

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

渡部 晟*・渡部 均**・吉田 英一***

Carbon source and formation process of spherical carbonate concretions from the
Tentokuji Formation (Late late Miocene-Pliocene), Daisen City, Akita Prefecture, Japan

Akira Watanabe*, Hitoshi Watanabe** and Hidekazu Yoshida***

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

Carbon content of several concretions collected from the Neogene in Daisen City, Akita Prefecture have been measured in order to confirm the source balance used for spherical concretion formation. The carbon content estimated from the fossil mollusks buried inside those concretions is about 0.5-12% of carbon content from the concretion itself. The difference shows that most of the carbon in these concretions was not supplied by mollusks. Detailed observation of concretion inside suggests that the rest of carbon considered to be supplied by infaunal benthoses such as polychaetes, nematodes, etc., because many trace fossils are identified inside the concretions.

Post mortem of mollusks, infaunal benthoses gather around to feed on their molluscos part. The remains, feces, secreted mucus of benthoses are included in the growing concretion and contribute to the growth of the concretion by supplying additional carbon to the concretion. With time, most of the infaunal benthoses surrounding the concretion congregated near the concretion and die thereafter. Due to this, provided carbon source is reduced and terminated the concretion growth.

I はじめに

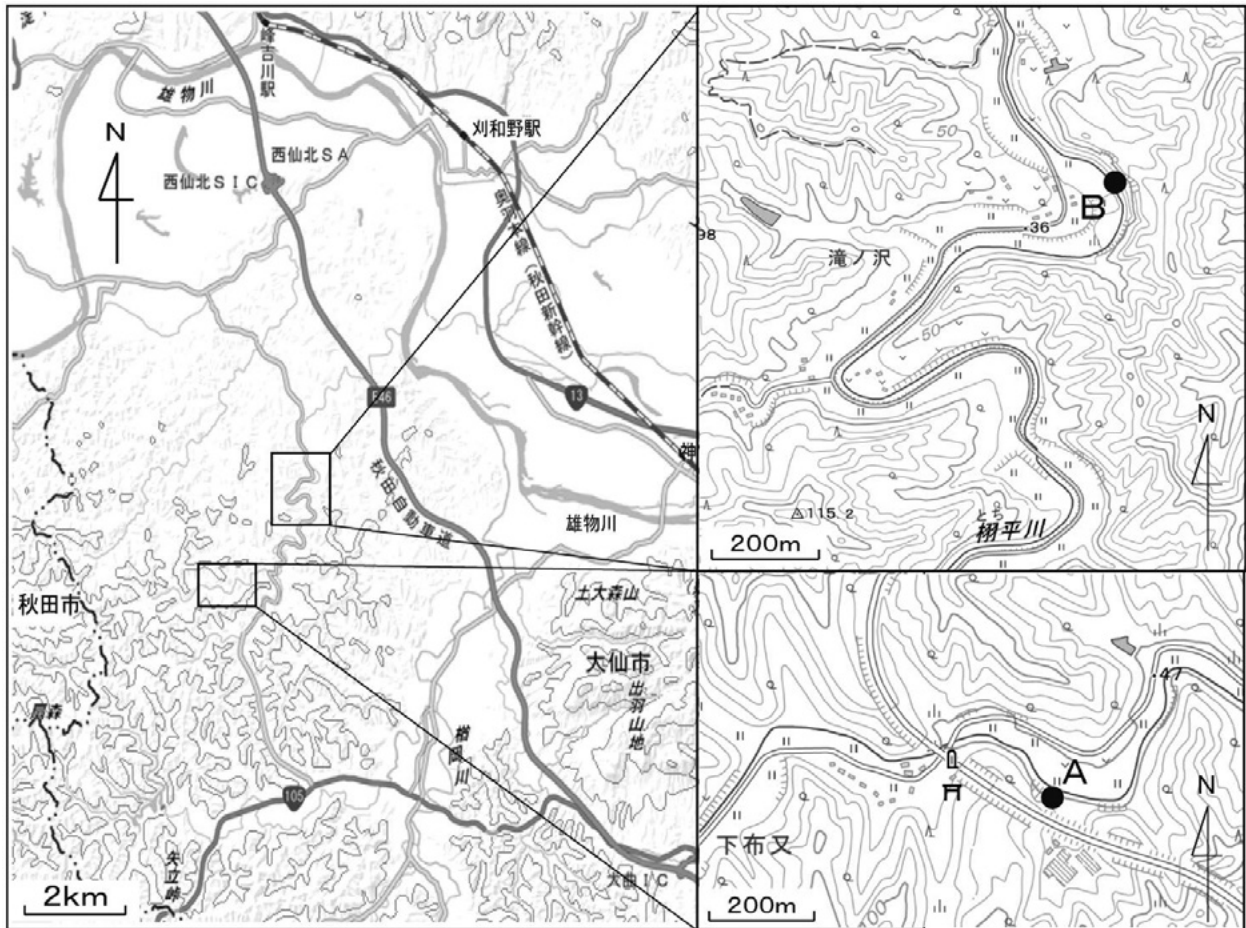
球状炭酸塩コンクリーションは世界的にさまざまな地質時代海成層に広く産出する。秋田県の出羽山地では特に女川層や船川層・天徳寺層に多く見られる（西川ほか，2020）。

近年球状炭酸塩コンクリーションの研究が急速に進み（Yoshida et al, 2015；村宮ほか，2017；Yoshida et al, 2018 など），その成因はどのように考えられている。海底面に埋もれた生物遺体の腐敗が進むと，有機物の分解に伴って発生する重炭酸イオンが遺体を中心として濃度勾配によって等方拡散し，堆積物粒子間の海水に含まれる陽イオン（カルシウムイオンなど）と結びついて炭酸塩鉱物が沈殿し，堆積物粒子を膠結しつつ

急速に等方向三次元的に成長して，きわめて短時間のうちに球状コンクリーションを形成するというものである。このような成因論は，主としてコンクリーションの安定炭素同位体比（ $\delta^{13}\text{C}$ ）がかなり低く，生物体と同程度の値を示す事実から裏づけられている。また，コンクリーションが保存良好な化石を含むことが多い事実もこうした成因から説明できる。

安定炭素同位体で示されるように，もしコンクリーション生成に寄与する有機炭素（本論では，以下，有機炭素を炭素として記述）が，コンクリーション内部に含まれる生物化石のみから供給されるのであれば，コンクリーション中の炭素量は生物遺体の炭素量に規制され，それを上回る

*湯上市天王字長沼110-3, **秋田県立博物館, ***名古屋大学博物館



第1図 調査したコンクリーションの産地

A : 下布又, 39°28' 22"N, 140°18' 47"E. B : 滝ノ沢, 39°29' 33"N, 140°20' 10"E. 地理院地図を使用した.

ことはないと考えられる. 実際にツノガイコンクリーションにおいては, ツノガイの大きさとコンクリーションの大きさとの間に正の相関があることが知られている (吉田, 2019).

しかしながら内部に化石を含むコンクリーションにおいては, コンクリーションのサイズと化石のサイズとの比は様々である. 化石がコンクリーションに比して小さい場合は, その化石が生物として持っていた有機物に含まれる炭素ではコンクリーション全体の炭素は賄いきれないのではないかと, と思われることもある. さらには, コンクリーションには内部に明瞭な硬質の殻化石などを含まないものもあり, それらの炭素の由来については検討すべき課題だと考えられている (吉田, 2022).

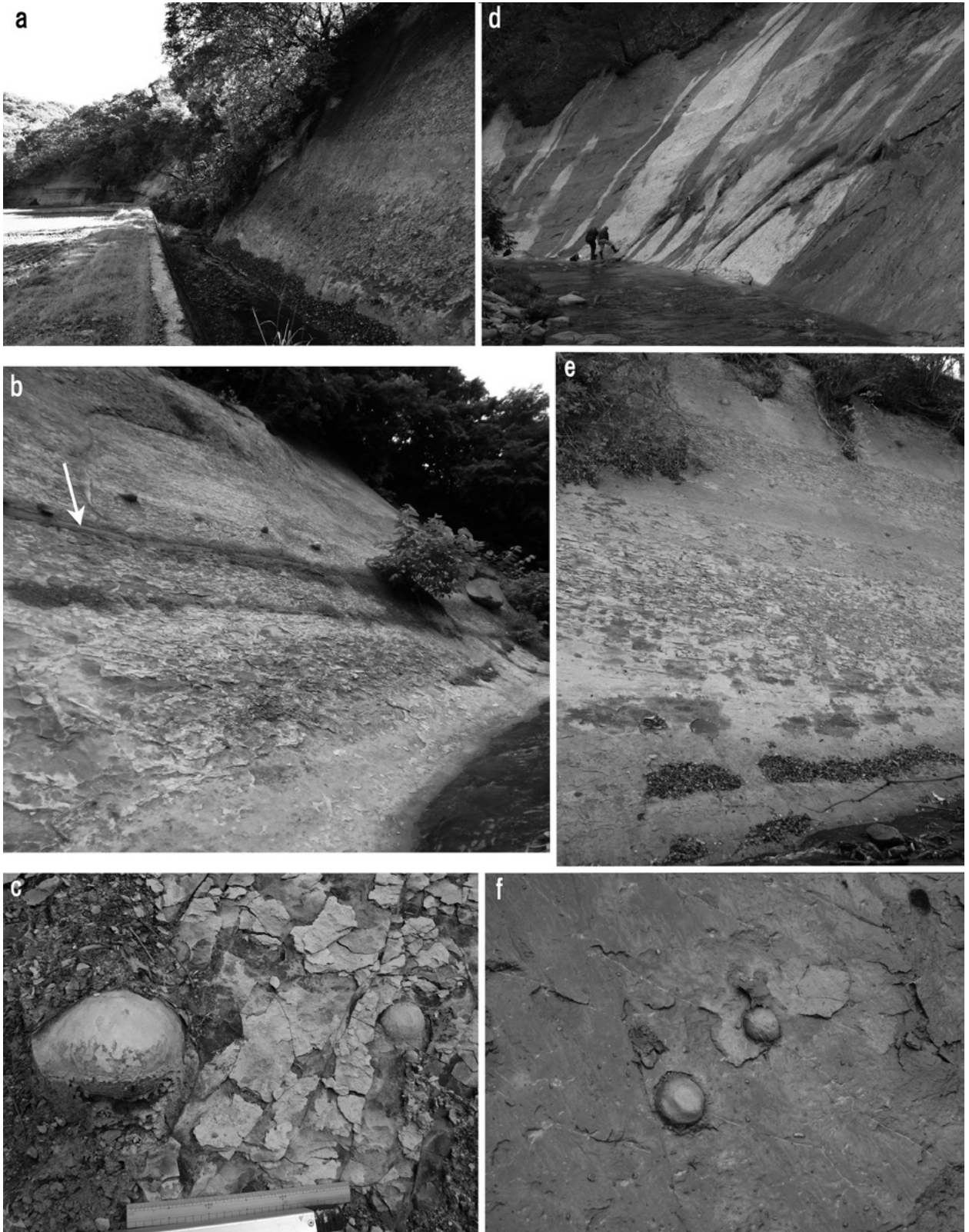
そこで筆者らは, 秋田県立博物館に収蔵・保管されている秋田県大仙市下布又および滝ノ沢の天徳寺層から産出した貝化石を含む4個のコンク

リーションについて, それぞれのコンクリーションの炭素量を測定した. また貝化石の軟体部に含まれていたと考えられる炭素量を見積もって両者を比較し, 炭素の起源とコンクリーションの形成過程を考察した.

以下, それらの分析・比較結果並びに産地の地質観察結果から推定される形成過程の考察について述べる.

II コンクリーション産地域の地質とコンクリーションの産状

出羽山地中部に位置する大仙市の下布又および滝ノ沢周辺では, 南西から北東に向かって蛇行して流れる羽平 (とちひら) 川によって侵食された崖が発達し, それらは良好な露頭となっている (第1図). この地域には出羽山地を構成する海成新第三系のうち主に天徳寺層が分布している. この地域の天徳寺層は下位の船川層に整合に重なり,



第2図 コンクリーション産地の露頭とコンクリーションの産状

a-c: 下布又, a: ところどころにコンクリーションが露出している, b: 鍵層 K-6 の上位の同一層準に並ぶコンクリーション, 矢印先端は K-6 の上限, c: 球状を呈するコンクリーション (スケールは 30cm), d-f: 滝ノ沢, d: 塊状シルト岩層の中に白色の凝灰岩層が挟まっている (露頭上部), e: 細かく剥離する部分と剥離しない部分が互層状に重なる (露頭の高さは約 30m), f: 球状を呈するコンクリーション (直径は 10cm 程度).

岩相は砂岩およびシルト岩を主体とする。白田ほか(1978)によると、本層中のコンクリーションは3つに大別され、球状を呈するもの、レンズ状～楕円状を呈するもの、層状を呈するものなどである。このうちレンズ状～層状を呈する大型のもの(厚さ0.6～1m,長さ6～30m)は本層下部のある一定層準に含まれており、鍵層K-7として追跡可能である。本層は主に浅海棲の軟体動物化石を産し、それらについて白田ほか(1978, 1979),高安ほか(1986)で報告されている。また、本地域の北に隣接する刈和野地域において、有孔虫化石及び珪藻化石について白田ほか(1979),珪藻化石について土谷・古川(1994)による報告がある。これらの化石から、本地域の天徳寺層は後期中新世後期から鮮新世にかけて堆積したものと考えられる(土谷・古川, 1994)。

今回調査した下布又(第1図のA)では、羽平川右岸の高さ30m程度の露頭が東西に連なり(第2図a),東側(下流側)の露頭では天徳寺層基底部の鍵層K-6(白田ほか, 1978)が観察され(第2図b),その走向はN-S,傾斜は6°Wである。この鍵層は下部の酸性粗～細粒凝灰岩(30～50cm)と上部の良成層を示す砂質凝灰岩(20cm)およびこれらに挟まれた厚さ約6mの軟質優黒色泥岩からなる(白田ほか, 1978)。この鍵層K-6の上位の層準について、球状コンクリーションとその周辺の地層を調査した。地層は主に塊状のシルト岩からなり、風化すると板状に剥離する。細かく剥離する部分とあまり剥離しない部分が厚さ数メートル間隔で重なり(第2図a),露頭上部ではそれと平行に厚さ10cm程度の凝灰岩が挟まっており、これらから層理を識別できる。コンクリーションはまわりの地層より硬いため露頭面より突出しており、直径10～30cm程度の球状のものが同一層順に並んでいることが多く(第2図b, c)長径1mを超えるレンズ～楕円状の大型コンクリーションを伴うことがある(第2図bの右端)。球状コンクリーションの表面には生痕化石が観察されるものが多い(第5図c)。

滝ノ沢の調査地点(第1図のB)は羽平川右岸の高さ30m近い露頭である(第2図d)。下布又の地層よりは上位、前述の鍵層K-7よりは下位

の層準の天徳寺層が露出しており、走向は北東～南西で、緩く(8°以下)西に傾斜している。下布又の露頭と同様、シルト岩の表面は細かく剥離する部分とあまり剥離しない部分が厚さ数メートル間隔で重なり(第2図e),後者には厚さ10～20cm程度の凝灰岩が数枚挟まっているのがよく観察される(第2図d)。露頭面のコンクリーションは、直径5～10cm程度の小型のものが多く含まれる部分(第2図f)や、直径30cm程度のものが同一層準に並んでいる部分などがある。球状あるいはハート型のコンクリーション表面で生痕化石が多数観察される(第5図a, b)。その周囲の地層は塊状で、風化した部分を取り除くと、暗青灰色の母岩表面に生痕が認められることが多い。層内にはラミナ等の堆積構造が見えない(第2図f)ことから生物擾乱を受けたと考えられる。

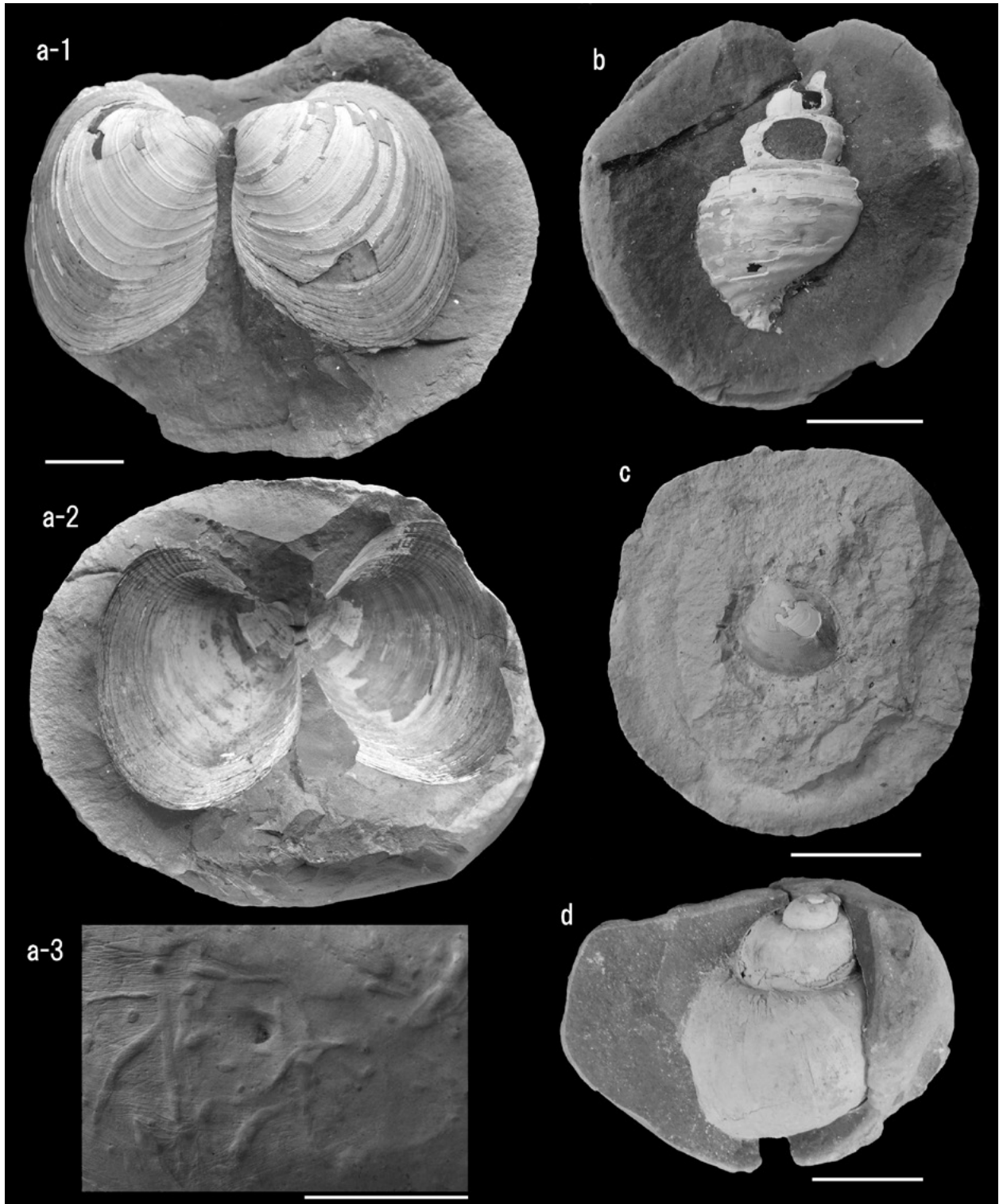
III コンクリーションと化石軟体部の炭素量の比較

1 コンクリーションの記載

調査した4個のコンクリーション(第3図)について、産地、形状、大きさ、質量、表面の状態、内部の化石などについて、観察所見を簡単に記述する。なおコンクリーションの名称は内部の化石の種類による。

ウバトリガイコンクリーション(第3図a-1, 2, 3):下布又産。やや楕円体状のコンクリーションで、内部にウバトリガイ *Serripes groenlandicus* に同定された二枚貝(殻長:11.0cm)が含まれている。殻は開殻の状態がよく保存されており、ウバトリガイの口縁部を含む面で二つに割られている。その面での長径は約21cm,短径は約18cm,その面に垂直方向の径は約15cm,質量は6.8kgである。中心部は暗灰色で、周縁の1～1.5cm程度はやや明るい色調を呈する。表面には生痕と思われる幅1～数mm,長さ最大で50mm程度の細長い高まりが多数分布する(第3図a-3)。

エゾバイコンクリーション(第3図b):滝ノ沢産。球状のコンクリーションで最大径が10.1cm,最小径が9.6cm,質量が1214.5g。断面は暗灰色を呈するが、周縁の厚さ約1cmの部分



第3図 調査したコンクリーション

a-1, 2, 3: ウバトリガイコンクリーション. b: エゾバイコンクリーション. c: キンギョガイコンクリーション. d: タマガイコンクリーション. スケールはいずれも3cm.

はやや明るい灰色である. ところどころに黒色の植物由来と思われる粒が点在し, 長さ6cm以上の明らかに植物と認められる化石も存在している. 内部にエゾバイ類 *Neptunea* に同定される巻

貝化石が含まれ, 殻が保存されている. 表面では幅数mm, 長さ5~20mm程度の細長い突出や, 径5mm程度の円から楕円形の構造が認められ, これらは生痕と考えられる.

第1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				
	ウバトリガイ	エゾバイ	キンギョガイ	タマガイ	貝化石なし
A 試料の質量 (g)	10.6	10.0	11.1	10.7	9.9
B 試料投入前の総質量 (g)	180.2	179.2	182	180.3	176.9
C 反応終了後の総質量 (g)	188.3	186.4	190.1	188	184.2
質量減少量 ΔM (発生したCO ₂)	2.5	2.8	3.0	3.0	2.6
炭素質量 [g]	0.68	0.76	0.82	0.82	0.71
炭素含有率%	6.4	7.6	7.4	7.7	7.2

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

第2表 各コンクリーションの残渣質量から求めた炭酸塩質量

測定項目等	コンクリーション				
	ウバトリガイ	エゾバイ	キンギョガイ	タマガイ	貝化石なし
a 試料の質量 (g)	10.6	10.0	11.1	10.7	9.9
b 残渣の質量 (g)	5.2	3.5	4.4	3.5	3.8
a-b 想定される炭酸塩質量(g)	5.4	6.5	6.7	7.2	6.1
ΔM より求めた炭酸塩の質量*(g)	5.2 ~ 5.7	5.9 ~ 6.4	6.3 ~ 6.8	6.3 ~ 6.8	5.4 ~ 5.9

*最小値はドロマイト換算量($\Delta M \times 184 / 88$)，最大値は方解石換算量($\Delta M \times 100 / 44$)

キンギョガイコンクリーション (第3図c)：滝ノ沢産。ほぼ球形のコンクリーションであったと思われるが、全体の半分程度しか現存していない。断面の長径が9.3cm，短径が8.5cm，断面に垂直な方向の半径が約4cm，質量が326.0g。断面はやや黄色味を帯びた明るい灰色を呈し，黒い粒状物が点在する。断面のほぼ中央にある二枚貝化石はキンギョガイ類 *Nemocardium* に同定され，殻が残存し，細肋が明瞭。断面に見えている殻は右殻であり，その口縁部外縁部外側に左殻の口縁部が観察できるので，閉殻の個体である。コンクリーション表面には細かい凹凸があり，幅1～2mm，長さ2～6mmほどの生痕と見られる細長い高まりが認められる。

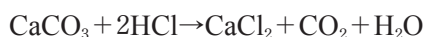
タマガイコンクリーション (第3図d)：下布又産。全体としては楕円体状をなす。最大径は8.8cm，最小径は5.5cm。質量は368.6g。かなり大型のタマガイ類 *Naticidae* 化石を含む。断面は暗灰色を呈し，ほぼ一様である。表面は比較的滑らかであり，やや不明瞭であるが幅数mm，長さ10～20mmほどの細長い高まりが数カ所にあり，これらは生痕と考えられる。

以上4個のコンクリーションは希塩酸で盛んに発泡し，残渣は粘土・シルトである。

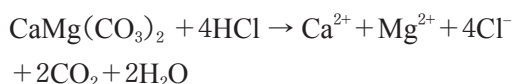
2 コンクリーションの炭素量測定

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るが，今回対象とした天徳寺層のコンクリーションは前者を主体にしている (安藤ほか，2015；西川ほか，2020)。これらの炭酸塩鉱物は塩酸と反応して二酸化炭素を発生する。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，炭酸塩コンクリーションを砕いた試料を希塩酸に入れて溶かし，以下の手順で発生したCO₂の質量を測定した。

試料は，貝化石の含まれていない部分を鉄乳鉢を用いて砕き，粗い粉末 (径1mm以下) にし，

およそ 10g 準備した。

2mol/l の希塩酸およそ 100ml を 200ml 三角フラスコに入れ、それに試料を投入する。一度にたくさん試料を塩酸に入れると泡がフラスコからあふれるので、1～2g ずつ数回に分けて投入した。1 回の反応時間は 10 分程度で、すべての試料の反応終了までは、最初の試料投入後およそ 70 分であった。

試料投入時の容器、塩酸、試料の合計質量及び、反応終了時の容器と溶液の合計質量を電子天秤（型番 Nakamura HL-200）によりそれぞれ測定し、その差を ΔM とする。発生した CO_2 が容器外に放出されたとすると、 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を求めた。

以上の測定を、貝化石を含む 4 個のコンクリーションと、比較のために下布又産の貝化石を含まないコンクリーション 1 個について行った。その結果は第 1 表のように、貝化石を含む 4 個のコンクリーションの炭素量は 6.4%～7.7% であった。また、貝化石を含まないコンクリーションの炭素量は 7.2% と、貝化石を含むものと同程度であった。

なお、質量減少量 ΔM が発生した二酸化炭素量を反映しているかチェックするために、反応終了後の液体を濾過し、水で洗浄したうえで濾紙に残った固形物（残渣）の乾燥後の質量を測定した。濾過後の残渣は、塩酸と反応しなかった試料中のシルトや粘土などと考えられる。そこで、試料の総質量から残渣の質量を引いた値（＝想定される炭酸塩量）を、 ΔM から計算した炭酸塩（方解石またはドロマイト）の質量と比較した。第 2 表のように、タマガイコンクリーションでやや差があるものの、想定される炭酸塩量と ΔM から計算した炭酸塩量はほぼ一致する。このことから、

ΔM は発生した二酸化炭素量を反映していると考えて問題ないと思われる。

3 化石軟体部の炭素質量推計

各コンクリーションに含まれている貝化石の軟体部の質量（湿重量：以下生物の硬組織以外の質量はすべて湿重量による）について、それぞれの化石で最適と考えられる方法で推計し、その値から化石の軟体部が含んでいたと思われる炭素質量を算出した。貝類軟体部の炭素含有率は湿重量に対して 2～3% 程度とされる（秋元ほか、2017）ので、ここでは 3% で計算する。

ウバトリガイコンクリーション：このコンクリーションに含まれるウバトリガイは、殻長が 110.0mm である。秋田県水産振興センターに保管されている秋田市沖合で採集されたウバトリガイの現生標本は殻長が 98.8mm であり、採集時の殻を含む質量は 219g と記録されている（秋田県水産振興センター、2014）。このウバトリガイは現在は殻のみが保存されているので、その質量を計測したところ 83.6g であった。したがって軟体部の質量は 135.4g だったことになる。

今回のウバトリガイは現生個体もコンクリーション中の個体も明らかに成貝である。二枚貝は、胎殻およびその直後の短い期間を除くと外形のプロポーシオンを大きく変えることなく成長するように見える（速水、1974）と言われるので、同一個体であれば例えば殻長が a 倍になれば殻高・殻幅ともほぼ a 倍になり、殻の体積や軟体部の質量はほぼ a^3 倍になると考えられる。このことは個体変異がなければ同種他個体間でも通用する。しかし個体変異がないということはありません。その程度を知るために化石と現生の両個体でそれぞれ殻長に対する殻幅の比を計算してみた。その結果は化石個体で 0.573、現生個体で 0.596 であり、違いはそれほど大きくない。この程度の個体変異は無視しても結果に大きな影響はないであろう。したがって化石ウバトリガイの軟体部質量は

$$135.4 \times (110.0 \div 98.8)^3 = 186.86(\text{g})$$

約 187g と見なすことができる。この 3% が炭素量なので化石ウバトリガイ軟体部が含んでいた炭

第3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			
		ウバトリガイ	エゾバイ	キンギョガイ	タマガイ
コンクリーション	質量 (g)	6800	1214.5	326(×2=652)	368.4
	炭素含有率	0.064	0.076	0.074	0.077
	c 炭素質量 (g)	435.2	92.3	(652×0.074=48.2)	28.4
コンクリーション 内化石	軟体部質量 (湿重量, 推定) (g)	187	31	3.7	57
	b 軟体部炭素質量 (推定) (g)	5.61	0.93	0.11	1.7
b/c		0.0130	0.0101	(0.0023)	0.060

軟体部炭素質量は、軟体部の湿重量の炭素含有率を0.03(秋元ほか, 2017)として計算した。
キンギョガイコンクリーションは現存量(326g)が半分程度。()内は現存していない部分と現存量が同じと仮定して計算した。

素質量は

$$187 \times 0.03 = 5.61$$

で約 5.61g と推定される。

エゾバイコンクリーション：このコンクリーションに含まれるエゾバイ類化石については、殻の体積を推計し、それに基づいて軟体部重量を求め、軟体部に含まれる炭素質量を算出した（以下、キンギョガイコンクリーションとタマガイコンクリーションにおいても同様）。このエゾバイ類化石の場合殻の体積は、殻を、底面を共有する二つの、すなわち殻口側と殻頂側の二つの円錐形の接合した状態と考えることで推計した。計測値は二つの円錐形の底面の直径が 41.7mm、殻頂側と殻口側の円錐の高さがそれぞれ 36.6、31.5mm である。体積は

$$3.14 \times (41.7 \div 2)^2 \times (36.6 + 31.5) \div 3 \\ = 30985(\text{mm}^3)$$

で、約 31.0cm³ と見なすことにする。殻の体積は殻の容量よりは大きいですが、これを殻容量と見ることとし、それを軟体部の体積と見なす。軟体部は密度が約 1g/cm³ と考えられるので、その質量は約 31g であり、その 3% が炭素なので、炭素質量は

$$31 \times 0.03 = 0.93(\text{g})$$

約 0.93g と求められる。

キンギョガイコンクリーション：このコンクリーションに含まれるキンギョガイの計測値は、殻長が 23.0mm、殻高が 22.3mm、殻深が 6.0mm

である。

キンギョガイ類は類円形でふくらみが強いとはいえ、その体積について殻長あるいは殻高を直径と見なした球を想定すれば相当に過大な見積もりになる。そこで殻長、殻高、殻幅 (= 殻深 × 2) の平均値を直径とする球をこの貝の体積と見なすことにする。その直径は

$$(23.0 + 22.3 + 6.0 \times 2) \div 3 = 19.1(\text{mm})$$

であるから、体積は

$$4 \div 3 \times 3.14 \times (19.1 \div 2)^3 = 3646.5(\text{mm}^3)$$

となり、約 3.65cm³ と見なされるので、その質量は約 3.7g であり、この 3% すなわち

$$3.7 \times 0.03 = 0.111(\text{g})$$

約 0.11g を軟体部の炭素質量と考えることができる。

タマガイコンクリーション：このコンクリーションに含まれるタマガイ科の貝は、形態のプロポーションがエゾタマガイによく似ている。エゾタマガイの殻の体積は、数個体の計測の結果、殻の最大径と最小径の平均値を直径とする球の体積とほぼ一致する。そこで、コンクリーションに含まれるタマガイ科の貝の体積も同様に求めた。

コンクリーション中のタマガイ科の貝の最大径は 50.55mm、最小径は 45.05mm なのでその平均は 47.80mm である。これを直径とする球の体積は、

$$4 \div 3 \times 3.14 \times (47.80 \div 2)^3 = 57156.0(\text{mm}^3)$$

であり、約 57.2 cm^3 と見なすことができる。よって軟体部の質量は約 57 g でありこの 3% を炭素質量とすると

$$57 \times 0.03 = 1.71 (\text{g})$$

約 1.7 g がこの化石の軟体部炭素質量と考えられる。

以上に述べたコンクリーションとその内部の化石軟体部の炭素質量をまとめて第3表に示す。このように貝軟体部の炭素質量は、最大の場合でもコンクリーション全体の炭素質量に比べて約 6% にすぎないという結果が得られた。

この結果は、コンクリーションの炭素含有率が 7% 程度と測定されたのに対し、軟体部の炭素含有率はその半分以下であり、かつ軟体部の体積がコンクリーションより小さいことからみて当然と言える。一般に、貝化石を含むコンクリーションでは炭素含有率の多少や体積の大小関係が今回の場合と同様と考えられるので、今回の測定と同様の結果になることが予測される。

なお貝殻（殻体）にも有機物が含まれており、これもコンクリーションの炭素源になった可能性がある。殻体の有機物の質量は貝殻全体の質量の 10% 以下であり、タンパク質を主とする。またそのタンパク質を構成するアミノ酸で量的に多く含まれるのはアスパラギン酸、グリシン、グルタミン酸などである（和田，1994）。それらの割合は種によって異なるが、割合が明らかになっている種はごくわずかであるため、当該種の殻体内の炭素質量を正確に見積もるのは困難である。

しかしアスパラギン酸、グリシン、グルタミン酸の炭素含有率はそれぞれ約 $36, 32, 41\%$ であり、このことから殻体内有機物の 40% 程度を炭素と考えるとそれほど大きな問題はないであろう。そこでこの考えに基づいてウバトリガイ化石の殻の炭素質量を見積もってみる。この化石の殻の質量は、軟体部質量と同様な計算で、約 115.4 g と推算される。その 10% が有機物でさらにその 40% が炭素だとすれば、約 4.6 g が炭素質量になり、軟体部における値に近い。仮に殻体部から軟体部と同量の炭素がコンクリーションに供給されたとしても、ウバトリガイコンクリーション全体の炭素に対して 2.6% に過ぎない。他の三つのコンクリ-

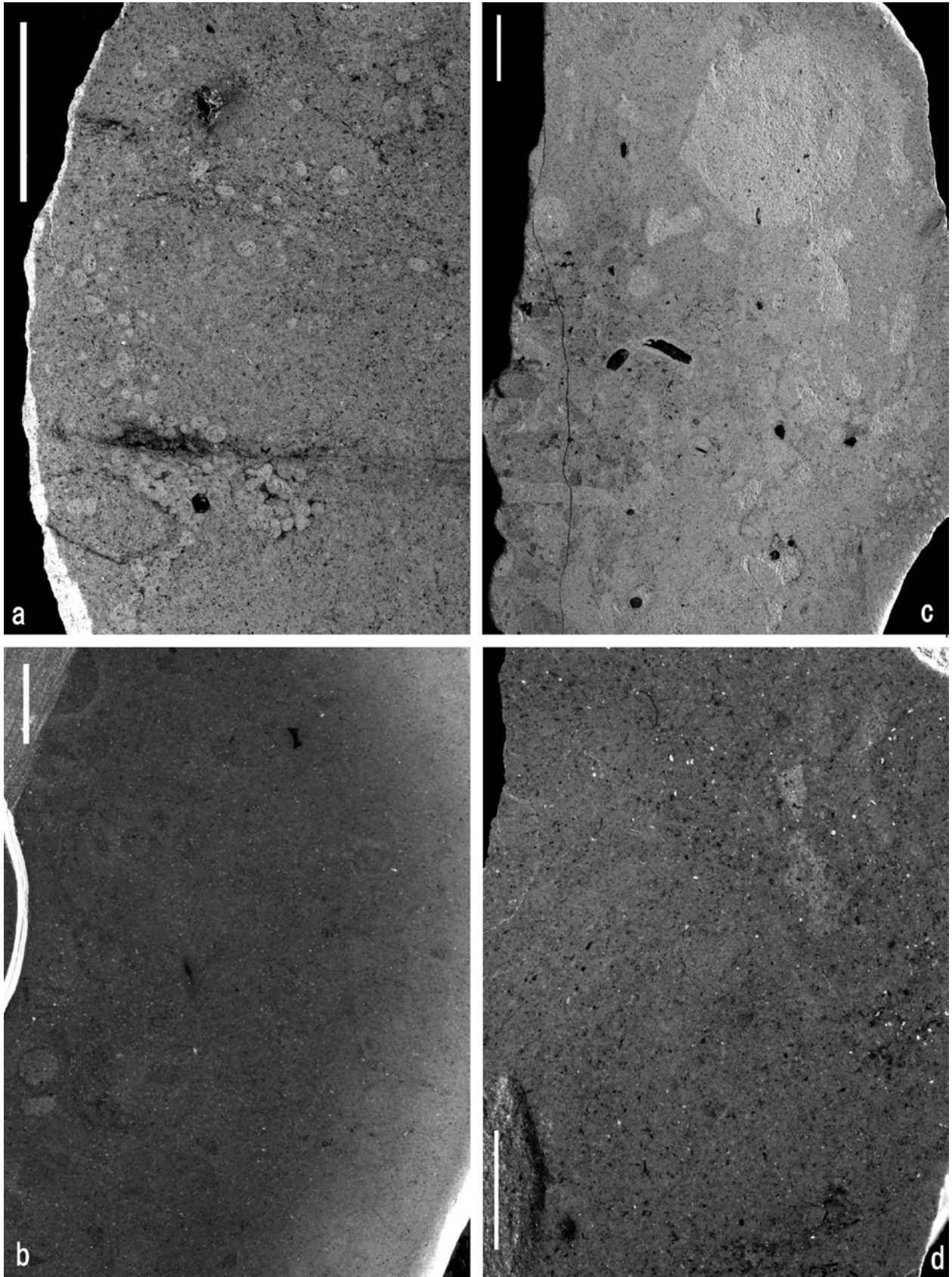
ーションでは化石の殻の質量を推算するのは困難であるが、ウバトリガイの例から見て、軟体部と殻体部から供給された炭素を合わせても軟体部のみの炭素質量の 2 倍程にしかならないであろう。したがって、貝全体の有機物に含まれる炭素質量とコンクリーションの炭素質量の比は、第3表の b/c の 2 倍程度 ($0.5 \sim 12\%$) と見積もるのが妥当と思われる。

ただ、軟体部や殻体部が含む有機物が分解した際には、その中のすべての炭素原子が重炭酸イオンを構成するわけではないので、コンクリーションの形成に寄与する炭素原子は、貝の有機物に含まれているものの中の一部と考えられる。

IV コンクリーション内部と周辺の生痕化石

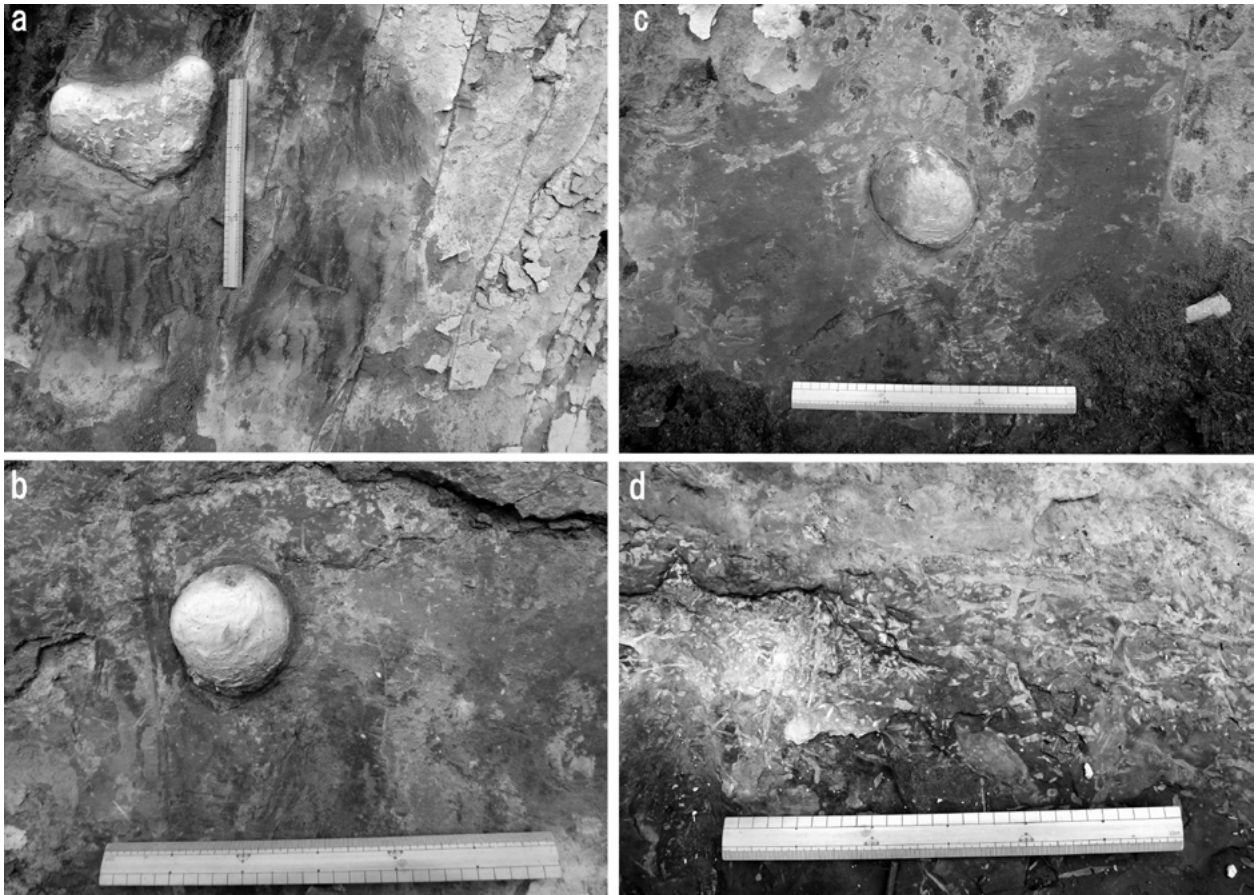
IIIで述べたように、今回測定したコンクリーションでは、コンクリーション中の炭素質量は貝化石の軟体部の炭素より多いことが確認できた。また、殻体の有機物に含まれる炭素を加えても同様と考えられる。したがって、この過剰分の炭素の供給源を考える必要がある。その一つの可能性として、殻など硬質部を持たない埋性ベントス（多毛類や線虫類などの底生動物）の遺骸やそれらが排出した体液あるいはペレット（糞）などが考えられる（吉田，2022）。これらを挙げる理由は、巣穴などの生痕がコンクリーション化していることも観察されるという事実に基づいている。とくに埋性ベントスは、生活活動の痕跡を堆積物中に残したはずであり、それらは生痕として観察できる可能性がある。そこでコンクリーション内部と外部（コンクリーションの母岩）について生痕化石の観察を行った。

今回調査したコンクリーションの場合、ハンマーなどによる破断面では生痕は全く観察できないことから、破断面を研磨して観察した。また母岩の場合は野外ではその露出面を削って平滑にして観察するとともに、コンクリーションの層位的水平方向の直近および 30 cm と 60 cm 離れた位置の3か所で母岩を採集し、研磨したコンクリーションと同程度の観察条件になるように、シアノアクリレート系樹脂を浸透させて固めたうえで研磨して観察した。その結果は次の通りである。



第4図 コンクリーションの研磨面

いずれも生痕が密集している。a：ウバトリガイコンクリーション。b：エゾバイコンクリーション，左側の白い弧状の部分はエゾバイ類の殻の一部。c：キングョガイコンクリーション。d：タマガイコンクリーション。スケールはいずれも5mm。



第5図 露頭における生痕化石

a：ハート形を呈するコンクリーションの周囲に縦方向に発達する生痕。b：球形のコンクリーションの上位に密集する細長い生痕。a, bは滝ノ沢。c：球状コンクリーションの周囲に明確に生痕と認められるものは観察できない。d：コンクリーションから離れた部分に密集する細長い生痕。c, dは下布又。なお、a, b, cのコンクリーション表面には多くの生痕が認められる。スケールはいずれも30cm。

1 コンクリーション内部の生痕化石

コンクリーション内部の生痕化石はコンクリーションごとに特徴的な形態を示すので、それぞれの断面の観察所見を記述する（第4図）。

ウバトリガイコンクリーション（第4図a）：径1mm以下の円ないしは楕円形をなす周囲より明るい色調を示す生痕が散在し、それらが密集する部分もある。周囲と同じ色調のため目立たないが、黒色鉱物粒に縁どられた同様なサイズ・形の生痕も多数みられる。さらに黒色鉱物粒が線状に配列するところも多い。それらの生痕によって断面のほとんどが占められている。

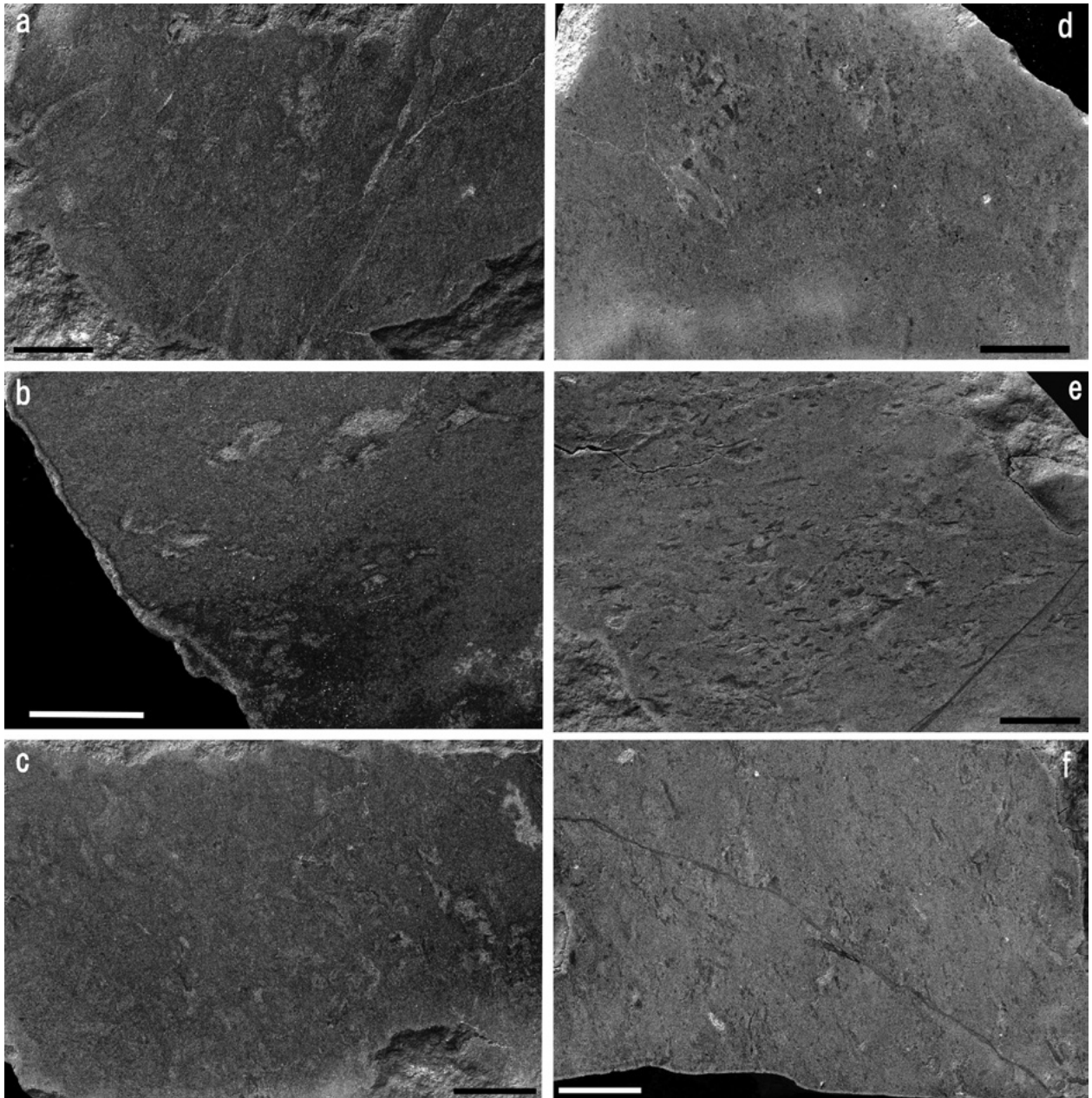
エゾバイコンクリーション（第4図b）：生痕はその周囲と色調の差が少ないため目立たない。しかし径1mm以下～数mm程度の円形や楕円形をなす生痕が多数観察でき、それらは多くの場合黒色鉱物粒に縁どられている。黒色鉱物粒が線状

に並び、それによって縁どられた太さ数mmの棒状の構造も見られる。これらの生痕は断面に密に配列する。

キンギョガイコンクリーション（第4図c）：径15～数mmの円形や楕円形の生痕が見られ、それらは周囲より明るい色調や粗い粒度で識別できる。また径1mmに満たない円や楕円を示す生痕もありこれらも色調はおおむね明るい。さらにはやはり色調で判別できる幅1～数mm、長さ5mm程度の棒状の生痕も見られ、これらによって断面はほとんどの面積が占められている。

タマガイコンクリーション（第4図d）：周囲よりわずかに明るい色調の幅1～数mm、長さ5mmあまりの細長い生痕が見られる。それらの中には黒色鉱物粒で縁取られているものもある。

径が1mm以下の円や楕円形を示す生痕も多い。それら生痕は断面の全体に多数分布している。



第6図 母岩の研磨面

a-c: 下布又, d-f: 滝ノ沢. aとdはコンクリーション直近, bとeはコンクリーションと同層準で30cm離れた位置, cとfは同じく60cm離れた位置.

なお, これらのコンクリーションの産地においては, 貝などの化石が含まれていないコンクリーションも多く産出する. それらのコンクリーションについても断面を研磨して観察したところ, いずれの産地のものも化石を含むコンクリーションと同様に豊富な生痕化石が認められた.

2 母岩の生痕化石

野外においては(第5図), コンクリーション周辺に, 層理にほぼ垂直方向にのびる幅1~

2cm程度の細長い生痕が多数見られ(第5図a), また主としてコンクリーションの上位に細い棒状や楕円形をなす生痕が密集していることがある(第5図b). 下布又ではコンクリーションの周囲に, コンクリーションを取り囲むように数cmの不規則な形で黄色味を帯びた粉状を呈する部分が分布している(第5図c). これが生痕であるか否か不明であり, 本地域の露頭でよく見られる鉄ミョウバン石(白田ほか, 1978)である可能性がある. また下布又ではコンクリーションから離

れた位置に滝ノ沢で見られるのと同じような細長い生痕が密集していることがある（第5図d）。

母岩の研磨面（第6図）では、コンクリーションの研磨面と比べると明確に生痕と認められるものは少ない。特に両産地ともコンクリーションに近い部分（第6図a, b, d, e）では少ない。第6図cでは棒状または楕円状のやや明るい色調のものが認められ、第6図fでは同様な形で黒色鉱物粒に囲まれたものが多い。両産地の、コンクリーションから60cmの位置の母岩に見られるこれらの構造は生痕と考えられるが、コンクリーション内部のように密集してはいない。

以上で述べたように、コンクリーション内部では明確に生痕と認められるものが高密度で分布している。それに対して、母岩では生痕と認められるものは少なく、その密度も低い。

コンクリーション内部の生痕は後述するようにコンクリーションの形成過程でコンクリーションに取り込まれたものであるから、コンクリーションの完成前に形成されている。しかし母岩はコンクリーションの形成後もしばらくの間は固結していないと考えられるので、コンクリーション完成後も生痕が形成される可能性がある。仮にコンクリーションの近くに生痕が存在していたとしても、それはコンクリーションの形成と同時期のものとは限らないことになる。

V コンクリーションの形成過程

Ⅲで述べたように、今回調査した貝化石を内部に含む4個のコンクリーションにおいては、含まれる貝の軟体部の炭素はコンクリーション全体の炭素の0.2～6%である。殻体に含まれる有機物からの供給量を加えても最大で10数%程度と考えられる。このことから、基本的にコンクリーションの大きさは貝の大きさではなく、それ以外から供給された炭素量によって決まると考えることができる。

貝から供給された炭素以外の炭素をコンクリーションに供給したのは、Ⅳの冒頭で述べたように硬質部を持たない埋在性ベントス（以下単に埋在性ベントスと表記する）である可能性が高い。しかもコンクリーション中に生痕化石が密集してい

ることから、形成中のコンクリーションの周囲では埋在性ベントスの個体密度がきわめて高かったと考えられる。

それでは、埋在性ベントスが供給した炭素に相当する埋在性ベントスの量（体積や質量）はどの程度になるのだろうか。これは調査した4個のコンクリーションにおいては、貝軟体部の持つ有機物から供給されたと考えられる炭素の質量が分かるので、計算によって求めることができる。例としてタマガイコンクリーションについて計算してみる。

タマガイコンクリーションの炭素質量は28.4gであり、その内タマガイ類軟体部から供給された分は1.7gである（第3表）。両者の差、26.7gが埋在性ベントスから供給されたとみなし、埋在性ベントスを多毛類と想定して、26.7gの炭素を持つ多毛類の体積(v)を求めることにする。多毛類の体の密度を ρ 、炭素含有率を c とすれば $v\rho c$ が炭素質量になる。これは26.7gなので体積は $v=26.7 \times \rho^{-1} \times c^{-1}$ である。

多毛類の炭素含有率は1～6%とされる（秋元ほか、2017）。ここでは最大値の6%を採用する。 ρ は 1g/cm^3 に近いのでこれらの数値を上式に入れて多毛類の体積を求めると

$$v=26.7 \div 1 \div 0.06=445 \text{ (cm}^3\text{)}$$

約445 cm^3 となる。一方、タマガイコンクリーションの体積は約154 cm^3 なので、多毛類の体積はコンクリーションの約2.89倍である。同様な計算を他のコンクリーションについても行うと、ウバトリガイコンクリーションで2.53倍、エゾバイコンクリーションで3.00倍、キンギョガイコンクリーションで2.34倍という値になる。

ただ、Ⅲで述べたように、貝の殻体部有機物から炭素が供給された可能性もあるので、その炭素が軟体部有機物から供給された炭素と同量であると仮定して計算すると、上記の値はタマガイコンクリーションで2.71倍、ウバトリガイコンクリーションで2.49倍、エゾバイコンクリーションで2.98倍、キンギョガイコンクリーションで2.33倍になる。

この計算では多毛類の炭素含有率について最大値を用いているので、多毛類の体積はこれらの値

より少なくなることはない。またIIIで述べたように、動物体の炭素原子がすべてコンクリーションに移行するわけではないので、実際にはこれらの値はより大きくなることは確実である。

いずれのコンクリーションにおいても、コンクリーションに炭素を供給した埋在性ベントスを多毛類と仮定した場合、その体積は少なくともコンクリーションの体積の2倍を超える。コンクリーション内の生痕はIVで述べたように数mm以下のものが多いことから、埋在性ベントスは多くの個体が小型のものだったと考えられる。径1mmに満たない生痕も多いことから見て、多毛類より微小な線虫類なども炭素を供給した一員である可能性が高い。個々では小さな体積のこれらのベントスであるが、全体としてコンクリーションの2倍以上の体積を占めるとすれば、その個体数は相当な多数になるであろう。

コンクリーションは短時間で形成されるので(Yoshida et al., 2018)、コンクリーションを成長させるには、形成され始めたコンクリーションの周囲に周辺堆積物中から埋在性ベントス個体が続々と集まってきて、コンクリーションに炭素を供給するような状況が実現されなくてはならないであろう。

この見地からコンクリーションの形成過程を考察し、以下に述べる。

i 埋在性ベントスが集まる

ここでは海底の泥質堆積物に埋没している貝の遺骸(将来、コンクリーション中心部に化石となって残る)がコンクリーション形成のきっかけになったと考える。きっかけとなった遺骸を中心部遺骸と呼ぶことにする。泥質堆積物中には多くの埋在性ベントスが生息しており、それらの中には肉食者(腐肉食者を含む)も存在している(菊池, 1985; 山田, 1967; 江原・只野, 1965)。中心部遺骸の有機物が腐敗・分解するとさまざまな成分がその外部に拡散する。その成分の中には肉食者を誘引する物質が含まれていることは容易に考えることができる。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ている(松浦, 2006)が、このことは他の分類群に属する多くのベントスにとっても同様と考えられ、肉食者はそれに引

かれて集まってくるのであろう。

集まってきた肉食者によって中心部遺骸が速やかに食い尽くされてしまえばコンクリーションが形成されることはない。そうならないためには、早期に中心部遺骸が自らの分解によって発生する重炭酸イオンと海水中のカルシウムイオンが反応して沈殿した炭酸カルシウムに覆われる(つまりコンクリーションが形成され始める)ことが必要である。集まった肉食者たちは、形成され始めたコンクリーションに阻まれて中心部遺骸を摂食できなくなる。それでも中心部遺骸からの誘引物質の拡散は続くので、彼らはその場を離れることもできないまま、新たな肉食者も集まってくる。こうして形成が始まって間もないコンクリーション周辺では埋在性ベントス(特に肉食者)の個体密度が高くなり、それらの遺骸や糞・分泌された粘液など(これらを周辺部遺骸と呼ぶことにする)が蓄積される。このことは、コンクリーション内部の生痕密度がきわめて高いという事実と整合的である。周辺部遺骸は、コンクリーションの成長に伴って生痕とともにコンクリーション内に取り込まれる。

なお、コンクリーション周辺に肉食者が集まって個体密度が高まると、肉食者が肉食者を捕食したり、そこに生息している堆積物食者を捕食したりして個体数が減少する可能性がある。しかしこれは個体間における炭素の移動であり、コンクリーション周辺の埋在性ベントスの持つ炭素総量は捕食に伴う個体数減少によって減少することはない。

ii コンクリーションが成長する

中心部遺骸が分解し尽くすと、その遺骸からの重炭酸イオンなどの発生が終了する。しかしコンクリーションに取り込まれた周辺部遺骸の腐敗・分解によって、肉食者を誘引する物質や重炭酸イオンの発生は続く。この重炭酸イオンによってコンクリーションの成長は続き、誘引物質によって新たな肉食者もその周りに集まる。こうしてコンクリーションは成長を続け、新たな周辺部遺骸や生痕を取り込む。

iii コンクリーションの成長が止まる

コンクリーションの成長がiiで述べたようなも

のであれば、コンクリーションは無限に成長することになる。しかし実際のコンクリーションは周囲の堆積物との境界が明瞭で、成長はある時点で完全に停止することを示している。

コンクリーションが成長を続けるためには、iiで述べたように多くの新たな肉食者がその周囲に集まり、周辺部遺骸を供給し続ける必要がある。周辺部遺骸の供給が止まればコンクリーションは成長できなくなるのである。肉食者が集まるのは、彼らを誘引する物質がコンクリーション内で発生し外部に拡散するからと考えられる。

松浦（2006）によれば、線虫は化学物質の濃度勾配を感知し、化学走向性を発現する。誘引物質の拡散源であるコンクリーションからある程度離れば、誘引物質は濃度が低下したり分解したりして、その濃度勾配が感知できなくなることは当然である。肉食者は濃度勾配が感知できる範囲内から成長中のコンクリーション周辺に集まり、そこで死亡するため、その範囲内では時間とともに肉食者の個体密度は低下する。この密度低下は、コンクリーション周辺の母岩における生痕の密度が低いという事実と矛盾しない。こうしてコンクリーション周辺に集まる新たな肉食者は減り、周辺部遺骸の供給量が減少して、コンクリーションが取り込める周辺部遺骸は少なくなる。そのためコンクリーションから拡散する重炭酸イオンの量が減少して成長速度は低下する。同時に誘引物質の量も減少し、コンクリーション周辺に集まる肉食者はますます少なくなる。これらの効果によりさらに取り込める周辺部遺骸の量は減少する。このような経過でコンクリーションの成長速度は急激に低下し、成長は終息すると考えられる。成長の止まったコンクリーションは周辺部遺骸を取り込むことができないので、再び成長に転じることはない。

ここで述べた形成プロセスは、見かけ上、硬質の化石を含まないコンクリーションの成因にも応用可能である。

VI まとめ

秋田県大仙市における天徳寺層の2か所のコンクリーション産地から採集された貝化石を含む4

個のコンクリーションの炭素量を測定し、含まれる貝軟体部の炭素量を推計して比較したところ、殻体に含まれる有機物の炭素を加えても、最大の場合でコンクリーションの炭素量の10数%に過ぎないことが判明した。

コンクリーション中の過剰分の炭素は、形成中のコンクリーションの周りに集まってきた埋在性ベントスの遺骸や糞・粘液（周辺部遺骸）から供給されたと考えられる。このことはコンクリーション内部には生痕が密に分布するのに対して、その母岩では生痕密度が低いことから示唆される。

コンクリーションの形成は、形成のきっかけとなる貝などの軟体部（中心部遺骸）の腐敗・分解に伴う重炭酸イオンの拡散によって始まる。それと同時に発生・拡散する誘引物質によって肉食の埋在性ベントスはその周りに集まる。コンクリーションは成長するので、その周囲に集まったベントスの遺骸や糞・粘液など（周辺部遺骸）を取り込む。中心部遺骸が分解し尽くしても、取り込まれた周辺部遺骸が分解して発生する重炭酸イオンによってコンクリーションは成長を続ける。しかし誘引物質の届く範囲は限られており、その範囲内の肉食性のベントス個体の多くはコンクリーションの周囲に集まってしまうので、その後は集まるベントスの個体数が少なくなる。このためコンクリーションが取り込める周辺部遺骸が減少し、発生する重炭酸イオンの量も減り、コンクリーションの成長速度は急速に低下して成長は終息すると考えられる。

VII おわりに

本稿で述べたコンクリーションの形成過程は、埋在性ベントスが餌を求めて移動するという動物の本質的行動に依拠している。その点で、調査した試料は地域的にも年代的にも限られているが、モデルとしてかなり広く適用できるのではないかと考えられる。

中心部に貝などの目だった化石のないコンクリーションも多く見られる。このようなコンクリーションの形成についてもこのモデルで説明可能である。死後着底した硬質部を持たないプランクトンやネクトン（クラゲなど）、あるいは硬質部

を持たないベントス（多毛類や線虫類など），そして硬質部を持つ動物の硬質部から外れた軟質部（鯨類の肉など）などが中心部遺骸として機能すれば，一見して化石が含まれていないように見えるコンクリーションが形成され则认为られる。

秋田県男鹿半島の女川層・西黒沢層には，径1mを超え最大5mにも達する巨大な球状炭酸塩コンクリーションが多数含まれている（渡部ほか，2017）。しかもこれらの母岩の地層はきわめて明瞭な細層理が発達し，現状，ほとんど生物擾乱を受けていないように見えるものもあり，今回のコンクリーション成因モデルの適用性も含め，今後さらに検討を続けていく予定である。

謝辞

秋田市の五井昭一氏には野外調査にご協力いただき，写真の一部を提供していただいた。厚くお礼申し上げます。

文 献

秋元彩渚・國田 淳・黒田祐一・酒井康彦・宮崎太一郎・小島治幸，2017，港湾構造物における炭素量を用いた生物現存量の定量評価の試み。海洋理工学会誌。vol.23, p. 37-45.

秋田県水産振興センター，2014，男鹿で『ウバトリガイ』が獲れました。 <https://www.pref.akita.lg.jp/pages/archive/6128>。2021年9月21日閲覧。

安藤大輝・西川 治・内田 隆・石山大三・松葉谷治，2015，秋田県新第三系に発達する炭酸塩コンクリーションの同位体地球科学的特徴。日本地質学会第122年学術大会講演要旨，485。

江原昭三・只野正志，1965，線虫類。動物系統分類学6，中山書店，速水 格，1974，二枚貝綱。松本達郎（編），新版古生物学，朝倉書店，p.1-62。

菊池泰二，1985，砂泥底の生態系とベントス。水産土木，vol.22, p.25-33。

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。

西川 治・安藤大輝・嶋田智恵子・石山大三・山本正

嗣，2020，秋田及び山形北部地域の新第三系炭酸塩コンクリーションのSr同位体比と珪藻化石年代。地質学雑誌，vol.126, p.53-69。

高安泰助・小笠原憲四郎・島本昌憲・的場保望，1986，秋田油田地域の貝類化石産地とその層序。高安泰助（監修），小笠原憲四郎・増田孝一郎・的場保望（編）秋田油田地域新第三系・第四系貝類化石図鑑，高安泰助教授退官記念会，p.9-68。

土谷信之・吉川敏之（1994）刈和野地域の地質。地域地質研究報告（5万分の1地質図幅），地質調査所，72p。

白田雅郎・村山進・白石建雄・高安泰助・乗富一雄（1978）秋田県総合地質図幅「大曲」地域。秋田県，100p。

白田雅郎・村山進・白石建雄・高安泰助・乗富一雄（1979）秋田県総合地質図幅「刈和野」地域。秋田県，77p。

和田浩爾，1994，第3章 殻体と外套膜。波部忠重・奥谷喬司・西脇三郎（編），軟体動物学概説，サイエンティスト社，p.135-158。

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。

山田真弓，1967，多毛類。動物系統分類学6，中山書店，p.24-106。

吉田英一，2019，球状炭酸塩コンクリーションの科学。近未来社，182p。

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.129, no.1, 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).