

農耕地河川における Chl-a 流出負荷量の評価

井上隆信¹・海老瀬潜²・今井章雄³

¹正会員 工博 国立環境研究所 水環境環境部 (〒305-0053 茨城県つくば市小野川16-2)

²正会員 工博 摂南大学 工学部土木工学科 (〒572-0074 大阪府寝屋川市池田中町17-8)

³正会員 Ph.D. 国立環境研究所 地域環境研究グループ (〒305-0053 茨城県つくば市小野川16-2)

農耕地河川の涵沼川における藻類の流出特性をChl-aを指標として、2年半の毎週調査と季節ごとの詳密調査をもとに明らかにした。流量安定時のChl-a濃度は、水温が高いほど、前回降雨からの経過日数が長いほど高くなった。降雨に伴う流量増大時には、先行晴天日数が長いほど濃度が高くなる傾向が見られた。種々の推定法を用いてChl-a年間流出負荷量の算定を行った結果、懸濁態の炭素・窒素・リンの流出負荷量に対して藻類の占める比率は、それぞれ13%・23%・7.8%になり、藻類としての流出負荷量は無視できない結果となった。藻類の増殖時には溶存態の窒素・リンを摂取しているため、溶存態の窒素・リンの流出負荷はそれぞれ3.6%・31%減少していることになり、このことから藻類の流出負荷量が重要であることが明らかになった。

Key Words : *chlorophyll a, algae, river, runoff characteristics, runoff loading, particulate matter, nutrient, nitrogen, phosphorus*

1. はじめに

我が国においては、湖沼や内湾等の閉鎖性水域における富栄養化の進行に伴う植物プランクトンの異常増殖が依然として問題になっている。富栄養化の要因物質である窒素・リンは、大部分が河川を通して流入しており、河川からの栄養塩流入負荷特性が閉鎖性水域における藻類増殖メカニズムに大きな影響を及ぼしている。閉鎖性水域における藻類増殖の予測・評価を行うための生態系モデルの精度を上げるためには、降雨時流出も含めた流入負荷量の変化特性を明らかにする必要がある。

栄養塩の濃度・負荷量変化は、溶存態と懸濁態とでは異なった特性を示す。溶存態成分は降雨に伴う流量増大時の濃度変化が小さいのに対して、懸濁態成分では濃度が上昇するため、結果として流量増大時には懸濁態成分の負荷量の増加比率は濃度の増加比率以上に大きくなるのが明らかになってきており、降雨時を中心とした懸濁態栄養塩の流入負荷量の重要性が指摘されている¹⁾。

さらに、懸濁物質は、大きく分けると粘土・シルト等の無機物質と流域や河床で増殖した藻類やデトリタス等の有機物質との混合物であり、それぞれで流出特性や閉鎖性水域へ流入後の挙動が異なる。このため、懸濁態無機物質中と懸濁態有機物質中の栄養塩では閉鎖性水域での藻類増殖への寄与も異なると考えられる。しかし、現時点ではこれらを直接分離する手法がなく、懸濁態成分として一括して取り扱われる場合が多い。

また、河床や流域内の停滞水域で藻類が増殖する場合、溶存態の窒素・リンを取り込み、懸濁態に形態変化させている。増殖した藻類の大部分は降雨に伴う流量増大時に流出すると考えられるため、次の降雨までの間流域内に栄養塩を一時貯留していることになる。このため、流量安定時には、流域内での藻類の増殖が溶存態栄養塩の下流域の閉鎖性水域への流入負荷の流出抑制にも寄与している²⁾。

これらより、河川水中の懸濁態有機物質中に占める比率が高いと考えられる藻類の河川流出特性・流出負荷量を定量的に評価することは重要である。藻類の指標として、湖沼の富栄養化や河床付着生物膜に関する研究においては光合成に不可欠な緑色素であるクロロフィルa (Chl-a)が用いられている。河川流出特性や負荷量に関する研究において、他の水質成分に関する研究は多いものの、Chl-aについての研究は少ない^{3),4)}。

藻類の河川流出特性も他の水質成分と同様に水深・流速等の河川特性や流域の土地利用形態等によって大きく異なるが、本研究では、日本に数多く存在する農耕地の流域に占める比率が高く、河床まで光の届く水深の浅い中小河川の例として涵沼川を調査対象に選定し、Chl-aの河川流出特性を明らかにした。また、河川水中のChl-a濃度と人工付着板を用いた調査研究で明らかにした河床付着生物膜現存量変化²⁾との関係についても検討を行った。さらに、藻類の流出負荷量、藻類としての炭素・窒素・リンの流出負荷量、および河川の総流出負荷量に

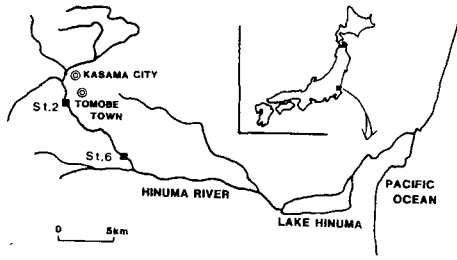


図-1 調査地点の概要

表-1 濁沼川St.6までの土地利用形態別面積

	面積(km ²)		比率(%)
総面積	142	100	-
経営耕地	55.1	39	100
水田	25.9	18	47
畑地	9.9	7	18
樹園地	19.3	14	35

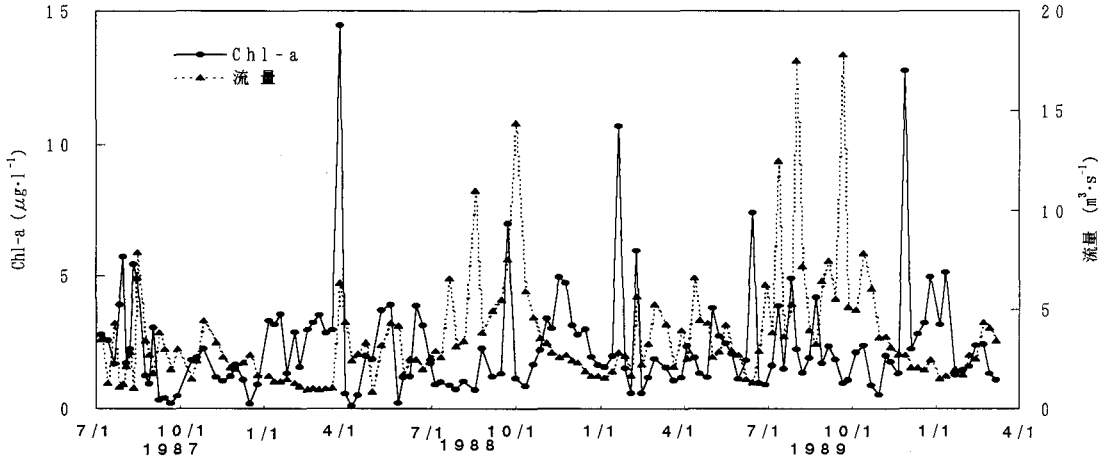


図-2 濁沼川St.6における毎週調査時のChl-a濃度と流量の変化

占める藻類の比率について定量的に評価を行った。

2. 調査・分析方法

図-1に示す茨城県中央部を流れる濁沼川の中流域6地点で毎週調査と季節ごとの詳細調査を実施した。毎週調査は、1987年8月から1990年2月まで原則として週に一度の間隔で定期的実施した。詳細調査は、季節ごとに4回(1990年4月19日～5月6日、8月12日～27日、11月7日～12月3日、1991年2月6日～3月6日)行い、前半は毎日、後半は調査間隔を延ばして実施した。ここでは、人工付着板を用いた河床付着生物膜の現存量変化調査⁵⁾を併せて実施したSt.2とSt.6の2地点を解析対象とした。下流端のSt.6における流域の土地利用形態別面積を表-1に示す。流域面積142km²の約40%が農耕地であり、農耕地の内訳は、水田が最も多く流域面積の18%を占めている。耕地別の比率では、水田が全国で58%、茨城県で59%⁶⁾であるのに対して、濁沼川流域では47%と少なくなっている。また、この流域では樹園地の比率が35%と全国の8%、茨城県の6%⁶⁾と比べても大きく、畑地よりも面積が広いことが特徴となっている。

調査は毎回定時に上流から下流に順次実施し、調査地

点では、流量算定のための断面積・流速の観測、水温・pHの測定、採水を行った。採水は流心で行い、Chl-a用の試水は500mlのポリビンに直接採水した。

藻類量を表す指標としてはChl-a濃度を用いた。水質は、Chl-aのほか、炭素・窒素・リン等の富栄養化関連項目や一般水質項目を主に「水の分析」⁷⁾に従い分析した。Chl-aの測定は、採水後水冷して実験室に持ち帰り、一定量をガラス繊維ろ紙(Whatman, GF/C)でろ過した後、ろ紙をメタノールで抽出⁸⁾し、冷暗所に12時間静置後、分光光度計を用いて吸光度を測定した。Chl-a濃度の算定は、Scour/Unescoの方法⁷⁾によった。

3. Chl-aの流出特性

(1) Chl-a濃度の変化

図-2には、濁沼川のSt.6における毎週調査時のChl-a濃度の変化を流量とともに示した。調査流域では、降水は春から増加し梅雨や台風のシーズンに多く冬季は少ない。このため、流量も一年を周期とした変化を示し、春から秋に多く11月頃から減少し冬季は1m³・s⁻¹以下の低流量の時期が続く。Chl-a濃度は、低流量状態が続いた後の降雨に伴う流量増大時に高い値になる傾向が見ら

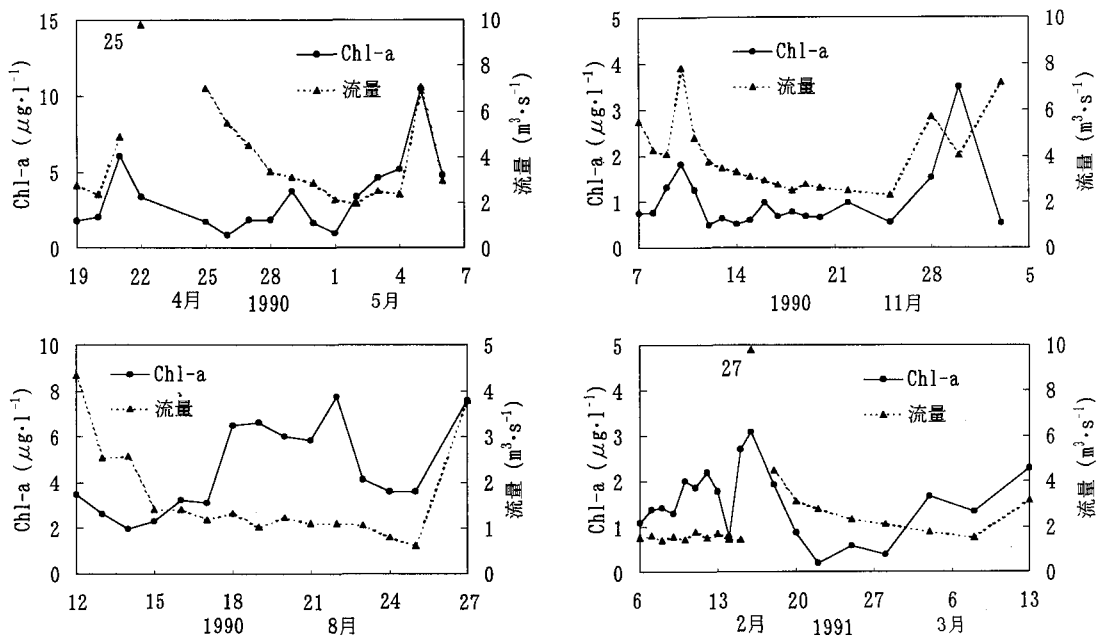


図-3 酒沼川St.2における詳密調査時のChl-a濃度と流量の変化

れ、最大値は冬季の低流量状態が続いた後の最初の大きな降雨時である1987年3月の $14 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ であった。Chl-a濃度は降雨時流出の変化が大きいため、一週間に一度の調査結果からでは明瞭な季節変化は見られなかった。

図-3に、酒沼川で季節ごとに実施した詳密調査時のChl-a濃度と流量の変化をSt.2の例で示す。他の調査地点でも同様の傾向になった。

春季調査では、調査開始直後の4月21日から23日の間に合計80mmの降雨があったため流量が増大した。その後流量は減少しているものの $2\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 以上と高流量で推移した。Chl-a濃度は、降雨後に $1 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ 程度まで減少した後増加傾向が見られ、5月4日の降雨時には、 $10 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ まで上昇した。

夏季調査は、8月7日から10日の合計116mmの降雨後に実施した。その後26日までまとまった降雨がなかったため、流量は徐々に減少し $1\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 以下の日が続いた。Chl-a濃度は、調査開始後数日は $2 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ であったが、その後上昇し最高で $7.8 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ になった。26日に20mmの降雨があり27日は流量の減少期であったため、他の詳密調査時のように降雨時にChl-aが増加する現象は見られなかった。

秋季調査は、11月4日の50mmの降雨後に開始した。9日から10日に17mmの降雨があり、流量は $7.8\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ まで増大したが、その後28日まで低流量状態が続いた。Chl-a濃度は、降雨時には濃度が高くなったが、流量安定時には $1 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ 以下の低濃度で推移した。

冬季調査では、開始後の2月15日から16日にこの時

期としては異例の合計73mmの降雨があり、流量が増大した。Chl-a濃度は $1 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ から $2 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ で推移していたが、降雨時に $3 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ まで増加した。その後流量の減少とともに濃度も低下し、 $1 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ 以下の状態が続いた。

季節ごとの詳密調査においても、低流量状態が続いた後の降雨に伴う流量増大時にChl-a濃度が上昇している。しかし、冬季調査ではその濃度が $3 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ と他の季節に比べて低かった。また、降雨後に流量が減少したときのChl-a濃度が流量増大前に比べ低くなる現象が、St.2の冬季及び、図示していないがSt.6の春季・秋季・冬季に見られた。その後の流量安定時のChl-a濃度は夏季に高く、秋季や冬季は低い状態が続いた。

表-2には、酒沼川のSt.6における流量とChl-aや他の水質項目の毎週調査時の算術平均濃度と流量加重平均濃度を示した。一般的に、流量加重平均濃度は、サンプル数が少ない場合は一回の流量増大時の重みが増すためサンプルのとり方によって値が大きく異なるが、一定間隔の調査であったり調査期間が長くサンプル数が多い場合は算術平均濃度より降雨時流出負荷量も含めた河川の流出実態をよく表している。表-2に示した懸濁物質や炭素・窒素・リンの懸濁態成分は、流量加重平均濃度が算術平均濃度より高くなっており、流量増大時に濃度が高くなることを示している。しかし、Chl-aは、他の懸濁態成分と異なって流量加重平均濃度は $2.3 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ と、算術平均濃度の $2.4 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ とほぼ同じ値になった。河床や流域内の停滞水域で増殖した藻類が降雨時に流出し

表-2 涸沼川St.6における毎週調査と精密調査時の平均流量と水質平均濃度

	毎週調査		春季	夏季	秋季	冬季
	算術平均	流量加重				
流量 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	3.5		3.3	1.4	3.4	2.2
Chl-a $\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$	2.4	2.3	2.7	4.9	0.76	1.9
POC $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$	1.2	1.9	1.1	0.51	0.92	0.67
DOC $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$	1.3	1.2	1.4	1.7	1.3	1.1
TOC $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$	2.5	3.1	2.5	2.2	1.5	1.7
P-N $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$	0.15	0.21	0.13	0.07	0.05	0.14
D-N $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$	1.4	1.4	2.0	0.74	1.6	1.4
T-N $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$	1.6	1.6	2.2	0.81	1.6	1.5
P-P $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$	0.049	0.073	0.058	0.018	0.015	0.033
D-P $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$	0.017	0.017	0.017	0.014	0.010	0.011
T-P $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$	0.066	0.089	0.075	0.032	0.025	0.043
SS $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$	25	104	20	7.1	5.6	12

ていると考えられるため、Chl-aは他の潜在的供給能力が非常に大きい懸濁態成分とは異なる流出特性を有している。

溶存態成分は、算術平均濃度と流量加重平均濃度の違いは少なく、流量に関係なくほぼ一定の濃度で流出している。また、全炭素・全リンでは、懸濁態成分の比率が高いため流量加重平均濃度が算術平均濃度より高くなっているが、溶存態の比率の高い全窒素では、算術平均濃度と流量加重平均濃度が同じ値であった。

表-2には、流量安定時の季節による違いを明らかにするため、季節ごとに実施した精密調査のうち、流量が $4\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 以下の場合のSt.6における平均流量と算術平均濃度も示した。春季は、他の季節と比べて炭素・窒素・リンとも濃度が高くなっている。特に、溶存態窒素・懸濁態と溶存態のリンの濃度が高い。この地域では、4月末から5月初めの連休中に水稻移植が行われるため、代かき時に農地へ投入される肥料の河川への流出の影響と考えられる。また、春季のChl-a濃度は夏季に次いで高くなっている。畠山らは農耕地河川では水田に施用される除草剤によって藻類の増殖が抑制されると報告している⁹⁾が、今回調査を実施した涸沼川においては、河川水中のChl-a濃度の減少は見られなかった。除草剤の多くは水稻移植後5～15日に散布されることから、春季の精密調査を実施した4月21日～5月6日は、流域内水田の除草剤散布前であった。このため、除草剤による阻害の影響よりも、代かき時に施用される肥料による窒素・リン濃度が上昇することで藻類の増殖が促進され、河川水中のChl-a濃度が上昇したと考えられる。畠山らの小貝川での調査においても、4月末から5月初めのChl-a濃度は高くなっている⁹⁾。

Chl-a濃度は夏季が最も高く、秋季が冬季よりも低く

なった。秋季の調査は50mmの降雨後に実施したため、Chl-a濃度が低くなったと考えられる。Chl-a濃度は低流量状態が続いた後の降雨に伴う流量増大時に高くなるが、流量安定時は、春季や夏季に高い値になり、秋季や冬季は低くなった。

(2) 流量安定時のChl-a流出特性

Chl-a濃度は低流量状態が続いた後の降雨に伴う流量増大時に高くなること、流量安定時の流出特性は季節によって異なることが明らかになった。このため、降雨に伴う流量増大時の流出特性と流量安定時の流出特性を分けて考える必要がある。ここでは、涸沼川の2年半の毎週調査の結果を用いて、流量安定時のChl-aの流出特性について検討を行った。

流量安定時のChl-aの供給源としては、河床附着生物膜の剥離流出、流域内の水田やため池等の停滞水域で増殖した藻類の流出、河川内の淵やよどみ等の流速の遅い場所で増殖した藻類の流出等が考えられる。なお、調査を実施した涸沼川流域では、春から秋にかけては降雨間隔が短いため、河床附着生物膜の流量安定時の剥離は生じていない²⁾。

これらの藻類の増殖に影響を与える主因としては、栄養塩濃度・水温・日射量が考えられる。また、図-3に示したように、降雨に伴う流量増大後にChl-a濃度は減少し、流量安定時には濃度が上昇する傾向が見られることから、前回の降雨に伴う流出時からの経過日数もChl-a濃度に関係すると考えられる。ここでは、栄養塩濃度の変化が小さい涸沼川のみを対象としていることから、栄養塩濃度は検討対象外とした。また、日射量の推定や日射量と水温の影響の分離が難しいことから、水温と降雨に伴う流出後の経過日数についてChl-a濃度との関係

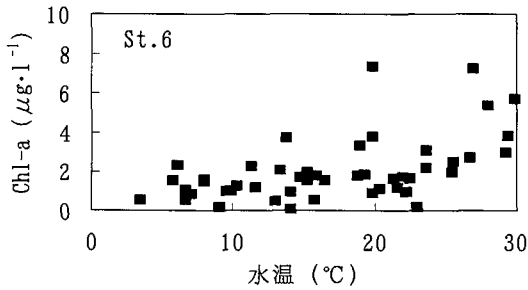
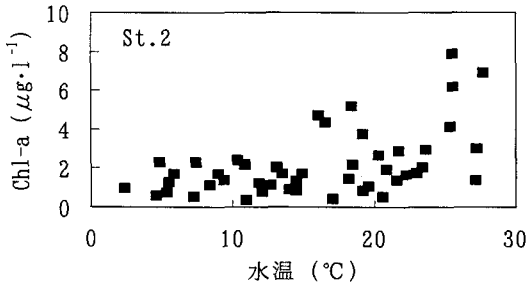


図-4 流量安定時のChl-a濃度と水温との関係

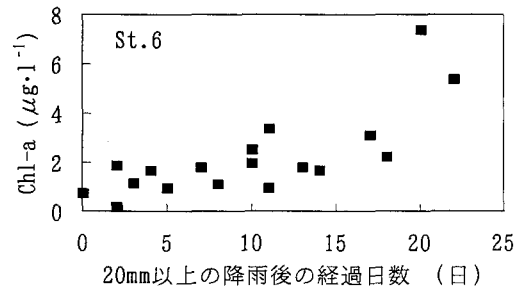
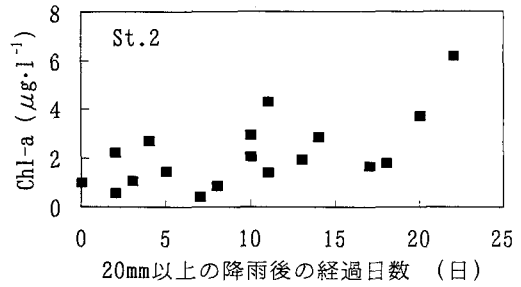


図-5 流量安定時のChl-a濃度と20mm以上の降雨後の経過日数との関係

について検討を行った。毎週調査時のデータを解析対象とし、水温は調査時の測定値を用いた。降雨に伴う流出後の経過日数は、降雨量が20mmを超えると河床附着生物膜現存量の剥離による減少が見られること⁵⁾から、20mm以上の降雨後の経過日数とした。また、流量増大時の影響を取り除くため、全データのうち流量の少ないほうから1/2になるようSt.2における流量が $2.5\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 以下の日を対象とした。

まず、Chl-a濃度と水温との関係について検討を行った。降雨に伴う流出後の経過日数が長くなると藻類の増殖量は飽和に達すると考えられる。この影響を取り除くため、20mm以上の降雨後の経過日数が30日以内のデータを抽出し、Chl-a濃度と水温の関係性を求めた。図-4に示したように、水温が高くなるとChl-a濃度も増加する傾向が見られた。46サンプル数で、相関係数はSt.2が0.51、St.6が0.53になり、1%の棄却率で有意な関係があった。この結果は、瀬沼川における季節ごとの精密調査で、流量安定時のChl-a濃度の平均値が夏季で高く、冬季や秋季で低くなったことと一致する。

次に、Chl-a濃度と降雨に伴う流出後の経過日数との関係は、水温の影響を軽減するために、St.2における水温が 15°C から 25°C の日のデータを対象とした。図-5に示したように、降雨後の経過日数が長くなるほどChl-a濃度が増加する傾向が見られた。相関係数は、18サンプル数でSt.2が0.62、St.6が0.75となり、1%の棄却率で有意な関係が認められた。

このように、流量安定時のChl-a濃度は、水温が高い

ほど高く、降雨後の経過日数が長いほど高くなることが明らかになった。これは、藻類が河床、流域内の停滞水域、河川内の淵やよどみで増殖して流出しているとする仮定と一致する。ここでは、最も簡単な相関係数による検討を行った。藻類の増殖初期は一次反応速度式に従うと考えられるが、増殖速度係数は水温の関数となる。生態系モデルにおいては種々の関数が用いられており、また、藻類種によっても最適水温が異なる。このため、流量安定時のChl-a濃度を予測するには、流出する藻類の増殖場に関する因子も含めて詳細な検討が必要になる。

(3)降雨時のChl-a濃度の変化

藻類の河川での流出は、他の懸濁物質と同様に降雨に伴う流量増大の影響が大きい。降雨流出時には表面流出が生じ、流域の晴天時堆積物質が洗い流される。また、土壌が侵食され土やシルトが流出し、水田等の停滞水域からの流出も生じる。河川内においては、一般に流量が増大すると流速も増加し河床堆積物質が巻き上げられて流出し、河川水中の懸濁物質濃度が上昇すると考えられている。降雨に伴う流量増大時に河床附着生物膜の剥離流出が生じる⁵⁾ため、Chl-aの場合は、河床附着生物膜の剥離流出と停滞水域からの流出が大きな要因となっている。このため、前回降雨に伴う流出後の経過日数が長いほど降雨時のChl-a濃度は高くなると考えられる。

図-6には、流量が $3.5\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 以上のデータを用いて、Chl-a濃度と20mm以上の降雨後の経過日数との関係を

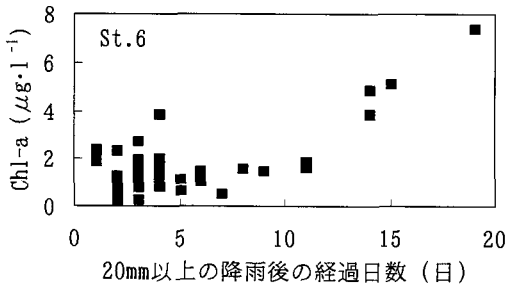
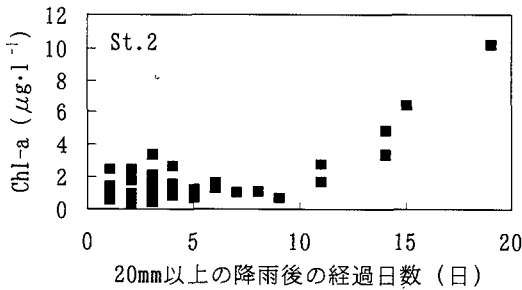


図-6 降雨時のChl-a濃度と20mm以上の降雨後の経過日数との関係

20mm以上の降雨後の経過日数が20日以内について示した。先行晴天日数が短い場合は、大きな降雨後の流量減少期も含まれていることと、当該降雨が前回降雨より大きい場合は前回降雨時に流出が生じなかった場所からも流出すること等の影響が大きくなるためChl-a濃度にバラッキが生じた。先行晴天日数が5日以上に限ると、降雨後の経過日数が長くなるほどChl-a濃度も高くなっている。5日以降に限ると、13サンプル数で相関係数はSt.2, St.6それぞれで0.90と0.94となり高い相関関係があった。このことから、降雨に伴う流量増大時のChl-a濃度の上昇は河床や停滞水域で増殖した藻類が流出するためと考えられる。

(4)河床附着生物膜現存量とChl-a濃度の関係

今回解析対象とした酒沼川のSt.2とSt.6においては、人工附着板を用いた河床附着生物膜の現存量変化調査も水質調査と併せて実施した。その結果をもとに構築した河床附着生物膜現存量変化のシミュレーションモデル式によって、実際の河床附着生物膜の現存量変化を精度よく表わすことが可能になった²⁾。図-7には、このモデル式を用いて求めた河床附着生物膜の現存量と河川水中のChl-a濃度との関係を示した。河床附着生物膜の現存量が多いときには河川水中のChl-a濃度も高くなる傾向が見られた。111サンプル数で相関係数は、St.2で0.49, St.6で0.51となり、1%の棄却率で有意な関係があった。

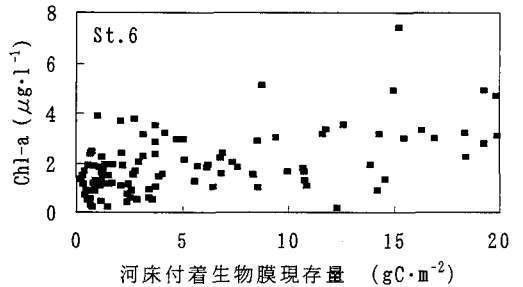
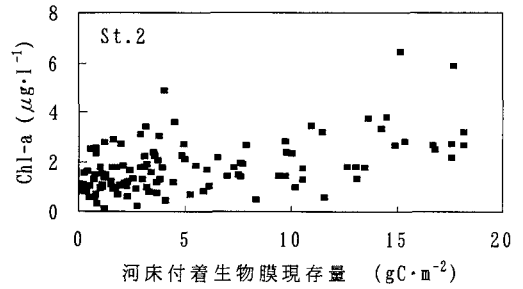


図-7 Chl-a濃度と河床附着生物膜現存量との関係

河床附着生物膜現存量変化のモデル式で、現存量は、降雨に伴う流量増大時に剥離によって減少し、その後の増加は流量・水温・日射量の関数として表わされており、それまでの気象・水理条件等の履歴を反映して現存量が求められる。そのため、河床附着生物膜現存量は、結果的に流域内の藻類の存在量にも比例していると考えられる。河川水中のChl-a濃度は河床附着生物膜の剥離、流域内の停滞水域や河道内の流速の遅い場所で増殖した藻類の流出がその主要な供給源であるため、河川水中のChl-a濃度は河床附着生物膜現存量との間に有意な関係が認められたものと考えられる。このことから、河床附着生物膜現存量から、河川水中のChl-a濃度を推定することも可能になる。

4. Chl-a 流出負荷量の定量評価

(1)Chl-a と他の水質項目との関係

藻類が河川に流出するとChl-a濃度だけでなく懸濁態の炭素・窒素・リンの濃度も上昇させている。Chl-a濃度と他の水質項目との相関係数をSt.2とSt.6について炭素・窒素・リンを中心に求め、表-3に示した。相関係数は、懸濁態の炭素・窒素・リンで1%の棄却率で有意な関係が認められた。このことは、Chl-a濃度が増加すると、懸濁態の炭素・窒素・リンも増加することを示している。懸濁態リンは、土壌粒子等に吸着しているものも多いため、窒素よりも相関係数が少し低くなっている。懸濁物質濃度との相関係数も低かったが、同様に無

表-3 Chl-aと流量及び水質項目との相関係数

	St.2	St.6
BOD	0.39**	0.45**
P-COD	0.21*	0.28**
D-COD	0.18*	0.18*
T-COD	0.26**	0.32**
POC	0.29**	0.38**
DOC	0.15	0.16
TOC	0.32**	0.40**
P-N	0.39**	0.38**
D-N	0.33**	0.13
T-N	0.10	0.05
P-P	0.26**	0.37**
D-P	0.05	0.36**
T-P	0.27**	0.39**
SS	0.22**	0.29**
流量	0.08	0.09

** : P < 0.01, * : P < 0.05

機物質の流出が多いためと考えられる。溶存態の炭素・窒素・リンとの相関係数は低くなり、Chl-a濃度との有意な相関関係は見られなかった。また、Chl-aの全炭素・全リンとの相関係数は1%の棄却率で有意な関係が認められたが、Chl-aと全窒素との相関係数には有意な関係が認められなかった。窒素は溶存態の比率が高く、炭素・リンは懸濁態の比率が高いため、このような結果になったと考えられる。低流量状態が続いた後の降雨に伴う流量増大時にChl-a濃度が上昇するものの流量との相関係数は大きくなかった。前述したように、降雨後の経過日数によって降雨時のChl-a濃度が変わることも原因の一つと考えられる。

これらのことから、藻類としての流出は、炭素・窒素・リン成分の流出とも密接に関連している。閉鎖性水域への栄養塩流入負荷量特性を評価するためには、特定排出源だけでなく、河川への流入後や流域内の停滞水域での藻類の増殖に伴う変化についても十分考慮する必要がある。

(2) Chl-aの流出負荷量

河川流出負荷量の推定手法としては、原単位法、 $L=a \cdot Q^n$ 式、定期調査値をもとに調査間隔に台形公式を用いて算出する方法等がある。原単位法の場合は、発生源別に求めた面積や人数等の単位当たりの排出負荷量をもとに、その流域の流出負荷量を算出する方法である。Chl-aの場合は、河川への流入後や流域の停滞水域での藻類の増殖によって増加するものであり、原単位法にはなじまない。また、原単位法では降雨に伴う流量増大時等日

単位の濃度変化を表すことはできない。 $L=a \cdot Q^n$ 式は、流量と各水質の流出負荷量に高い相関関係があることに着目したものであり、流量の日変化の観測値や推定値が得られれば負荷量変化を求めることが可能になる。また、流域内残存量や限界掃流力等を考慮したモデルも提案されている。調査間隔に台形公式を用いる場合は、日単位の流量が得られない場合に調査時の流量と負荷量から推定する方法である。調査回数が少ないと流量増大時の高濃度時等一回の観測値の重みが増し精度は悪くなるが、調査回数が多く一定間隔の場合には精度の高い推定法になる。また、前述したように河川水中のChl-a濃度は河床付着生物膜現存量との相関関係が高いため、河床付着生物膜現存量から流出負荷量を推定することも可能になる。このため、 $L=a \cdot Q^n$ 式、調査間隔に台形公式、河床付着生物膜現存量のそれぞれを用いた場合のChl-aの年間流出負荷量を沼沼川のSt.2とSt.6について算定した。河川流出藻類の流域内での増殖速度、流出過程等また明確になっていないことが多いため、流域内残存量や限界掃流力等を考慮したモデルは用いなかった。

日単位の流量変化は、St.2における観測流量と流域内の地域気象観測所の降雨データよりタンクモデルを用いて推定した²⁾。St.6ではSt.2の流量との回帰式

$$Q_{St.6} = 1.33 \cdot Q_{St.2} \quad (1)$$

より算定した²⁾。

$L=a \cdot Q^n$ 式の係数aと指数nは毎週調査データを用い、流量 $Q(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$ とChl-a負荷量 $L(\text{mg} \cdot \text{s}^{-1})$ から、直接最小二乗法により誤差の総和を求めて試行錯誤的に係数と指数の最適解を求める直接法とそれぞれの対数を取り $\log L = \log a + n \cdot \log Q$ の回帰直線として求める対数法の2方法を採用した¹⁰⁾。直接法により係数と指数を求めた場合は、St.2、St.6それぞれで、

$$L_{St.2} = 2.31 \cdot Q_{St.2}^{0.965} \quad (2)$$

$$L_{St.6} = 2.45 \cdot Q_{St.6}^{0.841} \quad (3)$$

の推定式、対数法による場合は、

$$L_{St.2} = 2.04 \cdot Q_{St.2}^{0.906} \quad (n=98, r=0.67) \quad (4)$$

$$L_{St.6} = 2.35 \cdot Q_{St.6}^{0.808} \quad (n=98, r=0.55) \quad (5)$$

の推定式を用い、流出負荷量を算定した。直接法は対数法に比べて高負荷量の値に重みづけされるため、係数・指数とも値が大きくなり、観測値と推定値の差の二乗の総和もSt.2で5%、St.6で3%小さくなった。

調査間隔に台形公式を用いる方法では、一年間の流出負荷量 $L_i(\text{g})$ を調査日 $T_i(\text{d})$ とその時の負荷量 $L_i(\text{g} \cdot \text{d}^{-1})$ を用いて、

$$L_T = \sum (T_i - T_{i-1}) \cdot (L_i + L_{i-1}) / 2 \quad (6)$$

より求めた。

河床付着生物膜現存量から流出負荷量を求める方法では、河床付着生物膜現存量 $P(\text{mgC} \cdot \text{m}^{-2})$ とChl-a濃度 $C(\mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1})$ との関係式は、それぞれ

表-4 瀬沼川のChl-a年間流出負荷量

	(kg)	台形公式	$L=a \cdot Q^n$		生物膜
			直接法	対数法	
1988	St.2	220	280	220	200
	St.6	270	330	270	270
1989	St.2	240	350	280	240
	St.6	370	400	330	320

$$C_{St.2}=0.102 \cdot P_{St.2}+1.25 \quad (7)$$

$$C_{St.6}=0.140 \cdot P_{St.6}+1.22 \quad (8)$$

となった。このChl-a濃度とタンクモデル及び式(1)によって推定した流量から、流出負荷量を算定した。

表-4には、各算定式を用いて求めたSt.2とSt.6における2年間の流出負荷量を示した。年間流出負荷量は、調査間隔に台形公式を用いて求めた場合、2年間の平均でSt.2で230kg、St.6で290kgになった。比流出負荷量は、それぞれ $1.8\text{kg} \cdot \text{km}^{-2}$ と $1.9\text{kg} \cdot \text{km}^{-2}$ とほぼ等しくなった。2年間の比較では1989年の流出負荷量が多くなった。これは、1989年の降雨量が1988年の1.2倍になり、流量が多くなったため、河床や流域内の停滞水域等の藻類増殖可能な場所が増加したこと等によると思われる。

ここでは、Chl-aの年間流出負荷量を、調査間隔に台形公式を用いる方法と $L=a \cdot Q^n$ 式の直接法と対数法、および、河床附着生物膜現存量から推定する方法により算定した。真の値が解らないので評価を行うのは難しいが、一桁の精度ではどの方法もほぼ同じ年間流出負荷量になった。このため、ここで求められた値がChl-aの年間流出負荷量として妥当な値であると考えられる。

ここで用いた手法のうち、調査間隔に台形公式を用いて算出する方法は、流量と水質の測定値があれば算定することが可能であり、調査間隔が短いほど精度が良くなる。しかし、閉鎖性水域における富栄養化生態系モデルでは日単位の計算が行われており、それに対応させるためには日単位の流出負荷量の算定が必要になる。しかし、この調査間隔に台形公式を用いる方法では、毎日の流出負荷量変化を求めることができない。

流出負荷量の日変化の算定には、流量の日変化が必要であるが、タンクモデルや他の手法で算定することは可能である。懸濁物質や懸濁態成分の場合、 $L=a \cdot Q^n$ 式を用いることが多い。Chl-aは懸濁態成分であるが、式(7)、式(8)に示したように相関係数もさほど高い値とはいえず、指数の値も直接法、対数法とも1以下になっており、他の懸濁態成分とは異なった挙動を示している。また、 $L=a \cdot Q^n$ 式では、前述したように前回の降雨流出時からの経過日数によるChl-a濃度の違いが反映されおらず、藻類の増殖速度の水温依存性についても考慮さ

表-5 炭素・窒素・りん流出負荷量に占める藻類の比率

	河川水($\times 10^3\text{kg}$)		藻類($\times 10^3\text{kg}$)		比率(%)	
	1988	1989	1988	1989	1988	1989
POC	260	410	37	51	14	12
TOC	390	560	37	51	9.5	9.1
P-N	25	35	5.9	8.2	23	23
T-N	200	240	5.9	8.2	3.0	3.5
P-P	9.4	16	0.81	1.1	8.6	6.9
T-P	11	19	0.81	1.1	7.1	6.0

れていない。また、平均濃度を用いて毎日の流出負荷量変化を算定することも可能であるが、図-2に示したように、Chl-aの濃度変化が大きいため、これらを表現する式が必要になる。流域内の藻類の存在量と河川水中のChl-a濃度が比例し、河床附着生物膜現存量は、流域内の藻類の存在量に比例しているとする推定が実証できれば、河床附着生物膜現存量とChl-a濃度との関係式より日単位のChl-a流出負荷量変化を求めることが可能であり、現時点ではこの手法がChl-aの流出負荷量の日変化を表わすのにはもっとも適していると考えられる。しかし、Chl-aの供給源が河床附着生物膜だけではないことから、さらに精度の高い流出負荷量の算定のためには、藻類の供給源や藻類の増殖を考慮した流出モデルの構築が必要になる。

(3) 藻類としての栄養塩の流出負荷量の評価

藻類が河川を流出する場合、その構成成分の炭素・窒素・リンも懸濁態として流出している。この藻類としての炭素・窒素・リンの流出負荷量の全流出負荷量に対する比率について検討した。

炭素・窒素・リンの流出負荷量のうち藻類の占める比率は、河川水中の濃度比と藻類の組成比を用いても算出することができる。河川水中の懸濁態の炭素・窒素・リン・Chl-aの比は、表-2で示した瀬沼川St.6における算術平均濃度で500:63:20:1、流量加重平均濃度で830:91:32:1になる。藻類の組成比として、瀬沼川における河床附着生物膜の比率を用いることにすると、同様に137:22:3.0:1になった²⁾。この値を用いて懸濁態成分に占める藻類の比率を推定すると、算術平均濃度で炭素は27%、窒素は35%、リンは15%、流量加重平均濃度ではそれぞれ、17%、24%、9.4%が藻類由来で占められることが解る。また、溶存態も含めた全炭素・窒素・リンに占める比率は算術平均濃度で13%、3.3%、11%、流量加重平均濃度で10%、3.2%、7.7%になった。

さらに、精度の高い算定方法として、年間流出負荷量を用いて全炭素・全窒素・全リンの流出負荷量のうち藻類の占める比率を求めた。表-5には、調査間隔に台形

公式を用いた場合の溜沼川の St. 6 における全及び懸濁態の炭素・窒素・リンの年間流出負荷量を1988年と1989年の2年に分けて示した。また、藻類としての流出負荷量は表-4に示したChl-aの調査間隔に台形公式を用いて算出した年間流出負荷量から河床付着生物膜の平均組成比を用いて算出した。藻類の比率を求めると、2年間の平均で、懸濁態の炭素・窒素・リンに対しては、それぞれ13%・23%・7.8%になり、全炭素・全窒素・全リンに対しては、それぞれ9.3%・3.2%・6.5%になった。2年間を比較すると窒素はほぼ同じであるのに対してリンは1989年が小さくなった。前述したように1989年は1988年に比べて降雨量が多く懸濁態成分の流出負荷量が大きくなったが、リンは藻類としての流出負荷量が増加する以上に土壌粒子等に吸着したものが増加するため、結果として藻類の比率が小さくなったと考えられる。

算術平均濃度では、懸濁態炭素・窒素・リンが流量増大時に高濃度になる分が加味されないうえ、藻類由来の流出の比率が他の推定法より大きくなった。また、調査を週に一度実施したため、調査間隔に台形公式を用いた年間流出負荷量からの推定値と流量加重平均濃度を用いた場合とでほぼ同じ値になった。懸濁態窒素の流出負荷量の約1/4は、藻類としての流出負荷量となり、その比率が大きい。全炭素・全リンの流出負荷量に占める藻類の比率も約10%と大きく、藻類としての流出負荷量は無視できない。さらに、これら流域内での藻類増殖時には河川に流出する溶存態の窒素・リンを取り込んでいるとすると、表-5に示した全窒素・全リンと懸濁態の窒素・リンの差の溶存態の窒素・リンの流出負荷量は、藻類の増殖によってそれぞれ2年間の平均で3.6%・31%減少した残りの値ということになる。流域内の河床や停滞水域での藻類の増殖は、溶存態栄養塩の流出負荷量を、特にリンで大きく減少させる効果を有している。さらに、下流域の閉鎖性水域に流入した後の藻類増殖への寄与は溶存態か懸濁態かの違いによって大きく異なる。藻類として流入した場合は、閉鎖性水域の栄養塩循環の中で、沈降によって系外に排出されたり、魚や動物プランクトン等に捕食される経路をたどる割合も大きくなり、閉鎖性水域内での藻類増殖への寄与は溶存態に比べて小さくなると考えられる。また、逆に、河川流域内の停滞水域で増殖した藻類は閉鎖性水域流入後に異常増殖を引き起こす要因になる可能性もある。

これらのことから、河川からの藻類としての流出負荷が、閉鎖性水域での藻類の増殖に与える影響は大きいものと考えられ、河川からの流入負荷量と下流域の閉鎖性水域の藻類増殖を結び付けた総合的な研究を進展させる必要があると考えられる。

5. おわりに

農耕地河川における藻類の流出特性と流出負荷量に関して、Chl-aを指標として2年半の毎週調査と季節ごとの詳細調査をもとに解析を行い、以下の結果を得た。

1)河床や流域内の停滞水域で増殖した藻類が降雨時に多く流出しているため、Chl-aの平均濃度は他の潜在的供給能力が非常に大きい懸濁態成分と異なり、流量加重平均濃度と算術平均濃度で差がなかった。

2)流量安定時のChl-a濃度は、水温が高いほど、前回の降雨からの経過日数が長くなるほど高くなり、降雨に伴う流量増大時のChl-a濃度は、先行晴天日数が長くなると高くなる傾向が見られ、河床、流域内の停滞水域、河川の淵・よどみ等流速の遅い場所等で増殖した藻類が流出しているためと考えられる。

3)Chl-aを含む水質項目の年間流出負荷量と藻類の組成比から、全流出負荷量に占める藻類としての流出負荷量の比率を求めると、懸濁態の炭素・窒素・リンに対しては、それぞれ13%・23%・7.8%、全炭素・窒素・リンに対しては、それぞれ9.3%・3.2%・6.5%になった。このため、藻類としての流出負荷量は無視できない。また、溶存態の窒素・リンを取り込んでいるとすると、溶存態の窒素・リンの流出負荷量はそれぞれ3.6%・31%減少していると推定され、流域内での藻類の増殖は特にリンで溶存態栄養塩の流出負荷を減少させていることが明らかになった。

参考文献

- 1) 海老瀬潜一, 井上隆信: 河川における懸濁物質の組成, 水環境学会誌, 16, pp.469-473, 1993.
- 2) 井上隆信, 海老瀬潜一: 河床付着生物膜現存量の周年変化シミュレーション, 水環境学会誌, 17, pp.169-177, 1994.
- 3) 宇佐見義博, 彦坂治, 吉本健二: 都市河川の流下に伴う水質変化とクロロフィルaとの関連性について, 水処理技術, 21, pp.1021-1028, 1980.
- 4) Inoue, T. and Ebise, S.: Runoff characteristics of COD, BOD, C, N and P loadings from rivers to enclosed coastal seas, *Marine pollution Bulletin*, 23, pp.11-14, 1991.
- 5) 井上隆信, 海老瀬潜一: 河床付着生物膜現存量の周年変化と降雨に伴う剥離量の評価, 水環境学会, 16, pp.507-515, 1993.
- 6) 茨城県企画部統計課: 茨城の農林業 (1990年世界農林業センサス結果報告書), 茨城県, 1991.
- 7) 日本分析化学会北海道支部: 水の分析-第3版-, 化学同人, 1981.

- 8) Otsuki, A., Watanabe, M.M. and Sugahara, K.: Chlorophyll pigments in methanol extracts from ten axenic cultured diatoms and three green algae as determined by reverse phase HPLC with fluorometric detection, *Journal of Phycology*, 23, pp.406-414, 1987.
- 9) 畠山成久, 福島悟, 笠井文絵, 白石寛明: 河川の藻類生産に及ぼす除草剤の影響評価, 陸水学雑誌, 53, pp.327-340, 1992.
- 10) 河原長美, 福住真也, 北川知与司: 年間総流出汚濁負荷量の推定法に関する研究, 水道協会雑誌, 593, pp.38-44, 1984.
- 9) 畠山成久, 福島悟, 笠井文絵, 白石寛明: 河川の藻類生 (1997.1.27 受付)

EVALUATION OF CHL-A LOADING IN A RURAL RIVER

Takanobu INOUE, Senichi EBISE and Akio IMAI

In the Hinuma River, the runoff characteristics of Chl-a as an indicator for algae were evaluated based on detailed observations during three and a half years. The higher the water temperature and the longer the days lasted after the last storm event were, the greater the Chl-a concentration during a low flow period. When the flow was increased by storm events, the Chl-a concentration became higher as the days lasted after the last storm event was extended. The algal biomass accounted for 13%, 23% and 7.8% of the particulate matter as carbon, nitrogen and phosphorus, respectively. Moreover, it was suggested that algae absorb and utilize 3.6% and 31% of dissolved nitrogen and phosphorus in terms of the annual runoff loading, respectively.