

(2) 湖沼の沈降物質に関する研究

国立公害研究所 正員 ○ 福島武彦
 国立公害研究所 相崎守弘
 国立公害研究所 正員 大坪国順
 国立公害研究所 正員 村岡浩爾

1. はじめに

湖沼における物質循環の中で湖水中の懸濁態物質の沈降現象は極めて大きな役割を有していると考えられる。すなわち流入河川水中の懸濁態物質、湖内で内部生産された植物プランクトン等の新生堆積物、吹送流・風波により巻き上げられる底泥等は、湖水中での生物・化学的变化とあわせて、その沈降特性により物質特に栄養塩の収支に大きくかかわっている。ここでは富栄養化の極めて進んだ霞ヶ浦を対象に、沈降物質量、沈降物質の物理、化学的特性を調べた結果をまとめるとともに、その物質収支・栄養塩収支への寄与の程度を評価した。

2. 方法

2-1 沈降物質の採集

調査地点は図1に示すように霞ヶ浦で特に汚濁の激しい高浜入に6点、高浜入流入河川中最大の流量を有する恋瀬川（途中より山王川も）の背水域に2点設置した。沈降物の採集の方法は図2に示す通りである。アンカーとブイの間に金かごを固定し、その中に2本のガラス容器を置き、これにたまるものを沈降物とした。沈降捕集容器の形状として円柱形はGardner¹⁾の報告によると捕集率が最も1に近いとされている。またロープのたるみは最小限とし、波による横揺れが金かごに生じないようにした。調査は1～8日間隔で行ない、沈

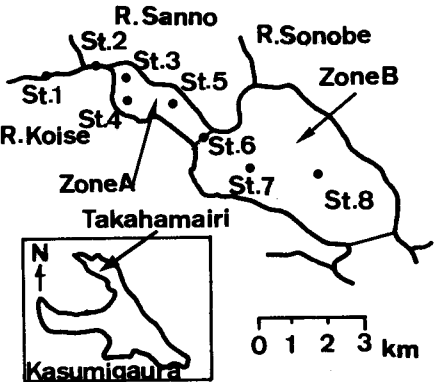


図1. 測定地点

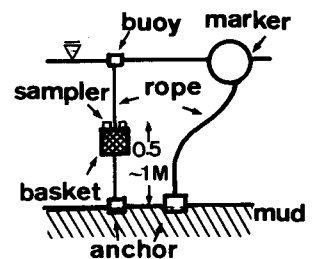


図2 沈降量採集方法

降物、水面下30cmの湖水、コアサンプラー（径4.1cm）による表面2～4mmの底泥を採集した。ここでは1981, 4-9の調査結果を報告する。サンプルの分析項目は以下の通りである。湖水-水温、電気伝導度、SS、クロロフィルa（Chla）、フェオフィチン（Pheo）、POC、PON、T-P、POP。沈降物-乾燥重量、Chla、Pheo（以上は2サンプルづつ）、C、N、P含量（2サンプルの平均）。底泥-Chla、Pheo、C、N、P含量。ChlaはUNESCO/SCOR法、PheoはLorenzenの方法、C、NはCHNコーダー、Pは過硫酸カリ分解でモリブデン酸ブルー法で測定した。

2-2 沈降速度の測定

湖水中の懸濁態物質の沈降速度は、18℃、暗条件のもとで1.2mの沈降筒に湖水を満たし、6ヶ所の採水口より得たサンプルについて、分光光度計（セル長5cm）により吸光度の時間変化から測定した。沈降物、底泥に関しては光透過式粒度分布測定器（高さ10cm）に遠心分離器を組みあわせて測定した。

2-3 湖水中懸濁態物質、沈降物、底泥に含まれる有機物質の分解実験

これは1980年に相崎らの行なったものである。25℃恒温、暗状態、スターラーで攪乱の条件で、湖水（5ℓ）、湖水（5ℓ）+沈降物（乾重1.07g）、湖水（5ℓ）+底泥（乾重5.79g、表面0～1cm）の三者の成分の時間変化を測定した。分析項目はChla、Pheo、各種栄養塩濃度（PO₄-P、DTP、T-P、DIN、DTN、T-N）等である。

3. 結果

3-1 地点特性

各測定地点の地理条件、湖水中懸濁態物質、底泥のChla, C, N, P含量を表1に示す。L_B, T_Bはそれぞれ背水域始端よりの距離、平均滞留時間を示す。懸濁態分の溶存態分を含めた全量に対する比は流入河川水では大きく

変動するが、平均的に見てN10%, P50%程度であり²⁾、湖内では夏季にN, Pとも50~90%である。³⁾表1より湖水、底泥ともにChla, C, N含量は湖心に向けて増加し、Pでは逆に減少傾向がある。湖水懸濁態物質と底泥は密切な関係を有していることがわかる。図3には測定期間中の降雨量、10分間平均日最大風速（以上筑波高層気象台のデータ）、及びSt.1, 5, 6, 8での電気伝導度とSSの変化を示す。背水域では水温、電気伝導度、SS, Chlaが低い。

3-2 沈降特性

図4には湖水中の懸濁態物質、沈降物、底泥の沈降特性を示す。横軸は沈降速度w、縦軸は分光度による累加残存比率q(w)で整理した。図4(1)の中でUPと書いたものは湖水中にアオコが多量に存在して、それが浮上したケースを意味する。この場合には別途カラム実験で浮上速度を測定し、図には沈降物のみによる残留率を示した。

湖水中懸濁態物質の沈降速度は図4に示したSt.5以外もSt.1, 8で3~5ケースを行なったが特別な差異は見られなかった。平均的な沈降速度はq(w)=50%として見ると0.2~1m/dの結果を得た。これに対して沈降物ではSt.1, 2の背水域においてwが大きく、平均で1.5~7m/dのwを有している。また泥では背水域でwが小さい結果を得たが、これはこの地点では砂地がかなりを占めるが、今回の採泥ではこうした部分をカットしたためである。泥のwは沈降物よりさらに大きく、2.5~10m/d程度である。

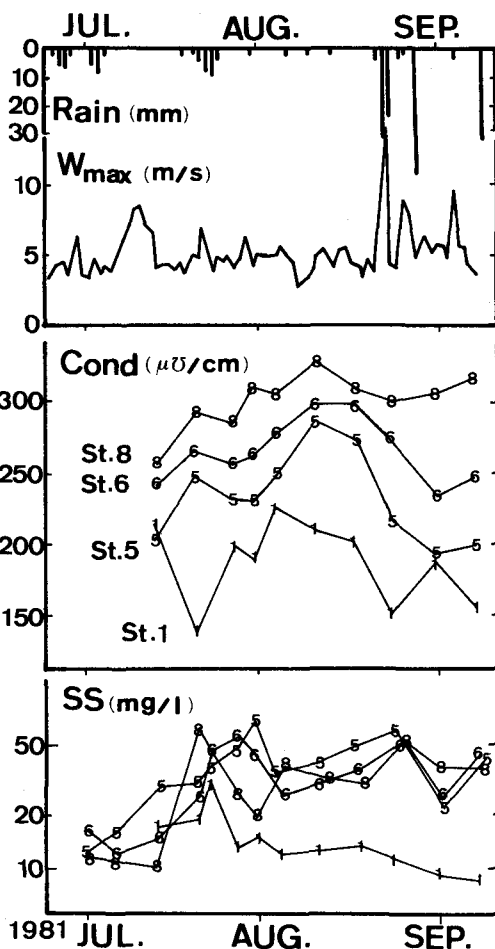
3-3 有機物の分解実験

図5にChlaの変化の様子を示す。クロロフィルaはフエオフィチンを経てさらに分解されるが、UNESCO法ではクロロフィルa、フエオフィチンの両者が測定にかかってくる。この図より5日程度までは保存物質として取り扱うことが可能と考えられる。

表1 地点特性

地点	L _B (km)	T _B (day)	h (m)	湖水中SSの含量(%)				泥の含量(%)			
				Chla ^{*1}	C ^{*2}	N ^{*2}	P ^{*2}	Chla ^{*3}	C ^{*2}	N ^{*2}	P ^{*2}
1	1.8	0.55	2.3	0.22	13.6	1.97		0.0054	2.08	0.21	0.03
2	3.2	0.91	1.8	0.24	13.2	2.00		0.0066	4.41	0.48	0.11
3	4.3	1.82	2.0	0.37	28.6	4.12	0.42	0.013	5.15	0.61	0.13
4	4.9	7.7	2.0	0.37	25.6	3.68	0.41	0.015	5.43	0.69	0.12
5	5.8	16.3	3.1	0.35	27.3	3.83	0.39	0.017	5.38	0.69	0.14
6	7.0	25.9	3.8	0.36	28.5	3.74	0.38	0.016	5.35	0.67	0.14
7	8.3	53.8	3.9	0.35	24.9	3.23	0.41	0.017	6.01	0.79	0.11
8	10.8	147	4.2	0.40	34.0	4.48	0.32	0.016	6.36	0.81	0.10

*1 1981 7.7~9.8 14回の平均 *2 1981 7.21, 8.11の平均
*3 1981 7.21~9.8 8回の平均



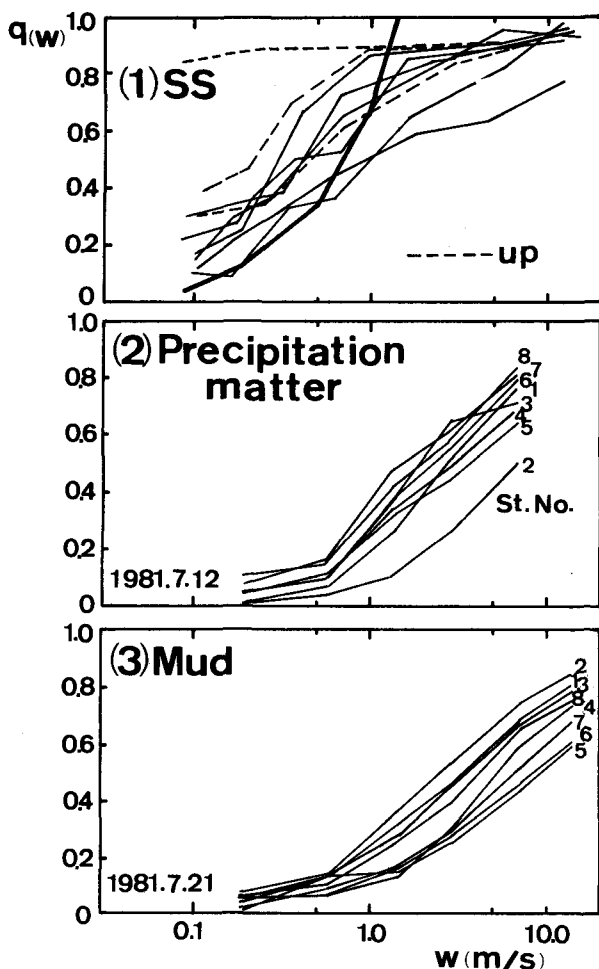


図4 湖水懸濁態物質、沈降物、泥の沈降特性

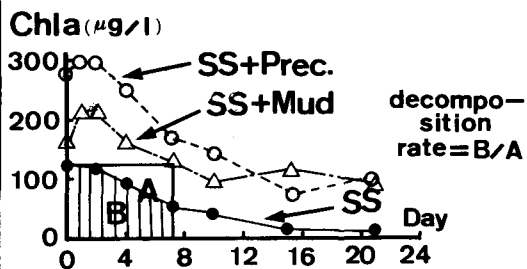


図5 Chla (UNESCO 法) の分解

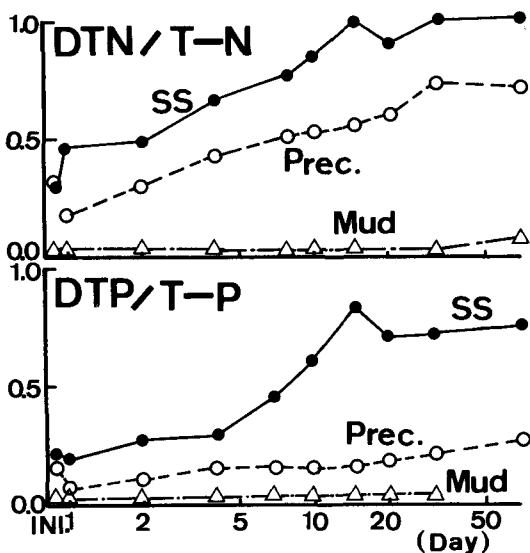


図6 N, P の分解

次に図6にはDTN/T-N, DTP/T-Pの変化を片対数プロットして示す。沈降物、泥は湖水中に懸濁の状態で測定を行なったが、湖水分の変化をさし引くことにより計算した。湖水では初期にN, P中7~8割が懸濁態として存在していたものが、10~20日程度で、8, 9割が溶存態に分解されてしまうことがわかる。また沈降物についてはNはPよりも分解されやすいことがわかる。

3-4 沈降量、新生堆積量、底泥まきあげ量

沈降物は流入河川中に含まれる懸濁態物質、新生堆積物、巻き上げられた底泥の混合したものである。流入懸濁態物質の量は後に考察で述べるように大雨時を除けば夏季には新生堆積物に比べ少なく、また背水域で大部分が一度沈降すると考えられるため、ここではまず沈降物を新生堆積物と巻き上げ底泥に分離することを考えた。1980年調査⁴⁾や表1の値から沈降物は底泥と湖水懸濁態物質の中間の組成を有していることがわかる。このため図7に模式的に示すようなモデル1, モデル2を考えた。ここでRは乾重量, cは保存物質の含量, S, P, Mの上ツキ添字は湖水, 沈降物, 底泥を意味する。

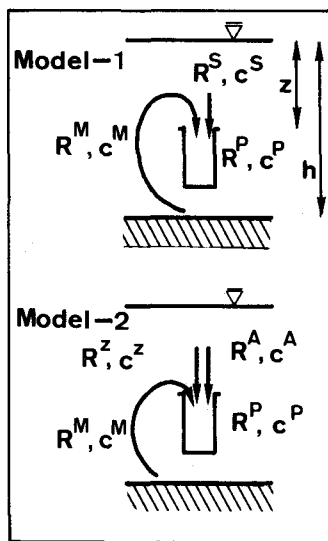


図7 沈降のモデル

しないとする。この結果次式が成立し、全沈降量に占める新生堆積物量の割合 r^S がもとまる。

$$R^P = R^S + R^M \quad (1)$$

$$R^P c^P = R^S c^S + R^M c^M \quad (2)$$

$$r^S = R^S / R^P = (c^P - c^M) / (c^S - c^M) \quad (3)$$

実際には湖水中に底泥巻き上げ分の残留が予想されるため、その沈降物への影響を除くモデル2を考える。残留分の含量を c^Z として、 $c^Z = c^M$ を仮定し、また残留分以外は植物プランクトンと考え、この沈降量を R^A 、含量を c^A とする。この結果

$$R^P = R^A + R^Z + R^M \quad (4)$$

$$R^P c^P = R^A c^A + R^Z c^Z + R^M c^M \quad (5)$$

$$r^A = R^A / R^P = (c^P - c^M) / (c^A - c^M) \quad (6)$$

が得られる。

3-3 分解実験より Chla (UNESCO 法) が保存率 (図5中に説明) で2日間-湖水0.09, 底泥1.22 7日間-湖水0.80, 底泥1.04 とN, Pに比べ1に近い、ここではこれを保存物質として以下の計算を行なった。全体のデータ処理の方法は図8に示す通りである。下ツキの添字はそれぞれの成分を意味する。底面 ($z=h$) での値に修正するための補正方法には以下の仮定を用いている。a) 湖水中の懸濁態物質は水深方向に均一に分布。b) その沈降速度分布は図4中の太線を仮定し、

$$R_{(z)}^S / R_{(h)}^S = \int_0^{z/D} (1-q(w)) dw / \int_0^{h/D} (1-q(w)) dw = \beta(z, h, D) \quad (7)$$

とした。ここでDは測定期間である。(c)底泥のwを図4中に示される値程度としてラウス分布を仮定すると、風速 $2 m/s$ 以上で巻き上がった底泥は水深方向にほぼ均一に分布する。(d)底泥ではwが大き(7)式の β は z/h と見なせる。また c_{Chla}^A , c_C^A , c_M^A , c_P^A には高村らが霞ヶ浦のアオコに対して得ている0.56, 37.7, 9.4, 0.7%の値を用いた⁵⁾。

図9にはSt. 5における $R_{SS}^P(h)$, $R_{SS}^S(h)$, $R_{SS}^A(h)$ の変化を示す。図10には数地点での $R_{SS}^S(h)$ の変化を示す。

また表2には全期間をI, II期に別けて、各期間の平均量をまとめて示す。これらより以下のことがいえる。
(a) 背水域では湖内に比べ R_{SS}^M , R_{SS}^S が大きい。(b) 湖内においても R_{SS}^M は R_{SS}^S より1オーダー程度大きい。

- (1) Measurement of $R_{1, c_{SS}, Chla, C, N, P}^P, c_{Chla, C, N, P}^P, c_{Chla, C, N, P}^M$
- (2) Correction of SS in the bottle
 $R_{SS}^P(z) = (R_1^P(z) - V c_{SS}^{SS}) / D$, V: bottle volume, D: time
- (3) Separation of sedimentation and resuspention
Model-1 and Model-2
- (4) Correction of measuring depth
 $R_{SS}^{S,A}(h) = R_{SS}^{S,A}(z) / \beta(z, h, D)$, $R_{SS}^M(h) = R_{SS}^M(z) \cdot h/z$
- (5) Calculation of sedimentation rate of C, N, P
 $R_{C, N, P}^A(h) = \text{Min}(R_{SS}^A(h) \cdot c_{C, N, P}^A, (R_{SS}^P(z) \cdot c_{C, N, P}^P - R_{SS}^M(z) \cdot c_{C, N, P}^M) / \beta(z, h, D))$

図8 データの処理方法

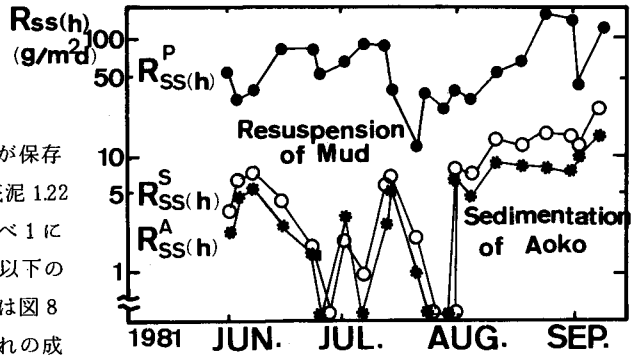


図9 St. 5での $R_{SS}^P(h)$, $R_{SS}^S(h)$, $R_{SS}^A(h)$ の変化

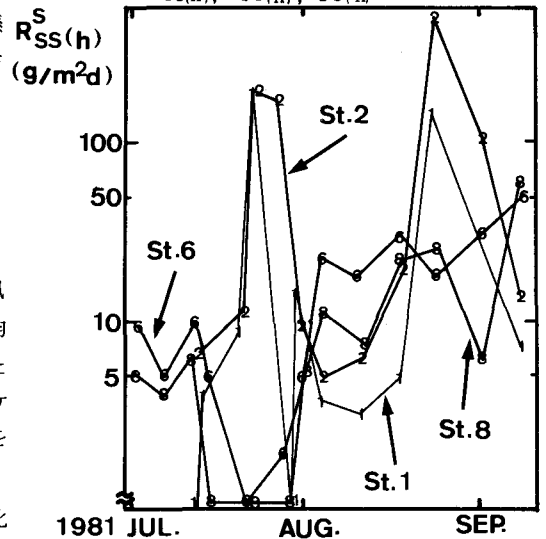


図10. 数地点での $R_{SS}^S(h)$ の変化

(c) R_{SS}^S , R_{SS}^A はⅡ期にはⅠ期の数倍となっている。
 (d) 水深が浅いほど R_{SS}^M が大きい。(e) w は
 図3の数値とはほぼ等しい。

次に表3には式(3)中の c に Chla, C, N, P を
 とった場合の r^S の値を示す。ここで非保存物
 質 c_T を考えて沈降中の分解による減少率を φ
 とすると

$$R^P c_T^P = \varphi R^S c_T^S + R^M c_T^M \quad (8)$$

となり、これよりもとまる $r_T^S (= c_T^P - c_T^M)$

$\div (c_T^S - c_T^M)$ と r^S の間には次式が成立する。

$$r_T^S / r^S = \varphi \quad (c_T^S > c_T^M) \quad (9)$$

表3より湖内では r_{Chla}^S は r_P^S とほぼ等しく、
 r_C^S, r_N^S は r_{Chla}^S の約半分であるため、C, N の
 分解率は50%以上と考えられる。

次に底泥巻き上げ量と気象量が密接な関係を
 有していることは図3、図9などより明らかで
 ある。背水域では降雨量つまり流量と、湖内では
 風つまり吹送流、風波の強さと相関がよいこ
 とが予想される。図11には期間最大風速 W_{max}
 の2乗(=x)と $R_{SS}^M(h)$ (=y) の $St.5$ にお
 ける関係を示す。風の強さの表現方法には各種

のものが考えられるが、xは、表3 $r^S(1981.8.11)$

この中で最も相関の高かった
 ものである。他地点では $St.6$,
 $y = 0.059x^{1.67} \quad (r=0.94)$,
 $St.7, y = 0.35x^{1.10} \quad (r=0.62)$,
 $St.8, y = 0.71x^{0.97} \quad (r=0.56)$
 を得た。1980年の観測では
 傾きが2程度であったものが、
 今回は0.8~1.7と小さく底
 面せん断力の1乗に比例する
 結果となった。しかし、風の

強さの表現方法など今後検討すべき課題と考えられる。

4. 考 察

4-1 新生堆積物と物質収支

まず背水域での沈降現象を考える。海老瀬によれば流入河川負荷量の変動は極めて大きい、年平均値として恋瀬川、山王川の負荷は $SS-7000Kg/d$, $PTN-70Kg/d$, $PTP-40Kg/d$ 程度である²⁾。
 $R_{SS}^S(h)$ の値は Chla より計算したため表3でわかるように背水域では小さく推定していると考えられるが、この値に背水域の面積約 $10^5 m^2$ をかけあわせると負荷量とはほぼ等しい値となる。つまり流入負荷中の懸濁態分はそのうち大部分が背水域で一度沈降していると考えられる。しかし背水域での底泥厚は0~10cmと薄く、こうした沈降物は再び巻き上がり、フラックスとして湖内へ向かっていると考えられる。

次に湖内での収支を考える。図12には相崎ら³⁾のもとめたAゾーン(図1)でのN, Pの年間収支図

表2. 各測定地点での沈降量の特徴

Ⅰ期 1981.6.25~7.28								
地点	R_{SS}^S	R_{SS}^A	R_{SS}^M	R_C^A	R_N^A	R_P^A	$\bar{SS}$	$\bar{w}$
1	18.9	2.87	1268	1.21	150.		189	1.00
2	66.7	4.34	1219	4.56	650		15.8	4.22
3	2.59	1.37	33.0	0.42	45	19	33.1	0.08
4	7.55	4.21	76.5	0.99	95	22	28.7	0.26
5	3.23	1.94	68.9	0.33	24	4	31.2	0.10
6	5.65	4.12	103	1.14	25	31	24.5	0.23
7	3.58	3.75	11.6	1.15	23	31	17.8	0.40
8	3.20	4.34	26.1	0.93	16	20	23.4	0.14
Ⅱ期 1981.7.28~9.8								
1	30.5	10.2	1051	6.35	950		11.8	2.58
2	106	11.8	2056	20.6	3200		11.2	9.46
3	23.4	14.8	432	5.5	820	180	40.5	0.58
4	34.9	17.5	126	4.6	650	84	46.3	0.75
5	19.1	11.1	130	2.8	450	84	45.7	0.42
6	28.8	17.7	107	3.5	500	47	38.6	0.75
7	44.7	21.6	69.2	3.4	570	36	37.3	1.20
8	21.6	9.1	54.9	1.1	200	36	32.5	0.66
単位	$(g/m^2 \cdot d)$				$(mg/m^2 \cdot d)$		(ppm)	(m/d)

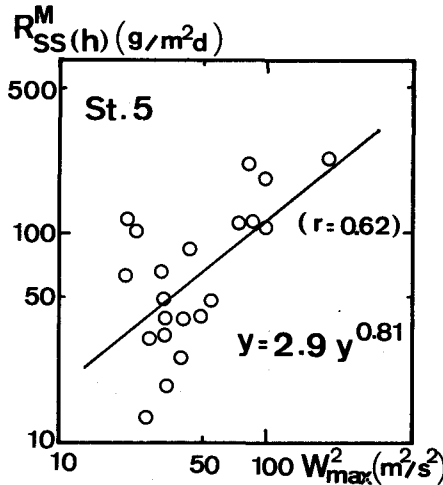


図11 風と巻き上げ量の関係

を示す。ここで沈降分を X_N, X_P としてある。総負荷量に対する比率としては $X_N = 40\%$ 、 $X_P = 45\%$ と湖の入り口部分でかなり大量の栄養塩が沈降していることがわかる。しかし表2の R_C^A 、 R_N^A 、 R_P^A の値を見ると総負荷量の数倍となることもある。相崎によると底泥の硝化活性は St.5 付近で夏季に $90 \text{ mg N/m}^2 \text{ d}$ と底泥表面での分解能力が極めて大きいことを報告している³⁾。また岩態によると今年の7月には St.5 で底泥からの P 供給が $36 \text{ mg P/m}^2 \text{ d}$ 存在したとされる³⁾。湖内での堆積速度は $0.27 \sim 1.5 \text{ cm/year}$ ^{7), 8)} との報告があるが底泥表面での含水率を 80% とすると I、II 期合計で R_{SS}^S より $0.5 \sim 1 \text{ cm}$ の堆積を行なうことになる。夏季における堆積速度の大きさを考慮しても若干大きすぎるように思われる。こうした事実を総合的に考え、また分解実験で沈降物の分解率が高いことを考慮すると、沈降物中の C, N, P は沈降中あるいは底泥表面において相当な割合が水中へ回帰しているものと推定される。次にネットの光合成速度は $1 \sim 3 \text{ g C/m}^2 \text{ d}$ と報告されているが、I 期では R_C^A はこれを下回り、II 期では同程度かこれ以上である。図3の SS の変化を見ると I 期で増加、II 期で平衡又は減少傾向であるので、湖内の植物プランクトンの現存量に沈降現象が影響を与えていることが考えられる。

4-2 他湖沼の沈降物量との比較

報告されているグロス生産量と年最大沈降量は以下のようなものである。諏訪湖、 $4 \sim 12$ 、 $0.5^9)$ 、湯の湖、 1 、 $0.4^{10)}$ 、Estrom 湖、 1.1 、 $0.3^{11)}$ 、Mendota 湖、 16 、 $5.6^{12)}$ 、単位は $\text{g C/m}^2 \text{ d}$ である。巻き上げを補正していないものもあるが、今回の調査とあわせて最大沈降量は夏期のグロス生産量の $1/2.5 \sim 1/10$ と考えられる。

4-3 底泥巻き上げ量

大坪は霞ヶ浦の沈降物についてせん断流場での流送実験を行ない限界掃流力が含水率 10% 程度のものに対して約 0.5 dyne/cm^2 と報告している⁴⁾。吹送流による底面せん断力は $\tau = \alpha_1 \rho W^2$ (ρ = 水の密度、 $\alpha_1 = 10^{-7}$)、風波によるものは $\tau = \alpha_2 \rho u_b^2$ ($\alpha_2 = 0.02$ 、 u_b は波による底面流速) より見積もることができるが、 $W = 1.0 \text{ m/s}$ として限界掃流力を超えるのは水深が浅い領域での風波だけが考えられる。このため湖岸の砂深帯近くで巻き上がった底泥が水深の深い水域に運ばれている可能性が強い。

5. おわりに

霞ヶ浦における沈降物採集調査の結果から、栄養塩の収支の中で沈降現象の占める役割りが大きいこと、底泥の巻き上げ量が新生堆積物量に比べ1オーダー大きいことなどを明らかにした。このため底泥上に沈降した有機物質がどのような条件、経路で水中に回帰してくるのかを明らかにすることが水質のモデル化、将来予測といった観点から早急に解決すべき課題といえよう。

参考文献 1) W.D Gandner; J. Marine Res. 38.1, 1980, 2) 国立公害研研究報告 第21号, 1981, 3) 国立公害研研究報告 第22号, 1981 4) 国立公害研調査報告 第16号, 1981, 5) 国立公害研研究報告第26号, 1981, 6) 第3回富栄養化シンポジウム予稿集、国立公害研究所、1981, 7) 岡野他; 水質汚濁研究 2-4, 1979, 8) 茨城大学農学部霞ヶ浦研究会編; 霞ヶ浦、三共出版, 1977, 9) IBP 諏訪湖研究グループ; 日本陸水群集の生産力に関する研究, 1973 10) IBP 湯の湖研究グループ、同上, 11) E. Lastin; OIKOS, 27-1, 1976 12) R.D. Fallon and T.D. Brock; Limnol. Oceanogr., 25-1, 1980

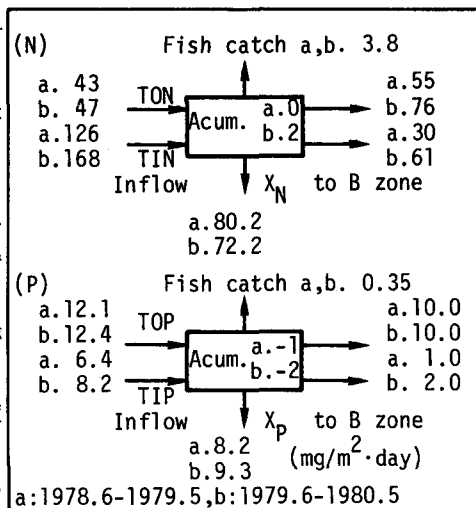


図12 AゾーンでのN, P収支