

有孔虫の産状からみた 2003 年春季の 赤潮発生期の中海の海況

野村律夫¹・瀬戸浩二²

Water conditions during the time of red tide occurrence in spring, 2003, and the associated benthic foraminifera in Lake Nakaumi

Ritsuo Nomura¹ and Koji Seto²

Abstract: Benthic foraminifera such as *Trochammina hadai* and *Saccammina* sp. occur along with biological aggregates (marine snow) that suspended in the brackish waters of Lake Nakaumi. These species are common in organic rich sediments at greater depths in this lake. The biological aggregates were mainly composed of a dinoflagellate *Prolocentrum minimum*, which formed a red tide in the spring of 2003. The presence of these foraminiferal species strongly suggests that strong wind stress caused turbulence that disturbed bottom sediments leading to dispersion at middle water depths. In addition to the observations based on this foraminiferal occurrence, the mixing of deeper and shallower water at the halocline is a significant factor leading to outbreaks of red tide.

Key words: foraminifera, biological aggregates (marine snow), bottom turbulence, red tide, Lake Nakaumi

はじめに

2003年4月中旬から5月中旬にかけて約1ヶ月間、中海では広域に赤潮が発生した。国土交通省の中海湖心水質自動観測所が設けられている湖心部においても確認することができた(図1)。ここでは表層の水深0.2~1.5mを黄褐色の微細な粒子が浮遊し、しかも黄褐色の濃淡は観測所の支柱によって形成された表層水の乱流状態までも示していた。

中海におけるこのような赤潮の発生は、近年、毎年のように観察されている。発生時期が冬季から春季にかけてみられるのが特徴とされ、この時期に赤潮の主要な構成種である渦鞭毛藻 *Prorocentrum minimum* がブルームングをすることによってもたら

されていることが分かっている (Otake *et al.*, 1980; Kondo *et al.*, 1990a, b)。

赤潮発生期間中の湖水中の無機窒素化学種やリン酸態リンなどの栄養塩類の溶存状態については、多くの議論がされているとことである (Otake *et al.*, 1980, 1982; Kondo *et al.*, 1990b; 近藤ほか, 1994)。しかし、その間の水塊の動態に関する情報は、Kondo *et al.* (1990b) や近藤ほか (1994) を除き少ない。著者らは、中海の水質自動観測所を利用して、月ごとに堆積物のフラックス調査を行っている。湖心部の上層水においても沿岸域から輸送された中型底生生物の有孔虫がみられることから、湖底の攪乱とその運搬・堆積過程は中海全体の水環境に重要な影響を及ぼすことが明らかになりつつある。今回、このフ

¹ 島根大学教育学部地学研究室 Faculty of Education, Shimane University, Matsue, 690-8504

² 島根大学汽水域研究センター Research Center for Coastal Lagoon Environment, Shimane University, Matsue, 690-8504



図1. 2003年5月7日に観測された赤潮の様子. 中海湖心にある国土交通省の中海湖心水質自動観測所で撮影.

Fig. 1. Red tide observed in the central part of Lake Nakaumi, May 7, 2003. Photograph at the Meteorological observatory.



図3. 回収されたネットの様子. 各ネットの水深は, 1 (水深0.5 m), 2 (1.2 m), 3 (1.9 m), 4 (2.6 m), 5 (3.3 m), 6 (4.0 m).

Fig. 3. View of sample net. Depth of each net 1 (0.5 m depth), 2 (1.2 m), 3 (1.9 m), 4 (2.6 m), 5 (3.3 m), 6 (4.0 m).

ラックス調査の中で起った大規模な赤潮期間中の水の動態を明らかにすることは, 赤潮の発生要因を考える資料になると判断したので, 発生から衰退までの海況について報告する.

研究方法

本論では4月1日から5月31日の2ヶ月間の詳細な環境変動を分析するために, 水温, 塩分, chlorophyll a, および風速に関するデータを1時間単位で扱った. これらの毎時データは, 国土交通省の中海湖心水質自動観測所で得られたものである. 国

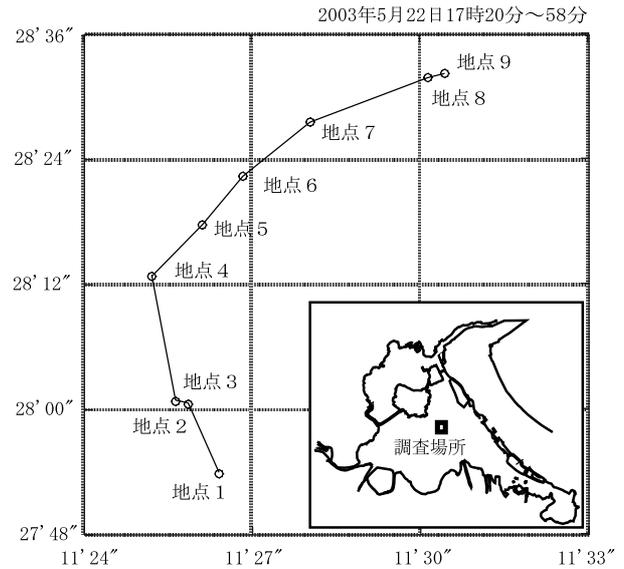


図2. 生物学的集塊を中海湖心部で移動採取した軌跡.

Fig. 2. Sailing route for the samples of biological aggregates.

土交通省出雲河川事務所による定期観測システムでは, 各層の水深が次のようになっているが, 本論では躍層の動態と関連している上層と中層についてのみ検討を行った.

表層: 水面下 0.5 m
 上層: 水面下 1.0 m
 中層: 水面下 3.5 m
 下層: 水面下 5.5 m
 底層: 湖底上 0.5 m

表層から中層における生物学的集塊の採取は, 観測所の北側で5月22日に実施した(図2). 口径28 cm, 篩のサイズが0.4 mmのナイロクロスを表層の0.5 mから水深4 mまで0.7 m間隔で計6水深に設置し, 38分間, 極低速で移動することによって生物学的集塊を採取した. 生物学的集塊の量は水深4 mで多く, 表層ほど少量の集塊しか採取されない傾向にあった(図3). 今回は, 湿重量を測定していないため, 有孔虫の現存量を採取時間で直接比較することにした.

また, 湖水中の生物学的集塊の浮遊状態については, 4月8日, 5月2日, 5月7日に水中ビデオカメラを使って観察・記録した.

結果と考察

1. 中海湖水の上層・中層の動態

中海では塩分の違いによって形成される躍層が水深3~4 m付近に発達し, その躍層によって生態系

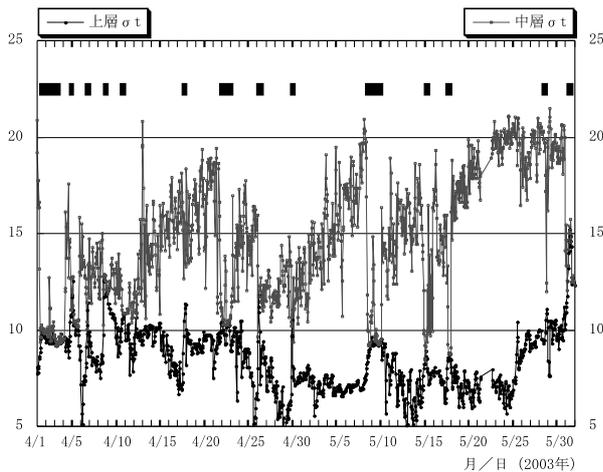


図 4. 上層水 (水深 1 m) と中層水 (3.5 m) における 4 月 1 日から 5 月 31 日までの σ_t の毎時変化. 太線で示した期間は両者の密度 (主に塩分) が逆相関をしている.

Fig. 4. Every hour variation of σ_t at upper (1.0 m) and middle (3.5 m) water depths. Data from April 1 to May 31. Thick lines indicating a reverse relationship of water density (σ_t) between upper and middle water depths.

も影響を受けている. 堆積物フラックス調査に付随した観察では, 躍層より上位ではフジツボやカキのような付着性生物が多く, 下位では, 冬季を中心にユウレイボヤのような富栄養水域に適応した生物が生息する. 一方で, 躍層は強い風浪によって著しく変動するとともに, 季節的にも安定性が異なっている.

湖底観察によると, 4 月から 5 月にかけては躍層を介して上下の生態系, とくに下層水域に適応した生態系に変化がみられる. たとえば, 湖底のユウレイボヤ群の衰退があげられる. 中海の上層水温は冬季に低下し, 躍層付近の中層水より低くなっている. たとえば, 2003 年 3 月には最大で約 4°C の較差が生じた. このような水温の逆転構造は 4 月上旬から中旬以降になると上層水温が高く, 中層水が低くなるという熱的に安定な構造へと移行する. ちなみに, 冬季に湖水の鉛直循環が起こりやすい理由の 1 つとして, 水温の逆転構造が考えられている (Ohtake *et al.*, 1982; 近藤ほか, 1994).

躍層の形成は海水の密度によって決まるもので, 汽水域では水温のほかに塩分によっても密度は大きく影響される. 一般に, 海水の密度は, 水圧, 水温, そして塩分の関数として表され, σ_t によって海水の密度が示されている (Sverdrup *et al.*, 1978). この σ_t は海水の物理化学的な性質, すなわち水塊の特性を

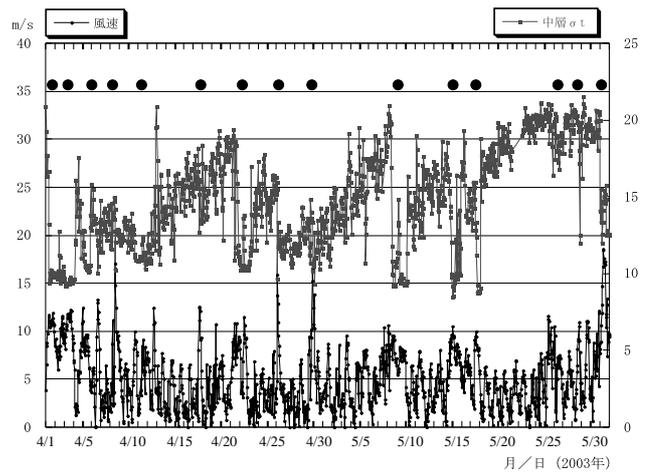


図 5. 中層水の σ_t の毎時変化と風速 (m/sec) との関係. 点で示した部分は, 風速が 10 m/s を超える時間帯には中層水の密度が低下していることを示している.

Fig. 5. Every hour variation of σ_t at the middle depth ((3.5 m)) and wind stress. Solid circles showing a reverse relationship between wind stress and water density indicate a mixing of upper and middle water.

第一義的に評価できるものとして重要視されているが, 汽水域では塩分による較差が水温差以上に大きい. 近藤ほか(1994)は, 密度成層に対する水温と塩分の寄与の割合から水温の支配された水温差型に対して, 中海水を塩分差型と認めているように, 実質的には塩分によって密度が支配されている.

図 4 は, 上層と中層における 4 月と 5 月の σ_t の時系列分布である. σ_t 値が上がれば海水密度は高くなっている. 図中に太線で示している部分は, 上層水と中層水の σ_t が逆相関になっている期間である. 上層の σ_t が上がると, 中層の σ_t は低下している. 逆の関係でも同様である. すなわち, 数日または数時間単位で中層から上層にかけて内部振動によって鉛直混合が起こっていることを示している. 混合の程度は 5% 以内である. 赤潮の発生前の 4 月上旬には上層と中層の密度差が極めて小さくなっている.

図 5 は中層付近の σ_t 値の変動を起こす要因として, 風速との関係を求めたものである. 風速の変動幅が大きく, しかも短期間の変動のため必ずしも明瞭に両者の関係が明示できていないわけではない. しかし数時間単で変動するスパイク的な中層水の σ_t 値の低下時には, 10 m/sec を超える強い風速が確認され, 躍層付近が頻繁に強い風の影響を受けている. すなわち, 上層水の σ_t 値の上昇は, 中層の高密

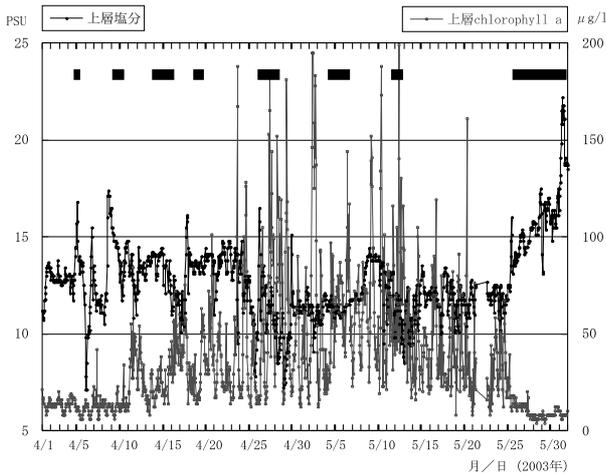


図6. 上層水の塩分の毎時変化とクロロフィル a 量の毎時変化との関係。上層水の σ_t が低下している時期にクロロフィル a 量が高くなっているのが4月の中旬にみられる。4月下旬から5月中旬にかけて、クロロフィル a 量は激しく変化している。上層水の密度が低いときには、中層水の密度は高くなっているため、躍層付近の水は安定した状態にある。

Fig. 6. Every hour variation of salinity and chlorophyll a at the upper water depth (1 m). Thick lines indicating a reverse relation between salinity and chlorophyll a.

度水の混合によるもので、風の営力を受けた結果として理解できる。このような風による躍層付近での塩分の混合作用は短期間でしか維持されないことが分かっている(奥田, 1997)。

渦鞭毛藻である *Prorocentrum minimum* は、細胞内に chlorophyll a, c を含んでおり、冬季から春季の赤潮発生時期の chlorophyll a 量は、*P. minimum* の現存量を示している(Kondo *et al.*, 1990a)。図6は上層における塩分と chlorophyll a の変動を示している。chlorophyll a の変動を時系列でみると、4月10日から23日まで、chlorophyll a の分布量は数日の間隔をおいて増減を繰り返している。4月8日の定期調査時には、まだ赤潮は発生していなかったが、4月21日には赤潮を確認することができた(瀬戸の定期調査による)。したがって、chlorophyll a の増減がより顕著になる12日以降23日までの期間中に赤潮として *Prorocentrum minimum* がブルーミングを起こしはじめたものとみられる。この時期以降、4月23日から5月20日の間は極めて大きな変動幅で推移している。赤潮が湖心部まで分布域を広げたのはこの時期に相当する。そして5月25日以降、急激に減少していく。次に塩分との関係でみると、太線で示した期間のように極めて特徴的な現象が確認できる。塩分が低下すると、chlorophyll a が増加し、逆に塩分が増

加傾向を示すと、chlorophyll a 量は低下する。最も典型的な時期として、5月下旬の chlorophyll a 量が低下する時には塩分は著しく増加していく。図4で示したように、上層水の σ_t 値が低下している時には、中層水の σ_t 値は逆に高くなっていることから、躍層付近の水塊は安定した状態になっているといえる。このことから *Prorocentrum minimum* は、躍層付近での混合作用のあとで、中層から上層の中海水が安定した短期間に急激に増殖を起こしているようにみえる。

2. 生物学的集塊(マリンスノー)と有孔虫の産状

5月2日の水中観察で赤潮は、表層から上層の約1.5 mの厚さをもって浮遊しており、微粒子状の“霧”として観察することができた。しかし、中層では“霧”ではなく、数 mm から数 cm の大きさを示す極めて物理的に不安定な生物学的集塊(マリンスノー)となって浮遊していた。この生物学的集塊は、赤潮を構成する *Prorocentrum minimum* の生体または遺骸よりなっており、赤潮に由来することを光学顕微鏡により確認した。

この生物学的集塊に付随して産出した有孔虫の種類を図7に示す。また、図8には、63 μm 以上の大きさをもつ有孔虫の個体数を生体と遺骸で水深ごとに区別して示した。*Trochammina hadai* と *Saccammina* sp. の生体が確認され、水深4 mの中層(躍層付近)に多く産出した。躍層より上位でも産出しているが、表層に近いほど産出個体数は少ない。遺骸の個体数は、生体に比べ少なかった。また、フラックス調査で比較的産出することの多い *Ammonia "becarii"* は *Trochammina hadai* に比べて極めて少なかった。

このような生物学的集塊中の有孔虫の産出は、有孔虫の分散・移動を考えるうえで貴重な証拠資料となるものであるが、ここではなぜ有孔虫がこのように多量に産出しなければならないのか、という基本的な問題を提起している。

3. 有孔虫からみた湖底泥の攪乱：赤潮発生の可能性へ向けて

これまで述べたように、 σ_t (主に塩分)からみて中海の躍層付近は、風の営力を受けて変動していることが明らかとなった。すでに奥田(1997)によって説明されているように、塩分躍層付近での内部振動の形成は沿岸帯で下層水の這い上がりをもたらしという。風浪によって攪乱された湖底泥も表層・上層へ運搬される機会が多くなっていると解釈することも

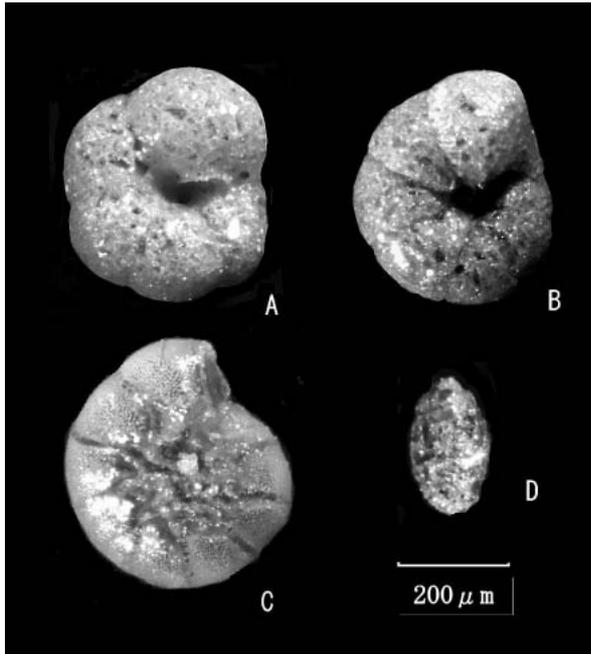


図 7. 生物学的集塊に付随して産出した有孔虫. A: *Trochammina hadai* (遺骸). B: *Trochammina hadai* (生体). C: *Ammonia "beccarii"* (遺骸). D: *Saccammina sp.* (生体).

Fig. 7. Foraminifera found in biological aggregates.

できる. Kondo *et al.* (1990b) は, 米子湾で 8 m/sec のような強い風速の時に *Prorocentrum minimum* の細胞数が増加していることを確認し, 浮遊物質の量が 10 m/sec 以上の風速の 2 時間後に増えたことを指摘している. 中海の湖心部の浮遊物の中に今回見つかった底生有孔虫は, このような湖底の攪乱の証拠となるものである. 先に示した *Trochammina hadai* や *Saccammina sp.* は中海の富栄養化したヘドロ堆積物中を主要な生息地としている (Nomura and Seto, 1992). 移動能力が極めて乏しいこのような有孔虫が, 生物学的集塊に多数存在していることは, 中海の沿岸で湖底泥の巻き上がりが起っているという解釈を矛盾なく説明している. 明らかに湖底の攪乱を受けて生物学的集塊へ取り込まれた, または付着した結果である. 有孔虫による今回の証拠からみると, 湖底の堆積物中にあった休眠状態の *Prorocentrum minimum* が風浪によって攪乱された結果, 中層水そして上層水中へ再帰することは十分に考えられる. 3 月下旬から 4 月上旬にかけて上層と中層の海水密度が類似し, しかも強風が偶然に作用したときには, 中層の栄養塩類ばかりでなく, 湖底泥の巻き上がりによる生物の移動も頻繁に起こっているものと推察される. そして, 水の栄養状態 (近藤ほか, 1994) や

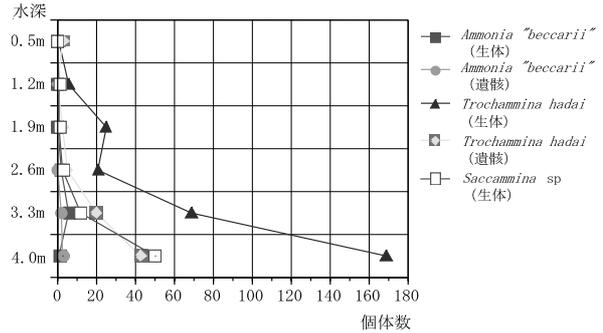


図 8. 各水深における産出有孔虫の個体数.

Fig. 8. Foraminiferal occurrences of each water depth.

日照量によっては大規模な赤潮へと発展することが可能であろう.

2003 年の赤潮は中海で広域的に発生したが, 中海の沿岸でヘドロ堆積物が厚く堆積している場所の攪乱は, 赤潮を発生させる要因の 1 つになっていると考えられる.

ま と め

小論では, 赤潮発生の海況を海水の密度 (σ_t) からみて, 上層水と中層水が極めて特徴的な挙動をしていることを指摘した. そして, 移動能力が乏しく, ヘドロ堆積物中にしか生息できない有孔虫 (主に *Trochammina hadai*) が, 中層水から上層水中の生物学的集塊に多く産出したことを指摘し, 強風による中層付近の湖底泥の巻き上がりの証拠を示した. 赤潮の発生要因のなかで, 湖底泥の攪乱と上層への拡散を指摘した Kondo *et al.* (1990b) の議論は, 有孔虫からみても積極的に支持できる. しかし, 今回確認した有孔虫は, 米子湾に限らず, 中海の塩分躍層より下位に多い種類であったことから, 湖底の攪乱は中海の沿岸で広く起こりえるといえる. 4 月における水温の変化は, 塩分はもとより生態系にとって重要である. さらに, 湖底泥の攪乱を誘発させる風浪は, 中海の環境を支配しているともいえる. 今後, 湖底泥の攪乱と分散を詳細に検討していく必要がある.

謝 辞

中海の水質資料を快く提供していただいた国土交通省出雲河川事務所の溝山勇水環境課長に衷心よりお礼申し上げる. また, 赤潮の発生についてコメントをいただいた島根大学の太谷修司教授と清家 泰

助教授にお礼申し上げます。

引用文献

- Kondo, K., Seike, Y. and Date, 1990a. Red tides in the brackish lake Nakanoumi (I) The frequency and causative species of red tides. *Bull. Plankton Soc. Japan*, 36: 103-110.
- Kondo, K., Seike, Y. and Date, 1990 b. Red tides in the brackish lake Nakanoumi (II) Relationships between the occurrence of *Prorocentrum minimum* red tide and environmental conditions. *Bull. Plankton Soc. Japan*, 37: 19-34.
- 近藤邦男, 清家 泰, 橋谷 博, 1994. 汽水湖中海における栄養塩類および植物プランクトンの鉛直分布を支配する塩分躍層の役割. *陸水学雑誌*, 55: 47-60.
- Nomura, R. and Seto, K., 1992, Benthic foraminifera from brackish Lake Nakanoumi, San-in district, southwestern Honshu, Japan. *In* Ishizaki, K. and Saito, T., eds., *Centenary of Japanese Micropaleontol.*, Terra Sci. Publ. Co., Tokyo, 227-240.
- Ohtake, H., Kondo, K., Hayashi, N., Oda, K., Kawata, S. and Date, Y., 1980, Phytoplankton studies in the brackish lake Nakanoumi, Japan I. Phytoplankton in Lake Nakanoumi, 1974-1978. *Arch. Hydrobiol.*, 90 (3): 309-323.
- Ohtake, H., Kondo, K., Seike, Y. and Date, Y., 1982. Seasonal and features of the lagoonal environment in Lake Nakanoumi, a shallow coastal lagoon in Japan. *Hydrobiologia*, 97: 15-26.
- 奥田節夫, 1997. 汽水湖における水塊の移動と混合過程. *沿岸海洋研究*, 35 (1): 5-13.
- Sverdrup, H. U., Johnson, M. W. and Fleming, R. H., 1978. *The Oceans. Their physics, chemistry, and General Biology*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J.