

瑞浪市化石博物館研究報告 第 50 卷, 第 3 号, 59–66, 4 figs., 1 table.

Bulletin of the Mizunami Fossil Museum, vol. 50, no. 3, 59–66, 4 figs., 1 table.

©2024, Mizunami Fossil Museum

Manuscript accepted on January 19, 2024; published on March 29, 2024.

# パレオパラドキシア瑞浪釜戸標本と共産した 方解石質コンクリーションの成因

村宮悠介<sup>1)</sup>・吉田英一<sup>2)</sup>

1) 公益財団法人深田地質研究所 〒113-0021 東京都文京区本駒込 2-13-12

2) 名古屋大学博物館 〒464-8601 愛知県名古屋市千種区不老町

## Formation of calcite concretions co-occurred with the “Paleoparadoxiid Mizunami-Kamado specimen” in Mizunami City, central Japan

Yusuke Muramiya<sup>1)</sup> and Hidekazu Yoshida<sup>2)</sup>

1) Fukada Geological Institute, 2-13-12 Honkomagome, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0021, Japan

< muramiya@fgi.or.jp >

2) Nagoya University Museum, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi 464-8601, Japan

### Abstract

Formation processes of calcite concretions co-occurred with the “Paleoparadoxiid Mizunami-Kamado specimen” and calcite fillings formed in bones were studied and discussed based on geological observations and geochemical analyses. The un-deformed fecal pellet-like structures in concretion show that concretions formed before the compaction of sediments. The low  $\delta^{13}\text{C}$  values (approximately  $-10\text{‰}$ ) of concretions and calcite fillings in bones and similar  $\delta^{18}\text{O}$  values to each other suggest that they were formed from organic carbon at almost the same time during early diagenesis. The calcite fillings in bones protect the skeleton from deformation due to the compaction of sediments.

*Key words:* calcite filling, concretion, diagenesis, Paleoparadoxiidae, Mizunami Group, Miocene

### 1. はじめに

コンクリーションとは、方解石などの鉱物によって碎屑粒子の間隙がセメントされることで形成される緻密な岩塊のことで、世界各地の堆積岩または堆積物中から発見されている。コンクリーションの中心部には保存良好な化石が含まれていることが多く（例えば Baird et al., 1986; Martill, 1988; Maeda and Shigeta, 2005; Yoshida et al., 2015; Jauvion et al., 2016; Plet et al., 2017; Muramiya et al., 2024）、コンクリーションに含まれる化石は、古くから古生物学

者に注目されてきた。コンクリーションの産出は瑞浪層群においても複数層準で知られており（安藤, 2018; 安藤・星, 2020）、例えば、それらに含まれる保存の良い有孔虫化石は、瑞浪層群の微化石層序の理解に役立てられている（多井, 1958）。

今回、瑞浪層群宿洞層から産出したパレオパラドキシア科の骨格化石（パレオパラドキシア瑞浪釜戸標本、以下瑞浪釜戸標本と記述）を剖出する過程で、骨格化石に付随してコンクリーションが複数個発見された（Fig. 1）。このコンクリーションが炭酸カルシウム（ $\text{CaCO}_3$ ）を主成分とする場合、その炭素成分は有機炭素由来、つまり瑞浪釜戸標本の遺骸に含まれる有

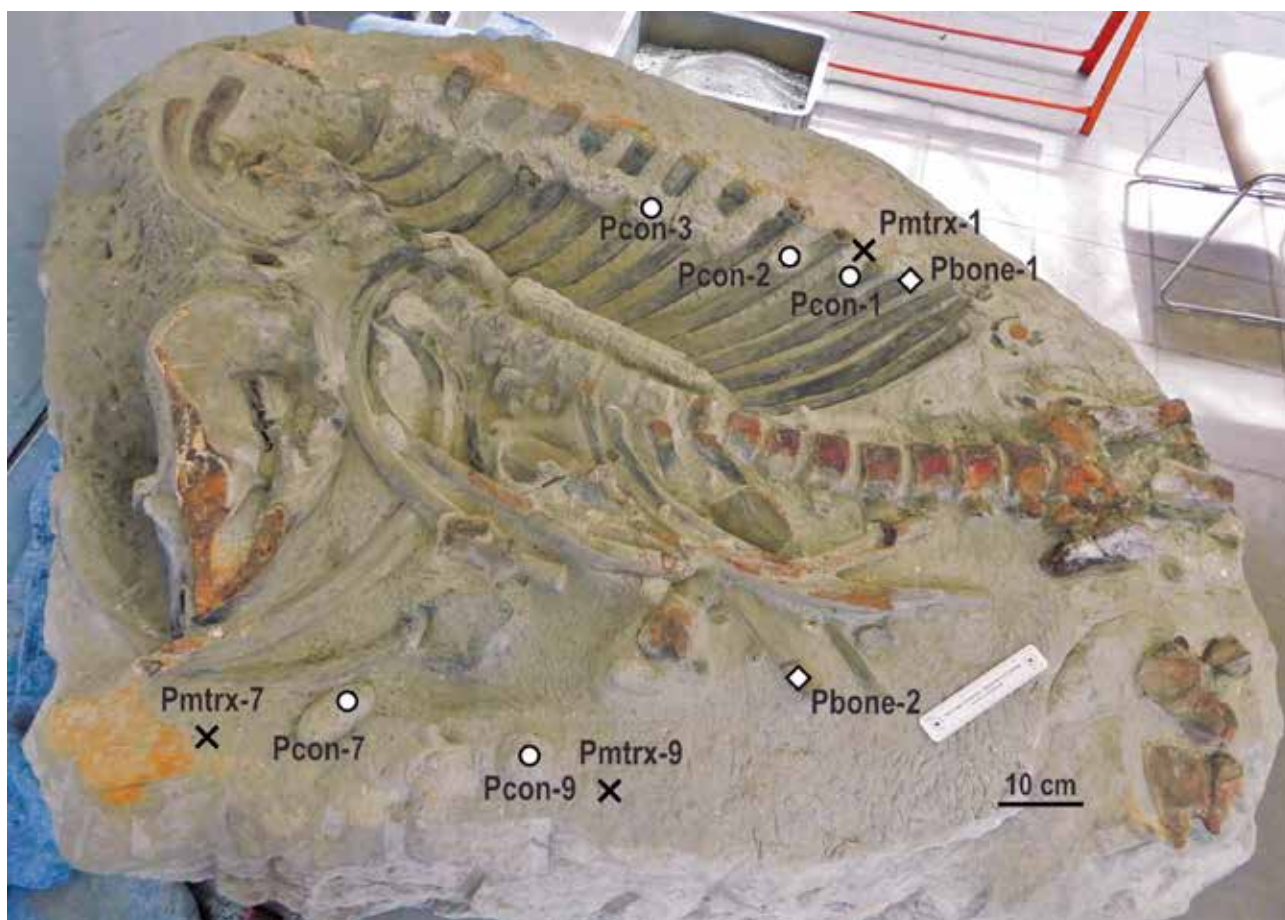
機炭素がその起源で、遺骸の埋積とほぼ同時期に形成された可能性が考えられる。また、これらが明らかとなれば、どのようにこの骨格化石の塊が形成されたのかについても、コンクリーション形成の視点から具体的な考察が展開できる可能性がある。本論では、以上の目論見のもと、地質学的な観察および地球化学的な分析結果と、これらから考えられるコンクリーションの成因や形成時期について報告する。

## 2. 方法

今回着目したコンクリーションは、瑞浪釜戸標本骨格内部の肋骨間および頭骨近傍に直径 3~5 cm 程度の球状体として確認されたものである (Fig.1)。これらのコンクリーションを 5 試料と、肋骨内部の充填物を 2 試料、周辺母岩を 3 試料、これらを骨格化石が含まれる岩塊 (Fig. 1) から採取し、以下の観察・分析等を行なった。

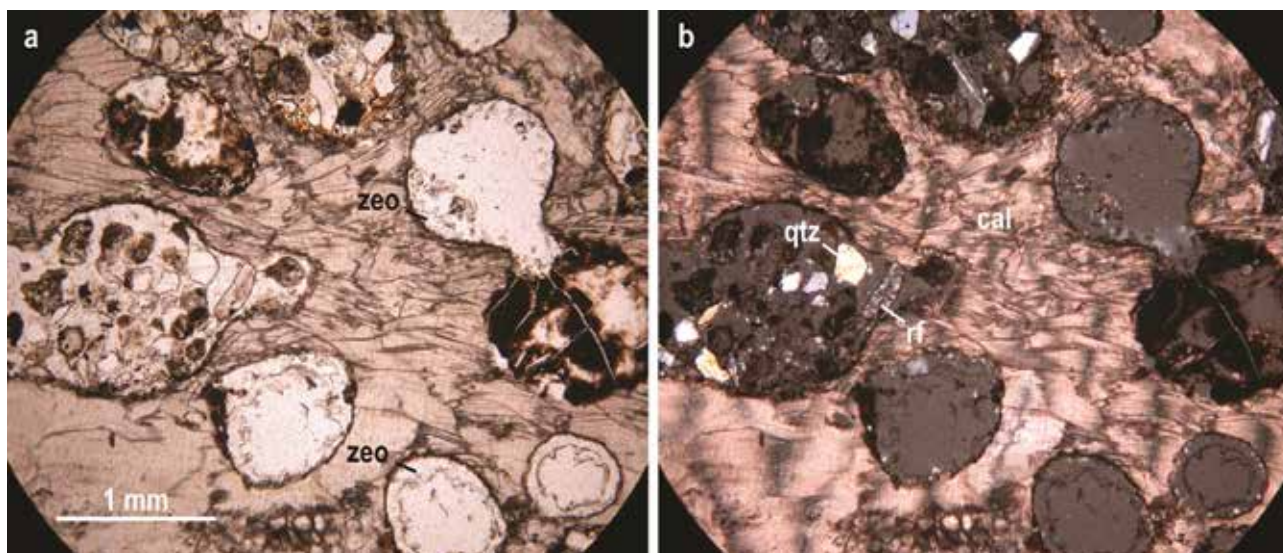
コンクリーションの微細な内部構造を確認するため、コンクリーションの薄片を作成し、それを偏光

顕微鏡で観察した。次に、コンクリーション、肋骨内部の充填物および周辺母岩の構成鉱物を同定するため、X 線回折 (XRD) 分析を行った。コンクリーションのサンプルはコンクリーションの中心付近から、肋骨内部の充填物のサンプルは肋骨化石の新鮮な破断面から、周辺母岩のサンプルはコンクリーションから 5~10 cm 程度離れた部分から採取した。各サンプルはメノウ製乳鉢で粉碎し粉末化した。この粉末サンプルを名古屋大学博物館に設置されている Rigaku 製の XRD 装置 (MultiFlex) を用いて分析し、回折パターンを得た。それぞれの分析は、Muramiya et al. (2022) の手法を踏襲して、Cu-K $\alpha$  線, 40 kV, 40 mA, 4°/分の条件で行った。さらに、上記の粉末サンプルおよびコンクリーションと同層準から産出したエゾイガイ (*Crenomytilus grayanus*) と底生有孔虫の化石ついて、昭光サイエンス株式会社に設置されている Thermo Fisher Scientific 製の質量分析計 (DELTA V Plus) を用いて炭酸塩の酸素・炭素安定同位体比 ( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$ ) を測定した。



**Fig. 1.** 地球化学的分析試料の採取箇所。bPcon はコンクリーション、Pmtrx は周辺母岩、Pbone は肋骨内部の方解石充填物を示す。

**Fig. 1.** Sampling points of the analyzed samples. Pcon, Pmtrx, and Pbone represent concretion, matrix, and calcite filling in bone, respectively.



**Fig. 2.** コンクリーションの薄片写真. コンクリーションの内部に、糞粒様構造(円形の断面)が確認できる。(a)はオープンニコル、(b)はクロスニコルで撮影. cal: 方解石, qtz: 石英, zeo: 沸石, rf: 岩片.

**Fig. 2.** Thin section photomicrographs of concretion under open-polarized light (a) and cross-polarized light (b), showing fecal pellet-like structures in concretion. cal: calcite, qtz: quartz, zeo: zeolite, and rf: rock fragment.

### 3. 結果

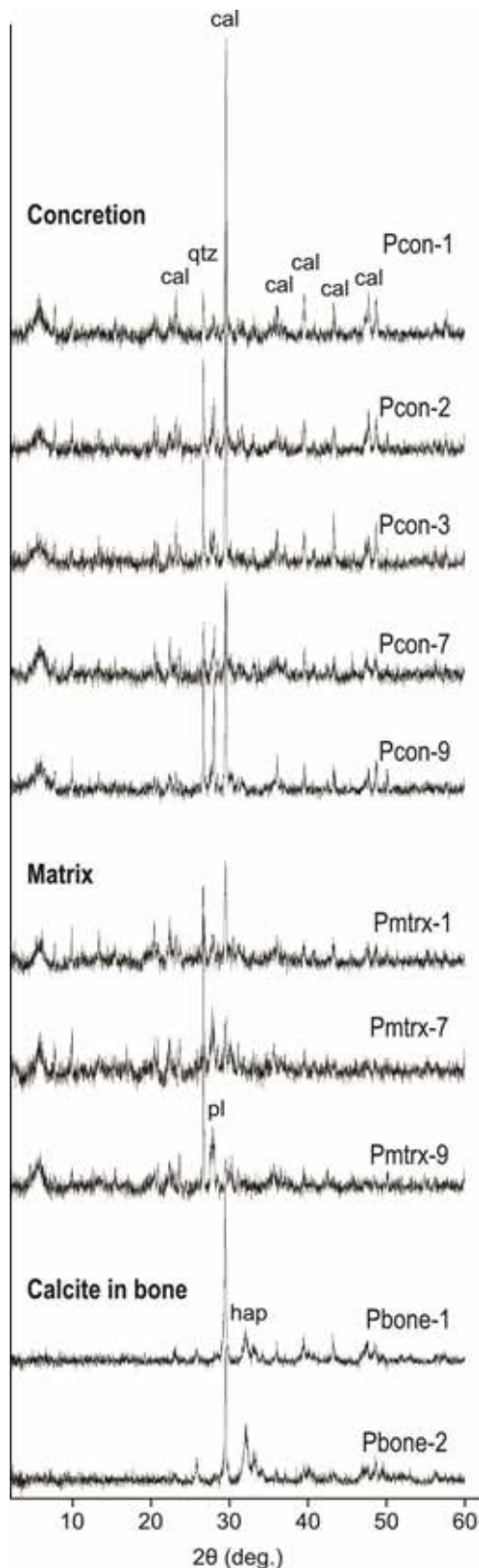
パレオパラドキシア科の骨格化石は、一層準にほとんど平面的に位置しており(骨格を含む層厚は約15 cm)、サンプリングしたコンクリーションも同層準の骨格近傍に含まれていた。サンプリングしたいずれのコンクリーションも、内部の色は周辺母岩とほとんど変わらないが、母岩部分よりもわずかに硬質なため、母岩を削りながら骨格を剖出する最中にその存在が認識できた。コンクリーションは、直径3~5 cm程度の垂球状をしている。コンクリーション Pcon-1~3は左側の肋骨の内側に接しており、地層の層理面と平行に配列し、コンクリーション Pcon-7 および Pcon-9は、Pcon-1~3に対して背骨を挟んで反対側に位置している。サンプリングしたいずれのコンクリーションでも、貝殻や骨化石といった化石本体が中心核になっている例はなかった。サンプルを採取した骨格化石が含まれる岩塊は一様に塊状で、コンクリーションが形成されている層準とそうでない層準において、母岩の粒度や固結度に違いはなかった。

薄片観察とXRD分析の結果から、コンクリーションは主に方解石からなることが分かった(Figs. 2, 3)。また、コンクリーションには碎屑物として石英、斜長石、火山ガラスなども含まれている。周辺母岩にはこれら碎屑物のほか、方解石も含まれている。周辺母岩の推定炭素含有率(酸素・炭素安定同位体比分析の際に、サンプルのリン酸分解で生成されるCO<sub>2</sub>ガス

量から求められる)は0.5~2.1wt%で、1点を除いてコンクリーションの推定炭素含有率(2.1~5.2wt%)の1/10程度であることから(Table 1)、周辺母岩に含まれる方解石の量はコンクリーションよりも少ないと考えられる。骨内部の骨組織間の空隙は、無色透明の方解石で充填されている。骨本体はヒドロキシアパタイトからなっている。

薄片では、一部のコンクリーションの内部に糞粒と思われる直径約1 mmの円状の構造が観察できた。その糞粒様構造の内部には石英や岩片といった碎屑粒子と有機物と思われる褐色の不透明物質が含まれている。また、糞粒様構造の内側の縁辺部には、縁辺部を縁取りする形、あるいは碎屑物の間隙を充填する形で、沸石と思われる鉱物が形成されている。糞粒様構造の周囲は方解石でセメントされている(Fig. 2)。

$\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{18}\text{O}$ の両方について、コンクリーション、骨化石内部の方解石、周辺母岩はいずれも負の値で特徴づけられる(Fig. 4, Table 1)。瑞浪釜戸標本と同層準から産出したエゾイガイと底生有孔虫は、それぞれ、 $\delta^{13}\text{C}$ が0.4‰と-1.6‰、 $\delta^{18}\text{O}$ が-2.6‰と-1.5‰の値を示す。分析値全体の中で、コンクリーションの分析値は低 $\delta^{13}\text{C}$ ・低 $\delta^{18}\text{O}$ 側にプロットされる。貝類化石および底生有孔虫化石の分析値は、コンクリーションとは逆側にプロットされる。周辺母岩の分析値はコンクリーションと化石(エゾイガイおよび底生有孔虫)の間にプロットされる。骨化石内部の方解石は、コンクリーションに近い値を示している。



**Fig. 3.** XRD 分析の結果. コンクリーションと肋骨内部の充填物は主に方解石からなる. 周辺母岩は主に石英と斜長石からなる. Cal: 方解石, qtz: 石英, pl: 斜長石, hap: ヒドロキシアパタイト.

**Fig. 3.** Results of XRD analyses. Concretions and fillings in bone mainly comprise calcite. Matrix mainly comprises quartz and plagioclase. cal: calcite, qtz: quartz, pl: plagioclase, and hap: hydroxypatite.

#### 4. 考 察

コンクリーションは、 $-10\text{‰}$ 前後の  $\delta^{13}\text{C}$  を持つことから、有機物が炭素源となって形成されたと考えられる (Irwin et al., 1977). 一部のコンクリーションの内部には糞粒と思われる構造が密集して確認されることから (Fig. 2), 糞粒に含まれる有機物中の炭素と間隙水中のカルシウムイオンとの反応で形成された可能性が高い. また、糞粒の断面が円形を保っていることから、コンクリーションは堆積物が圧密されるより前に形成されたと考えられる.

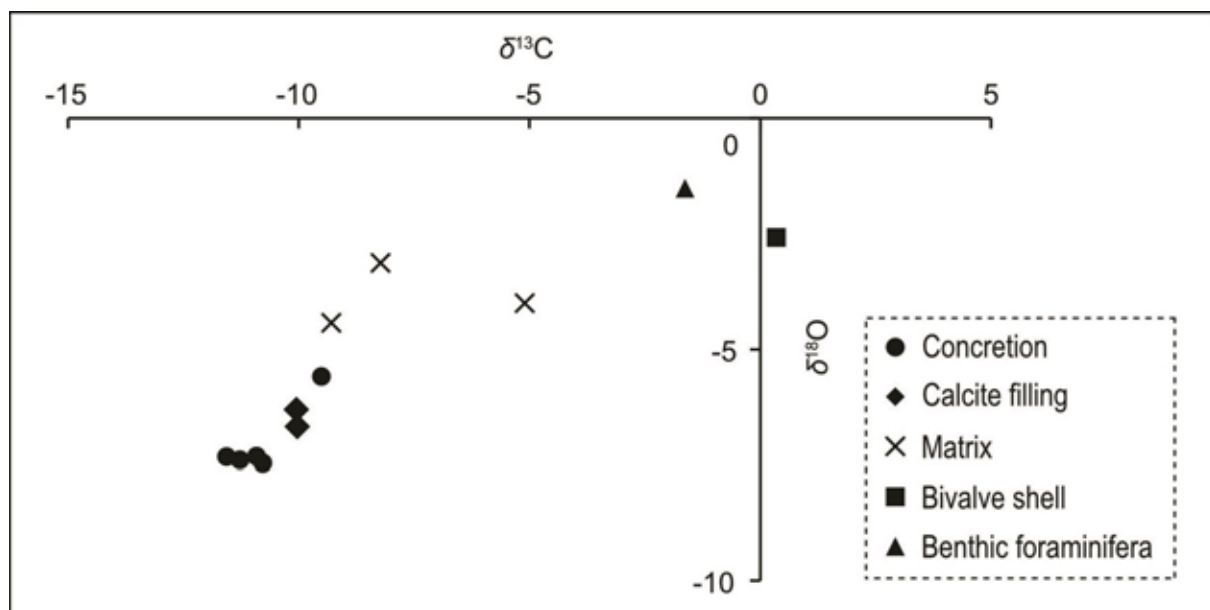
肋骨内部の方解石充填物は、コンクリーションと同様に  $-10\text{‰}$ 前後の  $\delta^{13}\text{C}$  を持つことから、その炭素源は有機物だと考えられる. したがって、肋骨内部の方解石充填物は骨内に残存していた脂質などの有機物が炭素源となって形成された可能性がある.

これまでの瑞浪釜戸標本の産状調査では、板鰓類による咬合痕が骨の表面に多数確認され、骨格周辺からも多数の板鰓類の歯化石が産出している (高桑, 2024). また、フジツボが肋骨表面に付着した状態で化石化している (北川, 2024). これらのことから、瑞浪釜戸標本の死骸海底に着底した後、板鰓類などによってその肉質部分の多くが捕食され、堆積物によって被覆されたときにはほとんど骨格のみになっていた可能性が高い. つまり、各骨は解離していないものの、コンクリーション形成に必要な有機炭素の大部分が埋積前に消失されてしまったことにより、数 cm サイズのコンクリーションと骨格内部を充填する方解石のみが形成されたと考えられる. また、骨格周辺に散らばった状態で産出する数 cm サイズの小さなコンクリーションは、板鰓類が捕食した際に周辺に散らばった肉片や排泄物、あるいはそれらに集まった底生生物が炭素源になって形成された可能性も考えられる. もし、板鰓類に捕食されることなく堆積物中に埋積していれば、骨格全体を内包するメートルサイズのコンクリーションに成長していたかもしれない. 実際に同じ束柱類の *Desmostylus hesperus* (デスモスチルス) の気屯標本 (樺太) は、長辺 3 m のコンクリーションに内包されていた (Shikama, 1966 など). また、秋田県男鹿半島では、鯨骨を内包する直径数メートルのコンクリーション群が確認されている (隈ほか, 2023). なお、同じ瑞浪盆地産のパレオパラドキシア泉標本の骨格は瑞浪釜戸標本と同じく骨格の一部がコンクリーションで覆われていたようである (井尻・亀井, 1961). 泉標本には板鰓類の歯化石が共産していることから (Shikama, 1966), 瑞浪釜戸標本と同じようにその捕食によりコンクリーション形成時には肉質が少ししか残されていなかった可能性がある.

**Table 1.** コンクリーション, 肋骨内部の方解石充填物, 周辺母岩, エゾイガイの殻, 底生有孔虫殻の  $\delta^{13}\text{C}$  および  $\delta^{18}\text{O}$ .

**Table 1.**  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  values of the concretions, calcite fillings in bone, matrices, bivalve shell, and benthic foraminifera shell. Results of oxygen and carbon isotopic analyses.

Sample type	Sample No.	Estimated C content (wt%)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰, VPDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰, VPDB)
Concretion	Pcon-1	5.2	-11.6	-7.3
	Pcon-2	4.5	-11.3	-7.4
	Pcon-3	4.3	-10.8	-7.5
	Pcon-7	2.1	-9.5	-5.6
	Pcon-9	4.2	-10.9	-7.3
Matrix	Pmtx-1	2.1	-8.2	-3.1
	Pmtx-7	0.7	-9.3	-4.4
	Pmtx-9	0.5	-5.1	-4.0
Calcite filling in bone	Pbone-1	8.3	-10.0	-6.7
	Pbone-2	5.2	-10.1	-6.3
Bivalve shell	Bivalve shell	49.0	0.4	-2.6
Benthic foraminifera	Benthic foraminifera	42.9	-1.6	-1.5



**Fig. 4.** 酸素・炭素安定同位体比分析の結果. 各点の数値は表1に示す.

**Fig. 4.** Results of oxygen and carbon isotopic analyses. The data are also presented in Table 1.

また, パレオパラドキシアの大野原標本, 般若標本, 梁川標本についてコンクリーションの存在についての記録は無いが, 大野原標本と梁川標本は骨が埋積前に水流で流されており(長谷川・竹谷, 1994; 北川ほか, 2013), 般若標本については板鰓類の捕食やフジツボの付着が見られることから(北川ほか, 2013), これらの骨格の埋積時にはコンクリーション形成に必要な炭素供給源がほとんどなかったことが推測される.

コンクリーションおよび肋骨内部の方解石充填物はともに $-7\%$ 前後の  $\delta^{18}\text{O}$  を持つ. 炭酸塩の  $\delta^{18}\text{O}$  は, 沈澱時の温度と間隙水の  $\delta^{18}\text{O}$  によって決まるが (Bickert, 2006), 両者が同程度の  $\delta^{18}\text{O}$  を持つことは, それらが同時期に形成されたことを示唆している. つまり, 肋骨内部の方解石充填物も, 堆積物が圧密されるより前に形成した可能性が高い.

一般的に、堆積物の表層付近で形成されたコンクリーションは、海水の  $\delta^{18}\text{O}$  と海水温を反映して、0‰ 付近の  $\delta^{18}\text{O}$  を持つことが多い (Nelson and Smith, 1996). しかし、今回発見されたコンクリーションや方解石充填物は、それよりも非常に低い値を示している。この理由について考察してみる。まず、沈澱温度の影響を考えてみる。堆積時の海水の  $\delta^{18}\text{O}$  を 2‰ と仮定 (前期中新世の海水の  $\delta^{18}\text{O}$ : Zachos et al., 2001) して、Watkins et al (2014) の  $\delta^{18}\text{O}$  - 温度関係式を用いて計算すると、-7‰ の  $\delta^{18}\text{O}$  を持つ方解石の沈澱温度は 76°C となる。コンクリーションが形成されたと考えられる堆積物の表層付近がこのような高温になる理由としては、熱水活動が考えられる。ただし、可児堆積盆の瑞浪層群中村層では地下浅所での熱水活動によって珪質岩脈が形成されている例があるが (古川ほか, 2020), 瑞浪釜戸標本の近傍では、現在のところ、地層の堆積時に熱水活動が生じていた証拠は発見されていない。

次に、間隙水が低い  $\delta^{18}\text{O}$  を持っていた可能性を考えてみる。まず、天水は一般的に低い  $\delta^{18}\text{O}$  を持つため (Drever, 1997), それが海底堆積物中に混入すると、間隙水の  $\delta^{18}\text{O}$  は海水よりも低くなる。コンクリーションが形成されていた層準の堆積環境は、貝形虫と有孔虫の群集解析から、水深 20~50 m の亜沿岸砂底と考えられている (入月ほか, 2024)。現在の海洋では、このような沿岸海底でも天水由来の湧水が生じている場所があり (例えば富山湾: 中口ほか, 2005), 宿洞層の堆積時にこのような湧水が生じていた直接的証拠はないが、もし堆積物中に天水が流入していた場合、そこで形成されるコンクリーションや方解石充填物は低い  $\delta^{18}\text{O}$  を持つに到ると考えられる。また、水-岩石反応によっても間隙水の  $\delta^{18}\text{O}$  は変化しうる。海底堆積物の間隙水の  $\delta^{18}\text{O}$  は、火山灰の変質によっても低下することが知られている (Aagaard et al., 1989)。コンクリーションが形成されている層準は凝灰質であるため、火山灰の変質によって間隙水の  $\delta^{18}\text{O}$  が低下していた可能性も考えられる。これらがコンクリーションおよび肋骨内部の方解石充填物の  $\delta^{18}\text{O}$  に影響を与えていた可能性がある。

## 5. まとめ

パレオパラドキシア瑞浪釜戸標本の骨格近傍には、直径数 cm の方解石質球状コンクリーションが形成されていた。また、肋骨内部は方解石によって充填されていた。これらの成因と形成時期について、地質学的な観察と地球化学的な分析の結果に基づいて考察した。

まず、コンクリーションの内部に密集する糞粒状の構造が圧密変形を被っていないため、コンクリーションは堆積物の表層付近で形成されたと考えられる。コンクリーションと方解石充填物はともに -10‰ 前後の  $\delta^{13}\text{C}$  を持ち、 $\delta^{18}\text{O}$  も互いに近い値を示すことから、両者は糞粒や骨内の脂質などの有機物を炭素源としてほとんど同時期に形成された可能性が高い。そして、肋骨内部の方解石充填物は、骨を内部から補強することで、化石を地層の圧密による変形から守る役割を果たしていたと考えられる。

## 6. 謝辞

楓 達也氏 (瑞浪市) には、サンプリングを手伝って頂いた。泉 賢太郎博士 (千葉大学) と長谷川善和博士 (横浜国立大学名誉教授, 群馬県立自然史博物館名誉館長) には原稿を査読していただいた。以上の方々にお礼申し上げます。

## 7. 引用文献

- Aagaard, P., P. K. Egeberg, and P. C. Smalley. 1989. Diagenetic reactions in Leg 104 sediments inferred from isotope and major element chemistry of interstitial waters. In O. Eldholm, J. Thiede, and E. Taylor, eds., *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results 104*: 273–279. DOI: 10.2973/odp.proc.sr.104.122.1989
- 安藤佑介. 2018. 瑞浪北中学校敷地造成工事現場で観察された中新統瑞浪層群の露頭. 瑞浪市化石博物館研究報告 44, 特別号: 1–11.
- 安藤佑介・星 博幸. 2020. 市道戸狩・月吉線工事現場 (瑞浪市明世町) に露出した瑞浪層群の地層. 瑞浪市化石博物館研究報告 47: 111–123. DOI: 10.50897/bmf.47.0\_111
- Baird, G. C., S. D. Sroka, C. W. Shabica, and G. J. Kuecher. 1986. Taphonomy of middle Pennsylvanian Mazon Creek area fossil localities, northeast Illinois: significance of exceptional fossil preservation in syngenetic concretions. *Palaios* 1(3): 271–285. DOI: 10.2307/3514690
- Bickert, T. 2006. Influences of geochemical processes on stable isotope distribution in marine sediments. In H. D. Schulz, and M. Zabel, eds., *Marine Geochemistry*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. p. 169–206.
- Drever, J. I. 1997. *The geochemistry of natural waters surface and groundwater environments*. Prentice Hall. Upper Saddle River, NJ. 436 pp.

- 古川邦之・西本昌司・金丸龍夫・和田穰隆・新正裕尚. 2020. 瑞浪層群中村層における脈状岩石の形成過程. 地質学雑誌 126(12): 697–712.  
DOI: 10.5575/geosoc.2020.0039
- 長谷川善和・竹谷陽二郎. 1994. 福島県梁川町より産したパレオパラドキシア化石. 福島県立博物館調査報告 30: 1–69.
- 井尻正二・亀井節夫. 1961. 樺太産の *Desmostylis mirabilis* Nagao と岐阜県産の *Paleoparadoxia tabatai* (Tokunaga) の頭蓋骨の研究. 地球科学 53: 1–27.
- 入月俊明・林 広樹・辻本 彰. 2024. パレオパラドキシア瑞浪釜戸標本産地の瑞浪層群宿洞層から産出した貝形虫化石と有孔虫化石. 瑞浪市化石博物館研究報告 50(3): 81–89.  
DOI: 10.50897/bmfm.50.3\_81
- Irwin, H., C. Curtis, and M. Coleman. 1977. Isotopic evidence for source of diagenetic carbonates formed during burial of organic-rich sediments. *Nature* 269: 209–213.  
DOI: 10.1038/269209a0
- Jauvion, C., D. Audo, S. Bernard, J. Vannier, A. C. Daley, and S. Charbonnier. 2020. A new polychelidan lobster preserved with its eggs in a 165 Ma nodule. *Scientific Reports* 10: 3574.  
DOI: 10.1038/s41598-020-60282-1
- 北川博道. 2024. パレオパラドキシア瑞浪釜戸標本の産状と骨格. 瑞浪市化石博物館研究報告 50(3): 29–42.  
DOI: 10.50897/bmfm.50.3\_29
- 北川博道・坂本 治・長谷川善和. 2013. 埼玉県産出のパレオパラドキシア化石について. 埼玉県立自然の博物館研究報告 7: 15–22.
- 隈 隆成・西本昌司・村宮悠介・吉田英一. 2023. 男鹿半島鶴ノ崎海岸の中新統西黒沢層・女川層中に見られる巨大鯨骨ドロマイトコンクリーション群の形成条件. 地質学雑誌 129(1): 145–151.  
DOI: 10.5575/geosoc.2022.0050
- Maeda, H., and Y. Shigeta. 2005. Maastrichtian ammonoid fauna from the Pugachevo Area, southern Sakhalin, Russian Far East. *National Science Museum Monographs* 31: 121–136.
- Martill, D. M. 1988. Preservation of fish in the Cretaceous Santana Formation of Brazil. *Palaeontology* 31(1): 1–18.
- Muramiya, Y., H. Yoshida, N. Katsuta, R. Kuma, and T. Mikami. 2024. Ammonite concretion formation through organic decomposition in the iron reduction zone. *Journal of Sedimentary Research* 94: 51–61.  
DOI: 10.2110/jsr.2023.078
- Muramiya, Y., H. Yoshida, M. Minami, T. Mikami, T. Kobayashi, K. Sekiuchi, and N. Katsuta. 2022. Glendonite concretion formation due to dead organism decomposition. *Sedimentary Geology* 429: 106075.  
DOI: 10.1016/j.sedgeo.2021.106075
- 中口 譲・山口善敬・山田浩章・張 勁・鈴木麻衣・小山裕樹・林 清志. 2005. 富山湾海底湧水の化学成分の特徴と起源—栄養塩と溶存有機物—. 地球化学 39(3): 119–130.  
DOI: 10.14934/chikyukagaku.39.119
- Nelson, C. S., and A. M. Smith. 1996. Stable oxygen and carbon isotope compositional fields for skeletal and diagenetic components in New Zealand Cenozoic nontropical carbonate sediments and limestones: a synthesis and review. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics* 39: 93–107.  
DOI: 10.1080/00288306.1996.9514697
- Plet, C., K. Grice, A. Pagès, M. Verrall, M. J. L. Coolen, W. Ruebsam, W. D. A. Rickard, and L. Schwark. 2017. Palaeobiology of red and white blood cell-like structures, collagen and cholesterol in an ichthyosaur bone. *Scientific Reports* 7: 13776.  
DOI: 10.1038/s41598-017-13873-4
- 多井義郎. 1958. いわゆる戸狩階について—瀬戸内中新統の微化石層位学—. 地質学雑誌 64(757): 516–525.  
DOI: 10.5575/geosoc.64.516
- Shikama, T. 1966. Postcranial skeletons of Japanese *Desmostylia*. *Palaeontological Society of Japan, Special Papers* 12: 1–176.
- 高栗祐司. 2024. パレオパラドキシア瑞浪釜戸標本と共産した板鰓類化石. 瑞浪市化石博物館研究報告 50(3): 75–80.  
DOI: 10.50897/bmfm.50.3\_75
- Watkins, J. M., J. D. Hunt, F. J. Ryerson, and D. J. Depaolo. 2014. The influence of temperature, pH, and growth rate on the  $\delta^{18}\text{O}$  composition of inorganically precipitated calcite. *Earth and Planetary Science Letters* 404: 332–343.  
DOI: 10.1016/j.epsl.2014.07.036
- Yoshida, H., A. Ujihara, M. Minami, Y. Asahara, N. Katsuta, K. Yamamoto, S. Sirono, I. Maruyama, S. Nishimoto, and R. Metcalfe. 2015. Early post-

mortem formation of carbonate concretions  
around tusk-shells over week-month timescales.  
Scientific Reports 5: 14123.  
DOI: 10.1038/srep14123

Zachos, J., M. Pagani, L. Sloan, E. Thomas, and K.  
Billups. 2001. Trends, rhythms, and aberrations in  
global climate 65 Ma to present. *Science* 292: 686–693.  
DOI: 10.1126/science.1059412