

男体火山の最近 17,000 年間の噴火史

石崎 泰男*・森田 考美**・岡村 裕子**、***・小池 一馬****・
宮本 亜里沙****・及川 輝樹*****

(2014年5月1日受付, 2014年8月11日受理)

Eruption History of Nantai Volcano During the Last 17,000 Years

Yasuo ISHIZAKI*, Takami MORITA**, Yuko OKAMURA**,***, Kazuma KOIKE****,
Arisa MIYAMOTO**** and Teruki OIKAWA*****

Nantai volcano (2,486 m a.s.l.), a near-conical stratovolcano with a summit crater ~1 km wide, is located along the volcanic front of NE Japan. To date, the eruptive history and characteristics of this volcano have been poorly studied, except for an explosive eruption that occurred at ~17 cal. ka BP (Stage 2 eruption). In this paper, we present the results of investigation of the stratigraphy of recent proximal eruption products, the tephrostratigraphy of the northeastern foot of the volcano, and new radiocarbon ages. The results show that at least six eruptions of Nantai volcano have occurred after Stage 2 eruption, and we refer to these as Stage 3 eruptions.

We identify four tephra layers and one pyroclastic flow deposit in the soil sections above the Stage 2 pumice flow deposit, at the northeastern foot of the volcano. These are classified in the ascending order as: (1) Nantai-Bentengawara Tephra 4 (Nt-Bt4), (2) Bentengawara Pyroclastic Flow Deposit, (3) Nt-Bt3, (4) Nt-Bt2, and (5) Nt-Bt1. The Nt-Bt2 is phreatic fallout with no juvenile material; the other tephra layers are phreatomagmatic fallouts containing juvenile pyroclasts together with ash aggregates. Six Stage 3 eruption products are identified within and around the summit crater: (1) a blocky lava flow (Osawa Lava) exposed on the northern crater wall, (2) a partly dissected scoria cone and (3) a poorly-preserved tuff ring (and its resedimented deposits) on the steep crater floor, (4) a subaqueous lava and associated lava fragments sandwiched by lacustrine deposits, (5) a tuff breccia containing hydrothermally-altered lava block and clayey matrix, and (6) a stratigraphically uppermost phreatomagmatic tephra (Nantai-Yudonoyama Tephra). All the proximal eruption products, except for the subaqueous lava, can be correlated with the tephra layers and the pyroclastic flow deposit on the northeastern foot based on stratigraphic positions, lithologies, and geochemical affinities. Our study reveals that five tephra-forming eruptions (ca. 14, 12, 8, 7.5, and 7 cal. ka BP) and one non-explosive subaqueous eruption (between 12 and 8 cal. ka BP) occurred during Stage 3, from a discrete eruption center inside the summit crater. Moreover, the tephra-forming eruptions were diverse in style, with strombolian (12 cal. ka BP), phreatomagmatic (14, 8, and 7 cal. ka BP), and phreatic (7.5 cal. ka BP) eruptions. Eruption style was determined primarily by vent position and spatiotemporal variations in local hydrological factors (e.g., the presence or absence of a crater lake, wet lacustrine deposits, and streams).

Key words: Nantai volcano, proximal eruptives, tephra, eruption history

* 〒930-8555 富山市五福 3190
富山大学大学院理工学研究部
Graduate School of Science and Engineering, University
of Toyama, 3190 Gofuku, Toyama 930-8555, Japan.

** 〒930-8555 富山市五福 3190
富山大学大学院理工学教育部
Graduate School of Science and Engineering for Edu-
cation, University of Toyama, 3190 Gofuku, Toyama
930-8555, Japan.

*** 〒315-0035 茨城県石岡市南台 3-1-11
岡村地質
Okamura Chishitsu Co. Ltd., 3-1-11 Minamidai, Ishioka,

Ibaraki 315-0035, Japan.

**** 〒930-8555 富山市五福 3190

富山大学理学部地球科学科

Department of Earth Science, Faculty of Sciences, Univer-
sity of Toyama, 3190 Gofuku, Toyama 930-8555, Japan.

***** 〒305-8567 茨城県つくば市東 1-1-1 中央第 7
独立行政法人産業技術総合研究所地質情報研究部門
AIST, Geological Survey of Japan, Tsukuba Central 7,
1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8567, Japan.

Corresponding author: Yasuo Ishizaki
e-mail: ishizaki@sci.u-toyama.ac.jp

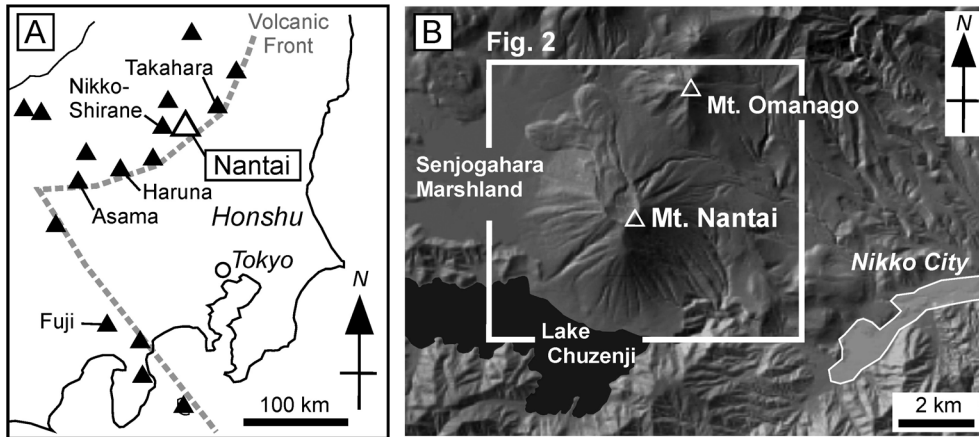


Fig. 1. (A) Location of Nantai volcano. Closed triangles represent active volcanoes. (B) Shaded relief image of Nantai volcano and the surrounding area (produced with Kashmir 3D). The location of Fig. 2 is also shown.

1. はじめに

男体火山（標高2,486 m）は、栃木県北西部、東北日本弧の火山フロント付近に位置する中型の成層火山である（Fig. 1A）。本火山の南方と西麓には、それぞれ、本火山の活動による堰止湖である中禪寺湖と、かつての堰止湖が高層湿原となった戦場ヶ原が広がり、南東麓には国際的な観光都市である日光市の市街が位置する（Fig. 1B）。

男体火山の形成史についての最初の詳細な研究は山崎（1957）であり、本火山の活動を、成層火山体の形成期である主期活動と、その後休止期を経て発生した一連の大規模火砕噴火を主体とする末期活動とに区分した。末期活動は、男体火山での最大規模の噴火であり、長年男体火山の最後の噴火と考えられていた（山崎，1957；石崎・呉山，2004）。末期活動の噴火は、ソレアイト系列のデイサイト～安山岩質火砕物の噴出による男体今市テフラとそれを覆う志津スコリア流堆積物の形成に始まり、カルクアルカリ系列のデイサイト～安山岩質火砕物の噴出による男体七本桜テフラとそれを覆う荒沢・竜頭軽石流堆積物の形成を経て、その後、同系列のデイサイト～安山岩質ブロック溶岩流である御沢溶岩の流出へと推移したとされる（須藤・山崎，1980；石崎・呉山，2004；火砕堆積物と溶岩流の名称は須藤・山崎（1980）に、テフラの名称は町田・新井（2003）に従う）。末期活動の年代については、阿久津（1979）が荒沢・竜頭軽石流堆積物中の炭化木から $12,430 \pm 270$ yr BP 及び $12,280 \pm 250$ yr BP の放射性炭素 (^{14}C) 年代を報告したが、初期の年代測定であったため、現在普及している酸・アルカリ・酸洗浄による分析前試料処理や同位体分別補正が行われていない、などの問題があった。最近、中村・他（2011）は、加

速器質量分析（AMS）法による ^{14}C 年代測定により、男体今市テフラに埋積した炭化木片から $14,770 \sim 14,935$ cal. yr BC の較正暦年代（以後、暦年代）を報告している。末期活動の各火砕堆積物は、山体近傍～遠方の各所で土壌や二次堆積物を挟まずに整合的に堆積していることから（石崎・呉山，2004）、約 17 cal. ka BP 頃に比較的短時間で噴出し堆積したと考えられる。

最近、男体火山の噴火史を考える上で重要な噴出物が三宅・他（2009）と Ishizaki *et al.*（2010）によって報告された。三宅・他（2009）は、北東麓の弁てんがわら（Fig. 2）において、末期活動の荒沢・竜頭軽石流堆積物の上位に風化火山灰土を挟んで載る弁天河原火砕流堆積物を見出し、その中の炭化木の ^{14}C 年代（11～12 cal. ka BP）を報告した。Ishizaki *et al.*（2010）は、山頂火口内北域において、弁天河原火砕流堆積物よりも若い水中火山岩（御真仏難火山角礫岩）と水蒸気マグマ噴火の噴出物（男体湯殿山テフラ）を見出し、男体湯殿山テフラ中の埋積炭化樹幹の ^{14}C 年代（約 7 cal. ka BP）を報告した。これらの噴出物は、いずれもその分布から男体火山の噴出物であることは間違いなく、男体火山が末期活動の後も噴火を繰り返していたことは明らかである。特に約 7 cal. ka BP の暦年代をもつ男体湯殿山テフラの存在は、男体火山が最近 1 万年以内に活動した活火山（気象庁定義）であることを示す証拠としても重要であり、末期活動の後の噴火履歴の解明が防災上も重要となってきた。

本研究では、末期活動の一連の火砕噴火終了以降、すなわち最近約 17,000 年間の男体火山の噴火史を検討した。最近の研究（三宅・他，2009；Ishizaki *et al.*，2010）により末期活動が男体火山の最後の噴火活動ではないことが明らかになったため、本稿では、山崎（1957）の活動期

区分のうち主期活動（成層火山体形成期）を第 1 期活動、末期活動の一連の火砕噴火を第 2 期活動、第 2 期活動の後の噴火活動を第 3 期活動（御沢溶岩の噴火も含む）と定義する。我々は、まず、男体火山北東麓の弁天河原林道において、第 2 期活動の荒沢・竜頭軽石流堆積物の上位に風化火山灰土を挟んで載る男体火山起源のテフラ（一部はラハール堆積物を伴う）を 4 層認定し、弁天河原火砕流堆積物も含めた第 3 期活動のテフラ・火砕流堆積物の層序を確立した。さらに、山麓調査と並行し、Ishizaki *et al.* (2010) において未調査であった山頂火口内南域で地質調査を行った。その結果、第 3 期活動で噴出したスコリア丘とタフリングの堆積物を新たに見出し、山頂火口内～近傍域の第 3 期活動の噴出物の分布とそれらを形成した噴火様式の全容が明らかになった。本研究では、北東麓のテフラ・火砕流堆積物と火口内～近傍噴出物を、噴出物の産状、本質物の形態・全岩及びモード組成の類似性、層位及び¹⁴C 年代を基に対比することで、男体火山の第 3 期活動の噴火履歴を明らかにした。また、これらの検討により、御沢溶岩に対比される第 3 期活動のテフラが北東麓で認定され、これまでの研究（山崎, 1957; 須藤・山崎, 1980; 石崎・呉山, 2004）で末期活動の火砕噴火と一連の活動で流出したとされていた御沢溶岩が第 3 期活動の噴出物であることが明らかになった。

なお、本稿では慣例に従い、未較正の¹⁴C 年代を、遡及開始年を西暦 1950 年とする yr BP あるいは ka BP、それを暦年較正した値を cal. yr BP あるいは cal. ka BP と表記する。暦年から推定される層位年代についても、本稿では層位年代と明記した上で同じく cal. yr BP あるいは cal. ka BP と表記する。

2. 地質概説

男体火山は、基底径約 6 km、基底からの比高約 1,200 m の円錐形の火山体をもつ (Fig. 2)。第 1 期活動では、主に玄武岩～安山岩質溶岩と同質のテフラの噴出により、火山体の主要部をなす 3 つの成層火山、すなわち初期に活動した小麓火山と男体北火山、それらを覆って現在の山頂部を構成する古麓火山^{ふるなげ}が形成された (高橋・他, 2009)。本火山から噴出した最も古いテフラ（男体小川テフラ）が始良丹沢 (AT) テフラのほぼ直上に堆積していることから (鈴木・他, 1994)、第 1 期活動による成層火山体の形成は AT の噴出年代 (約 30 cal. ka BP; Smith *et al.*, 2013) の後に始まったと考えられる。第 1 期火山体の形成後の約 17 cal. ka BP には第 2 期活動が起き、この噴火による火砕流堆積物が第 1 期火山体の北麓に広く堆積した。第 3 期活動の噴出物は、山頂火口内～近傍と北

東麓に分布が確認されている。

3. 山頂部及び北域の地形的特徴

男体火山の地形的特徴の一つに、現山頂部（古麓火山の山頂部）に見られる径約 1 km の火口の存在が挙げられる (Fig. 3A)。この山頂火口は、火口縁が南側で高く北側で低い非対称な形態をもち、火口壁構成物も南半部が古麓火山の噴出物であるのに対し、北半部は御沢溶岩からなる (Fig. 3B)。また、山頂部北域には、御沢溶岩に埋積された径約 1 km の馬蹄形凹地が山頂火口の縁を切る形で存在する (高橋・他, 2009; Ishizaki *et al.*, 2010; Fig. 2)。この馬蹄形凹地の開口方向にあたる御沢溶岩末端部での調査では、流れ山と考えられる小丘がいくつか確認でき、それらがジグソークラックの発達した岩屑なだれ岩塊を主体とする堆積物であることを確認できる。また、これらの岩塊は、全岩組成の類似性から、主に志津スコリア流堆積物の溶結凝灰岩が起源となっていることが分かっている (岡村・他, 2005)。これらの観察と分析から、現在の山頂域の地形は、①古麓火山の活動による山頂火口（“原火口”）の形成、②“原火口”からの大規模火砕噴火（第 2 期活動）の発生と溶結凝灰岩（志津スコリア流堆積物）の形成、③表層の溶結凝灰岩層（志津スコリア流堆積物）を含む“原火口”北側の崩壊と馬蹄形凹地の形成、④馬蹄形凹地頂部付近からの御沢溶岩の流出と火口北壁の再生、というイベントを経て形成されたと解釈できる。現在の火口には、礫層を挟む未固結の粘土～砂層が、火口底から火口北縁の最低点までの比高約 15 m にわたって分布する。Ishizaki *et al.* (2010) は、これらが山頂火口内に存在した火口湖で堆積した湖沼堆積物であると結論している。

本研究での現地調査と航空写真判読により、山頂火口内～近傍に 2 つの小火口と変質帯の存在が明らかになった (Fig. 3A)。小火口 C1 は、後述するスコリア丘の火口であり、山頂火口内の標高 2,300～2,350 m に北西-南東方向に伸長した明瞭な火口縁をもつ。小火口 C2 は、山頂火口内の標高 2,240～2,270 m に見られる径約 200 m の浅い窪地であり、後述するタフリングの火口跡である。また、山頂火口東縁と馬蹄形凹地東縁の間に位置する弁天河原谷頭域の周辺には変質帯が広がり、岩石が著しい熱水変質を被っている。

4. 北東麓に分布する第 3 期活動のテフラと火砕流堆積物

男体火山の北東麓、弁天河原左岸側の傾斜約 10°の斜面上に設けられた弁天河原林道では、各所で第 2 期活動の荒沢・竜頭軽石流堆積物 (AR) またはその二次堆積物

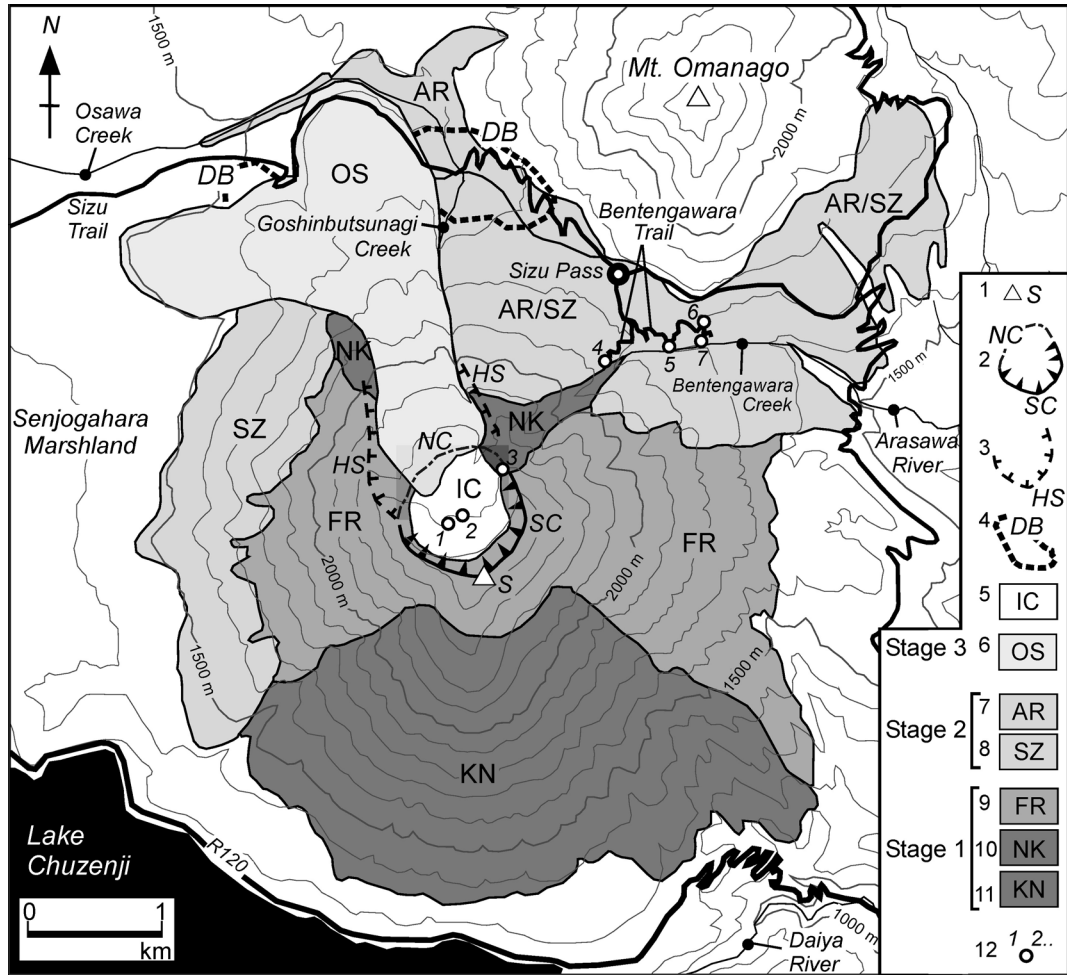


Fig. 2. Simplified geologic map of Nantai volcano (modified from Takahashi *et al.*, 2009), showing discussed localities. 1: summit, 2: SC, rim of the summit crater; NC, rim of the northern crater wall, 3: outline of the horseshoe-shaped collapse scarp, 4: approximate distribution area of hummocks, 5: eruption products and lacustrine deposits in the summit crater, 6: Osawa Lava, 7: Arasawa-Ryuzu Pumice Flow Deposit, 8: Sizu Scoria Flow Deposit, 9: eruption products of Furunagi volcano, 10: eruption products of Nantai-kita volcano, 11: eruption products of Konagi volcano, 12: locations of key outcrops and stratigraphic sections in Figs. 4 and 10. Label AR/SZ shows the area where thin Arasawa-Ryuzu Pumice Flow Deposit overlies Sizu Scoria Flow Deposit. Distributions of Nantai-Imaichi and Shichihonzakura Tephra are not shown.

を基底とし、その上位に明褐色の風化火山灰土を挟み第3期活動の噴出物が堆積している (Fig. 4)。林道沿いの荒沢・竜頭軽石堆積物は、層厚が約5mであり、やや円磨された白～黄白色軽石 (最大径約30cm) を主要構成物とし、少量のスコリアと縞状軽石を伴う。第3期活動の噴出物は、下位から、男体弁天河原テフラ4 (Nt-Bt4)、弁天河原火砕流堆積物 (BPFDF)、男体弁天河原テフラ3 (Nt-Bt3; ラハール堆積物を伴う)、同2 (Nt-Bt2) 及び同1 (Nt-Bt1) である。Nt-Bt1の上位には風化火山灰土を挟ん

で約50cmの黒色土壌が載り、その中位に6世紀に降下した榛名ニツ岳軽石層 (Hr-FP; 新井, 1962) が挟まれる。第3期活動で形成された各テフラの等層厚線図を Fig. 5A, D, Eに、ラハール堆積物と火砕流堆積物の分布をそれぞれ Fig. 5B, Cに示す (火砕流堆積物とラハール堆積物については、産出地点が同一であるため Fig. 5上では同じような分布域に示しているが、分布限界は必ずしも一致しない)。男体弁天河原テフラには、球状の火山灰凝集塊、いわゆる火山豆石も多く見られる。本稿では、

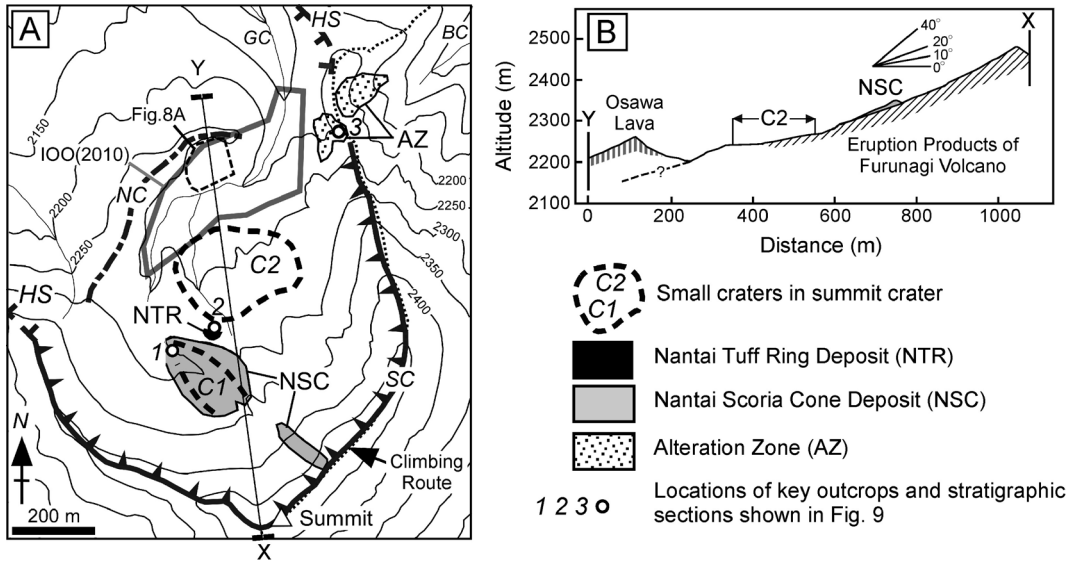


Fig. 3. (A) Topographic map of summit area of Nantai volcano showing areas of the alteration zone (AZ), Nantai Scoria Cone Deposit (NSC) and its crater (C1), and Nantai Tuff Ring Deposit (NTR) and its crater (C2). Abbreviations: BC, Bentengawara Creek; GC, Goshinbutsunagi Creek. Other abbreviations as in Fig. 2. The photographed area of Fig. 8A is shown by thin dashed outline. IOO (2010) shows the studied area of Ishizaki *et al.* (2010). X-Y represents the line of section used in Fig. 3B. Contour interval is 50 m. (B) Topographic cross section along the line X-Y in Fig. 3A. Inset figure shows the inclination scale in degrees.

Brown *et al.* (2010) に従い、内部に火山灰の粒径変化が見られない凝集塊を火山灰ペレット (ash pellet), 火山灰が外縁部から核部へ粗粒化するものを火山灰凝集火山礫 (accretionary lapillus) と呼び、これらの中で単一もしくは少数の粗粒火山灰～細粒火山礫を核にもつものを有核火山灰ペレット (cored ash pellet) または有核火山灰凝集火山礫 (cored accretionary lapillus) と呼ぶ。

各噴出物の本質物のうち代表的なものについて斑晶量及び全岩組成を Table 1 に示す。全岩組成については、7章で詳しく議論する。本質物の岩質は安山岩～デイサイトと多様であり、常に安山岩に比べデイサイトで斑晶に富む傾向が見られ、その傾向は山頂火口内の第3期活動の噴出物でも同様である。

4-1 男体弁天河原テフラ 4 (新称)

男体弁天河原テフラ 4 (Nt-Bt4) は、荒沢・竜頭軽石流堆積物の上位に層厚約 40 cm の風化火山灰土を挟んで載る、火山礫 (最大径 2.5 cm) 混じりの火山灰層である (Figs. 4, 6A)。層厚は地点 4 と 5 で約 10 cm、地点 7 で約 30 cm であり、山頂から一番遠い地点 7 で最も厚い (Fig. 5A)。地点 4 と 5 での本層は、降下テフラと考えられる淘汰の良い塊状の灰～明褐色火山灰層である。一方、地点 7 での本層は、淘汰の良い灰色及び明褐色の火山灰薄層の互層からなり、下位の薄層を削り込む形でクロスラ

ミナが発達する (Fig. 6B)。これらの産状から、地点 7 の本層全体またはその一部は火砕サージとして定置した可能性が高い。

本テフラの主要構成物は、デイサイト質の灰色火山灰～火山礫と安山岩質の黒灰色火山灰～火山礫である (Fig. 6C)。いずれも発泡が悪い多面体状のものが多く、表面に冷却割れ目をもつものも見られる。これらは、新鮮な状態で産することから本質物と判断できる。

径長 1 cm 以上の本質火山礫で測定した斑晶量は、デイサイトが 49 vol.%, 安山岩が 37 vol.% であり、斑晶として斜長石、石英、角閃石 (安山岩では存在しないこともある; 以後土と表記)、斜方輝石、単斜輝石、かんらん石、不透明鉱物が見られる。また、本質物中には、やや丸みを帯びた、安山岩と同一の斑晶組合せをもつ苦鉄質包有岩も見られる。デイサイトの多くは石基がガラス質であり、真珠岩状の割れ目 (perlite crack) が発達する (Fig. 7A)。安山岩と包有岩の石基組織は、前者がハイアロオフィティック組織、後者がディクティタキシティック組織である。

テフラ中には火山灰凝集塊も多く見られ、それらは火山灰ペレットもしくは有核火山灰ペレットとして産する (Fig. 7B)。他の構成物として、変質した褐色の安山岩質火砕物と花崗岩片が少量見られる。

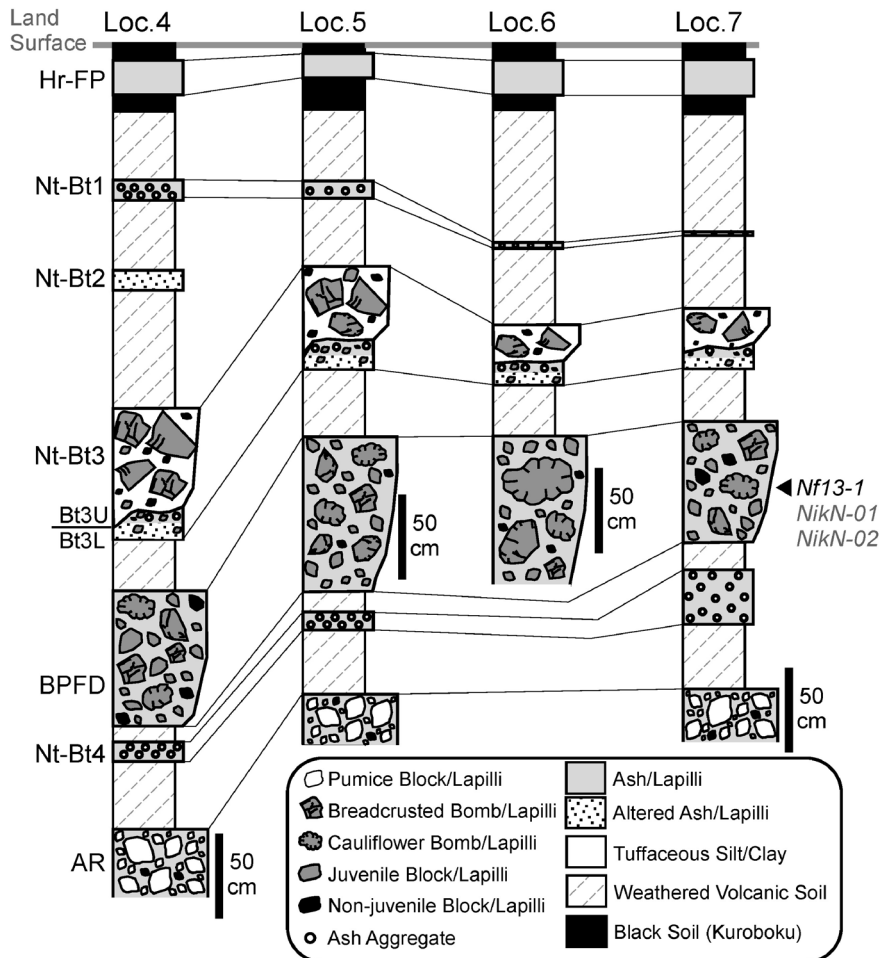


Fig. 4. Stratigraphic sections on the northeastern foot of Nantai volcano. Sampling horizons for ^{14}C dating are also shown (Nf13-1, this study; NikN-01 and NikN-02, Miyake *et al.*, 2009). Section locations are shown in Fig. 2. Abbreviations: Hr-FP, Haruna-Futatsudake Pumice; Nt-Bt1, Nantai-Bentengawara Tephra 1; Nt-Bt2, Nantai-Bentengawara Tephra 2; Nt-Bt3, Nantai-Bentengawara Tephra 3 (Bt3L, ash fallout; Bt3U, lahar deposit); BPF, Bentengawara Pyroclastic Flow Deposit; Nt-Bt4, Nantai-Bentengawara Tephra 4; AR, Arawasa-Ryuzu Pumice Flow Deposit.

4-2 弁天河原火砕流堆積物 (三宅・他, 2009)

弁天河原火砕流堆積物 (BPF) は、淘汰が悪く逆級化した層厚約 1 m の単層からなる火山岩塊火山灰流 (block-and-ash flow) 堆積物であり、男体弁天河原テフラ 4 の上位に層厚約 20 cm の風化火山灰土を挟んで載る (Fig. 4)。志津峠から延びる男体火山の北面登山道においても標高 1,950 m まで本堆積物の分布が確認でき (Fig. 5B)、男体火山の山頂域に給源があったことは間違いない。

本堆積物は、多様な形態の火山弾、火山岩塊～火山礫サイズのスコリア・軽石及び同質の粗粒火山灰から主に

構成され、少量の弱変質した類質溶岩片と花崗岩質の異質岩片を伴う (三宅・他, 2009)。本質物としては、円磨されたスコリアと軽石、やや円磨された不定形の火山弾、カリフラワー状火山弾、平滑面に囲まれたパン皮状火山弾が見られる。軽石がデイサイト質であるのに対し、スコリアとカリフラワー状火山弾は安山岩質である。また、安山岩質本質中にはしばしばパッチ状もしくは縞状に白色のデイサイト質部が混在する。地点 6 には巨礫サイズのパン皮状及び不定形火山弾が多産するが、これらの約半数は、多量の安山岩質火砕物と少量のデイサイト質火砕物からなる溶結火砕岩である。溶結火砕岩中の

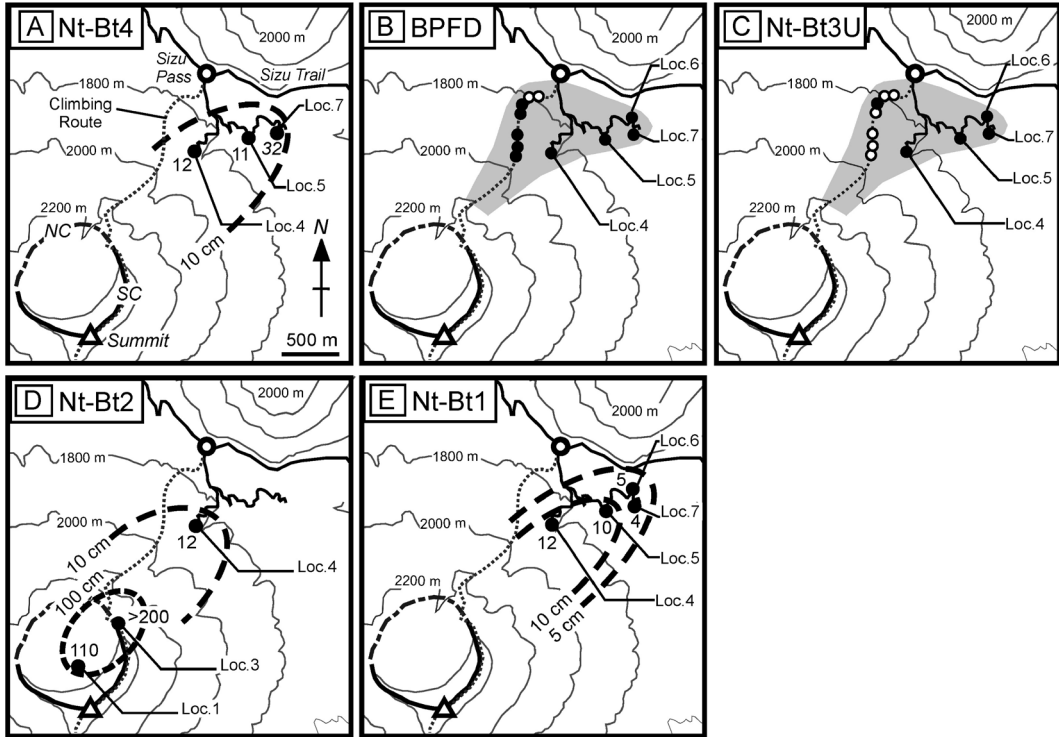


Fig. 5. Isopach maps of Stage 3 tephra, (A) Nt-Bt4, (D) Nt-Bt2, and (E) Nt-Bt1, and distribution maps of (B) BPFDF (pyroclastic flow deposit) and (C) Nt-Bt3U (lahar deposit). Closed circles show the locations of the outcrop of the primary Stage 3 eruption products. Open circles in (B) and (C) show the locations where only boulder of the cauliflower bomb (major constituent of BPFDF) or quench-fragmented lava block (major constituent of Nt-Bt3U) occurs without any finer-grained matrix parts. Contour interval is 200 m. Abbreviations as in Figs. 2 and 4.

粗粒火砕物は、不定形のフィアメ状のものが多く、しばしば内部まで赤色に酸化している (Fig. 6D-E)。これらの観察から、溶結火砕岩は、マグマ噴火 (おそらくストロンボリ式噴火) で放出された高温の火砕物が一度空気に触れて酸化し、定置後に圧密により溶結して形成されたと考えられる。

本質物の岩石は、斑晶量 7~41 vol.% の安山岩~デイサイトである。斜長石、石英、角閃石 (安山岩では±)、斜方輝石、単斜輝石、かんらん石 (デイサイトでは±)、不透明鉱物が斑晶として存在する。石基は、デイサイトが少量のマイクロライトを伴うガラス質組織、安山岩がハイアロオフィティック組織を示す。

4-3 男体弁天河原テフラ 3 (新称)

男体弁天河原テフラ 3 (Nt-Bt3) は、弁天河原火砕流堆積物の上位に層厚約 40 cm の風化火山灰土を挟んで載り、岩相により下部層 (Bt3L) と上部層 (Bt3U) に区分される (Figs. 4, 6A)。

Nt-Bt3L は、火山礫混じりの火山灰層 (最大層厚約 20 cm) であり、色調が下位の灰白色から上位の暗褐色へ漸移する (Fig. 4)。灰白色層が変質した細粒火山礫~粗粒火山灰を多く含み、やや淘汰が悪いのに対し、上位の暗褐色層は火山礫サイズの粒子が少なく淘汰が良い。Nt-Bt3L には、色調と無関係に、細粒火山礫~粗粒火山灰サイズの多面体形の灰~黒灰色溶岩片 (最大径 3 cm) が含まれる。これらの溶岩片は、その新鮮さ及び表面に冷却割れ目が発達しているものも見られることから、本質物と判断される。また、細粒火山灰の多くは火山灰ペレットとなっており、灰~黒灰色溶岩片の核をもつ有核火山灰ペレットが普通に見られる (Fig. 7C)。

Nt-Bt3U は、逆級化構造をもつ最大層厚約 60 cm の基質支持角礫層の単層からなる (Fig. 4)。構成物は、冷却割れ目が入った平滑面に囲まれた、新鮮で緻密な灰~黒灰色溶岩塊 (最大径約 30 cm ; Fig. 6F)、やや円磨された白色の変質火山岩片及びこれらの粒間を埋める火山灰~

Table 1. Representative whole rock and modal compositions for eruptive products from Nantai volcano.

Unit Name	OS	OS	Nt-Bt4	Nt-Bt4	NSC	NSC	BPDF	BPDF
Sample No.	OSI06-3	OSI06-4	Bt4/10-1	Bt4/10-3	NSCw08-1	NSCa09-2	BP07-12W	BP07-14
Rock Type	Lava	Lava	Lapilli	Lapilli	Bomb	Bomb	Bomb	Scoria
(wt.%)								
SiO ₂	58.63	66.45	57.02	65.90	55.33	64.42	65.06	55.54
TiO ₂	0.63	0.52	0.77	0.58	0.72	0.52	0.53	0.70
Al ₂ O ₃	16.87	15.89	16.90	14.99	17.61	15.85	15.92	17.92
Fe ₂ O ₃ *	8.54	5.47	9.79	6.43	9.87	5.77	5.91	9.81
MnO	0.14	0.10	0.16	0.12	0.15	0.11	0.11	0.16
MgO	4.32	1.99	4.91	2.39	4.41	2.11	2.28	4.70
CaO	7.13	5.01	7.06	4.88	8.59	4.88	5.09	8.86
Na ₂ O	2.49	2.99	2.36	3.03	2.35	3.11	3.01	2.15
K ₂ O	1.24	2.17	1.17	2.17	0.67	2.19	2.13	0.74
P ₂ O ₅	0.11	0.11	0.12	0.08	0.10	0.07	0.10	0.13
Total	100.11	100.71	100.26	100.56	99.79	99.03	100.14	100.70
(ppm)								
Rb	40	73	36	68	18	68	72	22
Sr	272	251	268	226	282	252	254	280
Nb	4	5	2	5	2	5	4	3
Ni	25	2	28	9	11	6	7	14
Y	16	18	17	18	16	20	20	16
Zr	85	111	77	139	76	124	115	69
V	179	78	205	124	240	116	119	242
Ba	311	457	300	505	219	514	558	205
(vol.%)								
Plagioclase	21.3	29.2	25.6	36.6	7.7	26.1	31.7	9.4
Quartz	1.5	6.2	3.3	4.8	0.4	1.9	2.7	1.9
Amphibole	0.0	1.1	0.0	1.0	0.6	1.2	0.3	0.2
Orthopyroxene	1.5	4.4	2.4	2.1	0.6	2.2	2.2	0.8
Clinopyroxene	0.6	1.2	4.0	3.0	1.0	3.8	1.2	0.3
Olivine	0.8	0.0	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.8
Opaque Mineral	1.0	1.6	1.2	1.4	0.5	1.8	0.7	0.2
Groundmass	73.3	56.3	63.3	51.1	89.0	63.0	61.1	86.3
Total	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

火山礫混じりの黄白色粘土である。基質部には、多様な炭化度の植物細片も少量含まれる。本層は Nt-Bt3L を削剥し、両者の境界に土壌が存在しないこと、変質火山岩と火山灰質粘土を大量に伴うことから、下部層の堆積直後に発生した cohesive なラハール (Crandell, 1971) の堆積物と判断される。Nt-Bt3U も弁天河原火砕流堆積物と同様に、男体火山北面の標高 1,950 m 付近まで露頭もしくは冷却割れ目をもつ溶岩塊の転石が確認でき (Fig. 5C), 男体火山の山頂域に給源があったことは間違いない。

Nt-Bt3L 中の本質火砕物及び Nt-Bt3U 中の灰～黒灰色溶岩塊は、ともに斑晶量 17～36 vol.% の安山岩～デイサイトである。斜長石、石英、角閃石 (安山岩では土)、斜方輝石、単斜輝石、かんらん石、不透明鉱物が斑晶として存在する。また、Nt-Bt3U の溶岩塊中にはしばしば暗灰色の苦鉄質包有岩 (最大長径約 8 cm) も見られる。包有岩の斑晶組合せは安山岩と同一である。石基は、デイサイトと安山岩がハイアロオフィティック組織、包有岩

がディクティタキシティック組織を示す。

4-4 男体弁天河原テフラ 2 (新称)

男体弁天河原テフラ 2 (Nt-Bt2) は、地点 4 付近に見られる一部パッチ状の含火山礫火山灰層 (層厚約 12 cm; Fig. 5D) であり、男体弁天河原テフラ 3 の上位に層厚約 60 cm の風化火山灰土を挟んで載る (Fig. 4)。構成物は、主に白～灰白色の粘土質火山灰からなり、その中に変質した火山岩の細粒火山礫が点在する。火山礫の多くは、周囲を細粒火山灰に覆われ、有核火山灰ペレットとなっている。本層は、本質物を含まないことから、水蒸気噴火による堆積物と考えられる。

4-5 男体弁天河原テフラ 1 (新称)

男体弁天河原テフラ 1 (Nt-Bt1) は、火山礫混じりの淘汰の良い黒色火山灰層であり、男体弁天河原テフラ 2 の上位に層厚約 40～60 cm の風化火山灰土を挟んで載る (Fig. 4)。層厚は、山頂火口に近い地点 4 で約 10 cm、山頂火口から遠い地点 7 で約 5 cm である (Fig. 5E)。本テフラは、本質物と考えられる新鮮で多面体状もしくはカ

Table 1. Continued from the previous page.

Unit Name	NTR	NTR	UGVB	UGVB	Nt-Bt3	Nt-Bt3	Nt-Yd	Nt-Bt1
Sample No.	NTR10-1	NTR10-2	UG1b10-5	UG10-9	Bt3U08-3	Bt3U10-2	YdU08-3	Bt1/08-4
Rock Type	Bomb	Bomb	Vol.Block	Vol.Block	Vol.Block	Vol.Block	Bomb	Lapilli
(wt.%)								
SiO ₂	63.87	55.27	59.93	63.95	63.59	55.37	56.30	56.10
TiO ₂	0.57	0.72	0.64	0.58	0.55	0.72	0.69	0.80
Al ₂ O ₃	15.98	17.57	16.33	16.52	15.61	17.05	18.04	16.92
Fe ₂ O ₃ *	6.67	10.47	8.31	7.13	6.49	10.77	9.18	10.62
MnO	0.11	0.15	0.13	0.10	0.11	0.15	0.14	0.17
MgO	2.80	4.41	3.57	2.57	2.90	4.27	3.77	4.80
CaO	5.52	8.45	6.84	4.73	5.52	8.67	8.42	7.24
Na ₂ O	2.80	2.31	2.36	2.74	2.90	2.42	2.43	2.48
K ₂ O	1.99	0.79	1.47	1.83	1.94	0.77	0.64	0.76
P ₂ O ₅	0.07	0.13	0.13	0.10	0.11	0.13	0.13	0.15
Total	100.38	100.26	99.70	100.25	99.74	100.31	99.73	100.04
(ppm)								
Rb	65	23	58	59	64	21	12	20
Sr	253	284	283	242	246	282	287	274
Nb	4	3	4	6	4	3	4	4
Ni	13	14	16	13	14	13	8	17
Y	19	16	17	20	18	17	14	18
Zr	112	67	95	107	116	64	76	90
V	139	228	172	142	131	236	221	218
Ba	433	203	348	487	461	210	238	238
(vol.%)								
Plagioclase	24.3	12.5	15.0	19.9	24.1	13.6	8.2	13.1
Quartz	5.6	0.6	0.6	3.7	2.4	1.4	1.4	1.0
Amphibole	0.6	0.1	0.2	0.2	0.3	0.0	0.0	0.1
Orthopyroxene	1.0	0.6	2.1	1.3	2.8	0.6	0.8	1.6
Clinopyroxene	0.6	1.7	0.7	2.1	2.0	1.0	1.0	1.2
Olivine	0.6	0.4	0.1	0.4	0.8	0.2	0.0	0.3
Opaque Mineral	1.0	0.3	0.6	1.2	3.2	0.4	0.2	0.6
Groundmass	66.3	84.0	80.8	71.2	64.3	82.9	88.3	82.1
Total	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

The modal compositions were determined by counting ~2000 points. Phenocrysts were defined as >0.3 mm in the longest dimension. Total Fe is expressed as Fe₂O₃. Vol.Block, volcanic block.

リフフラワー状の形状をもつ黒色火山灰~火山礫（最大径 1.5 cm）から主に構成される (Fig. 6G)。本質火山礫には表面に冷却割れ目をもつものも見られる。その他に類質物として変質が進んだスコリア片と溶岩片、異質物として砂~泥質堆積物の破片と花崗岩片を少量含む。また、本層中には火山灰凝集塊も多く見られ、それらには有核火山灰ペレット、火山灰凝集火山礫 (Fig. 7D) 及び有核火山灰凝集火山礫として産する。火山灰凝集塊の存在及び山頂火口からの距離に対応して薄化することから、本層は、男体火山の山頂域での水蒸気マグマ噴火による降下テフラ層と判断できる。

本質物は、斜長石、石英 (±)、角閃石 (±)、斜方輝石、単斜輝石、かんらん石 (±)、不透明鉱物を斑晶にもつ安山岩である。また、複数の本質火山礫のモード測定から求めた斑晶量 (平均) は約 17 vol.% である。石基は、

主に黒色ガラスからなり、少量のマイクロライトを伴う。

5. 山頂火口内及び火口近傍に分布する第 3 期活動の噴出物

5-1 山頂火口内北域の噴出物と層序

山頂火口内北域では、第 2 期活動の火砕噴火後に山体崩壊が起き (第 3 章参照)、その後、陸上噴火と火口湖内で水中噴火及び碎屑物の堆積により、多様な岩相の噴出物と堆積物が形成された。それらは、下位から順に、御沢溶岩 (OS: 山頂火口北壁の壁岩)、御真ごしんぶつなぎ火角礫岩 (GVB)、男体湖沼堆積物 1 (NLD1)、男体湯殿山テフラ (Nt-Yd)、男体湖沼堆積物 2 (NLD2) と命名されている (Fig. 8)。各層の分布と岩相の詳細については、Ishizaki *et al.* (2010) を参照されたい。以下では各層の概要を新たに明らかになった知見と併せて述べる。

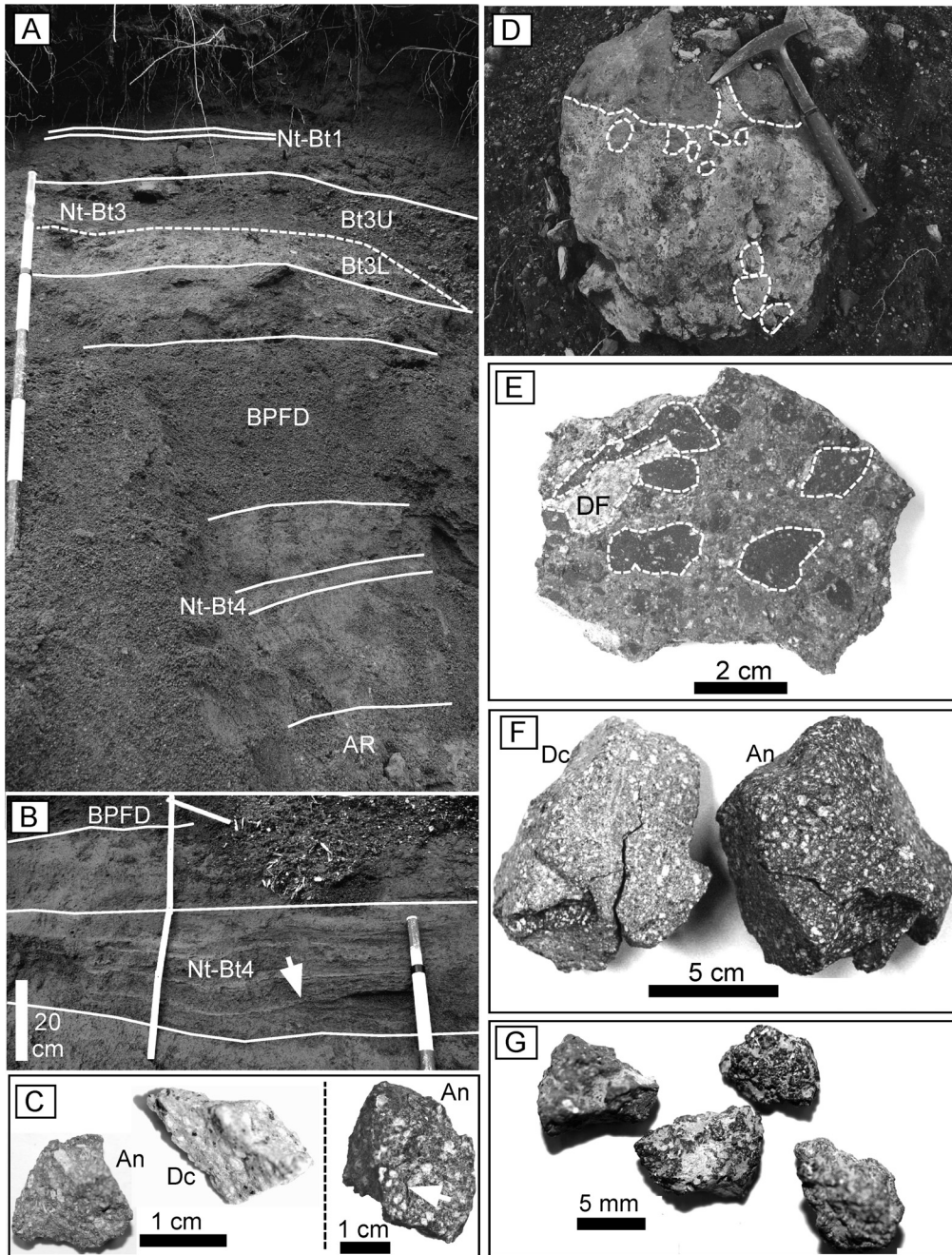


Fig. 6. Occurrences and constituents of Stage 3 eruption products on the northeastern foot of Nantai volcano. Locations of (A) and (B) are shown in Fig. 2. Abbreviations of unit names as in Fig. 4. (A) Tephra section at Loc. 5. Note that Nt-Bt3U truncates the underlying Nt-Bt3L. (B) Section of Nt-Bt4 at Loc. 7, showing cross-lamination. Note the arrowhead where the upper bed truncates the underlying bed. (C) Juvenile dacitic (Dc) and andesitic (An) lapilli in Nt-Bt4, with cracks (arrow) on the surface. (D) Block of welded pyroclastic rock in BPFD. Dashed lines show the outline of the oxidized scoriaceous pyroclasts. (E) Cross section of a block of welded pyroclastic rock in BPFD. Dashed lines show the outline of coarse pyroclasts (>1.5 cm in long axis). Light-colored part (DF) shows a flamme of dacitic pyroclast. (F) Dacitic (Dc) and andesitic (An) volcanic blocks in Nt-Bt3U, with a branching network of cracks on the surface. (G) Juvenile andesitic lapilli in Nt-Bt1.

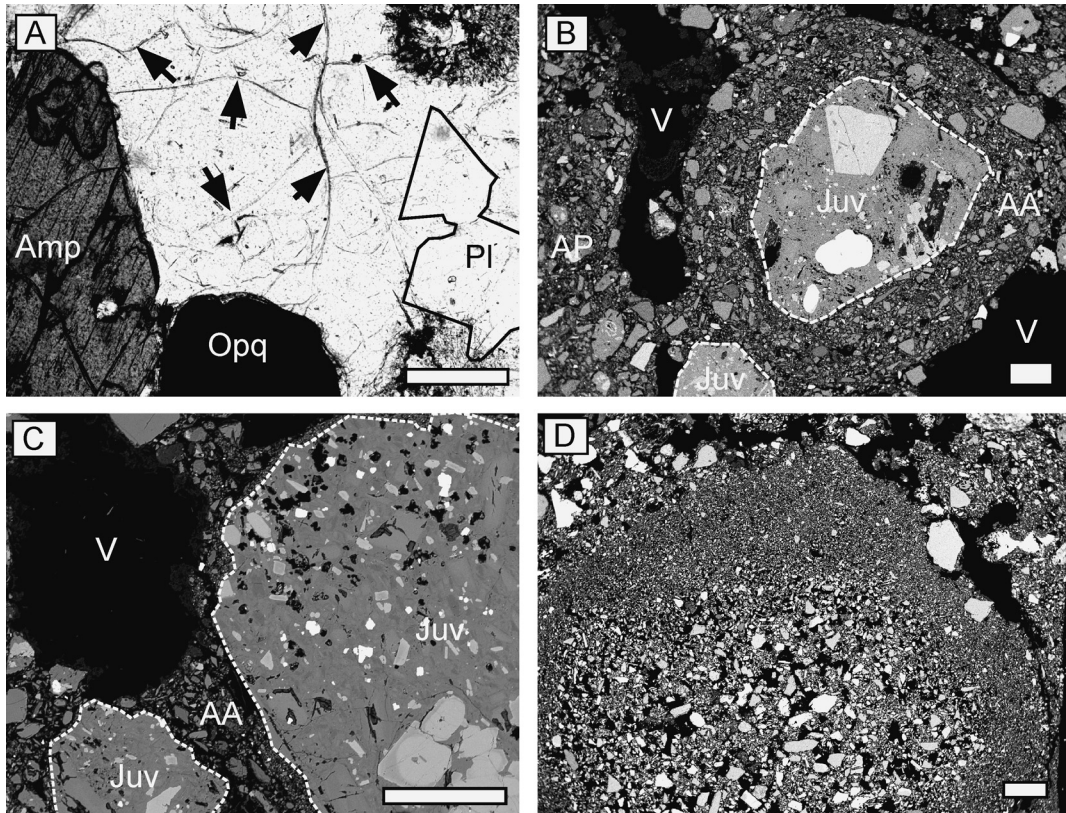


Fig. 7. (A) Thin section microphotograph of non-vesiculated juvenile dacitic lapillus in Nt-Bt4 with abundant arcuate perlitic cracks (arrowheads). Abbreviations: Pl, plagioclase; Amp, amphibole; Opq, opaque mineral. (B-D) Backscatter electron (BSE) images of ash aggregates. Most ash aggregates are deposited in a clast-supported fabric with voids (V) in between. The BSE imaging and digital image acquisition were performed using a JEOL JXA-8230 located at the Center for Instrumental Analysis, University of Toyama. (B) Cored ash pellet (center) and ash pellet (AP) in Nt-Bt4. The former consists of a core of coarse-grained juvenile andesitic ash (Juv) and a rim of finer-grained ash aggregates (AA). (C) Cored ash pellets in Nt-Bt3L with a core of coarse-grained juvenile andesitic ash (Juv) and a rim of finer-grained ash aggregates (AA). (D) Accretionary lapillus in Nt-Bt1 with slightly finer-grained coating of ash around a coarser-grained core. All scale bars denote 0.2 mm. Abbreviations of unit names as in Fig. 4.

5-1-1 御沢溶岩 (山崎, 1957)

御沢溶岩 (OS) は、山頂部の馬蹄形凹地頂部付近から流出した溶岩流であり、北麓の標高 1,000 m 付近まで流下し、荒沢・竜頭軽石流堆積物の平坦面上で停止している (Fig. 2)。山頂火口北壁には、塊状で垂直方向の流動模様をもつ御沢溶岩が露出している (Fig. 8A)。

本溶岩は、斑晶量が 25~55 vol.% の安山岩~デイサイトである。斑晶組合せは、斜長石、角閃石、石英、斜方輝石、単斜輝石、かんらん石 (デイサイトでは土)、不透明鉱物である。溶岩中には、暗色で最大長径約 15 cm の安山岩質包有岩も見られる。包有岩の斑晶組合せは安山岩と同一である。石基は、デイサイトがガラス質組織、

安山岩がハイアロオフィティック組織、包有岩がデイクテイタキシティック組織を示す。

5-1-2 御真仏薙火山角礫岩 (Ishizaki *et al.*, 2010)

御真仏薙火山角礫岩 (GVB) は、山頂火口底から御真仏薙源頭部付近に分布し、岩相に基づき下部層 (LGVB) と上部層 (UGVB) に区分される (Fig. 8)。いずれも山頂火口内に存在した火口湖内で形成もしくは堆積した地質体である。

LGVB は、総層厚約 30 m の無層理で塊状の火山角礫岩層であり、下半部がピローロブとその破片からなる pillow fragment breccia、上半部が偽ピローとその破片からなる angular fragment breccia で構成される (用語は

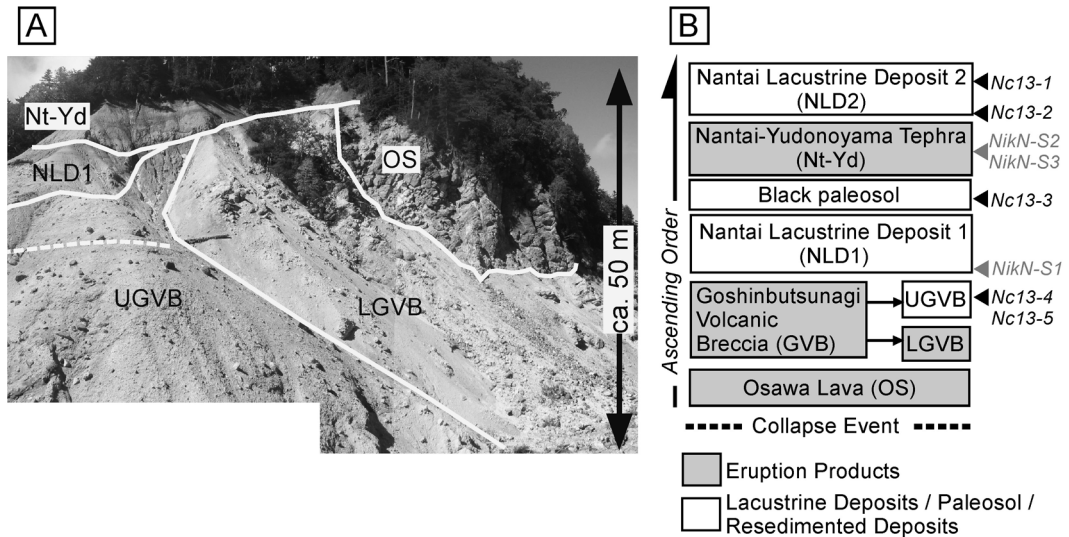


Fig. 8. (A) Photographs showing the lithologic units exposed at the northern sector of the summit crater. Abbreviations of unit names are shown in Fig. 8B. Dashed line shows the bed plain in UGVB. (B) Stratigraphy of the northern sector of the summit crater, showing stratigraphic units distinguished by Ishizaki *et al.* (2010). Sampling horizons for ^{14}C dating are also shown (Nc13-1 to Nc13-5, this study; NikN-S1 to NikN-S3, Ishizaki *et al.* (2010)).

Yamagishi (1991) に従う)。岩石は、斑晶量 10~20 vol.% の玄武岩質安山岩~安山岩であり、斜長石、斜方輝石、単斜輝石、かんらん石、不透明鉱物を斑晶にもつ。第 3 期活動の噴出物の中で唯一、角閃石を斑晶にもたない。石基はハイアロピリティック組織を示す。

UGVB は、総層厚約 30m の基質支持凝灰角礫岩であり、水平な層面に境される 2 層以上の単層からなる (Fig. 8A)。各層は、微細な冷却割れ目が発達した平滑面に囲まれた多角面体状の火山岩塊~火山礫 (最大径 80 cm) と同質でやや変質した細粒火砕物の基質から構成され、多くの樹幹状炭化木 (最大径 35 cm) 及び大小の炭化木片を乱雑に含むなど、重力流堆積物の特徴が見られる。また、下位の LGVB との境界に湖沼堆積物と考えられる層厚約 50 cm の砂泥層が挟まれることから、下部層形成後に時間間隙をおいて形成されたと考えられる。Ishizaki *et al.* (2010) は、岩相と構成物の特徴及び水中溶岩 (LGVB) と湖沼堆積物 (男体湖沼堆積物 1) に挟まれることから、本層を水中に再堆積した噴火同時性火砕堆積物 (subaqueously resedimented syn-eruptive volcanoclastic deposits: McPhie *et al.*, 1993) と解釈し、山頂火口内の斜面上に一度堆積した高温の火砕堆積物が斜面崩壊を起こし、流路上の樹木を巻き込みながら火口湖へと流下し再堆積することで形成されたと結論した。本層中の冷却割れ目をもつ新鮮な火山岩塊~火山礫は、斑晶量 14~36 vol.

% の安山岩~デイサイトである。斑晶として、斜長石、石英 (安山岩では土)、角閃石 (安山岩では土)、斜方輝石、単斜輝石、かんらん石 (デイサイトでは土)、不透明鉱物が存在する。また、火山岩塊中には、暗色で最大長径 8 cm の苦鉄質包有岩も見られる。包有岩の斑晶組合せは安山岩と同一である。石基は、デイサイトと安山岩がハイアロオフィティック組織、包有岩がデイクティタキシティック組織を示す。これらの岩質が本層分布域の南方上方の火口壁斜面に分布するタフリング堆積物 (5-2-2 参照) の本質物の岩質と類似すること、このタフリング堆積物の保存状況が極めて悪く、タフリング形成後にその山体が大規模に崩壊したと考えられることから、このタフリング堆積物が UGVB の母材であると判断される。

5-1-3 男体湖沼堆積物 1 (Ishizaki *et al.*, 2010)

男体湖沼堆積物 1 (NLD1) は、総層厚約 13 m の未固結の湖沼堆積物である (Fig. 8A)。本層の下半部には粘土~シルト質堆積物が卓越し、上半部にはシルト~細粒砂堆積物が卓越する。火山噴火に由来する堆積物を挟まないことから、本層堆積時には火山活動が休止していたと考えられる。

5-1-4 男体湯殿山テフラ (Ishizaki *et al.*, 2010)

男体湯殿山テフラ (Nt-Yd) は、水蒸気マグマ噴火によって形成された、最大層厚約 12 m の淘汰の悪い降下

火砕堆積物であり、多くの炭化した立ち木を埋積している。露頭の多くでは、下位の男体湖沼堆積物 1 との間に層厚約 6 cm の黒色土壤層が挟在する (Fig. 8B)。本質物は、表面に火山灰が固着した火山礫 (armored lapilli: Fisher and Schmincke, 1984) として産し、内部まで高温酸化により赤色化しているものや、表面に冷却割れ目をもつものも普通に見られる。本質物の岩石は、斑晶量 10~15 vol.% の安山岩であり、火口内の他の噴出物に比べ斑晶量に乏しい。斜長石、石英、角閃石 (±)、斜方輝石、単斜輝石、かんらん石 (±)、不透明鉱物が斑晶として存在する。石基は、主に黒~赤色のガラスからなり、少量のマイクロライトを伴う。

5-1-5 男体湖沼堆積物 2 (Ishizaki et al., 2010)

男体湖沼堆積物 2 (NLD2) は、層厚約 11 m の弱固結した湖沼堆積物であり、男体湯殿山テフラにアバットして堆積している。層界面が顕著な褐~明灰色碎屑物 (主に中~粗粒シルト) からなり、葉や木片などの植物遺骸を多量に含む。本層中に男体火山に由来した噴出物は確認されていない。

5-2 新たに山頂火口南域で見出された噴出物

5-2-1 男体スコリア丘堆積物 (新称)

男体スコリア丘堆積物 (NSC) は、山頂火口内の小火口 C1 を噴出源とする最大層厚約 20 m のスコリア質火山角礫岩層であり、C1 の周囲に底径約 150 m のスコリア丘を形成して分布する (Fig. 3)。C1 火口の壁には、古羅火山の溶岩を基底としてスコリア丘の断面が露出しており、著しく伸長したフィアメを伴う、最大層厚約 5 m の強溶結火砕岩の下部層 (LNSC) と、最大径 25 cm のスコリアと火山弾を主体とする、層厚 10 m 以上の上部層 (UNSC) に区分される (Figs. 9A, 10A)。本堆積物の一部は、山頂火口南壁に層厚約 3 m のスコリア質アグルチネート層としても産する (Fig. 10B)。UNSC とアグルチネート層では、本質物の原形が保存されており、それらが主に球状のスコリアとカリフラワー状火山弾からなることが分かる (Fig. 10C)。これらの産状から、本堆積物はストロンボリ式噴火による降下堆積物であると解釈される。なお、本堆積物と近接するタフリング堆積物の直接の層序関係は確認できなかった。

本質物は主に安山岩からなり、少量のデイサイト質火砕物を伴う。また、安山岩質火砕物には、その形状とは無関係に、パッチ状もしくは縞状に白色デイサイト質部を混在するものも存在する。本質物の斑晶量は 7~37 vol.% である。斑晶として斜長石、石英、角閃石、斜方輝石、単斜輝石、かんらん石 (デイサイトでは±)、不透明鉱物が見られる。石基は、デイサイトがやや脱ガラス化が進んだガラス質組織、安山岩が黒色ガラスに富むハイ

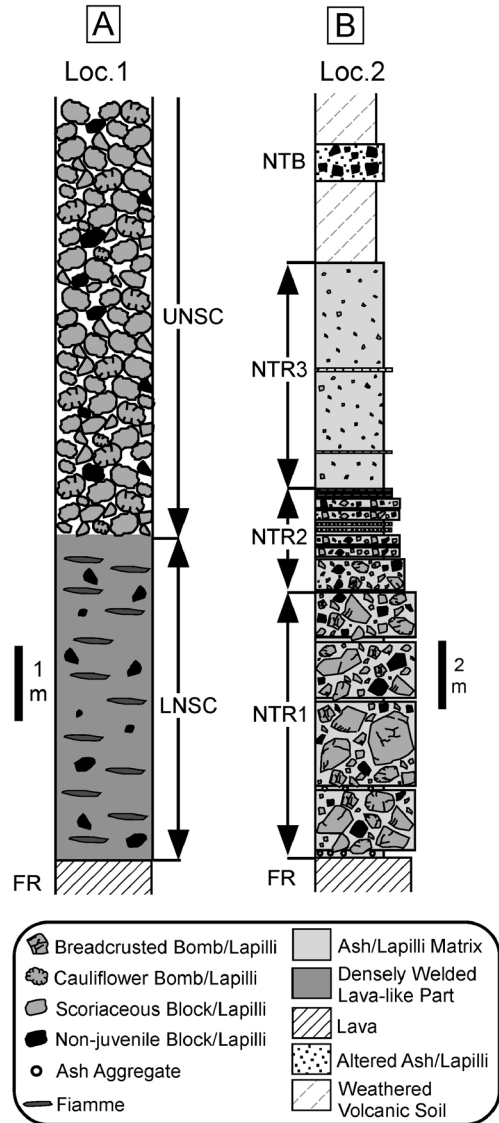


Fig. 9. Stratigraphic sections of (A) Nantai Scoria Cone Deposit (NSC) and (B) Nantai Tuff Ring Deposit (NTR). Both deposits can be divided into subunits on the basis of lithofacies. See text for detailed description of each subunit. NTB denotes Nanagoume Tuff Breccia. Section locations are shown in Figs. 2 and 3A.

アロオフィットイック組織を示す。

5-2-2 男体タフリング堆積物 (新称)

男体タフリング堆積物 (NTR) は、古羅火山の溶岩上に載る総層厚約 17 m の弱く固結した凝灰角礫岩~凝灰岩層であり (Fig. 10D)、小火口 C2 の火口縁の南側に局所的に分布する (Fig. 3A)。凝灰角礫岩層は、冷却割れ目が

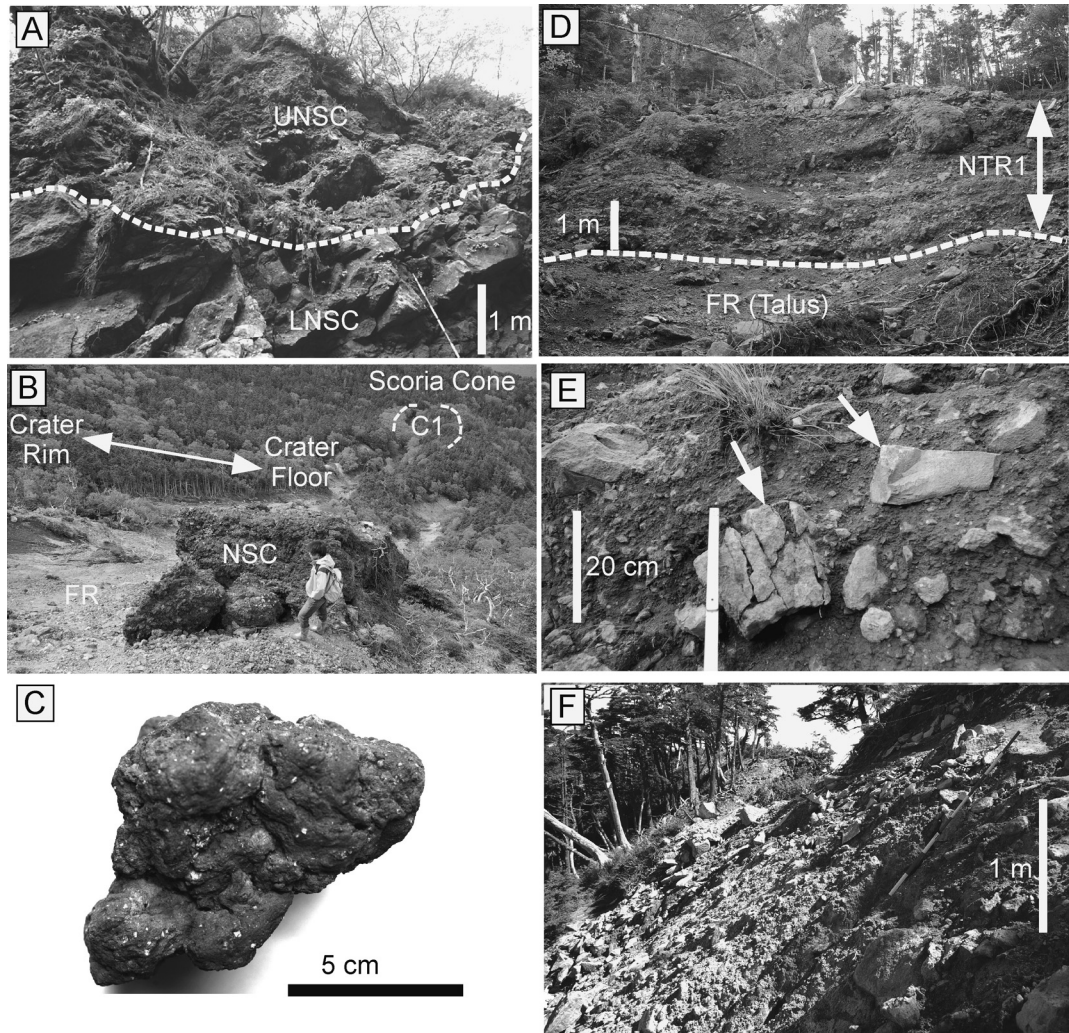


Fig. 10. Photographs of newly found eruption products within the summit crater of Nantai volcano. (A) Section of Nantai Scoria Cone Deposit (NSC), which consists of the upper scoria/bomb fallout part (UNSC) and the lower densely welded, lava-like part (LNSC). (B) Agglutinate lithofacies of NSC on the inner wall of the summit crater. FR denotes the eruption products of Furunagi Crater. (C) Cauliflower bomb in UNSC. (D) Section of the lower part of Nantai Tuff Ring Deposit (NTR1). (E) Clast-supported juvenile volcanic blocks with cracked surfaces (arrowheads) in NTR1. (F) Nanagoume Tuff Breccia (NTB) at Loc. 3.

発達した平滑面に囲まれた緻密な火山弾（最大径約 1 m）を本質物とし (Fig. 10E), 他に古羅火山由来の変質した溶岩片と赤色～暗紫色の溶結火砕岩片が類質物として産し, 少量の砂～泥質堆積物の破片と花崗岩片が異質物として存在する。凝灰角礫岩層の基質部と凝灰岩層の部分は, 白～灰色もしくは褐色の火山礫～火山灰からなる。

本堆積物は, 岩相により, 下位から 3 つのサブユニット NTR1～3 に区分される (Fig. 9B)。サブユニット間に土壌や浸食面が見られないことから, NTR1～3 は 1 回の

噴火で形成されたと判断される。NTR1 は総層厚が約 8 m, 凝灰角礫岩層 (層厚 1～2 m) と灰色の凝灰岩～火山礫岩層 (層厚 10～25 cm) の互層からなり, 凝灰角礫岩層の下面にはしばしばサグ構造が見られる。凝灰岩～火山礫層にはしばしばクロスラミナが見られ, 肉眼サイズの気泡を伴う泡入り凝灰岩 (vesiculated tuff: Lorenz, 1974) となっている部位も見られる。これらの産状から, NTR1 は爆発角礫岩 (explosion breccia: Wohletz and Sheridan, 1983) とベースサージ堆積物の互層であると解釈され

る。NTR2 は総層厚約 3 m であり、黄褐色の火山礫層（層厚 10~50 cm）と白色の凝灰岩層（層厚 5~10 cm）の互層からなる。凝灰岩層にはしばしばラミナが見られ、火山灰凝集塊の破片も含まれることから、ベースサージ堆積物と解釈される。NTR3 は総層厚約 7 m、火山礫を多く含む複数枚の塊状で固結度の弱い褐色凝灰岩層（最大層厚約 3 m）からなり、火山礫岩の薄層（層厚 10 cm 以下）を挟在する。

本堆積物中に産するような冷却節理の発達した緻密火山弾や、泡入り凝灰岩を伴うベースサージ堆積物は、いずれも水蒸気マグマ噴火で特徴的に形成される (Wohletz and Sheridan, 1983)。以上の産状及び噴出中心と考えられる C2 火口が本堆積物の基岩である古羅火山噴出物を掘削していることから、この露頭をタフリングの火口近傍相の断面と判断した。なお、本堆積物は保存状況が悪く、分布が確認されたのは地点 2 周辺に限られる。これは堆積物の大部分が安置後に斜面崩壊等により流出したためと考えられる。また、C2 火口は地形図や断面図 (Fig. 3B) では明瞭ではないが、これはタフリングの崩壊や土砂等の二次堆積物により埋積されたためと考えられる。

本堆積物の本質物は、斑晶量 12~39 vol.% の安山岩~デイサイトである。また、本質火山岩塊中には少量の暗灰色の苦鉄質包有岩（最大長径約 6 cm）が見られる。斑晶組合せは、ホスト・包有岩ともに、斜長石、石英（包有岩では土）、角閃石、斜方輝石、単斜輝石、かんらん石（デイサイトでは土）、不透明鉱物である。石基は、デイサイトと安山岩がハイアロオフィティック組織、包有岩がデイクティタキシティック組織を示す。

5-2-3 七合目凝灰角礫岩（新称）

七合目凝灰角礫岩層 (NTB) は、山頂部の変質帯の表層 (Fig. 3A の地点 3) と男体タフリング堆積物 (地点 2) の上位に見られる未固結の凝灰角礫岩層であり、古羅火山の溶岩由来のやや変質した火山岩塊~火山礫と、白色の粘土質火山灰からなる (Fig. 10F)。地点 3 では層厚が 2 m 以上であり、その上位には約 90 cm の風化火山灰土を挟み、榛名ニツ岳軽石層を挟在する黒色土壌層が載る。地点 2 では層厚約 110 cm であり、男体タフリング堆積物の上位に層厚約 220 cm の風化火山灰土を挟んで堆積している (Fig. 9B)。なお、地点 2 では本層の上位が崖錐と植生に覆われているため、より新しい噴出物の有無は不明である。本層は、淘汰が極めて悪く、巨礫サイズの類質火山岩塊を伴うものの本質物が見られないこと、基質が変質した粘土質火山灰からなることから、水蒸気噴火による噴出物と判断される。なお、本層と男体弁天河原テフラ 2 は、構成物の特徴及び層位が一致することから、同じ水蒸気噴火による堆積物と考えられる (Fig. 5D)。

6. ^{14}C 年代

主に年代が分かっていない噴出物と堆積物から、計 6 試料の ^{14}C 年代測定用試料を採取した。試料採取層準を、三宅・他 (2009) 及び Ishizaki *et al.* (2010) による ^{14}C 年代測定試料の採取層準とともに Fig. 4D と Fig. 8B に示す。山頂火口内からの測定試料は、男体湖沼堆積物 2 下部の灰色粘土層中に挟在する黒色腐植層 (Nc13-1: 採取層位は Nc13-2 の約 150 cm 上位) と男体湯殿山テフラ直上の褐色粘土層中の木片 (Nc13-2)、男体湯殿山テフラ直下の黒色土壌 (Nc13-3)、御真仏羅火山角礫岩上部層中の樹幹状炭化木 2 試料 (Nc13-4, Nc13-5) である (Fig. 8B)。北東麓からは、弁天河原火砕流堆積物中の炭化木 (Nf13-1) を測定試料として採取した (Fig. 4D)。分析は、株式会社加速器研究所に依頼した。酸・アルカリ・酸による前処理後に試料をグラファイト化し、AMS (NEC 社製 9SDH-2 型) を用い ^{14}C 及び $\delta^{13}\text{C}$ 濃度を測定した。 ^{14}C 年代の算出には Libby の半減期 (5,568 年) を用い、 $\delta^{13}\text{C}$ による同位体分別補正を行った。測定結果と、較正曲線データセット IntCal09 (Reimer *et al.*, 2009) 及び較正プログラム CALIB6.1.1 (Stuiver *et al.*, 2005) により算出された暦年代範囲を Table 2 に示す。

山頂火口内から採取した試料の ^{14}C 年代は、男体湖沼堆積物 2 下部から採取した Nc13-1 と Nc13-2 がそれぞれ $4,670 \pm 30$ yr BP と $4,830 \pm 30$ yr BP、男体湯殿山テフラ層直下の黒色土壌 Nc13-3 が $6,050 \pm 40$ yr BP、御真仏羅火山角礫岩上部層から採取した Nc13-4 と Nc13-5 がそれぞれ $7,330 \pm 40$ yr BP と $7,460 \pm 40$ yr BP である。これらの ^{14}C 年代は、上位層の試料ほど若い年代値を示し、層序とも矛盾がない。北東麓の弁天河原火砕流堆積物中の炭化木 Nf13-1 からは $10,350 \pm 40$ yr BP という年代が得られ、この値が第 2 期活動の年代より若いことから層序とも矛盾がない。

7. 全岩組成による噴出物の対比

これまでの研究により、男体火山の噴出物は、特に MgO-SiO₂ 図や Ni-SiO₂ 図において噴火期毎の全岩組成及び組成変化傾向の差異が明瞭に表れることが分かっている (石崎・呉山, 2004; 平野・高橋, 2006; 高橋・他, 2009; Ishizaki *et al.*, 2010)。そのため、全岩組成の比較により、第 3 期活動の火口内噴出物と山麓のテフラ・火砕流堆積物を対比することが可能と予想される。なお、御真仏羅火山角礫岩下部層と男体弁天河原テフラ 2 については、前者が水中溶岩からなりテフラを生産したとは考えにくいこと、後者が本質物を伴わない水蒸気噴火の堆積物であるため、全岩組成による対比の検討対象から除外した。

Table 2. Radiocarbon data and calibration ages for representative samples from Nantai volcano.

Sample Name	Unit Name (Position)	Material	$\delta^{13}\text{C}(\text{‰})$	^{14}C Age (yr BP)*	Calibration Age (cal yr BP) / probability (%) **	Labo ID
Nc13-1	NLD2 (Lower)	Black paleosol (humus)	-28.04 ± 0.40	4,670 ± 30	5,314 - 5,470 / 98.1 5,359 - 5,569 / 1.9	IAAA-82955
Nc13-2	NLD2 (Lowermost)	Wood fragment	-28.71 ± 0.44	4,830 ± 30	5,476-5,542 / 40.2 5,576-5,622 / 1.8 5,626-5,644 / 58.0	IAAA-91712
Nc13-3	Nt-Yd (Below Nt-Yd)	Black paleosol (humus)	-24.16 ± 0.84	6,050 ± 40	6,786-7,003 / 100	IAAA-91714
Nc13-4	UGVB	Carbonized wood fragment	-22.26 ± 0.40	7,330 ± 40	8,021-8,206 / 96.8 8,264-8,288 / 3.2	IAAA-91713
Nc13-5	UGVB	Carbonized wood fragment	-22.80 ± 0.46	7,460 ± 40	8,189 - 8,366 / 100	IAAA-82954
Nf13-1	BPFID	Carbonized wood fragment	-26.13 ± 0.64	10,350 ± 40	12,049-12,233 / 60.8 12,244-12,386 / 39.2	IAAA-123699

* Uncertainties are reported at 1 σ precision.

** Uncertainties are reported at 2 σ precision.

全岩組成は、富山大学機器分析施設の XRF (PHILIPS 社製 PW2404R) を用い、主成分・微量元素とも 1:5 に希釈したガラスビードを用いて測定した。測定条件と分析精度については Ishizaki *et al.* (2009) を参照されたい。全ての火口内噴出物、山麓の弁天河原火砕流堆積物及び男体弁天河原テフラ 3 上部層には、径が握り拳大以上の本質物が含まれる。これらの試料については、岩石切断機により風化面を除去した後にスライス化し、蒸留水によるスライスの洗浄という粉碎前処理をした。男体弁天河原テフラ 3 下部層と男体弁天河原テフラ 4 については、移植ゴテを用いて露頭面を削剥し、表面に現れた径 1~3 cm の本質火山礫を採取し、各粒子を洗浄・乾燥・粉末化の後に分析に供した。男体弁天河原テフラ 1 については、テフラ露頭の数部位から採取した約 2 kg のバルク試料から粒径 8 mm 以上の火山礫を選別し、洗浄・乾燥後に、実体鏡下で表面に汚れが残っているものや風化粒子、異質物、鉱物粒子を除去し、残った清浄な本質火山礫を採取部位毎に 2~3 個あわせて分析に供した。代表的試料の全岩組成を Table 1 に示す。また、各噴出物の組成の特徴が最も明瞭に表れている Ni-SiO₂ 図を Fig. 11 に示す。

男体弁天河原テフラ 4 の本質火山礫 (分析試料数 n=6) は、SiO₂ 量が 57.4~66.0 wt.% であり、第 2 期活動の火砕堆積物や他の第 3 期活動の噴出物に比べ安山岩の Ni 量が高く、SiO₂ 量の増加に伴い Ni 量が急激に減少するという特徴をもつ (Fig. 11A)。また、本質物は斑晶に富み、特にデイサイト質本質物では斑晶量が 50 vol.% に達する。山頂部に分布する噴出物の中で、男体弁天河原テフラ 4 と同様のモード及び全岩組成をもつ噴出物は御沢

溶岩に限られる。これまで御沢溶岩は、第 2 期活動の男体七本桜テフラ及び荒沢・竜頭軽石流堆積物のデイサイト質本質物と同一の全岩組成と斑晶組合せをもつこと、また、下位の荒沢・竜頭軽石流堆積物を直接覆う整合的被覆関係から、第 2 期 (末期) 活動の最後の噴火フェーズの噴出物と考えられてきた (石崎・呉山, 2004)。しかし石崎・呉山 (2004) が指摘したように、御沢溶岩のデイサイトの斑晶量 (約 55 vol.%) は、男体七本桜テフラ及び荒沢・竜頭軽石流堆積物のデイサイトの斑晶量 (25 vol.% 以下) と大きく異なり、安山岩の全岩組成も異なる (Fig. 11A)。そのため、男体七本桜テフラ及び荒沢・竜頭軽石流堆積物の噴出後にマグマ溜り内に取り残されたカルクアルカリ系列デイサイト質マグマが、その後も長期にわたって結晶化を進行させ、山体崩壊というイベントを経た後に斑晶に富む御沢溶岩となって噴出したと考えるのが自然であろう。また、御沢流域で報告されている御沢溶岩が荒沢・竜頭軽石流堆積物を直接覆う整合的被覆関係 (石崎・呉山, 2004) についても、この露頭地点が御沢溶岩流出当時も現在と同じく河谷域に位置したため、水流により軽石流堆積物の表層への土壌や二次堆積物の堆積が阻害され、噴火時期の異なる噴出物が見かけ上整合的な被覆関係をもつことになったと解釈すると上手く説明がつく。これらのことから、御沢溶岩が第 3 期活動の噴出物であり、御沢溶岩と酷似したモード及び全岩組成を有する男体弁天河原テフラ 4 が御沢溶岩の噴出時に形成されたテフラ層であると本稿では結論する。

山頂火口内の男体スコリア丘堆積物と北東麓の弁天河原火砕流堆積物には、本質物としてカリフラワー状火山弾 (Fig. 10C) が特徴的に産する。また、弁天河原火砕流

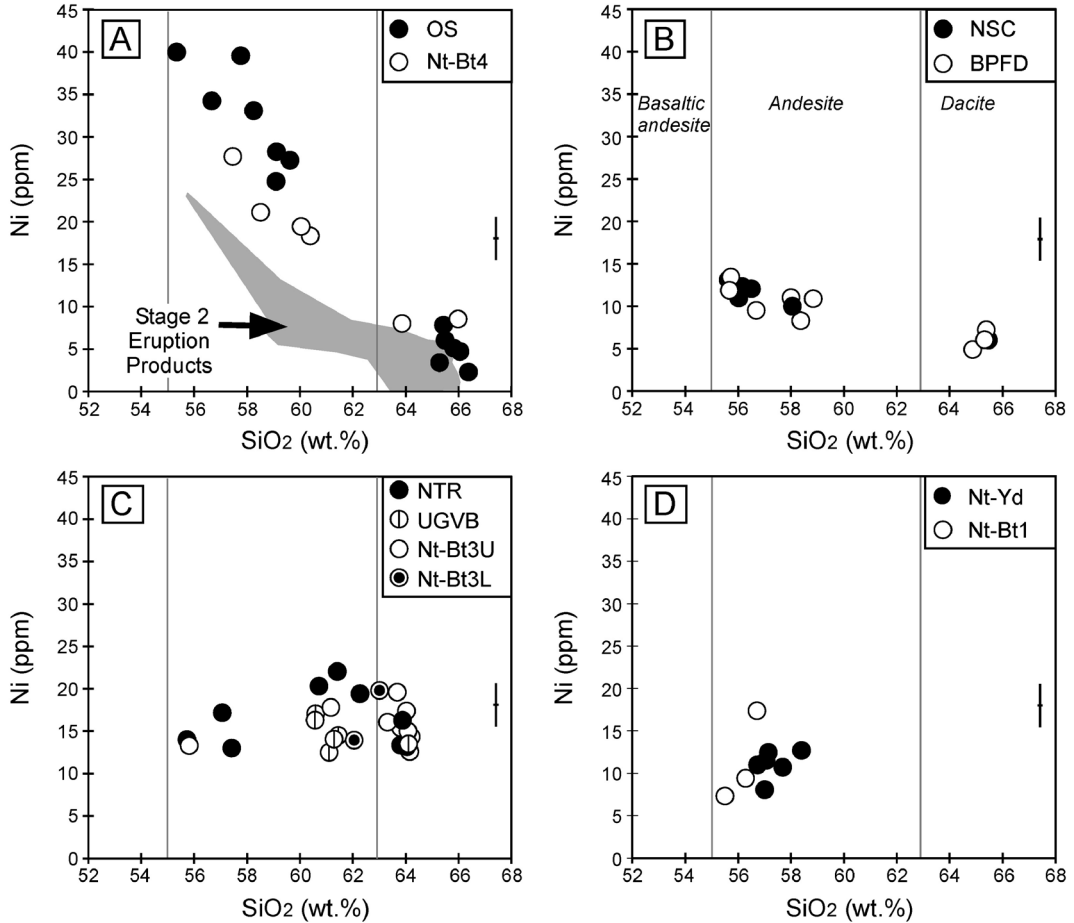


Fig. 11. Ni-SiO₂ variation diagrams of juvenile materials/lavas of: (A) Osawa Lava (OS) and Nantai-Bentengawara Tephra 4 (Nt-Bt4); (B) Nantai Scoria Cone Deposit (NSC) and Bentengawara Pyroclastic Flow Deposit (BPF); (C) Nantai Tuff Ring Deposit (NTR), the upper unit of Goshinbutsunagi Volcanic Breccia (UGVB), and Nantai-Bentengawara Tephra 3 (Nt-Bt3U and Nt-Bt3L); and (D) Nantai-Yudonoyama Tephra (Nt-Yd) and Nantai-Bentengawara Tephra 1 (Nt-Bt1). Division of basaltic andesite, andesite, and dacite is after Cox *et al.* (1979). Error bars indicate maximum 2σ analytical error on replicate XRF analyses of three standards (JB-1, JA-3, and JR-1). The field of the compositional range for the Stage 2 eruption products is also shown in A (data source: Ishizaki, unpublished data).

堆積物中には溶結火砕岩塊も含まれており (Fig. 6D-E), そのような岩石は、山頂火口内の第3期活動の噴出物では男体スコリア丘堆積物の下半部でのみ見られる (Fig. 9A)。男体スコリア丘堆積物と弁天河原火砕流堆積物の本質物は、SiO₂量がともに 55.6~65.4 wt.% (分析数はそれぞれ 6 試料と 9 試料) と一致し、Ni 量が低く (5~14 ppm), SiO₂量の増加に伴い Ni 量が微減する特徴をもつ (Fig. 11B)。このように火砕物の形態と産状が似ていることに加え、本質物の全岩組成も一致することから、男体スコリア丘堆積物と弁天河原火砕流堆積物は同一の噴火で形成された噴出物と結論される。

山頂火口内の男体タフリング堆積物、タフリング堆積物を母材とする御真仏薙火山角礫岩上部層、北東麓の男体弁天河原テフラ 3 は、主要構成物として平滑面に囲まれ、冷却割れ目の発達する溶岩片または本質火山角礫 (Figs. 6F, 10E) を特徴的に含み、岩質も類似するという共通点をもつ。これらの岩石の組成を比較したところ、SiO₂量が男体タフリング堆積物で 55.7~64.1 wt.% (n=8), 御真仏薙火山角礫岩上部層で 60.6~64.3 wt.% (n=7), 男体弁天河原テフラ 3 下部層で 62.1 及び 63.1 wt.% (n=2), 同上部層で 55.8~64.2 wt.% (n=9) と概ね一致し、Ni 量も SiO₂量とは無関係に 13~22 ppm でほぼ一定に保た

れるという共通の特徴が見られる (Fig. 11C). 以上の類似性から、これらの噴出物・堆積物は同一の噴火期に形成されたと結論される。

山頂火口内で最新の噴出物である男体湯殿山テフラと、北東麓の男体火山起源のテフラの中で最上位の男体弁天河原テフラ 1 にも、SiO₂量がそれぞれ 56.7~58.4 wt. % (n=6) と 55.5~56.7 wt. % (n=3), Ni 量がともに 7~23 ppm の範囲に点示されるなど、組成がほぼ一致し、他の噴出物に比べ SiO₂量の変化幅が小さいという共通性が見られる (Fig. 11D). また、記載岩石学的にも、両者はともに斑晶量 10~20 vol.% の安山岩からなり、角閃石斑晶が少ないという共通の特徴をもつ。以上の類似性から、男体湯殿山テフラと男体弁天河原テフラ 1 は同一の噴火で形成された噴出物であると結論される。

8. 第 3 期活動の各噴火の年代

8-1 御沢溶岩と男体弁天河原テフラ 4

御沢溶岩と男体弁天河原テフラ 4 の¹⁴C年代はこれまで報告されていない。男体弁天河原テフラ 4 の下位の荒沢・竜頭軽石流堆積物の暦年代は約 17 cal. ka BP (中村・他, 2011) であり、上位の弁天河原火砕流堆積物の暦年代は約 12 cal. ka BP である (8-2 参照)。これらの暦年代と男体弁天河原テフラ 4 の上下の風化火山灰土の厚さ (Fig. 4) から、御沢溶岩と男体弁天河原テフラ 4 を形成した噴火は 14 cal. ka BP (層位年代) 頃に起きたと推定される。

8-2 男体スコリア丘堆積物と弁天河原火砕流堆積物

これらの噴出物に関する¹⁴C年代としては、弁天河原火砕流堆積物中の炭化木片から得られた 3 つの年代値がある。それらのうち、本研究で得られた Nf13-1 の年代値が 10,350 ± 40 yr BP (暦年代 12,049~12,233 cal. yr BP (probability 60.8%), 12,244~12,386 cal. yr BP (同 30.2%)), 三宅・他 (2009) による年代値が NikN-01 で 10,343 ± 32 yr BP (暦年代 12,000~12,400 cal. yr BP), NikN-02 で 9,756 ± 161 yr BP (暦年代 10,600~11,800 cal. yr BP) である。三宅・他 (2009) による年代値は、NikN-01 が NikN-02 よりも古い年代を示し、誤差を考慮しても両者の年代値が一致しない。このような年代値の不一致の一因を、三宅・他 (2009) は火砕流が下位層中に含まれる植物遺骸を取り込んだためと考えた。しかしながら、三宅・他 (2009) による NikN-01 と NikN-02 の年代値の隔たりはわずか (暦年代で約 200 年) である。ここでは年代値が極めてよく一致した本研究による Nf13-1 の年代値と三宅・他 (2009) の NikN-01 の年代値を弁天河原火砕流堆積物の堆積年代と考え、この火砕流を形成した噴火が約 12 cal. ka BP に起きたと結論する。

8-3 男体タフリング堆積物、御真仏薙火山角礫岩上部層及び男体弁天河原テフラ 3

これらの噴出物に関する¹⁴C年代としては、本研究により御真仏薙火山角礫岩上部層中の炭化木 (試料 Nc13-4 と Nc13-5) から得られた 7,330 ± 40 yr BP と 7,460 ± 40 yr BP の年代値がある。暦年代は、Nc13-4 が 8,021~8,206 cal. yr BP (probability 96.8%), 8,264~8,288 cal. yr BP (同 3.2%) であり、Nc13-5 が 8,189~8,366 cal. yr BP (同 100%) である。したがって、これらの噴出物の形成年代は約 8 cal. ka BP と推定される。

8-4 七合目凝灰角礫岩と男体弁天河原テフラ 2

これら噴出物に関する¹⁴C年代はこれまで報告されていない。地点 4 では、男体弁天河原テフラ 2 とその上下のテフラとの間に挟まれる風化火山灰土の厚さはほぼ等しい。このことから、男体弁天河原テフラ 2 を形成した噴火は、男体弁天河原テフラ 3 を形成した噴火 (約 8 cal. ka BP) と男体弁天河原テフラ 1 を形成した噴火 (約 7 cal. ka BP; 8-5 参照) の半ばで起きたと推定され、その噴火年代は約 7.5 cal. ka BP (層位年代) と推定される。

8-5 男体湯殿山テフラと男体弁天河原テフラ 1

これらの噴出物に関する¹⁴C年代としては、男体湯殿山テフラに埋積された炭化木から報告された 6,110 ± 110 yr BP (試料 NikN-S2: 暦年代 6,736~7,254 cal. yr BP) と 6,090 ± 110 yr BP (試料 NikN-S3: 暦年代 6,679~7,250 cal. yr BP) がある (Ishizaki *et al.*, 2010)。また、本研究では、男体湯殿山テフラの下位の黒色土壌 (試料 Nc13-3) から 6,050 ± 40 yr BP が得られている (Table 2)。Nc13-3 の暦年代は、6,786~7,003 cal. yr BP (probability 100%) であり、男体湯殿山テフラに埋積された炭化木の暦年代と一致する。この黒色土壌は主に炭質物から構成され、男体湯殿山テフラの噴火によって埋積された植物起源の堆積物であると考えられる。以上から、男体湯殿山テフラ及び男体弁天河原テフラ 1 の噴火年代は約 7 cal. ka BP と結論される。

8-6 火口湖の存在時期

男体火山の山頂火口内には新旧 2 層の湖沼堆積物が分布しており、第 2 期活動後のある時期に火口湖が存在したことは明らかである。

男体湖沼堆積物 1 に関する年代としては、Ishizaki *et al.* (2010) が最下部の粘土層中の木片 (試料 NikN-S1) から報告した 7,350 ± 110 yr BP (暦年代 7,970~8,340 cal. ka BP)、この湖沼堆積物の直上を被覆する黒色土壌 (試料 Nc13-3) から本研究で得られた約 7 cal. ka BP がある (Table 2)。また、本堆積物の下位には、水中に堆積した御真仏薙火山角礫岩上部層が存在しており、その中の樹幹炭化木 (試料 Nc13-4 と Nc13-5) から約 8 cal. ka BP

の暦年代が本研究で得られている。したがって、男体湖沼堆積物 1 の堆積年代は 8~7 cal. ka BP の間であり、この期間に山頂火口内に火口湖が存在したことは間違いない。また、御真仏羅火山角礫岩上部層の下位にも水中火山岩の御真仏羅火山角礫岩下部層が存在しており、火口湖の存在期間は 8 cal. ka BP 以前に遡れる。北東麓には御真仏羅火山角礫岩下部層に対比されるテフラ層が存在しないが、このことは、御真仏羅火山角礫岩下部層形成時には十分な規模の火口湖ができており、湖底でのマグマと水の接触においてガスの急激な膨張が妨げられ、テフラを生産するような爆発的噴火が起きにくくなっていたことを示唆する。一方、火口湖の形成に重要な役割を果たしたのは約 14 cal. ka BP (層位年代) の御沢溶岩の噴出である。御沢溶岩の流出前には、山体崩壊によって北に口を開いた馬蹄形凹地が山頂域に形成されており、火口内の水は全て北麓へと排水されていたと考えられる。そのため、山頂域に湖が形成されるためには、馬蹄形凹地の頂部域に御沢溶岩が噴出し、現在の山頂火口北壁が再生される必要がある。したがって、山頂火口内での貯水が開始されたのは、御沢溶岩が噴出した約 14 cal. ka BP 以降、御真仏羅火山角礫岩上部層が堆積した 8 cal. ka BP 以前と考えられる。

男体湖沼堆積物 2 の年代として、本堆積物最下部層中の木片 (試料 Nc13-2) から 5,476~5,542 cal. yr BP (probability 40.2%), 5,576~5,622 cal. yr BP (同 1.8%), 5,626~5,644 cal. yr BP (同 58.0%), 本堆積物下部に挟在する腐植 (試料 Nc13-1) から 5,314~5,470 cal. yr BP (probability 98.1%), 5,359~5,569 cal. yr BP (同 1.9%) の暦年代が本研究で得られている (Table 2)。したがって、5.5 cal. ka BP 頃には新たな火口湖で男体湖沼堆積物 2 が堆積し始めていたと結論される。男体湖沼堆積物 2 は、約 7 cal. ka BP に形成された男体湯殿山テフラに対してアバットして堆積しており、男体湯殿山テフラによる地形的高まりが障壁となり火口湖が再生された可能性が高い。

9. 男体火山の第 3 期活動の噴火史

本研究で明らかになった山頂火口内~近傍の地質、北東麓のテフラ層序及び¹⁴C 年代から、男体火山の第 3 期活動の噴火史は以下のようにまとめられる (Fig. 12)。

約 14 cal. ka BP (層位年代) には、山頂北域の馬蹄形凹地頂部付近から御沢溶岩が噴出し、その地形的高まりにより、山体崩壊により消失した山頂火口の北壁が再生された。この噴火では、北東麓に男体弁天河原テフラ 4 が堆積した。男体弁天河原テフラ 4 には、内部に真珠岩状の割れ目、表面に冷却割れ目をもつ本質物 (Figs. 6C, 7A) や火山灰凝集塊 (Fig. 7B) が見られる。本質物の表面や

内部に見られる割れ目は、マグマが急速な冷却と収縮に伴って破砕されたことをうかがわせ、このような割れ目がマグマと水の接触による急冷で形成されることが実験で確かめられている (Büttner *et al.*, 1999)。また、火山灰凝集塊は水蒸気マグマ噴火の堆積物中に普通に産する (Wohletz and Sheridan, 1983; Fisher and Schmincke, 1984)。これらのことから、御沢溶岩の活動は、マグマの地下浅所への供給によって発生した水蒸気マグマ噴火を伴ったことが明らかであり、この水蒸気マグマ噴火で形成されたテフラが男体弁天河原テフラ 4 であると考えられる。14 cal. ka BP 頃には火口内に火口湖が存在しなかったため、この水蒸気マグマ噴火では、マグマと地下浅所の帯水層または火口内の河川水の接触が重要な役割を果たした可能性が高い。

約 12 cal. ka BP には、山頂火口内の小火口 C1 からの噴火により、山頂火口壁斜面上に男体スコリア丘堆積物が堆積した (Fig. 3A)。このスコリア丘の基底の傾斜は、スコリアや火山弾の安息角 (31~33°: 例えば, Yamamoto *et al.*, 2005) 以下の 15~25°である (Fig. 3B)。そのため、噴出した火砕物が斜面上を転がり落ちずにスコリア丘を形成するに至ったと考えられる。一方、この時の噴火で北東麓に堆積した弁天河原火砕流堆積物には、カリフラワースト火山弾や溶結火砕岩などのスコリア丘構成物が火砕物として産しており (Fig. 6D-E)、この火砕流が、高温のスコリア丘本体に火砕物の起源をもつスコリア丘崩壊型火砕流 (例えば, 田島・他, 2013) であると判断される。スコリア丘崩壊の主要因としては、①火口壁斜面上に噴火により新たな火砕物が供給され、急速に斜面が不安定化し崩壊した可能性、②火砕物の溶結による火道の閉塞とそれに伴う火道内の内圧増加により爆発が起こり、その結果スコリア丘が破壊され火砕流を発生させた可能性が考えられるが、現時点ではどちらの要因が重要であったかは判断できない。スコリア丘の位置や弁天河原火砕流堆積物の分布から、この火砕流は、最初は火口底の傾斜に沿って北流し、その後、御沢溶岩の高まりに遮られて北東方へと流れを変え、地形的低所を通して北東麓まで流下して定置したと推測される (Fig. 5B)。弁天河原火砕流堆積物はキュリー点以上の高温で北東麓に定置しており (三宅・他, 2009)、この時期の火口湖は火砕流を土石流化させるほどの規模には発達していなかったようである。

その後、火口湖は十分な規模に発達し、男体湯殿山テフラ (約 7 cal. ka BP) が噴出する前まで火口内に存続した。この火口湖底に噴出したマグマが水中溶岩からなる御真仏羅火山角礫岩下部層を形成したが、その噴出年代は分かっていない。

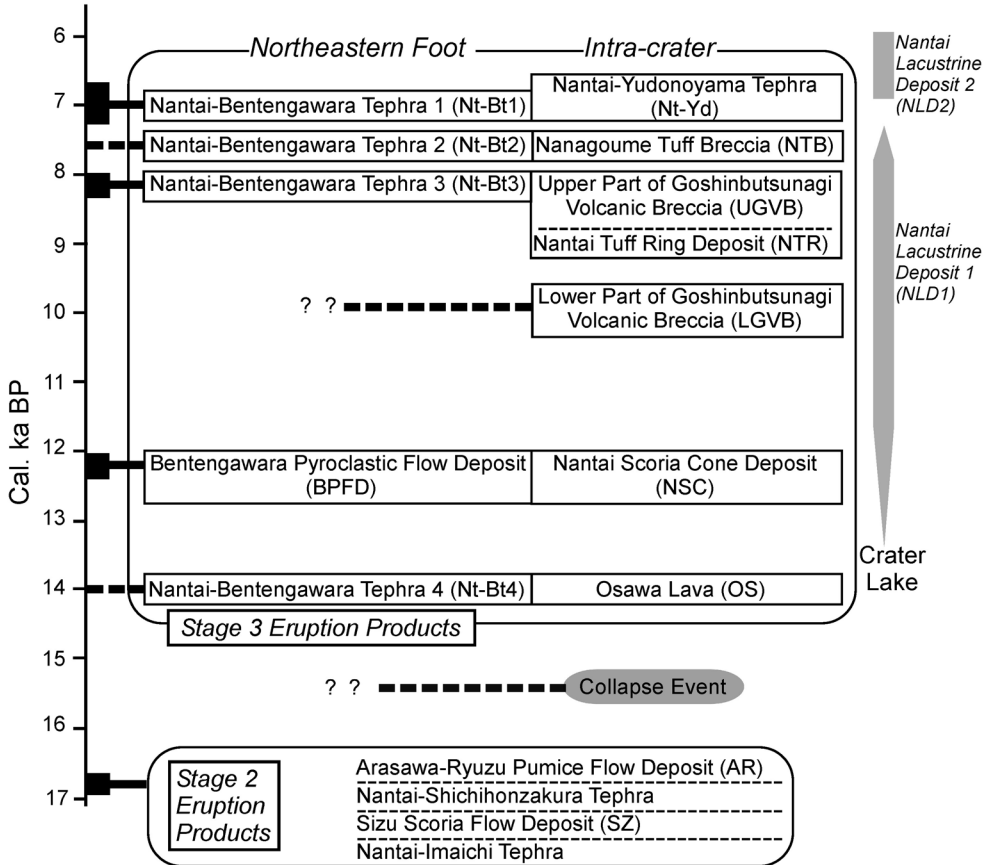


Fig. 12. Summary of the stratigraphy and correlations between proximal (intra-crater) eruptives and the distal (northeastern foot) eruptives of Nantai volcano during the last 17,000 yrs. Black boxes show the range of the calendar ages of eruptives. Eruption ages of Nt-Bt2 and Nt-Bt4 are deduced from their stratigraphic positions (Fig. 4). The ranges of ages for lacustrine deposits are also shown. Ages of LGVB and the collapse event are unknown.

約 8 cal. ka BP には、山頂火口内の小火口 C2 で水蒸気マグマ噴火が発生し、男体タフリング堆積物が形成された (Fig. 3A)。水蒸気マグマ噴火の原因としては、この噴火時には十分な規模に成長していた火口湖の湖水とマグマとの接触が考えられる。この噴火により、山麓にはまず火山灰凝集塊を含んだ男体弁天河原テフラ 3 の下部層が堆積した。このタフリングは、火口壁斜面上に堆積した未固結の火砕堆積物からなるため、形成直後に崩壊して高温の重力流を発生させた。この重力流は周囲の樹林を巻き込みながら火口底斜面を北流し、火口湖内に流入・再堆積し、炭化木を多量に含んだ御真仏雑火山角礫岩上部層を堆積させたと考えられる。重力流の一部は、火口湖流入後に湖水及び湖沼堆積物と混合し、ラハールとなって地形的低所を通して北東麓まで流下して男体弁天河原テフラ 3 の上部層を堆積させたと推測される

(Fig. 5C)。

約 7.5 cal. ka BP (層位年代) には山頂域で水蒸気噴火が起こり、山頂域には七合目凝灰角礫岩を、北東麓には男体弁天河原テフラ 2 を堆積させた。これらの噴出物には湖沼堆積物に由来する異質物が含まれていないため、この噴火の火口は、湖沼堆積物が分布しない火口壁斜面上部に位置したと考えられる。山頂域に分布する七合目凝灰角礫岩の基底には変質帯が広がっており、白色粘土と変質岩を主要構成物とする七合目凝灰角礫岩と男体弁天河原テフラ 2 も、この変質帯内に位置した火口から噴出した可能性が高い。この噴火にマグマが直接関与したか否かについては現時点では不明であるが、噴出物中に明らかな本質物が認められないことから可能性は低いと考えられる。これらの噴出物の成因がマグマ活動とは無関係であったとすると、水蒸気噴火の要因としては噴

気・熱水系の環境変化が考えられ、火口が変質帯の斜面上に想定されることから、地すべりによる噴気通路の閉塞とそれに伴う蒸気圧の増大（例えば、露木・他、1980）が噴火要因として考えられる。

約 7 cal. ka BP には水蒸気マグマ噴火が山頂火口内で起こり、山頂火口北域に男体湯殿山テフラを厚く堆積させ、北東麓には男体弁天河原テフラ 1 を堆積させた。男体湯殿山テフラの直下には有機物に富む黒色土壌が発達し、また、樹木が立木の状態でテフラに埋積し炭化していることから、この噴火の直前には火口湖は消失し、山頂火口内に森林が発達していたのだろう。また、男体湯殿山テフラ及び男体弁天河原テフラ 1 中に火山灰サイズの砂～泥質堆積物の破片が含まれることから、この噴火の火口は男体湖沼堆積物 1 の分布域に存在したと推定され、水分を含んだ湖沼堆積物の存在が水蒸気マグマ噴火の発生に重要な役割を果たしたと推測される。この噴火の後に、山頂火口内に火口湖が再生され、湖底に男体湖沼堆積物 2 を堆積させた。火口湖が再生された正確な時期は不明であるが、今回の年代測定結果より 5.5 cal. ka BP 頃には新たな火口湖において男体湖沼堆積物 2 が堆積していたことが明らかである。おそらく、厚く堆積した男体湯殿山テフラが山頂火口内の河川を堰き止めることにより、火口湖が再生したのだろう。

男体湯殿山テフラ及び男体弁天河原テフラ 1 よりも新しい男体火山起源の噴出物が確認できないことから、男体火山は約 7 cal. ka BP の水蒸気マグマ噴火以降は活動を停止している可能性が高い。

謝 辞

三宅康幸氏（信州大学）、中村洋一氏（宇都宮大学）及び大井信三氏（国土地理院）には折にふれ男体火山の噴出物や火山地形について議論して頂き、有益な助言を頂いた。2013 年日本火山学会秋季大会の現地討論会「男体火山・那須火山」に参加された方々との議論により、本論の論旨が明瞭になった。また、長谷川健氏（茨城大学）、匿名査読者、編集担当の前野 深氏（東京大学）に頂いたコメントにより本論を改善することができた。環境省への土石採取申請にあたっては、北関東東地区自然保護事務所に御世話になった。本研究には学術振興会科学研究費補助金基盤研究 (C) 課題番号 23510220（代表：石崎泰男）及び平成 21 年度深田研究助成（代表：石崎泰男）を使用した。以上の方々及び関係機関に記して感謝申し上げます。

引用文献

阿久津 純 (1979) 日光の自然。日光市史編纂委員会編

- 「日光市史（上巻）」, pp.2-29, 日光市。
 新井房夫 (1962) 関東盆地北西部の第四紀編年。群馬大学紀要（自然科学）, **10**, 1-79。
 Brown, R.J., Branney, M.J., Maher, C. and Dávila-Harris, P. (2010) Origin of accretionary lapilli within ground-hugging density currents: Evidence from pyroclastic couplets on Tenerife. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **122**, 305-320。
 Büttner, R., Dellino, P. and Zimanowski, B. (1999) Identifying magma-water interaction from the surface features of ash particles. *Nature*, **401**, 688-690。
 Cox, K. G., Bell, J. D. and Pankhurst, R. J. (1979) **The Interpretation of Igneous Rocks**. George, Allen and Unwin, London, 450 p.
 Crandell, D.R. (1971) Postglacial lahars from Mount Rainier Volcano, Washington. *U. S. Geol. Surv., Prof. Pap.*, **677**, 75 p.
 Fisher, R.V. and Schmincke, H.-U. (1984) **Pyroclastic Rocks**. Springer, Berlin, 472p.
 平野公平・高橋正樹 (2006) 日光男体火山最末期噴出物の斑晶鉱物化学組成とマグマ溜りプロセス。日本大学文学部自然科学研究所研究紀要, **41**, 123-150。
 石崎泰男・呉山正和 (2004) 日光火山群男体火山の 12 ka 噴火の推移とマグマ供給系。岩石鉱物科学, **33**, 197-207。
 Ishizaki, Y., Masubuchi, Y. and Aono, Y. (2009) Two types of dacitic pumices from the caldera-forming eruption of Numazawa volcano, NE Japan. *J. Mineral. Petrol. Sci.*, **104**, 356-373。
 Ishizaki, Y., Oikawa, T. and Okamura, Y. (2010) AMS ¹⁴C dating of lacustrine and pyroclastic deposits in the summit crater of Nantai volcano, NE Japan: evidence for Holocene eruption. *J. Mineral. Petrol. Sci.*, **105**, 215-227。
 Lorenz, V. M. (1974) Vesiculated tuffs and associated features. *Sedimentology*, **21**, 273-291。
 町田 洋・新井房夫 (2003) **新版火山灰アトラス: 日本列島とその周辺**。東京大学出版会, 336p。
 McPhie, J., Doyle, M. and Allen, R. (1993) **Volcanic Textures**. University of Tasmania, Tasmania, 198p.
 三宅康幸・齋藤美由紀・竹下欣宏・及川輝樹・齋藤武士 (2009) 日光男体火山における約 1 万年前の火砕流堆積物の発見。火山, **54**, 163-174。
 中村洋一・松居誠一郎・布川嘉英 (2011) 男体今市層 (Nt-I) および男体七本桜層 (Nt-S) の噴出年代。日本火山学会 2011 年度秋季大会講演予稿集, 73。
 岡村裕子・石崎泰男・遠藤広基・内野匡貴 (2005) 日光火山群、男体火山の地質: 1. 主に山頂火口内の地質について。日本火山学会 2005 年度秋季大会講演予稿集, 114。
 Reimer, P.J., Baillie, M.G.L., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J. W., Blackwell, P.G., Bronk Ramsey, C., Buck, C.E., Burr, G. S., Edwards, R. L., Friedrich, M., Grootes, P. M., Guilderson, T.P., Hajdas, I., Heaton, T.J., Hogg, A.G., Hughen, K.A., Kaiser, K.F., Kromer, B., McCormac, F.G., MaNting, S.W., Reimer, R.W., Richards, D.A., Southon, J. R., Talamo, S., Turney, C. S. M., van der Plicht, J. and Weyhenmeyer, C. E. (2009) IntCal09 and Marine09 radiocarbon age calibration curves, 0-50,000 years cal BP. *Radiocarbon*, **51**, 1111-1150。

- Smith, V.C., Staff, R.A., Blockley, S.P.E., Ramsey, C.B., Nakagawa, T., Mark, D.F., Takemura, K., and Danhara, T. (2013) Identification and correlation of visible tephra in the Lake Suigetsu SG06 sedimentary archive, Japan: chronostratigraphic markers for synchronising of east Asian/west Pacific palaeoclimatic records across the last 150 ka. *Quat. Sci. Rev.*, **67**, 121-137.
- Stuiver, M., Reimer, P.J. and Reimer, R.W. (2005) CALIB 6.0, WWW ¹⁴C age calibration program and documentation (<http://calib.qub.ac.uk/calib/>), 14CHRONO Centre, Queens University Belfast.
- 須藤 茂・山崎正男 (1980) 男体山火山活動末期における斜め噴火と異種のマグマの連続噴出. *火山*, **25**, 75-87.
- 鈴木毅彦・奥野 充・早川由紀夫 (1994) テフラからみた日光火山群の噴火史. *月刊地球*, **16**, 215-221.
- 田島靖久・吉本充宏・黒田信子・瀧 尚子・千葉達朗・宮地直道・遠藤邦彦(2007) 富士火山北東斜面の滝沢 B 火砕流堆積物の発生・堆積機構. *火山*, **58**, 499-517.
- 高橋正樹・吉田 剛・五十嵐俊成・金丸龍夫 (2009) 日光男体火山噴出物の全岩化学組成とマグマ供給システム. *日本大学文理学部自然科学研究所研究紀要*, **44**, 63-120.
- 露木利貞・金田良則・小林哲夫 (1980) 火山地域にみられる地盤災害とその評価 (1) 霧島火山群地域にみられる崩壊型について. *鹿児島大学理学部紀要 (地学・生物学)*, **13**, 91-103.
- Wohletz, K. H. and Sheridan, M. F. (1983) Hydrovolcanic explosion II. Evolution of basaltic tuff rings and tuff cones. *Amer. J. Sci.*, **283**, 385-413.
- Yamagishi, H. (1991) Morphological features of Miocene submarine coherent lavas from the "Green Tuff" basins: examples from basaltic and andesitic rocks from the Shimokita Peninsula, northern Japan. *Bull. Volcanol.*, **53**, 173-181.
- Yamamoto, T., Takada, A., Ishizuka, Y., Miyaji, N. and Tajima, Y. (2005) Basaltic pyroclastic flows of Fuji volcano, Japan: characteristics of the deposits and their origin. *Bull. Volcanol.*, **67**, 622-633.
- 山崎正男 (1957) 男体火山末期の活動. *火山*, **2**, 63-76.
(編集担当 前野 深)