

I 地形と湾盆の形態

中海は鳥取、島根両県にまたがる内湾である。現在、干拓淡水化工事が進められているが、著者が調査に従事した昭和20～50年代初には面積約102km²、²⁷⁾ 湾岸線85km、²⁶⁾ 水深は中央部最深地点で8.2m、²⁴⁾ 平均水深4.6mであった。

斐伊川や日野川、飯梨川等の排出した土砂によって形成された潟湖と見なすことができる。湾内には北西部に大根島と江島があり、干拓着工前には下宇部尾岬沖で最大深14m²⁶⁾ が記録されていた。

水路部発行の海図No. 133 第3版をもとに水深別の面積を試算し、海深との関係を作図すると図1となる。

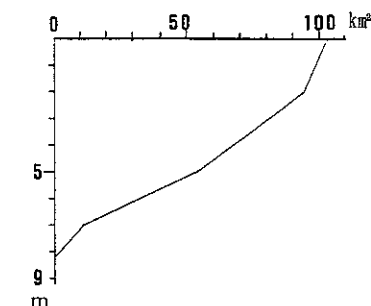


図-1 中海の水深と深度別面積の関係

この図を使って水深1m毎の湾面積を求め、更に湾容積を求積した結果は表1に示す。

表-1 中海の深度別面積と湾容積

水深	面積 km ²	面積比 %	容積 ×10 ⁶ m ³	容積比 %
0	103	100	100.0	20.5
1	99	96	96.5	19.6
2	94	91	87.5	17.8
3	81	79	74.0	15.0
4	67	65	60.5	12.3
5	54	52	43.0	8.7
6	32	31	21.5	4.4
7	11	11	7.5	1.4
8m以深	4	4	1.2	0.2
計			492.7	

注) 深度別の湾容積は前編と同様、簡易式で求積した。湾の全容積をシンプソンの公式により積算すると491×10⁶m³となる。

II 流入河川

中海に流入する河川としては、意宇川、飯梨川、伯太川等があり、6～7×10⁶m³/日の多量な陸水が注いでいるが、²⁵⁾ その7～8割は大橋川を経て宍道湖から流れ込んだものである。²⁶⁾

III 観測点の設定

中海の調査は2期に分けて実施した。昭和24年1月から26年1月の間は図2-1に示した13定点を設定し、毎月1回、表層および底層水を北原式B型採水器によって採取して、物理性状ならびにpH、 Cl^- 、溶存酸素等化学成分を測定した。

この調査により、海水の性状が鉛直的に変化の激しいことがわかったので、昭和26年以降は観測点を減らす一方、1m深間隔で採水して鉛直構造の解明に努めた。昭和32年以降の調査時には定点を6個所に選定したが、各点の位置は図2-2及び図2-3に示した。

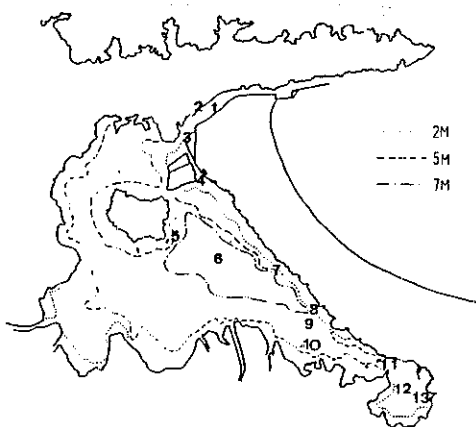


図2-1 観測点の位置(昭和24~26年)

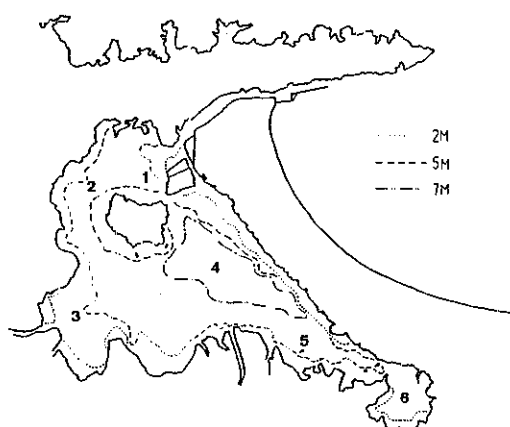


図2-2 観測点の位置(昭和26~37年)

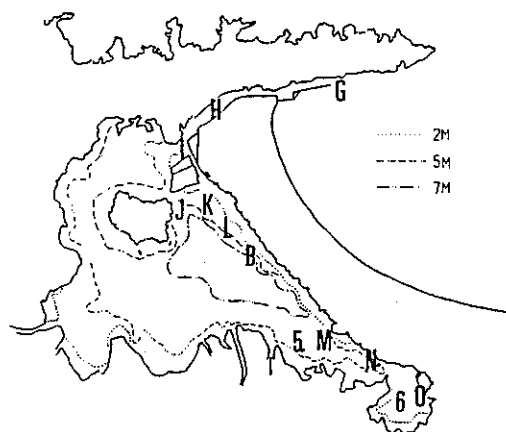


図2-3 観測点の位置(昭和41~51年)

IV 内湾水の物理的性状

1. 湾流

中海と外洋を結ぶ境水道(中江瀬戸)は6.5km²⁷⁾(現在は8.5km)この水道における潮汐流については幾つかの報告があり、流速の分布は干潮時、順流時にはほぼ河川型の分布をなしている。²⁷⁾潮が入り始めると逆流は先ず下層に現われ、次第に上層が転流して全断面に及ぶ。逆流から順流に変わる時は上層から順次転流する。最大流速は順流のとき表層付近にあり、逆流時には中層に生ずる。

順流時には底層ではほとんど流速がないが、逆流時には底層の流速が大きくなる。流量の極値は順流の

場合 800 ~ 1500 m³/Sec、逆流時には 500 ~ 1000 m³/Sec 程度²⁷⁾ であるという。

湾内における海水の流動について、古くは島根水試の報告があり、²⁸⁾ 通常は反時計回りの湾流があるとされている。Cl⁻ の水平分布を見ても³¹⁾ 境水道から流入した海水は北西岸から南東方向へ進んで米子湾に達しており、反時計回りの恒流を推定することができる。

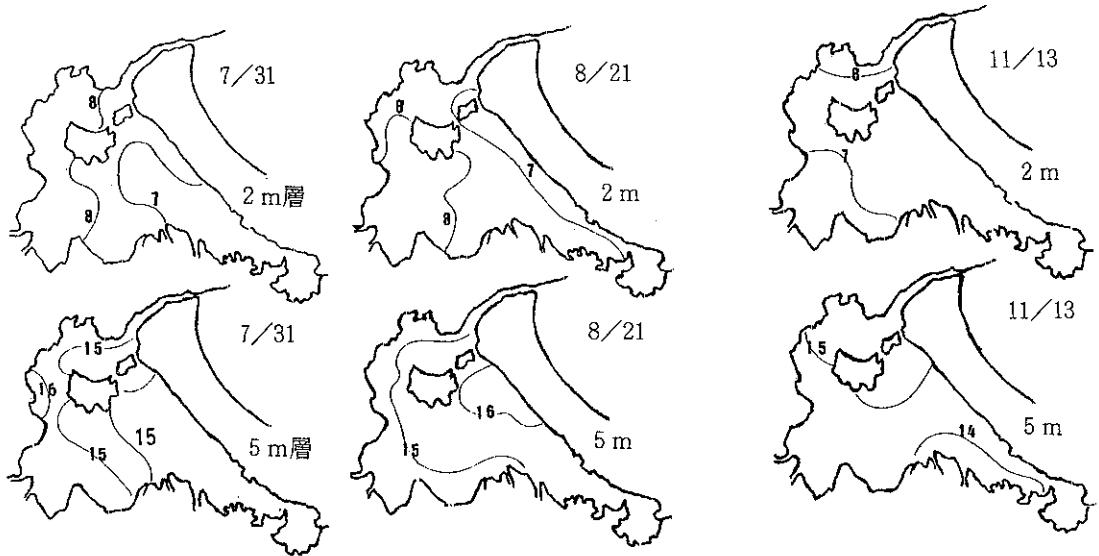


図-3 Cl⁻ の水平分布 (昭和33年) %

2. 透明度

図4に示したとおり、昭和24~25年におけるこの内湾の透明度は、境水道を除いた湾内部域でおおむね2~4 mであって、季節的には初春2~4月と秋9~10月に減少し高温期5~8月に増大していた。また最奥部の米子湾では他の場所にくらべて透明度が小さくなっていた。

3. 水温

北原式B型採水器を1 m間隔に目盛をつけた網でつるし、各水深層毎

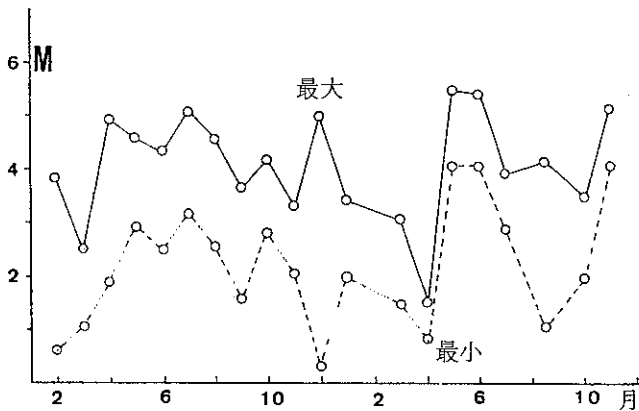


図-4 湾内透明度の季節変化 (昭和24~25年)

に採水して0.2℃目盛の棒状寒暖計で測温した。

(1) 鉛直分布

図5は昭和32~34年における水温の鉛直分布を月別に示したものである。

一見して明らかな様にこの内湾では、水深が浅いにもかかわらず、表、底層間の水温較差が大きく、周年にわたって中層に顕著な躍層を生じている。

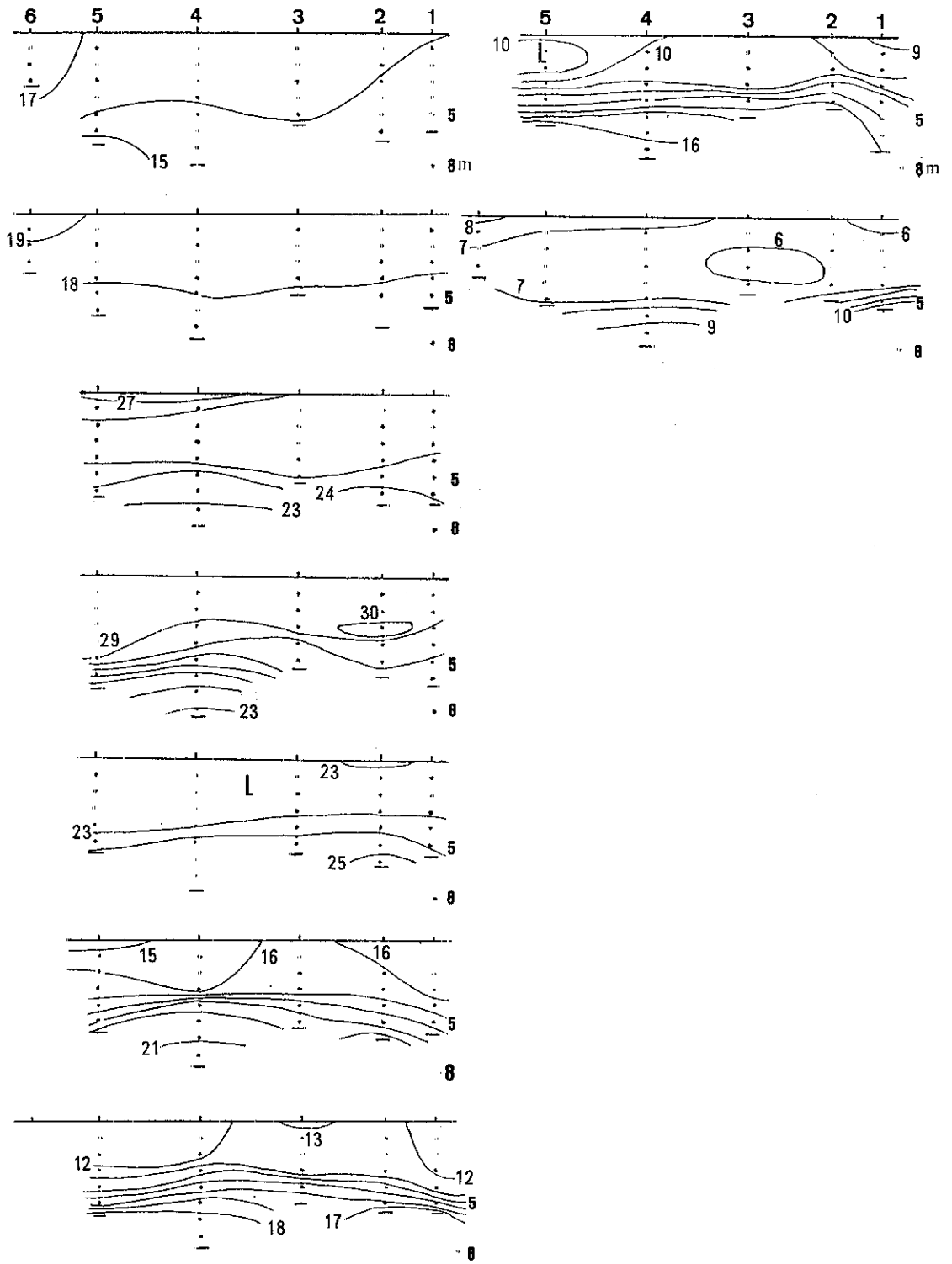


図-5 各定点における水温の鉛直分布(昭和33~34年) 単位°C

(2) 水平分布

図5では等温線が水平面とほぼ平行に分布しているの、鉛直的には不連続な分布をなすものの、水平的には連続した分布をなしているものと解することができる。詳細に観察すると湾口部のSt1と湾奥部の米子湾では多少の相違があり、年間を通して上・中層では湾奥部の方が若干高めの水温を呈する場合が多い。

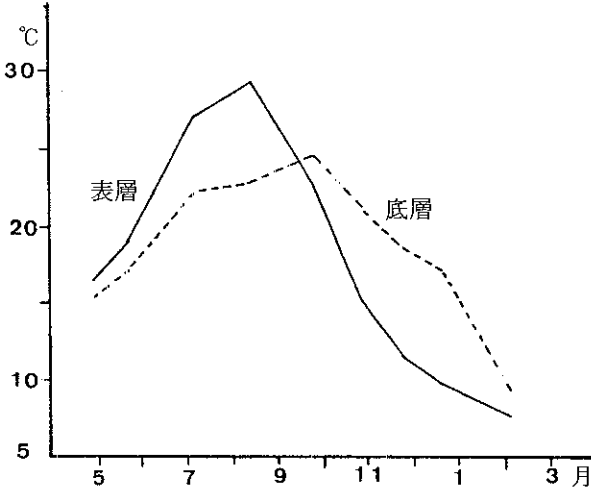


図-6 湾中央部における表・底層水温の年周変化
(昭和33~34年)

(3) 年周変化

湾中央部の最深地点における33年の表層と底層水温の年周変化を図6に示した。

表層水温は8月に最高となり、2月には最低値を生じていた。その年間較差は約22°Cである。一方、底層水の最高値は表層よりも1カ月おくらせて9月に出現しており、最低値は2月に生じていた。年間較差は約15°Cで表層にくらべると6°C小さい。下層ほど水温の季節変化が小さいことがわかる。

次に表、底層間の水温較差を見ると、成層が特に発達するのは高温期と寒冷期である。高温期8月には順列成層をなし

て較差は6.6°C。一方、寒冷期12月には成層が逆転しているものの、較差は増大して6.3°Cであった。

成層が反転するのは春期3月と秋期は9月である。この時期になると表底層間較差も減少して春、秋期とも2~4°Cとなっている。

他の機会に測定したところでは、表層水温が1月に4°C台に降温した例もあるので(鳥取水試資料A昭和50年度・昭和51年4月)水温値は年によってかなり変動すると考えられるが、成層の順逆に関係なく、表底層間の較差が高温期と寒冷期に最大となる現象はこの内湾の特徴であって、湖山池や東郷湖など他の潟湖では見られなかった現象である。

4. 外洋水の流入機構

湾中央の最深地点における水温鉛直分布の年周変化を図7に示した。図中で特に興味深いのは9月の成層逆転期になると、今まで底層には存在しなかった24°C台の高値が突然出現していることである。

中海の表層水温は気温と一致して8月に最高値を呈するが、外洋水はこれよりも1カ月おくらせて9月に極大値に達する。従って、底層水温が9月に最高となる上記の現象は、高温高鹹な外洋水が9月になって湾内底層に侵入したことを示している。この事例によってもわかるとおり、湾内の水温を外洋のそれと比較することによって、海水の流入機構を解明することも可能ではないかと考えた。ここでは昭和32~34年に中海と外洋美保湾で同時に行った数例の観測結果を使い、次の考察を試みた。

図8は中海中央部のSt4~5におけるT-CIダイアグラムと、同じ時期の美保湾の中江瀬戸寄り地点におけるダイアグラムである。

図において中海底層水の水温を、これと同一塩素量の美保湾水と比較すると両者の差は表2となる。

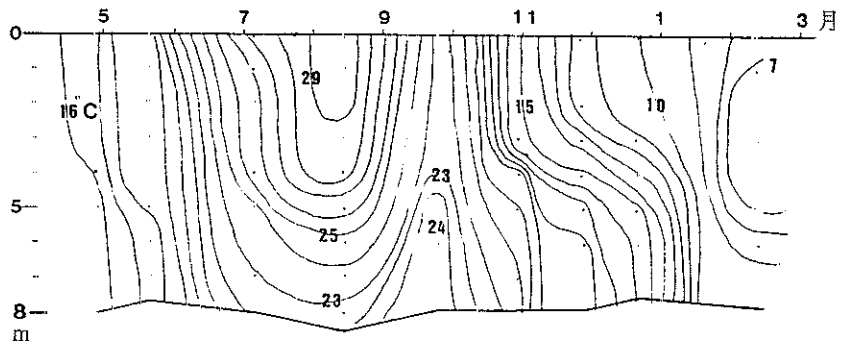


図-7 湾中央部における水温鉛直分布の年周変化(昭和33~34年)

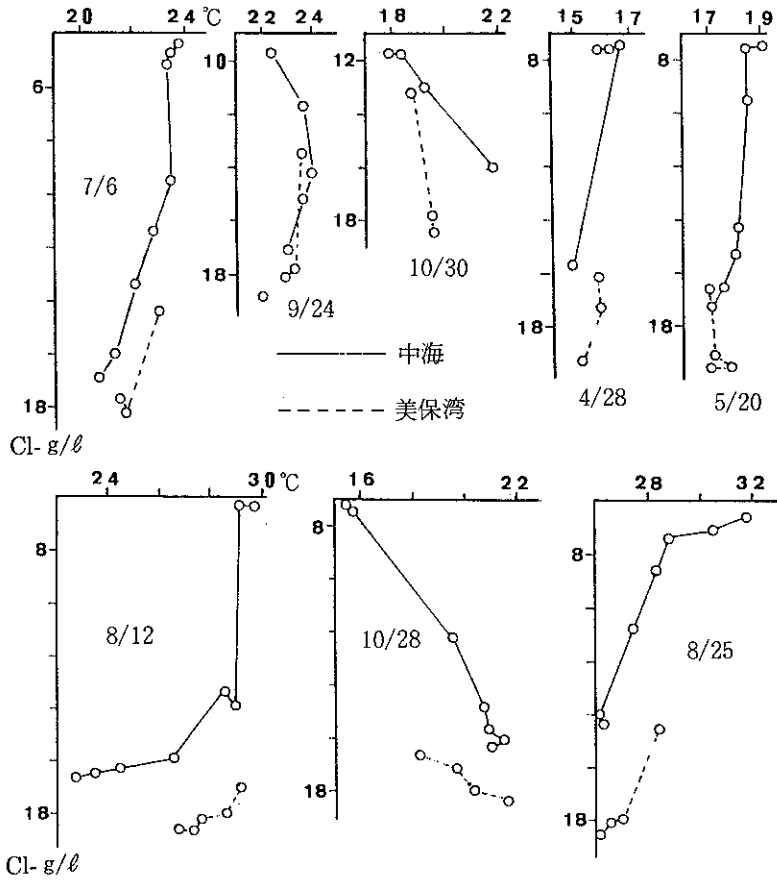


図-8 中海と美保湾の T, Cl ダイアグラム(昭和32~34年)

表-2 中海底層水と外洋水(同一塩分量)の温度差

年 - 月	32.7	9	10	33.4	5	8	10	34.8
温度差(中海-外洋)	-1.4	-0.3	+2.6	-0.9	0	-6.4	+3.0	-2.3

表によれば地中海の底層水温は外洋水と比べて9月以前は低温であって、33年8月には6.4℃も低くなっているが、10月以降には逆に2～3℃高温であることがわかる。

異常水温を呈するこの中海深所の底層水は、図8のT-Clダイアグラムによれば、実は数カ月前の外洋水と一致する水塊であり、かなり古い時期に中海へ流入した外洋水が、深所の底層に停滞していたことをこの図は示している。

すなわち気圧の低下や大潮などの際に、多量の外洋水が下、底層を伝って中海奥部へと流入するが、それは深所のくぼみに滞留して、通常の潮汐では一きょに湾外へ流出するものではない。恐らく長時間を経て躍層の上部へ次第に拡散した後、潮流流によって湾外へ排出されているものと考えられる。

湾流の項で考察したとおり、境水道では順流時に底層ではほとんど流速が計測できないことでもわかるように、地中海の底層水が底層を伝って直接に外洋へと流出することはない。

V 湾内海水の化学的性状

湾内海水の化学性状については主として観測回数が多い昭和32～34年の資料を用い、その他の機会に測定したものも含めて考察する。

1 pH

各層から採取した試水は船上で直ちにCRおよびTBを指示薬とし、鈴木製作所製の塩誤差を補正した標準緩衝液と比色して測定した。

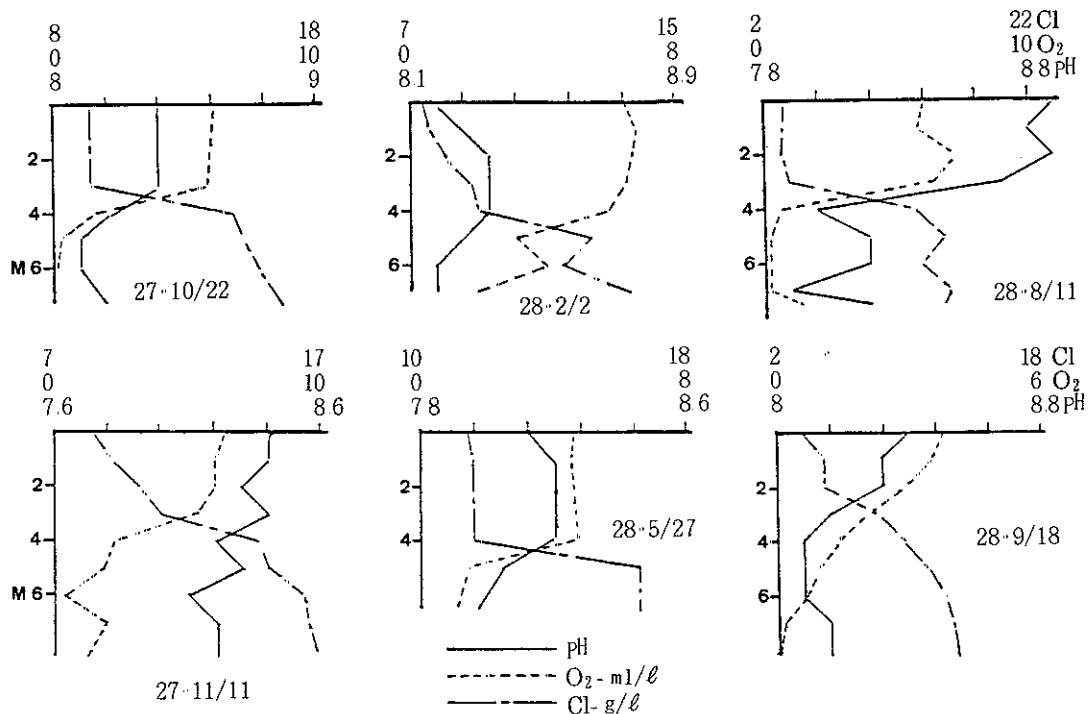


図-9 湾中央部におけるpH、O₂およびClの鉛直分布（昭和27～28年）

(1) 鉛直分布

湾中央部の St4 または St5 における各層の pH を、これと関係深いと思われる O_2 や Cl^- と対比させて図 9 に示した。

前項で考察した水温と同様に、これらの諸成分はどれも中層の同一深度に顕著な躍層を生じており、鉛直的には不連続な分布をなしている。

底層水の pH は湖山池と同様、他層よりも概して低値となっているが、底層の直上部に極小層を生じている現象が 7 例中の 4 例に認められる。同様な分布型は O_2 の場合に 2 例しかないもので、これは pH の鉛直分布だけに見られる特異な現象といえよう。

(2) 季節変化

躍層の上部と下部に大別して季節変化を概観すると、上層部では高温期に上昇し（8月に 8.9）寒冷期に低下する（2月に 8.2～8.4）傾向があり、下層部では寒冷期に増大して（2月に 8.2）高温期に減少（8月に 7.9）している。すなわち躍層を境としてその上、下層では全く逆の季節変化が認められる。

(3) 考察

潟湖の pH が O_2 量と関係深いことは先に湖山東郷の両湖沼で考察した。

すなわち、浮遊藻は明所において光化学的に溶存 CO_2 を同化して、これと当量の O_2 を生じ pH が上昇する。また暗所すなわち補償深度以深では反応が逆行して溶存 O_2 が消失し pH が下降する。

高温期には藻類の繁殖が旺盛であるから、これら生化学的諸反応は促進されるが、寒冷期になると藻類が減少し、反応も低調となる。

前記したとおり表、上層と下、底層で pH が相反した季節的消長をなすのは、躍層付近に補償点が存在するため、その上下では正逆相反する反応を呈したためと考えられる。

底層ではこの他に、細菌の代謝産物も pH 低下の一因をなしていると考えられるが、その機序は前編で考察したとおりである。

また底層の直上層で pH が極小となる現象については、海底で生じた還元物質に起因するとされている⁴⁾ が、この現象については別な機会に考察をゆずりたい。

2 塩素量 (Cl^-)

海水の塩素量はモール法で滴定し g/l 単位で表した。試水 5 ml に 10% K_2CrO_4 3～4 滴と約 20ml の蒸留水を加え、よく振とうしながら 0.1 N $AgNO_3$ で滴定した。

(1) 鉛直分布

前掲した図 9 に示したとおり Cl^- は、中層（2～4 m 層）に発達した躍層があって、鉛直的に極めて不連続な分布をなしており、この成層は周年乱れることがない。

(2) 水平分布

湾内の各定点における水深別 Cl^- 量を、等量線によって結ぶと図 10 となる。

図において各等量線はほぼ海面と平行しているので、 Cl^- の水平分布は連続的であると見なすことができる。St3 の表層にしばしば低 Cl^- 量の水塊を生じているのは、この地点が大橋川の河口域に当たるためである。中海の周辺からは大橋川、飯梨川、伯太川等を経て毎秒 70m³/Sec の陸水が流入する。²⁾ このうち約 70% は斐伊川水系の陸水であって大橋川を経由したものであり、³⁾ St3 はその受水域となっている。

概観したところ塩素量は周年にわたって上層で 5～8 g/l で、外洋水の約 1/3 に希められており、深所

の下、底層では外洋水と大差のない14~18 g/lを呈している場合が多い。

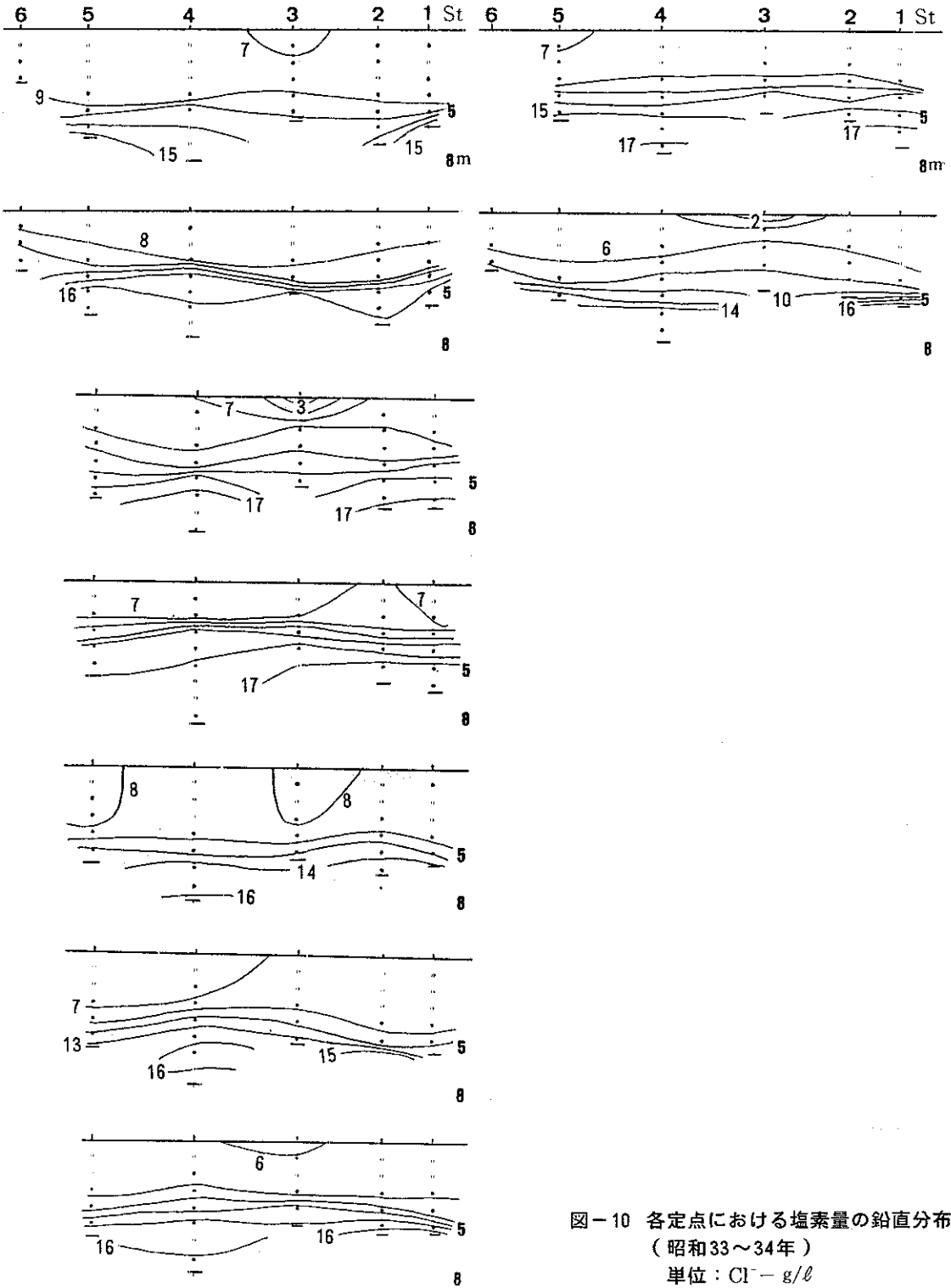


図-10 各定点における塩素量の鉛直分布
 (昭和33~34年)
 単位: Cl^- - g/l

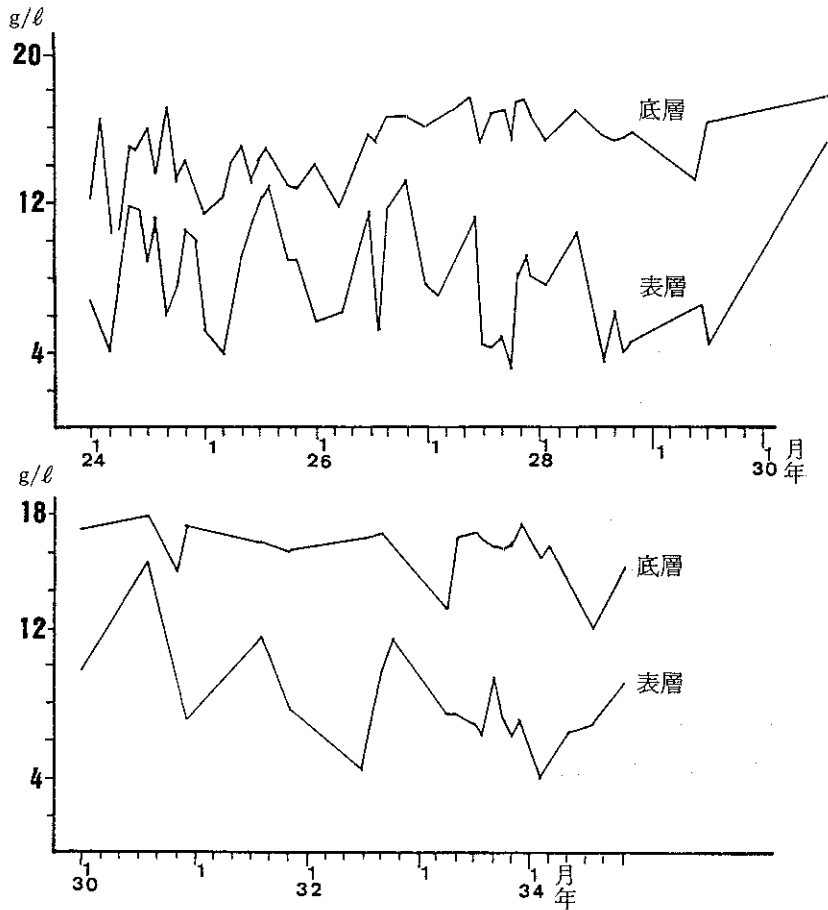


図-11 湾中央部における表、底層塩素量の経年変化

(3) 季節変化

湾中央部最深地点における表層と、底層近く最高鹹層 Cl^- 量の経年変化を画いたのが図11である。

表層について Cl^- が著しく少量となっている月をみると、2～4月、7月及び9～10月となっている。これらの月は融雪期や梅雨期あるいは、もどり梅雨の季節に相当しており、降水量と関係深いことがわかる。また表層水が $10 \text{ g/l } \text{Cl}^-$ 以上を呈するのは8月に多いが、夏期の旱天によって流入水が減少したためと解される。

前述した如く底層水の Cl^- はほぼ外洋水に近い濃度であるが、表層の Cl^- が極端に減少した際には底層水も低鹹となり気味であって、 $10 \sim 12 \text{ g/l}$ にまで低下した例もある。

3 溶存酸素 (O_2)

溶存酸素の測定はウインクラーク法によった。

試水は海水を満したバケツに沈めて水封し、持ち帰って測定に供した。

(1) 鉛直分布

湾中央部最深地点 St4 における Cl^- や pH と対比した O_2 の鉛直分布は先に図9に示した。

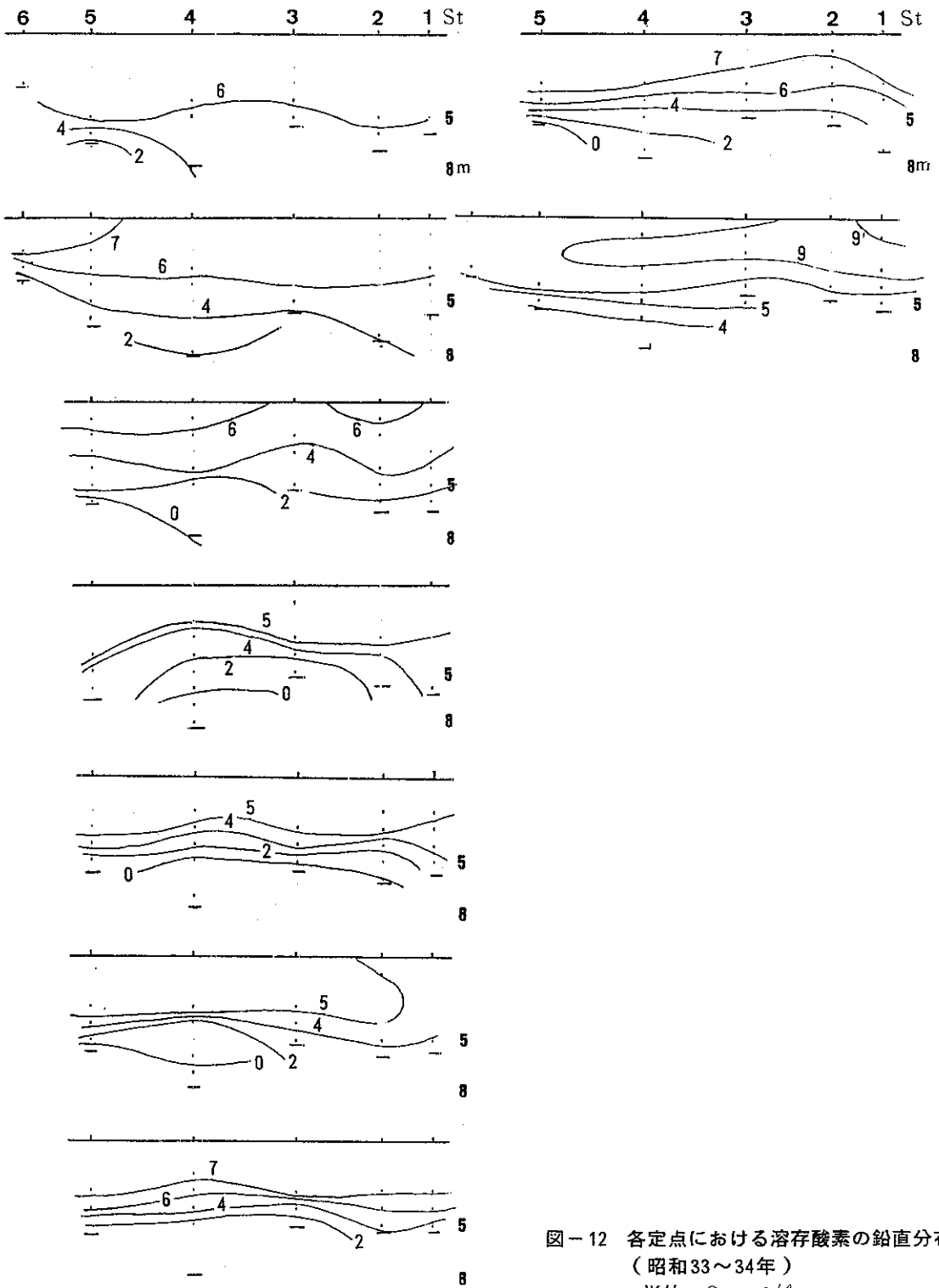


図-12 各定点における溶存酸素の鉛直分布
 (昭和33~34年)
 単位: O_2 -ml/l

一見してわかるとおり、その分布様式はPHの型とよく類似しており、Cl⁻の躍層を境界としてその上下では著しく不連続な分布をなして、底層では皆無となっている例もある。

(2) 水平分布

湾口部 St1 から奥奥部 St6 まで全観測点における O₂ の鉛直分布を図示したのが図12である。

等量線は上層部では水平面にはほぼ平行しているが、中、下層では若干異った様相を呈している。すなわち、湾口部の St1 では底層においてもかなり豊富な O₂ が毎回観測されているが、St2~3 と湾奥部へ進むにつれて下層部の O₂ は次第に欠亡してゆく。殊に St4~6 では高温期になると、底層には O₂ 皆無の層が形成されており、下層部の O₂ 分布には地域的な相違が認められる。

(3) 季節変化

湾口部の St1 と湾中部の St4 における表、底層酸素量の季節変化を図13に示した。

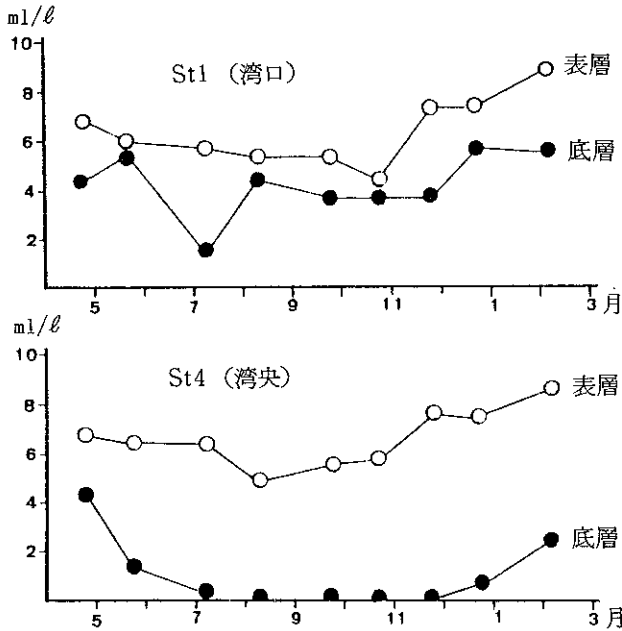
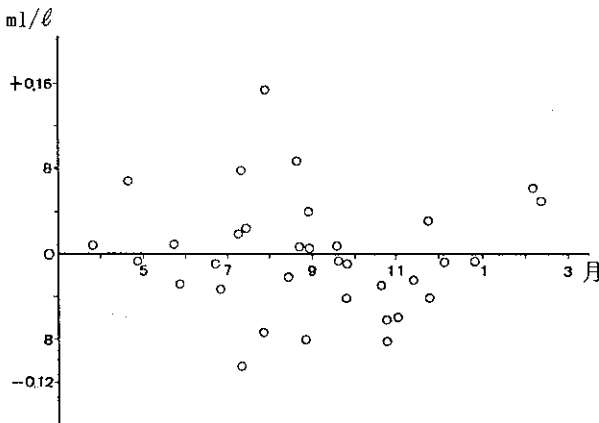


図-13 湾口と湾中部の表、底層酸素量の季節変化 (昭和33~34年)



湾口の St1 では表層において10月に 4.4ml/l、2月には 8.9ml/l であって、高温期に減量し低温期に増量する傾向が著しい。

底層では7月の1例を除いて 4~6ml/l の範囲で増減しており、表層と同様な季節変化を呈するものの、あまり顕著ではない。

一方、湾中部 St4 における溶存酸素量は、表層では湾口部と同様に高温期に減量し、寒冷期に増量しているが、底層水の O₂ 量は湾口部と同様に異にして、高温期 8~10月になると、前述した如く全く消失しているのが特徴的である。

(4) 考察

海水に対する O₂ の溶解度は水温の上昇につれて減量する。表、底層とも寒冷期に増量し、高温期に減少するのはこのためである。

図14は St4、5 の表層における溶存酸素量の飽差を示した。飽差が正值となるのは 7~8月の高温期と 1~4月の寒冷期であって、負値となりやすいのは秋期 9~12月である。

7~9月の高温期には正、負いづれに

図-14 湾中部表層における溶存酸素量飽差の季節変化 (昭和26~27年、32~34年)

も高値を生じやすいが、これは浮遊藻の消長と密接に関係した現象であると考える。

一方、湾中央部の下、底層で高温期になると溶存酸素が消失して皆無となるのは、この内湾の特徴の一つである。酸素が欠乏する機構は先に考察した湖山池、東郷湖と同様で、 H_2S など還元物質の生成が有力な要因と考えられるが、この他に浮遊藻の呼吸も影響しているかもしれない。

底層の溶存酸素が全く消失してしまうのは、著者が観測した事例に限ると、水温が $18^\circ C$ 以上の場合だけであって、海底の細菌など生物相の代謝と関係深いことがわかる。

4 過マンガン酸カリ消費量

$KMnO_4$ 消費量は次のようにして測定した。試水は着色スリ合せビンに密栓し水封して持ち帰った。この100mlをとり20%NaOH 2mlと0.01 N $KMnO_4$ 10mlを加えてヒーター上で15分間煮沸した後、冷却して0.01 N 修酸 10mlと(1 : 2) H_2SO_4 5mlを加えて脱色させる。湯溶上で $55 \sim 60^\circ C$ に再び加熱し、0.01 N $KMnO_4$ で滴定して3秒程度桃色が持続するところを終点とした。

(1) 鉛直分布

湾口部St1と湾中央部St4における $KMnO_4$ 消費量と Cl^- の鉛直分布を図15に示した。

St1では $KMnO_4$ 消費量が水深を増すにつれて小さくなり、塩分の躍層以深では激減して Cl^- 量とは逆相関を呈している。

St4でもおおむね同様な分布の傾向が認められるが、詳細に観測すると、8、10月のように塩分躍層の近辺に極大層を生じている場合や、8、9月のように底層で異常な高値を呈する場合があって、St1とはかなり異った様相をなしていた。

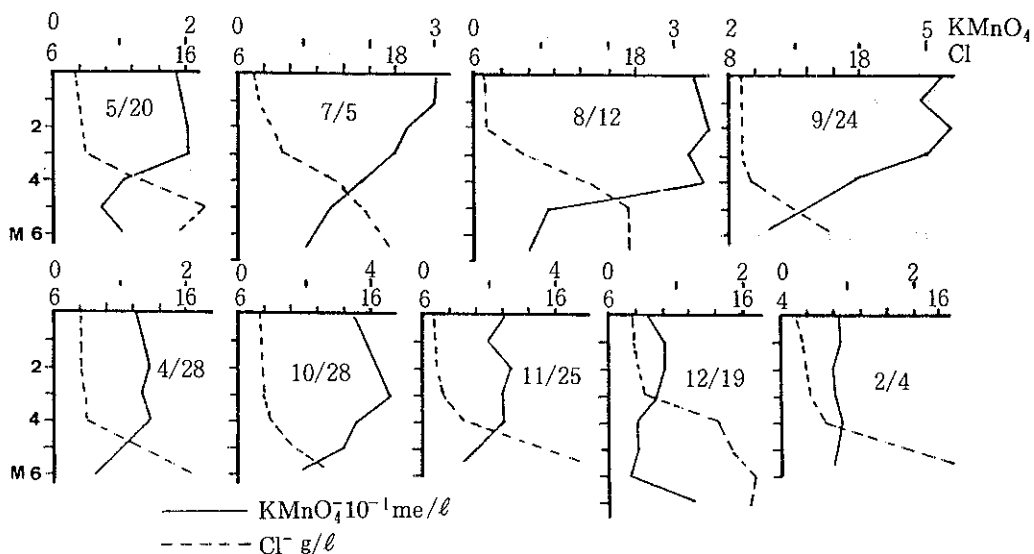


図-15-1 湾口部における $KMnO_4$ 消費量と Cl^- の鉛直分布(昭和33~34年)

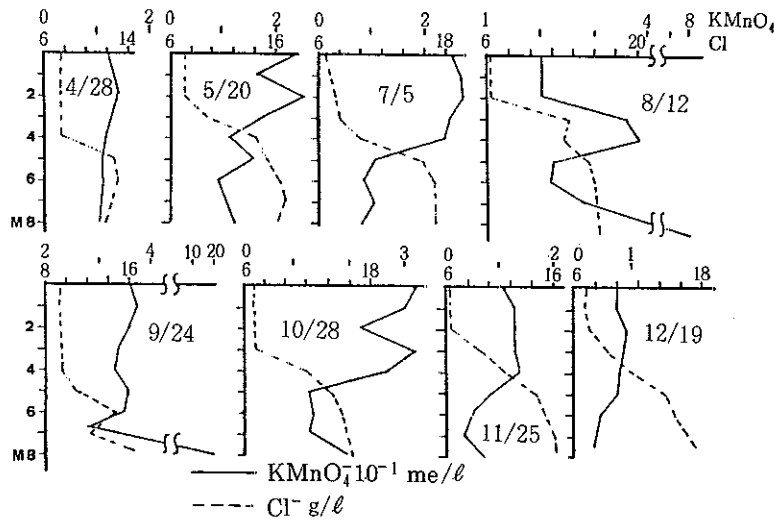


図-15-2 湾中央における KMnO_4 消費量と Cl^- の鉛直分布 (昭和33~34年)

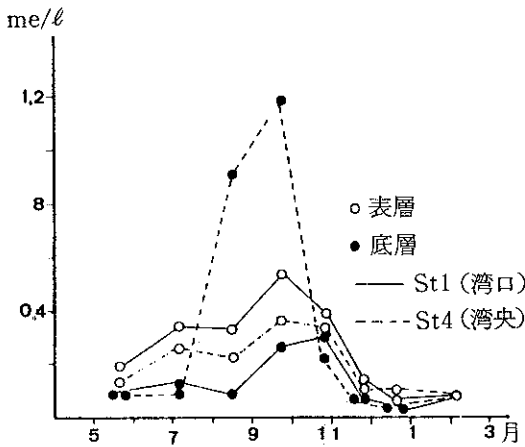


図-16 湾口と湾中央における表、底層 KMnO_4 消費量の季節変化 (昭和33~34年)

(2) 季節変化と水平分布

図16には St1 と St4 における表、底層 KMnO_4 消費量の季節変化を示した。

両地点の表、底層とも 7~10月の高温期に増量し、11~2月の寒冷期になると減量する季節変化が明瞭である。

一方、地域的な特徴として、St1 では表層の消費量が高温期になると著しく増量すること、ならびに湾中央の St4 では同じく高温期に底層で著量の消費量を呈することがあげられる。

(3) 考察

内湾水の Cl^- と KMnO_4 消費量が逆相関の鉛直分布をなすのは中海に限らず、他の内湾でも生じる現象であって、河川水が有機性物質を搬入したためと考えられている。ここで、

a、河川水以外に KMnO_4 消費物質を搬入するものがない。

b、河川水の保有する KMnO_4 消費物質は海中を拡散する途次、自浄作用を受けて消失することはないと仮定すると、上記の仮説は次式で表せる。

$$K_c = \frac{K_0 (C_1 - C) + K_1 (C_0 - C)}{C_1 - C_0} \quad (1)$$

ここに、 C_0 、 C_1 は河川水と外洋水の Cl^- 量であり、 K_0 、 K_1 は河川水と外洋水の KMnO_4 消費量、 K_c は Cl^- 量 C の内湾水の KMnO_4 消費量である。

実際には $\text{Cl}_0 \approx 0$ であるから、(1)は

$$K_c = - \frac{(K_0 + K_1)}{C_1} C + K_0 \quad (2) \text{となる。}$$

すなわち、Kc と C の間には負の直線相関が存在する。

前述したとおり湾央の底層では、高温期になると異常に高いKMnO₄消費量を呈する場合があるので、この層を除外した他層について、33～34年の実測値につき両者の相関度を検定すると表3となる。

表-3 定点別、各層KMnO₄消費量とCl⁻量の相関度の検定

年・月・日	St	n	r	$t = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}}$	有意水準 (危険率%)	回帰直線か ら求めたK ₀
33. 4. 28	1	5	-0.981	8.758	0.1~0.5	0.201
"	3	5	-0.674	1.583	10~25	0.172
"	4	6	-0.892	3.947	1~2.5	0.177
"	5	5	-0.924	4.185	2.5	0.152
5. 20	1	6	-0.957	6.598	0.1~0.5	0.306
"	3	4	-0.978	6.630	1~2.5	0.334
"	4	7	-0.955	7.200	0.1>	0.346
"	5	5	-0.927	4.281	1~2.5	0.438
7. 5	1	7	-0.979	10.738	0.1>	0.461
"	3	6	-0.808	2.743	5~10	0.277
"	4	9	-0.991	19.587	0.1>	0.397
"	5	7	-0.909	4.877	0.1~0.5	0.433
8. 12	1	6	-0.838	3.072	2.5~5	0.506
"	3	6	-0.729	2.130	10	0.381
"	4	7	+0.236	-	-	0.218
"	5	7	-0.254	0.587	50<	0.400
9. 24	1	6	-0.905	4.255	1~2.5	0.843
"	3	6	-0.729	2.130	10	0.381
"	4	8	-0.479	1.319	10~25	0.410
"	5	6	-0.123	0.248	5~10	0.326
10. 28	1	5	-0.883	3.258	2.5~5	0.574
"	3	6	-0.031	0.062	50<	0.312
"	4	8	-0.887	4.705	0.1~0.5	0.440
"	5	6	-0.941	5.561	0.5~1	0.476
11. 25	1	6	-0.889	3.883	1~2.5	0.162
"	3	6	-0.760	2.339	5~10	0.127
"	4	9	-0.816	3.735	0.5~1	0.175
"	5	6	-0.735	2.168	5~10	0.143
12. 19	1	7	-0.962	7.878	0.1<	0.114
"	3	5	-0.861	2.950	5~10	0.110
"	4	8	-0.740	2.452	5	0.120
"	5	6	-0.566	1.373	10~25	0.137
34. 2. 4	1	6	-0.575	1.406	10~25	0.087
"	3	5	+0.245	-	-	0.095
"	4	8	-0.753	2.803	2.5~5	0.093
"	5	6	-0.163	0.330	50<	0.091

先ず相関係数 r をみると、危険率 5% の有意水準に達しない場合が意外に多く、36 例中で半数近い 17 例を占めていた。

したがって KMnO_4 消費物が河川水に由来するとした上記の仮説は検討の余地が残る。よって、ここでは式(2)を導くに当たって設定した a, b 二つの仮定について再吟味する。

先ず、この観測を行った昭和 33～34 年には中海沿岸には河川の他、著量の汚水を流す施設は全くなかったから a の仮定には問題がないと考えられる。そこで b の仮定、すなわち自浄作用の有無が問題となる。

大橋川の河口域 St3 では中海に流入した直後であるから、河川水はまだ自浄作用を受けない状態にあるが、 r は他の地点にくらべて最も有意性にとぼしい。逆に St1 は湾内水が外洋へ排出される地点であって、河川水の自浄作用が最も累積した場所と考えられるが、ここでは r の有意性が大きい。従って R の有意性の低さは自浄作用と関係ないと判断できる。

次に各地点別に観測時毎に式(2)の回帰直線を求め、河川水の KMnO_4 消費量 ($C=0$ における K_C) を算出し、これを表 3 中に K_0 で示したが、この値は流入直後の St3 において最も小さく、逆に中海から外洋へ排出される直前の St1 では最大となっていた。この事実は中海の内部に、負の自浄作用が存在することを示している。いい換えると、ここに測定された KMnO_4 消費物質は、中海の内部において生産されたことを意味する。すなわち、 KMnO_4 消費物質を河川水がもたらした有機物であるとする当初の仮説自体、誤りであることがわかった。

中海における表層の KMnO_4 消費量と Cl^- の分布様式を検討した結果、反応対象物質のかなりの部分が湾内で生産されたものと推定するに至ったことは、その実体を解明する上で有意義なことであった。おそらく、それは中海の内部で増殖した浮遊藻、ならびにその分解産物であって、 KMnO_4 消費物の大半はこれら生物体有機物によって占められるのであろう。

次に底層に出現する KMnO_4 消費量の異常値とその反応対象物質の実体について論じたい。

中海では高温期に深所の底層で異常に大きな KMnO_4 消費量を呈することは前述した。その本体は出現の仕方から見て上層の消費物とは異質のものと思われる。すなわち図 13 及び図 15 によれば底層に異常な高値を生じた時は必ず溶存酸素が皆無となっている点からみて、その本体は還元力が特に強い S^{2-} や Fe^{2+} の無機イオンではないかと思われる。

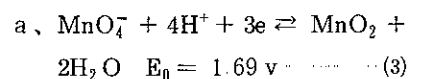
高温期には表層でも消費量は高値となるが、この層に溶存する KMnO_4 消費物が底層のそれと異質なものであることは、測定操作中における試水の変色によっても明らかである。

すなわち、試水に所定量の KMnO_4 を加えて放置すると、表 4 に示したとおり表層水の場合には、消費量の大きなものほど青緑色を帯び、底層水で消費量の大きなものは桃紫色から直ちに橙色に変色する。同一消費量を呈するものであっても、両者の色彩は全く異っているから、この変色を手がかりとして溶存物質を推定することも可能ではないかと考える。

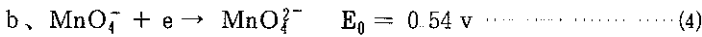
表 - 4 KMnO_4 消費量測定中における試水の変色

試水	色彩変化の経過
表層	桃色 → 青紫色 → 青色
底層	桃色 → 橙黄色

アルカリ性 KMnO_4 溶液中では次の 2 通りの酸化反応が進行する。⁷⁾



この反応は pH がおよそ 2～12 の範囲で起るとされている。



OH^- が 1 mol/l 以上の強アルカリ液中で生じるというのが、反応は2段に進行して、



(3)の反応系では MnO_4^- が桃色、 MnO_2 が黄色であって、溶液は桃色から反応が進むにつれて橙色に変色する。

また、(4)の反応系では第1段の酸化で生じる MnO_4^{2-} が青緑色であるから、溶液の色は桃色→紫青色→緑色となり、更に第2段の(5)反応へ進むと液は緑から黄色へと変色する。

前述した試水の変色傾向から察すると、表～上層水の場合には(4)の反応が生じているものと推定されるし、底層水の場合には(3)の反応が進行しているものと解される。

天然水中に溶存する $KMnO_4$ 消費物としては蛋白質、炭水化物等生物体を構成する有機物と、 Mn^{2+} 、 Fe^{2+} 、 S^{2-} 等の無機イオンが考えられるが、アルカリ性下でそれらに $KMnO_4$ を作用させた場合に(3)(4)いづれの反応を生ずるか確かめるため次の実験を行った。

すなわち、各種有機物はそれぞれ $0.4 \text{ ppm} \sim 0.004 \text{ ppm}$ の溶液を作り、無機還元性イオンは $5 \times 10^{-4} \text{ N} \sim 5 \times 10^{-5} \text{ N}$ の希薄溶液とする。各々の 50 ml に $20\% \text{ NaOH } 1 \text{ ml}$ と 0.01 N 、 $KMnO_4$ の 5 ml を加えて放置し、それぞれの色彩の変化を観察した。結果は表5に示す。

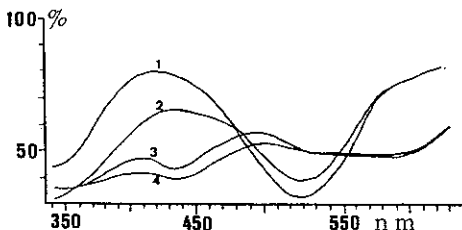
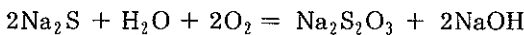
表-5 各種天然物質を添加したアルカリ性 $KMnO_4$ の変色

桃色→紫青→緑に変色したもの	桃色→橙色に変色したもの
炭水化物・可溶性澱粉、ブドウ糖 デキストリン・寒天	$(NH_4)_2Fe \cdot 2SO_4$ モール塩 H_2S 水溶液
蛋白質・アルブミン、ペプトン、ロイシン グリココル	
無機イオン・ $Na_2S_2O_3$ ($S_2O_3^{2-}$)	
Na_2S (S^{2-})	

この実験結果によると、炭水化物、蛋白質、アミノ酸等、生物体を構成する有機物と $S_2O_3^{2-}$ や Na_2S の無機イオンは(4)反応を呈して緑色となり、橙色を呈するのはモール塩と H_2S 水であった。

H_2S が橙色となるのに

Na_2S が緑色となるのは、 Na_2S 中に大気中の O_2 によって生じた $Na_2S_2O_3$ があり、これが(4)の反応を呈して緑色になると考えられる。



- 1. 対照区
- 2. $2 \times 10^{-4} \text{ N}$ モール塩
- 3. 0.4 ppm 可溶性澱粉
- 4. 0.4 ppm アルブミン

図-17 各種物質を含有する $KMnO_4$ 水溶液の吸光度

図17はモール塩、可溶性澱粉、アルブミン及び対照区の可視光透過率を图示したものである。モール塩区の透過率は対照区に類似しているが、可溶性澱粉とアルブミンは明らかに異った透過率を呈し、色彩の相違を示している。

前述した試水処理中に生じる色彩の変化を、この実験結果と対照してみると、表～上層水に溶存する $KMnO_4$ 消費物質は澱粉やアルブミン様の物質であると考えられるし、底層に出現する多量の消費物質は、 Fe^{2+} 類似物質または H_2S が主体をなしていることがわかる。

先に表～中層消費量の鉛直乃至水平分布を解析した際に、反応対象物質は湾内で生産された生物体ではないかと予見したが、上記の実験結果はこの推論と一致している。

ここで、再び KMnO_4 消費量の鉛直分布について、考察を深めておきたい。

著者らは、先に中海で養殖されたマガキの異常へい死を観察した際、発達した躍層では界面吸着現象が生じて KMnO_4 消費物もこの界面層に濃縮されることを明らかにした。³⁰⁾ 一方後述するとおり、溶存酸素法によって基礎生産量を測定すると、中層に純生産の極大点を生じている場合も認められる。湾中央部の中層に生じる KMnO_4 消費量極大層は、ここで生産された生物体有機物が、発達した界面層において濃縮されたものである。中層に純生産の極大点を生じる理由としては、後述する如く、高温期に下、底層において生じた多量の NH_4^+ や PO_4^{3-} が、この層まで浮上していることも一因をなしていると考えられる。

5 沃度消費量

着色ビンに満して密栓し水封して持ち帰った試水を、共栓フラスコに 100 ml とり、0.01 N I_2 液 5 ml を加えて暗所に 15 分間放置した後、0.01 N $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ で滴定した。

(1) 鉛直分布

図18は湾中央部 St4 における I_2 消費量の鉛直分布を示したものである。

KMnO_4 と違って図に見られる如く、特定な分布様式は認め難い。強いていうなら 4 m 層付近に極大層を生じる場合が多く（9 例中 6 例）概して上層よりも底層の方が消費量が大きい。

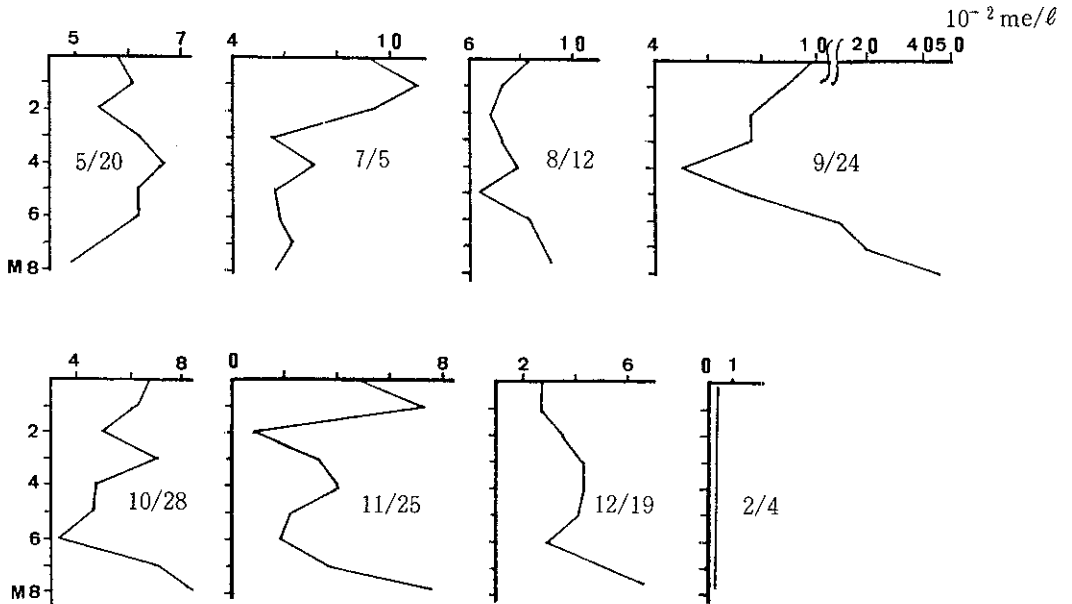


図-18 湾中央部における沃度消費量の鉛直分布（昭和33～34年） 単位： $10^{-2} \text{me}/\ell$

(2) 季節変化

湾中央部の St4 における表、底層 I_2 消費量の季節変化を図19に示した。

表、底両層とも寒冷期には減少して $0.00 \text{me}/\ell$ となり、高温期になると増量する傾向がある。この増量傾向は底層において特に著しく 9 月には $0.46 \text{me}/\ell$ に達していた。

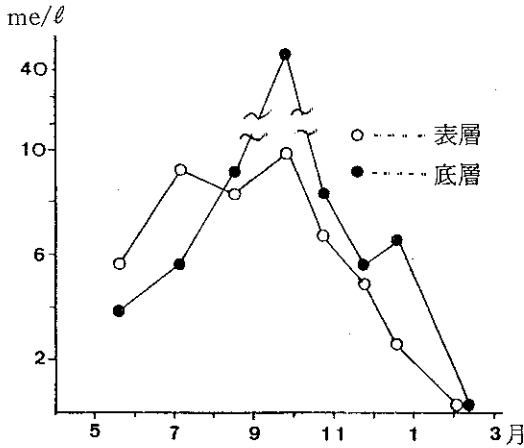


図-19 湾中央部における表・底層沃度消費量の季節変化（昭和33～34年）

の反応が起ったとしても、その酸化力は KMnO_4 の $E_0 = 1.69 \text{ v}$ にくらべて微弱であって、当量単位で比較すると、どの試水についても KMnO_4 消費量 \geq I_2 消費量の関係が成立し、両者の差は反応対象物の種類によって異なるはずである。

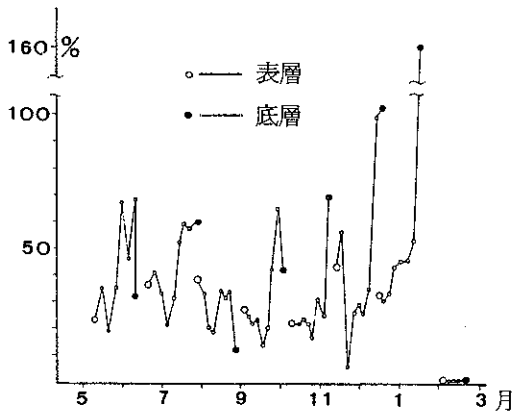


図-20 各水深層における KMnO_4 消費量に対する I_2 消費量比率の季節変化（湾中央部 St4）

ており、一見不可解である。その分析化学的意義については別な機会に検討したい。

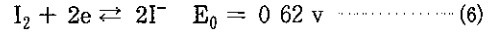
6 硫酸塩 (SO_4^{2-})

硫酸塩は Ca^{2+} 、 Mg^{2+} と同時に次の方法で測定した。

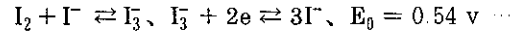
試水 5 ml に 5N HCl 1 滴を加え、少量の水と 0.05 N BaCl_2 5 ml を注加した後、煮沸して CO_2 を追い出す。冷却後 pH 10 の緩衝液 4 ml を加え、0.02 M、EDTA $\cdot 2\text{Na}$ で EBT を指示薬として滴定する (T_1 ml)。

(3) 考察

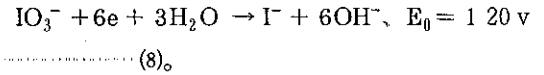
海水の沃度消費量は過去に H_2S を指すものとされた時期がある。しかしその反応対象物は多種類にわたり KMnO_4 と同様にその実体は不明である。 I_2 は水に難溶であるがその酸化反応は、



I_2 消費量の測定には ($\text{I}_2 + \text{KI}$) 溶液が使われており、この場合の反応は、



である。また反応系の pH が 9 以上では $3\text{I}_2 + 6\text{OH}^- \rightarrow \text{IO}_3^- + 5\text{I}^- + 3\text{H}_2\text{O}$ 、ここに生じた IO_3^- は、



すなわち反応系が $\text{pH} > 9$ であれば(6)~(8)のいずれ

の反応が起ったとしても、その酸化力は KMnO_4 の $E_0 = 1.69 \text{ v}$ にくらべて微弱であって、当量単位で比較すると、どの試水についても KMnO_4 消費量 \geq I_2 消費量の関係が成立し、両者の差は反応対象物の種類によって異なるはずである。

湾中央部 St4 について、各水深層における I_2 消費量の KMnO_4 消費量に対する比率を、季節別に図に示したのが図 20 であるが、この図によると I_2 消費量/ KMnO_4 消費量の値には次のような分布と消長が認められた。

鉛直分布：四季を通じて表、上層ではおおむね 40% 以下の低率であるが、下、底層では 50% を超える高率となっている。中層には 20% 内外の極小値を呈する層があり、ほぼ塩分躍層の直上層と一致している。

季節変化：表、底層間の全層とも 7~10 月の高温期には比率が低値となり、11~12 月の晩秋~初冬期になると増率する傾向がある。特に 11~12 月には底層の I_2 / KMnO_4 当量比率が 100% を上回っ

次に 0.005 N BaCl₂ 5 ml に少量の Zn-EDTA 末および pH 10 緩衝液と EBT 指示薬を加え、同様に 0.02 M EDTA 2Na で滴定する (T₂ ml)。

別に試水 5 ml をとり pH 10 緩衝液 (NH₄Cl 7 g と濃アンモニア水 57 ml を水に溶して 100 ml とする) 2 ml を加え、EBT を指示薬として 0.02 M EDTA 2Na で滴定する (T₃ ml)。

試水 5 ml 中の Ca + Mg の量は T₃ に相当する。また SO₄²⁻ の量は この EDTA · 2Na 液の (T₂ + T₃ - T₁) ml に相当する。

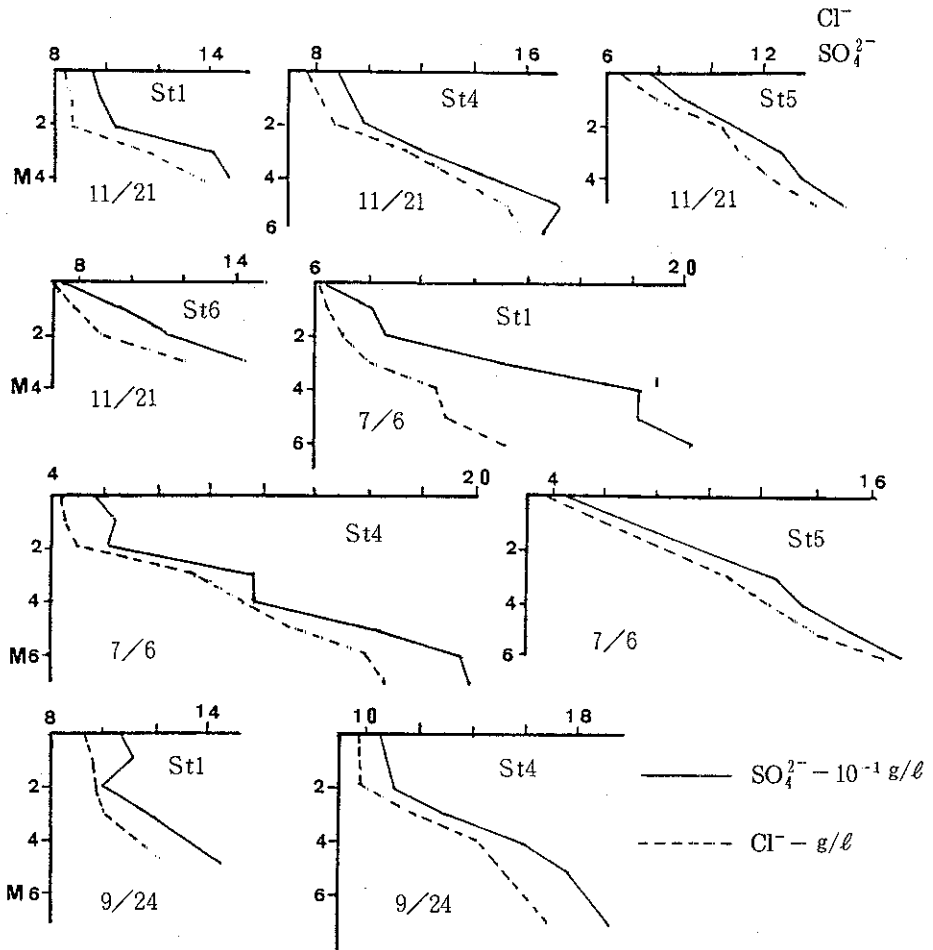


図-21 SO₄²⁻ と Cl⁻ の鉛直分布 (昭和31~32年)

(1) 鉛直分布

図21には Cl⁻ と SO₄²⁻ の鉛直分布を示した。

両者の分布型はほぼ一致しており、SO₄²⁻ が Cl⁻ に比例していることがわかる。しかし詳細に観察すると、両者のグラフが常に一致した折線をなしているわけではなく、季節や地点によっては若干異った様相を呈する水深層もある。

(2) 考察

海中には多様な生物が生息しており、その中には硫酸還元菌のように SO₄²⁻ を消費するものもある。一

方、海塩中には Cl^- の 13.96% に相当する SO_4^{2-} が含有されており、 Cl^- 量にこの係数を乗じて算出した SO_4^{2-} 量の計算値と、実測値の差は(以下消失量と呼ぶ)硫酸還元菌によって消費された量にはほぼ相当し、溶存する H_2S 量とおおむね一致する⁴⁾といわれている。

図22には中海の数地点における SO_4^{2-} 消失量を図示したが、31年11月21日の例を見ると、湾口部の St1 から湾奥の St5 まで全地点において、消失量は底層が最大であって $0.4 \sim 0.6 \text{ g/l}$ 、上層へ向って次第に減少しており、表層では 0.2 g/l 程度となっている。

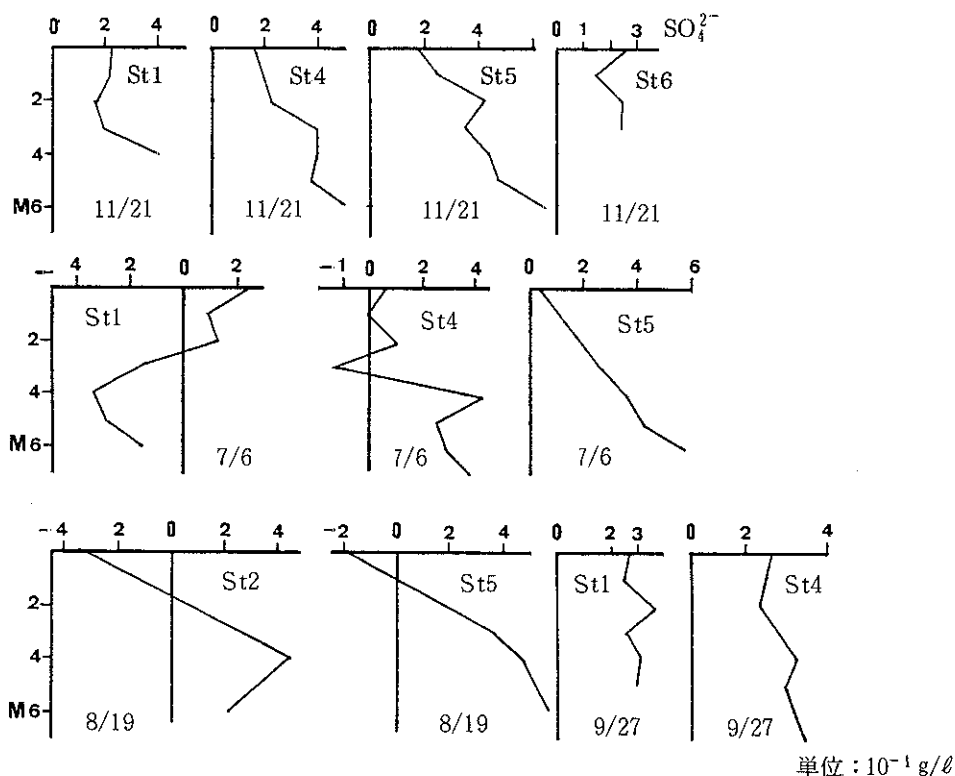


図-22 SO_4^{2-} 水深別消失量(計算値と実測値の差) 昭和31~32年

32年7月6日の例は特に興味深い。すなわち湾口部 St1 の中～底層では理論値以上に SO_4^{2-} が溶存するが、湾中央の St4 では底層で消失量が 0.3 g/l となっており、更に湾奥の St5 では底層の消費量が 0.58 g/l と増大している。これは湾口に侵入した外洋水が、湾奥の底層へと波及する過程において、次第に SO_4^{2-} を消失していく様子を端的に示している。

8月19日の観測では表層水の SO_4^{2-} 実測値が計算値にくらべて異常に大きく、特に St2 ではこの傾向が著しかった。この地点は大橋川の河口に近いので、表層では特に河川水の影響が強かったことは、 Cl^- が他の地点よりも少量であることによってもわかるが、山陰地方の河川水で実測された $\text{SO}_4^{2-} / \text{Cl}^-$ の比率を見ると千代川 = 0.54、天神川 = 0.25、日野川 = 0.23~0.25 であって、¹⁴⁾ いずれも海水の 0.1396 にくらべ 2 倍以上となっている。したがって河川水の混入率が特に大きい場合には、 Cl^- に 0.1396 を乗じた計算値にくらべて実測値が大となることも起り得るわけであって、その 1 例と見なすことができる。

7. 硫化水素 (H₂S)

中海の湾央部底層水は高温期になると腐卵臭を発するので、H₂Sが溶存している³²⁾ことは古くから知られていた。その濃度はI₂消費量などから推定されて来たが、この中にはFe²⁺やMn²⁺などS²⁻以外の物質による消費量も含まれているので、当然過大な値となっている筈である。ここではS²⁻に固有な定量法であるメチレンブルー法で測定したS²⁻量について報告する。

S²⁻は次の操作によって測定した。³³⁾すなわち、HCl 70mlを氷で冷しながらP-アミノジメチルアミン 20gを少しづつ溶かし、HClを追加して全量を100mlとする。

a、水400mlに濃H₂SO₄ 500mlを加えて冷却し、更に水を加えて980mlとし、これに先のアミンHCl貯蔵液20mlを加える。

b、FeCl₃・6H₂O、75gを水に溶かして1ℓとする。

c、(NH₄)₂HPO₄ 400gを水に溶かして1ℓとする。

d、メチレンブルー5.90gを水に溶かして1ℓとする。これはS²⁻ 1000ppmに相当する。

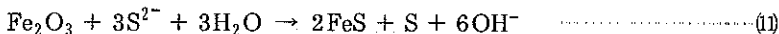
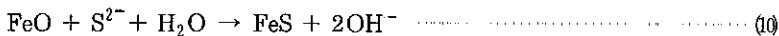
試水7.4mlを直径1.5cmの試験管にとり、アミンH₂SO₄液0.5mlを加え、次にFeCl₃液2滴を加えてよく混和する。1分間後(NH₄)₂HPO₄を1mlづつ2回計2mlをよくまぜながら加える。青色になったら1分間後にメチレンブルー標準液と比色する。

H₂Sの定量結果は表11、12に示したが、最も多量な地点でS²⁻ - 5mg/ℓ程度であって、前記硫酸塩の章で考察した(理論値-実測値)から算出したSO₄²⁻消失量の1/30~1/40当量に過ぎない。

SO₄²⁻消失量に対してS²⁻が意外に少い理由としては、硫酸還元菌の外にもSO₄²⁻を消費する生物があるのではないかと考えられること、ならびに硫酸還元菌によって生産されたH₂Sのうち、始めに生じたものは先ず溶解酸素の消費に使われてしまうので、O₂が消失した後に生じたH₂Sだけが溶存をゆるされること、

$$O_2 + 2H_2S \rightarrow 2H_2O + S \downarrow \dots \dots \dots (9)$$

更に溶存するS²⁻は、海底に堆積する泥土や、河川水が搬入する土壌粒子中に含れるFe等の、重金属類と反応して硫化重金属となり、海底土上に堆積すること等が考えられる。



S²⁻の生成機構については前編でも考察したが、多量のSO₄²⁻が溶存し、生物体有機物の堆積量が多い中海にあっては、硫酸還元菌によるものが大半であろう。

昭和27年7月下旬から9月上旬にかけて桃赤色の塊状をなした生物体が、湾央部から米子湾にかけて多量に浮上し潮目をなしてただよったが、これはおそらく硫酸還元菌の集落であったと思われる。

8 マグネシウム及びカルシウム (Mg²⁺、Ca²⁺)

海水中には多量のCa²⁺、Mg²⁺が溶存する。これらアルカリ土金属は試水を5mlとってキレート滴定により定量したが、詳細は前編と全く同一であるからここでは省略する。

前編で述べたとおり、海塩中のCa²⁺とMg²⁺はそれぞれCl⁻と3.81%および19.62%の当量比で含有されている。一方、日野川の河川水には0.214me/ℓのCl⁻と0.224me/ℓのCa²⁺および0.164me/ℓのMg²⁺を含有する¹⁴⁾というから、この値を中海に流入する全陸水にあてはめて算出すると、中海におけるCl⁻とCa²⁺、Mg²⁺の関係は次式となる。(濃度は各々me/ℓ)

$$\text{Ca}^{2+} = 0.037718 \times \text{Cl}^- + 0.217 \quad (12)$$

$$\text{Mg}^{2+} = 0.195997 \times \text{Cl}^- + 0.122 \quad (13)$$

表-6 Ca^{2+} と Mg^{2+} の実測値と計算値の差

年月日	St	水深	実測値と計算値の差		年月日	St	水深	実測値と計算値の差		
			Ca-me/l	Mg-me/l				Ca-me/l	Mg-me/l	
41 4 22	H	0	-0.8	+0.8	42. 6 15	K	5	-0.1	-1.3	
	"	1	-0.4	+0.7		"	B6.5	0	-1.3	
	"	2	-1.7	+1.2		7.24	K	0	-0.6	-0.8
	"	3	-2.5	+0.3			"	2	-0.1	+0.6
	"	4	-0.8	+2.5			"	3	-0.3	+2.1
5.17	6	0	-0.4	0	"		4	+0.2	+4.5	
"	"	1	-0.6	+2.5	"	"	5	+0.8	+1.2	
"	"	B2.2	-0.3	+5.0	"	"	B6	+0.3	+2.0	
6.10	H	0	-0.7	-0.1	8 10	J	0	0	0	
	"	1	+0.1	+8.6		"	1	+0.1	-0.5	
	"	2	-0.7	+3.2		"	2	0	-0.2	
	"	3	-0.9	-0.7		"	3	-0.1	-0.7	
	"	4	-0.5	-1.8		"	4	0	-0.2	
	"	5	-0.4	-1.1		"	"	B5	+0.2	+0.2
	"	"	B6.4	-0.3		-1.0	9 22	J	0	-0.2
6.13	6	0	-0.5	-0.2	"	2		-0.2	+0.2	
	"	1	-0.1	-0.3	"	3		-0.1	+0.9	
	"	"	B2.2	-0.3	+0.1	"		4	+0.2	-3.8
"	"	"	"	"	"	B5.5	+0.5	-0.6		
7 24	6	0	-0.5	-0.7	11 14	K	0	+0.5	-2.1	
	"	1	-0.9	-0.3		"	1	-0.2	-1.5	
	"	"	B2.2	-1.5		0	"	2	-0.4	-1.2
42. 5 11	"	"	"	"	"	"	3	-0.3	-1.3	
	"	"	"	"	"	"	4	-0.5	-1.3	
	"	"	"	"	"	"	B5.5	-0.3	-2.1	
	"	"	3.3	-0.1	-3.9	43 3. 7	J	0	-0.1	-0.7
	"	"	B4.3	-1.7	-1.2		"	1	+0.4	-1.3
6 15	K	0	-0.5	-0.7	"		2	-0.2	-0.8	
	"	1	-0.3	-0.3	"		3	0	-0.8	
	"	2	-0.1	-0.6	"		4.5	-0.5	+7.2	
	"	3	0	-1.2	"	5	-0.2	-1.3		
"	"	4	-0.1	0	"	"	B6.0	+0.2	-2.2	

表6には前記した方法で実測した Ca^{2+} 、 Mg^{2+} の値と、(12)、(13)式によって Cl^- から算出した計算値の差を示した。

中海の場合、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} とも実測値が計算値よりも概して小さいが、その差は僅少であって $1\text{mg}/\ell$ 内外であり、かつ水深による相違や季節変化等は認め難い。

9. 鉄 (Fe)

海水中の全Feは次の方法で測定した。すなわち、試水 100ml に $36\text{N}\cdot\text{H}_2\text{SO}_4$ を加え白煙が出るまで加熱する。 75ml の水を加えて析出物を溶かし、微紅色を呈するまで $0.2\text{N}\cdot\text{KMnO}_4$ を滴加する。過剰の KMnO_4 は Br_2 飽和水で脱色した後、過剰の Br_2 を追い出し、 KCNS ($120\text{g}/\ell$)液 10ml を加えて発色させた。標準液は 70ml の水と Na_2SO_4 ($450\text{g}/\ell$)液 22ml および $36\text{N}\cdot\text{H}_2\text{SO}_4$ 5ml ならびにFe標準液 (Fe $0.1\text{mg}/\ell$) 5ml を加えたものとし、 KCNS 液 10ml で発色させたものと比色した。

また Fe^{2+} は水質作業準則に従って測定した。ただし、試水には塩酸とドロキシルアミンを加えず、発色剤としては $\alpha\alpha'$ ジピリジールを用いた。この方法で定量されるFeは、酸性下で溶出し、かつ発色剤に Fe^{2+} として反応し得る形態のものだけである。大気によって酸化され Fe^{3+} となる恐れがあるため、採水直後船上で測定した。

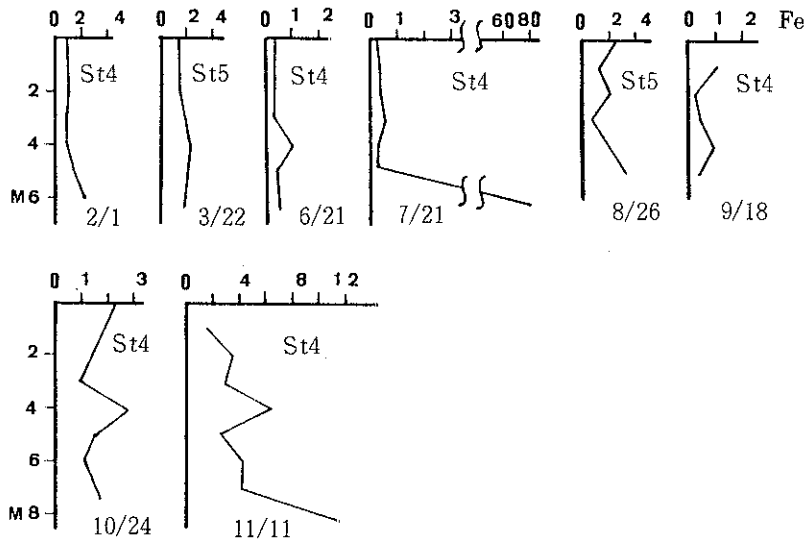


図-23 全Feの鉛直分布(昭和27年) 単位: $10^{-1}\text{mg}/\ell$

(1) 全Feの鉛直分布

図23には全Feの鉛直分布を示した。

図に明らかなおおむね、全Feは表層～5m深において、おおむね $0.2\text{mg}/\ell$ 以下の微量であるが、6m以深、特に底層水中には多量のFeが溶存しており、時としては $8\text{mg}/\ell$ に達することもある。

(2) 全Feの季節変化

実測例が少ないので即断できないが、2～6月には表～底の全層でおおむね $0.2\text{mg}/\ell$ 以下である。下、底層では7～11月に $1.0\text{mg}/\ell$ 以上となっているから、底層では高温期に増量するのであろう。

(3) Fe^{2+} の分布

酸可溶性 Fe^{2+} は昭和42年7～9月及び43年7～9月の高温期にのべ6カ月間測定を行った。図24に示したとおり、43年には7月に7地点16層中の3層で検出し、0.01～0.03 mg/ℓ であった。8～9月になると、表～底層の全層にわたって Fe^{2+} が出現しており、9月には0.2～0.3 mg/ℓ の高濃度な層も生じていた。特に8～9月の例では1～3 m深で極少となる特異な鉛直分布が見られる。

一方、表11に示した42年の測定値を見ると7～8月に底層で0.4～0.5 mg/ℓ の高濃度を生じ、43年と同様に通増型の分布をなしているが、9月には全層で全く検出されていない。季節変化は年によって若干の相違があるらしい。

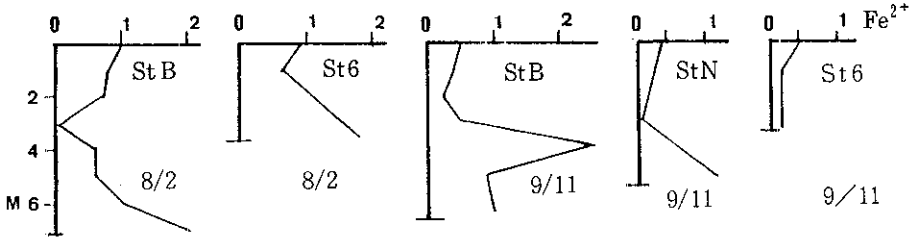
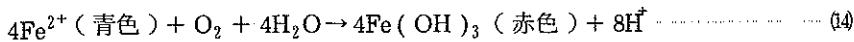


図-24 Fe^{2+} の鉛直分布 (昭和43年) 単位: $10^{-1} \text{mg}/\ell$

(4) 考 察

中海は赤潮の発生しやすい内湾として古くから著名であった。当地ではこれを苦潮と呼んでいる。その発生機構については倉茂³²⁾らを始めとして数次の調査が行われており、プランクトン異常発生などの諸説がある。

著者らは昭和24～27年の間、調査にたずさわった結果、後述する如く、魚貝類がへい死するのは底層水の浮上による酸素欠乏と、硫化水素の中毒によるものであり、赤色を呈する物質は酸性時にロダン酸カリで発色する点からみて、 Fe コロイドであることを確認した。恐らく底層に溶存していた H_2S や Fe^{2+} が上層へ浮上する際に、溶存酸素にふれて次式により生じたものと考えている。



全 Fe の鉛直分布において、 Fe が下層～底層水中に多量に含有されていること、ならびに前述したとおり底層水の KMnO_4 消費量や I_2 消費量が異常な高値となる8～9月に、下、底層における全 Fe および酸可溶性 Fe^{2+} が増量している事実は、上記した赤潮の発生機構の一端を示すものである。

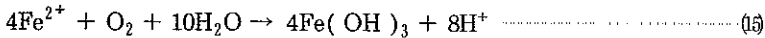
酸可溶性 Fe^{2+} の実態については不明であるが、船上で採水直後に測定した際、観察したところでは、下～底層の試水は $\alpha\alpha'$ ジピリジールを注加すると速かに発色するが、表～中層の試水では注加後10数分経過して発色が濃厚となっており、 Fe^{2+} の溶存形態に相違のあることがうかがわれた。

下、底層水がジピリジールの添加後速かに発色するのは、この層に溶存する Fe^{2+} がイオン状または比較的それに近い形態で存在するためと考えられる。

Fe の存在形態としては Fe_2O_3 や Fe^{2+} など無機態の他に、生物体有機物などと結合したものがあり、それぞれに溶解状と懸濁性の二態が想定される。

表、上層の Fe^{2+} が発色のおそい理由として、それらは生物体有機物などと錯体を作って溶存しているものであって、定量操作のため加えられた HCl 、 H_2SO_4 等による酸性下で始めて解離し、 Fe^{2+} としてジピリ

ジールと反応したものではないかと著者は考えている。発色のおそいこの Fe^{2+} が検出される水深帯には、 O_2 が多量に溶存している点を見ても、 Fe^{2+} が錯化合物として溶存するため、下記の反応は進行せず



溶存酸素と共存することが出来るのではないかと考える。

10 燐酸塩 (PO_4^{3-})

燐酸塩の測定は、海洋観測法によりドニゼの方法で採水後4時間以内に比色定量した。

(1) 鉛直分布

湾の中央部に近い St K と J における燐酸塩の鉛直分布と季節変化を図25に示した。

鉛直的には季節にかかわらず通増型分布をなしている。

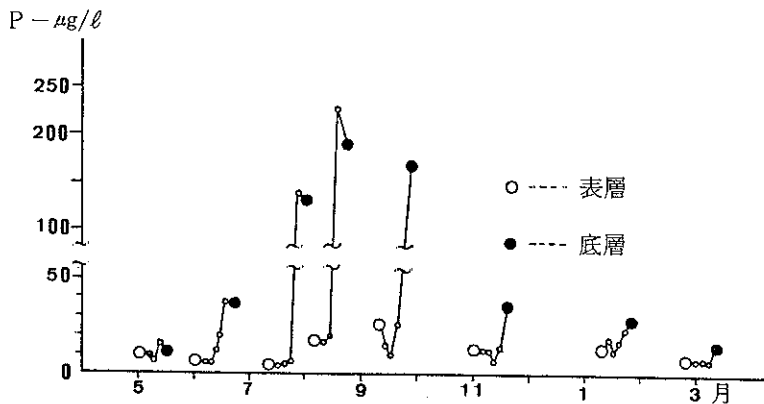


図-25 湾中央部における PO_4^{3-} 鉛直分布の季節変化((昭和42~43年))

(2) 季節変化

表~中層では周年、おおむね $\text{P}-5\sim 30\mu\text{g}/\ell$ の微量であって、季節的に特定した消長の傾向は認められない。しかし、下底層では季節変化が顕著であって、7~9月の高温期になると $\text{P}-100\mu\text{g}/\ell$ 以上、特に8月には $230\mu\text{g}/\ell$ に増量していた。その他の季節には表~中層よりも若干高めに $\text{P}-10\sim 40\mu\text{g}/\ell$ 台で経過している。

ただし、水深が2~3m以浅で Cl^- の躍層が存在しない地点では(米子湾のように概してPの多量な所でも)高温期になっても底層 PO_4^{3-} の異常増量現象は生じていない。

(3) 考察

高温期になると深所の底層で PO_4^{3-} が異常に増量する現象は、先に湖山池と東郷湖でも考察したところであるが、中海でも全く同様な機構によって海底堆積物中から溶出したものであると考えられる。すなわち、好気的な環境下では土壌等に付随する Fe^{3+} が海水中の PO_4^{3-} と結合し、 FePO_4 となって沈積しているが、高温期になって底層が嫌気的環境になると、 FePO_4 は硫酸還元菌の生産する S^{2-} と反応して PO_4^{3-} を溶出する。

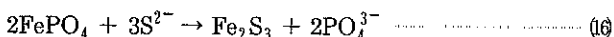


表12を見ると PO_4^{3-} が $\text{P}-100\mu\text{g}/\ell$ 以上の高値を呈しているのは溶存酸素が皆無の場合だけであって、 PO_4^{3-} の溶出が嫌気的条件下でのみ起っていることを示している。

11 無機態窒素化合物 (NH_4^+ 、 NO_2^- 、 NO_3^-)

水質作業準則に従って次の方法により採水後4時間以内に測定した。

NH_4^+ ：衛生試験法注解の処方調成したネスラー試薬により比色した。ただし昭和50～51年にはインドフェノール法⁴⁴⁾で測定した。

NO_2^- ：グリスロミイン試薬で発色させた。

NO_3^- ：ジフェニルアミン法で比色した。ただし昭和50年以降はミッドウルトン法³⁸⁾で測定した。すなわち、試水50mlにアンモニア水2mlと MnSO_4 液(MnSO_4 1gを5% HAc 100mlに溶す)1mlおよびZn末0.2gを加え密栓して5分間激しく振った後ろ過する。ろ液10mlにグリース試薬(0.1gスルファニル酸を少量の水で加熱して溶かし、これに0.08gの α ナフトールを75mlのHAcに溶解したものを加えて水で100mlにうすめる)2.5mlを加えてよく振り30分後に比色した。

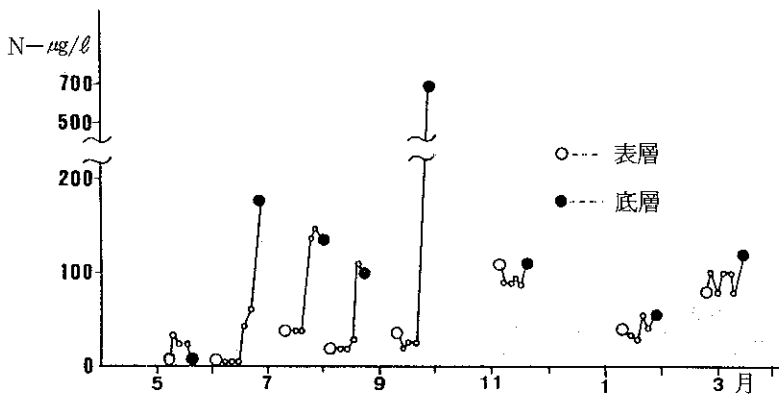


図-26 湾中央部における NH_4^+ 鉛直分布の季節変化(昭和42～43年)

(1) アンモニウム塩

湾中央に近いStK及びStJにおける NH_4^+ の分布と消長を図26に示した。

鉛直分布：米子湾では遞減型の分布が見られたが、他の地点では季節にかかわらず遞増型の分布をなしており、ことに下、底層では $\text{N}-100 \mu\text{g}/\ell$ 以上の高値がしばしば出現していた。J地点の底層では42年9月に $\text{N}-700 \mu\text{g}/\ell$ の高値を生じている。

季節変化：表、中層の NH_4^+ は高温期(5～9月)および寒冷期の1月にはそれぞれ $50 \mu\text{g}/\ell$ 以下であって概して少量であるが、11月及び3月の温暖期には $\text{N}-80 \sim 110 \mu\text{g}/\ell$ とやや増量していた。

一方、下～底層の NH_4^+ は表～中層にくらべて周年高値であるが、特に6～9月の高温期になると急増して $100 \mu\text{g}/\ell$ 以上となっており、寒冷期の1月及び5月には $0 \sim 50 \mu\text{g}/\ell$ に減少していた。

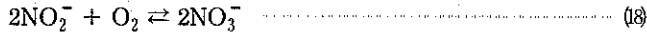
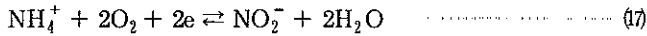
水平分布：米子湾内は他の地点にくらべて著しく高濃度であり、表層で $180 \sim 500 \mu\text{g}/\ell$ を呈することもある。この湾岸は中海沿岸で最も人口が稠密な場所であるから、多量の生活廃水が流入しており、それらの分解によって生じた NH_4^+ であって、遞減型鉛直分布をなすのも、流入陸水に由来するためである。

(2) 亜硝酸塩 (NO_2^-)

鉛直分布：亜硝酸塩は下、底層で検出され、50年1月の1例を除いて遞増型分布をなしている場合が多い。

季節変化：観測事例の少いことにもよるがNO₃⁻のように顕著な季節変化は認められない。しばしば検出されないこともあるが、検出してもN=0~10 μg/lの範囲であって、他の2態のN化合物にくらべると微量である。

これはNO₂⁻がNH₄⁺ ⇌ NO₃⁻の酸化還元系にあって、中間体的な存在であるために、多量には溶存することがないものとする。



これらの反応は硝酸化成細菌など微生物の作用によって促進される¹⁸⁾という。

(3) 硝酸塩 (NO₃⁻)

湾中央部に近いStKおよびStJにおけるNO₃⁻の各層における濃度の月別変化を図27に示した。

鉛直分布：図27に示したとおり、1月には逡増型に分布し、3月には逡減型となっている。その他の季

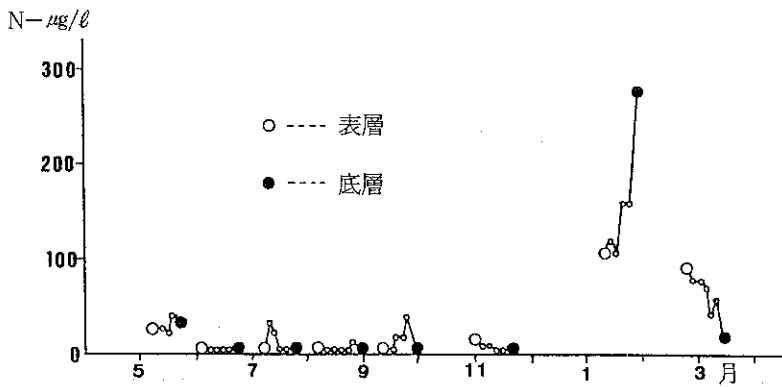


図-27 湾中央部におけるNO₃⁻鉛直分布の季節変化(昭和42~43年)

節では特定な分布傾向が認められない。

季節変化：高温期5~11月には、表層から底層に至る全層において、N=40 μg/l以下の微量であり、特に6~11月には大半の層でNO₃⁻は検出されなかった。しかし、1~3月の寒冷期になると急激に増量し、殊に1月には全層がN=100 μg/l以上の高濃度となり、底層では280 μg/lの著量となっていた。

同様な現象は先に東郷湖や湖山池でも観察したことである。

(4) 考 察

無機N化合物の分布と消長は浮遊藻や堆積物、あるいは細菌の代謝と密接に関係する。

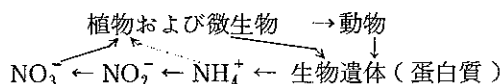
中海に溶存するN化合物は、湾内におけるNの循環系において生じたものの他、新たに周辺市街地から流入した生活廃水、産業排水等もN源として加わる。前述した如く米子湾でNH₄⁺が逡減型の鉛直分布をなすのは、多量のNH₄⁺をともなった陸水が海面を拡散しているためである。

一方、海中の生物は死後海底に沈積するが、生物体を構成する蛋白質は好気的環境であれ、嫌気的条件下にあって脱アミノ反応によりNH₄⁺を生じる。ここに生じたNH₄⁺は表7に示したNの循環系に乗って再び生物体を構成することとなる。

高温期、この内湾では前記したとおり下、底層では溶存酸素が消失し、環境は還元化する。したがって海底で生じたNH₄⁺は、NO₂⁻~NO₃⁻への酸化径路をへることなくNH₄⁺のまま溶存が可能である。夏期、下層においてNH₄⁺の濃度が増大するのはこのためであろう。また後述する如くこの時期、下底層におけ

る藻類の呼吸は微量であるから、藻類が消費する NH_4^+ もまた少量であろう。したがってここに生じた NH_4^+ の大半は酸化を受けずに下層に温存され、上層へ拡散した後、直ちに植物に取り込まれることとなる。すなわち、高温期における N の循環は点線で示した短絡系が主体となるのではあるまいか。

表-7 湾内における N の循環



寒冷期になると水温が低下するにつれて、溶存酸素が全層にわたって増量する。

したがって(7)、(8)に示した酸化反応が惹起し、 NO_3^- を生じて NH_4^+ は減少する。一方、温度の低下

とともに藻類による N の摂取も激減するので、この反応により生じた NO_3^- は表～底の全層にわたって蓄積となる。すなわち、この時期、N の循環系は実線で示した長径路型へ移行し、これが主流をなすに至る。

NH_4^+ が夏期に下、底層で増量し、逆に冬期になると NO_3^- が全層において増量しているのは、N の循環系が、季節的に短絡型から長径路型へと移行したために生じた現象であると著者は解する。

湖山池、東郷湖で考察した如く、総じて浮遊藻など N を取り込む者が減少する冬期の無機 N 量は、この内湾の富栄養化を示す指標と見なすことができる。

米子湾など局地的に汚濁の進んだ場所は別として、湾内の大半の地点でその値は湖山池の 1/2、東郷湖の 1/3 程度であると判断する。

12 基礎生産量

無機栄養生物による基礎生産量は41年から50年の間に、湾内の数地点で随時に測定した。測定方法は湖山池や東郷湖で行ったと同様に明、暗ビンを採水地点に24時間垂下した後、 O_2 を固定してウインクラー法で測定した。

測定の結果は表8及び図28に示した。

図28において実線で示したのが総生産量であり、点線は呼吸量である。

両線の交点に相当する水深が補償深度となる。図によってわかるとおり、総生産量は表層で最大であり、かつ高温期に増量するなど湖山、東郷の両湖と同様な傾向がある。

湾内に近い St J と N における水深別純生産量を、表1に示した深度別湾容積に乗じて、湾全域における表層から補償深度までの純生産量を積算すると表9となる。他の水域と比較する目的で積算純生産量を湾面積で除し、これを図示したのが図29であるが、春秋の2回に峰を生じているのが特徴的である。

図29において横軸と折線に囲まれた部分の面積を求積すると、それは単位面積当りの年間純生産量に相当する。試算の結果ではおよそ $214.3 \times 10^6 \text{ l/km}^2 \cdot \text{年}$ となっており、湖山池の 86%、東郷湖の 77% になり、三瀉湖中で最小であった。

(1) 考察

純生産量の季節変化は湖山、東郷の両湖の場合、高温期を峰としていたが、この内湾では春秋の二峰型となっている。これは海湾と淡水湖の相違にもとづくものであろうか。

表層における総生産量を見ると、両湖沼にくらべて中海の方が若干少量となっている。

湖山池及び東郷湖では総生産量ならびに呼吸量とも、底層において零となった例はなかったが、中海では 5 m 層以深で溶存酸素が皆無となっている場合があり、藻類が生存しない層の形成されていることがわかる。

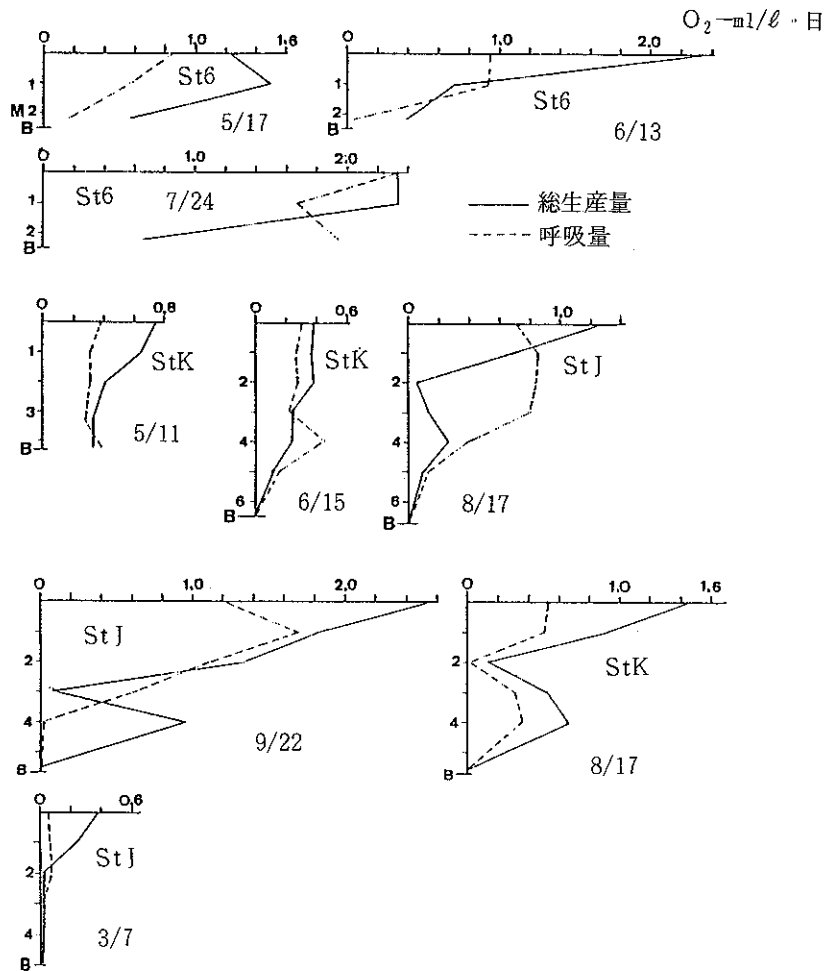


図-28 中海における基礎生産（昭和41～43年）

表-8 中海の各水深層における基礎生産量（ O_2 -ml/l・日）

年月日	41. 5. 17			年月日	41. 6. 13			年月日	41. 7. 24		
St	6			St	6			St	6		
水深	総生産	呼吸	純生産	水深	総生産	呼吸	純生産	水深	総生産	呼吸	純生産
1	1.23	0.86	0.37	0	2.33	0.94	1.39	0	2.33	2.30	0.03
0	1.49	0.58	0.91	1	0.70	0.92	-0.22	1	2.34	1.69	0.65
B2.2	0.57	0.16	0.41	B2.2	0.39	0.02	0.37	B2.2	0.65	1.95	-1.30

年月日	42. 5 11			年月日	42. 6 15			年月日	42. 8 17		
St	K			St	K			St	J		
水 深	総生産	呼 吸	純生産	水 深	総生産	呼 吸	純生産	水 深	総生産	呼 吸	純生産
0	0.73	0.39	0.34	0	0.39	0.30	0.09	0	1.27	0.72	0.55
1	0.65	0.31	0.34	1	0.37	0.27	0.10	1	0.68	0.85	-0.17
2	0.41	0.31	0.10	2	0.38	0.28	0.10	2	0.06	0.84	-0.78
3.3	0.33	0.28	0.05	3	0.24	0.23	0.01	3	0.13	0.80	-0.67
B4.3	0.33	0.39	-0.06	4	0.25	0.45	-0.20	4	0.26	0.39	-0.13
				5	0.11	0.16	-0.05	5	0.10	?	?
				B6.5	0.00	0.00	0.00	B6.7	0.00	0.00	0.00

年月日	42. 9. 22			年月日	42. 11. 14			年月日	50. 1. 27		
St	J			St	K			St	J		
水 深	総生産	呼 吸	純生産	水 深	総生産	呼 吸	純生産	水 深	総生産	呼 吸	純生産
0	2.53	1.22	1.31	0	1.43	0.53	0.90	0	0.37	0.05	0.32
1	1.82	1.70	0.12	1	0.91	0.51	0.40	1	0.23	0.06	0.17
2	1.34	1.11	0.23	2	0.13	0.00	0.13	2	0.00	0.07	-0.07
3	0.07	0.62	-0.55	3	0.52	0.32	0.21	3	注) 総生産量と呼吸量は 3日間現地に沈めて測 定した値の1/3である。		
4	0.96	0.00	0.96	4	0.66	0.35	0.31	4			
B5.5	0.00	0.00	0.00	B5.5	0.00	0.00	0.00	B5			

表-9 湾全域について積算した純生産量
($O_2 - 10^3 \text{kl/日}$) 昭和42年

月	5	6	8	9	11	1
補償深度 m	3.8	3.1	0.8	2.3	5.5	1.7
積算純生産量	63.61	24.10	22.22	92.13	134.72	30.49
湾面積 km^2	103	"	"	"	"	"
積算純生産量/ km^2	0.6176	0.2340	0.2157	0.8945	1.3080	0.2960

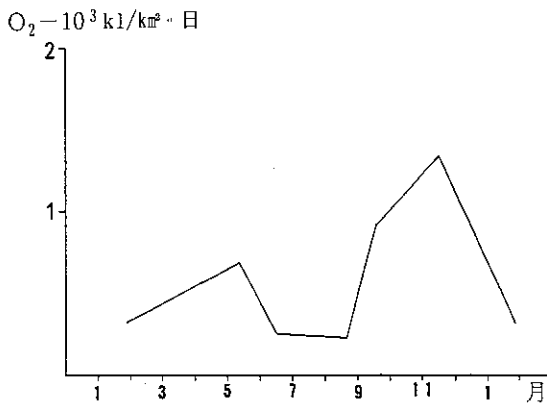


図-29 純生産量の季節変化

13. 酸化還元電位 (Eh)

湖山池と東郷湖ならびに中海の三者について水質の化学性状を考察すると、三者に共通した現象として下、底層において溶存酸素が著しく欠乏していることが指摘できる。この層では時として多量の還元物質の溶存している場合もあり、潟湖に特有な性状の一つといえよう。著者はこの層を還元層と呼んでいるが、還元性の強弱を示す指標の1つに Eh がある。Eh の測定は東洋ろ紙製、SIj 型 pH 計を用い、白金電極を挿入して測定した。

昭和43年の高温期に表層水から海底土に至る各層の Eh を測定した結果は表12と図30に示したが、表層水ではおよそ+250 ~ +500mV、底層水では最低が-180mV であって、海底土では-206mV が最低であった。

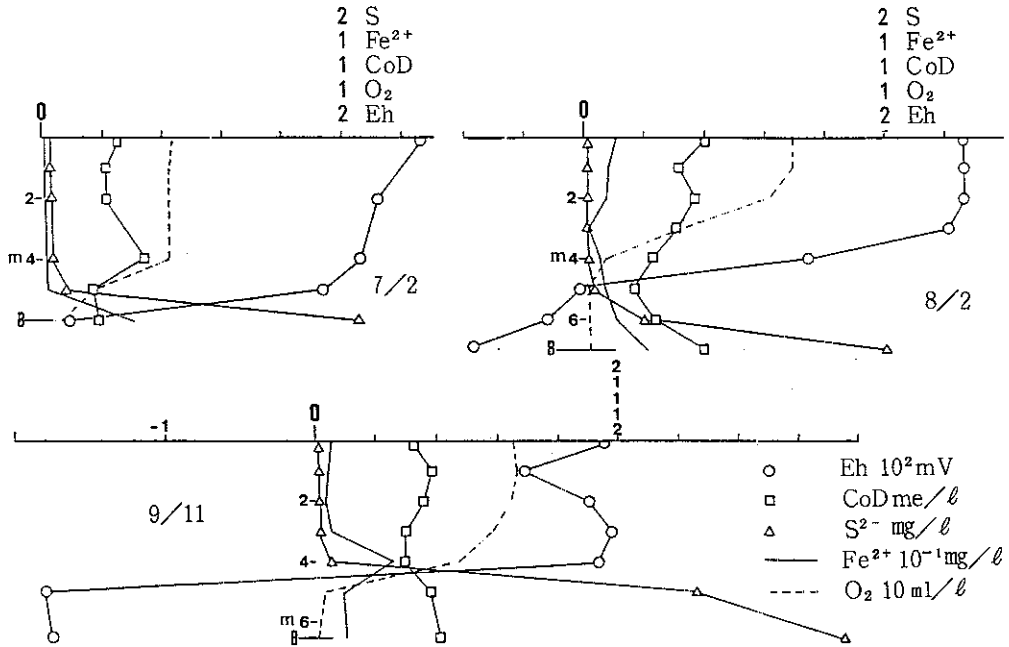


図-30 還元物質の鉛直分布と酸化還元電圧 (昭和43年)

14. 還元層の形成機構

底層水が還元状態となりやすいことが、潟湖に共通した現象であることは前述したが、苦潮の例に見られる如く、これが潟湖の漁場環境を劣悪化させる最大の因子であることは、モカイ漁場の変遷などにもよく現れている。

底層における還元物質の生成機構については前編でもふれておいたが、ここでは中海について具体的に考察したい。

(1) 海底堆積物中の生物体有機物

底層水が還元状態となるのは、海底における嫌気細菌の代謝産物によるものであって、沈積した生物体はそれらの細菌にとってエネルギー源として不可欠である。すなわち、底層における還元層の形成は生物体の堆積が起点であると考えられる。

生物体有機物の測定はチューリン法、シマコフ変法などが適すると思われるが、ここでは海底土の KMnO_4 消費量について三潟湖のそれを比較したところ表10となった。

この値から有機物の堆積量を推定すると、中海<湖山池<東郷湖の順となるが、厳密にはこの値が有機物のみを指すとは限らないので、三潟湖の有機物堆積量はおよそ同程度であると解している。

(2) 海水の浸入と還元層の形成

生物体有機物の堆積量が多い潟湖では、当初、底層が好気的環境であっても次第に嫌気状となり、細菌叢も嫌気性種へと遷移することは前編で指摘した。それらの代謝産物は蓄積して還元層を生じるが、外洋

表-10 三瀉湖における底土の有機物含有量
(湖心部の値を示す)

	中 海	湖 山 池	東 郷 湖
強熱減量	—	13.4 ~ 18.2 %	14.0 ~ 19.0 %
KMnO ₄ 消費量	0.0 ~ 7.9 me/g	4.5 ~ 8.3 me/g	6.7 ~ 15.3 me/g

注) 湖山池、東郷湖は昭和46~47年の測定値、中海は36~37年の資料による。

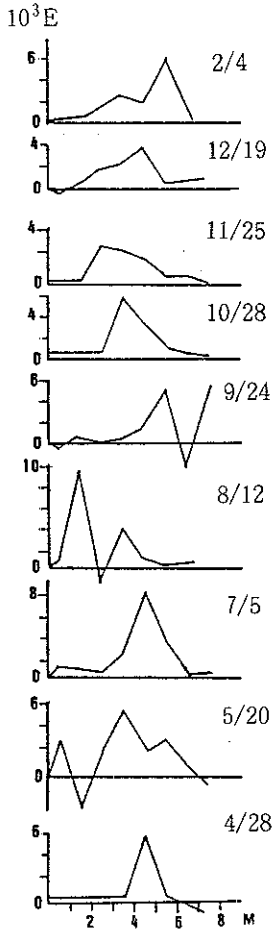


図-31 湾中央部における鉛直安定度
(昭和33~34年)

から浸入した高密度の海水は、底層水を嫌氣的に保存する上で主要な役割を果たしている。すなわち、昭和33年の観測値を例にとりて各層の鉛直安定度を算出すると、図31に示した如く躍層付近で極大となって、 $(3\sim 10)\times 10^3$ Eと甚だ大きな値を呈していた。この層を境とした上、下層間では海水の対流が極め起り難いことがわかる。

一方、 S^{2-} を生産する硫酸還元菌は SO_4^{2-} を呼吸するので、多量の SO_4^{2-} を含有する高濃度の海水が海底に滞留すれば、菌の繁殖が助長され、 H_2S の蓄積も促進される結果となる。いずれにしても外洋から浸入する高濃度の海水は、還元層の形成において主要な役割を果たしている。

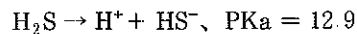
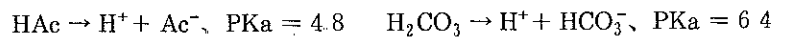
(3) 還元物質相互の反応

中海の中央部の底層には、主として嫌気性細菌の働きにより還元層が形成され、表下層では見られない各種の還元物質が溶存していることはこれまでに詳述したとおりである。

これらの還元物質はそれぞれ反応性に富んでおり、底層水は海塩と海底堆積物ならびにここで生じた各種還元物質が、相互に平衡した状態で存在する。

底層に生じた嫌気的環境下では、嫌気細菌が沈積した生物体有機物からエネルギーを獲得し、酢酸等の酸性物質を生成している。したがって生物体の堆積量が増加すると、底層水中にはこれら酸性の代謝産物が増加しpHが低下する。

一方、硫酸還元菌が生産する H_2S は、これらの酸性物質にくらべるとはるかに弱い酸であるから、pHが低下すれば H_2S の電離度が減少して毒性は一段と強力になる。



一方、ここに生じた S^{2-} は海底に堆積した $FePO_4$ と反応して PO_4^{3-} を遊離することはすでに指摘したが、還元層中に著量の PO_4^{3-} が溶存するのはこのためである。

ある種の嫌気性細菌では硝酸呼吸を行って NO_2^- あるいは N_2 を生じるものがあり、更に数段の還元を行ってアンモニアを生じる¹⁸⁾という。還元層中では無機N化合物として、 NH_4^+ しか溶存していないのはこのためと考えられる。こうして多量に PO_4^{3-} と NH_4^+ が溶存する底層水は、湧昇する機会があれば上層部へ浮上し、浮遊藻の繁殖に利用されることとなる。

また底層水中には多量の S^{2-} と共に Fe^{2+} も溶存していることはすでに記述した。両者は反応して FeS を生じるが、これは甚だ難溶性であって溶解度積は $[Fe^{2+}] \times [S^{2-}] = 1.5 \times 10^{-19}$ である。したがって表 12 に示した 43 年 9 月 11 日、StN のように $S^{2-} - 5.0 \text{ mg}/\ell = (0.156 \times 10^{-3})$ の H_2S と共存可能な Fe^{2+} は (1×10^{-15}) 以下であって、 $0.11 \text{ mg}/\ell = (0.197 \times 10^{-5})$ の多量の Fe^{2+} が共存する事実は一見して不可解である。先に Fe^{2+} の項において上層に存在する Fe^{2+} は錯化合物ではないかと推論したが、底層においても溶解度積を超える多量の Fe^{2+} が溶存するこの現象は、 Fe^{2+} のうちの大部分が上層のそれとは異なるものの、或る種の錯化合物として存在するために、溶解度積の制限を受けずに溶存できるのではないかと考えている。

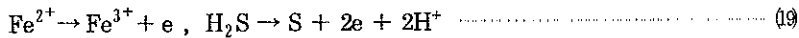
表-11 $KMnO_4$ 消費物質中に占める S^{2-} と Fe^{2+} の比率

年月日	St	水深	$KMnO_4$ 消費量 me/l A	S^{2-}		Fe^{2+}		その他の還元物質 me/l D	
				me/l B	B/A %	me/l C	C/A %	$D = \frac{A - B - C}{B - C}$	D/A %
43.7.2	B	B7.0	0.457	0.1169	25.58	0.0002	0.04	0.3399	74.4
"	5	B6.0	0.177	0.1306	73.79	0.0005	0.28	0.0459	25.9
"	6	0	0.403	0.000	0.00	0.0005	0.12	0.4025	99.9
43.8.2	G	0	0.191	0.000	0.00	0.0014	0.73	0.1896	99.3
"	"	B9.0	0.116	0.000	0.00	0.0018	1.55	0.1142	98.4
"	I	0	0.325	0.000	0.00	0.0014	0.43	0.3236	99.6
"	"	B5.0	0.157	0.000	0.00	0.0023	1.46	0.1547	98.5
"	L	0	0.364	0.000	0.00	0.0021	0.58	0.3619	99.4
"	"	B3.5	0.281	0.000	0.00	0.0029	1.03	0.2781	99.0
"	B	0	0.397	0.000	0.00	0.0018	0.45	0.3952	99.5
"	"	4	0.219	0.000	0.00	0.0011	0.50	0.2179	99.5
"	"	5	0.157	0.0013	0.83	0.0011	0.70	0.1546	98.5
"	"	6	0.211	0.025	11.85	0.0018	0.85	0.1842	87.3
"	"	B7.0	0.377	0.125	33.16	0.0036	0.95	0.2484	65.9
"	6	0	0.384	0.000	0.00	0.0016	0.42	0.3297	99.6
"	"	2	0.331	0.000	0.00	0.0013	0.39	0.2578	98.8
"	"	B3.5	0.261	0.000	0.00	0.0032	1.27	0.3403	99.8
43.9.11	L	0	0.341	0.000	0.00	0.0007	0.21	0.3403	99.8
"	"	B3.9	0.271	0.0625	23.06	0.0014	0.52	0.2071	76.4
"	B	0	0.320	0.000	0.00	0.0009	0.28	0.3191	99.7
"	"	4	0.284	0.0006	0.21	0.0045	1.58	0.2789	98.2
"	"	5	0.374	0.1563	41.79	0.0016	0.43	0.2161	57.8
"	"	B6.5	0.403	0.2188	54.29	0.0018	0.45	0.1824	45.3
"	N	0	0.312	0.000	0.00	0.0005	0.16	0.3115	99.8
"	"	B4.9	1.24	0.625	50.40	0.0020	0.16	0.613	49.4
"	6	0	0.394	0.000	0.00	0.0007	0.18	0.3933	99.8
"	"	B3.2	0.386	0.0006	0.16	0.000	0.00	0.3854	99.8

(4) 底層に溶存する還元物質の組成

先に KMnO_4 消費量を考察した際に、表～下層に溶存する消費物質は主に湾内で生じた生物体であること、ならびに湾中央深所の底層で高温期に著量の消費量を呈する物質はこれと全く異質なもので、 KMnO_4 と反応する際の色の変化を見ると Fe^{2+} 及び H_2S がこれに該当することを指摘しておいた。

ここでは昭和43年の観測資料について、 Fe^{2+} 及び H_2S がそれぞれ KMnO_4 と次式のとおり反応するものと見なし、各々の濃度を me/ℓ 単位に換算した上で、それらが KMnO_4 消費量中に占める比率を算出してみた。結果は表11に示した。



表によって明らかなように、全観測点の表～下層では KMnO_4 消費量の90%以上が、 Fe^{2+} 、 H_2S 以外の物質によって占められている。

全体として Fe^{2+} が還元物質中に占める割合は甚だ小さく、底層水中でも1～2%、その他の層ではおおむね1%以下となっている。

一方、 H_2S は底層水およびその直上層にのみ溶存しているが、 KMnO_4 消費量に対する比率は甚だ大であって、50～75%に達するものが3例もある。還元層の形成において H_2S は特に重要な還元物質であることがわかる。

VI 漁場環境の特異性と魚群の生態

これまで論述したことによってわかるとおり、中海は最深8m余の浅い汽水性内湾であるが、中層に発達した塩分躍層が存在するので下層部は溶存酸素が欠亡し、還元層が形成されている。従ってここに生息する魚類は、この特異な漁場環境に対応して、他の海面では見られない生態を呈する。以下にその数例を記述する。

1. 苦潮

この内湾には古くからニガシオと呼ばれる特異な魚類のへい死現象があった。同時に海水が赤色を呈するところから赤潮とされていたが、著者らはその発生機構を解明した結果、瀬戸内海などに見られるプランクトン起原のへい死現象ではなく、晩夏から初秋にかけて外洋の水位が上昇すると躍層も上昇し、 O_2 欠亡水によって覆われる区域が拡大する。この際に強風が吹けば図32に示したとおり湾内には環流を生じて、風上の海岸には O_2 欠亡水乃至還元物質を含有する底層水が浮上するようになり、ここに生息していた魚類は溶存酸素の欠亡によって窒息または H_2S による中毒によって死に至る。この際、底層水に溶解していた Fe^{2+} 化合物は酸化して $\text{Fe}(\text{OH})_3$ コロイドとなり、赤色を呈することを明らかにした。^{34, 35)} 苦潮は風上にさす、と古老はいい伝えているが、体験的に環流の生じることを理解していたのであろう。同様な現象は与謝内海や久美浜湾でも見られる⁴³⁾ というが、いつれにしても苦潮は魚類の生活に著しい悪影響を及している。

2. 魚類の生活圏

中海の海況は鉛直的变化が著しいばかりでなく季節変化も顕著である。したがってここに生息する魚類

はその変化に対応して生活圏を変えている。

ア、春期：水温の上昇につれて外洋から来遊する魚群は水温の高い上層を経由するが、この層は塩分量が外洋水の1/3～1/4であるため、外洋性の強い魚種は湾口部に止り、汽水性魚から先に溯上する。

イ、夏期：躍層以深は溶存酸素が著しく欠乏するので、生活圏は上層に限定され、底生種も3m以浅に集る。

ウ、秋期：上層水温が下降し始め、外洋よりも低温になると、魚群は境水道を経て降海し始める。一方、この季節になると水温成層が逆転し下層が高温となる。また下層水の O_2 量も次第に増量し始めるので、一部の魚群は上層から下層へと移行するものもある。

エ、冬期：上、下両層の水温較差が広がる一方、下、底層の溶存酸素量も生息可能なまでに増量するため、中海に残存した魚群は次第に中央部深所へと移動し、着底して越冬する。

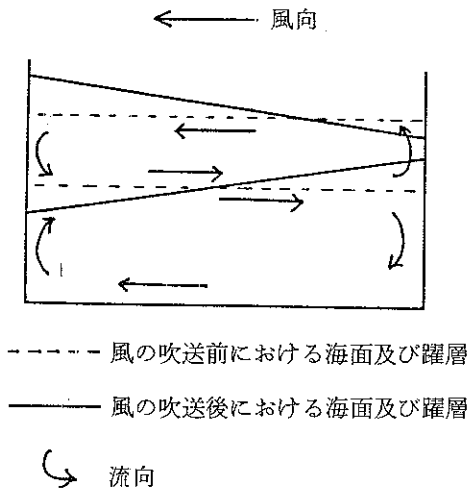


図-32 還流の模式図

(吉村信吉：湖沼学による)

3 モガイ漁場の変遷

漁場環境の劣化とその変遷を端的に表すものとして、モガイ漁場の移り変りをあげることができる。

モガイは中海の特産物として明治～大正初期には中海全域に分布していたという。

境港の突堤構築が進むにつれて、²⁶⁾赤潮の発生区域が当初米子湾内に限られていたのが、次第に大橋川河口へと拡がり、頻度を増すとともにモガイの減産も著しくなった。

米子湾内に産するモガイは城貝と呼ばれて、特に美味であったというが、著者が調査に従事した昭和23年以降においては、27年1～2月に米子湾内、島田地先で多少の漁獲があった他は、主漁場が島根県意東地先に移っており、安来以南では漁獲がなかった。

4 還元層を利用した中海特有の漁法

中海には、環境の特異性を利用した、他の内湾では見られない特殊な漁具、漁法がいくつか存在する。

ボラはこの内湾における主要な漁獲物の1つであって、主としてまき刺網によって漁獲されているが、湾中央部の最深部で約8mの水深であるから、まき刺網は少なくとも網丈が10m以上必要である。しかし実際には僅か4～5mの網丈の刺網を使って大差ない漁獲をあげている者もある。

これは躍層以深では O_2 が欠乏しているので、網の下部を潜って外へ逃逸することができないのを利用した漁法であって、還元層が発達する高温期には、漁具資材の節減と軽便化を計ってかなりの成果をあげている。還元層をたくみに利用した1例といえよう。

ツボ網を設置する際に3m以浅の場所をえらぶ等、還元層の存在を利用した漁法はこの他にも多数あり、永年の経験から漁業者が「底水が腐って」魚が住めない事実を理解していたことがわかる。漁場環境を悪化させる還元層の存在も、巧みに利用すれば漁獲の効率を高める上で役立つ場合のあることを示している。

VII 漁場環境の改善

中海の中層には溶存諸成分の強固な躍層があり、下層では溶存酸素が欠乏して還元層を生じている。このため魚貝類の生活圏は躍層以浅に限られており、劣悪な漁場であることはここに詳述したとおりである。その改善策としては次の方策が考えられる。今後淡水化事業などを考究する上で参考に供したい。

1. 客土の効果

海水の汚濁が問題視されなかった往事、中海の漁獲量は1町歩当り年間31貫(11.74 t/km²)に過ぎず(大正1~5年の平均)他府県の150貫余(56.82 t/km²)にくらべるとまことに微少であって、すでに生産力の低い海湾であると評価されていた。²⁸⁾

前述した「苦潮」現象は当時からすでに発生しており、モガイ等貝類の増殖をはかるため却土による漁場の改良²⁸⁾が提案されている。

ニガシオの発生が底層におけるH₂Sの生成に起因するものであれば、特に褐色の濃い赤土(重金属酸化物含有量が多量である)を撒布すると、次式によってS²⁻が固定され魚貝類への被害は軽減されるであろう。
$$2\text{Me}^{n+} + n\text{S}^{2-} = \text{Mn}_2\text{Sn} \dots\dots\dots (36)$$

客土によってモガイの漁場では歩留りが著しく改善されており、産業的に有効なことは確認されている。³⁶⁾しかし、重金属を消費し尽せば更に追加して却土する必要があるから、恒久的対策とはいえない。

2. 堆積有機物の浚渫

一方、還元層の生成機構を見るに生物体の堆積が起点となっているので、これを浚渫によって除去すればH₂Sの発生も阻止される筈であり、その効果は持続的であると考えられる。著者がマガキの垂下養殖場で試みた結果では、赤土の撒布によるへい死の軽減効果は認められなかったが、浚渫による漁場環境の改善は歩留りと成長の向上において顕著な効果を呈していた。⁴⁰⁾昭和48年以降、中海においてニガシオ等による魚貝類の異常へい死が急激に減少したといわれるが、中海干拓にともなう浚渫作業がこの年代から急速に進行したことと関連して、生物体有機物の除去が効を奏したものと考えられる。

3. 内湾電池の構想

中海に限らず、還元層を生じる内湾や潟湖では表、底層間の酸化還元電位差が数100 mVに達する例もめずらしくない。昭和43年、この内湾における実測値は表12に示したとおり、表層では+250~+500 mV、底層水は最低が-180 mVであって両層間の電位差は約0.7 mVであった。

中海の海水は表、上層で5~8 Cl⁻g/l、下底層では14~18 Cl⁻g/lの多量な海塩を含有しているので電気伝導度は大きい。一方、先述したとおり表、底層間には500~600 mVの酸化還元電位差があるので、いま2本の被覆導線の先端にそれぞれ1枚づつ電極板を装着し、船上から1本は底層に、他の1本は上層にそれぞれ電極板を垂下した後、両導線を連結すれば、ここに1個の酸化還元電池が形成され、0.5~0.6 Vの起電力が取り出せる訳である。著者はこれを「内湾電池」と呼ぶこととし、ステンレス製電極板を装着して米子湾で実測した結果、0.9 Vの起電力を生じた。(昭和38年特許願31914号)

同様な構想はアメリカにおいてもシスラーによって試みられ、海洋電池⁴¹⁾と呼ばれている。

この電池が放電しつくした時には、底層に溶存する還元物質も消滅している訳であって、「苦潮」の対策としても有意義であると考えられる。すなわち、内湾電池の構想は悪化した漁場環境を、逆に産業的に利用することによって浄化を試みようとするものである。

表-12 中海の漁場環境 (昭和41年4月~昭和51年7月)

年月日	St	水深	水温	Cl ⁻ g/l	KMnO ₄ 消費量 me/l	O ₂ ml/l	SO ₄ ²⁻ me/l
41. 4. 22	H	0	15.6	18.38	—	—	—
" "	"	1	15.4	18.58	—	—	—
" "	"	2	15.1	18.92	—	—	—
" "	"	3	15.1	19.16	—	—	—
" "	"	4	15.2	18.86	—	—	—
41. 5. 17	6	0	21.8	7.70	0.214	5.73	23.4
" "	"	1	21.8	8.25	0.221	5.96	24.5
" "	"	B2.2	21.8	8.82	0.221	6.53	26.3
41. 6. 10	H	0	20.8	13.34	—	—	—
" "	"	1	20.8	13.35	—	—	—
" "	"	2	20.2	14.95	—	—	—
" "	"	3	19.1	18.39	—	—	—
" "	"	4	18.6	19.06	—	—	—
" "	"	5	18.7	19.05	—	—	—
" "	"	B6.4	18.6	19.07	—	—	—
41. 6. 13	6	0	22.0	10.04	0.336	6.32	32.0
" "	"	1	21.8	10.73	0.314	6.73	33.3
" "	"	B2.2	20.0	11.12	0.286	5.43	34.7
41. 7. 24	6	0	29.0	6.27	0.708	8.45	18.8
" "	"	1	29.0	6.11	0.575	8.42	17.7
" "	"	B2.2	27.7	7.93	0.421	7.23	22.4
年月日	St	水深	水温	Cl ⁻ g/l	KMnO ₄ 消費量 me/l	O ₂ ml/l	SO ₄ ²⁻ me/l
42. 5. 11	K	0	22.6	6.48	0.108	6.18	19.8
" "	"	1	21.2	6.60	0.127	6.43	19.2
" "	"	2	21.0	7.16	0.127	6.35	21.2
" "	"	3.3	20.4	13.68	0.087	3.81	27.8
" "	"	B4.3	18.8	16.33	0.111	2.74	44.8
42. 6. 15	K	0	24.8	12.00	0.213	4.82	32.0
" "	"	1	24.6	11.97	0.205	4.78	32.5
" "	"	2	24.4	12.08	0.230	4.76	30.8
" "	"	3	23.7	15.98	0.196	3.14	44.5
" "	"	4	23.1	16.79	0.213	1.69	48.4
" "	"	5	22.6	17.14	0.188	0.43	50.2
" "	"	B6.5	22.4	17.29	0.405	0.00	54.3
42. 7. 24	K	0	29.8	5.52	0.252	4.51	24.8
" "	"	1	29.8	5.52	0.286	4.44	30.6
" "	"	2	29.0	5.96	0.295	4.74	24.0

Ca ₂ ⁺ me/ℓ	Ca + Mg me/ℓ	NH ₄ ⁺ N - μg/ℓ	NO ₂ ⁻ N - μg/ℓ	NO ₃ ⁻ N - μg/ℓ	PO ₄ ³⁻ P - μg/ℓ	アルブミノイド N - mg/ℓ
19.0	121.5	-	1	6	18	
19.4	122.9	-	1	0	15	
18.6	124.5	-	1	0	12	
18.1	124.4	-	1	0	12	
19.5	126.3	-	4	0	12	
8.0	50.7	180	2	6	25	
8.4	56.6	91		13	15	
9.3	63.2	40	2	10	22	
13.7	87.5	+	2	0	30	
14.5	97.0	±	±	0	25	
15.4	101.4	±	±	0	23	
18.9	120.0	+	±	0	17	
20.0	123.7	±	±	0	20	
20.1	124.4	+	±	0	30	
20.2	124.7	+	±	0	35	
10.4	65.8	500	±	0	30	1.56
11.5	70.6	670	±	0	30	2.03
11.7	73.2	330	±	0	20	0.86
6.4	40.5	+	0	0	26	
5.8	39.4	+	0	0	24	
7.2	51.2	±	0	0	30	
Ca ²⁺ me/ℓ	Ca + Mg me/ℓ	NH ₄ ⁺ N - μg/ℓ	NO ₂ ⁻ N - μg/ℓ	NO ₃ ⁻ N - μg/ℓ	PO ₄ ³⁻ PP - μg/ℓ	Fe ²⁺ mg/ℓ
7.0	42.2	0	0	30	9	
7.3	42.8	32	0	30	9	
7.7	46.9	24	0	28	8	
14.5	86.3	24	2	40	15	
15.9	105.1	0	2	38	11	
12.5	78.3	0	0	0	6	
12.7	78.7	0	0	0	6	
13.0	79.3	0	0	0	6	
17.2	104.5	+	0	0	12	
17.7	110.6	46	0	0	20	
18.4	112.1	64	0	0	38	
18.5	112.9	180	0	0	38	
5.5	35.3	40	0	0	4	-
0.4	35.3	40	1	35	5	-
6.5	40.2	40	1	23	5	-

年 月 日	St	水 深	水 温	Cl ⁻ g/ℓ	KMnO ₄ 消費量 me/ℓ	O ₂ ml/ℓ	SO ₄ ²⁻ me/ℓ
42 7 24	K	3	27.6	9.38	0.195	4.25	71.4
"	"	4	24.4	12.66	0.244	1.03	54.9
"	"	5	23.0	15.21	0.252	0.00	29.4
"	"	B6.0	22.6	15.46	0.194	0.00	4.4
42 8.10	J	0	30.0	8.76	0.318	5.57	—
"	"	1	30.0	8.76	0.296	5.53	—
"	"	2	29.7	8.79	0.344	5.37	—
"	"	3	28.7	12.32	0.214	1.96	—
"	"	4	25.2	16.18	0.235	0.00	—
"	"	5	26.2	14.40	0.423	0.00	—
42 8.17	J	0	29.2	11.47	—	4.47	—
"	"	1	29.2	11.69	—	4.46	—
"	"	2	29.0	11.73	—	4.37	—
"	"	3	29.0	11.80	—	4.01	—
"	"	4	29.0	12.11	—	3.08	—
"	"	5	28.0	15.00	—	0.38	—
"	"	B6.7	26.3	16.56	—	0.00	—
42. 9.22	J	0	23.0	10.00	0.615	7.96	22.4
"	"	1	23.0	9.98	—	8.54	—
"	"	2	22.9	9.86	0.372	8.10	21.5
"	"	3	22.8	10.07	0.370	7.84	23.1
"	"	4	23.8	12.19	0.263	2.84	18.1
"	"	B5.5	24.3	13.64	1.120	0.00	31.1
42 11 14	K	0	13.8	8.79	0.533	7.64	—
"	"	1	13.8	8.79	0.460	7.56	15.9
"	"	2	13.6	8.79	0.487	7.05	16.9
"	"	3	13.6	8.99	0.332	6.65	18.2
"	"	4	15.6	12.20	0.255	4.68	26.4
"	"	B5.5	17.3	13.86	0.341	0.00	28.3
43. 3 7	J	0	7.2	6.22	0.173	8.48	20.7
"	"	1	6.8	6.22	0.198	8.37	20.7
"	"	2	6.6	6.34	0.240	8.54	19.0
"	"	3	6.9	6.64	0.173	7.84	24.7
"	"	4	6.2	14.71	0.132	4.72	54.3
"	"	5	7.8	15.17	0.099	4.37	50.7
"	"	B6.0	8.2	15.28	0.153	2.40	46.8

Ca ²⁺ me/l	Ca + Mg me/l	NH ₄ ⁺ N - μg/l	NO ₂ ⁻ N - μg/l	NO ₃ ⁻ N - μg/l	PO ₄ ³⁻ P - μg/l	Fe ²⁺ mg/l
9.9	64.0	100	0	0	6	-
13.9	88.5	140	3	0	70	0.17
17.2	102.6	150	1	0	140	0.22
16.4	104.0	140	+	0	130	0.47
9.5	58.0	20	0	-	18	0.00
9.6	57.6	20	0	-	18	0.06
9.6	58.1	20	0	-	20	0.02
13.2	80.7	30	3	-	90	0.06
17.4	106.8	110	1	-	230	0.12
15.7	95.6	100	1	-	190	0.35
-	-	-	-	0	-	-
-	-	-	-	0	-	-
-	-	-	-	0	-	-
-	-	-	-	0	-	-
-	-	-	-	0	-	-
-	-	-	-	0	-	-
-	-	-	-	10	-	-
-	-	-	-	0	-	-
10.50	66.2	35	0	0	26	0.00
-	-	-	-	0	-	0.00
10.50	65.3	20	0	20	14	0.00
10.84	67.5	24	0	20	10	0.00
13.40	77.1	24	1	40	28	0.00
15.20	90.1	700	0	0	170	0.00
10.10	56.7	110	0	17	13	-
9.35	56.6	90	0	11	13	-
9.06	56.6	90	0	10	13	-
9.29	57.8	92	2	+	8	-
12.70	79.0	90	4	+	15	-
14.65	89.3	110	2	+	37	-
6.63	40.4	80	2	90	8	-
7.22	40.4	100	2	80	10	-
6.74	41.1	80	2	80	10	-
7.32	43.2	100	7	75	10	-
15.40	104.0	100	7	45	12	-
16.24	98.9	80	7	60	14	-
16.70	99.1	120	7	20	20	-

年月日	St	水深	水温	Eh mV	Cl ⁻ g/l	KMnO ₄ 消費量 me/l	O ₂ ml/l
43. 7. 2	G	0	22.8	-	17.10	0.152	4.96
"	"	B1.0	22.2	+287	19.10	0.115	4.62
"	H	0	22.2	+301	-	-	-
"	"	B-	22.1	+302	-	-	-
"	I	0	23.6	+307	15.38	0.165	4.48
"	"	B3.8	23.2	+240	16.14	0.165	4.22
"	L	0	24.3	+373	13.54	0.198	4.76
"	"	B4.5	21.6	+85	16.14	0.288	0.00
"	B	0	24.2	+266	13.52	0.221	4.74
"	"	B7.0	20.5	-12	16.82	0.457	0.00
"	5	0	23.8	+255	13.65	0.246	4.26
"	"	1	-	-	13.65	0.210	4.22
"	"	2	23.6	+255	13.70	0.210	4.22
"	"	3	-	-	14.00	-	-
"	"	4	23.0	+211	15.48	0.342	4.15
"	"	5	-	+186	15.99	0.156	1.64
"	"	B6	21.1	+17	16.67	0.177	0.59
"	6	0	24.3	+260	12.44	0.403	4.92
"	"	B3.5	22.8	+228	15.23	0.280	0.00
年月日	St	水深	水温	Eh mV	Cl ⁻ g/l	KMnO ₄ 消費量 me/l	O ₂ ml/l
43. 8. 2	G	0	28.1	+267	15.94	0.191	5.67
"	"	B9.0	24.6	+294	18.75	0.116	4.88
"	H	0	26.8	+313	-	-	-
"	"	B7.0	25.3	+313	-	-	-
"	I	0	28.7	+317	8.35	0.325	6.28
"	"	B5.0	25.1	+324	18.46	0.157	4.64
"	L	0	29.2	+110	7.93	0.364	7.00
"	"	B3.5	25.8	+0.64	13.70	0.281	0.42
"	B	0	29.0	+252	7.57	0.397	6.92
"	"	1	28.8	+252	7.65	0.314	6.91
"	"	2	28.2	+252	9.10	0.364	6.14
"	"	3	27.7	+242	11.69	0.314	3.28
"	"	4	26.5	+148	13.40	0.219	0.70
"	"	5	25.2	-6	15.10	0.157	0.00
"	"	6	25.0	-26	15.39	0.211	0.00
"	"	B7.0	24.5	-76	16.02	0.377	0.00
"	5	0	28.7	+222	-	-	-
"	"	B6.0	25.0	-81	-	-	-

S ²⁻ mg/l	Fe ²⁺ mg/l					
0.00	0.00					
0.00	0.00					
—	—					
—	—					
0.00	0.00					
0.00	0.00					
0.00	0.00					
0.00	0.00					
0.00	0.00					
1.87	0.01					
0.00	0.00					
0.00	0.00					
0.00	0.00					
—	—					
0.00	0.00					
0.00	0.00					
2.09	0.03					
0.00	0.03					
±	0.00					
S ²⁻ mg/l	Fe ²⁺ mg/l	海 底 土				
		Eh mV	KMnO ₄ 消費量 me/g			
0.00	0.08					
0.00	0.10	+74	1.04			
—	—					
—	—	—	—			
0.00	0.08					
0.00	0.13	+146	0.399			
0.00	0.12					
0.00	0.16	-176	0.532			
0.00	0.10					
0.00	0.08					
0.00	0.07					
0.00	0.00					
0.00	0.06					
0.02	0.06					
0.40	0.10					
2.00	0.20	-206	3.70			
—	—					
—	—	-161	2.55			

年月日	St	水深	水温	Eh mV	Cl ⁻ g/ℓ	KMnO ₄ 消費量 me/ℓ	O ₂ ml/ℓ
43. 8. 2	M	0	28.8	+122	-	-	-
"	"	B?	24.8	-114	-	-	-
"	N	0	29.5	+201	-	-	-
"	"	2.5	28.4	+92	-	-	-
"	"	B5.5	25.0	-86	-	-	-
"	O	0	29.3	+81	-	-	-
"	"	B4.0	26.0	-107	-	-	-
"	6	0	29.5	+297	7.47	0.384	-
"	"	2	29.2	+291	8.95	0.331	-
"	"	B3.5	27.5	+32	10.85	0.261	-
年月日	St	水深	水温	Eh mV	Cl ⁻ g/ℓ	KMnO ₄ 消費量 me/ℓ	O ₂ ml/ℓ
43. 9. 11	G	0	23.4	-	15.80	0.123	4.40
"	"	B10	24.0	-	18.20	0.103	3.98
"	H	0	24.2	+485	-	-	-
"	"	B7.0	24.2	+500	-	-	-
"	I	0	24.0	+465	10.77	0.341	5.38
"	"	B6.8	24.5	+475	15.96	0.107	3.49
"	L	0	24.6	+362	10.67	0.341	6.14
"	"	B3.9	24.7	+354	11.08	0.271	3.49
"	B	0	24.4	+190	9.27	0.320	6.50
"	"	1	24.5	+134	9.29	0.374	6.70
"	"	2	24.5	+179	9.42	0.353	6.35
"	"	3	24.2	+195	9.72	0.288	5.77
"	"	4	24.4	+185	10.10	0.284	4.58
"	"	5	24.1	-180	14.53	0.374	0.23
"	"	B6.5	24.0	-177	14.96	0.403	0.00
"	5	0	24.5	-	-	-	-
"	"	B6.5	24.1	-175	-	-	-
"	M	0	24.8	+189	-	-	-
"	"	B6	24.1	-111	-	-	-
"	N	0	24.6	+214	10.17	0.312	6.42
"	"	3	24.5	+154	10.61	0.312	6.05
"	"	4.9	24.1	-90	15.12	1.24	0.00
"	6	0	26.4	+255	10.30	0.394	7.21
"	"	1.5	25.5	+284	10.25	0.299	7.57
"	"	B3.2	25.4	+124	10.92	0.386	1.88

S ²⁻ mg/ℓ	Fe ²⁺ mg/ℓ	海 底 土				
		Eh mV	KMnO ₄ 消費量 me/g			
—	—					
—	—	- 206	9.91			
—	—					
—	—					
—	—	- 176	3.23			
—	—					
—	—	-	6.68			
0.00	0.09					
0.00	0.07					
0.00	0.18	- 188	4.48			
S ²⁻ mg/ℓ	Fe ²⁺ mg/ℓ	海 底 土 Eh mV				
0.00	+					
0.00	0.06	+ 485				
—	—					
—	—					
0.00	0.05	+ 444				
0.00	0.05					
0.00	0.04	+ 64				
0.10	0.08					
0.00	0.05	- 175				
0.00	0.04					
0.00	0.03					
0.00	0.05					
0.01	0.25					
2.50	0.09					
3.50	0.10	- 175				
0.00	—					
2.50	—	- 177				
0.00	—					
4.00	—	- 185				
0.00	0.03					
0.00	0.00	- 188				
5.00	0.11					
0.00	0.04					
0.00	0.00					
0.10	0.00					

年 月 日	St	水 深	水 温	Cl ⁻ g/ℓ	KMnO ₄ 消費量 me/ℓ	O ₂ ml/ℓ	NH ₄ ⁺ N- μg/ℓ
50. 1. 27	J	0	4.8	9.72	0.242	7.79	37
"	"	1	4.8	9.67	0.175	7.91	35
"	"	2	4.8	9.76	0.279	7.80	32
"	"	3	4.6	9.82	0.352	7.64	53
"	"	4	4.9	10.18	0.202	7.84	42
"	"	B5	4.9	10.31	0.214	7.54	52
51. 7. 27	J	0	30.0	13.42	0.291	4.83	15
"	"	2	28.8	13.42	0.202	4.94	12
"	"	3	28.7	13.42	0.213	5.00	16
"	"	4	27.0	15.20	0.240	3.54	19
"	"	5	26.8	15.40	0.349	3.73	54
"	"	6	26.0	16.90	0.357	2.46	280
"	"	B7.5	24.5	16.90	0.357	1.49	310

NO_2^- N - $\mu\text{g}/\ell$	NO_3^- N - $\mu\text{g}/\ell$	PO_4^{3-} P - $\mu\text{g}/\ell$				
3	110	14				
2	120	18				
1	98	13				
1	160	16				
1	160	24				
1	280	27				
12	0	24				
11	0	25				
11	0	27				
15	0	29				
25	0	29				
22	0	27				
25	0	21				

文 献

- 1) 鳥大湖山池汚濁要因研究協議会：鳥取県湖山池汚濁要因調査報告書、1972年3月
- 2) 吉村信吉：湖沼学、昭和12年
- 3) 鳥取県：湖山池東郷湖地域振興計画調査報告書、昭和40年
- 4) 吉村信吉：鳥取県多鯰ヶ池の湖沼学的予察研究、地理学評論、Vol 5、No.11 昭和4年
- 5) 境測候所：境の気象百年、昭和58年
- 6) 鳥取衛研：東郷湖汚濁要因調査報告書、昭和46年度
- 7) 花岡、古川、野上：海水中の懸濁物に関する研究IV、日本誌 25巻5号、昭和35年
- 8) 花岡、古川、野上：海水中の懸濁物に関する研究I、日本誌 22巻4号、昭和31年
- 9) 古坂、服部：土壌の中の細菌の生態、科学、32巻8号
- 10) 木俣、門田、畑、田島：海洋性硫酸還元菌に関する研究I、日本誌 21巻2号、昭和30年
- 11) 例えば岩波生物学辞典など
- 12) 門田 元、三好英夫：昭和35年度日本農学大会水産部会講演予定要旨
- 13) 松平近義：水産学集成
- 14) 小林 純：本邦河川の化学的研究、岡山鳥取県下の水質について、農学研究 38巻1号、昭和23年
- 15) 徳平、宇井、市川、近藤：衛生工学者のための水質学(2) 用水と廃水、12巻5号
- 16) 吉田、木俣：海洋中の無機態窒素化合物利用微生物に関する研究V、日本誌 35巻3号、昭和44年
- 17) 西条八束：湖沼調査法、古今書院
- 18) 富山、神崎：底土に含まれる硫化物の少量定量法、日本誌 17巻6号、昭和26年
- 19) 農林省鳥取統計事務所：鳥取県農林水産統計年報（水産編）昭和32～59年
- 20) 日本水産資源保護協会：水産用水基準（改定版）昭和58年3月
- 21) 半谷高久：水質調査法、昭和35年9月 丸善株式会社
- 22) 同仁薬化学研究所：ドータイト試薬解説資料No.115
- 23) 奥田 東：土壌肥料綜説、養賢堂 昭和32年
- 24) 海図 No.133 出雲海岸
- 25) 中海干拓事務所：宍道湖中海淡水化に関連する水理水質及び生態の挙動について、昭和59年3月
- 26) 豊原義一：中海における水位異常変化について、海と空18巻2号、昭和12年
- 27) 鳥根県：境水道の交流について(1)、昭和33年
- 28) 鳥根水試：大正9年度鳥根県水産試験場事業報告
- 29) 那須淑子・他：ぶんせき、1985、No.6
- 30) 梶川、佐野、早栗：中海における垂下養殖かきのへい死原因に関する研究、日本誌 19巻4号 昭和28年
- 31) 中海干拓調査事務所：昭和33年度中海塩分調査報告書
- 32) 倉茂、喜多村：気象集誌第2輯 12(6)、1933
- 33) 日本薬学会：衛生試験法注解、昭和42年
- 34) 梶川、佐野、早栗：中海赤潮に関する研究（予報）中海赤潮の発生機構について、昭和26年
- 35) 梶川、佐野、早栗：中海に発生する赤潮の原因及びその被害対策に関する研究、昭和27年
- 36) 太田 繁：中海における藻貝養殖場の客土効果について、鳥根水試報告（昭和17～28年）
- 37) 気象庁：海洋観測指針 1970年

- 38) 水野篤行：水質底質調査入門、昭和43年、ラテイス
- 39) 吉田、河田、木俣：海洋性硝酸化成細菌に関する研究Ⅵ、日本誌 33巻 5号 昭和42年
- 40) 佐野 茂：鳥取県中海における牡蛎養殖に関する研究、鳥取水試研究報告No.37 - 1、昭和37年
- 41) 古賀正三：生物化学電池、科学 33巻 7号
- 42) 喜多村一男：中海調査、浜田測候所、昭和10年
- 43) 田村 正：浅海増殖場の環境Ⅰ、水産増殖叢書、15 - 1、昭和42年
- 44) 海洋観測指針、気象庁、1970