

# 有明海産ハボウキガイ *Pinna bicolor* の腎臓における 高濃度のマンガン蓄積

山本千裕<sup>1†</sup>

## High accumulation of manganese in the kidney of pen shell *Pinna bicolor* in Ariake Sea, Japan

Chihiro YAMAMOTO<sup>1†</sup>

*Pinna bicolor* is a Pinnidae shellfish, inhabiting shallow waters from temperate to tropical zone. The bivalve possesses large kidneys filled with metal-rich granules. The concentration of manganese in dried kidney tissues of pen shells sampled from Ariake Sea, Hagi, and Kamigoto were  $58,500 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ,  $34,300 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ , and  $5,700 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ , respectively. At the same time, manganese concentrations of 600 to  $1,400 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ,  $260 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ , and  $130 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  were found for sediment samples from Ariake Sea, Hagi, and Kamigoto, respectively. There were significant correlations between manganese concentration in the kidney and in the mud ( $p < 0.01$ ). These results suggest that manganese concentration in *Pinna bicolor* kidney can be an indicator of ionized manganese elution due to hypoxia or ooze deposition in the hydrosphere. Because the manganese concentration of samples at Ariake Sea was higher than ever reported. I assume that high elution of ionized manganese is occurring widely in the habitat of *Pinna bicolor* in Ariake Sea.

**Key words:** Ariake Sea, Pinnidae, *Atrina*, *Pinna bicolor*, manganese, kidney

### はじめに

ハボウキガイ *Pinna bicolor* は翼形亜綱イガイ目ハボウキガイ科に属し、本邦房総半島、能登半島以南、熱帯インド・西太平洋の水深50mまでの砂泥底に生息し、殻長35cmに達する大型の二枚貝で(奥谷, 2009)、有明海の福岡県地先海域では近縁種のタイラギ *Atrina pectinata* と混在して生息している(福岡県水産海洋技術センター有明海研究所調査, 未発表)。本種を含むハボウキガイ科のいくつかの種類は、金属成分に富む顆粒状の腎石(以下腎臓顆粒とする)によって満たされた巨大な腎臓を有することが古くから知られている(Ghiretti et al., 1972)。筆者は、有明海におけるタイラギの大量斃死の原因を探る調査の過程で、有明海産ハボウキガイの腎臓顆粒中に平均6.6%と極めて高い濃度のマンガンが含まれていることを見いだした。二枚貝の腎臓顆粒中にマンガンが著しい高濃度で蓄積した事例

については、これまでワスレガイ *Sunetta menstrualis* での4.4%(Ishii et al., 1986)、ピノスガイ *Mercenaria mercenaria* での8%(Sullivan et al., 1988)、ホタテガイの一種 *Pecten maximus* の10.6%(George et al., 1980)などの報告があるが、ハボウキガイについてはこのような高濃度で蓄積した事例は見当たらない。そこで本研究では、他海域産のハボウキガイや有明海産のタイラギとの比較、生息域の堆積物中マンガン濃度との関係について検討を行った。その結果、生息環境とマンガン蓄積の関係、ハボウキガイが堆積物からのマンガン溶出を知るためのバイオモニターとしての有効性に関する知見を得たので論議する。

### 材料と方法

ハボウキガイは山口県萩(Fig. 1a)で2010年2月に採取した5個体、有明海柳川沖の海域(Fig. 1b)で2010年3月に採取した35個体、長崎県上五島(Fig. 1c)で2010年1月に採取した5個体を用いた。また、タイラギは有明海産ハボウキガイと同じ水域で2009年12月に採取し、同年生まれと推定された小型個体約20個体を用いた。何れのサンプルも、水深10m前後の海底から潜水によって採取した。同時に表層約3cm厚の堆積物も採取した。

2011年4月25日受付, 2011年9月27日受理

<sup>1</sup> 福岡県水産海洋技術センター有明海研究所

Fukuoka Fisheries and Marine Technology Research Center Ariakekai Laboratory, 728-5 Yoshitomi-mach, Yanagawa, Fukuoka 832-0055, Japan

† trebuhcsp397@ori.bbq.jp

貝類は殻長、全重量、殻の成長休止帯による年齢推定の測定を行った後、軟体部重量を測定した。大型個体については腎臓、消化盲嚢、鰓、後部閉殻筋、外套膜に分けて湿重量を測定し、部位別に切り分けることが困難な小型個体では腎臓重量のみの湿重量測定を行った後、120°Cの乾燥機にて恒量となるまで24時間以上乾燥させ、乾燥終了直後の重量を乾燥重量としてマンガン濃度の定量分析に用いた。また、乾燥した腎臓の一部を80%エタノール水溶液中で砕いて洗浄し、腎臓顆粒のみを集めて腎臓顆粒サンプルとし、顆粒のサイズ測定や元素分析に供した。堆積物についても同様に、120°Cで乾燥した後、マンガン濃度を測定し、乾燥重量あたりの濃度で示した。

マンガン濃度の定量分析は貝類、堆積物とも硫酸および硝酸により有機物を分解した後、工業廃水試験方法 (JIS-K0102, 56-1) に定められた過ヨウ素酸吸光度法 (日本工業規格, 1998) に基づき行った。吸光度の測定は分光光度計 (U-2000, 日立) を用い、計測の標準物質として標準マンガン溶液 (和光純薬製計量法トレーサビリティ適合品) を用いた。腎臓顆粒の元素分析は電子線マイクロアナライザ (EPMA8750, 島津) (以下EPMAとする) を用いた半定量分析にて行った。本分析法は対象物に電子線を照射した際に発生する元素固有のX線 (特性X線) の解析に

より、対象物に含まれる元素の種類及び量を求めるもので、本研究ではホウ素からウランまでの原子番号範囲の元素について解析を行った。腎臓顆粒に含まれる元素についての標準試料は作成されていないため、標準試料を用いない半定量分析とし、分析結果は各元素の質量割合で示した。顆粒表面の観察は走査電子顕微鏡 (SEM) (VE7800, キーエンス) により無蒸着で行った。産地間の数値の差の有意性をMann-WhitneyのU検定およびKruskal-Wallis検定により判定した (有意水準,  $p < 0.05$ )。また、堆積物中のマンガン濃度と腎臓のマンガン濃度との相関の有意性をt分布表から判定した (有意水準,  $p < 0.05$ )。

## 結果

### 腎臓の発達状況

全軟体部に占める腎臓の重量比率は殻長にほぼ比例して増加した (Fig. 2)。1歳未満と推定される殻長10cm前後の個体では5%以下で、その大きさもカバーガラスにて平坦にした状態で長径が3.6mm程度と極めて小さい (Fig. 3a) のに対し、成長に従ってほぼ直線的に重量比率が増加し、殻長40cmの5歳以上と推定される大型個体では、左右1対の腎臓が1つに融合するまで肥大し (Fig. 3b)、最大で重量比率が28%を占める個体も出現した。腎臓の発達状況そのものについては産地間の差異は認められなかった。

### 腎臓顆粒の発達状況

腎臓顆粒はすべてのサンプルで認められた。1歳未満と推定される殻長11cm以下の個体では、顆粒は同心円状の構造を有する単純な球形や長球形の形状であり、直径は最大で約0.1mmであるのに対し (Fig. 4a)、殻長20cm以上の個体では同心円状の構造を持つ小顆粒が融合した形状となって巨大化し、長径で約1mmに達する巨大な顆粒も多

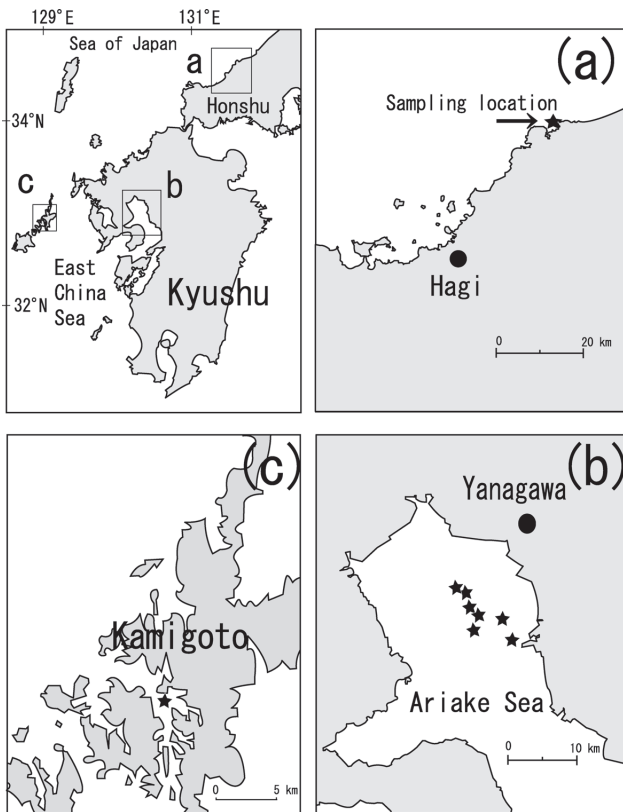


Figure 1. Collection sites of *Pinna bicolor*. Sampling locations are marked by solid stars.

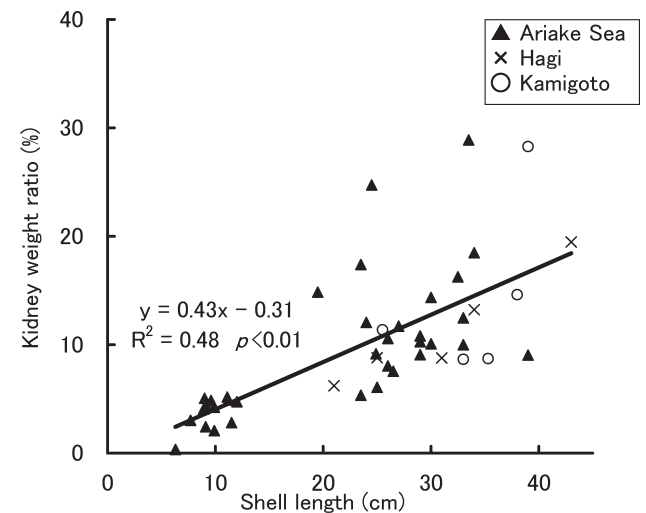


Figure 2. Relationship between kidney weight ratio (kidney weight $\times$ 100/total soft-tissue weight) and shell length.



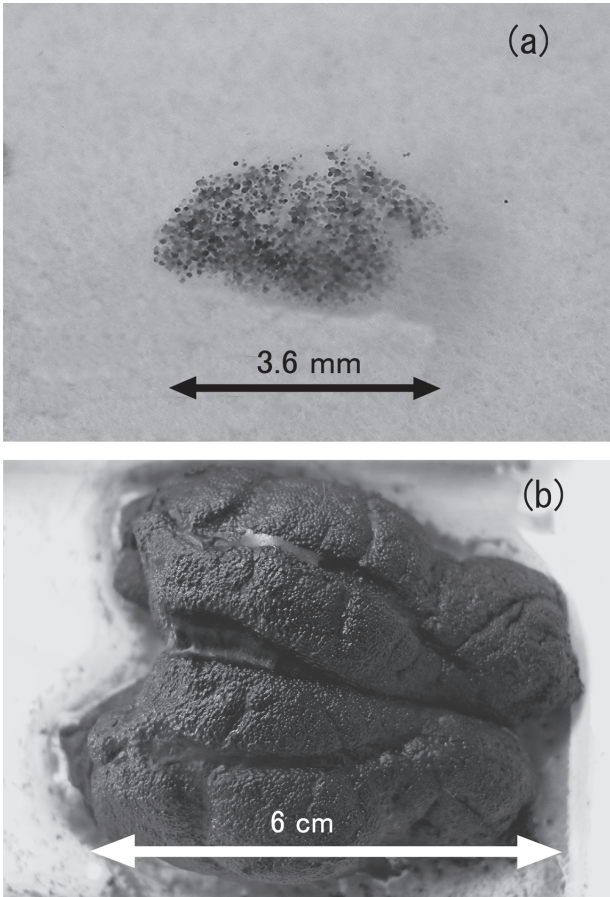


Figure 3. Kidney of young (a) and mature (b) *Pinna bicolor*.

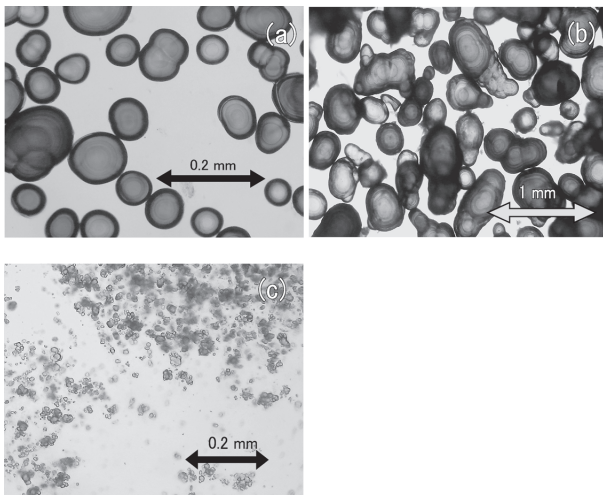


Figure 4. Nephroliths of young *Pinna bicolor* (a), mature *Pinna bicolor* (b) and *Atrina pectinata* (c).

数観察された (Fig. 4b). また、このような巨大な顆粒を持つ個体では、腎臓の外見からも腎臓内部はほぼ顆粒によって満たされている様子が認められた (Fig. 5). また、

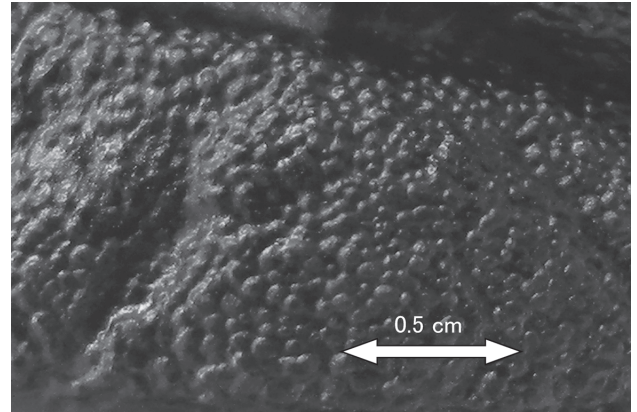


Figure 5. Surface of mature *Pinna bicolor* kidney.

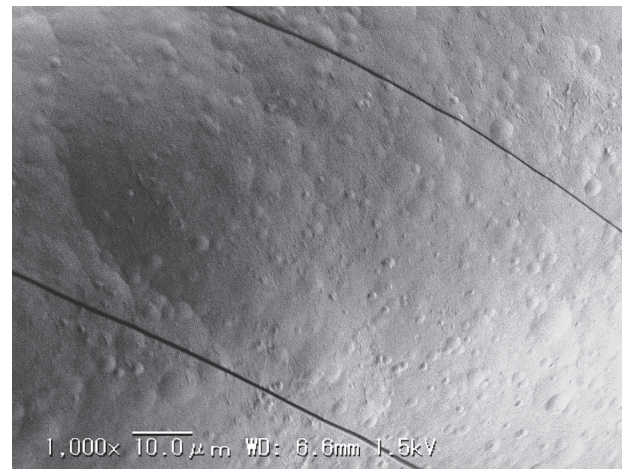


Figure 6. SEM image of which surface of *Pinna bicolor* nephrolith, showing many small bulging was observed.

SEMによる観察では、観察した全ての腎臓顆粒の表面に顆粒形成の痕跡と見られる凸レンズ状の隆起が無数に見られた (Fig. 6). 一方、タイラギについては、腎臓顆粒の存在は認められたが、顆粒の大きさは最大でも約0.01 mmで、顆粒の数も少なく、腎臓中に散在する程度であった (Fig. 4c).

#### 腎臓顆粒の元素成分

有明海産と上五島産の腎臓顆粒サンプルについての元素分析の結果 (Table 1), いずれも主要な構成元素はカルシウム、炭素、リン、酸素で、この4元素で有明海産サンプルの74%, 上五島産サンプルで82%を占めた。次いで多かったのはマンガンで、平均値は有明海産のサンプルで6.6%, 上五島産で1.2%であった。カルシウム、炭素、リン、酸素の含有割合は2産地間で有意の差は認められなかったが、マンガンは有意の差が認められた (Mann-Whitney *U*検定,  $p < 0.01$ ). その他の成分としてはイオウ、窒素、塩素、マグネシウム、ケイ素、亜鉛、ナトリウム、鉄、カリウム、アルミニウム、臭素が検出された

が、2産地間に有意差は認められなかった。

#### 部位別および産地別のマンガン濃度

部位別のマンガン濃度 (Table 2) を見ると、いずれの産地においても腎臓で最も高く、次いで、消化盲囊、鰓と外套膜、後部閉殻筋の順であった。特に腎臓では特異的に高く、他の臓器の数十倍から数百倍の濃度であった。このうち腎臓について、マンガン濃度と殻長の関係を見ると、いずれの産地についても有意の相関関係が認められなかった (Fig. 7)。一方、マンガン濃度のみに着目すると、有明海産で最も高く、次いで萩産、上五島産の順であり、産地間の値に有意の差が認められた (Kruskal-Wallis検定,  $p < 0.01$ )。また、有明海産タイラギについては、一般的にマンガン濃度は低く、臓器による差も少なく、腎臓が特異的に高いマンガン濃度を示すことはなかった (Table 2)。

**Table 1.** Metal composition (% , mean±SD,  $n=5$ ) of *Pinna bicolor* nephrolith in samples collected from Ariake Sea and Kamigoto.

Element	Ariake Sea	Kamigoto
Ca	22.0±11.2	26.9±11.5
C	18.2±10.9	21.7±17.9
P	17.3±8.5	18.3±8.9
O	17.3±4.2	15.1±7.5
Mn	6.6±3.4**	1.2±0.9**
S	4.1±3.0	4.4±3.9
N	3.9±2.4	2.8±1.8
Mg	2.7±0.7	2.8±1.2
Cl	2.7±2.7	2.1±2.4
Si	1.3±2.3	0.1±0.2
Zn	1.2±1.7	0.4±0.6
Na	0.9±0.5	1.0±0.8
K	0.8±0.6	0.8±0.3
Fe	0.8±1.2	1.9±1.6
Al	0.3±0.4	0.1±0.1
Br	ND	0.6±0.8

\*\*Significant difference ( $p < 0.01$ ) between two stations.

ND: No Data.

#### 採取地点の堆積物中のマンガン濃度と腎臓中のマンガン濃度の関係

堆積物のマンガン濃度は、それぞれ乾燥重量で上五島  $130 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 、萩  $260 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 、有明海では  $590\text{--}1400 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  であり、全体的に見ると堆積物中のマンガン濃度と腎臓のマンガン濃度の間には有意な正の相関が認められた (Fig. 8) ( $p < 0.01$ )。一方、サンプルを有明海産のみに限ると、両者の間に有意の相関は認められなかった ( $p > 0.5$ )。

#### 考察

##### 腎臓および腎臓顆粒の発達状況

ハボウキガイの腎臓は成長に伴って肥大し、5歳以上と推定される大型個体では軟体部重量の28%に達する巨大な腎臓を有する個体も出現した。このような巨大な腎臓の内部はほぼ腎臓顆粒で満たされていたことから、この腎臓の肥大は顆粒の蓄積によってもたらされ、顆粒部分を除けば本来の腎臓の部分はこれよりかなり小さくなるものと考えられる。

Sullivan et al. (1988) は、ハボウキガイと同様に大型の顆粒が充満した大型の腎臓を有するビノスガイについて、腎臓顆粒は腎細胞内のリソソーム残余小体の細胞外への排出、蓄積という一連の過程によって形成され、大型化すると推論している。今回観察したハボウキガイにおいても、腎臓が未発達な小型個体の段階から顆粒の形成が認められること、腎臓顆粒の表面で顆粒成長の痕跡が見られる (Fig. 6) ことなどから、ビノスガイと同様の過程によって細胞外で形成されたものであると考えられる。また、ハボウキガイと同一海域に生息するタイラギでも腎臓顆粒の存在は認められた (Fig. 4c) が、ハボウキガイに比べ顆粒は著しく小さく、その数もハボウキガイに比べ少ないため顆粒の充満によって腎臓が肥大化することは認められなかった。ほとんどの二枚貝は腎臓内に顆粒を生成する (大越, 2007) とされているが、腎臓を巨大化するまでに大量の顆粒を蓄積する種は限られており、ハボウキガイはこの限られた種の一つ (Reid and Brand, 1989) とされている。このことが形態的によく似ているタイラギとの最大の相違であり、両者

**Table 2.** Mean values of manganese concentration ( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ dry) in each organ of *Pinna bicolor* collected from Ariake Sea, Hagi and Kamigoto; and *Atrina pectinata* collected from Ariake Sea.

Organ	<i>P. bicolor</i>			<i>A. pectinata</i>
	Ariake Sea	Hagi	Kamigoto	Ariake Sea
Kidney	58,500	30,340	5,780	30
Digestive diverticula	840	420	170	10
Gills	470	220	30	20
Mantle	220	330	30	30
Post adductor muscle	40	110	20	20



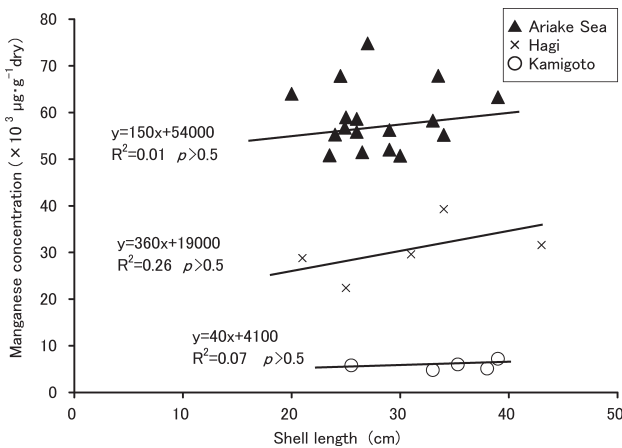
の生理的な特性の相違につながるものが考えられる。

**ハボウキガイ腎臓顆粒の成分**

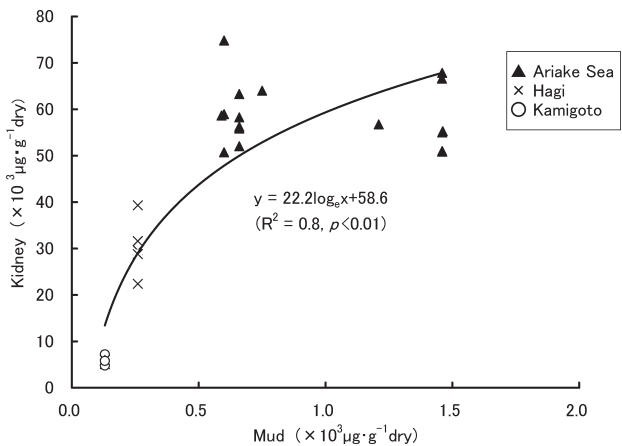
EPMAによる分析結果から顆粒の主成分はカルシウム、リン、酸素、炭素で、これらの主成分については有明海と上五島間で産地による差はなかった (Table 1)。二枚貝の腎臓顆粒を構成する主な成分の化学種について、Gold et al. (1982) はリン酸カルシウム  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  であるとしている。これに対し、Sullivan et al. (1988) は、ピノスガイやCarmichael et al. (1979) によるイタヤガイ科二枚貝の測定値から、顆粒がすべてリン酸カルシウムで構成されていると仮定した場合のカルシウム、リンのモル比率 (1.5:1) に比べ、いずれの測定値でもカルシウムの比率が低いとしてリン酸カルシウム以外に  $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2$  や  $\text{Mn}_3(\text{PO}_4)_2$  などのリン酸の金属化合物が含まれている可能性があることを指摘した。石井 (2000) は、高濃度のマンガンを蓄積しているワスレガイの腎臓顆粒についてマンガン化合物の構造解析を行った結果、化学状態は  $\text{Mn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  で酸化数は2

価であると報告している。本研究においても分析結果から計算したカルシウム、リンのモル比率はほぼ1:1と算出された。このようにカルシウムの比率が低いこと、顆粒に含まれるマンガンの割合が平均6.6%と高いことから、ハボウキガイにおいてもワスレガイと同様にマンガンは2価のリン酸塩の形で存在している可能性が高いと考えられる。他方、顆粒の有機成分についてGhiretti et al. (1972) はハボウキガイと近縁の *Pinna nobilis* の腎臓顆粒中に脂肪族の炭素鎖と結合したリン酸塩が含まれることを報告している。ハボウキガイについても同様に顆粒の一部は有機成分によって構成されていると考えられる。

Reid and Brand (1989) はオーストラリア産ハボウキガイの腎臓顆粒について、形態的な特徴やX線アナライザ (EDX) による分析値から、鉄、ニッケル、クロムを主成分とする顆粒 (iron nephroliths) と、カルシウム、リン、イオウを主成分とする顆粒 (calcium nephroliths) の2種があると報告している。この報告と今回の分析結果とを比べると (Table 3)、本研究で分析した腎臓顆粒はReid and Brand (1989) により iron nephrolith とされた顆粒に形態的な特徴はよく似ているが、成分としては calcium nephrolith とされた顆粒に似ていることなど、構成する元素に大きな差が認められた。また、Pallan (2010) によるマレーシア産ハボウキガイの重金属類の分析報告ではマンガンよりも



**Figure 7.** Relationship between manganese concentration in the kidneys and shell length of *Pinna bicolor*.



**Figure 8.** Relationship between manganese concentrations in the kidneys and in the mud where specimens were sampled.

**Table 3.** Comparison of metal concentration (% of dry weight granules) in *Pinna bicolor* nephrolith collected from three localities.

Element	Ariake Sea <sup>a)</sup>	Kamigoto <sup>a)</sup>	Australia (calcium nephrolith) <sup>b)</sup>	Australia (iron nephrolith) <sup>b)</sup>
Ca	36.3	44.5	47.1	7.0
P	28.6	30.3	28.9	7.3
Mn	10.8	2.0	0.2	
S	6.7	7.4	8.0	2.5
Cl	4.5	3.4	4.4	
Mg	4.5	4.6	11.1	
Si	2.1	0.2		3.3
Zn	1.9	0.7		
Na	1.5	1.6		
Fe	1.4	3.2		53.7
K	1.2	1.3		
Al	0.4	0.2		
Br	0.0	0.9	0.4	
Ni				12.6
Cr				13.7

a) Data based on the present study. Oxygen, carbon and nitrogen are excluded for analogy with the results of Reid and Brand (1989).

b) Data based on Reid and Brand (1989).

鉄が優占するとしており、産地により報告される重金属成分は異なっている。このように、ハボウキガイ腎臓顆粒に蓄積される重金属類の組成が、産地によって大きく異なっていることは、その生息環境の重金属類の状態を反映していることが理由と考えられる。

#### 部位別のマンガン濃度

部位別のマンガン濃度 (Table 2) を見ると、いずれの産地のサンプルにおいても腎臓中のマンガン濃度は高く、他の臓器の数十倍から数百倍の濃度を示し、次いで消化盲囊、鰓と外套膜、後部閉殻筋の順で低くなっており、マンガンは腎臓中に偏在していることが認められた。一方、同一海域で採取されたタイラギでは全般的にマンガン濃度は低く、腎臓中にマンガンが偏在する傾向は認められなかった。

二枚貝へのマンガンの取り込み経路には、餌料から消化器官を通じて取り込む経路と堆積物中の間隙水 (山元ほか, 2008) や底層水から鰓や外套膜などを通じて直接取り込む経路の二つがあると考えられる。ハボウキガイはタイラギ (秋本ほか, 1994) と同様に懸濁物食者であると推察されることから、前者の可能性もある。しかしながら、後述するように、海水中のマンガンについては水溶性の2価のイオンとして存在していると考えられること、ムラサキイガイにおけるカドミウム取り込みでは餌料経路の割合は0.2%から0.5%に過ぎない (Borchardt, 1983) とされていることからハボウキガイについても後者の可能性のほうが大きいと考えられる。

Ishii et al. (1992) は腎臓中に高濃度のマンガンを蓄積するシャコガイでの高濃度蓄積の原因は腎臓顆粒の存在によると報告している。ハボウキガイにおいても、マンガンを高濃度を含む腎臓顆粒が腎臓中に大量に存在することが腎臓のマンガン濃度が著しく高くなった理由と考えられる。一方、タイラギでは腎臓中に高濃度のマンガン蓄積が生じなかった。この理由として (1) 腎臓顆粒自体の量が少ないこと、(2) 顆粒自体に含まれるマンガン濃度についても、同属の *Atrina vexillum* でハボウキガイの約40分の1と報告された結果 (Reid and Brand, 1989) から考え、タイラギの場合も低濃度であると推察される。

ワスレガイやハボウキガイなど特定の二枚貝が腎臓中に高濃度のマンガンを蓄積する生理的な理由についてはまだ完全に明らかにされていないが、George and Pirie (1979), Reid and Brand (1989) および石井 (2000) は有害な重金属イオンを不溶態にして無害化するのが目的ではないかとしている。この考えに基づけば、ハボウキガイが大量のマンガンを不溶態で蓄積し、顆粒として排出する (Reid and Brand, 1989) のは体内に侵入した過剰のマンガンを固形物として無毒化し、排出する生理反応の現れと考えられる。

#### 産地別の腎臓中マンガン濃度と採取地点のマンガン濃度との関係

ハボウキガイ腎臓中マンガン濃度と採取地点における堆積物中のマンガン濃度の間に有意な正の相関があったが、有明海内に限るとこの関係は認められなかった (Fig. 8)。これは、有明海が比較的狭く浅い海域であり、大きな潮差により速い潮流が存在するため堆積物から溶出したマンガンの海水の攪拌によって水平的に均質化されやすいこと、有明海産のサンプルで測定された50,000から70,000  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  の高い濃度は蓄積の上限に近い可能性があることが理由として考えられる。

Corbin and Wade (2004) はオーストラリア産のハボウキガイで殻長と重金属の蓄積との関係について測定した結果、少数の例外を除けば有意の相関は認められなかったとし、重金属類の取り込み速度が排出速度を上回った場合にのみ加齢による蓄積の増加があると報告している。本研究においても後述するように、取り込まれたマンガンの濃度が産地毎に固有の値を示した理由と考えられる。

有明海で底質のマンガン濃度が高くなる理由について、堤 (2005) は、主要流入河川である筑後川や緑川など、火山活動の活発な阿蘇外輪山に源流を持つ河川から、火山活動の熱水に含まれるマンガンを大量に有明海に補給されるためとしている。NPO法人有明海再生機構 (2009) は有明海柳川沖での地層調査の結果、マンガン濃度は大津波の痕跡により特定された1792年以前から現在に至るまで比較的高い濃度で推移してきたと推定できる調査結果を示している。これらのことから有明海では地質学的にマンガンの蓄積が起こりやすい海域であると考えられる。今回比較検討を行った他の二つの産地の特徴として、上五島は離島であるため陸域からのマンガンの流入は少なく、萩は離島ではないが、流入河川は小さく、上流に活火山もないことなどの特徴があり、このためこれらの地点の濃度が有明海に比べ低い値を示したものと考えられる。

堆積物中のマンガンは4価の二酸化マンガン (Tsutsumi, 2008) や2価のマンガン水和物 (青山, 1993) などの形で堆積物中に不溶態の形で存在していると考えられている。青山 (1993) は、富栄養化の進んだ堆積物中では、マンガンの酸化数は2価で、水和酸化物の形で堆積物中に閉じこめられている比率が高く、貧酸素などによる還元状態で再び2価のマンガニオンとして溶出すると報告している。また、小山 (1976) は堆積物の還元過程で堆積物中の4価の二酸化マンガンを2価のマンガニオンに還元され溶出するとしている。これらのことから、いずれの酸化数のマンガんでも浮泥の堆積や貧酸素水の発生などの原因で堆積物が還元状態となることにより、堆積物中から2価のマンガニオンとして溶出し、生物の体内に取り込まれると考えられる。Yano (1997) は、ヤマトシジミ *Corbicula*

*japonica*について、貧酸素環境の頻発する閉鎖水域に生息している個体群と、貧酸素が発生しない水域の個体群を比べ、貧酸素が発生する水域では著しく高い濃度のマンガンが蓄積されていることを報告し、蓄積されるマンガン量を貧酸素発生の指標として利用できることを示唆している。長岡ほか(2004)も貧酸素の発生によって堆積物の還元層化が進んだ結果、堆積物中のマンガンがイオンとなって溶出すると述べている。本研究で有明海産のハボウキガイの腎臓で高濃度のマンガン蓄積が見られた理由として、もともと高い濃度で有明海の堆積物中に存在するマンガンが底層の還元的条件で2価のイオンとなって溶出し、腎臓顆粒に取り込まれたことが考えられる。この還元的条件を生成した原因として、近年頻発する大規模な赤潮(堤ほか, 2003)、浮泥の堆積および潮流の流速の低下(有明海八代海総合調査評価委員会, 2006)によってもたらされた酸素濃度の低下が考えられる。本研究の調査水域においても底層で酸素飽和度30%以下の貧酸素水の発生が報告されており(杉野ほか, 2009)有明海産ハボウキガイ腎臓における濃度は、堆積物からマンガンイオンが比較的高い濃度で溶出している可能性を示しているものと考えられる。

#### バイオモニターとしてのハボウキガイ

これまで述べてきたように、ハボウキガイの腎臓顆粒に蓄積するマンガン量は堆積物中のマンガン量と、還元的条件下でのマンガン溶出という二つの要素で決定されると考えられる。二枚貝に蓄積したマンガンは先述した貧酸素発生(Yano, 1997)や貧酸素水塊移動(Langlet et al., 2006)の指標となる他、マンガンイオン自体も水生生物にとって有害である(環境リスク評価室, 2008)。これらのことからハボウキガイ腎臓顆粒に蓄積するマンガンは貧酸素やマンガンイオンの溶出など水生生物に対する総合的な環境ストレスの指標として用いることができると考えられる。

Reid and Brand (1989)はハボウキガイの腎臓顆粒は常に生成と排出が行われており、最短で2週間、最長でも数ヶ月で顆粒の全量が入替わるとしている。このように短期間に交換される腎臓顆粒は比較的応答の速いバイオモニターとして利用できる可能性が考えられる。本研究においても、採集した直後の無傷のハボウキガイから大量の顆粒がこぼれ落ちるのをしばしば観察しており、サンプルを傷つけずに顆粒を採取することは比較的容易と思われる。また、ハボウキガイの腎臓顆粒にはマンガン以外にもさまざまな重金属が蓄積されている。二枚貝を用いた重金属類のバイオモニタリングについてはムラサキガイなどを使っていたいわゆるマッセルウォッチが国内外で検討されている(高柳・坂見, 2002)。これらの研究では生体サンプルそのものを分析に供するために測定は1度に限られるのに対し、ハボウキガイでは排出される顆粒を採取すれば、同一個体を用いて時系列的なモニターや環境条件を変化させるなど様々な試験ができる可能性が考えられる。ハボウキガ

イの分布は温帯域から熱帯域まで広く分布しており(奥谷, 2009)、比較的広い範囲の海域で試験生物として利用可能であり、バイオモニターとしては他の二枚貝にない特性を有するものと考えられる。しかしながらハボウキガイは各地で環境悪化等により急速にその数を減らしており、千葉県(2006)、愛知県(2009)、熊本県(2009)、沖縄県(2005)では絶滅種または絶滅危惧種とされている。ハボウキガイを貴重な試験生物として利用するために、何らかの保護策が必要と考える。

#### 謝辞

本研究を遂行するにあたり、株式会社ベントスの南里洋児氏にはハボウキガイのサンプル採取と堆積物サンプル採取に多大なご協力を頂いた。熊本県立大学の堤裕昭教授にはマンガンに関する文献・資料の提供およびご助言を頂いた。株式会社久留米リサーチパークの藤崎崇芳氏にはEPMAによる分析にご協力を頂いた。株式会社キーエンスの木下義久氏にはSEMによる顆粒の観察にご協力を頂いた。ここに記し、深く感謝の意を表す。

#### 引用文献

- 愛知県(2009)レッドデータブックあいち2009. 愛知県, 492 pp.  
 秋本恒基・相島 昇・林 宗徳・渡辺裕介(1994)有明海におけるタイラギ生息分布と環境との関係. 福岡水技研報, 2, 79-83.  
 青山 勲(1993)水圏環境中における鉄・マンガンの挙動. 土壌の物理性, 57, 11-18.  
 有明海八代海総合調査評価委員会(2006)有明海八代海総合調査評価委員会報告書, 環境省, 12-22.  
 Borchardt, T. (1983) Influence of food quantity on the kinetics of cadmium uptake and loss via food and seawater in *Mytilus edulis*. Mar. Biol., 76, 67-76.  
 Carmichael, N. G., K. S. Squibb and B. A. Fowler (1979) Metals in molluscan kidney: A comparison of two closely related bivalve species (*Argopecten*), using X-ray microanalysis and atomic absorption spectroscopy. J. Fish. Res. Bd. Can., 36, 1149-1155.  
 千葉県(2006)千葉県の保護上重要な野生生物. 千葉県レッドリスト(動物編)〈2006年改訂版〉, 千葉県環境生活部自然保護課, 36 pp.  
 Corbin, T. and S. Wade (2004) Heavy metal concentrations in razorfish (*Pinna bicolor*) and sediments across the northern Spencer Gulf. Appendix 1 Relationships between razorfish length and metal concentrations. Environment Protection Authority, Adelaide, South Australia, 78 pp.  
 George, S. G. and B. J. S. Pirie (1979) The occurrences of cadmium in sub-cellular particles in the kidney of the marine mussel, *Mytilus edulis*, exposed to cadmium: The use of electron microprobe analysis. Biochim. Biophys. Acta, 580, 234-244.  
 George, S. G., B. J. S. Pirie and T. L. Coombs (1980) Isolation and elemental analysis of metal-rich granules from the kidney of the scallop, *Pecten maximus* (L.). J. Exp. Mar. Biol. Ecol., 42, 143-156.  
 Ghirelli, F., B. Salvato, S. Carlucci and R. De Pieri (1972) Manganese in *Pinna nobilis*. Experientia, 28, 232-233.  
 Gold, K., G. Capriulo and K. Keeling (1982) Variability in the calcium phosphate concretion load in the kidney of *Mercenaria mercenaria*. Mar. Ecol. Prog. Ser., 10, 97-99.  
 石井紀明(2000)元素を高濃度に蓄積する亜熱帯域の海洋生物。



- みどりいし, **11**, 1-3.
- Ishii, T., K. Ikuta, T. Otake, M. Hara, M. Ishikawa and T. Koyanagi (1986) High accumulation of elements in the kidney of the marine bivalve *Cyclosunetta menstrualis*. Bull. Jpn. Soc. Sci. Fish., **52**, 147-154.
- Ishii, T., K. Okoshi, T. Otake and M. Nakahara (1992) Concentration of elements in tissues of four species of Tridacnidae. Nippon Suisan Gakkaishi, **58**, 1285-1290.
- 環境リスク評価室 (2008) マンガンとその化合物. 化学物質の環境リスク評価, 環境省, 1-23.
- 小山忠四郎 (1976) 湖沼における浄化作用. 用水と排水, **18**, 59-69.
- 熊本県 (2009) 海洋生物. レッドデータブックくまもと2009, 熊本県, 418-496.
- Langlet, T., L. Y. Alleman, P. Plisnier, H. Huges and L. Andre (2006) Mn seasonal upwellings recorded in Lake Tanganyika mussels. BGD., **3**, 1453-1471
- 長岡千津子・山本義和・江口さやか・宮崎信之 (2004) 大阪湾における底質重金属濃度と底質環境の関係. 日本水産学会誌, **52**, 147-154.
- 日本工業規格 (1998) 56.1 過よう素酸吸光度法. JISK0102 工場廃水試験法, 日本規格協会, 220-221.
- NPO 法人有明海再生機構 (2009) 平成20年度干潟・浅海域における物質循環に関する研究報告書. NPO 法人有明海再生機構, 64 pp.
- 沖縄県 (2005) 動物編貝類. 改訂版レッドデータブックおきなわ—動物編一, 沖縄県, 515 pp.
- 大越健嗣 (2007) 貝と貝殻のミネラル. 海のミネラル学, 成山堂書店, 東京, 62-77.
- 奥谷喬司 (2009) 日本近海産貝類図鑑, 東海大学出版会, 東京, 887 pp.
- Pallan, N. F. (2010) Heavy metal in pen shells (Bivalvia-Pinnidae) at Merambong Island and Merambong seagrass shoal. Masters thesis, University Technology Malaysia, Faculty of Civil Engineering, 74-77.
- Reid, R. G. B. and D. G. Brand (1989) Giant kidneys and metal-sequestering nephroliths in the bivalve *Pinna bicolor*, with comparative notes on *Atrina vexillum* (Pinnidae). J. Exp. Mar. Biol. Ecol., **126**, 95-117.
- 杉野浩二郎・吉田幹英・伊藤輝昭・松井繁明 (2009) 有明海福岡県地先におけるタイラギ斃死要因に関する研究II. 福岡水海技セ研報, **19**, 83-90.
- Sullivan, P. A., W. E. Robinson and M. P. Morse (1988) Isolation and characterization of granules from the kidney of the bivalve *Mercenaria mercenaria*. Mar. Biol., **99**, 359-368.
- 高柳和史・坂見知子 (2002) 沿岸海域の重金属汚染モニタリングに向けた指標生物候補としての二枚貝の特性. 水研センター研報, **2**, 35-46.
- 堤 裕昭 (2005) 有明海に面する熊本県の干潟で起きたアサリ漁業の著しい衰退とその原因となる環境変化. 応用生態工学, **8**, 83-102.
- Tsutsumi, H. (2008) Reduction of manganese dioxide in the sediment and its negative impact on the physiology of clams on two sandy tidal flats, Midori River Tidal Flat and Arao Tidal Flat, in Ariake Bay. Plankton Benthos Res., **3**, 64-71.
- 堤 裕昭・岡村絵美子・小川満代・高橋 徹・山口一岩・門谷茂・小橋乃子・安達孝弘・小松利光 (2003) 有明海奥部海域における近年の貧酸素水塊および赤潮発生と海洋構造の関係. 海の研究, **12**, 291-305.
- 山元憲一・半田岳志・那須博史 (2008) タイラギ外套膜内への底質の間隙水の浸入. 水大校研報, **56**, 233-235.
- Yano, Y. (1997) Use of manganese concentration in bivalves as an indicator of water pollution in Japanese brackish lakes. In. Environmental Biomonitoring, American Chemical Society, 65-76.