

霞ヶ浦の富栄養化に関する研究 - III

— 窒素収支について —

浜 田 篤 信 ・ 津 田 勉

目 次

1. 透明度の変化
2. 漁獲量と漁獲物組成の変化
3. エビ・ハビ類の増殖に伴う底土からの回帰栄養塩の増大
4. N収支モデル
5. 各項目の検討
 - 1) 混合の条件
 - 2) 湖水中のN濃度 (C)
 - 3) 回 帰 量
 - 4) 堆 積 量
 - 5) 下流域からの逆流
 - 6) 水圏への負荷
6. N 収 支
7. おわりに

霞ヶ浦で藍藻類の一種 *Microcystis* が大発生し、養殖ゴイのへい死などの漁業被害が発生したのは昭和48年であった。その後49、50年夏季にも程度の差はあれ藍藻類の「水の華」が形成され、特に高浜入や土浦入の一部では水面にアオコの堆積がみられた。このようなことからアオコの発生が昭和48年を境として急激に上昇してきたような印象を受けるのであるが、湖心部附近でも昭和43年の夏～秋季には透明度で0.4 mという低い値が観測されており、この頃から大発生の兆しがあったようである。また明治43、44年の観測結果¹⁾をみると *Microcystis* や *Anabaena* が「甚多」とあり、この頃から富栄養化が進んでいたようである。しかしながら厳密にこれらの動向をしらべれば富栄養化の進行速度も単に時間の経過とともに一定の割合で大きくなるのではなく、水象・気象・人口・経済活動・浴水対策としての河川工事等様々な要因で小刻みに変動しているものと思われる。そして富栄養化の動向を確実にとらえ、それをひき起している要因を分析することから将来予測や防止対策が生

まれるものである。ところが富栄養化現象という概念は、長い年月の中で徐々に進行しているものであるからその間の資料に乏しく、全体像さえ掴みにくいのが現状である。

霞ヶ浦の富栄養化に関する調査・研究も最近になってやっと始められたばかりであるので、資料の蓄積が少なく十分に機構の解明にまで至っていない。

一般に湖沼における生物生産は第1次生産者である植物プランクトンから始まり、魚類生産にまで至っている。したがって魚類生産は富栄養化の指標ともみなされる。霞ヶ浦・北浦は本部でも有数の漁業の盛んな水域であり、このため比較的古くから各種の調査が行なわれ、漁獲統計も整備されている。いわば富栄養化のことを考えるための資料としてはもっとも豊富である。

本報告ではこのような観点に立って主として昭和30年以降の湖沼観測結果や漁獲統計を中心に水質と魚介類の動向を比較しながら、霞ヶ浦のN収支を考えることにした。

1 透明度の変化

NやPの測定が昭和40年以降になって始められたのに対し、透明度は明治43年の記録¹⁾が残されている。これによれば、8月・9月の透明度は高浜入の羽生地先では5尺6寸～6尺5寸、志戸崎地先では3尺～5尺、土浦八沖宿地先で3尺8寸～6尺、北浦では3尺2寸～4尺7寸程度と記載されている。その後大正年間では資料が見当らず、昭和23年になって桜井²⁾によって再開されている。昭和23年沖宿の透明度は8月・9月で0.45～1.6m、1・2月には1～3.3mであった。その後の調査は茨城県霞ヶ浦北浦水産事務所・茨城県内水試によって測定されている。水産事務所の調査によれば昭和25年の透明度は木原沖で0.7～1.4mであった。昭和30年以降の透明度については、昭和49年度の本誌²⁾でふれたとおりであるが、昭和25年頃のほうが、昭和30年代に比較して低い傾向にあり、またばらつきも小さいようである。昭和46年までの木原沖の透明度はすでにまとめて報告したので、ここではその後の値と未発表の36・37年の結果をまとめて第1表に示した。また昭和30年以後の透明度の年平均値、および7・8・9・10月の中の最小値を第1図に示した。第1図によれば最小値は昭和25年～42年の間では顕著な低下は認められず0.6～1.0mの間を不規則に変動しているが、昭和43年には0.4mという低い値が観測され、この頃から48年にかけて急激な低下がみられる。そして48年には観測史上最低の0.2mという数値が観測されている。

また平均値について見ると最小値とはほぼ同じような周期を示しながら変動しているが、最小値に比較すると変動の幅が小さく、特に48年度以降では最小値の低下が顕著であるのに対し、平均値ではそれ程の低下は見られない。しかし昭和30～50年の20年間の流れのなかで眺めてみると、昭和40年頃までは比較的安定していたものが、その後低下していると言えそうである。

透明度の最大・最小値あるいは平均値は、夫々意味を持つものであり、最大値は植物プランクトンの繁殖の少ない時期の値であろうし、最小値は逆に最大限に植物プランクトンが繁殖していた時期の値である。したがって夏期には栄養塩の大部分が植物プランクトンの形で透明度にとらえられるが、冬季には逆に分解されて透明度にかゝって来ない部分が多くなることも考えられる。しかし最近のよ

第1表 霞ヶ浦木原沖における透明度の変化

年	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	平均
明治 39				1.6			1.7		1.7				沖
44						1.7		1.6			2.3		宿
45		1.7											沖
昭和 25	0.8	0.7	1.0	1.0	1.4	1.1	-	1.0	1.4	1.4	1.4	1.4	1.15
30	-	-	-	1.4	1.5	1.5	1.3	1.0	1.5	0.9	1.8	2.6	1.53
31	2.1	1.7	1.0	1.0	1.4	1.1	1.0	1.2	0.7	1.0	1.5	1.7	1.21
32	1.6	1.5	0.8	1.2	0.8	1.0	1.5	1.3	1.4	1.7	1.6	1.7	1.35
33	1.2	1.3	1.5	0.8	1.5	1.2	1.6	0.9	0.5	0.6	2.5	2.0	1.43
34	-	-	2.7	1.1	0.9	1.2	1.8	1.8	0.8	1.5	1.7	2.0	1.46
35	2.5	1.2	1.0	1.6	1.5	1.2	1.4	1.3	0.9	1.3	1.5	1.5	1.31
36	1.5	0.8	1.2	1.1	1.2	1.2	-	0.6	-	1.1	1.2	1.6	1.15
37	-	1.7	1.6	1.1	0.9	1.2	0.85	0.85	1.1	1.1	1.1	1.5	1.18
38	1.4		1.7		1.0	1.2	2.0	-	0.9	1.5	1.3	1.3	1.37
39	1.6	2.2	1.0	1.0	0.6	1.2	1.8	1.1	-	-	1.7	2.0	1.26
40	0.9	-	1.0	1.0	1.2	1.0	2.0	1.8	1.0	1.3	1.3	1.1	1.39
41	1.6	2.0	-	-	0.9	1.1	1.4		1.2	0.9	1.4	1.5	1.13
42	1.6	1.2	-	-	1.6	1.3	1.5	1.3	1.0	1.1	1.2	1.2	1.20
43	-	-	-	-	1.0	1.4	1.2	0.4	0.4	0.4	0.5	0.9	0.78
44	2.1	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	-	1.1	1.3	1.1	1.2	1.7	1.17
45	2.4	0.9	2.0	2.0	1.4	1.4	1.3	0.7	0.7	0.6	0.9	0.9	1.20
46	1.1	1.2	0.7	0.7	0.7	0.8	0.7	0.8	0.6	0.5	0.6	2.0	0.90
47	1.7	0.8		1.1	-	0.8	1.8	1.1	1.0	0.6	0.6	1.0	1.03
48	1.7	0.8	0.7	0.7	0.75	0.5	1.6	0.2	0.9	1.5	1.0	0.95	0.94
49	0.9	1.6	1.5	1.3	0.9	1.0	0.8	0.5	0.7	0.9	1.1	1.9	1.09
50	1.4	1.1	1.4	0.9	1.0	0.95	1.1	0.8	0.6	0.6	0.75	1.1	0.97
51				1.0	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9	0.8	0.45	0.85	

うに植物プランクトンの繁殖が多くなると比較的短期間に増減がおこったり、47年のように冬期間に緑藻の一種 *Closterium aciculare* が増殖する場合も見られる。このような状態になれば透明度だけから富栄養化現象の全体を論ずることはできないのは当然である。

しかしながら、資料がもっとも多く、過去30年位からの検討が可能となる利点も見逃せない。勿論透明度の測定値をどのように整理するかという問題もあるが、魚類生産との関係から富栄養化を論ずるという大まかな研究であるから、ここでは平均値をとりあげることとする。

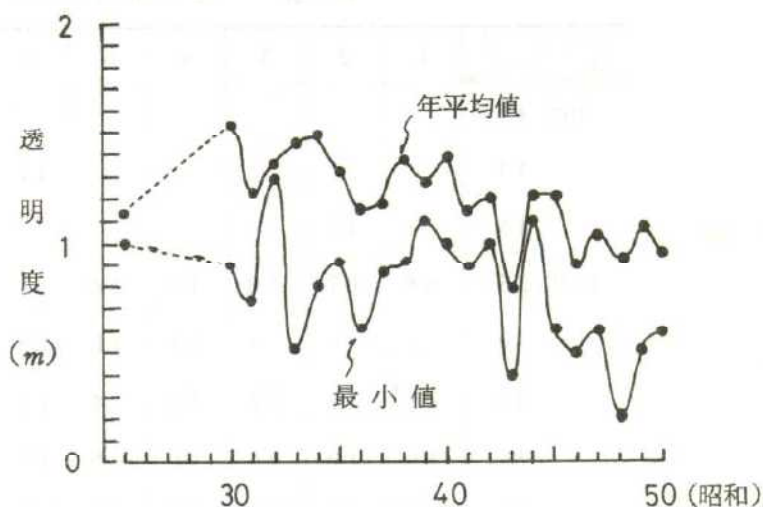
2 漁獲量と漁獲物組成の変化

霞ヶ浦北浦の総漁獲量は昭和30年から45年まで毎年4.6%づつ増加し、昭和46年には16,000トンに達している。昭和43年以降は横ばいの状態で、

増加する気配は見られない。ここで総漁獲量の増加の内容をみると、昭和33年から農林統計表に登場してくるヤマトシジミの占める比重が大きい。そこで貝類を除いた漁獲量について見ると昭和40年頃までは5,500～7,000トンで比較的安定していることがわかる。ところが昭和41年頃からは増加傾向が見られ昭和43年以降は12,000トン前後で安定している(第2図)。

また漁獲物の内容についてみると30～39年の間は、プランクトン捕食者であるワカサギ・シラウオが1,000～2,000トンの範囲で変動しているのに対し、40・41年は2,800トンという史上最大の漁獲高を示している。そしてそれ以降は急激な減少を示し、昭和43年以降は400～1,000トンの間を変動するようになった。

ワカサギ・シラウオの減少と同じ時期からそれ以外の魚類、特にハゼ・エビ・コイ・フナ等の著し



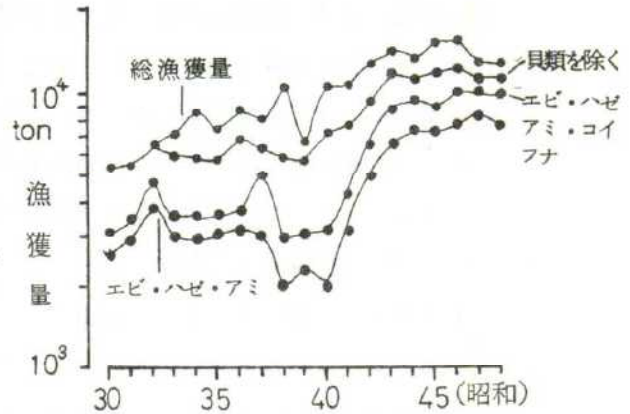
第1図 透明度の変化

第2表 漁獲量の変化

	大正5	10	昭和1	5	10	15	20	25	45	46	47	48
ワカサギ	2694	1826	1814	1969	1680	2134	2171	1005	772	425	606	238
シラウオ	486	516	639	298	290	141	127	290	342	175	200	160
合計	3180	2342	2453	2267	1970	2275	2298	1295	1114	600	806	398
エビ	547	579	541	270	414	566	167	406	2348	4011	3911	3383
ハゼ	647	447	492	224	191	248	281	311	2960	3042	2155	3688
コイ	222	296	173	167	351	110	53	179	682	869	785	1067
フナ	332	366	383	352	241	339	182	675	1521	1587	1628	1484
イサザアミ	325	3272	2555	2130	1834	1579	1192	1969	1843	879	1400	866
合計	2093	4960	4144	3143	3031	2842	1875	3540	9254	10388	10879	10488

い増加がはじまっている。この増加の始まるのは昭和41年からであり、前述したように43年以降は単一種の漁獲量は大きく変動しているが貝類を除く総漁獲量が一定であるので減少魚と増加魚とは相関があることになる。

一方透明度について平均値をとりあげて見ると、昭和40年以前は1.1～1.5 mの間を変動しているが、41年以降は低下の傾向が見られ0.7～1.2 mとなっている。溶存酸素量の飽和度が昭和40年を境としてそれ以降急激な増加を示していることはすでに外岡等²⁾が報告している。

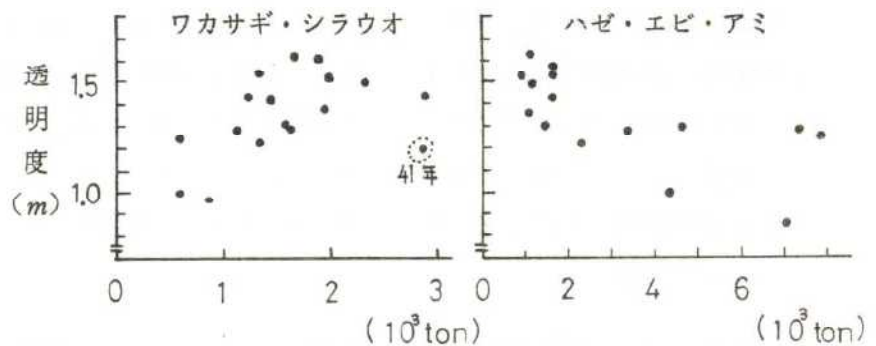


第2図 漁獲量の変遷

このように見てくると昭和30～40年と43年以降の二つの比較的安定した生態系があって昭和41、42年は過渡的な状態と見放すことができそうである。

そこで30～40年のワカサギ・シラウオ中心の生態系がどのような原因によって昭和43年以降のハゼ・エビ・アミを中心とする生態系に移行したかを解明するのが第1の課題となる。

普通環境と生物群集は密接な関係を保ちながら変化している。この関係を透明度と漁獲量に代表させて第3図に示した。透明度が低下して、言い換えれば植物プランクトンが多くなると、ハゼ・エビ・アミ・フナ・コイの合計は増加し、ワカサギ・シラウオは逆に透明度が低下すると減少している。



第3図 漁獲量と透明度の関係

このような現象の説明として水質の悪化(=透明度の低下)によってワカサギ・シラウオが淘汰され、水質の悪化に強い抵抗力を持つハゼ・エビ等が生残ったという見方がある。しかし水質悪化が魚類の生存をおびやかすというような場合、昭和48年の夏期に見られたように溶存酸素量の低下が問題となるものと考えられる。霞ヶ浦の魚類の酸素抵抗については表層へ移動することのできるワカサギ・シラウオに対し、湖底で生活しているエビ・ハゼ類はむしろ低酸素の影響を受けやすいといわれている⁴⁾。またワカサギ・シラウオが減少し始めるのは昭和42年・ハゼ・エビ等が増加し始めるのが41年からで、この時点では植物プランクトンの増殖が顕著でないことは第2図から明らかであるし、魚類の代謝異常をひきおこす程の溶存酸素量の低下も見られない。また富栄養化が急速に進行した諏訪湖ではワカサギ資源は減少していない。

霞ヶ浦のワカサギについて資源学的に解析した研究によれば、ワカサギの減少は乱獲によるものであったことが報告⁵⁾されている。すなわち、昭和40年には帆びき網漁業の一部が、41年には多

くの漁船が動力びきに転換したが、動力びきは帆びき網漁業に比較して漁獲強度が2倍程度に高く、操業に要する経費も低廉であったので、努力当りの漁獲量が低下してもなお経済的に操業が可能となって資源量が低下する傾向にあった。特に漁期末期の残存資源量が帆びき網漁業時代に比較すると低く、したがって産卵量も少なく翌年の資源量を減少せしめたと見られている。

次に、エビ・ハゼ・アミ・コイ・フナ等の増加についてであるが、この点については、本誌 No1 1号⁽⁶⁾でふれたところであるが、第4図に示したようにワカサギ・シラウオが1トン減少するとエビ・アミ等が2.8トン増加する。この関係は単なる餌料の奪いあいだけでは説明できるものではない。何となれば、動物プランクトン4gはワカサギ・コイ・ハゼいずれについてもほゞ1gに転換するからである。言い換えれば、ワカサギ・シラウオが減少して動物プランクトンが余っても、それによって増加するハゼ・フナ等はワカサギ・シラウオの減少分に相当する量だけしか増加しない筈で、残りの1.8トンは別の要因によって増加するものと考えざるを得ない。もう一つの原因として考えられるのは、プランクトン食性魚であるワカサギ・シラウオによるエビの幼生であるゾエア・アミおよび仔稚魚の捕食の問題である。すなわち、ワカサギ・シラウオの減少によってエビ・アミ・仔稚魚の生残量が増加した結果、これらの漁獲量が増加したのではないかと考えられる。このように考えてくると第3に次の点が問題となる。

エビ・アミ・ハゼ・コイ・フナが増加し、ワカサギ・シラウオが減少するとなぜ透明度が低下するのか、植物プランクトンの増殖が促進されるかという点である。

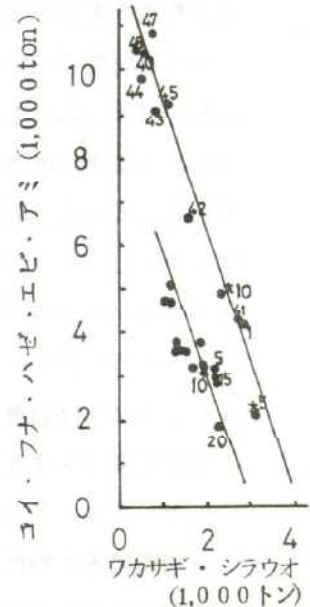
3 エビ・ハゼ類の増殖に伴う底土からの回帰栄養塩の増大

普通、湖沼への流入負荷という場合には、流入する物質をその形態の如何にかかわらず一括して取り扱っている。ところがここでは植物プランクトンの増殖ということの問題にしているので流入負荷を植物プランクトンあるいは水圏に対する負荷と流入後比較的短時間の内に沈澱するもの、地圏への負荷に分けて整理して考える必要がある。

このような考え方に立てば、水中に浮遊しているプランクトンを捕食しながら生産が行なわれるワカサギ・シラウオでは、プランクトンが体内にとり込まれて代謝されてゆく過程で体外に排泄されるNは70%が $\text{NH}_4\text{-N}$ であり⁷⁾、残りの大部分も水溶性のものと考えられるから、再び水中に溶存することとなり、ワカサギ・シラウオが生産されることによって水圏の物質収支は殆んど変化しない。

ところがエビやイサザアミのように主としてデトリタス等の湖底の側にある餌料を摂取して成長しているものにあつては、それから生産される過程で水中に $\text{NH}_4\text{-N}$ を排泄するから地圏から水圏へNが添加されることになる。

Nについてみれば魚類のN含有量は魚体重の約2.5%であるから40トンの魚類を生産するのに5



ワカサギ・シラウオとコイ・フナ・ハゼ・エビ・アミその年間漁獲量の関係
(数字は昭和年)

トンのNが必要で、そのうち4トンが水中へ排泄されることになる。したがってベントスやデトリタスを摂取しながら成長してゆく魚類では10トンが生産される過程で1トンのNが地圏から水圏へ添加されることになる。そこで魚種別の食性が明らかにされれば魚介類によってもたらされる底泥からの回帰量をそれらの生産量から求めることができる。しかし魚の食性については不明の点が多い。特にハゼ類やフナ類については霞ヶ浦には数種が生息しており食性も異なることが考えられるし、成長段階でも多少の差が生ずることも考えられ非常に複雑である。そこで、こゝではこのような仮説を吟味する目的で次のような実験を行なった。

霞ヶ浦の湖心部で採取した底泥を45cm×30cmの水槽に泥深が5cm位になるように入れ、数日間注水しながら放置し、その後注入水と水槽の出口附近のNH₄-Nの測定を行ない、その差に流量を乗じて底泥からのN回帰量を求めた。次にこの水槽の中にワカサギ・チチブ・テナガエビおよびイトミミズを入れ同様にNH₄-Nを測定した。こゝで測定されたNH₄-Nは泥からの回帰量と動物の標準代謝量が含まれているから測定値から両者を差し引いた値を第3表に示した。底泥からの回帰量は別報で述べた通りで⁽⁸⁾、約0.4/m²・dayであった。

ワカサギを底泥を敷いた水槽に入れてもNH₄-Nの増加は含んど見られないが、チチブやテナガエビでは顕著な増加を示している。

またイトミミズではチチブやエビ程ではないが明らかなNH₄-N排泄量の増加が認められた。

このような実験においてNH₄-Nの増加が魚から排泄されたものか、あるいは泥の中に存在していたものが魚の動きによって溶出してきたものであるかは問題であるが、簡単にガラス棒で泥を継続的に攪拌した結果では顕著な溶出は認められなかった。したがってむしろ魚から排泄されたと見て差しつかえないように思われる。

この実験は、泥の面積と魚の量との関係で現場の条件を満しているかどうか等の問題もあるが、定性的にはこゝにあげた仮説が支持されたと考えてよからう。

第3表 動物の差異によるN回帰量の増加

動物名	NH ₄ -N mg/g・day
ワカサギ	0.038
チチブ	0.94
テナガエビ	1.42
イトミミズ	0.48

4 N収支のモデル

霞ヶ浦の物質収支を論ずる場合、NをとるかPについて考えるか、更にはこれとは別の物質を取りあげるべきか、あるいはそれらを有機的なつながりの中で取り扱っていくべきか等が問題となる。夫々長短があると思われるが、測定値が多いという点と霞ヶ浦の植物プランクトンの発生に大きな影響を与えていると見られていることからNをとりあげることにした。

N収支のモデルを考える場合もっとも大きい要素は流入・流出である。流入については一部沈澱した物質については堆積と回帰を考えなければならない。また空中窒素の固定と空気中への逸散もある。

しかし、それらの各々について明らかにしてゆくことは現段階では容易ではないが、現段階で考えられる方法でN収支のモデルを考え量的な検討を加えることにする。

空中窒素の固定については藍藻類の数種について確認されているが、現在のところ霞ヶ浦産のもの

については窒素固定は確認されていない。

また空中放散については脱窒とNH₃とが考えられるが、赤野⁹⁾や中島・手塚¹⁰⁾の実験から両方も殆んど問題にならない程度とみてさしつかえなからう。また漁獲による回収は考えないことにした。

いま、湖水はよく混合されており均一であると考えると物質収支は第5図のとおりとなる。流入河川および下流域からの流入水量を夫々Q_I, Q_T, 窒素濃度をC_I, C_T, 底泥からの回帰をCr, 泥面積をS, 底泥中の天然餌料によって魚介類が生産される過程で生ずる底泥からの回帰をCf, 水容積をVとすれば

$$V \frac{dc}{dt} = Q_I C_I + Q_T C_T + SCr + Cf - (C_I + Q_T) C$$

$$C = \left(C_0 - \frac{Q_I C_I + Q_T C_T + SCr + Cf}{Q_I + Q_T} \right) e^{-\frac{Q_I + Q_T}{V} t} + \frac{Q_I C_I + Q_T C_T + SCr + Cf}{Q_I + Q_T}$$

..... (1)

となる。

こゝでは主に年単位で考えを進めることとするが、この場合にはQ_I = 13.8億トン, V = 8億トンとみられるから比較的短時間の間に平衡に達するものと考えられる。したがって(1)式でt → ∞とおいた次式について考えることにする。

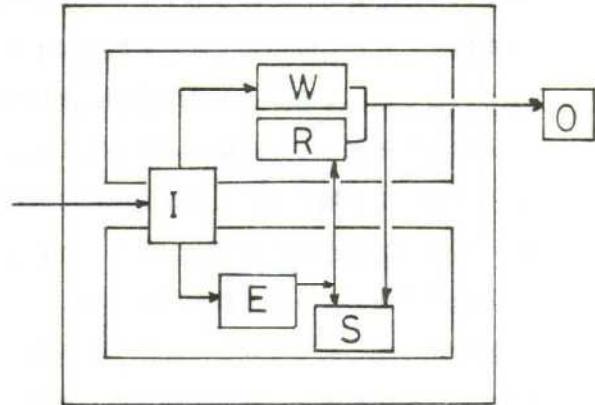
$$C = \frac{Q_I C_I + Q_T C_T + SCr + Cf}{Q_I + Q_T}$$

..... (2)

5 各項目の検討

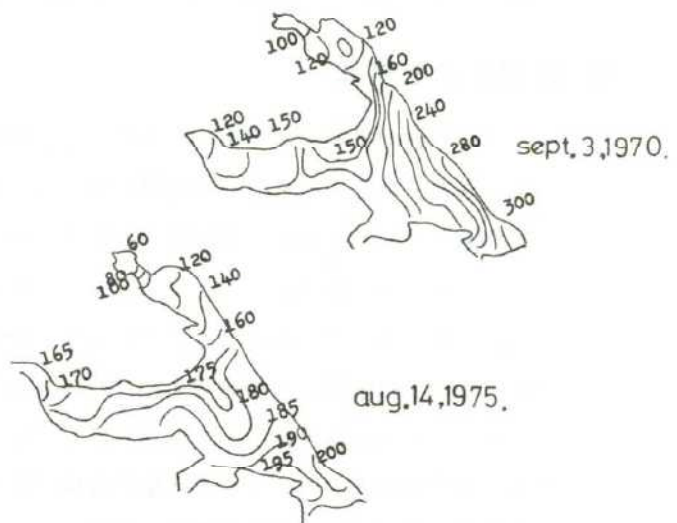
1) 混合の条件

さきに述べた霞ヶ浦の物質収支は完全混合を前提としている。しかし霞ヶ浦は地形も複雑であり、どの程度の混合が行なわれているかを知っておくことは(2)式を適用してゆく上で重要である。第6図は昭和45年9月, 50年8月に霞ヶ浦の塩素量の測定を行ない分布図を描いたものである¹¹⁾。この年代ではすでに常陸川水門が操作されているが、牛堀附近



I : 流入負荷 E : 沈澱 R : 回帰
W : 水圏への負荷 S : 堆積 O : 流出

第5図 物質収支モデル



第6図 塩素量の水平分布(表層)

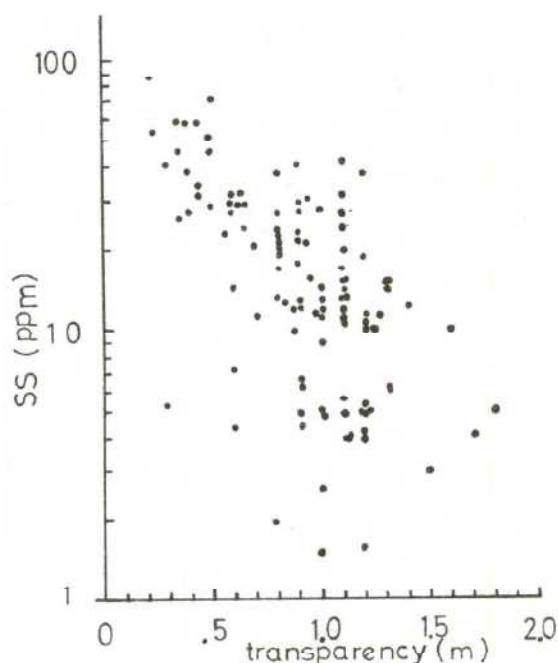
では300 ppmであるが、湖心に向うにしたがって減少していき、玉造町浜、出島村田伏、志戸崎美浦村大山、桜川村西ノ州を結ぶ線が170 ppmとなっている。この線より内側について見ると土浦入では土浦市大岩田～沖宿の間でも140 ppmであり比較的均一に混合されている。また高浜入では玉里村大井戸と出島村安飾を結ぶ線が120 ppmで奥部に行くにしたがって漸減している。また昭和50年8月14日の上層の塩素量の分布は湖尻で200 ppmであるが湖奥部の沖宿附近で170 ppmと奥部と湖尻部との差が比較的小さい。勿論、土浦入・湖心部・高浜入というように水域別に検討することが望ましいし、常陸川水門が閉鎖されている場合には塩素量だけで混合の度合を推測することは危険であり、例えば珪酸塩の分布等も参考にしなければならないが、昭和30年代の観測地点が土浦入に限られている関係から、そのような操作を踏まずに論を進めることにする。したがって導き出された結果については、こうした混合の条件を考慮して判断しなければならない。

2) 湖水中のN濃度 (C)

霞ヶ浦におけるNの測定が継続的に開始されたのは昭和47年以降である。ここでは、できる限りさかのぼって資料を集めなければならないので透明度を採用することにした。

透明度とSSの関係は外岡等²⁾の報告があり $SS = 60e^{-1.26Tr}$ の関係がある。しかし変動の幅が大きく、また年や季節によっても異なるようで50年6～9月の測定値について両者の関係を求めると第7図が得られる。外岡の報告と比較するとやや勾配が大きくなるようであるが、ここでは外岡の値を採用することにした。

つぎにSSと全N、SS中の全窒素量の関係である。全NとSS中のNとを同時に測定した例としては昭和50年6月3日～10月



第7図 透明度とSSの関係 (50年6～9月)

29日の間に週一回の観測結果がある⁽²⁾。このうち木原と三又沖のSSとSS中のNの関係を図示したのが第8図である。SSとSS中のNの関係は、もし植物プランクトンのN含有量が一定であれば直線を示す筈であるが、実際には植物プランクトンの増殖過程で異なるように変動がある。第8図では平均値についてみるとSS中のNは4.4%である。またSS中のNと全窒素量の関係を図示したのが第9図である。全Nが1 ppm以下の場合にはSSとして存在するNは少ないようであるが、全Nが増加して2 ppm以上になるとSSとして存在するNが増加し、60%以上を占めるようになる。このようなNの存在形態の変化がどのような原因によっておこるかは興味深い問題であるが、ここでは簡単のために0.5～2 ppmの間で1/2がSSとして存在することに注目して、

$$N (\text{ppm}) = 5.28 e^{-1.26Tr}$$

より全Nを推定することにする。勿論、これまで述べてきたように、透明度からNを導びくことは、その絶対値だけを取りあげれば多くの問題がある。しかし本報告では比較的長い時間を取りあげて相対的な見方、時間の経過とともにどのような傾向で変化してきたかという点を重視し、このような操作を行なったが十分意味をもつものと考えられる。

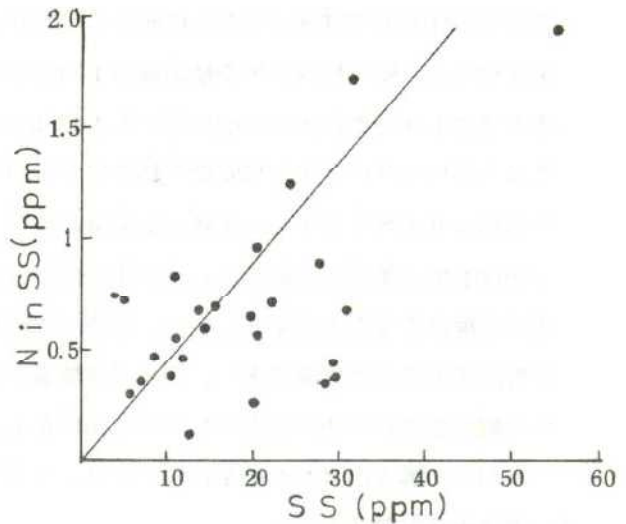
3) 回 帰 量

本報告では回帰を2つに大別して取扱うことにする。一つは先にも述べたように底泥中に棲息している餌料を大型の動物が捕食し、代謝を行なう過程で地圏より水圏へ移行するものである。こゝで大型動物とは漁獲の対象となるようなものを指しており、イトミミズやユスリカは含まれない。これらを量的にとりあげようとする場合、底泥中の餌料を利用する動物の現存量や生産量を把握し排泄量を求めればよいのであるが、現存量や生産量は勿論のこと各種動物の食性すら十分に明らかにされていない。

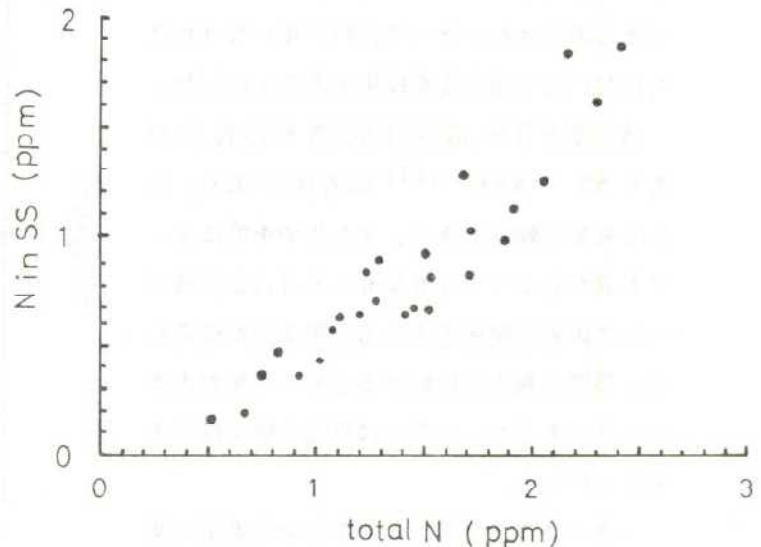
そこで、こゝではエビ・アミ・

ハゼ類を底泥中の餌料を摂取するものとし、その年間漁獲量を生産量と見做して定量化することにした。漁獲量10トンは1トンのNに相当するものと見なした。

次に微生物による回帰であるが、これについては別報で述べたとうりである⁸⁾。すなわち1.6 ton/dayの窒素が回帰するものとみられる。この値にさきのエビ・アミ・ハゼ類の生産に際して生ずる損失量を農林統計表から漁獲量10トンがN1トンに相当するものとして両者を合計して地圏からの回帰量として第4表に示した。これによれば、ハゼ・エビ・アミの漁獲が増加する前の昭和30~41年の回帰量は2~2.5 ton/dayであるが、以後増加して4~6.5 ton/dayとなっているものと推定される。



第8図 SSとSS中のNの関係



第9図 total NとSS中のNの関係

第4表 透明度，回帰量等の変化

項目	昭和30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
(1) 透明度 (m)	1.53	1.21	1.35	1.43	1.46	1.31	1.15	1.19	1.46	1.26	1.39	1.13	1.20	0.78	1.17	1.20	0.90	1.09	0.94
(2) 推定 N (g/m^3)	0.77	1.09	0.96	0.87	0.84	1.01	1.24	1.18	0.84	1.08	0.92	1.28	1.16	1.98	1.21	1.16	1.70	1.37	1.62
(3) $3.78 \times 10^6 \times N$ (ton/day)	2.91	4.12	3.63	3.22	3.02	3.82	5.29	4.46	3.18	4.08	3.48	4.84	4.38	7.48	4.57	4.38	6.43	5.18	6.12
(4) 回帰 N (ton/day)	2.32	2.42	2.85	2.48	2.45	2.41	2.77	2.38	2.18	2.23	2.18	2.55	2.98	3.55	3.68	3.53	3.72	3.05	3.77
(5) (3)-(4) 水圏への 負荷 (ton/day)	0.59	1.70	0.78	0.74	0.57	1.41	2.52	2.08	1.00	1.85	1.30	2.29	1.40	3.93	0.89	0.85	2.71	2.13	2.35

4) 堆積量

第1報で述べたように昭和30年以降の堆積速度は $6mm/year$ と見積られている²⁾。これは湖心部についての値であって、この値を全体にひき伸すことは困難であろう。また泥のN含有量についてもすでに述べたところである。

こゝではN含有量 $5mg/g$ ，堆積速度 $6mm/year$ ，堆積に関係する有効湖面積を砂及び砂泥の部分を除く 66.2% ⁽³⁾として堆積量を求めることにする。また泥の比重は 1.3 ，水分含有量は約 80% であるから堆積量は

$$5mg \times 0.2 \times 0.6 \times 10^4 \times 1.3 \times 0.662 \times 200 \times 10^6 \\ = 1033 ton/year = 283 ton/day$$

となる。

5) 下流域からの逆流

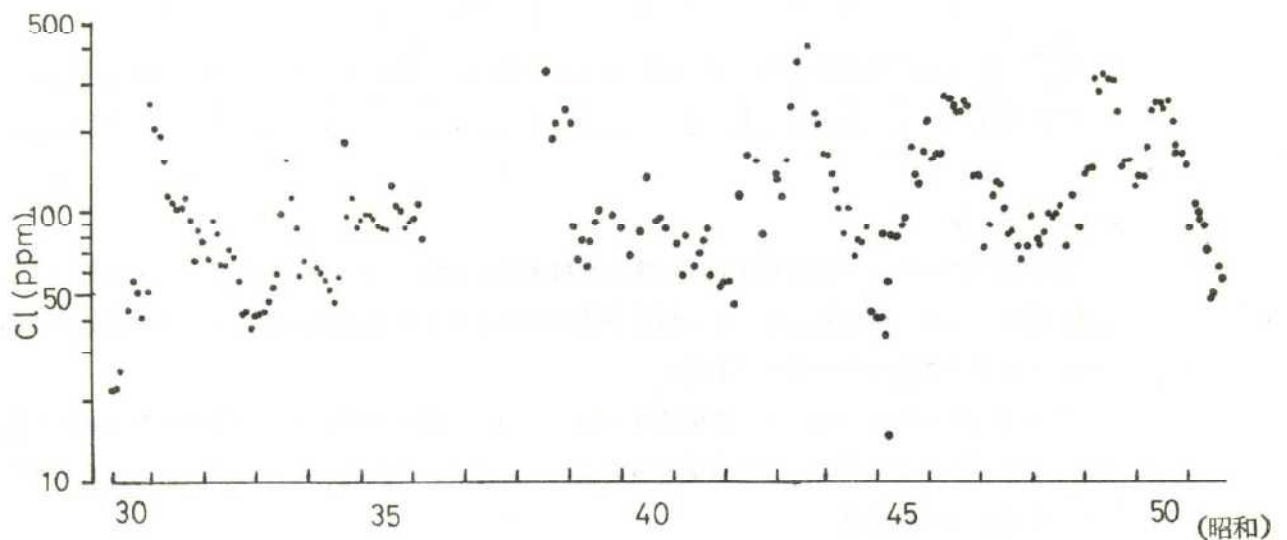
霞ヶ浦には桜川・恋瀬川・園部川・小野川，北浦にあっては巴川等の流入河川があり，一方流出路としては常陸利根川が唯一であって，水面勾配は洪水時でも $1/20,000$ という緩流で洪水の疎通が極めて悪く，利根川水位が高い場合には相当量の逆流をおこし湖面を上昇せしめ洪水を発生せしめた歴史がある。それだけでなくも下流域では平均海面に較べて河川固有流の水面が低いため潮汐に伴う逆流現象が常にみられていた。そしてタイダル・フラッシュに伴なってその影響水域では，水質が塩水化し，これを利用する農業用水，生活用水，工業用水等の使用面に塩害をひき起し，これが端著となって常陸川水門が建設されたことは周知の事実である。このことは昭和30年代に入ってから利根川下流域の河川工事や利水による河川固有流量の減量等によって強調されてきたものである。

これらの下流域での環境変化は漁業面でも確認することができる。すなわち霞ヶ浦では棲息していなかったヤマトシジミ（棲息していても資源量が極めて少なく漁業の対象にならなかった）が漁

獲統計面では昭和33年から農林統計に記載され、昭和43年からは許可漁業として制度化され相当の漁獲をあげてきたことでも知ることができる。

N収支モデルで述べた(2)式によれば、この逆流量とそれが湖水と混合する割合が明らかにならなければ精度をあげることができない。

第10図は昭和30年以後における霞ヶ浦木原沖の毎月の塩素量の測定値を示したが、40~500 ppmの幅を変動している。もし逆流してくる水の塩素量が一定であり、この間の上流からの流入量及び湖内での混合状態が把握されれば、実質の逆流量が求められることになるが、下流域の塩素量が利根川流量、霞ヶ浦流出量・潮汐等極めて複雑な要素によって変化するので計算することは困難である。したがってN収支モデルの中での Q_T は無視して計算することにする。



第10図 塩素量の変化(木原沖)

6) 水圏への負荷

本報告では物質収支を(2)式で考えることとしたが、前述したように下流域からの逆流水を考えないと(2)式は次のとおりとなる。

$$C = \frac{Q_i C_i + S_{Cr} + C_f}{Q_i} \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{これより } Q_i \cdot C_i = Q_i C - (S_{Cr} + C_f) \dots\dots\dots (4)$$

となる。

流入量(Q_i)は昭和30~39年の平均値13.8億ton/yearとすれば湖水中のN濃度(C)、底泥からの回帰(S_{Cr})、魚貝類が生産される過程で生ずる回帰量(C_f)はすでに検討してきたので水圏への負荷(C_i)が計算される。ここで C_i は流入してきた物質のうちの可溶性のものや容易に分解されるもので、植物プランクトンに利用され易い物質と考えられる。これを年次別に計算したのが第4表・第11図であるが、全負荷量(Q, C)は昭和40~41年までは3~5ton/dayであるが、それ以後は4.5~8ton/dayに増加しているのに対し、水圏に対する負荷量

($Q_i C_i$) は大きな変動を示しながら増大している。そしてこの増加傾向は指数曲線で増加しており、その増加率は年率で10%程度とみられる。

6 N 収支

これまでに各項目の検討を行なったが、これらの各項目は有機的なつながりをもつものであるから当然全体の物質収支が明らかにされるはずである。

昭和48年のN収支についてみると第4表の数値に堆積量の2.83 ton/dayを加えると最終的に第12図のバランス・シートが得られる。

$Q_i C_i$ は6.12 ton/dayであり、このものが流出することになるが、このうちの38%が直接流入してきたものから由来し、残り62%は回帰によってもたらされるものと推定される。つぎに回帰の3.77 ton/dayと堆積の2.83 ton/dayを合計した6.60 ton/dayが流入負荷中の地圏に対する負荷とみることができる。

したがって全流入負荷量は、この地圏への流入負荷と水圏への負荷2.35 ton/dayを加えた8.95 ton/dayとなる。

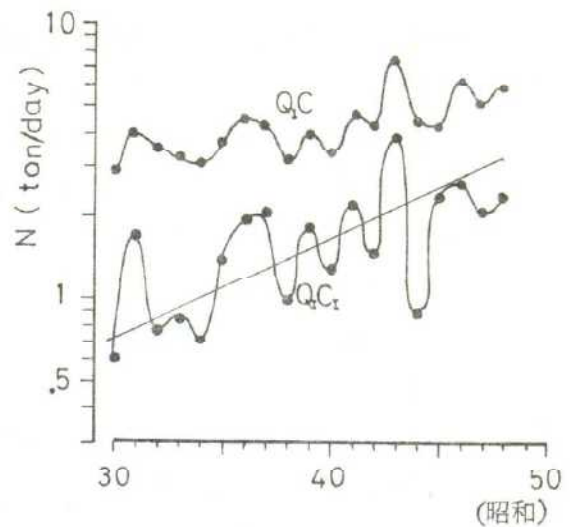
流入負荷の実測値としては国立公衆衛生院による8.7 ton/day¹⁷⁾、公害技術センターによる8.7 ton/day¹⁸⁾があるが、本報告の推定値

は前者に近いといえる。しかしながら、この見積りにおいては下流域からの逆流量を無視して計算を進めてきたので、実際の負荷量はこの数字より上まわることと考えられる。

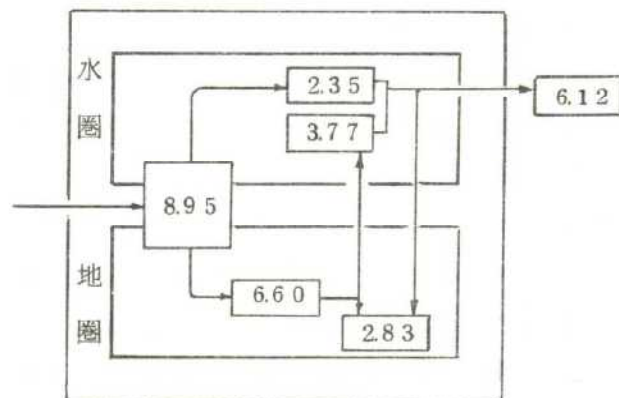
7 おわりに

霞ヶ浦のNに関するバランス・シートを第12図に示したが、植物プランクトンの異常なまでの増殖を根本的に抑制するには負荷量の軽減と回帰量を低下させるという2つの方法しか見出せない。

普通汚濁負荷量の軽減については排水規制や排水処理方式が採用され、回帰量の軽減にはヘドロの



第11図 水圏へのN負荷量の変化



第12図 霞ヶ浦におけるN収支 (昭和48年)
ton/day

浚渫等が考慮されているが、茲では触れない。

一般に漁業は漁獲によって有機物を系外に取り出しているが、漁獲の対象となる生物は環境と深いつながりの中で一つの生態系を形成している。

本報告の推定によれば、昭和48年には水中に存在するNの62%に相当する3.8 ton/dayが回帰によるものとした。そしてこの回帰量は、ワカサギが豊漁であった昭和40年には2.2 ton/dayであり、この間に回帰量は1.6 ton/dayだけ増加している。この増加は前にも述べたようにワカサギ中心の生態系が、エビ・ハゼ類を中心とする生態系へ移行したためと考えられている。したがって、もしワカサギ中心の生態系に復元することができれば $1.6/6.12 = 26\%$ のNを水中から取除くことが可能となる。したがってワカサギ資源の回復が急務といえる。

しかしワカサギ資源の回復には解決しなければならない多くの問題がある。第1はワカサギ資源減少と富栄養化に伴う水質悪化との関係、第2は資源増大のための増殖方法、第3は再び乱獲をもたらさないための漁業管理の方法等である。

第1の問題については、すでに述べたので省略する。

つぎにワカサギの増殖方法についてであるが、現在は卵の移植によって行なわれている。

ところがその効果については、すでに加瀬林も指摘しているようにテナガエビやハゼ類による食害があり、更には孵化仔魚の歩溜も低く、0.5～1.5%程度と見積られている。この歩溜が低い理由は、他魚種による捕食がもっとも大きいと見られている。したがって捕食されない大きさまで飼育し放流すれば効果をあげることができる。この点については、技術的に稚魚の生産技術が開発されており、種苗生産の規模を拡大して継続的な放流を行っていけばワカサギ中心の生態系をとりもどすことができるものと考えられる。

しかし、ここで問題となるのは第3の問題である。すなわち種苗生産及び放流によって解禁前の資源量を昭和40年頃の状態にもどすことができたとしても、漁業社会における潜在的な過剰人口の問題は解決されておらず、乱獲現象をひき起し易い。したがって、霞ヶ浦という場の漁業における総合利用方式の検討と構造対策の重要性を痛感する。勿論、漁民全体の総意による漁業管理は当然のことである。

文 献

- 1) 茨城県水産試験場：霞ヶ浦北浦漁業基本調査報告（1911）
- 2) 外岡健夫他：本誌No.13（1975）
- 3) 桜井徳雄：東京管区気象研究会誌No.2（1950）
- 4) 位田俊臣：未発表資料
- 5) 加瀬林戌夫他：本誌No.11, 1～22（1973）
- 6) 津田勉他：本誌No.11, 35～43（1973）
- 7) 浜田篤信他：日水誌39（12）, 1231～1235（1973）
- 8) 佐々木道也：本誌13（1970）
- 9) 赤野誠之：陸水誌
- 10) 中島拓男他：陸水誌35（3）, 117～123（1974）
- 11) 茨城県内水面水産試験場：未発表
- 12) 外岡健夫：本誌13（1975）
- 13) 水資源開発公団：霞ヶ浦利水影響対策調査報告書
- 14) 外岡健夫他：本誌No.11, 91～113（1973）
- 15) 資源科学研究所：利根川水系水産動物調査報告，昭和38・39年度（1965）
- 16) 茨城県：公共用水域の水質測定結果（1972）
- 17) 霞ヶ浦水質保全専門調査会：霞ヶ浦の水質保全対策についての中間報告（1973）
- 18) 辻本敏雄：茨城県公害技術センター年報No.7, 99～122,（1974）