白亜系蝦夷層群における 炭酸塩コンクリーション中の空間の自己閉塞作用

村宮悠介

深田地質研究所

Self-filling process of cavities in carbonate concretions from the Cretaceous Yezo Group.

MURAMIYA Yusuke

Fukada Geological Institute

要旨:白亜系蝦夷層群からは、炭酸塩コンクリーションに包有されたアンモナイト化石が豊富に 産し、その多くは、ゾーニング構造を持つ方解石によって充填されている.本研究ではコンクリ ーション中の Gaudryceras tenuiliratum Yabe の殻内部に形成した方解石充填物について、地質学的 観察および地球化学的分析を行い、コンクリーション中の空間を炭酸塩が充填する過程を考察し た.コンクリーションの炭素同位体比は、その炭素起源が、生物遺骸であることを示す.コンク リーション中の化石は、鉱物学的にも物理的にも保存状態が良く、コンクリーションは、堆積物 が圧密を受ける以前に、堆積物表層近くで急速に形成されたと考えられる.アンモナイトの殻内 部は、住房部内側の殻側に形成した軸放射状の方解石 (BCcal-1)、さらにその内側に形成したス パーライト質の方解石 (BCcal-2)、気房部の各部屋を充填するスパーライト質の方解石 (PHcal) の3種類の方解石によって充填されている.酸素同位体比が示す方解石の沈殿温度は、BCcal-1 が 堆積物のごく表層部で形成し、その後、BCcal-2、PHcal の順に形成したことを示している.BCcal-1 の炭素同位体比は、海水中の溶存無機炭素を由来とする方解石に特徴的な値を示す.一方、BCcal-2 と PHcal の炭素同位体比は、これらが、堆積物中に含まれる有機物の分解過程で発生する炭素を 起源にしており、堆積物の比較的深部で形成されたことを示唆している. キーワード:炭酸塩コンクリーション、方解石をメント、初期続成過程、アンモナイト

Abstract: The Cretaceous Yezo Group yields ammonites which contained in carbonate concretions and most of them are filled by zoned calcite precipitates. This study revealed the formation process of calcite fillings in *Gaudryceras tenuiliratum* Yabe contained in carbonate concretions based on geological observations and geochemical analyses. The δ^{13} C value of the concretion indicates that organ-derived bicarbonate is the source of the concretion. Mineralogically and morphologically well-preserved fossils in concretions suggest that concretion had probably been formed rapidly at near the sediments surface and prior to compaction. In side of ammonite shells are filled by three types of calcite, as follows: 1, radiaxial fibrous calcite on the wall of body chamber (BCcal-1); 2, sparitic calcite filling the remined cavity of body chamber (BCcal-2); and 3, sparitic calcite filling each chamber of phragmocone (PHcal). Precipitation temperatures of calcite estimated by δ^{18} O values suggest that BCcal-1 was precipitated near the water-sediment interface, after that BCcal-2 and PHcal were precipitated in this order. δ^{13} C values of BCcal-2 and PHcal indicate that these calcites were derived from organic decomposition and had been formed respectively deeper in the sediments. Keywords: carbonate concretion, calcite cement, early diagenesis, ammonite

1. はじめに

保存状態の良いアンモナイト化石の殻内部は, しばしば方解石や石英などの鉱物によって充填さ れている. 国内では、北海道の白亜系蝦夷層群中 の炭酸塩コンクリーションから産出するアンモナ イトにおいて、このような産状は一般的に認めら れる. アンモナイトの殻は、外側に開口した住房 部 (body chamber: 軟体部が位置していた部分) と,隔壁によって区切られた気房部(phragmocone) からなる. 通常は、住房部には堆積物が侵入する ため、鉱物充填は気房部のみに生じる.しかし、 何らかの理由で住房部に堆積物が侵入しなかった 場合,住房部にも充填が生じることがある(e.g. Tanabe and Fukuda, 1987). これらの充填物は、肉 眼サイズでゾーニングをしており、アンモナイト の殻が、堆積物に埋没した後に経験した続成作用 の過程を保存している可能性がある。しかし、北 海道のアンモナイトに関する研究は、古生物学的 視点によるものがほとんどで、このような殻内部 の鉱物充填に着目した研究例はこれまでにない. また海外においても、殻内部の充填鉱物に着目し た研究 (e.g. Marshall, 1981; Hudson, 1982; Curtis et al., 2000) は非常に少なく, 特にコンクリーション の形成と充填鉱物の形成の関係は議論されてこな かった.本研究では、北海道北部の中川町に分布 する上部白亜系蝦夷層群に含まれる,炭酸塩コン クリーションから産したアンモナイトの殻内部の 充填鉱物について、地質学的・地球化学的な調査 を行い、その形成プロセスを考察した.

地質概説と試料

北海道中軸部には、白亜系海成層の蝦夷層群が 広く分布している(図1)(例えば Takashima et al.,



(20万分の1シームレス地質図より改作)

2004). 蝦夷層群は、分布域ごとに細分され、中川 地域では下位より西知良志内層、大曲層、および オソウシナイ層に区分されている(長尾,1962;高 橋ほか,2003). オソウシナイ層は, 主に泥質岩か らなり、アンモナイト類やイノセラムス類などの 非常に保存状態の良い海生生物化石を豊富に産す る. これらの産出化石から、オソウシナイ層は白 亜紀後期のカンパニアン階に相当すると考えられ る(高橋ほか、2003).本研究に用いたアンモナイ ト試料は、中川町佐久地域および大和地域で、転 石コンクリーションから採取した. このコンクリ ーションは、岩相と産出地点から、オソウシナイ 層に由来すると思われる. 用いた試料は Gaudryceras tenuiliratum Yabe (1903)の未成年殻で ある. コンクリーションには, Gaudryceras 以外に も、様々な成長段階の、その他の種のアンモナイ トや、二枚貝の Inoceramus が密集して含まれてい た.特に Inoceramus は離弁したものや破片化した ものがほとんどである. これらの化石は、コンク リーション内で、ある面に対して平行に近い向き に並んでいる.

G tenuiliratum は,最終隔壁から先,住房部が 320°ほど巻く.分析に用いた2試料(試料1,試 料2)とも,住房部のうち,最終隔壁寄りの約130° ~180°分が方解石によって充填されている. 殻 に近い部分の方解石は暗褐色を呈し(BCcal-1), さらにその内側の空間を無色透明な方解石 (BCcal-2)が充填している.気房部は無色透明の 方解石 (PHcal)によって充填されている(図2).

試料1は薄片観察に用いた. 試料2はXRF分析, XRD分析,酸素・炭素安定同位体比分析に用いた.



図2 分析試料(試料1).

3. 手法

3.1 薄片観察

アンモナイト試料の正中線における薄片資料を 作成し, 偏光顕微鏡を用いて方解石充填物の微小 構造を観察した.

3.2 蛍光 X 線 (XRF) 分析による全岩化学組成分析

XRF 分析では, BCcal-1, BCcal-2, PHcal, アン モナイトを含むコンクリーション,およびオソウ シナイ層の泥岩の計5試料を分析した.まずそれ ぞれの試料を、メノウ製乳鉢を用いて粉末化した. これを 1000℃で強熱し、揮発性成分を除去した. 強熱前後の質量差から、揮発性成分量(LOI: Loss on Ignition)を求めた.強熱後の試料は、重量にし て正確に 10 倍量の四ホウ酸リチウム試薬と混合 し、溶融させ、ガラスビード試料とした. これを 蛍光 X 線分析装置により分析し、主成分元素量を 求めた.対象元素は Si, Ti, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K, P である.

3.3 X 線回折 (XRD) 分析

XRD 分析では、アンモナイト殻、BCcal-1、 BCcal-2、PHcal、アンモナイトを含むコンクリー ション、およびオソウシナイ層の泥岩の計6試料 を分析した.XRF分析と同様に、それぞれの試料 を粉末化した.この粉末試料をX線回折装置によ り分析し、含まれる鉱物種を同定した.

3.4 炭素·酸素安定同位体比分析

BCcal-1, BCcal-2, PHcal, アンモナイトを含む コンクリーション, アンモナイト殻の計5試料に ついて行った.粉末試料をリン酸を用いて処理し, 生成したCO2ガスを安定同位体質量分析計によっ て分析した.

4. 結果

4.1 薄片観察

住房部奥部の殻のすぐ内側には、軸放射状の方 解石が成長している(BCcal-1). さらにその内側 の空間には、スパーライト質の方解石が充填して いる(BCcal-2)(図 3a). 気房部の一部の気室に は軸放射性の方解石が成長しているが、大部分の 気室はスパーライト質な方解石(PHcal)で充填さ

	SiO ₂	TiO ₂	Al_2O_3	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P_2O_5	LOI	Total
concretion	20.60	0.17	5.34	3.78	ND	1.23	34.52	0.77	1.01	0.58	30.33	98.33
BCcal-1	1.08	0.03	ND	3.13	ND	1.65	47.96	ND	ND	0.54	42.56	96.94
BCcal-2	1.68	0.02	ND	2.17	ND	0.29	50.66	ND	ND	0.02	42.25	97.09
PHcal	1.83	0.02	ND	1.95	0.13	0.50	49.10	ND	ND	0.02	43.13	96.69
mudstone	64.23	0.64	15.45	4.86	0.02	1.61	1.64	2.05	3.07	0.11	4.33	98.03

表1 XRF 分析結果(単位は wt %, ND:検出されなかったもの).



図3 薄片写真. 3a:住房部を充填する2 種類の方解石 (BCcal-1, BCcal-2).3b:気房部を充填する方解石(PHcal).3c:住 房部に見られるペレット粒子.

れている (図 3b). 住房部の堆積物が充填してい る部分には、ペレット (糞粒)が見られる (図 3c). また、球状の黄鉄鉱が、BCcal-1 の基部およびペ レット粒子の間隙に見られる (図 3b, c).

4.2 蛍光 X 線 (XRF) 分析による全岩化学組成分析

BCcal-1, BCcal-2, PHcal は主に Ca と LOI から 構成されている. その中でも, BCcal-1 には, Fe, Mg, P が他よりも濃集していることが特徴である. コンクリーションは, 主に Si, Ca, LOI から構成 されている. コンクリーションにも BCcal-1 と同 様に, P の濃集が認められる. オソウシナイ層の 泥岩は, 主に Si と Al からなる (表 1).

4.3 X 線回折 (XRD) 分析

コンクリーションは、主に方解石と石英からな る. BCcal-1, BCcal-2, PHcal はいずれも方解石か らなることが分かった. アンモナイト殻は主にア ラゴナイトからなっている. オソウシナイ層の泥 岩は主に石英と斜長石からなっている(図4).

4.4 炭素·酸素安定同位体比分析

結果は表2の通りである.アンモナイト殻内部 の空間を充填する方解石は、それぞれ異なる酸 素・炭素安定同位体比を示すことが分かる.



図 4 XRD 分析結果. Cal: 方解石, Qz: 石英, Arg: アラゴナイト, Pl: 斜長石.

	δ ¹³ C (‰)	δ ¹⁸ O (‰)
concretion	-5.5	-1.4
BCcal-1	0.0	-0.4
BCcal-2	11.8	-3.0
PHcal	-7.5	-4.8
shell	-0.3	-0.1

表2 炭素·酸素安定同位体比分析結果.

5. 考察

5.1 住房部の空間の由来

アンモナイトの住房部は外側に開口している ため、通常は堆積物に充填されている.一方、本 研究で扱った試料では、住房部の奥側が方解石に よって充填されている.これは、方解石が沈殿し た際に、住房部の奥部には堆積物による充填がな かったことを示している.この理由として、(1) アンモナイトの死殻が静かに堆積物に覆われるこ

とで,堆積物が住房部奥まで侵入しなかったため, (2) 殻が埋没した時点で,住房部奥に軟体部が残 っていたため、の二つが考えられる.本研究で扱 った試料が含まれていたコンクリーションには、 Inoceramus の離弁した殻や破片化した殻が密集し て含まれている. さらに, 様々な成長段階の, 様々 な種のアンモナイトも含まれていることから、各 種の生物遺骸が掃き寄せられて堆積したと考えら れる. このような場合, アンモナイトの死殻に堆 積物が侵入しないことは考えにくい. このことか ら、本研究で扱ったアンモナイト殻は、住房部の 奥に軟体部を残した状態で堆積物に埋没した可能 性が高い. 薄片観察では、住房部内にペレットが 観察された、このことも、ペレットを排出した生 物の食物となる軟体部が、住房部内に存在してい たことを示唆している.

5.2 アンモナイト殻の保存性

XRD 分析から, アンモナイト殻はアラゴナイト からなることが分かった.アンモナイトは生存時 にアラゴナイト質の殻を持っていたと考えられて いる(Kulicki et al., 2015).アラゴナイトは準安定 相であるため,アラゴナイト質の殻は,しばしば 続成作用において方解石へ転移する(例えば,神 谷,1975).本研究で対象にした試料では,アンモ ナイト殻はアラゴナイト質が保存されている.ま た,殻の炭素同位体比(δ¹³C)および酸素同位体 比(δ¹⁸O)はほとんど±0‰に近い.アンモナイト 殻などの,海水と同位体平衡下で形成した炭酸塩 の未変質試料は,このような値を持つことから

(Landman et al., 1983; Moriya et al., 2003; Lukeneder et al., 2010),本研究で扱った試料には, 鉱物学的あるいは地球化学的にも,続成作用によ る変質は,ほとんど生じていないと考えられる.

5.3 コンクリーションの形成

このコンクリーションの δ¹³C は-5.5‰の値を示 す. このような低い δ¹³C 値を持つコンクリーショ ンは、微生物による生物遺骸の分解に伴って形成 されたと考えられている (Yoshida et al., 2015, 2018).このコンクリーションにはアンモナイトを はじめとした様々な生物遺骸が含まれており、こ れらがコンクリーションを形成する重炭酸イオン の供給源になったと考えられる. コンクリーショ ンにはリンが周辺母岩の数倍程度濃集している. 海底堆積物に含まれるリンは一般的に、有機物の 分解作用に由来すると解釈される(例えば,鈴村 ほか,2003). 周辺母岩に含まれるリンの量は、コ ンクリーションに含まれる量よりも少ないため, 粘土鉱物に吸着されたリンやアパタイトなどの鉱 物のように、砕屑物に含まれるリンだけでは、コ ンクリーションに含まれるリンの量を説明できな い. このことは、コンクリーションが形成される 際に、生物遺骸が盛んに分解され、リンの供給が あったことを示している. この時同時に、コンク リーションを形成するための重炭酸イオンも多量 に発生したと考えられる. この段階で, 住房部内 部に残されていた軟体部も分解され、後に方解石 で充填される空間が形成したと考えられる. コン クリーションの形成には生物遺骸の分解反応を伴 うこと、また、コンクリーション中の化石の保存 状態が、鉱物学的にも物理的にも良いことから、 コンクリーションは堆積物の表層部分で、堆積物 が圧密される前に形成したと考えられる.

5.4 方解石充填の形成時期

住房部奥部は軸放射状の BCcal-1 と,スパーラ イト質の BCcal-2 の 2 種の方解石により充填され ている.気房部は主にスパーライト質の方解石 (PHcal)により充填されている.これらは、それ ぞれ元素組成, δ^{13} C および δ^{18} O が異なることから, 続成過程の異なるステージで形成したものと考え られる.

炭酸塩の δ^{18} Oは、その炭酸塩が沈殿した時点の 間隙水温と一定の関係を持って変化する(Kim and O'Neil, 1997; Kim et al., 2007). このことから、炭 酸塩の δ^{18} Oから古水温の情報を得ることができ る.アンモナイト殻の δ^{18} O値は、-0.1‰ (vsPDB) であった.白亜紀の海水の δ^{18} O値を、氷床が存在 しない時代の平均的な値である-1.0‰ (vs SMOW) とし (Shackleton and Kennett, 1975), Kim et al. (2007)に示されたアラゴナイトに関する δ^{18} O と 水温の換算式を用いると、アンモナイト殻の δ^{18} O 値は約 13℃の水温に相当する.この温度は、 Moriya et al. (2003)で示された、白亜紀後期におけ る蝦夷層群を堆積させた堆積盆の海水温とも概ね 一致する.

本研究で用いたアンモナイト殻内部には, BCcal-1, BCcal-2, PHcalの3種の方解石が充填し, δ¹⁸O はそれぞれ, -0.4‰, -3.0‰, -4.8‰ (いずれ もvsPDB)の値を持っている.先と同様に、間隙 水のδ¹⁸O 値を-1.0‰とし, Kim and O'Neil (1997) で示された方解石に関する δ¹⁸O と水温の換算式 を用いると、それぞれの方解石の沈殿温度は11℃、 23℃, 32℃と見積もられる. このことから, BCcal-1 は海水温に近い温度、つまり海底面近くの堆積物 ごく表層で形成したと考えられる. さらに、間隙 水温は地温勾配によって深部ほど高温になること から, BCcal-2 と PHcal は, この順で, 堆積物が 深くへ埋没する過程で沈殿したと考えられる. ま た、日本の平均的な地温勾配を 30-40°C/km (田中 ほか, 2004)とし、当時の海底水温を11℃とする と、BCcal-2 は海底下 300~400m, PHcal は海底下 500~700m 程度の深度で沈殿したと推定される (図5).



図5 方解石充填の形成過程 a: コンクリーションの形成とほぼ同時期に住房部内に BCcal-1 が形成. b: 住房部内に残された空間を BCcal-2 が充填. c: 気房部を PHcal が充填.

5.5 方解石充填の炭素起源

炭酸塩のδ¹³Cは、その炭酸塩の炭素起源に関す る情報を持っており、炭素起源に応じて特徴的な 値を示す (Irwin et al., 1977; Mozley and Burns, 1993; Nelson and Smith, 1996). BCcal-1 $O \delta^{13}$ C /±±0.0‰ であるが、この値は、海水に含まれる溶存無機炭 素を起源にした炭酸塩に特徴的である(Coleman, 1993; Nelson and Smith, 1996). BCcal-1 は, 海底面 付近で形成したこと、リンを特徴的に含むことか ら、コンクリーションの形成とほとんど同時期に 形成したと考えられる.一方で、δ¹³C 値から、 BCcal-1 とコンクリーションは別の炭素起源を持 っていると考えられる. ほとんど同時期に形成し たと思われるこれらの炭酸塩が、異なる炭素起源 を持つ理由、また、BCcal-1 が海水中の溶存無機 炭素起源だとすると、 海水中の炭素成分がアンモ ナイトの住房部分に濃集する理由は現段階では不 明であり、今後の研究課題である.

有機物に富む堆積物では,深度に応じていくつ かの有機物分解帯が存在し,それぞれが特徴的な δ^{13} C値を持つ CO₂を発生させる (Irwin et al., 1977). これによると, BCcal-2 が持つ正の δ^{13} C 値は,深 度 10~1000m 程度 (Kimmeridge Clay の例) に位 置する微生物発酵 (bacterial fermentation) 帯に特 徴的である. さらにそれよりも深部では,脱炭酸 反応が起こり,負の δ^{13} C値を持つCO₂が発生する. 負の δ^{13} C値を持つPHcal は,脱炭酸反応帯由来の 炭素から沈殿したと考えられる.

6. まとめ

本研究では、北海道北部、中川町地域に分布す る白亜系蝦夷層群オソウシナイ層から産出した、 炭酸塩コンクリーション中に含まれるアンモナイ ト殻内に形成した方解石充填物について、地質学 的観察と地球化学的分析を行った.その結果、次 のようなことが示された.

1) アンモナイト殻は、生存時のアラゴナイト質を 保存しており、その酸素同位体比も当時の古海水 温から想定される値を示す.このことは、本研究 に用いた試料には、鉱物学的にも地球化学的にも 変質等が生じていない.

2) コンクリーションが、低い炭素同位体比を持つ ことと、リンに富むことは、コンクリーションが 生物遺骸の分解過程で形成された可能性が高い.

また、内包する化石が、極めて良好に保存されて いることは、コンクリーションが、堆積物表層部 で急速に形成されたことを示唆する.

3) BCcal-1 は、アンモナイト殻とほぼ同じ形成温 度を示すことから、海底面直下で形成したと考え られる.これは、BCcal-1 の炭素同位体比が、海 水中の溶存無機炭素に特徴的な値を示すこととも 整合的である.

4) BCcal-2 と PHcal は, BCcal-1 よりもそれぞれ 約 10℃ないしは約 20℃高い沈殿温度を示してい る.また,それぞれの炭素同位体比は,それらが 堆積物の比較的深部で生成される CO₂に由来する ことを示唆する.このことは, BCcal-2 と PHcal は,堆積物が埋没する過程において,堆積物の比 較的深部で形成されたと考えられる.

本研究から、炭酸塩コンクリーション内部の空 間の一部が、コンクリーションの形成とほとんど 同時期に充填される可能性が示された.ただし、 本研究では、それぞれの分析は1試料について行 ったので、今後、試料数を増やしてさらに検討を 重ねる必要がある.

謝辞

酸素・炭素同位体比分析では,名古屋大学博物 館の吉田英一教授,名古屋大学大学院宇宙地球環 境研究所の南雅代准教授,高知大学海洋コア総合 研究センターの池原実教授,海洋研究開発機構高 知コア研究所の窪田薫博士のお世話になった. XRF分析では,名古屋大学大学院環境学研究科の 山本鋼志教授のお世話になった.薄片試料は,名 古屋大学博物館技術補佐員の與語節生氏の高い技 術により作成された.以上の方々に,心より感謝 申し上げます.

文献

- Coleman, M. L. (1993): Microbial processes: Controls on the shape and composition of carbonate concretions, Marine Geology, 113, 127-140.
- Curtis, C. D., Cope, J. C. W., Plant, D. and Macquaker,

J. H. S. (2000): 'Instantaneous' sedimentation, early microbial sediment strengthening and a lengthy record of chemical diagenesis preserved in Lower Jurassic ammonitiferous concretion from Dorset, Journal of the Geological Society, 157, 165-172.

- Hudson, J. D. (1982): Pyrite in ammonite-bearing shales from the Jurassic of England and Germany, Sedimentology, 29, 639-667.
- Irwin, H., Curtis, C. and Coleman, M. (1977): Isotopic evidence for source of diagenetic carbonates formed during burial of organic-rich sediments, Nature, 269, 209-213.
- 神谷英利 (1975): 化石の貝殻に見られる内部構造 の特徴とその続成変化について,地質学雑誌, 81,423-430.
- Kim, S. T., and O'Neil, J. R. (1997): Equilibrium and nonequilibrium oxygen isotope effects in synthetic carbonates, Geochimica et Cosmochimica Acta, 61, 3461-3475.
- Kim, S. T., O'Neil, J. R., Hillarie-Marcel, C. and Mucci, A. (2007): Oxygen isotope fractionation between synthetic aragonite and water: Influence of temperature and Mg²⁺ concentration, Geochimica et Cosmochimica Acta, 71, 4704-4715.
- Kulicki, C., Tanabe, K., Landman, N. H. and Kaim, A. (2015): Ammonoid Shell Microstructure, Chapter 8 in Ammonoid Paleobiology: From Anatomy to Ecology, Topics in Geobiology, 43, 253-320. Springer, Dordrecht.
- Landman, N. H., Rye, D. M., and Shelton, K. L. (1983): Early ontogeny of *Eutrephoceras* compared to recent *Nautilus* and Mesozoic ammonites: Evidence from shell morphology and light stable isotopes, Paleobiology, 9, 269-279.
- Lukeneder, A., Harzhauser, M., Müllegger, S. and Piller,

W. E. (2010): Ontogeny and habitat change in Mesozoic cephalopods revealed by stable isotopes ($\delta^{18}O$, $\delta^{13}C$), Earth and Planetary Science Letters, 296, 103-114.

- Marshall, J. D. (1981): Zoned calcites in Jurassic ammonite chambers: trace elements, isotopes and neomorphic origin, Sedimentology, 28, 867-887.
- Moriya, K., Nishi, H., Kawahata, H., Tanabe, K. Takayanagi, Y. (2003): Demersal habitat of Late Cretaceous ammonoids: Evidence from oxygen isotopes for the Campanian (Late Cretaceous) northwestern Pacific thermal structure, Geology, 31, 167-170.
- Mozley, P. S. and Burns, S. J. (1993): Oxygen and carbon isotopic composition of marine carbonate concretion: An overview, Journal of Sedimentary Petrology, 63, 73-83.
- 長尾捨一 (1962):5 万分の1 地質図幅「天塩中川」 および同説明書.北海道立地下資源調査所,札 幌.39 p.
- Nelson, C. S. and Smith, A. M. (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.
- Shackleton, N. J. and Kennett, P. J. (1975): Paleotemperature history of the Cenozoic and the initiation of Antarctic glaciation: Oxygen and carbon isotope analyses in DSDP sites 277, 279, and 281, Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, 29, 743-755.
- 鈴村昌弘・國分治代・伊藤 学 (2003): 東京湾に おける堆積物―海水間のリンの挙動. 海の研究, 12,501-516.

- 高橋昭紀・平野弘道・佐藤隆司 (2003):北海道天 塩中川地域上部白亜系の層序と大型化石群の 特性,地質学雑誌,109,77-95.
- Takashima, R., Kawabe, F., Nishi, H., Moriya, K., Wani, R., and Ando, H. (2004): Geology and stratigraphy of forearc basin sediments in Hokkaido, Japan: Cretaceous environmental events on the north-west Pacific margin, Cretaceous Research., 25, 365-390.
- Tanabe, K. and Fukuda, Y. (1987): The jaw apparatus of the Cretaceous ammonite *Reesidites*. Lethaia. 20, 41-48.
- 田中明子・山野 誠・矢野雄策・笹田政克 (2004): 日本列島及びその周辺域の地温勾配及び地殻 熱流量データベース,数値地質図 DGM P-5,産 総研地質調査総合センター.
- Yabe, H. (1903): Cretaceous cephalopoda from the Hokkaido, Journal of the College of Science, Imperial University, Tokyo, 18, 1-55.
- Yoshida, H., Ujihara, A., Minami, M., Asahara, Y., Katsuta, N., Yamamoto, K., Shirono, S., Maruyama, I., Nishimoto, S. and Metcalfe, R. (2015): Early post-mortem formation of carbonate concretions around tusk-shell over week-month timescales, Scientific Reports, 5, 14123.
- Yoshida, H., Yamamoto, K., Minami, M., Katsuta, N., Shirono, S. and Metcalfe, R. (2018): Generalized conditions of spherical carbonate concretion formation around decaying organic matter in early diagenesis, Scientific Reports, 8, 6308.