

4 湖沼の汚濁機構の調査

— 湖山池、淡水湖、中海の水質汚濁現象の
相違と湖沼の内部生産について —

【水質調査科】

安田 満夫 ・ 南 條 吉 之 ・ 田 中 賢 之 介
寛 一 郎 ・ 坂 田 裕 子

1 はじめに

湖山池、中海は、いずれも富栄養湖であるが、湖山池は、貧塩分湖～淡水湖で、植物プランクトンは淡水種、中海は、多塩分湖～中塩分湖で植物プランクトンも海洋種がほとんど占めており、両湖は水質汚濁現象を異にしている。その原因は塩分濃度を異にするためと考え、湖山池と中海のデータに淡水湖の霞ヶ浦¹⁾、諏訪湖、琵琶湖など汽水湖の宍道湖のデータを加えて、リンと植物プランクトンの増殖量、湖沼の内部生産を重点において数値解析を行ない、次のような知見を得たので報告する。

① リンと植物プランクトンの増殖量：湖山池などの淡水湖ではリンが植物プランクトン(Chl-a)の増殖に利用されて、水質汚濁をもたらしているが、中海ではあ

まり利用されていない。また、夏期に底泥から溶出したリンは、湖山池では増殖に利用されているが、中海では米子湾を除いて増殖にはほとんど利用されていない。

② 植物プランクトンの季節変化：湖山池や霞ヶ浦などの淡水湖では夏期に良く増殖し、冬期にはあまり増殖しないが、中海では夏期よりむしろ、春と秋から冬にかけて増殖している。

③ 湖沼の内部生産量：湖山池などの淡水湖は汽水湖の中海に比較して植物プランクトンの増殖による内部生産が高く、その割合も大きい。

2 水質の概要

湖山池、中海は、それぞれ県の東部と西部に位置しており、水深は湖山池が平均2.8m、最大8.9m、中海が平均5.4m、最大17.1mである。

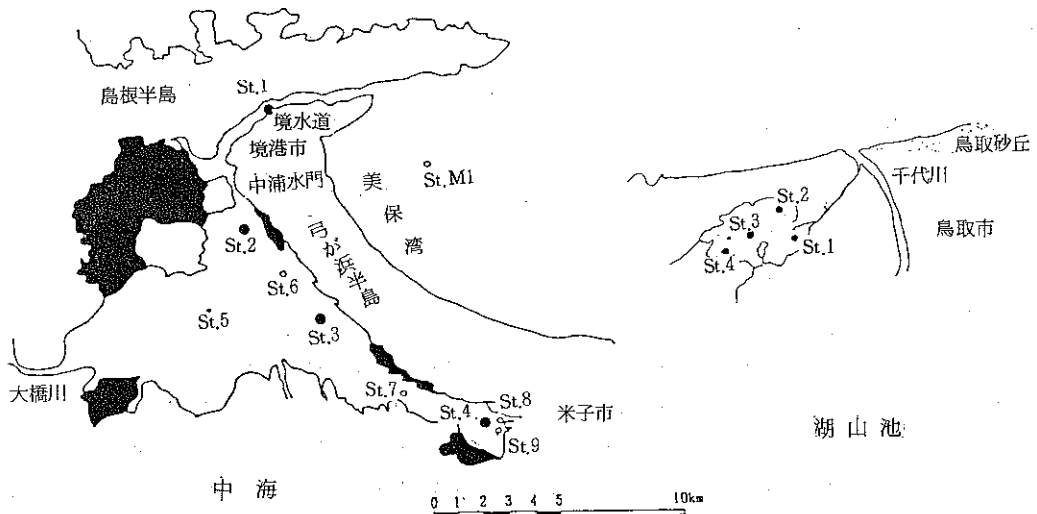
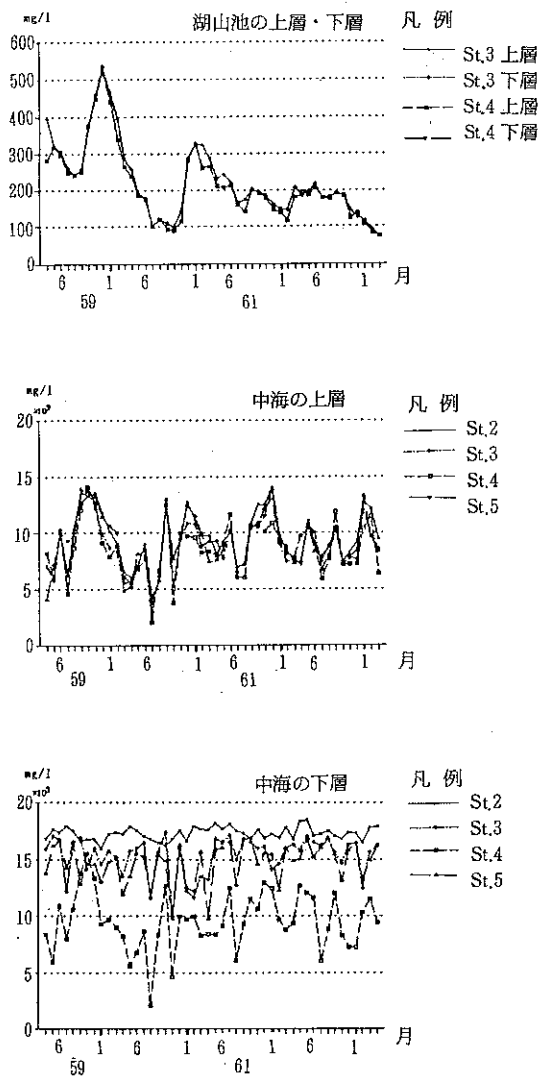


図1 調査地点位置図

図2 Cl⁻の推移

水質調査地点は、湖山池で4地点、中海で9地点の調査をおこなっている。その代表地点として湖山池はSt.3(中央部3.7m)、中海はSt.3(米子市葭津地先、水深7.9m)、St.4(米子湾中央部、水深3.4m)を選定した。

最近4年間(59~62年度)の平均値について代表地点における上層(水深0.5m)と下層(湖底から0.5m、ただし中海St.3は1.0m)の水質を比較すると、次のとおりである。

Cl⁻:湖山池は223と226mg/lで上層と下層があまり変わらず、塩分に換算して0.4%と淡水湖の状態である。中海はSt.4が8,550と9,460mg/lで上層と下層があまり変わらないが、St.3は8,790と15,200mg/lで下層が高値である。

COD:湖山池は7.0と6.1mg/l、中海St.3は3.9と1.7mg/l、St.4は5.2と4.8mg/lで、いずれも上層が下層より高値で、特に中海のSt.3の下層が低値である。

水温:湖山池は16.8と16.3℃、中海St.3は16.5と15.9℃で、St.4は16.7と16.5℃で、いずれも上層が、下層より僅かに高値である。

TN:窒素をIN(無機態窒素(NH₄-N、NO₂-N、NO₃-Nの合計)とON(有機態窒素)、PTN(懸濁態窒素)とDTN(溶解性窒素)に分画した。TNは、湖山池が1.055と0.823mg/l、中海St.3が0.566と0.584mg/l、St.4が0.894と0.878mg/lである。湖山池と中海St.4は上層が下層より高値を示すが、中海St.3は僅かであるが、下層が上層より高値である。湖山池、中海ともにONがINより高値で、ONは湖山池、中海St.4が高値である。PTNは湖山池上層だけがDTNより高値であるが、他は低値である。

表1 水質の概要(59~62年度平均値)

水域	地点	部位	水温 ℃	COD mg/l	IN mg/l	ON mg/l	PTN mg/l	DTN mg/l	TN mg/l	PTP mg/l	DTP mg/l	TP mg/l	Chl-a μg/l	Cl ⁻ mg/l
湖山池	St.3	上層	16.8	7.0	0.093	0.959	0.592	0.462	1.055	0.051	0.018	0.069	56.6	223
		下層	16.3	6.1	0.155	0.668	0.310	0.513	0.823	0.045	0.019	0.064	27.3	226
中海	St.3	上層	16.5	3.9	0.073	0.492	0.275	0.290	0.566	0.034	0.017	0.051	19.7	8,790
		下層	15.9	1.7	0.250	0.334	0.156	0.433	0.584	0.023	0.064	0.088	9.3	15,200
	St.4	上層	16.7	5.2	0.172	0.722	0.440	0.454	0.894	0.058	0.020	0.079	37.6	8,550
		下層	16.5	4.8	0.182	0.696	0.400	0.478	0.878	0.055	0.026	0.082	33.6	9,460

TP：リンをPTP（懸濁態リン）とDTP（溶解性リン）に区分した。TPは湖山池が0.069と0.064 mg/l、中海St.3が0.051と0.088 mg/l、St.4が0.079と0.082 mg/lで、湖山池は上層が、中海は下層が高値である。湖山池、中海ともにPTPは上層が、DTPは下層が高値を示している。PTPは中海St.3の下層を除いてDTPより高値である。

Chl-a：湖山池は56.6と27.3 μg/l、中海St.3は19.7と9.3 μg/l、St.4は37.6と33.6 μg/lで、上層が

下層より高値で、特に湖山池上層が高値を、中海St.3の下層が低値を示している。

3 水質構造

(1) 水質構造の概要

湖山池と中海のCl⁻、COD、Chl-a、TPの59～62年度の平均値による水質の模式図により水質構造について説明する。

湖山池：調査地点はSt.1→St.2→St.3→St.4と東

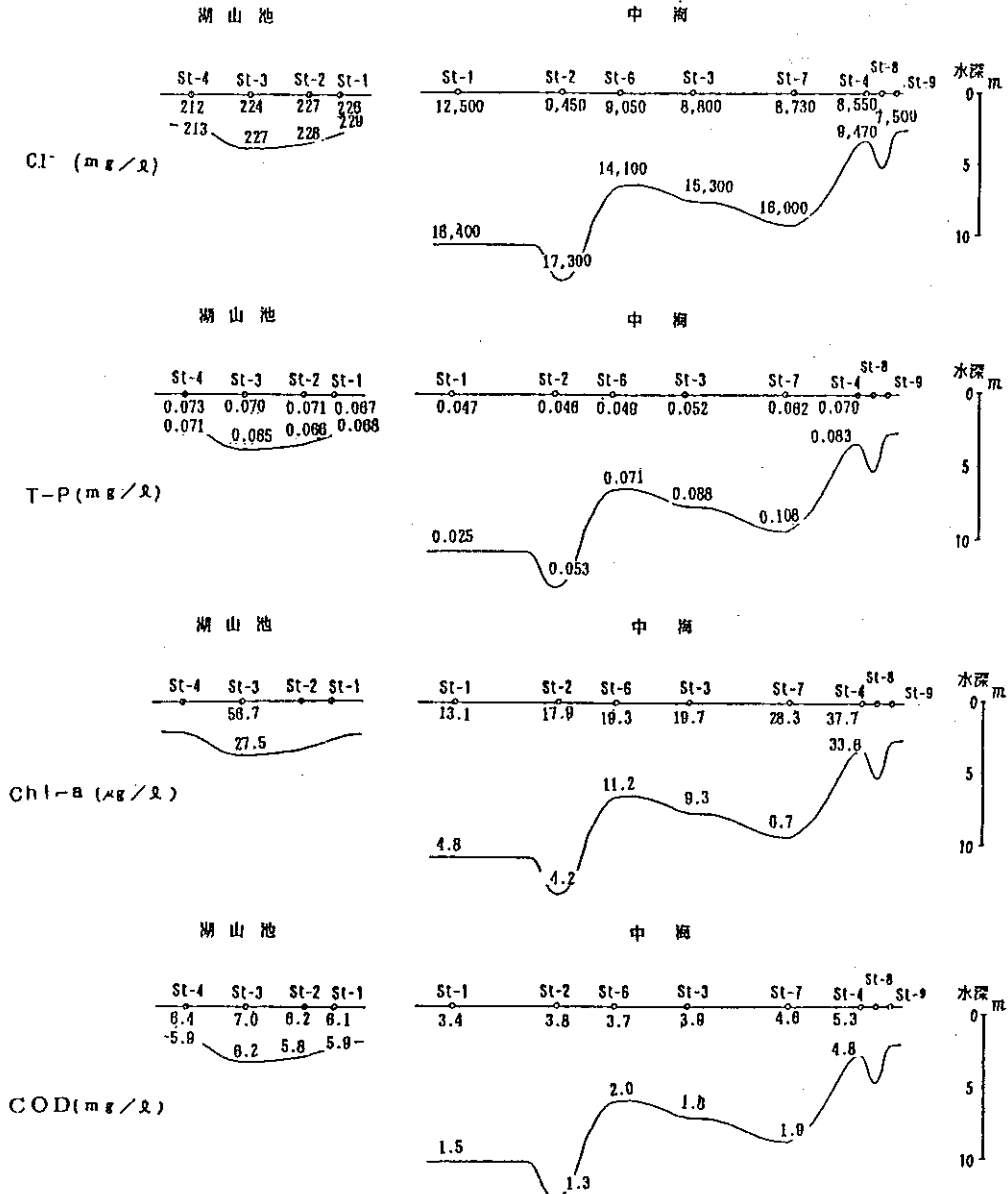


図3 水質の模式図(59～62年度平均値)

から西へ、すなわち湖山川の河口地先のSt.1から松原地先のSt.4までである。

Cl⁻は、St.1が226と229mg/l、St.2が227と228mg/l、St.3が224と227mg/l、St.4が212と213mg/lで、Cl⁻は上層と下層がほとんど変わらない構造をしており、上層と下層間より、むしろ地点間による差が認められる。

CODは、St.1が6.1と5.9mg/l、St.2が6.2と5.8mg/l、St.3が7.0と6.2mg/l、St.4が6.4と5.9mg/lで上層が僅かに高値を示している。

Chl-aはSt.3が上層56.7μg/l、下層27.5μg/lで上層が高値を示している。

TPは、上層0.073~0.067mg/l、下層0.071~0.065mg/lで、St.1では下層が、St.2、3、4では上層が高値を示している。

中海：St.1、2、3、4、6、7の上層と下層の水質と、St.1(境水道中央部)→St.2(境港市小篠津地先)→St.6→St.3(米子市葭津地先)→St.7→St.4(米子湾中央部)の境水道から米子湾の順に、上層、下層の水質を説明する。

Cl⁻は、上層12,500~8,550mg/l、下層18,400~9,470mg/lで、St.1が上層、下層とも最大値を示している。St.2からSt.4に行くにしたがって上層は9,450→9,050→8,800→8,730→8,550mg/lと徐々に低値となっているが、下層は17,300→14,100→15,300→16,000→9,470mg/lとSt.7からSt.4の間で変動が見られる。これは塩分躍層が水深3~5mにあり、水深が浅いSt.4を除いて大幅に下層が上層より高値を示している。中海の塩分構造はこのように湖山池と異なり塩分躍層を境にして低塩分層(9,470~8,550mg/l)と高塩分層(17,300~14,100mg/l)を持つ複合構造を有している。

CODは、低塩分層が5.3~3.8mg/l、高塩分層が2.0~1.3mg/lで、低塩分層が高塩分層より2mg/l程度高値である。St.2からSt.4までの低塩分層は、3.8→3.7→3.9→4.6→5.3mg/lと米子湾に近づくほど高値になっている。高塩分層は1.3→2.0→1.8→1.9mg/lと低値を示している。

Chl-aは低塩分層が37.7~17.9μg/l、高塩分層が11.2~4.2μg/lで、低塩分層が高値である。St.2からSt.4までの低塩分層は17.9→19.3→19.7→28.3→

37.7μg/lで、高塩分層は4.2→11.2→9.3→6.7μg/lと低値である。

TPは、低塩分層が0.083~0.046mg/l、高塩分層が0.108~0.053mg/lで高塩分層が高値である。St.2からSt.4までは低塩分層0.046→0.049→0.052→0.062→0.079mg/lで高塩分層は0.053→0.071→0.088→0.108mg/lでCODやChl-aと逆に高塩分層が高値を示しており、St.7の高塩分層が特に高値である。

(2) 湖水の混合状態

湖山池、中海の湖水の流動状態を知るため地点間のCl⁻の相関係数(59年4月から63年3月までのn=48)を求めた。

湖山池のSt.1~2~3~4の上層間の相関係数は、それぞれ0.993、0.995、0.987、同様に下層間では0.991、0.997、0.987で、いずれも0.987以上の高値を示している。上層と下層間の相関係数はSt.1が0.997、St.2、St.3、St.4のいずれも0.999と地点間より高い相関係数がある。

湖山池は平均水深2.8mと浅く、湖水が良く混合し、Cl⁻の地点間、上下間の相関係数は0.999~0.987と高値を示しており、特に垂直混合が発達している。

中海の低塩分層間の相関係数はSt.1~2~6~3~7~4の間では0.629、0.975、0.973、0.931、0.925、また、低塩分層に属するSt.4の上層と下層との相関係数は0.917で、中浦水門を挟んだ境水道のSt.1と中海のSt.2の間は0.629であるが、中海の低塩分層間の相関係数は0.93以上の高値である。同様に高塩分層間の相関係数は0.618、0.329、0.626、0.825で、水深の相違による影響があるがSt.1とSt.2、St.6とSt.3、St.3とSt.7の間で比較的高値を示している。低塩分層と高塩分層間の相関係数はSt.1が0.125、St.2が-0.237、St.6が0.231、St.3が0.195、St.7が0.237と低値を示している。

これらの事からも中海湖水は塩分躍層を境にして、上部の低塩分層と下部の高塩分層に区分されることが認められる。

湖水の垂直方向の流動はDO分布によっても知ることができる。DOは大気からの直接溶解と植物プランクトンによる光合成によって供給され湖水表面では過飽和状態となっている。DOは湖水の流動によって各深度までもたらされるので、DOの垂直分布は湖水の

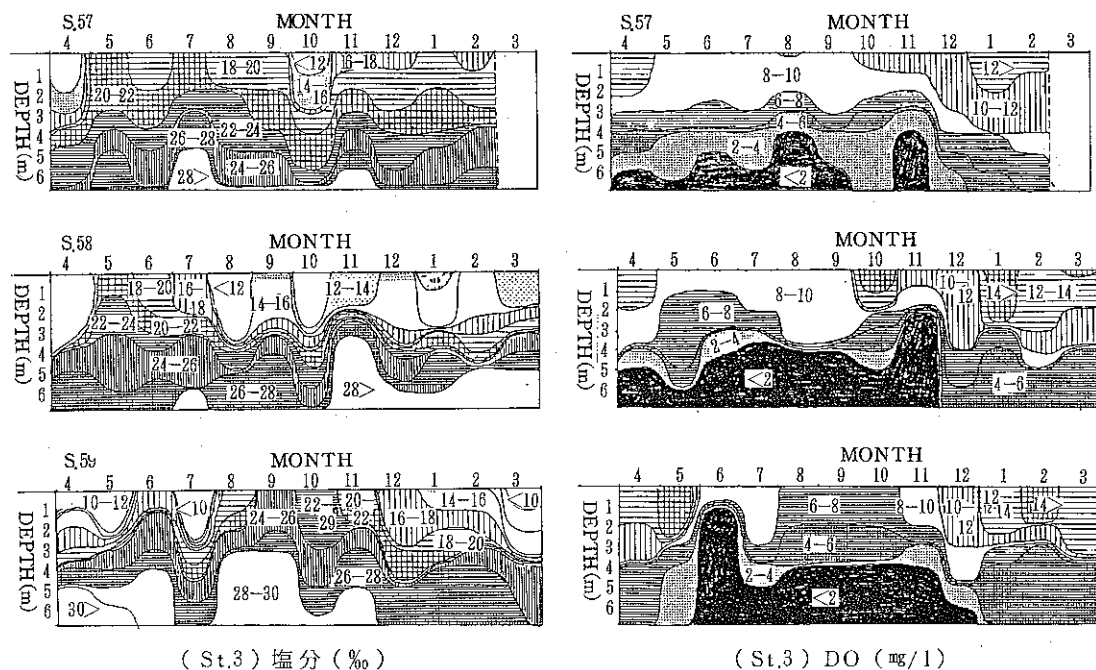
流動を特徴的にとらえることとなる。供給されたDOはその深度での生物による呼吸作用や各種溶存物質の酸化反応によって消費される。そのためDOの分布は湖水の垂直方向の動きを反映する重要な指標である。

中海 St.3 のDOの垂直分布の経月変化からDO量は表層→上層→中層→下層→底層と深度を増すに従って減

少している。それも水深3~5mを境にして急激に減少している。これは塩分躍層の影響を強く受けているためと考察される。表層ではほとんどの期間が8mg/l以上であるが、底層では2mg/l以下の期間が6~8カ月に及んでいる。このことから表層水は良く流動しているが、底層水は余り流動していないことが分かる。

表2 Cl⁻の地点間の相関係数 (59~62年度)

湖 沼	湖 山 池				中 海						
	St.4	St.3	St.2	St.1	St.1	St.2	St.6	St.3	St.7	St.4	St.9
上 層 間	0.987	0.995	0.993		0.629	0.975	0.973	0.931	0.925	0.948	
上 下 層 間	0.999	0.999	0.999	0.997	0.125	-0.237	0.231	0.195	0.237	0.917	
下 層 間	0.987	0.997	0.991		0.618	0.329	0.626	0.825	0.317		



(St.3) 塩分 (%)

(St.3) DO (mg/l)

図4 塩分・DOの垂直分布の経月変化

4 リンと植物プランクトンの増殖量

(1) 水質項目間の関係

湖山池、中海St.3、St.4の上層、下層の水温、COD、IN、ON、PTN、DTN、TN、PTP、DTP、TP、Chl-a、Cl⁻の12項目について相関分析、主成分分析をおこなったので、その概要について記述する。

【相関分析】

植物プランクトンの指標であるChl-aとCOD、PTP、DTP、TPの相関係数 (n=48) は、それぞれ湖山池は上層が0.915、0.726、0.192、0.651、下層が0.429、0.632、0.011、0.487、中海St.3は上層が0.439、0.506、-0.092、0.247、下層が0.237、0.369、0.252、0.283、St.4は上層が0.684、0.432、0.031、0.347、下層が0.674、0.526、-0.112、0.129である。湖山池は、COD、PTP、TPは1%で有意であるがDTPはChl-a

	水温	COD	IN	ON	PTN	DTN	TN	PTN	DTN	TP	Chl-a	Cl ⁻
水温	1.000	0.168	-0.553	0.315	-0.057	-0.092	-0.139	0.103	0.411	0.458	0.167	0.027
COD		1.000	-0.309	0.451	0.449	-0.149	0.193	0.499	-0.180	0.048	0.674	-0.367
IN			1.000	-0.398	-0.274	0.620	0.421	-0.152	0.044	-0.025	-0.430	-0.055
ON				1.000	0.590	0.205	0.663	0.509	-0.143	0.090	0.530	-0.306
PTN					1.000	-0.401	0.360	0.328	-0.293	-0.142	0.550	-0.316
DTN						1.000	0.709	0.125	0.117	0.174	-0.245	-0.102
TN							1.000	0.379	-0.105	0.068	0.173	-0.348
PTP								1.000	-0.226	0.232	0.526	-0.386
DTP									1.000	0.894	-0.112	0.530
TP										1.000	0.129	0.352
Chl-a											1.000	-0.362
Cl ⁻												1.000

表4 淡水湖と汽水湖の水質比較

水域名	地点	水温 (°C)	COD (mg/l)	TP (mg/l)	Chl-a (μg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	Chl-a/TP
霞ヶ浦	St.3	16.5	10.0	0.131	101		0.771
	St.8	16.3	8.1	0.090	57.2		0.635
	St.9	16.0	7.1	0.065	43.1		0.663
印旛沼		16.6	8.3	0.069	48.5	23	0.702
諏訪湖		15.6	6.9	0.100	78.6		0.786
北浦		15.2	6.7	0.044	37.9	42	0.861
琵琶湖	北湖	16.0	2.3	0.007	3.7	8	0.528
	南湖	15.8	2.6	0.017	9.9	8	0.582
湖山池		16.8	7.0	0.069	56.6	223	0.820
宍道湖		16.9	4.7	0.046	19.8	1,890	0.430
中海	St.2	17.2	3.8	0.046	17.9	9,440	0.389
	St.3	16.6	3.9	0.051	19.7	8,790	0.386
	St.4	16.8	5.2	0.079	37.6	8,550	0.475
	St.5	16.7	3.7	0.047	17.9	9,150	0.380

- 注1. 水質調査データは、霞ヶ浦は霞ヶ浦全域調査資料による。印旛沼、諏訪湖、北浦、琵琶湖、宍道湖は、千葉県水質保全研究所、長野県衛生公害研究所、茨城県公害技術センター、滋賀県衛生環境センター、島根県衛生公害研究所から提供をいただいた。
2. 調査地点は、霞ヶ浦は St.3 高浜入、St.8 土浦入、St.9 中央部、印旛沼、諏訪湖、北浦、湖山池、宍道湖は湖心。琵琶湖は北湖が大溝沖中央、南湖は唐崎沖中央、中海は St.2 境港市小篠津地先、St.3 米子市葭津地先、St.4 米子湾中央部、St.5 中海中央部。
3. 採水部位は上層、数値は年度平均値。
4. 調査年度は、霞ヶ浦は 58~61、印旛沼、北浦、琵琶湖は 55~58、諏訪湖は 56~58、宍道湖は 57、58、湖山池、中海は 59~62、ただし諏訪湖は 1、2 月が欠測。

(2) リンと植物プランクトン

リンは植物プランクトンの増殖に利用されているが、淡水湖と汽水湖での利用状況を知るため、湖山池、中海と淡水湖の代表として霞ヶ浦、印旛沼、諏訪湖、北浦、琵琶湖と汽水湖として宍道湖の上層水の水質について検討した。これらの湖沼の平均値を比較すると次のとおりである。

水温：水温は湖山池 16.8℃、中海 17.2～16.6℃、宍道湖 16.9℃で、霞ヶ浦 16.5～16.0℃、印旛沼 16.6℃、諏訪湖 15.6℃、北浦 15.2℃より高い。

COD：湖山池は 7.0 mg/l で霞ヶ浦 10.0～7.1 mg/l、印旛沼 8.3 mg/l より低値で諏訪湖 6.9 mg/l、北浦 6.7 mg/l より僅かに高値である。中海は 5.2～3.7 mg/l で宍道湖 4.7 mg/l と同程度である。

TP：湖山池 0.069 mg/l は印旛沼 0.069 mg/l と同程度で、霞ヶ浦 0.131～0.065 mg/l、諏訪湖 0.100 mg/l より低値で、北浦 0.044 mg/l より高値である。中海は 0.079～0.046 mg/l で宍道湖 0.046 mg/l より高値である。

Chl-a：湖山池は 56.6 μg/l で諏訪湖 78.6 μg/l より低値であるが、霞ヶ浦 101～43.1 μg/l とあまり変わらず、印旛沼 48.5 μg/l、北浦 37.9 μg/l より高値である。中海は 37.6～17.9 μg/l、宍道湖は 19.8 μg

/l である。

淡水湖と汽水湖の TP と Chl-a の関係を図 5 にまとめ、淡水湖の各湖沼の TP と Chl-a の平均値から回帰式を算出した。回帰式は $\text{Chl-a} (\mu\text{g/l}) = 768 \times \text{TP} (\text{mg/l}) - 4.7$ ($n=9, r=0.980$) で、汽水湖の中海、宍道湖は、すべて回帰直線の下側にあり、汽水湖ではリンが淡水湖に比較して植物プランクトンの増殖に利用されていないことを意味しているものと考えられる。

植物プランクトンの増殖に関与しているリンの割合が高くなると、TP と Chl-a の関係が密接になり相関係数も高くなるとの考えから淡水湖と汽水湖の相関係数を比較すると、淡水湖は 0.868～0.401 (湖山池 0.652、霞ヶ浦 St.3 0.518、St.8 0.723、St.9 0.705、印旛沼 0.401、諏訪湖 0.868、北浦 0.598) で、1% で有意であるが、汽水湖は 0.348～0.135 (宍道湖 0.327、中海 St.2 0.241、St.3 0.248、St.4 0.348、St.5 0.135) と低値で相関があまり見られない。琵琶湖は北湖 0.182、南湖 0.376 と低値である。

以上のことから、淡水湖ではリンが植物プランクトンに良く利用されているが、汽水湖や琵琶湖ではあまり利用されていないものと考えられる。

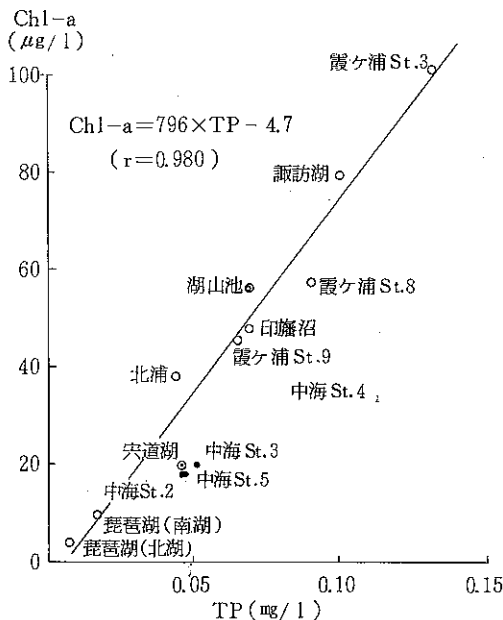


図5 淡水湖と汽水湖のTPとChl-aとの関係
注：調査地点、調査年度は表4の注のとおり。

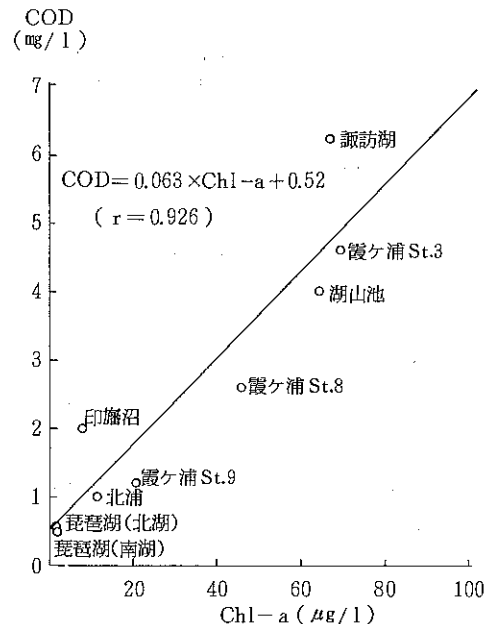


図6 夏期の植物プランクトンによるChl-aとCODの関係

5 湖沼の内部生産

(1) 夏期と冬期の水質汚濁

植物プランクトンの増殖は栄養塩、水温、光強度の影響を強く受ける。水温が高く、光強度の強い初夏から秋にかけては植物プランクトンが良く増殖し、水温が低く、光強度の弱い冬には増殖が衰える。

湖沼における季節による植物プランクトンの増殖と水質の関係をj知るため6～9月の4か月を夏期、11～2月の4か月を冬期としてChl-aとCODの夏期と冬期を比較すれば次のとおりである。

Chl-a: 淡水湖は、霞ヶ浦がSt.3 131.8と62.5 $\mu\text{g}/\text{l}$ 、St.8 79.3と33.6 $\mu\text{g}/\text{l}$ 、St.9 54.3と33.3 $\mu\text{g}/\text{l}$ 、印旛沼が42.4と35.1 $\mu\text{g}/\text{l}$ 、諏訪湖が117.9と50.7 $\mu\text{g}/\text{l}$ 、北浦が45.2と34.1 $\mu\text{g}/\text{l}$ 、湖山池が87.4と23.9 $\mu\text{g}/\text{l}$ と、いずれも夏期が大幅に冬期より高値である。汽水湖は、宍道湖が19.3と17.8 $\mu\text{g}/\text{l}$ 、中海がSt.2 15.2と19.3 $\mu\text{g}/\text{l}$ 、St.3 18.3と21.5 $\mu\text{g}/\text{l}$ 、St.4 35.3と36.5 $\mu\text{g}/\text{l}$ 、St.5 16.1と19.0 $\mu\text{g}/\text{l}$ で宍道湖は夏期と冬期が同程度で、中海では夏期よりむしろ冬期が高値を示している。

COD: 淡水湖は、霞ヶ浦がSt.3 12.3と7.7 mg/l 、St.8 9.7と7.1 mg/l 、St.9 8.0と6.8 mg/l 、印旛沼が8.8と6.8 mg/l 、諏訪湖が10.0と3.8 mg/l 、北浦が7.4と6.4 mg/l 、湖山池が9.1と5.1 mg/l で、いずれも夏期が大幅に冬期より高値である。汽水湖は宍道湖が4.8と4.7 $\mu\text{g}/\text{l}$ 、中海St.2が4.0と3.2 mg/l 、St.3が3.8と3.9 mg/l 、St.4が5.2と4.9 mg/l 、St.5が3.9と3.5 mg/l で夏期と冬期が同程度である。

すなわち植物プランクトンの増殖量は、淡水湖では増殖に条件が良い夏期が、条件の悪い冬期より増殖が多いが、汽水湖では夏期と冬期が変わらない。これは淡水湖では夏期の光強度が増殖に利用されているのに、汽水湖では夏期に植物プランクトンの増殖が抑制されているためと考えられる。

(2) 湖沼の内部生産

湖沼のCODは家庭排水、工場排水、水田、樹園地など湖沼の外部から流入した外部汚濁CODと湖沼内で二次的に植物プランクトンの増殖などにより発生する内部生産CODが考えられる。植物プランクトンは食物連鎖の生産者に当たり、内部生産物質のうち最大の寄与率を占めており、マクロには植物プランクトン

表5 夏期と冬期のChl-aとCODの関係

水域名	地点	年平均		夏期平均		冬期平均	
		COD (mg/l)	Chl-a ($\mu\text{g}/\text{l}$)	COD (mg/l)	Chl-a ($\mu\text{g}/\text{l}$)	COD (mg/l)	Chl-a ($\mu\text{g}/\text{l}$)
霞ヶ浦	St.3	10.0	101	12.3	131.8	7.7	62.5
	St.8	8.1	57.0	9.7	79.3	7.1	33.6
	St.9	7.3	44.1	8.0	54.3	6.8	33.3
印旛沼		8.3	48.5	8.8	42.4	6.8	35.1
諏訪湖		6.9	78.6	10.0	117.9	3.8	50.7
北浦		6.7	37.9	7.4	45.2	6.4	34.1
琵琶湖	北湖	2.3	3.7	2.7	4.3	2.2	3.9
	南湖	2.6	9.9	3.0	9.1	2.4	8.6
湖山池		7.0	56.6	9.1	87.4	5.1	23.9
宍道湖		4.7	19.8	4.8	19.3	4.7	17.8
中海	St.2	3.8	17.9	4.0	15.2	3.2	19.3
	St.3	3.9	19.7	3.8	18.3	3.9	21.5
	St.4	5.2	37.6	5.2	35.3	4.9	36.5
	St.5	3.7	17.9	3.9	16.1	3.5	19.0

が内部生産を代表していると考えられる。この考えから、湖沼 COD = 内部生産 COD + 外部汚濁 COD の式が成立する。

内部生産 COD の求め方として、夏期の植物プランクトンの増殖による Chl-a、COD を求めれば良い。そこで、夏期の Chl-a 値から冬期の Chl-a 値を減じた Δ Chl-a 値、同様に夏期の COD 値から冬期の COD 値を減じた Δ COD 値を求めると、この Δ Chl-a、 Δ COD が夏期の植物プランクトンの増殖により発生した Chl-a、COD である。

Δ COD と Δ Chl-a の関係式として、

$$\text{COD} = 0.063 \times \text{Chl-a} + 0.52 \quad (n=9, r=0.926)$$

の回帰式が求められる。この回帰係数をもとに、

$$\text{内部生産 COD} = 0.063 \times \text{Chl-a}$$

の式から内部生産 COD を算出し、外部汚濁 COD を求め、内部生産の割合を算出した。

湖沼の内部生産 COD と内部生産の割合について説明すると、霞ヶ浦は St.3 が 6.3 mg/l (63%)、St.8 が 3.6 mg/l (44%)、St.9 が 2.8 mg/l (38%)、印旛沼が 3.0 mg/l (36%)、諏訪湖が 4.9 mg/l (71%)、北浦が 2.4 mg/l (36%)、湖山池が 3.6 mg/l (51%) で、汽水湖は、宍道湖が 1.2 mg/l (26%)、中海は St.2 が 1.1 mg/l (29%)、St.3 が 1.2 mg/l (31%)、St.4 が 2.4 mg/l (46%)、St.5 が 1.1 mg/l (30%) である。淡水湖の内部生産 COD 値は 6.3 ~ 2.4 mg/l で内部生産の割合は 71 ~ 36% で、霞ヶ浦、諏訪湖、湖山池が内部生産が大きい。汽水湖の湖沼の内部生産 COD は 2.4 ~ 1.1 mg/l で内部生産の割合は 46 ~ 26% と淡水湖に比較して小さい。

淡水湖は夏期に植物プランクトンの増殖が盛んであるが、内部生産は、霞ヶ浦 St.3 が 8.3 mg/l、諏訪湖が 7.4 mg/l、湖山池が 5.5 mg/l と高値を示し、内部生産の割合は、68%、74%、60% と非常に大きい割合を占めている。

(3) 湖山池と中海の水質構造と湖沼の内部生産

湖山池と中海は、塩分による水質構造が異なっているが、塩分の水質構造と湖沼の内部生産について比較をすれば次のとおりである。

湖山池 St.3 は COD が上層 7.0 mg/l、下層 6.2 mg/l で、内部生産 COD が上層が 3.6 mg/l、下層が 1.7 mg/l と上層が若干高値を示すが、これは上層でアオコが発生したためである。Cl⁻ は上層 224 mg/l、下層 227 mg/l で、

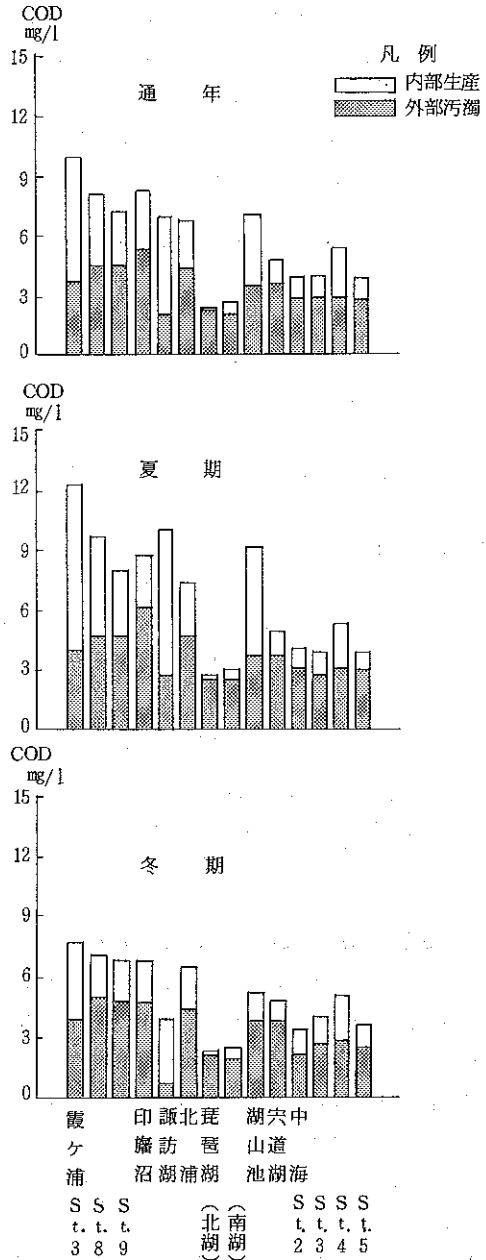


図7 淡水湖と汽水湖の内部生産と外部汚濁

海水の割合は上層、下層ともに1.1%に過ぎない。

中海の COD は低塩分層が 5.3 ~ 3.7 mg/l、高塩分層が 2.0 ~ 1.3 mg/l で、低塩分層が 2 mg/l 程度高値である。内部生産 COD は低塩分層が 2.4 ~ 1.1 mg/l、高塩分層が 0.7 ~ 0.3 mg/l で低塩分層が高値である。内部生産の割合は低塩分層が 44 ~ 29%、高塩分層が 35 ~ 21% である。高塩分層 COD が低値なことの原因の一つとして

中海湖水における海水の割合が大きいことが考えられる。低塩分層は50～45%、高塩分層は91～74%で、海水が低塩分層では半分、高塩分層では大部分を占めている。海水の割合は、美保湾海水のCl⁻を19,000mg/l (美保湾の境港市福定町地先4kmの下層水の59～

62年度のCl⁻の平均値18,800mg/l)、河川水のCl⁻を20mg/lとして次式により算出した。

$$\text{海水の割合 (\%)} = 100 \div \{ 1 + \{ (19,000 - \text{Cl}^- \text{濃度}) \div (\text{Cl}^- \text{濃度} - 20) \} \}$$

表6 湖山池と中海における湖沼の内部生産と海水の割合 (59～62年度)

	部位	湖山池	中			海	
		St.3	St.2	St.6	St.3	St.7	St.4
COD (mg/l)	上層	7.0	3.8	3.7	3.9	4.6	5.3
	下層	6.2	1.3	2.0	1.8	1.9	4.8
内部生産COD (mg/l)	上層	3.6	1.1	1.2	1.2	1.8	2.4
	下層	1.7	0.3	0.7	0.6	0.4	2.1
内部生産CODの割合 (%)	上層	51	29	32	31	37	40
	下層	27	23	35	33	21	44
Cl ⁻ (mg/l)	上層	224	9,450	9,050	8,800	8,730	8,550
	下層	227	17,300	14,100	15,300	16,000	9,470
海水の割合 (%)	上層	1.1	50	48	46	46	45
	下層	1.1	91	74	81	85	50

注：中海における海水の割合は (美保湾の境港市福定町地先4kmの下層水の59～62年度のCl⁻の平均値が18,800mg/l) 美保湾海水のCl⁻を19,000mg/l、河川水のCl⁻を20mg/lと仮定し、次式により算出した。
海水の割合 (%) = 100 ÷ { 1 + { (19,000 - Cl⁻濃度) ÷ (Cl⁻濃度 - 20) } }

(4) 夏期と冬期の内部生産の相違と植物プランクトン

湖沼の内部生産と植物プランクトンの関係を知るため、湖山池、霞ヶ浦、諏訪湖と汽水湖の中海、宍道湖の植物プランクトンの季節変化について略述する。

湖山池：1～4月は珪藻類の*Melosira*、*Asteonera*、6～11月に藍藻類の*Microcystis*、*Anabaena*が優占種で、夏期には、しばしば*Microcystis*によるアオコが発生する。

霞ヶ浦³⁾：春および晩秋から冬には、珪藻類*Synedra rumpens*、*Melosira granulata*、夏から秋には藍藻類*Microcystis aeruginosa*、*Anabaena flos-aquae*が優先する。それに1～3月にかけて緑藻類*Closterium aciculare*などが増えることがある。

諏訪湖⁴⁾：2～6月は珪藻類の*Cyclotella*、*Fragilaria*、*Melosira*が増加し、7～11月は藍藻類の*Microcystis*が優占種となっている。また、冬期には珪藻類*Cyclotella*や鞭毛藻類、緑藻類が優占している。

宍道湖⁵⁾：珪藻類*Cyclotella*は年間を通して出現

しているが、冬から春にかけて優占し、*Chaetoceros*は夏と冬に、*Skeletonema costatum*は夏から秋にかけて、藍藻類では*Coelosphaerium kuetzschingianum*が冬に優占している。

中海：珪藻類*Skeletonema costatum*は夏から冬にかけて、*Chaetoceros*は夏に優占している。渦鞭毛藻類*Prorocentrum minimum*は通年出現しているが、春と秋から冬に優占し、時には赤潮を形成している。

湖山池、霞ヶ浦、諏訪湖では夏期に藍藻類の*Microcystis*が優占しChl-a、CODが高値となり、冬期は主として珪藻類でChl-a、CODは低値である。このためリン当たり植物プランクトンの増殖量、湖沼の内部生産量、内部生産の割合が夏期が冬期より高くなっている。

中海では、渦鞭毛類の*Prorocentrum*が赤潮プランクトンで、春と秋から冬の冬期に優占し、夏期には衰微している。また、宍道湖では、藍藻類が夏期よりむしろ冬期に優占している。このためChl-a、CODが夏期と

冬期に差が見られなくなったものと考えられる。

また、汽水湖の中海、宍道湖が、もし淡水湖であれば、夏期には藍藻類のMicrocystisが優占種として増殖し、Chl-a、CODが高値となり、夏期の内部生産量が大幅に大きくなることが予測される。この様に、植物プランクトン種と水質との密接な関係が見られる。

6 ま と め

(1) 水質構造と湖水の混合状態

湖山池の塩分構造は上下層がほとんど変わらない構造で、むしろ地点間による差異が認められる。また、水質は上層が僅かに高値を示している。中海の塩分構造は、塩分躍層を境にして低塩分層(9,470~8,550mg/l)と高塩分層(17,300~14,100mg/l)を持つ複合構造を有している。水質(COD)は、低塩分層が高塩分層より2mg/l程度高値である。

(2) リンと植物プランクトンの増殖量

淡水湖のリン当たり植物プランクトンの増殖量は、汽水湖より高値であることから、淡水湖では植物プランクトンの増殖に関与しているリンの割合が高い。また、TPとChl-aの相関係数から淡水湖ではリンが植物プランクトンに良く利用されているが、汽水湖や琵琶湖ではあまり利用されていないことが考察される。

また、夏期の底泥からの溶出リンは、湖山池は植物プランクトンの増殖に利用されているが、中海では米子湾を除いては増殖にはほとんど利用されていない。

(3) 淡水湖と汽水湖の湖沼の内部生産

淡水湖の内部生産CODは6.3~2.4mg/lで内部生産の割合は71~36%で、霞ヶ浦、諏訪湖、湖山池の内部生産が大きい。汽水湖の湖沼の内部生産CODは2.4~1.1mg/lで内部生産の割合は46~26%と淡水湖に比較して小さい。また、植物プランクトンの増殖の盛んな夏期の内部生産は、霞ヶ浦St.3が8.3mg/l、諏訪湖が7.4mg/l、湖山池が5.5mg/lと高値を示し、内部生産の割合は68%、74%、60%と非常に大きい割合を占めているが、汽水湖の中海では夏期の内部生産は2.2~1.0mg/lと低値で、内部生産の割合も42~25%と小さい。

(4) 植物プランクトンの種類と湖沼の水質(COD)

湖山池、霞ヶ浦、諏訪湖では夏期に藍藻類が優占しChl-a、CODが高値となり、冬期は主として珪藻類

でChl-a、CODは低値である。このためリン当たり植物プランクトンの増殖量、内部生産量、内部生産の割合が夏期が冬期より高くなっている。

中海では、渦鞭毛藻類のProrocentrumが赤潮プランクトンで、春と秋から冬の冬期に優占し、夏期には衰微している。また、宍道湖では、藍藻類が夏期よりむしろ冬期に優占している。このためChl-a、CODが夏期と冬期に差が見られなくなったものと考えられる。

また、汽水湖の中海、宍道湖が、もし淡水湖であれば、夏期には藍藻類のMicrocystisが優占種として増殖し、Chl-a、CODが高値となり、夏期の内部生産量が大幅に大きくなることが予測される。

中海のProrocentrumは、Cl⁻が4,000mg/l以下では増殖速度が低下し、淡水ではほとんど増殖しないなど塩分の影響を受けるが、条件の良い夏期に増殖しないで、条件の悪い冬期に増殖するか、これが今後の研究課題である。

謝 辞

本研究を進めるに当たり、諏訪湖、宍道湖などの水質データの御提供をいただいた茨城県公害技術センター、千葉県水質保全研究所、長野県衛生公害研究所、滋賀県衛生環境センター、島根県衛生公害研究所に厚くお礼申し上げます。

文 献

- (1) 国立公害研究所：国立公害研究所研究資料第33号 霞ヶ浦全域調査資料(1988)
- (2) 安田満夫、山内佳見、田中賢之介、箕 一郎、坂田裕子：県内湖沼の栄養塩類の挙動と富栄養化現象について、鳥取県衛生研究所報第26号38~39(1987)
- (3) 高村典子、岩熊敏夫、安野正之：霞ヶ浦の植物プランクトンの現存量と一次生産及びバラン藻類の生産特性、国立公害研究所研究報告第51号、11~56(1984)
- (4) 長野県衛生公害研究所：諏訪湖の富栄養化に関する研究、65~66(1982)
- (5) 石原淳子、安田幸伸、川上誠一、山崎美起雄：宍道湖のプランクトン相について、島根県衛生公害研究所報第23号、121~127(1981)