Bulletin of the Tohoku niversity useum No.24 2025

Bulletin of the Tohoku University Museum

Editors

Ryusaku NGAOAKA	Professor of Art History Department of Integrated Human Sciences, Graduate School of Arts and Letters, Tohoku University
Atsushi FUJISAWA	Professor of Archaeology The Tohoku university Museum, Tohoku University
Yoshitaka KANOMATA	Professor of Archaeology Department of Japanese Studies, Graduate School of Arts and Letters, Tohoku University
Reishi TAKASHIMA	Professor of Geology and Stratigraphy The Tohoku university Museum, Tohoku University

March, 2025

 $\ensuremath{\textcircled{C}}$ The Tohoku University Museum, Tohoku University

6-3 Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai 980-8578, Japan

Printed by

Senkyo, Co., Ltd. 2-4-2, Hinodemachi, Miyaginoku, Sendai 983-0035, Japan Telephone : 022-236-7161

Cover image: Body design of Final Jomon Pottery drawn by the technigue of "erased-over cord impressions". Original photograph by Miki Kikuchi.

Contents

Shuji Niko and Masayuki Ehiro : Changhsingian (latest Permian) orthoconic cephalopods from the South Kitakami Belt, Northeast Japan	1
Shuji Niko : <i>Columenoceras kyushuense</i> , a new species of Silurian cephalopod from the Gionyama Formation in the Kuraoka area, Miyazaki Prefecture, Southwest Japan	5
Tomohiro Takahashi, Yoshitaka Nagahashi, Takeyoshi Yoshida and Tohru Danhara : Geology and formation of Pliocene Tenjin and Fukano calderas at western part of Sendai, North-east Honshu, Japan.	9
Atsushi Fujisawa, Harumasa Kano and Takeshi Sugii : 3-D measurement of Omura tunnel tomb group in Kumamoto Prefecture using SfM method	
Atsushi Fujisawa, Harumasa Kano, Yoshio Kikuchi and Masanao Shimura : High- resolution 3-D measurement of Nakata tunnel tomb in Fukushima Prefecture	61

Changhsingian (latest Permian) orthoconic cephalopods from the South Kitakami Belt, Northeast Japan

Shuji Niko* and Masayuki Ehiro**

*Department of Environmental Studies, Faculty of Integrated Arts and Sciences, Hiroshima University, Higashihiroshima 739-8521, Japan, **The Tohoku University Museum, Sendai 980-8578, Japan

Abstract: Three Changhsingian (latest Permian) species of orthoconic cephalopods from the South Kitakami Belt, Northeast Japan are described with collections of Tohoku University Museum and Iwate Prefectural Museum. *Cycloceras ofunatoense* sp. nov. was collected from shales of the upper part of the Toyoma Formation at Maeda in Ofunato City, Iwate Prefecture. Previously, this species erroneously assigned to *Protocycloceras* or *Pseudocycloceras*. *Neorthoceras*? sp. and undeterminable phragmocone were collected from shales of the Senmatsu Formation at Senmatsu, Okago, Fujisawa-cho in Ichinoseki City, Iwate Prefecture.

Introduction

It must be said that our knowledges concerning Late Permian orthoconic cephalopods in Japan are extremely insufficient. The reason is because their occurrences are very rare and limited in the terrigenous faces of the South Kitakami Belt, Northeast Japan, in which all fossils are more or less deformed. The purpose of this paper is to add new findings for the poorly known field on the bases of the material kept in the Tohoku University Museum, Sendai (prefixed IGPS) and Iwate Prefectural Museum, Morioka (prefixed IPMM). Although detailed geographic positions of the specimens are not always clear, we attempt to describe morphologies and determine taxonomic positions for them in light of the importance.

Systematic paleontology

Subclass Orthoceratoidea Teichert, 1967 Order Orthocerida Kuhn, 1940 Family Cycloceratidae Hyatt, 1883 Genus **Cycloceras** M'Coy, 1844 Type species. Orthoceras laevigatum M'Coy, 1844.

Cycloceras ofunatoense sp. nov. Figures 1.1–1.6

Protocycloceras cf. cyclophorum (Waagen). Hayasaka, 1924, p. 46–49, pl. 6, figs. 1–3

Cycloceras? sp. nov., Shimizu and Obata, 1936, p. 23. *Pseudocycloceras*? sp., Koizumi, 1975, p. 23, pl. 3, figs. 6a–b.

Diagnosis. Species of *Cycloceras* with gradually expanded conchs with 3° in reconstructed angle and annulated; annulations on most part of body chamber are continuous, close, and strongly prominent; shell surface lacks ornamentation except for annulations.

Description. The type series consists of three fragmentary, deformed and annulated molds; the holotype is an orthoconic body chamber indicating 92 mm in length and gradual conch expansion; its reconstructed diameters as circular transverse section are 29 mm near adoral end and 27 mm at approximately one third part from the point, whose measurements provide for reconstructed expansion angle of 3°; two paratypes respectively represent more apical and more adoral shells than the holotype; a younger shell (phragmocone?, IGPS coll. cat. no. 112947) preserved as an external mold, has 32 mm in length and may be 10 mm in reconstructed diameter; another paratype (IGPS coll. cat. no. 112949) is a small fragment of body chamber with 43 mm in length; apex and peristome are not preserved. Shape and spacing of annulations exhibit considerable ontogenetic changes; apical annulations are weak, approximately 0.5 mm in height, having nearly flat and relatively wide interspaces, and having bluntly pointed crests; annulations on body chambers shift continuous, close and strongly prominent type, whose crests are bluntly pointed to narrowly rounded and heights range from 1.9 to 2.6 mm; interspaces of adoral annulations are strongly concave; in the most adoral shell of the largest specimen (paratype, IGPS coll. cat. no. 112949), annulations abruptly disappear; except for this gerontic (or pathological?) part, approximate numbers of annulations in corresponding reconstructed conch diameter

are 4–5 in apical and 8–10 in adoral shells. Besides annulations, ornamentation on shell surface is absent. No internal structures including suture, septa, siphuncle, and cameral deposits are preserved.

Material examined. Holotype, IGPS coll. cat. no. 112948. Paratypes, IGPS coll. nos. 112947, 112949.

Occurrence and age. The holotype and a paratype (IGPS coll. cat. no. 112947) are preserved on an identical shale block. Another paratype (IGPS coll. cat. no. 112949) occurs in brownish weathered sandy shale associated with a brachiopod, *Lamnimargus*. According to the accompanied labels, their locality is Maeda in Ikawa-cho, Ofunato City, Iwate Prefecture, Northeast Japan. This area is a well-known fossil locality of the upper part of the Toyoma Formation. The Maeda fauna is of Changhsingian (the latest Permian) age as indicated by ammonoid (Ehiro, 1996), bivalves (Nakazawa, 1998), and brachiopods (Tazawa, 2008).

Etymology. The specific name is derived from Ofunato. The type locality of the new species belongs to this city.

Discussion. As indicated by the above synonym list the present species was assigned Protocycloceras Hyatt in Zittel 1900, Cycloceras M'Coy, 1844, and Pseudocycloceras Barskov, 1959. We consider that this species should be placed in Cycloceras because (1) its slender conch shape, continuous and transverse annulations in the apical body chamber clearly correspond to the diagnosis of the genus, (2) distinction between Cycloceras and Protocycloceras is difficult only the external conch characters, but occurrences of the latter genus are confined to the Lower Ordovician, and (3) the Silurian genus Pseudocycloceras is characterized by its relatively rapid conch expansion. The external shell morphologies of the species also agree closely with those of Lopingoceras Shimansky in Ruzhentsev et al., 1962, and Neocycloceras Flower and Caster, 1935, whose stratigraphic range reaches the Upper Permian. However, Lopingoceras has distinctly spaced annulations with nearly flat to weakly depressed interspaces even in the body chamber and annulations of Neocycloceras indicate sinuses.

The most similar species to *Cycloceras ofunatoense* sp. nov. is *C. bicinctum* (Abich, 1878, p. 26, 27, pl. 4, figs. 5, 5a; Shimansky *in* Ruzhentsev and Sarycheva, 1965, pl. 16, figs. 14a, b), which occurs in the Dzhulfian (early late Permian) *Araxoceras* ammonoid zone of Azerbaijan. The principal difference between them is the apparently weaker development of annulations in *C. bicinctum*. As suggested by Hayasaka (1924), the new species also similar to *Cycloceras cyclophorum* (Waagen, 1879, p. 68, 69; 1887, pl. 6, figs. 7a, b, 8) from the late Permian part of the *Productus* Limestone in the Salt Rang, Pakistan. When compared at the nearly same growth stages, *Cycloceras cyclophorum* has the slightly wider interspaces between annulations than those of *C. ofunatoense*.

Shimizu and Obata (1936) stated that this Toyoma species should be compare with *Cycloceras laevigatum* (McCoy, 1844, p. 10, pl. 1, fig. 3; Histon, 1998, p. 54, 55, pl. 6, figs. 5a, b) from the Carboniferous of Ireland and *C. obliqueannulatum* (Waagen, 1879, p. 69, 70; 1887, pl. 6, figs. 9, 10) from the late Permian of Pakistan. *Cycloceras laevigatum*, however, is well differentiated from *C. ofunatoense* by the possession of transverse lirae. Furthermore, there is a considerable chronological gap between these two species. Teichert and Kummel (1973) changed the generic assignment of *obliqueannulatum* to *Neocycloceras*. We think this replacement is reasonable because of its sinuated annulations.

Order and Family Uncertain Genus **Neorthoceras** Shimizu and Obata, 1936 *Type species. Orthoceras verbeeki* Haniel, 1915.

Neorthoceras? sp. Figure 1.7

Description. A single fragmentary specimen of flattened longiconic orthocone was available for the study; it is approximately 16 mm in length and annulated(?); conch expansion very gradual. Shell surface marked by fine and closely spaced transverse lirae that exhibit weak sinus and form relatively broad salients; interspaces of lirae are narrow groove-like. No internal structure observable.

Material examined. IPMM 42351B.

Occurrence and age. This specimen was found in black shale at Senmatsu, Okago, Fujisawa-cho in Ichinoseki City, Iwate Prefecture. Judging from these lithologic and geographic evidences, its stratigraphic position is determinable as the upper part of the Senmatsu Formation (Ehiro, 1979; Ehiro and Bando, 1985). Fossils, including gastropods, bivalves, ammonoids and plants, suggest that the formation is Changhsingian in age (Murata, 1969; Kon'no, 1973; Bando, 1975; Murata and Shimoyama, 1979; Ehiro and Bando, 1985).

Discussion. Although surface ornamentation of the specimen corresponds to that of the genus *Neorthoceras*, its very gradual conch expansion is beyond the diagnosis of the generic type, *N. verbeeki* (Haniel, 1915, p. 140, 141, pl. 56, figs. 6a–c) from the Permian of East Timor, whose conch shows more rapid expansion and may attain 10° in angle.

Genus and Species Indeterminate Figure 1.8

Description. A single deformed specimen was examined; it is a fragment of orthoconic phragmocone having 22 mm in length and smooth conch surface. Sutures directly transverse.



Figure 1. 1–6. *Cycloceras ofunatoense* sp. nov. 1, paratype, IGPS coll. cat. no. 112947, side view, silicon rubber cast: 2–5, holotype, IGPS coll. cat. no. 112948; 2, side view, silicon rubber cast; 3, 4, side views of Steinkern; 5, longitudinal section of Steinkern, showing annulations: 6, paratype, IGPS coll. cat. no. 112949, side view, silicon rubber cast. **7.** *Neorthoceras*? sp., IPMM 42351B, side view. **8.** Orthoconic cephalopod, genus and species indeterminate, IPMM 42351A, side view. Scale bar is 15 mm in 1, 5; 30 mm in 2–4, 6; 6 mm in 7; 20 mm in 8.

Septa shallow. Camerae short, ranging approximately 5–7 mm in length. Siphuncle can not observable.

Material examined. IPMM 42351A.

Occurrence and age. Same as Neorthoceras? sp. (this report).

Discussion. The present material is not complete to enough for a confident identification.

Acknowledgements

We thank Yukihiro Takaizumi who provided information on the orthoconic cephalopod specimens in the geological collections of Iwate Prefectural Museum. Shuichiro Sato of this museum kindly helped in arranging for loans of these specimens. We also wish to thank Masayuki Fujikawa for his through review and helpful suggestions.

References

- Abich, H., 1878, Geologische Forschungen in den kaukasischen L\u00e4dern. Theil 1. Eine Bergkalkfauna aus der Araxesenge bei Djoulfa in Armenien, 126 p. Alfred H\u00f6lder, Wien.
- Bando, Y., 1975, On some Permian Medlicottidae from the Toyoma Formation in the Kitakami Massif. Memories of the Faculty of Education, Kagawa University, Part 2, vol. 25, p. 67–81.
- Barskov, I. S., 1959, New Silurian nautiloids from southern Fergana. Paleontologicheskii Zhurnal, no. 3, p. 55–60, pl. 5. (in Russian)
- Ehiro, M., 1979, Geology of Fujisawa-chō (Investigated in 1977). In, Taira, S. ed., Local History of Fujisawa-chō, Main Part, First Volume, p. 661–690. Fujisawa-chō, Higashiiwai-gun, Iwate Prefecture. (in Japanese)
- Ehiro, M., 1996, Latest Permian ammonoid *Paratirolites* from the Ofunato district, Southern Kitakami Massif, Northeast Japan. *Transactions and Proceedings of the Palaeontological Society* of Japan, New Series, no. 184, p. 592–596, pls. 79–80.
- Ehiro, M. and Bando, Y., 1985, Late Permian ammonoids from the Southern Kitakami Massif, Northeast Japan. *Transactions and Proceedings of the Palaeontological Society of Japan, New Series*, vol. 142, p. 400–408, pls. 79–80.
- Flower, R. H. and Caster, K. E., 1935, The stratigraphy and paleontology of Northwestern Pennsylvania. Part II: Paleontology. Section A: The cephalopod fauna of the Conewango Series of the Upper Devonian in New York and Pennsylvania. *Bulletins of American Paleontology*, vol. 22, p. 199–271.
- Haniel, C. A., 1915, Die Cephalopoden der Dyas von Timor. Paläontologie von Timor, vol. 3, p. 1–153, pls. 46–56.
- Hayasaka, I. 1924., Fossils in the roofing slate of Ogachi, Prov. Rikuzen. *Japanese Journal of Geology and Geography*, vol. 3, p. 45–53.
- Histon, K., 1998, A revision of A. H. Foord's monograph of Irish Carboniferous nautiloid cephalopods (1897–1901). Part 1. *Monograph of the Palaeontological Society, London*, no. 609, p. 1–62, pls. 1–7.
- Hyatt, A., 1883–1884, Genera of fossil cephalopods. *Proceedings of the Boston Society of Natural History*, vol. 22, p. 253–338.
- Koizumi, H., 1975, *Paleozoic Cephalopods in Japan*, 149 p. Teiseki Bunko, Tokyo.

Kon'no, E., 1973, New species of *Pleuromeia* and *Neocalamites* from the upper Scythian bed in the Kitakami Massif, Japan – with a brief note on some equisetacean plans from the upper Permian bed in the Kitakami Massif–. *The Science Reports of the Tohoku University, Series 2*, vol. 43, p. 99–115, pls. 8–12.

Kuhn, O., 1940, Paläozoologie in Tabellen, 50 p. Fischer, Jena.

- M'Coy, F., 1844, A Synopsis of the Characters of the Carboniferous Limestone Fossils of Ireland, 274 p. Privately published. (reissued by Williams and Norgate, London, 1862)
- Murata, M., 1969, Molluscan fauna of the Toyoma Formation (late Permian). Saito Ho-on Kai Museum Research Bulletin, no. 38, p. 1–22, pls. 1–4.
- Murata, M. and Shimoyama, S., 1979, Stratigraphy near the Permian–Triassic boundary and the pre-Triassic unconformity in the Kitakami Massif, Northeast Japan. *Kumamoto Journal of Science, Geology*, vol. 11, p. 11–31. (in Japanese with English abstract)
- Nakazawa, K., 1998, Uppermost Permian bivalve fossils from the Southern Kitakami Mountains. *Earth Science (Chikyu Kagaku)*, vol. 52, p. 51–54. (in Japanese)
- Ruzhentsev, V. E. and Sarycheva, T. G., 1965, Development and change of marine organisms at the Paleozoic-Mesozoic boundary. *Trudy Paleontologicheskogo Instituta, Akademia Nauk SSSR*, vol. 108, p. 1–431. (in Russian)
- Ruzhentsev, V. E., Zhuravleva, F. A., Balashov, Z. G., Bogoslovsky, B. I. and Librovich, L. S., 1962, Fundamentals of Paleontology (Osnovy Paleontologii). Mullusks, Cephalopods I, Nautiloids, Endoceratoids, Actinoceratoids, Bactritoids, Ammonoids, 438 p., 89 pls., Izdatel'stvo Akademii Nauk SSSR, Moskva (in Russian)
- Shimizu, S. and Obata, T., 1936, Remarks on Hayasaka's Protocycloceras cf. cyclophorum and the Permian and Carboniferous orthoconic nautiloids of Asia. The Journal of the Geological Society of Japan, vol. 43, p. 11–29. (in Japanese with English abstract)
- Tazawa, J., 2008, Lamnimargus (Productida, Brachiopoda) from the upper Permian of Ofunato in the South Kitakami Belt, NE Japan, and its palaeobiogeographical significance. Science Report, Niigata University (Geology), no. 23, p. 1–11.
- Teichert, C., 1967, Major features of cephalopod evolution. In, Teichert, C. and Yochelson, E. L. eds., Essays in Paleontology & Stratigraphy. R. C. Moore Commemorative Volume, Department of Geology, University of Kansas Special Publication 2, p. 162–210. The University Press of Kansas, Lawrence and London.
- Teichert, C. and Kummel, B., 1973, Nautiloid cephalopods from the Julfa beds, upper Permian, Northeast Iran. Bulletin of the Museum of Comparative Zoology at Harvard College, vol. 144, p. 409–434.
- Waagen, W., 1879, Salt-Range fossils. I.–Productus-limestone fossils. I.–Pisces–Cephalopoda. Palaeontologia Indica, Series 13, vol. 1, p. 1–72.
- Waagen, W., 1887, Salt-Range fossils. I.–*Productus*-limestone fossils. I.–Pisces–Cephalopoda. Plates. *Palaeontologia Indica*, *Series* 13, vol. 1, pls 1–6.
- Zittel, K. A. von, 1900, *Text-book of Paleontology* (translated and edited by Eastman, C. R.), vol. 1, 706 p. Macmillan and Co., Limited, London and New York.

Columenoceras kyushuense, a new species of Silurian cephalopod from the Gionyama Formation in the Kuraoka area, Miyazaki Prefecture, Southwest Japan

Shuji Niko

Department of Environmental Studies, Faculty of Integrated Arts and Sciences, Hiroshima University, Higashihiroshima 739-8521, Japan

Abstract: A new Ludlow (early late Silurian) species of geisonoceratid orthocerid, *Columenoceras kyushuense*, is described from the G3 Member of the Gionyama Formation in the Kuraoka area of Miyazaki Prefecture, Southwest Japan. The new species differs from other species of *Columenoceras* by a combination of its narrow siphuncle, smooth shell surface, and relatively short to short camerae. This is the first record of *Columenoceras* outside Variscan Europe. The present discovery provides a further confirmation about the existence of a faunal linking between the Kurosegawa Belt and peri-Gondwana.

Introduction

The first Silurian cephalopod from the Gionyama Formation in the Kurosegawa Belt, Southwest Japan was reported by Hamada (1961), who discovered a geisonoceratid orthocerid, *Geisonocerina*? sp. Subsequently, Niko (2024) added four orthocerid and three pseudorthocerid species for the assemblage. The present study describes below a previously unrecorded orthocerid from the formation as *Columenoceras kyushuense* sp. nov.

Systematic paleontology

Subclass Orthoceratoidea Teichert, 1967 Order Orthocerida Kuhn, 1940 Family Geisonoceratidae Zhuravleva, 1959 Genus **Columenoceras** Barskov, 1960 Type species. Orthoceras columen Barrande, 1868.

Columenoceras kyushuense sp. nov. Figures 1.1–1.10

Diagnosis. Species of *Columenoceras* with smooth shell surface and relatively short to short camerae indicating form ratios (see below for definition) of 2–5; siphuncle subcentral and narrow; siphuncular diameter ratios (ditto) approximately 0.1–0.2; connecting rings cylindrical to subcylindrical; septal necks orthochoanitic to suborthochoanitic, short, 0.4–0.5 mm; endosiphuncular deposits form continuous lining on ventral siphuncular wall.

Description. Conchs longiconic orthocones with gradual expansion, 5°-6°, and circular transverse sections; the holotype of imperfect phragmocone has 70 mm length and diameters of 8.5 mm near apical and 11 mm at adoral ends; the largest paratype (phragmocone, IGPS coll. cat. no. 112849) attains approximately 13 mm in diameter; no shell surface observable by matrix, but sections suggest it is smooth and lacks distinct ornamentations. Septa exhibit deep curvature and form relatively short to short camerae, whose approximate ratios (maximum diameter per length) are 2-3 in apical and 2.5-5 in adoral phragmocones; there are 2-5 camerae in length of corresponding conch diameter; sutures also are not observable, but they indicate oblique and inclined towards dorsum natures in longitudinal section. Siphuncle subcentral in position, situated between the conch center and the ventral margin; siphuncular position ratios (distance of central axis of siphuncle from ventral shell surface per corresponding conch diameter) are approximately 0.4; in apical phragmocone, siphuncular wall consists of orthochoanitic septal necks and cylindrical connecting rings, then they shift suborthochoanitic and weakly inflated subcylindrical forms in adoral portions; lengths of septal necks are short, 0.4-0.5 mm, throughout; diameters of connecting rings narrow, 0.8-0.9 mm in apical (holotype) and attaining 1.4 mm in adoral (paratype, IGPS coll. cat. no. 112849) phragmocones; siphuncular diameter ratios (maximum siphuncular diameter per corresponding conch diameter) are approximately 0.1-0.2; thickening and structural differentiation are not developed in connecting rings. Cameral deposits well-developed and differentiated



into episeptal-mural and hyposeptal types; endosiphuncular deposits initially form as partial deposits, then they fuse with adjacent ones to form continuous lining on ventral siphuncular wall.

Material examined and repository. Holotype, IGPS coll. cat. no. 112950. Paratypes, IGPS coll. cat. nos. 112849, 112850, 112951, 112952. In addition, two specimens (IGPS coll. cat. nos. 112953, 112954) are also assigned to *Columenoceras kyushuense* sp. nov. These specimens are reposited in the Tohoku University Museum, Sendai.

Occurrence: All specimens examined herein were recovered from float blocks of limestones derived from the Ludlow (lower upper Silurian) G3 Member of the Gionyama Formation. Collecting site is a river bed of the Gokase River in the Kuraoka area, Miyazaki Prefecture. (= locality 5 in Niko, 2024).

Etymology. The specific name is derived from Kyushu Island, in which the type locality is situated.

Discussion. Columenoceras kyushuense sp. nov. is well differentiated from the typical species assigned to the genus by the possession of a narrow siphuncle. For example, its siphuncular diameter ratios are approximately 0.1-0.2, whereas this ratio reaches approximately 0.3 in the type species, C. columen (Barrande, 1868, pl. 309, figs. 8-11). Only C. duponti (Barrande, 1866, pl. 212, figs. 5-8; 1868, pl. 285, figs. 1-17, pl. 324, figs. 7-10; 1870, pl. 394, figs. 1-4) from the upper Silurian of Bohemia, Czech Republic and C. grande (Meneghini, 1857, p. 189-191, pl. C, figs 4A, a, a'; Gnoli, 1987, p. 246–248, pl. 1, figs. 1, a, 2, a, 3, a, b, 4, 5) from the upper Wenlock (upper lower Silurian) of Sardinia, Italy possess the relatively narrow siphuncles for the genus. However, the former species has prominent transverse bands on the shell surface and cameral lengths of the latter one are longer than those of C. kyushuense and indicate 1.2-1.4 in form ratios.

Significance

It has been considered that *Columenoceras* is an endemic genus in Variscan Europe, including Bohemia, Sardinia, Carnic Alps and Western Pyrenees, (Gnoli, 2002) whose area was a constituent of peri-Gondwana (northern margin of Gondwana) during late Silurian time (i.e., Scotese, 2001; Franke and Żelaźniewicz, 2023). This study represents the first record of the genus outside Variscan Europe. The existence of a linking of the cephalopod fauna between the Kurosegawa Belt and peri-Gondwana has been pointed out by Niko *et al.* (2017) and ratified subsequently by Niko (2021, 2024). The present discovery of *Columenoceras* from the Gionyama Formation belonging the Kurosegawa lends further support to the thoughts.

Acknowledgements

I thank Yasuyoshi Hirata, who donated some important specimens used in this study. I also would like to thank Toshifumi Komatsu and Gengo Tanaka for their field assistances. Masayuki Ehiro kindly provided helpful comments on the manuscript.

References

- Barrande, J., 1866, Systême Silurien du Centre de la Bohême, Première Patie: Recherches Paléontologiques, Volume 2, Classe des Mollusques, Ordre des Céphalopodes, 2me série, pls.108–244, Prague and Paris.
- Barrande, J., 1868, Systême Silurien du Centre de la Bohême, Première Patie: Recherches Paléontologiques, Volume 2, Classe des Mollusques, Ordre des Céphalopodes, 3me série, pls. 245–350, Prague and Paris.
- Barrande, J., 1870, Systême Silurien du Centre de la Bohême, Première Patie: Recherches Paléontologiques, Volume 2, Classe des Mollusques, Ordre des Céphalopodes, 4me série, pls. 351–460, Prague and Paris.
- Barskov, I. S., 1960, Silurian and Devonian nautiloids from Southern Fergana. *Bulletenie Moskovskogo, Otdel Geologicheskii*, vol. 35, p. 153–154. (in Russian)
- Franke, W. and Żelaźniewicz, A., 2023, Variscan evolution of the Bohemia Massif (Central Europe): Fiction, facts and problems. *Gondwana Research*, vol. 124, p. 351–377.
- Gnoli, M., 1987, Revision and autecological remarks of the species Columenoceras grande (Meneghini, 1857) (Nautiloidea, Orthocerida). Bollettino della Società Paleontologica Italiana, vol. 26, p. 245–250, pl. 1.
- Gnoli, M., 2002, Northern Gondwanan Siluro-Devonian palaeogeography assessed by cephalopods. *Palaeontologia Electronica*, vol. 5, p. 1–19.

Hamada, T., 1961, The Middle Palaeozoic group of Japan and its

←

Figure 1. *Columenoceras kyushuense* sp. nov., thin sections. **1–3, 9.** Holotype, IGPS coll. cat. no. 112950: 1, longitudinal section, venter on right; 2, transverse section, venter down, arrow indicates siphuncle; 3, partial enlargement to show siphuncular structure; 9, partial enlargement to show siphuncular wall structure, arrow indicates septal neck. **4, 5.** Paratype, IGPS coll. cat. no. 112951: 4, longitudinal section; 5, partial enlargement to show siphuncular structure, arrow indicates cameral endosiphuncular deposits. **6.** Paratype, IGPS coll. cat. no. 112952, longitudinal section, arrow indicates cameral deposits. **7, 8.** Paratype, IGPS coll. cat. no. 112849: 7, longitudinal section; 8, partial enlargement to show siphuncular structure. **10.** Paratypes, IGPS coll. cat. no. 112850, longitudinal section, showing details of siphuncular wall, arrow indicate suborthochoanitic septal neck. Scale bar is 10 mm in 1, 4, 6, 7; 6 mm in 2, 3; 3 mm in 5, 8; 0.6 mm in 9, 10.

bearing on her geological history. *Journal of the Faculty of Science, the University of Tokyo, Section 2*, vol. 13, p. 1–79. Kuhn, O., 1940. *Paläozoologie in Tabellen*, 50 p. Fischer, Jena.

- Meneghini, G., 1857, Paléontologie de l'Ile de Sardaigne, In, La
- Marmora, A. *ed.*, *Voyage en Sarddigne*, p. 53–144, Imprimerie Royale, Turin.
- Niko, S., 2021, Late Silurian orthocerid cephalopods from the Suberidani Group, Tokushima Prefecture, Southwest Japan. *Bulletin of the Tohoku University Museum*, no. 20, p. 1–7.
- Niko, S., 2024, Silurian cephalopods from the Gionyama Formation in the Kuraoka area, Miyazaki Prefecture, Southwest Japan. *Bulletin of the Tohoku University Museum*, no. 23, p. 1–10.
- Niko, S, Sone, M. and Leman, M. S., 2017, Late Silurian cephalopods from Langkawi, Malaysia, with peri-Gondwanan

faunal affinity. Journal of Systematic Paleontology, vol. 16, p. 595–610.

- Scotese, C. R., 2001, Atlas of Earth History, Volume 1, Paleogeography, 52 p. PALEOMAP Project, Arlington, Texas.
- Teichert, C., 1967, Major features of cephalopod evolution. In, Teichert, C. and Yochelson, E. L. eds., Essays in Paleontology & Stratigraphy. R. C. Moore Commemorative Volume, Department of Geology, University of Kansas Special Publication 2, p. 162–210. The University Press of Kansas, Lawrence and London.
- Zhuravleva, F. A., 1959, On the family Michelinoceratidae Flower, 1945. *Materialy k Osnovam Paleontologii*, vol. 3, p. 47–48. (in Russian)

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¹⁴C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	graphi	sample		Gr	ain asse	mblage	(%)				Shap	e of gla	ss 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
	ĩ	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
E.	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	² ukano F	ormation									Tenjin F	ormation	
unit	tuff	vent	Moriya	asu 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	5	6		5		13	;	4		12	2	9		14	ţ
Oxide(wt.%)	mean s														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.												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, Fe	D*: total in	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		1	11		1)	16		18		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.

| ample | : | Grai | n asser | nblage | : (%) | | | | Shape

 | of gla | ss sha

 | ds (%) | | |
 | | | Ν | lafic m | ineral a | issemt | olage (S
 | %) | | |
 |
|-------|--|---|--|--|--|---|--|--
--
--
--|---
--
--
------------------------|---|--|---|---|--|---|--|---
--|--|--
---|---|---|---|
| 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
No.
7
8
9
6
5
4
2
3
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 assemblage (%) No. Gl Pl Qtz Mm WeGl 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 0.0 2.9 2 94.7 1.0 0.0 0.5 3.4 0.5 0.0 8.8 3 98.8 0.8 0.0 0.0 4.0 0.0 0.0 8.8 <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 1.0 2.19 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 0.0 0.0 3.2 15.1 7.5 8.5 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 5 84.8 1.7 12.6 0.4 0.0 0.0 4.6 18.8 30.2 10.0 34.4 48 81.6 8.1 2.7 0.4 7.2 0.0 0.0</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 1.0 2.19 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 0.0 0.0 3.2 15.1 7.5 8.5 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 5 84.8 1.7 12.6 0.4 0.0 0.0 4.6 18.8 30.2 10.0 34.4 48 81.6 8.1 2.7 0.4 7.2 0.0 0.0</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 1.0 2.19 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 0.0 0.0 3.2 15.1 7.5 8.5 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 5 84.8 1.7 12.6 0.4 0.0 0.0 4.6 18.8 30.2 10.0 34.4 48 81.6 8.1 2.7 0.4 7.2 0.0 0.0 | 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	wa Tuff				
unit	Lower	part		Uppe	r part		Lower	part	Upper	part	Lower	part			Upper	part			
lithology	pum	ice	pum	ice	black p	umice	piso	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	\$	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	1.38 0.21		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	normalized on water free, FeO*: total 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. SiO₂ - K₂O 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 K₂O 側 にプロットされる(Fig. 8, Table 2).SiO₂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K₂O側にプロットされる(Fig. 8、Table 2).SiO₂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 SiO₂ 量 76.5 ~ 77.3wt.% で、Medium-K 領域の低 K₂O 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K₂O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K₂O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 SiO2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.SiO2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 SiO2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. SiO₂ - K₂O 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 SiO₂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 K₂O 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, χ^2 検定で失格する. χ^2 値の大きいものから順に除外し, χ^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, X²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, X²検 定で失格する. X²値の大きい順に25粒子を除外したとこ ろで X²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、 χ^2 検定で失格する. χ^2 値の大 きい順に除外し、 χ^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χ²検定で失格する. χ²値の大きいものを順に除外し、χ²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 ⁻²)	N_s	p (cm	i 1 ⁻²)	N_i	ρ_d (×10 ⁴ cm ⁻²)	N_d	r	Pr(χ2) (%)	U (ppm)	Age±1 o (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 ±	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: $\lambda D = 1.55125 \times 10^{-10} \, yr^{-1}$

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

(9) error: $\sigma_T = T \times [1/\Sigma N_s + 1/\Sigma N_i + 1/\Sigma N_d + (\sigma_{q'}\zeta)^2]^{1/2}$

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.

遠刈田層(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:021) 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″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2~3cm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^2 検定で失格する. χ^2 検定に合格するところまで χ^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:021) 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). SiO₂ - K₂O 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,K₂O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 SiO₂ 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 SiO₂ 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 K₂O 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 K₂O 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K₂O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K₂O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(SiO₂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,SiO₂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 SiO₂に富むマグマから、天神前シルト岩部層 に相当するより SiO₂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 SiO₂ 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 SiO₂の乏しいマグマを噴出する時期と、再び、より分化し た SiO₂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.

熊本県大村横穴群の SfM 法による 3 次元計測 3-D measurement of Omura tunnel tomb group in Kumamoto Prefecture using SfM method

藤沢 敦 *・ 鹿納 晴尚 *・ 杉井 健 **

* 東北大学総合学術博物館 ** 熊本大学大学院人文社会科学研究部

Atsushi Fujisawa*, Harumasa Kano*, and Takeshi Sugii**

*The Tohoku University Museum, **Faculty of Humanities and Social Sciences, Kumamoto University

Abstract: Omura tunnel tomb group is located in Hitoyoshi City, Kumamoto Prefecture, and 26 tombs have been identified. In some of tunnel tombs, the walls next to the entrances show various designs in relief. They are estimated to have been built roughly in the 6th century. This site has always been in danger of cliff face collapse. It is important to conduct detailed 3D measurements to prepare for damage to this site caused by disasters. 3D measurements using the SfM method were conducted in FY2021 and FY2022 for the main part of the Omura tunnel tomb group, the area where seven tombs were built.

1. はじめに

近年相次ぐ地震や水害で文化財の被害が続いているが、 3次元計測データがあると、被害状況の把握、被災後の修復・ 復元の際に、大きな威力を発揮する。被害が集中している 石材で構築された文化財を対象に、保全を目的とした3次 元計測の標準を確立することを目的として、藤沢が研究代 表者となり、2020年度から文部科学省科学研究費助成事業 (基盤研究(A)・2020-2024年度)「石材構築文化財の保全 のための3次元デジタルアーカイブの標準化の研究」を実 施している¹⁾。この科研費による研究の一環として、2021 年度と2022年度に計測を実施した、熊本県人吉市に所在す る大村横穴群の計測成果を報告する²⁾。当該科研費での研 究で計測を実施した遺跡の報告は、準備が整ったものから、 順次行うこととしている³⁾。

なお本論は、1.3.6.7.を藤沢、2.を杉井、4.5. を鹿納・藤沢が分担して執筆した。

2. 大村横穴群について

横穴群の概要

大村横穴群は、熊本県人吉市城本町に所在する国史跡の 横穴群である。そこは、JR 肥薩線人吉駅のすぐ北側、人吉 盆地西端の球磨川の右岸である(図 1、図 2)。 大村横穴群は、横穴羨門外側の外壁面に装飾文様が浮き 彫りされていることで全国的に著名である。当横穴群の装 飾文様が広く知られるようになったのは、1917年(大正6) に発行された京都帝國大學文學部考古學研究報告第1冊『肥 後に於ける装飾ある古墳及横穴』(濱田1917)(以下、京大 報告)で報告されたことがきっかけであり、1921年(大正



図1 大村横穴群の位置 (国土地理院電子地形図を加工して作成)



図2 熊本県人吉盆地における古墳の分布(杉井編 2023 の図 39)
10)3月、「凝灰岩質ヨリ成レル丘陵ノ南側ニ穿タレタルモ ノニシテ現存セルモノ約二十餘個アリ横穴ノ外壁ニ各種ノ 装飾模様ヲ彫リ出セリ」の説明を付して国史跡に指定され た。

大村横穴群が営まれているのは、村山台地と呼ばれる独 立丘陵の南側崖面である。村山台地を構成するのは、約9 万年前の阿蘇4火砕流によって堆積した阿蘇溶結凝灰岩で、 その下位には湖沼堆積物である人吉層が存在する。横穴が 穿たれているのは、ほぼ垂直をなす阿蘇溶結凝灰岩の崖面 の下位である。現在、東西にのびるこの南側崖面の長さ約 800 mの範囲に、東西2 群に分かれて26 基の横穴の存在が 確認されている。横穴は、ほぼ同じ高さに横一列に並ぶ(図 3)。古くに開口し、出土遺物がわずかであることから、横 穴群が築かれた時期には不明な点が多いが、古墳時代後期、 6 世紀代を中心とした時期の築造であると推定されている。

横穴の数え方は京大報告のままとされ、東側から順に番 号が付されている。そのため、連続する番号が付された隣 接する横穴のあいだに新たな横穴の存在が確認された場合 には a、bの枝番が付される。西端のさらに西側に新たな横 穴が発見された場合は、続きの番号が付される。このよう にして号数の整理がなされており、現在確認できる 26 基に は 4 号から 27 号までの番号が与えられている(図 3)。こ れらのうち、東群は 4 号から 14 号までの 12 基、西群は 15a 号から 27 号までの 14 基である。なお、かつて東端部 に存在したと伝えられる 1 ~ 3 号は現在確認できない。

26基の横穴のうち装飾文様の存在が確認されているのは、 東群の4・5・6b・7・11・13・14号の7基と西群の15b号 の1基のあわせて8基である(人吉市教委編2018)。羨門 外側の外壁面に文様が刻まれることが特徴で、武器(刀剣・ 弓・鞆)、武具(靫・盾)、工具(刀子)、動物(馬)、幾何 学文(円文・三角文)が浮き彫りによって表現されている。 なお、15b号のみ、外壁面の靫・弓以外に、玄室奥壁や飾 り縁にも円文が刻まれている。

崖面崩落との戦い

阿蘇溶結凝灰岩は、軽石や火山灰などを含む火砕流堆積 物が高温のうちに溶けて結合し形成される。冷却の過程で 固化して形成されるため、火砕流が堆積する以前の地面や 堆積後の空気に触れる下位、上位よりも中位の方が高温を 維持しやすい。したがって、阿蘇溶結凝灰岩から成る台地は、 一般に下位から上位に向かって、非溶結部、低溶結部、強 溶結部、低溶結部、非溶結部と変化する。また、岩石は冷 却時に収縮するため、節理が発達する。大村横穴群が築か れた村山台地の阿蘇溶結凝灰岩も同様の性質を有しており、 横穴群のある南側崖面は節理面からの崩落をたびたび起こ してきた。

大村横穴群に関わる毀損履歴は、人吉市教育委員会によって整理されている(人吉市教委編2018:pp.77-81)。そこでは、

平成28年(2016年) 熊本地震による崩落までがまとめら れているが、それ以降でも、令和元年(2019年)7月の豪 雨の影響で7月3日には東群の東端部で大規模な崩落が、 同13日には東群と西群の中間地点で落石が発生した。さら に、球磨川の氾濫を引き起こした令和2年(2020年)7月 豪雨の際には、東群の5号横穴と6a号横穴のあいだの法面 が大規模に崩壊し、流れ出た土砂がJR肥薩線の線路にまで 達した。

近年の毀損のなかで、1996年6月発生の事案は、装飾横 穴の11号の下部が大規模に崩壊したもので(図4)、装飾 文様という大村横穴群におけるもっとも重要な本質的価値 を損ねるおそれがあるものであった。これに関しては、速 乾性固化剤を混ぜた砕石とセメントを積み上げて横穴を下 方から支えるという崩落防止工事が行われた。

このように、豪雨などによりたびたび崖面の崩落が発生 し、横穴および装飾文様にまで被害がおよぶ可能性が高く なっていた。そこで、1994 年度から、有識者による委員会 が設置され、文化庁や熊本県文化課からも指導を受けなが ら、計画的に保存修理事業が実施されるようになった。事 業は、装飾横穴が集中する東群から着手され、1994 ~ 2004 年度において崖面に長尺のアンカーを打設するなどの壁面 保存工事が実施された。くわえて見学者用の築堤の構築が 行われた。そして、2012 年度からは西群において事業が開 始され、それは現在も継続中である。

平成28年(2016年)熊本地震や令和2年(2020年)7 月豪雨などの大規模災害時、大村横穴群では少なからぬ被 害を受けた。そうした大規模災害時でなくても、近年の集 中豪雨は、大なり小なりの崖面崩落を引き起こしている。 東群では一通りの保存修理事業が完了したとはいえ、地球 の大地を相手にしているという点で、人の手による崩落防 止工事が万全であるとは誰も保証できない。自然はけっし て人為の及ぶところではない。

そのため、万一の事態に備えて、横穴や装飾文様の現状 を詳細な三次元データで記録しておくことの重要性は明ら かである。また、遺跡活用のうえでも三次元データはきわ めて有用なものとなる。たとえば、現在の見学者用の築堤 から横穴や装飾文様までは若干の距離があり、見学者がそ れらを間近に観察することは難しい状況にあるが、作成さ れた三次元データを利用すれば見学者の携帯端末(スマー トフォンなど)に横穴や装飾文様の三次元画像や動画を映 し出すことが可能になる。また、安全上の観点から立ち入 りが制限されている区域の横穴についても、携帯端末上で その様子をみることができるようになる。こうした工夫は、 市民が遺跡を知り、身近に感じることに直結する。大村横 穴群全体の三次元計測の実施は、急がれるべき重要な課題 であるといえるだろう。



図3 大村横穴群における横穴の配置(人吉市教委編 2018 の第6 図を改変)



(人吉市教委編 2018 の 84 頁掲載写真)図4 1996 年 6 月に発生した 11 号横穴下部の崖面崩落状況

3. 調査の目的

本科研費では、計測方法の検討を目的として、各年度に 数ヶ所の計測を実施している。計測対象遺跡の選定は、計 測方法の検討に合致することを基本としている。それに加 えて、近年の自然災害によって被害を受けた遺跡や、今後 の保全が懸念される遺跡を優先するとともに、被災した自 治体を支援することも目的として、対象を選択してきた。

近年、梅雨期をはじめとする集中豪雨で、毎年のように 各地で被害が発生している。2020年(令和2)の7月3日 から7月31日にかけて、日本付近に停滞した前線の影響か ら各地で大雨となり、人的被害や物的被害が発生した。気 象庁は、この一連の大雨について、「令和2年7月豪雨」と 名称を定めた。中でも7月3日から4日にかけて降り続い た豪雨は、球磨川水系に大規模な被害をもたらした⁴。この 豪雨による熊本県内の犠牲者65名の中で、50名が球磨川 流域の氾濫によると推測されている。人吉市では、球磨村 の25名に次ぐ、20名の犠牲者が出ている。球磨川は、各 所で氾濫が発生したが、人吉市の市街地でも、約518ha、 4,681 戸が浸水した。球磨川右岸側は、丘陵近くにある人吉 駅付近まで浸水域が広がった。本殿や拝殿などが国宝に指 定されている青井阿蘇神社も、4mを越える浸水高となっ た。人吉城石垣にも被害が及ぶなど、文化財も多くの被害 を受けた。上述のように、この豪雨によって、大村横穴群 東群の5号横穴と6a号横穴のあいだの法面が大規模に崩壊 し、流れ出た土砂がJR肥薩線の線路にまで達した。

 崖面崩壊の危機にさらされてきた大村横穴群の3次元計 測の必用性は、上述のように明確であり、直近の水害被害 に対する支援の意味も含めて、本科研費で取り組むべき課 題と考え、計測を実施することとした。将来の崩落の危険 性を考慮し、横穴だけでなく、崖面を広く計測することが 必要と考え、そのための方法的検討を兼ねることとした。

4. 調査の方法と経緯

現地視察と計測方法の検討

新型コロナ感染症が比較的落ち着いた 2021 年の 10 月 18 日に、藤沢・鹿納・杉井の 3 名で、大村横穴群の現地視察 と打合せを行った⁵⁾。人吉市教育委員会歴史文化課の担当者 の方々に立ち合っていただくとともに、九州での 3 次元計 測の実績が豊富な株式会社とっぺんの担当者にも同行いた だき、現地の状況を踏まえ計測方法などを検討した。

大村横穴群は広い範囲に分布していることから、今回の 計測は中心となる東群の、6a号から12号横穴が分布する 範囲を計測対象とすることとした(図 5-1)。ただし、6b 号 は入口が閉鎖されているため、内部の計測は行っていない。 そのため、7基の横穴を計測したこととなる。

横穴が分布する範囲より上部の崖面も、あわせて計測す ることが必要と判断した。当初は、横穴と上部の崖面を一 度に計測することを想定していた。しかし、2020年の水害 後、例年実施されてきた高所作業車を用いた除草作業が中 断しており、上部の崖面の計測には着手できない状態であっ た。そのため2021年度の計測は、横穴の分布する区域につ いて実施し、それより上部の崖面は、高所作業車による除 草作業が実施された後に、計測を行うこととした。SfM 法 による計測の有効性を検証することも兼ねて、株式会社とっ べんに SfM 法での計測を委託すると同時に、ハンディ3D スキャナでの計測を行い、比較検討することとした。

2021年度の計測

2021 年度の計測作業は、同年 12 月に実施した。SfM 法 による計測を委託した株式会社とっぺんによって、12 月 6 日から 8 日に、計測対象区域の草の除去などの清掃作業と、 基準点と標定点の設置と観測作業、SfM 用の撮影作業がな された(図 5-2)。基準点は横穴南側の道路などに設置され た既知点を使用し、見学用広場からトータルステーション を使用して、各横穴に設定した標定点を計測した(表 1)。 撮影した写真によるデータ解析、各横穴のデータの合成ま で、同社に委託した。

13日には、科研費関係者の藤沢・鹿納・杉井・田尻が合 流し、ハンディ3Dスキャナは東北大学から Artec Eva (図 5-3)、九州大学から Artec Space Spider (図 5-4)を持ち込み、 装飾部分を計測して比較データを取得した。Space Spider での計測にあたっては、九州大学の大学院生・学生諸氏の 多大なご協力を得た⁶。

現地での作業は14日にほぼ終了し、同日夕方には、東北 大学から持参したヘッドマウントディスプレイ Oculus を使 用して、福島県清戸廹横穴のデータでVR 体験を参加者で行 い、意見交換を行った。翌日の15日には、以前に作成され 保管されていたレプリカの計測も、九州大学チームで試み た。

Artec 社の2種類の3Dスキャナでの計測を試みたが、データの質を問題にする以前に、屋外作業での操作性に課題があることが明確になった。機器とPCを接続する同社のケーブルに由来すると考えられるが、接続が度々不安定となり、 円滑に作業を進めることが困難であった。機器の開発目的にも関わるものと推測されるが、屋外での作業には適合性が低いと評価せざるを得なかった。なおArtec Evaで計測したデータをもとに、11号横穴の装飾部分を、縮尺5分の1で、 3Dプリンターで造形することも、2021年度事業で試みた。

2022 年度の計測

横穴墓群より上部の崖面については、2022 年度に追加計 測を実施した。水害後中断していた、人吉市教育委員会に よる高所作業車を用いた除草作業が、2022 年度に再開され たことから、作業実施時期に合わせて計測を行った。

計測の実施に先立って、除草作業が始まった1月10日 に藤沢が現地に赴き、人吉市教育委員会の担当者の方々と、 除草作業の進捗予定を踏まえ、計測方法や実施時期などにつ いて協議した(図5-5)。2021年度の計測では、SfM法によ る計測を委託したため、今回も同様に行うこととした。SfM 法で使用する写真の撮影にあたっては、高い崖面の撮影が 必要となるため、ドローンを用いることとした。2021年度 に計測を委託した株式会社とっぺんで、これらの作業に対 応できることから、同社に委託することとした。

計測作業は、2月17日と18日の2日間で実施した。基準となる評定点の観測(表1)と、ドローン(DJI Mavic3 Classic)による写真撮影を行っていただき(図5-6)、データ解析、2021年度計測成果との合成も委託した。作業の実施の際には、人吉市教育委員会の方に立ち会っていただき、安全確保に努めた。

5. 計測データの加工

計測で取得したデータ

2021 年度の横穴分布範囲の計測にあたっては、できる だけ横穴表面の情報を得るため、細かく写真を撮影してい ただいたことから、撮影して使用した写真の枚数 3,428 枚、 解析後の総数点は約 11.5 億点となった。

2022 年度の崖面部分は、ドローンを用いた撮影のため写 真の数が限定されることと、自然の岩盤のため、人工的な 加工が施された横穴部分ほどの解像度を必要としないこと から、新たに撮影し使用した写真の枚数は 260 枚となった。 2021 年度の撮影枚数と合わせて 3,678 枚の写真を使用し、 解像度を落として合成し約 2.9 億点のデータとなった。

正射投影図の作成

東北大学総合学術博物館では、特定のソフトウエアに依存しない形で3次元データを保存するために、X・Y・Zの座標値とRGBデータによる、色付き点群データとして保存し利用する方法を採用している。一方、考古学的データとして、学術的検討に供する方法は、本報告を含めて、2次元の図面として調査報告を作成することが一般的である。そのため、3次元データをもとに、正射投影画像を作成する必要がある。

2022 年度で計測作業が完了したため、2023 年度に報告 用の正射投影図の作成を委託する計画であった。しかし全 体の経費との関係で、次に示す全体の正射投影図の作成の みを、2024 年度に株式会社とっぺんに委託することとした。



 1. 大村横穴群東群の現状(2021 年 12 月 13 日・横穴 周囲の除草実施後の状況)



2. 標定点用の新設基準点 TP1 設置状況



3. ハンディ 3D スキャナ(Artec Eva)での7 号横穴の 計測状況



 ハンディ 3 D スキャナ(Artec Space Spider)での 11 号横穴の計測状況



5. クレーン車を用いた除草作業(2023年1月10日)



6. 撮影用ドローンの準備作業

図5 大村横穴群の現状と作業状況

藤沢敦・鹿納晴尚・杉井健

表1 大村横穴群基準点・標定点一覧

					世界測地系・第Ⅱ座標系
場所	点名	Х	Y	Z	備考
		2021年度事業	基準点・標定点		
道路	TO-1	-86830.875	-23156.623	107.370	既知点
道路	TO-2	-86816.529	-23131.672	107.691	既知点
	TS-2	-86790.201	-23082.026	107.230	既知点
見学場所	TP1	-86818.481	-23172.773	110.607	新設点
外 (9 号付近)	target 8	-86801.576	-23187.603	115.503	標定点
7号	target 23	-86798.875	-23182.812	116.357	標定点
外 (7 号付近)	target 24	-86800.396	-23182.847	113.934	標定点
10 号	target 25	-86807.184	-23198.678	115.137	標定点
外 (12 号付近)	target 26	-86813.357	-23205.904	116.338	標定点
11 号	target 33	-86807.319	-23202.45	115.516	標定点
6a	target 41	-86794.363	-23175.767	117.570	標定点
11 号	target 47	-86808.191	-23200.299	115.370	標定点
9号	target 54	-86800.305	-23188.917	116.049	標定点
9号	target 55	-86801.256	-23190.713	116.000	標定点
外(10号付近)	target 61	-86807.248	-23197.202	116.655	標定点
10 号	target 68	-86805.125	-23199.228	189.714	標定点
外(6a 号先)	target 76	-86793.793	-23171.808	115.336	標定点
外 (6a 号付近)	target 77	-86795.738	-23175.042	115.133	標定点
外(6a 号付近)	target 78	-86792.822	-23175.838	118.227	標定点
7号	target 83	-86797.515	-23182.878	117.200	標定点
外 (9 号付近)	target 84	-86803.226	-23189.211	113.626	標定点
8号	target 85	-86800.691	-23185.398	115.526	標定点
外 (6a 号先)	target 86	-86793.595	-23171.787	117.259	標定点
8号	target 87	-86798.649	-23186.973	116.373	標定点
外 (9-10 号)	target 120	-86805.784	-23194.314	114.177	標定点
外(6a-7号)	target 167	-86796.464	-23177.5	116.697	標定点
外(12 号付近)	target 180	-86809.733	-23202.444	116.993	標定点
外 (8 号付近)	target 223	-86801.621	-23184.985	113.576	標定点
外 (6a 号先)	target 232	-86791.444	-23166.307	117.052	標定点
外(6a 号先)	target 240	-86791.886	-23166.208	115.614	標定点
外(12 号付近)	target 265	-86811.135	-23203.855	114.742	標定点
外(6a-7号)	target 269	-86797.744	-23178.674	114.510	標定点
	2	022 年度事業 標定点(基準点は 2021 年度と同じ)	
外壁下部(マーカー)	tagret 290	-86815.591	-23208.826	116.679	標定点
外壁下部(マーカー)	tagret 238	-86810.326	-23202.714	117.100	標定点
外壁下部(マーカー)	tagret 209	-86807.053	-23196.778	116.727	標定点
外壁下部(マーカー)	tagret 281	-86803.323	-23191.160	116.236	標定点
外壁下部(マーカー)	tagret 270	-86794.270	-23174.876	117.574	標定点
外壁下部(マーカー)	tagret 102	-86792.152	-23168.621	117.727	標定点
外壁下部(マーカー)	tagret 279	-86787.762	-23161.948	118.373	標定点
外壁上部(特徴点)	P1	-86815.331	-23208.142	123.144	標定点
外壁上部(特徴点)	P2	-86809.943	-23200.929	125.918	標定点
外壁上部(特徴点)	P3	-86805.921	-23196.236	124.152	標定点
外壁上部(特徴点)	P4	-86802.087	-23191.967	124.101	標定点
外壁上部(特徴点)	P5	-86795.691	-23179.566	127.085	標定点
外壁上部(特徴点)	P6	-86791.150	-23170.069	125.411	標定点
外壁上部(特徴点)	P7	-86786.561	-23161.546	124.598	標定点
外壁上部(特徴点)	P8	-86797.744	-23185.625	127,127	標定点

全体投影図の作成にあたっては、計測範囲の両端に投影 基準点を設定し、側面と平面の投影図を作成した。側面は、 基準点を結んだ面に投影することで作成できる(図6)。平 面は、どの高さから投影するかによって、形状などは異なっ ていく。横穴の構築された位置は、高低差があり一定では ない。崖面の形状も、標高によって変化していく。各横穴 の形状を示せるように、それぞれ抽出してつなぎ合わせる 作業を行って示すこととした(図7)。

一方、横穴ごとの正射投影図は、鹿納が担当して作成した。 フリーソフトウエアの Blender 4.1(以下 Blender)を使用 して書き出しを行った⁷⁾。Blender を用いた作業手順などは、 別に詳述する予定のため、ここでは詳細は省略し、作業の 要点のみを述べる。

最初に、各横穴の平面形状から軸線を設定する。軸線を 基準面に、左側と右側を投影した画像を作成した⁸⁾。入口を 外側から見た画像は、軸線に沿って投影し、内側に見える 奥壁は消去している。玄室の中ほどを基準に、横断面形を 示す面を、軸線に直角に交差する方向で設定し、そこから 奥壁側の投影図と入口側の投影図を作成した。床面と天井 を見上げた投影図は、玄室内の構造や羨道が入る高さで投 影面を設定した。

床面の正射投影図に顕著に現れているが、断面のライン の外側に、後ろの部分の壁の裏面が見える場合がある。通 常は、断面ラインと内側の投影部分の関係が判りづらくな るため、断面ラインの外側は、全て消去して示すことが多い。 しかし今回は、外側に見える裏面を、あえて消去しないで 示した。

3次元計測データから床面の正射投影図を作成する際、 ある一定の高さで切断し、そこから下側を投影した図を作 成することが、もっとも簡単である。その際、床面や羨道 などの一番高い所に、切断面を合わせる必要がある。切断 面と床面の低い部分との高低差が大きいと、切断面とのず れが大きくなることがある。壁面の傾斜がある場合は、床 面の輪郭が切断面の断面ラインより外側まで出てしまい、 その部分は示せないこととなる。この問題を解消するには、 切断する高さを細かく変化させて作成するか、床面のライ ンを手作業で拾うなどの作業が必要となり、非常に多くの 手間を有することとなる。大村横穴は、床面から直立せず に傾斜して壁が立ち上がるため、影響が大きくなる。今回 は時間的制約もあり、投影面は一定の高さのままとし、投 影面の断面より外側に見える裏面を、あえて消去しないで 示し、床面の広がりが判るようにした。軸線に沿った投影 図でも、一部が断面から外側にでるため、同じように外側 に見える裏面を、あえて消去しないで示した。断面のライ ンは、わかりやすいように、陰影図にカラー情報を加えた ものは白線で、陰影図のものものは黒線で示した。

陰影画像の作成

陰影画像も、Blenderを用いて書き出した。3 次元データ から 2 次元画像とする際に、凹凸を表現する方法は、様々 な方法がある。今回は、仲林篤史が遺物を対象に提案した、 Blenderを用いて陰影を強調する方法(仲林 2023)を参考 にして、より簡略化した方法で作成した。

Blenderで頂点色付きメッシュデータから画像出力 (レンダリング) する際に使用したレンダーエンジンは Workbench である。レンダリングプロパティは以下のと おりである。照明は MatCap を選択し、投影面に平行する 面は明るく、そこから傾斜が強くなるほど暗く表現する方 法を選択する。特定の方向から光をあて陰影を付ける表現 方法ではないため、カメラから見た傾きを同じように表現 することができる。カラーの選択は、マテリアルにすると 傾斜がグレースケールで表示され、属性にすると色情報に 傾斜の明暗を乗算した表示となる。同じカメラでカラーを マテリアルと属性で切り替えると、2種類の画像を簡単に 出力することができる。次にオプションでキャビティーに チェックを入れ、タイプは両方(ワールドとスクリーン) を選ぶ。ワールドとスクリーンで尾根と谷の係数を設定で きるようになるので、それぞれを最大値に設定した。カラー マネジメントで露出とガンマを調整して、強調したい特徴 が出るような設定にする。このような設定でレンダリング することで、横穴の切削痕などの特徴を表現できる。

6. 計測成果について

上記のような作業を行って作成した各横穴の正射投影画 像を、Adobe illustrator ヘ埋め込み配置し、床面、天井面に は座標値を、各種展開面は標高値の入力を行った。図8か ら図23に、各横穴の展開図として配置したものを示す。天 井を見上げた図面は、公共座標値が裏返った状態となるの で、ご留意いただきたい。縮尺は40分の1に統一し、カラー 情報を入れたものと、陰影画像だけのものの2種類をそれ ぞれ示した。壁面の凹凸などを示すためには、本来は20分 の1より大きな縮尺の方が望ましいが、紙幅の関係で、や むを得ず40分の1とした。

各横穴を示す展開図とは別に、7号と11号については、 外側の装飾部分を拡大した、縮尺20分の1の正射投影図を 示した。カラー情報を入れたものと、陰影画像だけのもの の2種類をそれぞれ示した(図22~24)。

今回試みた陰影の表現は、投影面に平行な面は明るく表 現され、そこからの傾斜に応じて、暗く表現される。大村 横穴の装飾は、浮き彫り状に掘り出されたものであり、表 現されるモチーフは、平坦な面として作られている。その ため、今回の陰影画像の表現方法は、適したものであると 評価できると考えられる。



図 6 大村横穴群東群側面正射投影図





図8 大村横穴群 6a 号横穴展開図 (カラー・陰影図)



















図16 大村横穴群10号横穴展開図(カラー・陰影図)





図18 大村横穴群11号横穴展開図(カラー・陰影図)





図 20 大村横穴群 12 号横穴展開図(カラー・陰影図)









7.まとめ

今回の計測では、横穴群の広範囲を対象として、SfM 法 で計測することを試行した。委託をした株式会社とっぺん の担当者が、詳細な部分まで図化できるように、撮影を工 夫してくださったことによって、解像度も充分高い3次元 データを得ることができたと言える。特に、横穴内に見え る亀裂については、想定していた以上に、深い部分まで図 化することができた。亀裂の深い部分まで図化するために は、撮影方向や枚数、照明方法をかなり工夫する必要がある。 担当者の努力によるところが大きいことを明記しておきた い。

図 25 は、2021 年度データをもとに、裏面から見た状態 を示したものである⁹。崖のなかから見た状態を示してお り、現実には見ることができない、3次元計測データだけ で見ることができる画像となっている。9号横穴から7号 横穴にかけて、亀裂が一連の位置でつながっていく様子が 見て取れるであろう。亀裂を深くまで図化できたことによっ て、このような画像を得ることができた。この画像を見ると、 大村横穴群の亀裂が連続した大規模なものであり、崩壊の 危険が極めて高い、深刻な問題であることが一目瞭然であ る。1994 ~ 2004 年度に実施された長尺アンカー打設をは じめとする保存工事が、いかに重要であったことが理解で きる。このような危険性を示すためにも、3次元計測が有 効であることが示せたと言えるであろう。



図 25 6a 号~9号を背面から見た画像

これは、万一の事態に備えたデータ取得という主要な目 的に加えて、さまざまな利点があることの一端を示すもの と言えよう。今回は、計測成果の報告を中心としたため、 装飾や横穴壁面の加工痕跡の検討、亀裂の問題など、詳細 な分析までは行えていない。遺跡の活用にあたっての3次 元データ利用も重要な課題である。今後、多方面で、このデー タが活用されることを期待したい。

※本論には、日本学術振興会(JSPS)科研費20H00019「石 材構築文化財の保全のための3次元デジタルアーカイブ の標準化の研究」(基盤研究A・2020~2024年度・研究 代表者藤沢敦)による研究成果を含みます。

謝辞

今回の計測では、人吉市教育委員会歴史文化課の各氏に は、多大なご協力をいただいた。現地での計測作業と、計 測データの加工を担当いただいた株式会社とっぺんには、 様々な面倒な依頼にも丁寧な対応をしていただいた。ここ にあらためて感謝したい。

註

- 本科研費での研究については、WEBページを作成し、その概要を紹介しているので参照されたい。 https://webdb1.museum.tohoku.ac.jp/index.html
- 2) 横穴の呼称には、横穴や横穴墓など複数がある。ここでは、 史跡指定名称である「大村横穴群」を使用する。
- 3)本科研費で計測した成果で、これまでに報告しているの は、次のとおりである。
 - ・福島県双葉町清戸廹横穴:東北大学総長裁量経費を利用 して 2016 年度に計測。光学式非接触ハイエンド 3D ス キャナである SmartSCAN-HE を使用。計測成果の整理 等に本科研費を利用。藤沢・鹿納・吉野・小池 2023。
 - ・東北大学正門・小川記念園:2020年度に SfM 法で計測。 鹿納・藤沢 2021。
 - ・宮城県名取市経の塚古墳出土長持形石棺: 2021 年度シン技術コンサルの協力で計測。藤沢・大橋 2023。
 - ・福島県須賀川市前田川大塚古墳石室:2022年度計測の 成果を菊地ほか 2023 で報告。2023年度に SfM 法で再 計測。再計測成果は、菊地ほか 2024 で報告。
 - ・福岡県朝倉市湯の隈古墳石室:2022 年度に SfM 法で計 測。藤沢・鹿納・田尻・志村 2024
- 4) 2020年7月の球磨川水害については、国土交通省九州整備局八代河川国道事務所によるWEBページ『令和2年7月豪雨球磨川水害伝承記~後代に残す記録~』を参照した。

https://kumariver-r0207archive.jp/

- 5) 10月18日の現地での検討の際には、熊本県教育委員会 で3次元計測を進めておられる方も現地にお越し頂き、 有益な意見交換ができた。大村横穴群の視察後は、水害 による人吉城跡の石垣などの被害状況の視察を行うこと ができた。また人吉市に伺う前には、熊本市の塚原古墳 群において、熊本地震での被害状況を視察し、熊本市の 担当者の方々にご説明いただいた。いずれにおいても、 文化財の保全のために3次元計測が有効であることを、 あらためて知る機会となった。ご協力いただいた方々に、 深く感謝する次第である。
- 6)調査中には、熊本県教育委員会の有志の方々や、熊本県 内の文化財保護行政関係者の方も現地にお越し頂き、有 益な意見交換ができた。ご協力いただいた方々に、深く 感謝したい。
- 7) The Blender Foundation, https://www.blender.org/
- 8) 横穴式石室などでは、奥から玄門側を見て、左右を示す ことが一般的である。一方、入口側から奥壁側を見た際 の方向で表現した方が記載しやすい場合もある。今回は、 奥壁側を見た方向を基準に、左壁、右壁とする。
- 9) 東北大学総合学術博物館では、大量の色付き点群データ を取り扱うために、エリジオン社の大規模点群加エソフ トである InfiPoints を導入し、合成処理、ノイズ処理、軽 量化処理などの各種加工を行っている。図 25 に示した画 像は、InfiPointsのビューワーで 2021 年度データを表示 させた画像を、キャプチャーし加工したものである。

引用・参考文献

- 鹿納晴尚・藤沢敦 2021「小型ドローンを利用した SfM 法に よる屋外構造物の 3 次元計測」『Bulletin of the Tohoku University Museum』No. 20、67 ~ 78 頁、東北大学総 合学術博物館
- 菊地芳朗ほか 2023『前田川大塚古墳 1・大仏古墳群 1』福 島大学考古学研究報告第 16 集
- 菊地芳朗ほか 2024『前田川大塚古墳 2・大仏古墳群 2』 福 島大学考古学研究報告第 17 集
- 小林行雄編1964『装飾古墳』平凡社
- 杉井健編 2023『ドローンによる空撮写真を用いた熊本県球 磨郡錦町四ツ塚古墳群の測量調査-その成果、手順、 課題-』熊本大学文学部
- 高木正文 1984「大村横穴墓群」『熊本県装飾古墳総合調査 報告』熊本県文化財調査報告第 68 集、344 ~ 355 頁、 熊本県教育委員会
- 仲林篤史 2023「古代瓦の三次元データを用いたシェーディ ング処理の検討」『デジタル技術による文化財情報の記 録と利活用 5』奈良文化財研究所研究報告 37、75 ~ 90 頁、独立行政法人国立文化財機構奈良文化財研究所
- 濱田耕作 1917「球磨郡大村城ヶ下横穴群」『肥後に於ける 装飾ある古墳及横穴』京都帝國大學文學部考古學研究 報告第1冊、48~54頁、京都帝國大學
- 人吉市教育委員会編 2018 『史跡大村横穴群保存活用計画書』 人吉市教育委員会
- 藤沢敦・鹿納晴尚・吉野高光・小池雄利亜 2023「福島県清 戸廹横穴の高精細 3 次元計測」『Bulletin of the Tohoku University Museum』No. 22、7 ~ 38 頁、東北大学総合 学術博物館
- 藤沢敦・大橋葵2023「経の塚古墳と東北の埴輪」『国家形 成期におけるヤマト政権と地域権力の相互関係の再定 義-東北地方を中心に-』科研費報告書、35~44頁、 福島大学行政政策学類
- 藤沢敦・鹿納晴尚・田尻義了・志村将直 2024「福岡県湯 の隈古墳の高精細 3 次元計測」『Bulletin of the Tohoku University Museum』No. 23、7 ~ 38 頁、東北大学総合 学術博物館

福島県中田横穴の高精細3次元計測

High-resolution 3-D measurement of Nakata tunnel tomb in Fukushima Prefecture

藤沢 敦 * • 鹿納 晴尚 * • 菊地 芳朗 ** • 志村 将直 ***

* 東北大学総合学術博物館 ** 福島大学 *** シン技術コンサル

• Atsushi Fujisawa*, Harumasa Kano*, Yoshio Kikuchi** and Masanao Shimura***

*The Tohoku University Museum, **Fukushima University, ***SHIN ENGINEERING CONSULTANT CO. LTD.

Abstract: Nakata tunnel tomb, located in Iwaki City, Fukushima Prefecture, has mural-paintings of continuous triangular pattern. It was constructed in end of the 6th century. In view of its importance, it has been designated as a national historic site. As part of our Grant-in-Aid for Scientific Research project, 3D measurements of Nakata tunnel tomb were conducted in 2021. Because tool marks and thin line engravings were found on the wall, we used the SmartSCAN-HE, an optical, non-contact, high-end 3D scanner, to obtain detailed data. The floor inside the tomb was measured by photo analysis of the Structure from Motion (SfM) method, and the outside of the tomb was measured with a terrestrial laser scanner. These three types of data were merged. High-resolution measurements allowed us to identify detailed features.

1. はじめに

東日本大震災以降も、相次ぐ地震や水害で、日本各地で 文化財の被害が続いている。特に古墳石室や城郭石垣など の石材で構築された文化財では、被害が目立つ。これらの 文化財が被災した場合、3次元計測データがあると、被害 状況の把握、被災後の修復・復元の際に、大きな威力を発 揮する。様々な特質を有した石材で構築された文化財を対 象に、保全を目的とした3次元計測の標準を確立すること を目的として、藤沢が研究代表者となり、2020年度から文 部科学省科学研究費助成事業(基盤研究(A)・2020-2024 年度)「石材構築文化財の保全のための3次元デジタルアー カイブの標準化の研究」を実施している¹¹。この科研費によ る研究の一環として、2021年度に計測を実施した、福島県 いわき市に所在する中田横穴の計測成果を報告する²¹。当該 科研費での研究で計測を実施した遺跡の報告は、準備が整っ たものから、順次行うこととしている³。

なお本論は、1.3.6.7.を藤沢、2.を菊地、4.を 鹿納・藤沢、5.を志村・鹿納・藤沢が分担して執筆した。

2. 中田横穴について

横穴の構造

中田横穴(以下「本横穴」)は、福島県いわき市平沼ノ内 に所在する。いわき市中心部の南東約8km、現海岸線の西約 1km、海岸沿いに延びる低丘陵の西斜面に位置する(図1)。 周辺には重要文化財「天冠埴輪」等が出土した神谷作101 号墳、多数の優れた副葬品が出土した八幡横穴群、古代磐 城郡衙である根岸遺跡など、古墳時代後期から奈良・平安 時代の重要遺跡が集中し、この地がいわき地域のみならず 東北南部・北関東における拠点地域の一つであったことが 容易に推察される。

本横穴は、1969年1月、道路工事中に偶然確認され、た だちに発掘調査が行われた。北西向き斜面に掘られた6基 以上からなる横穴群の1基(1号横穴)であり、群中で最も 低い位置に構築され、一部に礫岩を狭在する細粒の凝灰質 砂岩からなる新第三系高久層群下高久層(須貝ほか1957) に掘り込まれている。

本横穴の最も大きな特徴は、整美な装飾壁画をもつこと であり、これにより「中田装飾横穴」の名でも知られる。 東日本では数少ない装飾古墳の一つであり、調査後間もな い1969年5月に国史跡に指定された。現在は横穴の入口外 側にガラス扉と保護室が設置され、横穴内部に直接日光や



⁽いわき市埋蔵文化財調査報告第180冊第5図を参照し国土地理院電子地図を加工して作成) 図1 中田横穴の位置と周辺の古墳・横穴墓

外気が入り込まない措置が取られている。

本横穴は、副室構造をもち、装飾壁画や副葬品のみならず、 構造と規模においても非常に優れたものである(図2)。羨 門部端から後室奥壁までの全長が6.67 mをはかり、主軸は N64°Wで西北西に入口を向ける。以下それぞれの空間の記 述において、報告書にしたがい、奥側から順に「後室」、「前 室」、「羨門部」、「前庭部」と呼称する(渡辺ほか1971)。 各部の規模と形態は、つぎのとおりである。

後室:長さ2.6m、最大幅2.8m、高さ2.28m、平面隅丸 正方形、天井ドーム形

前室:長さ 2.0 m、最大幅 2.2 m、高さ 1.85 m、平面奥 側の広い不整方形、天井アーチ形

 羨門部:長さ 1.1m、最大幅 1.8m、平面逆台形(天井の 高さ・形状不明)。

前庭部:長さ1.3m、幅6.8 m以上、羨門部床面から1.1m 下位に設けられ、地山上に下から順に人頭大の凝灰質砂岩 礫、拳大の河原石、木炭、灰が敷かれる。

各室の間は、幅と高さを減じて門状になっており、その 外側に板石を用いて閉塞するための溝が掘られている。た だし、不時発見により閉塞の状況は不明確であった。また、 後室門(玄門)と羨門部の中央には排水用とみられる溝が 掘られ、後室には壁面全面の上半部に30個以上の小孔がみ られる。後者の小孔は壁画完成後に穿たれ、壁画上方に布 を張って天井を装飾した際の痕跡と推定されている。

横穴は一般に主軸に対称となる平面形状をもつが、本横 穴は入口側からみて後室が右側(南側)に偏る特異な形状 を呈する⁴。これは、後室左壁(北壁)の予定箇所に表面が 茶褐色の大きさが数10 cm~1m程のコンクリーション (周囲の地層と異なる組成により球状に硬く発達したもの・ ノジュールとも言う)が存在したため、やむなく掘削が変 更された結果であり、当初から意図されていたものではな いと考えるのが自然である。

壁画の特徴

本横穴の壁画は、後室のみにあり、四周の壁面全面に描 かれる。主要なモチーフは、水平に引かれた4本の赤線の 間に赤色顔料で3段に描かれた連続三角文である。各段の 三角形はほぼ同大であるが、詳細に見ると正三角形のもの、 二等辺三角形のもの、頂点がないものなど一様ではない。

上段の三角文は下向き、中段と下段は上向きに描かれ、 さらに奥壁では、赤彩されていない部分の三角形の上段と 中段に白色顔料が塗られ、白色の連続三角文となっている。 のちの分析により、赤色顔料はベンガラ、白色顔料は白土 (カオリナイト)と判明している(江本 1975)。後室床面に も赤色顔料が認められるものの、部分による濃淡の差が大 きく、その意図やモチーフは明確でなかった。

中段と下段の赤彩三角文は、頂点と下辺の位置を揃えて いるが、上段の赤彩三角文は、中段の赤彩三角文と頂点の 位置を一致させず、中段三角文の下辺端にあたる場所に上 段の三角形の頂点が位置するよう、ずらして描かれている。 これにより赤彩されない上段と中段の三角文が鋸歯文に見 えるようになり、特に奥壁では白色顔料が塗られたことで コントラストが鮮明となり、高い視覚的効果が与えられる ことになっている。

後室入口上部には、以上と異なる表現の壁画が認められ る。玄門天井に接して4個(あるいは5個)の大小の上向 き赤彩三角文が描かれ、さらにその上に2本の赤色弧線が 引かれ、弧線間に赤線による鋸歯文が充填されている。三 角文と鋸歯文どうしに特段の部位の一致は認められない。

壁画の基本的構成は以上のとおりだが、各所に不統一や 乱れがみられる。顕著なのは白色顔料で、奥壁の上段と下 段の三角形のみに塗られ、奥壁下段とその他の壁にはみら れない。また、下段の赤彩三角文は壁面を全周しておらず、 奥壁と北壁では三角の輪郭線のみが引かれるものや、線が 辺の途中までしか引かれていないものがある。北壁ではコ ンクリーションにより三角の形が十分に表されていない箇 所が目立つ。さらに、多くの箇所で彩色三角形の輪郭と一 致して刻線による三角形が書かれており、彩色に先立って 刻線で文様の割付が行われたことを推測させるが、線刻が 書かれない部分や重複して書かれた部分がある。

以上の壁画構成からは、本横穴の壁画が任意で描かれた のでなく、あらかじめ用意された設計企画をもとに制作さ れたものであることを強く推測させる。一方で、上記の不 統一や乱れは、実際の横穴掘削と描画にあたり、状況に応 じて臨機応変に当初設計を変更したことや、描画者の迷い・ 混乱のようなものもうかがうことができる。この規格性と 随意性が、逆に壁画の芸術性や呪術性を高めることにつな がっているとみることもできるであろう。

出土遺物と被葬者

本横穴では、ほぼ全範囲から多種・多数の遺物が出土し、 その内容は同時期の大型前方後円墳の副葬品に匹敵する。 ただし、遺物の大半は本来の形状をとどめず、位置や全部 品が揃わないバラバラの状態で出土し、その意味は十分に 明らかになっていない。遺物の種類・数は、つぎのとおり である。

装身具:勾玉32,管玉1、棗玉10、ガラス玉336、 銅釧2、耳環3

鏡:珠文鏡1

武器・武具:大刀2ないし3、鉾2、弓、鉄鏃65以上、 刀子10、札甲1組、他

馬具:金銅装馬具1組?

土器:土師器片 5、須恵器提瓶 1、須恵器甕 2

その他:銅鋺蓋1、砥石1、紡錘車1、木片

これらは、東北のみならず日本列島の横穴全体でみても 非常に豊富な副葬品群といえ、後期大型前方後円墳のそれ



図2 中田横穴実測図





と多少の違いが生じている。

(調査報告書第27図より・一部改変)

図3 中田横穴壁画実測図

と共通することとあわせ、高位の人物がここに葬られたことを物語る。

副葬品の乱れが大きかったことや、人骨がごくわずかし か出土しなかったことにより、被葬者の正確な数は判明し ていないが、報告書では1人と推定されている。副葬品の 数と組み合わせは、1人の被葬者にともなうものとみても矛 盾はない。一方で、副葬品の著しい乱れは、埋葬・副葬後 にこれらが大きく動かされたことをしめしており、追葬と 関係があるか否かが問題として残されている。

横穴についてのまとめ

本横穴の年代は、副葬品をもとにすると古墳時代後期後 ~末葉(紀元後6世紀末)と考えるのが妥当であり、東北 では古い段階の横穴の一つに数えられる。横穴そのものの 規模の大きさ、副葬品の高い質と数、装飾壁画という本横 穴の特徴に匹敵する内容をもつ横穴は、いわき地域のみな らず東北・関東にも認められず、極めて高位の人物がここ に葬られたことが明らかである。

本横穴の主要な壁画モチーフである連続三角文は、神谷 作101号墳出土埴輪などいわき地域の形象埴輪に採用され るとともに、茨城県ひたちなか市虎塚古墳(墳長 57m の前 方後円墳)等の装飾壁画にも認められる。このことは、古 墳時代後期のいわき~茨城県北部(常磐地域)において、 連続三角文を高位の人物の墓の要素として採用する心的共 通性や葬送儀礼が存在したこととともに、この地域が一定 の政治的・社会的なまとまりを有していたことを示唆する。

いわき地域では、本横穴と同時期の墳丘をもつ古墳、と りわけ優れた内容をもつものが十分に把握されていないと いう問題も残るが、以上をふまえると、本横穴の被葬者は、 6世紀後半に活躍した常磐地域の最有力首長であり、間もな く成立する古代磐城郡に向かう政治的・社会的変化を主導 する役割を果たした人物と推定するのが適当と考えられる。

3. 調査の目的

本科研費での研究では、計測方法の検討を目的として、 各年度に数ヶ所の計測を実施している。計測対象遺跡の選 定は、計測方法の検討に合致することを基本としている。 それに加えて、近年の自然災害によって被害を受けた遺跡 や、今後の保全が懸念される遺跡を優先するとともに、被 災した自治体を支援することも目的として、計測対象を選 択してきた。

東北地方の中でも福島県と宮城県は、6世紀末から7世 紀にかけて、極めて多数の横穴墓が築造された地域である。 それらの中には、彩色や線刻で装飾を施すものが比較的集 中することが知られているが(図4)、横穴墓全体の数から 見ると、極めて限られた割合にとどまる。線刻による横穴 墓が過半以上を占めることから、彩色による装飾を有する ものは、極めて希少である。

これら東北地方の彩色による装飾を有する横穴墓のほと んどは、単純な直線・円文・珠文などを描くものである。 それらの中にあって、福島県内陸部の泉崎村泉崎横穴(福 島 1983)、沿岸部の南相馬市羽山横穴(渡辺ほか 1974)と 双葉町清戸廹横穴(西ほか1985)の3ヶ所の横穴墓は、人 物や動物など、具象的な題材を含むものとして特徴的であ る。これらに加えて中田横穴は、後室壁面のほぼ全面に三 角文を描いており、横穴墓の規模が大きいこともあわせて、 傑出した特徴を有する。これら4ヶ所の彩色で装飾された 横穴墓は、その希少さと重要性から、いずれも史跡に指定 され、保護施設が設けられるなどして、比較的安定して保 護されてきた。東日本大震災以前は、気候が安定した時期に、 一斉公開も行われてきた(図5)。しかし東日本大震災と東 京電力福島第一原子力発電所の事故によって、公開は中断 したままのものもある。保護施設に被害を受けた横穴墓も あり、清戸廹横穴は原発事故に伴い長期間にわたって立入 が禁止されていた。

泉崎横穴と羽山横穴については、以前に九州歴史博物館 によって3次元計測が実施されている。清戸廹横穴につい ては、筆者ら東北大学総合学術博物館が計測を実施し、本 科研費でデータ整理を行い報告している(藤沢ほか2023)。 中田横穴の3次元計測データを得ることができれば、これ ら福島県内の主要な彩色を持つ4ヶ所の横穴墓のデータが そろうこととなる。東日本大震災以降、一般公開が難しく なっており、それを補填する意味においても、中田横穴の 3次元計測の必要性が高いと判断し、本科研費で計測する こととした。

4. 調査の方法と経緯

2020 年秋に、別件で藤沢がいわき市を訪問した際に、中 田横穴の計測について打診したところ、快諾をいただき計 測を実施することとなった。しかし、新型コロナ感染症が 拡大していったことから、2020 年度の実施は見送らざるを 得なくなり、経費は翌年度に繰り越すこととなった。

2021 年度は、早々にも計測を実施する方向で調整を進め ていたが、新型コロナ感染症の感染動向で延期を重ね、あ る程度落ち着いた秋以降に、ようやく準備を進めることが できるようになった。2021 年 10 月 11 日に、藤沢がいわき 市役所を訪問し、現地での検討の日程等を協議した。11 月 11 日には、計測を委託したシン技術コンサルの担当者も含 めた現地での検討を、いわき市文化スポーツ室・観光交流 室文化振興課の担当者の立ち会いのもと実施し、調査方法 や基準点の設置場所、調査の手順などを確認した(図 6-1)。

3次元計測には様々な方法があり、計測対象と必要とさ れる精度を踏まえ、計測方法を選定することが重要である。 現地視察と打合せを踏まえ、彩色を伴う装飾古墳であるこ



図4 東北地方の主要な装飾古墳

とと、壁面の細かな凹凸や線刻による下書きを明瞭に記録 する必要があることから、光学式非接触ハイエンド3Dス キャナ(ストラクチャードライトスキャナ)と SfM 法を併 用することとした。これは、福島県双葉町の清戸廹横穴で 実施した方法と、同じ方法となる。

横穴内は、床面を除いて、AICON(アイコン・独、現在 は XEGON)社製の光学式非接触ハイエンド 3D スキャナ である SmartSCAN-HE を使用した。SmartSCAN-HE は、白 色 LED で複数のパターンを連続して照射し、それを 2 台の CCD カメラで撮影して 3 Dデータを取得する。スキャナ本 体の光源は白色 LED を使用しており、照射時間は数秒程度 と短い。そのため、計測対象、特に顔料へのダメージは無 いと考えられる。SmartSCAN-HE はレンズを換えることに よって、解像度や計測範囲を変えることができる⁵⁰。今回の 計測では、525 × 400mmの範囲を計測して、159 μ mのピッ チで計測可能なM -650 を使用した。スキャンデータを合成 するため、計測データが周囲と一部が重なるように、計測



図5 福島県装飾横穴墓一斉公開のポスター

機器を移動しながら、全体をカバーするように計測した。

形状が複雑で3Dスキャナでは計測が難しい部分と床面 については、デジタルカメラを用いたSfM(Structure from Motion)-MVS(MultiView-Stereo)法(以下SfM法と略)によ る計測をおこなった。床面は、日常的な管理で歩かざるを 得ないことから、詳細な表面形状を記録する必用性は少な いことから、計測時間の短縮も兼ねて、SfM法を併用した。 入口に設けられている保護施設とその周囲については、据 え置き型レーザー計測器で計測した。

計測作業は株式会社シン技術コンサルに委託し 2021 年の 12月20~24日の5日間で実施した。作業にあたっては、 いわき市文化振興課の担当者に、保護施設の開閉を行って いただき、藤沢・鹿納・菊地の3名が、交替で現地に常駐 して作業を管理した。横穴内の温度上昇には留意する必要 があるため、羨門右上の、モルタル部分に温湿度センサー を設置し(図 6-2)、ケーブルを前室に伸ばしてチェックで きるようにした。清戸廹横穴では、作業者の発する熱によっ て温度上昇が見られた場合もあったが、中田横穴は規模が 大きいため、作業中の温度上昇は、ほとんど見られなかった。

計測成果を公共座標に位置づけるため、GNSS 測量を用い て横穴の周辺に基準点を2点設けた(図 6-3)。この2点の 基準点から、保護施設内の横穴内を視準できる場所まで基 準点を移動し(SP1~SP4)、SP4からトータルステーショ ンによって横穴内に標定点を設定した(図 6-4)。国の史跡 に指定されているため、マーカーを設置することができな いため、特徴点を標定点として計測した(表 1)。

保護施設には照明用の電気は引かれていたが、容量が不 足するため、保護施設の外側に発電機を設置して電源とし た。スキャナから伸びるケーブルには、ビニールを巻いて 養生し、保護施設内に設置した PC に接続してデータを収集 した(図 6-6)。横穴内で作業する人数は1名に限定し、カ ビの胞子などを持ち込まないように、タイベックスーツを 着用した(図 6-5)。

12月20日の作業開始後、最初に基準点・標定点計測、 保護施設のレーザー計測を実施し、その後に3Dスキャナ 計測用のPCなどの機器を保護施設内に設置し、横穴内の計 測に進んだ。床面の排水用の溝など形状が複雑な部分では、 3Dスキャナでの計測が難しい場所もあり、作業が難航した 局面もあったが、予定どおり24日夕刻に作業を終了するこ とができた。

3Dスキャナ(SmartScan)による3次元データの頂点数 は21億点となった。これに、SfM法による画像解析によっ て作成したデータを合成し、3次元データの頂点数の合計 は25億点となった。上述した基準点測量によって、計測デー タは公共座標に位置づけた。これらの成果は、2021年度末 に納品された。

5. 計測データの加工

東北大学総合学術博物館では、特定のソフトウエアに依

存しない形で3次元データを保存するために、X・Y・Zの座 標値とRGBデータによる、色付き点群データとして保存し 利用する方法を採用している。一方、考古学的データとし て、学術的検討に供する方法は、本報告を含めて、2次元 の図面として調査報告を作成することが一般的である。そ のため、3次元データをもとに、正射投影画像を作成する必 要がある。3次元計測データから正射投影画像を作成する必 要がある。3次元計測データから正射投影画像を作成する作 業は、今回のように点群数が多い場合、かなりの手間と時 間を要し、PCの能力も高いものが要求される。そのため、 2023 年度の科研費経費を利用して、調査報告用の正射投影 (オルソ) 画像の作成と、画像の配置等の作業を、株式会社 シン技術コンサルに委託した。同じく2023 年度事業として、 株式会社ラングに、稜線強調処理の一種である PEAKIT 処理 を委託した。

オルソ画像の作成

床面、天井面、左右側面、奥壁面、後室見返し、前室奥、 前室見返し、入口の計9面のオルソ画像を作成した。

頂点数が多いため、カラーオルソ作成に必要なメッシュ の頂点数は100万点程度に調整し、陰影図は㈱ラングの PEAKIT 処理にて対応した。

オフセット原点(112,195.5/100,880.5/8)を起点に、SPA が図上の縦軸と平行に、SPB ~ F が横軸と平行になるよう に 106.909 度回転をかける。

床面と天井面は、標高 8.6 mのポイントでカットして作成 した。

SPA の両側面はセクションラインと片面を合わせた立方体に対して A-A' は交差でカット、A'-A は差分でカットして作成。SPB も同様に 3 次元モデルをカットし、3 次元モデルのテクスチャ空間の大きさとカメラのサイズを合わせて正射投影でカラーオルソ画像を撮影した。

C'-C ライン、D-D' ライン、E'-E ライン、F-F' ラインは、 セクションラインのアングルで撮影する際に裏側が見えて

					世介測地希・弗林座標希
No	点 名	X 座標	Y 座標	Z 座標	備考
1	R3K1	112244.797	100868.398	5.428	基準点(県道脇・GNSS 測量)
2	R3K2	112416.669	100925.716	4.598	基準点(県道脇・GNSS 測量)
3	SP1	112210.361	100857.843	5.496	レーザースフィア
4	SP2	112219.167	100875.427	5.645	レーザースフィア
5	SP3	112188.890	100872.051	5.839	レーザースフィア
6	SP4	112196.201	100875.981	7.298	レーザースフィア
7	1	112194.651	100880.187	10.006	横穴内標定点
8	2	112195.402	100880.561	9.816	横穴内標定点
9	3	112196.016	100880.546	8.786	横穴内標定点
10	4	112194.990	100883.384	9.021	横穴内標定点
11	5	112195.124	100882.972	9.676	横穴内標定点
12	6	112195.414	100880.418	8.493	横穴内標定点

表1 中田横穴基準点・評定点測量成果

世界測地系・第以座標系


1. 中田横穴保護施設の外観(2021年11月)



2. 温湿度計の設置状況(矢印・羨門右外側のモルタル部分)



3. 基準点 R3K1 での GNSS 測量作業状況



4. トータルステーションを用いた横穴内の標定点の 測量作業状況



5.3Dスキャナを用いた計測作業状況 (ケーブルはビニールを巻いて養生)



6. 計測データは横穴外に設置した PC にケーブルで 接続して送信

図6 中田横穴の現状と作業状況

しまうため、裏側として見えている部分をカットして撮影 した。

Illustrator 配置

撮影したオルソ画像をアングルごとに illustrator へ埋め込み配置し、床面、天井面には座標値を、各種展開面は標高値の入力を行った。

カラーオルソ画像作成手法

本資料のオルソ画像はフリーソフトウエアの Blender を 使用して書き出しを行っている。

撮影するカメラのサイズとオブジェクトのテクスチャ空 間のサイズを一致させることで余白のないオルソ画像を書 き出している。また、背景部分を透過に設定することによ りオブジェクトが写っていない箇所を透明にしている。

中田横穴のデータ加工について

本資料作成において最大の課題となった部分は、中田横 穴の取得データ量の多さである。20 億点を超えるデータは 解析や結合など一つ一つの動作に非常に時間がかかり、1 日 かかった末に失敗などということもあった。詳細データは 記録保存には適しているが、オリジナルデータのまま利活 用するのはコスト的にも作業時間的にもおすすめしない。

しかし詳細データがあれば様々な用途で活用することが できる。

詳細点群を形状の特徴を失わない程度に間引き、メッシュ 化を行い形状の特徴をノーマルマップに焼き付けて、さら にリトポロジーを行ったメッシュにベイクすることで低ポ リゴンでありながら、疑似的に形状特徴を再現したデータ を作ることができる(図7)。

中田横穴の後室のように側壁から奥壁にかけて文様が連続している場合であれば、土器の展開図の要領で3次元モ デルから内部の展開写真を作ることもできる(図8)。

PLATEU や OSM などの公開地形データを利用し、横穴や

古墳と座標位置を合わせることで、どのような地形条件下 に遺跡が存在するのかを視覚的、直感的に確認することが できる。Blender上に設置したカメラを移動したり、メッシュ にアニメーションを付けたりして解説動画を作成すること もできる。

このように様々な3次元データの活用方法がある中で、 作図する人の主観が入ってしまう図面を報告書として用い るよりも、PEAKIT処理のような客観的データに専門家が必 要に応じて注釈を入れる手法が今後の主流になっていくの ではないだろうか。

6. 計測成果について

上記のような作業を行って作成した正射投影画像を、図 9から図40に示す。3次元データから投影図を作成する場 合、断面のラインの外側に、後ろの壁の裏面が見える場合 があるため、断面ラインの外側は全て消去して示している。



図7 リトポロジー後データ8万メッシュ



図8 3次元データによる奥室壁面展開写真

その際、床面形状が正確に示せない場合があることに留意 する必要がある。3次元計測データから床面の正射投影図 を作成する際、ある一定の高さで切断し、そこから下側を 投影した図を作成することが、もっとも簡単である。その際、 床面の一番高い所に、切断面を合わせる必要があるが、切 断面と床面の低い部分との高低差が大きいと、床面形状が 正確に示せないことが多くなる。壁面の傾斜がある場合は、 床面の輪郭が切断面の断面ラインより外側まで出ることが あるが、その部分は示せないこととなる。この問題を解消 するには、切断する高さを細かく変化させながら作成する か、床面のラインを手作業で拾うなどの作業が必要となり、 非常に多くの手間を有することとなる。今回は、床面の輪 郭が大きく変わらないため、切断面から下側を投影した図 を示している。

上述のように稜線強調処理は、株式会社ラングに PEAKIT 処理を委託した。ラングでは、主に考古遺物、特に石器の 図化のために、3 次元データから正射投影画像を作成し、そ の画像に尾根線などを強調する加工を行っている。これは、 投影する面を指定し、地上開度(尾根)、地下開度(谷)、レリー フ(起伏陰影図)、距離段彩の4種類の画像を作成して、注 目したい形状特徴に合わせて重合して示すものである(千 葉・横山 2017)。

委託にあたっては、シン技術コンサルに委託して設定した投影面と対応する形で、9面について PEAKIT 処理を行った。色調を示すためにテクスチャ、凹凸のみを示すためにレリーフのみ、レリーフと尾根線の合成、尾根線データのみの、4種類を提示することとした。この4種類の提示は、 清戸廹横穴の報告と同じ方法である。

図9と図10は、縮尺50分の1で作成した展開図で、各 面の正射投影図を配置したものである。断面図のポイント などは、この展開図に示した。天井を見上げた図面は、公 共座標値が裏返った状態となるので、ご留意いただきたい。 この両図では、シン技術コンサルで作成した正射投影図(オ ルソ画像)を利用した。図11以降のラングによる PEAKIT 処理を施したものと、色調が若干、異なっている。3D スキャ ナで取得した色データと、SfM 法で使用したデジタルカメ ラの画像データでも色調が異なっており、色調を正確に再 現することには課題が残っている。

図 11 から図 36 までは、各面の正射投影図を、縮尺 25 分 の 1 で示した。壁面の凹凸などを示すためには、本来は 20 分の 1 より大きな縮尺の方が望ましいが、紙幅の関係で、 やむを得ず 25 分の 1 とした。PEAKIT 処理を行って作成し た、テクスチャ、レリーフ、レリーフと尾根線の重ね合わ せ、尾根線のみの、4 種類の画像を、各面ごとにこの順番 で提示した。壁面の保存状態が良い部分では、工具の痕跡 が読み取れる。基盤の地層の状態が、下位ほど良くないため、 工具痕跡などは、床面に近くなるほど不明瞭となっている。 図 11 から図 14 に示した床面の図面では、後室と前室の 壁に近い部分に、多角形のラインが見える。このラインは、 3Dスキャナで撮影した範囲と、デジタルカメラ画像から SfM 法で3次元化した範囲の境界である。両者で解像度が 異なるため、スムーズに接続できない結果となっている。 また、両者で色調が異なっている部分も多い。使用した機 器の違いによって、取得データのばらつきから生じたもの と考えられる。

図 37 から図 40 には、縮尺 10 分の 1 で、後室の壁面を詳 細図として示した。図の下側が標高 8.5m、上側が 9.2m の 位置で切っている。左右は、線刻が認められる範囲が入る ように切っている。考古学の実測図では、通常は尾根線を 太く、谷線を細く表現する。中田横穴の線刻は、表面の保 存状態の関係もあり、尾根線は不明瞭な部分が多い。一方 で谷線は、かなり鋭い道具で行ったものと考えられ、明確 に認識できる。そのため、尾根線と谷線を合わせて示すと、 谷線が強調される形となるため、図 11 から図 36 の図面で は、尾根線だけを示したものを提示した。図 37 から図 40 の詳細図では、線刻をより明確に表現するため、レリーフ・ 尾根線・谷線の、3 種類のデータを重ね合わせて表現した。 それぞれの表現について、比較して見ていただきたい。

7.まとめ

今回の計測では、光学式非接触ハイエンド3Dスキャナ を用いて、高精細な計測を目指したが、工具痕跡や線刻も ほぼ再現できており、おおむね当初の目的を果たせたと言 えるであろう。それでも、特に細かな線刻の部分などでは、 点の密度をさらに高くした方が、より明瞭に表現できる可 能性がある。一方で、膨大すぎるデータの取り扱いには、 多大な課題も残っている。実際の活用にあたっては、活用 目的にあわせて、点の数を間引いて減らすことや、画像を 分割して容量を減らすなどの操作が必要である。今回の報 告では、計測成果の報告を中心としたため、下書きの線刻 と実際の彩色の関係、壁面の加工痕跡の検討、後室内に多 数認められている小孔の用途など、さまざまな課題につい ては検討できていない。今後、このデータを活用した、詳 細な検討が進むことが期待される。

※本論には、日本学術振興会(JSPS)科研費 20H00019「石 材構築文化財の保全のための3次元デジタルアーカイブ の標準化の研究」(基盤研究A・2020~2024年度・研究 代表者藤沢敦)による研究成果を含みます。

謝辞

今回の計測では、いわき市文化スポーツ室・観光交流室 の文化振興課の各氏には、多大なご協力をいただいた。現 地での計測作業と、計測データの加工を担当いただいた株 式会社シン技術コンサル、PEAKIT 処理を担当していただい た株式会社ラングには、膨大なデータ量を扱うこととなり、 様々な面倒な依頼にも丁寧な対応をしていただいた。ここ にあらためて感謝したい。

註

- 本科研費での研究については、WEBページを作成し、 その概要を紹介しているので参照されたい。 https://webdb1.museum.tohoku.ac.jp/index.html
- 2) 中田横穴の呼称は、調査報告書では「中田装飾横穴」 とされているが、史跡指定名称は「中田横穴」となっている。本来は、横穴墓と呼ぶことが望ましいと考えているが、本論では史跡指定名称である「中田横穴」を使用する。
- 本科研費で計測した成果で、これまでに報告しているのは、次のとおりである。
 - ・福島県双葉町清戸廹横穴:東北大学総長裁量経費を 利用して2016年度に計測。光学式非接触ハイエンド 3DスキャナであるSmartSCAN-HEを使用。計測成果 の整理等に本科研費を利用。藤沢・鹿納・吉野・小池 2023。
 - ・東北大学正門・小川記念園:2020 年度に SfM 法で計測。 鹿納・藤沢 2021。
 - ・宮城県名取市経の塚古墳出土長持形石棺: 2021 年度 シン技術コンサルの協力で計測。藤沢・大橋 2023。
 - ・福島県須賀川市前田川大塚古墳石室:2022年度計測の成果を菊地ほか2023で報告。2023年度にSfM法で再計測。再計測成果は、菊地ほか2024で報告。
 - ・福岡県朝倉市湯の隈古墳石室:2022 年度に SfM 法で 計測。藤沢・鹿納・田尻・志村 2024
- 4)横穴式石室などでは、奥から玄門側を見て、左右を示 すことが一般的である。一方、入口側から奥壁側を見 た際の方向で表現した方が記載しやすい場合もある。 中田横穴は、おおむね西側に開口しており、今回は、 奥壁側を見た方向を基準に、北側となる側を左壁、南 側となる側を右壁とする。
- 5) SmartSCAN-HE による計測の精度やデータの特性については、SfM 法による画像解析との比較を含めて、小池雄利亜が検討している(小池 2019・2022)。

引用・参考文献

- 江本義理 1975「中田横穴の顔料及び石材劣化に関する調査 報告」『中田横穴保存状態調査研究報告書』いわき市教 育委員会
- 鹿納晴尚・藤沢敦 2021「小型ドローンを利用した SfM 法に よる屋外構造物の 3 次元計測」『Bulletin of the Tohoku University Museum』No. 20、67 ~ 78 頁、東北大学総 合学術博物館
- 菊地芳朗ほか 2023『前田川大塚古墳 1・大仏古墳群 1』福 島大学考古学研究報告第 16 集
- 菊地芳朗ほか 2024『前田川大塚古墳 2・大仏古墳群 2』 福 島大学考古学研究報告第 17 集
- 小池雄利亜 2019「3 次元計測について」『西廹横穴墓群(3 次調査)』261 ~ 270 頁、南相馬市埋蔵文化財調査報告 書第 30 集
- 小池雄利亜 2022「合戦原遺跡横穴墓の 3 次元計測について」 『合戦原遺跡』第2分冊、329~354頁、山元町文化財 調査報告書第22集
- 木幡成雄・千田一志・山崎京美・矢島敬之 2017『神谷作古 墳群』いわき市埋蔵文化財調査報告第 180 冊、いわき 市教育委員会
- 小林行雄編 1964 『装飾古墳』 平凡社
- 須貝貫二・松井寛・佐藤茂・喜多河庸二・河内英幸 1957『日本炭田図 | 常磐炭田地質図、1:5000 並びに説明書』 地質調査所
- 千葉史・横山真 2017「第2部第2章 PEAKIT 処理による横 穴式石室の画像処理」『デジタル技術を用いた古墳の非 破壊調査研究』早稲田大学東アジア都城・シルクロー ド考古学研究所調査研究報告第4冊、41~44頁
- 西徹雄ほか 1985『清戸廹横穴墓群』福島県双葉町教育委員会
- 福島雅儀 1983『七軒横穴群』矢吹町文化財調査報告書第6 集
- 藤沢敦・鹿納晴尚・吉野高光・小池雄利亜 2023「福島県清 戸廹横穴の高精細 3 次元計測」『Bulletin of the Tohoku University Museum』No. 22、7 ~ 38 頁、東北大学総合 学術博物館
- 藤沢敦・大橋葵2023「経の塚古墳と東北の埴輪」『国家形 成期におけるヤマト政権と地域権力の相互関係の再定 義-東北地方を中心に-』科研費報告書、35~44頁、 福島大学行政政策学類
- 藤沢敦・鹿納晴尚・田尻義了・志村将直 2024「福岡県湯 の隈古墳の高精細 3 次元計測」『Bulletin of the Tohoku University Museum』No. 23、7 ~ 38 頁、東北大学総合 学術博物館
- 渡辺一雄ほか 1971『いわき市史別巻 中田装飾横穴』いわき 市
- 渡辺一雄ほか 1974『羽山装飾横穴発掘調査概報』原町市教 育委員会



図9 中田横穴各面の展開図(1)



図10 中田横穴各面の展開図(2)











図 15 中田横穴天井正射投影図(テクスチャー)





図 17 中田横穴天井正射投影図(レリーフ・尾根線)



図 18 中田横穴天井正射投影図(尾根線)



図19 中田横穴北側壁正射投影図(テクスチャー)











図23 中田横穴南側壁正射投影図(テクスチャー)

__3

0

8.0m



図 24 中田横穴南側壁正射投影図(レリーフ)

- ²

0



図 25 中田横穴南側壁正射投影図(レリーフ・尾根線)

___3

₀⊥

8.0m



図 26 中田横穴南側壁正射投影図(尾根線)

___2

₀⊥

8.0m

8.5m –



レリーフ



図 27 中田横穴後室奥壁正射投影図(1)

В'



図 28 中田横穴後室奥壁正射投影図(2)

В'



テクスチャー







図 29 中田横穴後室入口側正射投影図(1)



レリーフ・尾根線



尾根線



図 30 中田横穴後室入口側正射投影図(2)



テクスチャー



レリーフ



図 31 中田横穴前室奥壁側正射投影図(1)



レリーフ・尾根線



尾根線



図 32 中田横穴前室奥壁側正射投影図(2)

<u>D'</u>



図 33 中田横穴前室入口側正射投影図(1)



図 34 中田横穴前室入口側正射投影図(2)







図37後室入り口側詳細図(レリーフ・尾根線・谷線)



図38 玄室北側壁詳細図(レリーフ・尾根線・谷線)



図39 玄室奥壁詳細図(レリーフ・尾根線・谷線)



図40 玄室南側壁詳細図(レリーフ・尾根線・谷線)
東北大学総合学術博物館紀要(Bulletin of the Tohoku University Museum) 編集委員会規定

2004年1月31日

(設置)

第1条 東北大学総合学術博物館(以下「博物館」という。)に東北大学総合学術博物館紀要編集委員会(以下「委員会」 という。)を置く。

(任務)

第2条 委員会は,館長の求めに応じ,『東北大学総合学術博物館紀要』(以下「紀要」という。)に掲載する論文等の審 査及び編集に当たるとともに,これに関する事項について審議する。

(組織)

第3条 委員会は、次に掲げる者をもって組織する。

一. 博物館の教官で館長が指名した者。

二. 博物館の運営委員及び兼任教官で館長が委託した者。

三. その他,特に館長が必要と認めた者。

(委員長)

第4条 委員会に,委員長を置く。

一.委員長は、第3条第1項、及び第2項の委員の互選によって定める。

二. 委員長は、委員会を召集し、その議長となり、会務を掌理する。

(任期)

第5条 第3条に定める委員の任期は、1年とし、再任を妨げない。

(議事)

第6条 委員会は、委員の過半数の出席がなければ会議を開くことができない。

2. 委員会の議事は、出席入数の過半数をもって決し、可否同数の時は、委員長が決するところによる。 (論文等の審査)

第7条 委員会は、寄稿された論文等について審査をおこなう。

2. 審査は掲載の可否,修正範囲,掲載分類等とする。

3. 審査にあたって,査読を実施する。

(委員以外の出席)

第8条 委員長が必要と認めた時は、委員以外の者を委員会に出席させ、意見を求めることができる。

(査読者の委託)

第9条 委員会は、論文等の審査にあたり、委員以外の者に査読を委託することができる。

(審議結果の報告)

第10条 委員会は,審議結果について,館長に報告する。

(庶務)

第 11 条 委員会の庶務は、博物館の事務において処理する。

(雑則)

第 12 条 この規定に定めるもののほか, 論文等の審査及び編集に関し必要な事項は, 委員会が別に定める。 附則

この規定は、2004年1月31日から施行する。

東北大学総合学術博物館『紀要』寄稿要項

- 1 東北大学総合学術博物館紀要(以下「紀要」という。)は総合学術博物館(以下「博物館」という。)に関連する諸科学に 関する研究報告,調査報告等を掲載・発表することにより,それらの学問の発展に寄与するものである。
- 2 紀要に寄稿することができる者は、次の通りとする。
 - 東北大学の教職員(同客員教官を含む)
 - 東北大学の名誉教授
 - ③ その他,博物館において適当と認めた者
- 3 原稿執筆における使用言語は英語・日本語を原則とする。
- 4 寄稿する原稿には英文要旨(300 語程度)を添付する。
- 5 原稿はA4判横書き,1ページ1段組で1,000字(40字×25行)とし,充分な余白を取る。英文の場合はこれに準ずる。 (図,写真,表,図版などはそれぞれ別ページとして準備する。さらにそれらのキャプションを別途準備する。)図,写 真類のできあがりの最大の大きさは1ページ縦22 cm×横17 cmとする。
- 6 原稿はデジタルデータで提出する。
- 7 原稿の提出は 10 月末とする。
- 8 原稿の提出は、紀要編集委員会とする。
- 9 原稿は編集委員会から委託した査読者の審査を経て編集委員会が採択する。
- 10 掲載した一論文につき、別刷り 30 部まで無償とし、それ以上は著者の負担とする。
- 11 紀要に掲載された論文等の著作権は、博物館に帰属するものとする。

Bulletin of the Tohoku University Museum