

大山火山噴火履歴の再検討

山元孝広^{1,*}

Takahiro Yamamoto (2017) Quantitative eruption history of Pleistocene Daisen Volcano, SW Japan. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol.68 (1), p.1-16, 12 figs, 3 tables.

Abstract: Daisen Volcano is a large dacitic composite volcano in the San-in district, SW Japan. This volcano has sometimes ejected wide-spreading pyroclastic fallouts along the Japanese islands during the Pleistocene time. The largest of them is the Daisen-Kurayoshi Pyroclastic Fall Deposit (DKP) at 60 ka. In this study, I revised quantitative eruption history of the volcano, because previous studies had involved stratigraphic and methodological problems. Firstly, there were different opinions about which the youngest product was the Misen Lava Dome or Sankoho one. New ¹⁴C dating has revealed that the Misen and Sankoho eruption occurred at 28.6 and 20.8 ka, respectively. Secondary, volumes of the pyroclastic fall deposits from this volcano were measured in the database of Suto *et al.* (2007, *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 58, p. 337-352); they diagrammatically redraw the isopachs of the deposits in previous studies. However, their results ignored the distal distributions of the fallouts and underestimated the volumes of the deposits. So, the volumes of the pyroclastic fall deposits were newly determined by other methods using relationship between thickness and area within an isopach. The revised quantitative eruptive history of the volcano since 210 ka shows that the magma discharge rate has increased at about 100 ka and DKP eruption took place during this high rate stage.

Keywords: Daisen Volcano, Quaternary, eruption history, magma discharge rate, ¹⁴C age

要 旨

大山火山は山陰地方に位置する大型のデイサイト質成層火山である。この火山は約6万年前の大山倉吉降下火砕堆積物(DKP)に代表されるような日本列島沿いに大規模な火砕物を降下させる噴火を更新世に度々起こしたことで知られている。大山火山の既存研究には層序学的な問題や評価手法上の問題が残されているため、本研究では噴火履歴を定量的に見直した。まず、層序学の問題では、最新期の噴火を^{みせん}弥山溶岩ドームの形成とするものと^{さんこほう}三鈷峰溶岩ドームの形成とする異なる文献が存在した。新たに実施した放射性炭素年代測定の結果は、弥山噴火が28.6千年前、三鈷峰噴火が20.8千年前となり、後者が最新期の噴出物であることが確実になった。次の問題は、須藤ほか(2007)のデータベースに記載された大山火山起源降下火砕堆積物の体積評価手法である。この手法では既存文献の堆積物等層厚線を図学的に書き直すことで体積を求めているが、実際には分布する遠方の火砕物を無視しており、計測された体積は相当な過小評価になっている。そのため、降下火砕堆積物の体積はLegros(2000)や他の手法を用いて再計測し直している。今回の計測値

を用いて作成した積算マグマ噴出量階段図では、10万年前頃からマグマ噴出率が大きくなる傾向が認められ、その中でDKPが発生したように見ることが出来る。

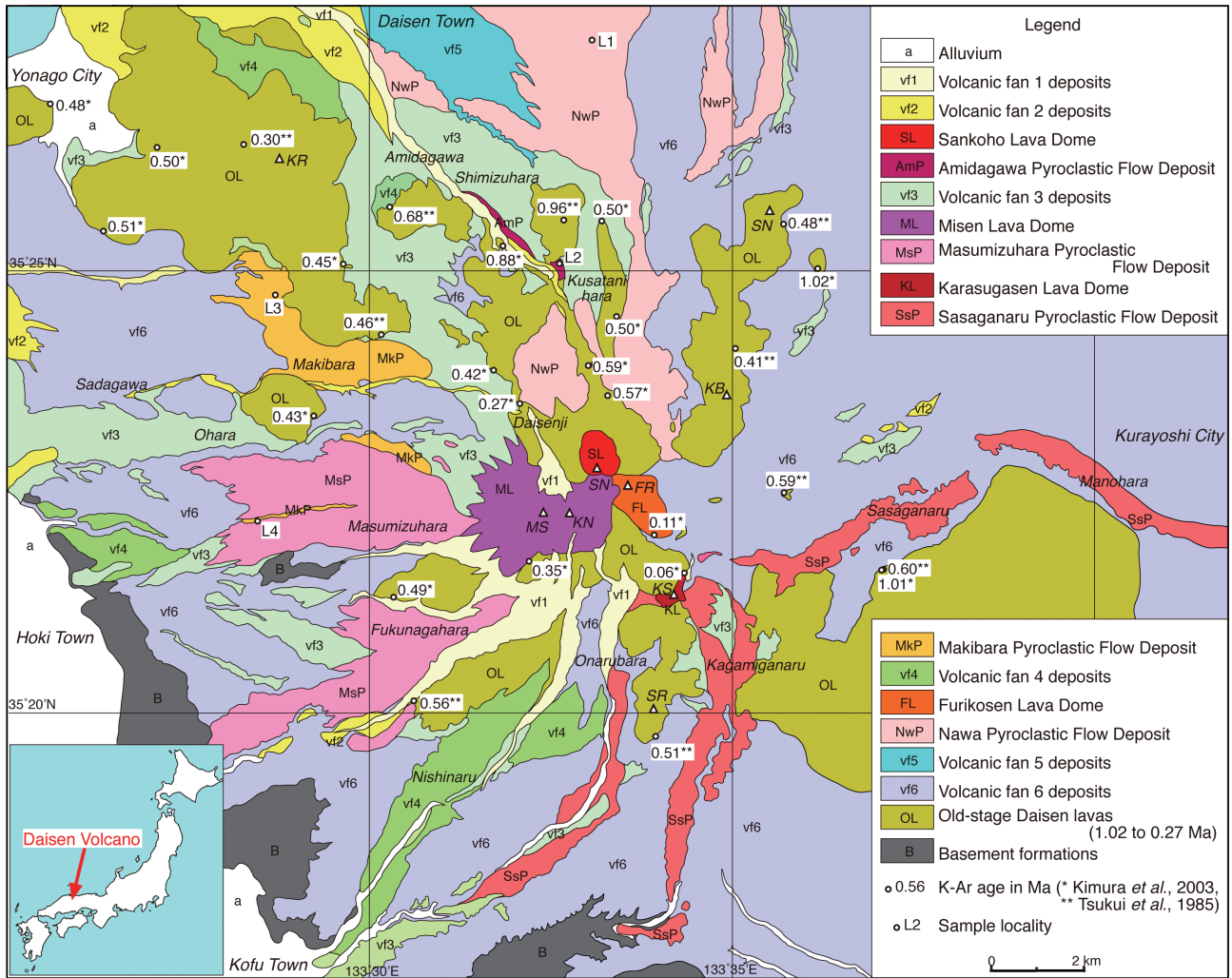
1. はじめに

火山活動の長期的な評価のためには、火山噴出物の地質学的検討による噴火規模の定量化と噴出年代の特定が重要である。その結果作成される積算マグマ噴出量階段図は、長期的なマグマ噴出率の変動傾向を示しており、対象とする火山の将来活動の可能性を評価するための基礎資料として活用できよう。日本の主要な第四紀火山の積算マグマ噴出量階段図については既存文献情報をもとに取りまとめ公開しているものの(山元, 2015)、使用した文献情報には不十分なものが多く、全ての火山について信頼性の高い活動履歴情報が整備できている状況にはない。そのため、今後も精度の高い噴火履歴調査を積み重ねていくことが求められている。

大山火山は鳥取県西部にある東西約35 km, 南北約30 kmの大型の第四紀複成火山である(第1図)。この大山火山では約6万年前に国内で最大規模のプリニー式噴火で

¹産業技術総合研究所 地質調査総合センター 活断層・火山研究部門(AIST, Geological Survey of Japan, Research Institute of Earthquake and Volcano Geology)

*Corresponding author: T.Yamamoto, Central 7, Higashi 1-1-1, Tsukuba, Ibaraki 305-8567, Japan, Email: t-yamamoto@aist.go.jp



第1図 大山火山の地質図。三角は山頂 (FR = 振子山; KB = 甲ヶ山; KN = 剣ヶ峰; KR = 孝霊山; KS = 鳥ヶ山; MS = 弥山; SN = 船上山; SR = 城山)

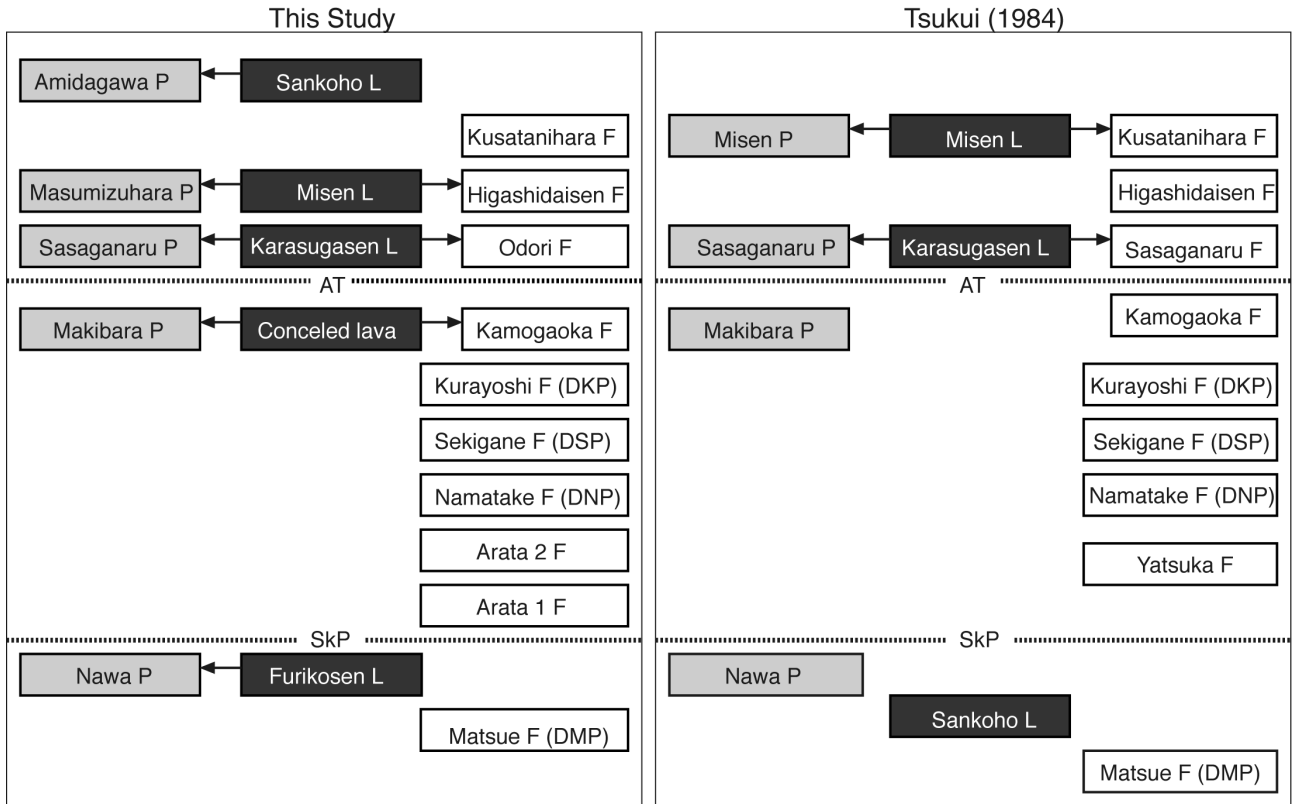
Fig. 1 Geologic map of Daisen Volcano. Triangles are mountain tops (FR = Furikosen; KB = Kabutogasen; KN = Kengamine; KR = Koreisan; KS = Karasugasen; MS = Misen; SN = Senjosan; SR = Shiroyama).

ある倉吉降下火砕物 (DKP; 町田・新井, 1979; 長橋ほか, 2016) が噴出している (町田・新井の原著では倉吉軽石層と呼ばれているが, 他の噴出物も含め降下火砕物等の成因名に統一する)。大山火山は活火山として扱われていないものの, DKPのような噴出物は火山周辺だけでなく北陸から関東・東北地方にまで到達しておりその影響範囲は広い。そのため, 例えば福井県下の原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査では, 電力事業者による大山火山の将来予測とその影響評価結果が公開されている (原子力規制委員会, 2014)。その将来予測の基になった噴火履歴に関しては, 津久井 (1984) の大山火山層序や須藤ほか (2007) の降下火山灰データが使用されているが, 本報告で指摘するように両者の結果には修正を要する重大な問題が含まれている。そこで, 本報告では大山火山

の過去約20万年間の噴出物層序の再構築とマグマ噴出量の再計測を行い, 大山火山の長期的な活動の傾向について考察する。具体的には, 地表踏査による噴出物の観察と試料採取, 放射性炭素年代測定, 降下火砕堆積物の等層厚線図の作成を実施して, 大山火山地質図と積算マグマ噴出量階段図を新たに作成している。

2. 従来の層序の問題点

大山火山の火山噴出物層序については, まず津久井 (1984) により大枠が示され (第2図), その後, 津久井ほか (1985) による溶岩のK-Ar年代測定や木村ほか (1999) のテフラ中のジルコンを用いたフィッシュン・トラック年代測定により時間軸が与えられている。これらによると



第2図 本研究と既存研究の大山火山噴出物層序の比較. AT = 始良Tn降下火砕物; SkP = 三瓶木次降下火砕物; F = 降下火砕堆積物; L = 溶岩; P = 火砕流堆積物.

Fig. 2 Comparison between this study and previous one for the stratigraphy of the Daisen volcanic products. AT = Aira Tn Pyroclastic Fall Deposit; SkP = Sanbe-Kisuki Pyroclastic Fall Deposit; F = pyroclastic fall deposit; L = lava; P = pyroclastic flow deposit.

大山火山の噴火活動は約100万年前から始まり、約35万年前以降に20回に及ぶプリニー式噴火が起きたと考えられている。大山の噴出物層序における問題点はむしろ最新期の活動で、異なる2つの主張がある。すなわち、津久井(1984)は最新期の噴出物を主峰の弥山溶岩ドーム(第1図のML)とその形成過程で発生した弥山火砕流堆積物とし(第2図)、三位・赤木(1967)が北麓の扇状地から報告した放射性炭素年代(17,200 ± 400 yBP)がこの火砕流の噴出年代を示すものと考えていた。そして、弥山北東の三鈷峰溶岩ドーム(第1図のSL)については岩質から約12万年前の大山松江降下火砕物(DMP)もしくはその直前の大山^{ひるせんぼら}原降下火砕物に伴うものとしていた。しかしながら、三位・赤木(1967)の測年試料採取地周辺には弥山溶岩ドーム起源の火砕流は到達しておらず、なぜこの年代を噴火年代と判断したのか理由は不明である。一方、福元・三宅(1994)は、北山腹の火砕流堆積物を津久井(1984)の弥山火砕流堆積物よりも上位にある別の火砕流とし、岩質から三鈷峰溶岩ドーム起源と考えている。両者の主張する異なる層序関係は、現存する同一の露頭(鳥取県西伯郡大山町^{くさたにはら}草谷原; L2地点; 第1図)の解釈の

違いによるものである。本報告では両者の主張の妥当性を確認するため、この露頭から採取した試料の年代測定を行っている。その結果は、後述するように、福元・三宅(1994)の主張を裏付けるものとなった。

3. 大山火山噴出物の層序

津久井(1984)は、大山火山を古期と新时期に区分しており、本報告でもこの区分に従う。このうち古期大山火山は、山体中央部の弥山周辺や山腹(孝霊山、^{こうれいさん}船上山、^{せんじょうさん}城山など; 第1図のKR, SN, SRなど)を構成する斑状のデイサイトを主体とする溶岩岩体と、津久井(1984)により溝口凝灰角礫岩層と呼ばれた土石流堆積物を主体とする火山麓扇状地6堆積物からなる。古期の溶岩からは、1.02 ~ 0.27 MaのK-Ar年代値が報告されている(津久井ほか, 1985; Kimura *et al.*, 2003)。最も新しい0.27 Maの年代値は、大山寺のデイサイト溶岩から得られている(Kimura *et al.*, 2003)。一方、火山麓扇状地6堆積物は古期溶岩群の縁辺相を構成するもので、異なる形成時期の扇状地堆積物が累積したものを一括している。開析の進

んだ地形面をつくり、その最新の地形面は、後述する約21万年前の奥津降下火砕物(DOP; 加藤ほか, 2004)や約17万年前の樋谷降下火砕物(津久井, 1984)を挟む風成層に覆われることから、海洋酸素同位体比ステージ(MIS)のMIS8に離水したものと判断される。また、この最も新しい地形面は荒川(1984)の古期扇状地I面に対応する。

本報告の新时期大山火山は、DOP以降の噴出物や堆積物からなる。降下火砕物を除くと下位から、火山麓扇状地5堆積物、名和火砕流堆積物、振子山溶岩ドーム(新称)、火山麓扇状地4堆積物、榎原火砕流堆積物、笹ヶ平火砕流堆積物、烏ヶ山溶岩ドーム、榊水原火砕流堆積物(新称)、弥山溶岩ドーム、火山麓扇状地3堆積物、阿弥陀川火砕流堆積物(新称)、三鉢峰溶岩ドーム、火山麓扇状地2堆積物、火山麓扇状地1堆積物からなる(第1図)。

3.1 火山麓扇状地5堆積物

大山火山の北麓に広がる段丘化した土石流堆積物で、約13万年前の松江降下火砕物(DMP; 町田・新井, 1979)を挟む風成層に覆われる。この扇状地堆積面は、荒川(1984)の古期扇状地II面に対応し、MIS6に形成されたと判断される。この時期の扇状地堆積物が北麓に良く発達することは、山頂部から北に流れる深い谷が存在したことを示しており、後続する名和火砕流が山体北側に限定して流下していることと調和的である。

3.2 名和火砕流堆積物

大山火山北山腹から北麓に分布する黒雲母斜方輝石普通角閃石デイサイト本質岩片からなる火砕流堆積物である。地層名は太田(1962)の名和軽石流により、模式地は西伯郡大山町名和である。ただし、厳密な意味での岩石密度が $1,000 \text{ kg/m}^3$ 以下の軽石は、全く含まれていない。堆積物の岩相は、典型的なブロックアンドアッシュフローで、発泡の悪い多面体型の本質岩片とその細粉からなる基質で構成され、不明瞭な成層構造や逆級化が認められる。従来から報告されているように(津久井, 1984; 荒川, 1984)、本堆積物がDMPを挟む風成層を不整合に覆い、かつ三瓶木次降下火砕物(SkP)を挟む風成層に整合的に覆われることが北山腹のL1地点周辺で確認できた。木村ほか(1999)は本堆積物から $100 \pm 40 \text{ ka}$ のジルコン・フィッシュトラック年代を報告しているが、この年代は上下のテフラとの関係から推定される層序年代(約10万年前)と調和的である。名和火砕流堆積物がつくる緩斜面は、海岸部の標高30 m付近から北山腹の標高1,050 m付近まで広がり、さらに上流に給源となった溶岩ドームがあったことを示唆している。堆積物の層厚は、海岸部の国道9号沿いで約5 m、中腹のL1地点で約20 mである。さらに上流部では、地形判読から最大50 m前後の層厚を持つものとみられる(第3図)。削剥部分も含め作図した層厚コンターから算出した見かけ体積は

$1.7 \times 10^0 \text{ km}^3$ で、堆積物密度を $1,800 \text{ kg/m}^3$ とした岩石換算体積(デイサイト= $2,300 \text{ kg/m}^3$; 以下同じ)は $1.3 \times 10^0 \text{ km}^3$ となる。

3.3 振子山溶岩ドーム

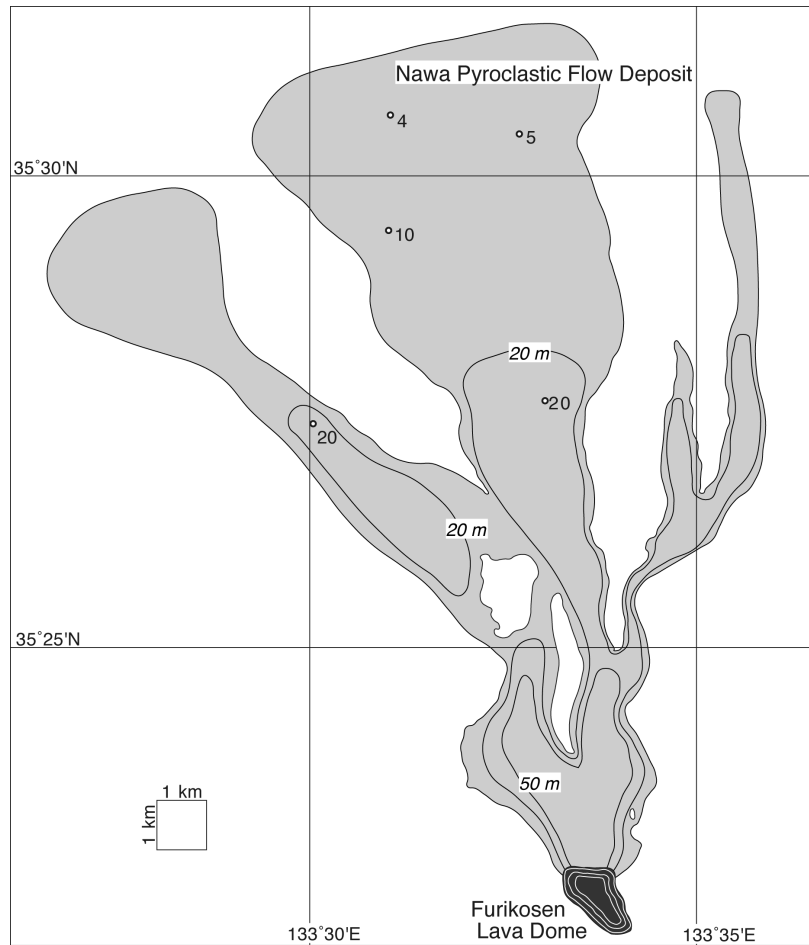
大山山頂部の東に位置する振子山(第1図のFR)を構成する黒雲母斜方輝石普通角閃石デイサイトの溶岩ドームである。太田(1962)や津久井(1984)の側火山溶岩ドームの一部に相当するが、振子山南の地獄谷上流部の溶岩からは、名和火砕流堆積物の層序年代とほぼ同じ $0.11 \pm 0.02 \text{ Ma}$ のK-Ar年代が報告されている(Kimura *et al.*, 2003)。地形的にも名和火砕流堆積物の上流に位置しており、岩質も共通しており同火砕流の給源とみられることから他の溶岩から独立して新称を与える。削剥部分も含め作図した層厚コンター(第3図)から算出した溶岩体積は、 $3.6 \times 10^1 \text{ km}^3$ である。

3.4 火山麓扇状地4堆積物

大山火山の南南西、西及び北東麓に広がる段丘化した土石流堆積物で、厚さ20～30 cmの褐色火山灰土を挟んで3万年前の始良Tn降下火砕物(AT; 町田・新井, 1992)に覆われる。津久井(1984)や荒川(1984)の地質図では、後述の榎原火砕流堆積物が分布するとされているものの、その堆積物基質はいずれも円磨された多源の比較的淘汰の良い極粗粒～粗粒砂で構成されており、土石流堆積物を石質の火砕流堆積物と誤認したものとみられる。この扇状地堆積面は、被覆する風成層のテフラ層序からMIS4に形成されたと判断される。

3.5 榎原火砕流堆積物

大山火山西山腹の標高200 m付近から標高650 mまで続く緩斜面を構成する黒雲母含有斜方輝石普通角閃石デイサイト本質岩片からなる火砕流堆積物である。地層名は、西伯郡大山町榎原を模式地に津久井(1984)と荒川(1984)が独立に命名している。この火砕流も典型的なブロックアンドアッシュフローの岩相を示し、発泡の悪い多面体型の本質岩片とその細粉からなる基質で構成され、不明瞭な成層構造や逆級化が認められる。本堆積物は、厚さ10 cm前後の褐色火山灰土を挟んでATに覆われている。その層序学的位置は大山火山の東に分布する黒雲母含有斜方輝石普通角閃石デイサイト質の鴨ヶ岡降下火砕堆積物[津久井(1984)の鴨ヶ丘火山灰層]とほぼ同じ層位にあり、同降下火砕堆積物は火砕流堆積物の同時異相とみなせよう。Kato *et al.* (2007)は、同降下火砕堆積物(原著では偽ホーキ火山灰)に対して複数の放射性炭素年代の平均から $41,632 \pm 203 \text{ cal yBP}$ の暦年代を算出している。津久井(1984)は、最大層厚を20～30 mで見かけ体積を約 1 km^3 (津久井, 1984)、荒川(1984)も最大層厚を20 mで見かけ体積を 2 km^3 としているが、彼らが榎原



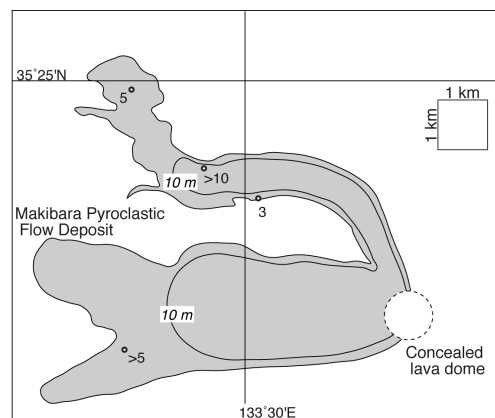
第3図 名和火砕流堆積物と振り山溶岩ドームの等層厚線図。数字は露頭で確認した層厚で、単位はm。溶岩ドームの白線コンターは100, 300, 500 m。

Fig. 3 Thickness contours for the Nawa Pyroclastic Flow Deposit and the Furikosen Lava Dome. Numerals are observed thickness at outcrops in meters. White contours in the lava dome are 100, 300 and 500 m.

火砕流堆積物としたものの大半は、前述の火山麓扇状地4堆積物相当層である。本堆積物の下流域(地点L3)での層厚は約5 mで、想定される最上流部での層厚は約20 mはあるものと地形からは判読できる(第4図)。その更に上流側の標高800 m以上の場所には火砕流を発生させた溶岩ドームが存在したであろうが、現在は後述する弥山溶岩ドームに埋まっている公算が大きい。削剥部分も含め作図した層厚コンターから算出した見かけ体積は $2.5 \times 10^{11} \text{ km}^3$ で、堆積物密度を $1,800 \text{ kg/m}^3$ とした岩石換算体積は $1.9 \times 10^{11} \text{ km}^3$ となる。

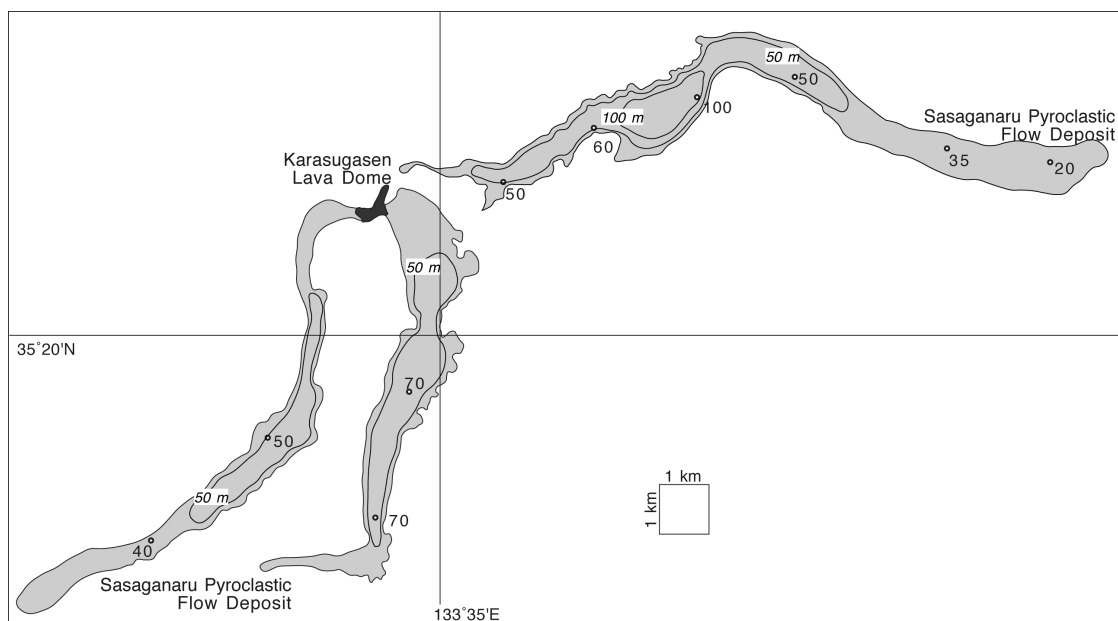
3.6 笹ヶ平火砕流堆積物

大山火山南東山腹の烏ヶ山溶岩ドームから東、南南東及び南南西方向の3つの谷地形を埋めて分布する黒雲母斜方輝石普通角閃石デイサイト本質岩片からなる火砕流堆積物である。地層名は津久井(1984)の命名で、模式地は倉吉市関金町笹ヶ平である。この火砕流も典型的な



第4図 横原火砕流堆積物の等層厚線図。数字は露頭で確認した層厚で、単位はm。

Fig. 4 Thickness contours for the Makibara Pyroclastic Flow Deposit. Numerals are observed thickness at outcrops in meters.



第5図 笹ヶ平火砕流堆積物の等層厚線図。数字は露頭で確認した層厚で、単位はm。

Fig. 5 Thickness contours for the Sasaganaru Pyroclastic Flow Deposit. Numerals are observed thickness at outcrops in meters.

ブロックアンドアッシュフローの岩相を示し、発泡の悪い多面体型の本質岩片とその細粉からなる基質で構成され、不明瞭な成層構造や逆級化が認められる。本火砕流堆積物に伴うオドリ降下火砕物は主に粗い火山砂からなり、ほとんど火山灰土を挟むことなくATを覆っている(津久井, 1984; Kimura *et al.*, 2005)。Katoh *et al.* (2007)は、同降下火砕流堆積物に対して複数の放射性炭素年代の平均から $29,320 \pm 412$ cal yBPの暦年代を算出している(ATに対しては $29,858 \pm 274$ cal yBP)。東の谷沿いの堆積物は、標高800 m付近の笹ヶ平から標高180 m付近まで続く緩斜面を構成している。また、南南東の谷沿いの堆積物は標高1,300 mの烏ヶ山山頂付近から鏡ヶ平を経て標高520 mまで続く緩斜面を、南南西の谷沿いの堆積物は同じく烏ヶ山山頂付近から大平原を経て標高330 mまで続く緩斜面を構成している。Kimura *et al.* (2005)の堆積物断面図に示されたように東の谷沿いの堆積物の最大層厚は100 m、それ以外の谷の堆積物の最大層厚は70 mに達している(第5図)。削剥部分も含め作図した層厚コンターから算出した見かけ体積は 1.3×10^6 km³で、堆積物密度を $1,800$ kg/m³とした岩石換算体積は 1.0×10^6 km³となる。

3.7 烏ヶ山溶岩ドーム

大山火山南東山腹の烏ヶ山(第1図のKS; 標高1,448 m)山頂部をつくる黒雲母斜方輝石普通角閃石デイサイトの溶岩ドームである。地層名は、津久井(1984)の烏ヶ山溶岩円頂丘による。ただし、笹ヶ平火砕流堆積物の給源と

認定された烏ヶ山溶岩ドームの大きさは、津久井(1984)が当初示していた範囲よりもかなり狭い(Kimura *et al.*, 2005)。侵食により初生的な火山地形の大半が失われているが、噴火時には溶岩岩栓をなしていたものとみられる。現存部分の最大高低差350 mを岩栓の高さと仮定すると、その溶岩体積は 7.2×10^2 km³である。

3.8 榊水原火砕流堆積物

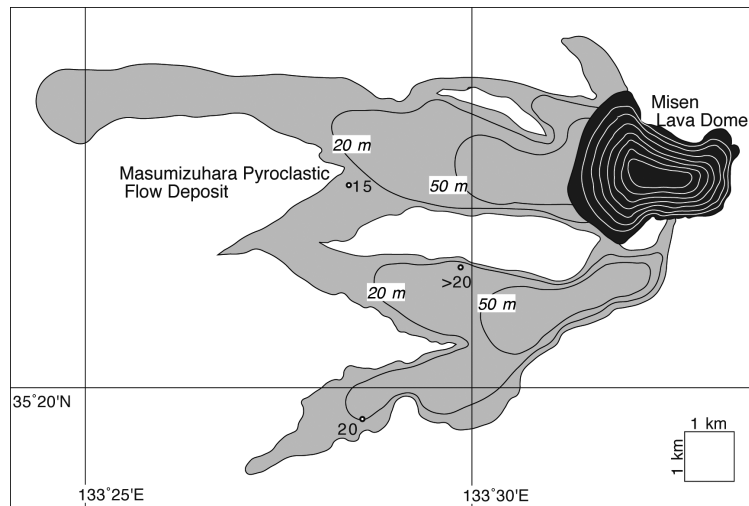
大山火山の西及び南西山腹に分布する黒雲母斜方輝石普通角閃石デイサイト本質岩片からなる火砕流堆積物である。新称で、模式地は西伯郡伯耆町金屋谷(L4地点)である。津久井(1984)の弥山火砕流堆積物から後述の阿弥陀川火砕流堆積物や火山麓扇状地3堆積物を除いた部分、荒川(1984)のオドリ火砕流堆積物から前述の笹ヶ平火砕流堆積物を除いた部分にほぼ相当する。この火砕流も典型的なブロックアンドアッシュフローの岩相を示し、発泡の悪い多面体型の本質岩片とその細粉からなる基質で構成され、不明瞭な成層構造や逆級化が認められる。模式地のL4では、厚さ数cmの褐色火山灰土を挟んでATを覆っている。また、L4地点の堆積物基底部から採取した炭化木片(DS201)から、後述するようにBC26,570–BC26,280 ($28,520$ – $28,230$ cal yBP)の暦年代を得ている(第1表)。またこの結果は、大山東方の湿地掘削コアで見つかった東大山降下火砕物(原著では弥山軽石)の放射性炭素年代($28,923 \pm 358$ cal yBP; Katoh *et al.*, 2007)とほぼ一致している。西山腹の榊水原火砕流堆積物がつくる

大山火山噴火履歴の再検討 (山元)

第1表 放射性炭素年代測定結果. IAAA ID = 株式会社加速器分析研究所の測定番号; AAA = 酸-アルカリ-酸処理; pMC = 標準現代炭素に対する試料炭素の¹⁴C濃度の割合. L2 = 北緯35度25分4.7秒, 東経133度32分38.3秒; L4 = 北緯35度22分10.4秒, 東経133度28分27.4秒.

Table 1 Results of ¹⁴C dating. IAAA ID = Measurement number for the Institute of Accelerator Analysis Ltd.; AAA = Acid-Alkali-Acid pretreatment; pMC = percentage of modern carbon. L2 = 35°25' 4.7"N, 133°32' 38.3"E; L4 = 35°22' 10.4"N, 133°28' 27.4"E.

Sample	IAAA ID	Loc	Material	Chemical pretreatment	¹⁴ C age (y BP)	δ ¹³ C (permil)	Calibrated ¹⁴ C age (y BP)	pMC (%)	Calendar age	
DS101	141722	L2	Charcoal	AAA	17,280 ± 60	-26.37 ± 0.58	17,250 ± 60	11.67 ± 0.09	2σ	BC19,076 - BC18,650
									1σ	BC18,961 - BC18,743
DS102	141723	L2	Charcoal	AAA	17,250 ± 70	-24.39 ± 0.37	17,260 ± 70	11.66 ± 0.09	2σ	BC19,088 - BC18,654
									1σ	BC18,971 - BC18,749
DS201	141723	L4	Charcoal	AAA	24,290 ± 90	-23.38 ± 0.46	24,320 ± 90	4.85 ± 0.05	2σ	BC26,699 - BC26,131
									1σ	BC26,572 - BC26,277



第6図 榎水原火砕流堆積物と弥山溶岩ドームの等層厚線図. 数字は露頭で確認した層厚で, 単位はm. 溶岩ドームの白線コンターは100 m間隔.

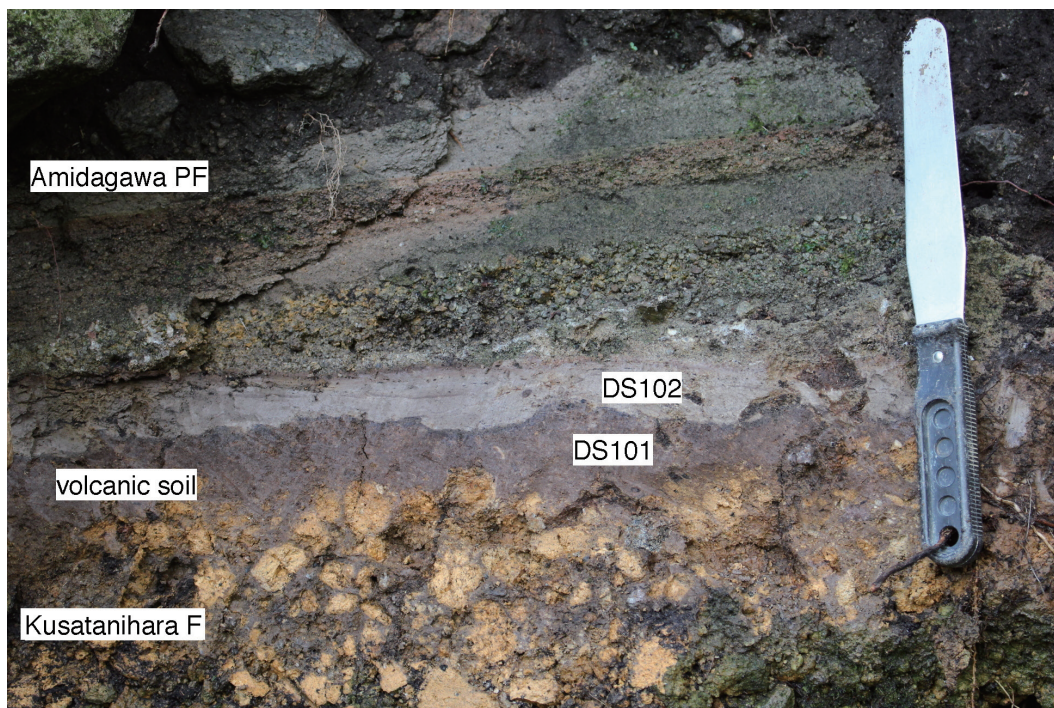
Fig. 6 Thickness contours for the Masumizuhara Pyroclastic Flow Deposit and the Misen Lava Dome. Numerals are observed thickness at outcrops in meters. White contours in the lava dome are 100-m-intervals.

緩斜面は, 標高250 m付近から榎水原の標高950 mまで広がり, そのまま標高1,709 mの弥山をつくるデイサイト溶岩ドーム斜面に連続している. また, 南西山腹の本堆積物は標高240 m付近から福永原を経て弥山の南山腹の標高950 mまでの緩斜面を構成している. 堆積物の層厚は, 標高350 m付近の中腹で約20 mである. さらに上流部では, 地形判読から最大50 m前後の層厚を持つものとみられる(第6図). 削剥部分も含め作図した層厚コンターから算出した見かけ体積は $9.4 \times 10^1 \text{ km}^3$ で, 堆積物密度を $1,800 \text{ kg/m}^3$ とした岩石換算体積は $7.3 \times 10^1 \text{ km}^3$ となる.

3. 9 弥山溶岩ドーム

大山山頂部の弥山(第1図のMS; 標高1,709 m)や剣ヶ

峰(第1図のKN; 標高1,729 m)をつくる黒雲母斜方輝石普通角閃石デイサイトの溶岩ドームである. 地層名は, 太田(1962)の弥山溶岩, 津久井(1984)の弥山溶岩円頂丘による. ただし, 彼らの示した弥山溶岩のうち北縁部と南縁部については弥山の溶岩ドーム地形からは突出した尾根をなしており, 別の岩体に区分すべきである. 実際に弥山南斜面の一ノ沢沿いのデイサイト溶岩からは, 古期溶岩を示す $0.35 \pm 0.02 \text{ Ma}$ のK-Ar年代が報告されている(Kimura *et al.*, 2003). 削剥部分も含め作図した層厚コンター(第6図)から算出した溶岩体積は, $1.9 \times 10^0 \text{ km}^3$ である. ただし, この体積は弥山溶岩ドームの底がほぼ平らと仮定したもので, 伏在している可能性が高い横原火砕流堆積物の給源溶岩ドームの体積も包含している可能性がある.



第7図 薄い火山灰土を挟んで草谷原降下火砕堆積物を覆う阿弥陀川火砕流堆積物(L2地点；西伯郡大山町草谷原)。DS101とDS102は放射性炭素年代測定試料。F = 降下火砕堆積物；PF = 火砕流堆積物。

Fig. 7 The Amidagawa Pyroclastic Flow Deposit overlying the Kusatanihara Pyroclastic Fall Deposit with intercalating thin volcanic soil at L2 (Kusatanihara, Daisen Town). DS101 and DS102 are ¹⁴C-dating samples. F = pyroclastic fall deposit; PF = pyroclastic flow deposit.

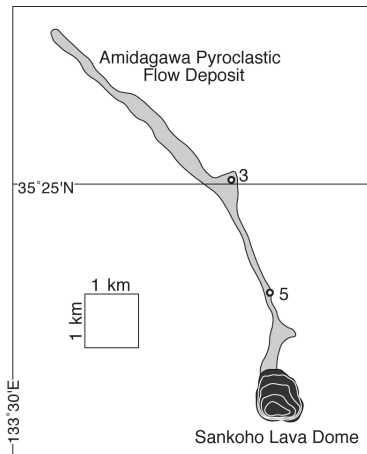
3. 10 火山麓扇状地3堆積物

大山火山の各主要河川沿いに広がる段丘化した土石流堆積物で、楨原・笹ヶ平・榊水原火砕流堆積物がつくる地形面を削削している。北山腹の西伯郡大山町草谷原～清水原や西山腹の西伯郡伯耆町大原で特にその分布が広い。荒川(1984)は北山腹の清水原東端の露頭を模式地に清水原火砕流堆積物を定義しているが、この露頭を含め清水原を構成するデイスাইト石質岩片に富む粗粒堆積物は、いずれも円磨された多源の比較的淘汰の良い極粗粒～粗粒砂からなる基質を持ち、土石流堆積物を石質の火砕流堆積物と誤認したものとみられる。荒川(1984)が大山寺デブリアバランチ堆積物と呼んだ北東山腹の緩斜面構成物も、堆積面が平滑で流れ山を持たないこと、岩塊相が認定できないこと、岩片支持で淘汰された粗粒砂基質を持つことから、塊状の土石流堆積物を誤認したものであり、本扇状地堆積物に含めている。

3. 11 阿弥陀川火砕流堆積物

大山火山北山腹の阿弥陀川沿いに分布する単斜輝石含有斜方輝石黒雲母普通角閃石デイスাইト本質岩片からなる火砕流堆積物である。この火砕流も典型的なブロックアンドアッシュフローの岩相を示し、発泡の悪い多面体

型の本質岩片とその細粉からなる基質で主に構成されている。模式地の西伯郡大山町草谷原(L2地点)では、厚さ3 cmの褐色火山灰土を挟んで基底部に成層した火砕サージ相を伴う本堆積物が、草谷原降下火砕堆積物(津久井, 1984)を覆っている(第7図)。津久井(1984)は、この露頭(原著のL地点)で彼の弥山火砕流堆積物が草谷原降下軽石を直接覆うものとしていた。また福元・三宅(1994)は、この露頭で両者の間に火砕流に焼かれた炭質物と土壌層の存在を記載したものの、上位の火砕流堆積物を荒川(1984)の清水原火砕流堆積物に対比している。しかし、清水原の地形面自体は前述のように火山麓扇状地3堆積物で構成されること、本火砕流堆積物は阿弥陀川沿いで清水原よりも一段低い段丘面をつくることから、清水原火砕流とは異なる新称を定義する。本報告では、L2地点の火山灰土最上部の炭化物(DS101)と火砕流最下部に含まれる炭化物(DS102)から、後述するようにBC18,961–BC18,743 (20,911–20,693 cal yBP)とBC18,971–BC18,749 (20,921–20,699 cal yBP)の暦年代を得ている(第1表)。福元・三宅(1994)が指摘した岩質の一致と分布地形から、本堆積物の給源は阿弥陀川源頭部の三鉢峰溶岩ドームと判断される。堆積物の層厚は模式地のL2で4 m、上流の河床で5 mである(第8図)。削削部分も含めた分布範囲



第8図 阿弥陀川火砕流堆積物と三鈷峰溶岩ドームの等層厚線図。数字は露頭で確認した層厚で、単位はm。溶岩ドームの白線コンターは100 m 間隔。

Fig. 8 Thickness contours for the Amidagawa Pyroclastic Flow Deposit and the Sankoho Lava Dome. Numerals are observed thickness at outcrops in meters. White contours in the lava dome are 100-m-intervals.

で平均層厚を5 mとすると、見かけ体積は $8.6 \times 10^3 \text{ km}^3$ で、堆積物密度を $1,800 \text{ kg/m}^3$ とした岩石換算体積は $6.7 \times 10^3 \text{ km}^3$ となる。

3. 12 三鈷峰溶岩ドーム

大山火山山頂部の北東に位置する三鈷峰(第1図のSN; 標高1,516 m)を構成する単斜輝石含有斜方輝石黒雲母普通角閃石デイサイトの溶岩ドームである。地層名は、太田(1962)の三鈷峰溶岩、津久井(1984)の三鈷峰溶岩円頂丘による。作図された層厚コンター(第8図)から算出した溶岩体積は $1.5 \times 10^{11} \text{ m}^3$ である。

3. 13 火山麓扇状地2堆積物

大山火山北山腹から北北東山麓の阿弥陀川沿いに主に広がる段丘化した土石流堆積物で、阿弥陀川火砕流堆積物を削剥している。荒川(1984)の最新期扇状地面堆積物に相当する。

3. 14 火山麓扇状地1堆積物

大山火山山頂部周辺から発生する現在成長中の土石流堆積物で、下流の沖積面へとつながる。

4. 放射性炭素年代測定

L2地点の阿弥陀川火砕流堆積物基底及び直下の土壌から採取した炭化木片(DS101, DS102)と、L4地点の榊水原火砕流堆積物基底から採取した炭化木片

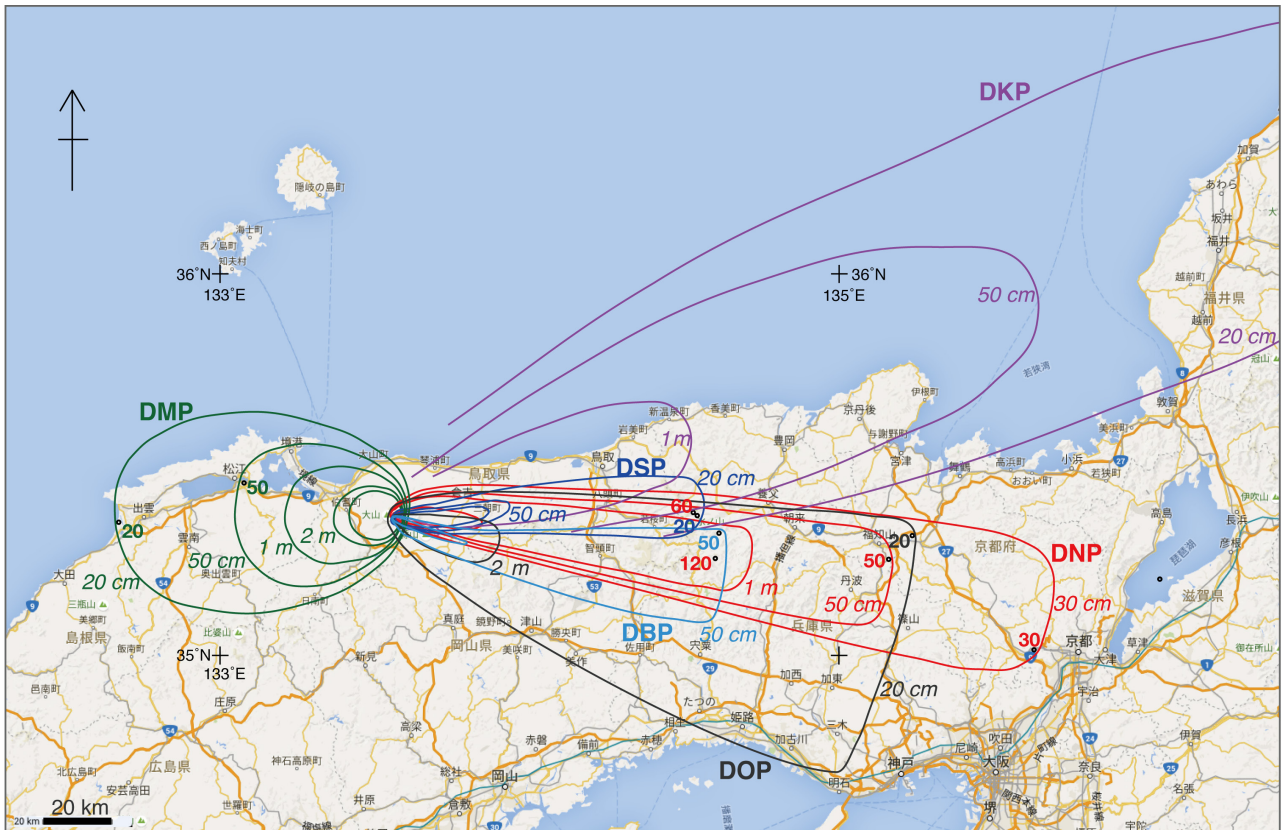
(DS201)の放射性炭素年代測定は、株式会社加速器分析研究所に依頼した。依頼先では、酸-アルカリ-酸処理により試料から不純物を化学的に取り除かれたのち、試料は燃焼され、発生した二酸化炭素からグラファイトが生成され、これが測定装置に装着されている。年代測定では、加速器をベースとした ^{14}C -AMS専用装置(NEC社製)が使用され、 ^{14}C の計数、 ^{13}C 濃度($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$)、 ^{14}C 濃度($^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$)が測定されている。また、測定では米国国立標準局(NIST)から提供されたシュウ酸(HOx II)を標準試料としており、この標準試料とバックグラウンド試料の測定も同時に実施されている。

L4地点の榊水原堆積物基底から採取した炭化木片(DS201)からBC26,570–BC26,280、L2地点の阿弥陀川火砕流堆積物直下の炭化物(DS101)と同火砕流最下部に含まれる炭化物(DS102)からBC18,961–BC18,743とBC18,971–BC18,749の暦年代を得ている(第1表)。この測定結果は層序関係と矛盾しておらず、良好な年代が得られたものと判断される。すなわち、近接するDS101とDS102がほぼ同じ年代を示しており、ATの直上にあるDS201がATよりも若干若い年代を示している。なお、暦年較正年代の計算には、IntCal13データベース(Reimer *et al.*, 2013)を用い、OxCalv4.2較正プログラム(Bronk Ramsey, 2009)が使用されている。

5. 大山火山起源の降下火砕物の分布

約6万年前に噴出したDKPについては、その等層厚線分布が町田・新井(1979)や竹本(1991)により公表されており、これを使ってマグマ体積を見積もることが可能である。しかし、DKP以前の大規模な降下火砕物について示された広域の等層厚線図はほとんどなく、文献情報を基に新たに作成し直した(第9図)。唯一、大山火山近傍の等層厚線(岡田・石賀, 2000)を遠方に外挿して書き直した須藤ほか(2007)の分布図はあるものの、その外挿手法は特異な図学的処理によるものであり、その科学的な正当性は低い。しかも、須藤ほか(2007)の示した等層厚線図は、後述するように遠方での降下火砕物の層厚とは全く一致しておらず、相当な過小評価となっている。同様な外挿手法は大山火山起源の降下火砕物以外にも用いられており、須藤ほか(2007)の作成したデータベースの等層厚線図とそこから算出された噴出量は全て評価に用いるべきではない。

関金降下火砕物(DSP)は、DKPの下位に位置する黒雲母含有斜方輝石普通角閃石デイサイトの約7万年前に噴出したプリニー式降下火砕物である(町田・新井, 1979)。大山から約10 km東で1 m以上の層厚を持ち(岡田・石賀, 2000)、遠方では加藤ほか(2001)が兵庫県北部(大山から約85 km東)で記載した層厚20 cmの降下軽石堆積物(試料T-12)に対比される。さらに遠方では、長野県木曾



第9図 大山火山起源の降下火砕堆積物の分布. DKP = 倉吉降下火砕堆積物(町田・新井, 1979; 竹本, 1991); DSP = 関金降下火砕堆積物(町田・新井, 1979; 加藤ほか, 2001); DNP = 生竹降下火砕堆積物(町田・新井, 1979; 井本ほか, 1989; 野村, 1994; 加藤ほか, 2001; 小滝ほか, 2002); DMP = 松江降下火砕堆積物(町田・新井, 1979); DBP = 別所降下火砕堆積物(岡田・石賀, 2000; 加藤ほか, 2001); DOP = 奥津降下火砕堆積物(加藤ほか, 2004; 小滝ほか, 2002). 数字は堆積物の厚さで, 単位はcm. DKPの等層厚線は竹本(1991)による. 他の等層厚線は, 岡田・石賀(2000)の大山近傍のものに遠方のデータを加えて作成した. 基図にはGoogleマップを用いた.

Fig. 9 Distributions of pyroclastic fall deposits from Daisen Volcano. DKP = Kurayoshi Pyroclastic Fall Deposit (Machida and Arai, 1979; Takemoto, 1991); DSP = Sekigane Pyroclastic Fall Deposit (Machida and Arai, 1979; Katoh *et al.*, 2001); DNP = Namatake Pyroclastic Fall Deposit (Machida and Arai, 1979; Imoto *et al.*, 1989; Nomura, 1994; Katoh *et al.*, 2001; Kotaki *et al.*, 2002); DMP = Matsue Pyroclastic Fall Deposit (Machida and Arai, 1979); DBP = Bessho Pyroclastic Fall Deposit (Okada and Ishiga, 2000; Katoh *et al.*, 2001); DOP = Okutsu Pyroclastic Fall Deposit (Katoh *et al.*, 2004; Kotaki *et al.*, 2002). Numerals are thickness of the deposits in centimeters. The isopachs for DKP are taken from Takemoto (1991). Other isopachs are redrawn in this study, adding new data in the distal regions to the proximal isopachs of Okada and Ishiga (2000). Base map is taken from Google Map.

地域(大山から約370 km東)で層厚1.5 cmの細粒軽石降下火砕物として確認されている(竹本ほか, 1987). これに対して, 須藤ほか(2007)のDSP等層厚線図は, 大山から約83 km東で層厚が0 cmとなるように作図されている. 遠方の分布を無視した須藤ほか(2007)の等層厚線図が過小評価であることは明らかである.

生竹降下火砕物(DNP)は, DSPの下位に位置する黒雲母含有斜方輝石普通角閃石デイサイトの約8万年前に噴出したプリニー式降下火砕物で, 佐治ほか(1975)により

生竹浮石と呼ばれていたものである(町田・新井, 1979). 大山から約10 km東南東で2 m以上の層厚を持ち(岡田・石賀, 2000), 遠方では加藤ほか(2001)が兵庫県北部(大山から約90 km東南東)で記載した層厚120 cmの軽石降下火砕物(試料T-19)に対比されるほか, 京都府福知山市(大山から約150 km東)の土師火山灰(層厚50 cm; 野村, 1994; 小滝ほか, 2002)に対比され, 京都府越畑盆地(大山から約190 km東南東)でも層厚30 cmの降下火砕物の分布が確認されている(井本ほか, 1989). さらに遠方で

は、富士山東麓(大山から約450 km東)で阿蘇4(町田・新井, 1992)の上位の富士火山噴出物間に確認されている(町田, 1996)。これに対して、須藤ほか(2007)のDNP等層厚線図は、大山から約87 km東南東で層厚が0 cmとなるように作図されている。遠方の分布を無視した須藤ほか(2007)の等層厚線図が過小評価であることは明らかである。

松江降下火砕物(DMP)は、火山の西側に分布する黒雲母含有カミングトン閃石普通角閃石デイサイトのプリニー式降下火砕物である(町田・新井, 1979)。町田・新井(1979)が記載したように島根県出雲市周辺(大山から約80 km西)で20 cm前後の層厚を持ち、MIS5eの海成層を覆うことから、その噴出年代は13万年前である。一方、須藤ほか(2007)のDMP等層厚線図は、大山から約61 km西で層厚が0 cmとなるように作図されている。遠方の分布を無視した須藤ほか(2007)の等層厚線図が過小評価であることは明らかである。

別所降下火砕物(DBP)は、大山最下部テフラ中の降下火砕物で、大山から10 km東南東で3 m以上の層厚を持つ(岡田・石賀, 2000)。加藤ほか(2004)によるとこの火砕物は黒雲母カミングトン石含有斜方輝石普通角閃石デイサイト質で、近畿地方を中心に広域に分布する可能性が大きい。例えば加藤ほか(2001)が兵庫県北部(大山から約90 km東)で記載した層厚50 cmの降下軽石堆積物(試料T-20)に対比されている。これに対して、須藤ほか(2007)のDBP等層厚線図は、大山から約26 km東南東で層厚が0 cmとなるように作図されている。遠方の分布を無視した須藤ほか(2007)の等層厚線図が過小評価であることは明らかである。

奥津降下火砕物(DOP)も大山最下部テフラ中の降下火砕物で、DBPよりも下位にあり、大山から約10 km東南東で3 m以上の層厚を持つ(岡田・石賀, 2000)。またより北側に分布する岡田・石賀(2000)のhpm1軽石はDOPと共に黒雲母含有カミングトン有斜方輝石普通角閃石デイサイト質で両者の鉱物の組成の特徴が良く一致すること、分布域は異なるがほぼ同じ層準にあること、ジルコンのフィッシュ・トラック年代は前者が 230 ± 70 ka、後者が 190 ± 60 kaと誤差の範囲で重なること(木村ほか, 1999)から、両者は同一の噴火堆積物であると考えられている(加藤ほか, 2004)。また、琵琶湖高島沖コア中の火山灰(長橋ほか, 2004)との対比から加藤ほか(2004)はDOPの年代を210 ka頃と考えている。遠方では京都府綾部市(大山から約150 km東)の層厚20 cmの物部火山灰層がDOPに対比可能であるほか(小滝ほか, 2002)、神戸市のポートアイランドコア(大山から約150 km南東)からも対比可能な火砕物が見出されている(小滝ほか, 2007; Kotaki *et al.*, 2011)。須藤ほか(2007)のDOP等層厚線図は、大山から約205 km東南東で層厚が0 cmとなるように作図されているものの、分布の幅が狭く、綾部市やポート

アイランドは分布範囲外となっている。

6. 大山火山起源の降下火砕物のマグマ体積

降下火砕物堆積物のマグマ体積については、層厚(T)と等層厚線が囲む面積(A)との関係(第2表)から岩石換算値として計測し直した(第3表)。軽石降下火砕堆積物についてはバルク密度を 800 kg/m^3 、オドリや鴨ヶ岡のような発泡の悪い石質降下火砕堆積物については $1,500 \text{ kg/m}^3$ としている。通常、火口近傍の堆積物層厚が測定できたテフラの場合は、各層厚と面積の相関から遠方部の層厚分布をグラフ上で作図・外挿し、各層厚毎の体積を積算して計測することが望ましい。しかし、大山火山の降下火砕物のように火口近傍の堆積物層厚が測定できない場合は、Legros (2000)の簡便法(最小体積 $= 3.69 \times A \times T$)を用いて体積を見積もる手法が現実的である。この方法は一つの等層厚線の面積から全体積の最小値を与えるもので、降下火砕堆積物全体の等層厚分布が把握できていない場合にも用いることが可能である。また、真の体積はLegros (2000)の最小値の数倍以内であることが多い。複数の等層厚線がある場合は、最も大きな最小体積値を用いるが、第2表に示したように遠方の等層厚線面積ほど体積見積もりに大きく寄与する傾向がある。また、このLegros (2000)の簡便法は、Pyle (1989)の手法を拡張したものであるが、結晶法適用例の平均値を用いるHayakawa (1985)の経験式と結果的に算術式の形は同じで $A \times T$ の係数が約 $1/3$ となる。このことは第一次近似としてHayakawa (1985)の経験式は有効であり、既存文献にある彼の手法で決められた値もその意味を理解していれば十分使えるものであることを意味している。第10図は、マグマ体積に換算したLegros法最小体積とHayakawa法体積の比較である。ここでは、各等層厚線から算出されるHayakawa法体積の平均を降下火砕堆積物の体積としている。また、DKPについては、比較的信頼性の高い複数の等層厚線があるので(竹本, 1991)、比較のためBonadonna and Houghton (2005)のべき乗則適合法を用いた体積(第11図)も示している。同法によるDKPの岩石換算体積は約 $2.1 \times 10^{11} \text{ km}^3$ で、Hayakawa法体積とほぼ一致し、Legros法最小体積のほぼ2倍である。また、Tephra2の再現計算からDKP噴出量を推定した山元(2016)では、質量を $4 \sim 8 \times 10^{13} \text{ kg}$ (体積換算すると $1.7 \sim 3.4 \times 10^{11} \text{ km}^3$)と推定している。一方、明らかな過小評価である須藤ほか(2007)との比較で最も乖離が大きなものはDNPで、須藤ほか(2007)の算出したDNPに対する $1.1 \times 10^0 \text{ km}^3$ のみかけ体積は、本報告のLegros法最小体積の $1/6$ 、Hayakawa法体積の $1/10$ となっている。

第2表 降下火砕堆積物の等層厚線の囲む面積と最小体積。最小体積は Legros (2000)の手法により算出し、最も大きな最小体積を与える等層厚線値のセルに影をつけている。等層厚線データのうち、本研究のものはボールド体、岡田・石賀(2000)のものはいタリック体、竹本(1991)のものはアンダーラインの数字で示している。n.d.は、データなし、降下火砕物の名称は以下の文献による；^a 町田・新井(1979)；^b 津久井(1984)；^c 岡田・石賀(2000)；^d 加藤ほか(2004)。デイサイトの岩石密度は2,300 kg/m³。

Table 2 Area within isopachs and minimum volume of pyroclastic fall deposits. Minimum volume was determined by the method in Legros (2000), and the isopach cell presenting the largest minimum volume is shaded. Isopach data by this study, Okada and Ishiga (2000) and Takemoto (1991) are shown as numerals in bold letter, italic letter and underlined, respectively. n.d. means no data. The names of pyroclastic fall deposits were defined by ^a Machida and Arai (1979); ^b Tsukui (1984); ^c Okada and Ishiga (2000); ^d Katoh *et al.* (2004). Density of dense-rock dacite is 2,300 kg/m³.

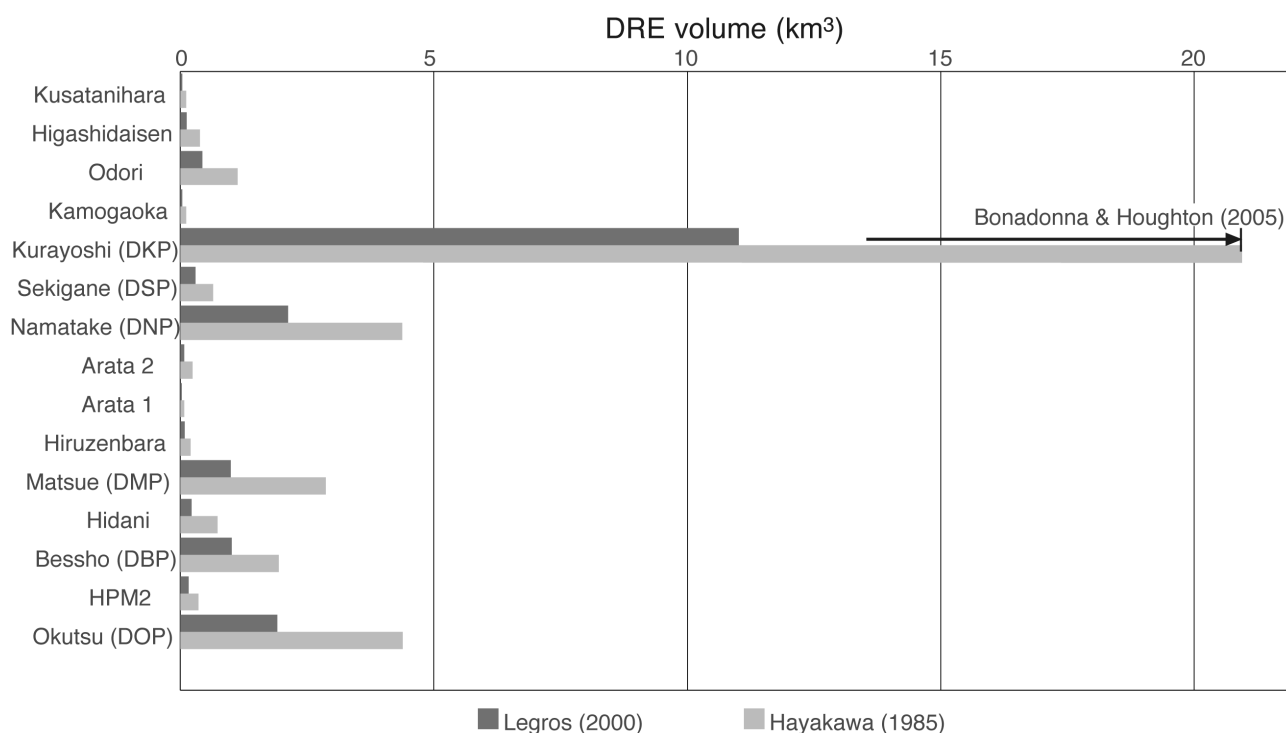
Tephra	10-cm isopach (km ²)	20-cm isopach (km ²)	30-cm isopach (km ²)	40-cm isopach (km ²)	50-cm isopach (km ²)	60-cm isopach (km ²)	80-cm isopach (km ²)	100-cm isopach (km ²)	200-cm isopach (km ²)	Min Volume (km ³)	DRE Volume (km ³)
Kusatamihara ^b	n.d	n.d	n.d	n.d	<i>5.3 × 10¹</i>	n.d	n.d	n.d	n.d	9.8 × 10 ⁻²	3.4 × 10 ⁻²
Higashidaisen ^b	n.d	n.d	n.d	<i>2.5 × 10²</i>	<i>1.8 × 10²</i>	n.d	n.d	n.d	n.d	3.7 × 10 ⁻¹	1.3 × 10 ⁻¹
Odori ^c (Upper)	n.d	<i>4.6 × 10²</i>	<i>1.4 × 10²</i>	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	3.4 × 10 ⁻¹	2.2 × 10 ⁻¹
Odori ^c (Lower)	n.d	<i>4.5 × 10²</i>	<i>2.0 × 10²</i>	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	3.3 × 10 ⁻¹	2.2 × 10 ⁻¹
Kamogaoka ^b	<i>1.5 × 10²</i>	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	5.4 × 10 ⁻²	3.5 × 10 ⁻²
Kurayoshi (DKP) ^a	<i>8.6 × 10⁴</i>	<i>3.8 × 10⁴</i>	n.d	n.d	<i>1.1 × 10⁴</i>	n.d	n.d	<i>3.0 × 10³</i>	n.d	3.2 × 10 ¹	1.1 × 10 ¹
Sekigane (DSP) ^a	n.d	<i>1.2 × 10³</i>	n.d	n.d	<i>2.1 × 10²</i>	n.d	n.d	<i>1.2 × 10²</i>	n.d	8.5 × 10 ⁻¹	3.0 × 10 ⁻¹
Namatake (DNP) ^a	n.d	n.d	<i>5.5 × 10³</i>	n.d	<i>2.9 × 10³</i>	n.d	n.d	<i>1.4 × 10³</i>	<i>1.2 × 10²</i>	6.1 × 10 ⁰	2.1 × 10 ⁰
Arata 2 ^c	n.d	n.d	<i>2.1 × 10²</i>	n.d	n.d	n.d	<i>6.7 × 10¹</i>	n.d	n.d	2.3 × 10 ⁻¹	8.0 × 10 ⁻²
Arata 1 ^c	n.d	n.d	<i>6.3 × 10¹</i>	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	7.0 × 10 ⁻²	2.4 × 10 ⁻²
Hiruzenbara ^a	n.d	<i>3.4 × 10²</i>	n.d	<i>1.3 × 10²</i>	n.d	<i>7.4 × 10¹</i>	<i>2.8 × 10¹</i>	n.d	n.d	2.5 × 10 ⁻¹	8.7 × 10 ⁻²
Matsue (DMP) ^a	n.d	<i>3.8 × 10³</i>	n.d	n.d	<i>1.5 × 10³</i>	n.d	n.d	<i>7.4 × 10²</i>	<i>2.9 × 10²</i>	2.9 × 10 ⁰	9.9 × 10 ⁻¹
Hidami ^b	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	<i>8.7 × 10¹</i>	6.4 × 10 ⁻¹	2.2 × 10 ⁻¹
Bessho (DBP) ^c	n.d	n.d	n.d	n.d	<i>1.6 × 10³</i>	n.d	n.d	n.d	n.d	2.9 × 10 ⁰	1.0 × 10 ⁰
HPM2 ^c	n.d	<i>6.2 × 10²</i>	n.d	<i>2.7 × 10²</i>	n.d	<i>1.3 × 10²</i>	<i>4.0 × 10¹</i>	n.d	n.d	4.6 × 10 ⁻¹	1.6 × 10 ⁻¹
Okutsu (DOP) ^d	n.d	<i>7.5 × 10³</i>	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	<i>2.9 × 10²</i>	5.5 × 10 ⁰	1.9 × 10 ⁰

大山火山噴火履歴の再検討 (山元)

第3表 大山火山噴出物の岩石換算体積. DKPの年代は長橋ほか(2016), DSPからDBPの年代は山元(2015)のコンパイルによる. 他の噴出物の年代の引用は本文を参照のこと.

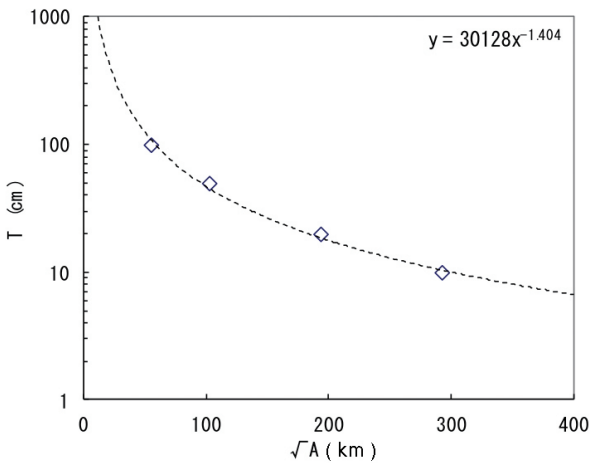
Table 3 Dense-rock equivalent volume for the products of Daisen Volcano. Eruption ages for DKP and DSP to DBP are based by Nagahashi *et al.* (2016) and compiled data in Yamamoto (2015), respectively. See text for references of other product ages.

Age (ka)	Lava (km ³ DRE)	Pyroclastic flow (km ³ DRE)	Pyroclastic fall (km ³ DRE)	Total (km ³ DRE)
20.8	Sankoho 1.5 × 10 ⁻¹	Amidagawa 6.7 × 10 ⁻³		1.6 × 10 ⁻¹
21			Kusatanihara 3.4 × 10 ⁻²	3.4 × 10 ⁻²
28.6	Misen 1.9 × 10 ⁰	Masumizuhara 7.3 × 10 ⁻¹	Higashidaisen 1.3 × 10 ⁻¹	2.8 × 10 ⁰
29.3	Karasugasen 7.2 × 10 ⁻²	Sasaganaru 1.0 × 10 ⁰	Odori 4.4 × 10 ⁻¹	1.5 × 10 ⁰
41.6		Makibara 1.9 × 10 ⁻¹	Kamogaoka 3.5 × 10 ⁻²	2.3 × 10 ⁻¹
60			Kurayoshi (DKP) 1.1 × 10 ¹	1.1 × 10 ¹
67			Sekigane (DSP) 3.0 × 10 ⁻¹	3.0 × 10 ⁻¹
80			Namatake (DNP) 2.1 × 10 ⁰	2.1 × 10 ⁰
83			Arata 2 8.0 × 10 ⁻²	8.0 × 10 ⁻²
93			Arata 1 2.4 × 10 ⁻²	2.4 × 10 ⁻²
100	Furikosen 3.6 × 10 ⁻¹	Nawa 1.3 × 10 ⁰		1.7 × 10 ⁰
115			Hiruzenbara 8.7 × 10 ⁻²	8.7 × 10 ⁻²
130			Matsue (DMP) 9.9 × 10 ⁻¹	9.9 × 10 ⁻¹
170			Hidani 2.2 × 10 ⁻¹	2.2 × 10 ⁻¹
190			Bessho (DBP) 1.0 × 10 ⁰	1.0 × 10 ⁰
200			HPM2 1.6 × 10 ⁻¹	1.6 × 10 ⁻¹
210			Okutsu (DOP) 1.9 × 10 ⁰	1.9 × 10 ⁰



第10図 岩石換算した Legros (2000) 法最小体積とHayakawa (1985) 法体積の比較. DKPについてはBonadonna and Houghton (2005) の手法による体積(第11図)も表示している.

Fig. 10 Comparison between dense-rock equivalent volumes for the pyroclastic fall deposits from Daisen Volcano by the methods in Legros (2000) and Hayakawa (1985). The result of the power-law fit by Bonadonna and Houghton (2005) in Figure 11 is only added for DKP.



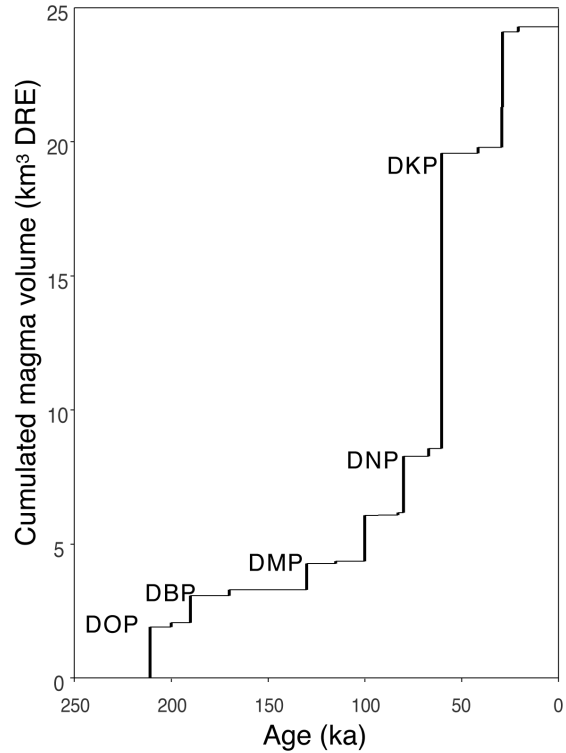
第11図 DKPに対する層厚(T)と等層厚線の囲む面積(A)の関係. Bonadonna and Houghton (2005)の計算式を当てはめると, DKPの見かけ体積は60 km³となる.

Fig.11 Thickness (T) versus area within isopach (A) for DKP. Using the equation by Bonadonna and Houghton (2005), the apparent volume of DKP is estimated at 60 km³.

7. 積算マグマ噴出量階段図の改訂

大山火山のマグマ噴出量階段図は, 電力事業者の作成資料として第122回原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合の配付資料(原子力規制委員会, 2014)に掲載されている。電力事業者の評価では, 新期大山の活動で約6万年前のDKPだけが突出して大きいこと, DKP噴火に至る活動間隔は30万年以上であることが示されている。しかしながら, すでに指摘したようにこの評価の基となった階段図は津久井(1984)の層序を基本としていること, 降下火砕物の体積として明らかな過小評価である須藤ほか(2007)の値を採用していること, 須藤ほか(2007)の火砕物の見かけ体積値と溶岩の岩石体積値を区別しないで図示していることに問題がある。

本研究で計測し直し作成した最近約20万年間の大山火山噴出物のマグマ噴出量時間階段図(第12図)と第122回審査会合配付資料の階段図を比較すると, 最大規模の噴火であったDKPと他の噴火との違いが小さくなったことが指摘できる。特にDKPに先行した8万年前のDNPの規模は電力事業者の評価よりも相当に大きくなり, DKPに次ぐ規模であったことは明らかである。また, 今回の階段図では10万年前頃から階段の傾きが急に, すなわちマグマ噴出率が大きくなる傾向が認められ, その中でDKPが発生したように見ることが出来る。従って, DKPだけを大山火山の噴火履歴の中で特殊なものとして別物扱いする必要はない。電力事業者の主張するDKP噴火に



第12図 25万年前以降の大山火山噴出物積算マグマ噴出量階段図. DKP = 倉吉降下火砕堆積物; DNP = 生竹降下火砕堆積物; DMP = 松江降下火砕堆積物; DBP = 別所降下火砕堆積物; DOP = 奥津降下火砕堆積物.

Fig.12 Cumulated magma volume versus age for the products of Daisen Volcano since 250 ka. DKP = Kurayoshi Pyroclastic Fall Deposit; DNP = Namatake Pyroclastic Fall Deposit; DMP = Matsue Pyroclastic Fall Deposit; DBP = Bessho Pyroclastic Fall Deposit; DOP = Okutsu Pyroclastic Fall Deposit.

至る活動間隔が30万年以上との主張も, それ以上の長期にわたってマグマの供給率が一定とするだけの根拠はなく, 意味のある評価とはなっていない。むしろマグマ噴出率が明らかに時間変化していることは, そのような仮定は成立していないことを意味していよう。

8. まとめ

大山火山の噴火履歴を再構築し, マグマ噴出量の定量化を実施した。その結果, 明らかにしたことは以下の通りである。

1) 大山火山噴出物は, 奥津降下火砕堆積物以降の新期大山火山噴出物とこれよりも下位の古期大山火山噴出物に分けられる。本研究では, 降下火砕物を除いた新期大山火山噴出物を, 下位から火山麓扇状地5堆積物, 名

和火碎流堆積物, 振子山溶岩ドーム(新称), 火山麓扇状地4堆積物, 横原火碎流堆積物, 笹ヶ平火碎流堆積物, 鳥ヶ山溶岩ドーム, 桝水原火碎流堆積物(新称), 弥山溶岩ドーム, 火山麓扇状地3堆積物, 阿弥陀川火碎流堆積物(新称), 三鈷峰溶岩ドーム, 火山麓扇状地2堆積物, 火山麓扇状地1堆積物に区分した。

2) 大山火山の最新期噴火を弥山溶岩ドームの形成とする津久井(1984)と, 三鈷峰溶岩ドームの形成とする福元・三宅(1994)の異なる主張があったが, 本研究の結果は後者を支持している。新たに実施した放射性炭素年代測定の結果, 三鈷峰溶岩ドーム形成に伴う阿弥陀川火碎流堆積物からは20.8千年前, 弥山溶岩ドーム形成に伴う桝水原火碎流堆積物からは28.6千年前の暦年代が得られた。

3) 新期大山火山の降下火碎堆積物群の体積を, 層厚と等層厚線の囲む面積の関係から計測し直した。須藤ほか(2007)のデータベースにある同堆積物群の体積は, 遠方の堆積物分布が無視されており, 過小評価になっている。同データベースの体積計測手法には科学的な正当性がなく, 大山火山以外の事例についても引用すべきではない。

4) 電力事業者は大山火山の長期活動評価を行っているが, その評価には津久井(1984)の層序と須藤ほか(2007)の体積値が採用されており問題がある。本研究で作成し直したマグマ噴出量階段図と電力事業者のものを比較すると, 最大規模の噴火であったDKPと他の噴火との違いが小さくなったことが指摘できる。特に事業者の評価では, 大山火山の活動の中でのDKPの規模の特異性が強調されていた。しかし, 今回の階段図では約10万年前頃から階段の傾きが急に, すなわち噴出率が大きくなる傾向が認められ, その中でDKPが発生したように見ることが出来る。従って, DKPだけを大山火山の噴火履歴の中で特殊なものとして別物扱いする必要はない。

謝辞: 本研究は, 原子力規制庁「平成27年度原子力施設等防災対策等委託費(火山影響評価に係る技術的知見の整備)」の成果の一部である。研究の実施に当たっては, 同庁担当者に日頃からご支援を頂いている。また, 査読者の星住英夫さん, 編集担当の工藤 崇さんのご指摘は原稿改善に有益であった。ここに感謝いたします。

文 献

荒川 宏(1984) 大山火山北西部における火山麓扇状地の形成, 地理学評論, Series A, **57**, 831–855.
 Bonadonna, C. and Houghton, B.F. (2005) Total grain-size distribution and volume of tephra-fall deposits. *Bull. Volcanol.*, **67**, 441–456.
 Bronk Ramsey, C. (2009) Bayesian analysis of radiocarbon dates. *Radiocarbon*, **51**, 337–360
 福元和孝・三宅康幸(1994) 大山火山, 弥山溶岩ドーム

よりも新期に形成された三鈷峰溶岩ドームと清水原火碎流. 第四紀, no. 26, 45–50.
 原子力規制委員会(2014) 第122回原子力発電所の新規規制基準適合性に係る審査会合資料. http://www.nsr.go.jp/disclosure/committee/youshikisya/tekigousei/power_plants/h26fy/20140704.html (2016/09/01参照)
 Hayakawa, Y. (1985) Pyroclastic geology of Towada volcano. *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo*, **60**, 507–592.
 井本伸広・清水大吉郎・武蔵野 実・石田志朗(1989) 京都北西部の地質. 地域地質研究報告(5万分の1地質図幅), 地質調査所, 84p.
 加藤茂弘・山下 透・檀原 徹(2004) 大山テフラの岩石記載的特徴と大山最下部テフラ層中のテフラの対比. 第四紀研究, **43**, 435–445.
 加藤茂弘・大森繁雄・松田高明・山下 透・檀原 徹・先山 徹・半田久美子・佐藤祐司・古谷 裕・小林文夫(2001) 兵庫県北西部・鉢伏山周辺地域の第四紀後期テフラ層序—大山火山起源のテフラを中心として— 人と自然, no. 12, 1–12.
 Katoh, S., Handa, K., Hyodo, M., Sato, H., Nakamura, T., Yamashita, T. and Danhara, T. (2007) Estimation of eruptive ages of the late Pleistocene tephra layers derived from Daisen and Sambe Volcanoes based on AMS ¹⁴C dating of the moor sediments at Ohnuma Moor in the Chugoku Mountains, Western Japan. *Nature and Human Activities*, no. 11, 29–50.
 木村純一・岡田昭明・中山勝博・梅田浩司・草野高志・麻原慶憲・館野満美子・檀原 徹(1999) 大山および三瓶火山起源テフラのフィッシュトラック年代とその火山活動史における意義. 第四紀研究, **38**, 145–155.
 Kimura, J.-I., Kunikiyo, T., Osaka, I., Nagao, T., Yamauchi, S., Kakubuchi, S., Okada, S., Fujibayashi, N., Okada, R., Murakami, H., Kusano, T., Umeda, K., Hayashi, S., Ishimaru, T., Ninomiya, A. and Tanase, A. (2003) Late Cenozoic volcanic activity in the Chugoku area, southwest Japan arc during back-arc basin opening and reinitiation of subduction. *Island Arc*, **12**, 22–45.
 Kimura, J.-I., Tateno, M. and Osaka, I. (2005) Geology and geochemistry of Karasugasen lava dome, Daisen–Hiruzen Volcano Group, southwest Japan. *Island Arc*, **14**, 115–136.
 小滝篤夫・古山勝彦・井上陽一(2002) 京都府北部, 福知山・綾部地域の高位段丘層中の含カミングトン閃石火山灰層と大山最下部火山灰層との対比. 地球科学, **56**, 35–48.
 小滝篤夫・木谷幹一・牧野州明(2007) 近畿地方に分布する大山最下部火山灰層hpm1. 第四紀研究, **46**, 355–361.

- Kotaki, A., Katoh, S. and Kitani, K. (2011) Correlation of Middle Pleistocene crystal-rich tephra layers from Daisen Volcano, southwest Japan, based on the chemical composition and refractive index of mafic minerals. *Quaternary International*, **246**, 105–117.
- Legros, F. (2000) Minimum volume of tephra fallout deposit estimated from a single isopach. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, **96**, 25–32.
- 町田 洋(1996) 富士山東山麓の富士テフラ群下部に見られる阿蘇4などの諸広域テフラ. 第四紀露頭集—日本のテフラ, 日本第四紀学会, 36–37.
- 町田 洋・新井房夫(1979) 大山倉吉軽石層-分布の広域性と第四紀編年上の意義. 地学雑誌, **88**, 313–330.
- 町田 洋・新井房夫(1992) 火山灰アトラス. 東京大学出版会, 276p.
- 三位秀夫・赤木三郎(1967) 5万分の1土地分類基本調査[米子]表層地質各論. 経済企画庁, 1–35.
- 長橋良隆・吉川周作・宮川ちひろ・内山 高・井内美郎(2004) 近畿地方および八ヶ岳山麓における過去43万年間の広域テフラの層序と編年: EDS分析による火山ガラス片の主要成分化学組成. 第四紀研究, **43**, 15–35.
- 長橋良隆・深谷桃子・木村純一・常 青・佐川拓也・中川 毅・池原 研・KR15-10乗船研究者一同・SG06プロジェクトメンバー一同(2016) 大山倉吉テフラと山陰1テフラの層序と年代: 若狭湾沖堆積物コアと水月湖SG06コアによる検討. 日本地質学会第123年学術大会講演要旨, 154.
- 野村亮太郎(1994) 氷上低地・福知山盆地に分布するテフラと地形学上の問題. 兵庫地理, **39**, 62–71.
- 岡田昭明・石賀 敏(2000) 大山テフラ. 日本地質学会第107年学術大会見学旅行案内書, 81–90.
- 太田良平(1962) 5万分の1地質図幅「赤崎・大山」および同説明書. 地質調査所, 37p.
- Pyle, D. M. (1989) The thickness, volume and grain size of tephra fall deposits. *Bull. Volcanol.*, **51**, 1–51.
- Reimer, P. J., Bard, E., Bayliss, A., Blackwell, P. G., Ramsey, C. B., Buck, C. E., Cheng, H., Edwards, R. L., Friedrich, M., Grootes, P. M., Guilderson, T. P., Hafflidson, H., Hajdas, I., Hatté, C., Heaton, T. J., Hoffmann, D. L., Hogg, A. G., Hughen, K., A., Kaiser, K. F., Kromer, B., Manning, S. W., Niu, M., Reimer, R. X., Richards, D. A., Scott, E. M., Southon, J. R., Staff, R. A., Turney, C. S. M. and van der Plicht, J. (2013) IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves, 0–50,000 years cal BP. *Radiocarbon*, **55**, 1869–1887.
- 佐治孝式・田崎和江・赤木三郎・麻田 斉(1975) 大山火山降下堆積物の層序とその特徴. 地球科学, **29**, 199–210.
- 須藤 茂・猪股隆行・佐々木 寿・向山 栄(2007) わが国の降下火山灰データベース作成. 地質調査研究報告, **58**, 261–321.
- 竹本弘幸(1991) 大山倉吉軽石層とこれにまつわる諸問題. 駒澤地理, **27**, 131–150.
- 竹本弘幸・百瀬 貢・平林 潔・小林武彦(1987) 新期御岳テフラ層の層序と時代—中部日本における編年上の意義—. 第四紀研究, **25**, 337–352.
- 津久井雅志(1984) 大山火山の地質. 地質学雑誌, **90**, 643–658.
- 津久井雅志・西戸裕嗣・長尾敬介(1985) 蒜山火山群・大山火山のK-Ar年代. 地質学雑誌, **91**, 279–288.
- 山元孝広(2015) 日本の主要第四紀火山の積算マグマ噴出量階段図. 地質調査総合センター研究資料集, no. 613, 産総研地質調査総合センター.
- 山元孝広(2016) 大山倉吉テフラの降灰シミュレーション. 地質調査総合センター研究資料集, no. 635, 産総研地質調査総合センター, 1–46.

(受 付 : 2016年8月22日 ; 受 理 : 2017年1月12日)