

# 中海における赤潮発生過程に関する実験的研究

南條吉之\* ・細井由彦\*\*・城戸由能\*\*\*  
矢木修身\*\*\*\*・梶原慎一\*\*\*\*\*

## 1. 緒 言

中海は島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。図-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96.9 km<sup>2</sup>、平均水深5.4 m、最大水深8.4 mであり、塩分躍層は水面下3~5 mに形成されている。滞留時間は0.4年、流域面積590.0 km<sup>2</sup>、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。

図-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)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)を観測した結果を図-3に示した。川上ら(1990)、江角(1993)、神谷(1994)、近藤(1991)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、中海より分離単藻化した *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。

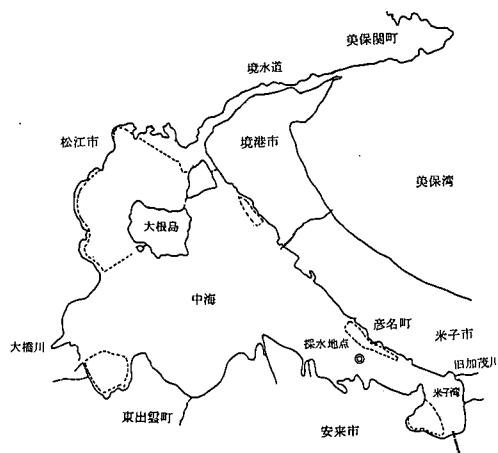


図-1 中海及びその周辺の概要

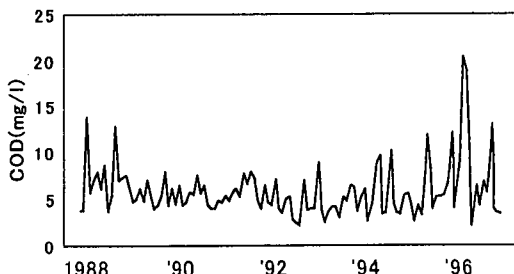


図-2 米子湾中央部上層のCODの推移

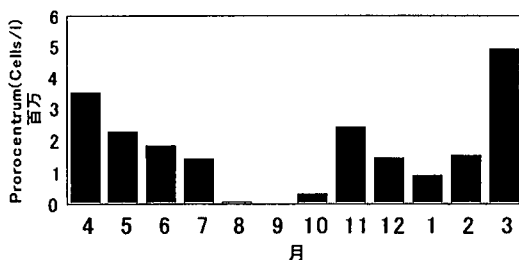


図-3 米子湾における *Prorocentrum* の消長 (10年間の平均)

\* 正会員 農修 鳥取県衛生研究所  
\*\* 正会員 工博 鳥取大学教授 工学部社会開発システム工学科  
\*\*\* 正会員 工博 鳥取大学助教授 工学部社会開発システム工学科  
\*\*\*\* 農博 環境庁国立環境研究所  
\*\*\*\*\* 正会員 工修 建設省九州地方建設局

## 2. 実験方法

### (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。採水地点は図-1中に示した。

### (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) の f/2 培地を用いた。詳細は表-1に示した。

### (3) 添加栄養物質

中海湖水に窒素 ( $\text{KNO}_3$  72 mg/l), リン ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$  4.6 mg/l), EDTA ( $\text{Fe}\cdot\text{EDTA}$  0.5 mg/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) 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 GFF 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) 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) は塩素イオン濃度 3,500 mg/l 以上で優占しているの、混合後塩素イオン濃度が 4,000 mg/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 300 ml の三角フラスコに 150 ml 分注した後、

表-1 f/2 培地の組成

f/2 metals			
$\text{NaNO}_3$	75 mg	$\text{Na}_2\text{EDTA} \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$	4.4 g
$\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$	6 mg	$\text{FeCl}_3 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$	3.16 g
Vitamin $\text{B}_{12}$	0.5 $\mu\text{g}$	$\text{CoSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$	12 mg
Biotin	0.5 $\mu\text{g}$	$\text{ZnSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$	21 mg
Thiamine HCl	100 $\mu\text{g}$	$\text{MnCl}_2 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$	180 mg
$\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9 \text{H}_2\text{O}$	10 mg	$\text{CuSO}_4 \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$	7 mg
f/2 metals	1 ml	$\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$	7 mg
Seawater	999 ml	Distilled water	1 l

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°C, 2,000 Lx 連続照射、振とう強度 50 rpm 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. 実験結果と考察

### (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 測定結果を表-1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 5.44 mg/l, 5.30 mg/l であった。3月は *Prorocentrum minimum* と *Noctiluca miliaris* (夜光虫) の同時発生で、TOC は 6.04 mg/l と高い値を示した。その他の月では、2.29~4.82 mg/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

表-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 1.31 mg/l, 下層水は 4.15 mg/l, 混合水は 2.62 mg/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) 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。

図-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

表-2 赤潮の発生状況, TOC 及び *Prorocentrum minimum* の細胞数

年月	赤潮の発生状況	TOC (mg/l)	細胞数 (Cells/l)
H 10.4		4.82	なし
5		2.29	$3.7 \times 10^5$
6		3.32	$1.8 \times 10^4$
7		3.31	$6.9 \times 10^4$
8		2.75	$1.4 \times 10^6$
10		2.46	$4.7 \times 10^4$
11	◎	5.44	$8.5 \times 10^5$
12		3.15	$3.0 \times 10^5$
1		3.08	$1.4 \times 10^5$
2	◎	5.30	$2.4 \times 10^7$
3	○	6.04	$1.5 \times 10^6$

◎ *Prorocentrum* による赤潮

○ *Prorocentrum* と *Noctiluca* の混合赤潮

表-3 *Prorocentrum minimum* の各培養液における増殖結果

	上層水	下層水	混合水	上層水+ 河川水	混合水+ 河川水
H 9.5	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		
H 10.2	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	0.34	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
平均	1.31	4.15	2.62	3.82	5.09

TOC : mg/l

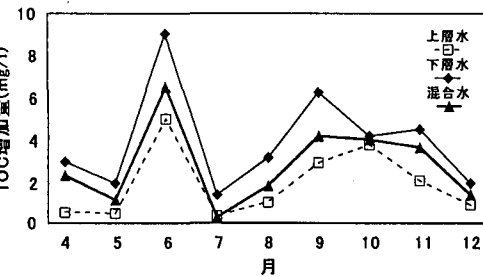


図-4 混合による増殖量の変化

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。

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 AGP 試験より増殖制限物質

表-4 月別制限栄養物質

年	月	上層水	下層水	混合水	年	月	上層水	下層水	混合水
1997	6	N, P, E	N	N	1998	4	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
1998	1	P	P	P		11	N, P, E	N	N
						12	N, P, E	P	P

(N:窒素, P:リン, E:EDTA)

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表-4に示した。上層水では、窒素、リン、EDTAの同時制限になる月が多かった。このことは、表-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図-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2.11 mg/lであった。次に上層水+河川水で平均は3.82 mg/l、最も高い値を示したのが混合水+河川水で平均値は5.09 mg/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。

表-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)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19.1 m/sを記録した。10月16~18日にかけて157 mmの降雨があった。また1999年2月上旬は冬の気圧配置の日が多く、最大瞬間風速はほぼ毎日10 mをこえ、2月2日には23.4 mを記録した。また2月2~5日にかけて18 mmの降雨があったと鳥取県気象月報(1999)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おり、赤潮が発生したものと推測される。

(4) 7月、8月の各栄養状態による増殖変化

図-4にみられるように7月には上層水と下層水を混

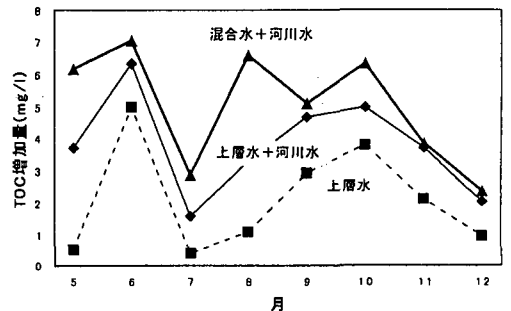
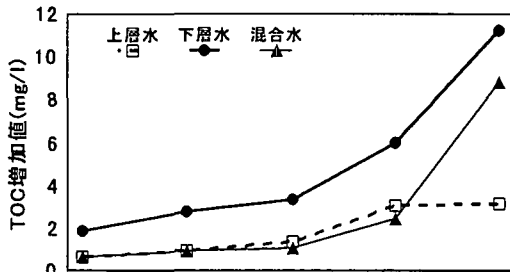
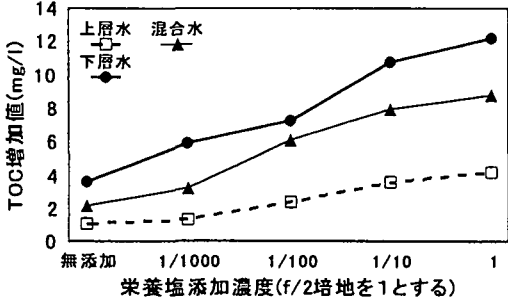


図-5 上層水、混合水と河川水の関係



(A)7月の試水に関する結果



(B)8月の試水に関する結果

図-6 各栄養状態における増殖量

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。

図-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

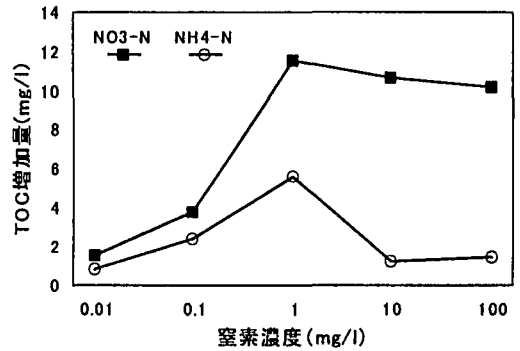


図-7 硝酸性窒素とアンモニア性窒素による増殖量の変化

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。

#### (5) アンモニア性窒素による増殖抑制効果

矢木ら (1982) によると NH<sub>4</sub>-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 NO<sub>3</sub>-N と、これを NH<sub>4</sub>-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。その結果を図-7 に示した。

NO<sub>3</sub>-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 を越えたとほぼ一定の増殖を示した。NH<sub>4</sub>-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、NO<sub>3</sub>-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 10 mg/l 以上では増殖量が少なくなった。これより NH<sub>4</sub>-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 NH<sub>4</sub>-N は最大で 0.6 mg/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 NH<sub>4</sub>-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 NH<sub>4</sub>-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。

#### 4. 結 語

(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 1.31 mg/l (平均値) と低く、下層水との混合により平均値が 2.62 mg/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 5.09 mg/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 5.44 mg/l, 5.30 mg/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の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。

#### 参 考 文 献

- 有賀祐勝 (1973): 水界植物群落の物質生産 II, 共立出版, pp. 14-17.
- 江角比出郎 (1993): 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, pp. 101-123.
- 神谷 宏 (1994): 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 pp. 104-110.
- 川上誠一・黒崎理恵・神谷 宏・高橋純一・石飛 裕・林喬一郎 (1990): 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, pp. 101-123.
- 近藤邦夫 (1991): 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, pp. 19-28.
- 近藤邦夫・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, Jpn. J. Limnol, 55, 1, pp. 47-60.
- 鳥取地方气象台 (1998): 鳥取県気象月報 (10 月), 財団法人日本気象協会鳥取支部, 21 p.
- 鳥取地方气象台 (1999): 鳥取県気象月報 (2 月), 財団法人日本気象協会鳥取支部, 23 p.
- 南條吉之・福田明彦・矢木修身・細井由彦 (1998): 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, No. 8, pp.530-535.
- 矢木修身・須藤隆一・今岡努・寺西靖治 (1982): 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, 289 p.
- Kunio Kondo・Yasushi Seike and Yoshio Date (1990): Relationships between Phytoplankton Occurrence and Salinity or Water Temperature in Brackish Lake Nakanoumi, Jpn. J. Limnol, 51, 3, pp. 173-184.
- National Institute for Environmental Studies (1994): List of Strains (Forth Edition), pp. 35-37.