

短報-3

1998年冬・春期の霞ヶ浦北浦における植物プランクトンとカビ臭の関係

岩崎 順・渡邊直樹

The relationship between phytoplankton and musty odor
in Lake Kasumigaura and Lake Kitaura during
the winter and spring seasons, 1998

Jun IWASAKI and Naoki WATANABE

1. はじめに

霞ヶ浦北浦では1990年以降、富栄養化の進行に伴い、冬・春期に網生管養殖ゴイや漁獲されたワカサギ・ハゼ類等の水産物にカビ臭が付着する現象が起こっている(佐々木1997)。カビ臭の直接的な原因は、湖沼に発生した*Oscillatoria*や*Phormidium*等の藍藻類であり(保尊1997)、それらが湖水中に排出する特殊成分の2-メチルイソボルネオール(2-MIB)やジェオスミン(Geosmin)が魚体に吸着されることにより発現すると言われている。ここでは、水産物のカビ臭問題が起こった1998年冬・春期の霞ヶ浦北浦における湖水中のカビ臭物質濃度と同時期の*Microcystis*・*Oscillatoria*・*Phormidium*各属の生物量(単位水量当たりの細胞数)との関係を調査したので、その結果を報告する。

2. 調査方法

1997年12月下旬から1998年6月上旬にかけて、霞ヶ浦(内水面水産試験場研究棧橋)で毎週、北浦(江川舟溜外)で隔週、表層水を採取し、両湖で優占的に発生する植物プランクトン(*Microcystis* spp.・*Oscillatoria tenuis*・*Phormidium tenue*)の同定・計数及びカビ臭物質(2-MIB・Geosmin)の定量分析を行った。

すなわち、植物プランクトンの場合、未固定の試料の中からこれら藻類の群体数(colonies/ml)を生物顕微鏡下で計数し、表1の平均値を用いて群体数から細胞数への換算を行い、1ml当たりの細胞数(cells/ml)

として表した(茨城県内水面水産試験場1999)。

表1. 群体数から細胞数への換算表

(単位: cells/colony)

属名	最小値	最大値	平均値
<i>Microcystis</i> spp.	5	>999	約30
<i>Oscillatoria tenuis</i>	152	385	217
<i>Phormidium tenue</i>	33	133	53

カビ臭物質の場合、ガスクロマトグラフィー・マススペクトロメトリー装置(GC-MS)(横河アナリティカルシステムズ製)にパージノトラップ装置(GLサイエンス社製)を装着して、定量分析を行った。カビ臭に対して50%の人が感じる最小濃度(50%閾値)は10~100ng/lと低く(保尊1989)、そのままではカビ臭物質濃度を正確に測定することができないため、佐谷戸(1985)が示しているように1~100ng/lの定量範囲をもつパージノトラップ法で濃縮し、GC-MSを用いて分析した。このパージノトラップ法は、検水に塩化ナトリウムを20%濃度になるように加え、曝気(10min)によりカビ臭物質を気相に追い出し、TENAX-GC™を充填した濃縮管で捕集した後、濃縮管を加熱(40℃(2min)→250℃、20℃/min)してカビ臭物質を一気に追い出し、GC-MSでマススペクトル解析と定量を行う方法である。

植物プランクトン細胞数及びカビ臭物質濃度の測定結果は、付表1に示す。

3. 調査結果

(1) 植物プランクトンとカビ臭物質の経年変化

霞ヶ浦の植物プランクトン (*Microcystis* · *Oscillatoria* · *Phormidium*) 細胞数とカビ臭物質濃度の季節変化を図1・2・3に示した。

*Microcystis*細胞数は調査期間中0～6,000cells/mlの範囲にあり、調査序盤の12月29日～2月10日までは2,100～6,000cells/ml、調査終盤の5月18日～6月8日までは2,100～3,900cells/mlであったが、それ以外の時期には発生は認められなかった。

また、*Oscillatoria*細胞数は調査期間中86,800～883,190cells/mlの範囲にあり、時系列的な変動はあるものの、調査期間を通して増加する傾向が認められた。

そして、*Phormidium*細胞数は53,000～798,710 cells/mlの範囲にあり、調査終盤の4月27日～5月4日にかけて700,000cells/ml台の高密度を維持していた。この時期以前は、時系列的な変動はあるものの、増加傾向が認められ、この時期以後は減少傾向が認められた。

他方、2-MIB濃度は調査期間中3～104ng/lの範囲にあり、3月30日～5月4日までは30～104ng/lと比較的高濃度を維持しており、この時期以前は漸進的な増加傾向が認められ、この時期以降は、時系列的な変動はあるものの、減少傾向が認められた。

また、Geosminは調査期間中4～37ng/lの範囲にあり、3月1日から4月27日までは、4月13日に4ng/lの最低値を記録した場合を除き、19～37ng/lと比較的高濃度を維持していたが、それ以外の時期は低水準を維持していた。

霞ヶ浦の植物プランクトン (*Microcystis* · *Oscillatoria* · *Phormidium*) 細胞数とカビ臭物質濃度との関係を見ると、*Microcystis*と2-MIB及び*Microcystis*とGeosminはいずれも変動パターンの増減が逆関係になっていた。また、2-MIB・Geosminともに*Oscillatoria* · *Phormidium*の増殖中期に最高値に達する傾向が認められた。

北浦の植物プランクトン (*Microcystis* · *Oscillatoria* · *Phormidium*) 細胞数とカビ臭物質濃度の季節変化を図4・5・6に示した。

*Microcystis*細胞数は調査期間中0～2,100cells/mlの範囲にあり、3月1日及び6月8日に2,100cells/mlを示した他は発生は認められなかった。

また、*Oscillatoria*細胞数は調査期間中15,190～173,600cells/mlの範囲にあり、4月13日に最高値の173,600cells/mlを示した。この日以前は、時系列的な変動はあるものの、増加傾向が認められ、この日以後は急激な減少傾向が認められた。

そして、*Phormidium*細胞数は35,510～558,620 cells/mlの範囲にあり、調査中盤の3月15日～4月27日にかけて194,510～558,620cells/mlと比較的高密度を維持していたが、この時期以前は漸進的な増加傾向が認められ、この時期以後は急速な減少傾向が認められた。

他方、2-MIB濃度は調査期間中0～64ng/lの範囲にあり、4月27日までは徐々に増加し、4月27日に最高値の64ng/lを示した後は急速に減少していった。また、Geosminは調査期間中0～9ng/lの範囲にあり、3月15日～4月13日にかけて8～9ng/lを記録した他は低水準を維持していた。

北浦の植物プランクトン (*Microcystis* · *Oscillatoria* · *Phormidium*) 細胞数とカビ臭物質濃度との関係を見ると、霞ヶ浦同様、*Microcystis*と2-MIB及び*Microcystis*とGeosminはいずれも変動パターンの増減が逆関係になっていた。また、2-MIB・Geosminともに*Oscillatoria* · *Phormidium*の増殖終期に最高値に達する傾向が認められた。

(2) 植物プランクトンとカビ臭物質との関係

霞ヶ浦における*Microcystis*細胞数と2-MIB濃度、*Oscillatoria*細胞数と2-MIB濃度、そして*Phormidium*細胞数と2-MIB濃度との関係を図7・8・9に示した。

*Microcystis*細胞数が大きくなるほど2-MIB濃度

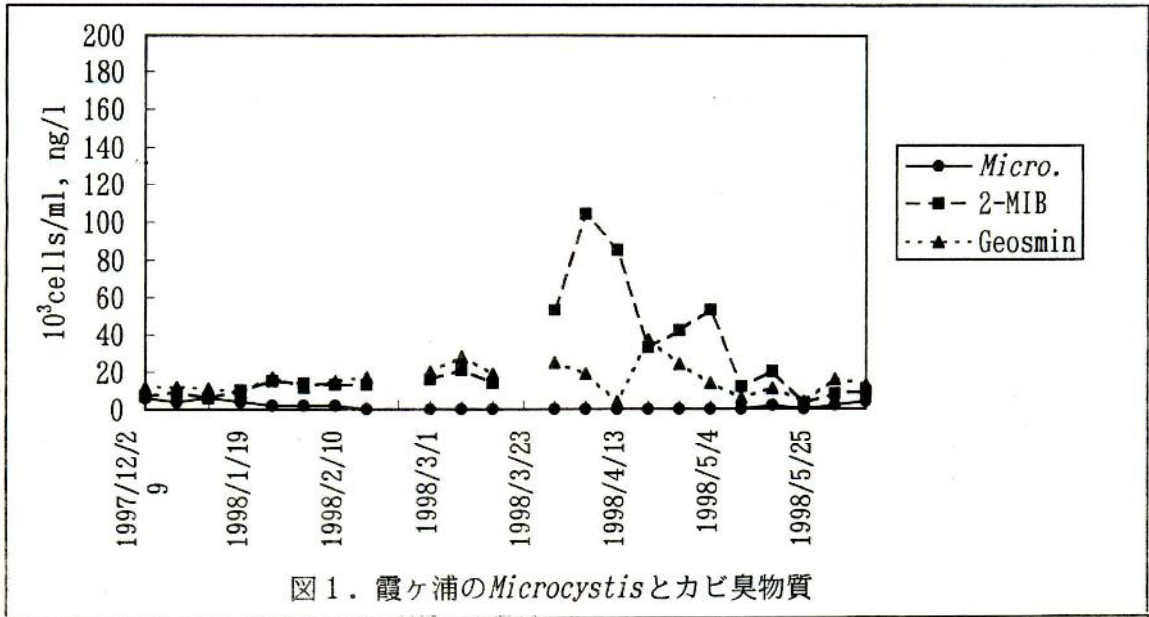


図1. 霞ヶ浦の*Microcystis*とカビ臭物質

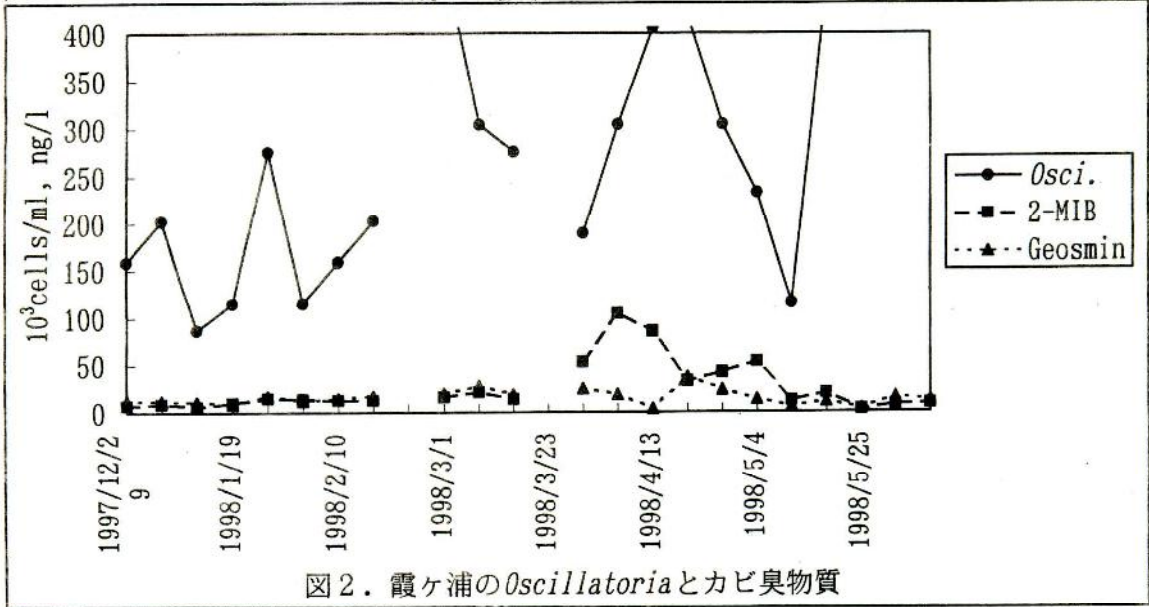


図2. 霞ヶ浦の*Oscillatoria*とカビ臭物質

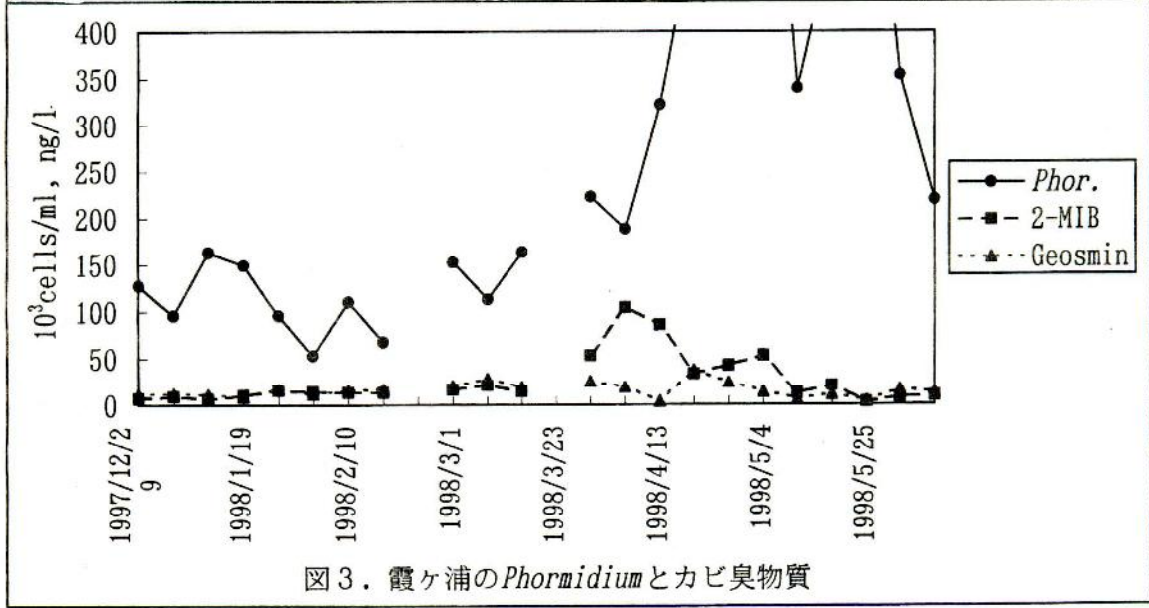


図3. 霞ヶ浦の*Phormidium*とカビ臭物質

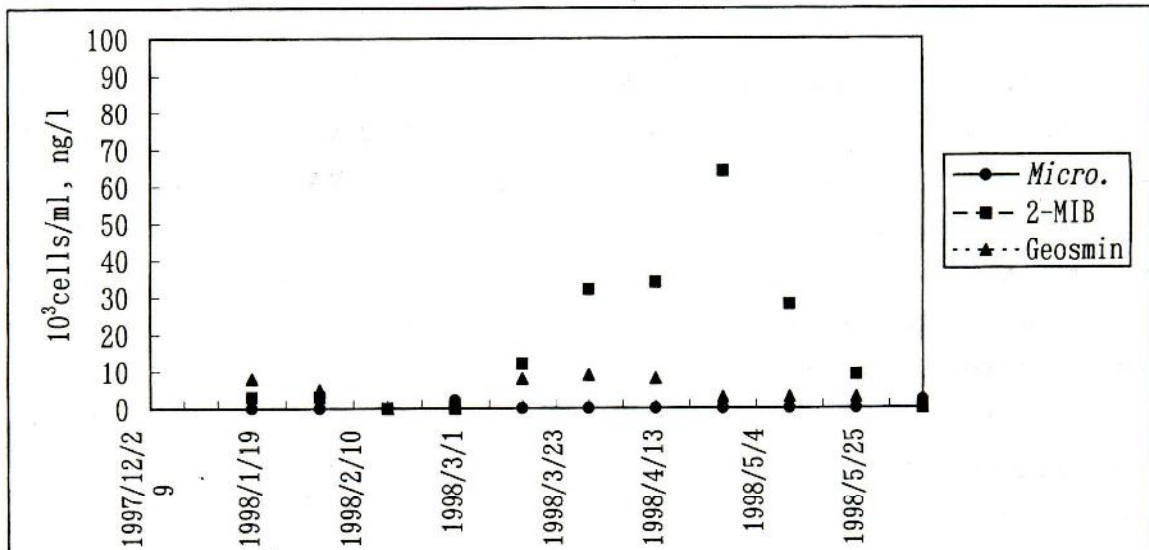


図4. 北浦の*Microcystis*とカビ臭物質

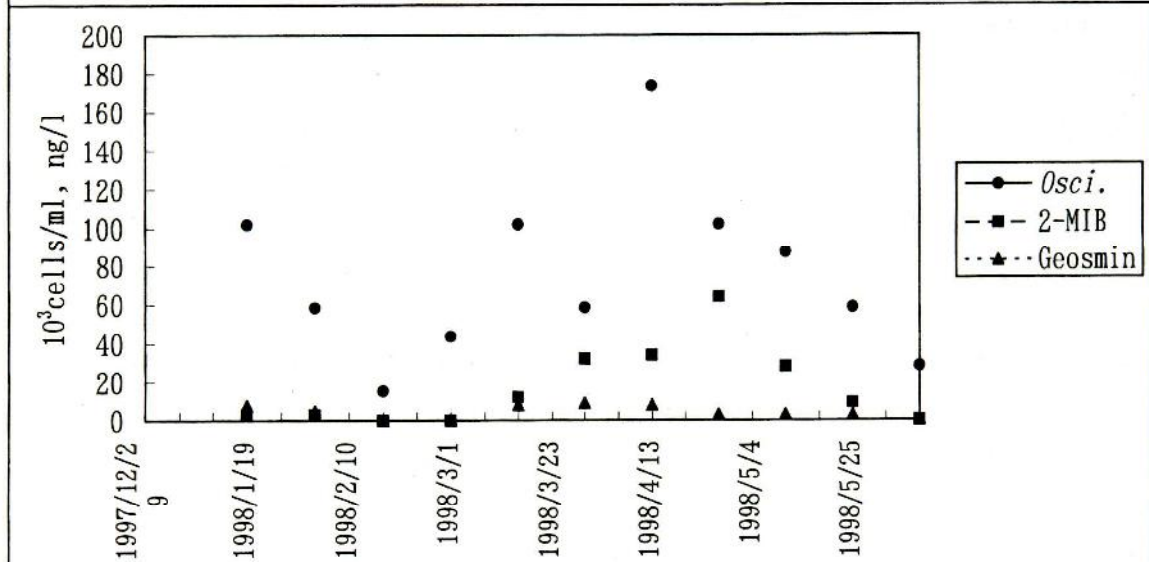


図5. 北浦の*Oscillatoria*とカビ臭物質

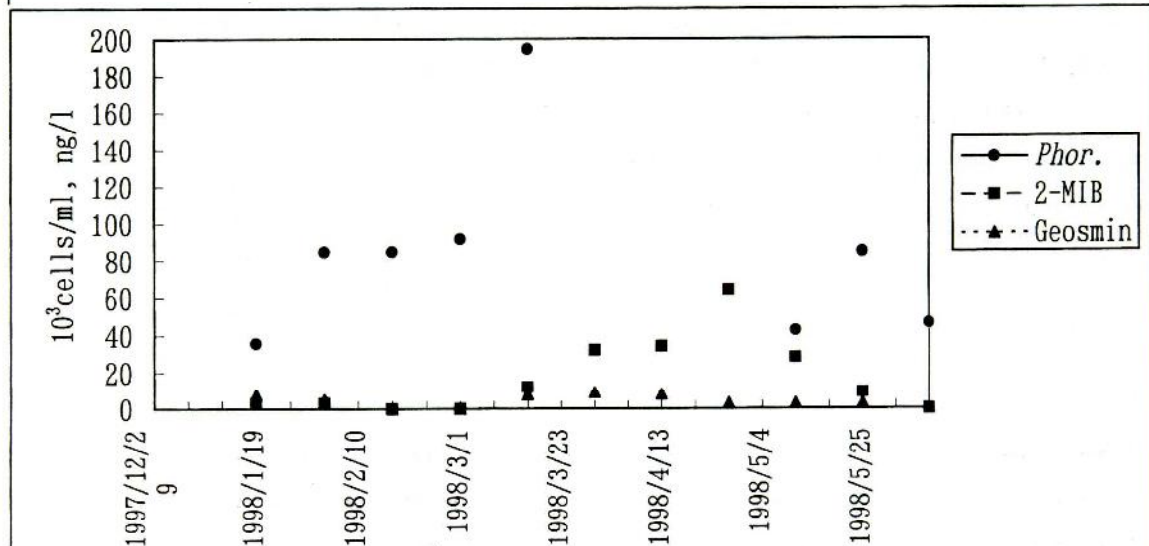


図6. 北浦の*Phormidium*とカビ臭物質

は小さくなり、両者は負の相関関係（反比例）にあることが認められた。また、*Oscillatoria*細胞数が303,800cells/mlのときに2-MIB濃度は最高値の104ng/lを示し、*Oscillatoria*細胞数が303,800cells/mlという値から離れるにしたがって2-MIB濃度は急速に減少しており、*Oscillatoria*細胞数に対する2-MIB濃度の関係は単峰性（one modal）であることが明らかになった。他方、*Phormidium*も187,620cells/mlのときに2-MIB濃度は最高値の104ng/lを示し、*Phormidium*細胞数が187,620cells/mlという値から離れるにしたがって2-MIB濃度は急速に減少しており、*Phormidium*細胞数に対する2-MIB濃度の関係は、*Oscillatoria*のときと同様、単峰性であることが明らかになった。

霞ヶ浦における*Microcystis*細胞数とGeosmin濃度、*Oscillatoria*細胞数とGeosmin濃度、そして*Phormidium*細胞数とGeosmin濃度との関係を図10・11・12に示した。

*Microcystis*細胞数が大きくなるほどGeosmin濃度は小さくなり、2-MIB濃度のときと同様、両者は負の相関関係（反比例）にあることが認められた。また、*Oscillatoria*細胞数が418,810cells/mlのときにGeosmin濃度は最高値の37ng/lを示し、*Oscillatoria*細胞数が418,810cells/mlという値から離れるにしたがってGeosmin濃度は急速に減少しており、*Oscillatoria*細胞数に対するGeosmin濃度の関係は、2-MIB濃度のときと同様、単峰性であることが明らかになった。他方、*Phormidium*細胞数とGeosmin濃度との間には顕著な相関関係は認められなかった。

北浦における*Microcystis*細胞数と2-MIB濃度、*Oscillatoria*細胞数と2-MIB濃度、そして*Phormidium*細胞数と2-MIB濃度との関係を図13・14・15に示した。

*Microcystis*細胞数が2,100cells/mlのときに2-MIB濃度は0ng/mlとなり、*Microcystis*細胞数が0cells/mlのときに2-MIB濃度は0~64ng/lの範囲にあり、両者の間には顕著な相関関係は認められな

かった。また、*Oscillatoria*細胞数が101,990cells/mlのときに2-MIB濃度は最高値の64ng/lを示し、*Oscillatoria*細胞数が101,990cells/mlという値から離れるにしたがって2-MIB濃度は急速に減少しており、*Oscillatoria*細胞数に対する2-MIB濃度の関係は単峰性であることが明らかになった。他方、*Phormidium*細胞数はその値が大きくなるほど2-MIB濃度も大きくなり、両者は正の相関関係（正比例）にあることが認められた。

北浦における*Microcystis*細胞数とGeosmin濃度、*Oscillatoria*細胞数とGeosmin濃度、そして*Phormidium*細胞数とGeosmin濃度との関係を図16・17・18に示した。

*Microcystis*細胞数が2,100cells/mlのときにGeosmin濃度は0ng/mlとなり、*Microcystis*細胞数が0cells/mlのときにGeosmin濃度は0~9ng/lの範囲にあり、両者の間には顕著な相関関係は認められなかった。また、*Oscillatoria*細胞数はその値が大きくなるほどGeosmin濃度も大きくなり、両者は正の相関関係（正比例）にあることが認められた。他方、*Phormidium*細胞数とGeosmin濃度との間には顕著な相関関係は認められなかった。

4. 考察

カビ臭の主たる原因が藍藻類であることから、これまでカビ臭原因藍藻類の研究が数多くなされてきた。原因生物として調べられた藍藻類は9属39種で（保尊1994）、そのほとんどがネンジュモ目の*Oscillatoria*属（主に*O. tenuis*）や*Phormidium*属（主に*P. tenue*）である。そこで、調査期間中に霞ヶ浦北浦で優占的に発生した [*Oscillatoria*+*Phormidium*] 細胞数と2-MIB濃度との関係、 [*Oscillatoria*+*Phormidium*] 細胞数とGeosmin濃度との関係を調べてみた。また、*Oscillatoria*細胞数と [2-MIB+Geosmin] 濃度との関係、*Phormidium*細胞数と [2-MIB+Geosmin] 濃度との関係も調べてみた。

霞ヶ浦における [*Oscillatoria*+*Phormidium*] 細

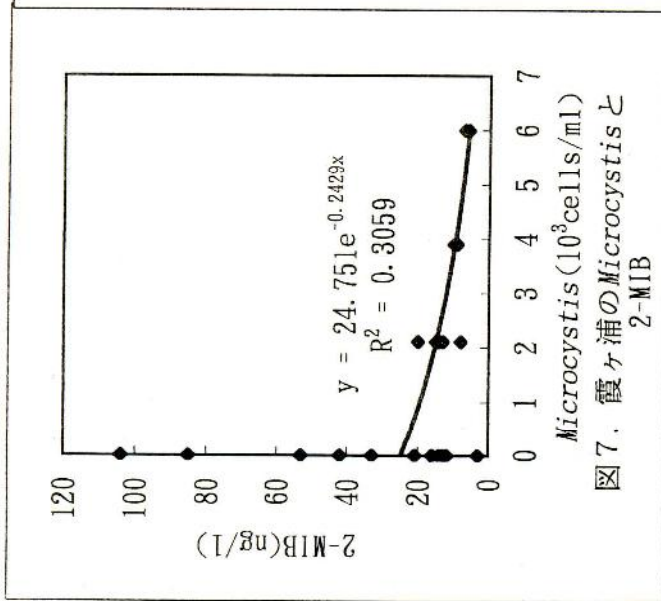


図7. 霞ヶ浦のMicrocystisと2-MIB

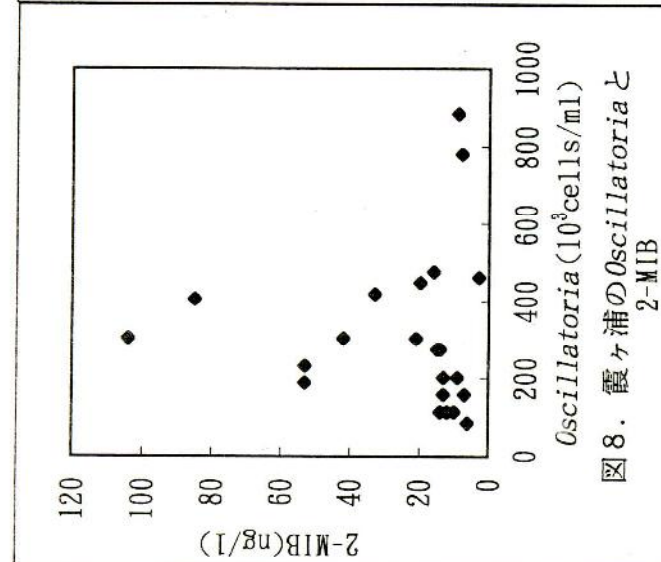


図8. 霞ヶ浦のOscillatoriaと2-MIB

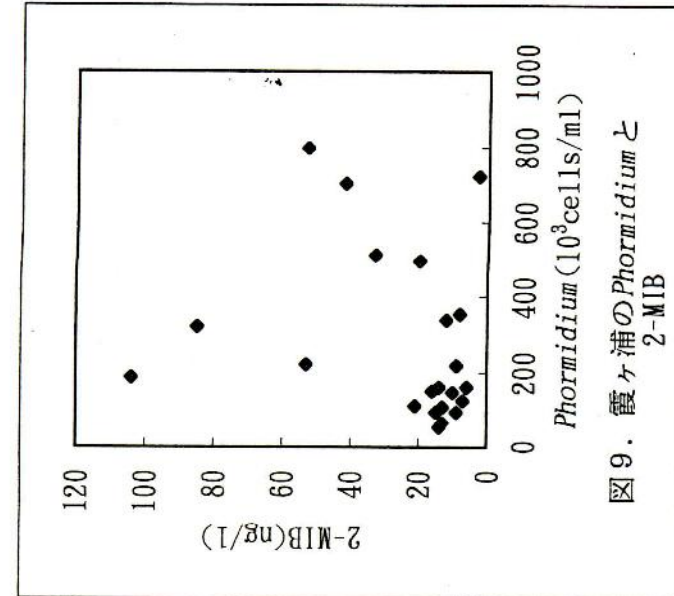


図9. 霞ヶ浦のPhormidiumと2-MIB

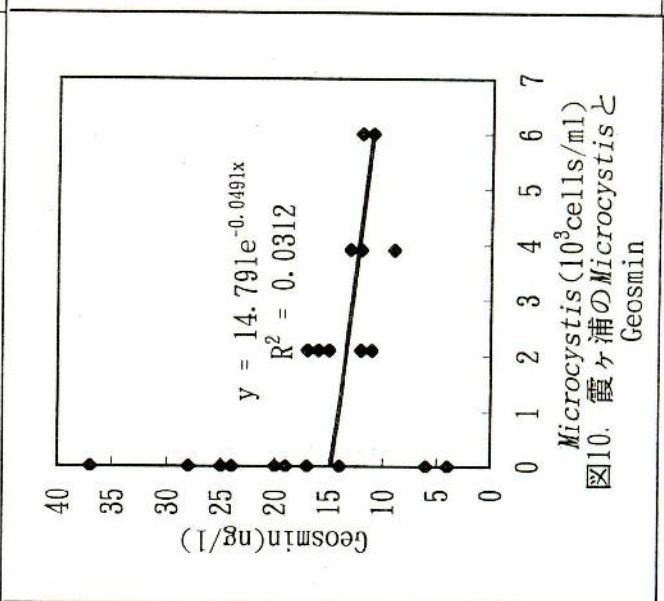


図10. 霞ヶ浦のMicrocystisとGeosmin

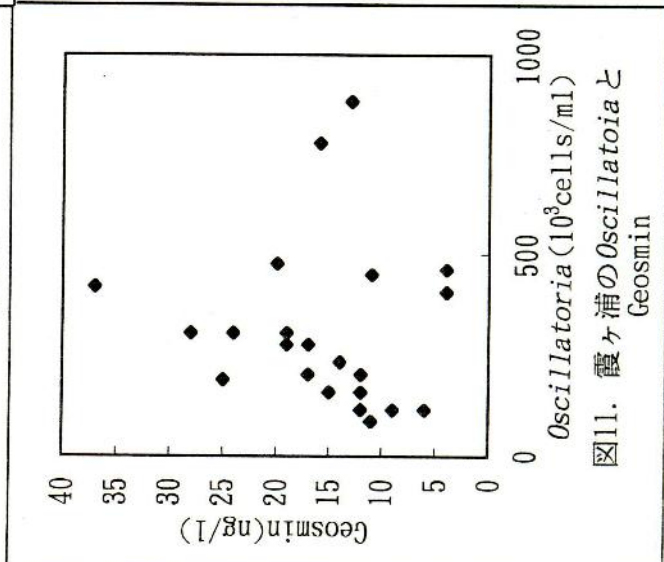


図11. 霞ヶ浦のOscillatoriaとGeosmin

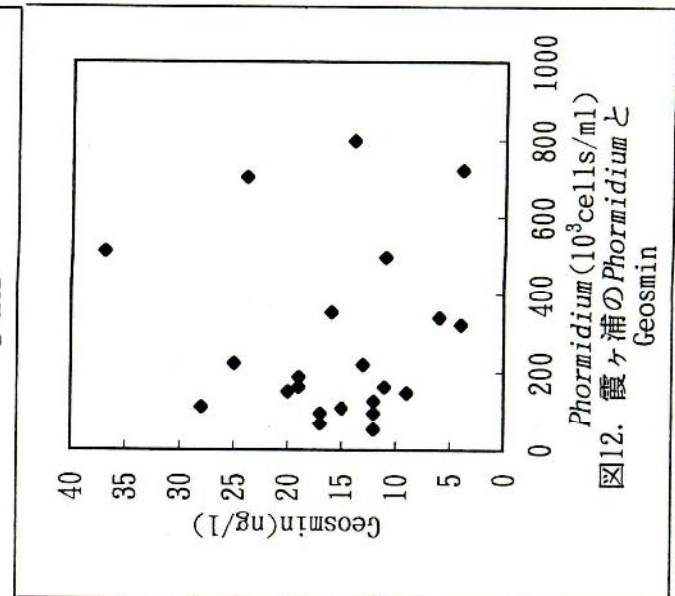


図12. 霞ヶ浦のPhormidiumとGeosmin

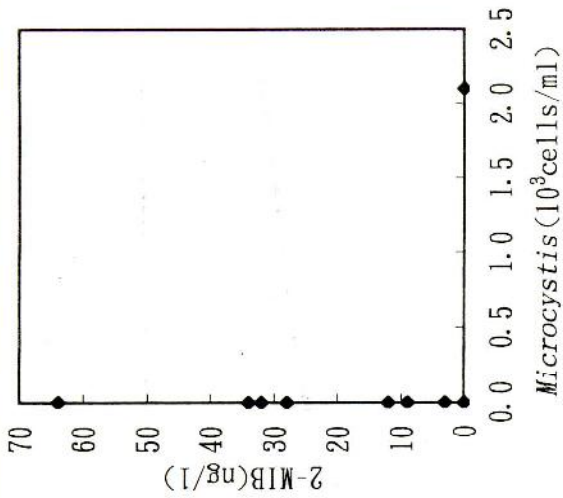


図13. 北浦のMicrocystisと2-MIB

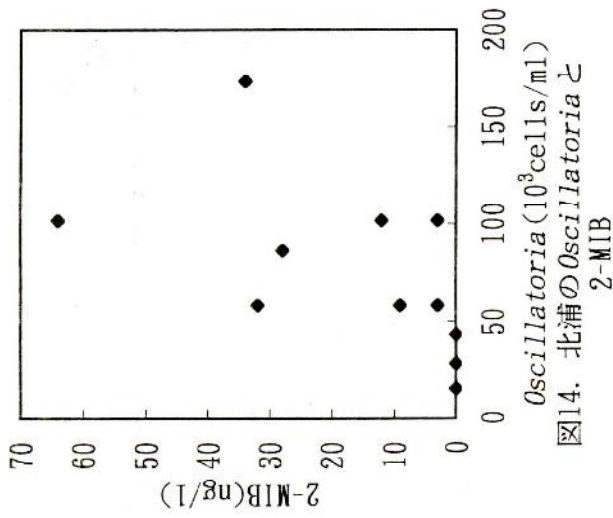


図14. 北浦のOscillatoriaと2-MIB

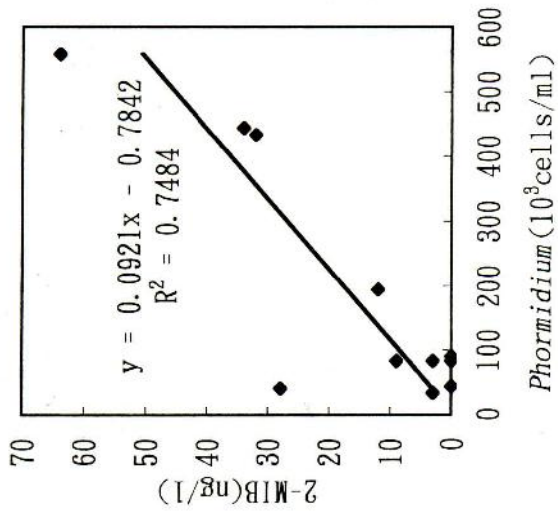


図15. 北浦のPhormidiumと2-MIB

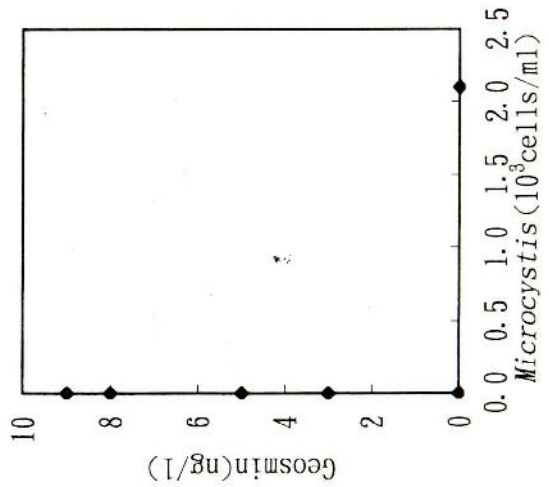


図16. 北浦のMicrocystisとGeosmin

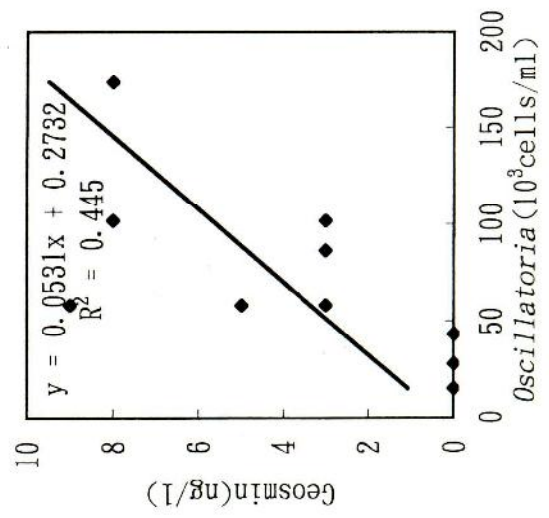


図17. 北浦のOscillatoriaとGeosmin

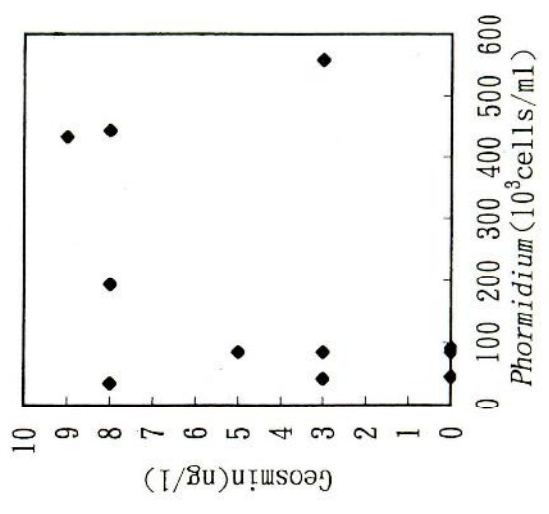


図18. 北浦のPhormidiumとGeosmin

胞数と2-MIB濃度との関係、[*Oscillatoria*+*Phormidium*]細胞数とGeosmin濃度との関係を図19・20に示した。

[*Oscillatoria*+*Phormidium*]細胞数491,420cells/mlのときに2-MIB濃度は最高値の104ng/lを示し、[*Oscillatoria*+*Phormidium*]細胞数491,420cells/mlという値から離れるにしたがって2-MIB濃度は急速に減少しており、[*Oscillatoria*+*Phormidium*]細胞数に対する2-MIB濃度の関係は単峰性(one modal)であることが明らかになった。他方、[*Oscillatoria*+*Phormidium*]細胞数が931,320cells/mlのときにGeosmin濃度は最高値の37ng/lを示し[*Oscillatoria*+*Phormidium*]細胞数が931,320cells/mlという値から離れるにしたがってGeosmin濃度は急速に減少しており、[*Oscillatoria*+*Phormidium*]細胞数に対するGeosmin濃度の関係は、2-MIB同様、単峰性であることが明らかになった。

北浦における[*Oscillatoria*+*Phormidium*]細胞数と2-MIB濃度との関係、[*Oscillatoria*+*Phormidium*]細胞数とGeosmin濃度との関係を図21・22に示した。

[*Oscillatoria*+*Phormidium*]細胞数はその値が大きくなるほど2-MIB濃度も大きくなり、両者は正の相関関係($r=0.872$)にあることが認められた。他方、[*Oscillatoria*+*Phormidium*]細胞数はその値が大きくなるほどGeosmin濃度も大きくなり、2-MIB同様、両者は正の相関関係($r=0.499$)にあることが認められた。

霞ヶ浦における*Oscillatoria*細胞数と[2-MIB+Geosmin]濃度との関係、*Phormidium*細胞数と[2-MIB+Geosmin]濃度との関係を図23・24に示した。

*Oscillatoria*細胞数が303,800cells/mlのときに[2-MIB+Geosmin]濃度は最高値の123ng/lを示し、*Oscillatoria*細胞数が303,800cells/mlという値から離れるにしたがって[2-MIB+Geosmin]濃度は急速に減少しており、*Oscillatoria*細胞数に対する[2-MIB+Geosmin]濃度の関係は単峰性であることが明らかになった。他方、*Phormidium*細胞数は187,620cells/

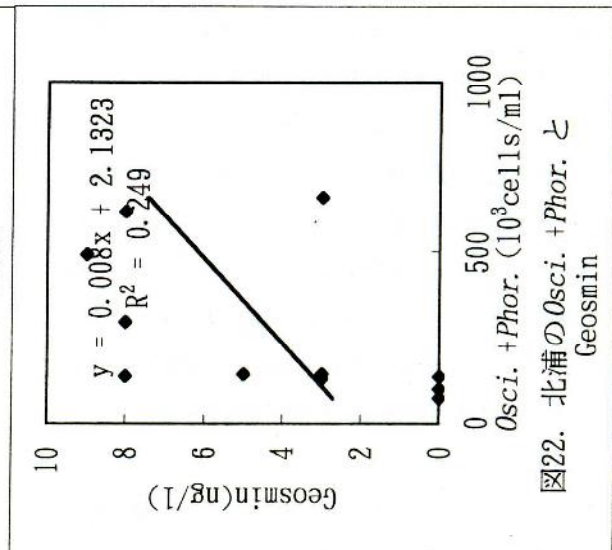
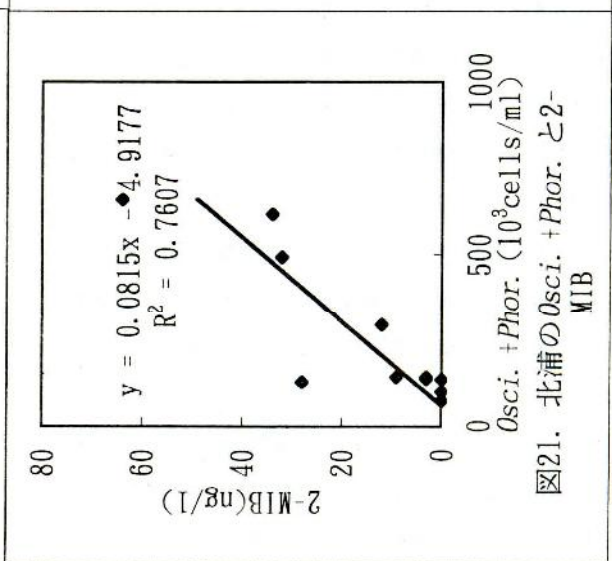
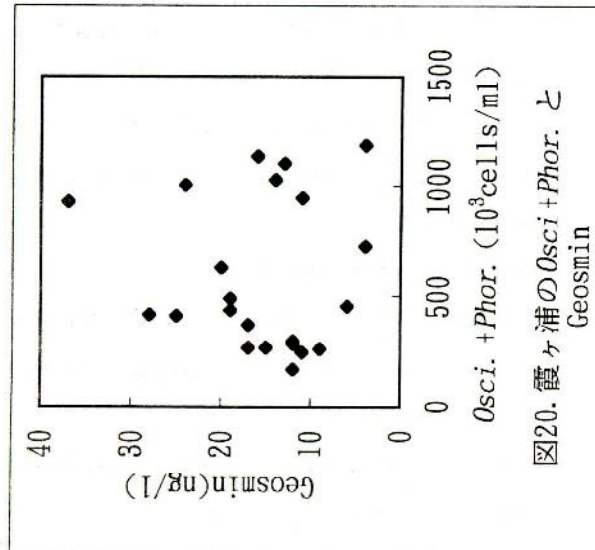
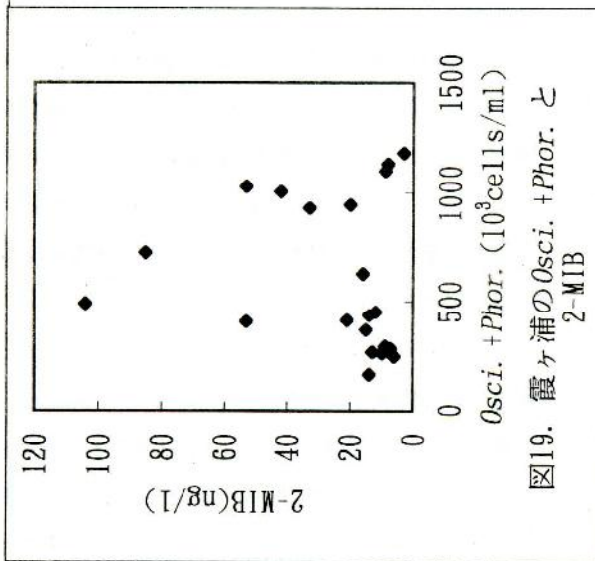
mlのときに[2-MIB+Geosmin]濃度は最高値の123ng/lを示し、*Phormidium*細胞数が187,620cells/mlという値から離れるにしたがって[2-MIB+Geosmin]濃度は急速に減少しており、*Phormidium*細胞数に対する[2-MIB+Geosmin]濃度の関係は、*Oscillatoria*同様、単峰性であることが明らかになった。

北浦における*Oscillatoria*細胞数と[2-MIB+Geosmin]濃度との関係、*Phormidium*細胞数と[2-MIB+Geosmin]濃度との関係を図25・26に示した。

*Oscillatoria*細胞数はその値が大きくなるほど[2-MIB+Geosmin]濃度も大きくなる傾向があり、両者は正の相関関係($r=0.630$)にあることが認められた。他方、*Phormidium*細胞数はその値が大きくなるほど[2-MIB+Geosmin]濃度も大きくなる傾向があり、*Oscillatoria*同様、両者は正の相関関係($r=0.881$)にあることが認められた。

以上から、霞ヶ浦では[*Oscillatoria*+*Phormidium*]細胞数と2-MIB濃度、[*Oscillatoria*+*Phormidium*]細胞数とGeosmin濃度、*Oscillatoria*細胞数と[2-MIB+Geosmin]濃度、*Phormidium*細胞数と[2-MIB+Geosmin]濃度のいずれの関係においても、細胞数の増加途上でカビ臭物質濃度は最高値を示したのが特徴的であり、*Oscillatoria*・*Phormidium*とも増殖中盤(対数増殖期)に1細胞当たりのカビ臭物質産生能力が最大になると考えられる。

他方、北浦では[*Oscillatoria*+*Phormidium*]細胞数と2-MIB濃度、[*Oscillatoria*+*Phormidium*]細胞数とGeosmin濃度、*Oscillatoria*細胞数と[2-MIB+Geosmin]濃度、*Phormidium*細胞数と[2-MIB+Geosmin]濃度のいずれの関係においても、細胞数とカビ臭物質濃度とは正の相関関係を保っていたことが特徴的であり、*Oscillatoria*・*Phormidium*とも増殖終盤(増殖飽和期)に1細胞当たりのカビ臭物質産生能力が最大になると考えられる。このように、1細胞当たりのカビ臭物質産生能力が最大になると考えられる時期が霞ヶ浦と北浦で異なるのが、水質の差異によるものか否かは明らかではなく、今後の課題として残



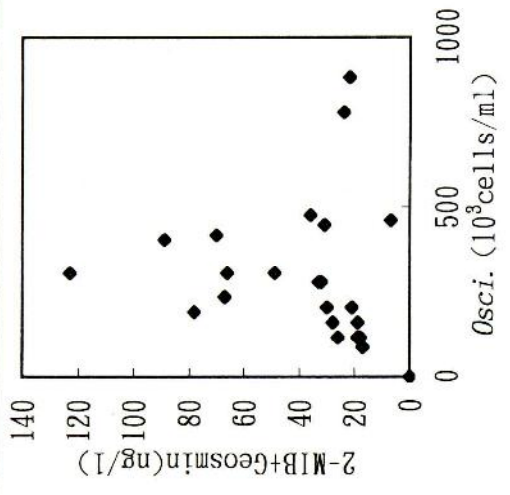


図23. 霞ヶ浦のOsci.と2-MIB+Geosmin

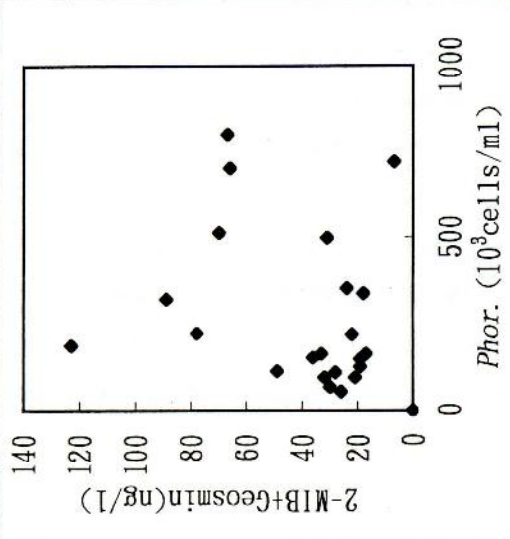


図24. 霞ヶ浦のPhor.と2-MIB+Geosmin

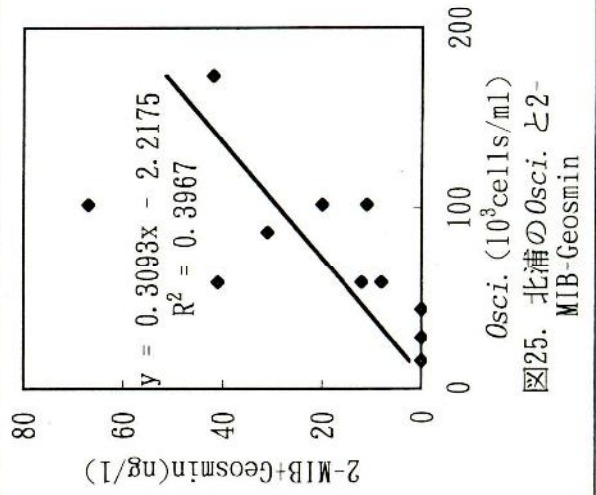


図25. 北浦のOsci.と2-MIB+Geosmin

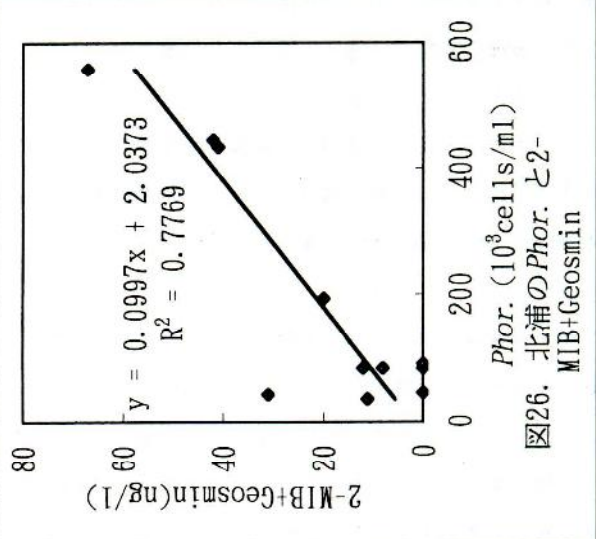


図26. 北浦のPhor.と2-MIB+Geosmin

されている。

また北浦の場合、上記のいずれの関係においても相関係数 (r) は0.499～0.881の範囲に広がっていることから、カビ臭の原因を *Oscillatoria*・*Phormidium* 等の藍藻類だけに求めることには多少無理があると考えられる。

鈴木 (1984) は、その他のカビ臭の原因として放線菌の存在を挙げている。放線菌は分岐した糸状の菌糸を作る細菌の総称で、通常土壌中より分離されることから、水中でカビ臭を産生することはないと言われている。実際に、日本の湖沼で放線菌が大規模なカビ臭発生の原因となった報告例は少ないが、現場調査・文献調査を通して発生事例を集める必要があると考えられる。

また今後は、どのような生物がどのようなカビ臭物質を産生するかを特定するために、カビ臭が発生している湖沼から原因生物と思われる生物を採取し、室内で単離培養した後、培養液からのカビ臭物質を確認する作業も必要になると考えられる。

5. 文 献

- 保尊とし子 (1994) : 第45回全国水道研究発表会講演要旨集, 562-563.
- 保尊とし子 (1997) : 水道のかび臭微生物—その障害と対策—。月刊「水」, 556 (1997年9月号), 16-30.
- 茨城県内水面水産試験場 (1999) : 平成10年度河川・湖沼総合浄化促進事業報告書 (水産庁委託), 72pp.
- 大阪府水道部水質試験所 (1989) : 平成元年度水質試験成績並びに調査報告, 458-494.
- 佐々木道也 (1997) : 魚介類へのカビ臭の着臭および除臭に関する一考察。茨城県内水面水産試験場調査研究報告, 33, 77-80.
- 佐谷戸安好 (1985) : VII. 理化学試験-6. 臭気。厚生省生活衛生局水道環境部監修, 上水試験方法 (1985年版), 199-203. 東京, 日本水道協会, 1019pp.
- 鈴木宏行 (1984) : 第35回全国水道研究発表会講演要旨集, 519-521.

付表 1. 霞ヶ浦における植物プランクトン細胞数とカビ臭物質濃度

	内水試験槽						江川舟溜外								
	(cells/ml) <i>Micro.</i>	(cells/ml) <i>Osci.</i>	(cells/ml) <i>Phor.</i>	(ng/l) 2-MIB	(ng/l) Geosmin	(cells/ml) <i>Micro.</i>	(cells/ml) <i>Osci.</i>	(cells/ml) <i>Phor.</i>	(ng/l) 2-MIB	(ng/l) Geosmin	(cells/ml) <i>Micro.</i>	(cells/ml) <i>Osci.</i>	(cells/ml) <i>Phor.</i>	(ng/l) 2-MIB	(ng/l) Geosmin
	1997/12/29	6,000	158,410	127,200	7	12	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1998/1/4	3,900	201,810	95,400	9	12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1998/1/10	6,000	86,800	162,710	6	11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1998/1/19	3,900	115,010	148,400	10	9	0	101,990	35,510	3	8	-	-	-	-	-
1998/1/26	2,100	275,590	95,400	15	17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1998/2/1	2,100	115,010	53,000	14	12	0	58,590	84,800	3	5	-	-	-	-	-
1998/2/10	2,100	158,410	109,710	13	15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1998/2/17	0	201,810	67,310	13	17	0	15,190	84,800	0	0	-	-	-	-	-
1998/2/23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1998/3/1	0	477,400	152,110	16	20	2,100	43,400	91,690	0	0	-	-	-	-	-
1998/3/8	0	303,800	112,890	21	28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1998/3/15	0	275,590	162,710	14	19	0	101,990	194,510	12	8	-	-	-	-	-
1998/3/23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1998/3/30	0	188,790	222,600	53	25	0	58,590	434,600	32	9	-	-	-	-	-
1998/4/6	0	303,800	187,620	104	19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1998/4/13	0	405,790	321,710	85	4	0	173,600	445,200	34	8	-	-	-	-	-
1998/4/21	0	418,810	512,510	33	37	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1998/4/27	0	303,800	703,310	42	24	0	101,990	558,620	64	3	-	-	-	-	-
1998/5/4	0	232,190	798,710	53	14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1998/5/11	0	115,010	339,200	12	6	0	86,800	42,400	28	3	-	-	-	-	-
1998/5/18	2,100	449,190	498,200	20	11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1998/5/25	0	462,210	721,330	3	4	0	58,590	84,800	9	3	-	-	-	-	-
1998/6/1	2,100	781,200	353,510	8	16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1998/6/8	3,900	883,190	219,420	9	13	2,100	28,210	46,110	0	0	-	-	-	-	-
最大値	6,000	883,190	798,710	104	37	2,100	173,600	558,620	64	9	-	-	-	-	-
最小値	0	86,800	53,000	3	4	0	15,190	35,510	0	0	-	-	-	-	-
平均値	1,555	314,255	280,225	25	16	382	75,358	191,185	17	4	-	-	-	-	-
標準偏差	1,983	202,062	221,280	26	8	810	42,231	183,418	20	3	-	-	-	-	-
変動係数	128	64	79	102	49	212	56	96	116	79	-	-	-	-	-

注) *Micro.*: *Microcystis* spp., *Osci.*: *Oscillatoria tenuis*, *Phor.*: *Phormidium tenue*