

中海における赤潮発生過程に関する実験的研究

【水質調査第一科】

南 條 吉 之 ・ 藤 田 紀 子
道 上 隆 文 ・ 福 田 武 史

Study on Process of Red Tide Occurrence at Lake Nakaumi

Yoshiyuki NANJYO, Noriko FUJITA
Takafumi MICHIE, Takeshi FUKUTA

Abstract

Located in downstream of Hii river and between Shimane and Tottori prefectures, Lake Nakaumi is the 5th largest brackish lake in our country. The quality of the lake water has continuously failed to satisfy the environmental standard since 1973, the cause of which is the eutrophication of the lake water that has been in progress due to increase in the contributory population and change in their lifestyle.

In the current study, we sampled water from the upper layer and the lower layer of Lake Nakaumi for 2 years. We isolated *Prorocentrum minimum* from the sample water and performed Algal Growth Potential Test (AGP Test).

The object of the study was to examine the characteristics of the red tide and its mechanism, including identification the substance that inhibits Algal Growth, determination of the impact of mixing water between upper layer and lower layer, clarification of the reason why the incidence of red tide is less in summer.

1 はじめに

中海は鳥根県と鳥取県との間に位置し、斐伊川の下流部に形成された我が国第5位の大きさを持つ汽水湖である。Fig. 1にその概要を示す。大橋川を介して宍道湖と、境水道を介して日本海と繋がり、大山隠岐国立公園と隣接して優れた景観を形成している。湖面積は96.9km²、平均水深5.4m、最大水深8.4mであり、塩分躍層は水面下3～5mに形成されている。滞留時間は0.4年、流域面積590.0km²、流域人口159.6千人で、周辺地域は山陰地方の産業、文化、観光等の中心として古くから栄えてきた地域である。しかし、流域人口の増加と生活様式の変化に伴って富栄養化が進行し、1973年以降継続して水質環境基準が確保されて

いない。その原因として渦鞭毛藻類の*Prorocentrum minimum*を優占種とする赤潮が毎年発生していることがあげられる。1988年に湖沼法の指定を受け、1989年度に中海水質保全計画を策定し、引き続き1994年度に第2期の計画を策定して水質保全対策が進められているが顕著な水質改善は見られていない。Fig. 2に米子湾中央部上層におけるCODの観測結果を示した。これを見る限り水質は改善傾向にあるとは言えない。

これまで中海の赤潮について、近藤ら(1994)¹⁾は成層化した湖の上下層水の混合によって発生が促進される傾向にあると述べているが、そのメカニズムは十分には解明されてこなかった。中海における赤潮(*Prorocentrum minimum*)の月別平均出現個体数(10年間)の観測した結果をFig.

3に示した。川上ら(1990)²⁾、江角(1993)³⁾、神谷(1994)⁴⁾、近藤(1991)⁵⁾により述べられているように、夏期には発生しにくく、秋期～春期にかけて、とくに春期に多く発生する傾向にある。

本研究では、中海における彦名地先において上下層水を2年間にわたり採取し、中海より分離単離した*Prorocentrum minimum*を用いて藻類増殖(AGP)試験を行い、増殖制限物質の特定や上下層水の混合による影響、夏期に発生しにくい原因等、赤潮の発生特性とその機構について検討を行った。



Fig. 1 Outline of Lake Nakaumi and sampling point

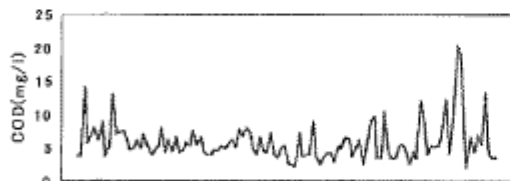


Fig. 2 Monthly change of COD in Yonago inlet

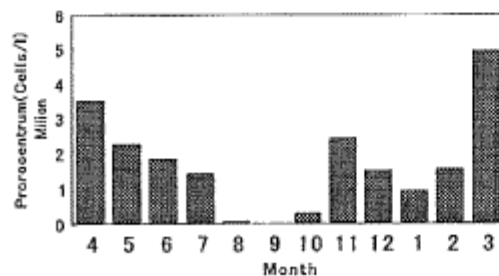


Fig. 3 Density of red tide plankton (*Prorocentrum*) (average for 10 years)

2 方 法

1) 実 験 水

筆者らが中海において実施している常時監視地点の中で、最深地点であると共に窪地である彦名地先(約10m)において、上層および下層より採水を行った。また米子湾に流入する都市河川である旧加茂川においても採水した。採水地点はFig. 1に示した。

2) 供 試 藻 類

赤潮プランクトンの種として、中海より分離した*Prorocentrum minimum*を使用した。保存培地には国立環境研究所で作成されているList of Strains(1994)⁶⁾のf/2培地を用いた。詳細はTable. 1に示した。

Table. 1 Detail of f/2 culture medium
f/2metals

NaNO ₃	75mg	NaEDTA·2H ₂ O	4.4g
NaH ₂ PO ₄ ·2H ₂ O	6mg	FeCl ₃ ·6H ₂ O	3.16g
Vitamin B ₁₂	0.5 μg	CoSO ₄ ·7H ₂ O	12mg
Biotin	0.5 μg	ZnSO ₄ ·7H ₂ O	21mg
Thiamine HCl	100 μg	MnCl ₂ ·4H ₂ O	180mg
Na ₂ SiO ₃ ·9H ₂ O	10mg	CuSO ₄ ·5H ₂ O	7mg
f/2metals	1ml	Na ₂ MoO ₄ ·2H ₂ O	7mg
Seawater	999ml	Distilled water	1 l

3) 添加栄養物質

中海湖水に窒素(KNO₃: 72mg/l)、リン(KH₂PO₄: 4.6mg/l)、EDTA(Fe·EDTA: 0.5mg/l)を添加する事によって、*Prorocentrum minimum*は赤潮を形成するまでに増殖することが確認されたので、この3種を用いてAGP試験を実施した。

4) 増殖量の測定方法

藻類増殖量の測定には、有賀(1973)⁷⁾が述べているように細胞数の計数法、重量法、Chl-a法等があるが、今回の実験では島津製作所製TOC 5000を使用し、有機炭素量(TOC: Total Organic Carbon)を求めて最大増殖量から培養初期濃度を差し引き増殖量とした。

5) 実験方法

採取試料をWhatman G F Fで濾過後、上層水、下層水はそのまま、混合水は上層水:下層水を1:

1の割合で混合し試料とした(以下混合水と言う)。河川水を添加する場合は上層水及び混合水:河川水は1:1を目途に混合したが、Kondo *et al.* (1990)⁸⁾は塩分8~30‰で*Prorocentrum minimum*の出現が観測されたとしており、南條ら(1998)⁹⁾は塩素イオン濃度3,500mg/l以上で優占するとしているので、混合後塩素イオン濃度が4,000mg/l以下となる時は河川水の割合を減じ、塩素イオン濃度を増殖可能な範囲に保持した。

試料を300mlの三角フラスコに150ml分注した後、栄養物質を適宜添加し、*Prorocentrum minimum*を植種し培養液とした。培養液は、植種液(栄養物質無添加)、窒素添加、リン添加、EDTA添加、窒素・リン添加、窒素・リン・EDTA添加の6種とした。

培養条件は、南條ら(1998)の結果を基に藻類培養試験器(理研式GT-40)で21℃、2,000Lx連続照射、振とう強度50rpmで行った。培養期間は3週間とし、各週毎に増殖量を測定し、それらの中の最大値から初期値を差し引き最大増殖量とした。

3 結果と考察

1) 米子湾中央部における赤潮発生状況

1998年度の赤潮発生状況とTOC測定結果をTable. 2に示す。赤潮発生状況は筆者らが採水に行った時の目視による観測結果を示した。11月、2月、3月に赤潮を観測したが、その時のTOCは5.44mg/l、5.30mg/lであった。3月は*Prorocentrum minimum*と*Noctiluca miliaris*(夜光虫)の同時発生で、TOCは6.04mg/lと高い値を示した。その他の月では、2.29~4.82mg/lで赤潮の発生は見られなかった。

2) 上層、下層、混合水による増殖試験の結果

Table. 3に1997年と1998年の上層水、下層水、混合水による増殖量の結果を示した。増殖量の平均値を見ると、上層水は1.31mg/l、下層水は4.15mg/l、混合水は2.62mg/lとなり、混合水は上層水と下層水のほぼ中間の値を示した。このことは、近藤ら(1994)¹⁰⁾の述べているように上下

層水が混合することにより、上層部において赤潮の発生しやすい環境となることを意味している。

Table. 2 Situation of Occurrence of Red Tide, TOC and Cell Count of *Prorocentrum minimum*

Month/Year	Occurrence of Red Tide	TOC (mg/l)	Cells Count (Cells/l)
H10. 4		4.82	None
5		2.29	3.7×10^6
6		3.32	1.8×10^6
7		3.31	6.9×10^6
8		2.75	1.4×10^6
10		2.46	4.7×10^6
11	◎	5.44	8.5×10^6
12		3.15	3.0×10^6
1		3.08	1.4×10^6
2	◎	5.30	2.4×10^7
3	○	6.04	1.5×10^6

◎Red Tide caused by *Prorocentrum*

○Red Tide caused by both *Prorocentrum* and *Noctiluca*

Fig. 4に1998年の結果を図示した。すでに述べたように下層水の増殖量が多く、上層は少なく、混合水はその中間に位置している。しかし7月の増殖量を見ると、混合水は上層水と同様に低い値を示した。すなわち下層水が上層水に混入しても増殖を促進することはないという結果となった。この現象は他の月には見られず、中海において夏期に赤潮が発生しない現象が室内実験においても確認された。

Table. 3 Situation of occurrence of red tide, TOC and cell count of *Prorocentrum minimum*

	Upper	Lower	Mixed	Upper + River water	Mixed + River water
5. 1997	0.09	1.34	0.77		
6	1.46	6.16	2.76		
7	0	2.36	0.79		
8	0	8	1.37		
9	2.73	10.68	7.01		
10	0.22	5.42	3.93		
11	0.48	2.77	1.49		
12	0	2.88	2.93		
2. 1998	0.91	2.28	1.19		
3	1.42	1.13	1.83		
4	0.57	3.02	2.32		
5	0.53	1.98	1.18	3.74	6.2
6	5.03	9.06	6.57	6.39	7.1
7	0.41	1.41	0.94	1.59	2.92
8	1.09	3.21	1.89	3.34	6.63
9	2.93	6.33	4.23	4.72	5.16
10	3.83	4.23	4.08	5.01	6.39
11	2.13	4.53	3.68	3.75	3.87
12	0.97	1.97	1.45	2.05	2.41
Average	1.31	4.15	2.62	3.82	5.09

TOC : mg/l

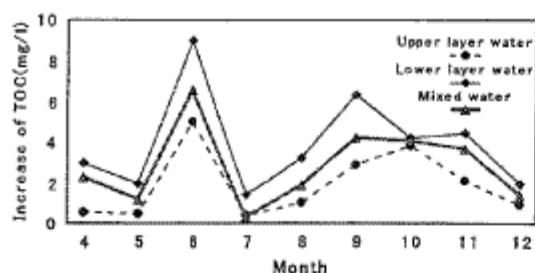


Fig. 4 Transition of Growth Rate by Mixing water

Table. 4 Limiting Nutrient in each Month

Month/Year	Upper	Lower	Mixed	Month/Year	Upper	Lower	Mixed
6/1997	N, P, E	N	N	4/1998	P	P	P
7	N, P, E	-	N, P, E	5	E	E	E
8	N, P	N, P, E	N, P	6	N	N	N
9	-	N	N	7	N, P, E	-	N, P, E
10	N, P	N	N	8	N, P, E	N	N
11	N, P	E	E	9	N, P, E	N	N
12	N, P	N, P	N, P	10	N, P, E	N	N
1/1998	P	P	P	11	N, P, E	N	N
				12	N, P, E	P	P

つぎに各試料水に 2.5) で示した種々の栄養塩を添加した 6 種類の培養液による A G P 試験より増殖制限物質を検討した結果を述べる。1997～1998年の各月の試験結果より判定した第一制限物質を Table. 4 に示した。上層水では、窒素、リン、E D T A の同時制限になる月が多かった。このことは、Table. 3 の上層水による増殖量からも分かるように、上層水は栄養物質が少なく赤潮が発生しにくい水と考えられた。下層水は栄養物質が無添加でも相当の増殖が見られることから、彦名地先は水深10mの窪地であり還元状態になりやすく栄養物質の底質からの回帰があるものと考えられた。第一制限物質は窒素の月が多かった。混合水は下層水と同様の傾向を示した。

3) 流入河川水の影響

上層水、上層水+河川水、混合水+河川水の増殖量の推移を Fig. 5 に示した。上層水は 3 試水の中で最も増殖が少なく、5月から12月の平均が 2.11mg/l であった。次に上層水+河川水で平均

は 3.82mg/l、最も高い値を示したのが混合水+河川水で平均値は 5.09mg/l であった。上層水試料は穏やかな日が続いた時の状態、上層水+河川水の試料は降雨後の湖水、混合水+河川水の試料は相当強い風により上下層混合が起こり、さらに降雨により河川水が混合した状態に相当すると想定できる。したがって、湖水に河川水より栄養塩が補給され、さらに底泥から回帰した栄養塩を含む下層水と混合することにより赤潮を惹起するものと考えられた。

Table. 2 に示したように、1998年11月と1999年2、3月に赤潮の発生が観測された。鳥取県気象月報 (1998)¹⁰⁾ によると1998年10月には台風10号が山陰地方を通過し、最大瞬間風速19.1m/sを記録した。10月16～18日にかけて157mmの降雨があった。また1999年2月上旬は冬型の気圧配置の日が多く、最大瞬間風速はほぼ毎日10mをこえ、2月2日には23.4mを記録した。また2月2～5日にかけて18mmの降雨があったと鳥取県気象月報 (1999)¹¹⁾ に記録されている。このような気象の影響により上下層の混合と河川水の大量流入が起こり、赤潮が発生したものと推測される。

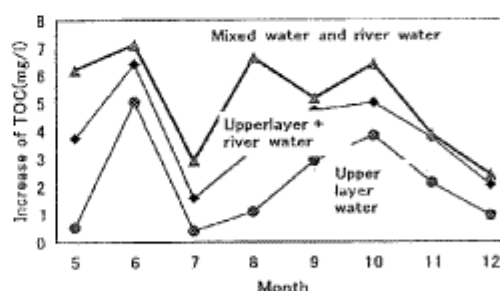


Fig. 5 Relation among the Upper Layer Water, Mixed Water and River Water

4) 7月、8月の各栄養状態による増殖変化

Fig. 4 にみられるように7月には上層水と下層水を混合しても、増殖の様子は上層水と同様であり、ほとんど増えなかった。このことは、上層水に何らかの増殖を阻害する物質が含まれていることを示唆している。そこで、このことを調べるために、つぎのような実験をおこなってみた。

上層水、下層水、混合水のそれぞれに、増殖が十分おこなわれることがわかっているf/2培地と同じ濃度組成になるよう栄養塩を添加した。これに*Prorocentrum*を植種し増殖実験を行った。もし増殖阻害物質が含まれているならば、十分な増殖が可能な栄養塩組成でも何らかの影響が現れることが予想される。もし増殖阻害物質が含まれていても、その濃度が栄養塩濃度に比べて低いならば、阻害の影響が顕著に現れないことも予想される。

そこで、f/2培地の1/10、1/100、1/1000の濃度組成のものを作成して同様の実験を行った。以上の実験を増殖阻害物質の存在が疑われた7月の試水と、それが見られなかった8月の試水を対象に行った。

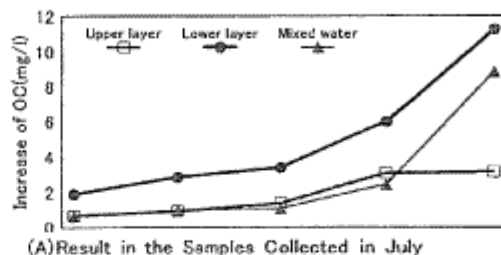
Fig. 6 に実験結果を示す。8月の試水については、いずれの栄養塩濃度においても下層水で良く増殖し、上層水では増殖が少なく、混合水はその中間の傾向を示した。

また栄養塩濃度が高くなるにしたがって、増殖も顕著であった。

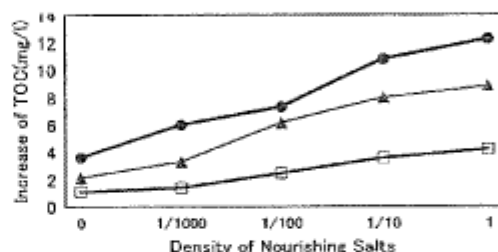
これに対して7月の試水では、下層水では栄養塩濃度が高くなるほど増殖量も大きかったが、上層水では栄養塩無添加のものからf/2培地の1/100の濃度まではほとんど増殖しなかった。栄養塩濃度がf/2培地の1/10のときとf/2培地と同濃度のときには、ほぼ同程度の増殖が見られた。このことは、上層水に増殖を阻害する物質が含まれており、栄養塩の濃度が1/100以下の場合には、その影響が栄養塩による増殖促進効果よりはるかに勝っていることを示していると考えられる。栄養塩濃度が1/10以上になると増殖を促進する効果が勝るようになるが栄養塩濃度が1になっても、それほど増殖しないことから、阻害物質の影響が残っているものと考えられる。

混合水についても、栄養塩濃度が1/10以下までは上層水と同様の傾向を示している。すなわち、上層水に栄養が豊富な下層水が混入されても、上層水に含まれる阻害物質の影響が勝っている。栄養塩濃度が1のときには、混合水における増殖は上層水と下層水の中間となり、阻害物質の影響は

消えている。このように、7月の上層水には、*Prorocentrum*の増殖を阻害する物質がふくまれており、下層水との混合が起こっても、他の月のように増殖が促進されるまでには到らないと考えられる。



(A) Result in the Samples Collected in July



(B) Result in the Sample Collected in August

Fig. 6 Algal growth in each nutritional stage

5) アンモニア性窒素による増殖抑制効果

矢木ら (1982)¹²⁾ によるとNH₄-Nは、赤潮にとって増殖抑制効果があると報告されている。そこで7月の抑制物質の一つとしてアンモニア性窒素に着目した。実験方法はf/2培地の窒素源を本来のものであるNO₃-Nと、これをNH₄-Nにおきかえたものを用い、それぞれ窒素濃度を変えて上記と同様の実験を行った。その結果をFig. 7 に示した。

NO₃-Nを窒素源とした場合には、窒素濃度が1 mg/lになるまでは濃度の増加にしたがって増殖量も多くなり、1 mg/lを越えるとほぼ一定の増殖を示した。NH₄-Nを窒素源とした場合には、窒素濃度が1 mg/lまでは窒素濃度の増加とともに増殖量も多くなったが、NO₃-Nの場合に比べると増殖量は少なかった。さらに窒素濃度が10mg/l以上では増殖量が少なくなった。これよりNH₄-Nは濃度が低い場合には窒素源として増殖に利用されるが、濃度が高くなると増殖を阻害する作用を示すことがわかる。

彦名地先の下層水のNH₄-Nは最大で0.6mg/l程度であり、室内実験の結果を見る限り増殖阻害に至るまでの濃度とはなっていない。したがって、7月の増殖抑制物質がNH₄-Nであるとは必ずしも断言はできない。他の物質の影響あるいはNH₄-Nも含めた複数の物質の影響も考えられ、さらに検討をする必要がある。

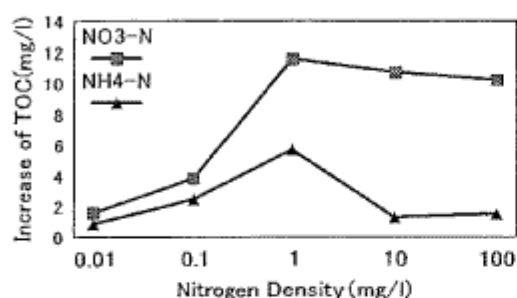


Fig. 7 Transition of growth rate by NO₃-N and NH₄-N

4 ま と め

- 1) AGP試験による中海の赤潮 (*Prorocentrum minimum*) の形成は、上層水のみではTOCの増加量は1.31mg/l (平均値) と低く、下層水との混合により平均値が2.62mg/lと増加するものの赤潮形成までには至らない。さらに、この混合水に河川水を加えることにより5.09mg/lに増加し赤潮形成に至るものと考察された。1998年度*Prorocentrum*による赤潮を観測した月は11月と2月であり、その時のTOC値は5.44mg/l、5.30mg/lであった。
- 2) 上層水の第一制限物質はN、P、EDTAの同時制限となることが多く、上層水は栄養塩の含有量が少ないことが示された。下層水はN制限となることが多く、P、EDTAは底泥からの回帰により供給されているものと考察された。
- 3) 気象の影響による上下層の混合と河川水的大量流入が中海における赤潮発生の一因と考えられた。
- 4) 上下層水及び混合水を用いたAGP試験により、7月の試水に増殖抑制物質の存在が疑われ、確認実験を実施したところ、栄養塩濃度の希薄な状態で十分増殖を抑制する効果のある物質の

存在が確認された。夏期に赤潮が発生しない理由として上下混合しにくいということもあるが、抑制物質の影響もあるものと考えられる。

- 5) アンモニア性窒素は、低濃度では*Prorocentrum*の窒素源として増殖に利用されるが、高濃度になると増殖を阻害することが明らかになった。

引用文献

- 1) 近藤邦男・清家泰・橋谷博：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, *Jpn. J. Limnol.*, 55(1), 47-60(1994)
- 2) 川上誠一・黒崎理恵・神谷宏・高橋純一・石飛裕・林喬一郎・宍道湖・中海のナノプランクトン調査結果について (1989年4月-1991年3月), 島根衛公研所報第32号, 101-123 (1990)
- 3) 江角比出郎：宍道湖・中海の植物プランクトンの調査結果 (1993年度), 島根衛公研所報第35号, 101-123(1993)
- 4) 神谷宏：宍道湖・中海の植物プランクトン水質調査結果 (平成6年度), 島根衛公研所報第36号104-110 (1994)
- 5) 近藤邦夫：中海における植物プランクトン群集の出現を支配する環境要因, 国際生態学シンポジウム島根'90 (汽水域・その豊かな生態系を求めて) 報告集, 19-28 (1991)
- 6) National Institute for Environmental Studies: List of Strains (Forth Edition), 35-37 (1994)
- 7) 有賀祐勝：水界植物群落の物質生産II, 共立出版, 14-17 (1973)
- 8) Kunio Kondo・Yasushi Seike and Yoshio Date: Relationships between Phytoplankton Occurrence and Salinity or Water Temperature in Brackish Lake Nakanoumi, *Jpn. J. Limnol.*, 51(3), 173-184 (1990)
- 9) 南條吉之・福田明彦・矢木修身・細井由彦：汽水湖沼におけるアオコおよび赤潮発生の制御に関する基礎的研究, Vol. 21(.8), 530-

535 (1998)

- 10) 鳥取地方気象台：鳥取県気象月報（10月），
財団法人日本気象協会鳥取支部，p21（1998）
- 11) 鳥取地方気象台：鳥取県気象月報（2月），
財団法人日本気象協会鳥取支部，p23（1999）
- 12) 矢木修身，須藤隆一，今岡努，寺西靖治：海水の赤潮生物生産能力の評価，国立環境研究所報告第30号，p289（1982）。