

原著論文

カンブリア系日立火山深成複合岩体赤沢層の変成凝灰岩から
発見された杏仁状集合組織

田切美智雄*・塙 勝利**・及川 晃**・渡邊則昭***・安藤寿男****

(2021年9月17日受理)

**Amygdaloidal Globe Clusters in Meta-tuffs from the Akazawa Formation of
the Cambrian Hitachi Volcano-Plutonic Complex**

Michio TAGIRI*, Katsutoshi HANAWA**, Akira OIKAWA**, Noriaki WATANABE*** and Hisao ANDO****

(Accepted September 17, 2021)

Abstract

Cluster textures of amygdaloidal globes found from meta-tuffs in the upper part of the Akazawa Formation (Cambrian), Hitachi metamorphic rocks, Hitachi City, are morphologically described to consider the origins based on 1) polished rock surfaces, 2) thin sections, 3) micro-focus X-ray computed tomography scanning images and 4) their three-dimensional printed acrylic resin molds of globe clusters. The clusters comprise two types of globe <3 mm in diameter: 1) mantled globes consisting of an aggregate core of fine-grained felsic and opaque minerals and a mantle of fine-grained felsic minerals, and 2) spherulitic globes composed of radially oriented crystals or filled by mono-crystalline quartz or plagioclase. The clusters, which are several tens of millimeters thick and 10 centimeters long, are contiguously arranged along the bedding plane in general.

The two types of globes within the clusters occasionally exhibit linear to radial, or semi-circular orientations, or grading. Many mantled globes are connected with thin stringy parts, forming some tufts. These silicified amygdaloidal globe clusters may be different in formation mechanism from amygdaloidal textures and spherulite of igneous rocks. They may have originated from some colonial animal body and subsequently been replaced by silicate minerals, though the corresponding animal was not identified in this study.

Key words: amygdaloidal globe cluster, creature origin organization, X-ray CT scan, 3D-mold, meta-tuff, Cambrian, Akazawa Formation, Hitachi, Abukuma Mountains.

* 日立市郷土博物館 〒317-0055 茨城県日立市宮田町 5-2-22 (Hitachi City Museum, 5-2-22 Miyata, Hitachi, Ibaraki 317-0055, Japan).

** ジオネット日立 〒319-1304 茨城県日立市十王町友部 1342-1 (Geonet Hitachi, 1342-1 Tomobe, Juo, Hitachi, Ibaraki 319-1304, Japan).

*** 東北大学環境科学研究科 〒980-8579 宮城県仙台市青葉区 6-6-11 (Graduate School of Environmental Studies, Tohoku Univ., 6-6-11 Aoba, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8579, Japan).

**** 茨城大学理学部地球環境科学コース 〒310-8512 茨城県水戸市文京 2-1-1 (Department of Earth Sciences, College of Science, Ibaraki University, 2-1-1 Bunkyo, Mito, Ibaraki, 310-8512, Japan).

はじめに

阿武隈山地南部には日立変成岩類が分布し、その原岩は、層序的に下半分はカンブリア系火山碎屑岩類、上半分は石炭系からペルム系堆積岩類で、最上部に下部白亜系堆積岩類が含まれることが知られている(田切ほか, 2011, 2016a など)。カンブリア系は日立火山深成複合岩体と呼ばれ(田切ほか, 2016a), 全体が緑色片岩相から角閃岩相の変成作用を受けている。その原岩は主に溶岩類, 火山碎屑岩類, 花崗岩類で構成され, 低~中変成度の岩石の一部に原岩の組織が残っている。これまでに報告されたカンブリア系の地質年代は全てジルコン U-Pb 放射年代測定によるものである(例えば, 田切ほか, 2011)。この岩体からは, 原岩に砂泥質堆積岩類や石灰岩層が認められていなかったことから, 化石は見出されていない。他方, カンブリア系複合岩体を不整合に覆う石炭系大雄院層からは, サンゴ, フズリナ, ウミユリなどの化石が報告され(藤本, 1924; Minato, 1955), ペルム系の鮎川層からはフズリナ化石が得られている(杉山, 1972)。

著者らは, カンブリア系の地質年代が得られて(田切ほか, 2011)以降, カンブリア紀の化石を探索してきたが, このたび, 日立市助川町金山付近の赤沢層上部で, 生物組織に類似する杏仁状集合組織を含む変成凝灰岩層と, 細管や針状の化石様組織を含む結晶質石灰岩層を発見した。本論では, この凝灰岩層および石灰岩層付近の地質と, 凝灰岩中の杏仁状集合組織について報告する。杏仁状組織については, 岩石研磨面や薄片観察, X線CT画像による観察, CT画像を用いた3D造形の形状観察によって, これらの組織の成因を考察し, 杏仁状集合組織が珪酸塩物質で置換された生体組織の可能性を議論する。さらに, 海綿骨片に類似する組織についても報告する。

日立地域の地質概説

日立地域の地質図を図1に示す。田切ほか(2016a)によれば, 日立変成岩類の原岩である“日立古生層”は, カンブリア系日立火山深成複合岩体と, 石炭系大雄院層, ペルム系鮎川層で構成されている。カンブリア系日立火山深成複合岩体中の溶岩類や火山岩脈と火山碎屑岩類から構成される地層は赤沢層と命名されている(渡邊, 1920)。この複合岩体について多数の放

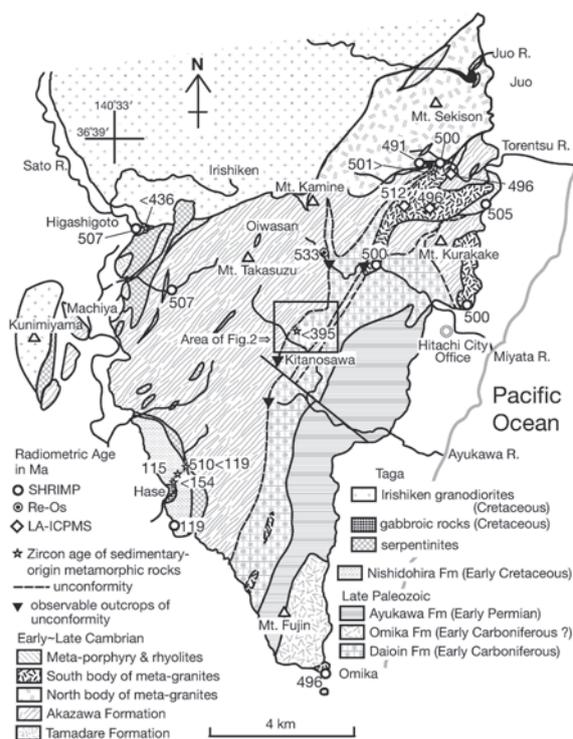


図1. 日立地域の地質図。Fm: 地層; LA-ICPMS: レーザーアブレーション ICP 質量分析; R.: 川; Re-Os: レニウム-オスミウム放射年代; SHRIMP: 高感度高分解能イオンマイクロプローブ。中央の長方形は図2の範囲。

Fig. 1. Geological map of the Hitachi district. Fm: Formation; LA-ICPMS: Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry; R.: river; Re-Os: Rhenium-Osmium radiometric dating; SHRIMP: Sensitive High Resolution Ion Microprobe. The central rectangle shows the area of Fig. 2.

射年代が測定され, 533-496 Ma の年代が得られている(Nozaki *et al.*, 2014; 田切ほか, 2016a)。カンブリア紀花崗岩類は赤沢層に貫入しており, 赤沢層がカンブリア系に属する根拠の一つとなっている(図1)。カンブリア系赤沢層と石炭系大雄院層の境界は大規模な不整合をなしている(田切ほか, 2011)。日立古生層は北北東-南南西の走向を示し, 大局的には西部にカンブリア系, 東部に石炭系・ペルム系が分布するが, 北北東-南南西の軸をもった向斜・背斜の繰り返しがある(田切ほか, 2016b)。そのため, 石炭系大雄院層分布域の北半部の中央には, 背斜軸に沿ってカンブリア系赤沢層やカンブリア紀花崗岩類が細長く帯状に分布する。

カンブリア系日立火山深成複合岩体を含む日立古生層は, 白亜紀に変成作用を受けており, 北西側ほど変成度が高く, 南東側に低くなる(Tagiri, 1971, 1973)。そのため, 赤沢層分布域の南東側の

との境界付近で変成度が最も低くなり、後述するように堆積構造や原岩組織がよく残った火山岩類が産する。また、この境界部にあたる日立市助川町金山では、赤沢層内に新たに大理石質石灰岩層が発見された(田切ほか, 2016c)。したがって、赤沢層の中では、変成度が低く石灰質な上部の層準が化石産出の可能性が高い。

杏仁状集合組織を含む凝灰岩の産出地付近の地質

石炭系大雄院層との不整合境界に近い赤沢層上部について化石を探索してきたところ、日立市宮田川支流の敷沢川上流部と、鮎川上流部における赤沢層上部の凝灰岩から、杏仁状球体が集合する組織を見出した(図2)。この地域でも北西側にカンブリア系赤沢層が分布し、南東側に分布する石炭系大雄院層とは不整合

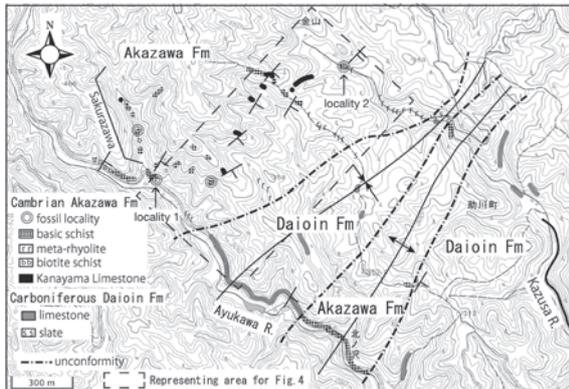


図2. 金山地域の地質ルートマップ。破線で囲まれた四角領域は図4の模式柱状図に相当する地域。2つの矢印(locality 1と2)はそれぞれ図3AとBの撮影位置を示す。

Fig. 2. Geological route map of the Kanayama area. T: Town. The rectangular area surrounded by a broken line shows a representative area in the schematic columnar diagram of Fig. 4. Two arrows indicate the localities 1 and 2 of Fig. 3A and B, respectively.

境界を有する。そして、赤沢層は褶曲によって繰り返す、大雄院層分布域内の背斜軸部に帯状の分布がある。赤沢層は、枕状溶岩や水中自破砕溶岩、火山碎屑岩を原岩とする角閃岩や緑色片岩で構成されている。変成凝灰岩は火山礫や火山砂、火山灰からなる層状の岩相を示し、頻繁に級化構造が観察されるが、斜交層理は稀である(図3A)。一部には流紋岩質火山岩類も含まれ、それらは白雲母片岩や珪長質片岩に変成されている。しかし、変成火山岩類は再結晶や変形による組織

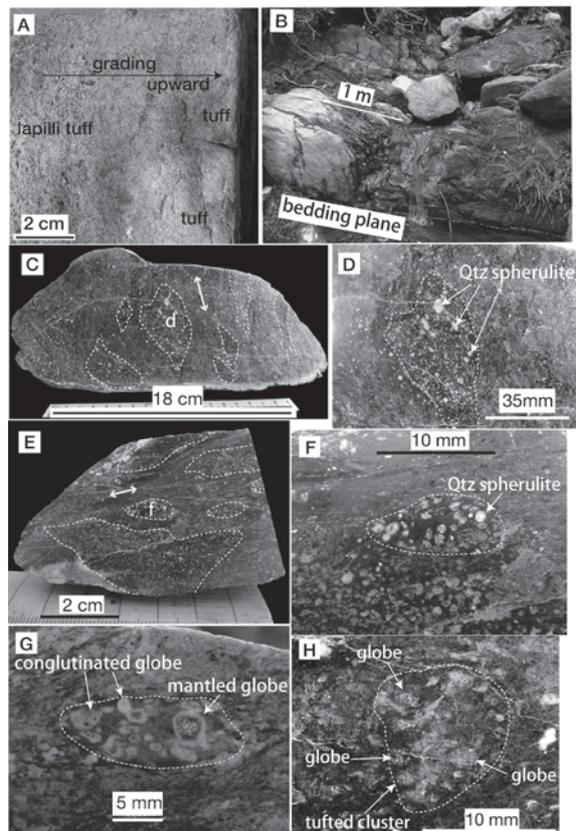


図3. A: 図2のlocality 1に見られた凝灰岩とラピリ凝灰岩の層理。矢印は地層の上方を示す。B: 図2のlocality 2に見られた杏仁状球体を有する変成凝灰岩の露頭。層理はほぼ垂直である。C: 直径2-7 cmの杏仁状集合体を含む河床礫(試料 20180204H)の層理面に直交する研磨面。杏仁状集合体を破線で囲んで示す。両矢印は層理面。D: 図3Cの集合体dの拡大写真。E: 直径2-5cmの杏仁状集合体を含む海岸礫(M1C1)の層理面に直交する研磨面。両矢印は層理面。F: 図3Eの集合体fの拡大写真。多くの白色球体は押し潰された豆状で、白色外套部と暗色核部からなる。G: 杏仁状球体を含む海岸礫(M2A1)の層理面に直交する研磨面。球体の直径は0.5-3 mm。右側の矢印は被層球体を、左側の2つの矢印は癒合した被層球体を示す。H: 緑簾石に富む変成凝灰岩海岸礫(M3G1)の層理面に直交する研磨面。破線で囲まれた部分は緑簾石に富む杏仁状集合体で、ブドウのような房状集合を示す。Qtz: 石英。

Fig. 3. A: Bedding within tuff and lapilli tuff at locality 1 in Fig.2. The arrow shows the upward direction of strata. B: Outcrop of amygdaloidal globe-bearing meta-tuff at locality 2 in Fig.2. The bedding plane is nearly vertical. C: Polished surface perpendicular to the bedding plane in a fluvial gravel (sample 20180204H) bearing amygdaloidal globe clusters 2-7 cm in diameter. Amygdaloidal globe clusters are indicated with a broken line. The two-way arrow indicates the bedding plane. D: An enlarged photo of the cluster d of Fig. 3C. E: Polished surface perpendicular to the bedding plane in a beach gravel (M1C1) bearing amygdaloidal globe clusters 2-5 cm in diameter. The two-way arrow indicates the bedding plane. F:

An enlarged photo of cluster f in Fig.3E. Most whitish globes are broad bean-shaped and composed of whitish mantle and dark core. **G**: Polished surface of the bedding plane in an amygdaloidal globe-bearing beach gravel (M2A1). The globes are 0.5-3 mm in diameter. The arrows indicate a right mantled-globe and two left conglutinated mantled globes. **H**: Polished surface perpendicular to the bedding plane in a beach gravel (M3G1) of epidote-rich meta-tuff. An epidote-rich globe cluster inside of the area surrounded by a dotted line shows a tufted-cluster like grapes. **Qtz**: quartz.

変化が弱く、原岩の組織を残していることが多く（例えば、田切ほか、2010; Tagiri *et al.*, 2011）、片理の発達した角閃石片岩や緑色片岩の分布は限られている。地層は南東に急傾斜しており、南東側が見かけ上位であるが、北西側の赤沢層の緑色片岩内には褶曲の繰り返しがあり、層序学的にすべて南東上位かは断定できない。本論では、岩相の分布を考慮して杏仁状集合組織を産した部分から南東側の赤沢層は、南東上位の層序をなしていると判断する。この緑色片岩最上部の層厚3mの変成凝灰岩類に、灰白色の杏仁状球体が密集して集合体を形成し、さらに集合体が密集している。これを杏仁状集合組織と呼ぶ（田切ほか、2016c）。この変成凝灰岩は、片理の発達が弱く塊状で、不均質な基質を特徴としており、両河川の河床や海岸の転石でも岩相から識別できる。

変成凝灰岩の上位に、層厚約10mほどの石灰岩層が、走向に沿って4つの尾根と一つの谷で確認できる。石灰岩の表面は雨水による溶食が顕著で、円頂状の石灰岩柱が露頭や転石として点在する。石灰岩は斜交層理が顕著であるが、平均的な走向傾斜はN30°E東急傾斜である。石灰岩は結晶質大理石であり、白色から灰色のもの、数cmから数10cm間隔の層理が明瞭なものから塊状なものまで岩相が変化する。この石灰岩層を金山石灰岩部層と命名する。金山石灰岩とそこで産出する化石様組織については、別に報告する予定である。

金山石灰岩の東側には緑色片岩と珪長質片岩が分布する。これらは流紋岩質～安山岩質火山岩を原岩とするもので、赤沢層最上部に相当する。さらに東側には不整合境界を挟んで石炭系大雄院層の結晶質石灰岩が分布している。

こうした層序関係を模式柱状図に表した（図4）。図2における金山石灰岩の上下の層準について、ジルコンU-Pb放射年代を求め、安山岩質から流紋

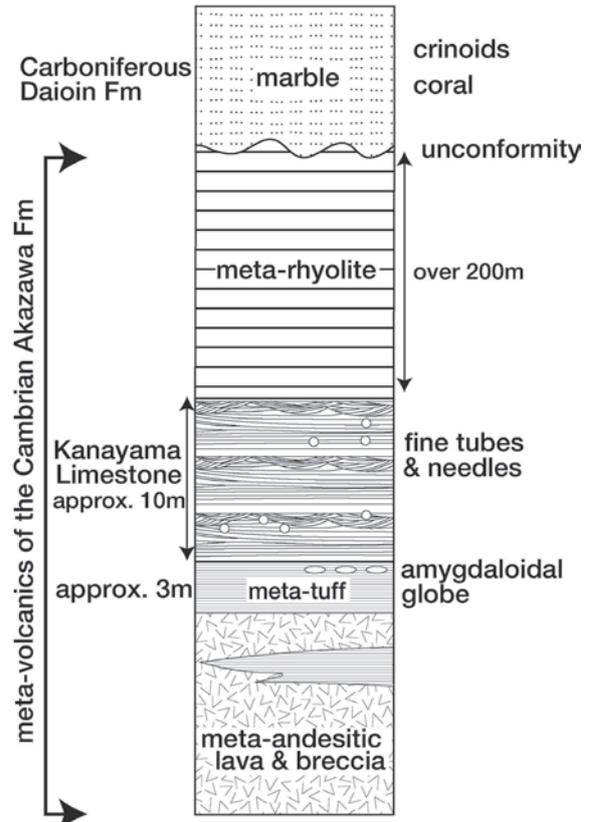


図4. 杏仁状球体を含む変成凝灰岩、金山石灰岩およびその周辺の地層の模式的な地質柱状図。作図に用いた地域は図2に示す。

Fig. 4. Schematic stratigraphic columnar diagram of the amygdaloidal globe-bearing meta-tuff, Kanayama Limestone and their neighboring strata. The measured area is shown in Fig. 2. Fm: Formation.

岩質の変成火山岩類18個のジルコン分離処理を行ったが、測定可能なジルコン粒子を得られなかったため測定には至らなかった。また、金山石灰岩からコノドントの抽出を試みたが、見出せなかった。

観察対象および方法

赤沢層上部に含まれる杏仁状集合組織は、多数の灰白色の杏仁状球体とその集合体として識別できるが、風化した露頭面での詳細な観察は容易でない。そのため、鮎川と数沢川流域、特に鮎川河口部と宮田川河口部の河床礫や海浜礫層中に見出された転石ブロックの水磨表面や、その転石を鏡面研磨した断面（層理に垂直・水平・斜めの切断面）で、集合体の産状や形態、そして杏仁状球体の内部構造や配列を観察した（図3, 5）。また、一部は薄片を作成し、偏光顕微鏡で杏仁状

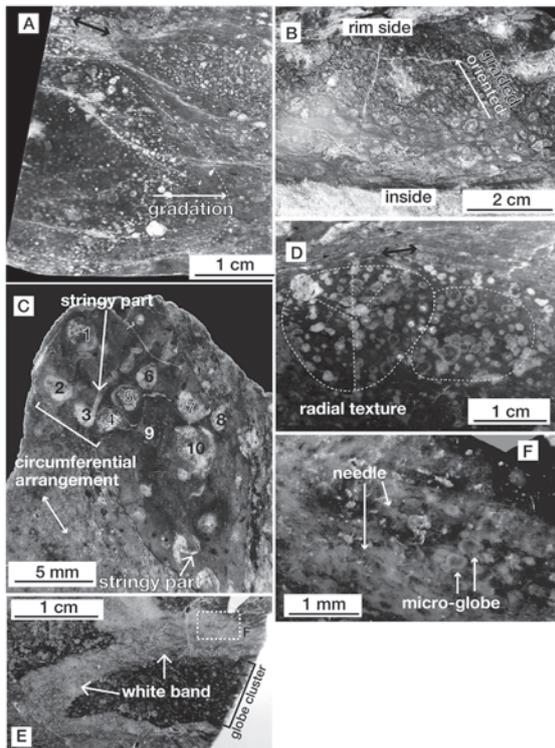


図 5. 変成凝灰岩の層理面に直交する研磨面で見える、杏仁状球体の様々な分布と配列様式。A: 2つの杏仁状集合体 (M1C1)。左下側の集合体では球体の粒径と分布密度が中心方向に変化する (白矢印で示す)。黒両矢印は片理面。B: 球体が直線状配列や粒径増加を示す (試料 OKG)。C: 図 7A と E に示す M2B1 中の集合体で、図 9

と比較するために鏡像にし、拡大したもの。1-6 番の 6 つの球体は円周状に配列している。球体のうちの 2 つは白色紐状部と連結している。被層球体には本文中での説明のため 1-10 の番号を付してある。白両矢印は層理面。D: M2B1 中の左側破線で囲まれた球体 (図 7A の d) の放射状配列。黒両矢印は片理面。E: AY2 中の乳白色帯。破線で囲まれた小さい四角は図 5F の範囲を示す。F: 図 5E の四角領域の拡大写真。乳白色帯は直径 0.2 mm 以下の微小被層球体と暗色針状部と乳白色基質からなる。

Fig. 5. Several types of the amygdaloidal globe distribution and orientation patterns on polished sections perpendicular to the bedding planes in meta-tuff. A: Two amygdaloidal globe clusters (M1C1). Left cluster with an inward gradation of globes in size and density (see an arrow). The black two-way arrow indicates the schistosity plane. B: Globes are oriented linearly and size-graded upward (sample OKG). C: Enlarged mirror-image photo of the cluster g on Fig. 7A, 7E (M2B1) for comparison with Fig. 9. Six globes (nos.1-6) are arranged semi-circumferentially. Two globes are connected with white stringy part (arrows). Mantled globes are numbered from 1 to 10 for the explanation in the text. The two-way arrow indicates the bedding plane. D: Radially-oriented globes in the left cluster circled by a broken line in d of M2B1 (Fig.7A). The black two-way arrow indicates the schistosity plane. E: A milky-white band in AY2. The small quadrangle shown by a broken line indicates the area of Fig.5F. F: An enlarged photo of the quadrangle area in Fig.5E. The milky-white band consists of mantled micro-globes of less than 0.2 mm in diameter and a few needle-like parts.

表 1. 試料番号, 産状, 産地, 観察方法, 収蔵施設のリスト。

Table 1. List of sample details such as sample number, occurrence, locality, observation and storage facility.

試料番号	産地	産状	観察方法	収蔵施設	特記事項
M1A	宮田川河口	河口海岸礫	実体	自然博	中心部疎
M1B	宮田川河口	河口海岸礫	実体	郷土博	中心部疎・紐状部
M1C*	宮田川河口	河口海岸礫	実体・偏光	郷土博	級化配列・中心部疎
M1D	宮田川河口	河口海岸礫	実体	郷土博	中心部疎・紐状部・乳白色帯
M1F	宮田川河口	河口海岸礫	実体	郷土博	円周状・紐状部・乳白色帯
M1G	宮田川河口	河口海岸礫	実体	自然博・郷土博	緑簾石化
M1H*	宮田川河口	河口海岸礫	実体	自然博・郷土博	線状配列・紐状部・乳白色帯
M2A*	宮田川河口	河口海岸礫	実体	郷土博	級化配列・紐状部・乳白色帯
M2B*	宮田川河口	河口海岸礫	実体・CT	郷土博	円周状・放射状配列・紐状部
M2C	宮田川河口	河口海岸礫	実体	郷土博	円周状配列・紐状部
M2D	宮田川河口	河口海岸礫	実体	郷土博	級化・放射状配列・紐状部
M2E	宮田川河口	河口海岸礫	実体	郷土博	癒合球体集合
M2F	宮田川河口	河口海岸礫	実体・偏光	自然博	紐状部・乳白色脈
M2H	宮田川河口	河口海岸礫	実体	自然博	中心疎・円周状配列・紐状部
M2J*	宮田川河口	河口海岸礫	実体・偏光	自然博	被層球体・紐状部
M3A	宮田川河口	河口海岸礫	実体	自然博	房状配列・紐状部
M3B	宮田川河口	河口海岸礫	実体	郷土博	被層球体密集・紐状部
M3C	宮田川河口	河口海岸礫	実体	郷土博	緑簾石化
M3D	宮田川河口	河口海岸礫	実体	自然博	緑簾石化・房状配列
M3E	宮田川河口	河口海岸礫	実体	自然博	緑簾石化・房状配列

(続く, to be continued)

(表 1. 続き, Table 1. continued)

M3F	宮田川河口	河口海岸礫	実体	自然博	緑簾石化・房状配列
M3G*	宮田川河口	河口海岸礫	実体	自然博・郷土博	緑簾石化・房状配列・紐状部
M3H	宮田川河口	河口海岸礫	実体	自然博	緑簾石化・房状配列
M3I	宮田川河口	河口海岸礫	実体	自然博	緑簾石化・房状配列
M3J	宮田川河口	河口海岸礫	実体	自然博	緑簾石化・房状配列・紐状部
M3K	宮田川河口	河口海岸礫	実体	自然博	緑簾石化・房状配列
MY1	宮田川河口	河口海岸礫	実体	郷土博	球顆顕著
MYT6	宮田川河口	河口海岸礫	実体	郷土博	乳白色帯
S1A(SZ1A)	鮎川桜沢	河床礫	実体・偏光	自然博・郷土博	緑簾石化杏仁不鮮明
S1B(SZ1B)	鮎川桜沢	河床礫	実体・偏光	自然博・郷土博	緑簾石化杏仁不鮮明
S1C(SZ1C)	鮎川桜沢	河床礫	実体	自然博・郷土博	緑簾石化杏仁不鮮明
S1D(SZ1D)	鮎川桜沢	河床礫	実体	自然博・郷土博	緑簾石化杏仁不鮮明
S1E(SZ1E)	鮎川桜沢	河床礫	実体	自然博・郷土博	緑簾石化杏仁集合
S1F(SZ1F)	鮎川桜沢	河床礫	実体	自然博・郷土博	球顆顕著
S1G	鮎川桜沢	河床礫	実体	郷土博	緑簾石化杏仁不鮮明
S1H	鮎川桜沢	河床礫	実体	自然博	緑簾石化杏仁不鮮明
S1I	鮎川桜沢	河床礫	実体	郷土博	緑簾石化杏仁不鮮明
S1J	鮎川桜沢	河床礫	実体	郷土博	緑簾石化杏仁不鮮明
S1K	鮎川桜沢	河床礫	実体	郷土博	緑簾石化杏仁不鮮明
S1L	鮎川桜沢	河床礫	実体	郷土博	緑簾石化杏仁不鮮明
S1M	鮎川桜沢	河床礫	実体	郷土博	扇状組織
S1N	鮎川桜沢	河床礫	実体	郷土博	緑簾石化杏仁不鮮明
AY1	鮎川河口	河口海岸礫	実体	郷土博	乳白色帯
AY2*	鮎川河口	河口海岸礫	実体	郷土博	乳白色帯
AY3	鮎川河口	河口海岸礫	実体・偏光	郷土博	乳白色帯
AY4	鮎川河口	河口海岸礫	実体	郷土博	乳白色帯
2015060204*	鮎川上流部	露頭	実体・偏光	郷土博	緑簾石化杏仁密集
OKG*	鮎川桜沢	現地性岩塊	実体	郷土博	綫化・綫状配列
20160204K	数沢川金山	現地性岩塊	肉眼観察	郷土博	杏仁状球体・球顆
20180204H*	宮田川下流域	河床礫	実体	自然博・郷土博	杏仁集合体
2015033005*	鮎川河口	河口海岸礫	偏光	郷土博	タイプ2 球顆
2017012503*	数沢川金山	河床礫	偏光	郷土博	球顆球体
2019120501*	里川町屋	河床礫	実体・偏光	郷土博	分散型球顆球体

*;本文中で記載。実体;実体顕微鏡, 偏光;偏光顕微鏡, CT; X線CT装置。

自然博;ミュージアムパーク茨城県自然博物館, 郷土博;日立市郷土博物館。

球体の連結や内部組織を観察し, その内部形状や構造を把握した。観察試料リストを表1に示す。日立古生層分布域から流出する河川のうち, 杏仁状集合組織を含む変成凝灰岩の転石が産するのは宮田川と鮎川の河口域に限られている。両河川の流域に露出する大雄院層や鮎川層には変成凝灰岩が含まれないので, これらの供給源は赤沢層由来のものと判断される。そこで, その供給源を追跡したところ, 宮田川支流の数沢川と鮎川上流部桜沢付近の狭い地域で, 厚さ約3mの杏仁状集合組織を含む変成凝灰岩の露頭を発見した(図2, 3B)。

他方, 赤沢層の安山岩質変成溶岩や変成凝灰岩にはしばしば石英に充填された球顆(石英球顆と呼ぶ)が

発達する。石英球顆も杏仁状であるが, 杏仁状集合組織とは異なり, 集合することなく広く分散して産し, 球顆の大きさも杏仁状集合組織のものに比して明瞭に大きい。このような石英球顆は研究対象としていない。

赤沢層変成凝灰岩中の杏仁状集合組織の記載

杏仁状集合組織の区分

本論で記載する杏仁状集合組織を以下の様に区分する。

1. 杏仁状球体 amygdaloidal globe

1a) 被層球体 mantled globe: 直径0.2-3mmの球状-扁球状-豆状の球体で, 微粒状物質を多量に含む暗色の核部と白色細粒結晶からなる外套部をも

つ杏仁状球体 (図 6A-C).

1b) 微小被層球体と乳白色帯 mantled micro-globe and milky-white band: 直径 0.2 mm 以下の微小な球体で、微結晶で充填された暗色の核部と白色の外殻部からなる。微小被層球体が集合して乳白色帯を形成する (図 5E, F).

2. 球顆球体 spherulite

2a) タイプ 1 球顆 type 1 spherulite: 核のみの通常型球顆で、石英球顆を含む (図 6D, E). 核部の結晶が角閃石や緑泥石、緑簾石の場合は中心部が暗色になり、タイプ 2 球顆に見えることがある。

2b) タイプ 2 球顆 type 2 spherulite: 核部は球顆であるが、白色細粒結晶からなる外殻部を有する (図 6F, G).

3. 杏仁状集合体 amygdaloidal globe cluster: 杏仁状球体と球顆球体が集合して、一つの集合組織を作る。

4. 紐状部 stringy part: 被層球体から伸びており、2 個の被層球体を繋いでいることがある (図 5C, 6A).

5. 癒合した被層球体 conglutinated globe: 被層球体が 2-3 個癒合して一体化している組織 (図 3G).

杏仁状球体の形状と内部構造

被層球体は、研磨面では互いに接しないで散在しているように見えるものが多いが、数個が癒合しているものもある (図 3G). しかし、研磨面では深さ方向の解像度が悪く、球体が重なっているのか癒合しているのか判定できない球体が多数である。一方、薄片観察ではしばしば 2 つが癒合しているものや、2~3 個に分かれているものも確認でき (図 6A), 実際には多くの球体は紐状部で繋がっているものと推定される (図 5C, 6A).

被層球体では、外殻部が核部を膜状に包んでおり、どちらも主に珪酸塩鉱物の微結晶で構成される。EDX-SEM を用いた定性分析によれば、外殻部は斜長石などの組成に近い物質である。外殻部では、珪酸塩鉱物の微細結晶が不規則に結晶化していることが多い (図 6C). 核部は茶褐色ないし暗灰色で、外殻部より粗粒な粒状石英と斜長石で充填されているが、細粒な緑泥石、角閃石、不透明鉱物を多量に含んでいる (図 6A-C). 核部の結晶の配列に明瞭な規則性は認められない。杏仁状球体全体が緑簾石の微細結晶で充填されているものも見られる (図 3H). 杏仁状球体は圧密に

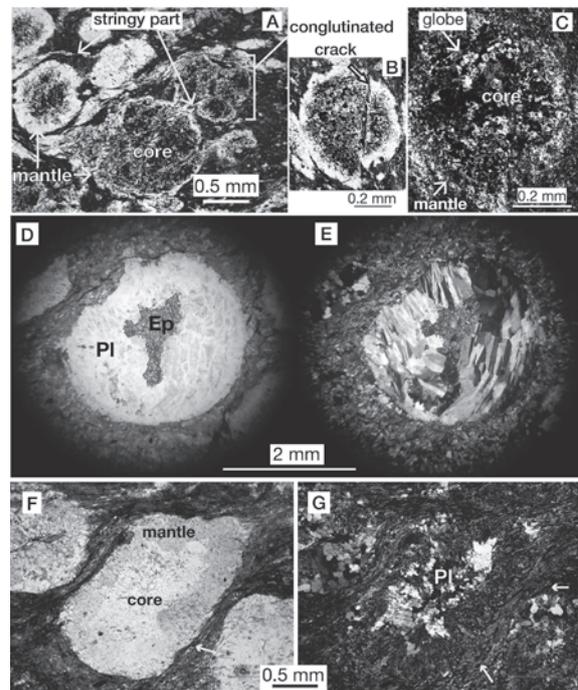


図 6. 被層球体、タイプ 1 球顆、タイプ 2 球顆の薄片写真。

A: M2J 中の被層球体の開放ニコル写真。球体は澄明な外殻部と濁った核部からなり、紐状部によって繋がっている。右側にある 3 つの小球体は癒合している。**B** と **C:** 同じ M2J 中の別の被層球体の開放ニコルと十字ニコル写真。この球体はクラックで変位している。**D** と **E:** 試料 2017012503 中のタイプ 1 球顆の開放ニコルと十字ニコル写真。核部が緑簾石や角閃石などで構成される時は、核部は暗色となり、タイプ 2 球顆に似る。**PI:** 斜長石、**Ep:** 緑簾石、**F** と **G:** 試料 2015033005 中の外殻部と核部からなるタイプ 2 球顆の開放ニコルと十字ニコル写真。外殻部は球顆縁に直交するように結晶化した微小斜長石で構成されている。核部は中粒の斜長石の集合である。矢印は基質に形成された極細粒な角閃石針状結晶である。

Fig. 6. Thin section photographs of mantled globes, type 1 spherulites and type 2 spherulites. **A:** Open-nicol photograph of mantled globes in the sample M2J. The globes consist of a clear mantle and a dusty core, and are connected each other with stringy parts. The three small globes on the right side are conglutinated. **B** and **C:** Photographs (open- and cross-nicol) of another mantled globe in M2J. This globe is displaced by a crack. **D** and **E:** Photographs of the type 1 spherulite (open- and cross-nicol) in sample No.2017012503. When the core is composed of epidotes and/or amphiboles, the core becomes dark like the type 2 spherulite. **PI:** plagioclase, **Ep:** epidote. **F** and **G:** Photographs of the type 2 spherulite (open- and cross-nicol) composed of two parts (mantle and core) in sample No.2015033005. The mantle is composed of very fine-grained plagioclase crystallized at right angles with the spherulite rim. The core is a medium-grained plagioclase-aggregate. The arrows indicate very-fine-grained amphibole needles in the matrix.

よる扁平化が頻繁に認められる(図 3F-H)が, 変成作用による顕著な変形を免れており, 稀にクラックによってわずかに変位している程度である(図 6B)。

10 個の試料(表 1)では, 杏仁状集合体と接して乳白色帯(幅数 mm, 長さ数 cm)が認められる(図 5E)。この帯状部には被層球体と同じ形状と内部組織をもつ直径 0.2 mm 以下の微小被層球体が密に並んでおり(図 5F), 基質に相当する部分も乳白色で, 杏仁状集合体の基質と異なる。これらの帯状部には, 長さ 0.5-0.8 mm の暗色針状体もいくつか見え, 分岐したものもある。

球顆球体の形状と内部構造

球顆球体では一定の方向(多くの場合球顆縁から放射状)に成長した結晶が充填しており, 充填する結晶は石英や斜長石, 角閃石, 緑泥石, 緑簾石のことが多い。球顆球体は杏仁状球体や他の球顆球体とは癒合せず, 孤立している(図 6D-G, 7G)。その形状も球体に近いものが多い。球顆球体の中には外套部を有するものがあり, これらをタイプ 2 球顆と呼び, これ以外をタイプ 1 球顆と呼ぶ。タイプ 2 球顆の外套部は, 主に斜長石からなる白色微細結晶が球顆縁に直交するように配列し, 核部も縁部から中心部方向に放射状に成長した斜長石で充填されている。

杏仁状集合体の形状と球体の分布

杏仁状球体は, 球顆球体とともに多数が集合して一塊の杏仁状集合体を構成している。集合体は数 mm から数 10 mm 厚の, 壺型, 楕円体, レンズ状, 平板状などの立体的な形状を示し, 長軸がおおよそ層理面に沿って配列している(図 3C, E)。集合体は互いに近接して密集し, サイズは大小様々で, 長軸を並行に配列していることが多いが, 長軸方向では最大約 10 cm 長である。杏仁状球体は各集合体内のみに分布し, 集合体間の基質部に単独で見られることは極めて稀である。周縁が侵食されて運搬された礫のような形状を示す集合体はなく, 含まれる杏仁状球体・球顆球体も集合体の外形と調和的に分布し, 堆積学的に分級や運搬を受けたとわかるような産状や明瞭な平行葉理もない。集合体の縁辺部は片理によって切断変形されていることが多いが(図 5A, D), それより内部は塊状である。そのため, 集合体が片理によって切断されていない場合は, 集合体の輪郭は基質部に対して漸移

的である(図 5A)が, 輪郭の識別は可能である。

杏仁状球体は研磨面で集合体を形成しており, 粒子が繋がっているのが観察される。なかには 14 ~ 15 個の杏仁状球体がつながって, 房状の組織を示すものもある(図 3H)。この試料では杏仁状球体の緑簾石化が進んでおり, 杏仁状球体か球顆球体かの判定が困難な球体が多い。

これらの集合体について, 集合体内での被層球体と球顆球体の分布状況とそれぞれの球体径の頻度分布を宮田川河口で採取した杏仁状組織を含む礫試料 M2B1 の切断研磨面(後述する X 線 3D 画像解析でも使用)で検討した。M2B1 には幅数 cm, 厚さ 2 cm 以下のレンズ状の集合体が 10 個認められ, 集合体 a-j として

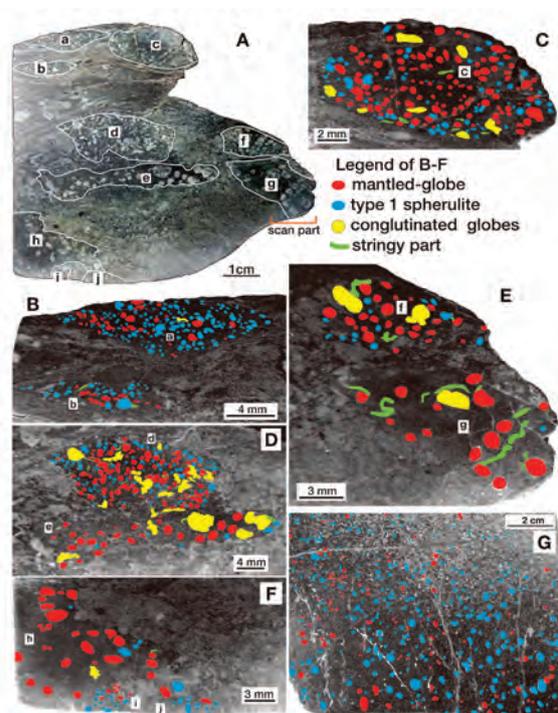


図 7. 層理面に直交する研磨面での被層球体, 球顆球体, 癒合球体およびそれらの集合体の分布。A: M2B1 中の 10 個 (a-j) の杏仁状集合体区分, B: 集合体 a と b, C: 集合体 c, D: 集合体 d と e, E: 集合体 f と g。集合体の右半分は図 5C と同じ。F: 集合体 h-j, G: 町屋産河床礫(試料 2019120501)の変成溶岩中の級化と分散を示す球顆。G の青と赤の点はそれぞれ, タイプ 1 球顆とタイプ 2 球顆である。

Fig. 7. Distributions of mantled globes, spherulite, conglomerated globes and their clusters on polished sections perpendicular to the bedding planes. A: Division of 10 amygdaloidal globe clusters (a-j) in M2B1; B: Clusters a and b, C: Cluster c, D: Clusters d and e, E: Clusters f and g. The right half of cluster g is equivalent to Fig. 5C. F: Clusters h-j, G: Dispersed and graded spherulites in meta-lava from a river gravel at Machiya (No.2019120501). The blue and red dots indicate the type 1 and type 2 spherulites, respectively.

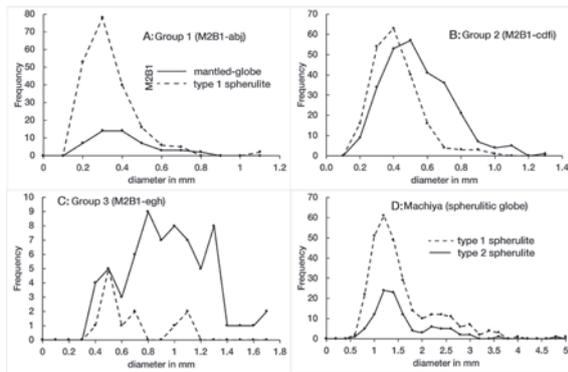


図 8. 杏仁状球体と球顆球体の粒径頻度分布図。直径は長径×短径の平方根。A: グループ 1 (球顆球体優勢型, M2B1-abj), B: グループ 2 (被層球体と球顆球体拮抗型, M2B1-cdfi), C: グループ 3 (被層球体優勢型, M2B1-egh), D: 対照試料の町屋産の集合体をなさない球顆球体。

Fig. 8. Diameter frequency diagrams of amygdaloidal globes and spherulites. Diameter = $\sqrt{\text{long diameter} \times \text{short diameter}}$. A: Group 1 (the spherulite predominant type; M2B1-abj); B: Group 2 (the competed type of mantled globe and spherulite; M2B1-cdfi); C: Group 3 (the mantled globe predominant type; M2B1-egh); D: Reference sample of the unaggregated spherulite from Machiya.

区別した (図 7A)。各集合体中の球体の分布を被層球体、球顆球体、被層球体の癒合型に識別し (図 7B-E)、被層球体とタイプ 2 球顆球体について、球体の粒径と頻度分布を求めた (図 8)。癒合した被層球体は、癒合した数や個々の粒径を求めることが難しいため、解析対象から除外した。粒径は長径と短径の積の平方根として求めた。図 7 では、紐状部も識別してある。タイプ 2 球顆球体はどの集合体でも直径 0.3 mm 程度の粒子が多く、その径サイズ分布に集合体間で共通性が認められる。他方、集合体内での球顆球体の存在頻度は様々で、集合体 a や j の様に球顆球体の頻度が高い場合 (図 7A, F, 図 8A) と、集合体 g や h の様に球顆球体があまり含まれない場合 (図 7D-F, 図 8C) がある。被層球体の出現についても、集合体毎に粒径やその存在頻度の分布が異なっている。

集合体内の粒径頻度分布を解析するには、個々の集合体内のみでは含まれる個数も少なく、傾向を抽出できないので、集合体を 3 つのグループに分けて検討した。集合体 abj の球顆球体が優勢なグループ 1、集合体 cdfi の球顆球体と被層型球体が拮抗しているグループ 2、集合体 egh の被層球体が優勢なグループ 3 である (図 7, 8)。グループ 1 では被層球体の総数が球顆球体の 1/7 と少ないが、粒径分布のピークは球顆球体

と同様に 0.3 ~ 0.4 mm にある。つまり、球顆球体も被層球体も小さい粒子が多く、サイズ分布に同調性がみられる。グループ 2 では被層型球体、球顆球体ともにグループ 1 より粒径が少し大きい、その頻度曲線はかなり似ており、サイズと頻度に同調性がある。グループ 3 では、一つの集合体に集積する球体の数が少ないため総数が少ないが、被層球体の粒径が大きく、その頻度も大きい。球顆球体もやや粒径が大きいが出現頻度が少ないため、同調性はあるものの弱い。球顆球体の粒径は分布のピークが 0.35–0.5 mm、レンジが 0.2–1.1 mm にあってグループ間で大きく異ならないのとは比べ、被層球体はその粒径と頻度の分布が 3 グループ間で異なり、グループ 3 では粒径のピークとレンジが最も大きくなっている。一つの小さな変成凝灰岩試料中で集合体の特性が 3 つのグループに分かれているのは、杏仁状組織が一樣な堆積作用や続成作用で形成されていないことを示唆する。

さらに、集合体中での球体の分布には、規則的な配列が認められる場合がある。集合体の縁辺部では球体が密で、内部に向かって次第に疎となることが多い (図 5A)。また、球体が一定の方向に配列しているものもある。例えば、集合体の内部に向かって粒径が大きくなって 3 次元的に配列しているものや (図 5B)、円周を描く様な配列 (図 5C, D)、放射状の配列が認められる (図 5D)。試料によっては、微小被層球体が密集する乳白色帯状部が杏仁状集合体を囲むように出現する (図 5E)。このような球体の配列の原因も、前述の 3 グループの成因と合わせて考察する必要がある。

球状粒子の CT 画像による 3 次元構造復元

球顆球体は研磨面や薄片の観察で単独の球状体をなしていることが明瞭である。しかし、被層球体の立体形状や 3 次元分布は不明のままである。それらの実態が明らかになれば、被層球体の成因に迫れるものと判断し、X 線 CT 装置による画像解析とその画像による 3 次元造形から、岩石内部に広がる被層球体の 3 次元形状の復元を試みた。

方法: 前節で記載した礫試料の切断研磨面に見られる被層球体について、X 線 CT 装置により、被層球体の 3 次元形態や近接する複数球体間の結合の様子を観察した (田切ほか, 2016c, 2018)。装置は東北大学環境科学研究科所有のマイクロフォーカス X 線

CT装置（コムスキャンテクノ株式会社製 ScanXmate-D225RSS270）を用い（X線管電圧：120 kV，X線管電流：300 μ A），得られた画像を装置付属の画像再構成ソフトウェア（コムスキャンテクノ株式会社製 coneCTexpress）によって処理し，3次元画像を構築した．各処理の設定条件は，リングアーチファクトフィルタは me-3，ノイズ除去フィルタは av-1，ビームハードニング補正は 1.1 である．

計 6 試料で画像解析を試みたが，粒子の密度が高い場合や，特に球顆球体の密度が高い場合には解析が困難であることがわかり，試料 M2B1 の集合体 g のみ

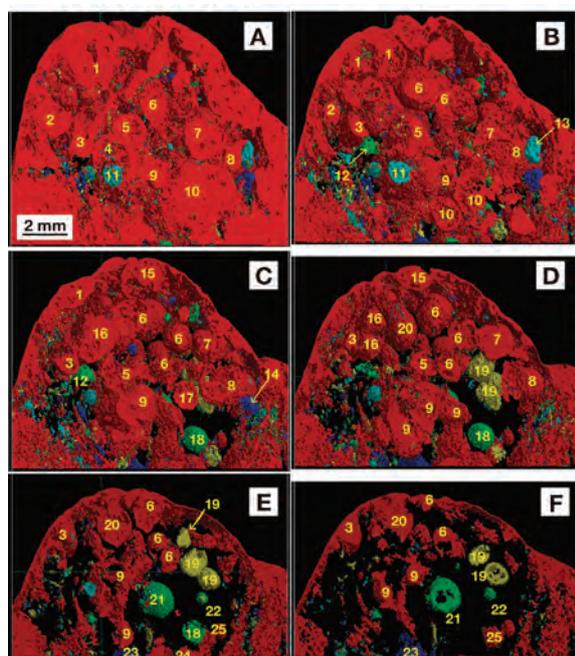


図 9. M2B1 (図 5C の上半分と図 7E-g) 中の杏仁状集合体 g の縦横 12 mm 領域の 3 次元スキャンカラーイメージ．A: 15 μ m 間隔での切片でイメージ番号 50 (深さ方向) /199 (全体数)，B: 70/199，C: 90/199，D: 110/199，E: 138/199，F: 151/199．被層球体と紐状部には色付けし，基質部は透明とした．本文での説明のため，個々の球体に番号 1-25 を付した (図 5C 参照)．青，黄緑，黄色，緑で示した球体は，赤色の繋がった球体から孤立している．

Fig. 9. Three-dimensional scan color images 12 mm high and wide of the amygdaloidal globe cluster g in M2B1 (upper half of Fig. 5C and Fig. 7E-g). A: Slice image number 50 (number on the depth side)/199 (total number) with 15 μ m interval, B: 70/199, C: 90/199, D: 110/199, E: 138/199, F: 151/199. Mantled globes and stringy parts are colored, and matrices are transparent. Numbers 1 to 25 indicate the individual globes for the explanation in the text (see Fig.5C). The globes shown by blue, light blue, yellow and green are isolated from the red-colored connected globes.

を検討対象とした．集合体 g は球体密度が小さい被層球体優勢のグループ 3 に属し，被層球体とその基質の鉱物組成が異なり，両者の X 線吸収度の違いが大きいこと（基質より杏仁状球体の方が吸収度が小さい）から，明瞭な画像が得られた (図 9)．対象箇所が試料の縁にあるなど，試料形状が CT スキャンに適していたこともある．スキャン間隔は 15 μ m，解析の範囲は縦 12 mm，横 12 mm，深さ 4.16 mm である．

次に，杏仁状球体の連結の様子を 3 次元的に観察するために，スキャン画像から 3D プリンターを用いてアクリル系透明樹脂の中に，杏仁状球体に黒い色付けをした造形を試みた．造形は (株) アピストに依頼して行った．造形物の大きさは，縦 18.5 cm，横 16 cm，高さ 10 cm である．球体間の基質部は透明とし，観察の妨げとなる手前の球体は消して，基質の中に埋まっている杏仁状球体を造形した (図 10)．この造形によって杏仁状球体の連結しているものや孤立しているものが識別できるが，観察方向が制限されるので，さらに，基質を除いた球体だけの半透明樹脂での造形も行った (図 11)．この場合は，樹脂の性質により，球体表面の凹凸は再現されていない．また，孤立して不安定な球体は造作上の都合，何本かの細い直線棒状の樹脂で球体を支持させている．

記載：199 枚の 3D 正面画像から深さ方向の異なる 6 枚を各杏仁状球体の分布の変化がわかるように選び，浅い方から深い方へ順に配列して示した (図 9)．図中の球体は全て被層球体である．赤色で示した球体は互いに繋がっていることを示しており，多くの球体が繋がっていることがわかる．識別のため球体に 1～25 の番号を付した．球体の表面は凹凸が顕著で，外套部と核部との区別ができる粒子も見える (図 9B の 1 や F の 19)．

図 5C の研磨面上で見えている球体は 1～10 で，球体 3 から延びる紐状部が確認できる．図 9A でも同じように 1～6 が円周状に配列し，球体 3 の紐状部が延びる様子が立体的に確認される．

深さ方向への被層球体の分布変化を観察すると，一つの球体だったものが二つ以上に分れたり (図 9A と B の 1, 6, 10 や D の 9)，消滅したり (図 9A の 4) する．新に現れる球体もあり，単独で現れるもの (図 9A の 11, B の 13, C の 12 や 18, E の 21, 22) と，複数球体が連結しているもの (図 9D, E の 19, 図 9F の 25) がある．特に 6 や 9 は，3 つ以上の球体に分かれてい

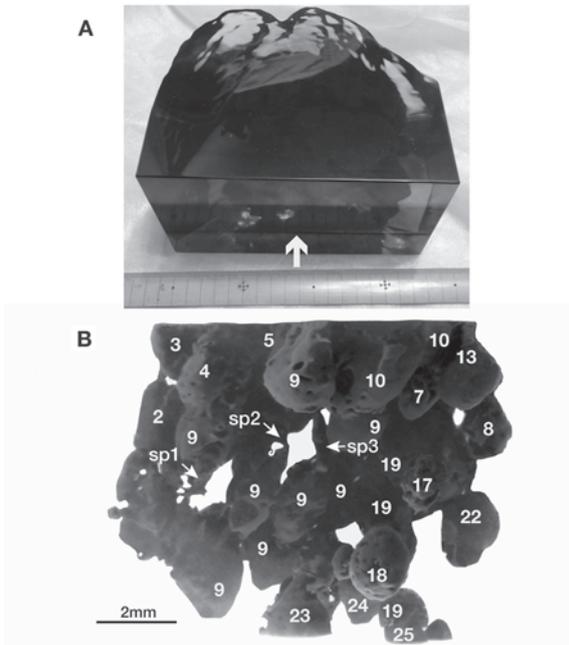


図 10. アクリル樹脂を用いた M2B1 中の杏仁状集合体 g の 3 次元造形. A: 3D 造形の外観, B: 連結した球体が見える 3D 造形の底部 (A の矢印) からの透過イメージ. 添付した番号は図 5C と 9 と同じ. 多くの球体が図 10B の上下方向で, 図 9 と 10A の上面に直交する一方方向に連結している. sp: 紐状部.

Fig. 10. The three-dimensional (3D) acrylic resin mold of the amygdaloidal globe cluster g in M2B1. A: External form of the 3D-mold, B: Transparent image showing connected globes inside the 3D-mold on the bottom view (the arrow of A). Affixed numbers are the same as those of Figs. 5C and 9. Most globes are unidirectionally connected up-and-down in Fig. 10B and perpendicular to the upper surface of Figs. 9 and 10A. sp: stringy part.

るので (図 9D), 房状をなしていると思われる. 被層球体の連結方向は図 9 では不明瞭である.

3D 造形物では, アクリル樹脂内部に被層球体の外形や外套部, さらに連結の様子が再現されている (図 10, 11). 全体像を図 10A に示した. 広く見えている上面は図 5C の研磨面や図 9A と同じ面である. つまり, 図 9 の深さの違う 6 枚のスライス面は, この上面から覗き込んだ画像である. 図 10B は造形物の矢印のある底面から覗いたもので, 内部の球体の分布や被層球体同士の連結の様子がわかる. 各球体に, 図 9 での番号と同じ番号を付した. 底面から最も奥に位置する 1 と 6 は見えていない. 図 9 では不明瞭だった被層球体の外形が見えている. 被層球体は長球状 (図 10B の上下方向) で, その長軸を紙面 (図 10A) の上下方向に向けて配列しており, 杏仁状である. 不規則で歪んだ外

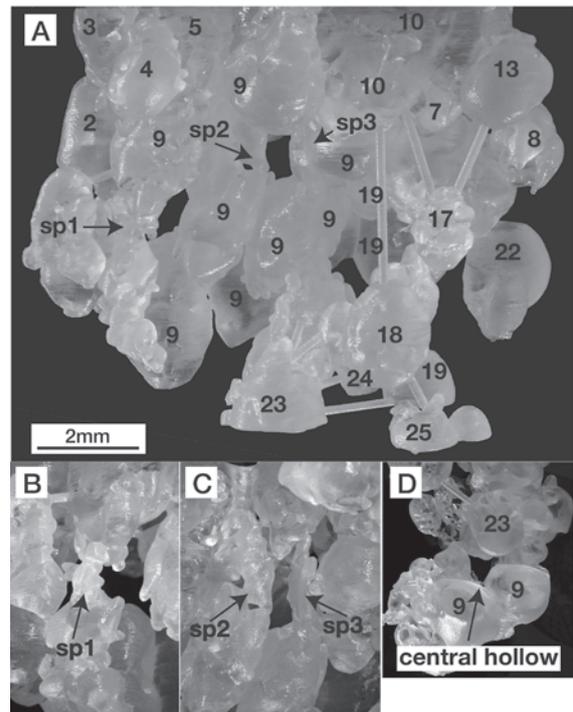


図 11. A: 杏仁状球体のみを半透明樹脂で造形したもの (図 10B と同じ). 孤立している球体はまっすぐな樹脂の棒で支えている. 添付した番号や略記は図 9 と 10B に同じ. B と C: それぞれ二つの球体を繋ぐ紐状部 1, 2, 3 の拡大写真. D: 図 11A の底面から見た中央孔.

Fig. 11. A: Semitransparent resin mold of only amygdaloidal globes (same as Fig. 10B). The isolated globes are supported by some straight resin bars. Affixed numbers and abbreviation are the same as in Figs. 9 and 10B. B and C: close-up views of the stringy part 1, 2, 3, each connecting two globes. D: The central hollow viewed from the bottom side of Fig. 11A.

形のものもある. 球体の表面は外套部に相当し, いくらか不規則な浅い凹凸があるが, 多数の孔が散在して球体内部に達しており, 多孔質となっている. 球体を連結する明瞭な紐状部が 3 カ所 (図 10B) で確認できる. 図 9 に示された球体のうち, 13, 18, 22 が単独球体として表現されている.

被層球体のみを造形した半透明樹脂 (図 11A) では, あらゆる方向から観察が可能である. 図 10B の cn1-cn3 に示された紐状部による連結は図 11B と C で再確認できる. 紙面の上方 (連結方向) から覗き込むと, 杏仁状集合体 g には中心空洞があり (図 11D), 中心空洞の回りに被層球体が一方方向に連結して配列しているのが見える.

考 察

杏仁状球体の形態と産状からみた形成過程

赤沢層上部に見出された杏仁状球体と球顆球体およびその杏仁状集合体は、赤沢層上部に挟在する金山石灰岩の下位の厚さ3 mの変成凝灰岩に限られている(図4)。集合体は、壺型、楕円体、レンズ状、平板状といった不規則な形状を示し、長軸方向の大きさが最大10 cm程度であるがサイズは多様である。礫岩中の礫のような円磨や分級を受けて運搬・集積したような組織は認められず、平坦面が層理面に平行に配列し、近接はするがお互いに接したり重ならない程度に密集している。また、集合体には変成作用によってその縁部に片理が生じており、変成作用以前に集合体が存在していたことを示している。こうした産状は、杏仁状集合組織が変成作用によって形成されたものではなく、続成作用を含む堆積作用によることを示唆している。しかし、集合体自体の周縁が侵食されたり、周縁にある球体が侵食されたような、礫として高エネルギー環境下で堆積したことを示す証拠はない。変成凝灰岩は一般的に厚層で、級化が確認できる層準(図3A)はあるが、顕著な斜交層理を示すような水流による堆積構造は見られない。変成凝灰岩は、浅海(有光帯上部)に生息する礁生生物の石灰質骨格が集積して形成される石灰岩(この場合は金山石灰岩)の下位に近接することから、浅海で堆積した可能性が高い。したがって、集合体は浅海底における初生的なパッチ状の密集状態をある程度保存して堆積し、固結したと考えられる。

杏仁状集合体の中で、被層球体は球顆球体とともに、級化状、直線状、放射状、円周状、さらには房状に配列しているのが認められる。組成濃度勾配があれば、無機的に形成される球顆でも級化配列することがある。例えば、変成溶岩中の無機的に形成された球顆の分布にも、級化配列が認められる(図7G)。しかし、そのような組成濃度勾配による結晶化で直線的、放射状、円周状、房状などの多様な配列を局所毎に形成するのは困難で、岩石中にこのような組織が存在し、その組織を利用して杏仁状集合組織を形成することが必要である。

岩石薄片や研磨片観察、X線CTスキャンによって得られた被層球体の3次元解析から、被層球体は不規則な凹凸をもった長球状の外形をもち、外套部と核

部が明瞭に分かれ、核部は杏仁状集合体内の基質部と同様であることが判明した。外套部表面には多くの孔が不規則ながら偏在する多孔質組織を示すものが幾つも見えられた。また幾つかは、房状に集まって隣接するような形状をもち、紐状部で繋がっているものもある(図10B, 11B, C)。球体同士が癒合しているように見えるものもある(図9A, Bの10)。一方向に連結しながら(図10B, 11A)円周状に配列している様子も認められる(図5C, 11A, D)。

被層球体は、外套部に微細硅酸質鉱物の結晶化は認められるものの、球顆のような縁部に直交して成長した結晶は認められず、特に核部は杏仁状集合体内の基質部と同じ様な無定方位の微細結晶で充填されており、球顆球体とは組織が大きく異なっているため、球顆とは別の成因が考えられる。一方、今回記載した凝灰岩の球顆球体は、杏仁状集合体中のみ形成されており、集合体間の基質部には認められない。したがって、球顆球体は普遍的・散在的に生成されたものではなく、被層球体となんらかの関係を持って杏仁状集合体内に形成されたことを示している。杏仁状集合体の中で、被層球体と球顆球体が一つの集合体を形成した要因を考察すれば、その成因が明らかになる可能性が高い。しかし、杏仁状集合体が3グループに分かれて形成された理由は、今のところ不明のままである。

微小被層球体の産状も特徴的である。被層球体より一桁小さい球体が集合して、乳白色帯を形成している。この帯状部には通常サイズの被層球体や球顆は認められず、帯状部は杏仁状集合体を囲んでいる。帯状部は連続性が乏しく、断続的に出現し、分岐することも多い。このような産状から、貫入脈を成因とすることは困難で、堆積時には存在していた組織と推定される。以上の考察を総合して、杏仁状組織の成因を探る必要がある。

変成溶岩中の大型球顆球体との比較

研究地域の赤沢層の変成溶岩や杏仁状集合体を含まない変成凝灰岩中にも球顆球体が含まれるが、これまで記載したより大きな球顆球体(大型球顆と略す)が発達した部分が頻繁にみられる。これらの大型球顆は集合することなく広く分散しており、杏仁状集合体中の球顆とは産状が異なる。そこで、対照試料(2019120501, 表1)を用いて、変成溶岩中に分散する大型球顆の形状や分布特性を解析した(図7G,

8D).

変成溶岩中の球顆には2種類あり、一方は石英または斜長石が規則的に成長した白色球顆、他方は暗色核部と白色外套部をもつ球顆である(図7G)。ただし、暗色核部は被層球体のような細粒物質が充填したものではなく、放射状に成長した角閃石や緑簾石からなり、外套部は図6Dのような中心方向に放射状配列した斜長石からなる。粒径頻度分布(図8D)では2種の球顆が同期した曲線を示すことから、2種の球顆は同時期に形成されたものと推定される。この変成溶岩中には、変成凝灰岩でみられたような被層球体は認められず、球顆の直径は変成凝灰岩中の球顆球体に比べ大きく、分布のピークは1.0–1.5 mmに位置する。溶岩中にあるこれらの球顆は続成作用や熱水作用で形成されたと推定され、被層球体の生成メカニズムとは大きく異なる。

これまで記載した被層球体は、外套部がタイプ2球顆の外套部と類似するが、被層球体の外套部は厚みが一樣で、しかも無定方位の多結晶から構成される。さらに、核部は微細な多結晶で充填されており、タイプ2球顆とは異なる成因で形成されたことは確実である。

球顆球体が既存の組織に左右されずに続成作用で形成された場合は、本変成溶岩中の大型球顆のように比較的一様に分散した分布特性を示すと考えられる。しかし、今回対象の杏仁状組織に含まれる球顆球体は杏仁状集合体中のみ形成され、球顆形成の条件が両者で異なっていたことが強く示唆される。

無機的に生成される球状物との比較

無機的に生成される球状物には、球晶のほか、球状花崗岩や球顆流紋岩に含まれる球顆、オパール小球、沸石充填小球、黄鉄鉱などに見られるフランボイダル組織などや、リン酸塩団塊やマンガン団塊などがある。また、火山豆石と呼ばれる球状物が存在する。さらに、温泉沈殿物としての球状石灰岩や魚卵状石灰岩にも球状物が含まれる。以上の球状物と前述した杏仁状球体を比較検討する。

球晶については須藤・下坂(1995, 1996)に産状と成因が詳しくまとめられている。球晶はマグマ中や火成岩中で結晶が成長して球状となったもので、中心から放射状に結晶成長したり、同心薄層状に結晶が形成された球状物である。その形は大勢において完全な球

形で産するが、2個以上の球晶が癒合している時は、複雑な球状物となる。溶岩などに含まれる空孔を埋めたものはより複雑な形となる。球晶は大小様々な肉眼的サイズで、構成する主結晶は単一種のことが多い。したがって、被層球体は球晶ではない。

凝灰岩中の球状物として火山豆石がある。火山豆石は火山灰が降り積もる際に水滴や水蒸気によって火山灰が豆状に集まったものとされている(例えば、Tomita *et al.*, 1985)。豆石は多層構造を持つこともあるが、一般的には豆石表面にのみ層が形成されており、内部は火山灰集合物で構成されている。大きさは数mmから数cmであり、堆積面に平行に集合・配列している(例えば、大野ほか, 1995)。これに対し、被層球体の核部は基質と同様な火山物質由来の鉱物集合からなるものの、外套部は火山豆石の表層と厚さは類似するが鉱物種は斜長石や石英に限定されており、変成凝灰岩の基質の鉱物組成とは異なる。さらに、被層球体は堆積面上での配列が明瞭でなく、集合形態も豆石のそれとはまったく異なる。したがって、被層球体は火山豆石ではない。

団塊は極めて多様な形状とサイズを示すが、深海の底質表層に特定の元素群が沈殿して多層の球状物を形成したものにマンガン団塊がある。マンガン団塊の場合、沈殿元素群は、MnとFeが主で、他に多くの有用金属元素が濃集している。団塊の大きさは数cmから10数cmまでであり、1mm以下の団塊は微小団塊とよばれ、海底粘土中に散在している(例えば、内尾, 1978)。これに対し被層球体は長石質のもので多層構造はなく、団塊に含まれる様な金属元素の濃集も認められないので、マンガン団塊とは異なる。

被層球体は変成凝灰岩にのみ含まれるので、魚卵状石灰岩に含まれるウーイドやオンコイド粒子、温泉沈殿物の球状石灰岩と比較することはできない。

杏仁状集合組織の動物組織の可能性

これまでの考察から、杏仁状集合組織は、堆積時の既存組織が続成作用などにより固結形成された可能性が高いことが示された。次に、この既存組織が動物組織であった可能性を考察する。

杏仁状球体のうち、被層球体は外套部と核部から構成され、核部は珪酸塩鉱物や不透明鉱物で充填された基質部と同等のものであった。したがって、被層球体の核部は空孔的な部分であり、外套部は核部を覆う膜

状の部分となる。そして、外套部には μm サイズの微細な孔があり、微視的に多孔質である。つまり、杏仁状集合組織は、 mm サイズの空孔に富んだ多孔質な被層球体が、明瞭とは言えないが規則的な配列をなして集合し、一部は紐状部で連結した房状になっていると判断できる。こうした、多数の被層球体を無機化学作用や続成・変成作用で形成されたとするのは説明が難しい。

一方、被層球体が円周状に配列している組織があり、その中心部は基質部となっている (図 5C)。被層球体のみを造形した樹脂では、この基質部は中心空洞として観察される (図 11D)。さらに、この中心空洞は被層球体の連結配列方向に続いており、被層球体が見られない部分となっている。被層球体と中心基質のこのような有機的配列は、無機化学過程で形成される事は困難であることから、何らかの動物の群体の産状を示している可能性が高い。

杏仁状集合体は層理面にほぼ平行に配列しているが内部に明瞭な分級や平行葉理は認められず、顕著な運搬・堆積過程で急速に集積したと見なされる部分は見出せない。こうした産状は、海底で生息していた動物の群体が受動的に火山灰に埋められ、一部は転倒して、層理面に平行に埋積されたことを示唆する。この推察は、様々な大きさ、形状、集合様式の杏仁状集合体が、限られた範囲に集中して杏仁状集合組織を形成していることと調和的である。

多孔質な組織をもつカンブリア紀の生物として、海綿動物がある。海綿動物には被層球体と類似した組織が記載されている。例えば、De Laubenfels (1955) によれば、多くの海綿は潮流が早いところで生息する場合、球状組織 (原文で *globule*) が発達しやすいとされている。本地域の岩相層序と集合体の産状からは、早い潮流環境下にあったかはわからないが、直上の石灰岩には顕著な斜交層理が発達しており、浅海海底火山表層部の堆積環境が予想されることから、可能性は残される。

海綿化石の群体中に多数の球体や球状の孔が残っている組織は、幾つかの海綿化石でも知られており (Krautter, 2002; Pisera, 2002; Reiner and Wörheide, 2002; Botting and Muir, 2014)、杏仁状集合体や被層球体の形状に似ているものがある。しかし、杏仁状集合体はその縁辺に海綿の群体の壁のような明瞭な境界を持たない。また、集合体の基質部に、間質部に相当す

るような骨針を伴う海綿状組織は基本的には認められない。ただし、試料 M1H1 の研磨面 (Fig.12A) では、杏仁状集合体内の基質部に暗色針状組織が認められた。また、試料 201606204 の研磨面 (Fig.12B) では杏仁状球体間の基質部に認められる暗色針状様の組織も認められた。これらは、形状・長さ・太さとも、Botting *et al.* (2013) の fig. 5-1, 4 や、Botting and Muir (2018) の fig. 4C, 5D の骨針組織に類似している。しかし、本地域の変成凝灰岩は緑色片岩相から角閃岩相の変成作用を受けており、基質部には針状角閃石や緑泥石が図 6F のように再結晶している。図 12 の暗色針状部も極めて細粒な針状角閃石の集合となっており、骨針様組織は変成鉱物によるみかけの組織なのかもしれない。いずれにしても、明瞭な海綿骨針組織が認められないため、現状では海綿動物とみなすことは難し

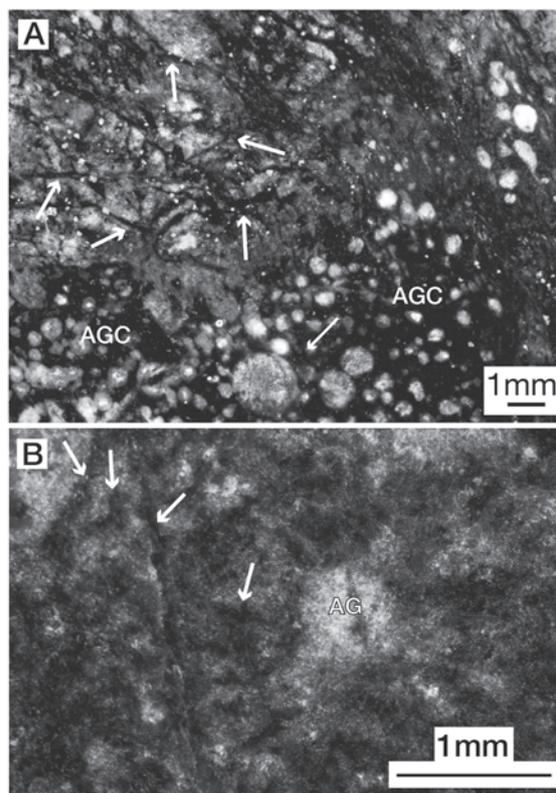


図 12. A: 杏仁状集合体間および基質部に見られる暗色の海綿骨針様組織 (矢印で示す) (M1H2). AGC: 杏仁状集合体. B: 杏仁状球体間に見られる暗色の海綿骨針様組織 (矢印で示す) (試料 201506204). AG: 杏仁状球体.

Fig. 12. A: The arrows indicate the sponge spicule-like texture observed in an amygdaloidal globe cluster and its matrix (M1H2). AGC: amygdaloidal globe cluster. B: The arrows indicate a sponge spicule-like texture observed around and between amygdaloidal globes (No. 201506204). AG: amygdaloidal globe.

い。

Botting (2005) は、凝灰質砂岩中の非常に良く保存された中部オルドビス系化石層における続成初期の珪化作用の重要性を論じた。海綿群体の周辺にシリカが移動して選択的に珪化されることで軟体部がよく保存されるとし、いくつかの種で多孔質組織と海綿骨針が共存している状態を記載している（例えば、p. 588 の text-fig. 6B, 7C）。日立地域の杏仁状組織も珪酸塩物質で置換されており、続成初期に珪化したことで杏仁状集合体が凝灰岩中に保存されたのかもしれない。したがって、杏仁状球体間の基質部にも条件がよければ、海綿間質部の骨針がもっと保存よく残されている可能性がある。

観察した試料の中には、直径 0.2 mm 以下の微小な被層球体が針状部とともに密集して乳白色帯状に分布する部分がある（図 5E, F）。直径 1 mm 程度の被層球体や球顆球体はこの帯状部には含まれず、乳白色帯状部は杏仁状集合体を囲んでいる。これは、杏仁状集合体を作る群体が、場所によって別の性状をなす組織に被覆されていたことを示唆する。

本研究では、カンブリア紀の年代が得られている日立変成岩類赤沢層の変成凝灰岩から見出された杏仁状集合体が、群体性の動物起源である可能性を考察してきたが、動物群を特定することができなかった。これが生物源のものであると確定できれば、日本における最古級の化石となるので、日本列島の地質形成史や生命進化史において極めて重要である。小論で記載した杏仁状集合体に比較できる生物を見出すために、今後の更なる検討が必要である。

結 論

杏仁状集合体の産状、被層球体や球顆球体の配列や分布特性、被層球体の内部組織、3D スキャンによる被層球体の細部組織、3D 造形による被層球体の配列や連結様式の確認から、杏仁状集合体中の球体は、生体由来組織を起源とする可能性を指摘した。特に被層球体については、紐状部による複数の球体の連結、複数が繋がった房状組織を確認できることから、群体性の動物組織が珪酸塩物質で置換された化石組織の可能性もある。また、海綿骨針に類似する針状組織を発見したが、角閃石などで構成される組織であり、海綿骨針と確定するのは困難であった。結論として、杏仁状

集合組織は火成岩の杏仁状組織や球顆組織とは形成機構が異なり、堆積時の既存組織が珪酸塩鉱物などで置換されて生じたものと推定した。既存組織として、該当するものを見出せなかったが、何らかの群体性動物組織に由来する可能性があるため、今後の検討が必要である。

謝 辞

本研究は日立市郷土博物館と茨城県北ジオパーク構想のインタープリター組織であるジオネット日立の協力を得て実施された。博物館職員とジオネット日立メンバーに感謝する。カンブリア紀化石の探索については、中国西北大学の舒 徳干教授にご教授いただいた。海綿化石の X 線 CT スキャンについては、JX 日鉱日石開発（株）のグエン・ビン博士の仲介で、東北大学工学研究科の土屋範芳教授のご協力のもと実施された。岩石薄片作成や EDX-SEM による定性分析は茨城大学の藤縄明彦名誉教授と長谷川健准教授に依頼した。岩石の鏡面研磨はこしば石材に有料で依頼した。石灰岩中のコノドント抽出は筑波大学指田研究室の高橋唯氏（現在室戸世界ジオパーク）にお願いした。大阪市立大学大学院理学研究科の江崎洋一教授、東京大学大学院理学系研究科附属臨海実験所の岡西政典特任助教からは、粗稿に対しコメントをいただいた。ミュージアムパーク茨城県自然博物館からは多方面にわたってご支援いただいた。2 名の査読者の方には丁寧な指摘を受け、原稿完成に至った。以上の方々に深く感謝する。

引用文献

- Botting, J. P. 2005. Exceptionally well-preserved middle Ordovician sponges from the Llandegley rocks Lagerstätte, Wales. *Palaeontology*, **48**: 577-617.
- Botting, J. P., L. A. Muir and J-P. Lin. 2013. Relationships of the Cambrian Protomonaxonida (Porifera). *Palaeontologia Electronica*, **16**: 1-23.
- Botting J. P. and L. A. Muir. 2014. First post-Cambrian records of the reticulosan sponges *Valospongia* and *Hintzespongia* from the late Tremadocian of North Wales. *Acta Palaeontologica Polonica*, **59**: 241-252.
- Botting, J. P. and L. A. Muir. 2018. Early sponge evolution: A review and phylogenetic framework. *Palaeoworld*, **27**: 1-29.
- 藤本治義. 1924. 日立鉾山付近の片状岩に伴われる石灰岩中のサンゴ化石. 地学雑誌, **36**: 559-561.

- Krautter, M. 2002. Fossil Hexactinellida: An overview. *In*: Hooper J.N.A. and R.W.M. von Soest (eds.). *Systema Porifera*. pp. 1210-1223, Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York.
- De Laubenfels, M. W. 1955. Porifera. *In*: Moore, R. C. (ed.), *Treatise on Invertebrate Paleontology, Part E, Archaeocyatha and Porifera*. E22-E113, Geological Society of America and University of Kansas Press.
- Minato, M. 1955. Japanese Carboniferous and Permian corals. *Journal of the Faculty of Science, Hokkaido University, Series 4, Geology and Mineralogy*, **9**: 1-202.
- Nozaki T., Y. Kato and K. Suzuki, 2014. Re-Os geochronology of the Hitachi volcanogenic massive sulfide deposit: The oldest ore deposit in Japan. *Economic Geology*, **109**: 2023-2034.
- 大野希一・遠藤邦彦・宮原智哉・陶野郁雄・磯 望. 1995. 雲仙岳 1992 年噴火における火山豆石の生成条件 - 雲仙岳噴火とその噴出物, 第 2 報. *火山*, **40**: 1-12.
- Pisera, A. 2002. Fossil 'Lithistids': An overview. *In*: Hooper J. N. A. and R. W. M. von Soest (eds.). *Systema Porifera: A Guide to the Classification of Sponges*. pp. 388-403, Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York.
- Reitner, J. and G. Wörheide. 2002. Non-lithistid fossil demospongiae – Origin of their palaeobiodiversity and highlights in history of preservation. *In*: Hooper J. N. A. and R. W. M. von Soest (eds.). *Systema Porifera: A Guide to the Classification of Sponges*. pp. 52-68, Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York.
- 須藤俊男・下坂康哉. 1995. 球晶および関連問題の研究史 (I) - 序論, 産状. *粘土科学*, **35**: 71-84.
- 須藤俊男・下坂康哉. 1996. 球晶および関連問題の研究史 (II) - 通性, 成因. *粘土科学*, **35**: 192-207.
- 杉山新平. 1972. 日立地域より紡錘虫化石の発見. *地球科学*, **26**: 173-175.
- Tagiri, M. 1971. Metamorphic rocks in the Hitachi district in the southern Abukuma Plateau. *Journal of the Japanese Association of Mineralogists, Petrologists and Economic Geologists*, **65**: 77-103.
- Tagiri, M. 1973. Metamorphism of Paleozoic rocks in the Hitachi district, southern Abukuma Plateau, Japan. *Science Reports of Tohoku University, Series III*, **12** (1), 1-67.
- Tagiri, M., D. J. Dunkley, T. Adachi, Y. Hiroi, and C. M. Fanning. 2011. SHRIMP dating of magmatism in the Hitachi metamorphic terrane, Abukuma belt, Japan: evidence for a Cambrian volcanic arc. *Island Arc*, **20**: 259-279.
- 田切美智雄・森本麻希・望月涼子・横須賀歩・D. J. Dunkley・足立達朗. 2010. 日立変成岩類 - カンブリア紀の SHRIMP ジルコン年代をもつ変成花崗岩質岩類の産状とその地質について. *地学雑誌*, **119**: 245-256.
- 田切美智雄・廣井美邦・足立達郎. 2011. 日本最古の地層— 日立のカンブリア系変成古生層. *地質学雑誌*, **117**: 補遺, 1-20.
- 田切美智雄・堀江憲路・足立達朗. 2016a. 阿武隈山地南部, ジルコン U-Pb 年代値に基づく日立変成岩類層序の再定義と日本海形成前の東北日本列島基盤の復元. *地質学雑誌*, **122**: 231-247.
- 田切美智雄・鈴木保光・小池 渉. 2016b. 日立変成地域, 大雄院層のクロリトイド片岩: その原堆積物と背斜褶曲との関係について. *茨城県自然博物館研究報告*, (19): 1-6.
- 田切美智雄・埴 勝利・及川 晃・渡邊則昭. 2016c. 日立カンブリア系赤沢層から化石報告 3—新たな海綿化石産出露頭と近接する石灰岩の産状. *日本地質学会第 123 年学術大会講演要旨*, R5-P-4.
- 田切美智雄・埴 勝利・及川 晃・渡邊則昭. 2018. 南部阿武隈山地日立地域, カンブリア系変成凝灰岩と変成石灰岩に産する化石/化石様組織. *日本地質学会第 125 年学術大会講演要旨*, R5-O-15.
- Tomita, K., T. Kanai, T. Kobayashi, and N. Oba. 1985. Accretionary lapilli formed by the eruption of Sakurajima volcano. *Journal of Japanese Association of Mineralogy, Petrology and Economic Geology*, **80**: 49-54.
- 内尾高保. 1978. マンガン団塊の重要性と性状・分布. *鉄と鋼*, **9**: 1440-1448.
- 渡邊万次郎. 1920. 日立鉾山付近の火成岩とその鉾床に對する關係に就て. *地質学雑誌*, **27**: 441-450.

(要 旨)

田切美智雄・埴 勝利・及川 晃・渡邊則昭・安藤寿男. カンブリア系日立火山深成複合岩体赤沢層の変成凝灰岩から発見された杏仁状集合組織. 茨城県自然博物館研究報告 第24号 (2021) pp. 1-17.

日立変成岩中のカンブリア系赤沢層最上部の変成凝灰岩と石灰岩層の産状と、変成凝灰岩から発見された杏仁状集合組織の形状を記載し、X線CTスキャンによって杏仁状集合組織を3D画像化してアクリル樹脂中に造形し、その組織の由来を考察した。集合組織は径0.2–3 mmの杏仁状球体と球顆球体からなり、層理面に沿った数10 mm厚、最大10 cm長の集合体を形成し、複数の集合体が近接している。集合体内では杏仁状球体と球顆球体が規則的配列を示すことがある。杏仁状球体は細い紐状部で房状に繋がっている。このような杏仁状集合組織は火成岩の杏仁状組織や球顆の形成機構とは異なり、堆積時にあった既存組織が珪酸塩鉱物で置換されたもので、群体動物起源と推定されたが、該当する動物は特定できなかった。

(キーワード): 杏仁状集合組織, 生物起源組織, X線CTスキャン, 3D造形, 変成凝灰岩, カンブリア紀, 赤沢層, 日立市, 阿武隈山地.