# 東北本州,仙台西方,鮮新世天神・深野カルデラの地質と 形成過程

# Geology and formation of Pliocene Tenjin and Fukano calderas at western part of Sendai, North-east Honshu, Japan

高橋 友啓 \*・長橋 良隆 \*\*・吉田 武義 \*\*\*・檀原 徹 \*\*\*\*

\* 新協地水(株) \*\* 福島大学共生システム理工学類 \*\*\* 東北大学大学院理学研究科 \*\*\*\*(株)京都フィッション・トラック

Tomohiro Takahashi\*, Yoshitaka Nagahashi\*\*, o Takeyoshi Yoshida\*\*\*, and Tohru Danhara\*\*\*\*

\*Shinkyotisui Co. Ltd., Tsuchiuri 1 13-6, Kohriyama, Fukushima 963-0204, Japan, \*\*Faculty of Symbiotic Systems Science, Fukushima University, Kanayagawa, Fukushima 960-1296, Japan, \*\*\*Graduate School of Science, Tohoku University, 6-3, Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai, 980-8578, Japan, \*\*\*\*Kyoto Fission-Track Co Ltd., 44-4 Minamitajiri-cho, Omiya, Kita-ku, Kyoto 603-8832, Japan

Abstract: The Tenjin and the Fukano calderas are distributed in Akiu-cho, Sendai to Kawasaki-cho, Miyaqi Prefecture. The Tenjin and Fukano Formations are composed mainly of pyroclastic flow deposits burying these calderas, respectively. Based on lithofacies and petrographic characters, the Tenjin and Fukano Formation are clearly distinguishable. The Tenjin Formation, filling Tenjin caldera, is divided into the lower and the upper parts. Pumices of pyroclastic flow deposits in the Tenjin Formation include small amount of cordierite, and their chemical composition of glass is plotted in the Low-K area. Zircon FT ages of the Tenjin Formation exhibits 5.1-5.4 Ma. The Fukano Formation, filling Fukano caldera, is divided into the lower, middle, upper and top parts. Cordierites are found in pumice from the middle and top parts of the Fukano Formation. The chemical composition of the pumice glass of the Fukano Formation is plotted in the Medium-K area. Geological age of the Fukano Formation is estimated at 5.5-4.0 Ma based on the ages of underlying and overlying strata. The stratigraphy and the distribution of these pyroclastic flow deposits and the geological structure show that the Fukano caldera was formed inside of the Tenjin caldera at its northwestern part as a nested caldera. The vents of these caldera volcanoes are presumed to have existed along their western margins. The type of these calderas is considered to be the trapdoor type caldera where the western parts of subsided blocks are more depressed than the eastern parts.

# 1. はじめに

東北本州弧の脊梁地域には後期中新世から更新世の火砕 流堆積物が広く分布する. これらの火砕流堆積物と相伴う 湖成堆積物が,しばしば同一の堆積盆を埋積することか ら(柴田ほか,1972;増田ほか,1973;島田ほか,1974; 田口,1975;鈴木ほか,1977;北村,1986a,b;大竹ほ か,1997),大量の火砕流噴出に伴ってカルデラが形成さ れたと解釈されている(粟田,1984;大竹ほか,1997). 東北本州弧では後期中新世から更新世のカルデラが多数識別され(佐藤, 1986;伊藤ほか, 1989;山元, 1992;吉田ほか, 1999, 2020),その一部については,形成史が論じられている(例えば,Yamada, 1988;粟田, 1993;山元, 1991).また近年,上部地殻内に認められる低速度体や反射体の分布,そして一部の内陸地震の起こり方が後期新生代に形成されたカルデラの分布と密接に関連することが指摘されている(海野ほか, 1998;小野寺ほか, 1998; Nakajima et al., 2006;Yoshida et al., 2018, 2023).これら のことは、地震波速度構造や地震発生層下限深度等で示される上部地殻内の温度構造が、後期新生代に形成されたカルデラの下に伏在する珪長質深成岩体の分布とも関連していることを示唆している(Yoshida, 2001;吉田ほか、2005, 2020; Yoshida et al, 2014).

本論で扱う仙台市西方には後期中新世から鮮新世の火砕 流堆積物が広く分布する(Fig.1;北村1986a, b). また, 秋保町から川崎町にかけては,顕著な負の重力異常がみら れ(Fig.2;広島ほか,1991),以前よりカルデラの存在が 指摘されていた(伊藤ほか, 1989). この重力異常は本論 で述べるカルデラの形状とほぼ対応し、天神カルデラは川 崎町と秋保町にわたる負異常部と,深野カルデラは秋保町 の負異常部東側半分と一致する(Fig. 2:高橋ほか, 2004). 吉田(2009)は、仙台付近の後期中新世カルデラと鮮新世 カルデラ噴出物のガラス組成と相平衡実験結果(Luth et al., 1964)から,前者は2~5km,後者は5~10kmの平衡 深度で生じたこと,および,これらの深度範囲の地震波高 速度域 (Nakajima et al., 2006) で活発な地震活動が起こっ ていることを示している.鈴木ほか(2017)は、仙台西方、 後期中新世白沢カルデラのメルト包有物の捕獲圧力に基づ き,多くの包有物形成に関与したマグマの平衡深度は,1~ 11 km 程度であり、少なくとも 2 ~ 6 km の深さではマグマ は水に飽和し、3~6%の水を含んでいたと推測している。 反射法地震探査の結果は、このカルデラを形成したマグマ 由来の流体の一部が、カルデラ南東部の深さ2~5kmに位 置する流体に富む深成岩体(fossil magma chamber)とし て現在も地殻中に残留していることを示唆している(Sato et al., 2002). Amanda et al. (2019) も, 白沢カルデラに近接 する後期中新世〜鮮新世に形成された天神・深野カルデラ (高橋ほか, 2004)のメルト包有物の組成に基づき、マグマ 溜りの深度として地下2~10km, 固化温度として750~ 795℃,含水量として 3.3~7.0%の値を推定している.こ のように、仙台西方のカルデラ群については、いくつかの 研究が報告されているものの, カルデラの内部構造や, そ れを埋積する火砕流堆積物の層序。また、それらとカルデ ラ外の火砕流堆積物との関係等については, 十分には明ら かにされていない.

本論では、野外調査で明らかとなったカルデラを特徴づける火道凝灰岩(tuff vents)の分布、カルデラを埋積した 火砕流堆積物の分布・層序とその地質構造に基づいて、天 神カルデラの中に入れ子状に深野カルデラが形成されたこ とを示す.さらにカルデラ内に分布する火砕流堆積物とカ ルデラ周辺に分布する小沢凝灰岩(北村,1986b),沼田凝 灰岩(北村,1986b),広瀬川凝灰岩(北村,1986a;北村ほか, 1986)など、との関係や、これらの火砕流堆積物の年代に ついても触れ、最後に天神・深野、両カルデラの形成過程 を論じる.

## 2. 地質概要

調査地域は仙台市西方の秋保町から川崎町にかけての南 北約 15Km, 東西約 10Km の範囲である(Fig. 1). この地域 は名取川水系である名取川・本砂金川・太郎川・北川が東 流し、このうち太郎川と北川は釜房湖に流入している.地 形的には脊梁山地と阿武隈山地北方延長部との間に位置す る脊梁山地東側の低山地・丘陵部からなり, 脊梁山地から 低山地部への標高変化は急激である(Fig.2). この堅固な下 部中新統が分布する脊梁山地域と、より軟質な中 - 上部中 新統と鮮新 - 更新統が分布する低山地部との境界には、脊 梁山地の降起に関係した作並断層が位置するとされている (北村, 1986a, b). 北村(1986a, b)はこの地域の地質層 序を総括し,下位から,下部中新統の青根層,中部中新統 の作並層・大森層・桜内層、上部中新統の湯元層・遠刈田層・ 大手門層・白沢層・小沢凝灰岩(火砕流堆積物),鮮新統の 天神凝灰岩(火砕流堆積物)・深野層・沼田凝灰岩(火砕流 堆積物)・音無層・薄木層, 第四系の芋峠層・安達 - 愛島 軽石層(蟹澤ほか, 1986)とした(Fig.3).

**下部中新統** 青根層は調査地域の西部に分布する (Fig. 4). 変質した流紋岩質〜デイサイト質の溶岩・凝灰角礫岩・ 火山礫凝灰岩・凝灰質砂岩等からなり, 黒色頁岩を挟む. *Glycymeris* sp. や *Cryptopectem* sp. 等の貝化石が産する (山 田, 1972).



Fig.1. Study area and distribution map of the Pliocene tuffs (after Kitamura, 1986a,b).



Fig.2. Bouguer anomaly map (  $\rho = 2.3 \text{ g/cm}^3$ ) of western part of Sendai city. Showing outline of the Tenjin and Fukano calderas superimposed on a slope map (Yokoyama, 2001). Contour interval is 1 mgal. H: High gravity anomaly zone. L: Low gravity anomaly zone. Modified from Gravity map of Hiroshima et al., (1991).

中部中新統 作並層も調査地域の西部に分布し (Fig.4), シ ルト岩・砂岩・凝灰岩からなる. 凝灰岩には珪長質細粒凝 灰岩, 軽石質凝灰岩, 安山岩質凝灰岩等がある. 本層から は, 浮遊性有孔虫化石の Orbulina suturalis と Globorotalia miozea と Globorotalina praemenardii praemenardii, 石 灰 質 ナ ン ノ 化 石 の Cyclicargolithus floridanus と Reticulofenestra pseudoumbilica, 放散虫化石の Cannartus petterssoni と Cyrtocapsella japonica と Eucyrtidium inflatum 等, 各種微化石が多産する (天野, 1980; 大槻ほ か, 1994). これらから作並層の上限は約 12Ma で下限は約 16Ma とされる (大槻ほか, 1994). 大森層および桜内層は 調査地域南西から南東部に分布し (Fig.4), 凝灰岩や粗粒 凝灰質砂岩に, 少量のデイサイト溶岩と安山岩溶岩を伴う (北村, 1986b).

上部中新統 湯元層は調査地域東部に分布し(Fig. 4),塊 状無層理で非溶結の軽石質凝灰岩を主とするが,溶結凝灰 岩も認められる(北村, 1986a).遠刈田層は調査地域南西



Fig.3. Stratigraphy of the study area in western part of Sendai city.

部に分布する(Fig. 4). 非溶結の軽石質凝灰岩を主とし, 基底部付近では異質礫を多く含み,上部は平行または斜交 葉理が発達する砂質凝灰岩からなる(北村, 1986b).大手 門層は調査地域北部に分布し(Fig. 4),含火山礫デイサイ ト質凝灰岩からなる.風化面は黄褐色から緑色を呈し,多 孔質で軽石が層理面と平行に配列する.含まれる火山礫は 安山岩 - デイサイト質の角礫からなる(北村, 1986a). 白 沢層は調査地域北東部に分布し(Fig.4), 白坂峠シルト岩 部層,大原凝灰岩部層,板颪峠シルト岩部層,白沢層主部 に区分される(北村, 1986a). 白坂峠シルト岩部層と板颪 峠シルト岩部層からは Okutsu (1955) により植物化石が, 小林(1962)により淡水性珪藻化石の産出が報告されてい る. 白沢層からは 8 Ma と 10 Ma の K-Ar 年代値(柴田ほ か, 1976), 6.9 Maの FT 年代値(北村ほか, 1986)が報告 されている. ただし, 大場・伴(1997)は黒鼻山玄武岩が 白沢層中部に対比できることを示した後、この玄武岩の年 代値として, 5.03, 5.2, 5.64 Maの K-Ar 年代を報告してい



Fig.4. Geological map and cross sections of the Tenjin and Fukano calderas. Holocene and terrace deposit are omitted from the cross section.

る (Ban et al., 1997). 藤原ほか (2013) は白沢層を含む秋 保層群の年代を8~6Ma頃と推定している。白沢層は東に 向かって開いた半盆状構造を成し,この盆地の北から東縁 では、中部中新統にアバットしている. この構造について は、カルデラ性の陥没盆地と考えられている(仙台団研グ ループ, 1966). この白沢カルデラでは, 北西部に入れ子状 の定義カルデラが分布している(鈴木ほか, 2017;高嶋ほか, 2018;吉田ほか, 2020).小沢凝灰岩は調査地域南東部に 分布する塊状無層理の軽石質凝灰岩で,軽石濃集ブロック を含む(Figs. 1, 4). 天神層(新称)は天神カルデラを埋積 する地層で、下部の柳生川凝灰岩部層の軽石質凝灰岩と上 部の天神前シルト岩部層からなる(Figs. 4, 5). 北村(1986b) の天神凝灰岩・中西層および北村(1986a)の深野層の一部 に相当する. 天神層は下位の湯元層と断層で接し, 芋峠層 に覆われるている.深野層(再定義)は仙台市太白区秋保 町深野周辺に位置する深野カルデラを埋積する地層で,下 部の上ノ原凝灰岩部層・中部の新田軽石凝灰岩部層・上部 の滝原凝灰岩部層・最上部の森安軽石凝灰岩部層に細分さ れる(Figs. 4, 5). 深野層は天野(1980)の深野層の一部に 相当し,下位の湯元層と断層で接し,芋峠層に覆われる.

鮮新統 沼田凝灰岩は調査地域南東部に分布する(Figs. 1, 4). 塊状無層理の軽石質凝灰岩で,下位の小沢凝灰岩を覆っ ている(北村, 1986b). 音無層は調査地域南部に分布し (Fig. 4), 礫岩・砂岩・細粒凝灰岩・亜炭からなる(北村, 1986b). 薄木層は調査地域南東部に分布する軽石質凝灰岩 で(Fig. 4),下位の音無層を覆う(北村, 1986b). 更新統 芋峠層は作並断層より東の尾根上に分布する(Fig. 4).主に安山岩質の中~大礫と砂岩からなり,一部亜炭層 を挟む.下位の大手門層・天神層・深野層を覆って分布する. 調査地域中央に位置する安達火山(蟹澤,1985,1996;蟹澤 ほか,1986;宮本ほか,2013)は、安達 - 愛島軽石層と 呼ばれる降下軽石堆積物からなる.約8万年前に活動した 安達火山は岩石学的特徴から青麻-恐火山列に属するとさ れている(蟹澤,1996).調査地域南部の釜房湖西方では段 丘地形が発達し(Fig.4),幡谷ほか(2004)により,高位 段丘面・中位段丘面・低位段丘面の大きく3つに区分され, 中位段丘面は海洋酸素同位体比ステージ6に対比されてい る.また,低位段丘面下の礫層からはATテフラ層が検出さ れることと44000年前の<sup>14</sup>C年代値が報告されていること から(小岩,1994),低位段丘面は最終氷期前半から後半を 通じて形成されたとされる(幡谷ほか,2004).

# 3. 地質各説·記載岩石学的性質

ここでは天神層・深野層とカルデラ周辺に分布する火砕 流堆積物について、その模式地・分布・層厚・層相や岩石 学的特徴について述べる.

岩石学的性質の記載や火山ガラスの主成分化学分析は, 以下の方法で行った.分析試料は,地層が複数ユニットに 細分される場合はユニットごとに採取した.天神層および 深野層の火砕流堆積物からは保存の良い軽石が取り出せる ため,軽石のみと基質部の火山灰の両方について分析を行っ



Fig.5. Schematic stratigraphy and lithofacies of the Tenjin and Fukano Formations.

た. 湖成堆積物は軽石が取り出せるものは軽石のみを分析 し, それ以外は軽石と基質部の火山灰をあわせたものを分 析試料とした.

記載岩石学的性質の記載項目は全粒子組成,火山ガラスの形状,重鉱物組成である(Table 1). 試料の処理は高橋ほか(2003)に基づいて行った.火山ガラスの主成分化学分析は福島大学のEDS分析装置(JEOL製JSM5800LV + LINK ISIS X線マイクロアナライザー)を用いた.分析条件は木村(1994)に基づき,加速電圧15kV,照射電流0.3 nA,ビーム径約5 μ m の条件下で各試料につき10 片の火山ガラスを分析した. EDS による分析結果は,長橋ほか(2003)に よる補正法を適用した(Table 2, 4).

#### (1) 天神層(新称)

天神層は、北村(1986b)の天神凝灰岩・中西層、および 北村(1986a)の深野層のうち秋保町上ノ原 - 川崎町内木 戸に分布するものに相当し、天神カルデラを埋積する下部 の柳生川凝灰岩部層の非溶結火砕流堆積物と上部の天神前 シルト岩部層の湖成堆積物に区分される. 模式地は太郎川 ルート(Fig. 6)とする.

**柳生川凝灰岩部層**本部層は川崎町柳生川に広く分布し, 北部では南北に細長く分布する(Fig. 4). 各ルートでは,

Table 1. Petrographic properties of the Tenjin and Fukano Formations.

Strati	atigraphi sample Grain assemblage (%)										Shape of glass shards (%)										Mafic	mineral a	assembla	ge (%)				
сu	init	No.	GI	Pl	Qtz	Mm	WeGl	Fr	Ha	Hb	Ca	Cb	Та	Tb	F	Ots	Bt	Hbl	oxHbl	Cum	Opx	Cpx	Grt	Aln	Zm	Ap	Opq	Crd
	2	8	63.5	7.1	14.7	4.3	9.5	0.9	0.0	0.0	28.8	12.7	27.1	23.7	3.4	4.2	0.0	0.9	0.0	0.5	54.5	18.8	0.0	0.0	0.0	0.0	23.0	2.3
	ų	7	92.6	2.9	3.9	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	6.5	2.8	45.4	45.4	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	49.5	7.5	0.0	0.0	0.0	0.0	41.0	1.4
a.	~	15	91.5	4.7	3.3	0.0	0.5	0.0	0.9	3.7	18.5	5.6	49.1	17.6	0.0	4.6	0.5	2.4	0.0	0.0	8.3	0.0	0.0	0.0	2.9	0.0	85.9	0.0
0 I	ĩ	6	77.1	3.2	4.6	0.9	14.2	0.0	3.2	7.2	14.4	16.0	13.6	6.4	0.8	38.4	0.0	2.3	0.0	0.0	39.4	8.9	0.0	0.0	0.5	1.4	47.4	0.0
uka	ž	5	91.4	2.9	2.4	0.5	1.9	1.0	0.0	0.9	17.0	6.3	17.9	43.8	0.9	13.4	0.0	7.7	0.0	0.0	26.5	7.1	0.0	0.0	0.0	0.0	53.5	5.2
1		13	89.5	1.4	2.9	1.0	5.3	0.0	0.0	0.0	14.3	8.9	33.9	36.6	1.8	4.5	0.0	1.8	0.0	0.0	1.8	0.0	0.0	0.0	1.3	0.0	95.2	0.0
	ī.	4	76.6	1.9	0.9	0.5	20.1	0.0	7.6	10.5	18.1	25.7	7.6	13.3	0.0	17.1	0.0	7.4	0.0	0.0	29.9	7.8	0.5	0.0	1.0	1.0	52.5	0.0
	_	12	77.1	9.6	0.6	0.3	12.4	0.0	0.0	0.9	32.5	21.1	12.3	13.2	0.9	19.3	0.0	12.7	0.0	0.0	9.9	0.0	0.0	0.0	2.1	0.0	75.4	0.0
		9	89.9	3.4	2.1	0.4	3.8	0.4	0.0	3.4	33.6	25.2	24.4	12.6	0.0	0.8	0.0	8.7	0.0	0.5	28.4	2.9	0.0	0.0	0.0	1.4	55.8	2.4
	LV IV	14	82.4	1.0	0.0	0.5	16.1	0.0	0.0	0.0	4.7	0.0	90.6	4.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	26.7	20.0	0.0	0.0	0.5	0.0	24.3	28.6
		17	74.1	9.5	4.1	0.5	11.8	0.0	0.0	0.0	18.3	4.6	55.0	18.3	0.0	3.7	0.0	2.0	0.0	0.0	34.2	7.1	0.0	0.0	0.0	1.0	47.4	8.2
		2	91.6	3.7	0.0	1.4	2.3	0.9	0.0	0.0	1.0	0.0	99.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.0	0.0	36.3	6.3	0.0	0.0	0.0	0.6	23.8	32.5
Ξ.	$T_s$	3	75.6	2.4	0.5	1.0	20.0	0.5	0.0	0.0	1.7	0.0	89.1	9.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	22.0	9.8	0.0	0.0	0.0	0.0	55.9	12.2
ų,		11	95.9	0.9	0.5	1.4	1.4	0.0	0.0	0.0	1.8	0.9	93.6	1.8	0.0	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	42.1	14.2	0.0	0.0	0.5	0.0	15.7	27.4
Ţ		1	59.9	7.5	3.1	0.4	28.2	0.9	0.0	0.0	29.1	4.9	39.8	16.5	1.0	8.7	0.0	3.8	0.0	0.5	42.4	9.0	0.0	0.0	0.0	1.0	39.5	3.8
		10	93.6	2.5	1.0	0.5	2.0	0.5	0.0	4.7	25.2	15.9	40.2	14.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	74.8	2.4	0.0	0.0	0.5	0.0	19.9	1.5
	λt	16	95.6	2.9	0.5	1.0	0.0	0.0	1.8	8.0	25.7	27.4	2.7	34.5	0.0	0.0	0.0	2.9	0.0	0.0	62.3	2.4	0.0	0.0	1.4	1.4	28.0	1.4
		18	85.7	6.9	4.5	2.9	0.0	0.0	0.0	0.0	71.8	4.5	18.2	5.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	43.1	18.7	0.0	0.0	0.5	1.0	32.1	4.8
		19	91.9	4.7	2.6	0.9	0.0	0.0	0.0	1.8	39.4	2.8	27.5	28.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	51.6	16.9	0.0	0.0	0.0	1.4	19.6	9.6

Yt : Yagyugawa tuff Member, Ts : Tenjinmae silt stone Member, tv : tuff vent, Ut : Uenohara tuff Member, Nt : Nitta pumice tuff Member, Tt : Takihara tuff Menber, Mt : Moriyasu pumice tuff Member Shape of glass shards is based on Yoshikawa (1976) and Kurokawa (1999). Bt : Biotite, Hbl : Homblende, oxHbl : Oxy-homblende, Cum : Cummingtonite, Opx : Orthopyroxene,

Shape of glass shards is based on Yoshikawa (19/6) and Kurokawa (1999). Bt : Biotite, Hb1 : Hornblende, oxHb1 : Oxy-hornblende, Cum : Cummingtonite, Opx : Orthopyro

Cpx:Clinopyroxene, Grt:Garnet, Aln:Allanite, Zrn:Zircon, Ap:Apatite, Opq:Opaque minerals, Crd:Cordierite, Cordierite, Crd:Cordierite, Cordierite, Crd:Cordierite, Cordierite, Cordierite

Table 2. Chemical compositions of volcanic glass shards. The results corrected by the method of Nagahashi et al. (2003).

Formation							F	<sup>2</sup> ukano F	ormation									Tenjin F	ormation	
unit	tuff	vent	Moriya	isu pum	ice tuff M	enber	Takiha Mem	a tuff ber	Nitta	pumice	tuff Mem	ber	Ue	nohara t	uff Memb	er		tuff	vent	
sample No.		8	7		15		6		5		13		4		12		9		14	
Oxide(wt.%)	mean	mean s mean s				s	mean s		mean	s	mean	s	mean	s	mean	5	mean	s	mean	s
SiO2	76.79	0.21	76.71	0.30	76.57	0.28	76.90	0.23	76.75	0.33	76.50	0.36	76.64	0.32	76.72	0.58	76.73	0.32	70.10	1.84
TiO2	0.13	0.07	0.19	0.12	0.09	0.09	0.15	0.10	0.23	0.18	0.11	0.11	0.10	0.08	0.18	0.15	0.18	0.18	0.56	0.20
AI2O3	12.69	0.10	12.86	0.12	12.93	0.10	12.84	0.12	12.71	0.10	12.69	0.25	12.83	0.14	12.76	0.14	12.89	0.24	14.39	0.39
FeO*	2.02	0.18	1.55	0.21	1.09	0.12	1.77	0.16	1.93	0.16	1.82	0.30	1.82	0.15	1.77	0.31	1.70	0.17	4.30	1.06
MnO	0.06	0.10	0.11	0.12	0.04	0.09	0.06	0.10	0.08	0.08	0.24	0.23	0.10	0.19	0.15	0.20	0.05	0.12	0.14	0.15
MgO	0.14	0.03	0.16	0.04	0.15	0.04	0.17	0.04	0.25	0.11	0.17	0.07	0.16	0.07	0.15	0.05	0.29	0.14	1.03	0.40
CaO	1.33	0.12	1.48	0.21	0.71	0.11	1.38	0.07	1.71	0.09	1.40	0.16	1.40	0.13	1.48	0.25	2.01	0.11	4.01	0.55
Na2O	4.51	0.50	4.49	0.26	4.88	0.10	4.42	0.23	4.20	0.25	4.94	0.28	4.68	0.29	4.69	0.26	4.43	0.13	4.21	0.48
K2O	2.31	0.24	2.46	0.14	3.53	0.11	2.33	0.07	2.14	0.12	2.13	0.09	2.26	0.10	2.10	0.24	1.72	0.16	1.26	0.10
100% normalized	on water	free, FeG	D*: total ir	on as Fe	:0															

Formation	Tenjin Formation																	
Part	tuff v	/ent		Tenji	nmae silt	stone M	ember					Ya	gyugawa t	tuff Men	nber			
sample No.	17	7	2		3		11		1	1		)	10	5	1	8	19	9
Oxide(wt.%)	mean	s	mean	s	mean	s	mean	s	mean	s	mean	s	mean	s	mean	s	mean	s
SiO2	76.29	1.38	64.87	2.15	71.34	0.68	66.55	1.97	77.21	0.39	75.88	1.11	75.55	0.22	76.49	0.36	76.42	0.32
TiO2	0.19	0.19	0.77	0.10	0.52	0.10	0.57	0.18	0.18	0.09	0.29	0.09	0.20	0.12	0.24	0.08	0.28	0.14
AI2O3	12.95	0.33	16.44	1.85	14.37	0.14	15.82	1.68	12.74	0.18	13.01	0.35	13.10	0.12	12.66	0.17	12.53	0.22
FeO*	2.29	0.67	5.98	1.10	3.83	0.33	5.37	0.82	1.70	0.29	2.23	0.28	2.33	0.21	1.97	0.25	2.15	0.36
MnO	0.14	0.25	0.15	0.10	0.18	0.16	0.14	0.16	0.03	0.06	0.09	0.08	0.12	0.15	0.12	0.13	0.01	0.07
MgO	0.34	0.30	1.07	0.41	0.96	0.13	0.83	0.28	0.26	0.06	0.27	0.17	0.34	0.08	0.38	0.13	0.37	0.11
CaO	2.31	0.37	5.89	1.01	3.77	0.17	5.45	0.98	1.94	0.10	2.32	0.34	2.31	0.06	2.08	0.15	2.05	0.11
Na2O	3.98	0.49	3.74	0.49	3.77	0.33	4.13	0.29	4.22	0.33	4.51	0.13	4.60	0.10	4.41	0.17	4.49	0.17
K2O	1.50	0.13	1.08	0.06	1.26	0.07	1.13	0.20	1.72	0.12	1.41	0.06	1.46	0.07	1.65	0.13	1.71	0.09

100% normalized on water free, FeO\*: total iron as FeO

Table 3. Petrographic properties of the Ozawa Tuff, Numata Tuff and Hirosegawa Tuff.

| Stratigraphic sample |  |   |  | nblage   | : (%)  |   |  | Shape of glass shards (%)  |   
   
  |   |  
   
   |   |  |   | | | |
  | Mafic mineral assemblage (%)   |   |  |   |  |  |  
   |   |   |   |   
   |
|----------------------|--|---|--|--|--|---|--|--
--
--
--|---
--
--
------------------------|---|--|---|---|--|---|--|---
--|--|--
---|---|---|---|
| No.                  | Gl   | Pl  | Qtz  | Mm   | WeGl   | Fr  | Ha   | Hb   | Ca  
   
  | Cb  | Та   
   
   | Tb  | F  | Ots   | Bt   
  | Hbl  | oxHbl   | Cum  | Opx   | Срх  | Ga   | Aln  
   | Zm  | Ар  | Opq   | Crd   
   |
| 7                    | 81.3   | 2.6   | 15.2   | 0.4  | 0.0  | 0.4   | 0.0  | 1.0  | 21.9  
   
  | 1.0   | 38.1   
   
   | 38.1  | 0.0  | 0.0   | 0.0  
  | 2.8  | 0.0   | 0.5  | 64.5  | 4.7  | 0.0  | 0.0  
   | 2.4   | 1.4   | 23.7  | 0.0   
   |
| 8                    | 87.7   | 1.8   | 6.4  | 1.4  | 2.7  | 0.0   | 5.5  | 8.2  | 45.5  
   
  | 10.9  | 8.2  
   
   | 9.1   | 2.7  | 10.0  | 0.0  
  | 10.0   | 0.0   | 1.0  | 59.7  | 2.0  | 0.0  | 0.0  
   | 1.5   | 0.5   | 25.4  | 0.0   
   |
| 9                    | 84.4   | 1.4   | 6.9  | 0.5  | 6.4  | 0.5   | 6.6  | 14.2   | 30.2  
   
  | 15.1  | 7.5  
   
   | 8.5   | 3.8  | 14.2  | 0.0  
  | 9.8  | 0.0   | 1.2  | 3.7   | 0.0  | 0.0  | 0.0  
   | 4.9   | 3.7   | 76.8  | 0.0   
   |
| 6                    | 78.3   | 5.2   | 10.0   | 0.4  | 5.7  | 0.4   | 0.0  | 0.0  | 32.8  
   
  | 30.3  | 5.9  
   
   | 13.4  | 2.5  | 15.1  | 0.0  
  | 4.1  | 0.0   | 5.7  | 3.3   | 4.9  | 0.0  | 0.0  
   | 17.1  | 2.4   | 62.6  | 0.0   
   |
| 5                    | 84.8   | 1.7   | 12.6   | 0.4  | 0.4  | 0.0   | 0.0  | 4.6  | 19.8  
   
  | 39.2  | 0.0  
   
   | 36.4  | 0.0  | 0.0   | 0.0  
  | 28.7   | 0.0   | 2.0  | 26.2  | 2.0  | 0.0  | 0.0  
   | 2.5   | 0.5   | 38.1  | 0.0   
   |
| 4                    | 81.6   | 8.1   | 2.7  | 0.4  | 7.2  | 0.0   | 0.0  | 2.9  | 29.5  
   
  | 22.9  | 12.4   
   
   | 15.2  | 0.0  | 17.1  | 0.0  
  | 37.2   | 2.3   | 2.3  | 16.3  | 0.0  | 0.0  | 0.0  
   | 7.0   | 0.0   | 34.9  | 0.0   
   |
| 2                    | 94.7   | 1.0   | 0.0  | 0.5  | 3.4  | 0.5   | 0.0  | 0.8  | 40.3  
   
  | 15.5  | 18.6   
   
   | 17.8  | 2.3  | 4.7   | 0.0  
  | 4.3  | 0.0   | 0.0  | 42.0  | 2.9  | 0.0  | 0.0  
   | 0.0   | 0.0   | 33.3  | 17.4  
   |
| 3                    | 98.8   | 0.8   | 0.0  | 0.0  | 0.4  | 0.0   | 0.0  | 0.8  | 71.2  
   
  | 5.1   | 16.9   
   
   | 5.9   | 0.0  | 0.0   | 0.0  
  | 0.0  | 0.0   | 1.4  | 82.4  | 1.4  | 0.0  | 0.0  
   | 0.0   | 0.0   | 12.2  | 2.7   
   |
| 1                    | 82.9   | 3.8   | 1.4  | 0.5  | 10.5   | 1.0   | 13.9   | 26.8   | 17.2  
   
  | 32.5  | 0.0  
   
   | 7.2   | 2.4  | 0.0   | 0.0  
  | 9.3  | 0.7   | 0.0  | 40.7  | 22.7   | 0.0  | 0.0  
   | 0.0   | 0.0   | 26.0  | 0.0   
   |
|                      | mplo<br>No.<br>7<br>8<br>9<br>6<br>5<br>4<br>2<br>3<br>1 | mple       7     81.3       8     87.7       9     84.4       6     78.3       5     84.8       4     81.6       2     94.7       3     98.8       1     82.9 | Grai     Grai       No.     GI     PI       7     81.3     2.6       8     87.7     1.8       9     84.4     1.4       6     78.3     5.2       5     84.8     1.7       4     81.6     8.1       2     94.7     1.0       3     98.8     0.8       1     82.9     3.8 | Grain asser       Ro.     Gl     Pl     Qtz       7     81.3     2.6     15.2       8     87.7     1.8     6.4       9     84.4     1.4     6.9       6     78.3     5.2     10.0       5     84.8     1.7     12.6       4     81.6     8.1     2.7       2     94.7     1.00     0.0       3     98.8     0.8     0.0       1     82.9     3.8     1.4 | Grain     assemblage       Grain     Pl     Qtz     Mm       7     81.3     2.6     15.2     0.4       8     87.7     1.8     6.4     1.4       9     84.4     1.4     6.9     0.5       6     78.3     5.2     10.0     0.4       5     84.8     1.7     12.6     0.4       4     81.6     8.1     2.7     0.4       2     94.7     1.0     0.0     0.5       3     98.8     0.8     0.0     0.1       1     82.9     3.8     1.4     0.5 | Grain     Grain     assemblage (%)       No.     GI     PI     Qtz     Mm     WeGI       7     81.3     2.6     15.2     0.4     0.0       8     87.7     1.8     6.4     1.4     2.7       9     84.4     1.4     6.9     0.5     6.4       6     78.3     5.2     10.0     0.4     5.7       5     84.8     1.7     12.6     0.4     0.4       4     81.6     8.1     2.7     0.4     7.2       2     94.7     1.0     0.0     0.5     3.4       3     98.8     0.8     0.0     0.0     0.4       1     82.9     3.8     1.4     0.5     10.5 | Grain assemblage (%)       Grain     Grain     Min     Weil     Fr       8     Grain     2.6     15.2     0.4     0.0     0.4       8     87.7     1.8     6.4     1.4     2.7     0.0       9     84.4     1.4     6.9     0.5     6.4     0.5       6     78.3     5.2     10.0     0.4     5.7     0.4       5     84.8     1.7     12.6     0.4     7.2     0.0       4     81.6     8.1     2.7     0.4     7.2     0.0       2     94.7     1.00     0.4     7.2     0.0       2     94.7     1.0     0.0     5.4     0.0       3     98.8     0.8     0.0     0.4     0.0       1     82.9     3.8     1.4     0.5     10.5     1.0 | Grain     assemblage (%)       Mo.     Gl     Pl     Qtz     Mm     WeGl     Fr     Ha       7     81.3     2.6     15.2     0.4     0.0     0.4     0.0       8     87.7     1.8     6.4     1.4     2.7     0.0     5.5       9     84.4     1.4     6.9     0.5     6.4     0.5     6.6       6     78.3     5.2     10.0     0.4     5.7     0.4     0.0       5     84.8     1.7     12.6     0.4     0.4     0.0     0.0       4     81.6     8.1     2.7     0.4     7.2     0.0     0.0       2     94.7     1.0     0.0     0.5     3.4     0.5     0.0       3     98.8     0.8     0.0     0.4     0.0     0.0     0.4     0.0     0.0       1     82.9     3.8     1.4     0.5     10.5     1.0     13.9 | Grain assemblage (%)       Gil     PI     Qtz     Mm     WcGi     Fr     Ha     Hb       7     81.3     2.6     15.2     0.4     0.0     0.4     0.0     1.0       8     87.7     1.8     6.4     1.4     2.7     0.0     5.5     8.2       9     84.4     1.4     6.9     0.5     6.4     0.5     6.6     14.2       6     78.3     5.2     10.0     0.4     5.7     0.4     0.0     0.0       5     84.8     1.7     12.6     0.4     0.4     0.0     0.0     4.6       4     81.6     8.1     2.7     0.4     0.0     2.9       2     94.7     1.0     0.0     5.5     3.4     0.5     0.0     2.9       2     94.7     1.0     0.0     0.5     3.4     0.5     0.0     0.8       3     98.8     0.8     0.0     0.0     4.0     0.0     0.8 <td>Grain     Grain     ssemblage (%)     Shape       No.     GI     PI     Qtz     Mm     WeGI     Fr     Ha     Hb     Ca       7     81.3     2.6     15.2     0.4     0.0     0.4     0.0     1.0     21.9       8     87.7     1.8     6.4     1.4     2.7     0.0     5.5     8.2     45.5       9     84.4     1.4     6.9     0.5     6.4     0.5     6.6     14.2     30.2       6     78.3     5.2     10.0     0.4     5.7     0.4     0.0     0.0     32.8       5     84.8     1.7     12.6     0.4     0.4     0.0     0.0     4.6     19.8       4     81.6     8.1     2.7     0.4     7.2     0.0     0.0     2.9     29.5       2     94.7     1.0     0.0     0.5     3.4     0.5     0.0     0.8     7.2       1     82.9     3.8     1.4</td> <td>Grain assemblage (%)     Shape of gla       No.     Gl     Pl     Qtz     Mm     WeG     Fr     Ha     Hb     Ca     Cb       7     81.3     2.6     15.2     0.4     0.0     0.4     0.0     1.0     1.0     2.19     1.0       8     87.7     1.8     6.4     1.4     2.7     0.0     5.5     8.2     45.5     10.9       9     84.4     1.4     6.9     0.5     6.4     0.0     0.0     3.2     15.1       6     78.3     5.2     10.0     0.4     5.7     0.4     0.0     0.0     32.8     30.3       5     84.8     1.7     12.6     0.4     0.0     0.0     4.6     18.8     39.2       4     81.6     8.1     2.7     0.4     7.2     0.0     0.0     2.9     29.5     29.9       2     94.7     1.0     0.0     5.3     4.05     0.0     0.0     8.40.3     15.5 <!--</td--><td>mpip     Grain assemblage (%)     Shape of glass shar       No.     GI     PI     Qtz     Mm     WeGI     Fr     Ha     Hb     Ca     Cb     Ta       7     81.3     2.6     15.2     0.4     0.0     0.4     0.0     1.0     21.9     1.0     38.1       8     87.7     1.8     6.4     1.4     2.7     0.0     5.5     8.2     45.5     10.9     8.2       9     84.4     1.4     6.9     0.5     6.4     0.0     0.0     20.9     30.3     5.9       6     78.3     5.2     10.0     0.4     5.7     0.4     0.0     0.0     32.8     30.3     5.9       5     84.8     1.7     12.6     0.4     5.7     0.4     0.0     0.0     32.8     30.3     5.9       6     78.3     5.2     10.0     0.4     5.7     0.4     0.0     0.0     32.8     3.0.8     5.9       7     84.8</td><td>Barry Mark     Grain assemblage (%)     Shape of glass shards (%)       No.     Gl     Pl     Qtz     Mm     WeG     Fr     Ha     Hb     Ca     Cb     Ta     Tb       7     81.3     2.6     15.2     0.4     0.0     0.4     0.0     1.0     21.9     1.0     38.1     38.1       8     87.7     1.8     6.4     1.4     2.7     0.0     5.5     8.2     45.5     10.9     8.2     9.1       9     84.4     1.4     6.9     0.5     6.4     0.6     6.4     14.2     30.3     5.9     13.4       5     84.8     1.7     12.6     0.4     0.0     0.0     4.6     18.8     30.3     5.9     13.4       5     84.8     1.7     12.6     0.4     0.0     0.0     4.6     18.8     30.3     5.9     13.4       4     81.6     8.1     2.7     0.4     7.2     0.0     0.0     2.9     2.9</td><td>Barry Barry B</td><td>Barry Barry B</td><td>mpip     Grain assemblage (%)     Shape of glass shards (%)       No.     GI     PI     Qtz     Mm     WeG     Fr     Ha     Hb     Ca     Cb     Ta     Tb     F     Ots     Bt       7     81.3     2.6     15.2     0.4     0.0     0.4     0.0     1.0     21.9     1.0     38.1     38.1     0.0     0.0     0.0       8     87.7     1.8     6.4     1.4     2.7     0.0     5.5     8.2     45.5     10.9     8.2     9.1     2.7     10.0     0.0       9     84.4     1.4     6.9     0.5     6.4     0.5     6.6     14.2     30.2     15.1     7.5     8.5     3.8     14.2     0.0       6     78.3     5.2     10.0     0.4     5.7     0.4     0.0     0.0     2.8     30.3     5.9     13.4     2.5     15.1     0.0       6     78.3     5.2     10.0     0.4     0.0     0.</td><td>Barry Barry B</td><td>mpip     Grain semilare (%)     Shape of glass shards (%)       No.     GI     Pl     Qtz     Mm     WeG     Fr     Ha     Hb     Ca     Cb     Ta     Tb     F     Ots     Bt     Hbl     oxHbl       7     81.3     2.6     15.2     0.4     0.0     0.0     1.0     21.9     1.0     38.1     38.1     0.0     0.0     0.0     2.8     0.0       8     87.7     1.8     6.4     1.4     2.7     0.0     5.5     8.2     45.5     10.9     8.2     9.1     2.7     10.0     0.0     1.0     2.0       8     87.7     1.8     6.4     1.4     2.7     0.0     5.5     8.2     45.5     10.9     8.2     9.1     2.7     10.0     0.0     10.0     0.0       6     78.3     5.2     10.0     0.4     5.7     0.4     0.0     0.0     2.8     3.3     5.9     13.4     2.5     15.1     0.0     0</td><td>Big     Grain assemblage (%)     Shape of glass sharts (%)     M     M     M       No.     GI     PI     Qtz     Mm     WeG     Fr     Ha     Hb     Ca     Cb     Ta     Tb     F     Ots     Bt     Hb     ocd     D     38.1     38.1     0.0     0.0     2.8     0.0     0.5       8     87.7     1.8     6.4     1.4     2.7     0.0     5.5     8.2     45.5     10.9     8.2     9.1     2.7     10.0     0.0     1.0     1.0     38.1     38.1     0.0     0.0     2.8     0.0     1.2       9     84.4     1.4     6.9     0.5     6.4     0.0     0.0     32.8     30.3     5.9     13.4     2.5     15.1     0.0     4.1     0.0     5.7       8     8.1     1.7     0.4     0.0     0.0     3.8     3.3     5.9     13.4     2.5     15.1     0.0     4.1     0.0     5.7</td><td>mptp     Grain assemblage (%)     Shape of glass sharts (%)     Main form     Main form       No.     GI     PI     Qtz     Mm     WeGi     Fr     Ha     Hb     Ca     Cb     Ta     Tb     F     Ots     Bt     Hb     oxHb     Cum     Opx       7     81.3     2.6     15.2     0.4     0.0     0.4     0.0     1.0     21.9     1.0     38.1     38.1     0.0</td><td>Bit Matrix     Grain assemblage (%)     Shape of glass sharts (%)     Matrix minorial frame     Matrix minorial frame       No.     GI     PI     Qtz     Mm     WeG     Fr     Ha     Hb     Ca     Cb     Ta     Tb     F     Ots     Bt     Hb     out     Op     Cpx       7     81.3     2.6     15.2     0.4     0.0     0.4     0.0     1.0     2.19     1.0     38.1     38.1     0.0     0.0     2.8     0.0     0.5     6.4     7       8     87.7     1.8     6.4     1.4     2.7     0.0     5.5     8.2     45.5     10.9     8.5     3.8     14.2     0.0     9.8     0.0     1.2     3.7     0.0       6     78.3     5.2     10.0     6.4     5.7     0.4     0.0     0.0     3.8     3.3     5.9     13.4     2.5     15.1     0.0     4.1     0.0     5.7     3.4     9       5     8.48     1.7</td><td>Main     Grain     service     Shape     Issue     Stape     <t< td=""><td>mptp     Grain assemilate (%)     Shape of glass shards (%)     Mafe mining assemilate (%)     Mathematical membration (%)     Mathematical membratised (%)       8</td><td>mpi (si a)     Grai a)     Grai a)     Weight (si a)     Shape of glass sharts (%)     Main (si a)     Shape of glass shape of glass shape of glass shape of glass (si a)     Shape of glass shape of glass shape of glass (si a)     Shape of glass shape of glass (si a)     Shape of gla</td><td>Bit Propering Propering</td><td>Imple     Grai weight weight</td></t<></td></td> | Grain     Grain     ssemblage (%)     Shape       No.     GI     PI     Qtz     Mm     WeGI     Fr     Ha     Hb     Ca       7     81.3     2.6     15.2     0.4     0.0     0.4     0.0     1.0     21.9       8     87.7     1.8     6.4     1.4     2.7     0.0     5.5     8.2     45.5       9     84.4     1.4     6.9     0.5     6.4     0.5     6.6     14.2     30.2       6     78.3     5.2     10.0     0.4     5.7     0.4     0.0     0.0     32.8       5     84.8     1.7     12.6     0.4     0.4     0.0     0.0     4.6     19.8       4     81.6     8.1     2.7     0.4     7.2     0.0     0.0     2.9     29.5       2     94.7     1.0     0.0     0.5     3.4     0.5     0.0     0.8     7.2       1     82.9     3.8     1.4 | Grain assemblage (%)     Shape of gla       No.     Gl     Pl     Qtz     Mm     WeG     Fr     Ha     Hb     Ca     Cb       7     81.3     2.6     15.2     0.4     0.0     0.4     0.0     1.0     1.0     2.19     1.0       8     87.7     1.8     6.4     1.4     2.7     0.0     5.5     8.2     45.5     10.9       9     84.4     1.4     6.9     0.5     6.4     0.0     0.0     3.2     15.1       6     78.3     5.2     10.0     0.4     5.7     0.4     0.0     0.0     32.8     30.3       5     84.8     1.7     12.6     0.4     0.0     0.0     4.6     18.8     39.2       4     81.6     8.1     2.7     0.4     7.2     0.0     0.0     2.9     29.5     29.9       2     94.7     1.0     0.0     5.3     4.05     0.0     0.0     8.40.3     15.5 </td <td>mpip     Grain assemblage (%)     Shape of glass shar       No.     GI     PI     Qtz     Mm     WeGI     Fr     Ha     Hb     Ca     Cb     Ta       7     81.3     2.6     15.2     0.4     0.0     0.4     0.0     1.0     21.9     1.0     38.1       8     87.7     1.8     6.4     1.4     2.7     0.0     5.5     8.2     45.5     10.9     8.2       9     84.4     1.4     6.9     0.5     6.4     0.0     0.0     20.9     30.3     5.9       6     78.3     5.2     10.0     0.4     5.7     0.4     0.0     0.0     32.8     30.3     5.9       5     84.8     1.7     12.6     0.4     5.7     0.4     0.0     0.0     32.8     30.3     5.9       6     78.3     5.2     10.0     0.4     5.7     0.4     0.0     0.0     32.8     3.0.8     5.9       7     84.8</td> <td>Barry Mark     Grain assemblage (%)     Shape of glass shards (%)       No.     Gl     Pl     Qtz     Mm     WeG     Fr     Ha     Hb     Ca     Cb     Ta     Tb       7     81.3     2.6     15.2     0.4     0.0     0.4     0.0     1.0     21.9     1.0     38.1     38.1       8     87.7     1.8     6.4     1.4     2.7     0.0     5.5     8.2     45.5     10.9     8.2     9.1       9     84.4     1.4     6.9     0.5     6.4     0.6     6.4     14.2     30.3     5.9     13.4       5     84.8     1.7     12.6     0.4     0.0     0.0     4.6     18.8     30.3     5.9     13.4       5     84.8     1.7     12.6     0.4     0.0     0.0     4.6     18.8     30.3     5.9     13.4       4     81.6     8.1     2.7     0.4     7.2     0.0     0.0     2.9     2.9</td> <td>Barry Barry B</td> <td>Barry Barry B</td> <td>mpip     Grain assemblage (%)     Shape of glass shards (%)       No.     GI     PI     Qtz     Mm     WeG     Fr     Ha     Hb     Ca     Cb     Ta     Tb     F     Ots     Bt       7     81.3     2.6     15.2     0.4     0.0     0.4     0.0     1.0     21.9     1.0     38.1     38.1     0.0     0.0     0.0       8     87.7     1.8     6.4     1.4     2.7     0.0     5.5     8.2     45.5     10.9     8.2     9.1     2.7     10.0     0.0       9     84.4     1.4     6.9     0.5     6.4     0.5     6.6     14.2     30.2     15.1     7.5     8.5     3.8     14.2     0.0       6     78.3     5.2     10.0     0.4     5.7     0.4     0.0     0.0     2.8     30.3     5.9     13.4     2.5     15.1     0.0       6     78.3     5.2     10.0     0.4     0.0     0.</td> <td>Barry Barry B</td> <td>mpip     Grain semilare (%)     Shape of glass shards (%)       No.     GI     Pl     Qtz     Mm     WeG     Fr     Ha     Hb     Ca     Cb     Ta     Tb     F     Ots     Bt     Hbl     oxHbl       7     81.3     2.6     15.2     0.4     0.0     0.0     1.0     21.9     1.0     38.1     38.1     0.0     0.0     0.0     2.8     0.0       8     87.7     1.8     6.4     1.4     2.7     0.0     5.5     8.2     45.5     10.9     8.2     9.1     2.7     10.0     0.0     1.0     2.0       8     87.7     1.8     6.4     1.4     2.7     0.0     5.5     8.2     45.5     10.9     8.2     9.1     2.7     10.0     0.0     10.0     0.0       6     78.3     5.2     10.0     0.4     5.7     0.4     0.0     0.0     2.8     3.3     5.9     13.4     2.5     15.1     0.0     0</td> <td>Big     Grain assemblage (%)     Shape of glass sharts (%)     M     M     M       No.     GI     PI     Qtz     Mm     WeG     Fr     Ha     Hb     Ca     Cb     Ta     Tb     F     Ots     Bt     Hb     ocd     D     38.1     38.1     0.0     0.0     2.8     0.0     0.5       8     87.7     1.8     6.4     1.4     2.7     0.0     5.5     8.2     45.5     10.9     8.2     9.1     2.7     10.0     0.0     1.0     1.0     38.1     38.1     0.0     0.0     2.8     0.0     1.2       9     84.4     1.4     6.9     0.5     6.4     0.0     0.0     32.8     30.3     5.9     13.4     2.5     15.1     0.0     4.1     0.0     5.7       8     8.1     1.7     0.4     0.0     0.0     3.8     3.3     5.9     13.4     2.5     15.1     0.0     4.1     0.0     5.7</td> <td>mptp     Grain assemblage (%)     Shape of glass sharts (%)     Main form     Main form       No.     GI     PI     Qtz     Mm     WeGi     Fr     Ha     Hb     Ca     Cb     Ta     Tb     F     Ots     Bt     Hb     oxHb     Cum     Opx       7     81.3     2.6     15.2     0.4     0.0     0.4     0.0     1.0     21.9     1.0     38.1     38.1     0.0</td> <td>Bit Matrix     Grain assemblage (%)     Shape of glass sharts (%)     Matrix minorial frame     Matrix minorial frame       No.     GI     PI     Qtz     Mm     WeG     Fr     Ha     Hb     Ca     Cb     Ta     Tb     F     Ots     Bt     Hb     out     Op     Cpx       7     81.3     2.6     15.2     0.4     0.0     0.4     0.0     1.0     2.19     1.0     38.1     38.1     0.0     0.0     2.8     0.0     0.5     6.4     7       8     87.7     1.8     6.4     1.4     2.7     0.0     5.5     8.2     45.5     10.9     8.5     3.8     14.2     0.0     9.8     0.0     1.2     3.7     0.0       6     78.3     5.2     10.0     6.4     5.7     0.4     0.0     0.0     3.8     3.3     5.9     13.4     2.5     15.1     0.0     4.1     0.0     5.7     3.4     9       5     8.48     1.7</td> <td>Main     Grain     service     Shape     Issue     Stape     <t< td=""><td>mptp     Grain assemilate (%)     Shape of glass shards (%)     Mafe mining assemilate (%)     Mathematical membration (%)     Mathematical membratised (%)       8</td><td>mpi (si a)     Grai a)     Grai a)     Weight (si a)     Shape of glass sharts (%)     Main (si a)     Shape of glass shape of glass shape of glass shape of glass (si a)     Shape of glass shape of glass shape of glass (si a)     Shape of glass shape of glass (si a)     Shape of gla</td><td>Bit Propering Propering</td><td>Imple     Grai weight weight</td></t<></td> | mpip     Grain assemblage (%)     Shape of glass shar       No.     GI     PI     Qtz     Mm     WeGI     Fr     Ha     Hb     Ca     Cb     Ta       7     81.3     2.6     15.2     0.4     0.0     0.4     0.0     1.0     21.9     1.0     38.1       8     87.7     1.8     6.4     1.4     2.7     0.0     5.5     8.2     45.5     10.9     8.2       9     84.4     1.4     6.9     0.5     6.4     0.0     0.0     20.9     30.3     5.9       6     78.3     5.2     10.0     0.4     5.7     0.4     0.0     0.0     32.8     30.3     5.9       5     84.8     1.7     12.6     0.4     5.7     0.4     0.0     0.0     32.8     30.3     5.9       6     78.3     5.2     10.0     0.4     5.7     0.4     0.0     0.0     32.8     3.0.8     5.9       7     84.8 | Barry Mark     Grain assemblage (%)     Shape of glass shards (%)       No.     Gl     Pl     Qtz     Mm     WeG     Fr     Ha     Hb     Ca     Cb     Ta     Tb       7     81.3     2.6     15.2     0.4     0.0     0.4     0.0     1.0     21.9     1.0     38.1     38.1       8     87.7     1.8     6.4     1.4     2.7     0.0     5.5     8.2     45.5     10.9     8.2     9.1       9     84.4     1.4     6.9     0.5     6.4     0.6     6.4     14.2     30.3     5.9     13.4       5     84.8     1.7     12.6     0.4     0.0     0.0     4.6     18.8     30.3     5.9     13.4       5     84.8     1.7     12.6     0.4     0.0     0.0     4.6     18.8     30.3     5.9     13.4       4     81.6     8.1     2.7     0.4     7.2     0.0     0.0     2.9     2.9 | Barry B | Barry B | mpip     Grain assemblage (%)     Shape of glass shards (%)       No.     GI     PI     Qtz     Mm     WeG     Fr     Ha     Hb     Ca     Cb     Ta     Tb     F     Ots     Bt       7     81.3     2.6     15.2     0.4     0.0     0.4     0.0     1.0     21.9     1.0     38.1     38.1     0.0     0.0     0.0       8     87.7     1.8     6.4     1.4     2.7     0.0     5.5     8.2     45.5     10.9     8.2     9.1     2.7     10.0     0.0       9     84.4     1.4     6.9     0.5     6.4     0.5     6.6     14.2     30.2     15.1     7.5     8.5     3.8     14.2     0.0       6     78.3     5.2     10.0     0.4     5.7     0.4     0.0     0.0     2.8     30.3     5.9     13.4     2.5     15.1     0.0       6     78.3     5.2     10.0     0.4     0.0     0. | Barry B | mpip     Grain semilare (%)     Shape of glass shards (%)       No.     GI     Pl     Qtz     Mm     WeG     Fr     Ha     Hb     Ca     Cb     Ta     Tb     F     Ots     Bt     Hbl     oxHbl       7     81.3     2.6     15.2     0.4     0.0     0.0     1.0     21.9     1.0     38.1     38.1     0.0     0.0     0.0     2.8     0.0       8     87.7     1.8     6.4     1.4     2.7     0.0     5.5     8.2     45.5     10.9     8.2     9.1     2.7     10.0     0.0     1.0     2.0       8     87.7     1.8     6.4     1.4     2.7     0.0     5.5     8.2     45.5     10.9     8.2     9.1     2.7     10.0     0.0     10.0     0.0       6     78.3     5.2     10.0     0.4     5.7     0.4     0.0     0.0     2.8     3.3     5.9     13.4     2.5     15.1     0.0     0 | Big     Grain assemblage (%)     Shape of glass sharts (%)     M     M     M       No.     GI     PI     Qtz     Mm     WeG     Fr     Ha     Hb     Ca     Cb     Ta     Tb     F     Ots     Bt     Hb     ocd     D     38.1     38.1     0.0     0.0     2.8     0.0     0.5       8     87.7     1.8     6.4     1.4     2.7     0.0     5.5     8.2     45.5     10.9     8.2     9.1     2.7     10.0     0.0     1.0     1.0     38.1     38.1     0.0     0.0     2.8     0.0     1.2       9     84.4     1.4     6.9     0.5     6.4     0.0     0.0     32.8     30.3     5.9     13.4     2.5     15.1     0.0     4.1     0.0     5.7       8     8.1     1.7     0.4     0.0     0.0     3.8     3.3     5.9     13.4     2.5     15.1     0.0     4.1     0.0     5.7 | mptp     Grain assemblage (%)     Shape of glass sharts (%)     Main form     Main form       No.     GI     PI     Qtz     Mm     WeGi     Fr     Ha     Hb     Ca     Cb     Ta     Tb     F     Ots     Bt     Hb     oxHb     Cum     Opx       7     81.3     2.6     15.2     0.4     0.0     0.4     0.0     1.0     21.9     1.0     38.1     38.1     0.0 | Bit Matrix     Grain assemblage (%)     Shape of glass sharts (%)     Matrix minorial frame     Matrix minorial frame       No.     GI     PI     Qtz     Mm     WeG     Fr     Ha     Hb     Ca     Cb     Ta     Tb     F     Ots     Bt     Hb     out     Op     Cpx       7     81.3     2.6     15.2     0.4     0.0     0.4     0.0     1.0     2.19     1.0     38.1     38.1     0.0     0.0     2.8     0.0     0.5     6.4     7       8     87.7     1.8     6.4     1.4     2.7     0.0     5.5     8.2     45.5     10.9     8.5     3.8     14.2     0.0     9.8     0.0     1.2     3.7     0.0       6     78.3     5.2     10.0     6.4     5.7     0.4     0.0     0.0     3.8     3.3     5.9     13.4     2.5     15.1     0.0     4.1     0.0     5.7     3.4     9       5     8.48     1.7 | Main     Grain     service     Shape     Issue     Stape     Stape <t< td=""><td>mptp     Grain assemilate (%)     Shape of glass shards (%)     Mafe mining assemilate (%)     Mathematical membration (%)     Mathematical membratised (%)       8</td><td>mpi (si a)     Grai a)     Grai a)     Weight (si a)     Shape of glass sharts (%)     Main (si a)     Shape of glass shape of glass shape of glass shape of glass (si a)     Shape of glass shape of glass shape of glass (si a)     Shape of glass shape of glass (si a)     Shape of gla</td><td>Bit Propering Propering</td><td>Imple     Grai weight weight</td></t<> | mptp     Grain assemilate (%)     Shape of glass shards (%)     Mafe mining assemilate (%)     Mathematical membration (%)     Mathematical membratised (%)       8 | mpi (si a)     Grai a)     Grai a)     Weight (si a)     Shape of glass sharts (%)     Main (si a)     Shape of glass shape of glass shape of glass shape of glass (si a)     Shape of glass shape of glass shape of glass (si a)     Shape of glass shape of glass (si a)     Shape of gla | Bit Propering | Imple     Grai weight |

Shape of glass shards is based on Yoshikawa (1976) and Kurokawa (1999). Bt : Biotite, Hbl : Homblende, oxHbl : Oxy-homblende, Cum : Cummingtonite, Opx : Orthopyroxene, Cpx : Clinopyroxene, Grt : Garnet, Aln : Allanite, Zm : Zircon, Ap : Apatite, Opq : Opaque minerals, Crd : Cordierite

Table 4. Chemical compositions of volcanic glass shards. The results corrected by the method of Nagahashi et al. (2003).

Formation			Ozawa	Tuff				Numat	ta Tuff				1	Hirosega	segawa Tuff						
unit	Lower	part		Uppe	r part		Lower	part	Upper	part	Lower	part			Upper	part					
lithology	pum	ice	pum	ice	black p	umice	pisol	lite	pum	ice	sur	ze	pum	ice	pum	ice	pum	ice			
sample No.	1		2		3		4		5		6		7		8		9				
Oxide(wt.%)	mean	8	mean	8	mean	\$	mean	\$	mean	s	mean	s	mean	s	mean	s	mean	s			
SiO2	75.61	0.35	75.19	0.61	74.95	0.45	76.96	0.27	77.20	0.67	76.80	0.27	76.34	0.55	76.64	0.23	76.70	0.31			
TiO2	0.22	0.07	0.26	0.12	0.24	0.12	0.11	0.10	0.11	0.07	0.16	0.08	0.12	0.08	0.12	0.08	0.12	0.05			
Al2O3	13.03	0.18	13.30	0.31	13.20	0.08	12.67	0.17	12.84	0.47	12.97	0.18	13.10	0.37	12.92	0.09	12.99	0.07			
FeO*	2.96	0.20	2.99	0.09	2.68	0.20	1.38	0.21	1.47	0.16	1.25	0.20	1.57	0.23	1.11	0.18	1.23	0.20			
MnO	0.16	0.14	0.06	0.08	0.08	0.11	0.07	0.11	0.05	0.08	0.06	0.12	0.12	0.16	0.02	0.08	0.00	0.07			
MgO	0.31	0.12	0.33	0.07	0.28	0.08	0.13	0.02	0.21	0.09	0.14	0.03	0.22	0.07	0.13	0.02	0.16	0.05			
CaO	2.33	0.12	2.47	0.15	2.42	0.17	0.89	0.24	1.32	0.20	0.82	0.17	1.64	0.16	0.62	0.05	0.76	0.34			
Na2O	3.69	0.45	3.53	0.45	4.48	0.13	4.22	0.34	4.66	0.21	3.97	0.31	4.73	0.29	4.43	0.24	4.41	0.53			
K2O	1.69 0.19 1.87 0.17 1.66				0.05	3.57	0.24	2.15	0.12	3.83	0.21	2.17	0.17	4.00	0.18	3.65	0.68				
100% normal	ized on wa	ater free	, FeO*: to	tal iron	as FeO																

名取川ルートの町南,本砂金川ルートの本砂金,太郎川ルートの天神および柳生川,北川ルート①の大久保,北川ルート②の内木戸に分布する(Fig. 6).層厚は少なくとも70m以上と見積もられる(Fig. 4).

名取川ルートでは、塊状無層理で灰色の粗粒砂サイズ以 下のガラス質結晶火山灰からなる基質中に,径5~10cm程 度の軽石が散在する. 基質部には一部弱い斜交葉理が見ら れる. 軽石は白色と灰色のものがほぼ同じ割合で含まれる. 本砂金川ルートでは塊状無層理で,灰白色 - 灰色の中粒砂 サイズ以下のガラス質火山灰からなる基質中に径 10 cm 程 度の軽石が散在する. また, 一辺 10 ~ 50 cm の塑性変形 をうけたシルトブロックが散在する. 天神前シルト岩部層 との境界付近では軽石をほとんど含まず,極細粒 - 細粒砂 サイズの淘汰の良いガラス質火山灰が主体となる. ここで は一辺 20 cm 程度の塑性変形を受けたシルトブロックをわ ずかに含む.太郎川ルートでは,塊状無層理で灰白色~灰 色の中粒砂サイズ以下のガラス質結晶火山灰からなる基質 中に最大で 30 cm 程度の軽石を含む. 軽石は白色と灰色の ものからなり、わずかながら黒色の軽石が含まれる.また、 一部で径 0.5 ~数 m の軽石濃集ブロックと,一辺 10 ~ 80 cmの塑性変形をうけたシルトブロックが散在する.シル トブロック量は下部で多くなる.北川ルート①では、灰白 色 - 灰色の中粒砂サイズ以下のガラス質火山灰からなる基 質中に径 10 ~ 20 cm 程度の軽石や径 0.5 ~数 m の軽石濃 集ブロックが散在する. 軽石は白色と黒色のものからなり, やや後者が多い. 北川ルート②では灰白色 - 灰色の細粒砂

サイズ以下のガラス質火山灰からなる基質中に径 0.5 ~数 mの軽石濃集ブロックが散在する. これは径 5 cm ~数 10 cmの白色と黒色の軽石が濃集したもので、ほぼ球状を呈す る. その周囲には、外殻状にシルトサイズのガラス質火山 灰が厚さ2~10 cm で取り巻く(Fig.7-a). 濃集する軽石 には黒色繊維状のものが多い. また, 基質中には一辺 10~ 30 cm の塑性変形を受けたシルトブロックが散在する.北 川ルート②では、上記の軽石濃集ブロックが散在する凝灰 岩中に層厚0.5~2mの細粒~中粒サイズの砂層を挟在す る. 軽石濃集ブロックが散在する凝灰岩の上位は, 塊状無 層理で灰白色の粗粒砂サイズ以下のガラス質結晶火山灰か らなる基質中に径 3cm 程度の白色軽石が散在する軽石質凝 灰岩からなる. この岩相は北川ルート②の火道凝灰岩(後述) 分布域から東部 200 m の範囲でみられる. さらにこの凝灰 岩と軽石濃集ブロックが散在する凝灰岩との境界部付近に は、一辺数10mの、シルト〜細粒砂サイズのガラス質結晶 火山灰で構成されるブロックが含まれる.

柳生川凝灰岩部層から採取した軽石の全粒子組成は、火 山ガラスを主とし、斜長石(2~7%)と高温型石英(0.5 ~4.5%)を含む、火山ガラスには Ca型・Ta型が多い、重 鉱物は直方(斜方)輝石を主とし(42~75%),不透明鉱 物(20~40%)と単斜輝石(2~19%)を含む、また、菫 青石を1~10%程度と、普通角閃石・燐灰石・ジルコン をわずかに含む(Table 1)、火山ガラス組成は軽石の色の 違いによらず SiO2量に富み、Low-K 領域におちる(Fig. 8、Table 2)、SiO2量は名取川ルートの試料1で77.0~



Fig.6. Lithofacies and structure of main river routes. Legend is same as shown in Fig.4.

78.0wt.%,本砂金川ルートの試料10で73.0~77.0wt.%,太郎川ルートの試料16で75.1~75.8wt.%,北川ルート①の試料18で75.9~77.0wt.%,北川ルート②の試料19で75.9~76.8wt.%である.

**天神前シルト岩部層**本部層は調査地域の南北方向に分布 し、中央部では断層に挟まれた地域に、北部では東西に広 く分布する(Fig. 4). 各ルートでは名取川ルートの野口、本 砂金川ルートの本砂金、太郎川ルートの天神前付近、北川 ルート①の大久保,北川ルート②の内木戸に分布する(Fig. 6). 層厚は 50 m 程度と見積られる(Fig. 4).

本部層は名取川ルートで大きく2つの層相に分かれる. 下部は暗灰色の中粒 - 粗粒砂サイズのガラス質結晶火山灰 と砂からなる基質中に黒色軽石が散在し,平行葉理と弱い 斜交葉理が発達する.軽石は径3~5 cm 程度でよく円磨さ れている.上部は灰色~灰白色で,中粒~粗粒砂サイズの ガラス質結晶火山灰と砂からなる基質中に白色軽石が散在



Fig.7. Photographs of lithofacies of the Tenjin Formation and Fukano Formation.

し, 平行葉理と弱い斜交葉理が発達する. 上部の基底には 平行葉理の発達したシルトを伴う. 軽石は最大径 10 cm 程 度で円磨されている. この地域では全体的に NW-SE 走向で 緩く西に傾斜する.本砂金川ルートでは3つの層相に区別 され,下部はシルト - 極細粒砂サイズのガラス質火山灰を 主とし, 平行葉理が発達する. また, 径 20 cm 程度の軽石 の濃集層を挟む. 中部は暗灰色で細粒~中粒砂サイズの結 晶ガラス質火山灰と砂を主として, 平行または斜交葉理が 発達し, 径 2 cm 程度の黒色軽石が散在もしくは一部層状に 挟む. 上部は中粒砂サイズの結晶ガラス質火山灰からなる 基質中に径1~3 cm 程度の黒色軽石が散在し, 弱い斜交 葉理が見られる. この地域では全体的に NE-SW 走向で西に 緩く傾斜する.太郎川ルートではシルトと極細粒 - 中粒砂 サイズのガラス質結晶火山灰と砂から構成され、平行葉理 や低角の斜交葉理が発達し,径 0.5~1 cm 程度の軽石を含 む. ここではほぼ N-S 走向で西に緩く傾斜する. 北川ルー ト①では主にシルトや極細粒 - 中粒砂サイズのガラス質結 晶火山灰と砂から構成され,平行もしくは斜交葉理が発達

し, 径 5 cm 程度の軽石や火山豆石を含む層を挟むこともある. ここでの本部層は柳生川凝灰岩部層に対して低角度の 侵食面で接する. 全体的に NE-SW 走向で西に緩く傾斜する. 北川ルート②では主にシルトと極細粒 - 中粒砂から構成され, 斜交葉理が発達する.

天神前シルト岩部層から採取した軽石の全粒子組成は火 山ガラスを主とし、風化ガラス(1~20%)、斜長石(1~ 10%)と少量の石英を含む.火山ガラスはTa型が多い.重 鉱物は直方(斜方)輝石(22~42%)と不透明鉱物(16 ~56%)を主とし、菫青石(12~33%)と単斜輝石(6~ 14%)を含む.また、普通角閃石・燐灰石・ジルコンをわ ずかに含む(Table 1).火山ガラスの組成は、SiO2量が柳生 川凝灰岩部層に比べて全体的に低いLow-K領域にプロット される(Fig. 8, Table 2).SiO2量は天神前シルト岩部層に おける下部の名取川ルートの試料 2 で 62.0~67.3wt%、中 部の本砂金川ルートの試料 11 で 63.5~69.2wt.%、上部の 名取川ルートの試料 3 で 70.1~72.3wt.% である.



Fig.8. SiO<sub>2</sub> - K<sub>2</sub>O diagram of volcanic glass shards containing Tenjin Formation and Fukano Formation.

## (2) 深野層(再定義)

本層は、天野(1980)の深野層の一部に相当し、秋保町 竹林 - 川崎町山崎に分布する凝灰岩からなる.本層は深野 カルデラを埋積する非溶結の火砕流堆積物からなり、岩相 層序から下部の上ノ原凝灰岩部層・中部の新田軽石凝灰岩 部層・上部の滝原凝灰岩部層・最上部の森安軽石凝灰岩部 層に区分される(Figs. 4, 5).模式地は名取川ルート(Fig. 6) とする.

上ノ原凝灰岩部層 本部層は調査地北西部,名取川ルート の竹林 - 上ノ原と本砂金川ルートの山崎に主に分布する (Figs. 4, 6). 層厚は少なくとも 20 m 程度と見積もられる (Fig. 4). 名取川および本砂金川では,塊状無層理で灰白色 の中粒砂サイズ以下のガラス質結晶火山灰からなる基質中 に,径1~2 cm の火山豆石が散在する.基底は不明である が,上位の新田軽石凝灰岩部層との境界は明瞭である.本 砂金ルートにおいて上位の新田軽石凝灰岩部層との境界付 近に砕屑岩脈が見られる.名取川ルートでは NE-SW 走向で 西に傾斜する.本砂金川では NW-SE 走向で南西に傾斜する.

本部層から採取した火山豆石の全粒子組成は火山ガラス を主とし、斜長石(2~10%)と少量の石英を含む.火山 ガラスは Ca・Cb 型を主とする.また、形状区分では分類 されないその他の形状を示す火山ガラスが17~19%と多 い.重鉱物は不透明鉱物を主とし(52~75%),直方(斜方) 輝石(10~30%)と普通角閃石(7~13%),そして少量 の単斜輝石・ざくろ石・燐灰石・ジルコンを含む(Table 1). 火山ガラス組成はまとまりよく Medium-K 領域の低 K<sub>2</sub>O 側 にプロットされる(Fig. 8, Table 2).SiO<sub>2</sub>量は、名取川ルー トの試料 4 で 76.0~77.1wt.%、本砂金川ルートの試料 12 で 75.9~77.8wt.% である.

**新田軽石凝灰岩部層**本部層は調査地北西部,名取川ルートの上ノ原 - 新田,本砂金川ルートの山崎に主に分布する (Figs. 4, 6).層厚は 20 m 程度と見積もられる(Fig. 4).塊 状無層理で灰白色の中粒砂サイズ以下のガラス質結晶火山 灰からなる基質中に径3~5 cm 程度(最大径20 cm)の 軽石が散在する. 軽石は繊維状に発泡し,内部に径2~5 mmの石英を含む.名取川ルートの本部層の基底部付近に は,径2~5 cmの異質礫が厚さ約20 cmの範囲に濃集する. 更にその上位厚さ1.5 mの範囲は極細粒 - 中粒砂サイズの ガラス質結晶火山灰とシルトからなり平行葉理が発達する. 内部には厚さ5 cm 程度で層状に火山豆石が濃集する.本部 層は全体的に NE-SW 走向で西に傾斜する.

軽石の全粒子組成は、火山ガラスを主とし、風化ガラス(2~5%)、斜長石(1~3%)と石英(2~3%)を含む.火山ガラスにはTa・Tb型が多い.重鉱物は不透明鉱物を主とし(54~95%)、直方(斜方)輝石(2~26%)、普通角閃石(2~8%)、そして少量の単斜輝石・ジルコンを含む(Table 1).名取川ルートの試料5は董青石を5%程度含む(Table 1).火山ガラス組成は、Medium-K領域の低K<sub>2</sub>O側にプロットされる(Fig. 8、Table 2).SiO<sub>2</sub>量は、名取川ルートの試料13で76.0~77.0wt.%である.

**滝原凝灰岩部層**本部層は調査地域北西部の名取川ルート の滝原,本砂金川ルートの山崎に分布し(Figs.4,6),層厚 は 30 m 程度と見積もられる(Figs.4,6).塊状無層理で灰 白色の中粒砂サイズ以下のガラス質結晶火山灰からなる基 質中に,径1~2 cm 程度の火山豆石が散在する.火山豆石 の含有量は少ない.NE-SW 走向で,緩く西に傾斜する.本 部層の基底部には,層厚 50 cmの成層したシルトを挟在す る.

全粒子組成は、火山ガラスを主とするものの、風化ガラ スをやや多く含む(14%)、火山ガラスの形状はその他が最 も多い(38%)、重鉱物は不透明鉱物と直方(斜方)輝石を 主とし、普通角閃石・単斜輝石・ジルコン・燐灰石を含む、 火山ガラス組成は SiO<sub>2</sub> 量 76.5 ~ 77.3wt.% で、Medium-K 領域の低 K<sub>2</sub>O 側にプロットされる (Fig. 8, Table 2).

森安軽石凝灰岩部層 本部層は,調査地域北西部の名取川 ルートの森安,本砂金川ルートの山崎に分布する.層厚は 最大で 50m 程度と見積もられる(Figs. 4, 6).塊状無層理で 灰白色~白色の軽石質凝灰岩で,基質部は細粒分が乏しい. 軽石は最大径 10 cm 程度で,繊維状に発泡する.基底部付 近には斜交葉理と砕屑岩脈が発達する.

本部層の軽石の粒子組成は火山ガラスを主とし、石英(3~4%)と斜長石(3~5%)を含む、火山ガラスにはTa・Tb型が多い、重鉱物は直方(斜方)輝石(8~50%)と不透明鉱物(41~86%)を主とし、単斜輝石(8%)を含む、また、菫青石(1%程度)と黒雲母・普通角閃石・ジルコンをわずかに含む(Table 1)、火山ガラスのSiO2量は、名取 川ルートの試料7で76.2~77.1wt%で、Medium-K領域の低K<sub>2</sub>O側にプロットされる(Fig. 8, Table2)、一方、本砂金川ルートの試料14は76.2~77.0wt.%で、Medium-K領域の高K<sub>2</sub>O側からHigh-K領域にある(Fig. 8, Table2).

## (3) 火道凝灰岩

多くのカルデラにおいて陥没した火砕流堆積物とその 基盤とを境するカルデラ壁(断層)に沿って,幅数十m から数百mに及ぶ貫入性火砕岩岩脈が認められている (Reynolds, 1954, 1956;吉田, 1970;Almond, 1971;Ekren and Bryers, 1976;Oftedahl, 1978;Yoshida, 1984等). 今 回,これらの貫入性火砕岩岩脈に対比できる岩相が,天神 層と深野層の西縁に南北に細長く分布することを確認でき た.それらの貫入性火砕岩岩脈は,大部分が凝灰岩質であっ たので,ここでは「火道凝灰岩(tuff vents)」と呼ぶことと する.

# 天神カルデラの火道凝灰岩

天神カルデラの西縁にあたる太郎川ルート柳生川では, 基盤の作並層シルト岩と西側に緩く傾斜する柳生川凝灰岩 部層との間の内側傾斜の断層(カルデラ壁)に沿い幅約 150 m にわたり,柳生川凝灰岩部層の構造を切って,岩脈 状に凝灰岩が分布している.この凝灰岩の灰色部と黄灰色 部が示す縞状の構造は断層に平行であり,このうちの黄灰 色部は,灰色部を切ると共に,スランピング褶曲した灰色 部からなるブロックのマトリクスを構成している.従って, この部分は,数次繰り返し深部からカルデラ壁(断層面) に沿って上昇してきた火砕物が火道部(カルデラ壁)で固 結して形成された「火道凝灰岩(tuff vent)」であると判断 した.火道凝灰岩部分と柳生川凝灰岩部層との境界部では, 後者が上方に引きずられているが,これは火道内部に見ら れるスランピングとともに,柳生川凝灰岩部層側がカルデ ラ壁に沿って陥没したことを示している.(Fig.7-b).

一方, 天神カルデラの東壁にあたる本砂金ルートの本砂 金においては, 下盤側の湯元層と塊状無層理の柳生川凝灰 岩部層が,ほぼ垂直の断層で境されている(Fig.4).ここでの断層の落差は50m以上と推定される.この垂直に延びる断層の西側幅70mにわたって色調と細かい粒度の違いによる縞状の構造を有する凝灰岩質岩(Fig.6)が分布するが,西側に分布する塊状無層理の柳生川凝灰岩部層との境界はシャープで,その縞状構造は断層に平行に発達している.従って,これについても柳生川凝灰岩部層の噴出に伴って生じたカルデラ壁(断層)に沿って,深部からパルス状に何度もカルデラ壁に沿って上昇貫入してきた「火道凝灰岩」であると判断した.

他にも、同様の凝灰岩が本砂金川ルートの山崎で幅約 300 m,北川ルート②の清水で幅約20 mにわたって分布す る(Fig. 6).本砂金川ルートの山崎に認められる火道凝灰 岩は、極細粒~中粒砂サイズのガラス質火山灰とシルトサ イズ火山灰が縞状に互層をなし、径0.2~1 cm 程度の軽石 が散在する(Fig. 7-c).各縞の幅は2~5 cm,最大でも20 cm 程度である.各縞内部での粒度は比較的揃っており、こ こでは NE-SW 走向で東に60~80 度傾斜している.カルデ ラ壁西側に分布する火道凝灰岩に発達する縞状構造の傾斜 方向は一定しないが、全体に東傾斜が多い.太郎川ルート の柳生川では極細粒~中粒砂サイズのガラス質火山灰とシ ルトサイズ火山灰の縞状を呈する.北川ルート②では細粒 ・粗粒砂サイズのガラス質結晶火山灰と径5~30 cm 程度 の礫の層が縞状をなし、ここでも50 度程度で東に傾斜している.

火道凝灰岩から採取した軽石の全粒子組成は,火山ガラ スを主とし,風化ガラス(4~16%),斜長石(1~3%) と少量の石英を含む.火山ガラスにはCa型・Ta型が多いが, 概して火砕流堆積物に比較して,火山ガラスの破砕が進ん でいる.重鉱物は不透明鉱物を主とし(24~56%),直方 (斜方)輝石(27~34%),董青石(2~29%),単斜輝石 (3~20%),そして普通角閃石・カミングトン閃石・燐灰 石・ジルコンをわずかに含む(Table 1).火山ガラス組成は SiO<sub>2</sub>量にやや幅があるがLow-K領域にプロットされ(Fig. 8, Table 2),柳生川凝灰岩部層と一致する.SiO<sub>2</sub>量は,本砂 金川ルートの試料9で76.4~77.5wt.%,試料14で65.9~ 71.5wt.%,太郎川ルートの試料17で72.6~77.4wt.%であ る.

#### 深野カルデラの火道凝灰岩

深野カルデラの形成に関与したと思われる火道凝灰岩は, 調査地域北西部,名取川ルートの滝原で,森安軽石凝灰岩 部層と作並層を境する断層に沿って幅約 50m にわたり分布 し,70度程度で西に傾斜する(Figs. 4, 6).径5 cm 程度の 破砕された軽石と中粒砂サイズのガラス質火山灰およびシ ルトサイズ火山灰が縞状を呈し,各縞の厚さは最大でも 0.5 ~1m程度である.各縞の内部での粒度は比較的揃ってい る(Fig. 7-d).軽石を主とする縞では,基質部の細粒分が欠 如するとともに、各軽石間の境界が不明瞭になっている.

軽石の全粒子組成は、火山ガラスを主とし、石英(15%) と風化ガラス(9%)と斜長石(7%)を含む、火山ガラスに はチューブ状のTb型を欠き、Ca型・Ta型が多い、重鉱物は、 直方(斜方)輝石を主とし(54%)、不透明鉱物(23%)と 単斜輝石(19%)を含む、また、菫青石を2%程度と普通角 閃石とカミングトン閃石をわずかに含む(Table 1).名取川 ルートの試料8の火山ガラスはSiO2量76.5~77.3wt.%で Medium-K領域にプロットされる(Fig.8, Table 2).

#### (4) カルデラ周辺に分布する火砕流堆積物の記載

小沢凝灰岩 小沢凝灰岩(北村, 1986b)は天神カルデラの 南東に分布する(Fig. 1).村田ダム周辺に分布する本層は, 下部の塊状無層理の軽石質凝灰岩から上部の軽石濃集ブ ロックを含む凝灰岩へと岩相変化している.ここでは,軽 石質凝灰岩を小沢凝灰岩下部とし軽石濃集ブロックを含む 凝灰岩を小沢凝灰岩下部とし軽石濃集ブロックを含む 凝灰岩を小沢凝灰岩上部として記載する.小沢凝灰岩下部 は村田ダムに流入する荒川河床に分布する.塊状無層理で, 灰色の細粒砂サイズ以下のガラス質結晶火山灰からなる基 質中に径3~5 cmの軽石が散在する.小沢凝灰岩上部は塊 状無層理で,灰色~灰白色の非溶結の軽石質凝灰岩であり, 細粒砂サイズ以下のガラス質火山灰からなる基質中に軽石 の濃集した径数10 cm ~数 m の球状ブロックが散在する. 同様の岩相が北川ルート②の柳生川凝灰岩部層においても 認められる.

小沢凝灰岩下部から採取した軽石の全粒子組成は火山ガ ラスを主とし、風化ガラス(11%)、石英(4%)と斜長石 (4%)を含む.火山ガラスには扁平型と中間型が多い.重 鉱物は直方(斜方)輝石を主とし(41%)、不透明鉱物(26%)、 単斜輝石(23%)、普通角閃石(9%)、そして少量の酸化 角閃石を含む(Table 3).火山ガラスのSiO2量は75.2~ 76.0wt.%でMedium-KとLow-Kの境界付近にプロットされ る (Fig. 9, Table 4). 小沢凝灰岩上部の軽石濃集ブロック から採取した軽石の全粒子組成は火山ガラスを主とし,風 化ガラス (0~3%) と斜長石 (0~1%) を含む.火山ガ ラスには Ca型・Ta型が多い. 重鉱物は直方(斜方)輝石 を主とし(42~82%),不透明鉱物(12~33%),董青石(3 ~17%),単斜輝石(1~3%),そして少量の普通角閃石と カミングトン閃石を含む(Table3).火山ガラスの SiO<sub>2</sub>量は, 試料 2 と 3 で 74.1~76.7wt.% で, Medium-K と Low-K の 境界付近にプロットされる(Fig. 9, Table4).

**沼田凝灰岩** 沼田凝灰岩(北村, 1986b)は天神カルデラの 南東に広く分布し(Fig. 1),小沢凝灰岩を覆う.村田町周 辺では,層厚が10~80mと最も厚く,そこから南方へと 層厚が薄くなる.沼田凝灰岩下部は,細粒砂サイズ以下の ガラス質結晶火山灰からなる基質中に火山豆石が散在する 凝灰岩からなる.その上位は塊状無層理で,灰白色非溶結 の軽石質凝灰岩で,粗粒砂サイズ以下のガラス質結晶火山 灰の基質中に径 5mm 程度の石英を含む軽石が散在する.

沼田凝灰岩の火山豆石と軽石の全粒子組成は、火山ガラ スを主とし、石英(3~13%)、斜長石(2~8%)と風化 ガラス(0.4~7%)を含む、火山ガラスにはCb型・Tb型 が多い、重鉱物組成は不透明鉱物を主とし(35~38%)、 普通角閃石(29~37%)、直方(斜方)輝石(16~26%)、 ジルコン(2~7%)、そして少量の酸化角閃石・カミング トン閃石・燐灰石を含む(Table 3)、火山ガラスのSiO2量は、 火山豆石(試料 4)では76.5~77.1wt.%で、Medium-Kと High-Kの境界付近にプロットされる、軽石(試料 5)では 75.5~77.9wt.%で Medium-K領域にプロットされる(Fig.9, Table 4).

広瀬川凝灰岩部層 仙台層群向山層の広瀬川凝灰岩部層(北 村,1986a;北村ほか,1986)は天神・深野カルデラの東 方に分布する(Fig.1).層厚は7~8mで,模式地の仙台 市向山北方広瀬川ではサージ部(宮本ほか,2013)から火



Fig.9. SiO<sub>2</sub> - K<sub>2</sub>O diagram of volcanic glass shards containing Ozawa tuff, Numata tuff and Hirosegawa tuff.

砕流本体部までが観察される.サージ部は層厚 50 ~ 70 cm で、シルト~極細粒砂サイズのガラス質結晶火山灰からな り、軽石や火山豆石が散在する(北村ほか、1986).火砕流 本体部は塊状無層理で、灰白色、非溶結の軽石質凝灰岩で、 ガラス質結晶火山灰からなる基質中に径 5 mm 程度の石英 を含む軽石が散在する.

サージ部から採取した火山灰(試料6)の全粒子組成は火 山ガラスを主とし、石英(10%)、風化ガラス(6%)と斜長 石(5%)を含む、火山ガラスには中間型が多い、重鉱物は 不透明鉱物を主とし(63%),ジルコン(17%),カミングト ン閃石(6%),そして少量の普通角閃石・単斜輝石・直方(斜 方)輝石・燐灰石を含む(Table 3).サージ部の火山ガラス (試料6)のSiO2量は、76.4~77.1wt.%でMedium-Kと High-Kの境界付近にプロットされる(Fig. 9, Table 4).火 砕流本体部から採取した軽石の全粒子組成は火山ガラスを 主とし,石英(6~15%),風化ガラス(0~6%)と斜長石(1 ~ 3%)を含む.火山ガラスの形状は試料7では多孔質型, 試料8と9では中間型が主である. 重鉱物は不透明鉱物を 主とし(24~77%),直方(斜方)輝石(4~64%),普通 角閃石 (3~10%), そして少量のジルコン・燐灰石・単斜 輝石・カミングトン閃石を含む(Table 3).火山ガラスの SiO<sub>2</sub>量は75.0~77.3wt.%であり、試料7はMedium-K領 域に、 試料 8 は High-K 領域に、 そして 試料 9 は K<sub>2</sub>O 量 2.0 ~ 4.1wt.% で Medium-K から High-K 領域にプロットされる (Fig. 9, Table 4).

高嶋ほか(2018)は、みやぎ台・朴木山地域に分布する 向山層中において、追跡可能な凝灰岩層として下部から上 部へ MkMy-1,2,3の三層を識別し、MkMy-1を広瀬川凝灰 岩部層に対比している.ただし、それらの重鉱物組み合せ には若干の差異が認められ、より詳細な検討が必要である と述べている.その後、草川・高嶋(2023)は、向山層(3.7 ~3.5 Ma)の凝灰岩に含まれる重鉱物の組み合せとアパタ イトの微量元素組成を検討し、向山層には広瀬川凝灰岩を 含む広域に追跡可能な凝灰岩が6層準あることを見い出し ている.

# 4. フィッション・トラック年代

調査地域の柳生川凝灰岩部層および新田軽石凝灰岩部層 と遠刈田層・小沢凝灰岩・沼田凝灰岩から9試料を採取 し、ジルコンによるフィッション・トラック年代測定を 行った. 試料は凝灰岩中から軽石片を取り出せるものは軽 石のみを用い、それ以外は基質と軽石を混ぜたものを用い た. 測定手法はジアリルフタレート板を誘導トラックの検 出材とした外部ディテクター法を採用し、測定にはゼータ 較正法(Hurford, 1990a, b)により年代値の標準化を行った (Danhara et al., 2003). 測定結果を Table 5 に示す.

天神層柳生川凝灰岩部層基底部付近(試料番号:MO1) 採

取位置は宮城県柴田郡川崎町柳生川(太郎川ルート),北緯 38°12′55″,東経140°36′44″である.本試料からは軽石 のみを取り出すことが困難なため,基質部を含めた試料を 測定試料とした.ジルコン含有量は少なく,少なくとも2 種類の年代粒子が混入している.このうち自発FT密度の低 いものを測定した.30粒子の測定データのまとまりは悪く,  $\chi^2$ 検定で失格する. $\chi^2$ 値の大きいものから順に除外し,  $\chi^2$ 検定に合格するところで残された粒子を同一の年代集 団とみなし年代を算出し,5.1 ± 0.4 Maの値が得られた.

**天神層柳生川凝灰岩部層(試料番号:MO2)** 採取位置は宮 城県柴田郡川崎町内木戸(北川ルート),北緯38°11′19″, 東経140°37′19″である.軽石中に含まれるジルコンは少 なく,抽出された結晶のうち60%は外来結晶と判断された. 従って,残りの自形結晶を対象に測定を行った.データに ばらつきがみられるものの, X<sup>2</sup>検定では合格する.測定 粒子全てを同一年代集団に属するとみなし年代値を算出し, 5.3±0.5 Maの値が得られた.

**天神層柳生川凝灰岩部層(試料番号:MO3)** 採取位置は宮 城県柴田郡川崎町柳生川(太郎川ルート),北緯 38°12′22″, 東経140°37′45″である. 軽石に含まれるジルコンは少な く,かつ外来結晶が多いので,本質結晶を十分確保するた めに10kg以上の試料処理を行った. 得られたジルコンは 20%が自形結晶で80%が褐色を呈する磨耗した結晶であっ た.本質結晶の可能性の高い20%の自形結晶を用い,92粒 子を測定した.しかし測定データのまとまりは悪く, X<sup>2</sup>検 定で失格する. X<sup>2</sup>値の大きい順に25粒子を除外したとこ ろで X<sup>2</sup>検定に合格した.残された粒子を同一の年代集団 とみなし,年代を算出し,5.4 ± 0.2 Maの値が得られた.

**火道凝灰岩(試料番号:MO4)**採取位置は宮城県柴田郡川 崎町柳生川(太郎川ルート),北緯 38°12′56″,東経 140° 36′44″である.抽出したジルコンは自発 FT 密度から、少 なくとも3種類の年代グループが混在するものと判断され、 最も自発 FT 密度の低いグループを測定対象とした.測定 データのまとまりは悪く、 $\chi^2$ 検定で失格する. $\chi^2$ 値の大 きい順に除外し、 $\chi^2$ 検定に合格するところで残された粒子 を同一の年代集団とみなし年代を算出し、3.5±0.3 Maの 値が得られた.

**新田軽石凝灰岩部層(試料番号:TA1)** 採取位置は仙台市 太白区秋保町馬場深野(名取川ルート),北緯38°16′01″, 東経140°37′34″である.軽石中に含まれるジルコンの 35%は外来と判断され,残りを測定した.データのまとま りは悪く,著しく古い年代粒子が混入しχ<sup>2</sup>検定で失格する. χ<sup>2</sup>値の大きいものを順に除外し、χ<sup>2</sup>検定に合格するとこ ろで,残された粒子を同一の年代集団とみなし年代を算出 し, 6.3 ± 0.8 Maの値が得られた.

遠刈田層(試料番号:TO1) 採取位置は宮城県柴田郡川崎 町湯坪(立野川),北緯38°10′52″,東経140°36′16″である. 塊状無層理で灰白色〜緑灰色の細粒〜粗粒砂サイズの火山

	Number	Sp	ontaneou	15		Induced		Dosim	ieter					
Sample	ofgrain	p (cm	s 1 <sup>-2</sup> )	$N_s$	p (cm	i 1 <sup>-2</sup> )	$N_i$	$\rho_d$ (×10 <sup>4</sup> cm <sup>-2</sup> )	$N_d$	r	Pr(χ2) (%)	U (ppm)	Age±1 c (Ma)	2
TA 1 (Takebayashi F. Nitta pumice tuff M.)	) 25	2.44	$ imes 10^{-5}$	76	1.19	$\times 10^{-6}$	370	8.706	4457	0.808	48	110	6.3 ±	0.8
TA 1 (All grains)	30	6.66	$ imes 10^{-5}$	237	1.53	$ imes 10^{-6}$	546	8.706	4457	0.419	0	150	13.2 ±	1.1
MO 4 (Tenjin caldera tuff vent)	29	3.06	$ imes 10^{-5}$	138	2.62	$ imes 10^{-6}$	1183	8.582	4394	0.845	36	250	3.5 ±	0.3
MO 4 (All grains)	30	3.16	$ imes 10^{-5}$	146	2.58	$ imes 10^{-6}$	1193	8.582	4394	0.767	0	250	3.7 ±	0.3
MO 3 (Tenjin F. Yagyugawa tuff M.)	67	6.92	×10 5	774	3.4	$ imes 10^{-6}$	3800	7.603	3893	0.837	19	420	5.4 ±	0.2
MO 3 (All grains)	92	1.11	$ imes 10^{-5}$	1750	3.12	$ imes 10^{-6}$	4901	7.603	3893	0.214	0	390	9.4 ±	0.3
MO 2 (Tenjin F. Yagyugawa tuff M.)	29	3.49	×10 5	142	1.99	$ imes 10^{-6}$	807	8.618	4412	0.861	71	190	5.3 ±	0.5
MO 2 (All grains)	30	3.62	$ imes 10^{-5}$	149	1.97	$ imes 10^{-6}$	812	8.618	4412	0.746	8	190	5.5 ±	0.5
MO 1 (Tenjin F. Yagyugawa tuff M. base)	28	4.69	×10 5	186	2.77	$ imes 10^{-6}$	1098	8.600	4403	0.787	22	270	5.1 ±	0.4
MO 1 (All grains)	30	5.39	$ imes 10^{-5}$	223	2.85	$ imes 10^{-6}$	1178	8.600	4403	0.725	0	280	5.7 ±	0.4
NM 1 (Numata Tuff)	30	1.08	$ imes 10^{-5}$	107	7.24	$ imes 10^{-5}$	719	8.688	4448	0.380	52	70	4.5 ±	0.5
OZ 1 (Ozawa Tuff)	24	7.85	$ imes 10^{-5}$	234	2.65	$ imes 10^{-6}$	791	8.670	4439	0.954	23	250	9.0 ±	0.7
OZ 1 (All grains)	25	8.27	$ imes 10^{-5}$	248	2.65	$ imes 10^{-7}$	795	8.670	4439	0.606	0	250	9.5 ±	0.7
TO 2 (Togatta F.)	30	8.49	$ imes 10^{-5}$	779	2.09	$ imes 10^{-6}$	1918	8.653	4430	0.776	54	200	$12.3 \pm$	0.6
TO 1 (Togatta F.)	30	4.37	$ imes 10^{-5}$	334	1.05	$ imes 10^{-6}$	799	8.635	4421	0.971	52	100	12.6 ±	0.9
(1) All analyses by internal detector method us	sing ED2.													

Table 5. Results of fission track dating on zircon from tuffs.

(2) p and N are density and total number of fission tracks counted, respectively. (3) r is correlation coefficient ps and pi.

(4)  $Pr(\chi 2)$  is the upper  $\chi 2$  tail probability corresponding to the observed  $\chi 2$ -statistics (Galbraith, 1981) (5) U is uranium content.

(6) Age calculated using dosimeter glass NIST-SRM612 and  $\zeta_{ED2} = 350\pm3$  (Danhara et al., 2003)

(7) the total decay rate for 238U:  $\lambda D = 1.55125 \times 10^{-10} \text{ yr}^{-1}$ 

(8) age:  $T = (1/\lambda_D) \cdot ln[1+\lambda_D \cdot \zeta \cdot (\rho_s/\rho_i) \cdot \rho_d]$ 

(9) error:  $\sigma_T = T \times [1/\Sigma N_s + 1/\Sigma N_i + 1/\Sigma N_d + (\sigma_c/\zeta)^2]^{1/2}$ 

灰からなる基質中に径 20 cm 程度の軽石が散在する.本試 料は軽石中に純度の高い淡桃色の自形ジルコンを豊富に含 み,良好な FT 年代測定試料と判断される.データのまとま りは良く、測定した全粒子が同一年代集団に属すると判断 され, 12.6 ± 0.9 Ma の値が得られた.

遠川田層(試料番号:TO2) 採取位置は宮城県柴田郡川崎 町前川の林道内,北緯38°10′34″,東経140°36′14″である. 白色~灰白色の砂と火山灰からなる基質中に径 10 ~ 20 cm 程度の軽石が散在する. 基質部には平行葉理や斜交葉理が 発達する. 軽石から抽出されたジルコンは極めて均質な赤 色の自形を示し,良好な FT 年代測定試料と判断される.デー タのまとまりは良く,測定した全粒子が同一年代集団に属 すると判断され, 12.3 ± 0.6 Ma の値が得られた.本試料は TO1 と同一地層とみなされるが、ジルコンのウラン濃度に 約2倍の差がみられ,結晶の色調もTO1が桃色であるのに 対しTO2は赤色を示す.しかしながら,年代値は誤差の範 囲でよく一致する.

小沢凝灰岩(試料番号:OZ1) 採取位置は宮城県柴田郡村 田町村田ダム周辺,北緯 38°08′55″,東経 140°40′40″で ある. 塊状無層理で灰白色の細粒~中粒砂サイズの火山灰 からなる基質中に径2~3 cmの軽石が散在する. 軽石は白 色と灰色のものから構成される. 軽石中に含まれるジルコ

ンは非常に少なく純度も低い.したがって測定条件は劣る. 外来結晶が 30% 含まれ,結晶面の状態が悪く測定できない 結晶が 45% 含まれる. 測定に用いたのは全体の 25% の結 晶である. データのまとまりは悪く, χ<sup>2</sup>検定で失格する.  $\chi^2$ 検定に合格するところまで $\chi^2$ 値の大きいものを順に除 外した.残された粒子にはウラン濃度のばらつきが認めら れるが、同一の年代集団とみなし年代を算出した結果、9.0 ± 0.7 Ma の年代値が得られた.

**沼田凝灰岩(試料番号:OZ1)** 採取位置は宮城県柴田郡村 田町村田ダム周辺,北緯38°09′01″,東経140°40′13″で ある. 塊状無層理で灰白色の細粒~中粒砂サイズの火山灰 からなる基質中に最大径 50 cm の軽石が散在する. 軽石は 内部に径 5 mm 程度の石英を含む. 軽石中には桃色の自形 ジルコン結晶が豊富に含まれ、良好な FT 年代測定試料であ る.本試料のウラン濃度は低く,平均 FT(自発および誘導) 計数が少ない.しかし、粒子データのまとまりは良く、測 定した全粒子が同一年代集団に属すると判断され, 4.5 ± 0.5 Ma の年代値が得られた.

# 5. 議論

#### (1) 天神層と深野層の地質時代

ここでは,まず天神層・深野層と周辺に分布する火砕流 堆積物との対比について検討し,さらに層序と年代測定値 から天神層と深野層の地質年代を考察する.

柳生川凝灰岩部層と小沢凝灰岩上部との対比 小沢凝灰岩 は、天神層の分布域から約2~5km南東に分布し、天神 層より下位の地層とされていた(北村, 1986).小沢凝灰岩 は天神層と隣接し, その上部の軽石が濃集した球状ブロッ クを含む岩相は柳生川凝灰岩部層と酷似する.柳生川凝灰 岩部層と小沢凝灰岩上部は、全粒子組成において前者で石 英と斜長石の含有量がやや高いものの,ほぼ一致している. 重鉱物組成で直方(斜方)輝石と不透明鉱物を主とし菫青 石を少量含むという特徴も一致する.火山ガラスの組成は 柳生川凝灰岩部層が SiO2 量 73.5 ~ 78.5wt.% で Low-K 領域 にプロットされるのに対し、小沢凝灰岩上部は SiO2 量 74.6 ~ 77.2wt.% で Low-K と Medium-K の境界付近にプロット される (Figs. 8, 9). SiO<sub>2</sub> - K<sub>2</sub>O 図でプロットされる位置は 若干ずれるものの,一部は重複し,K<sub>2</sub>O量が少ないという 特徴は一致している. これらの岩相と記載岩石学的性質(特 に菫青石を含むこと)および火山ガラスの主成分組成の特 徴から,柳生川凝灰岩部層と小沢凝灰岩上部を対比するこ とが可能である.

一方,小沢凝灰岩下部の火山ガラスの組成は SiO<sub>2</sub> 量 75.3 ~ 76.3wt.% で Low-K と Medium-K の境界付近にプロット され (Fig. 9),小沢凝灰岩上部と一致する.しかし,柳生川 凝灰岩部層からは 5.1 ± 0.4, 5.3 ± 0.5, 5.4 ± 0.2 Ma の FT 年 代値が得られたのに対し,小沢凝灰岩下部は 9.0 ± 0.7 Ma と古い値を示す.また,小沢凝灰岩下部は重鉱物組成で単 斜輝石が多く,董青石を含まない.以上のことから,小沢 凝灰岩下部は,小沢凝灰岩上部とは異なる地質時代の火砕 流堆積物である可能性が高い.柳生川凝灰岩部層と小沢凝 灰岩上部の噴出年代は FT 年代から 5.1 ~ 5.4 Ma 前後であっ たと推定される.

#### 沼田凝灰岩と広瀬川凝灰岩部層との比較

沼田凝灰岩と広瀬川凝灰岩部層は、主たる分布域は離れ ている(Fig. 1)ものの、火山豆石を含む凝灰岩の直上に軽 石質の火砕流堆積物が重なる岩相層序と、軽石中に肉眼で 容易に判別できるほど粗大な石英を多量に含むという特徴 が共通している.両者は重鉱物組成でも、不透明鉱物と直 方(斜方)輝石・普通角閃石を主とし、少量のカミングト ン閃石と自形ジルコンを含むといった共通点がある.ただ し、層厚は沼田凝灰岩が10~80mと厚いのに対して、広 瀬川凝灰岩部層が7~8mで、相対的に薄い.沼田凝灰岩 の最下部に発達する含火山豆石凝灰岩と、広瀬川凝灰岩部 層のやはり最下部に発達するサージ部の含火山豆石凝灰岩 の火山ガラスは、ともに SiO<sub>2</sub> に富み Medium-K と High-K の境界付近にプロットされる(Fig. 9). それに対して沼田 凝灰岩主部の軽石は Medium-K 領域の低 K<sub>2</sub>O 側にプロッ トされ、Medium-K と High-K の境界にプロットされるも のは無い. 一方、広瀬川凝灰岩部層の火山ガラスの組成 は主に Medium-K と High-K の境界付近にプロットされ、 Medium-K 領域の低 K<sub>2</sub>O 側にプロットされる軽石を含むこ とが分かった.(Fig. 9). このことは、Kasuya et al.(1992) による、広瀬川凝灰岩部層が n = 1.498 前後に最頻値をも つ火山ガラスとともに、上部ではより高屈折率の火山ガラ スが混在することに対応する可能性がある.また、檀原・ 岩野(1995)は、広瀬川凝灰岩部層の4 層準から採取した 試料の FT 年代を測定した際に、ジルコンのウラン濃度が、 下位での 110 ppm から、上位での 80 ppm へと減少してい ることを報告している.

沼田凝灰岩と広瀬川凝灰岩部層では、まず下部の Medium-KとHigh-Kの境界付近にプロットされるマグマが 噴出した.その後、沼田凝灰岩の主部はMedium-K領域の 低K<sub>2</sub>O側にプロットされるマグマであるが、広瀬川凝灰岩 部層はMedium-KとHigh-Kの境界付近にプロットされるマ グマを主としつつもMedium-K領域の低K<sub>2</sub>O側にプロット されるマグマが混在する.

近年, Takashima et al. (2020) はアパタイトの微量元素組 成とジルコンの U-Pb 年代をもとに, 仙台層群向山層に挟ま る凝灰岩と, 仙台周辺に露出する鮮新世の各凝灰岩との対 比を行ない, 広瀬川凝灰岩部層は, 蔵王町〜村田町周辺に 分布する沼田凝灰岩(3.71±0.03 Ma) に対比され, その給 源火山は,沼田凝灰岩の近傍にある白石カルデラ(吉田ほか, 2020)であると結論している.本論で示した沼田凝灰岩(4.5 ±0.5Ma) と広瀬川凝灰岩部層の火山ガラスの組成は, 両 者の対比を否定するものではないが, 両者により厳密な層 序関係が存在する可能性がある.

#### 深野層と沼田凝灰岩・広瀬川凝灰岩部層との比較

次に,深野層と沼田凝灰岩および広瀬川凝灰岩部層との 関係について検討する.上ノ原凝灰岩部層は火山豆石を含 む凝灰岩からなり,新田軽石凝灰岩部層は石英の目立つ軽 石を含む凝灰岩からなる.これは,沼田凝灰岩・広瀬川 凝灰岩部層の岩相層序と一致するが,上ノ原凝灰岩部層と 新田軽石凝灰岩部層の境界部には数10cmのシルトが挟在 し,若干の時間間隙が認められ,火山豆石を含む凝灰岩か ら軽石凝灰岩へ間隙無く堆積する沼田凝灰岩・広瀬川凝灰 岩部層とは異なる.また,上ノ原凝灰岩部層は沼田凝灰岩・ 広瀬川凝灰岩部層と比べ,全粒子組成において石英の含有 量が低く,重鉱物にカミングトン閃石を含まない点で異な る.さらに,上ノ原凝灰岩部層および新田軽石凝灰岩部層 の火山ガラスの主成分組成は,SiO2量77.0~78.0wt.%で Medium-K領域の低K20側にプロットされ,高K20側にプ ロットされるガラスを含む沼田凝灰岩・広瀬川凝灰岩部層 とは明らかに異なる。新田軽石凝灰岩部層は軽石質の火砕 流堆積物からなり石英をやや多く含むが、沼田凝灰岩・広 瀬川凝灰岩部層上部ほど石英の含有量は高くない。さらに、 新田軽石凝灰岩部層は菫青石を含むが、沼田凝灰岩と広瀬 川凝灰岩部層には含まれない。以上のことから、深野層を 沼田凝灰岩や広瀬川凝灰岩部層と対比することはできない。

本論において,新田軽石凝灰岩部層からは 6.3 ± 0.8 Ma の FT 年代が得られたが、整然と西に傾斜する地質構造と 野外での層序関係から,深野層は天神層より新しい.また, 柳生川凝灰岩部層と小沢凝灰岩上部が対比されることから, 沼田凝灰岩は天神層より上位となる. 深野層には沼田凝灰 岩や広瀬川凝灰岩部層と一致する岩石学的特徴を持った火 砕流は認められないことから, 沼田凝灰岩や広瀬川凝灰岩 部層は深野層より上位である可能性が高い.よって,深野 層の形成年代は、天神層(4.8~5.8 Ma)よりは新しく、沼 田凝灰岩(3.71±0.03Ma)や広瀬川凝灰岩部層よりは古 い 4.0 ~ 5.5 Ma の範囲と推定される. これらの年代は、仙 台市西部の愛子地域に分布する"広瀬川凝灰岩"から得ら れた 4.95 ± 0.11 Ma や 4.92 ± 0.07 Ma のジルコン U-Pb 年 代(Takashima et al., 2020) と重なっている. また, 天神力 ルデラ・深野カルデラの形成年代は, 仙台層群, 竜の口層 の年代(5.4~5.3 Ma;藤原ほか, 2013)とも、ほぼ重なっ ている. 天神カルデラの火道凝灰岩が, 3.5 ± 0.3 Ma の年 代を示しているが、これは近傍の白石カルデラからの沼田 凝灰岩の噴火活動の影響を受け、カルデラ壁が再動した可 能性も考えられる.

#### (2) 天神カルデラおよび深野カルデラの構造

天神層と深野層は,層相や岩石学的特徴により明瞭に区別でき,それぞれに対応する火道凝灰岩も認められる.それらの分布(Fig.4)や地質構造(Fig.10)と重力異常(Fig. 2)から判断して,天神層と深野層の噴出期にはそれぞれに対応するカルデラが形成されたと考えられる.以下にそれらカルデラの構造について検討する.

天神層の西縁では作並層と火道凝灰岩が接している(Fig. 4).北川ルート上流部での火道凝灰岩は NE-SW 走向で 42 ~80°の高角で東に傾斜する(Fig. 10).また本砂金川下流 部に分布する火道凝灰岩は,東側に分布する湯元層を高角 で切る断層(カルデラ東壁)に沿って分布している(Fig. 10).それに対して柳生川凝灰岩部層は概ね 4 ~ 20°の緩傾 斜を示し,南部では軽微な盆状構造を示し,北部では一様 に緩く西傾斜する(Fig. 10).天神層の分布南縁から約1~ 2 km南方には,北に開いた半円弧状の地形が認められ,そ の北側の低地には段丘面が発達し,南側の丘陵地には大森 層・遠刈田層・小沢凝灰岩・沼田凝灰岩が分布する(Fig. 4).

負の重力異常は、川崎町付近と秋保大滝付近にある(Fig. 2).川崎町付近の負の重力異常は中心が -50 mgal で、重力 勾配は比較的緩いが,約5km四方の大きさがある.秋保大 滝付近の負の重力異常は,中心が-40mgalで,そこから南 北に伸びた楕円形の形状をもち,勾配が急である.天神層 はこれら2つの負の重力異常域にまたがって分布している. 細かく見ると,天神層分布域の北縁と東縁は等重力線の走 向と調和的である.西縁では等重力線と斜交し,また南縁 は鍋底状の負の重力の中心を横切っている(Fig.2).

以上述べたように天神層に対応する火道凝灰岩が認めら れることや地質構造・重力分布から天神層噴出期には陥没



Fig.10. Generalized dip-contour map of the Tenjin and Fukano calderas.

The dip direction is perpendicular to the contours. The width between the respective contours expresses a gradient of the map. カルデラが形成されたと推定される.この陥没カルデラを 高橋ほか(2004)は天神カルデラと命名した.その形状は 南北に長軸をもつ楕円形を呈し、東西幅は中心部で小さく 南部で大きいひょうたん形を示す(Fig. 10).この陥没カル デラの規模は南北約12 km、東西最大で5 km である.現在 地表に現れている半円弧状の地形は、陥没カルデラ形成期 よりカルデラ南縁が2 km 程度後退したものと推定される. なお天神層下部は塑性変形したシルトブロックや成層した 砂を挟在すること、外殻状にシルトサイズの火山灰を付着 させた球状の軽石濃集ブロックを含むことから、噴出時に 水の影響を受けたと考えられる.よって天神層噴出以前に、 現在の天神層と小沢凝灰岩分布域にまで広がる凹地(川崎 カルデラ(吉田ほか, 2020))が存在していた可能性がある.

深野層は天神層分布域の北西部に南北に細長く分布する. 現在認められている深野層に対応する火道凝灰岩は,作並 層と湯元層の間にのみ存在し(Fig. 4), NE-SW 走向で 70° の高角で西に傾斜している(Fig. 6). 深野層の東縁は柳生 川凝灰岩部層と接し、その境界は断層と推定される. 北縁 は大手門層とおそらく断層で境される. 深野層は概ね 18~ 34°で西に傾斜するが、この傾斜角は天神層の傾斜よりやや きつい. 深野層の北縁部と南縁部は露出がないため, そこ での構造は不明であるが、その他では一様に西傾斜してい る(Fig. 10). 深野層の分布は、秋保大滝付近にある負の重 力異常域の東側半分と一致する. 深野層に対応する火道凝 灰岩の存在や地質構造・重力分布から,深野層噴出期にも カルデラが形成されたと推定される. このカルデラを高橋 ほか(2004)は深野カルデラと命名した.本カルデラは天 神力ルデラの北西部に入れ子状に生じ,その規模は南北約6 km, 東西約2km である.

Amanda et al.(2019) は、天神・深野カルデラを形成した マグマ溜りの深さを多数のメルト包有物の組成にもとづき、 地下 2 ~ 10 km と推定している.なお、天神・深野カルデ ラの南側でのマグマ溜り深度の中央値が 7 km であるのに対 して、天神・深野カルデラの北側では 5 km と、少し浅い値 を示している.

## (3) カルデラタイプ

カルデラはマグマ溜りの形態や火道の位置・形状と陥没 様式などの違いにより,バイアス型(ピストンシリンダー 型),じょうご型,多角形型(高橋,1993),ピースミル 型,トラップドア型,ダウンサグ型(Lipman,1997)な どが知られ,それぞれに特徴的な地下構造や堆積相を有す る.重力構造を比較した場合,苦鉄質マグマが関係した高 重力異常型と,珪長質マグマに起因する低重力異常型に分 類される(横山,1993).陥没カルデラの多くは低重力異常 型で,バイアス型カルデラでは縁辺部での急傾斜帯と内部 の平坦な構造から成る鍋底状を示し,じょうご型では倒立 円錐型のすり鉢状を呈する.バイアス型カルデラでは,そ

の内側の巨大ブロックが環状割れ目に沿った珪長質火砕物 質の噴出に伴ってピストンシリンダー状に落ち込む(Smith and Bailey, 1968). この場合, しばしば直径 10 km を超え る陥没凹地を埋積したカルデラ形成期の火砕流堆積物は良 く保存されている.例えば、東北本州脊梁域の地熱地帯で は、試錘調査によって、カルデラを充填した厚さ1km以上 の後期中新世~更新世溶結凝灰岩が知られている(須藤, 1993). じょうご型カルデラは、すり鉢状のカルデラ底(横 山、1993)と、中心部に推定される比較的細い火道により 特徴付けられ(小室, 1993),爆発的な中心噴火で基盤岩が 破砕・崩落して牛じる. 地表浅部では直径3~5km もしく はそれ以上の大きさの凹地を湖成層が埋積していることが あるが、地下深部の火道の直径は概ね2~3 km 以下である (安藤, 1983;水垣, 1993). 多角形カルデラは,噴火に先 行するドーム状隆起によって地殻が直径10~20km程度の 多角形状に陥没(一次陥没)し,その後の大規模噴火で円 形の陥没(二次陥没)が生じる二重陥没構造を呈するのが 特徴である (Komuro,1987). トラップドア型は, テキサス 州ソリタリオ地域で確認された.地下に定置したラコリス によって生じたドーム状隆起構造の隆起軸部にカルデラが 形成され、片落ちのちょうつがい状の形状を示す.

天神・深野カルデラはカルデラの西縁で、火道凝灰岩の 発達も良く、その厚さもより厚い.カルデラ内堆積物には 異質礫の含有量が少なく、カルデラ縁辺部でも顕著なカル デラ壁崩壊堆積物を確認することはできない.その内部構 造は、天神カルデラ南部で軽微な盆状構造を示すものの、 北部では、一様に西傾斜している.従って、上述のカルデ ラタイプのいずれにも直接当てはめることは困難であるが、 強いて言えば、トラップドア型のピストンシリンダー型カ ルデラであると思われる.

## (4) 天神カルデラおよび深野カルデラの形成過程

以下に, 天神カルデラの形成過程をステージ T1 ~ T3 に, 深野カルデラの形成過程をステージ F1・F2 に, さらに深野 カルデラ形成後~現在までに分けて論ずる(Fig. 11).

**柳生川凝灰岩部層のマグマ上昇期(ステージT1)** 珪長質 マグマ溜り上部(SiO<sub>2</sub>量が明瞭に柳生川凝灰岩部層から天 神前シルト岩部層へ減少することから,組成累帯していた 可能性が高い)から,SiO<sub>2</sub>に富むより分化したマグマが上 昇する.マグマの上昇に伴いマグマ溜まり上部に割れ目が 形成され,そこが火道として利用されたと推定される.柳 生川凝灰岩部層は塑性変形したシルトブロックを含むこと や一部成層した砂岩を挟在することから,柳生川凝灰岩部 層の火砕流が噴出する以前に,この地域一帯にすでに凹地 が存在し,湖が形成されていた可能性が高い.

この凹地自体,より古い名取層群,旗立層(13~11.5 Ma(藤 原ほか,2013))の年代にほぼ重なる遠刈田カルデラ(遠刈 田層:12.6~12.3 Ma)や,名取層群,綱木層下部(10~



Fig.11. Model for formation of the Tenjin and Fukano calderas. Stage T1: vent opening of the Tenjin caldera. Stage T2: collapse of Tenjin caldera floor. Stage T3: Deposition of lower part of the Tenjin Formation, after that and forming caldera lake. Stage F1: vent opening of Fukano caldera. Stage F2: collapse of the Fukano caldera floor and deposition of the Fukano Formation.

9 Ma; (藤原ほか, 2013))の年代にほぼ重なる川崎カルデラ (小沢凝灰岩: 9.0 ± 0.7 Ma) などのカルデラ構造(吉田ほ か、2020)に由来する可能性がある. 仙台付近では旗立層 上部以上では,全体として浅海化が進んでいるが,藤原ほ か(2013)は、これには仙台付近におけるローカルな地殻 変動が関与しているとしている.彼らは、この浅海化に伴い、 旗立層と綱木層の境界(11~9 Ma頃の地層が欠如),綱 木層最上部(8~7 Ma頃), 亀岡層の基底(6 Maよりやや 後),そして竜の口層と向山層の境界(4 Ma頃)の4箇所 で不整合(地層の削剥)が認められるとしている.地層の 削剥は基盤の隆起などで起こるが、ローカルな隆起が大規 模なカルデラ噴火に先行して起こることは良く知られてい る (Smith and Bailey, 1968). 場所を変えながら, ローカル な隆起域での大規模なカルデラ噴火に伴う地域の沈降が繰 り返されたと考えると、このような不整合の繰り返しを説 明することができるかも知れない. その場合, 旗立層と綱 木層の境界不整合は川崎カルデラ,綱木層最上部の不整合 は白沢カルデラ, 亀岡層基底の不整合は天神・深野カルデ

ラ,そして竜の口層と向山層の境界不整合は白石カルデラの活動と関連していた可能性を指摘できる.藤原ほか(2013)が指摘している,仙台付近の不整合と奥羽山脈脊梁域で認められる複数の不整合との良い対応は,広域応力場の変遷が個々のカルデラ活動と密接な関連を持っている(Acocella et al., 2008)ためかも知れない.

**柳生川凝灰岩部層の火砕流噴出期(ステージT2)**割れ目 状火道から柳生川凝灰岩部層に相当する火砕流が噴出する. 噴出初期の火砕流は,上昇したマグマがカルデラ壁部で発 泡し軽石を形成した後,軽石流として湖底に吹き出し,湖 水との反応により軽石濃集ブロックが形成されたものと推 定される.この火砕流噴出に伴いカルデラ陥没が生じる. 陥没は火道が発達したカルデラ西部が東部に比べ相対的に 大きく落ち込むトラップドア状に起こった.噴出と陥没が 同時に進行し,陥没により生じた凹地を柳生川凝灰岩部層 の火砕流本体が埋積する.このときのカルデラ壁は内側傾 斜していたと推定される.

天神前シルト岩部層の湖成層堆積期(ステージ T3) 陥没

カルデラの凹地に水が蓄えられ、湖が生じた.しかし、依 然として噴火活動は続き,黒色や白色の軽石がカルデラ湖 内に供給された. この時期の噴火は,柳生川凝灰岩部層に 相当するより SiO<sub>2</sub>に富むマグマから、天神前シルト岩部層 に相当するより SiO<sub>2</sub>に乏しいマグマに変化している. この マグマは柳生川凝灰岩部層の火砕流をもたらしたマグマと は異なり、組成累帯したマグマ溜りのより深部に由来する と考えられる. 天神前シルト岩部層では, 層位的下位から 上位へ SiO<sub>2</sub> が減少した後,再び増加する傾向がある.こ のことは天神前シルト岩部層堆積期の噴火活動は、徐々に SiO<sub>2</sub>の乏しいマグマを噴出する時期と、再び、より分化し た SiO<sub>2</sub>に富むマグマが噴出する時期があったと考えられる. 深野層のマグマ上昇期(ステージ F1) 天神前シルト岩部 層が堆積した後, 天神カルデラとは別のマグマ溜りから, 深野層をもたらしたマグマが現在のカルデラ北西部に位置 する火道から噴出した.

**深野層の火砕流噴出期(ステージF2)**火砕流噴出に伴い 天神カルデラ北部の西半分が再陥没する. 陥没は現在火道 が認められるカルデラ西部が東部に比べ相対的に大きく落 ち込むトラップドア状の陥没であったと推定される. カル デラ西部では,カルデラ壁を形成する基盤の湯元層が一部 崩壊する(Fig. 7-j).火砕流の噴出に伴って陥没するカルデ ラ凹地を,上の原凝灰岩部層から森安軽石凝灰岩部層に至 る火砕流堆積物が充填する.天神カルデラ北部には天神前 シルト岩部層の湖成堆積物が広く分布し(Fig. 4),深野層 の火砕流噴出時にも凹地に湖が存在していた可能性が高い. 上ノ原凝灰岩部層が火山豆石を含むこととあわせて,深野 層初期の噴火はマグマ水蒸気噴火を伴ったと解釈される.

深野カルデラ形成後 - 現在 天神カルデラと深野カルデラ が形成された後,この地域一体は,沼田凝灰岩と広瀬川凝 灰岩部層に相当する火砕流堆積物に覆われたと推定される. 前期更新世に入ると、天神カルデラおよび深野カルデラの 西側壁部が作並断層として再活動する. これに伴い, 隆起 した脊梁山地から安山岩を主体とする礫が供給され芋峠層 が堆積する、このときの断層運動によって、カルデラ西側 がカルデラ東側に対して相対的に沈降し、天神カルデラ北 部と深野カルデラが西側へ傾斜した可能性は否定できない. しかしながら, 芋峠層の基底面は緩やかな東傾斜を示すこ とから,全体に脊梁山地側が隆起上昇した可能性が大きい. 中期更新世末から後期更新世初頭には,数100万年間の時 間間隙をおいて安達火山が活動している.安達火山はカル デラ東縁部に位置し, 菫青石を含む同源捕獲岩を多く含有 する(Kanisawa and Yoshida, 1989) ことから, 菫青石を含 む火砕流を噴出した天神カルデラ下に伏在,残留していた マグマ(蟹澤, 1992)が既存のカルデラの東壁の一部を利 用して再上昇・噴出した可能性が考えられる.

## 6. まとめ

仙台市秋保町から宮城県川崎町に至る地域で,カルデラ 内堆積物の分布・層序と地質構造を明らかにし,カルデラ 内火砕流堆積物とカルデラ周辺に分布する火砕流堆積物と の対比および地質時代について検討した,それらの結果を 以下に示す.

- 天神カルデラを埋積する天神層は、柳生川凝灰岩部層の 火砕流堆積物と、天神前シルト岩部層の湖成堆積物に区 分される。天神層の軽石は火山ガラス主体で結晶をわず かに含み、また重鉱物として菫青石を1.4~32.5%程度 含む、柳生川凝灰岩部層の軽石の火山ガラスはSiO2量 73.5~78.5wt.%でLow-K領域にプロットされる。一方、 天神前シルト岩部層中に含まれる軽石の火山ガラスは SiO2量61.8-72.5wt.%でLow-K領域にプロットされる。 小沢凝灰岩上部は柳生川凝灰岩部層と対比され、それら の年代は5.1~5.4 Maと推定される。
- 2. 深野カルデラを埋積する深野層は上ノ原凝灰岩部層・新田軽石凝灰岩部層・滝原凝灰岩部層・森安軽石凝灰岩部層に区分される. 深野層の軽石および火山豆石は火山ガラス主体で結晶をわずかに含み,上ノ原凝灰岩部層と滝原凝灰岩部層は菫青石を含む. 上ノ原凝灰岩部層・新田軽石凝灰岩部層・森安軽石凝灰岩部層の軽石は SiO2 量76.8 ~ 78.7wt.% で Medium-K 領域にプロットされる. 深野層の年代は天神層より新しく,沼田凝灰岩より古い4.5 ~ 5.1 Ma と推定される.
- 天神・深野カルデラのカルデラ壁には火道凝灰岩が発達 する.天神カルデラ内の堆積物は南部で軽微な盆状構造 を示し、北部では天神・深野カルデラともに一様に西へ 傾斜する.これらのことから、天神・深野カルデラは、 西部が東部より相対的に大きく落ち込んだトラップドア タイプに分類される可能性が高い.

## 謝辞

本研究は文部科学省科学研究費補助金(若手研究 B,課題 番号 16740283,代表者:長橋良隆)の一部を使用した.関 係機関に心から感謝する.

# 文献

- Acocella, V., Yoshida, T., Yamada, R. and Funiciello, F., 2008. Structural control on late Miocene to Quaternary volcanism in the NE Honshu arc, Japan. *Tectonics*, **27**, TC5008. (doi:10.1029/2008TC002296).
- Almond, D.C., 1971. Ignimbrite vents in the Saboloka cauldron, Sudan. *Geological Magazine*, **108**, 159-176.
- Amanda, F.F., Yamada, R., Uno, M., Okumura, S. and Tsuchiya, N., 2019. Evaluation of caldera hosted geothermal

potential during volcanism and magmatism in subduction system, NE Japan. Geofluids, 3031586, p14, doi.org/10.1155/2019/3031586.

- 天野一男, 1980. 奥羽脊梁宮城・山形県境地域の地質学的 研究. 東北大理学部地質古生物学研邦報, **81**, 1-56.
- 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.
- 粟田泰夫, 1984. 東北地方における後期中新世ー鮮新世の カルデラ群. 地調月報, **35**, 439-440.
- 粟田泰夫, 1993. 後期中新世川舟カルデラ内にみられるカ ルデラ形成最盛期の層序.月刊地球, **15**, 705-708.
- Ban, M., Ohba, T., Hayashi, S. and Umeda, K., 1997. The Kurohanayama basalt (Sendai, Japan) during the late Miocene to Early Pliocene. *Journal of Mineralogy*, *Petrology and Economic Geology*, **92**, 181-188.
- 檀原 徹・岩野英樹, 1995. 火砕流堆積物の FT 年代測定– 仙台層群広瀬川凝灰岩の場合–.フィッション・トラッ ク ニュースレター, **8**, 25-34.
- Danhara, T., Iwano, H., Yoshioka, T. and Tsuruta, T., 2003. Zeta calibration values for fission track dating with a dially1 phthalate detector. *The Journal of the Geological Society of Japan*, **109**, 665-668.
- Ekren, E.B. and Byers, F.M. Jr., 1976. Ash-flow fissure vent in west-central Nevada. *Geology*, **4**, 247-251.
- 藤田至則・川北敏章・新井 節, 1970. 本宿グリーンタフ 形成期における構造運動-とくに, 陥没構造と火山活 動について-. 地団研専報, **16**, 81-95.
- 藤原 治・鈴木紀毅・林 広樹・入月俊明, 2013. 仙台市 南西部に分布する東北日本太平洋側標準層序としての 中・上部中新統および鮮新統. 地質学雑誌, **119**, S 96-119.
- Galbraith, R. F., 1981. On statistical model for fission track counts. *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, **13**, 471-488.
- 幡谷竜太・柳田昭成・佐藤 賢・佐々木俊法, 2004. 宮 城県川崎盆地における海洋酸素同位体ステージ6河成 段丘の認定とその意義.日本第四紀学会講演要旨集, 113-114.
- 広島俊男・駒澤正夫・大熊茂雄・中塚 正・三品正明・斉 藤和夫・岡本國徳, 1991. 重力図 (ブーゲー異常図), no3, 地質調査所.
- Hurford, A. J., 1990a. Standardization of fission track dating calibration. Recommendation by the Fission Track Working Group of the I.U.G.S., subcommission of Geochronology. *Chemical Geology*, **80**, 171-178.
- Hurford, A. J., 1990b. International Union of Geological Sciences subcommission on Geochronology recommendation for the standardization of fission track dating calibration and data reporting. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements* **17**, 233-236.
- 伊藤谷生・歌田 実・奥山俊一, 1989. 東北日本脊梁地域 に分布する中新世〜鮮新世のカルデラ群について.地 質学論集, **32**, 409-429.
- 蟹澤聰史, 1996. 安達火山. 日本地質学会第 103 回学術大会, 見学旅行案内書, 128p.
- 蟹澤聰史・吉田武義・青木謙一郎, 1986. 仙台周辺安達愛

島軽石,およびトーナル岩質石質岩片の微量成分-安 達火山の提唱とその意義-.東北大核理研研究報告, **19**,130-138.

- Kasuya, M., Yamashita, T. and Danhara, T., 1992, Correlational Study of the Pliocene Hirosegawa Tuff Member of the Sendai Group in Northeast Honshu: Heavy mineral composition and refractive index of volcanic glass. *The Journal of the Geological Society of Japan*, **98**, 1065-1068.
- 木村純一, 1994. エネルギー分散型 X 線マイクロアナライ ザーによる火山ガラスの定量化学分析. 福島大学教育 学部理科報告, **54**, 19-31.
- 北村 信, 1986a. 新生代東北本州弧地質資料集. 島弧横断 ルート No. 23.
- 北村 信, 1986b. 新生代東北本州弧地質資料集. 島弧横断 ルート No. 24.
- 北村 信・石井武政・寒川 旭・中川久夫, 1986. 仙台地 域の地質. 地域地質研究報(5万分の1地質図幅), 地 質調査所, 134p.
- 小林巌雄,1962. 宮城県仙台市西方における新第三系白沢 層の層相変化とその堆積環境. 地質学雑誌,**68**,141-151.
- 小岩直人,1994. 宮城県名取川流域における最終氷期以降 の河成段丘発達史.日本地理学会予稿集,**103**,1,68-76.
- Komuro, H., 1987 Experiments on cauldron formation: a polygonal cauldron and ring fractures. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **31**, 139-149.
- 小室裕明, 1993. カルデラ陥没のメカニズムーニつのタイ プの実験的検討ー.月刊地球, **15**, 682-685.
- 黒川勝己, 1999. 水底堆積火山灰層の研究法-野外観察か ら環境史復元まで-. 地学団体研究会, 地学双書 30, 109p.
- 草川 遥・高嶋礼詩,2023.アパタイト微量元素組成を用 いた仙台地域の鮮新統・向山層の層序と凝灰岩の対比. 地質学雑誌,**129**,389-404.
- Lipman, P. W., 1997. Subsidence of ash-flow calderas : relation to caldera size and magma-chamber geometry. *Bulletin of Volcanology*, **59**, 198-218.
- 増田孝一郎・柴田豊吉・阿久津 純・中川義二郎, 1973. 福島県地質調査報告「田島地域の地質」.福島県, 33p.
- 宮本 毅・蟹澤聰史・石渡 明・根本 潤, 2013. 仙台の 大地の成り立ちを知る. 地質学雑誌, **119**, S 27-46.
- 水垣桂子,1993.砂子原カルデラの構造と火山活動史.地 質学雑誌,**99**,721-737.
- 長橋良隆・吉田武義・中井聡子・奥平敬元,2003,テフラ ガラス片の化学組成について – XRF 分析との比較による EDS 分析結果の評価 – . 第四紀研究,**42**,265-277.
- Nakajima, J., Hasegawa, A., Horiuchi, S., Yoshimoto, K., Yoshida, T. and Umino, N., 2006. Crustal heterogeneity around the Nagamachi-Rifu fault, northeastern Japan, as inferred from travel-time tomography. *Earth, Planets and Space*, **58**, 843-853.
- Okutsu, H., 1955. On the stratigraphy and paleobotany of the Cenozoic plant beds of the Sendai area. *The Science Reports of the Tohoku University. 7th series, Geography*,

**26**, 1-114.

- 小野寺 充・堀内 茂木・長谷川 昭, 1998. Vp/Vs イン ヴァージョンによる 1996 年鬼首地震震源域周辺の 3 次 元地震波速度構造. 地震 第2輯, **51**, 265-279.
- 大場 司・伴 雅雄, 1997. 仙台市, 黒鼻山玄武岩の層準 - 後期中新世〜前期鮮新世に噴出したピジョン輝石玄 武岩-. 岩鉱, **92**, 2, 55-62.
- 大竹正巳・佐藤比呂志・山口 靖, 1997. 福島県南会津, 後期中新世木賊カルデラの形成史. 地質学雑誌, **103**, 1-20.
- 大槻憲四朗・根本 潤・長谷川四郎・吉田武義, 1994. 広 瀬川流域の地質, 仙台市環境局.
- Reynolds, D.L., 1954. Fluidization as a geological process, and its bearing on the problem of intrusive granites. *American Journal of Science*, **252**, 577-614.
- Reynolds, D.L., 1956 Calderas and ring-comples, Gedenkboek H.A. Brouwer. Kon. Ned. Geol. Mijnbouw Gen., **16**, 1-25.
- 佐藤比呂志,1986.東北地方中部地域(酒田-古川間)の 新生代地質構造発達史(第|部・第|部).東北大理学 部地質古生物研邦報,**88**,32p,**89**,45p.
- Sato, H., Imaizumi, T. and Yoshida, T., 2002. Tectonic evolution and deep to shallow geometry of Nagamachi – Rifu Active Fault System, NE Japan. *Earth, Planets and Space*, **54**, 1039-1043.
- 仙台団研グループ,1966.東北地方における後期中新世の 火山構造性陥没ー仙台市西方の白沢層群の地質構造ー. 地団研専報,**12**,112-126.
- 柴田豊吉・増田孝一郎・村田正文・石崎国熙・鳥羽晴文・佐々 木郁郎・佐々木 隆・田野久貴・中川義二郎・渡辺 斌・ 伊藤希久夫, 1972. 福島県地質調査報告「糸沢地域の 地質」. 福島県, 36p.
- 柴田豊吉・植田良夫・玉生志郎, 1976, 仙台付近産火山岩 類の絶対年代と層序区分の関係について. 日本地質学 会講演要旨集, 174p.
- 島田昱朗・根田武二郎・黒江良太郎・伊沢寿昭, 1974. 福 島県地質調査報告「小林地域の地質」. 福島県, 29p.
- Smith, R. L. and Bailey, R. A., 1968, Resurgent cauldrons. *Geological Society of America Memoirs*, **116**, 613-662.
- 須藤 茂, 1993. 仙岩地熱地域にみられるピストンシリン ダー型カルデラ. 月刊地球, **15**, 700-704.
- 鈴木敬治・真鍋健一・吉田 義, 1977. 会津盆地における 後期新世代層の層位学的研究と会津盆地の発達史.地 質学論集, **14**, 17-44.
- 鈴木 拓・宇野正起・奥村 聡・山田亮一・土屋範芳, 2017. 中新世後期白沢カルデラの噴出マグマの分化と現世の 地熱流体貯留層.日本地熱学会誌,**39**, 25-37.
- 田口一男, 1975. 5万分の1地質図「鳴子」。山形県, 14p.
- 高橋正樹, 1993. 日本のカルデラー最近の研究動向一. 月 刊地球, **15**, 667-671.
- 高橋友啓・長橋良隆・柳沢幸夫・吉田武義・黒川勝己, 2003. 福島県太平洋岸に分布する鮮新統大年寺層のテ フラ層ーその2. 記載岩石学的特徴-. 地質調査研究報 告, **54**, 365-393.
- 高橋友啓・長橋良隆・吉田武義・柳沢幸夫,2004. 仙台市 西方,鮮新世深野・天神カルデラの地質.日本地質学会 第111年学術大会要旨,255.

- Takashima, R., Kusakawa, H., Kuwabara, S., Orihashi, Y., Nishi, H., Niwano, M. and Yoshida, T., 2020. Identification of the source caldera for a Pliocene ash-flow tuff in Northeast Japan based on apatite trace-element compositions and zircon U-Pb ages. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **401**, 106948.
- 高嶋礼詩・桑原 里・草川 遥・庭野道夫,2018. 東北福祉 大学・横向山校地及び朴木山キャンパス周辺に露出す る新第三系-第四系の層序.感性福祉研究所年報,**19**, 79-92.
- 海野徳仁・松沢 暢・堀修一郎・中村綾子・山本 明・長 谷川 昭・吉田武義, 1998. 1996 年 8 月 11 日宮城県 鬼首付近にて発生した地震について. 地震 第 2 輯, 51, 253-264.
- 山田営三, 1972. 宮城県峨々周辺の地質について. 岩井淳 一教授記念論文集, 367-375.
- Yamada, E., 1988. Geologic Development of the Onikobe Caldera, Northeast Japan, with Special Reference to its Hydrothermal System, Report, Geological Survey of Japan, Research in the Kurikoma Geothermal Area, **268**, 61-190.
- 山元孝広, 1991. カルデラ陥没に伴う大規模斜面崩壊:会 津若松市南方,後期中新世高川カルデラの内部構造, 火山, **36**, 1-10.
- 山元孝広, 1992. 会津地域の後期中新世-更新性カルデラ 火山群. 地質学雑誌, 98, 21-38.
- 柳沢幸夫・高橋友啓・長橋良隆・吉田武義・黒川勝己, 2003. 福島県太平洋岸に分布する鮮新統大年寺層のテ フラ層-その1. 年代層序-. 地質調査研究報告, 54, 351-364.
- 横山 泉, 1993. じょうご型カルデラの証拠. 月刊地球, 15, 11, 672-681.
- 横山隆三,2001.東北地方斜度図.地形解析図集(横山隆 三監修).北海道地図.
- Yoshida.K., Hasegawa, A., Yoshida, T. and Matsuzawa, T., 2018. Heterogeneities in Stress and Strength in Tohoku and Its Relationship with Earthquake Sequences Triggered by the 2011 M9 Tohoku-Oki Earthquake. *Pure and Applied Geophysics*, doi.org/10.1007/s00024-018-2073-9.
- Yoshida, K., Uno, M., Matsuzawa, T., Yukutake, Y., Mukuhira, Y., Sato, H. and Yoshida, T., 2023. Upward earthquake swarm migration in the northeastern Noto Peninsula, Japan, initiated from a deep Ring-shaped cluster: Possibility of fluid leakage from a hidden magma system. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 128, e2022JB026047. Doi.org/10.1029/2022JB026047.
- 吉田武義, 1970. 四国・石鎚陥没カルデラと天狗岳火砕流. 岩鉱, **64**, 1-12.
- Yoshida, T., 1984. Tertiary Ishizuchi cauldron, southwestern Japan arc: formation by ring fracture subsidence. *Journal of Geophysical Research*, **89**, 8502-8510.
- Yoshida, T., 2001. The evolution of arc magmatism in the NE Honshu arc, Japan. *Tohoku Geophy. Jour.*, **36**, 131-149.
- 吉田武義・相澤幸治・長橋良隆・佐藤比呂志・大口健志・ 木村純一・大平寛人, 1999. 東北本州弧, 島弧火山活

動期の地史と後期新生代カルデラ群の形成. 月刊地球 号外, 27, 123-129.

吉田武義・中島淳一・長谷川 昭・佐藤比呂志・長橋良隆・ 木村純一・田中明子・Prima, O.D.A.・大口健志, 2005. 後期新生代,東北本州弧における火成活動と地殻・マ ントル構造.第四紀研究,**44**, 195-216.

吉田武義・高嶋礼詩・工藤 健・プリマ オキ ディッキA・

前田純伶・吉田圭佑・岡田知己・三浦 哲・高橋友啓・ 長橋良隆・片岡香子,2020. 東北日本弧における後期 新生代の火成活動と地殻構造一内陸地震活動の背景一. 地學雑誌,**129**,529-563.

吉川周作, 1976. 大阪層群の火山灰層について. 地質学雑誌, 82, 497-515.