

[技術報告]

## 琵琶湖深層部の微生物由来マンガン酸化物構造体 *Metallogenium* の発生

Occurrence of *Metallogenium*-like Manganese Oxide Particles in Deepest Layer of Lake Biwa

一瀬 諭\* 若林 徹哉\* 岡本 高弘\*  
 藤原 直樹\* 井上 健\*\* 加賀爪敏明\*  
 宮島 利宏\*\*\*

2002年11月上旬における琵琶湖深層部の動物・植物プランクトン調査において、直径20~40 $\mu$ mの赤褐色微粒子が $10^3$ particles/ml以上計数され、検水のろ過作業に障害が生じた。このような現象は定期調査開始後、初めてのことであった。また、この時期の深層部調査から、底層部ではきわめて溶存酸素量が少ない水層が確認され、溶存態マンガン濃度の上昇も認められた。この水層には多量に本微粒子が分布していることが明らかとなり、その分布域は水深90m層以深に広く分布しており、概算でも約20km<sup>2</sup>と広範囲に及んでいることが推定された。この微粒子は、これまでの研究から*Metallogenium*とよばれる微生物由来のマンガン酸化物の構造体であることが明らかとなった。今回の調査から、琵琶湖深層部の広範囲にわたり本微粒子が多量に発生したということは、そのすぐ下にまで還元層(貧酸素層)が存在していたことが示唆され、今後、本微粒子の大量培養法を確立し琵琶湖の低酸素化のマーカーとして活用できるかについても検討していきたい。

**Key words** : 琵琶湖, 深層部, メタロゲニウム, マンガン酸化物, 溶存酸素量

### 1. はじめに

琵琶湖は滋賀県の中央部に位置し、面積670 km<sup>2</sup>、最大水深104mの日本最大の湖であり、そ

の水量は275億m<sup>3</sup>を保有し、近畿1,400万人の貴重な飲料水源となっている。さらに琵琶湖は400万年前に誕生したといわれる古代湖の1つである。当センターでは、琵琶湖のプランクトン調査を

\* Satoshi ICHISE, Tetsuya WAKABAYASHI, Takahiro OKAMOTO, Naoki FUJIWARA, Toshiaki KAGATSUME, 滋賀県立衛生環境センター(現滋賀県琵琶湖・環境科学研究センター) 〒520-0022 大津市柳が崎 5-34, Lake Biwa Environmental Research Institute, 5-34 Yanagasaki, Otsu-shi 520-0022 Japan (E-mail: ichise-satoshi@pref.shiga.lg.jp)

\*\* Ken INOUE, 滋賀県立衛生環境センター(現滋賀県下水道公社湖南中部浄化センター)

\*\*\* Toshihiro MIYAJIMA, 東京大学海洋研究所海洋化学部門

1978年から実施しており、深層部(水深約90m層)における動物・植物プランクトン調査についても1994年から毎月2回の頻度で継続実施してきている。

今回、2002年11月の定期調査時において、深層部検体から茶褐色の微粒子が多量に計数された。本微粒子についてはMiyajima<sup>1)2)</sup>が、メタロゲニウム(*Metallogenium*)とよばれる微生物由来のマンガン酸化物構造体であることを報告している。この*Metallogenium*の代表的な報告例としては、ワシントン湖<sup>3)</sup>やレマン湖<sup>4)</sup>があり、また旧ソビエト連邦の研究者によるロシア国内の湖における報告例<sup>5)6)</sup>がある。しかしながら、この*Metallogenium*とよばれている微粒子(以下、*Metallogenium*と略)が微生物であるのか否かについては、まだ未解明である。

今回、琵琶湖深層部において本微粒子が広範囲にかつ多量に観察されたことから、この微粒子の形態的特徴やその平面分布・鉛直分布についての調査を実施したので報告する。

## 2. 方法

*Metallogenium*の平面分布調査は、図1に示す琵琶湖北湖の水深約90m層で3回実施した。第1回目は2003年8月12日に3地点で、第2回目は10月31日に3地点で、第3回目は12月4日に6地点で実施した。調査項目は*Metallogenium*の微粒子数および溶存酸素飽和度、溶存酸素濃度、溶存態マンガン濃度などである。*Metallogenium*やプランクトンの水深別調査は、今津と長浜を結ぶ線上の中央地点(C地点:水深約90m)において水深0.5m、5m、湖底から1m(水深89m)の3層で1994年から毎月2回の頻度で継続実施している。植物プランクトン計数は、採水後ただちに検水1mlをプランクトン計数板(株離合社製)に取り、検水1ml中の植物プランクトン種とその総細胞数を生物顕微鏡(株ニコン製:オブチフォト)で計数した。また、動物プランクトンの計数は、検水1lをグルタルアルデヒド5%v/vで固定し、24時間自然沈殿させ上澄液をアスピレーターで除去した後、10mlにまで沈降濃縮した。この濃縮液中の1mlをプランクトン計数板に取り、検

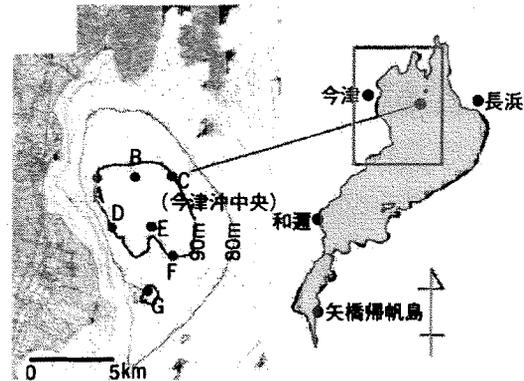


図1 琵琶湖北湖深層部における調査地点

水100ml中の動物プランクトンの種類と個体数を生物顕微鏡で計数した。

水温や溶存酸素飽和度/濃度(HACH社製Hydrolab Quanta)、溶存態マンガン(ICP発光分析装置)などの理化学調査についても同時に実施した。*Metallogenium*の確認後は、鉛直分布調査を水深0.5、5、10、15、20、30、40、60、80、湖底から1mの10層で計6回実施した。

水温および溶存酸素飽和度は、DOセンサーによる現場測定を行ない、その他の項目については実験室に持ち帰り、分析および計数を行なった。水温はサーミスター温度計で測定し、溶存酸素は隔膜電極法により測定した。なお、採水にはバンドーン採水器(容量20l)を用いた。

*Metallogenium*の測定は、検水1mlをプランクトン計数板に直接取り、生物顕微鏡にて全マスを計数し、1ml中の*Metallogenium*の総個体数を計数した。また、鉛直方向における水深別調査については、*Metallogenium*の現存量が底層部に比べ少ないため、Miyajimaの計数方法<sup>1)</sup>に準じて行なった。同方法は、検水10mlの湖水(グルタルアルデヒド5%v/v固定)を日本ミリポア(株)製HAフィルター(口径:25mm、孔径:0.45 $\mu$ m)でろ過した後、40 $^{\circ}$ Cの乾燥機においてフィルターを乾燥し、無蛍光イメージングオイルで透明化した後、フィルター表面に捕集された微粒子を生物微分干涉顕微鏡で検鏡する方法である。

*Metallogenium*の培養方法については、20 $^{\circ}$ C $\pm$ 1 $^{\circ}$ Cの培養室内にて暗条件で、試験管(20ml)を

用いて静置条件で液体培養を行なった。*Metallogenium*培地は主として藍藻用培地であるM11培地<sup>7)</sup>をベースに使用した。

### 3. 結果

#### 3.1 深層部主要プランクトン

C地点の深層部(水深89m)におけるおもな植物プランクトンの定期調査結果では、珪藻の*Stephanodiscus carconensis* (*S. suzukii*)や*Fragilaria crotonensis*, 褐色鞭毛藻の*Rhodomonas* sp.などが主要種であり、冬季に総細胞数が少なく秋季に多い傾向が毎年みられた。また、動物プランクトンでは、小型繊毛虫の*Strobilidium* sp.が最も多く、次いで球形のAmoebidae科に属する種がおもな優占種であった。しかし、赤褐色の微粒子が多量に計数された2002年11月6日の深層部では、植物プランクトンでは藍藻に属する*Aphanothece clathrata*が最も多く出現し、総細胞数は $9.0 \times 10^6$  cells/mlで2001年11月5日の $2.3 \times 10^2$  cells/mlや2000年11月6日の $3.9 \times 10^2$  cells/mlに比較して少なかった。つぎに動物プランクトンでは、2002年11月6日の総個体数は $3.6 \times 10^3$  particles/mlであり、2001年11月5日の $3.2 \times 10^3$  particles/mlや2000年11月6日の $4.7 \times 10^3$  particles/mlと比較して同程度の総個体数であった。しかし、動物プランクト

ンの種類組成でみると、本微粒子が多量に計数された2002年11月6日には、*Strobilidium* sp.等の小型繊毛虫の占める割合が全体の73%と多くの比率を占め、2001年11月5日の13%や2000年11月6日の19%に比較して多い傾向にあり、琵琶湖深層部における動物・植物プランクトン相は、今回みられた*Metallogenium*や溶存態マンガンの増加によって、影響を受けている可能性が示唆された。

#### 3.2 微粒子の形態について

C地点深層部で確認されたこの微粒子を写真1に示す。写真1①, ②の*Metallogenium*の形態は、毛球様であり、球体の中心部から紐状の突起物を数本から十数本放射状に出している。また、この紐状の突起物は不規則に湾曲し、先端が丸いものや(写真1③, ④), 先端が細くなり尖るもの(写真1⑤, ⑥), 突起物が長く伸びるもの(写真1⑦)など、さまざまな形態のものが観察された。*Metallogenium*の色彩は、光学顕微鏡での観察では酸化マンガン鉱物特有の黒っぽい茶褐色を呈しており、クロロフィル色素を有する多くの植物プランクトンや運動性を有する動物プランクトンとは容易に区別が可能であった。とくに深層部の微粒子は、茶褐色の色がより濃く写真1①~④に示すように、明瞭な太い突起物をもっているものが

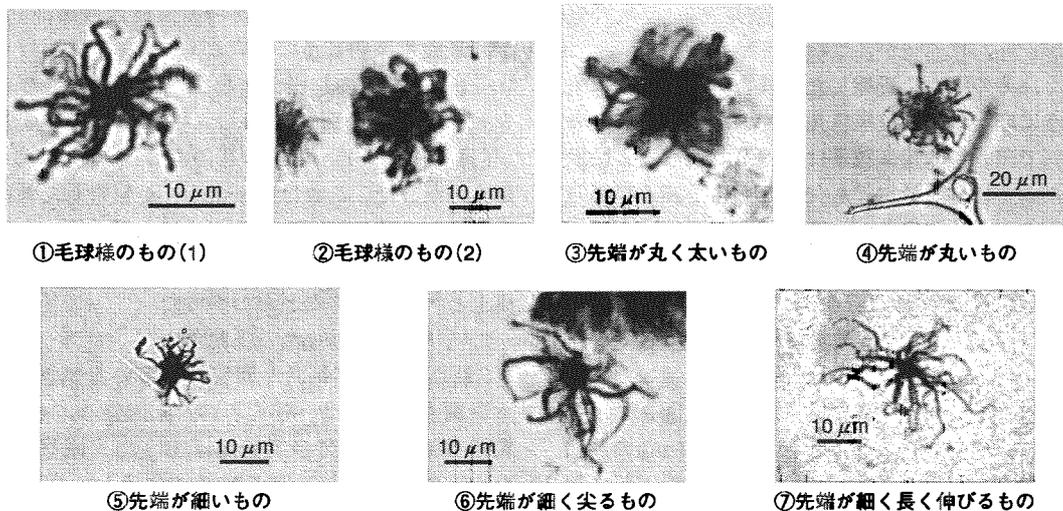


写真1 C地点深層部で採集された*Metallogenium*の形態的特徴(2002年11月18日採集)

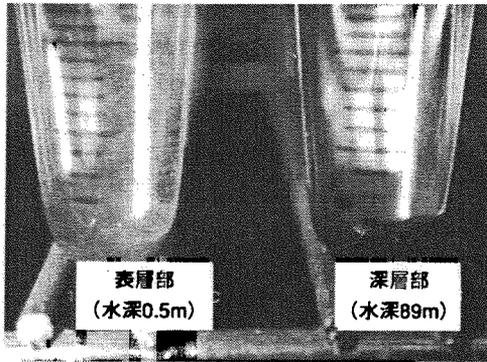


写真2 C地点における11中の沈殿物(2002年11月18日採集)

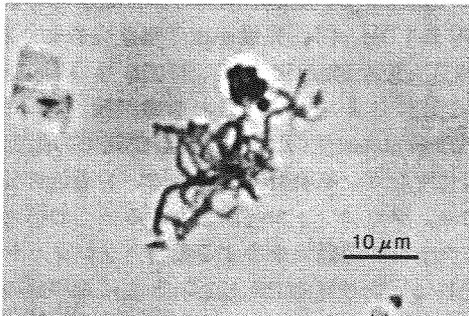


写真3 C地点表層部の色が薄く、先端が細く変形したMetallogenium(2003年1月14日採集)

多く、その湖水を濃縮した沈殿物も写真2に示すように底層のものは黒色化していた。しかし、表層部で確認される微粒子は色素が薄く写真3に示したように、紐状突起も欠けたものや細く変形したものが多く観察され、深層部と表層部では形態が異なることが明らかとなった。

3.3 微粒子の粒径分布について

2002年12月2日のC地点深層部に分布していた微粒子と、水深60mの中層部に分布していた微粒子の粒径の分布を図2と図3に示す。図2に示すように深層部の微粒子の粒径は13~40 μmの範囲で変動し、平均は21 μmで、Miyajima<sup>2)</sup>が報告した琵琶湖和邇沖の水深75m地点での粒径よりも、さらに大型であった。また、中層部のものは平均

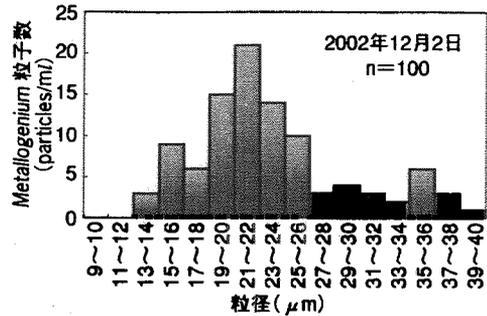


図2 C地点深層部のMetallogeniumの粒径分布

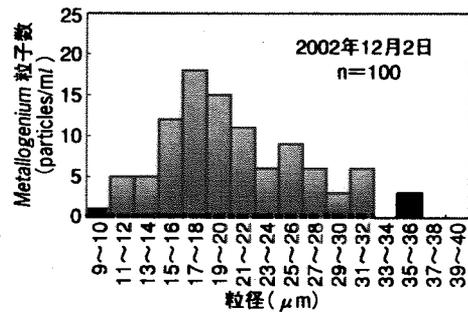


図3 C地点中層部のMetallogeniumの粒径分布

17 μmの粒径であり、深層部のものより中層部のものは小型化する傾向が認められた。黒い茶褐色の濃度も、深層部のものと比べると中層部のものは色が薄かった(写真3)。

琵琶湖南湖の矢橋帰帆島沖浚渫跡地底層部(図1, 最大水深約13mの湖底から1m層)におけるMetallogeniumの粒径分布を図4に示す。粒径は5~14 μmの範囲で変動し、平均8 μmと小型(写真4)であり、北湖のものより突起状の枝が短く細かった。これはMiyajima<sup>1)</sup>が報告した粒径や形態と一致した。このように、水深の深い北湖のものは水深の浅い南湖のものより、粒径で2倍以上と大型であることがわかった。

3.4 Metallogeniumの経日変化

C地点において毎月2回実施しているプランクトン調査結果では、茶褐色のMetallogenium様の粒子は過去10年間の調査ではまったく観察されなかった。しかし、図5に示すように、2002年10月31日に $2.8 \times 10^2$  particles/ml 計数され、11月6日には $1.4 \times 10^3$  particles/mlと微粒子は急増し

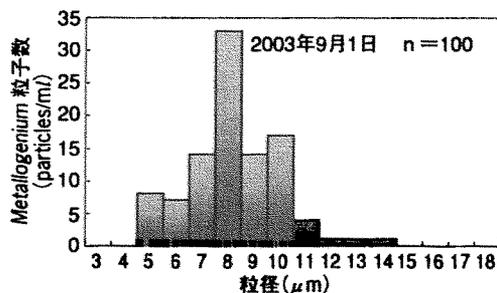


図4 矢橋帰帆島沖浚渫跡地底層部(水深12m)のMetallogeniumの粒径分布

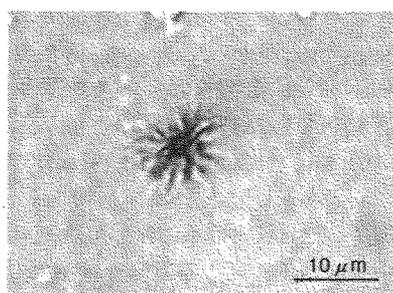


写真4 矢橋帰帆島沖浚渫跡地底層部(水深12m)のMetallogenium

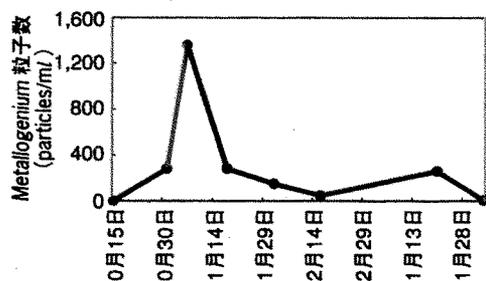


図5 C地点深層部におけるMetallogenium調査結果(2002~2003年)

た。その後、徐々に減少傾向が認められたが、すぐには消滅せず11月18日で $2.8 \times 10^2$  particles/ml, 12月2日で $1.5 \times 10^2$  particles/ml, 2003年1月14日で $3.0 \times 10^2$  particles/ml, 1月20日の調査時においてもMetallogeniumが $2.6 \times 10^2$  particles/mlとなり、その後、計数されなくなった。

### 3.5 Metallogeniumの細胞確認

Metallogeniumの粒子はマンガンの厚い殻を有するためか、前出のMiyajimaの方法<sup>1)</sup>および核酸染色剤(アクリジンオレンジ等)を用いた落射蛍光顕微鏡による観察では細胞質の存在を確認することができなかった。また、植物プランクトンの場合、葉緑体をG励起やB励起を用いて落射蛍光顕微鏡(自家蛍光存在)によって確認することが可能である。しかし、この方法を用いてもMetallogeniumの構造物内に細胞質の存在は確認できなかった。さらに、吸光光度計を用いてクロロフィルaの分析を行なったが、クロロフィルa特有の吸光は認められなかった。

### 3.6 Metallogeniumの固定と培養

Metallogeniumはグルタルアルデヒド固定液(5%v/v)や中性ホルマリン固定液(5%v/v)を加えた場合には、長期間培養室内( $20 \pm 1$ ℃)で培養しても固定された個体は成長したり増加したりしなかった。しかし、未固定の粒子をキャピラリー洗浄法により約50particles分離し、溶解性マンガンを微量( $MnSO_4$ として $200 \mu M$ )加えたM11培地<sup>7)</sup>で約1カ月間静置培養( $20 \pm 1$ ℃)した結果、写真5に示すように突起が長く伸びたり、小型のMetallogeniumの新たな存在が確認され、本種が微生物由来のものである可能性が推察された。しかし、2カ月間経過すると、色素が薄くなるなど活性が失われ、それ以上の培養はできなかった。

また、固定せずに非固定の状態に置いて培養すると、一時的に小型のMetallogeniumが発生したり、突起が3倍以上に成長することなども今回確認できた。これらのことから、本微粒子中には細胞質は確認できなかったが、この粒子自体がマンガン酸化能力をもっていることが推察された。

今後、琵琶湖底における本微粒子の大量発生メカニズムを解明するためにも、遺伝子解析や大量培養が必要であり、早期にMetallogeniumの単離培養法を確立する必要があると考えられた。

### 3.7 Metallogeniumと溶存酸素飽和度等

琵琶湖北湖の水深約90m層において、2002年8月と10月、12月の3回にわたり溶存酸素飽和度の調査を行なった。このとき、琵琶湖北湖の表層部では100~105%の溶存酸素飽和度であった。

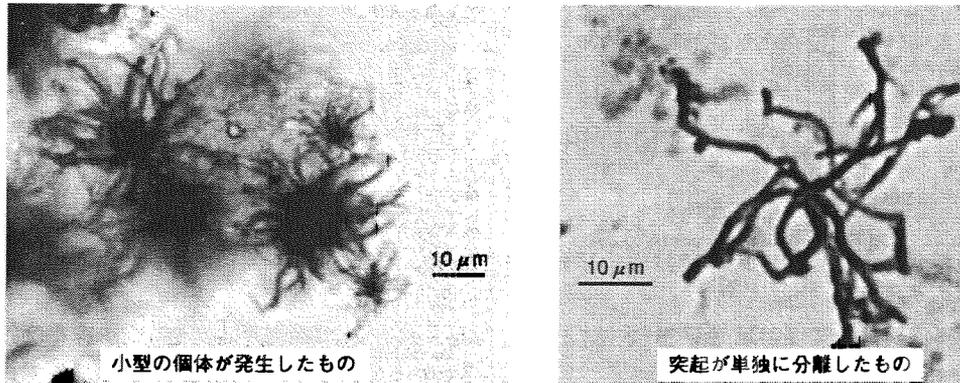


写真5 1カ月間静置培養したMetallogenium

表1 琵琶湖北湖深層部のMetallogeniumの分布  
(2002年, 各湖底から1m層)

地点	月/日	Metallogenium sp. (particles/ml)	溶存酸素飽和度 (%)	溶存酸素濃度 (mg/l)
C	10/31	280	24	2.6
F	10/31	2,700	9	1.1
G	10/31	1,100	16	1.9
A	12/ 4	1,580	31	3.6
B	12/ 4	850	30	3.5
D	12/ 4	730	30	3.5
E	12/ 4	1,820	24	2.8
F	12/ 4	1,200	34	4.0
G	12/ 4	600	34	4.0

しかし、8月12日の深層部では溶存酸素飽和度が42%にまで低下し、10月31日と12月4日の測定結果をみると、表1に示したように各地点でさらに溶存酸素飽和度の低下がみられた。10月31日の調査ではC、F地点で24%、9%という低い溶存酸素飽和度を計測し、また最深部(G地点)においても16%と低い溶存酸素飽和度を記録した。また、その約1カ月後の12月4日に行なった調査においても24~34%と低い溶存酸素飽和度であった。これらのなかで比較的溶存酸素飽和度が高かった10月31日のC地点では粒子数が $2.8 \times 10^2$  particles/mlと比較的少なかったが、飽和度が9%と低かったF地点では $2.7 \times 10^3$  particles/mlと多く計数された。また、最深部(水深104m)の飽和度が16%のG地点では、Metallogeniumは $1.1 \times$

$10^3$  particles/mlと多かった。一方、溶存酸素飽和度が24~34%と少し回復していた約1カ月後の12月4日に行なった調査においても、全地点において、 $6.0 \times 10^2 \sim 1.8 \times 10^3$  particles/mlと比較的多いMetallogeniumを計数した。

つぎに、C地点における溶存態の鉄・マンガン濃度と溶存酸素飽和度の鉛直分布を示す(図6)。深層部の総マンガン濃度と溶存酸素飽和度の推移(図7)をみると、溶存酸素飽和度の低下する時期に若干の上昇を示しているが、2002年の総マンガン濃度上昇は顕著であった。とくに11月6日の総マンガン濃度は $130 \mu\text{g/l}$ 、溶存態マンガン濃度は $28 \mu\text{g/l}$ と過去9年間での最大値であった。

今回の調査結果から、深層部の溶存酸素量が少ない水層でMetallogeniumが多く分布していることが明らかとなった。その分布域は水深80m層以深でとくに顕著であり、 $5.0 \times 10^2$  particles/ml以上計数された分布の面積を地図上から概算すると、約 $20\text{km}^2$ と広範囲に及んでいることが推察された。さらに、Metallogeniumは一度、生成されると好気的な環境下においては分解しにくく、形態を長期間保つことも推察された。

### 3.8 鉛直分布

つぎに、C地点におけるMetallogeniumの鉛直分布を図8に示す。2002年11月6日は深層部でのみ多量に計数されたが、12月2日の調査では、水深40m層までMetallogeniumが計数され、2003年2月3日の調査では、表層部から深層部まですべての水深で少量ながらもMetallogeniumが計数さ

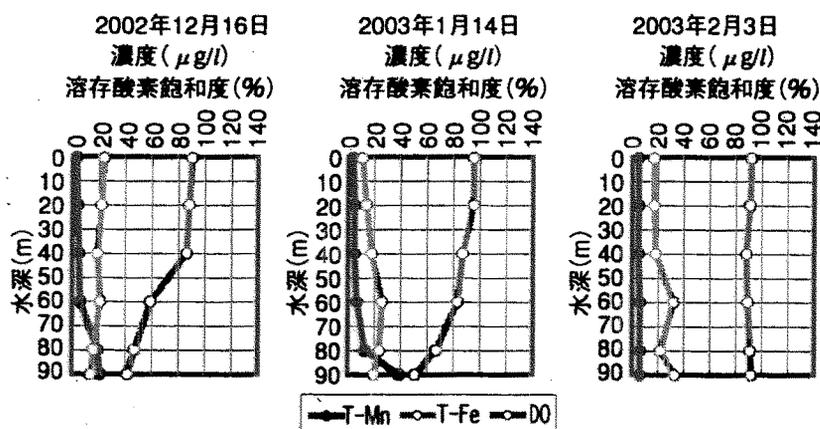


図6 C地点における溶存態鉄・マンガンと溶存酸素飽和度の鉛直分布

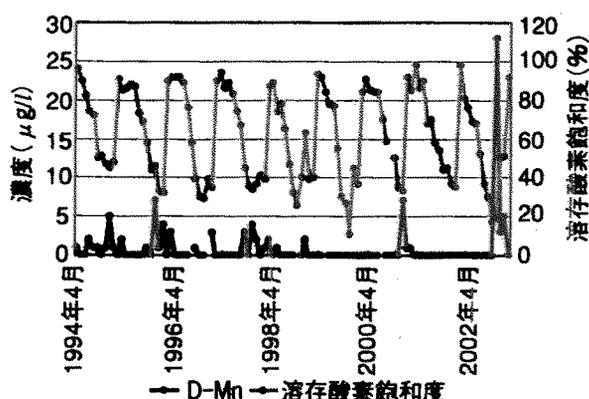


図7 C地点深層部の溶存態Mn濃度および溶存酸素飽和度の推移

れ、徐々に深層部から上昇してくる傾向が認められた。このことは、秋季に水温の低下とともに湖水の鉛直混合が起こることで、*Metallogenium*の一部が表層部にも運ばれている可能性が示唆された。

#### 4. 考察

琵琶湖深層部における動物・植物プランクトンは、*Metallogenium*や溶存態マンガンの増加によって、影響を受けている可能性が示唆された。今回、琵琶湖深層部の調査において多量に計数された微粒子の形態的特徴は、Miyajima<sup>1)2)</sup>、筆者ら<sup>8)</sup>や世界各地の貧酸素層を有する湖沼において報告<sup>3)4)9)~13)</sup>されている微粒子と一致していたことから*Metallogenium*であると同定した。

しかし、この*Metallogenium*とよばれるマンガン酸化物構造体が微生物であるのか否かについては、まだ未解明な部分が多い。1つの仮説として、旧ソ連の研究者Zavarinら<sup>5)</sup>は、マイコプラズマ細菌に類似した非常に小さなアメーバ状の微生物*Metallogenium symbioticum*の細胞の周囲に、マンガン酸化物を沈着して毛球状粒子を形成する機構があることを提案している。彼はまた、*M. symbioticum*を真菌類と二員培養した例も示

していた。これに対し、アメリカの研究者Klavness<sup>14)</sup>らは、微粒子自体は微生物ではなく、他の微生物が生産して細胞外に分泌した、ある種の蛋白質が核となって、二次的にマンガン酸化物が沈着・生成したものであるとしている。今回の調査で検出された微粒子が、どのように形成されたのかは不明であるが、いずれにしても、この微粒子をホルマリン液等で固定処理すると形態的には成長しないことから、なんらかの微生物の働きが関与していることは確実であると考えられる。本微粒子を未固定のまま培養すると、一時的に小型の*Metallogenium*が発生したり、突起が3倍以上に成長することなども今回確認されたことから、この粒子自体がマンガン酸化能力をもつ微生物由来のものであることも推察された。

Kawashimaら<sup>15)</sup>や寺島ら<sup>16)</sup>は、琵琶湖は中栄養湖であり、北湖では水中全体が通年酸化的であり、還元層および、その酸化還元境界層は底質または堆積物表面に存在することを報告している。また、北湖の最深部では夏に粒子態マンガンが蓄積することや、琵琶湖南湖の浚渫された水域でのみ季節的に嫌気底層が認められ、中層部で生じる典型的な酸化還元境界層において、生物作用によってマンガン沈降が起こっていることを報告<sup>15)</sup>している。

さらにMiyajimaは、*Metallogenium*が発生する条件として、①材料となる酸素と還元態マンガニオンが共存していること、②生成に関与する微

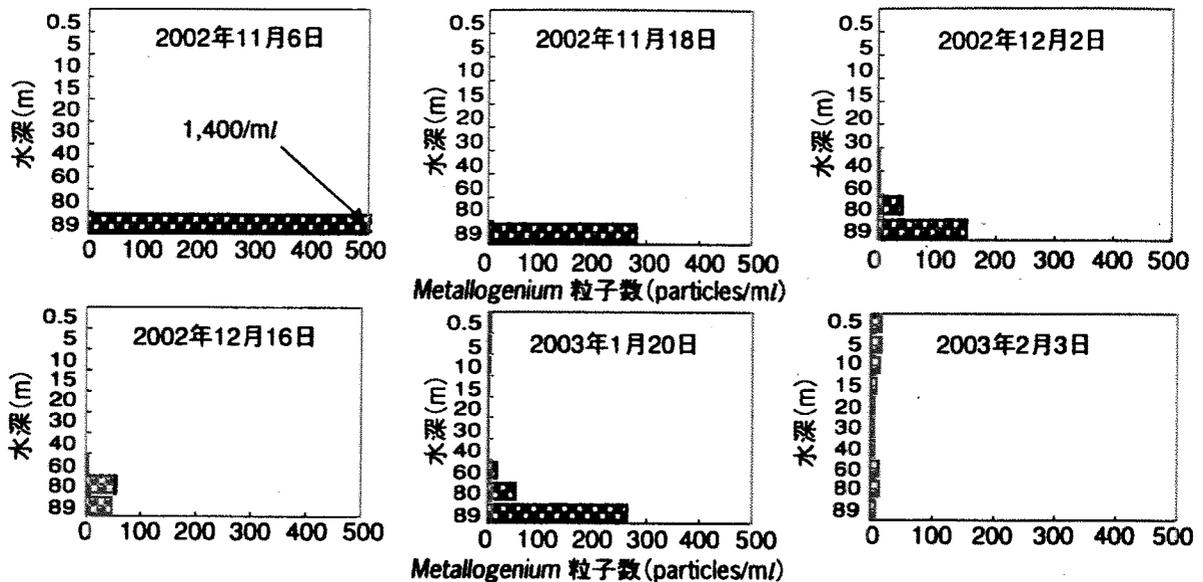


図8 C地点におけるMetallogeniumの鉛直分布(2002~2003年)

生物が存在すること, ③pHが中性(7.0)付近であること, ④炭水化物を主成分とした有機栄養素があること, ⑤溶存重炭酸イオンが存在すること, ⑥リン酸イオンの濃度は低いこと, などを挙げている。また, Metallogeniumの増加は, その生存場所の下にある還元層から拡散してくる2価のマンガンイオン量によってコントロールされることも報告<sup>2)</sup>している。

このように, 本微粒子が生成されるためには溶存態マンガン(II)の共存が不可欠であるが, 溶存態マンガン(II)は通常は底質中の還元層にしか存在せず, 底質表層には酸化層が発達しているため, 溶存態マンガン(II)は酸化層で酸化沈積してしまい, 湖水中に溶出してくることはない。しかし, 本微粒子が湖水中において発生していることを示した今回の調査結果は, 溶存態マンガン(II)が少なくともある時期において, 底質表層の酸化層を通り抜けて湖水中に溶出できる状態になっていたことを意味している。深層水の溶存酸素濃度が低下したために底質表層の酸化層が維持できなくなって一時的に消失したか, もしくは酸化層が残っていても, 酸素が不足しているために溶存態マンガン(II)の酸化沈積速度が鈍化したことが, この溶出の原因となっていた可能性が推察される。この推察は, 湖水深層部での溶存酸素濃度, 溶存態マンガン濃度, Metallogenium粒子

の発生密度の間に相関があるという観測結果(3.7, 3.8参照)とも符合している。この微粒子が湖水中において, なぜこのような大増加を示すのかは明確ではないが, 酸化還元境界付近において, 「新しくできては沈殿していき, また新しくできては沈殿していく」サイクルを繰り返しながら増加していることが推察された。

今回の調査結果から, 琵琶湖深層部の広範囲にわたり本微粒子が多量に発生したということは, そのすぐ下にまで還元層(貧酸素層)が存在していたことが示唆され, 琵琶湖の湖底面を覆っていた薄い酸化膜が部分的に剝がれた可能性があることが推察された。今後は本微粒子の大量培養法を早期に確立し, 本微粒子の増加特性や遺伝子解析, および, 琵琶湖低酸素化のマーカーとして活用できるかについても検討していきたいと考える。

#### 謝辞

本研究に当たり滋賀県琵琶湖研究所(現滋賀県琵琶湖・環境科学研究センター)の西野麻知子総括研究員, 中島拓男上席総括研究員, 滋賀大学の川嶋宗継教授に多くの助言を頂きましたことに心より感謝いたします。

また, 本原稿は, 滋賀県立衛生環境センター所報において発表された既報<sup>8)</sup>を, 大幅に加筆・修正したものである。

## —参考文献—

- 1) Miyajima, T. : Biological manganese oxidation in a lake : I. Occurrence and distribution of *Metallogenium* sp. and its kinetic properties, *Arch. Hydrobiol.*, 124, 317~335 (1992).
- 2) Miyajima, T. : Mud-water fluxes of inorganic nitrogen and manganese in the pelagic region of Lake Biwa : Seasonal dynamics and impact on the hypolimnetic metabolism, *Arch. Hydrobiol.*, 130, 303~324 (1994).
- 3) Gregory, E., Perry, R. S., Staley, J. T. : Characterization, distribution and significance of *Metallogenium* in Lake Washington, *Microb. Ecol.*, 6, 125~140 (1980).
- 4) Jaquet, J.-M., Nembrini, G., Garcia, J., Vernet, J.-P. : The manganese cycle in Lac Léman, Switzerland : the role of *Metallogenium*, *Hydrobiologia*, 91-92, 323~340 (1982).
- 5) Zavarzin, G. A., Hirsch, P. : *Metallogenium symbioticum* Zavarzin (1964), *Bergey's Manual of Systematic Bacteriology* (Staley, J. T., Bryant, M. P., Phennig, N., Holt, J. G. eds.) 9th edition, Vol. 3, 1986~1989, Williams & Wilkins, Baltimore (1989).
- 6) Zavarzin, G. A. : *Metallogenium symbioticum*, *Zeitschrift für Allgemeine Mikrobiologie*, 4, 390~395 (1964).
- 7) 矢木修身編 : アオコの増殖及び分解に関する研究, 国立公害研究所研究報告, 92, 7~17 (1986).
- 8) 一瀬 諭, 若林徹哉, 岡本高弘, 藤原直樹, 井上 健, 加賀爪敏明, 宮島利宏 : 琵琶湖北湖深層部における微生物由来のマンガン酸化物構造体—*Metallogenium* sp.の発生について (2002年)—, 滋賀県立衛生環境センター所報, 38, 100~105 (2003).
- 9) Davison, W. : *Chemical Processes in Lakes* (Stumm, W. ed.), p.31~54, Wiley-Interscience, New York (1985).
- 10) Nealson, K. H., Tebo, B. M., Rosson, R. A. : Occurrence and mechanisms of microbial oxidation of manganese, *Adv. Appl. Microbiol.*, 33, 279~318 (1988).
- 11) Stumm, W., Morgan, J. J. : *Aquatic Chemistry*, 2nd ed., Wiley-Interscience, New York (1981).
- 12) Brewer, P. G., Spencer, D. W. : Colorimetric determination of manganese in anoxic waters, *Limnol. Oceanogr.*, 16, 107~110 (1971).
- 13) Davies, S. H. R., Morgan, J. J. : Manganese (II) oxidation kinetics on metal oxide surfaces, *J. Colloid and Interface Sci.*, 129, 63~77 (1989).
- 14) Klaveness, D. : Morphology, distribution and significance of the manganese-accumulating microorganism *Metallogenium* in lakes, *Hydrobiologia*, 56, 25~33 (1977).
- 15) Kawashima, M., Takamatsu, T., Koyama, M. : Mechanisms of precipitation of manganese (II) in Lake Biwa, a fresh water lake, *Water Res.*, 22, 613~618 (1988).
- 16) 寺島 彰, 上田孝明 : 琵琶湖南湖盆の浚渫が水質および底生動物に及ぼす影響, 陸水学雑誌, 43, 81~87 (1982).

(原稿受付日; 2006年12月 8日)

(原稿受理日; 2006年 4月 7日)