

## 南西北海道，羊蹄火山の完新世噴火史の再検討

上澤真平\*・中川光弘\*・江草匡倫\*

(2010年11月24日受付，2011年4月8日受理)

## Reinvestigation of Holocene Eruptive History of Yotei Volcano, Southwest Hokkaido, Japan

Shimpei UESAWA\*, Mitsuhiro NAKAGAWA\* and Masamichi EGUSA\*

We carried out the geological and petrological investigations around the summit area of Yotei Volcano. Four eruptive crater groups are recognized: Summit, Hinangoya, Niseko and Kitayama in ascending order. They erupted six pyroclastic deposits (from S-6 to S-1 in ascending order) and five lava flows. Lava effusion occurred from the Hinangoya, Niseko and Kitayama crater groups. These activities were mainly Strombolian. Whole-rock chemistry of juvenile materials is distinct among four crater groups, indicating distinct magma system has been active beneath different craters. The radiocarbon age from unit S-2 fallout deposit from the Kitayama crater group was obtained as  $4010 \pm 30$  cal. yBP. On the basis of estimated accumulation rate of soil layers, the latest (S-1) and S-4 eruptions from Kitayama group are considered to have occurred in  $\sim 2,500$  yBP and  $> 5,000$  yBP, respectively. Eruptive deposits of Kitayama crater group do not show the evidence of interval more than several thousand years between unit S-4 and S-5. Thus, it could be concluded that the Kitayama group started its activity from mid of Holocene. Eruptive volumes of each eruptive group except for the Summit crater group range from 0.1 to  $0.18 \text{ km}^3$ . After the last magmatic eruption in 2.5 ka, there are no evidences of eruptions from the Kitayama group, indicating that activity of the group has finished. However, considering newly revealed eruption history of the summit area, it should be noted that next eruptive group with distinct magma system might start its activity from another crater.

**Key words:** Holocene, tephra, eruptive history, Yotei Volcano

## 1. はじめに

羊蹄火山は東北日本弧の北端である南西北海道の中央部に位置する標高 1,898 m の成層火山である (Figs. 1, 2). 勝井 (1956) は羊蹄火山の地質と岩石を報告し，山頂の火口群が層位的に上位であることを示し，その他に複数の側火山の存在も指摘した。柏原・他 (1976) は羊蹄火山麓で羊蹄火山起源のテフラ層序を編年し，その中で最上位としたテフラ (北岡軽石・スコリア層: K-Ps; 柏原・他, 1976) 直下の土壌の放射性炭素年代値が  $5,930 \pm 180$  yBP (佐々木・他, 1971) であると報告した。この年代がそれまでに確認されてきた羊蹄火山の最新の噴火年代であった。そして，その結果を受けて本火山は過去 1 万年以内に火山噴火があったとされ，気象庁により活火山に区分されている (気象庁 (編), 2005)。しかしながら，近年の研究で，K-Ps は側火山 (富士見火砕丘) から

の噴出物であること，また K-Ps 直下の土壌 ( $10,780 \pm 40$  yBP; 星住, 2004) や直下の火砕流堆積物中の炭化木 ( $11,570 \pm 70$  cal. yBP; 廣瀬・他, 2007) から，従来の値より古い年代値が報告されている。一方で，宇野 (1989) は側火口のひとつである南火口から噴出した南火口溶岩の下位の材木片から  $10,200 \pm 190$  yBP の年代値を報告した。したがって，これまで考えられてきたように K-Ps が羊蹄火山の最新の噴火堆積物かどうか，さらに羊蹄火山の完新世の噴火実績に関しては再検討が必要となってきた。

これまでの研究は勝井 (1956) を除き，山麓部のテフラ層序の検討が主体であり，それらのテフラと火山体の発達過程との対比は，一部の側火山を除き行われていない。勝井 (1956) が指摘したように，山頂部には新鮮な複数の火口地形が認められ，完新世の噴火活動の可能性

\* 〒060-0810 札幌市北区北 10 条西 8 丁目  
北海道大学大学院理学院自然史科学専攻  
Department of Natural History Science, Graduate  
School of Science, Hokkaido University, N10 W8,

Kita-ku, Sapporo 060-0810, Japan.

Corresponding author: Shimpei Uesawa  
e-mail: s-uesawa@mail.sci.hokudai.ac.jp

も考えられる。そこで、我々は羊蹄火山の完新世の噴火史を構築するために、特に山頂周辺の地形判読、地質調査を行うとともに噴出物の岩石学的検討を行った。その

結果、完新世の噴火堆積物を新たに発見したので報告する。

## 2. 調査・分析方法

本研究では、まず空中写真判読で山頂の火口地形と山頂周辺の溶岩形成順序を検討した。次に、山頂周辺および登山道沿いを調査し、山頂周辺および登山道沿いの18地点で羊蹄火山噴出物の記載を行った (Fig. 3)。調査の際には空中写真判読結果も加味しながら、噴出物の岩相、産状および被覆関係から山頂周辺のユニット区分および層序を検討した。噴出物の対比およびユニット区分

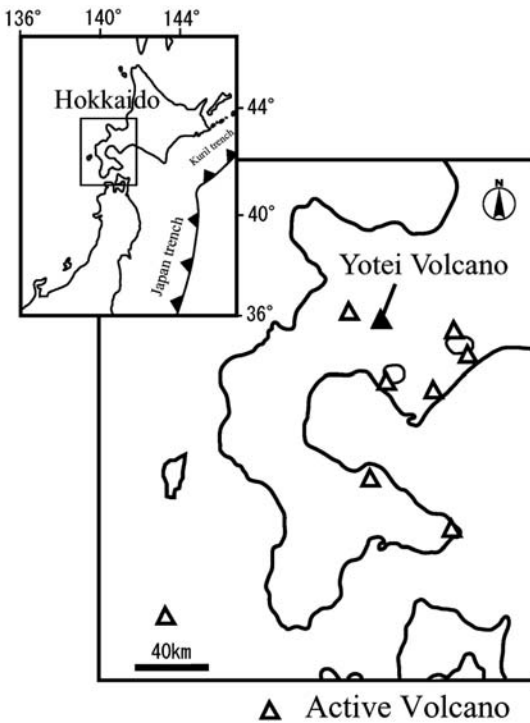


Fig. 1. Locality map of Yotei Volcano. Localities of active volcanoes are after Japan Meteorological Agency (2005).

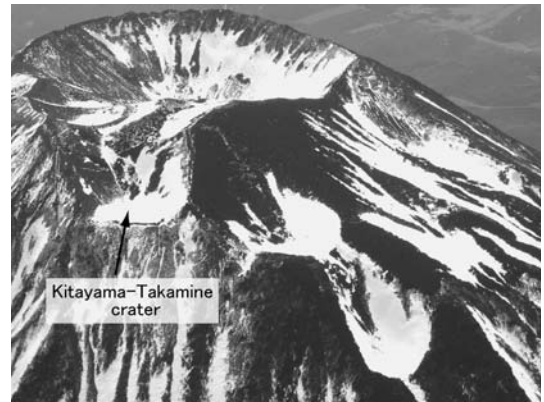


Fig. 2. A view around the summit of Yotei Volcano from NNW.

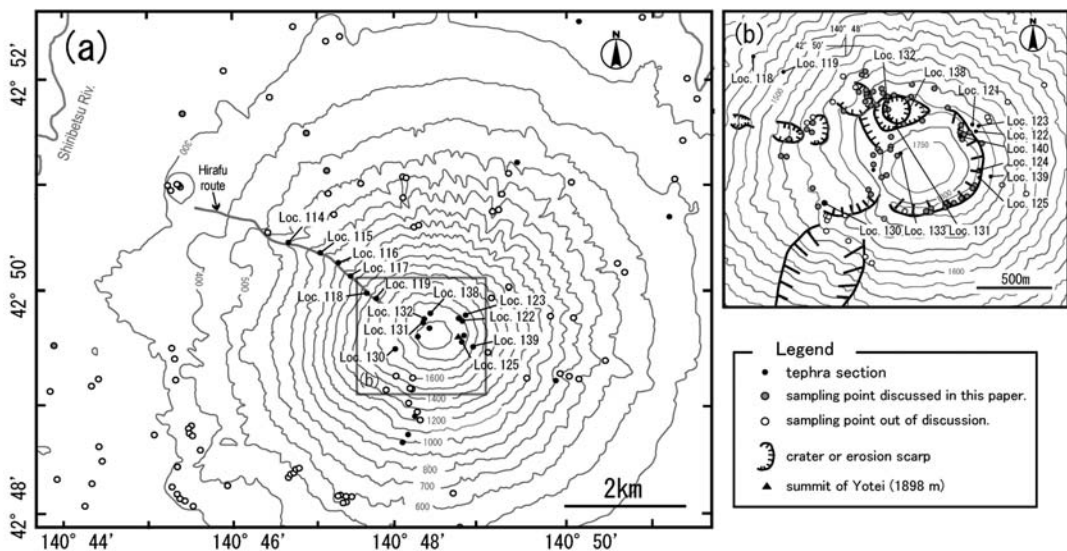


Fig. 3. Locality map of sampling points and tephra sections of Yotei ejecta.

の決定の際には岩石学的特徴を考慮した。テフラ層においては各噴火堆積物を主に構成する新鮮な岩石を本質物質と判断しサンプルを採取した。

1 試料の炭化物の炭素年代測定は、加速器分析研究所に依頼した。サンプルは、洗浄後、加速器質量計 (NEC Pelletron 9SDH-2) を用いて測定した。測定結果の暦年較正には、 $^{14}\text{C}$  年代一暦年代較正曲線 IntCal04 (Reimer *et al.*, 2004), および較正プログラム OxCal v4.0 (Ramsey, 1995; Ramsey, 2001; Ramsey *et al.*, 2001) を用いた。

各噴火堆積物の代表的な試料について以下のように岩石学的データを収集した。モード組成はモードカウンターを用いて、1枚の薄片につき3,000ポイント以上カウントした。全岩化学組成分析に用いたサンプルは新鮮な試料を選び粉碎した。粉末試料を融剤で1:2に希釈しガラスビードを作成した。測定には、北海道大学理学部のXRF (スペクトリス社製 MagiX Pro) を用い主成分化学組成を求めた。火山ガラスの化学組成分析には、北海道大学理学部のSEM-EDS システム (JEOL-JSM-T330+LINK ISIS) を用いて、石井・他 (2008) と同様の手法を行った。

### 3. 地形地質概説

羊蹄火山は基底直径約11 km, 比高約1,600 mの円錐形の成層火山である。山麓部では広く火山麓扇状地が発達するが、西山麓には羊蹄火山起源の流れ山地形が広く分布し、Fig. 4aの範囲外の南東麓にも多数の流れ山が分布するが、隣接する尻別岳起源と考えられている (守屋, 1983)。新鮮な火口地形が山頂部、山麓で認められる。北西部を除く山頂火口は直径約700 mのほぼ円形であり、その他にも山頂周辺には複数の火砕丘や火口が認められる。北～北西～西山麓には火口地形を持つ富士見火砕丘や半月湖火砕丘のような側火山が認められる (Fig. 4a)。これらの山頂火口および周辺の火口から流出した溶岩流が北西～西～南山麓に流下しているのが認められる。その他に西から南山麓にかけてはデイサイト質～安山岩質の溶岩流や溶岩ドームも多数存在している (勝井, 1956)。一方で、北～東～南の山腹は降下火砕堆積物に覆われており、それを侵食してやや深い谷が形成されている。

羊蹄火山は山麓のテフラ層序から、少なくとも5万年前から活動していたと考えられており、東麓を中心に複数枚のテフラが分布している (宇野, 1989)。東麓で認められるテフラのうち最大規模の噴火堆積物は下位より羊蹄第3軽石・スコリア層、羊蹄第2軽石・スコリア層 ( $25,270 \pm 1,080$  yBP,  $27,280 \pm 1,410$  yBP)、羊蹄第1軽石・スコリア層 ( $15,000 \pm 400$  yBP) であり (柏原・他,

1976)、これらを噴出した時期が最も活動が活発であった可能性が考えられる。また、東麓のテフラで最上位のK-Psは分布から側火山である富士見火砕丘 (Fig. 4) から噴出したことが明らかにされた (星住, 2004)。山体の地質については勝井 (1956) の報告があり、本体火山を下位より第1期噴出物から第3期噴出物まで分類し、寄生火山 (側火山) として、山頂部の北山噴出物、山腹の650M山頂頂丘溶岩、502M山頂頂丘溶岩、南火口溶岩、山麓の半月湖火砕丘、富士見火砕丘の地質と岩石を記載している。

### 4. 地形判読による山頂部の噴火層序

空中写真による地形判読から、Fig. 4bに示した山頂周辺の火口の形成順序および溶岩流 (Fig. 4a) の流出順序は以下のとおりと考えられる。なお、星住 (2004) が示す火口名と本研究による火口地形の観察結果は異なるため、以下の火口名は山頂火口以外すべて新称である。山頂周辺で最大の火口である山頂火口 (SM-C) は直径700 mである。山頂火口の東側～南、さらに南西にわたる縁は外側斜面が約30度の火砕丘地形を成している。山頂火口形成後の噴火活動は、避難小屋火口 (HG-C)、ニセコ火口 (NS-C)、北山火口群 (KT-1～3C, -TKC, -HF-1～3C) の3つの火口群が活動している。まず山頂火口の西側に馬蹄形をした避難小屋火口 (HG-C) が形成される。その後、HG-Cからは溶岩流が流出し、西～南西山麓まで流下している。HG-Cから流出した溶岩流は少なくとも3つのフローユニットからなり (Fig. 4b) の溶岩地形 $\alpha\sim\beta$ )、被覆関係から北から順に流出したことがわかる。溶岩地形 $\alpha$ 上の標高1,000 m付近にはニセコ火口 (NS-C) が形成され溶岩流が流出し、西麓まで流下している。HG-Cおよび溶岩地形 $\alpha\sim\beta$ の一部は北山火口群からの噴出物に覆われている。北山火口群の活動では火砕丘が形成された。北山火口は三重構造をしており、外側から順に北山第1火口 (KT-1C)、北山第2火口 (KT-2C)、北山第3火口 (KT-3C) と命名した。これらの火口を取りまく火砕丘地形 (北山火砕丘) には、火砕丘の西山腹から西に分布する北山一比羅夫火口列 (KT-HFCs) と、北西山腹の北山一高峰火口 (KT-TKC) が形成されており、KT-TKCからは大規模な溶岩流が流出し北西山麓まで流下している。一方、KT-HFCsからは溶岩流を伴う大規模な噴火を起こしたと考えられる地形は認められず、割れ目火口に伴う東西に並んだ3つの火口地形が認められる。これらの火口を上位から順に北山一比羅夫第1火口～第3火口 (KT-HF1C～KT-HF3C) とする。KT-HFCsおよびKT-TKCは北山火砕丘の山腹を切って形成されているので、北山第1火口形成後に活

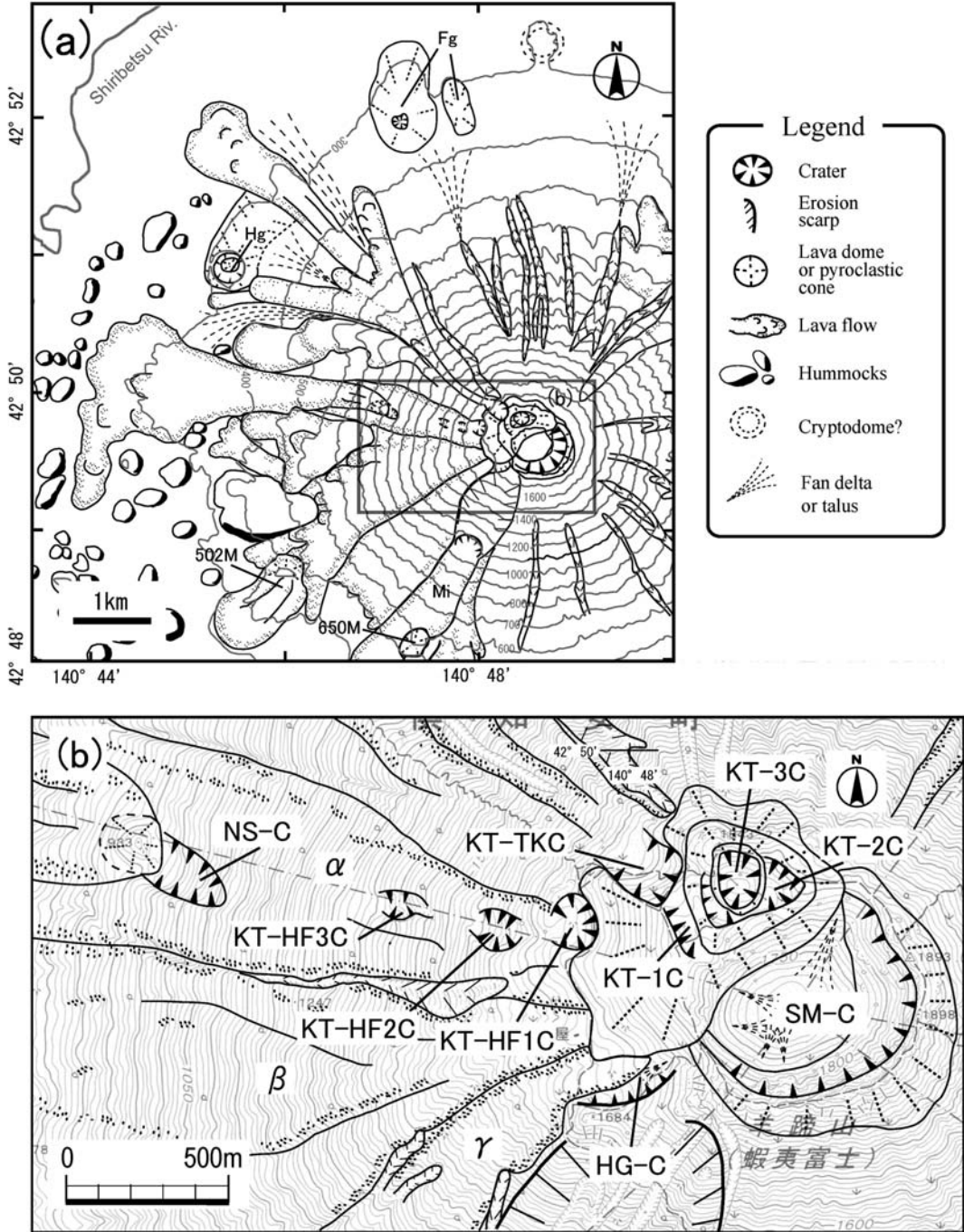


Fig. 4. Geomorphological map of Yotei Volcano in the study area. (a): Fg: Fujimi scoria cone, Hg: Hangetsuko scoria cone. 502M: 502m. peak lava. 650M: 650m. peak lava. Mi: Minami crater lava. (b): SM-C: Summit crater, HG-C: Hinangoya crater, NS-C: Niseko crater, KT-HF1C: Kitayama-Hirafu first crater, KT-HF2C: Kitayama-Hirafu second crater, KT-HF3C: Kitayama-Hirafu third crater, KT-TKC: Kitakama-Takamine crater, KT-1C: Kitayama first crater, KT-2C: Kitayama second crater, KT-3C: Kitayama third crater.  $\alpha$ : lava land form  $\alpha$ ,  $\beta$ : lava land form  $\beta$ ,  $\gamma$ : lava land form  $\gamma$ . Geographical map (1/25000) for background is published by the Geographical Survey Institute.

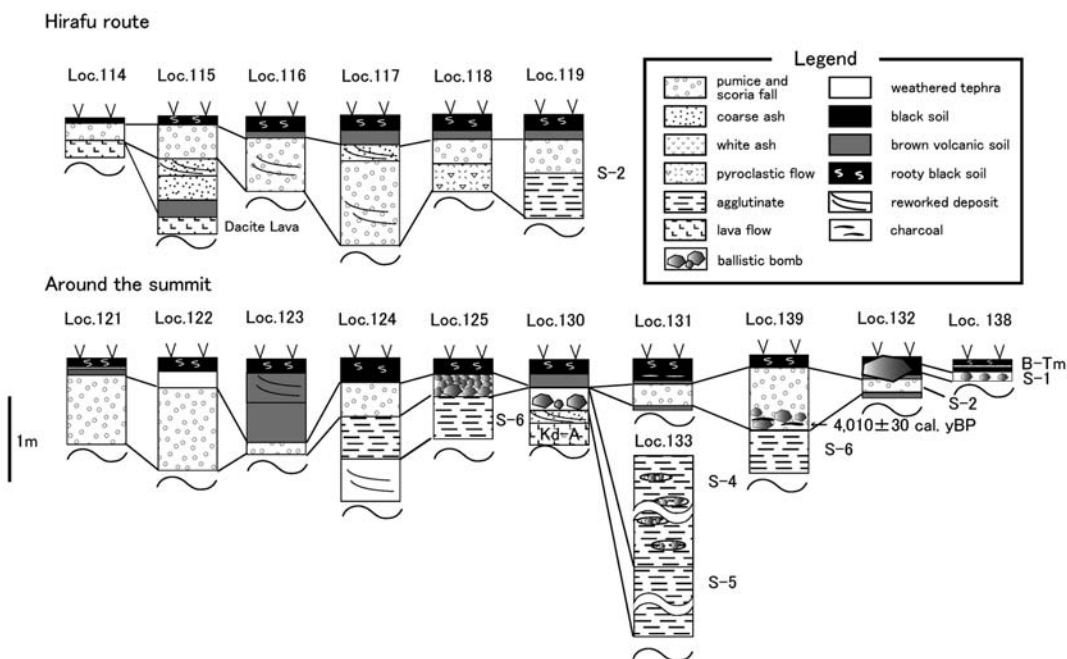


Fig. 5. Representative columnar sections of Yotei ejecta around the summit.

動したことは明らかである。しかしながら、北山第1火口内部に形成された北山第2および第3火口の活動とこれらの火口からの噴出物との前後関係は地形からは判断できない。

### 5. 山頂部の火山噴出物層序

既に述べたように、野外調査、空中写真判読および噴出物の岩石学的性質から、テフラおよび溶岩流の対比と層序を決定した。その結果、各火口に対応した噴出物(テフラおよび溶岩)として、下位より山頂火口噴出物、避難小屋火口噴出物、ニセコ火口噴出物、北山火口群噴出物を認識した。テフラ層については下位よりユニットS-6~S-1とし、溶岩流についてはフローユニットごとに新称を与えた。山頂周辺で確認されたテフラはほとんどが羊蹄火山由来であるが、広域テフラとして白頭山一苦小牧火山灰(B-Tm: 町田・他, 1981)を見出した。対比柱状図を Fig. 5 に、層序図を Fig. 6 に、そして地質図を Fig. 7 に示す。なお、記載岩石学的特徴については付録として表にまとめた。以下に山頂部の各噴出物の分布、層序および特徴を下位層から順に示す。なお、溶岩流の名称は流下した地域の地名に基づいて命名した。

#### 5-1 山頂火口噴出物

山頂火口噴出物は、山頂火口(SM-C)から噴出した降下火砕物である。以下にその分布と特徴を示す。

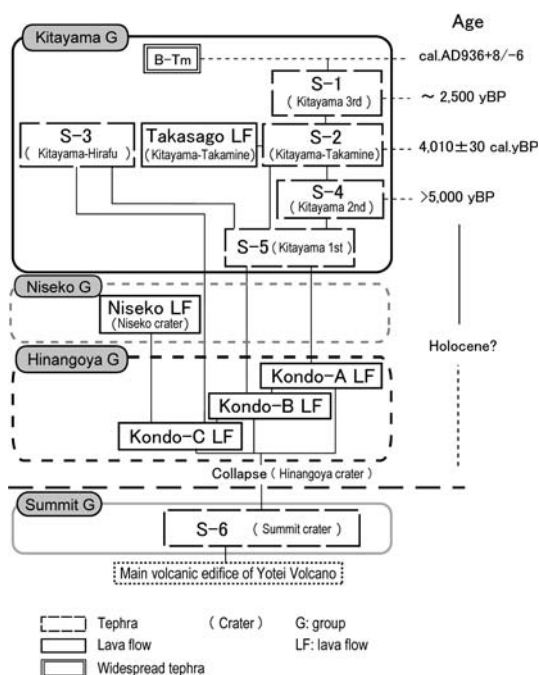


Fig. 6. Block diagram for stratigraphy of Yotei ejecta around the summit.

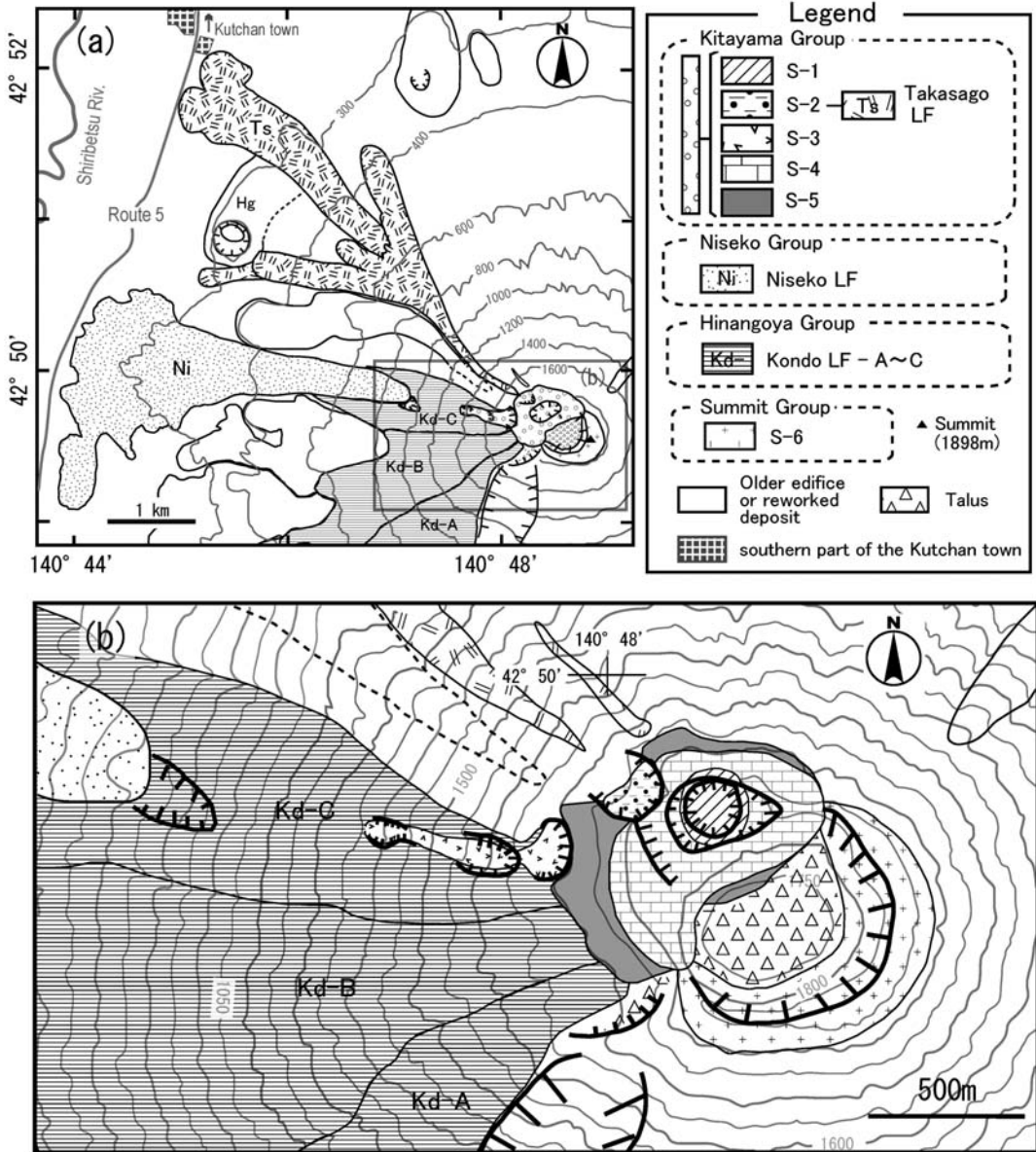


Fig. 7. Geological map of Yotei Volcano in the study area.

#### ユニット S-6 (新称)

ユニット S-6 は山頂火口 (SM-C) から噴出した降下火砕堆積物で、SM-C の東縁から南西縁にかけて分布する (Fig. 7)。山頂火口壁では塊状のアグルチネート堆積物と比較的溶結度の低い部分とが互層した構造が認められ、最大厚層は約 100 m である。溶結度の低い部分は、発泡の悪いこぶし大～人頭大の火山礫および火山岩塊で構成されている。火口の内壁は崖錘堆積物に覆われており、広範囲での厚層の水平変化はわからないが、観察地

点 (Loc. 140) では水平の成層構造が認められる。本質物質の岩石は、カンラン石含有斜方輝石単斜輝石安山岩、単斜輝石斜方輝石安山岩および斜方輝石単斜輝石安山岩である。

#### 5-2 避難小屋火口噴出物

避難小屋火口噴出物は、避難小屋火口 (HG-C) から噴出した溶岩流であり、少なくとも 3 枚のフローユニットからなる (Fig. 7a)。避難小屋火口 (HG-C) は馬蹄形の地形を残した火口であることから、ユニット S-6 の西側

の表層部が崩壊してできたと考えられる。空中写真判読により、溶岩流の噴出順序は北から近藤溶岩流 C、近藤溶岩流 B、近藤溶岩流 A である。以下にその分布、層位および特徴を下位のユニットから順に述べる。

#### 近藤溶岩流 C (Kd-C: 新称)

近藤溶岩 C は羊蹄火山西山腹の標高 500 m 付近まで流下している。北山—比羅夫火口列によって形成された侵食崖では層厚約 10 m が露出しており、地形図から読み取れる下位の地形原面に対する比高から判断して、平均層厚は約 10 m である。本溶岩流上には北山—比羅夫火口列 (KT-HFCs) が形成されているので (Fig. 4b)、後述するユニット S-3 の活動に先行した活動であることがわかる。岩石は斜方輝石単斜輝石安山岩である。

#### 近藤溶岩流 B (Kd-B: 新称)

近藤溶岩 B は羊蹄火山西山麓の標高 500 m 付近まで流下している。現地では少なくとも数メートル程度の層厚が確認できたが、地形図から読み取れる下位の地形原面に対する比高から判断して、平均層厚は約 10 m である。岩石は斜方輝石単斜輝石安山岩である。

#### 近藤溶岩流 A (Kd-A: 新称)

近藤溶岩 A は羊蹄火山南西から南山麓の標高 400 m 付近まで流下している。現地調査では、少なくとも 2~3 m の層厚が確認できたが、地形図から読み取れる下位の地形原面に対する比高から判断して、平均層厚は約 10 m である。地点 130 では、砂質の二次堆積物を挟んでユニット S-5 に覆われている。岩石はカンラン石含有斜方輝石単斜輝石安山岩である。

#### 5-3 ニセコ火口噴出物: ニセコ溶岩流 (Ni: 新称)

ニセコ火口噴出物はニセコ火口 (NS-C) から噴出した溶岩流である。ニセコ溶岩は Kd-C 上の標高 1,000 m 付近に形成されたニセコ火口 (NS-C) から噴出し、羊蹄火山西麓の標高 200 m 付近まで流下しており、火口からの最大流下距離は直線距離で約 4.3 km である (Fig. 7a)。標高 300 m 付近より低所では南北に広がり、溶岩じわが認められる。また、火口には溶岩流の上面からの比高が約 40 m の溶岩ドーム状の高まりが認められる。これはニセコ溶岩流本体と連続しているため、本論ではニセコ溶岩流として一括して取り扱う。溶岩流の層厚は末端崖で約 50 m である。岩石は斜方輝石単斜輝石安山岩である。本溶岩と Kd-C 以外の噴出物との層位関係は不明であるが、その全岩化学組成は避難小屋火口噴出物とは明瞭に異なり、上位の北山火口群噴出物に類似する。また後述する北山火口群は、地形の保存が最も良好で、本火山で最後の活動であることは明らかである。以上のことから、本溶岩流は近藤溶岩の流出後、北山火口群に先行して噴出したと考えられる。

#### 5-4 北山火口群噴出物

北山火口群噴出物は、北山火砕丘を形成した各火口に対応するテフラ層および溶岩流である。以下に火口ごとの噴出物の分布、層位および特徴を下位層から順に示す。

##### ユニット S-5 (新称)

ユニット S-5 は分布と層序から判断して、北山第 1 火口 (KT-1C) から噴出したと考えられる降下火砕物で、山頂火口の北東から西側にかけて分布する (Figs. 4b, 7b)。地点 133 ではやや赤色酸化したアグルチネート堆積物として認められ、層厚 10 m 以上である。本噴出物は近藤溶岩 A を覆い、ユニット S-4 に直接覆われる。本質物質の岩石は、単斜輝石斜方輝石安山岩である。

##### ユニット S-4 (新称)

ユニット S-4 は分布および層序から判断して、北山第 2 火口 (KT-2C) から噴出したと考えられる降下火砕堆積物である (Figs. 4b, 7b)。溶結度の高いアグルチネートの部分と非溶結な部分とが互層した堆積物で、ユニット S-5 を直接覆っている。本堆積物の層厚は地点 133 では層厚 10 m で、山頂火口の西側では上部の 1 m が部分的に露出している。また、本堆積物は北山火口群の北側の侵食崖でも露出している (Fig. 7b)。非溶結部分の基質は細礫~極粗粒砂で 20 cm~100 cm の発泡の悪い亜角礫の岩塊を含み、側方に数 10 m の範囲で数 cm~数 m と層厚が著しく変化する。本質物質の岩石は、単斜輝石斜方輝石安山岩である。

##### ユニット S-3 (新称)

ユニット S-3 は北山—比羅夫火口列 (KT-HFCs, Fig. 4b) から噴出した降下火砕堆積物である。降下火砕物はアグルチネートと火山弾で、アグルチネートは北山—比羅夫第 1 火口底に幅約 3 m、高さ 1.5 m の露頭として認められる。また、火山弾は直径数十 cm のものが火口内に散在している。これらのテフラの分布は火口内に限られているため、その他のテフラ層との層位関係は不明である。本質物質の岩石は斜方輝石単斜輝石安山岩である。

##### ユニット S-2 および高砂溶岩流 (Ts) (新称)

ユニット S-2 は分布および全岩化学組成から、北山—高峰火口 (KT-TKC, Fig. 4b) から噴出したと考えられる降下火砕堆積物で、同火口からは高砂溶岩流 (Ts: 新称) が噴出している。後述するように、S-2 と Ts は全岩化学組成の特徴が一致する。ユニット S-2 は、北山—高峰火口 (KT-TKC) の火口壁 (Fig. 7b) ではアグルチネートとして露出し、比羅夫登山道沿い及び山頂周辺では降下軽石・スコリア堆積物や火山弾として分布する。降下軽石は黄褐色を呈し、著しく風化している。降下軽石・スコリア堆積物は、山頂周辺では土壌を挟んでユニット

S-1 と B-Tm に覆われ、比羅夫登山道沿いでは土壌を挟んで、ユニット S-6 より下位であると考えられるデイサイト質溶岩を覆う。高砂溶岩は大きく 2 つのローブに分けられ、一方は標高 600 m 付近から北西麓に分布し、600 m 付近より上方は他方に覆われる。他方は標高 1,660 m 付近から西麓の側火山である半月湖付近まで流下し、半月湖火砕丘の北側、東側～南側の一部を覆っている (Fig. 7a)。地形図から読み取れる下位の地形原面に対する比高から判断して、層厚は末端崖で最大約 50 m、平均層厚は約 30 m である。本質物質の岩石は、テフラが単斜輝石斜方輝石安山岩または斜方輝石単斜輝石安山岩で、溶岩が単斜輝石斜方輝石安山岩である。

#### ユニット S-1 (新称)

ユニット S-1 は北山第 3 火口 (KT-3C, Fig. 4b) から噴出した降下火砕堆積物で、火口周辺に緻密な岩石からなるアグルチネートおよび火山弾として分布している。火山弾は火口中心から約 100 m 以内に分布している。火山弾によるボムサグ構造が認められ、直下の土壌および下位の S-2 を著しく変形させている。地点 138 では、厚さ 7 cm の土壌を挟んで白頭山一苦小牧テフラ (B-Tm) に覆われている。本質物質の岩石は、単斜輝石斜方輝石安山岩である。

#### 5-5 B-Tm 降下火山灰層

細砂～シルト質の白色降下火山灰層で、山頂で分布が新たに発見された。層厚は 0.5 cm で、土壌を挟んでユニット S-1 を覆い土壌層に覆われる。火山灰中の本質ガラス組成は SiO<sub>2</sub> で 66.9～77.4wt.%, K<sub>2</sub>O で 4.2～5.6wt%, TiO<sub>2</sub> で 0.19～0.59 wt% である。この化学組成はこれまで報告されている B-Tm の組成と一致する (町田・新井, 2003)。なお、ガラス組成の値は測定された主成分元素の合計を 100% に規格化した値である。

#### 6. 噴出物の年代

本研究により地点 139 ではユニット S-2 降下火山灰中の草木由来と考えられる炭化物から 4,010 ± 30 cal. yBP の放射性炭素年代値が得られた (Table 1)。この年代はユニット S-2 の噴火年代と考えられる。それ以外のユニットからは放射性炭素年代測定に適した試料を見出すことはできなかった。そこで、年代既知のテフラに挟ま

れた土壌厚で、S-2 以外のテフラの年代値を推定することにする。

年代既知のテフラとしては S-2 以外には、ユニット S-1 の上位に広域テフラである B-Tm が今回発見された。石塚・他 (2003) のウィグルマッチング法を用いた高精度な年代測定によると、B-Tm の年代値は cal. AD936 + 8/-6 である。まず、比較的平坦で土壌の堆積速度を見積もるのに適する地点 138 でユニット S-1 と B-Tm の間および B-Tm 上の土壌の厚さからユニット S-1 の年代を推定する。B-Tm の上位の土壌は 5 cm で、AD936 年から調査を行った 2009 年までのこの土壌の堆積速度は約 4.7 cm/ky である。S-1 の堆積以前も土壌の堆積速度が一定であると仮定して、得られた堆積速度をユニット S-1 から B-Tm までの 7 cm の土壌に適用すると、AD936 年は 1,014 yBP であるから、ユニット S-1 の噴火年代は約 2,500 yBP となる。なお、ユニット S-1 とその下位のユニット S-2 の間の土壌はユニット S-1 噴出物による変形が著しく土壌の堆積速度を見積もるのに適さない。そのため、上記の手続きで求めた S-1 の年代を検証することができない。一方、ユニット S-4 の上位の地点 131 ではユニット S-2 の下位に少なくとも 5 cm の土壌が存在することから、同様の堆積速度を用いるとユニット S-4 は少なくとも 5,000 yBP 以前の噴火であると推定される。以上、S-1、S-2 および S-4 の 3 つのユニットについて年代を推定した。しかし、この中で S-2 の噴火年代以外は、誤差が大きい推定年代として取り扱うべきである。

#### 7. 主成分全岩化学組成

ユニット S-1～S-6 のテフラ層および溶岩流に関して、Table 2 にその代表的なサンプルの全岩化学組成を、Fig. 8 に代表的な元素のハーカー図を示す。噴出物は SiO<sub>2</sub> = 54.7～60.2% の玄武質安山岩～安山岩であり、ユニット内の複数のサンプルでは組成幅が狭く類似した組成を示すか、SiO<sub>2</sub> 量などで組成幅が認められた場合でも、ハーカー図上で連続した変化を示すひとつのトレンドを描く。ユニット S-2 と Ts では化学組成が類似しており、そのことも両者が同一火口からの噴出物とした地質学的結論と矛盾しない。

各火口噴出物は、それぞれ明瞭に異なる組成で区別で

Table 1. The radiocarbon age of charcoal from S-2 tephra unit. Lat.: Latitude, Long.: Longitude, Lab. No.: Laboratory Number.

Unit	Locality (Lat., Long.)	Material	Lab. No.	δ <sup>13</sup> C (‰)	<sup>14</sup> C date (±1σ)	Cal. range (2σ) (probability, %)
S-2	Loc.139 ( 42° 18' 33.68" N, 140° 48' 45.37" E )	Carbide	IAAA-82961	-23.21 ± 0.40	4,010 ± 30 cal. yBP	4566 - 4560 yBP (1.0) 4530 - 4417 yBP (94.4)



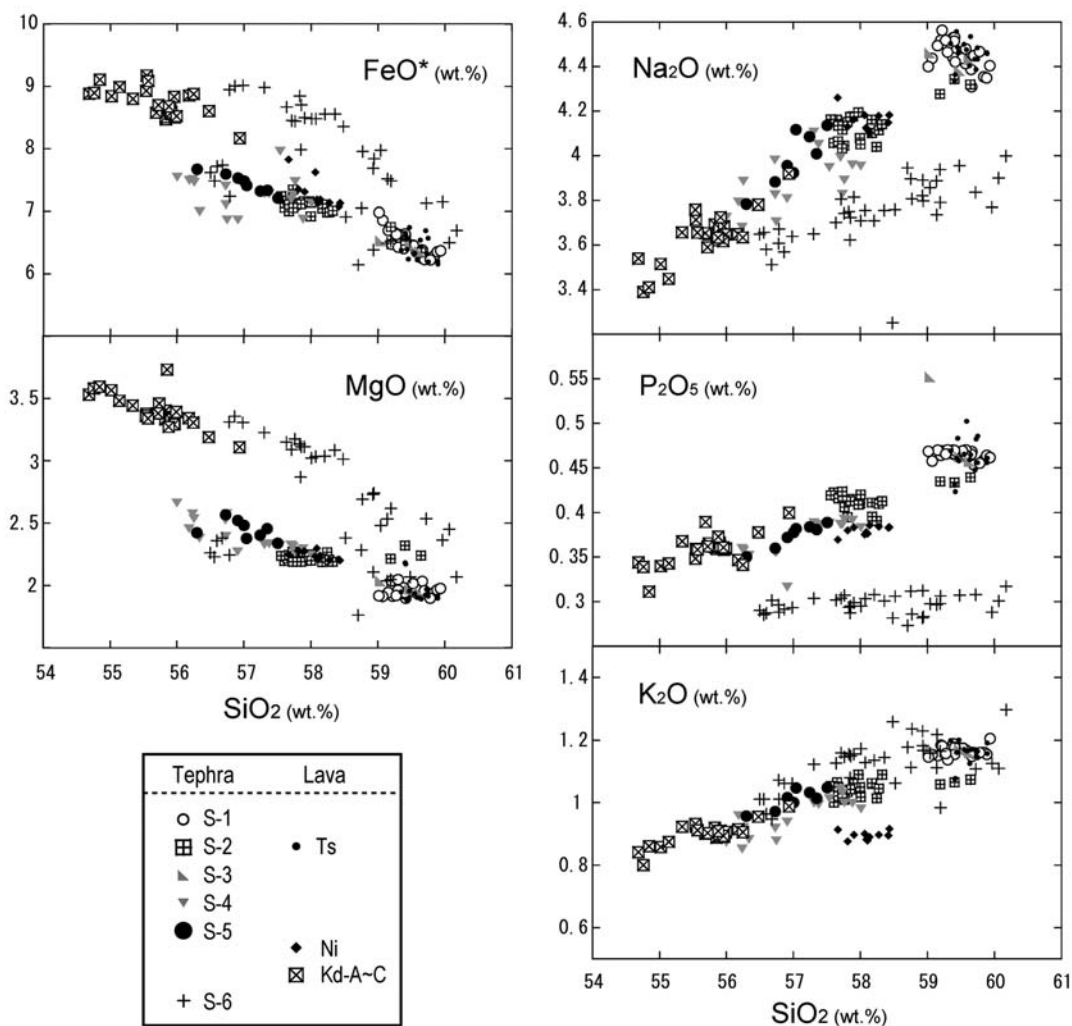


Fig. 8. Selected harker diagrams of whole-rock chemistry of tephra and lava samples from Yotei Volcano. All data is normalized to 100%. FeO\* shows Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> was recalculated as total FeO.

きる。すなわち，山頂火口噴出物（ユニット S-6）は P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、Na<sub>2</sub>O に乏しく，他の噴出物は P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、Na<sub>2</sub>O に富む。SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O 図では，ユニット S-6 は他の噴出物に比べやや K<sub>2</sub>O に富んでいる。また避難小屋火口噴出物（Kd-A～C）は，ニセコ火口噴出物（Ni）や北山火口群噴出物（S-5～S-1 および Ts）と比べて，より SiO<sub>2</sub> に乏しく，FeO\*，MgO に富むトレンドを示す。ニセコ火口噴出物は，他の噴出物と比べて，K<sub>2</sub>O に乏しいことが特徴的である。北山火口群噴出物は複数のユニットから構成されるが，上位になるにつれて SiO<sub>2</sub> に富む傾向が認められる。

## 8. 議 論

### 8-1 組成領域と噴火グループ

本研究によって羊蹄火山山頂部の活動では，位置の異なる複数の火口からそれぞれ異なる岩石学的特徴を有するマグマが活動したことが明らかとなった。北山火口群は数 1000 年にわたって複数回の噴火が火口を移動させて断続的に継続し，時間とともに次第に SiO<sub>2</sub> に富む傾向があることはすでに述べた。しかしながらその場合でも，それらはハーカー図上で一連のトレンドを描くという共通した全岩化学組成上の特徴を有しており，他の火口噴出物とは区別できる。マグマ系という点からは，羊蹄火山山頂部の活動では，マグマ系の変化と火口位置の変化が対応していることになる。特に火口位置とマグマ

Table 2. Whole-rock chemistry of representative samples from Yotei ejecta. ig. loss: loss on ignition, n.d.: no data.

Sample No.	YO69	YO92	YO82	YO74	YO75	YO382	YO60
Unit	S-6	S-6	S-6	Kd-A	Kd-B	Kd-C	Ni
ig.loss (wt.%)	0.26	0.51	0.10	0.27	0.35	0.57	-0.06
(wt.%)							
SiO <sub>2</sub>	57.55	58.16	56.41	54.03	54.98	53.42	57.75
TiO <sub>2</sub>	0.86	0.91	1.05	1.03	1.04	1.03	0.98
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.43	18.64	16.76	17.82	18.10	18.14	18.44
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.93	7.64	9.16	9.55	9.54	9.64	7.93
MnO	0.16	0.17	0.20	0.21	0.21	0.21	0.20
MgO	2.06	2.37	3.10	3.36	3.34	3.45	2.23
CaO	7.10	7.17	6.82	7.77	7.65	8.15	7.27
Na <sub>2</sub> O	3.80	3.74	3.65	3.57	3.54	3.46	4.07
K <sub>2</sub> O	1.16	1.06	1.12	0.90	0.89	0.82	0.88
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.31	0.30	0.30	0.36	0.36	0.34	0.38
total	98.35	100.16	98.57	98.59	99.63	98.65	100.13

Sample No.	YO342	YO278	YO91	F-34	YO352	YO41	YO66
Unit	S-5	S-4	S-3	Ts	S-2	S-2	S-1
ig.loss (wt.%)	0.31	1.86	0.34	n.d.	1.58	0.83	0.69
(wt.%)							
SiO <sub>2</sub>	55.89	56.33	58.76	59.06	57.68	58.04	59.53
TiO <sub>2</sub>	0.98	0.97	0.96	1.00	0.98	0.99	0.97
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.42	19.97	18.17	17.73	19.29	19.19	18.43
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.21	7.55	7.10	7.21	7.65	7.94	7.07
MnO	0.19	0.17	0.20	0.18	0.19	0.19	0.20
MgO	2.47	2.25	1.95	1.91	2.24	2.20	2.03
CaO	7.62	7.49	6.48	6.44	6.69	6.82	6.35
Na <sub>2</sub> O	3.88	3.77	4.33	4.43	4.06	4.05	4.30
K <sub>2</sub> O	1.00	0.93	1.16	1.15	1.04	1.02	1.15
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.37	0.31	0.46	0.45	0.41	0.42	0.47
total	99.03	99.75	99.55	99.56	100.22	100.86	100.48

系の共通性を考慮して、以下ではそれぞれ下位より山頂グループ（ユニット S-6）、避難小屋グループ（Kd-A～C）、ニセコグループ（Ni）、北山グループ（ユニット S-5～S-1, Ts）と呼ぶこととする。特に、山頂グループは、主要斑晶鉱物に対して液相濃集元素として振舞う P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> や Na<sub>2</sub>O で、またニセコグループは同様な液相濃集元素の K<sub>2</sub>O で、他のグループと区別できるので、そのマグマ系の組成差は大きいと考えられる。一方で、避難小屋グループと北山グループの両者は MgO で区別できるが、Na<sub>2</sub>O や P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> では両者の差は認められず、K<sub>2</sub>O ではやや異なっている。このようにグループ間で液相濃集元素に差が認められることから、マグマ系の変化・更新は、分化の程度だけでなく、初生マグマで異なる可能性がある。マグマの深部プロセスについてはより詳細な検討が必要ではあるが、本論の目的とは異なるので、ここではこれ以上の議論は行わない。

## 8-2 完新世噴火史

我々は、火口形成順序、火山噴出物層序、年代測定、全岩化学組成によるテフラと溶岩の対比によって、羊蹄火山山頂部の噴火史を明らかにした (Fig. 6)。その結果、その活動は大きく 4 つのグループに分けられ、それぞれ独立したマグマ系が噴火口を変化させながら活動を続けてきた。山頂グループは羊蹄火山本体の一部であり、その活動は本論で取り扱ったそれ以降のグループに比べ活動年代が古い可能性があり、本論の対象地域の中では最も古い活動という意味しかない。それ以降の活動では、避難小屋グループ、ニセコグループの噴火年代は不明であるが、それらに引き続く北山グループでは約 4,000 年前（ユニット S-2）と約 2,500 年前（ユニット S-1）の 2 回、噴火を起こしたことが明らかとなった。さらにユニット S-2 以前の活動としては、ユニット S-4 が少なくとも 5,000 年前の活動である可能性がある。さらにユニット S-3, S-4 および S-5 の間には大きな時間間隙を示

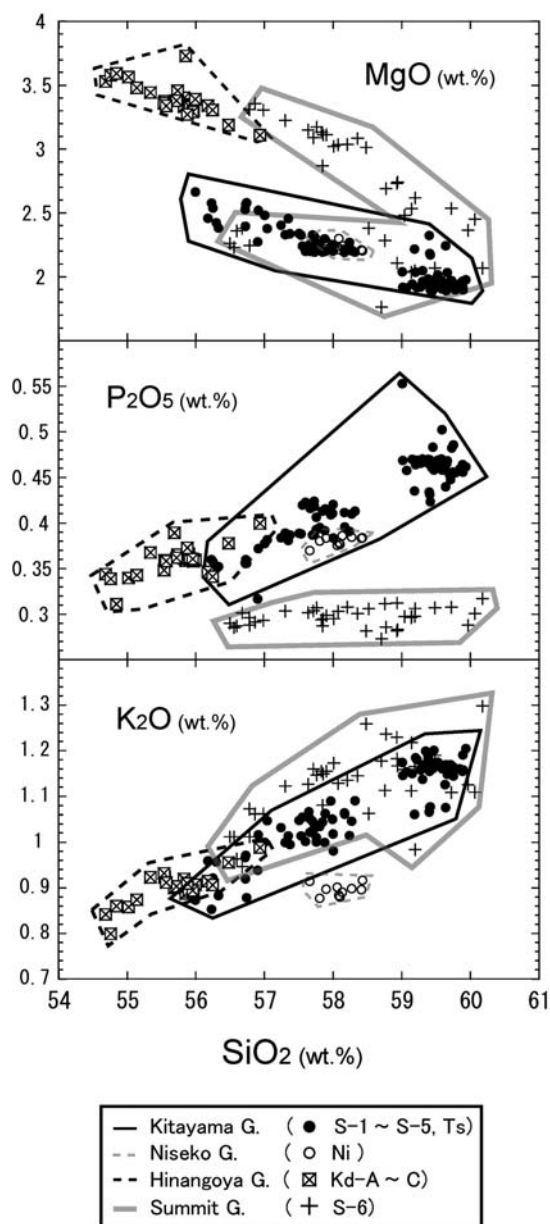


Fig. 9.  $\text{SiO}_2$ - $\text{MgO}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ , and  $\text{K}_2\text{O}$  diagrams of Yotei ejecta. All data is normalized to 100%. G.: group.

す証拠がないことや、全岩化学組成が類似することから、北山グループの噴火活動は完新世の中頃に開始し、数1,000年にわたって断続的に噴火したと考えられる。また、S-1噴出物の上位に噴火堆積物は認められないことから、最近2,500年間、羊蹄火山は噴火を起こしていないことも指摘できる。

山頂グループの活動については、火口壁に露出する堆

積物がアグルチネートや粗大な火山弾を含む降下火砕物であることからストロンボリ式や〜ブルカノ式の噴火を行ったと考えられるが、それに伴う溶岩流出の有無は不明である。一方、山頂グループ以降の活動である3つのグループもストロンボリ式噴火であったと考えられるが、それぞれのグループでは山麓まで達する溶岩流出を伴っていたことが明らかになった。一方、北山グループのうち確認できた最後の噴火である約2,500年前のユニットS-1をもたらした噴火は、噴出物の分布が火口周辺に限られ火山弾を噴出していることから、ブルカノ式噴火であったと考えられる。

避難小屋グループ以降の噴出量を分布域の面積と平均層厚を乗じて求めた。その結果、非難小屋グループが $0.10 \text{ km}^3$ 以上、ニセコグループが約 $0.18 \text{ km}^3$ 、北山グループでは、それぞれS-5が約 $0.007 \text{ km}^3$ 、S-4が約 $0.004 \text{ km}^3$ 、S-3が約 $0.0009 \text{ km}^3$ 、S-2が約 $0.013 \text{ km}^3$ 、Tsが約 $0.10 \text{ km}^3$ 、S-1は約 $0.0003 \text{ km}^3$ で、あわせて約 $0.13 \text{ km}^3$ である。このことから、各グループでは噴出量のほとんどを溶岩流が占めていることになる。北山グループが5,000年前から現在まで活動したと仮定すると、北山グループの噴出率は $0.03 \text{ km}^3/\text{ky}$ 以下となる。

### 8-3 羊蹄火山の山頂部の活動評価

従来、羊蹄火山は約10,000年前頃に山腹で起こった噴火が最後であったと考えられていた。しかし、本研究により約2,500年前の山頂噴火が最後の噴火であり、さらに羊蹄火山は少なくとも完新世中頃から数1,000年にわたり山頂を中心に噴火活動をしていたことが明らかとなった。山頂部の噴火のうち避難小屋グループ以降では、各グループでVEI=4程度の噴火を起こし、溶岩を山麓まで流下させている共通点がある。特に、最後のグループである北山グループの約4,000年前の噴火では、溶岩流は現在の倶知安市街の一部まで到達している。

完新世中頃から活動を開始したと考えられる北山グループの活動が将来再開する可能性を考える。この場合には、北山グループは既に $0.1 \text{ km}^3$ 以上の溶岩を流出しているので、その噴火はユニットS-1噴火程度の小規模なものであろう。北山グループの約2,500年前の噴火の1つ前の噴火は約4,000年前であり、その時間間隔は約1,500年間である。羊蹄火山は最近約2,500年間噴火していないことから、北山グループの活動は終了したと考えてもよいかもしれない。しかし、山頂部での噴火履歴を考えると、将来異なるマグマ系が火口を変えて別のグループとして活動することを想定するのが妥当であろう。この場合には、噴火はストロンボリ式の比較的穏やかな噴火であるが、規模の大きい溶岩流出を伴い、その先端は火口の位置によっては市街地まで到達することを

想定しなければならない。現在、羊蹄火山は地熱または地震活動は低調であり(火山噴火予知連絡会, 2010), 今すぐ噴火することは考え難い。しかし, 火山地質学的見地に立つと, 山麓での噴火の可能性は低いと考えられるが, 山頂部で噴火活動が再開する可能性が十分あるという結論を得た。

## 9. ま と め

本研究により以下の点について明らかとなった。

(1) 羊蹄火山山頂周辺において各火口に対応する噴出物と B-Tm を認識した。

(2) テフラと溶岩を, 全岩化学組成を用いて対比した結果, 山頂周辺の噴火活動を明らかにした。

(3) 避難小屋グループの噴火以降, 各グループで火口位置とマグマ系を変えながらそれぞれ溶岩流出を伴う噴火を起こしてきた。

(4) 北山グループは完新世中頃からの活動で, 山頂での小規模な爆発的噴火に加え約 4,000 年前の噴火では溶岩流を流出した。

(5) 最後の噴火以降, 約 2,500 年間羊蹄火山は噴火していない。

## 謝 辞

本研究を行うにあたり, 薄片製作においては, 北海道大学の野村秀彦氏, 中村晃輔氏, 全岩化学組成分析および火山ガラス組成分析においては同大学院の松本亜希子博士にお世話になった。また, (独)北海道立総合研究機構地質調査所の廣瀬 亘博士には山頂のテフラについて貴重な情報を提供していただいた。査読者の安井真也准教授(日本大学), 古川竜太博士(産総研), 編集担当の宮城磯治博士(産総研)のコメントにより本稿は改善された。調査に際して, 環境省及び関係町村に土石採取の許可を頂いた。また, 京極町の野上 守氏, 留寿都村の坂庭 進氏, 恵子氏には宿泊の便宜を図っていただいた。なお, 本研究には北海道受託研究費および文科省「地震および噴火予知研究費」の一部を使用した。以上の方々および関係機関には, 記して感謝いたします。

## 引用文献

廣瀬 亘・大津 直・川上源太郎(2007) 羊蹄火山における完新世側噴火の<sup>14</sup>C年代。日本地球惑星科学連合

大会講演要旨集, V156-P027.

星住リベカ(2004) 羊蹄火山における最近2万年の噴火活動史。第四紀学会講演予稿集, p. 119-120.

石井英一・中川光弘・齊藤 広・山本明彦(2008) 北海道中央部, 更新世の十勝三股カルデラの提唱と関連火砕流堆積物: 大規模火砕流堆積物と給源カルデラの対比例として。地質雑, 114, 348-365.

石塚友希夫・中村俊夫・奥野 充・木村勝彦・金 奎漢・金 伯祿・森脇 広(2003) 白頭山火山の10世紀における巨大噴火の高精度 AMS<sup>14</sup>C年代測定。名古屋大学加速器質量分析計業績報告書, XIV, 58-65.

柏原 信・広瀬保志・香川正人・菅 恵一・春日井昭・山岸一夫(1976) 羊蹄火山のテフラ-降下軽石・スコリア堆積物とその<sup>14</sup>C年代について一。第四紀研究, 15, 2, 75-86.

勝井義雄(1956) 羊蹄火山の地質と岩石。5万分の1地質図幅説明書「留寿都」付録, 北海道開発庁, 1-14.

火山噴火予知連絡会(2010) 第115回火山噴火予知連絡会 全国の火山活動の評価。報道発表資料, 10p.

気象庁(編)(2005) 日本活火山総覧。第3版, 635p.

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, 170p.

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, 51, 562-569.

守屋以智雄(1983) 日本の火山地形。東京大学出版会, 135p.

Ramsey C.B. (1995) Radiocarbon calibration and analysis of stratigraphy: the OxCal Program. *Radiocarbon*, 37, 425-430.

Ramsey C.B. (2001) Development of the Radiocarbon Program OxCal. *Radiocarbon*, 43, 355-363.

Ramsey C.B., van der Plicht J. and Weninger B. (2001) 'Wiggle Matching' radiocarbon dates. *Radiocarbon*, 43, 381-389.

Reimer, P. J., Baille, M. G. L., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J. W., Bertrand, C. J. H., Blackwell, P. G., Buck, C. E., Burr, G. S., Cutler, K. B., Damon, P. E., Edwards, R. L., Fairbanks, R. G., Friedrich, M., Guilderson T. P., Hogg, A. G., Hughen, K. A., Kromer, B., McCormack, F. G., Manning, S., Ramsey, C. B., Reimer, R. W., Remmele, S., Southon, J. R., Stuiver, M., Talamo, S., Taylor, F. W., van der Plicht J. and Weyhenmeyer, C. E. (2004) IntCal04 terrestrial radiocarbon age calibration. 0-26 cal kyrBP, *Radiocarbon*, 46, 1029-1058.

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) 北海道における腐食質火山灰の編年に関する研究。第四紀研究, 10, 117-123.

宇野リベカ(1989) テフラからみた羊蹄火山の活動。日本火山学会 1989 秋季大会講演予稿集, p. 110.

(編集担当 宮城磯治)

付 録

羊蹄火山山頂周辺噴出物の記載岩石学的特徴を Table

A1 にまとめた.

Table A1. Modal compositions of phenocrysts minerals for the representative samples of each ejecta. Abbreviations. Pl: plagioclase; Opx: orthopyroxene; Cpx: clinopyroxene; Ol: olivine; Opq: opaque mineral; In: intersertal texture; Hy: hyaloophitic texture.

Group	Sample no.	Unit	Type	Phenocryst (mode%)					Groundmass		
				Pl	Opx	Cpx	Ol	Opq	Subtotal	mode%	texture
Summit	YO69	S-6	agglutinate	28.5	0.6	1.7	0.0	0.8	31.6	68.4	Hy
Summit	YO92	S-6	agglutinate	25.7	1.8	0.4	0.0	0.5	28.4	71.6	Hy~In
Summit	YO82	S-6	agglutinate	25.9	2.6	2.3	tr.	0.8	31.6	68.4	Hy
Hinangoya	YO74	Kd-A	lava	17.9	1.3	1.3	0.1	0.1	20.6	79.4	Hy
Hinangoya	YO75	Kd-B	lava	22.1	0.3	1.1	0.0	0.5	24.0	76.0	Hy
Hinangoya	YO382	Kd-C	lava	21.3	0.7	0.5	0.0	0.2	22.7	77.3	Hy~In
Niseko	YO60	Ni	lava	19.3	tr.	0.1	0.0	0.2	19.6	80.3	Hy~In
Kitayama	YO342	S-5	agglutinate	23.1	0.7	0.8	0.0	0.2	24.9	75.1	Hy
Kitayama	YO278	S-4	agglutinate	24.1	1.5	2.1	0.0	0.6	28.3	71.7	In
Kitayama	YO91	S-3	agglutinate	15.2	0.4	0.3	0.0	0.3	16.3	83.7	Hy
Kitayama	F-34	Ts	lava	18.9	0.3	0.1	0.0	0.3	19.6	80.4	Hy
Kitayama	YO352	S-2	agglutinate	9.9	0.4	0.2	0.0	0.2	10.7	89.3	Hy
Kitayama	YO41	S-2	scoria fall	11.3	0.1	0.1	0.0	0.3	11.7	88.3	Hy
Kitayama	YO66	S-1	agglutinate	18.3	0.2	0.2	0.0	0.4	19.2	80.8	Hy