-b が時間的に近接して堆積した後に、なんらかの擾乱作用により混合したものと考えることができる。第 4 層は火山ガラス組成から樽前火山起源であるが、普通角閃石を含む点で、歴史時代の樽前火山起源降下火碎堆積物とは区別できる。その層序関係および周辺地域での分布（徳井, 1988a など）を考慮し、樽前 c 降下火碎堆積物（曾屋・佐藤, 1980; 浦上・他, 1933 など。以下、瀬尾・他, 1968 に従い Ta-c と略記）に対比した。Ta-c の噴火年代はおよそ 2.5 ka であり（Kelsey・他, 2002; 鈴木, 1994 など）、斑晶に普通角閃石を含む（徳井, 1988b）。第 5 層は摩周火山起源の火山ガラス組成を示す軽石火山礫を主体とする降下軽石堆積物である。層序関係を考慮すると摩周 g・h・i・j 降下火碎堆積物（勝井, 1962; 山田, 1940 などに基づく）のいずれかに対比できる。これらは休止期を挟まない一連の噴火による降下火碎堆積物である。

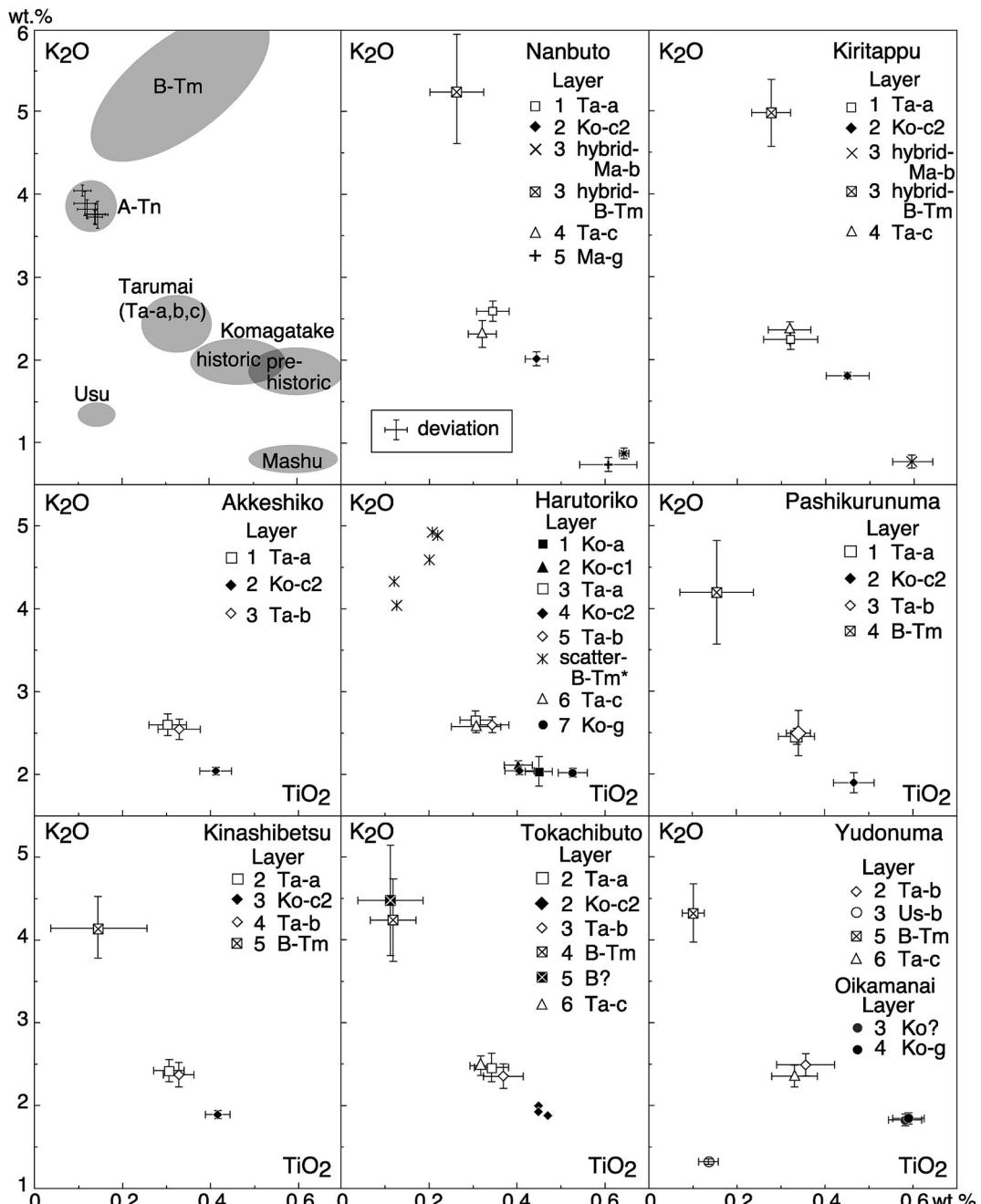


Fig. 7. Variation diagrams for TiO_2 - K_2O contents of glass shards by microprobe analyses. Each symbol shows mean and deviation in normalized wt.%. Fields of source-known volcanic glass shards by Katsui *et al.* (1978), Furuta *et al.* (1986), Tokui (1993) and Fukusawa *et al.* (1998) are shaded in upper-left plot. A-Tn is a working standard sample analyzed in each analysis.

宮田・他（1988）の等層厚線図から判断すると、根室地域で層厚10cm以上となる可能性があるのは摩周g降下火碎堆積物（以下、勝井、1962に従いMa-gと略す）のみであることから、Ma-gに対比する。Ma-g・h・i・jと一連の噴火である摩周f火碎流堆積物堆積物（勝井、1962）の噴火年代はおよそ8.5ka（中村・平川、2004）である。

霧多布：第1層は樽前火山起源、第2層は駒ヶ岳火山起源である。南部沼と同様にTa-a, Ko-c2にそれぞれ対比できる。上位のTa-aが褐灰色なのに対して、Ko-c2は明るい白灰色であることが多い。MG-8地点（Figs. 2, 3a）で第2層の下位にある粗粒火山灰層は、第1層と岩石学的特徴がほぼ共通するが、Cf型火山ガラス片を含まない。Ko-c2の4cm下位にあることを考慮すると、樽前b降下火碎堆積物（曾屋・佐藤、1980；浦上・他、1933など。以下、瀬尾・他、1965に従いTa-bと略す）に対比できる。Ta-bの噴火年代は西暦1667年である（山田、1958など）。第3層はB-Tmの化学組成領域にある火山ガラス片と摩周火山起源の領域にあるものがほぼ1:1の比率で混在する。またMG-3地点（Figs. 2, 3）のように、厚さ1-2cmの泥炭層を挟む2層の細粒火山灰として産出する地点がある。よってMG-GS1地点の第3層はB-TmとMa-bの混合層で、時間的に近接して堆積した2層の火山灰が、堆積後に擾乱を受けて一層となつたと解釈できる。第4層は普通角閃石を含み、樽前火山起源であること、および層序関係から、Ta-cに対比できる。

厚岸湖：第1層および第2層は南部沼および霧多布と同様の特徴を持ち、それぞれTa-aおよびKo-c2に対比できる。第3層は第1層とほぼ共通の岩石学的特徴を持つ粗粒火山灰で、茶色透明のCf型火山ガラス片を含まない。Ko-c2の5cm下位にあることから、Ta-bに対比できる。

春採湖：第1層は岩石学的特徴から駒ヶ岳火山起源である。第1層の上位は最近の軟質なヘドロで、後述する下位層との関係から1856年より新しい。よって駒ヶ岳a降下火碎堆積物（神津・他、1932；山田、1951など。以下、佐々木・他、1970に従いKo-aと略す）に対比可能である。第2層は駒ヶ岳火山起源であり、第3層との層序関係から駒ヶ岳c1降下火碎堆積物（北海道火山灰命名委員会、1972；山田、1951など。以下、佐々木・他、1970に従いKo-c1と略す）に対比できる。Ko-c1の噴火年代は西暦1856年である（山田、1958など）。第3層はCf型火山ガラス片を含む細粒火山灰で、樽前火山起源であることからTa-aに対比できる。第4層はKo-c2に対比できる。第5層は粗粒火山灰であることから、Ta-bに対比できる。春採湖第5層の下位1-6cmから採取し

た有機質シルト層が含む火山ガラス片の化学組成は樽前火山、駒ヶ岳火山、および起源不明の組成領域などに分散するが、およそ15%がB-Tmの組成領域を示す。よってB-Tmは火山灰層としては保存されていないものの、有機質シルト層中に散在する火山ガラス片は降灰層準を示す可能性が高い。第6層はCf型火山ガラスと普通角閃石をわずかに含む特徴を持つことからTa-cと判断した。第7層は駒ヶ岳火山起源のガラス組成を持ち、なかでもTiO₂量に富む先史時代噴出物の特徴（宇井・他、1997）を示す。第7層直下の有機質シルト層からは6530±40y.B.P.の放射性炭素年代を得た。この年代においては春採湖は太平洋と接続した内湾であり（添田・七山、2005）、表層海水のリザーバ効果を考慮した年代較正（Stuiver and Braziunas, 1993）を適用すると6930-7060cal.y.B.P.（1σ）となる。春採湖の第7層は駒ヶ岳g降下火碎堆積物（北海道火山灰命名委員会、1972；瀬尾、1951など。以下、佐々木・他、1970に従いKo-gと略す）に対比できる。今回の較正年代値は海水表面での補正值（△R）を考慮していないため、年代値はさらに100-400年程度若返る可能性がある。今回の年代測定値は奥野・他（1999）によるKo-gの年代6.8-7.0kaに近く、また中村・平川（2004）の6.5-6.6kaとも大きく矛盾しない。

馬主来沼：第1層から第3層まで近接して産出する。第1層はCf型火山ガラス片を含む樽前火山起源の火山ガラス組成で、第2層は駒ヶ岳火山起源、第3層は樽前火山起源の粗粒火山灰である。よって上位からTa-a, Ko-c2, Ta-bに対比できる。第4層はガラス組成からB-Tmに対比できる。

キナシベツ：第1層は3種類以上の組成領域に分散するガラスが混在し、卓越する種類がない。側方への連続性が乏しく、他地点で産出しないことを考慮して、初生的な降下火碎堆積物ではないと判断した。第2層から第4層は近接して産出し、馬主来沼の第1層から第3層と同様な特徴を示すことから、上位からTa-a, Ko-c2, Ta-bにそれぞれ対比した。

十勝大：第1層は粗粒火山灰であるが、含まれる火山ガラス片の化学組成は特定の領域に集中しない。また側方への連続性が悪いことから初生的な降下火碎堆積物ではないと判断した。第2層は95%の火山ガラス片が樽前火山起源の組成、残り5%のガラスは駒ヶ岳火山起源の組成を示す。Cf型火山ガラス片を含むことから樽前火山起源の火山ガラス片はTa-aに対比できる。少量ながら存在する駒ヶ岳火山起源の火山ガラス片は層的に近接したKo-c2が混在していると解釈できる。第3層は樽前火山起源の火山ガラス片からなり、粗粒火山灰層で

あることから Ta-b に対比できる。第4層および第5層はいずれも B-Tm の組成領域を示す火山ガラス片を主体とする。上下の泥炭層の厚さと B-Tm の年代を考慮すると、第4層が B-Tm である可能性が高い。第5層に対比できる白頭山火山起源の降下火碎堆積物は不明である。第6層は樽前火山起源の火山ガラス片からなり、普通角閃石を含むことから Ta-c に対比できる。

湧洞沼: 第1層および第4層はいずれも3種類以上の組成領域にまたがる火山ガラス片が混在し、また側方への連続性が乏しいことから、初生的な降下火碎堆積物ではないと判断できる。第2層は樽前火山起源の火山ガラス片からなる粗粒火山灰であり、周辺で類似した岩相で産出することから、Ta-b に対比できる。第3層は斑晶として普通角閃石と石英を含み、火山ガラス片が有珠火山起源の組成領域を示すこと、第2層の Ta-b と近接して産出することから、有珠 b 降下火碎堆積物（浦上・他、1933など。以下、横山・他、1973 に従い Us-b と略記）に対比できる。火山ガラス組成は非常に分散の小さい値を示す。Us-b の噴火年代は西暦 1663 年である（山田、1958 など）。第5層は火山ガラス組成から B-Tm に対比できる。第6層は樽前火山起源の火山ガラス組成を示し、普通角閃石を含むことから、Ta-c に対比した。

生花苗: 第1層および第2層は湧洞沼地域の第2層および第3層と産状および記載岩石学的特徴一致することから、それぞれ Ta-b および Us-b に対比できる。第3層および第4層は共通した記載岩石学的特徴を持ち、火山ガラス片が駒ヶ岳火山先史時代の組成領域を示す（Fig. 6）。これらが 2 m に及ぶ泥炭層下から産出することと、北海道東部まで分布することを考慮すると、駒ヶ岳火山起源の Ko-g が対比の候補となる。第3層および第4層を比較すると、第4層のほうがやや粗粒で連続性が良い産状を示す。よって第4層を Ko-g に対比できる可能性が高い。第3層に駒ヶ岳火山起源であることは確実であるが、対比可能な降下火碎堆積物は見つかっていない。

小紋別: 第1層および第2層は、生花苗地域の第1層および第2層と記載岩石学的特徴がそれぞれ一致することから、Ta-b および Us-b に対比できる。いずれも生花苗地域より厚く粗粒となる。

7. 降下火碎堆積物の分布

今回の調査結果をもとに、各降下火碎堆積物の分布を詳細に明らかにした（Fig. 8）。分布境界線は露頭（試料）で降下火碎堆積物が視認できる範囲、および既存の文献から存在することが判断できる範囲として表現した。

その結果、多くの降下火碎堆積物は從来の報告より広範囲に分布することが判明した。春採湖では駒ヶ岳火山

から西暦 1929 年に噴出した降下火碎堆積物である Ko-a に対比できる降下火山灰層を認定した。駒ヶ岳火山近傍での降下軽石堆積物の分布主軸は東南東方向であるが、噴火後期の降灰は北側に向かい、室蘭・胆振・日高・十勝南部地方に及び、襟裳岬南東沖の太平洋上では汽船が「軽石末のストーム」に遭遇したことが記録されている（根本、1930）。これは軽石質の粉末が船上に激しく降下したことを描写していると解釈でき、降下火碎物をもたらした噴煙が火口から 300 km に及ぶ範囲に到達していたことを示唆する。春採湖における Ko-a の発見は、Ko-a が北海道東部にも広域に分布する可能性を示唆するもので、より詳細な分布を明らかにするための調査が今後必要である。

駒ヶ岳火山起源の Ko-c1（1856 年）は春採湖で検出したのみであった。これまで 1856 年に十勝大津で降灰記録があり（勝井・他、1975），北海道東部で広範囲に分布するとされた（遠藤・他、1989）。しかし徳井（1989）では、北海道東部地域での Ko-c1 の分布は散点的であり、今回の調査でも春採湖で見つかったのみである。Ko-c1 が北海道東部に分布することは確実であるが、後述する同じ駒ヶ岳火山を起源とする Ko-c2 が普遍的に分布するのに比べ、産出は稀である。この原因は Ko-c2 に比べて層厚が薄いことと、19世紀以降北海道東部で活発化した入植や農業活動による耕作や地形改変によって、表層付近の地層が保存されていない可能性がある。

樽前火山起源の Ta-a（1739 年）は調査地域内では十勝太以北の広い範囲に分布する。層厚 2–3 cm で一定しており、火口からの距離による明確な変化を示さない。十勝太より南では急速に薄化する。既存の研究も含めた全体の分布を考慮すると、分布の幅が南北に広いことが特徴である。

駒ヶ岳火山起源の Ko-c2（1694 年）は Ta-a と同様に十勝太以北の広い範囲に分布する。調査地域内ではほぼ層厚 2–3 cm で、十勝太以南では急速に薄化する。厚さ数 cm 未満の泥炭層を介して上位の Ta-a と共に産出することが多く、北海道東部における完新統の主要な鍵層といえる。

樽前火山起源の Ta-b（1667 年）は霧多布以南に分布する。霧多布で散点的に産出し、それ以北では産出しないことから霧多布付近が分布北限である。また生花苗沼から湧洞沼付近で層厚が 5 cm を越える極大値を示すから、火口から約 200 km 離れた地域でも明瞭な分布軸が存在する。また海底での分布も確認されており（古川、2005；Noda et al., 2004 など），分布の延長方向と調和的である。同じ樽前火山起源の Ta-a と比較すると南北方向の幅が狭い分布となっていることが特徴である。

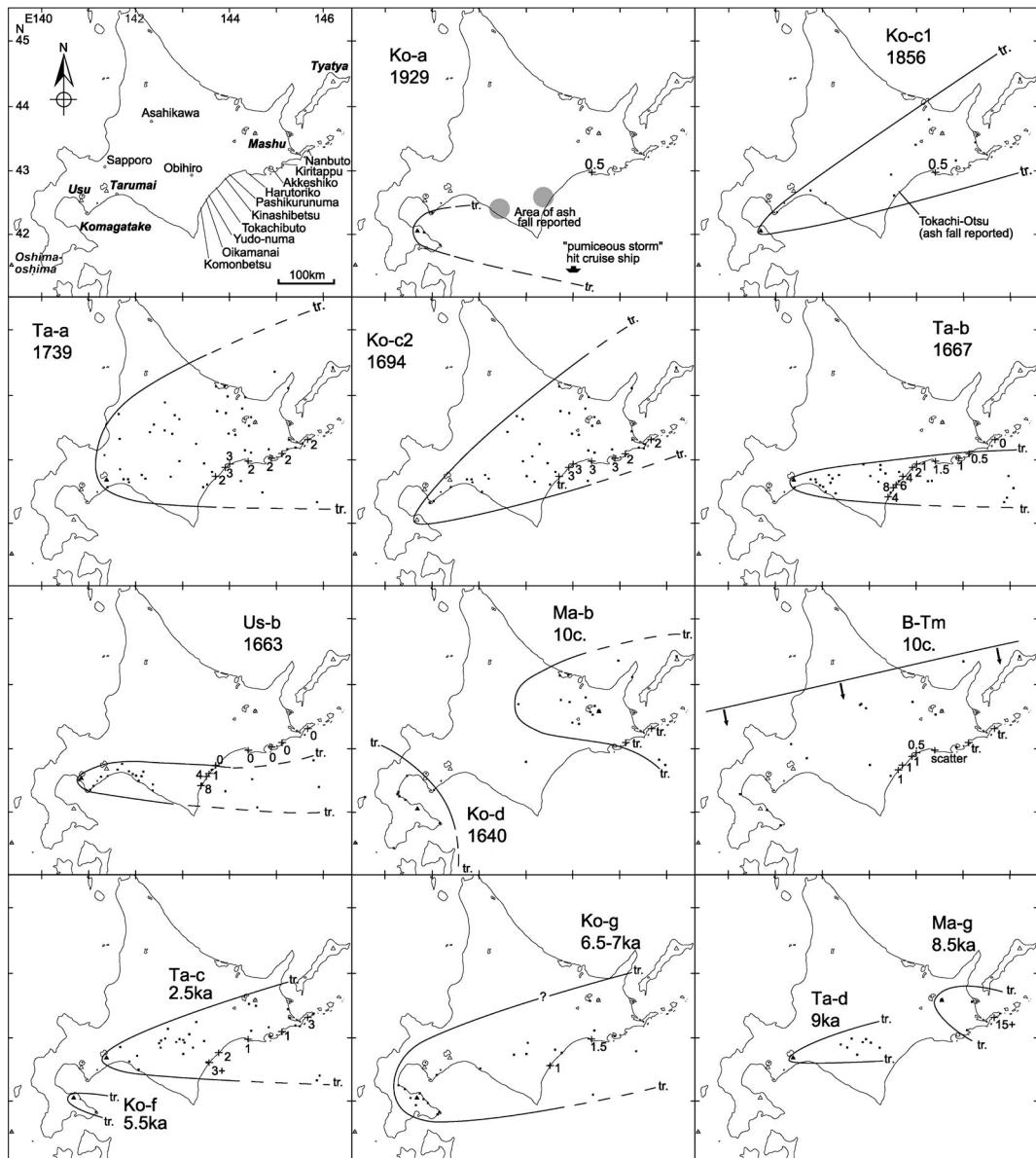


Fig. 8. Dispersal of Holocene pyroclastic fall deposits in Hokkaido. Enclosing line shows area where pyroclastic fall deposits are identified. Points shown as crosses are described in this study and solid squares are referred from literatures as follows; Ko-a: Nemoto (1930), Kozu *et al.* (1932), Ko-c1: Yamada (1958), Endo *et al.* (1989), Tokui (1989), Igarashi (2002), Nakagawa *et al.* (2002); Ta-a: Igarashi and Takahashi (1985), Murata *et al.* (1999), Miyaji *et al.* (2000), Shimada *et al.* (2000), Soeda and Akamatsu (2001), Wada *et al.* (2001), Nishina (2002), Hirakawa (2002), Atwater *et al.* (2004), Noda *et al.* (2004), Furukawa (2005); Ko-c2: Furukawa *et al.* (1997); Ta-b: Tokui (1988b); Us-b: Oba and Kondo (1964), Nakamura and Hirakawa (2002); Ko-d: Miyoshi *et al.* (1985); Ma-b: Katsui (1962); B-Tm: Okuno *et al.* (1999), Nakamura and Hirakawa (2004); Ta-c: Tokui (1988a, b), Igarashi *et al.* (2001); Ko-f: Katsui *et al.* (1989); Ko-g: Kito and Takimoto (1999); Ma-g: Miyata *et al.* (1988); Ta-d: Kondo and Doi (1987). Duplicated references are omitted.

有珠火山起源の Us-b (1663 年) は湧洞沼付近を北限として分布する。層厚が小紋別で極大となることから、層厚主軸はそれ以南にある。小紋別より南側の地域では Us-b の分布状況が明らかになっていない。

駒ヶ岳火山起源の駒ヶ岳 d 降下火碎堆積物（北海道火山灰命名委員会, 1972; 山田, 1951 など。以下、佐々木・他, 1970 に従い Ko-d と略す）は今回の調査地域内では産出せず、これは給源火山から北西に分布するという従来の報告（勝井・他, 1989 など）と調和的である。しかし徳井（1989）は帶広南部で Ko-d を記載しており、今後も注意深い検討が必要である。

摩周火山起源の Ma-b（10 世紀頃）は噴火年代の近い B-Tm と混在する形で霧多布および南部沼に分布する。Ma-b は大雪 あさひだけ 岷山麓や國後島などにも分布し（Nakagawa et al., 2002; 和田・他, 2001），今回の調査により噴出源の南東にも広く分布することが判明した。Ma-b は火山近傍では複数の降下堆積単位からなり、分布主軸も複数存在する（勝井, 1962）。Ma-b の分布はそれらを総合したものであり、分布が広くなった要因であろう。

白頭山火山起源の B-Tm は調査地域のほぼ全域に分布する。東に向かってやや層厚を減じる傾向を示す。春採湖では B-Tm が単層として産出しなかったが、周囲には広く B-Tm が分布すること、有機質シルト中に白頭山火山起源の火山ガラス片を含むことから、春採湖地域にも降灰した可能性が高い。

樽前火山起源の Ta-c（約 2.5 ka）は調査地域内の広範囲に分布する。徳井（1988a）によると北側で厚くなる傾向があり、今回の調査でも南部沼で 3 cm と厚くなる。

駒ヶ岳火山起源の Ko-g（6.5–7 ka）は深くまで試料を取れた春採湖と生花苗で分布を確認した。北海道東部の広い範囲から分布の報告があり（中村・他, 2002；中村・平川, 2004），分布の幅は広いものの、遠方では主軸を示すような厚層部は検出されていない。

摩周火山起源の Ma-g に対比した降下軽石堆積物は南部沼において軽石質火山礫を主体とする粗粒な岩相を示した。南部沼は宮田・他（1988）による Ma-g の分布主軸延長上にあたり、分布が連続している可能性が高い。

かつて北海道東部地域では完新世の広域降下火碎堆積物として、雌阿寒 a および摩周 a 火山噴出物（北海道火山灰命名委員会, 1972, 1979；山田, 1958），矢臼別層（瀬尾・他, 1963），常呂火山灰（遠藤・上杉, 1972）などが報告され、これらの給源火山として雌阿寒および摩周火山が候補として挙げられた。その後、それらはいずれも西南北海道の火山を起源とする Ta-a, Ko-c2, Ta-c, および B-Tm などに対比された（遠藤・他, 1989；遠藤・他, 1996；徳井, 1989）。今回の調査でも多くの降下火碎堆積

物は西南北海道や白頭山火山起源であり、北海道東部の火山を起源とする完新世の降下火碎堆積物は摩周火山起源の Ma-b および Ma-g のみであった。

8. 降下火碎堆積物の噴出量

北海道東部地域における降下火碎堆積物の分布および層厚を考慮すると、従来の噴出量見積もりは過小評価である可能性が高い。これまで北海道の降下火碎堆積物について、噴出源から数 10 km の範囲での降下火碎堆積物の層厚減衰率から遠方での分布面積と層厚を外挿して噴出量を求めたものである（たとえば鈴木, 1981）。遠藤・他（1989）は樽前火山起源の Ta-a および駒ヶ岳火山起源の Ko-c1 と Ko-c2 について、北海道東北部での分布を明らかにして、従来の手法による見積もりが過小である可能性を指摘した。しかし各降下火碎堆積物の層厚に関する検討は充分ではなかった。今回の調査では Ta-b, Ma-b, Us-b, Ta-c, Ma-g については従来より広く分布することを明らかにした。また得られた各降下火碎堆積物の層厚は、各地域ごとに複数の地点で調査した結果にもとづいており、層厚に関する信頼性が高いことが期待できる。よって新たに判明した分布および層厚をもとに降下火碎堆積物の噴出量を全面的に見直す必要がある。これについては改めて別稿で論じる。

9. ま と め

北海道東部太平洋沿岸地域の低湿地や海跡湖には大規模な地震の記録である津波堆積物と、爆発的噴火により飛來した広域に分布する降下火碎堆積物の双方が良好に記録されていることが判明した。同一地域内で多数の地点を調査することにより、層厚変化や再移動の評価も含めて、確度の高い降下火碎堆積物の層厚分布を明らかにし、詳細な時間軸を示した。産出した降下火碎堆積物は鉱物組み合わせ、火山ガラス組成、および層序関係などを総合して給源火山と堆積年代を決定した。西南北海道の火山を起源とする Ta-a, Ko-c2, Ta-c, および朝鮮半島－中国大陸起源の B-Tm は調査地域の全域に分布しており、その層厚分布を詳細に明らかにした。また Us-b および Ta-b の分布は、今回の調査範囲内にそれぞれの降下火碎堆積物の分布北限があることを明らかにした。

今後は北海道東部～北部の内陸部や太平洋などの周辺海域についても、より精度の高い分布情報を獲得していく必要がある。また泥炭層や有機質シルト層中に、降下火碎堆積物とともに挟在する津波堆積物は浸食基底を持つことから（七山・他, 2000 など）、津波堆積物によって泥炭層、有機質シルト層および挟在する降下火碎堆積物は欠損している可能性もある。よって泥炭層および有機

質シルト層について、地層の保存性や堆積速度などを検討することも必要である。本研究で明らかにした北海道東部沿岸地域における火碎物の降灰履歴と、津波堆積物が示す地震履歴を総合的に判断し、その時間的空間的関係を理解することは今後の重要な課題である。

謝 辞

本研究にあたって産業技術総合研究所活断層研究センターの佐竹健治氏に全面的な協力を受けた。現地調査は明治コンサルタント(株)の重野聖之氏、牧野彰人氏、北海道開拓記念館の添田雄二氏の献身的な協力によるところが大きい。EPMA分析では奥山康子、宮崎一博、塚本斉、斎藤元治、宮城礎治、清水徹、以上の産業技術総合研究所地質調査総合センター諸氏の手を煩わせた。分析手法の発展では和田恵二氏(旭川教育大学)、標準試料の採取では宇井忠英氏(当時北海道大学)、作図では川村喜一郎氏(深田地質研究所)、堆積速度については芝原暁彦氏(筑波大学)、英文要旨はJ. Bandibas氏(産業技術総合研究所)にそれぞれ指導していただいた。編集委員の小林哲夫氏(鹿児島大学)、片岡香子氏(新潟大学)ならびに匿名の査読者により、本稿は大幅に改善された。

引 用 文 献

- 荒牧重雄(1979)火山碎屑物と火碎岩。地球科学選書火山(横山 泉・荒牧重雄・中村一明編), 142–155, 岩波書店。
- Atwater, B. F., Furukawa R., Hemphill-Haley, E., Ikeda Y., Kashima K., Kawase K., Kelsey, H., Moore, A., Nanayama F., Nishimura Y., Odagiri S., Ota Y., Park S., Satake K., Sawai Y. and Shimokawa K. (2004) Seventeenth-century uplift in eastern Hokkaido, Japan. *Holocene*, **14**, 487–501.
- DeMets, C. (1992) Oblique convergence and deformation along the Kuril and Japan Trenches. *J. Geophys. Res.*, **97**, 17615–17625.
- 遠藤邦彦・上杉 陽(1972)オホーツク海沿岸トコロ海岸平野の地形・地質。「常呂」(東京大学文学部考古学研究室編), 493–504.
- 遠藤邦彦・隅田まり・宇野リベカ(1989)北海道東部の完新世後期のテフラ層序と給源火山。地学雑誌, **98**, 506–510.
- 遠藤邦彦・隅田まり・星住リベカ(1996)北海道東部、オホーツク海沿岸に分布するトコロ(常呂)火山灰。第四紀露頭集—日本のテフラ, 104.
- Fisher, R. V. (1961) Proposed classification of volcaniclastic sediments and rocks. *Geol. Soc. America Bull.*, **72**, 1409–1414.
- Fisher, R. V. (1963) Bubble-wall texture and its significance. *J. Sed. Petrol.*, **33**, 224–227.
- 福沢仁之・塚本すみ子・塚本 斉・池田まゆみ・岡村 真・松岡裕美(1998)年縞堆積物を用いた白頭山一苦小牧火山灰(B-Tm)の降灰年代の推定. *LAGUNA(汽水域研究)*, **5**, 55–62.
- 古川竜太(2005) GH04 航海で得られた北海道東部沖海底堆積物中の火山灰。千島弧一東北日本弧会合部の海洋地質学的研究。平成16年度研究概要報告書一根室沖・日高沖海域一、地質調査総合センター速報 **33**号, 98–102.
- 古川竜太・吉本充宏・山縣耕太郎・和田恵治・宇井忠英(1997)北海道駒ヶ岳火山は1694年に噴火したか?—北海道における17~18世紀の噴火年代の再検討—。火山, **42**, 269–279.
- Furuta T., Fujioka K. and Arai F. (1986) Widespread submarine tephras around Japan—petrographic and chemical properties. *Marine Geology*, **72**, 125–142.
- 平川一臣(2002)雨竜沼湿原の成立に関する地形・地質学的検討。財団法人前田一步園財団創立20周年記念論文集, 第7章, 163–169.
- 北海道火山灰命名委員会(編集代表佐々木龍男)(1972)北海道の火山灰分布図。北海道農業試験場, 60万分の1分布図1葉, 20万分の1分布図6葉, 説明書19p.
- 北海道火山灰命名委員会(佐々木龍男・片山雅弘・後藤計二・富岡悦郎・天野洋司・勝井義雄・田村昇一・菊地晃二・木村方一・湊 正雄・北川芳男・春日井昭・新居田清信・柏原 信)(1979)北海道の火山灰分布図。60万分の1分布図, 北海道。
- 五十嵐八枝子(2002)別寒辺牛湿原の植生変遷史。財団法人前田一步園財団創立20周年記念論文集, 43–50.
- 五十嵐八枝子・高橋伸幸(1985)北海道中央高地、大雪山における高地湿原の起源とその植生変遷(I)。第四紀研究, **24**, 99–109.
- 五十嵐八枝子・五十嵐恒夫・遠藤邦彦・山田 治・中川光弘(2001)北海道東部根室半島・齒舞湿原と落石岬湿原における晩氷期以降の植生変遷史。植生史研究, **10**, 67–79.
- 磯部一洋・横田節哉・羽坂俊一・佐藤卓見(1999)北海道東部太平洋沿岸に連なる海跡湖を訪ねて。地質ニュース, **534**, 7–18.
- 勝井義雄(1962)5万分の1地質図幅屈斜路湖。北海道開発庁, 42 p.
- 勝井義雄・大場与志男・曾屋龍典(1978)噴火史と噴火予測。火山, **23**, 41–52.
- 勝井義雄・横山 泉・藤田隆男・江原幸男(1975)駒ヶ岳一火山地質・噴火史・活動の現況および防災対策。北海道防災会議, 札幌, 194 p.
- 勝井義雄・篠沢達也・知本康男・山田裕丈(1986)北海道駒ヶ岳の歴史時代の火碎流。文部省科学研究費報告書「火山噴火に伴う乾燥粉体流(火碎流等)の特質と災害」, 91–113.
- 勝井義雄・鈴木建夫・曾屋龍典・吉久康樹(1989)北海道駒ヶ岳火山地質図。火山地質図5, 1:50000, 地質調査所。
- Kelsey, H.・佐竹健治・澤井祐紀・Sherrod, B.・下川浩一・宍倉正展(2002)北海道東部における完新世後期の急激な海岸隆起の繰り返し。活断層・古地震研究報告, 第2号, 223–233.
- 紀藤典夫・瀧本文生(1999)完新世におけるブナの個体群增加と移動速度—北海道南西部の例—。第四紀研

- 究, **38**, 297–311.
- 近堂祐弘・土肥 誠 (1987) 樽前 C1 火山灰の分布・層序と強磁性鉱物の化学組成ーとくに十勝平野の十勝 C1 火山灰との関連性についての検討ー. ペトロジスト, **31**, 2–13.
- 神津淑祐・他 9 名 (1932) 駒ヶ岳大爆發研究報文. 学術研究報告, 第十五号, 斎藤報恩會出版, 仙臺, 246 p.
- Larsen, G. (1981) Tephrochronology by microprobe glass analysis. In *Tephra Studies* (Self, S. and Sparks, R. S. J. eds), 95–102. D. Reidel Publishing Company, Holland.
- 町田 洋 (1996) 泥炭地における最近 1000 年間のテフラ—クッチャロカルデラ美留和一. 第四紀露頭集—日本のテフラ, 109.
- 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.
- Machida H. and Arai F. (1983) Extensive ash falls in and around the Sea of Japan from large late Quaternary eruptions. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **18**, 151–164.
- 町田 洋・新井房夫 (1992) 火山灰アトラス. 東京大学出版会, 276 p.
- 町田 洋・新井房夫・森脇 広 (1981) 日本海を渡って きたテフラ. 科学, 562–569.
- 宮地直道・中川光弘・吉田真理夫 (2000) 羅臼岳火山における最近 2200 年間の噴火史. 火山, **45**, 75–85.
- 宮田雄一郎・山口昇一・矢崎清貴 (1988) 計根別地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所, 77 p.
- 三好真澄・太田陽子・澤 祥・今泉俊文・鹿島 薫 (1985) 北海道奥尻島の完新世海成段丘. 地理学評論, **58A**, 596–608.
- 村田泰輔・五十嵐八枝子・村山雅史・中村俊夫・岡村 真・松岡裕美・許成基・白河利夫 (1999) 網走湖の過去 2500 年間の環境変遷・その 2—珪藻および花粉化石群集に基づく古環境の復元ー. 第四紀学会講演予稿集, **29**, 50–51.
- 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., Ishizuka Y., Kudo T., Yoshimoto M., Hirose W., Ishizaki Y., Gouchi N., Katsui Y., Solovyow, A. W., Steinberg, G. S. and Abdurakhmanov, A. I. (2002) Tyatya Volcano, southwestern Kuril arc: recent eruptive activity inferred from widespread tephra. *The Island Arc*, **11**, 236–254.
- 中村有吾・平川一臣 (2002) 有珠山 1663 年噴火と有珠 b テフラに関する新知見. 歴史地震, 第 18 号, 123–136.
- 中村有吾・平川一臣 (2004) 北海道駒ヶ岳起源の広域テフラ, 駒ヶ岳 g テフラの分布と噴出年代. 第四紀研究, **43**, 189–200.
- 中村有吾・片山美紀・平川一臣 (2002) 水和の影響を除去した北海道の完新世テフラガラス屈折率. 第四紀研究, **41**, 11–22.
- 中田 高・島崎邦彦 (1997) 活断層研究のための地層抜き取り装置 (Geo-slicer). 地学雑誌, **106**, 59–69.
- 七山 太・佐竹健治・下川浩一・重野聖之・古川竜太 (1999) 堆積学の手法に基づく, 千島海溝沿岸域における古津波? 履歴調査—霧多布湿原における研究例ー. 平成 10 年度活断層・古地震研究調査概要報告書, 3–17.
- 七山 太・佐竹健治・下川浩一・古川竜太・重野聖之 (2000) イベント堆積物を用いた千島海溝沿岸域の津波の週上規模と再来間隔の検討. 平成 11 年度活断層古地震研究調査概要報告書, 1–17.
- 七山 太・牧野彰人・佐竹健治・古川竜太・横山芳春・中川 充 (2001a) 鉛路市春採湖コア中に認められる, 千島海溝沿岸域における過去 9000 年間に生じた 20 層の津波イベント堆積物. 活断層・古地震研究報告, No. 1, 233–249.
- 七山 太・重野聖之・牧野彰人・佐竹健治・古川竜太 (2001b) イベント堆積物を用いた千島海溝沿岸域における津波の週上規模の評価—根室長節湖, 床潭沼, 馬主来沼, キナシベツ湿原および湧洞沼における研究例ー. 活断層・古地震研究報告, No. 1, 251–272.
- 七山 太・重野聖之・三浦健一郎・牧野彰人・古川竜太・佐竹健治・斎藤健一・嵯峨山 積・中川 充 (2002) イベント堆積物を用いた千島海溝沿岸域における先史～歴史津波の週上規模の評価—十勝海岸地域の調査結果と根釧海岸地域との広域比較ー. 活断層・古地震研究報告, No. 2, 209–222.
- 七山 太・重野聖之・添田雄二・古川竜太・岡橋久世・斎藤健一・横山芳春・佐竹健治・中川 充 (2003) 北海道東部, 十勝海岸南部地域における 17 世紀の津波痕跡とその週上規模の評価. 活断層・古地震研究報告, No. 3, 297–314.
- Nanayama F., Satake K., Furukawa R., Shimokawa K., Atwater, B. F., Shigeno K. and Yamaki S. (2003) Unusually large earthquakes inferred from tsunami deposits along the Kuril Trench. *Nature*, **424**, 660–663.
- 根本廣記 (1930) 駒ヶ岳爆發噴火調査報告. 駿震時報, 第 4 卷, 第 2 号, 71–139.
- 西村裕一・宮地直道・吉田真理夫・村田泰輔・中川光弘 (2000) 北海道霧多布湿原の泥炭層中から発見された 1843 年の津波堆積物. 第四紀研究, **39**, 451–460.
- 仁科健二 (2002) サロマ湖湖底に集積する堆積物の推量. 北海道立地質研究所報告, **73**, 205–208.
- Noda A., Tsujino T., Furukawa R. and Yoshimoto N. (2004) Character, provenance, and recurrence intervals of Holocene turbidites in the Kushiro Submarine Canyon, eastern Hokkaido forearc, Japan. *Mem. Geol. Soc. Japan*, **58**, 123–135.
- 大場与志男・近堂祐弘 (1964) 有珠火山の降下軽石堆積物について. 火山, **9**, 75–86.
- 岡崎由夫・伊藤裕三・伊藤俊彦・東海林明雄・岩瀬政吉・山城準一 (1988) 地形・地質・水質部門. 春採湖調査会編「春採湖及び周辺の環境保全基礎調査報告書」, 鉛路市, 12–56.
- 奥野 充・吉本充宏・荒井健一・中村俊夫・宇井忠英・和田恵治 (1999) 北海道駒ヶ岳火山, Ko-f テフラの加速器 14C 年代. 地質雑誌, **105**, 364–369.
- 佐々木竜男・片山雅弘・音羽道三・天野洋司 (1970) 渡島半島の火山灰について. 北海道農業試験場土性調査報告, 第二十編, 渡島支庁管内土性調査報告, 255–286.
- 佐々木竜男・片山雅弘・富岡悦郎・佐々木清一・矢沢正士・山田 忍・矢野義治・北川芳男 (1971) 北海道に

- おける腐植質火山灰の編年に関する研究. 第四紀研究, **10**, 117–123.
- 瀬尾春雄 (1951) 北海道に於ける農牧適地の土壤地帯概説. 北海道農業試験場土性調査報告, 第1編, 157 p.
- 瀬尾春雄・佐々木竜男・富岡悦郎・後藤計二・片山雅弘・天野洋司 (1963) 主としてカムイヌプリ岳火山灰の分布について. 北海道農業試験場土性調査報告, 第13編, 169–197.
- 瀬尾春雄・富岡悦郎・片山雅弘 (1965) 石狩国南部および胆振国東部(一部) 土性調査報告—石狩支庁管内(市を含む)—. 北海道農業試験場土性調査報告, 第15編, 242 p.
- 瀬尾春雄・後藤計二・天野洋司・佐々木竜男・富岡悦郎 (1968) 胆振国土性調査報告—胆振支庁管内(市を含む)—. 北海道農業試験場土性調査報告, 第18編, 294 p.
- 重野聖之・七山 太・廣田 眞 (1999) 塩ビパイプと速乾性ボンドを用いた未固結砂礫の定方位試料作成法. 地質ニュース, **542**, 39–45.
- 嶋田智恵子・村山雅史・青木かおり・中村俊夫・長谷川四郎・大場忠道 (2000) 珪藻分析に基づく南西オホーツク海の完新世古海洋環境復元. 第四紀研究, **39**, 439–449.
- 庄司貞雄・増井淳一 (1974) 北海道上川郡標茶町のカムイヌプリ岳火山灰土壤の¹⁴C年代. 一日本の第四紀層の¹⁴C年代(97)ー. 地球科学, **28**, 101.
- 添田雄二・赤松守雄 (2001) 北海道東部サロマ湖周辺域における10~17世紀の海水準変動. 第四紀研究, **40**, 423–430.
- 添田雄二・七山 太 (2005) 北海道東部太平洋沿岸, 春採湖コア中に認められる急激な古環境変化と巨大地震津波との関係. 地学雑誌, **114**, 626–630.
- 添田雄二・七山 太・重野聖之・古川竜太・熊崎農夫博・石井正之 (2004) 北海道東部太平洋沿岸域, 史跡国泰寺跡および汐見川低地において認定された先史時代の巨大津波イベント—津波堆積物認定の際の堆積学的解析と珪藻遺骸分析併用的重要性ー. 地質学論集, **58**, 63–75.
- 曾屋龍典・佐藤博之 (1980) 千歳地域の地質. 地域地質研究報告(五万分の一図幅), 地質調査所, 92 p.
- Stuiver, M. and Braziunas, T. F. (1993) Modeling atmospheric ¹⁴C influences and ¹⁴C ages of marine samples to 10000 BC. *Radiocarbon*, **35**, 137–189.
- 鈴木建夫 (1981) 降下火碎堆積物の“層厚一面積”曲線. 火山, **26**, 9–23.
- 鈴木正章 (1994) 恵庭市ユカンボシE9遺跡における完新世後期のテフラ層序. 北海道恵庭市発掘調査報告書, 118–125.
- 徳井由美 (1988a) 道東地域における樽前C火山灰の分布(演旨). 日本第四紀学会講演要旨集, No. 18, 182–183.
- 徳井由美 (1988b) 晚遺跡の地質. 帯広・曉遺跡3, 帯広市埋蔵文化財調査報告第7冊, 5–8.
- 徳井由美 (1989) 北海道における17世紀以降の火山噴火とその人文環境への影響. お茶の水地理, **30**, 27–33.
- 徳井由美 (1993) 近世の北海道を襲った火山噴火. 火山灰考古学(新井房夫編)古今書院, 194–206.
- 宇井忠英・吉本充宏・古川竜太・石塚吉浩・吉田真理夫・宮地直道・勝井義雄・紀藤典夫・雁沢好博・野上健治 (1997) 北海道駒ヶ岳1996年3月の噴火. 火山, **42**, 141–151.
- 浦上啓太郎・山田 忍・長沼祐二郎 (1933) 北海道における火山灰に関する調査(第一報)東部胆振国における火山灰の分布に就いて. 火山, **1**, 44–60.
- 和田恵治・中村瑞恵・奥野 充 (2001) 旭岳の表層にみられる広域火山灰の化学組成とその給源火山の特定. 北海道教育大学大雪山自然教育研究施設研究報告, **35**, 9–18.
- Westgate, J. A. and Evans, M. E. (1978) Compositional variability of Glacier Peak tephra and its stratigraphic significance. *Can. J. Earth Sci.*, **15**, 1554–1567.
- 山田 忍 (1940) 火山性地土性調査法に就いて(第一報). 日本土壤肥料学雑誌, **14**, 673–702, 747–762.
- 山田 忍 (1951) 火山性地土性調査法と北海道に於ける火山性土壤. 北海道農業試験場報告, **44**, 1–100.
- 山田 忍 (1958) 火山灰堆積状態から見た沖積世における北海道火山の火山活動に関する研究. 地団研専報, **8**, 1–40.
- 横山 泉・勝井義雄・大場与志男・江原幸男 (1973) 有珠山一火山地質・噴火史・活動の現況および防災対策. 北海道防災会議, 札幌, 254 p.

(編集担当 小林哲夫)

Table A1. Major element analyses of glass shards in volcaniclastic deposits in this study.
 Result for each oxide is shown as mean and deviation of normalized weight % and total
 (*) is raw sum of analysis. N** is number of analysed glass shard.

sample	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total*	N**
Nanbuto(NB-GS1)											
layer1_Ta-a	76.40 0.61	0.35 0.04	12.29 0.32	2.07 0.26	0.05 0.02	0.41 0.08	2.19 0.20	3.66 0.31	2.59 0.12	96.50 2.17	48
layer2_Ko-c2	75.92 0.30	0.45 0.03	12.78 0.20	2.29 0.07	0.12 0.03	0.51 0.02	2.32 0.13	3.61 0.16	2.01 0.08	92.27 1.46	10
layer3_B-Tm	72.31 3.09	0.26 0.06	12.39 1.79	4.15 0.41	0.10 0.03	0.05 0.04	0.53 0.32	4.98 0.45	5.23 0.68	94.19 1.52	23
layer3_Ma-b	74.76 0.58	0.64 0.01	13.21 0.23	3.27 0.06	0.14 0.01	0.71 0.04	2.94 0.10	3.45 0.65	0.87 0.08	95.84 1.50	3
layer4_Ta-c	76.13 0.71	0.32 0.03	12.96 0.41	1.97 0.11	0.07 0.02	0.35 0.04	2.34 0.41	3.57 0.22	2.31 0.17	96.65 1.85	10
layer5_Ma-g	72.42 1.03	0.61 0.06	14.25 0.25	3.40 0.38	0.17 0.03	0.94 0.13	3.54 0.44	3.92 0.17	0.73 0.08	93.74 1.79	10
Kiritappu(MG-GS1)											
layer1_Ta-a	77.47 0.72	0.32 0.06	12.22 0.28	2.41 0.32	0.05 0.04	0.40 0.05	2.09 0.22	2.77 0.16	2.26 0.13	96.30 0.58	10
layer2_Ko-c2	77.38 0.61	0.45 0.05	11.96 0.50	2.80 0.12	0.09 0.07	0.47 0.04	2.37 0.16	2.66 0.14	1.82 0.04	95.15 0.94	9
layer3_Ma-b	75.99 1.18	0.59 0.04	12.93 0.33	3.45 0.26	0.11 0.07	0.69 0.08	3.04 0.12	2.42 1.12	0.76 0.08	94.95 1.89	17
layer3_B-Tm	73.11 2.33	0.28 0.04	12.02 1.37	4.07 0.23	0.09 0.03	0.04 0.02	0.46 0.23	4.97 0.30	4.98 0.40	94.22 2.42	15
layer4_Ta-c	76.77 0.57	0.32 0.04	12.71 0.30	1.93 0.07	0.07 0.02	0.37 0.03	2.11 0.24	3.37 0.10	2.36 0.09	96.66 0.76	12
Akkeshiko(N26)											
layer1_Ta-a	76.69 0.65	0.30 0.04	11.98 0.42	1.93 0.15	0.05 0.03	0.38 0.05	2.17 0.26	3.91 0.30	2.59 0.13	96.93 1.66	43
layer2_Ko-c2	76.32 0.52	0.41 0.04	11.80 0.24	2.30 0.09	0.08 0.03	0.49 0.06	2.42 0.17	4.13 0.34	2.04 0.05	95.91 2.91	31
layer3_Ta-b	76.24 0.82	0.33 0.05	11.98 0.23	2.16 0.34	0.05 0.03	0.43 0.08	2.30 0.27	3.97 0.19	2.54 0.12	96.47 2.73	42
Harutoriko(H3)											
layer1_Ko-a	77.97 1.15	0.45 0.03	12.67 0.83	2.19 0.17	0.10 0.02	0.47 0.08	2.52 0.55	1.59 0.07	2.03 0.18	94.04 1.78	65
layer2_Ko-c1	76.57 0.16	0.40 0.03	11.86 0.09	2.25 0.05	0.08 0.02	0.46 0.02	2.32 0.06	3.96 0.09	2.11 0.05	95.83 2.99	28
layer3_Ta-a	76.62 0.57	0.31 0.03	12.04 0.33	2.02 0.18	0.06 0.02	0.38 0.04	2.13 0.21	3.79 0.14	2.65 0.11	97.48 1.79	29
layer4_lower_Ko-c2	76.06 0.27	0.41 0.03	12.10 0.22	2.37 0.07	0.08 0.02	0.49 0.03	2.43 0.14	4.02 0.06	2.04 0.03	96.43 1.74	33
layer5_Ta-b	76.06 0.58	0.34 0.04	12.20 0.18	2.23 0.22	0.05 0.02	0.42 0.05	2.26 0.17	3.85 0.08	2.59 0.10	96.69 2.71	30
1-6cm beneath layer5_	75.95 1.53	0.21 0.14	12.59 1.15	2.04 1.06	0.09 0.04	0.13 0.13	1.01 0.56	3.66 0.72	4.32 0.68	93.62 1.60	5
layer6_Ta-c	76.57 0.51	0.31 0.06	12.07 0.18	1.99 0.10	0.06 0.02	0.38 0.08	2.14 0.13	3.92 0.12	2.57 0.07	95.04 2.14	35
layer7_Ko-g	74.26 0.39	0.53 0.03	12.58 0.15	2.86 0.16	0.10 0.02	0.65 0.05	2.82 0.13	4.18 0.10	2.02 0.05	95.43 2.23	36
Pashikurunuma(PK-GS1)											
layer1_Ta-a	76.99 0.48	0.35 0.03	12.52 0.10	1.85 0.43	0.07 0.03	0.37 0.02	1.94 0.18	3.46 0.09	2.46 0.09	96.44 0.98	16
layer2_Ko-c2	76.24 0.65	0.47 0.05	12.63 0.26	2.33 0.07	0.10 0.02	0.52 0.07	2.37 0.22	3.45 0.37	1.89 0.12	95.81 2.00	10
layer3_Ta-b	76.53 0.76	0.34 0.03	12.75 0.65	2.07 0.18	0.06 0.02	0.40 0.03	2.06 0.14	3.31 0.28	2.49 0.27	96.87 0.90	17
layer4_B-Tm	76.99 1.10	0.11 0.04	11.73 1.03	1.69 1.23	0.05 0.01	0.08 0.06	0.79 0.33	3.97 1.11	4.60 0.42	94.08 1.96	37

Table A1 (continued)

sample	SiO ₂ *	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	raw total	N**
Kinashibetsu(Kn-3)											
layer2_Ta-a	76.62 0.71	0.31 0.04	12.01 0.35	1.98 0.25	0.05 0.02	0.39 0.07	2.22 0.27	4.00 0.08	2.42 0.13	97.51 1.41	35
layer3_Ko-c2	76.40 0.27	0.42 0.03	11.85 0.08	2.30 0.06	0.09 0.02	0.49 0.02	2.39 0.09	4.18 0.16	1.88 0.05	96.10 2.83	31
layer4_Ta-b	76.24 1.12	0.33 0.03	12.11 0.49	2.12 0.30	0.06 0.03	0.43 0.12	2.38 0.45	3.96 0.07	2.37 0.15	97.72 1.54	30
layer5_B-Tm	77.42 1.27	0.15 0.11	11.58 0.60	1.52 1.11	0.05 0.02	0.08 0.10	0.84 0.30	4.19 0.68	4.16 0.35	94.52 2.25	72
Tokachibuto(Tkb-01)											
layer2_Ta-a	76.78 0.76	0.34 0.04	11.97 0.28	1.89 0.48	0.06 0.03	0.48 0.30	2.22 0.30	3.79 0.13	2.47 0.15	96.20 1.65	21
layer2_Ko-c2	76.97 0.61	0.43 0.03	11.78 0.14	2.06 0.28	0.09 0.01	0.47 0.02	2.30 0.16	3.92 0.13	1.98 0.05	97.84 0.73	3
layer3_Ta-b	76.31 1.06	0.37 0.05	12.31 0.38	1.92 0.34	0.06 0.03	0.44 0.15	2.34 0.28	3.89 0.14	2.35 0.14	96.05 0.59	49
layer4_B-Tm	77.60 0.97	0.12 0.05	12.21 0.27	1.02 0.57	0.05 0.03	0.08 0.04	0.96 0.32	3.72 0.47	4.23 0.50	93.84 0.75	51
layer5_Baitoushan?	76.92 1.71	0.11 0.07	12.28 0.46	1.26 1.00	0.06 0.03	0.07 0.04	1.02 0.30	3.80 0.71	4.47 0.67	93.74 1.83	47
layer6_Ta-c	76.45 0.45	0.32 0.02	12.44 0.24	1.72 0.16	0.06 0.02	0.38 0.04	2.22 0.09	3.94 0.17	2.48 0.12	94.59 1.59	80
Yudonuma(YDN1)											
layer2_Ta-b	75.75 1.19	0.36 0.07	12.08 0.33	2.25 0.42	0.07 0.03	0.46 0.12	2.49 0.45	4.05 0.11	2.49 0.13	97.61 0.82	26
layer3_Us-b	76.75 0.12	0.14 0.02	12.74 0.08	1.93 0.07	0.13 0.02	0.26 0.05	1.90 0.04	4.84 0.09	1.32 0.03	96.41 1.46	32
layer5_B-Tm	77.28 0.58	0.10 0.03	11.86 0.26	1.39 0.32	0.03 0.02	0.06 0.05	0.93 0.12	4.03 0.35	4.32 0.35	94.61 2.06	19
layer6_Ta-c	76.39 1.10	0.33 0.05	11.98 0.39	2.14 0.38	0.05 0.02	0.45 0.19	2.30 0.32	4.01 0.17	2.35 0.13	96.89 2.45	46
Oikamanai(Oi-B-1)											
layer3_Komagatake?	74.40 0.52	0.58 0.04	12.77 0.28	2.58 0.23	0.11 0.02	0.68 0.07	3.01 0.22	4.04 0.16	1.82 0.07	95.81 1.26	71
layer4_Ko-g	74.54 0.69	0.59 0.04	12.73 0.34	2.49 0.24	0.11 0.02	0.68 0.06	2.98 0.28	4.04 0.19	1.84 0.07	96.36 1.32	76