

村岡 浩爾

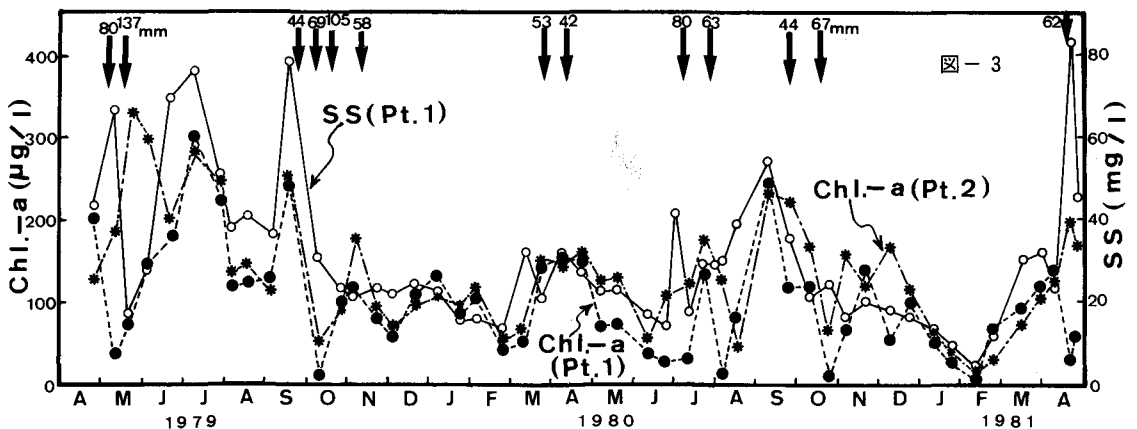
3. 降雨時流出の河口部への影響

湖沼河口部における流動状態は、河川からの流入物質の拡散・沈殿を支配するため、平常時（晴天時流出）の流動はむろんのこと、異常時（降雨時流出、とくに洪水時）の流動を明らかにする必要がある³⁾。すなわち、河川からの流入物質が湖沼へどのように分散して行き、どれだけ沈殿し、どれだけ生物生産に利用され得るかの判定が、湖沼への流入河川の impact の評価として重要である。また、この現象を流入河川側から見れば、流量変化の大きさに加えて、流入物質の量的および質的变化の顕著さが特色であり、その流出変化における水文量と水質量との定量的な関係を明らかにすることが必要である。

したがって、以下は、高浜入最奥部の高崎入湾形部での1979年4月以降の長期的な水質変化における降雨時流出による短期的な水質変化を中心に検討を進めることにする。霞ヶ浦でも「浅くて狭い高崎入という」最も富栄養化した水域における短期的な水質変化としては、植物プランクトン由来の懸濁物質と、流入河川による流入物質との混合状態の変化として捉えることができる。図-3は、地点①のSSとChl.-aの変化と地点②のChl.-aの変化を2年間にわたって示したものである。図中に、40mm以上の降雨については、矢印でその時期を示している。図より、降雨時流出の影響は、Chl.-a濃度の急減とSSの急増の同時発生として捉えられるが、観測日時が、降雨時流出の直後でもなければ、Chl.-a濃度の急減少としてしか現われていないが、懸濁態物質の内容構成を詳しく検討すれば、後述のように、POC、PON、POPなどの急減現象としても捉えることができる。降雨時流出による短期的な変化は、懸濁態物質に限らず、河口部の溶存態の無機イオンや、底泥間隙水中の溶存物質の組成変化としても認められ⁵⁾、その影響の大きさを指摘できる。一時的な懸濁物質の急増とその後の沈殿や分散に伴う漸減のほか希釈もある。

この河口部における流入物質の挙動、あるいは、流入河川水との混合現象は、河口部での滞留時間との関係とからんで、その時間スケールとの対応から、次の3つの場合に分けて考えることができる。まず、晴天時流出の場合と降雨時流出の場合に分けられ、さらに、降雨時流出は以下の2つの場合に分けられる。すなわち、移動性の低気圧や雷雨のような単独豪雨による流出と、前線性降雨のような連続降雨による流出である。この両者は、河川からの降雨流出の時間の長さはむろんのこと、先行晴天期間や先行降雨などの初期条件と降雨強度と降雨継続時間によって、流入負荷量の大きさと流入物質の構成内容がかなり異なるため、湖沼への impact の強さも異なることは十分予想できることである。これを河川水と湖沼水の混合という観点から捉えれば、前者の場合は混合というよりも押し出し（flush out）現象と考えられる急激な変化であり、後者はその水質変化の時間スケールが長くなり、幾分緩慢な混合現象として捉えることができる。これは、晴天時流出を「弱混合状態」とすれば、前者は「一時流出による押し出し流れ状態」、後者は「連続流出による強混合状態」となり、それぞれの湖沼河口部へ与える影響も異なってくる。

図-3において、1970年9月末から10月末までの1カ月間は、連続降雨流出による強混合状態に続いて、単独豪雨による押し出し流れ状態となり、地点①、地点②とも大きな影響として現われている。



(1) 単独豪雨による一時流出

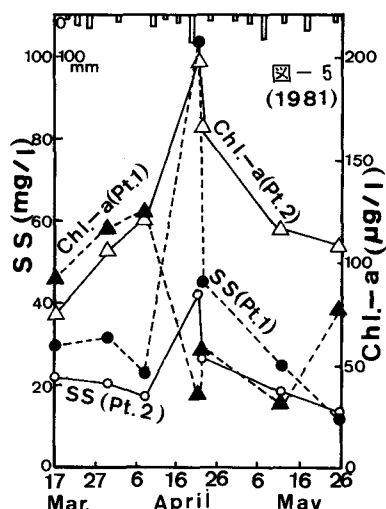
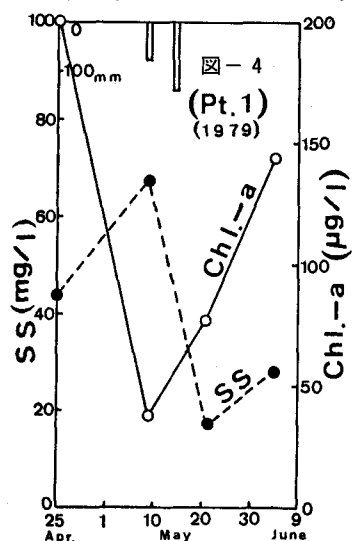
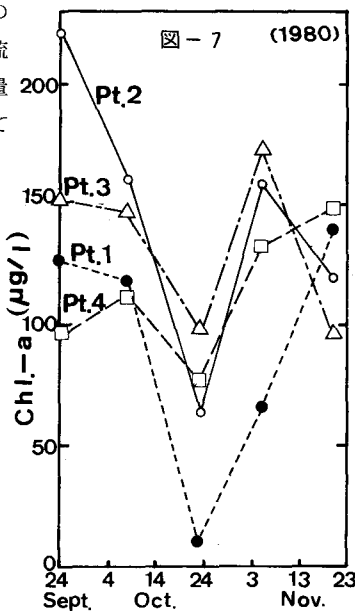
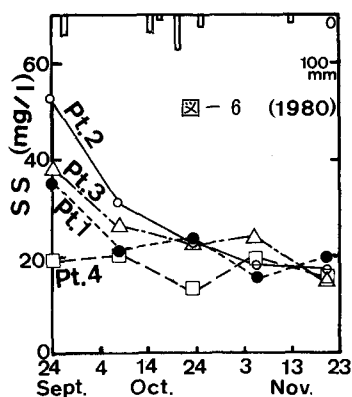
地点②まで影響の及ぶflush out の押し出し流れ現象は、そう頻度の高いものではないが、1979年4月以降100mmを超える豪雨が2回観測されている。実際、降雨量と降雨強度がともに大きな40mm以上の豪雨であれば、1日後には地点①に流入河川水の影響が大きく現われている。単独豪雨による直接流出の流出率を、田園地河川の恋瀬川で0.2、市街地河川の山王川で0.35、湖表面（Aゾーン）で1.0とし、湖沼水位に変化がないものとすれば、130mm弱の豪雨によってAゾーンの湖水はおおよそ2日後には河川水と入れ替わるという単純計算ができる。湖沼河口部で降雨時流出をどの時点で、どの段階での水質変化を観測しているかによって、湖沼への影響の判定も異なったものとなるため、流出後の経過日も重要である。

豪雨流出の直後（1日後）の影響を把えた観測例として、1979年5月8日の80mmの豪雨（図-4）と、1980年4月19～20日の62mmの豪雨（図-5）がある。両者の場合とも、地点①におけるChl.-aの急減のほか、SSの急増をも把えている。1日後の場合は、Aゾーンの出口近くの地点②には、まだ流入河川水の影響が波及するには至っていないが、図-5の2日後の観測値から、地点②でのChl.-aとSSの減少としての影響の出現が認められた。地点①では、2日後にはSSの減少とChl.-aの若干の回復が見られた。このほか、定期の水質観測以外に、1980年6月28～30日の84mmの豪雨と1980年7月30～31日の62mmの豪雨の1日後の地点①での観測値もあり、同様の傾向が認められた。

さらに、豪雨流出の数日後の高崎入および高浜入全体への影響を把えた観測値として、1980年10月19～21日の72mmの豪雨の場合を図-6と図-7に示す。10月14～15日に38mmの先行降雨があったことも加わって、10月23日の2日後には、高浜入の4地点全てでChl.-aの減少が認められたが、地点①および②の減少が著しく、影響の大きさが目立つ。

(2) 連続降雨による長期間流出

長期間にわたり繰り返す降雨のある場合は、流入河川水量や流入負荷量の大きさや流入物質の構成内容が単独豪雨による場合とは異なり、湖沼への影響も若干異なることが多い。連続降雨の場合は、先行降雨による流出の直接的な影響が残存するうちに次の降雨流出が出現するため、いくつかの降雨流出の重ね合せの結果としての影響と考えられる。すなわち、連続降雨を構成する個々の降雨流出の初期条件の相違が、流入河川水量の大きさや流入負荷量の量的および質的な違いとなって反映されることになる。



このほか、連続的な降雨の場合、湖沼への影響は、流入河川水のみではなく、生物生産への影響の大きい日照量・日照時間および水温にも降雨の影響が大きいため、Chl.-a の増減の判定には、この点も考慮に入れる必要がある。

連続降雨流出による観測例としては、図-8と図-9に示す1979年9月末から10月初めにかけての降雨流出である。この場合、9月25日より32mm、44mmの一連の降雨を含む8mm以上の降雨が10月1日まで続き、3日に15mm、6～7日に69mmの豪雨があり、18～19日には台風により107mmの豪雨が続いた。この場合は、図-9からもわかるように、10月6～7日までの降雨流出の影響が大きく、10月18～19日の107mmの豪雨流出の影響はChl.-aにはあまり大きく現われていない。10月6～7日までの降雨流出により、高浜入の4地点全てでChl.-aの減少が観測され、結果的には、図-6と図-7の場合と同様の変化となっている。両方の場合とも、その後、Chl.-a濃度の増加の地点による差が大きくなるにもかかわらず、SS量にはあまり差がないなどの特徴が見られる。

4. 流入河川水質と湖沼河口部水質

高浜入に流入する恋瀬川、山王川、園部川の3河川は、毎週1回の定時負荷量観測を1978年6月より2年間にわたって実施している。このうち平年並みの降水量のあった後半の1年間(1979年6月～1980年5月)の52回の観測による流量および水質負荷量の平均値を示す。()内の値は、変動係数である。

表-2 定期負荷量観測値

河 川	流量 (m^3/s)	I-N (g/s)	T-N (g/s)	PO_4^{3-} -P (g/s)	T-P (g/s)	T-COD (g/s)	SS (g/s)	Cl ⁻ (g/s)
恋瀬川	2.38 (0.89)	5.33 (1.10)	6.84 (1.12)	0.22 (2.48)	0.59 (2.00)	12 (1.45)	69 (3.15)	32 (0.79)
山王川	0.47 (0.52)	1.17 (0.56)	1.79 (0.58)	0.15 (0.35)	0.29 (0.64)	4 (0.65)	12 (1.41)	12 (0.32)
園部川	1.65 (1.04)	8.40 (1.09)	10.5 (1.15)	0.33 (0.79)	0.64 (0.90)	13 (1.03)	40 (3.11)	35 (0.96)

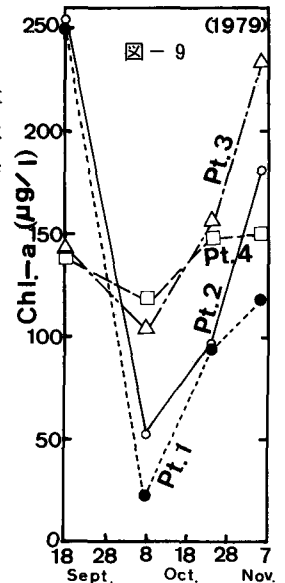
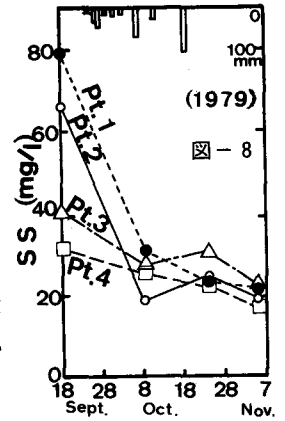
表-3 河川水質構成 (山王川・小桜川)

河 川	晴天時・降雨時の別	I-N	PO_4^{3-} -P	D-COD	P-N	P-P	P-N	P-P	P-COD
		T-N	T-P	T-COD	T-N	T-P	SS	SS	SS
山 王 川	晴天時24時間調査(4回)	0.67	0.67	0.70	(0.13)	(0.37)	(0.027)	(0.012)	0.39
	降雨時流出(7mm)	0.64	0.50	0.67	0.24	0.43	0.030	0.011	0.11
	降雨時流出(35mm)	0.65	0.16	0.27	0.26	0.84	0.005	0.005	0.11
	降雨時流出(58mm)	0.50	0.09	0.30	0.39	0.85	0.014	0.006	0.10
小 桜 川	晴天時流出負荷量調査	0.82	0.58	0.68	0.05	0.28	0.019	0.015	0.14
	降雨時流出(45mm)	0.52	0.13	0.20	0.41	0.87	0.009	0.002	0.10
	降雨時流出(68mm)	0.72	0.09	0.14	0.25	0.91	0.002	0.002	0.09

さらに、山王川と恋瀬川支流の小桜川について、晴天時流出と降雨時流出の水質負荷量の構成内容の違いを表-3に示す。同様に、山本ら(茨城県)による1978年の恋瀬川での観測結果をまとめて示したものが表-4である。⁶⁾

表-4 河川水質構成 (恋瀬川)

晴天時・降雨時の別	I-N	PO_4^{3-} -P	D-COD	P-COD
	T-N	T-P	T-COD	SS
晴天時日負荷量調査	0.79	0.54	0.69	0.08
降雨時流出(50mm)	0.39	0.01	0.13	0.04



この表-3と表-4より、晴天時の流出負荷量と降雨時のそれとの水質構成内容の相異は、懸濁態物質あるいは懸濁態成分のウェイトである。降雨時流出では、SSの大量の負荷量のほか、懸濁態全リン、懸濁態COD、懸濁態全窒素の負荷量が、晴天時流出と比較して、この順に大きな増加率を示すのが通常である。このほか溶解態成分としては、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ がほぼ晴天時流出並み、無機態窒素が $\text{NO}_3^-\text{-N}$ を主としてかなり大きな負荷量となる。とくに、懸濁態物質の降雨時流出が際立っており、その懸濁態物質の粒径構成の変化ももう1つの大きな相違点であり、リンを吸着した土粒子の流出が大きなウェイトを占めると考えられる。

降雨時流出における河川水SSの粒径構成は、図-10のように20 μ を超える粒子が50%以上になることが多く、晴天時流出の20 μ を超える粒子が非常に少ない場合と大きく異なり、湖沼河口部での多量の沈殿が予想される。実際、1981年4月19~20日62mmの豪雨の場合における4月21日、22日の観測では、その前後の変化も含めて図-11と図-12に示すようなSSとChl.-aの粒径構成となる。4月21日の地点①のSSは、53 μ 以上の粒子は1.5%、20 μ 以上の粒子は3%となり、大きな粒径の粒子はほとんど存在せず、すでに沈殿していると考えられる。

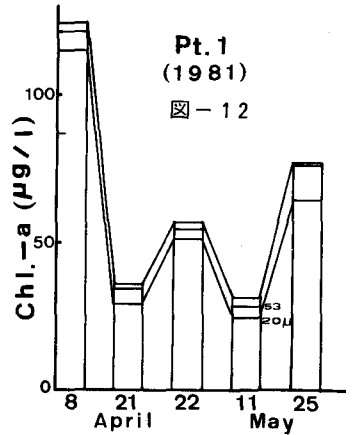
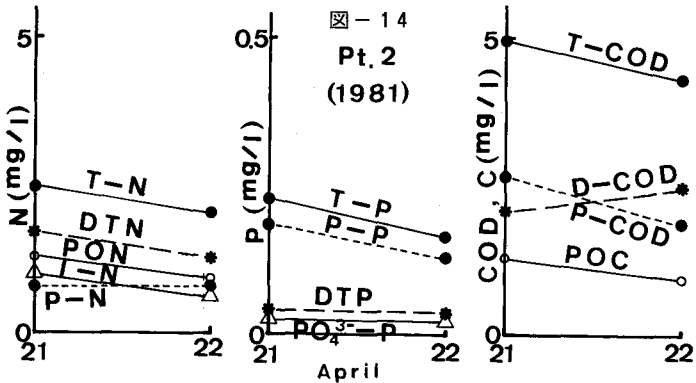
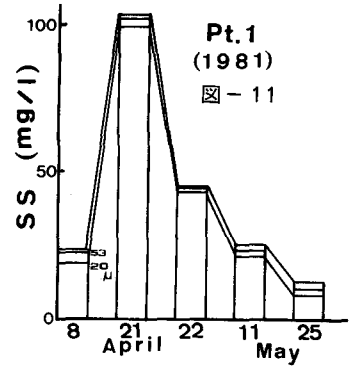
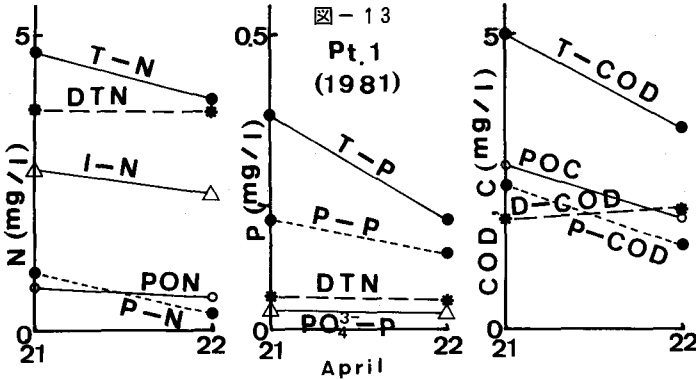
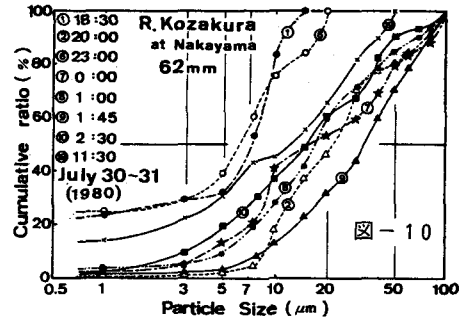


表-5 湖沼河口部の水質構成 (Pt. 1)

降雨年月日	観測日	$\frac{\text{I-N}}{\text{T-N}}$	$\frac{\text{PO}_4^{3-}\text{-P}}{\text{T-P}}$	$\frac{\text{D-COD}}{\text{T-COD}}$	$\frac{\text{P-N}}{\text{T-N}}$	$\frac{\text{P-P}}{\text{T-P}}$	$\frac{\text{P-N}}{\text{SS}}$	$\frac{\text{P-P}}{\text{SS}}$	$\frac{\text{P-COD}}{\text{SS}}$
81年4月19~20日 (62mm)	4月21日	0.57	0.06	0.27	0.21	0.85	0.010	0.003	0.047
同上	4月22日	0.59	0.16	0.57	0.08	0.74	0.007	0.003	0.065
80年6月28~30日 (84mm)	6月30日	0.70	0.11	0.75	0.22	0.52	0.014	0.002	0.035
80年7月30~31日 (62mm)	8月1日	0.63	0.07	0.63	0.24	0.66	0.004	0.004	0.072

さらに翌日の4月22日に地点①のSSは、 20μ 以下の粒子が減少し、全体でもほぼ半減している。降雨流出直後に、地点①のSSの 20μ 以下の粒径の比率が極度に増加した例は、1979年5月8日80mmの豪雨の場合の9日の観測において、 63μ 以上の粒径の粒子が3%に過ぎなかった。このSSの粒径の大きなものから沈殿し、沖合へ分散して行くに従って、SSとChl.-a以外の水質構成がどう変化するかを示したのが図-14と図-15の1981年4月19~20日の豪雨の場合である。地点①のP-PおよびP-CODの減少が大きく、P-Nの減少は小さいことが明らかである。さらに、地点①における豪雨流出直後の水質構成を、表-3、表-4の河川水の降雨時流出のそれと比較のために示したのが表-5である。P-P/SSより、降雨時流出の流入河川水は、河口部での大きな粒径の粒子の沈殿にもかかわらず、河川での比率が、豪雨流出直後とその後のしばらくの間も保持されていることがわかる。P-PはSSと同様の挙動を呈し、SSの沈殿は、これまで2年半にわたる観測結果から、降雨流出後の3~4日後に、最大 $11\sim 12(\text{mg}/\ell)$ まで減少する可能性があるが、通常は、湖水の残留懸濁物質（主として植物プランクトン起因）との混合のため、 $17\sim 24(\text{mg}/\ell)$ にとどまる。P-NとP-CODは、豪雨流出の場合ごとに、河川水の水質構成比率が変化するため、P-Pほど定量的な推定は困難である。これらの降雨時流出負荷量は先行降雨や先行晴天日数等の降雨の初期条件によって変化しやすい有機物質の流域内残留量に関係するため、土粒子と挙動を共にする比率の高いP-Pとは異なる結果となることも理解できる。また、河川水と湖水の懸濁物質のC/N比は、河川で大きく7~11の範囲であった。⁷⁾

5. SSとChl.-aの関係

富栄養化した湖沼河口部における流入河川による湖沼への影響や流入河川水と湖水の混合の程度を把握するためには、図-3~図-9のSSとChl.-aの関係を利用することができる。高崎入のように高度に富栄養化した湾形部の場合、降雨時流出前後のChl.-aの濃度差から稀釈率あるいは植物プランクトンの残留率からのアプローチでも、おおよその混合度を推定することができる。

SSとChl.-aの関係は、植物プランクトンの優占種の交代や増殖のstageによって異なるであろうが、実際の湖沼では、Chl.-a/SSの値はほぼ一定の範囲内におさまる。節によって湖水の3~4つの粒径分画を行ない、SSとChl.-aの関係を求めれば、図-15のようにほぼ等しい勾配の直線群が得られる。その直線を延ばし切片を求めれば、流入水や底泥などの外来性の懸濁物質の影響の大きさ、すなわち、バックグラウンドとしてのSS量を知ることができる。

6. おわりに

降雨時流出による湖沼河口部への影響として、河口部における流入河川水と湖水の混合および流入物質の沈殿の大きさを指摘した。降雨時流出による流入物質も、生物生産との関係から見れば、単に栄養塩のみではなく微量成分の影響や植物プランクトン現存量の回復時間との関係⁸⁾など多くの問題が残されている。この高崎入での沈殿量の大きさは、湖内沈降物質量の測定によって確認されているが、⁹⁾一部は高浜入全体、さらには湖心部へと分散しているはずであり、沈殿物の再浮上との関係を明らかにする必要がある。

分析は、栄養塩をオートアナライザーCSM6、POC・PONはCHNコーダーMT3、CODはアルカリ性Mn法によった。

参考文献

- 1) 山口ほか(1978) 土木研究所報告第151号, 2) 海老瀬(1981) 国立公害研究所報告第21号, 3) 海老瀬(1980) 土木学会第35回年講, 4) 海老瀬ほか(1981) 土木学会第36回年講, 5) 河合ほか(1981) 国立公害研究所報告第22号, 6) 山本ほか(1980) 第14回水質汚濁研究会年講, 7) 相崎ほか(1981) 国立公害研究所報告第22号, 8) 藤木ほか(1981) 京大環境衛生工学会第3回シンポ, 9) 福島ほか(1982) 第18回衛生工学研究討論会

