

男鹿半島鵜ノ崎における中新統産炭酸塩コンクリーションに含まれる 鯨骨化石およびコンクリーションの炭素源と形成過程

渡部 晟*・長澤 一雄**・渡部 均***

Carbon sources and growth process of a carbonate concretion with whale bones
from the Miocene in Unosaki, Oga Peninsula, Japan

Akira Watanabe*, Kazuo Nagasawa** and Hitoshi Watanabe***

キーワード：球状炭酸塩コンクリーション，炭素含有量，貝化石，生痕化石，埋在性ベントス
Key words : spherical carbonate concretion, carbon content, molluscan fossil, trace fossil,
infaunal benthos

Abstract

We studied carbon sources of a large carbonate concretion with fossil whale bones and its growth process. Large concretions, Miocene, are exposed on the Unosaki Coast in Oga Peninsula and they are mainly classified as cocoon-shaped or spherical-shaped. The material is a broken cocoon-shaped concretion obtained from there. The material was cut into six plates. These plates showed that three thoracic vertebrae were contained continuously in the central axis of the cocoon-shaped. We obtained the carbon content of the entire concretion by chemical analysis. Furthermore, we estimated the carbon content of the only whale bones based on the maximum amount of organic matter contained in living whale bones. The results revealed that the source of organic carbon from whale bones was only 12% in the total carbon of the concretion. And it suggested that the main source of carbon came from infaunal benthos contained in the concretion matrix. Actually, a lot of trace fossils formed by benthos are observed on the cutting plates of concretion. It was assumed that the benthos was fed on organic matter from both whale bones and even their remains.

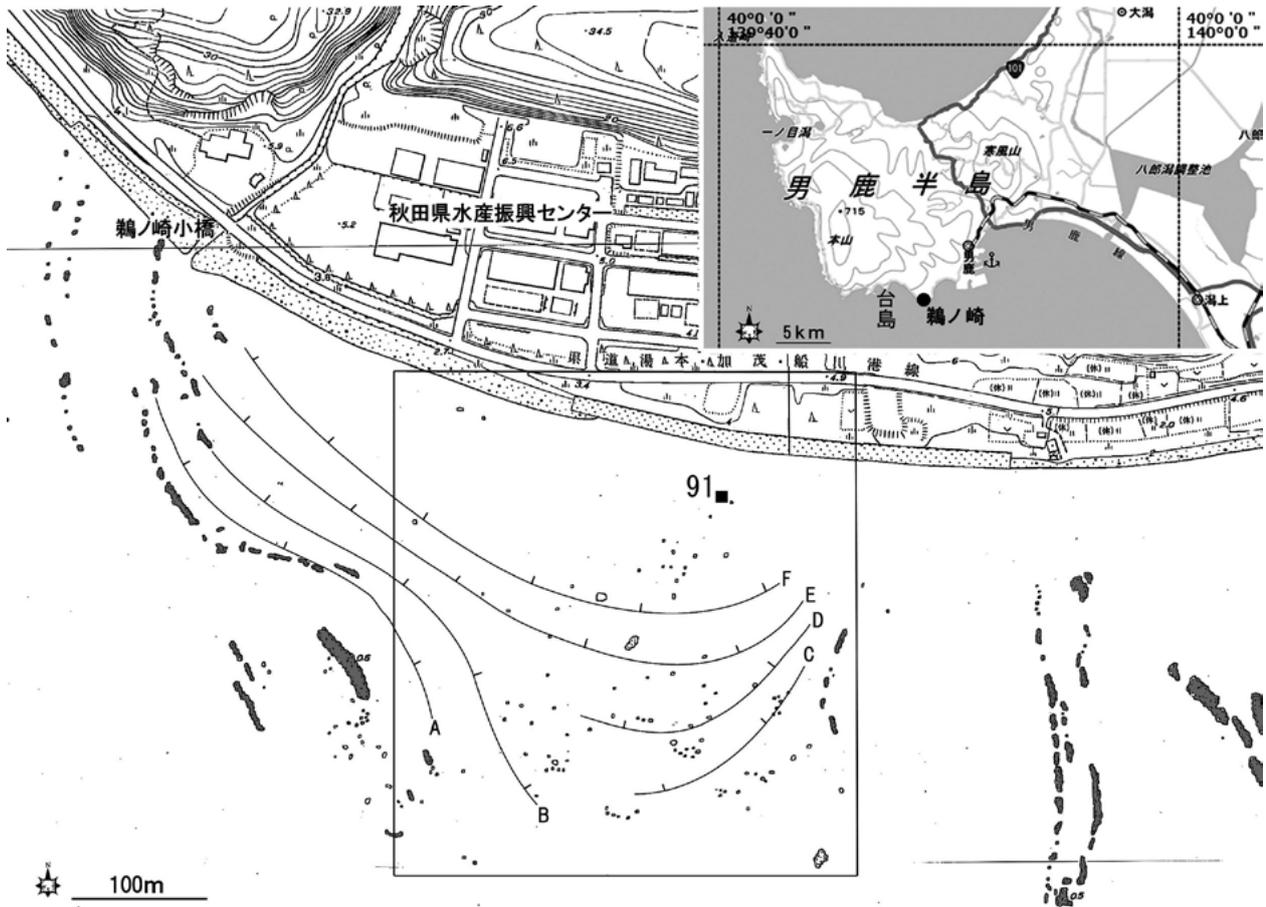
Generally, carbonate is formed by a chemical reaction between bicarbonate ions and metal ions as calcium ion and magnesium ions. We inferred the growth process of the concretion as follows. Initially, the carbonate was formed by reaction between bicarbonate ions from the organic matter derived from whale bones and metal ions from seawater. Later, when bicarbonate ions from whale bones were depleted, bicarbonate ions from benthos replaced that and continued the reaction. Many benthos remains caused the concretion to grow larger and larger. Finally, there were no more benthos around the concretion to supply organic matter, and the concretion growth ended.

I はじめに

球状炭酸塩コンクリーションの内部には貝類などの保存良好な体化石が含まれていることがあり，コンクリーションの形成に必要な炭素はそれら生物の有機物から供給され，地質学的時間に比べてきわめて短時間で形成されたと考えられている（例えば Yoshida et al, 2015；村宮ほか，

2017；Yoshida et al, 2018）。すなわち海底面下に埋没した生物遺骸の有機物の分解により生成した重炭酸イオン HCO_3^- が拡散し，堆積物粒子間の間隙水に含まれるカルシウムイオン Ca^{2+} やマグネシウムイオン Mg^{2+} などと結合して，生物遺骸を中心として炭酸塩が堆積物粒子間に晶出することでコンクリーションが形成されるというもの

*湯上市天王字長沼110-3, **山形県立博物館, ***秋田県立博物館



第1図 No.91 コンクリーションの産地

91■がNo.91 コンクリーションが存在していた地点。A～Fの曲線は走向線で、ケバの方向が地層の傾斜方向。アミ掛けした部分は炭酸塩岩層。矩形内に島状に描かれているのは比較的大きな球状コンクリーション。右上図は地理院地図を、下図は男鹿市2500分の1都市計画図を使用した。渡部ほか（2017）に加筆した。

である。この考えでは、コンクリーションの炭素量はコンクリーションに含まれる貝などの生物遺骸の持っていた炭素量を超えないことになる。

一方で、貝化石を含む炭酸塩コンクリーションにおいて貝が含んでいた炭素量を推定し、コンクリーションの全炭素量と比較すると、最大の場合でも前者は後者の10数%程度に過ぎないとの報告もある（渡部ほか，2023）。渡部ほか（2023）は、コンクリーション内に生痕化石が多量に含まれていることから、炭素のうち、貝から供給されたもの以外は、死亡した貝の肉を摂食しようとして集まってきた硬質部を持たない埋在性ベントスが供給したと推定している。また、最近では、コンクリーションに炭素を供給したのは中心部に含まれる遺骸だけではないと考えられるようになっていく（吉田，2023）。

秋田県男鹿半島南岸の鶴ノ崎には、中期中新世

の泥岩を主とする地層が広大な波食台をなして露出している。この泥岩層中に大型の球状炭酸塩コンクリーションが多数含まれている。これらのコンクリーションには鯨骨化石を含むものがある（渡部ほか，2017；長澤ほか，2018；長澤ほか，2023）。隈ほか（2023）は、これらの鯨骨化石コンクリーションについては、鯨の遺骸やその周囲に集まった生物が持つ有機物に由来する重炭酸イオンが間隙水中のマグネシウムイオンやカルシウムイオンと結びついて形成されたと考えている。しかし、鯨遺骸から供給された炭素とコンクリーションの炭素の量的関係については言及していない。

男鹿市では男鹿半島・大潟ジオパークの展示に供するため、2023年2月20日、鶴ノ崎海岸の海岸線近くにある球状コンクリーションを2個引き揚げた。そのうちの1個は楕円柱状をなし、軸

部両端に鯨類の椎骨が露出していた。このコンクリーションはその後6枚の板状に切断され、内部の化石を観察できるようになった。本稿ではこの鯨類化石を記載し、このコンクリーションにおいて鯨遺骸から供給されたと考えられる炭素量とコンクリーションの全炭素量とを比較する。さらにコンクリーションの形成過程について考察する。

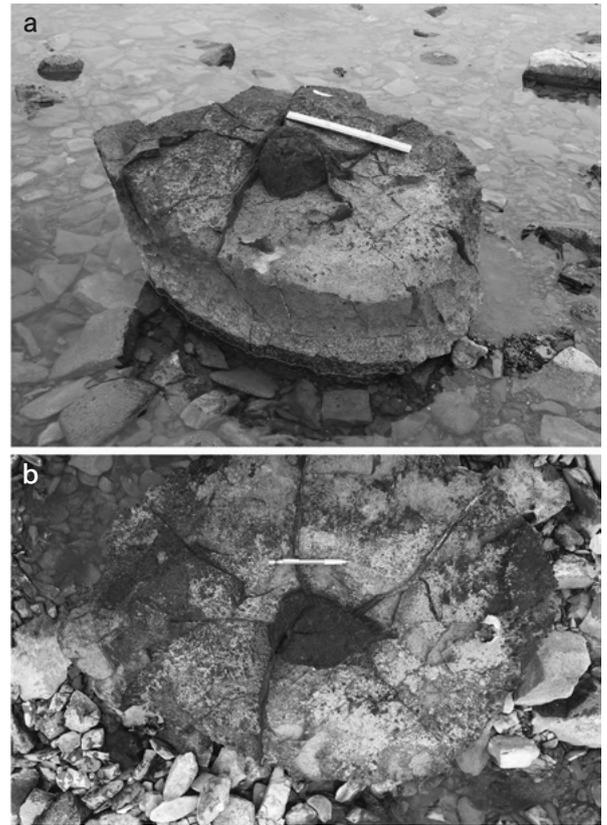
II 鵜ノ崎海岸の地質と炭酸塩コンクリーション

鵜ノ崎海岸（第1図）に露出する地層は主として中期中新世の西黒沢層と女川層である。西黒沢層下部は鵜ノ崎西方の台島付近に露出し、主に中～粗粒砂岩層からなる。中～上部では珪質で細層理の発達する泥岩を主体とする。またところどころに炭酸塩の濃集した泥岩や砂岩層をはさむ。女川層は西黒沢層から岩相が漸移的に変化し、主として細層理の発達する珪質の泥岩からなる。

これらの地層は褶曲しており、秋田県水産振興センター付近にほぼ南北方向の向斜軸がある。向斜軸は北方に緩くプランジしているため、波食台上で走向線が北に開いた弧状を呈し、干潮時にはそれを目視することができる。

なお、鵜ノ崎の海岸線付近の陸上における西黒沢層と女川層の境界は、鹿野ほか（2011）の地質図幅によれば、秋田県水産振興センター付近の向斜軸より西方で約500m付近、東方で約250m付近にあり、それを波食台上に延長した場合、第1図の走向線Eのあたりと考えられている（渡部ほか、2017）。

女川層と西黒沢層との境界については、鹿野ほか（2011）によれば、男鹿半島北岸の西黒沢付近では、両層の間に珪藻化石帯 NPD5A の欠如があるが、目立った侵食構造はなく、岩相も漸移的である。内陸や南岸では珪藻殻がほとんど保存されていないため化石帯の欠如は確認できないが、両層の間に構造的不調和は認められないという。また、地質年代は西黒沢層では約17～12.3Maの範囲にあり、女川層では13.1～6.7Maにわたる。鵜ノ崎海岸の波食台に露出する地層のうち、球状コンクリーションを含む部分（第1図の矩形内部）は西黒沢層と女川層の境界をはさんでいることから、その年代はおよそ12～13Maと考えら



第2図 野外におけるNo.91コンクリーション

aのスケールは30cm、bは真上から見たものでペンの全長は14.7cm。中央部に見える色の濃い部分が鯨骨化石。

れる。

向斜軸の西側約150m、東側約100mの間の西黒沢層と女川層には径数十cm～数mの球状炭酸塩コンクリーションが含まれており、現在は100個以上が波食台上で観察できる。地層に含まれた状態のもの（現地性）と地層から離れて移動した状態のもの（異地性）とがあり、後者は一般に破損している。原形をとどめないコンクリーションの破片は、巨～大・小の角礫として波食台上に無数に散在している。

これらのコンクリーションはドロマイト質とされ（隈ほか、2023）、形態的に球形を呈する球タイプと繭形を呈する繭タイプにおおむね分けられる（渡部ほか、2017）。球タイプコンクリーションでは鯨類化石が確認できるものは少ないが、繭タイプではほぼ例外なく鯨類の椎骨や下顎骨など大きな化石を含んでいる（渡部ほか、2017；長澤ほか、2018；長澤ほか、2023）。なお現地性の繭タイプコンクリーションは、その長軸が母岩の堆積面とほぼ平行な状態をなして母岩に含まれている。

III No.91 コンクリーションと含まれる化石

(1) No.91 コンクリーション

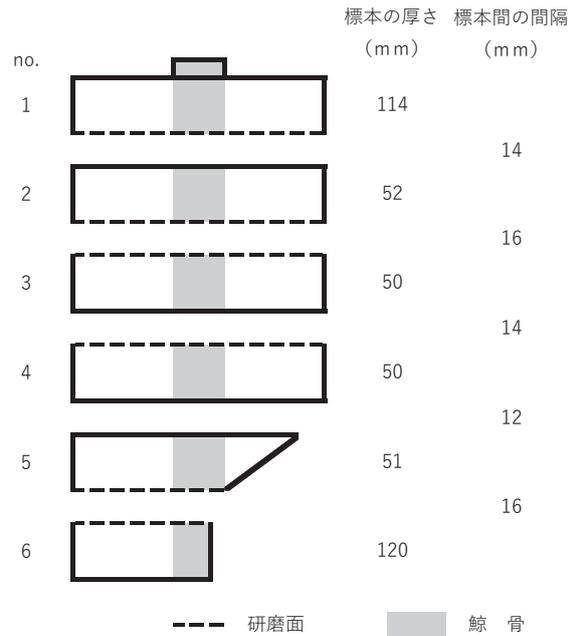
今回調査したコンクリーションは、筆者らが No.91 と命名したもので、汀線から約 50m 沖合の波食台上に存在していた（第 1 図、第 2 図）。このあたりの波食台は礫に覆われており、No.91 コンクリーションはその上にあったので明らかに異地性である。ただし、存在位置等からみて、元の包含層は女川層であった可能性が高い。

No.91 コンクリーションは長径約 85cm、短径約 65cm、長さ約 50cm の楕円柱状をなし、両底面の中心部付近に鯨骨化石が露出している。表面は侵食されて小さな凹凸に富み、現生の穿孔性動物による窪みも見られる。表面部分が剥落したところがあり、また部分的に割れて脱落している。両底面には鯨骨化石から放射状に複数方向に亀裂が発達し、その内部を石英が埋めている。なお No.91 コンクリーションは、現地では楕円柱の長軸が波食面に対してほぼ垂直であった（第 2 図）。

繭タイプコンクリーションは、長軸に垂直なクラックが発達することが多く、クラックを境に横断的に割れ、楕円柱状の破片になっているものもある。No.91 コンクリーションは、形態からみて本来は繭タイプコンクリーションであり、クラックを境にして割れた楕円柱状の断片の一つと考えられる。

No.91 コンクリーションは陸揚げ後、長軸に垂直に 6 枚の板状標本として切断され、それぞれの一面が研磨された。各断面では鯨骨の断面が観察できた。鶴ノ崎産の鯨骨を含むコンクリーションから鯨骨が割出されたことはなく、内部の鯨骨化石が観察されたのはこれが初めてである。また鶴ノ崎海岸の繭タイプコンクリーションの大部分に長軸の両端に椎骨等が露出していることから、内部に連続する骨の存在が予想されていたが、本標本によってそのことが証明された。

No.91 コンクリーションを切断して得られた板状標本を、コンクリーションの現地での姿勢の上方から、no.1～6 とする。各標本の厚さは 5～12cm であり、各標本間が切断・研磨によって厚さ 12～16mm が失われた（第 3 図）。これら 6 枚の板状標本には、すべての中央付近に化石骨が



第 3 図 切断・研磨された板状標本の模式図

切断および研磨によって失われた厚さはそれぞれ 12mm, 2mm.

現れている（第 4 図）。

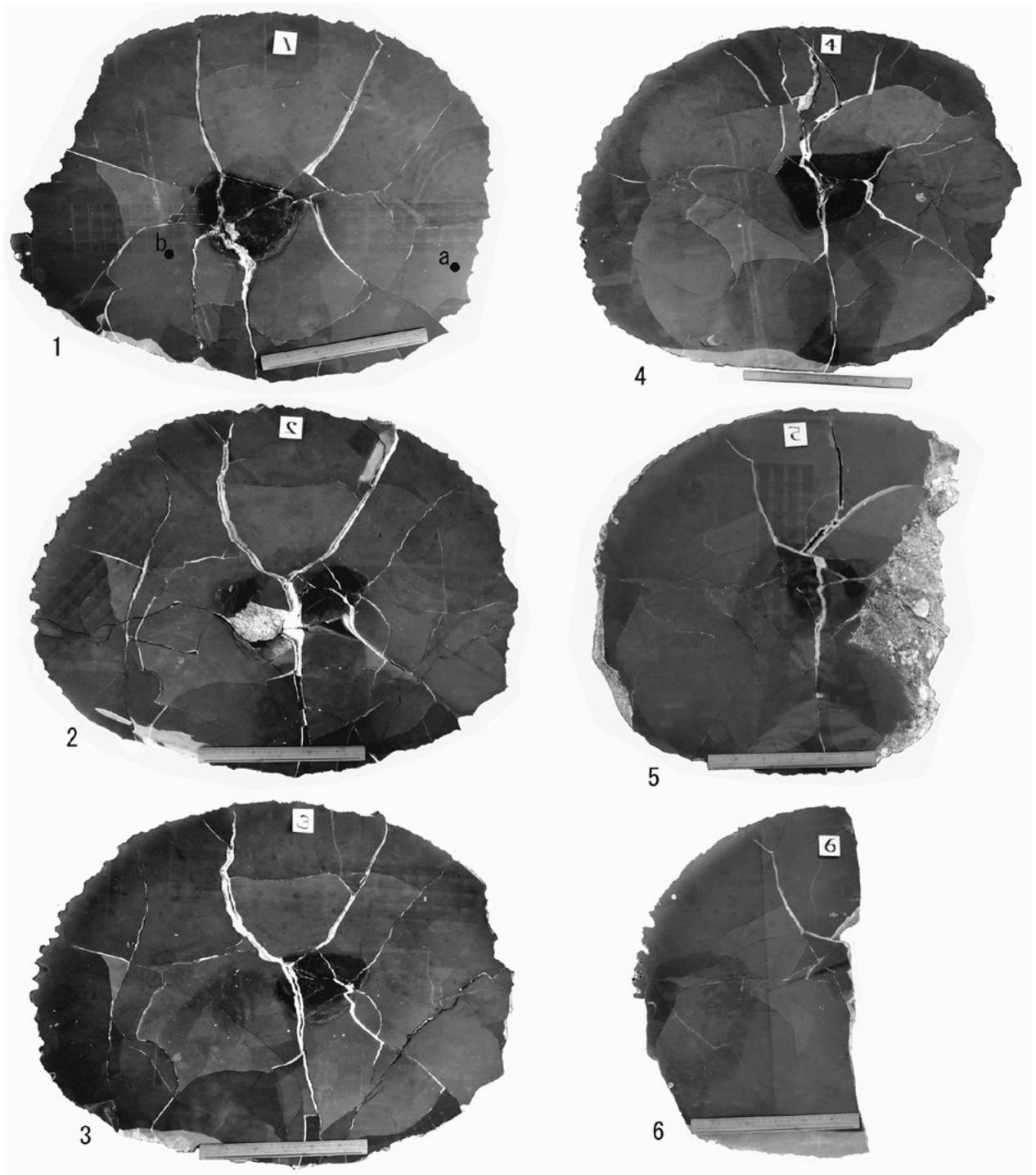
(2) 鯨類化石

野外においては、No.91 に含まれていて観察できた化石骨は上面から上方に突出していた 1 点である（第 2 図）。この化石は四角形状をなし、全体が黒色を帯びて海綿質が見える。化石骨の外形は、欠損や摩耗のために不完全であるが、大型の骨で海綿質が明瞭なことから鯨類骨と考えられる。化石の部位としては、椎骨またはヒゲ鯨類の下顎骨などが想定される。しかし、下顎骨を貫通する下顎管が開口していないことから、本化石は横突起や棘突起を欠損した椎骨と判断される。椎体最大幅 16.5cm、同最大高 12.0cm。

板状標本に現れた椎骨は棘突起や横突起を欠損した椎体のみで、また表層が摩耗しているため形態が不完全である。さらに亀裂を充填した石英脈によって不規則に分断されている。

これらの椎体の外形は、いずれも半円状を示していることから、曲面側を腹側とする胸椎であると判断される。胸椎はコンクリーション中に複数連続するが、各胸椎の大きさ・位置・向きなどはほぼ一致している。

以下、各板状標本の研磨面において観察された



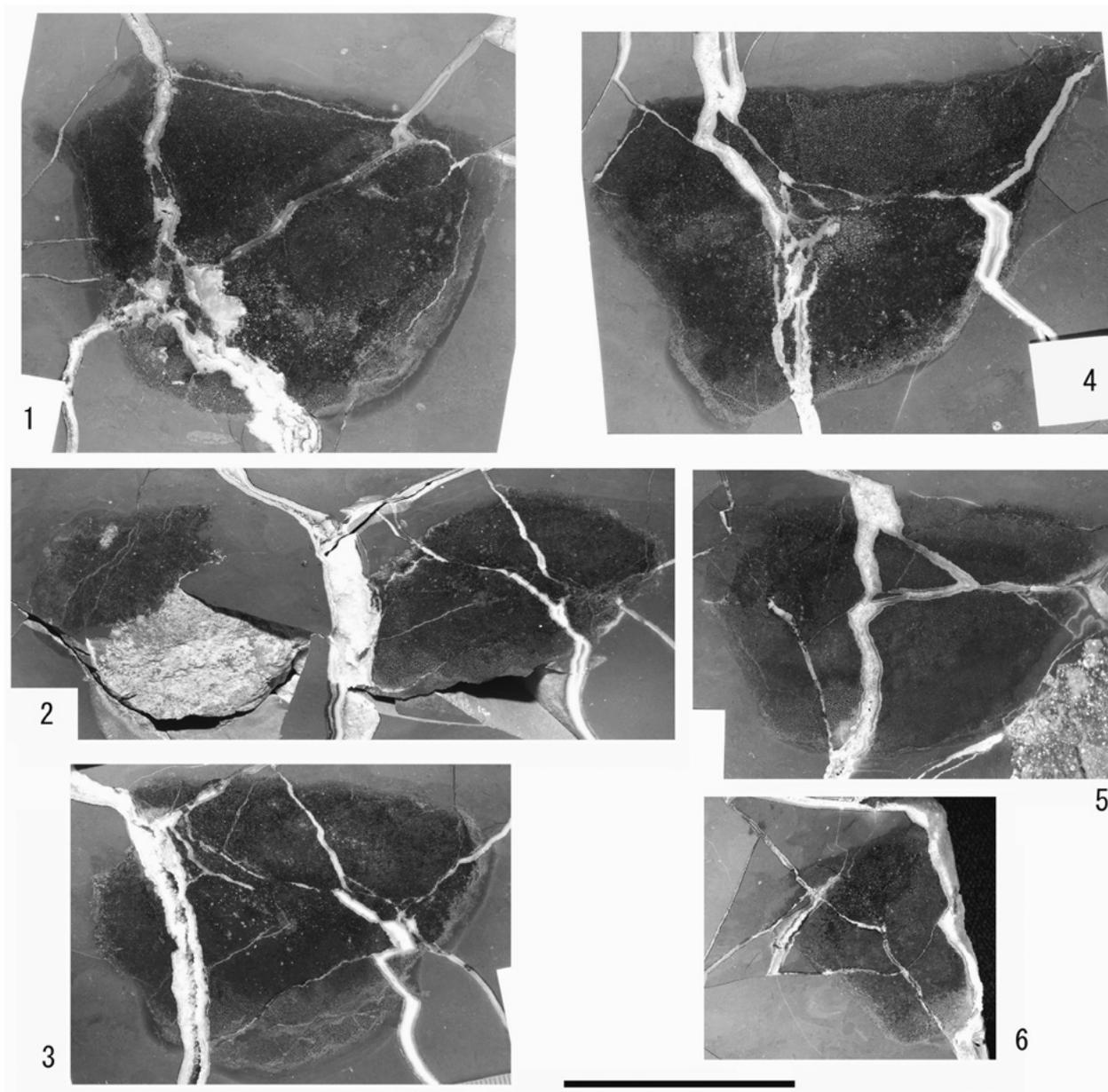
第4図 板状標本の研磨面

no.1, 2 および 5 は野外での姿勢で下面が, no.3, 4 及び 6 は上面が研磨されている。そこで no.1, 2 および 5 は他に合わせるため、上方から見たように写真を調整してある。no.1 の a, b は第 6 図 a, b の撮影位置。スケールは 30cm。なお、これらの標本は鏡面に仕上げられているため、撮影機材や天井などの構造物が写りこんでいる。

椎骨について概略を記載する(第5図)。計測値は背腹方向の最大値を椎体最大高、これと直交する方向の最大値を椎体最大幅とした。計測値の一部(no.3)は、記録写真のスケールより推定している。なお、板状標本は切断面が骨軸とやや斜交

している可能性もあることから、計測値はあくまで参考値として提示しておく。また以下の記載においての左右とは、上方から見た場合(第5図)の方向である。

no.1 の椎骨標本(上面から約 12cm)：背側が



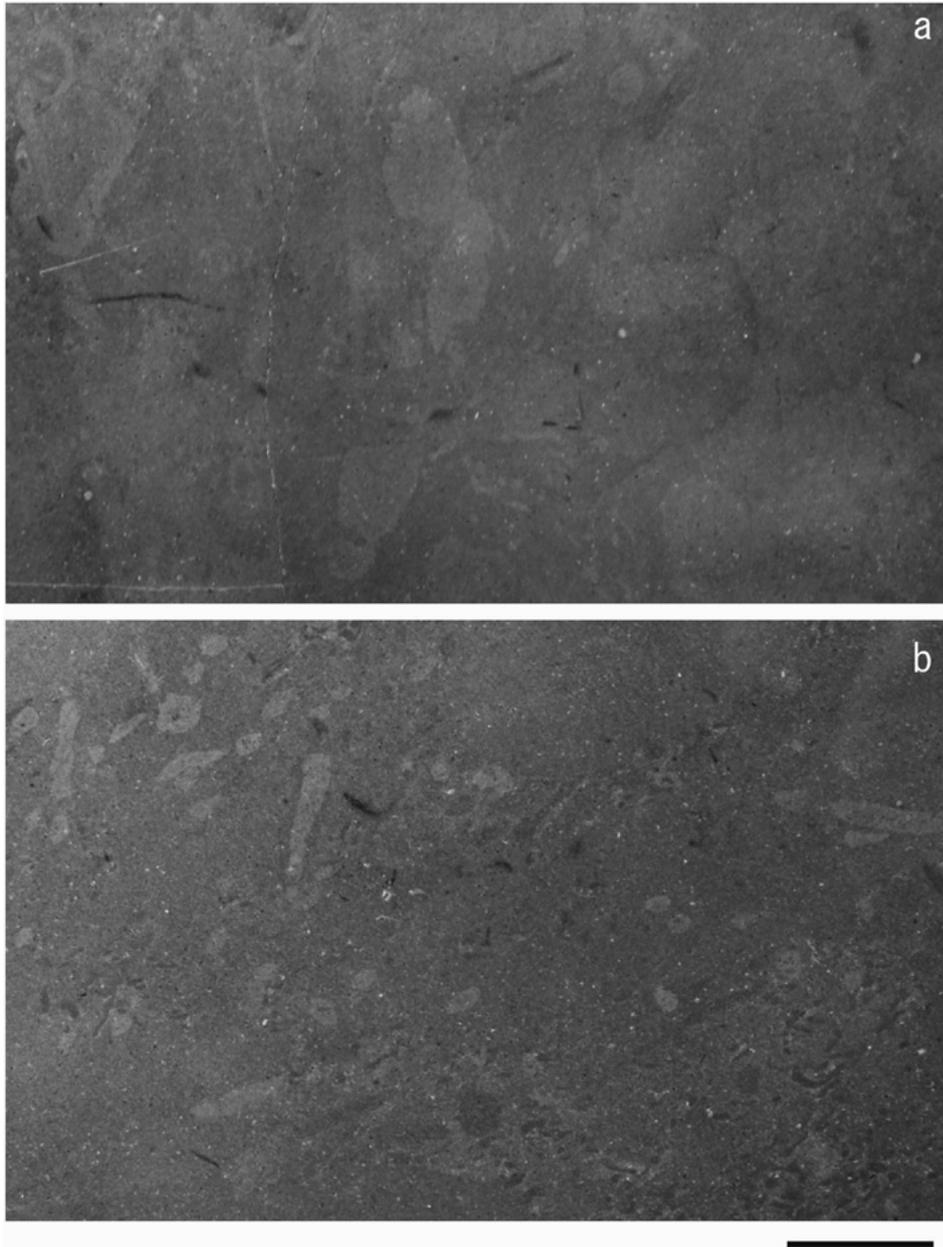
第5図 各板状標本に現れた鯨骨

第4図と同様に no.1, 2 および 5 は上方から見たように写真を調整してある。スケールは10cm.

直線状で腹側が曲面をなす半円形状をなす。左背側に横突起の基部と見られる痕跡があるが、右側では不明瞭である。化石の位置や大きさと形態の連続性から、野外でコンクリーションの表層で突出していた胸椎と同一骨と考えられる。椎体最大幅 18.2cm, 同最大高 14.3cm.

no.2 の椎骨標本 (上面から約 18.9cm) : 他の胸椎に比較して形態や大きさが異なる。中央の石英脈によって分断されて2つの不規則な形の骨に分かれている。これらは形態的に、隣接する no.1 および no.3 の胸椎とは連続しないようであ

る。いずれも不完全なしゃもじ状の形態をなし、左側の骨の片側は鋭角的な欠損形態を示し、右側の骨の縁辺部も同様の不規則な欠損が見える。no.2 の部位については、塊状をなす胸椎の椎体が鋭角的に欠損することは考えにくく、またそれらの形態および隣接する胸椎よりも小さいことなどから、椎骨から分離した横突起の断片と考えられる。これらは、椎間部分の空隙に何らかの原因によって挟まれたものと思われる。左側横突起最大長 12.1mm, 同最大長 9.3cm, 右側横突起最大長 13.5cm, 同最大幅 8.0cm.



第 6 図 no.1 の研磨面に見られる生痕化石

a, b の位置は第 4 図に示してある。スケールは 1cm.

no.3 の椎骨標本（上面から約 20.5cm）：半円形の胸椎の断面の特徴が表れているが、椎体の表層は摩耗や欠損によってやや凹凸をなす。前述のように no.2 の標本とは形態が連続しない。椎体最大幅 16.5cm, 同最大高 12.6cm.

no.4 の椎骨標本（上面から約 26.9cm）：全体として台形状をなしており、直線側が胸椎の背側と判断される。腹側は欠損や摩耗を受けて曲面形態が失われている。右側背側に横突起の一部が残存する。隣接する no.3 の標本と比較すると本標本はやや大きい。形態の類似性と椎体長を

考慮すると、両者は同一胸椎と判断される。椎体最大幅 19.6cm, 同最大高 13.9cm, 横突起残存長 3.3cm.

no.5 の椎骨標本（上面から約 38.1cm）：半円形の胸椎の形態を示すが、外層部分は摩耗している。外形は no.3 の標本に似る。椎体最大幅 17.0cm, 同最大高 13.5cm.

no.6 の椎骨標本（上面から約 39.7cm）：石英脈を境にして、椎体の右 3 分 2 ほどが欠落している。不完全な標本ながら左側の残存部分の外形は、隣接する no.5 の標本とほぼ一致することから、両

者は同一胸椎であると判断される。椎体残存最大幅 7.4cm, 同残存最大高 9.8cm.

内部の椎骨数：以上のとおり、コンクリーション内部には連続する3個の胸椎 (no.1, no.3～4, no.5～6) の存在が推定される。また椎間部に横突起断片が含まれていると考えられる。

(3) 生痕化石

No.91 コンクリーションのいずれの研磨面においても豊富な生痕化石が見られる。第6図に no.1 の研磨面の生痕化石を示した。このように同じ研磨面でも、場所によって生痕の形態は異なっている。

第6図 a では、長径 10mm 弱の楕円形～円形をなす生痕がいくつか見られる。そのほか不鮮明ではあるが、全体に不定形の生痕が分布している。中央部には長さ数 mm 程度の細長いあるいはほぼ円形の生痕が集まっている。なお不定形の生痕は、no.1 においてもほかの断面においても広く見られる。

第6図 b では、長さ 10mm 弱太さ 2mm 程度の棒状の、あるいは円形から楕円形をなす生痕が多数分布する。このような生痕は断面に均等に分布せず、部分部分にまとまって頻繁に見られる。

これらのほかに、no.4 の鯨骨の左方に、上方から下方に直線的に幅約 20mm で長い筒状をなす生痕が延びている (第4図)。この生痕は途中で他の生痕を切り、あるいは他の生痕に切られている。同様な生痕は no.1 の鯨骨の左方にも見られる。

このように研磨面においてはさまざまな形態の生痕が多数観察できる。これは No.91 の形成中に、その周囲に多くの埋存性ベントスが生息していたことを示している。

(4) その他の化石

隈ほか (2023) は、鶴ノ崎のコンクリーションに珪藻や海綿骨針等の生物遺骸を幾らか含むことを確認しているが、No.91 コンクリーションからは今のところそれらの微化石は検出できていない。

第1表 研磨面におけるコンクリーションと鯨骨の面積

no.	断面積 (cm ²)	
	コンクリーション	鯨骨
1	4662	250
2	4291	153
3	4450	161
4	3908	201
計	17311	612
平均	4328	204

no.2の鯨骨断面積は計、平均から除いてある。

IV No.91 コンクリーションの炭素量と鯨遺骸由来の炭素量

No.91 コンクリーションに含まれる全炭素量を測定し、内部の鯨遺骸のみが供給しうる炭素量と比較する。

(1) No.91 コンクリーションの炭素量

炭素量の計算に当たっては、板状標本 no.5 と 6 が大きく欠損しているためそれらを除き、no.1 から 4 までを対象とする。それに伴い、鯨骨も同じ板状標本に含まれる範囲を対象とする。

コンクリーションの炭素量を求めるために必要な量は、コンクリーションの体積、密度、炭素含有率である。

体積は、No.91 コンクリーションを楕円柱と考え、その底面積と長さの積として求めた。底面積は no.1 から 4 までのそれぞれの研磨面の断面積を求め、それらの平均値とした。断面積は、それぞれの研磨面の写真に 2,000 個余りの正方形からなるグリッドを重ね、グリッドの個数を数えて求めた。その結果は第1表の通りである。なお断面における鯨骨の面積も同時に求め、それも第1表に示した。

密度は、No.91 コンクリーションの小片について次のような手法で測定した。水を入れたビーカーを電子天秤に乗せ、水とビーカーの合計重量 M1 を計測する。次に、細い糸をかけたコンクリーション小片 (以下、小片と記す) を、容器に触れないように水中につるし、そのときの重量 M2 を計測する。M2 は小片が水から受ける浮力の反作用の分だけ M1 より大きな値になる。アルキメデスの原理では、水中にある物体 A は、物体 A の

第2表 各コンクリーションの炭素量及び炭素含有率

測定項目等	コンクリーション試料	
	1	2
A 試料の質量 (g)	10.7	11.1
B 試料投入前の総質量 (g)	181.4	184.5
C 反応終了後の総質量 (g)	188.2	191.5
質量減少量 ΔM (発生したCO ₂ 質量)(g)	3.9	4.1
炭素質量 (g)	1.06	1.12
炭素含有率 (%)	9.9	10.1

$$\Delta M = A + B - C$$

体積と同じ水の体積分の重量と等しい浮力を受ける。これにより、 $M_2 - M_1$ は小片が受ける浮力、すなわち小片と同じ体積分の水の重量であり、水の密度を 1.0g/cm^3 とすると、 $M_2 - M_1$ から小片の体積が求められる。その値と小片の質量から密度を計算した。2個の小片について密度を測定し、それぞれ 2.68g/cm^3 及び 2.67g/cm^3 であり、その平均をとって 2.68g/cm^3 が得られた。

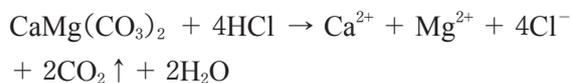
炭素含有率は渡部ほか (2023) で採用した方法、すなわちともに質量計測済みのコンクリーションを希塩酸に完全に溶かし、発生した二酸化炭素の質量を計測することによって求めた。

炭酸塩コンクリーションを構成する炭酸塩鉱物は、主に方解石やドロマイトであり、これらは塩酸と反応して二酸化炭素を発生するため、下の化学式により、発生した二酸化炭素量から鉱物中の炭素量を求めることができる。

方解石 CaCO_3 の反応は



ドロマイト $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ の反応は



そこで、No.91 コンクリーションの鯨骨化石の含まれていない部分を砕いた試料を希塩酸に入れて溶かし、反応前後の容器 (三角フラスコ) と溶液の質量を測定した。発生した CO_2 は容器外に放出されるので、反応後の質量減少量 ΔM は反応で生じた CO_2 の質量に等しいはずである。なお、実験時間内における溶液の蒸発量や三角フラスコ内に残る CO_2 量は今回の測定精度を考慮すると誤差範囲と考えられる。

こうして求めた CO_2 の質量から、分子量をもとに次式により炭素の質量を計算できる。

$$\text{炭素の質量} = \Delta M \times 12 / 44$$

また、炭素の質量と試料の質量から炭素含有率が求められる。2個の試料について測定を行い、それぞれ 9.9%、10.1% であり、その平均値は 10.0% であった (第2表)。

以上の値から、No.91 コンクリーションの no.1 から 4 までの炭素質量は

$$4,328(\text{cm}^2) \times 32(\text{cm}) \times 2.68(\text{g/cm}^3) \times 0.100 = 37,117(\text{g})$$

約 37.0kg となる。No.91 コンクリーションは表面が侵食されており、また剥落したり、欠けたりした部分があることから、本来はこれより多くの炭素が含まれていたことが明らかである。

(2) 鯨骨の炭素量

鯨類遺骸から供給された炭素量は推算によるが、その方法は次の通りである。

まず no.1 から 4 までの鯨骨の体積を求める。体積は、それぞれの研磨面に露出している鯨骨断面の面積の平均値と長さの積とする。ただし、no.2 においては研磨面に現れているのが他と違って椎体ではないので、これを平均値の計算に入れると誤差が大きくなる可能性があるため除いた。その結果断面面積の平均値は第1表に示したように 204cm^2 である。長さをコンクリーションと同じ 32cm と見て、骨の体積は

$$204(\text{cm}^2) \times 32(\text{cm}) = 6,528(\text{cm}^3)$$

約 $6,530\text{cm}^3$ である。

鯨骨の炭素量は、鯨骨の海綿状組織の空隙に含まれる有機物 (主に鯨油) の炭素量として求め

る。この際、空隙の体積は不明なので、鯨骨の体積を鯨油の体積と見なす。また鯨油は多種の脂肪酸からなり、その組成はクジラの種によって異なり(岩田ほか, 2017), また同種でも部位によって異なる(佐伯・林, 1953) ことが報告されている。しかしほとんどの場合、最多の脂肪酸はオレイン酸であり、少なくとも全脂肪酸の20w/w%を占め、多い場合は40w/w%を占める(岩田ほか, 2017) ので、オレイン酸によって代表させることにする。

オレイン酸の密度は 0.895g/cm^3 , 炭素含有率は76.6%である。したがって鯨骨の炭素質量は

$$6,530(\text{cm}^3) \times 0.895(\text{g/cm}^3) \times 0.766 \\ = 4,475.4(\text{g})$$

約4.5kgである。

(1)において、No.91 コンクリーションの炭素質量は約37kgと算出され(2)では鯨骨の炭素質量は4.5kgと推算されたので、No.91 コンクリーションに対して鯨骨の有機物は12%程度の炭素を供給できたに過ぎない。

(3) 軟部組織の炭素量

No.91 コンクリーションにおいては、鯨類の椎骨が連続して含まれていることから、椎骨が海底下に埋没した時点で軟部組織によって連結されていた可能性が高い。したがってNo.91 コンクリーション形成に当たって軟部組織からも炭素が供給された可能性がある。

この場合、炭素を供給する軟部組織の体積を推定できないことが問題となる。そこで、海底下の堆積物に非常に大きい軟部組織が埋没したと仮定する。

軟部組織の体積が、それによって将来形成されるコンクリーションの体積を超過していた場合、超過部分から発生する重炭酸イオンは、濃度勾配によって外方に向かうため、そのコンクリーションの形成には関与できないことになる。そのためコンクリーション形成にかかわる軟部組織の量は、計算上、形成されたコンクリーションと同体積を最大値と考えなければならない。これによって軟部組織の炭素量を計算してみる。

軟部組織の密度は約 1g/cm^3 と考えられる。鯨類の軟部組織の炭素含有率に関する資料はない

が、同じ哺乳類であるヒトに関しては0.185というデータがある(池北・榎並, 2017) ので、これを用いることにする。なお哺乳類における炭素含有率は48.40%(高橋, 1992) とされるが、これは乾重量に対する値と考えられるので、一般に約60%とされる生体の水分含有量を加えて湿重量に換算すると19.4%程度となり、池北・榎並(2017)の値とほぼ同じである。

No.91 コンクリーションの体積は

$$4,328(\text{cm}^2) \times 32(\text{cm}) = 138,496(\text{cm}^3)$$

鯨骨の体積は $6,528\text{cm}^3$ なので、軟部組織の体積は最大値で

$$138,496(\text{cm}^3) - 6,528(\text{cm}^3) = 131,968(\text{cm}^3)$$

約 $132,000\text{cm}^3$ である。

軟部組織に含まれる炭素質量は

$$132,000(\text{cm}^3) \times 1(\text{g/cm}^3) \times 0.185 = 24,420(\text{g})$$

約24.4kgである。

骨と軟部組織からの炭素を合わせると28.9kgとなり、これはNo.91 コンクリーションの全炭素に対して約78.1%である。つまり軟部組織がどれほど大きくても、コンクリーションの形成に関与できる鯨遺骸の炭素はコンクリーションの全炭素より少ないのである。

なお、No.91 コンクリーションの場合、鯨骨の保存が悪い。このことは底質に埋没した時点で骨に付着していた軟部組織が少なかったことを示唆するものと考えられる。それが妥当であれば、軟部組織から供給された炭素量は少量であったと考えてよいであろう。

V 鯨骨コンクリーションの形成過程

IVで述べたように、No.91 コンクリーションの炭素量は、鯨骨に含まれる有機物から供給された炭素量より多い。鯨骨を軟部組織が取り囲んでいたと仮定した場合、この軟部組織から供給される炭素量を加えてもコンクリーションの炭素量を下回る。またIIIで述べたようにNo.91 内部には生痕化石が多量に含まれる。これらは、渡部ほか(2023)による貝化石コンクリーションの場合と共通する事実である。

渡部ほか(2023)は貝化石コンクリーションにおいて、コンクリーションの内部に存在する貝を

中心部遺骸と呼んだ。中心部遺骸はコンクリーション形成のきっかけとなった遺骸である。また生痕を残したベントスの遺骸や、ベントスから分泌された粘液や糞を周辺部遺骸と呼んだ。そしてコンクリーションに含まれている炭素は中心部遺骸だけでなく周辺部遺骸からも供給されたと考えることで、コンクリーションの炭素が中心部遺骸である貝の炭素より多いという問題を解決した。

No.91 コンクリーションにおいても鯨骨やそれらを繋いでいた軟部組織を中心部遺骸とし、生痕を残したベントスの遺骸等を周辺部遺骸とすれば、炭素の供給源は貝化石コンクリーションと全く同様に、中心部遺骸と周辺部遺骸の両方であると考え得る。

このことをもとにして、No.91 コンクリーションの形成過程を考察する。

No.91 コンクリーションの形成に先立って、椎骨は有機物が腐敗分解してしまう前に海底堆積物中に埋没する必要がある。No.91 コンクリーションは繭タイプコンクリーションの破片と考えられるので、本来は残存していた分の数倍の長さであったはずであり、含まれていた椎骨も3個の数倍であったと思われる。つまり3個の数倍の数の連続した椎骨が埋没したと推定される。埋没の機構については不明な点が多いが、隈ほか(2023)は、ストームによる鯨遺骸の深部への運搬と砂の供給を上げている。

埋没した椎骨に含まれる有機物が分解すると、様々な物質が生成され周囲に拡散する。その中には腐肉食性や肉食性の埋在性ベントス（以下単にベントスと言う）を誘引する物質も含まれている。ベントスの一種である線虫類にとっては、誘引物質の存在はエサの存在を意味し、化学物質の濃度勾配を感知し化学走向性を発現する（松浦, 2006）。堆積物中に生息する他の種類のベントスにとっても、誘引物質だけが餌の存在とその方向を示唆するものであろう。こうしてベントスが鯨骨の周辺に集まって来る。

これらベントスが鯨骨の有機物を食い尽くしてしまえばコンクリーションは形成されないので、早い段階で、分解生成物の一つである重炭酸イオンと間隙水中のカルシウムイオンやマグネシウム

イオンが結びつき、コンクリーションの薄い膜が形成されて中心部遺骸が覆われてしまうと考えられる。これがNo.91 コンクリーションの形成の始まりである。薄い膜に阻まれてベントスは鯨骨の有機物を摂食できなくなるが、誘引物質は発生して拡散を続けるので、そこを離れることもできないまま新たなベントスが集まる。こうして中心部遺骸周辺ではベントスの密度が高くなる。一方で鯨骨からの重炭酸イオンの発生と拡散も続くので、No.91 コンクリーションは成長する。集まったベントスの中にはその場で死亡するものが出てきて、その遺骸や分泌された粘液、糞などが成長するNo.91 コンクリーションに取り込まれて周辺部遺骸となる。

やがて鯨骨の有機物はすべて分解し尽くすが、周辺部遺骸から誘引物質や重炭酸イオンが拡散されるのでNo.91 コンクリーションは成長を続ける。

誘引物質は形成されつつあるNo.91 コンクリーションから拡散する。当然No.91 コンクリーションから距離が遠くなるとその濃度は低下し、やがてベントスが感知できないほどの低濃度になるであろう。ベントスが感知できる濃度範囲の堆積物中では、ベントスはその濃度の高い方、つまりNo.91 コンクリーションの方向へ移動する。その結果感知できる濃度の範囲内に生息していたベントスはNo.91 コンクリーションの周囲に集まり、その範囲内ではベントスがほとんどいなくなる。これはNo.91 コンクリーションへの周辺部遺骸の供給が途絶えるということである。その結果、No.91 コンクリーションは重炭酸イオンを生成・拡散できなくなり、成長を停止する。一旦成長が停止したコンクリーションは新たな周辺部遺骸を取り込めないで、再び成長することはない。

VI まとめ

本稿では男鹿半島鵜ノ崎海岸の波食台で採集された鯨骨を含む1個の炭酸塩コンクリーションの破片について、鯨骨の記載を行い、さらにコンクリーションの炭素量と鯨骨から供給されたと考えられる炭素量の比較をしたうえで、コンクリーションの形成過程を考察した。

今回明らかになったことを列記する。

- 1) 鯨骨の部位と連続性：鯨骨は No.91 コンクリーションのほぼ中軸部を貫通するように存在し、連続する胸椎椎体 3 点 (no.1 標本, no.3 ~ 4 標本, no. 5 ~ 6 標本) および、横突起 2 点 (no.2 標本) と考えられる。椎体のねじれもあまりない。これらのことは鯨類遺骸の堆積時に椎骨が靭帯や筋肉によって繋がれていた可能性を示唆する。
- 2) 鯨骨の保存状態：各胸椎の保存状態は、棘突起や横突起を欠くほか、椎体自体も摩耗や欠損を受けている。各胸椎の大きさと形態が明瞭でないため、脊柱の方向性（頭側または尾側）は決められない。
- 3) 炭素量の比較：鯨骨の有機物からコンクリーションに供給されたと考えられる炭素量は、コンクリーションに含まれる全炭素量の 12% 程度である。コンクリーションには埋在性ベントスの生痕が豊富に含まれていることから、これらベントスもコンクリーションに炭素を供給したと推定される。
- 4) コンクリーションの形成過程：コンクリーションは、海底下に埋没した鯨骨（中心部遺骸）が持っていた有機物（油分）が分解することにより発生した重炭酸イオンと、間隙水中のカルシウムイオンやマグネシウムイオンが結合して形成される。鯨骨の有機物が枯渇しても、成長するコンクリーションに取り込まれた埋在性ベントスの遺骸や粘液・糞など（周辺部遺骸）から重炭酸イオンが発生し、コンクリーションは成長を続ける。コンクリーション周辺では、埋在性ベントスの多くがコンクリーションの周りに集まり死亡するためベントスが不在になり、コンクリーションへの遺骸などの供給が滞り、その成長は停止する。

VII おわりに

以上に述べたように、No.91 コンクリーションにおいては渡部ほか（2023）が貝化石コンクリーションにおいて提唱した考え、すなわち「コンクリーションの炭素は中心部遺骸と周辺部遺骸の双方から供給される」が成立し、本コンクリーション

は貝化石コンクリーションと同じような過程で形成されたと推定できる。また他の繭タイプコンクリーションにおいても鯨骨化石が No.91 コンクリーションと同様な状態で含まれていることからみて、この形成過程は広くそれらにも適用できると考えられる。

こうした成果とは別に、いくつかの問題点も残っている。その内の主要なものを上げておく。

- 1) No.91 コンクリーションに含まれる鯨骨化石には欠損・摩耗などが見られ、保存状態はよくない。欠損や摩耗は、一般的には主として遺骸の運搬過程において生じると考えられる。しかし椎骨が連続している点で海底を運搬されたとは考えにくく、運搬されたとすれば軟部組織に包まれていたと仮定しなくてはならない。こうしたことからどの時点でどのようにして欠損・摩耗が生じたのかが明らかでない。
- 2) 鶴ノ崎のコンクリーションのうち、球タイプの多くにおいては鯨骨化石が確認できず、今のところ他の生物の体化石も認められない。このようなコンクリーションにおいてもコンクリーション形成のきっかけとなった遺骸（中心部遺骸）はあるはずである。それが何なのか、また周辺部遺骸があるとすればどのようなものなのかを究明する必要がある。
- 3) 日本海沿岸地域に分布し、中部～上部中新統を構成する珪質堆積岩は、有機物に富んでおり、男鹿半島に分布する珪質の泥岩も例外ではない。この有機物は主に珪藻由来と考えられている（例えば福沢，1992；早稲田ほか，1995）。こうしたことから No.91 コンクリーションにおいても、珪藻遺骸（の有機物）が周辺部遺骸の一つになっている可能性は否定できないが、その点の解明は今後の課題である。

謝辞

竹内弘和氏、渡部公成氏（当時）をはじめとする男鹿半島・大潟ジオパーク推進協議会事務局の各位は、No.91 コンクリーションの陸揚げ・切断・研磨の任に当たられ、標本に関する資料を提供してくださった。男鹿市ジオパーク学習センターの

菊地光和氏，秋田大学の西川 治准教授からは標本の観察に当たって便宜を図っていただいた。秋田県立博物館の鈴木照洋博士には鉱物同定や微化石検出の際にご協力いただいた。以上の方々より心よりお礼申し上げます。

文 献

福沢仁之，1992，新第三紀生物源珪質頁岩の堆積作用と古海洋環境の関係について。地質学論集，no.37，219-226.

池北雅彦・榎並 勲，2017，生物を知るための生化学。丸善出版，9,223p.

岩田在博・小川友樹・吉田幸治・藤永篤史，2017，鯨油の脂肪酸組成と臭気分析。山口県産業技術センター研究報告，no.29，p.12-14.

鹿野和彦・大口健志・柳沢幸夫・栗田泰夫・小林紀彦・佐藤雄大・林信太郎・北里 洋・小笠原憲四郎・駒沢正夫，2011，戸賀及び船川地域の地質。地域地質研究報告（5万分の1図幅），産総研地質調査総合センター，127p.

隈 隆盛・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，vol.129，p.145-151.

松浦哲也，2006，線虫の化学感覚と行動。比較生理生化学，vol.23，p.10-19.

村宮 悠介・吉田 英一・山本 鋼志・南 雅代，2017，初期続成過程における巨大球状炭酸塩コンクリーション形成。地質学雑誌，vol.123，p.939-952.

長澤一雄・渡部 晟・澤木博之・渡部 均，2018，秋田県男鹿半島鶴ノ崎海岸の中新統コンクリーションより多数の鯨類化石を発見。日本古生物学会 2018 年年会講演予稿集，p.21.

長澤一雄・渡部 晟・澤木博之・渡部 均，川辺孝之，2023，秋田県男鹿半島鶴ノ崎海岸における中新世巨大コンクリーション中の鯨類化石とコンクリーションの成因。日本地質学会第 130 年学術大会講

演要旨。

佐伯誠道・森高次郎，1953，鯨油の研究（IV），マッコウ鯨油の脂肪酸成分（第 2 報），骨油及び大腸油について。日本農芸化学会誌，vol.27，p.190-193.

高橋英一，1992，元素から見た生物の世界。日本農薬学会誌，vol.17，p.s291-s296.

早稲田周・辻 隆司・梶原義照・西田英毅，1995，女川層の有機物相と堆積環境。石油技術協会誌，vol.60，49-58.

渡部 晟・澤木博之・渡部 均，2017，秋田県男鹿半島鶴ノ崎の中・上部中新統（西黒沢層・女川層）に含まれる炭酸塩コンクリーション中の脊椎動物化石の産状。秋田県立博物館研究報告，no.42，p.27-38.

渡部 晟，渡部 均，吉田英一，2023，秋田県大仙市の天徳寺層（後期中新世後期－鮮新世）産球状炭酸塩コンクリーションの炭素の起源と形成過程。秋田県立博物館研究報告，no.48，p.11-26.

吉田英一，2023，球状コンクリーションの理解と応用。地質学雑誌，vol.128，p.1-16.

Yoshida, H., Ujihara, A., Minami, M., Asahara, Y., Katsuta, Y., Yamamoto, K., Sirono, S., Maruyama, I., Nishimoto, S. & Metcalfe, R., 2015, Early post-mortem formation of carbonate concretions around tusk-shells over week-month timescales. *Scientific Reports*, 5, 14123 (2015).

Yoshida, H., Yamamoto, K., Minami, M., Katsuta, N., Sirono, S. & Metcalfe, R., 2018 Generalized conditions of spherical carbonate concretion formation around decaying organic matter in early diagenesis. *Scientific Reports*, 8, 6308 (2018).

付記：現在，板状標本の no.1 は秋田県立博物館，no.2, 4, 6 は男鹿市ジオパーク学習センター，no.3 は名古屋大学博物館，no.5 は秋田大学大学院国際資源学研究所附属鉱業博物館にそれぞれ収蔵されている。