

貝形虫の殻の Mg/Ca 比, Sr/Ca 比による古環境推定の現状と問題点

A review of the utility of Mg/Ca and Sr/Ca ratios of ostracode valves as a tool for paleoenvironmental reconstructions

森下知晃* 山口龍彦**
眞柴久和*** 神谷隆宏***

*Tomoaki Morishita**,
*Tatsuhiko Yamaguchi***,
*Hisakazu Mashiba**** and
*Takahiro Kamiya****

2009年11月13日受付.

2010年6月30日受理.

* 金沢大学フロンティアサイエンス機構/ハワイ大学マノア校地質学・地球物理学科

Frontier Science Organization, Kanazawa University, Kakuma-machi, Kanazawa, 920-1192, Japan/Department of Geology & Geophysics, University of Hawaii at Manoa, 1680 East-West Rd. Post 614, Honolulu, Hawaii 96822, USA

** 日本学術振興会海外特別研究員/カリフォルニア大学サンディエゴ校スクリプス海洋学研究所

Postdoctoral Fellowship for Research Abroad, Japan Society for the Promotion of Science/Scripps Institution of Oceanography, University of California, San Diego, 206 Vaughan Hall, MS-0244, La Jolla, CA 92093-0244, USA

*** 金沢大学大学院自然科学研究科地球環境学専攻

Division of Earth and Environmental Sciences, Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University, Kanazawa 920-1192, Japan

Corresponding author; T. Yamaguchi,
tyamaguchi@mail.ucsd.edu

はじめに

貝形虫(あるいは介形虫, オストラコーダ)は二枚貝状の炭酸カルシウムの殻(背甲と呼ばれることもある)と6~8対のキチン質の脚を持つ微小甲殻類(通常0.5~4mmの大きさ)である。深海や沿岸のような海洋, 湖沼, 水たまりのような陸水のほぼ全ての水圏に生息している。現在, 20,000種以上が生息し, 多くの種は底生生活をしている(Horne et al., 2002)。

湖底や海底の堆積物から産出する貝形虫化石群集は, 過去の水温や塩分, 水深の復元のような古環境解析や環境汚染の

Abstract

Ostracoda, a crustacean group, have valves composed of low-magnesium calcite. The magnesium/calcium (Mg/Ca) and strontium/calcium (Sr/Ca) ratios of fossil ostracodes have been used as indicators of the paleoenvironment. The Mg/Ca ratios and partition coefficients of marine ostracodes generally correlate with the water temperature of the ostracode habitat, and the Mg/Ca and Sr/Ca ratios of freshwater ostracodes have been used as a proxy for water chemistry. We reviewed previous studies on the Mg/Ca and Sr/Ca ratios of ostracode valves and obtained the following findings. (1) Diagenesis is likely to affect the Mg/Ca and Sr/Ca ratios of subfossil and fossil valves; however, it is difficult to assess the degree of diagenetic alteration using methods developed in previous studies, such as that based on the visual preservation index (VPI). Our statistic analysis, using published data, revealed no significant correlation between VPI and the Mg/Ca or Sr/Ca ratios of artificial dissolved specimens. (2) The partition coefficients of Mg/Ca and Sr/Ca ratios vary with the taxa, habitat, and phyletic group. Cypridoidea have statistically higher Mg/Ca and lower Sr/Ca partition coefficients than do Bairdioidea and Cytheroidea. Compared with marine taxa, freshwater taxa have more variable partition coefficients. The Mg/Ca partition coefficient of marine ostracodes is clearly dependent on the phyletic group at the family level. (3) The Mg/Ca and Sr/Ca partition coefficients are independent of sex but may depend on ontogenic stage. (4) The variable nature of partition coefficients in marine species indicates that Mg/Ca thermometers have an error of $\pm 2-4$ °C. (5) Spatial variations in Mg concentration within an individual valve have an effect on the Mg/Ca ratio of the whole valve. The accuracy of Mg/Ca and Sr/Ca ratios as proxies for temperature and water chemistry would be improved if the effects of diagenesis and spatial heterogeneity are evaluated quantitatively and if the partition coefficients of various taxa are available.

Keywords: Mg/Ca ratio, Sr/Ca ratio, water temperature, partition coefficient, Ostracoda

指標に利用されている(例えば, Ozawa and Kamiya, 2001; Irizuki et al., 2004, 2007; Ruiz et al., 2005; Bergin et al., 2006)。貝形虫化石群集の研究は, 地球規模の環境変動に対比される日本列島沿岸の古環境変動や生物相の変遷の解明や完新世の人為的環境改変による生物相への影響の解明に貢献してきた。

近年, 貝形虫の殻に含まれる微量元素の量に注目し Mg/Ca 比や Sr/Ca 比の変化を環境指標とする研究が行われている。1970年代後半から1980年代にかけ現生する貝形虫の殻の Mg/Ca 比や Sr/Ca 比が生息場の水温や塩分と相関があることが指摘され(Cadot and Kaesler, 1977; Chivas et al.,

1983, 1985, 1986a, b), 定量的な環境指標の確立のため研究が進められた。そして機器分析の技術が飛躍的に向上した1990年代以降, 化石のMg/Ca比やSr/Ca比の変化から古環境を復元する研究が増加した (Dwyer et al., 1995; Wansard, 1996; Ingram, 1998; Yu and Ito, 1999 など)。特に陸水域での研究が活発に行われている。一方, これらの微量元素と環境因子との相関の再検討も行われており, 殻のMg/Ca比やSr/Ca比の規制要因は水温や塩分のみではないことが明らかにされるようになってきた (Xia et al., 1997; De Deckker et al., 1999 など)。1990年代までの研究成果は, Holmes and Chivas (2002) によって包括的な総括がなされている。Holmes and Chivas (2002) のほかに, 深海や沿岸に環境を限定して貝形虫殻の微量元素の研究を総括したもの (Anadón et al., 2002b; Dwyer et al., 2002; 山田, 2002), 殻の微量元素量の変化とその吸収のメカニズムに焦点を当て研究を総括したレビューもある (Ito et al., 2003; Ito and Forester, 2009)。Holmes and Chivas (2002) 以降, 貝形虫の殻の微量元素に関する主な研究成果は, 次のものが挙げられる。1) 生息場の電気伝導度のような1990年代以前にはほとんど研究がされていない環境因子との相関関係の検討 (Wetterich et al., 2008a, b; Zhang et al., 2009 など), 2) 不純物除去のためのクリーニング方法の検討 (Jin et al., 2006; Keatings et al., 2006), 3) 様々な分類群のデータの蓄積 (Vann et al., 2005; Wetterich et al., 2008a, b; Zhang et al., 2009 など), 4) 殻内の高空間分解能の測定による微小分布の検討 (Ito et al., 2003; Morishita et al., 2007)。これらの研究成果を踏まえ, 本論では古環境指標としての貝形虫殻のMg/Ca比, Sr/Ca比の利点, 問題点についてレビューをする。これまでの報告された貝形虫の殻のMg/Ca比およびSr/Ca比のデータを集約し, 淡水棲および海棲貝形虫のMg/Ca比およびSr/Ca比と環境因子, および分類学的性質, 種間および試料内でのMg/Ca比およびSr/Ca比の変化, 試料の保存とクリーニングの方法について議論する。

本論では, 先行研究のMg/Ca比およびSr/Ca比とそれらの分配係数のデータを, 単位をモル比に統一して示し, 潮間帯以外の海棲貝形虫に関する研究で微量元素の分配係数が算出されていない場合, 殻のMg/Ca比およびSr/Ca比のデータを基に, 海水のMg/Ca比とSr/Ca比をそれぞれ5.16 mol/mol, 8.74×10^{-3} mol/molとし, 分配係数を算出した。集約するデータは生体を含む現生の標本の測定値で, 測定数が6以上のものを対象とした。他に以下のことを行った。1) Reduced Major Axis法 (RMA: Sokal and Rohlf, 1994) による水温と分配係数との回帰直線の算出, 並べ替え検定 (permutation test) による相関関係の検定を行った。先行研究での微量元素の量の測定は複数の分析機器で行われている。そして測定された微量元素の量と水温は誤差を伴う。誤差を伴う2変数の関係を直線で回帰するRMA法を採用した。2) 貝形虫種の微量元素比の分配係数から推定される水温の誤差を算定した。分配係数の偏差は, それから推定される水温に誤差を与える。しかしそれを算定した例は少ない。そこで水温を真の値と仮定し, 最小二乗法による回帰直線を

利用して, 分配係数の偏差と水温の誤差を算定した。3) 分類群, 成長ステージおよび性別による分配係数の差異の統計的検討をした。先行研究では分類群, 成長ステージおよび性別による分配係数の差異が論じられているが, 値を直接比較し議論した例は少なく, この差異の有意性については, 統計的な検討がほとんどなされていない。3つ以上のグループ間の平均値の差異は, テューキー・クレーマー検定 (Tukey-Kramer test) あるいはゲイムス・ハウエル検定 (Games-Howell test) で, 2つのグループ間の差異の検定はt検定あるいはウェルチのt検定 (Welch's t-test) で検討した。これらの検定を行う前にデータの等分散性を検討するため, 3つ以上のグループ間のデータにはバートレット検定 (Bartlett's test) を, 2つのグループ間のデータにはF検定を行った。等分散性が認定できれば, テューキー・クレーマー検定あるいはt検定を行い, できなければゲイムス・ハウエル検定あるいはウェルチのt検定を行った。

回帰直線の算出と並べ替え検定にはフリーウェアソフトPALaeotological STatistics (Hammar et al., 2001) を, その他の検定にはフリーウェアソフトR (<http://www.r-project.org>) を利用した。

本論文は金沢大学大学院博士前期課程の地球学演習で眞柴が行った論文のレビューが土台となっている。本論文で眞柴は電子線マイクロアナライザ (Electron Probe Micro-Analyser: EPMA) 分析および資料の収集に貢献し, 森下と神谷は内容の立案と総括を担い, 山口は統計解析とデータの解釈, 執筆を担当した。森下は筆頭筆者として山口と同等の責任を負う。

貝形虫の殻

貝形虫の殻を構成するのは, 炭酸塩鉱物の一種である低マグネシウム方解石である (Kesling, 1951 など)。炭酸塩鉱物 (MeCO_3) は2価の陽イオン (Me^{2+}) と炭酸イオン (CO_3^{2-}) とからなり, イオン結合で結ばれている。炭酸塩の主要成分である炭酸カルシウムは主に2つの異なる結晶形 (方解石, あられ石) をもつ。Meが Ca^{2+} よりもイオン半径の小さい Mg^{2+} (MgCO_3) の場合, 方解石形の結晶形をとり, イオン半径の大きい Sr^{2+} (SrCO_3) の場合は, あられ石形の結晶形をとる (例えば, 北野, 1988)。Meが Ca^{2+} (CaCO_3) の場合は方解石形, あられ石形両方の結晶形を取ることができる。貝形虫殻にはMgやSrが含まれている。淡水棲貝形虫 *Mytilocypris henricae* の場合, 殻中にMgは $2.03 \times 10^{-1} \sim 4.97$ mol/kg, Srは $2.67 \times 10^{-2} \sim 1.59 \times 10^{-1}$ mol/kg含まれており, そのMg/Ca比は $2.03 \times 10^{-2} \sim 4.97 \times 10^{-1}$ mol/mol, Sr/Ca比は $2.67 \times 10^{-3} \sim 1.60 \times 10^{-2}$ mol/molである (Chivas et al., 1983)。貝形虫は2枚の殻を持つが, 殻の左右でMg/Ca比およびSr/Ca比に明瞭な差はない (Wansgard et al., 1998; Dwyer et al., 2002; Holmes, 2008)。

貝形虫の背甲構造の形態やその形成様式は, 山田 (2008) によって詳細な解説がされている。本論での背甲構造の用語は, Yamada et al. (2007a, b), 山田 (2008) の定義に従う。一般に, 貝形虫の外皮はクチクラ (あるいは外骨格)

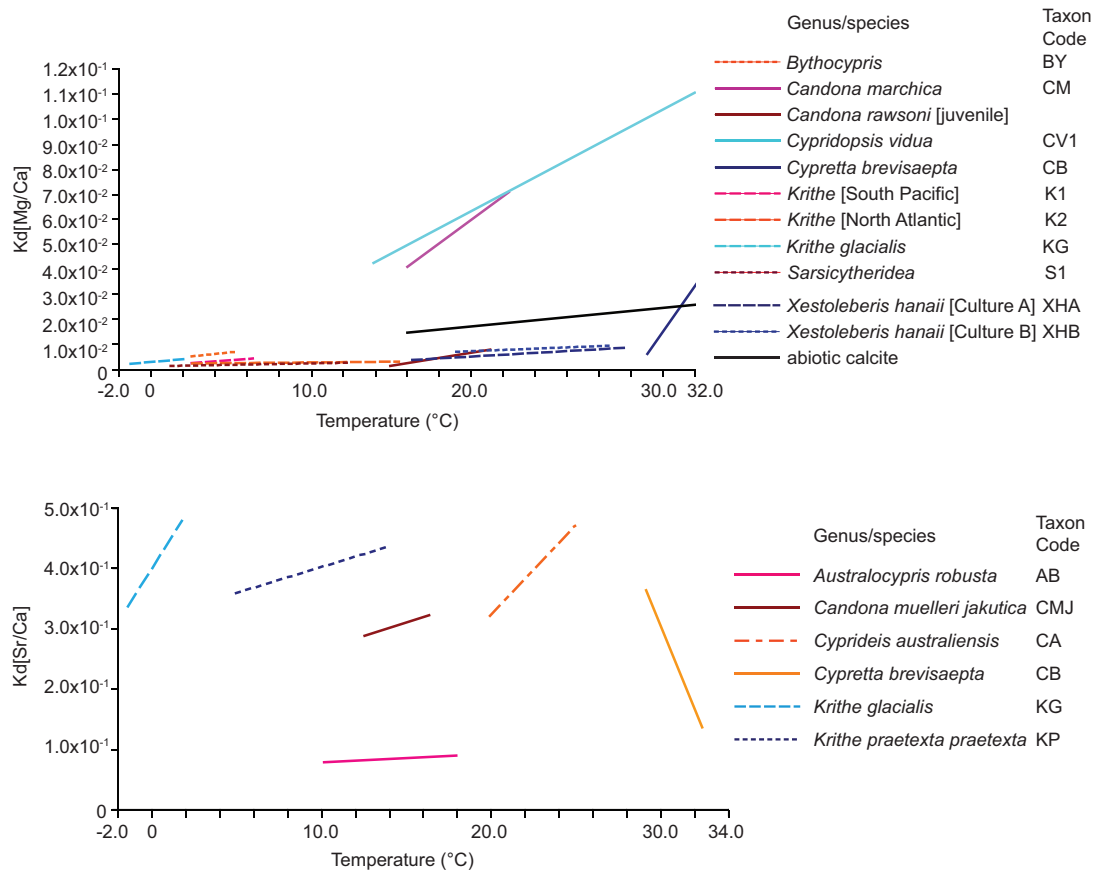


Fig. 2. Regression between water temperature and the partition coefficient of Mg/Ca ratios (K_d [Mg/Ca]). The regression of abiotic calcite is from Oomori et al. (1987). See also Table 1. 2) Regression between water temperature and the partition coefficient of Sr/Ca ratios (K_d [Sr/Ca]). See also Table 2.

る。一般に、無機的に形成された炭酸塩鉱物中の Mg, Sr 含有量は温度、溶液組成、成長速度などの様々な要因によって異なる事が知られている (Kitano et al., 1971; Mucci and Morse, 1983; Oomori et al., 1987; Morse and Bender, 1990)。

1. 古環境指標としての Mg/Ca 比

貝形虫の殻の Mg/Ca 比は、水温と生息場の海水、淡水の Mg/Ca 比に依存性がある。Chivas らは、淡水棲貝形虫 *Mytilocypris henricae* を水溶液組成、温度を制御した環境下で飼育し、貝形虫殻の Mg/Ca 比と温度に良い正の相関があることを明らかにした (Chivas et al., 1983, 1985, 1986a, b)。

海水の Mg/Ca 比は 5.16 mol/mol で、海域や水深での差異、季節的な変化がほとんどないといわれている (Chester, 1990 など)。そのため海棲の貝形虫の殻の Mg/Ca 比の水温依存性は顕著である。多くの海棲貝形虫の分配係数は水温と強い相関がある。分配係数と水温の回帰式の傾きは無機方解石のものと同じ桁数である (Fig. 2, Table 1)。これまで海棲の 5 属の殻の Mg/Ca 比と水温の相関が検討されているが、ほとんどの研究で、両者の強い相関が報告されている (Dwyer et al., 1995; Corrège and De Deckker, 1997; Ingram, 1998; Vann et al., 2004; Kondo et al., 2005; Cronin

et al., 2005a; Table 1)。Dwyer et al. (1995) は深海の *Krithe* 属の Mg/Ca 比と水温の相関を検討し、北大西洋の海底コア DSDP site 607 の 3.2 Ma 以降の底層の水温の変化を推定した。Mg/Ca 比の変化は、貝形虫化石と共産する底生有孔虫化石 *Cibicidoides wuellerstorfi* の酸素安定同位体比 ($\delta^{18}O$) の変化と一致した。そして鮮新世～更新世前期の底層の水温の変化は 41,000 年周期で起き平均 1.5 °C 程度で、第四紀後期の底層の水温の変化は 10 万年周期で起き 4.5 °C 程度であった。Corrège and De Deckker (1997) は南太平洋の珊瑚海の水深約 600 ~ 3000 m の底質から *Krithe* 属および *Bythocypris* 属を採取し、殻の Mg/Ca 比と水温の変化に相関があることを報告し、同じ海域の海底コアの化石の Mg/Ca 比を測定し過去 10 万年の水温の変化を推定した。この水温の変化の極大期と極小期は底生有孔虫化石 *C. wuellerstorfi* の $\delta^{18}O$ が示す海洋同位体ステージと一致した。このように貝形虫化石は多産するため、水温の定量的な変化を高時間分解能で推定したり、環境変化の周期性の評価の研究に利用されている。

淡水環境は水質の Mg/Ca 比の季節的な変化が大きく、地域によっても値が異なる。Yu and Ito (1999) は過去 2100 年間に堆積した北アメリカのグレートプレーンのコアの堆積物中の *Candona rawsoni* の A-1, A-2 幼体の Mg/Ca 比の変

Table 1. Regression equations between the partition coefficient of Mg/Ca and water temperature ($k_d [Mg/Ca] = a \times \text{Temperature} + b$), correlation coefficient, and results of the permutation test: n.s., not significant; * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$. For taxon codes, see Tables 2 and 3, and Appendix 1. Abbreviations: F = material collected in the field, L = material cultured in the laboratory, Lv = living specimen, Mx = mixed specimens (living and subfossils).

Slope a	Intercept b	Correlation coefficient	Permutation test	Number of analyses	Species/genus	Taxon Code	Temperature range (°C)	Salinity	Material	References	Note
7.38×10^{-4}	2.84×10^{-3}	0.763	**	43	<i>Bythocypris</i>	BY	2.25–5.04	34.6	F/?	Corrège and De Deckker (1997)	
5.0×10^{-3}	-3.44×10^{-2}	0.95	*	6	<i>Candona marchiaca</i>	CM	15, 17, 21	0.5, 3.1	F/Mx	Wansard et al. (1998)	
-7.99×10^{-2}	1.91	-0.259	n.s.	12	<i>Candona muelleri jakutica</i>	CMJ	12.6–16.4	-	F/Lv	Wetterich et al. (2008a)	
-1.2×10^{-2}	2.0×10^{-2}	-0.30	n.s.	8	<i>Candona neglecta</i>	CN	9.5–17.0	0.5, 0.8	F/Mx	Wansard et al. (1998)	
2.3×10^{-4}	-1.5×10^{-3}	0.28	n.s.	23	<i>Candona rawsoni</i>	CR1	15, 25	1.14–9.23	L/Lv	Engstrom and Nelson (1991)	Adult
-2.68×10^{-2}	7.76×10^{-1}	0.589	*	22	<i>Candona rawsoni</i>	CR2	14.0–19.9	0.92–9.23	F/Lv	Engstrom and Nelson (1991)	Adult
4.0×10^{-4}	6.6×10^{-4}	0.22	n.s.	28	<i>Candona rawsoni</i>	CR3	7.0–24.8	-	F/Lv	Xia et al. (1997)	Adult, Coldwater Lake
2.1×10^{-4}	8.6×10^{-4}	0.33	n.s.	34	<i>Candona rawsoni</i>	CR4	7.8–25.0	-	F/Lv	Xia et al. (1997)	Adult, Roslyn Lake
1.11×10^{-3}	-1.48×10^{-2}	0.619	**	24	<i>Candona rawsoni</i>	-	14.0–19.9	0.92–9.23	F/Lv	Engstrom and Nelson (1991)	Juvenile
2.3×10^{-5}	5.2×10^{-4}	0.35	n.s.	15	<i>Candona rawsoni</i>	-	7.0–24.8	-	F/Lv	Xia et al. (1997)	Juvenile, Coldwater Lake
8.2×10^{-5}	3.2×10^{-3}	0.46	n.s.	14	<i>Candona rawsoni</i>	-	7.8–25	-	F/Lv	Xia et al. (1997)	Juvenile, Roslyn Lake
4.92×10^{-2}	-7.08×10^{-1}	0.148	n.s.	12	<i>Candona weltermi</i>	CW	14.2–22.6	-	F/Lv	Wetterich et al. (2008a)	

Slope a	Intercept b	Correlation coefficient	Permutation test	Sample size	Species/genus	Taxon Code	Temperature range (°C)	Salinity	Material	References	Note
3.9×10^{-4}	-5.1×10^{-3}	0.39	n.s.	24	<i>Cyprideis australiensis</i>	CA	20, 25	14.5–70.0	F/Lv	De Deckker et al. (1999)	
3.6×10^{-3}	-4.6×10^{-3}	0.72	**	98	<i>Cypridopsis vidua</i>	CV1	13–32	-	F/Lv	Palacios-Fest and Dettman (2001)	
9.71×10^{-3}	-2.78×10^{-1}	0.794	**	31	<i>Cyprretta brevisaepta</i>	CB	29.2–32.5	0.305–0.436	F/Lv	Holmes et al. (1995)	
5.7×10^{-4}	-2.4×10^{-4}	0.44	n.s.	6	<i>Fabaeformiscandona inaequivallis</i>	FI	10.4–14.3	-	F/Lv	Wetterich et al. (2008a)	
9.8×10^{-4}	-3.8×10^{-3}	0.028	n.s.	36	<i>Fabaeformiscandona pedata</i>	FP	5.9–15.3	-	F/Lv	Wetterich et al. (2008b)	
-1.1×10^{-2}	2.58×10^{-1}	-0.378	n.s.	20	<i>Herpetocypris brevicaudata</i>	HB	12.6–23.4	-	L/Lv	Wansard and Roca (1998)	Adult
6.8×10^{-4}	3.40×10^{-2}	-0.575	n.s.	12	<i>Herpetocypris brevicaudata</i>	-	12.6–23.4	-	L/Lv	Wansard and Roca (1998)	Juvenile
1.07×10^{-2}	3.85×10^{-2}	0.225	n.s.	64	<i>Herpetocypris intermedia</i>	HI	8.3–24.6	-	F/?	Wansard and Mezquita (2001)	
5.11×10^{-4}	7.54×10^{-4}	0.724	**	54	<i>Krithe</i>	K1	2.25–5.87	34.6	F/?	Corrège and De Deckker (1997)	
2.61×10^{-4}	1.05×10^{-3}	0.860	**	64	<i>Krithe</i>	K3	2.3–14.5	-	F/Mx	Dwyer et al. (1995)	
5.79×10^{-4}	2.32×10^{-3}	0.223	**	161	<i>Krithe glacialis</i>	KG	-1.36–1.80	33.92–34.95	F/Mx	Cronin et al. (1996)	
1.15×10^{-4}	1.90×10^{-3}	0.490	n.s.	11	<i>Krithe praetexta praetexta</i>	KP	5, 10, 14	32.7–34.8	L/Lv	Majoran et al. (1999)	Adult
7.89×10^{-5}	2.32×10^{-3}	0.414	n.s.	15	<i>Krithe praetexta praetexta</i>	-	5, 10, 14	32.7–34.8	L/Lv	Majoran et al. (1999)	A-1
1.2×10^{-4}	6.6×10^{-4}	0.83	**	25	<i>Sarsicytheridea</i>	S1	1.0–11.5	33.8–35.3	F/?	Ingram (1998)	
3.87×10^{-4}	-2.82×10^{-3}	0.715	**	16	<i>Xestoleberis hanaii</i>	XHA	15.3–27.8	34.0	L/Lv	Kondo et al. (2005)	Culture A
2.66×10^{-4}	1.71×10^{-3}	0.912	**	27	<i>Xestoleberis hanaii</i>	XHB	17.9–26.9	34.0	L/Lv	Kondo et al. (2005)	Culture B

化を調べた。この種の A-1, A-2 幼体は夏季に多産する。検討の結果、日射量の 420, 218, 143 年周期に相当する Mg/Ca 比の周期的な増減が認められた。この変化は過去 2,000 年間の大気放射性炭素同位体比 ($\Delta^{14}\text{C}$) の変化、グリーンランドの氷床コア GISP2 の $\delta^{18}\text{O}$ の変化と対比でき、日射量の極小期がグリーンランドでの寒冷期、グレートプレーンでの乾燥期に対応することを明らかにした。そして、これは太陽の日射量の変化による 100 年スケールでの気候のテレコネクションを示す。このように淡水の貝形虫化石でも詳細な環境変動の復元の研究が可能である。

前述のように 1980 年代に、殻の Mg/Ca 比と水温に相関があることが、淡水の貝形虫の研究で明らかにされた。しかし 1990 年代には、淡水環境では貝形虫殻の Mg/Ca 比と水温の相関が弱いことが明らかにされるようになった。Engstrom and Nelson (1991) は、アメリカ合衆国グレートプレーンのコールドウォーター湖、ロズリン湖を含む 10 の湖の *Candona rawsoni* の殻の Mg/Ca 比と温度との相関を示した。さらに水溶液組成と殻の Mg/Ca 比の関係を直線回帰した結果、水溶液組成の Mg/Ca 比が 0 の時の殻 Mg/Ca 比が 0 以上になることに注目し、貝形虫の殻のカルサイトは熱力学的なカルサイトの形成とは異なることを指摘した。Xia et al. (1997) は、Engstrom and Nelson (1991) も研究をしたコールドウォーター湖、ロズリン湖で採取した *Candona rawsoni* の殻の Mg/Ca 比および Sr/Ca 比、湖水の水温および化学組成の計測を行い、殻の Mg/Ca 比が水温と水の Mg/Ca 比に相関があることを確認した。しかし彼らは、水の Mg/Ca 比が高いコールドウォーター湖 (Mg/Ca 比: 32 ~ 38 mol/mol) では殻の Mg/Ca 比の変化は水温と相関を示さなくなることから、分配係数の温度依存性が保証されるための水の Mg/Ca 閾値がある可能性を指摘した。Wansard et al. (1998) はスペイン、フランス、ベルギーの 8 つ湖沼から採取した *Candona* 属 3 種と Engstrom and Nelson (1991) が示した *C. rawsoni* の殻の Mg/Ca 比と生息場の水の Mg/Ca 比を検討し、水の Mg/Ca 比が 2 mol/mol 未満では、分配係数と水の Mg/Ca 比は負の相関があるが、水の Mg/Ca 比が 2 mol/mol 以上の時、分配係数がほぼ一定なることを示した。このことから彼らは殻の Mg/Ca 比には水温だけでなく水の Mg/Ca 比も寄与すると主張した。De Deckker et al. (1999) はオーストラリア南部のソルトディップ湖で採取した *Cyprideis australiensis* の飼育実験をし、殻の Mg/Ca 比と水温に強い相関はないが、分配係数と水の Mg/Ca 比に強い相関があることを確認した。以上の結果から殻の Mg/Ca 比は水溶液の Mg/Ca 比と平衡ではないことが指摘されている (Xia et al., 1997; De Deckker et al., 1999 など)。実際に多くの淡水棲貝形虫種の分配係数は水温と相関がない (Xia et al., 1997; De Deckker et al., 1999 など; Table 1)。水温と Mg/Ca 比の分配係数に相関が認められる場合でも、淡水棲貝形虫の分配係数と水温の回帰式の傾きは、海棲のものや無機方解石のものに比べ約 10 倍程度大きい (Fig. 2, Table 1)。これらのことに加え、水の Mg/Ca 比が季節的、地域的に顕著に異なり、過去の水の Mg/Ca 比が明らか

かではない淡水環境では古水温の推定は困難である。これらが明らかになってきた 1990 年代後半から、淡水棲貝形虫の殻の Mg/Ca 比は水温のプロキシではなく、堆積物や化石群集の組成の変化と対比させて、生息場の水の Mg/Ca 比の復元や水中の炭酸カルシウムの沈殿のような水質の変化の推定に利用されている (Haskell et al., 1996; Ingram et al., 1998; Anadón et al., 2002a; Zhang et al., 2009 など)。

Haskell et al. (1996) は、ノースダコタ州のロズリン湖で過去 12,000 年間に堆積した試料中の自生炭酸カルシウムの Sr/Ca 比と貝形虫化石 *Candona* 属の Mg/Ca 比および Sr/Ca 比の変動を調べた。彼らは貝形虫の殻の Mg/Ca 比および Sr/Ca 比の変動は湖底で沈殿した鉱物種の変化と関連があると考えた。例えば塩分が高い時期には、貝形虫殻の Sr/Ca 比は極小となり Mg/Ca 比が極大になる一方で自生炭酸カルシウムの Sr/Ca 比が極大になっており、あられ石の沈殿が起きたことが示唆された。

近年の淡水域の古環境研究では、貝形虫殻の Mg/Ca 比および Sr/Ca 比は、ある環境因子の指標として単独に利用されることはなく、酸素・炭素安定同位体比 ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$) や群集組成など他の指標と組み合わせて利用されている。淡水棲貝形虫殻の Mg/Ca 比および Sr/Ca 比は、塩分や水温など複数の因子を示す環境指標 (Mischke and Wünnemann, 2006; Zhang et al., 2009 など) あるいは生息場の水溶液中の Mg/Ca 比および Sr/Ca 比の環境指標 (Anadón et al., 2002a, 2008 など) として利用されている。

2. 古環境指標としての Sr/Ca 比

海水の Sr/Ca 比は平均 8.74×10^{-3} mol/mol で、海域および水深による差は 1 ~ 2 % であり、淡水環境に比べて小さい (de Villiers et al., 1995)。ほとんどの海棲の貝形虫の殻の Sr/Ca 比と水温には相関が認められない (Fig. 2, Table 2)。Dwyer et al. (2002) は、海棲の *Krithe* 属を 12 ~ 27 °C の温度範囲で飼育し、殻の Sr/Ca 比を測定した。その結果 Sr/Ca 比の変化は水温の変化と相関がないことを示した。Ingram (1998) は北海の水深 29 ~ 200 m の底質に棲む *Sarsicytheridea* の Sr/Ca 比と水温との関係を検討したが、Sr/Ca 比のばらつきが大きく、温度との相関は明確ではないことを示した。

研究の初期には淡水貝形虫の殻の Sr/Ca 比の変化は塩分および水温の変化と相関があることが指摘されていた (Chivas et al., 1983, 1985, 1986a, b) が、1990 年代後半以降に否定されるようになった。Xia et al. (1997) は、アメリカ合衆国ノースダコタ州の塩湖に生息する *Candona rawsoni* の殻の微量元素量と生息場の水の微量元素量および水温との関係を検討し、殻の Sr/Ca 比は水温の変化とは無関係であるが、殻の Mg 含有量の増加に関連して Sr 含有量が増加すると考えた。De Deckker et al. (1999) は、オーストラリア南部のソルトディップ湖で採取した *Cyprideis australiensis* を 20 °C と 25 °C の水温で飼育し、殻の微量元素量を検討し、殻の Sr/Ca 比と水温の相関がないことを示したが、水温 5 °C 以下では殻の Sr/Ca 比と水温は弱い相関があることを認めた。このように殻の Sr/Ca 比と水温の強い相関は否定され

Table 2. Regression equations between the partition coefficient of Sr/Ca and water temperature ($Kd [Sr/Ca] = a \times \text{Temperature} + b$), correlation coefficient, and results of the permutation test: n.s., not significant; * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$. For taxon codes, see Tables 1 and 3, and Appendix 1. Abbreviations: F = material collected in the field, L = material cultured in the laboratory, Lv = living specimens, Mx = mixed specimens (living and subfossils).

Slope a	Intercept b	Correlation coefficient	Permutation test	Number of analyses	Species/genus	Taxon Code	Temperature range (°C)	Salinity	Material	References	Note
1.50×10^{-3}	6.09×10^{-2}	0.0194	*	17	<i>Australocypris robusta</i>	AR	10.2, 13.5, 18.0	71.5, 72.7, 74.0	F/Lv	Chivas et al. (1985)	
-1.3×10^{-2}	5.6×10^{-1}	-0.82	n.s.	13	<i>Candona marchica</i>	CM	15, 17, 21	0.5, 3.1	F/Mx	Wansard et al. (1998)	
8.89×10^{-3}	1.75×10^{-1}	0.383	*	12	<i>Candona muelleri jakutica</i>	CMJ	12.6–16.4	-	F/Lv	Wetterich et al. (2008a)	
1.1×10^{-2}	2.6×10^{-1}	0.93	n.s.	5	<i>Candona neglecta</i>	CN	9.5, 17.0	0.5, 0.8	F/Mx	Wansard et al. (1998)	
2.2×10^{-2}	-4.7×10^{-2}	0.044	n.s.	28	<i>Candona rawsoni</i>	CR3	7.0–24.8	-	F/Lv	Xia et al. (1997)	Adult [Coldwater]
3.7×10^{-3}	2.5×10^{-1}	0.087	n.s.	34	<i>Candona rawsoni</i>	CR4	7.8–25	-	F/Lv	Xia et al. (1997)	Adult [Roslyn Lake]
-1.2×10^{-2}	6.1×10^{-1}	-0.30	n.s.	23	<i>Candona rawsoni</i>	CR1	15, 25	1.14–9.23	L/Lv	Engstrom and Nelson (1991)	Adult
-2.68×10^{-2}	7.76×10^{-1}	-0.205	n.s.	22	<i>Candona rawsoni</i>	CR2	14.0–19.9	0.92–9.23	F/Lv	Engstrom and Nelson (1991)	Adult
1.5×10^{-2}	3.7×10^{-1}	0.21	n.s.	12	<i>Candona rawsoni</i>	-	7.0–24.8	-	F/Lv	Xia et al. (1997)	Juvenile [Coldwater]
-1.8×10^{-3}	3.4×10^{-1}	-0.37	n.s.	14	<i>Candona rawsoni</i>	-	7.8–25.0	-	F/Lv	Xia et al. (1997)	Juvenile [Roslyn Lake]
-5.28×10^{-2}	1.22	-0.0269	n.s.	24	<i>Candona rawsoni</i>	-	14.0–19.9	0.92–9.23	F/Lv	Engstrom and Nelson (1991)	Juvenile
1.92×10^{-2}	-8.80×10^{-3}	0.468	n.s.	12	<i>Candona welterni</i>	CW	14.2–22.6	-	F/Lv	Wetterich et al. (2008a)	
3.0×10^{-2}	-2.8×10^{-1}	0.45	*	28	<i>Cyprideis australiensis</i>	CA	20–25	14.5–70.0	F/Lv	De Deckker et al. (1999)	
-6.91×10^{-2}	2.38	-0.467	**	31	<i>Cyprretta brevisaepta</i>	CB	29.2–32.5	0.305–0.436	F/Lv	Holmes et al. (1995)	
2.0×10^{-2}	1.2×10^{-1}	0.50	n.s.	6	<i>Fabaeformiscandona inaequivahvis</i>	FI	10.4–14.3	-	F/Lv	Wetterich et al. (2008a)	
-2.1×10^{-2}	5.2×10^{-1}	-0.10	n.s.	36	<i>Fabaeformiscandona pedata</i>	FP	5.9–15.3	-	F/Lv	Wetterich et al. (2008b)	
6.86×10^{-3}	5.49×10^{-2}	0.269	n.s.	20	<i>Herpetocypris brevicaudata</i>	HB	12.6–23.4	-	L/Lv	Wansard and Roca (1998)	
4.47×10^{-2}	3.97×10^{-1}	0.362	**	161	<i>Krithe glacialis</i>	KG	-1.36–1.80	33.92–34.95	F/Mx	Cronin et al. (1996)	
8.57×10^{-3}	3.15×10^{-1}	0.962	**	11	<i>Krithe praetexta praetexta</i>	KP	5, 10, 14	32.7–34.8	L/Lv	Majoran et al. (1999)	Adult
6.07×10^{-3}	3.43×10^{-1}	0.482	n.s.	15	<i>Krithe praetexta praetexta</i>	-	5, 10, 14	32.7–34.8	L/Lv	Majoran et al. (1999)	A-1
6.5×10^{-3}	3.3×10^{-1}	0.37	n.s.	24	<i>Sarsicytheridea</i>	SI	1.0–11.5	33.8–35.3	F/?	Ingram (1998)	

ている (Fig. 2, Table 2).

ただし, Ito et al. (2003) や Ito and Forester (2009) によれば, 殻の Sr/Ca 比は水溶液中の Sr/Ca 比やイオン強度と相関がある. Sr の取り込みも Mg と同様に, 水の Sr/Ca 比が低い場合には, 高い場合に比べ Sr が殻に取り込まれにくくなるので, 殻への Sr の取り込みには, 水溶液の Sr/Ca 比の閾値があることが指摘されている (Xia et al., 1997; Wetterich et al., 2008a).

水のイオン強度の指標である電気伝導度 (electrical conductivity) との関連性も検討されている. Wansard and Mezquita (2001) は, スペイン東部のマイクレス鉱泉産の *Herpetocypris intermedia* の殻の Sr/Ca 比が電気伝導度と相関がある (相関係数: $r = 0.81$) ことを示した. Zhang et al. (2009) は, チベット高原北部のスガン湖に生息する *Eucypris inflata* の殻の Sr/Ca 比が生息場の電気伝導度と相関があること ($r = 0.992$) を示した. しかしシベリア平原の淡水棲貝形虫 *Candona wetlneri* や *Fabaeoformiscandona pedata* の殻の Sr/Ca 比は電気伝導度と相関が認められない (Wetterich et al., 2008a, b).

最近の淡水域の古環境研究では, 貝形虫の殻の Sr/Ca 比は生息場の水溶液の Sr/Ca 比の指標として利用されている (Haskell et al., 1996; Anadón et al., 2002a, 2008 など). 淡水の Sr/Ca 比は, 降雨, 蒸発, 地下水や他の河川水の流入によって変化するため, 貝形虫の殻の Sr/Ca 比を殻の Mg/Ca 比や化石群集の組成, 堆積岩の鉱物および化学組成の層序変化と組み合わせることで, 淡水の環境変化の復元が行われている.

貝形虫の殻の Mg/Ca 比および Sr/Ca 比の規制要因

貝形虫の殻の Mg/Ca 比, Sr/Ca 比は, 生息場の水温やイオン濃度と相関があり, これらの環境の指標として利用されている. 本項では, これら以外の殻の Mg/Ca 比, Sr/Ca 比の規制要因について述べる.

1. クリーニング手法による殻の Mg/Ca 比および Sr/Ca 比への影響

Mg/Ca 比および Sr/Ca 比の測定前に, 貝形虫標本に付着した軟体部や粘土鉱物, 有機物を除去するための次亜塩素酸ナトリウム (NaOCl) 水溶液を用いたクリーニングは, 一般に次の手順で行われる.

- 1) イオン交換水に浸した試料から光学顕微鏡下で針や筆でキチン質の組織や付着物を除去する.
- 2) 次亜塩素酸ナトリウムの希釈水溶液 (濃度: 5%程度) に 10~30 分程度浸し, キチン質の組織や付着物を除去する.
- 3) イオン交換水に浸して 2~3 回洗浄する.

貝形虫は Mg や Sr を含むキチン質の膜が殻を覆っている (Chivas et al, 1983). *Mytilocypris henriae* の膜には炭酸カルシウム 1 kg あたり Mg が 2.80~3.35 mol, Sr が 84.5~91.3 mmol 含まれており, Mg/Ca 比は 2.80×10^{-1} ~ 3.40×10^{-1} mol/mol, Sr/Ca 比は 8.47×10^{-3} ~ 9.14×10^{-3} mol/mol である (Chivas et al, 1983). 特に現生試料の

殻の微量元素の測定には, このキチン質の膜を取り除く必要がある (Ito et al., 2003 など). 一方, 薬品を使用した場合, 殻の溶解と微量元素の量が変化することが指摘されている (Pingitore et al., 1993). そのため薬品処理を行わないことが推奨されており (Holmes and Chivas, 2002; Ito et al., 2003; Keatings et al., 2006 など), 実際に薬品処理が実施されないことがある (Chivas et al., 1986a; Holmes et al., 1995; De Deckker et al., 1999; Wetterich et al., 2008a, b など; Table 3). 薬品処理には次亜塩素酸ナトリウム水溶液が利用される (Ingram, 1998; Kondo et al., 2005) が, 過酸化水素水 (H_2O_2) もよく利用されている (Engstrom and Nelson, 1991; Corrège and De Deckker, 1997; Xia et al., 1997; Wansard and Roca, 1998; Wansard et al., 1998; Wansard and Mezquita, 2001; Palacios-Fest and Dettman, 2001; Table 3). Keatings et al. (2006) はクリーニング時に利用する薬品による貝形虫の殻の化学組成の変化を調べるため, ジャマイカの完新統産の淡水棲 *Cypretta brevisaepta* について, 5%の次亜塩素酸ナトリウム水溶液に 4 時間浸した場合, 5%の過酸化水素水溶液に 80℃で 15 分浸した場合, 塩酸ヒドロキシルアミン (H_4NOCl) 水溶液に 80℃で 30 分浸した場合, 亜ジチオン酸ナトリウム ($Na_2S_2O_4$) 水溶液に 80℃で 30 分浸した場合, 薬品処理をしていない場合の殻の質量, Mg/Ca 比と Sr/Ca 比を比較した. Mg/Ca 比と Sr/Ca 比の測定には誘導結合プラズマ発光分光分析装置 (Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry: ICP-AES) が使われた. その結果, これらの薬品を利用した場合, 殻の重量の減少が確認され, 薬品が殻を溶解させることが判明した. 過酸化水素水を使って処理した場合, 次亜塩素酸ナトリウム水溶液を使用した場合に比べ, Mg/Ca 比の平均値は 2%増加し, 95%の信頼限界の区間は 4.5 倍に, Sr/Ca 比の平均値は 31%減少し, 95%の信頼限界の区間は 18 倍に広がることを示された. この違いは Mg/Ca 比の平均値の比較には大きな影響はないが, Sr/Ca 比の平均値の比較, 水温との相関や回帰式の算定には大きな影響を及ぼす. 同様の違いは亜ジチオン酸ナトリウム溶液を用いた場合にも認められたが, 塩酸ヒドロキシルアミン溶液を用いた場合には認められなかった. Dywer et al. (2002) も次亜塩素酸ナトリウム水溶液を用いたクリーニング法が最も適切であると報告しており, この Keatings et al. (2006) の実験結果と調和的である. Keatings et al. (2006) は, この対照実験で使った試料の殻表面の SEM による観察も行った. 彼らは 80℃の塩酸ヒドロキシルアミン水溶液に 30 分浸した試料と 80℃の亜ジチオン酸ナトリウム水溶液に 30 分浸した試料の表面に小さな穴が生じたことを報告した. この実験と観察により Keatings et al. (2006) は薬品によるクリーニングを行う場合, 次亜塩素酸ナトリウム水溶液を利用することを推奨している.

これらの薬品処理の方法のほかに, 殻に付着した粘土鉱物の除去のため, 試料をメタノール (CH_3OH) 水溶液中に浸し, 1~2 分程度, 超音波洗浄器で洗浄する方法がある (Barker et al., 2003). Jin et al. (2006) は, この方法を含

めた6つの方法でクリーニングを行い、貝形虫殻の質量、Mg/Ca 比および Sr/Ca 比を比較検討した。6つの方法は、1) 筆を使って付着物や不純物を除去した方法、その上で、2) 超純水に浸け1~2分程度、超音波洗浄器で洗浄する方法、3) 30%の過酸化水素水溶液に20分間浸ける方法、4) 80℃の塩酸ヒドロキシルアミン水溶液 (H₃NO.HCl) に20分間浸けるの方法、5) 80℃の亜ジチオン酸ナトリウム (Na₂O₄S₂) 水溶液に20分間、6) メタノール水溶液中に浸し1~2分程度、超音波洗浄器で洗浄する方法である。微量元素量の測定には ICP-AES が使われた。実験の結果、(6)の方法では(1)の方法に比べ、Mg/Ca 比の減少量が10~36%と最大になったため、彼らは有効なクリーニングの方法であると結論づけた。そして Jin et al. (2006) は、筆や針による付着物除去を行った後、メタノール水溶液に浸し超音波洗浄する方法を推奨した。しかし超音波洗浄は殻を破壊し、試料の回収が困難になるため、貝形虫の研究では利用されないことがある (Cronin et al., 2005a)。

洗浄に利用されるイオン交換水も Mg/Ca 比を変化させる可能性がある。Dwyer et al. (2002) は pH 約7のイオン交換水は pH 約8のものに比べ貝形虫の殻の炭酸カルシウムを溶解させやすいことを指摘した。Mg は高い pH の水溶液中では Mg(OH)₂ として存在し移動しにくい、低い pH の水溶液中では Mg²⁺ となり移動しやすい (Lewis and Evans, 2001)。

2. 試料の保存状態による殻の Mg/Ca 比および Sr/Ca 比への影響

貝形虫の殻の化学組成を環境指標として用いる場合、保存状態の良い殻のみに限定し測定する必要がある (Holmes, 1992; Keatings et al., 2002)。殻形成後に殻の化学組成に影響を与える要因として、堆積物の固着などによる殻表面からの混染や、続成変質によるコーティング物質の形成、溶解、再結晶が考えられる (例えば, Holmes, 1996; De Deckker et al., 1999; Dwyer et al., 2002; Holmes and Chivas, 2002; Vann et al., 2004)。実際に殻の保存状態によって殻の Mg 含有量、Mg/Ca 比および Sr/Ca 比が変化することが報告されている。De Deckker et al. (1999) は、オーストラリア、カーベンタリア湾の堆積物コアから産出した *Cyprideis* 属貝形虫の殻には、部分的溶解が認められ、その殻の Mg 量は保存の良い殻よりも低く、Sr 量は変わらないことを報告している。Vann et al. (2004) はアメリカ合衆国東岸のチェサピーク湾の潮間帯のアマモ場から採取した *Loxococoncha matagordensis* の新しい殻と汚れた古い殻の Mg/Ca 比、Sr/Ca 比を比較した。汚れた古い殻の Mg/Ca 比および Sr/Ca 比は新しい殻に比べ低いことを報告した。

貝形虫の殻の保存の客観的な評価基準として、殻標本の色調と破損の度合いを評価した visual preservation index (VPI) が提案されている (Dwyer et al. 1995)。VPI は殻の保存状態を7段階に分けた指標で、その基準は以下の通りである。

- VPI 1: 透明な標本
- VPI 2: やや透明な標本

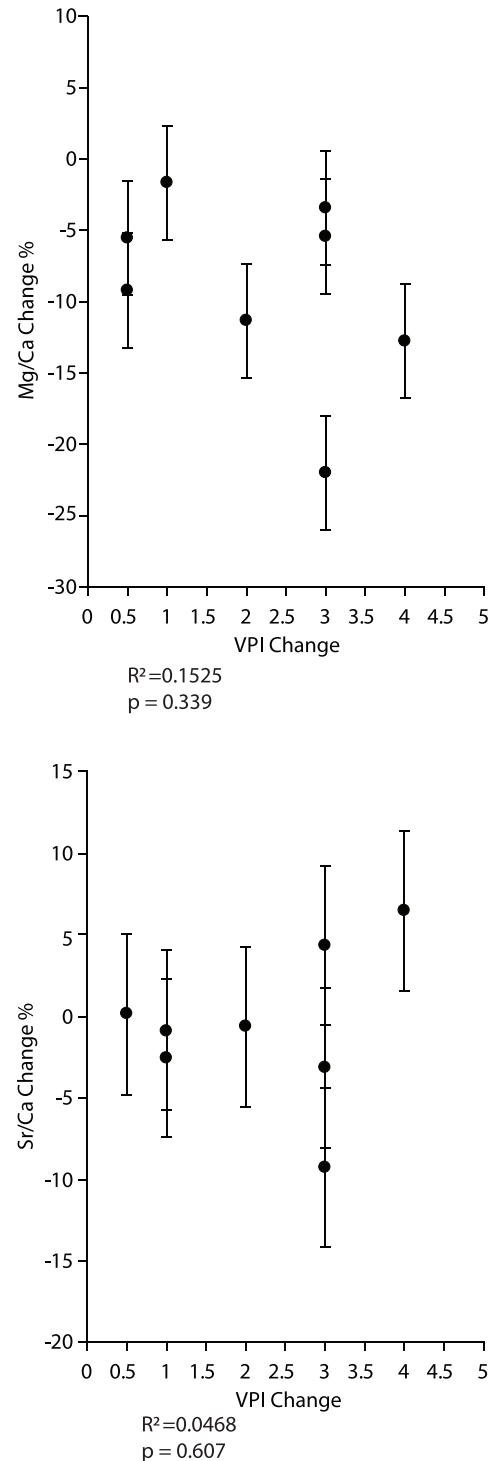


Fig. 3. Changes in the Visual Preservation Index (VPI) vs. changes in the Mg/Ca and Sr/Ca ratios of ostracode valves. Data are based on Dwyer et al. (2002), who examined VPI and these ratios for dissolved carapaces. R² and p are the mean correlation coefficient and the p-value obtained from the permutation test, respectively.

- VPI 3: やや半透明な標本 (VPI 2 と VPI 4 の中間)
- VPI 4: 半透明な標本
- VPI 5: やや半透明な標本 (VPI 4 と VPI 6 の中間)

VPI 6: やや不透明な標本

VPI 7: 殻が不透明あるいは白色で破損している標本

Dwyer et al. (2002) は深海棲 *Krithe* 属との浅海棲 *Loxococoncha* 属の殻をイオン交換水に浸け、浸けた時間と VPI, 殻重量, Na/Ca 比, Mg/Ca 比, Sr/Ca 比の変化を実験的に示した。彼らはこの実験で合併の試料のうち、イオン交換水に浸けた左殻の微量元素量比とイオン交換水に浸けていない殻の右殻の微量元素量比との差異および VPI の差異を測定し、これらの差異とイオン交換水に浸けた時間の関係を検討した。この研究によれば、イオン交換水に 1~2 時間つけた殻の VPI の変化は 1 段階であったのに対して、70 時間つけたものは最大 4 段階向上した。また殻重量は、70 時間つけたものでは最大 60% も減少し、*Krithe* 属、*Loxococoncha* 属ともに殻がもろく壊れやすくなるという結果となった。殻の Mg/Ca 比, Na/Ca 比は実験時間とともに減少したが、Sr/Ca 比には変化が認められていない。この実験から VPI が保存の指標になりうること、殻の Mg は殻の溶解の影響を受けやすく、Sr は比較的溶解の影響を受けにくいことが示唆された。

化石試料の Mg/Ca 比および Sr/Ca 比の研究では、VPI と Mg/Ca 比および Sr/Ca 比の相関を検討することで、Mg/Ca 比および Sr/Ca 比への続成作用の影響の有無を推定している (Dwyer et al., 1995; Cronin et al., 1996; Ingram, 1998; Keatlings et al., 2002)。これまでの研究では VPI と微量元素比に明瞭な相関は認められておらず、続成作用による殻の微量元素の変化は起きていないと結論づけられている。Dwyer et al. (1995) は鮮新世と完新世の深海棲 *Krithe* 属の VPI と Mg/Ca 比との関係を調べ、VPI と Mg/Ca 比には弱い負の相関があることを示した。しかし、研究対象の海域では水温の変化が大きかったと推定されること、同じ試料の VPI と Sr/Ca 比に相関がないことから、彼らは、続成作用は化石試料の Mg/Ca 比の変化に大きく寄与していないと主張した。Ingram (1998) はイングランド東沖の水深 70 m のコアから得られた更新世の浅海棲 *Sarsicytheridea* の Mg/Ca 比と VPI の関係を検討し、相関がないことから続成作用は Mg/Ca 比に影響していないと解釈した。Keatlings et al. (2002) はジャマイカのウォーリーウォッシュ・グレート沼で採取されたコアの完新世の *Cyprretta brevisaepta* の VPI と Mg/Ca 比および Sr/Ca 比の相関を検討したが、両者に相関は見られなかった。そして彼らは初期の続成作用は殻の化学組成に影響しないと考えた。実験や野外での殻の保存状態の観察は、殻の溶解が殻の Mg/Ca 比および Sr/Ca 比を変化させることを示唆するにもかかわらず、化石試料を用いた研究では、殻の溶解作用の影響が排除されている。この矛盾を解決する一つの方法は VPI と殻の Mg/Ca 比および Sr/Ca 比の関係を実験で検討することである。そこで我々は前述の Dwyer et al. (2002) のデータを用い VPI の変化量と殻の Mg/Ca 比および Sr/Ca 比の変化量の関係を統計的に検討した。その結果、VPI の変化量と殻の Mg/Ca 比および Sr/Ca 比の変化量に相関は認められなかった (Fig. 3)。続成作用を受けた殻の VPI と、その Mg/Ca (あるいは Sr/Ca) 比に負の相関があるならば、VPI の変化量とこれらの微量元素量比の変化量に負の相

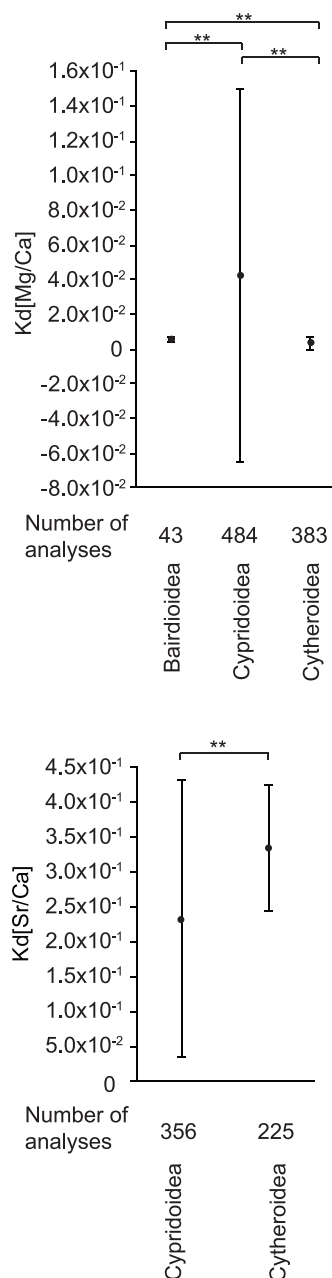


Fig. 4. Mean values and two standard deviations of Kd [Mg/Ca] and Kd [Sr/Ca] for ostracode superfamilies. Results of the Games-Howell and Welch's t-tests: ** $p < 0.01$ (see also Appendix 1). The data are from adult specimens of the following taxa: *Candona marchica*, *C. neglecta* (Wansard et al., 1998), *C. rawsoni* (Engstrom and Nelson, 1991; Xia et al., 1997), *C. muelleri jakutica*, *C. weltersi* (Wetterich et al., 2008a), *Cyprretta brevisaepta* (Holmes et al., 1995), *Cypridopsis vidua* (Palacios-Fest and Dettman, 2001), *Eucypris inflata* (Zhang et al., 2009), *Australocypris robusta* (Chivas et al., 1985), *Fabaeformiscandona inaequivalvis* (Wetterich et al., 2008a), *F. pedata* (Wetterich et al., 2008b), *Herpetocypris brevicaudata* (Wansard and Roca, 1998), *H. intermedia* (Wansard and Mezquita, 2001), *Mytilocypris henricae*, *M. mytiloides*, *M. splendida* (Chivas et al., 1986b), *Cyprideis australiensis* (De Deckker et al., 1999), *Sarsicytheridea* (Ingram, 1998), *Bythocypris* (Corrège and De Deckker, 1997), *Krithe* (Dwyer et al., 1995; Corrège and De Deckker, 1997), *K. glacialis* (Cronin et al., 1996), *K. praetexa praetexa* (Majoran et al., 1999), and *Xestoleberis hawaii* (Kondo et al., 2005).

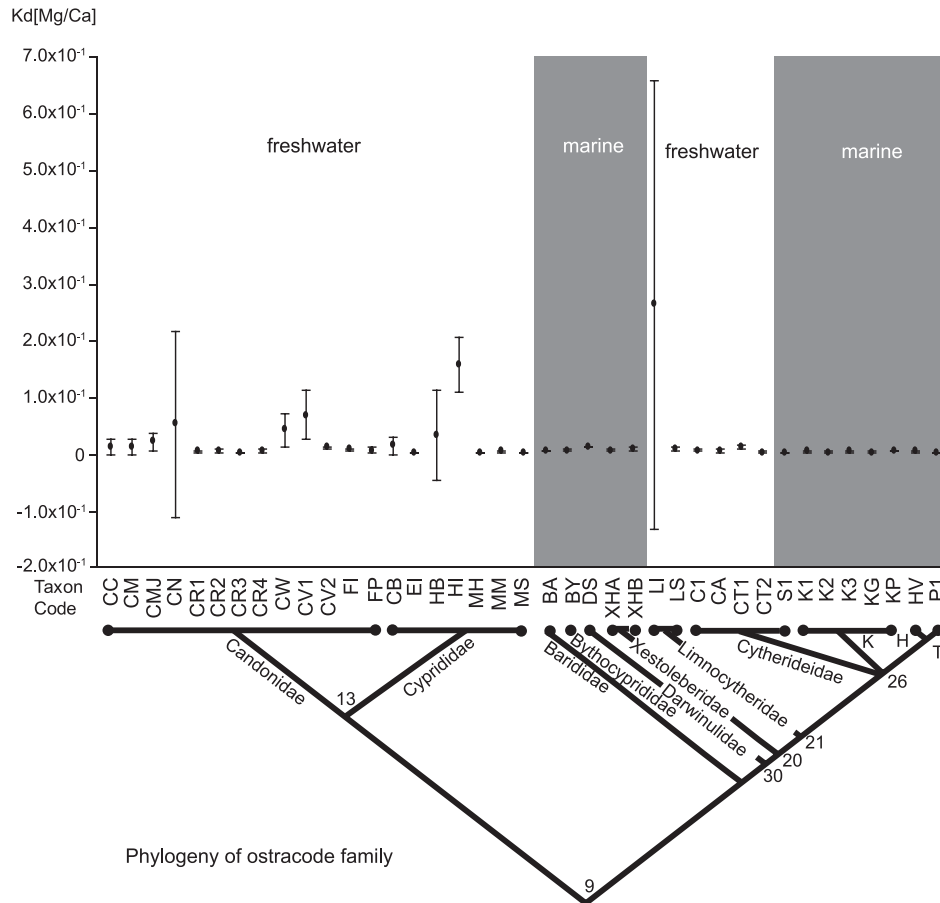


Fig. 5. Mean values and two standard deviations of Kd [Mg/Ca] for ostracode taxa and the phylogeny of ostracode families. The molecular phylogeny and numbers of nodes are modified after Tinn and Oakley (2008). Division of the ostracode family follows the review by Horne et al. (2002). For taxon codes, see Table 3 and Appendix 2. Abbreviations: K = Kritheroidea, H = Hemicytheridae, T = Trachyleberidae, X = Xestoleberidae.

関があるはずである。したがって、この Dwyer et al. (2002) の実験結果は続成作用を受けた殻の VPI と Mg/Ca 比および Sr/Ca 比に相関関係がないことを示唆する。これまで行われていた VPI と殻の Mg/Ca 比の相関をもとに化石試料の Mg/Ca (あるいは Sr/Ca) 比への続成作用の影響を推定する方法は妥当ではない。また、分類群によって殻の厚さや石灰化の程度が異なるため、VPI は全ての分類群の殻の保存状態を示す指標にはなり得ず、保存状態を示す指標として不十分であると考えられる。

以上のことから続成作用による貝形虫殻の微量元素量比の変化を評価する方法はまだ確立されていない。有孔虫をはじめとする炭酸カルシウム骨格をもつ化石の化学組成を環境指標として用いる時は、骨格に付着する二次的な炭酸カルシウムの有無や殻の結晶構造の検討も行われている (Sexton et al., 2006 など)。今後、貝形虫についても殻表面の二次的な炭酸カルシウムの付着の検討や、殻の結晶構造の検討も行い、化石試料の保存状態の評価を行うべきだろう。

3. 分類群による違い

一般に貝形虫の殻の Mg/Ca 比と Sr/Ca 比の分配係数は種によって固有の範囲があり、近縁な種間、属間で近い値を示すといわれている (Chivas et al., 1983; Holmes and Chivas, 2002)。貝形虫は 5 目 16 上科に分類される (Horne et al., 2002) が、上科ごとに殻の Mg 含有量が異なり、殻形成の時

の Mg の取り込み量が異なることが指摘されている (Cadot and Kaesler, 1977; Chivas et al., 1986a)。そして属間、種間でも殻の Mg/Ca 比および Sr/Ca 比の分配係数が異なることが報告されている (Chivas et al., 1986a, b; Dwyer et al., 2002)。

Holmes and Chivas (2002) は、それまで報告された貝形虫の殻の Mg/Ca 比および Sr/Ca 比の分配係数をまとめ、1) 同一種あるいは近縁な属間では分配係数が類似する、2) 殻が小さく薄い分類群は相対的に Mg 含有量が高い、3) 殻の Mg の取り込みには温度依存性がある、4) Mg の取り込みと進化系統との関連性を指摘した。

我々は本論で集約した分類群ごとの Mg/Ca 比および Sr/Ca 比の分配係数 (Figs. 4, 5, 6, 7; Table 3) を検討し以下の知見を得た。まず、Mg/Ca 比の分配係数について 1) Cypridoidea 上科, Bairdioidea 上科, Cytheroidea 上科の分配係数の平均値に有為な差はないという帰無仮説を立てゲイムス・ハウエル検定を行った。その結果、各上科間で帰無仮説が棄却され、有為な差が認められた (Fig. 4; Appendix 1)。2) 海棲種 Mg/Ca 比の分配係数の分布範囲は、淡水種に比べ狭い (Fig. 5)。海棲種の分配係数の平均値の範囲は $1.1 \times 10^{-3} \sim 7.4 \times 10^{-3}$ である。一方、淡水種の分配係数の平均値の範囲は $2.6 \times 10^{-4} \sim 2.6 \times 10^{-1}$ である。3) 海棲貝形虫の Mg/Ca 比の分配係数の分布には科レベルの系統群によ

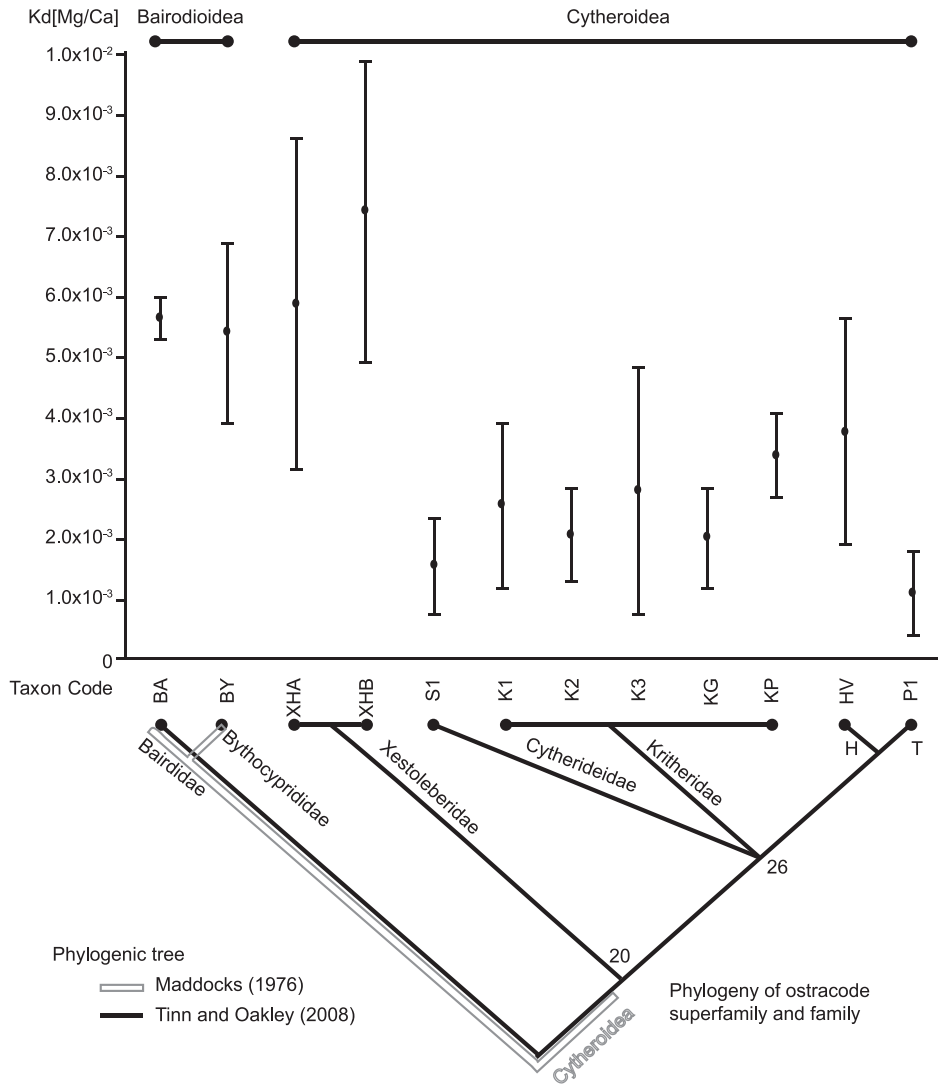


Fig. 6. Mean values and two standard deviations of Kd [Mg/Ca] for marine taxa and the phylogeny of ostracode families. The phylogeny and the number of nodes are modified after Maddocks (1976) and Tinn and Oakley (2008). The division of superfamily and family follows the review by Horne et al. (2002). For taxon codes, see Table 3 and Appendix 2. Abbreviations: H = Hemicytheridae, T = Trachyleberidae.

って差異が認められ (Fig. 6), 大きく2つのグループに分けられる。一つは平均値が相対的に低い Trachyleberidae 科, Hemicytheridae 科, Krittheridae 科, Cytherideidae 科, もう一つは平均値が相対的に高い Xestoleberidae 科と Bairdiidae 科, Bythocyprididae 科である。前者の分配係数の平均値の範囲は $1.07 \times 10^{-3} \sim 3.74 \times 10^{-3}$, 後者の分配係数の平均値の範囲は $5.37 \times 10^{-3} \sim 7.38 \times 10^{-3}$ である。Tinn and Oakley (2008) の分子系統樹によれば, 分配係数の平均値が低いグループはノード 26 で祖先を共有し単系統をなす。また, この差異は生息場の違いによるものではない。分配係数の平均値が低いグループ, 高いグループは, 共に浅海棲, 深海棲の分類群を含むからである。分配係数が高いグループでは, *Xestoleberis hanaii* (Xestoleberidae 科) は潮間帯に生息するが, *Bairdia* (Bairdiidae 科) は水深 110 m の海底から, *Bythocypris* (Bythocyprididae 科) は水深 800 m 以深の深海産の貝形虫である (Corrège and De Deckker, 1997; Ito et al., 2003; Kondo et al., 2005; Appendix 2)。分配係数が低いグループのうち, *Hemicythere villosa* (Hemicytheridae 科), *Krithe praetexta praetexta*

(Krittheridae 科), *Poseidonamicus* (Trachyleberidae 科), *Sarsicytheridea* (Cytherideidae 科) は水深 200 m 以浅で採取されたものだが, 他の *Krithe* (Krittheridae 科) は深海産のものである (Cronin et al., 1996; Corrège and De Deckker, 1997; Majoran et al., 1999; Ito et al., 2003; Holmes, 2008; Appendix 2)。以上のことから海棲貝形虫殻の Mg/Ca 比の分配係数には系統による制約があることが示唆され, Holmes and Chivas (2002) の見解は支持される。この分配係数と系統の関係は化石種の Mg/Ca 比による古環境の復元に重要である。

Sr/Ca 比の分配係数 (Figs. 4, 7; Table 3) については以下のことが見出せる。まず, 1) Cypridoidea 上科の分配係数は Cytheroidea 上科のものに比べ小さく, 上科レベルで分配係数に差異が認められる。差異の有意性はウェルチの t 検定による棄却で支持された (Fig. 4; Appendix 1)。2) 海棲種 Mg/Ca 比の分配係数の分布範囲は, 淡水種に比べ狭い。海棲種の分配係数の平均値の範囲は $3.7 \times 10^{-1} \sim 4.2 \times 10^{-1}$ である。一方, 淡水種の分配係数の平均値の範囲は $8.2 \times 10^{-2} \sim 8.2 \times 10^{-1}$ である (Fig. 7)。3) 科レベルの系統と分配係

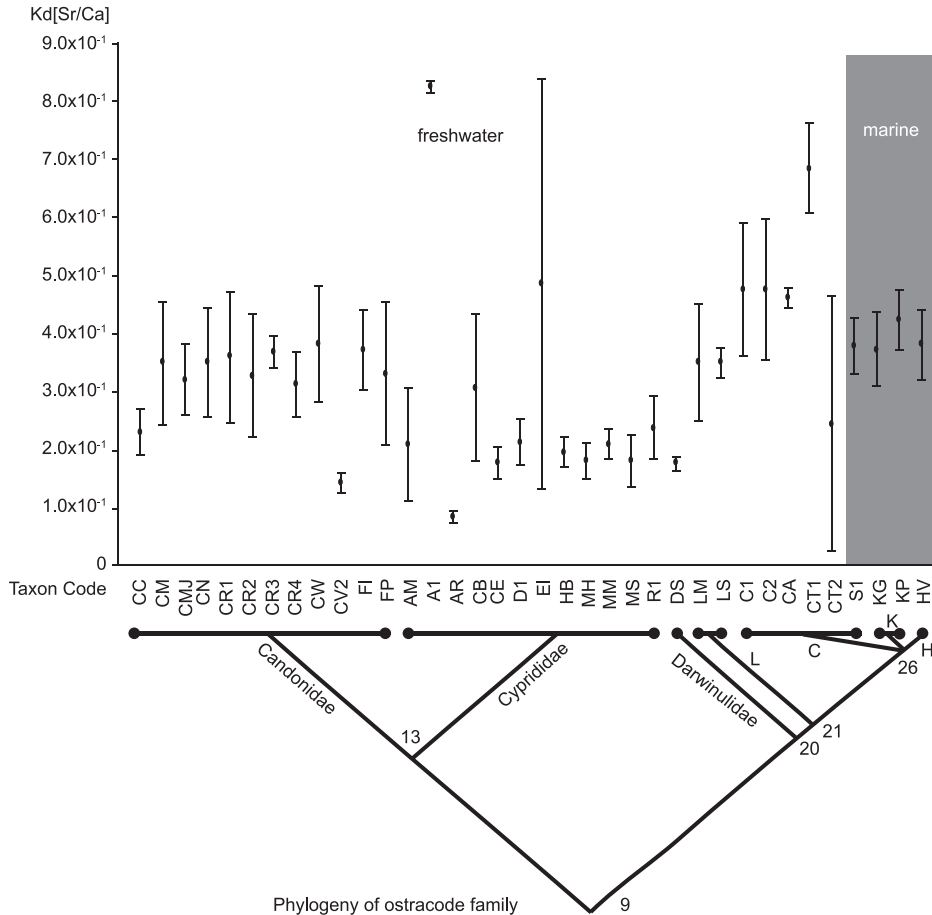


Fig. 7 Mean values and two standard deviations of K_d [Sr/Ca] for taxa and the phylogeny of ostracodes. The phylogeny and the numbers of nodes were modified after Tinn and Oakley (2008). The division of superfamily and family follows the review by Horne et al. (2002). For taxon codes, see Table 3 and Appendix 2. Abbreviations: C = Cytheroidea, K = Kritheridae, H = Hemicytheridae, L = Limnocytheridae.

数の分布に関連性は認められない (Fig. 7).

分類群および系統群ごとの分配係数の範囲を把握し、環境指標を探索するために、さらに多くの分類群の分配係数の検討が必要である。

4. 種内の分配係数の偏差

先行研究では生息場の水の Mg/Ca 比, Sr/Ca 比の差異などにより、分配係数が種内で異なることが指摘されている (Xia et al., 1997; Wansard et al., 1998; Kondo et al., 2005 など)。例えば *Candona rawsoni* の場合 (Xia et al., 1997)、コールドウォーター湖で採取した個体の Mg/Ca 比の分配係数の範囲と平均値は $4.77 \times 10^{-4} \sim 1.54 \times 10^{-3}$, 8.00×10^{-4} である。一方ロズリン湖で採取した個体の Mg/Ca 比の分配係数の範囲と平均値は $1.78 \times 10^{-3} \sim 7.32 \times 10^{-3}$, 4.40×10^{-3} であり、標準偏差はかなり大きい。これはクリーニング方法によるものかもしれない。これまで種の分配係数を報告してきた研究の多くは試料のクリーニングに過酸化水素を使っており (Table 3)、個体間の Mg/Ca 比や Sr/Ca 比の分散を実際より大きく見積もっている可能性がある (Keatings et al., 2006)。次亜塩素酸ナトリウムを利用したクリーニングをしたり、薬品によるクリーニングを行っていない 21 種に関する研究例 (Table 3) では、種内の Mg/Ca 比の分配係数の平均値に対する相対標準偏差は 0.3 ~ 75.2 % で、種内の Sr/Ca 比の分配係数の標準偏差は 2.0 ~

45.3 % であった。

では種内の Mg/Ca 比の分配係数の偏差は、どのくらい水温に誤差を与えているのだろうか？ここでは次亜塩素酸ナトリウムを使用した殻のクリーニングを適用した Kondo et al. (2005) のデータを最小二乗法により回帰することで誤差を検討した。Kondo et al. (2005) は、静岡県御前崎の潮間帯で採取した *Xestoleberis hanaii* を水温と海水の Mg/Ca 比、水温を制御した人工海水 (Culture A) と自然海水 (Culture B) の下で飼育し脱皮させ Mg/Ca 比を測定した。そして Mg/Ca 比の分配係数と水温の明瞭な相関を報告した。彼らは人工海水中で A-7 幼体から成体まで脱皮させた実験 (Culture A) と自然海水中で A-1 幼体から成体まで脱皮させた実験 (Culture B) を行った。この研究で示された成体殻の Mg/Ca 比とその水温との回帰式に検量線から見積もられる測定値の偏差 (穂積ほか, 1998) を外挿すると、分配係数のばらつきが不偏分散の平方根で表される。その値は Culture A および Culture B では、それぞれ 9.82×10^{-4} および 5.18×10^{-4} と計算され、これを水温に換算するとそれぞれ 2.12°C と 3.56°C である。したがって貝形虫種の殻の Mg/Ca 比から推定される水温の誤差は $\pm 2 \sim 4^\circ\text{C}$ 程度であると判断される。この誤差は有孔虫の殻の Mg/Ca 比から推定される水温の誤差 ($\pm 1 \sim 2^\circ\text{C}$: 黒柳, 2002; Lea, 2003 など) に比べ大きい。

Table 3. Means and standard deviations of the partition coefficients of Mg/Ca and Sr/Ca ratios in ostracode taxa, measured material, chemicals used in pre-treatments, analytical method. Data sources are listed in Appendix 1. Abbreviations: S.D. = standard deviation, N = number of analyses, F = material collected in the field, L = material cultured in the laboratory, Lv = living specimen, Mx = mixed specimens (living and subfossils), Sf = subfossil specimen, H₂O₂ = hydrogen peroxide, NaOCl = sodium hypochlorite, DCP: direct coupled plasma spectrometry, DCP-AES: direct current plasma-atomic emission spectrometry, DSP: digital signal processing spectrometry, GF-AAS: graphite furnace-atomic absorption spectrometry, ICP-AES: inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry.

Taxon Code	Genus/species	Kd [Mg/Ca]			Kd [Sr/Ca]			Material	Chemicals in pretreatment	Analytical method
		Mean	S.D.	N	Mean	S.D.	N			
CC	<i>Candona candita</i>	1.20x10 ⁻²	6.57x10 ⁻³	12	2.29x10 ⁻¹	2.00x10 ⁻²	12	F/Lv	?	?
CM	<i>Candona marchica</i>	1.20x10 ⁻²	6.95x10 ⁻³	13	3.48x10 ⁻¹	5.21x10 ⁻²	13	F/Mx	H ₂ O ₂	DSP
CMJ	<i>Candona muelleri jacktica</i>	2.07x10 ⁻²	8.07x10 ⁻³	12	3.2x10 ⁻¹	3.0x10 ⁻²	12	F/Lv	-	ICP-AES
CN	<i>Candona neglecta</i>	5.1x10 ⁻²	8.2x10 ⁻²	17	3.5x10 ⁻¹	4.7x10 ⁻²	11	F/Mx	H ₂ O ₂	DSP
CR1	<i>Candona rawsoni</i>	3.39x10 ⁻³	1.12x10 ⁻³	23	3.59x10 ⁻¹	5.64x10 ⁻²	23	L/Lv	H ₂ O ₂	DSP
CR2	<i>Candona rawsoni</i>	4.17x10 ⁻³	2.14x10 ⁻³	22	3.27x10 ⁻¹	5.32x10 ⁻²	22	F/Lv	H ₂ O ₂	DSP
CR3	<i>Candona rawsoni</i>	8.00x10 ⁻⁴	3.00x10 ⁻⁴	28	3.67x10 ⁻¹	1.41x10 ⁻²	28	F/Lv	H ₂ O ₂	DCP-AES
CR4	<i>Candona rawsoni</i>	4.40x10 ⁻³	1.5x10 ⁻³	34	3.12x10 ⁻¹	2.80x10 ⁻²	34	F/Lv	H ₂ O ₂	DCP-AES
CW	<i>Candona weltnei</i>	4.1x10 ⁻²	1.5x10 ⁻²	12	3.8x10 ⁻¹	5.0x10 ⁻²	12	F/Lv	-	ICP-AES
CV1	<i>Cypridopsis vidua</i>	6.80x10 ⁻²	2.23x10 ⁻²	98	-	-	-	F/Lv	H ₂ O ₂	ICP-MS
CV2	<i>Cypridopsis vidua</i>	9.80x10 ⁻³	4.00x10 ⁻⁴	7	1.42x10 ⁻¹	9.00x10 ⁻³	7	F/?	?	?
FI	<i>Fabaeformiscandona inaequalvis</i>	6.8x10 ⁻³	9.9x10 ⁻⁴	6	3.7x10 ⁻¹	3.5x10 ⁻²	6	F/Lv	-	ICP-AES
FP	<i>Fabaeformiscandona pedata</i>	5.3x10 ⁻³	2.9x10 ⁻³	36	3.3x10 ⁻¹	6.1x10 ⁻²	36	F/Lv	-	ICP-AES
AM	<i>Australocypris</i> and <i>Mytilocypris</i>	-	-	-	2.08x10 ⁻¹	4.80x10 ⁻²	89	F/?	-	ICP-AES
A1	<i>Australocypris</i>	-	-	-	8.24x10 ⁻¹	5.10x10 ⁻³	16	F/?	?	ICP-AES
AR	<i>Australocypris robusta</i>	-	-	-	8.2x10 ⁻²	5.0x10 ⁻³	17	F/Lv	-	ICP-AES
CB	<i>Cyprina brevisaepta</i>	1.37x10 ⁻²	7.91x10 ⁻³	31	3.06x10 ⁻¹	6.30x10 ⁻²	31	F/Lv	-	ICP-AES
CE	<i>Cyprinotus edwardi</i>	-	-	-	1.76x10 ⁻¹	1.40x10 ⁻²	10	F/?	?	ICP-AES
D1	<i>Diacypis</i> [3 species]	-	-	-	2.12x10 ⁻¹	2.00x10 ⁻²	13	F/?	-	ICP-AES
EI	<i>Eucypris inflata</i>	2.70x10 ⁻⁴	6.9x10 ⁻⁵	19	4.84x10 ⁻¹	1.76x10 ⁻¹	25	F/Mx	-	ICP-AES
HB	<i>Herpetocypris brevicaudata</i>	3.14x10 ⁻²	4.03x10 ⁻²	20	1.95x10 ⁻¹	1.30x10 ⁻²	20	L/Lv	H ₂ O ₂	DSP
HI	<i>Herpetocypris intermedia</i>	1.57x10 ⁻¹	2.45x10 ⁻²	64	-	-	-	F/?	H ₂ O ₂	DSP
MH	<i>Mytilocypris henricae</i>	2.65x10 ⁻⁴	1.97x10 ⁻⁵	6	1.80x10 ⁻¹	1.55x10 ⁻²	6	F/Lv	-	ICP-AES
MM	<i>Mytilocypris mytiloides</i>	2.59x10 ⁻³	2.59x10 ⁻⁴	8	2.09x10 ⁻¹	1.25x10 ⁻²	8	F/Lv	-	ICP-AES
MS	<i>Mytilocypris splendida</i>	2.60x10 ⁻⁴	3.16x10 ⁻⁵	7	1.79x10 ⁻¹	2.27x10 ⁻²	7	F/Lv	-	ICP-AES

Taxon Code	Genus/species	Kd [Mg/Ca]			Kd [Sr/Ca]			Material	Chemicals in pretreatment	Analytical method
		Mean	S.D.	N	Mean	S.D.	N			
R1	<i>Reticypis</i>	-	-	-	2.37x10 ⁻¹	2.70x10 ⁻²	7	F/?	-	ICP-AES
BA	<i>Bairdia</i>	5.60x10 ⁻³	1.74x10 ⁻⁴	91	-	-	-	F/?	?	LA-ICP-MS
BY	<i>Bythocypris</i>	5.41x10 ⁻³	7.46x10 ⁻⁴	43	-	-	-	F/?	H ₂ O ₂	ICP-AES
DS	<i>Darwimula stevensoni</i>	1.01x10 ⁻²	3.00x10 ⁻⁴	6	1.75x10 ⁻¹	6.00x10 ⁻³	6	F/?	?	?
XHA	<i>Xestoleberis hanaii</i> [Culture A]	5.84x10 ⁻³	1.36x10 ⁻³	16	-	-	-	L/Lv	NaOCl	GF-AAS
XHB	<i>Xestoleberis hanaii</i> [Culture B]	7.38x10 ⁻³	1.24x10 ⁻³	27	-	-	-	L/Lv	NaOCl	GF-AAS
LI	<i>Limnocythere inopinata</i>	2.63x10 ⁻¹	1.98x10 ⁻¹	8	-	-	-	F/Lv	-	ICP-AES
LM	<i>Limnocythere mowbrayensis</i>	-	-	-	3.5x10 ⁻¹	5.0x10 ⁻²	10	L/Lv	-	ICP-AES
LS	<i>Limnocythere sappaensis</i>	8.00x10 ⁻³	1.50x10 ⁻³	7	3.48x10 ⁻¹	1.30x10 ⁻²	7	F/Sf	-	ICP-AES
C1	<i>Cyprideis</i>	4.60x10 ⁻³	1.00x10 ⁻³	15	4.75x10 ⁻¹	5.70x10 ⁻²	32	L/Lv	?	ICP-AES
C2	<i>Cyprideis</i>	-	-	-	4.74x10 ⁻¹	6.10x10 ⁻²	37	F/?	?	ICP-AES
CA	<i>Cyprideis australiensis</i>	4.82x10 ⁻³	1.81x10 ⁻³	32	4.60x10 ⁻¹	8.99x10 ⁻³	32	F/Lv	-	ICP-AES
CT1	<i>Cyprideis torosa</i>	1.06x10 ⁻²	2.25x10 ⁻³	47	6.83x10 ⁻¹	3.88x10 ⁻²	47	F/T	H ₂ O ₂	ICP-AES
CT2	<i>Cyprideis torosa</i>	2.48x10 ⁻³	6.32x10 ⁻⁴	10	2.43x10 ⁻¹	1.10x10 ⁻¹	10	F/Lv	-	ICP-AES
S1	<i>Sarsicytheridea</i>	1.44x10 ⁻³	4.13x10 ⁻⁴	21	3.76x10 ⁻¹	2.44x10 ⁻²	21	F/?	NaOCl	DCP, ICP-AES
K1	<i>Krithe</i>	2.52x10 ⁻³	6.74x10 ⁻⁴	54	-	-	-	F/?	H ₂ O ₂	ICP-AES
K2	<i>Krithe</i>	2.03x10 ⁻³	3.84x10 ⁻⁴	53	-	-	-	F/?	?	LA-ICP-MS
K3	<i>Krithe</i>	2.78x10 ⁻³	1.02x10 ⁻³	64	-	-	-	F/Mx	NaOCl	DCP-AES
KG	<i>Krithe glacialis</i>	1.99x10 ⁻³	4.13x10 ⁻⁴	162	3.71x10 ⁻¹	3.19x10 ⁻²	162	F/Mx	NaOCl	DCP-AES
KP	<i>Krithe praetexta praetexta</i>	3.35x10 ⁻³	3.41x10 ⁻⁴	11	4.22x10 ⁻¹	2.61x10 ⁻²	11	L/Lv	NaOCl	DCP-AES
HV	<i>Hemicythere villosa</i>	3.74x10 ⁻³	9.32x10 ⁻⁴	39	3.80x10 ⁻¹	3.05x10 ⁻²	39	F/Lv	-	ICP-AES
PI	<i>Poseidonamicus</i>	1.07x10 ⁻³	3.41x10 ⁻⁴	239	-	-	-	F/?	?	LA-ICP-MS

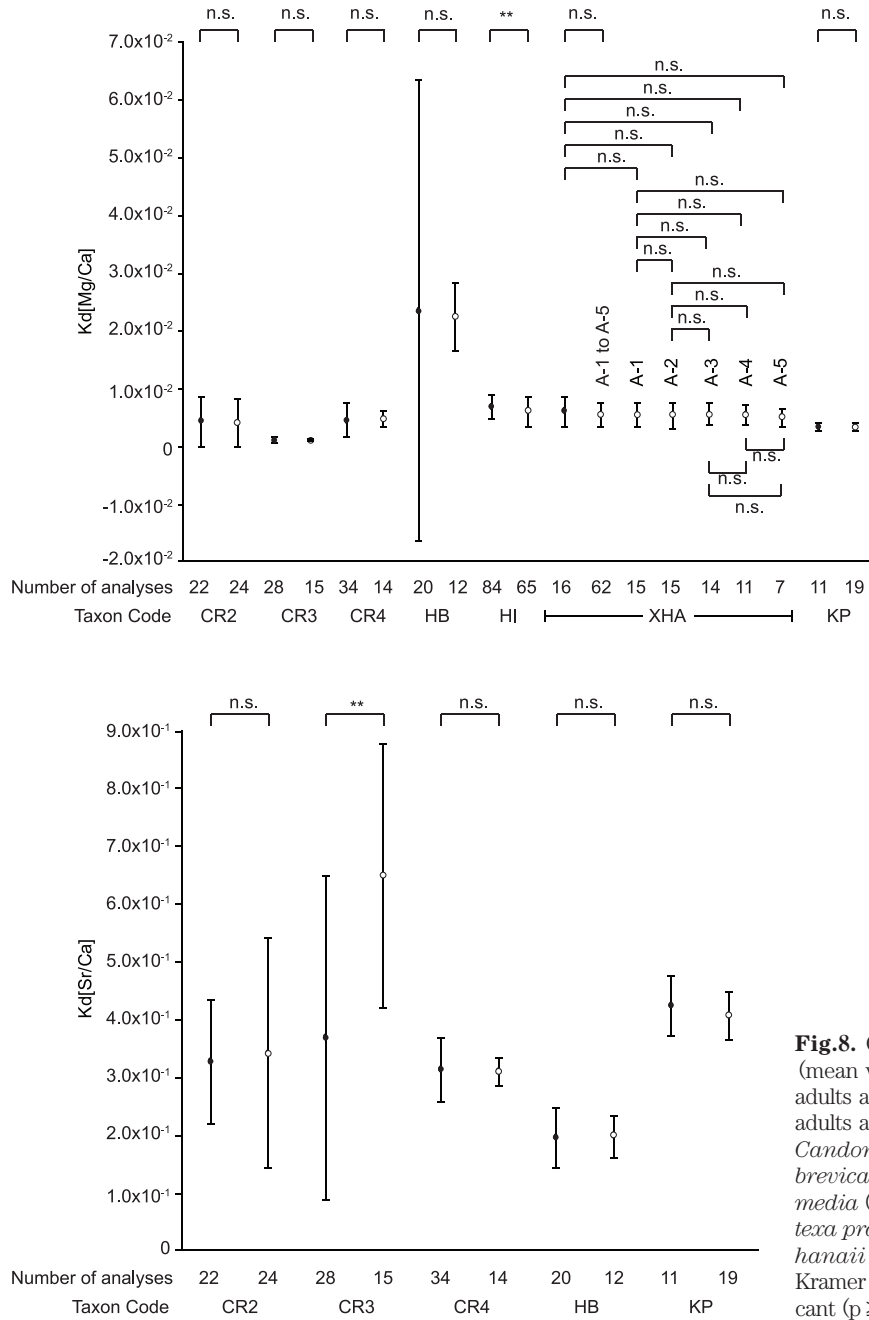


Fig.8. Comparison of K_d [Mg/Ca] and K_d [Sr/Ca] (mean values and two standard deviations) between adults and juveniles. Closed and open circles indicate adults and juveniles, respectively. Data are shown for *Candona rawsoni* (Xia et al., 1997), *Herptocypris brevicaudata* (Wansgard and Roca, 1997), *H. intermedia* (Wansgard and Mezquita, 2001), *Krithe praetexta praetexta* (Majoran et al., 1999), and *Xestoleberis hanaii* (Kondo et al., 2005). Results of the Tukey-Kramer test, Welch's t-test, and t-test: n.s., not significant ($p \geq 0.05$); ** $p < 0.01$. See also Appendix 1.

貝形虫の殻の微量元素の変化に関する、生息環境を制御した飼育実験の例が少ない (Table 3). 今後、高い精度での環境推定を行うためにも、より多くの種の Mg/Ca 比および Sr/Ca 比の測定と様々な環境を制御した飼育実験が望まれる。

ところで貝形虫の殻には成長ステージによって大きさの違いが顕著に現れる。貝形虫は脱皮するごとに体の体積がおおよそ2倍になることが知られている (Teissier, 1960 など)。また殻の大きさ、その形態、殻の質量に性差が顕著に見られることがある (Herman and Heip, 1982 など)。貝形虫の殻は数時間~数日で形成されるため、成長ステージや性別によって、殻の形成速度が異なり、Mg や Sr の殻への取り込みが

異なり、成長ステージや性別によって殻の Mg/Ca 比が異なることが指摘されている (Chivas et al., 1986a; Dwyer et al., 2002)。Chivas et al. (1983, 1986a) は、淡水棲貝形虫 *Mytilocypris henricae* を検討し、殻形成初期は相対的に Mg 含有量が高く、幼体殻の Mg/Ca 比は、成体に比べて高く、Sr/Ca 比は成体に比べて低いことも報告した。Dwyer et al. (2002) は深海棲貝形虫 *Krithe* 属の成長ステージ (成体, A-1, A-2, A-3 幼体) の違いによって殻の Mg/Ca 比に差があるかどうかを検討した。その結果 A-2 および A-3 幼体のほうが A-1 幼体、成体よりも Mg/Ca 比が高いことを指摘した。Kondo et al. (2005) は、浅海性貝形虫 *Xestoleberis hanaii* では成体の方が A-1 幼体に比べて Mg/Ca 比が高いこ

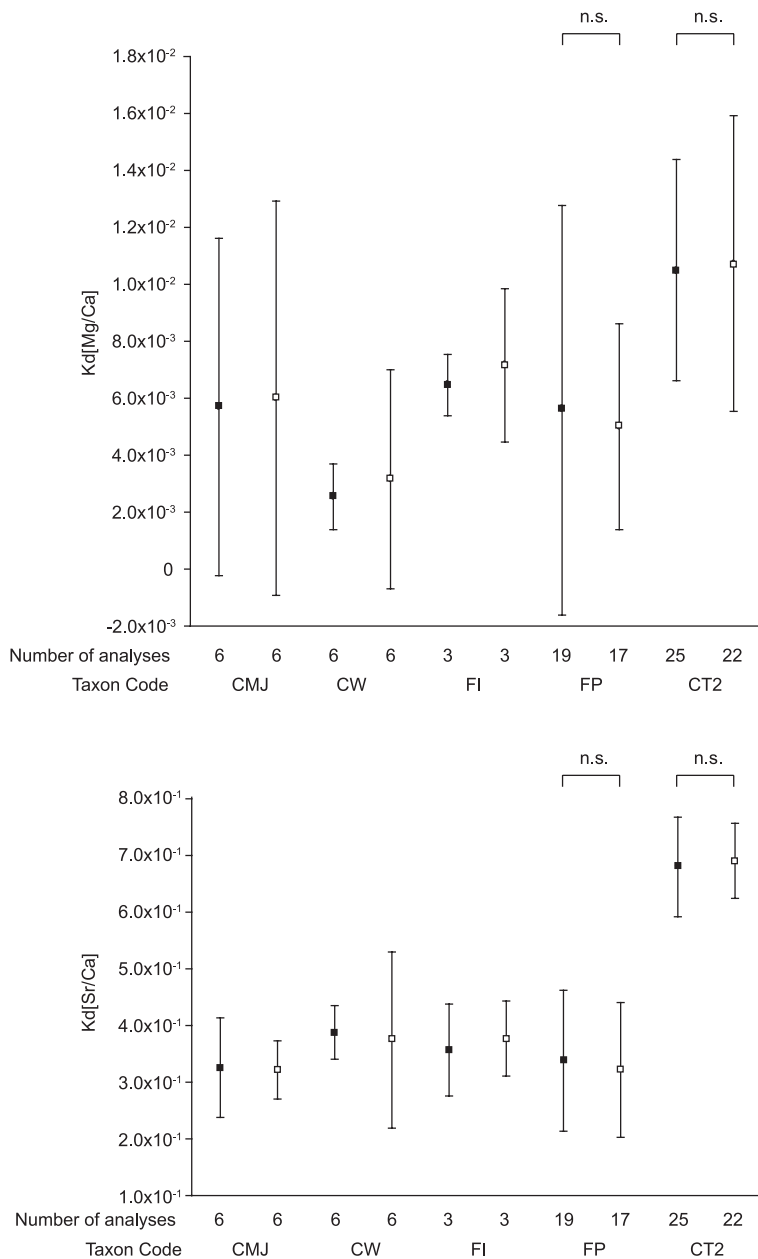


Fig. 9. Comparison of Kd [Mg/Ca] and Kd [Sr/Ca] (mean values and two standard deviations) between females and males. Closed and open squares indicate females and males, respectively. Data are shown for *Candona muelleri jakutica* and *Candona weltneri* (Wetterich et al., 2008a), *Fabaeoformiscandona pedata* (Wetterich et al., 2008b), and *Cyprideis torosa* (Wansard et al., 1998). Results of Welch's t-test and t-test: n.s., not significant ($p \geq 0.05$); ** $p < 0.01$. See also Appendix 1.

とを報告した。成長ステージによる分配係数の差異は、淡水棲貝形虫 *Herpetocypris intermedia* で認められる (Wansard and Mezquita, 2001)。このような成長を通じた Mg/Ca 比の違いは、殻の形成速度 (Chivas et al. 1983), A-1 から成体になるときの Mg を伴う有機物量 (Kondo et al., 2005) が関係しているといわれている。我々は、これまで報告された淡水棲種の *Candona rawsoni*, *Herpetocypris brevicaudata*, *H. intermedia*, および海棲種 *Xestoleberis hanaii*, *Krithe praetexta praetexta* の種の成体と幼体殻の Mg/Ca 比および Sr/Ca 比の分配係数について、平均値に有意な差はないという帰無仮説を立て t 検定を行った。さらに Kondo et al. (2005) が報告した *Xestoleberis hanaii* の Mg/Ca 比の分配係数について、成長ステージごとの平均値の差に有意な差異はないという帰無仮説を立てテュ

ーキー・クレーマー検定を行った。これらの検定の結果、*H. intermedia* の成体と幼体殻の Mg/Ca 比と、コールドウオーター湖の *C. rawsoni* の成体と幼体殻の Sr/Ca 比の分配係数に有意な差が認められた。しかし、これら以外の分類群では成体と幼体間に分配係数についての有意な差異は認められない (Fig. 8; Appendix 1)。Dwyer et al. (2002) が示した *Krithe* 属の成体と幼体の Mg/Ca 比の差異は種間の差異を反映しているかもしれない。*Krithe praetexta praetexta* の成体殻の Mg/Ca 比の分配係数の平均値 (Majoran et al., 1999) は *K. glacialis* の成体殻 (Cronin et al., 1996) より 1.26×10^{-3} 高い。一方 Dwyer et al. (2002) が示した *Krithe* 属の成体と幼体の平均値の差異は $3.45 \times 10^{-4} \sim 3.92 \times 10^{-4}$ であり、*Krithe* 属に複数の種が混在していた場合、この成体と幼体の差異は種間の差異でも説明できる。こ

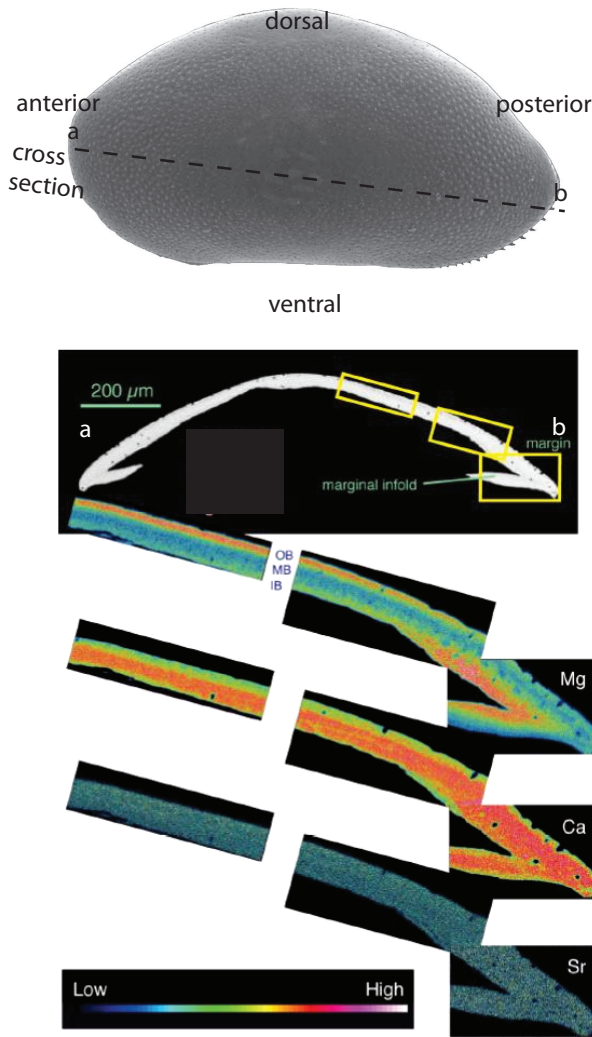


Fig. 10. Pattern of X-ray intensity, showing the distributions of Mg, Ca, and Sr in a cross-section of a valve of modern *Neonesidea oligodentata* (Morishita et al., 2007). Abbreviations: OB = outer band, MB = middle band, IB = inner band.

れまで貝形虫の殻の微量元素比の分配係数には成長ステージごとに差異があると言われていたが、必ずしも成長ステージごとに殻の微量元素比の分配係数は有意な差異を示すわけではない。

殻の Mg/Ca 比には性差があることも指摘されている。Dwyer et al. (2002) は深海棲の *Krithe* 属の Mg/Ca 比の性差を検討し、メスに比べてオスの殻の Mg/Ca 比の方がわずかに高いことを示した。しかし Wansard et al. (1998) はスペイン東部のパニョーレス湖から採取した *Cyprideis torosa* の殻の Mg/Ca 比および Sr/Ca 比には、これらの比に性差が認められないことを報告した。Wetterich et al. (2008b) はレナ川流域に生息する *Fabaeoformiscandona pedata* の Sr/Ca 比の分配係数にも顕著な性差が見られないことを報告した。我々が行った t 検定でも、帰無仮説は棄却されず、Wetterich et al. (2008b) と Wansard et al. (1998) の結論は支持された (Fig. 9; Appendix 1)。Dwyer et al.

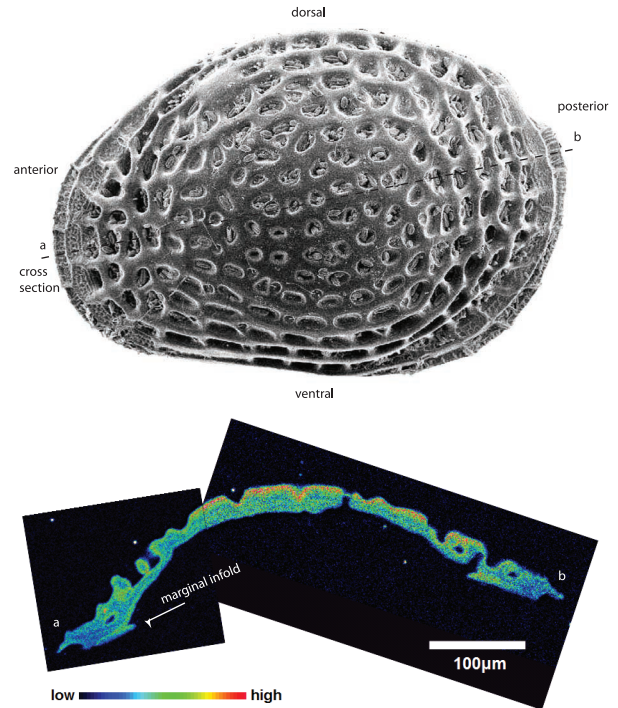


Fig. 11. Pattern of X-ray intensity, showing the distributions of Mg, Ca, and Sr in a cross-section of a valve of modern *Loxoconcha japonica*.

(2002) が示したオスとメスの Mg/Ca 比の分配係数の差異は 4.47×10^{-4} あり、前述の *K. praetexta praetexta* と *K. glacialis* の成体の分配係数の差異に比べ小さい。Dwyer et al. (2002) が示した *Krithe* 属のオス-メス間の分配係数の差異は種間の分配係数の差異を反映しているかもしれない。この *Krithe* 属に複数の種が混在していた場合、種間の分配係数の差異を反映して、彼らが示したオス-メス間の分配係数の差異が生じる可能性がある。以上のことから Mg/Ca 比と Sr/Ca 比の分配係数の有意な性差を示す証拠はまだない。

現時点では殻の分配係数が成長ステージや性別により、どのように変化するのかを一般的に議論できない。しかし分類群によっては成長ステージによって分配係数の有意な差異が認められることがあるため、気候変動を復元するためには Yu and Ito (1999) が行ったように、特定の成長ステージの試料を対象に分析を進めた方がよい。今後、より精度の高い過去の環境復元を行うために成長ステージや性別ごとの殻の Mg/Ca 比や Sr/Ca 比の検討が重要になっていこう。

5. 殻内の微小領域における Mg および Sr の分布

貝形虫の殻断面の EPMA 分析により、殻内の微小領域での微量元素の分布は不均質であることが従来から知られている (Cadot et al., 1972; Bodergat et al., 1993; Ito et al., 2003; Cronin et al., 2005b; Morishita et al. 2007 など)。Cadot et al. (1972) は、完新世の海棲 *Xestoleberis*, *Krithe*, *Echinocythereis*, *Bairdia*, *Macrocypris*, *Argilloecia*, *Cytherella* 属の貝形虫殻断面の EPMA 分析を

行い、 $MgCO_3$ は殻の外側と内側に多く、中部は $MgCO_3$ に乏しいことを報告した。彼らは、この殻内の微小領域の元素の分布の違いは成長速度が寄与している可能性を指摘した。Ito et al. (2003) は淡水棲貝形虫 *Cyprideis australiensis* の成体および A-1 幼体、海棲貝形虫 *Bairdia* 属、*Krithe* 属、*Poseidonamicus* 属のレーザーアブレーション誘導結合プラズマ質量分析器 (LA-ICP-MS) による分析を行い、殻の外側から内側に向かっての Mg/Ca 比と Sr/Ca 比の変化を検討した。*C. australiensis*、*Krithe* 属、*Poseidonamicus* 属で殻の外側のほうが内側よりも Mg/Ca 比が高いことを示した。Ito et al. (2003) と同様の方法で、海棲 *Loxococoncha matagordensis* の殻の Mg/Ca 比の変化を LA-ICP-MS 分析で測定した Cronin et al. (2005a) も、殻の外側のほうが内側よりも Mg/Ca 比が高いことを報告している。この殻内での Mg/Ca 比は $3.00 \times 10^{-2} \sim 7.00 \times 10^{-2}$ mol/mol の幅がある。Cronin et al. (2005b) が ICP-MS 分析で測定した *L. matagordensis* の成体 (67 個体) の殻全体の Mg/Ca 比の範囲は $1.88 \times 10^{-2} \sim 5.81 \times 10^{-2}$ mol/mol で、その平均値は 3.49×10^{-2} mol/mol である。すなわち、殻内の Mg/Ca 比の差異は、殻全体の Mg/Ca 比の個体間の差異と同じくらいか、それより大きい。殻内の微小領域での Mg/Ca 比の変化は、殻全体の Mg/Ca 比の変化にも影響すると考えられる。一方、殻の外側から内側に向かっての Sr/Ca 比の変化は小さく $2.0 \times 10^{-3} \sim 8.0 \times 10^{-3}$ mol/mol 程度である (Ito et al., 2003)。

Morishita et al. (2007) は、EPMA 分析によって石川県七尾湾産の *Neonesidea oligodentata* の成体標本の殻の断面中の Mg, Sr の二次元分布を明らかにし、規則的な化学的縞模様存在を明らかにした。その結果、この分類群の殻について、その化学的特長から、1) Mg, Sr に富む outer band, 2) Mg, Sr 濃度の低い不均質な middle band, 3) Mg に富み、Sr に乏しい inner band に分類し、marginal infold を含む縁辺部で inner band が広がっていることを報告し、Mg は層状に濃集していることを明らかにしている (Fig. 10)。我々は Morishita et al. (2007) の方法を用いて、予察的に日本沿岸域のアマモ葉上に生息する *Loxococoncha japonica* の成体標本の殻断面の元素分布を観察した。*N. oligodentata* 殻の組成分布的特徴と同様に、殻の外側だけでなく marginal infold の内側にも Mg が濃集する特徴が確認された (Fig. 11)。これは異なる属であっても共通した Mg の取り込みの特徴を持つ可能性が高いことを示唆し、今後の詳細な測定と検討が必要である。

石灰化が不完全な殻形成の初期段階では、高い Mg 含有量を示す事が報告されている (Chivas et al., 1983, 1986a)。Mg に富む outer band は、殻形成初期に形成された比較的高い Mg 含有量を示す石灰質部に対応している可能性がある。脱皮直後には殻表面の保護のために急速な石灰化が必要であるために、殻の外側で Mg が多く取り込まれる可能性が指摘されている (Teeter and Quick, 1990)。しかし、Mucci and Morse (1983) や Morse and Bender (1990) は、無機的に形成される炭酸塩鉱物の Mg/Ca 比の分配係数は結晶化速度

とは無関係であるとしている。一方、Sr/Ca 比の分配係数は結晶化速度によって変化する。また、Kitano et al. (1971) は、無機的に形成される炭酸塩鉱物において、結晶形成初期段階では高い Sr/Ca 比の分配係数を示すことを報告した。Kondo et al. (2005) が指摘したように、Mg は有機物に含まれている可能性があることから、Mg 量の違いが単純に殻構造 (有機物量) の違いによるものなのか、生理効果による元素の分別の違いなのかは、今後さまざまな分類群の殻の微細構造に関する研究を行うと同時に、殻内の微小領域での微量元素の分布の特徴を明らかにする必要があるだろう。

ま と め

過去 20 年あまりの分析技術の発展により貝形虫の殻の化学分析も容易に行えるようになり、特に陸域の古環境の推定を中心に研究例が増加した。分析で求められた貝形虫殻の Mg/Ca 比、Sr/Ca 比は研究当初指摘されていたように、水温や塩分だけが寄与しているものではない。これらには分類群の違い、生息環境の水溶液中の Mg/Ca 比、Sr/Ca 比、殻内の Mg および Sr の不均一性、続成作用や試料の前処理の方法も寄与することが明らかになってきた。これらのことや、貝形虫の殻の形成が数時間～数日で行われることから、殻の形成速度や形成時期も殻の Mg/Ca 比、Sr/Ca 比に寄与していると考えられる。今後、貝形虫の Mg/Ca 比、Sr/Ca 比をより精密な環境指標として確立するためには、これらの問題点や、より多くの分類群の分配係数のより厳密な評価が必要である。

謝 辞

本論文の執筆にあたり、井龍康文教授 (名古屋大学大学院環境学研究所) には原稿を読んで頂き有益なご助言を頂いた。鈴木 淳博士 (産業総合技術研究所) と匿名の査読者には丁寧な査読による建設的なご助言を頂いた。編集委員の狩野彰宏教授 (九州大学大学院比較社会文化研究院) から本論文を推敲する上で有益なご助言を頂いた。Davin Hadryanto Ekaputra Setiamarga 博士 (スクリプス海洋学研究所) には分子系統と系統樹の解釈についてご助言を頂いた。Michael Shudack 教授 (ベルリン自由大学) と大畑真理氏 (金沢大学大学院自然科学研究科) には文献収集にご協力いただいた。本論文のきっかけは、鶴見厚支氏 (伊藤忠商事 (株)) との議論からである。また、貝形虫を EPMA 分析するための分析準備のルーチン化は鶴見氏の功績である。森下は科学技術振興調整費「若手研究者の自立的な研究環境整備促進プログラム」および日本海学推進機構の「日本海学研究グループ支援事業」の補助を受けた。厚くお礼申し上げます。

文 献

- Anadón, P., Ghatti, P. and Gliozzi, E., 2002a, Sr/Ca, Mg/Ca ratios and Sr and stable isotopes of biogenic carbonates from the Late Miocene Velona Basin (central Apennines, Italy) provide evidence of unusual non-marine Messinian conditions. *Chem. Geol.*, **187**, 213-230.
- Anadón, P., Gliozzi, E. and Mazzini, I., 2002b, Palaeoenvironmental reconstruction of marginal marine environments from combined paleoecological and geochemical analyses on Ostracoda. *In* Holmes, J. A.

- and Chivas, A. R., eds., *The Ostracoda: Applications in Quaternary Research*. Geophys. Monogr., **131**, 227-248.
- Anadón, P., Utrilla, R., Vázquez, A., Martín-Rubio, M., Rodríguez-Lázaro, J. and Robles, F., 2008, Paleoenvironmental evolution of the Pliocene Villarroya Lake, northern Spain, from stable isotopes and trace-element geochemistry of ostracods and molluscs. *Jour. Paleolimnol.*, **39**, 399-419.
- Barker, S., Greaves, M. and Elderfield, H., 2003, A study of cleaning procedures used for foraminiferal Mg/Ca paleothermometry. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **4**, 8407, doi: 10.1029/2003GC000559.
- Bergin, F., Kucuksezgin, F., Uluturhan, E., Barut, I. F., Meric, E., Avsar, N. and Nazik, A., 2006, The response of benthic foraminifera and ostracoda to heavy metal pollution in Gulf of Izmir (Eastern Aegean Sea). *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, **66**, 368-386.
- Bodergat, A. M., Carbonell, G., Rio, M. and Keyser, D., 1993, Chemical composition of *Leptocythere psammophila* (Crustacea: Ostracoda) as influenced by winter metabolism and summer supplies. *Marine Biol.*, **117**, 53-62.
- Cadot Jr., H. M. and Kaesler, R. L., 1977, Magnesium content of calcite in carapaces of benthic marine ostracoda. *Paleontol. Contrib. (Univ. Kansas)*, **87**, 1-23.
- Cadot Jr., H. M., Van Schmus, W. R. and Kaesler, R. L., 1972, Magnesium in calcite of marine ostracoda. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, **83**, 3519-3522.
- Chester, R., 1990, *Marine Geochem.*, Unwyn Hyman, London, 689p.
- Chivas, A. R., De Deckker, P. and Shelley, J. M. G., 1983, Magnesium, Strontium and Barium partitioning in nonmarine ostracode shells and their use in paleoenvironmental reconstructions-a preliminary study. In Maddocks, R. F., ed., *Applications of Ostracoda, Proc. 8th Intern. Symp. Ostracoda*, Univ. Houston Geosci., 238-249.
- Chivas, A. R., De Deckker, P. and Shelly, J. M. G., 1985, Strontium content of ostracods indicates lacustrine palaeosalinity. *Nature*, **316**, 251-235.
- Chivas, A. R., De Deckker, P. and Shelley, J. M. G., 1986a, Magnesium and strontium in non-marine ostracod shells as indicators of palaeosalinity and paleotemperature. *Hydrobiol.*, **143**, 135-142.
- Chivas, A. R., De Deckker, P. and Shelley, J. M. G., 1986b, Magnesium content of non-marine ostracod shells: a new palaeosalinometer and palaeothermometer. *Palaeogeogr. Palaeoclimat. Palaeoecol.*, **54**, 43-61.
- Corrège, T. and De Deckker, P., 1997, Faunal and geochemical evidence for change in intermediate water temperature and salinity in the western Coral Sea during the late Quaternary. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, **313**, 183-205.
- Cronin, T. M., Dwyer, G. S., Baker, P. A., Rodriguez-Lazaro, J. and Briggs Jr., W. M., 1996, Deep-sea ostracode shell chemistry (Mg/Ca ratios) and late Quaternary Arctic Ocean history. In Andrews, J. T., Austin, W. E. N., Bergsten, H. and Jennings, A. E., eds., *Late Quaternary Palaeoceanography of the North Atlantic Margins*, Spec. Publ. Geol. Soc., London, **111**, 117-134.
- Cronin, T. M., Dowsett, H. J., Dwyer, G. S., Baker, P. A. and Chandler, M. A., 2005a, Mid-Pliocene deep-sea bottom-water temperatures based on ostracode Mg/Ca ratios. *Marine Micropaleontol.*, **54**, 249-261.
- Cronin, T. M., Kaniya, T., Dwyer, G. S., Belkin, H., Vann, C. D., Schwede, S. and Wagner, R., 2005b, Ecology and Shell chemistry of *Loxococoncha matagordensis*. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, **225**, 14-67.
- De Deckker, P., Chivas, A. R. and Shelley, J. M. G., 1999, Uptake of Mg and Sr in the euryhaline ostracod *Cyprideis* determined from in vitro experiments. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, **148**, 105-116.
- Dettman, D. L., Palacios-Fest, M. and Cohen, A. S., 2002, Comment on G. Wansard & F. Mezquita, The response of ostracode shell chemistry to seasonal change in a Mediterranean freshwater spring environment. *Jour. Paleolimnol.*, **27**, 487-491.
- de Villier, S., 1995, Seawater strontium and Sr/Ca variability in the Atlantic and Pacific oceans. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **171**, 623-634.
- Dwyer, G. S., Cronin, T. M. and Baker, P. A., 2002, Trace elements in marine ostracodes. In Chivas, A. R. and Holmes, J., eds., *The Ostracoda: Applications in Quaternary Research*, Amer. Geophys. Monogr., **131**, 205-225.
- Dwyer, G. S., Cronin, T. M., Baker, P. A., Raymo, M. E., Buzas, J. S. and Corrège, T., 1995, North Atlantic deepwater temperature change during late Pliocene and late Quaternary climatic cycles. *Science*, **270**, 1347-1351.
- Fassbinder, K., 1912, BeitrÜage zur Kenntnis der Süßwasserostrocoden. *Zool. Jahrb. Abstr. Anat. Ont. Tiere.*, **32**, 533-576.
- Engstrom, D. R. and Nelson, S. R., 1991, Paleosalinity from trace metals in fossil ostracodes compared with observational records at Devils Lake, North Dakota, USA. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, **83**, 295-312.
- Hammer, Ø., Harper, D. A. T. and Ryan, P. D., 2001, PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaeontol., Electron.*, **4**, 1-9. [http://palaeo-electronica.org/2001_1/past/issue1_01.htm]
- Hanai, T. and Ikeya, N., 1991, Two new genera from Omma-manganji ostracode fauna (Plio-Pleistocene) of Japan-with a discussion of theoretical versus purely descriptive ostracode nomenclature. *Trans. Proc. Palaeont. Soc. Japan, N.S.*, **163**, 861-878.
- Haskell, B. J., Engstrom, D. R. and Fritz, S. C., 1996, Late Quaternary paleohydrology in the North American Great Plains inferred from the geochemistry of endogenic carbonate and fossil ostracodes from Devils Lake, North Dakota, USA. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, **124**, 179-193.
- Herman, P. M. J. and Heip, C., 1982, Growth and respiration of *Cyprideis torosa* Jones 1850 (Crustacea Ostracoda). *Oecol.*, **54**, 300-303.
- Holmes, J. A., 1992, Micropalaeontology notebook. Trace-element chemistry of non-marine ostracod shells: a preliminary evaluation of cleaning methods. *Jour. Micropalaeontol.*, **11**, 36.
- Holmes, J. A., 1996, Trace-element and stable-isotope geochemistry of non-marine ostracod shells in Quaternary palaeoenvironmental reconstruction. *Jour. Paleolimnol.*, **15**, 223-235.
- Holmes, J. A., 2008, Sample-size implications of the trace-element variability of ostracod shells. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **72**, 2934-2945.
- Holmes, J. A. and Chivas, A. R., 2002, Ostracod shell chemistry-overview. In Chivas, A. R. and Holmes, J., eds., *The Ostracoda: Applications in Quaternary Research*, Amer. Geophys. Monogr., **131**, 185-204.
- Holmes, J. A., Street-Perrott, F. A., Ivanovich, M. and Perrott, R. A., 1995, A late Quaternary palaeolimnological record from Jamaica based on trace-element chemistry of ostracod shells. *Chem. Geol.*, **124**, 143-160.
- Horne, D. J., Cohen, A. and K. Martens, K., 2002, Taxonomy, morphology and biology of Quaternary and living Ostracoda. In Holmes, J. A. and Chivas, A. R., eds., *The Ostracoda: Applications in Quaternary Research*, Amer. Geophys. Monogr. **131**, 5-36.
- 穂積啓一郎・佐藤綾子・秋元直茂 (Hozumi, K., Satoh, A. and Akimoto, N.), 1998, 封管燃焼法による有機硫黄のサブミリグラム定量. 分析化学 (*Bunseki Kagaku*), **47**, 219-224.
- Ingram, C., 1998, Palaeoecology and geochemistry of shallow marine ostracoda from the Sand Hole Formation, Inner Silver pit, southern North Sea. *Quatern. Sci. Rev.*, **17**, 913-929.
- Ingram, B. L., De Deckker, P., Chivas, A. R., Conrad, M. E. and Byrne, A. R., 1998, Stable isotopes, Sr/Ca, and Mg/Ca in biogenic carbonates from Petaluma Marsh, northern California, USA. *Geochem. Cosmochim. Acta*, **62**, 3229-3237.
- Irizuki, T., Kusumoto, M., Ishida, K. and Tanaka, Y., 2007, Sea-level changes and water structures between ca. 3.5 to 2.8 Ma in the central part of the Japan Sea Borderland: analyses of fossil Ostracoda from the Pliocene Kuwae Formation, central Japan. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, **245**, 421-443.
- Irizuki, T., Yamada, K., Maruyama, T. and Ito, H., 2004, Paleoecology and taxonomy of Early Miocene Ostracoda and paleoenvironments of the eastern Setouchi Province, central Japan. *Micropaleontol.*, **50**, 105-147.
- Ito, E. and Forester, R. M., 2009, Changes in continental ostracode shell chemistry; uncertainty of cause. *Hydrobiol.*, **620**, 1-15.
- Ito, E., De Deckker, P. and Eggins, S. M., 2003, Ostracodes and their shell chemistry: implications for paleohydrologic and paleoclimatologic

- applications. In Park, L. E. and Smith, A. J., eds., *Bridging the Gap: Trends in the Ostracode Biological and Geological Sciences*, Paleontol. Soc. Pap., **9**, 119-151.
- Jin, Z., Bickle, M., Chapman, H., Yu, J., Greaves, M., Wang, S. and Chen, S., 2006, An experimental evaluation of cleaning methods for fossil ostracode Mg/Ca and Sr/Ca determination. *Jour. Paleolimnol.*, **36**, 211-218.
- Keatings, K. W., Heaton, T. H. E. and Holmes, J. A., 2002, The effects of diagenesis on the trace element and stable isotope geochemistry of non-marine ostracod valves. *Jour. Paleolimnol.*, **28**, 245-252.
- Keatings, K. W., Holmes, J. A. and Heaton, T. H. E., 2006, Effects of pre-treatment on ostracod valve chemistry. *Chem. Geol.*, **235**, 250-261.
- Kesling, R. V., 1951, Morphology of ostracod molt stages. *Illinois Biol. Monogr.*, **21**, 1-126.
- Keyser, D. and Walter, R., 2004, Calcification in ostracodes. *Rev. Espan. Micropaleontol.*, **56**, 1-11.
- 北野 康 (Kitano, Y.), 1988, 炭酸塩堆積物の私の研究履歴—温泉の石灰華から海の炭酸塩まで—。温泉科学 (*Jour. Hot Spring Sci.*), **38**, 163-174.
- Kitano, Y., Kanamori, N. and Oomori, T., 1971, Measurements of distribution coefficients of strontium and barium between carbonate precipitate and solution—Abnormally high values of distribution coefficients measured at early stages of carbonate formation. *Geochem. Jour.*, **4**, 182-306.
- Kondo, H., Toyofuku, T. and Ikeya, N., 2005, Mg/Ca ratio in the shells of cultured and natural populations of marine ostracode *Xestoleberis hanaii* (Crustacea). *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, **225**, 3-13.
- 黒柳あずみ (Kuroyanagi, A.), 2002, 浮遊性有孔虫が記録する海洋環境—どのような環境指標として有効か?—。地質ニュース (*Chishitsu News*), no.575, 5-11.
- Lea, D. W., 2003, Elemental and isotopic proxies of past ocean temperatures. In Elderfield, H. ed., *The Oceans and Marine Geochemistry*, Treatise on geochemistry, Elsevier-Pergamon, Oxford, 6, 365-390.
- Lewis, R. and Evans, W., 2001, *Chemistry*, Palgrave Macmillan, New York, 480p.
- Maddocks, R. F., 1976, Quest for the Ancestral Podocypid: Numerical cladistic analysis of ostracode appendages, a preliminary report. *Abh. Verh. natur. Ver. Hamburg.*, **18/19**, 39-53.
- Majoran, S., Agrenius, S. and Dwyer, G. S., 1999, The effect of temperature on the geochemical composition of the shells of the ostracod species *Krithe praetexta praetexta*. *Geosound*, **35**, 93-113.
- Mischke, S. and Wünnenmann, B., 2006, The Holocene salinity history of Bosten Lake (Xinjiang, China) inferred from ostracod species assemblages and shell chemistry: Possible palaeoclimatic implications. *Quatern. Intern.*, **153-154**, 100-112.
- Morishita, T., Tsurumi, A. and Kamiya, T., 2007, Magnesium and strontium distributions within valves of a recent marine ostracode (*Neonesidea oligodentata*): implications for reconstruction of paleo-water environments. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **8**, Q07009, doi: 10.1029/2007GC001585.
- Morse, J. W. and Bender, M. L., 1990, Partition coefficients in calcite: examination of factors influencing the validity of experimental results and their application to natural systems. *Chem. Geol.*, **82**, 265-277.
- Mucci, A. and Morse, J. W., 1983, The incorporation of Mg²⁺ and Sr²⁺ into calcite overgrowths: influences of growth rate and solution composition. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **47**, 217-223.
- Oomori, T., Kaneshima, H., Maezato, Y. and Kitano, Y., 1987, Distribution of Mg²⁺ ions between calcite and solution at 10–50 °C. *Marine Chem.*, **20**, 327-336.
- Ozawa, H. and Kamiya, T., 2001, Palaeoceanographic records related to glacio-eustatic sea-level fluctuations in the Pleistocene Japan Sea based on ostracods from the Omma Formation. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, **170**, 27-48.
- Palacios-Fest, M. R. and Dettman, D. L., 2001, Temperature controls monthly variation in ostracode valve Mg/Ca: *Cypridopsis vidua* from a small lake in Sonora, Mexico. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **65**, 2499-2507.
- Palacios-Fest, M. R., Cohen, A. S. and Anadón, P., 1994, Use of ostracodes as paleoenvironmental tools in the interpretation of ancient lacustrine records. *Rev. Espan. Paleontol.*, **9**, 145-164.
- Pingitore, N. E., Fretzdorff, S. B., Seitz, B. P., Estrada, L. Y., Borrego, P. M., Crawford, G. M. and Love, K. M., 1993, Dissolution kinetics of CaCO₃ in common laboratory solvents. *Jour. Sediment. Petrol.*, **63**, 641-645.
- Roca, J. R. and Wansard, G., 1997, Temperature influence on development and calcification of *Herpetocypris brevicaudata* Kaufmann, 1900 (Crustacea: Ostracoda) under experimental conditions. *Hydrobiol.*, **347**, 91-95.
- Ruiz, F., Abad, M., Bodergat, A. M., Carbonel, P., Rodríguez-Lázaro, J. and Yasuhara, M., 2005, Marine and brackish-water ostracods as sentinels of anthropogenic impacts. *Earth Sci. Rev.*, **72**, 89-111.
- Sexton, P. F., Wilson, P. A. and Pearson, P. N., 2006, Microstructural and geochemical perspectives on planktic foraminiferal preservation: “Glassy” versus “Frosty”. *Geochem. Geophys. Geosys.*, **7**, Q12P19, doi: 10.1029/2006GC001291.
- Sokal, R. R. and Rohlf, F. J., 1994, *Biometry: The Principles and Practice of Statistics in Biological Research*, 3rd ed. W. H. Freeman, New York, 887p.
- Sylvester-Bradley, P. C. and Benson, R., 1971, Terminology for surface features in ornate ostracodes. *Lethaia*, **4**, 249-286.
- Teeter, J. W. and Quick, T. J., 1990, Magnesium-salinity relation in the saline lake ostracode *Cyprideis americana*. *Geology*, **18**, 220-222.
- Teissier, G., 1960, Reticulate growth. In Waterman, T. H., ed., *The Physiology of Crustacea*, Academic Press, New York, 541-544.
- Tinn, O. and Oakley, T. H., 2008, Erratic rates of molecular evolution and incongruence of fossil and molecular divergence time estimates in Ostracoda (Crustacea). *Molec. Phylogen. Evol.*, **48**, 157-167.
- Turpen, J. B. and Angell, R. W., 1971, Aspects of molting and calcification in the ostracod *Heterocypris*. *Biol. Bull.*, **140**, 331-338.
- Vann, C. D., Cronin, T. M. and Dwyer, G. S., 2004, Population ecology and shell chemistry of a phytal ostracode species (*Loxococoncha matagordensis*) in the Chesapeake Bay watershed. *Marine Micropaleontol.*, **53**, 261-277.
- Wansard, G., 1996, Quatification of paleotemperature changes during isotopic stage 2 in the La Draga continental sequence (NE Spain) based on the Mg/Ca ratio of freshwater ostracods. *Quatern. Sci. Rev.*, **15**, 237-245.
- Wansard, G. and Mezquita, F., 2001, The response of ostracod shell chemistry to seasonal change in a Mediterranean freshwater spring environment. *Jour. Paleolimnol.*, **25**, 9-16.
- Wansard, G. and Roca, J. P., 1998, Etude expérimentale de l'incorporation du strontium et du magnésium dans les valves d'un ostracode d'eau douce, *Heterocypris brevicaudata* (Crustacea, Ostracoda). *Comp. Rend. Acad. Sci. Paris*, **325**, 403-409.
- Wansard, G., De Deckker, P. and Julia, R., 1998, Variability in ostracod partition coefficients D (Sr) and D (Mg). Implications for lacustrine palaeoenvironmental reconstructions. *Chem. Geology*, **146**, 39-54.
- Wetterich, S., Herzschuh, U., Meyer, H., Pestryakova, L., Plessen, B., Lopez, C. M. L. and Schirmermeister, L., 2008a, Evaporation effects as reflected in freshwaters and ostracod calcite from modern environments in Central and Northeast Yakutia (East Siberia, Russia). *Hydrobiol.*, **614**, 171-195.
- Wetterich, S., Schirmermeister, L., Meyer, H., Viehberg, F. A. and Mackensen, A., 2008b, Arctic freshwater ostracods from modern periglacial environments in the Lena River Delta (Siberian Arctic, Russia): geochemical applications for palaeoenvironmental reconstructions. *Jour. Paleolimnol.*, **39**, 427-449.
- Xia, J., Ito, E. and Engstrom, D. R., 1997, Geochemistry of ostracode calcite: Part 2. The effects of water chemistry and seasonal temperature variation on *Candona rawsoni*. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **61**, 383-391.
- 山田 桂 (Yamada, K.), 2002, 古環境を記録する微小甲殻類—貝形虫—。地質ニュース (*Chishitsu News*), no. 576, 23-30.
- Yamada, S., 2007a, Formation of the Hinge in the Podocopan Ostracode *Loxococoncha pulchra*. *Jour. Morphol.*, **268**, 442-456.
- Yamada, S., 2007b, Ultrastructure of the carapace margin in the Ostracoda (Arthropoda: Crustacea). *Hydrobiol.*, **585**, 201-211.

- 山田晋之介 (Yamada, S.), 2008, 貝形虫類の背甲: 構造とクチクラ形成に関する総説. 化石 (*Fossil*), **83**, 41-58.
- Yamada, S., Tsukagoshi, A. and Ikeya, N., 2004, Ultrastructure of the carapace in some *Semicytherura* species (Ostracoda: Crustacea). *Micropaleontol.*, **50**, 381-389.
- Yu, Z. and Ito, E., 1999, Possible solar forcing of century-scale drought frequency in the northern Great Plains. *Geology*, **27**, 263-266.
- Yumoto, M., 1994, The shell structure of the carapace in *Xestoleberis hanaii* Ishizaki (Crustacea, Ostracoda). *Trans. Proc. Palaeont. Soc. Japan*, **176**, 638-649.
- Zhang, J., Holmes, J. A., Chen, F., Qiang, M., Zhou, A. and Chen, S., 2009, An 850-year ostracod-shell trace-element record from Sugan Lake, northern Tibetan Plateau, China: Implications for interpreting the shell chemistry in high-Mg/Ca waters. *Quatern. Intern.*, **194**, 119-133.

以下の Appendix は、オープンファイルとして学会ホームページ上で公開しています。 < <http://www.geosociety.jp/publication/content0006.html> >

Appendix 1. Results of statistical tests. Abbreviations: S. D. = standard deviation, N = number of analyses, df = degrees of freedom. n. s., not significant; * p < 0.05; ** p < 0.01.

Appendix 2. Superfamily, family, and locality information, taxon codes, and references for the examined ostracode taxa.

(要 旨)

森下知晃・山口龍彦・眞柴久和・神谷隆宏, 2010, 貝形虫の殻の Mg/Ca 比, Sr/Ca 比による古環境推定の現状と問題点. 地質雑, **116**, 523-543. (Morishita, T., Yamaguchi, T., Mashiba, H. and Kamiya, T., 2010, A review of the utility of Mg/Ca and Sr/Ca ratios of ostracode valves as a tool for paleoenvironmental reconstructions. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **116**, 523-543.)

微小甲殻類の一種である貝形虫は低マグネシウム方解石の殻を持っており、この殻の微量元素量および、その比は古環境指標として利用されている。一般に海棲の貝形虫の殻の Mg/Ca 比は、生息場の水温と強い相関があり、淡水棲の貝形虫の殻の Mg/Ca 比および Sr/Ca 比は生息場の Mg, Sr 量を反映している。既存の研究を総括した結果、次のことが明らかになった。1) 続成作用による殻の Mg/Ca 比および Sr/Ca 比の変化を評価する方法は確立されていない。2) 殻の Mg/Ca 比および Sr/Ca 比の分配係数の範囲は分類群、生息場、系統によって異なる。3) これらの分配係数の範囲は種内の成長ステージによって異なる場合がある。4) 海棲種の Mg/Ca 比の分配係数から見積もられる水温は約 2 ~ 4 °C の誤差を伴う。5) 殻内の微小領域での Mg の分布の不均一性は殻全体の Mg/Ca 比に影響する。貝形虫殻の Mg/Ca 比, Sr/Ca 比をより精密な環境指標として確立するためには、生息環境の Mg/Ca 比, Sr/Ca 比, 続成作用や試料の前処理の厳密な評価、およびより多くの分類群のデータが必要である。