

濁川カルデラの内部構造

黒墨秀行*・土井宣夫**

(2002年9月3日受付, 2003年4月2日受理)

Inner Structure of the Nigorikawa Caldera, Hokkaido, Japan

Hideyuki KUROZUMI* and Nobuo DOI**

The Nigorikawa Caldera in southwest Hokkaido, Japan, is 3 km in diameter at the outer rim. Drilling data from 42 geothermal wells of up to -3,000 masl (m above sea level) has been used to study the internal structure of the caldera. Interpretation of the data shows an angular funnel shape, with a wide upper region (3×2.5 km) tapering to a narrower lower region (0.7×0.5 km). The shear zone is the same shape as the caldera, that is, rectangular with a NE-SW elongation. The caldera is infilled with vent-fill material, lake and alluvial deposits, landslide deposits, and post-caldera intrusions. The vent-fill material is a gray, non-welded lapilli tuff and tuff breccia, which homogeneously includes accidental lithics and shattered fragments, which were sheared during pyroclastic eruption, as well as accretionary lapilli occurring up to -824 masl. The vent-fill is intercalated with many lithic bands or lithic dominant zones that dip toward the caldera center. No large fault displacement can be recognized around the caldera wall.

The Nigorikawa Caldera was formed ca 12,000 years ago by violent pyroclastic flow eruption, fall-back, and the following subsidence by compaction with degassing.

1. はじめに

濁川カルデラは、西南北海道の太平洋(内浦湾)に面する茅部郡森町管内にある5角形の小型カルデラである。カルデラ底は標高109~120 mで、南から北に緩やかに傾斜し、現地形においてはほぼ平坦である。地表には温泉と小規模な噴気が多数あり、北側のカルデラ縁に熱水変質帯が生成している。

濁川カルデラの重力値は、カルデラの外側に比べてカルデラ中央で4~6 mgal 低く(浦上・西田, 1977; 金

藤・他, 1993), 「低重力異常型カルデラ」(Yokoyama, 1963) に属する。地熱井の地質を調査した安藤(1983)および Ando *et al.* (1992) によると、濁川カルデラは(1)傾斜60~70度のカルデラ壁を有するじょうご型の構造を呈する、(2)地表のカルデラの形状は、表層の地質構造(断層)に規制されている、(3)カルデラ充填物は海拔-1,600 m ないし-1,700 m まで認められ、(4)フォールバック堆積物で充填されている。これらの特徴に基づいて、荒牧(1983)および Aramaki (1984) は、じょうご型カルデラの典型として「濁川型カルデラ」を提唱している。一方、Lipman (1984; 1997) や Branney (1995) では、カルデラモデルに関して、その構造や噴出物によるまとめがなされている。

このように濁川カルデラは、じょうご型カルデラの模式として扱われてきたが、カルデラの内部構造の記載は未だに不十分である。特に、火砕流噴出時の基盤岩のカルデラ外への放出量やカルデラ形成後の沈降を示す事実などの記載はなされていない。

濁川カルデラ底では、道南地熱エネルギー(株)が北海道電力(株)森地熱発電所(50 MWe)へ蒸気を供給するため、37本の地熱井を掘削しており、このうち4本は掘削深度が3,000 m以上に達している。また、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)は、地熱開発促

* 〒020-0172 岩手県岩手郡滝沢村鶴飼字笹森 72
地熱エンジニアリング(株)
JMC Geothermal Engineering Co., Ltd., 72 Sasamori, Ukai, Takizawa-mura, Iwate 020-0172, Japan.
現連絡先: 〒020-0121 盛岡市月が丘 3-30-34
Present address: 3-30-34, Tsukigaoka, Morioka-city, Iwate 020-0121, Japan.

** 〒020-0172 岩手県岩手郡滝沢村鶴飼字笹森 72
地熱エンジニアリング(株)
JMC Geothermal Engineering Co., Ltd., 72 Sasamori, Ukai, Takizawa-mura, Iwate 020-0172, Japan.
現在: 〒020-8570 盛岡市内丸 10-1 岩手県庁
Present address: Iwate prefectural government, 10-1, Uchimaru, Morioka-city, Iwate 020-8570, Japan.
Corresponding author: Hideyuki Kurozumi
e-mail: hskm9623@orion.ocn.ne.jp

進調査の一環として、N2-KX-3（深度 1,501 m）を含む 5 本の地熱調査井を掘削し、コアを採取している（新エネルギー・産業技術総合開発機構, 1989; 1991; 1994）。

本論文では、1992 年以降に掘削された地熱井とカルデラ中央部でオール・コア掘削された N2-KX-3 で得られた試料に基づき、カルデラの地下形状、カルデラ壁の産状、火道充填物の組織と内部構造を記載し、カルデラ形成の考察を行う。

2. 濁川カルデラ周辺の基盤岩とカルデラ噴出物

濁川カルデラ周辺には、基盤岩として、新第三紀中新世の訓縫層、八雲層、黒松内層が分布する（井出・土井, 1982）。濁川火山噴出物である石倉層は、これらの新第三系を覆って、カルデラ付近に分布している（Fig. 1）。新第三系には、NNW-SSE 方向で波長 700~1,000 m の小褶曲が発達し、濁川カルデラは約 13 km に延びる背斜構造の西翼に位置する。濁川カルデラ周辺には、NNW-SSE, NS および NE-SW 方向の断層が認められる。これ

らの断層はカルデラ壁でも確認され、カルデラ壁の位置と方向を規制している。

石倉層は灰白色を呈する角閃石安山岩質（ SiO_2 : 62% 程度; 佐藤, 1980）の降下火砕堆積物、火砕サージ堆積物および火砕流堆積物からなり（Fig. 2）、カルデラ北縁部の新第三系中に生成する珪化帯や粘土化帯からなる熱水変質帯を覆っている（五十嵐・他, 1978）。降下火砕堆積物は、噴出初期の成層した火山灰、火山砂および軽石からなる。これらは濁川カルデラ東方約 150 km の胆振・日高地方門別町の沿岸部まで確認される（柳井・他, 1992）。その全層厚は濁川カルデラ東方 5 km の海岸沿いで 260 cm 以上である。降下火砕堆積物中に介在する火砕サージ堆積物は、不淘汰で不規則の葉理があり、炭化した小木片を多数含む。

火砕流堆積物は軽石および角閃石安山岩の岩片と、カルデラ内で掘削された地熱井で確認されるすべての基盤岩の岩片を含む。岩片は、新第三系起源のシルト岩、頁岩、砂岩、安山岩、凝灰岩、凝灰角礫岩、先第三系起源

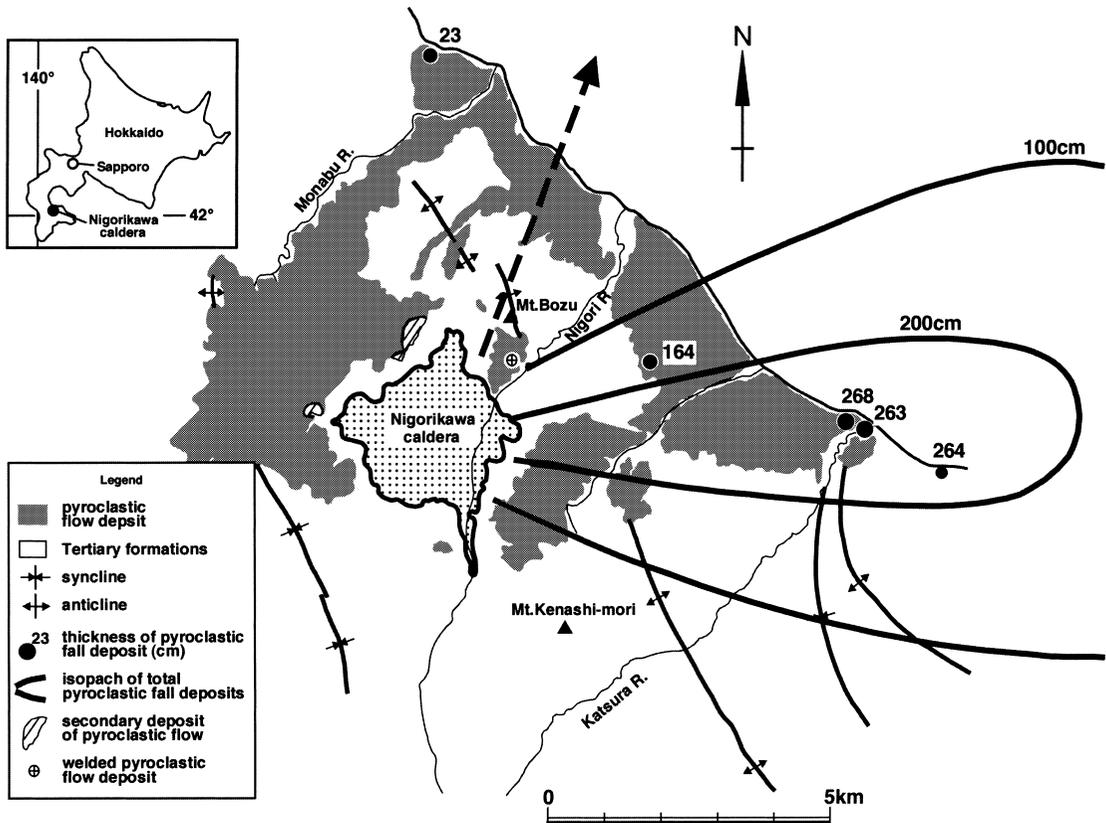


Fig. 1. Geological map of the Nigorikawa Caldera. The broken arrow shows the axis of highest concentration of large lithics and pumice in the pyroclastic flow deposit. Geological structure is taken from Ide and Doi (1982).

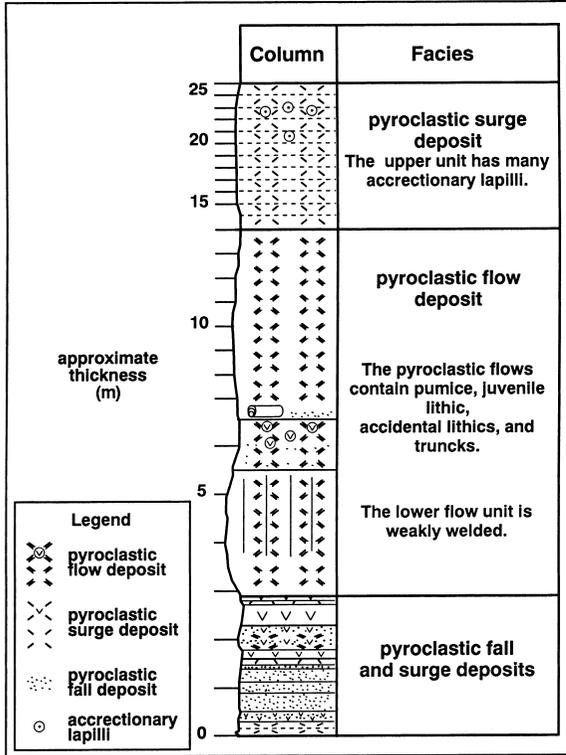


Fig. 2. Schematic section of pyroclastic ejecta from the Nigorikawa Caldera collected near the seashore.

の粘板岩、チャート、石灰岩、緑色凝灰岩、閃緑岩、石英閃緑岩、スカルン鉱物からなる。火砕流堆積物に含まれる岩片と軽石の粒径は、カルデラのNNE方向で最も大きく、この方向より離れるNNWおよびSSE方向ではそれぞれ小さくなる。この岩片と軽石の最大粒径の分布主軸（カルデラ北東部の濁川支流、Fig. 1）付近には、弱溶結した火砕流堆積物が分布する。また、火砕流堆積物より上位の火砕サージ堆積物中には、複数の層準に最大径8mmの火山豆石が多量に含まれる。

カルデラの北西壁上には、カルデラの外側に向かって18~25度傾斜する火砕物起源の再堆積物が分布し、カルデラ側からこの地点に堆積物が供給されたことを示す。このことは、供給源の消失とともに、カルデラ壁が現在の位置まで後退したことを示している。また、カルデラ南西壁の内側には、地すべり堆積物が分布する。

柳井・他(1992)は濁川火山噴出物を4つの噴出ユニットに区分し、噴出物の総量を10.7km³と推定した。また、名越(1994)は、濁川カルデラの火山活動はマグマ水蒸気爆発に始まり、プリニー式噴火、火砕サージを噴出した爆発的な噴火へと移行し、軽石流の噴出でピーク

を迎え、カルデラが形成されたと考えた。その後もカルデラ内ではマグマと外来水との接触により爆発的な噴火が繰り返され、カルデラ内に湖が形成された後に、最後のマグマ水蒸気爆発が起きたとした。

濁川火山噴出物の¹⁴C年代として、12,900±270 y.B.P. (佐藤, 1969), 11,670±220 y.B.P. (Sumi and Takashima, 1975), 12,270±190 y.B.P. (柳井・他, 1992)が報告されている。

3. 濁川カルデラの地下形状

濁川カルデラのカルデラ壁の地下形状を構造等高線で示す(Fig. 3)。カルデラ壁の位置は地熱井の掘削により地下の59カ所で確認された。最も深い確認は海拔-2,958mである。

濁川カルデラは地表で直径約3.0kmの五角形であるが、海拔100~-1,000m(この深度区間の確認箇所37カ所)では長方形を呈し、海拔-500mで径1.2×1.0kmである。海拔-1,000m以深(同22カ所)では、カルデラの南西側で長方形、北東側で円型である。長方形部と円型部を合わせた長軸方向の長さは0.7kmで、北東側の円型部は直径約0.5kmである。カルデラ壁の傾斜角は海拔100~-1,000mで30~50度、海拔-1,000m以深で70~90度、海拔-1,900m以深でほぼ90度と推定される。このように濁川カルデラは、地表に向けて開いた多角形のじょうご型、ないしトランペット型と称すべき形状を示す(Fig. 4)。

4. カルデラフィルの地質

濁川カルデラの内部を充填するカルデラフィルは、浅部より河床堆積物、湖成堆積物および火道充填物からなる。また、安山岩およびデイサイトが火道充填物中を貫き、その一部は溶岩ドームを形成して湖成堆積物に覆われている。カルデラフィルの地質は、カルデラ中央部で掘削されたN2-KX-3の連続コア(海拔-294~-1,383m)で岩相と層厚が模式的に示されている(新エネルギー・産業技術総合開発機構, 1991)。N2-KX-3の地質は下位より、火道充填物(海拔-121~-824m)、溶岩ドーム(海拔4~-121m)、湖成堆積物(海拔39~4m)、河床堆積物(海拔116~39m)からなる(Fig. 5)。

4-1 火道充填物

火道充填物は、下部の火道充填物1(vent-fill1: VF1)と上部の火道充填物2(vent-fill2: VF2)に区分される。VF1とVF2の境界は、N2-KX-3において最深の水中堆積物の下面(海拔-364m)に設定される(Fig. 5)。火道充填物の湿潤状態密度は、海拔-400m付近以深が2.2~2.5g/cm³、同海拔以浅が2.2g/cm³以下と、VF1とVF2の

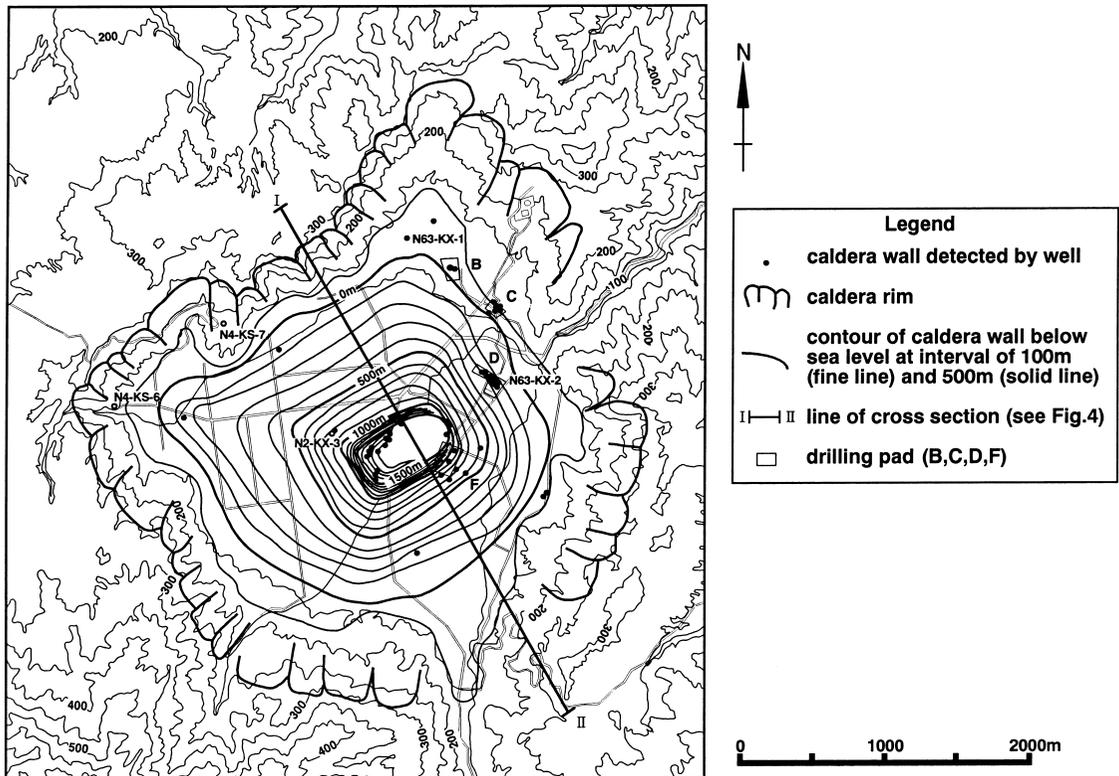


Fig. 3. Contour map of the subsurface caldera wall. The contour is shown from 0 m to $-1,900$ masl. The caldera wall is vertical below $-1,900$ masl. The line I-II is reference for Fig. 4.

境界深度とほぼ一致した変化を示している (Fig. 6e)。カルデラの中央部の F 基地より掘削された地熱井では、海拔 -700 m で採取されたコアの湿潤状態密度が 2.18 g/cm³ と低く、VF2 がカルデラ中心部でより厚いことを示している (Fig. 6e)。

VF1 は、灰色～暗灰色を呈する非溶結の火山礫凝灰岩ないし凝灰角礫岩である (Fig. 7a)。VF1 の異質岩片は、新第三系と先第三系起源の岩石からなり、基質は、新鮮で破碎された斜長石および軽石と、細かく粉碎された新第三系と先第三系起源の岩石 (岩粉) からなる。岩片の岩石種は、本質の角閃石安山岩および同軽石、新第三系起源の安山岩、凝灰岩および頁岩、先第三系起源のチャートおよび粘板岩である。そのほか少量の花崗岩、ホルンフェルス化した粘板岩・石灰岩、スカルン鉱物が含まれる。岩片は、その集中層 (以下、岩片集中層と呼称) を形成することがある (Fig. 7b)。VF1 はジグソーック状に破碎された岩片を含み、碎屑脈の貫入を受けている (Fig. 8d)。

VF2 は、灰色～暗灰色を呈する未固結で非溶結の火山礫凝灰岩ないし凝灰角礫岩である。VF2 の岩相や岩片の

岩石種、ならびに岩片集中層が存在することは VF1 とほぼ同じである (Fig. 7b) が、VF2 には薄い水中堆積物と地すべり堆積物が挟在する。N2-KX-3 では、海拔 -307 ~ -364 m 間に 7 層の水中堆積物が分布し、いずれも層厚 2 m 以下と薄い。これらは、灰白色～淡緑灰色で爪で容易に傷がつく軟らかい細粒の礫混じり粘土で、擾乱を受けていないことから、局所的に短時間で堆積したものと考えられる。また、湿地性の腐植土を伴う場合がある。

地すべり堆積物は、新第三系の凝灰岩や頁岩の角礫化したブロックからなり、N2-KX-3 で層厚約 30 m である。また、カルデラ西縁部で掘削された地熱井でも、湖成堆積物中に新第三系の頁岩ブロックで構成される層厚 167 m の地すべり堆積物が確認されており (安藤, 1983)、湖成層堆積期にカルデラ壁の拡大が引き続き起こっていたことが示唆される。

4-2 後カルデラ貫入岩と溶岩ドーム

後カルデラ貫入岩は、普通角閃石安山岩、普通角閃石含有普通輝石安山岩および普通角閃石デイサイトからなる (Fig. 9)。溶岩ドーム (N2-KX-3: 海拔 0 ~ -120 m) も

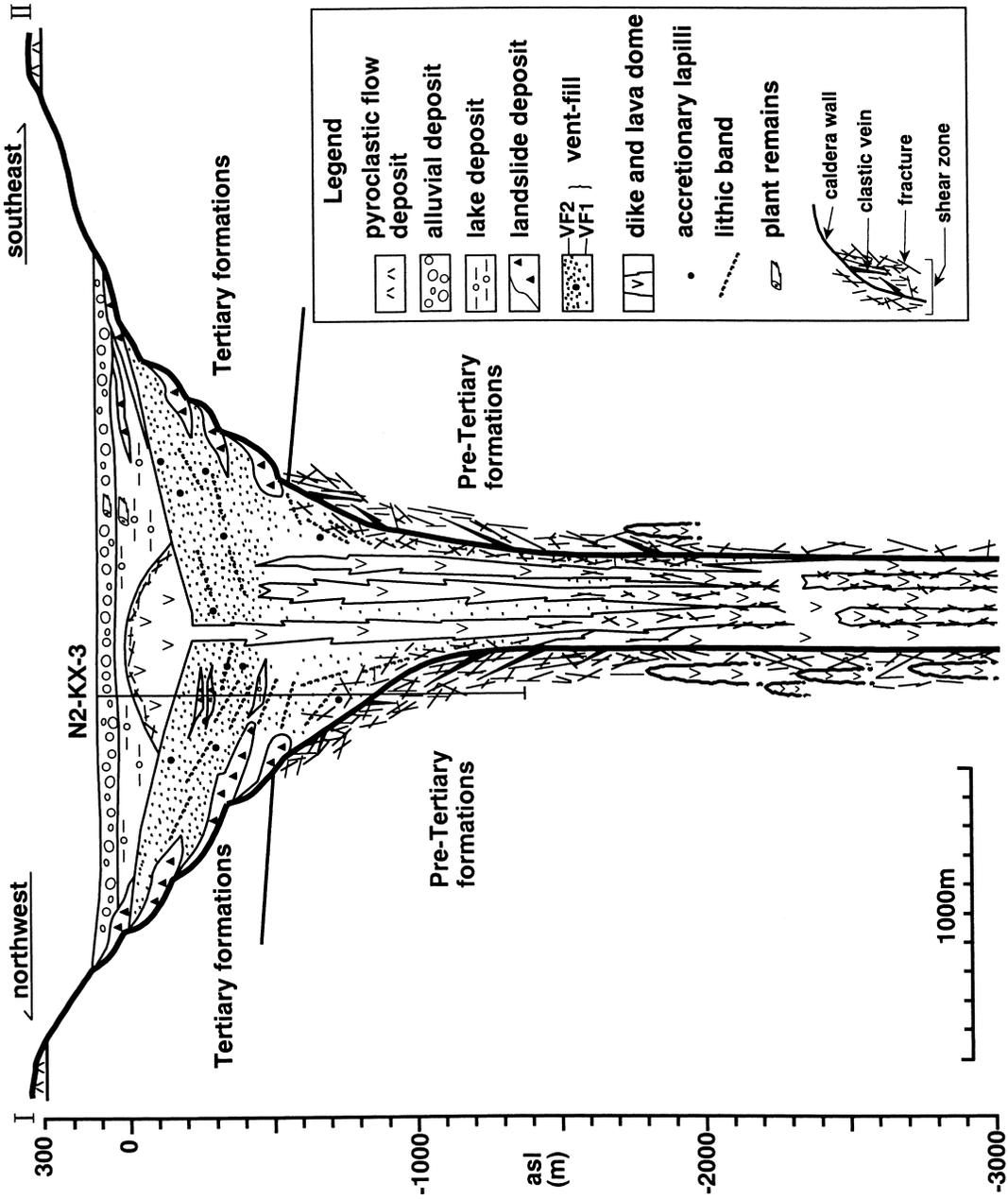


Fig. 4. Schematic cross section of the Nigorikawa Caldera (see Fig. 3, line I-II for the position of cross section). Continuous core sample were collected from -294 to -1,383 masl in well N2-KX-3. VF1 and VF2 include brecciated slumping blocks and accretionary lapilli. The vent-fill is intercalated with many lithic bands, which dip toward the caldera center. The basement rocks are sheared and intruded by clastic veins and andesite dikes. The maximum extent of the shear zone is approximately 500 m from the caldera wall.

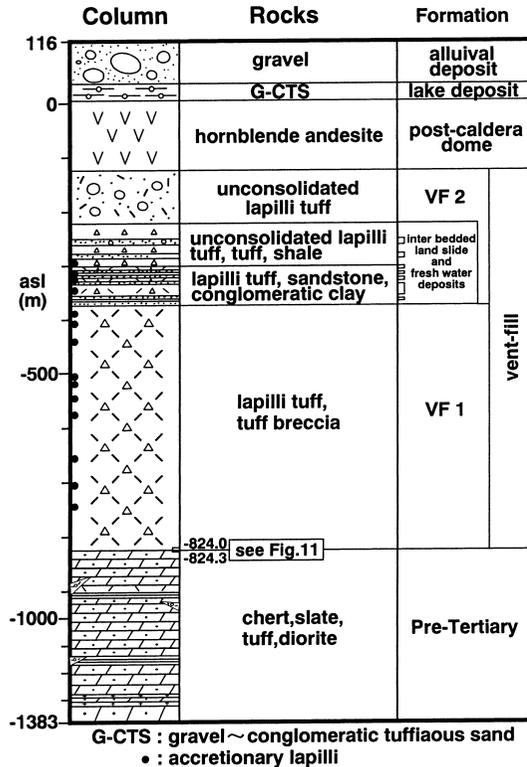


Fig. 5. Geology of well N2-KX-3 drilled near the center of the Nigorikawa Caldera. The solid circle shows the confirmed depth of accretionary lapilli. See Fig. 3 for the location of the well.

1 岩体確認される。

D 基地 (Fig. 3 中) より SW 方向に向けて掘削した地熱井では、カルデラ壁を海拔 -2,237 m で通過してカルデラの内側に入り、海拔 -2,329 ~ -2,814 m 間で後カルデラ貫入岩を貫くことが確認されている。この貫入岩は、強く熱水変質した安山岩とこれを貫く弱く変質した薄い安山岩からなる。また、F 基地 (Fig. 3 中) から NW 方向に火道を通るように海拔 -2,862 m まで掘削した地熱井では、通過した火道内 (海拔 -2,239 m ~ -2,862 m) が貫入岩で充填されていることを確認した。これらのことは、後カルデラ貫入岩は海拔約 -2,300 m 以深の火道内をほぼ完全に充填していることを示す (Fig. 9)。また、カルデラ北西側の海拔 -1,500 ~ -1,800 m 間の基盤岩中には、厚さ 10 ~ 20 m 以下の多数の角閃石安山岩が貫入している (Fig. 9)。

N2-KX-3 には、後カルデラ火山活動による角閃石安山岩の溶岩が分布する (Fig. 5)。この溶岩は N2-KX-3 の他、カルデラ中央部の F 基地 (Fig. 3 中) より掘削された 3 本の地熱井でも確認される。3 次元重力解析による

地下モデル (金藤・他, 1993) および地磁気測定 (浦上・西田, 1977) から、濁川カルデラ中央部浅部に高密度高磁性岩体が推定されていたが、これは前述の角閃石安山岩溶岩に相当し、溶岩ドームを形成していると考えられる。N2-KX-3 においては、この溶岩ドームの表面約 15 m は暗灰色ガラス質で空気に接触して冷却した産状を示し、ハイアロクラスチックな角礫化は認められない。また、腐食土が、この溶岩ドームを最初に被覆し、この上位に湖成堆積物が重なる。このことは、本溶岩ドームが次第に冠水したことを示す。

角閃石安山岩などの貫入岩と溶岩ドームは、緑色を呈する普通角閃石の屈折率の特徴から 3 つのグループに分けられる (タイプ A, B, C; Fig. 10a)。タイプ A は屈折率のモードが 1.685 で普通角閃石安山岩と普通角閃石含有普通輝石安山岩、タイプ B は屈折率のモードが 1.687 と 1.675 の 2 つのピークに分かれる普通角閃石安山岩である。タイプ C は屈折率のモードが 1.672 で、普通角閃石安山岩と普通角閃石サイトである。

以上のことから、後カルデラ火山活動による貫入イベントは、複数回あったと推定される。

4-3 湖成堆積物と河床堆積物

湖成堆積物は、溶岩ドームを被覆し、カッティングス (粒径 1 ~ 10 mm 程度) を用いた観察では未固結な粘土 ~ シルト層である。一部に砂礫を含有し、その礫種は角閃石安山岩、軽石 (一部角閃石含有) のほか、新第三系起源の安山岩、凝灰岩、頁岩、先第三系起源のチャート、粘板岩からなる。湖成堆積物に硫黄沈殿物は確認されていない。F 基地 (Fig. 3 中) より掘削された地熱井で認められた湖成堆積物最上部中の木片の ^{14}C 年代は、 $10,190 \pm 150$ y.B.P. である (Table 1)。

河床堆積物は、カッティングス (粒径 1 ~ 10 mm 程度) を用いた観察では、砂礫層からなり、一部に粘土を含有する。礫種は、湖成堆積物と同じである。F 基地 (Fig. 3 中) より掘削された地熱井で確認された河床堆積物最下部中の木片の ^{14}C 年代は、 $9,790 \pm 160$ y.B.P. である (Table 1)。

Table 1. ^{14}C age in the lake and alluvial deposits. The Libby's ^{14}C half life of 5,570 years is used.

Formation	Sampling level (asl)	^{14}C Age (y. B. P.)	Sample	Laboratory Number
Lake deposit	51 m	$10,190 \pm 150$	wood	GaK-17410
Alluvial deposit	61 m	$9,790 \pm 160$	wood	GaK-17409

5. 火道充填物の産状

5-1 火山豆石の存在

火道充填物は、N2-KX-3 において、海拔 -298 ~ -824 m 間に火山豆石を含む。海拔 -330 m 付近では火山豆石が集中して層状をなしている。火山豆石は多くが球形

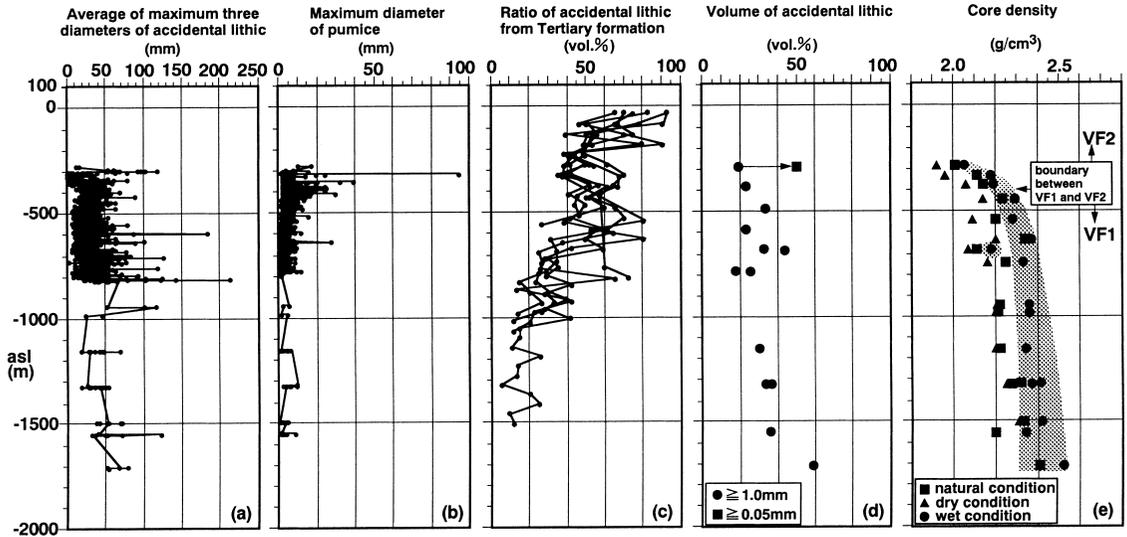


Fig. 6. Distribution of the average maximum three diameters of accidental lithics (a), the maximum diameter of pumice (b), composition of accidental lithics from Tertiary formations in seven wells (c), volume of accidental lithics in the vent-fill in six wells (d), and core-density variation in the vent-fill (e). Most of the average maximum three diameters of accidental lithics are less than 50 mm (a), and the maximum pumice diameters are less than 10 mm (b). The accidental lithics and pumice have been broken into fine fragments. The composition of accidental lithics of Tertiary rocks increases at -500 to -700 masl and decreases with depth and becomes 10% at approximately $-1,500$ masl (c). The volume of accidental lithics larger than 1 mm in diameter ranged from 20 to 40 vol.% (●), and increases from 20 vol.% to 50 vol.% by adding the volume of accidental lithics of 1.0–0.05 mm in diameter (■) (d). The stippled field shows distribution of the wet core-density (e).

(最大長径 12 mm, 平均長径約 5 mm) で、破片状を示すものもある。核として新第三系起源の頁岩が認められるものがある (Fig. 8c)。火山豆石の存在は、海拔 -824 m までの火道充填物中に降下火砕物が含まれることを示す。すなわち、火道充填物の少なくとも一部は、爆発によって吹き上げられた噴出物が再びカルデラ内に落下し、定置した「フォールバック」(fall-back) 堆積物である。

5-2 異質岩片の粒径変化

コアを用いて長さ 50 cm 区間毎の火道充填物中の軽石の最大径と異質岩片の最大 3 個の粒径を測定し、それらの垂直変化を調査した。N2-KX-3 については、火道充填物中のすべてのコア (直径約 60 mm) について実施した。その他、6 本の坑井において採取した合計 12 本のスポットコア (直径約 100 mm, 長さ 10~30 cm) で同様に測定した。スポットコアの場合は、不均質に分布する巨礫を捕獲できない場合があると予想されるが、今回用いた N2-KX-3 の連続コアでは、巨礫を見逃す可能性は低く、今回の測定値は、火道充填物中の軽石および異質岩片の大きさを示すと判断される。

異質岩片の平均最大径は 30.7 mm で、径 50 mm 以下

の岩片が多く、全般に小型である (Fig. 6a)。ただし、岩片集中層では、粒径が大きくなり、海拔 -600 ~ -800 m 間では径 100 mm 以上の岩片も認められる。N2-KX-3 では、カルデラ壁から 10 m 程内側の海拔 -804 ~ -810 m 間の VF1 中には、直径約 6m の粘板岩礫がある。この粘板岩礫は、火道充填物と同様の岩相の火山礫凝灰岩の貫入により破碎を受けて角礫化している。また、海拔 -814 ~ -824 m 間は、異質岩片が小型で量も乏しい火道充填物であり、これは碎屑岩脈とみなされる。

軽石の最大径は 10 mm 以下が多く、その平均は 4.7 mm で、岩片と同じように全般に小型である (Fig. 6b)。また、粒径の垂直および水平方向への系統だった変化は認められない。

これらのことから、火道充填物は細かく破碎された岩片、軽石、斜長石結晶が“均質”に混合した火山礫凝灰岩ないし凝灰角礫岩といえる。

5-3 異質岩片量

13 試料のコアについて、コア軸に直交する面内で径 1.00 mm 以上の異質岩片が占める面積を測定し、面積比を求めた。そのうちの 1 試料については、顕微鏡下で径 1.00~0.05 mm の異質岩片が占める面積比を求めた。こ

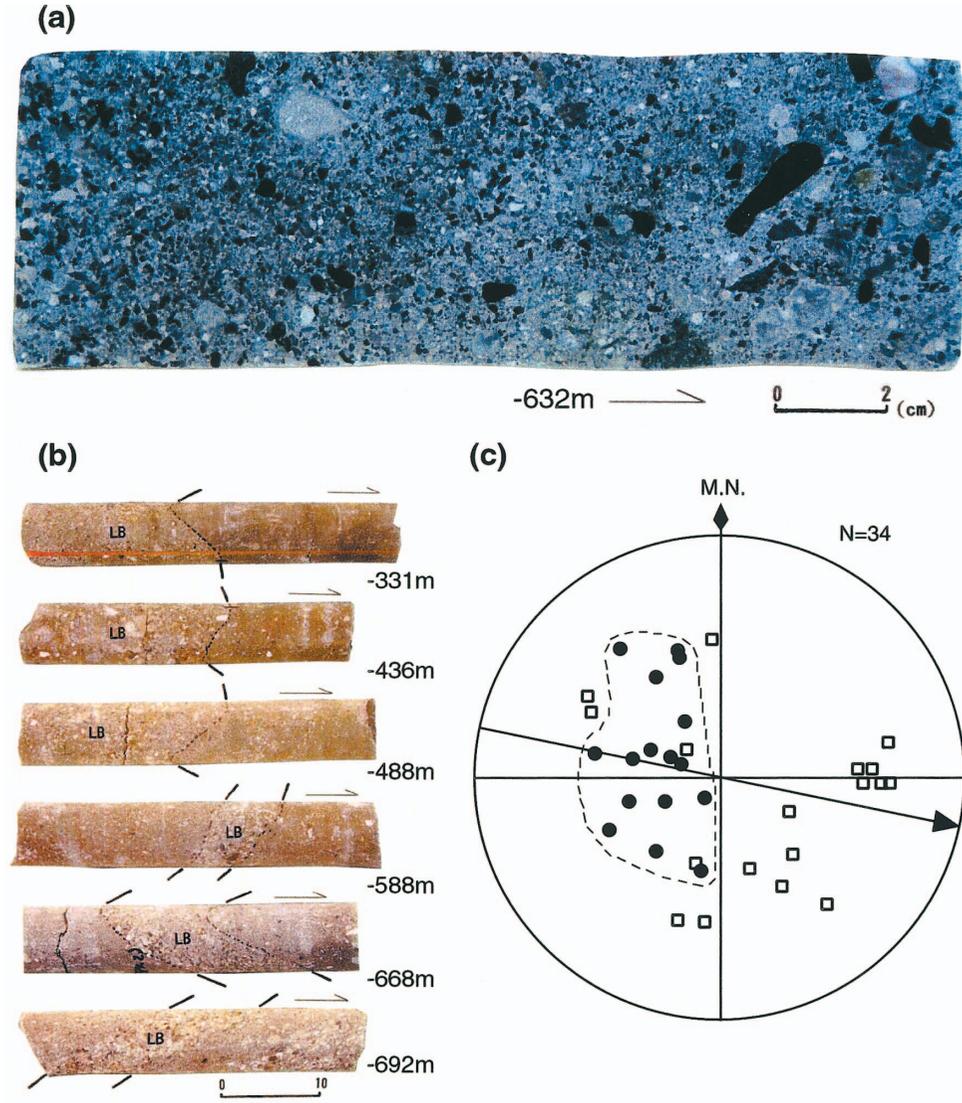


Fig. 7. Core samples of the lithic band in the vent-fill collected at well N2-KX-3. The bold arrow points downhole. All core depths are shown in masl. (a): Core of the vent-fill with typical lithofacies cut along core axis. (b): LB shows lithic band in the vent-fill, which is composed of larger lithics and pumices. (c): Schmidt Net projection of π -pole of the lithic band in lower hemisphere. The solid circle and open square show the data above and below -600 masl, respectively. The arrows shows the direction of the caldera center. The lithic bands of above -600 masl dip mainly toward the caldera center.

ここでは、これらの面積比を火道充填物中の異質岩片量 (vol.%) とした。

径 1.00 mm 以上の異質岩片量は 18~59 vol.% にわたり、平均値では 33 vol.% (Fig. 6d) である。海拔 -304 m のコア薄片中の径 1.00~0.05 mm の異質岩片量は 37 vol.% である。この深度の径 1.00 mm 以上の異質岩片量は 20 vol.% であることから、これらを合わせた径 0.05 mm 以上の異質岩片量は 50 vol.% ($0.2+0.8 \times 0.37$) とな

る。このことは、別の深度においても、火道充填物中の径 0.05 mm 以上の異質岩片を加えると、異質岩片量は 50 vol.% 以上に増加することを示唆している。

5-4 異質岩片の岩石種組成

カッティングス (粒径 1~4 mm 程度) 中の先第三系および新第三系起源の異質岩片を分離し、それぞれの重量を測定した。測定した坑井数は 7 本であり、そのうちの 5 本は安藤 (1983) の重量測定値を用いた。さらに、新第

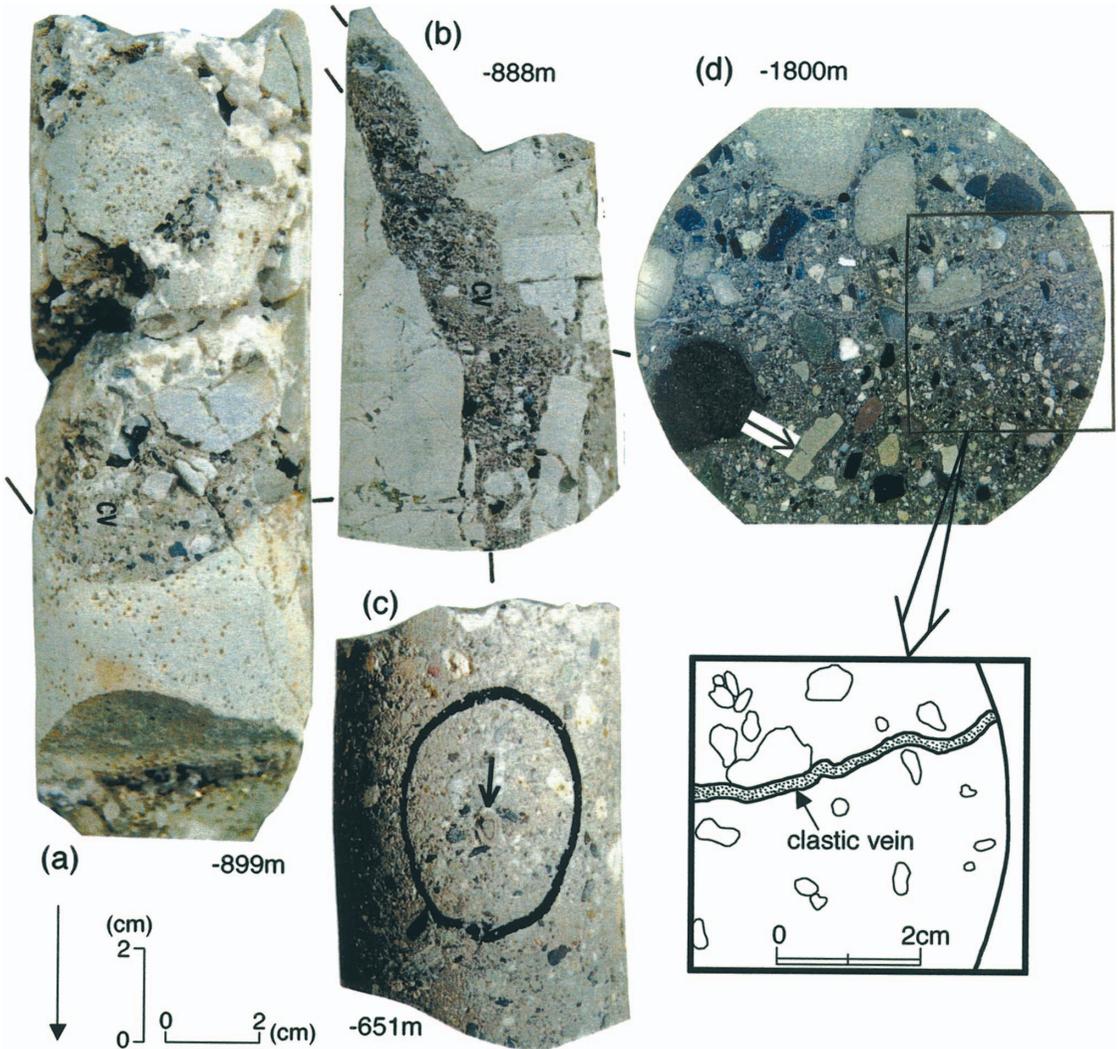


Fig. 8. Core samples collected near the caldera wall of clastic veins in Pre-Tertiary rocks and accretionary lapilli in the vent-fill collected at well N2-KX-3 (a)–(c). Cores chip collected near the caldera wall of the vent-fill (d). All depths are shown in masl. The arrow points downhole. (a) and (b): CV is a clastic vein in the Pre-Tertiary rocks, is 1–5 cm thick and composed of gray lapilli tuff including essential pumice whose lithofacies is the same as that of the vent-fill. (a): CV at –899 masl has vugs and idiomorphic calcites. (b): Accidental lithic of chert in CV at –888 masl is sheared with jigsaw cracks. (c): The arrows indicate accretionary lapilli in the vent-fill. Accretionary lapilli at –651 masl have a nucleus of Tertiary shale and is 4.3×6.2 mm in diameter. The distribution of accretionary lapilli is shown in Fig. 5. (d): Clastic veins 1–5 mm wide are recognized in the vent-fill. Some shattered accidental lithics have jigsaw cracks (arrow).

三系と先第三系起源の岩片の重量組成とコアの密度測定結果（新第三系：密度 2.4 g/cm^3 ，先第三系：密度 2.7 g/cm^3 ）から体積割合に換算し、それを岩石種組成（以下、岩片組成と称す）とした。

新第三系の岩片組成は、海拔–500～–650 m 付近でいったん増加するものの、全体的には深くなるにつれて減少し、海拔–1,500 m 付近で 10% となる (Fig. 6c)。さ

らに、F 基地 (Fig. 3 中) より W 方に向けて掘削した地熱井において、カルデラ壁を海拔–2,237 m で抜けてカルデラの内側に入り、海拔–2,329 m まで VF1 をカッティングス (1–4 mm 程度) で確認しているが、VF1 中に新第三系起源の岩片が認められていない。したがって、新第三系起源の岩片は、新第三系と先第三系の不整合面がある海拔–400～–600 m (Fig. 4) から、1,000 m

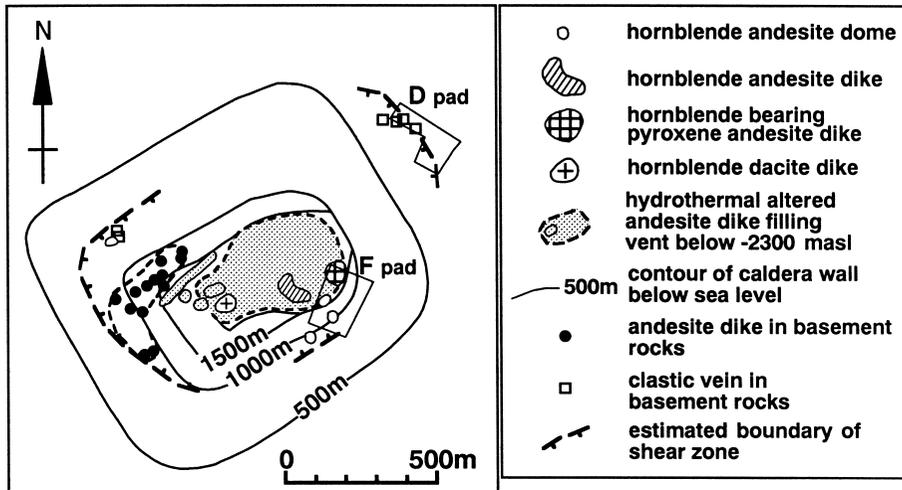


Fig. 9. Distribution of post-caldera intrusions in the vent-fill and clastic veins in the basement rocks. The location of the andesite dike (●) and clastic vein (□) in the basement rocks recognized from well data. The distribution of the andesite dike and the lava dome in the caldera are also estimated from well data.

以上の深部まで移動し、海拔−2,300m付近で0%となる。

このような異質岩片の分布は、著しい攪拌が生じた後に火道充填物が定置したことを示している。

5-5 岩片集中層

N2-KX-3のコアには、異質および本質岩片が集中して層状をなす岩片集中層が認められる。その最大層厚は11.7mで、8~60度傾斜している(Fig. 7b)。岩片集中層は、コア長10mに対して、海拔−307~−394m間と−444~−789m間で2.5枚以上と多く、海拔−394~−444m間と海拔−789m以深で1.5枚以下と乏しい。岩片集中層の上下の境界面は、海拔−330~−365m間と海拔−455~−595m間では明瞭であり、海拔−595m以深では不規則で不明瞭なものが多くなる。また、複数の地熱井間の地質対比によって、カルデラ壁近傍のVF1中の海拔−716m付近に、単一の岩石種から成る岩片集中層が水平的に70m以上の広がりをもって分布することが判明している。

次に、フラックスゲート型磁力計を用いてN2-KX-3の火道充填物のコアの残留磁気を測定してコアを定方位化し、岩片集中層の走向・傾斜を決定した。コアの磁北はコアを回転しながら残留磁気強度の変化から求め、カルデラフィルの堆積年代が約12kaであることから、コアの磁北は現在の磁北と一致すると仮定した。この結果、海拔−600m以浅の岩片集中層は、カルデラのほぼ中心を向く南ないし東方向に8~40度傾斜し、海拔−600m以深の岩片集中層は、上下の境界が不明瞭になるとともに傾斜方位が乱れることが判明した(Fig. 7c)。

岩片集中層の傾斜方位が安定する海拔−600m以浅は、カルデラが上方に開いた深度区間にはほぼ相当している。

6. カルデラ壁周辺の破碎構造

6-1 カルデラ壁付近の状況

N2-KX-3の海拔−824mのコアで確認されるカルデラ壁の境界をFig. 11に示す。カルデラ壁付近では、基盤岩(チャート)に、変位のない多数の微小な開口き裂が網目状に分布し、その一部はVF1で充填されている。カルデラ壁では、基盤岩に生じたき裂に沿う剥離面にVF1の火山礫凝灰岩が密着しており、この境界に沿う滑りは認められない。すなわち、カルデラ壁境界では顕著な断層は認められない。

一方、カルデラ壁から内側2m間のVF1には、不規則な“面なし断層”が分布し、その一部に方解石が薄く充填しているが、断層変位は認められない。また、VF1には、肉眼では弱い黄鉄鉱染が認められ、海拔−823mコアの粉末X線回折分析で緑泥石が同定されている(NEDO, 1991)が、強い変質は認められない。

6-2 カルデラ壁周辺の基盤岩中の破碎状況

N2-KX-3の海拔−887~−1,146m間のカルデラ壁に近い基盤岩には、35枚の碎屑脈が確認される。碎屑脈は厚さ1~5cmで、異質岩片と軽石を含む灰色の火山礫凝灰岩からなり、火道充填物(VF1)と同じ岩相を示す(Fig. 8a, b)。Fig. 8bに示すように、カルデラ壁に近い基盤岩のジグソークラック中に碎屑脈が貫入している。また、Fig. 8aでは、貫入した碎屑脈が開口し、方解石の自形結晶が成長している。N2-KX-3の碎屑脈が分布する

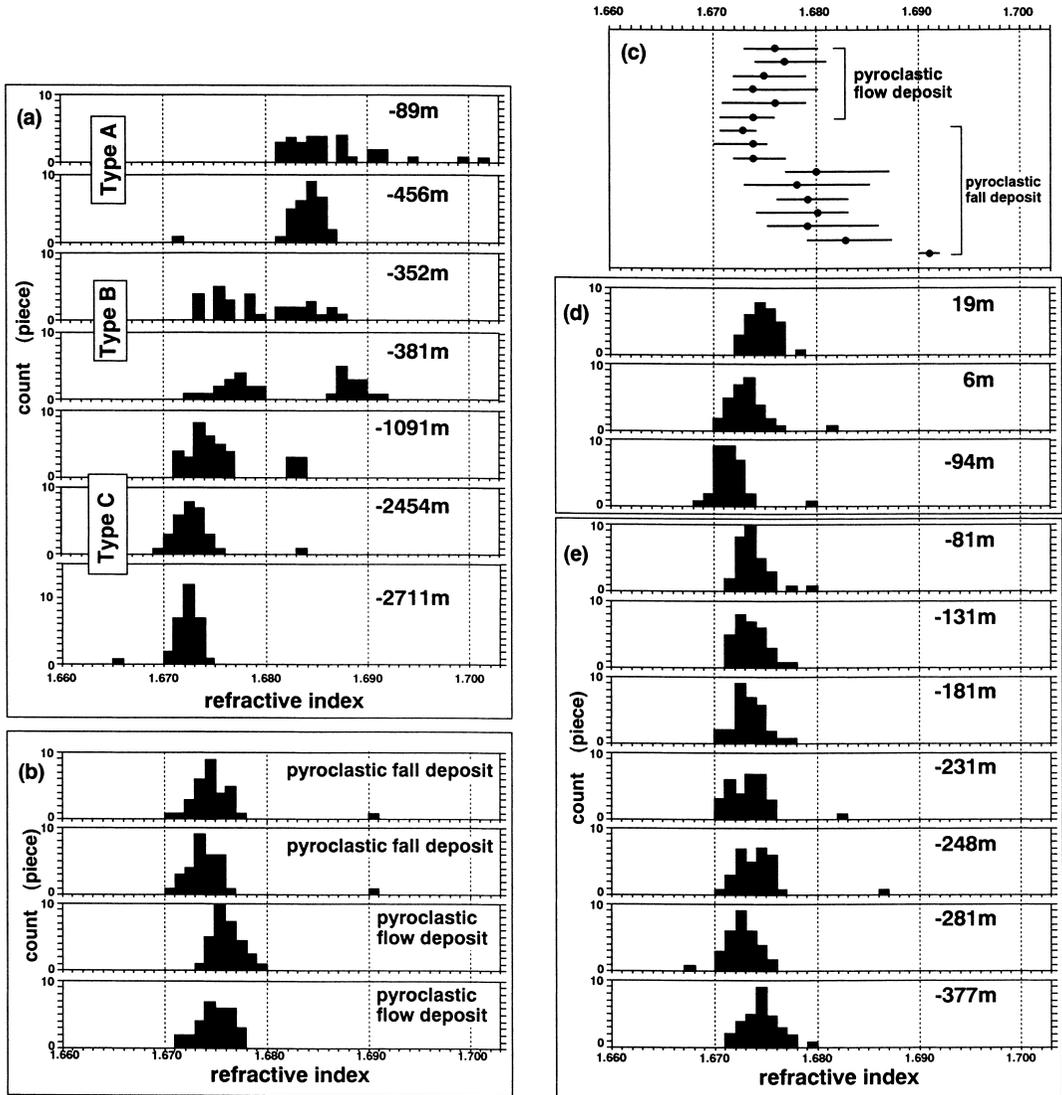


Fig. 10. (a) Refractive index of green hornblende in the post-caldera intrusion; (b) and (c) from Nigorikawa pyroclastic ejecta; (d) from lake deposit; (e) from vent-fill. All depths are shown in masl. The histogram (c) shows refractive index of hornblende in the Nigorikawa pyroclastic ejecta measured by Yanai *et al.* (1992).

範囲は、カルデラ壁から水平距離で 200 m までである。

また、他の地熱井においてもカルデラ壁に近い基盤岩中には、VF1 から成る碎屑脈ならびに層厚 20 m 以下の熱水変質を強く受けた安山岩貫入岩が多数認められる。基盤岩中の碎屑脈と安山岩貫入岩の分布は、カルデラの北東側でカルデラ壁から水平距離で 500 m、北西側で 150 m、南西側で 250 m、南東側で 130 m までおよんでいる (Fig. 9)。これはカルデラ形成時に基盤岩が破碎した距離を示している。基盤岩が破碎した範囲は、カルデラの形状と同じく、NE-SW 方向に長軸をもつ長方形を呈

している。

6-3 カルデラ壁周辺の火道充填物の破砕状況

火道充填物中において、海拔 -500 ~ -2,300 m 間の 52 箇所まで逸泥が発生した。逸泥の 90% 以上は、カルデラ壁からの水平距離が 150 m 以内で発生している。逸泥の発生頻度は掘進長 100 m 当り 2~3 カ所以下である。まれに生じる規模の大きい逸泥 (>1,500 l/min) は、急激に流出量が減少し、流出が停止するケースが多い。これらのことから、火道充填物中の開口き裂は、存在するがその広がりには小さいと推定される。

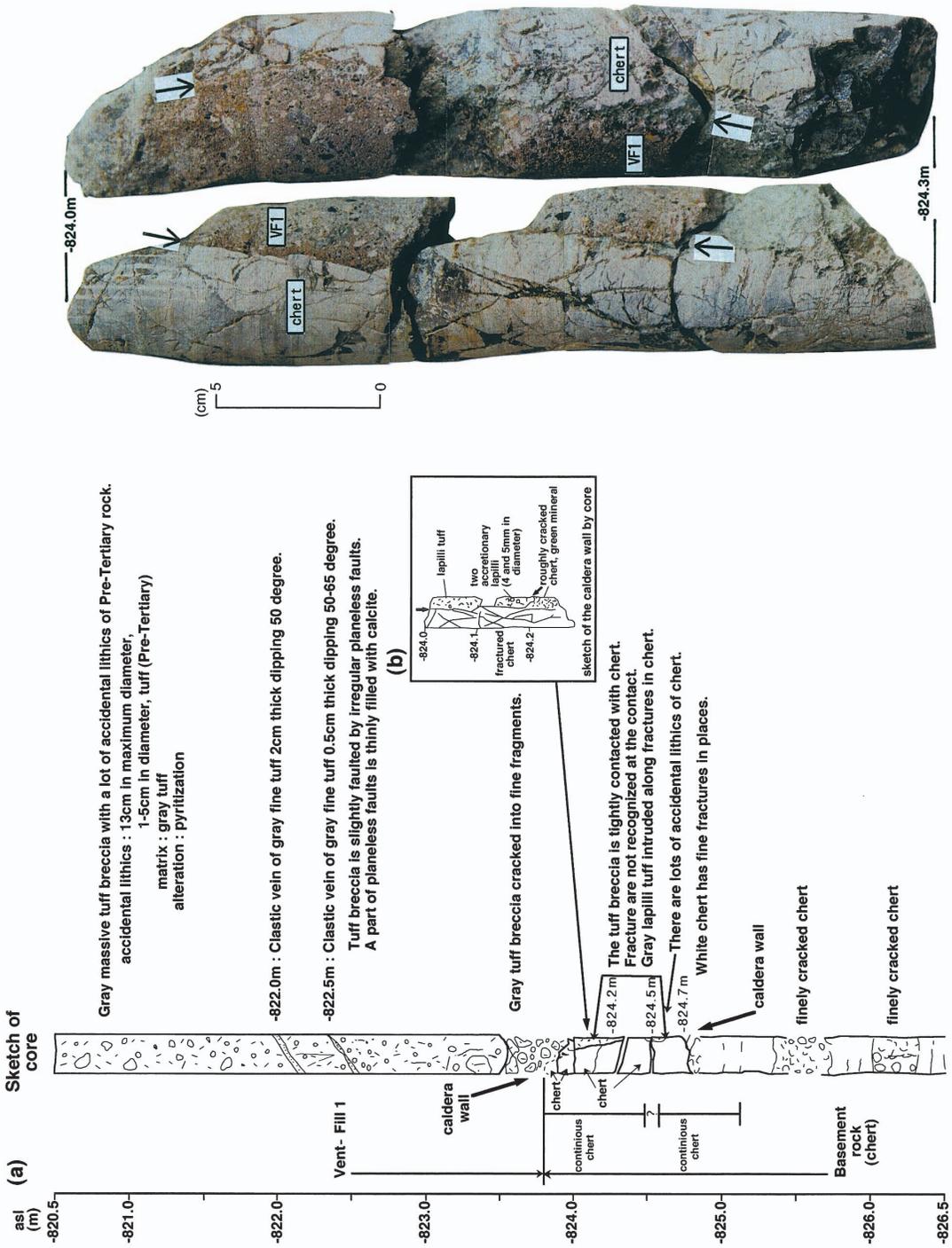


Fig. 11. Core of the caldera wall at -824 masl from well N2-KX-3 (see Figs. 3 and 5). The caldera wall is shown by arrows. The boundary of the caldera wall has no fault displacement. VF1 deposited along the boundary is tightly contacted to chert. Chert near the caldera wall has many fractures.

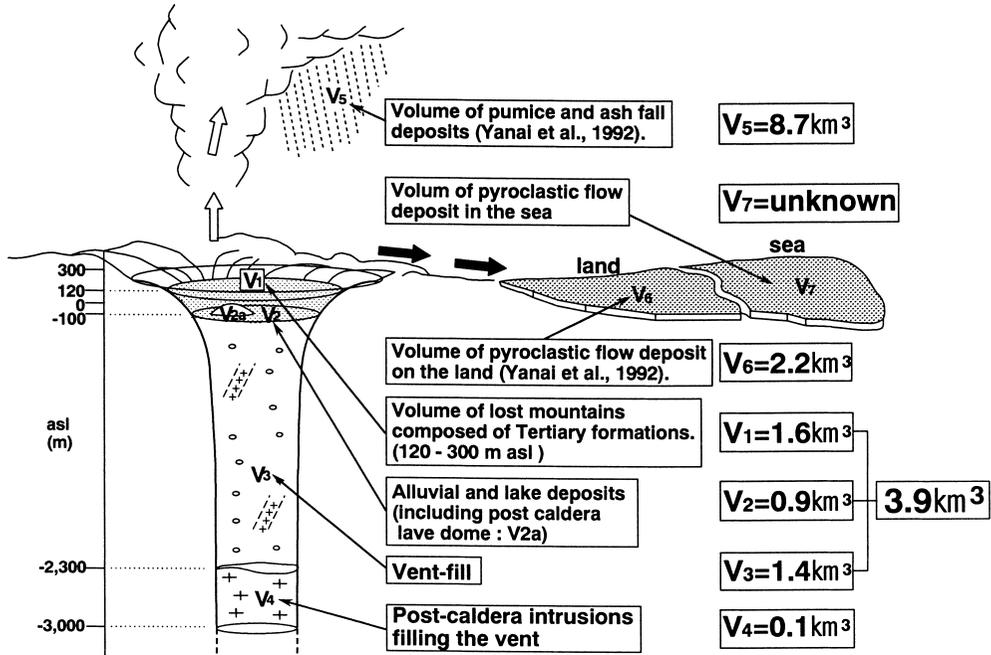


Fig. 12. Volume of the Nigorikawa Caldera, calculated from Figs. 3 and 4. The inner volume of the caldera from 300 masl to $-3,000$ masl is 4.0 km^3 .

一方、N2-KX-3において、火道充填物中で165枚の鉱物脈（平均3枚/10m）が確認されるが、その77%がカルデラ壁からの水平距離が150m以内に分布している。鉱物脈の傾斜角は、50度以上である。これらの鉱物脈沿いに断層変位は認められない。

以上のことから、カルデラ壁から水平距離150m以内には、場所によりやや高密度のき裂（一部開口）が分布していることが明らかであるが、確認される限り、き裂に沿う変位は認められず、開口き裂の分布範囲は狭いと推定される。

7. 考 察

上述した濁川カルデラの内部構造の特徴をもとに、濁川カルデラの形成時階、カルデラの容積と基盤岩のカルデラ外への放出量、基盤岩の破碎、およびカルデラの沈降について考察する。

7-1 カルデラの形成時階

柳井・他(1992)は、濁川火山噴出物の普通角閃石の屈折率を測定し、その値が噴出順序にしたがって系統的に変化することを報告している。今回、火道充填物と湖成堆積物（一部火山噴出物を含む）中の普通角閃石の屈折率を測定し、噴出物の屈折率と比較して、カルデラの形成時階を検討した。

火道充填物の屈折率は1.667~1.686の範囲にあり、特

に1.670~1.679に集中して、モードは1.672, 1.673, 1.674である（Fig. 10e）。火砕流堆積物の屈折率の範囲は1.671~1.679で、特に1.674~1.677に集中し、モードは1.674, 1.675である（Fig. 10b）。

一方、柳井・他(1992)によると、火砕流堆積物の屈折率の範囲は1.671~1.681で、モードは1.674, 1.675, 1.676および1.677である（Fig. 10c）。

火道充填物中の屈折率の範囲とモードは、火砕流堆積物の値とほぼ同じであり、噴出初期の降下火砕堆積物の値より小さい。これらのことから、カルデラとそれを埋める火道充填物は、火砕流噴出時に形成したと考えられる。

また、湖成堆積物中の屈折率は、1.668~1.674の範囲にあり、特に1.670~1.672に集中して、モードは1.670および1.671である（Fig. 10d）。これは火道充填物の値より低く、後カルデラ貫入岩のタイプC（Fig. 10a）の値に近い。このことから、湖成堆積物中には、後カルデラ貫入岩活動期の火山噴出物が含まれている可能性がある。

7-2 カルデラの容積と基盤岩の放出量

海拔300mから掘削によって確認された $-3,000$ mまでのカルデラ内の容積を算出して、基盤岩類のカルデラ外への放出量およびカルデラ内残留量を検討した。計算に当たりカルデラ底は海拔120m、湖成堆積物の下面は

海拔-100 mとした (Fig. 12).

カルデラの容積を計算した結果、海拔 300~120 m 間の失われた山体量は約 1.6 km^3 (V_1)、海拔 120~-100 m 間の河床堆積物と湖成堆積物の量 (後カルデラ溶岩ドームを含む) は約 0.9 km^3 (V_2)、海拔-100~-2,300 m 間の火道充填物量 (後カルデラ貫入岩を含む) は約 1.4 km^3 (V_3)、海拔-2,300~-3,000 m 間の火道を充填する後カルデラ貫入岩量は約 0.1 km^3 (V_4) で、合計約 4.0 km^3 となった (Fig. 12).

次に、カルデラ外への基盤岩放出量とカルデラ内残留量を検討する。今、海拔-100~-2,300 m 間の火道充填物中の異質岩片量の平均を異質岩片組成 (5-3 参照) より得られた最小値の 50 vol.% と仮定すると、火道充填物中の異質岩片の体積は約 0.7 km^3 ($V_3 \times$ 異質岩片量 = 1.4×0.5) である。したがって、カルデラの外に噴出した岩片の体積は約 3.2 km^3 ($V_1 + V_2 + V_3$ - 火道充填物中の異質岩片量 = $1.6 + 0.9 + 1.4 - 0.7$) となり、これは海拔-2,300 m 以浅のカルデラ全体の約 80 vol.% (カルデラ外噴出岩片量 ÷ 海拔-2,300 m 以浅のカルデラ容積 $\times 100 = 3.2 \div 3.9 \times 100$) となる。火道充填物がすべて異質岩片で構成されているとすると、カルデラの外に噴出した岩片の体積は、約 2.5 km^3 ($V_1 + V_2 = 1.6 + 0.9$) となり、これでも全体の約 65 vol.% ($2.5 \div 3.9 \times 100$) となる。厳密には、湖成堆積物中の異質岩片量と地すべり堆積物量を加えて考察する必要があるが、火道充填物の異質岩片量が 100% 以下で、最小は 50% であることを考慮すると、カルデラ形成時には、カルデラ内の基盤岩の 70 vol.% 以上 (2.7 km^3 以上) がカルデラの外に放出されたと推定される。火道充填物中に火山豆石が存在することを合わせて考えると、カルデラの形成過程において、基盤岩の 70 vol.% 以上は火砕流噴出時に本質物質とともにカルデラ外に放出され、30 vol.% 以下がカルデラ内にフォールバックしたと推定される。

さらに、カルデラから噴出した本質物質量の推定を試みる。火山噴出物量としては、広範囲の地質調査を行った柳井・他 (1992) の推定値を用いる。柳井・他 (1992) によると、降下火砕物量 (V_5) は約 8.7 km^3 、海への流入量 (V_7) を除く火砕流堆積物量 (V_6) は約 2.2 km^3 で、火山噴出物の総量は約 10.9 km^3 である。火山噴出物の総量は、DRE (密度: 0.6 g/cm^3 で計算) では約 6.5 km^3 となる。基盤岩の 70 vol.% がカルデラ外に放出されたとすると、火山噴出物に含まれる異質岩片量は、上述のように 2.7 km^3 以上であり、カルデラ内に残留する異質岩片量は 1.2 km^3 ($3.9 - 2.7$) 以下となる。この異質岩片のすべてが火道充填物に残ったとすれば、火道充填物中の本質物質の量は約 0.2 km^3 (V_5 - 残留異質岩片量: $1.4 - 1.2$)

となる。火山活動にともなう本質物質量は、火山噴出物中の本質物質量 ($6.5 - 2.7 = 3.8 \text{ km}^3$) とカルデラに残った本質物質の量 (0.2 km^3) の和である約 4.0 km^3 となる。海へ流入した火砕流の量を考慮すれば、カルデラから噴出した本質物質量は 4.0 km^3 (DRE) 以上と推定される。

以上のように、濁川火山の噴火は、 4.0 km^3 (DRE) 以上の本質物質を噴出して、容積約 4 km^3 (海拔-3 km 以浅) のカルデラを形成した。基盤岩の 70 vol.% 以上 (約 2.7 km^3 以上) は火砕流噴出時にカルデラ外に放出された。このような基盤岩放出量と本質物質量比からみると、濁川カルデラにおいては、火砕流噴出時の爆発・基盤岩の破碎がカルデラ形成の主因と考えられる。

7-3 基盤岩の破碎について

北側のカルデラ縁に火砕流堆積物に覆われる熱水変質帯が分布することから、濁川カルデラ形成前に熱水対流系が形成されていたと考えられる。本地域の基盤岩は、熱水対流系が生成する程度にすでに破碎されていたと推定できる。

濁川火山は、このような破碎域に火道が開き、火砕流噴出時の爆発によって基盤岩が破碎、放出されて海拔-500 m で径 $1.2 \times 1.0 \text{ km}$ 、海拔-1,000 m 以深で長径 0.7 km のカルデラが生じた。基盤岩の破碎は、碎屑脈と安山岩貫入岩の分布から、海拔-1,000 m 付近で NE-SW 方向に約 1.4 km 、NW-SE 方向に約 0.8 km におよぶと推定され、このうち基盤岩が放出されてカルデラ化したのは約 $0.7 \times 0.5 \text{ km}$ の範囲である。

火道充填物は、海拔-824 m まで原形を保つ火山豆石を含んでいる。このことから、火砕流噴出時に、火道充填物は、一度は空中に噴き上がり、火道内に落下して堆積、定置したと考えられる。すなわち、火道充填物がフォールバックであることが、細粒で良く攪拌した岩片組成を生じた主因と考えられる。前述のように、火砕流噴出時の基盤岩のフォールバック量は 30 vol.% 以下である。基盤岩が空中に噴き上げられた高度は不明であるが、空中に一度は噴き上がり落下したことは、基盤岩の破碎と攪拌を促進させたと推察される。

一方、火山豆石が確認される-824 m までの深度区間は、カルデラが上方に開いた区間にほぼ相当している。このことは、爆発によるカルデラの拡大とフォールバックが噴火中に同時に進行していたことを示す。

VF2 中の地すべり堆積物の介在は、濁川カルデラの形成末期に、浅部のカルデラ壁が崩落し、カルデラが拡大したことを示す。この崩落により、海拔-500m 以浅のカルデラ壁にあった破碎帯は消滅したと考えられる (Fig. 4).

7-4 カルデラの沈降について

火道充填物中の岩片集中層がカルデラの中心方向へ傾斜していること、ならびにカルデラ中心部で湿潤密度 2.2 g/cm^3 の軟弱な VF2 が厚いことは、カルデラの中心部の火道充填物が沈降したことを示唆する。一方、VF1 中に多数の碎屑脈が認められ、カルデラ壁に厚さ約 10 m の碎屑岩脈がある。これらのことは、圧密が脱ガスを伴って生じたことを示すと考えられる。

火道充填物中は、カルデラ壁から水平距離で 150 m 以内に、小き裂が分布する。この小き裂は、脱ガスを伴う圧密の進行によって生じた局所的なき裂であると考えられる。

8. ま と め

本論文では、地熱井の掘削結果に基づいて濁川カルデラの内部構造を詳細に記載し、特に、カルデラ生成の主因、基盤岩の破碎と火道充填物の粉碎の主因、並びに火道充填物の沈降について考察した。その結果は、以下のよう

- (1) 濁川カルデラは、地表に向かって開く多角形のじょうご型ないしトランペット型の地下形状を示し、地表では直径約 3 km の五角形で、海拔 -1,000 m 以深は長径 0.7 km で垂直のカルデラ壁を有している。
- (2) カルデラ内は、火道充填物、湖成堆積物および河床堆積物で埋積される。火道充填物上部と湖成堆積物中に地すべり堆積物が挟在する。
- (3) 火道充填物中の緑色角閃石の屈折率の範囲とモードから、カルデラおよびそれを埋める火道充填物は、火砕流噴出時に形成されたと考えられる。その後、安山岩～デイサイトが貫入し、溶岩ドームが生じた。
- (4) 火道充填物は 50 vol.% を超える量の良く破碎、粉碎されて小型の基盤岩起源の岩片を含む非溶結の火山礫凝灰岩～凝灰角礫岩からなる。火道充填物には多数の岩片集中層が挟在し、火山豆石を含む。火道充填物中は、多数の碎屑脈とカルデラ壁の碎屑岩脈に貫かれている。
- (5) カルデラ壁の基盤岩は破碎され、碎屑脈、安山岩の貫入が認められる。基盤岩の破碎は、カルデラ壁から水平距離で、少なくとも 130~500 m におよんでおり、カルデラの形状と同じ NE-SW 方向に長軸をもつ長方形の範囲で生じている。
- (6) 火砕流噴出時にカルデラ外に放出された基盤岩量は、カルデラ容積の約 70 vol.% (約 2.7 km^3) 以上であり、火砕流噴出時の爆発が濁川カルデラの形

成の主因である。基盤岩の約 30 vol.% 以下はカルデラ内にフォールバックし、岩片が小さく破碎され、均質に攪拌された分布を示す主因となった。

- (7) 火道充填物は、脱ガスを伴う圧密によって沈降した。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、日本重化学工業株式会社には発表を許可していただいた。道南地熱エネルギー株式会社および新エネルギー・産業技術総合開発機構には、試料の提供と発表を許可していただいた。東京大学名誉教授荒牧重雄教授、北海道大学大学院宇井忠英教授、Jonathan Dehn 氏 (現所属: アラスカ大学フェアバンクス校)、道南地熱エネルギー株式会社故鷹嶋守彦博士には、濁川カルデラについて有益なご意見を頂いた。名越幸生氏には、カルデラ周辺の火砕サージについてご教授頂いた。査読者の産業技術総合研究所高田 亮博士と(財)電力中央研究所三浦大助博士には、粗稿を読んで頂き、有益なご意見を頂いた。¹⁴C 年代の測定は学習院大学木越邦彦名誉教授に、角閃石の屈折率測定結果は株式会社京都フィッシュン・トラックの壇原 徹氏にそれぞれお願いした。また、地熱エンジニアリング株式会社の探査部諸氏には日頃から有益なご意見を頂いている。これらの方々に感謝の意を表したい。

引用文献

- 安藤重幸 (1983) ボーリング結果からみた濁川カルデラの構造。月刊地球, 5, 116-121.
- Ando, S., Kurozumi, H. and Komatsu, R. (1992) Structure and caldera-fill deposits of Nigorikawa caldera. Abstract of 29th International Geological Congress, Kyoto, 2, 480.
- 荒牧重雄 (1983) 概説: カルデラ。月刊地球, 5, 64-72.
- Aramaki, S. (1984) Formation of the Aira caldera, southern Kyushu, -22,000 years ago. *J. Geophys. Res.*, 89, 8485-8501.
- Branney, M. J. (1995) Downsag and extension at calderas: new perspectives on collapse geometries from ice-melt, mining, and volcanic subsidence. *Bull. Volcanol.*, 57, 303-318.
- 井出俊夫・土井宣夫 (1982) 北海道渡島半島、濁川盆地周辺の新第三系一特に安山岩質火山噴出物の層序について。地質雑, 88, 409-412.
- 五十嵐昭明・佐藤 浩・井出俊夫・西村 進・角 清愛 (1978) 北海道茅部郡濁川地熱地域の熱水変質帯。地質調査所報告, 259, 85-180.
- 金藤太由樹・小松 亮・黒墨秀行・花野峰行 (1993) 森地熱地域の 3 次元重力解析。物理探査学会第 88 回学術講演会論文集, 490-495.

- Lipman, P. W. (1984) The roots of ash flow calderas in western north America: windows into the top of granitic batholiths. *J. Geophys. Res.*, **89**, 8801-8841.
- Lipman, P. W. (1997) Subsidence of ash flow calderas: relation to caldera size and magma-chamber geometry. *Bull. Volcanol.*, **59**, 198-218.
- 名越幸生 (1994) 濁川カルデラの火砕堆積物. 日本火山学会講演予稿集 1994 年度秋季大会, 137.
- 佐藤博之 (1969) 最近測定された北海道の火山活動に関する ^{14}C 年代測定. 地質ニュース, 30-35.
- 佐藤博之 (1980) 西南北海道濁川カルデラの岩石. 日本地質学会第 87 年学術大会講演要旨, 267.
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) (1989) 昭和 63 年度地熱貯留層評価手法開発 森地域調査観測井掘削報告書 (N63-KX-1 N63-KX-2). 229p.
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) (1991) 平成 2 年度地熱貯留層評価手法開発 森地域調査 観測井掘削報告書 (N2-KX-3). 145p.
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) (1994) 平成 4 年度地熱開発促進調査データ処理報告書 No. 34 上の湯・三岱地域 (第 3 次). 1337p.
- Sumi, K. and Takashima, I. (1975) Absolute ages of the hydrothermal alteration halos associated volcanic rocks in some Japanese geothermal fields. 2nd U.N. Geothermal Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources, 625-634.
- 浦上晃一・西田泰典 (1977) 駒ヶ岳北部地域放熱量調査物理探査報告. 地質調査所月報, **28**, 1-20.
- 柳井清治・鷹澤好博・古森康晴 (1992) 最終氷期末期に噴出した濁川テフラの層序と分布. 地質雑, **98**, 125-136.
- Yokoyama, I. (1963) Structure of caldera and gravity anomaly. *Bull. Volcanol.*, **26**, 67-72.

(編集担当 伊藤順一)