

砂河川における河床付着藻類の繁茂と それによる水質変化

GROWTH OF PERIPHYTON AND RESULTING CHANGE OF WATER QUALITIES IN A SAND BED RIVER

戸田祐嗣¹・辻本哲郎²・池田拓朗³・多田隈由紀³

Yuji TODA, Tetsuro TSUJIMOTO, Takuro IKEDA and Yuki TADAKUMA

¹正会員 博(工) 名古屋大学大学院助教授 工学研究科 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町1)

²フェロー 工博 名古屋大学大学院教授 工学研究科 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町1)

³学生会員 名古屋大学大学院 工学研究科 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町1)

Field observations and numerical simulations were performed to know the growth of periphyton and resulting change of water qualities in a sand river. In the field observation, the spatial distribution of periphyton and the time-spatial variation of DO, nutrient and SS concentrations were measured in the Yahagi River. Integrated numerical simulation models were presented to describe the spatial distribution of periphyton and nutrient cycling at the observed river reach, and the numerical simulations were performed to know the effect of growth of periphyton on water qualities in the sand river. It was found that the present numerical simulation model can predict the spatial distribution of periphyton well. The results of the numerical simulations suggest that the growth of periphyton in the sand river increases the particulate organic load from sand river reach to sea area.

Key Words : *periphyton, sand bed river, growth model, nutrient cycling, suspended solid*

1. 序論

河川に繁茂する植物は、光合成活動を通して有機物を生産し、水生生物のエネルギー源として河川生態系を根幹から支えている。その中で水中での一次生産活動を担う藻類は、その生息形態によって、固体表面に付着して生息する付着藻類と水中に浮遊して生息する植物プランクトンに大別される。一般に、付着藻類が生育するためには、付着基盤の河床まで日射が到達し、かつ藻類の付着基盤が流れの中で安定して存在する必要があるため、浅い礫の河床では付着藻類の繁茂が生じる¹⁾。下流域の水深が比較的大きな砂河川では、河床に到達する日射量が少なく、河床材料の砂が藻類の付着基盤としては不安定であるため、付着藻類に比べて植物プランクトンによる一次生産が盛んになると言われている¹⁾。

一方で、流域に農業地帯などを有する河川では、灌漑などの目的で河川水の取水が行われている。取水量の大きな砂河川では平水時の河川流量が取水により減少し、その結果として水深と河床材料の移動性が低下するため、本来では付着藻類が生息しにくい砂床区間においても付着藻類が

繁茂することが報告されている²⁾。そこで、本研究では、利水による取水量の大きな砂河川を対象として、流量低下が砂河川生態系に与える影響を解明するために、砂河川での河床付着藻類の繁茂特性とそれによる河川水質への影響を、現地観測と数値解析より明らかにすることを目的とする。

2. 現地観測

(1) 観測地・観測期間概要

現地観測は、矢作川の河口より17km地点付近で実施した。矢作川本川の河口から34.6km地点から80.0km地点の区間には7つのダムが建設されており、その最下流に位置する明治用水(河口より34.6km地点)では、灌漑期に30m³/sの河川水の取水が行われている。この影響で、矢作川の下流域では平水時の河川流量が小さく、平水時水域の減少、水深の低下、河床材料の移動頻度の低下が生じているものと判断される。

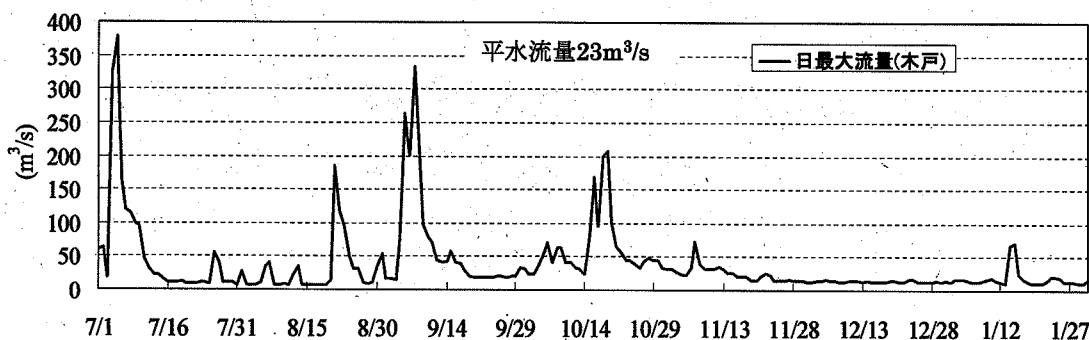


図-1 観測期間中の日最大流量の変化

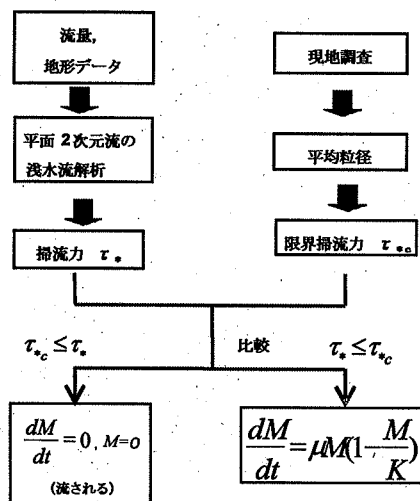


図-2 藻類繁茂域予測解析のフローチャート

観測期間の流況として、河口より13km地点に位置する木戸水位流量観測所(国土交通省)での流量を示す(図-1)。観測期前半の夏季から10月後半にかけては台風や秋雨前線の通過により流量が増加した期間があるが、観測期後半の11月以降については、安定した流況がつづいていたことが分かる。

(2) 付着藻類の空間分布に関する現地調査

観測は2005年10月から同12月の間に月一度の頻度で行なった。観測方法は、目視により判断される河床付着藻類の植被エリアの境界線をGPSによって測定した。12月12日の現地観測においては、河床の表面付近を採取し、強熱減量試験³⁾を行なって付着藻類量を求めた。強熱減量は、試料に対して強熱操作を行なったときの残留物重量と操作前重量の比を百分率で表したものであり、有機物量を表す指標である。同じ日に採取した藻類付着用プレートから得られたChl.a量と、強熱減量試験から得られた重量とその相関関係式を用いて付着藻類量(mg/m²)を算出した。

(3) 藻類繁茂による水質変化に関する現地観測

2005年9月14日～9月15日、11月19日～11月21日に河口

より34km地点、17km地点、10km地点で流程に沿って水質の時間的変動を観測した。測定項目は溶存酸素濃度(以下DOと表す)、硝酸態窒素濃度、リン酸態リン濃度で、水温も同時に測定した。現地でDOを携帯式DOメータ(FUSO-DO5509)で、水温は携帯式pHメータ(DKK・HPH-110)を用いて測定した。同時に河川水をボトルで採水し、分析室に持ち帰った。採水試料についてイオン分析計(TOA DKK IA-200)を用いて硝酸態窒素、リン酸態リンの濃度を測定した³⁾。

3. 数値解析

(1) 藻類繁茂域予測の数値解析

浅水流方程式を用いた平面2次元流れ場の解析に付着藻類動態を組み込んだモデルを構築し、藻類繁茂の空間分布予測を試みた。図-2に本解析のフローチャートを示す。本解析では、まず、観測対象河川の流量、地形データを用いた浅水流方程式の数値解析⁴⁾を行い、河床掃流力の平面分布を算出する。一方、現地河川での土砂粒径より限界掃流力を算出し、河床面での掃流力と比較する。掃流力が限界掃流力を上回る場合には、河床材料は移動しているものとし、河床面の藻類量は零とする。掃流力が限界掃流力以下の場合には、河床材料は停止しているものとして、ロジスティック方程式を用いた藻類の増殖解析を行う。

a) 藻類の増殖解析

藻類の増殖は以下のロジスティック方程式に従うものとする。

$$\frac{dM}{dt} = \mu M \left(1 - \frac{M}{K}\right) \quad (1)$$

ここに、 μ ：比増殖速度 (day⁻¹)、 K ：環境容量 (mg/m²)、 M ：付着藻類の現存量 (mg/m²)である。比増殖速度と環境容量は、藻類の光合成活動と関連しており、日射、水温、栄養塩濃度の影響を受ける。本研究では、その影響をMonod型関数、正規分布型関数で近似した戸田²⁾の手法により推定した。

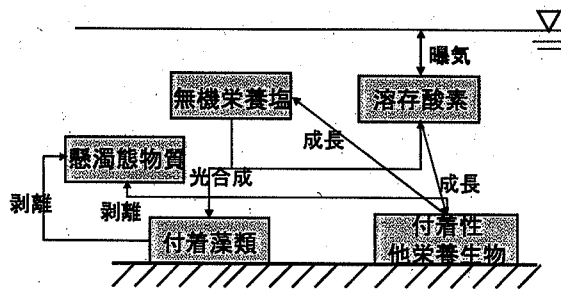


図-3 物質循環解析の概念図

b) 計算条件

地形データにはGPSとレーザーレベルによる測量データを用いた。計算格子は流下方向グリッド数が20、横断方向グリッド数は22とした。またManningの粗度係数を0.032とした。水位に関しては、下流側4kmに位置する木戸観測所と上流側7.5kmに位置する岡崎観測所における水位データから、計算対象区間の下流端である16.8km地点での水位を線形補完により算出した。流量は木戸観測所での流量値を用いた。対象区間と木戸観測所の間には支川の流入はなく、観測所の流量はほぼ対象区間の流量と等しいものと判断される。

水温、栄養塩濃度については、国土交通省管理の水文水質データベースから観測区域(17km地点)に最も近い観測所である米津水質自動観測所(10km地点)における水温データを使用した。日照時間については、気象庁電子閲覧室から、観測地に一番近い岡崎地域気象観測所から日照時間のデータを取得し使用した。

(2) 藻類繁茂による水質変化に関する数値解析

河床付着藻類の増殖が河川水質に与える影響を把握するため、藻類の増殖を考慮した物質循環モデルを構築した。図-3に本モデルで取り扱う物質循環の模式図を示す。付着藻類が光合成を行うことで窒素・リンが消費され、酸素が放出される。その一方で、有機物が微生物によって分解される際に、酸素が消費され、窒素・リンが放出される。砂河川での水質変動を計算するために、このような生物活動による物質循環をモデル化する。

a) 藻類の繁茂率

砂河川では流量の変動により、河床材料が頻繁に移動する。河床材料の移動に伴って付着藻類が剥離する。このような藻類の剥離は、河床面上の藻類現存量を変化させ、結果として砂河川の物質循環に影響を与える。従って、砂河川での物質循環モデルを構築するためには、流量変動に応じた河床面上の藻類の繁茂分布の影響を考慮しなくてはならない。しかし、3.(1)で行った平面2次元解析から藻類量を予測することは、流程に沿った長い区間での物質循環解析では計算負荷が大きくなってしまふ。そのため、本研究では藻類の河床面での繁茂率 p (繁茂している面積と河道の面積の割合)を導入し、それを用いて藻類量を計算することを試みた。河床面での

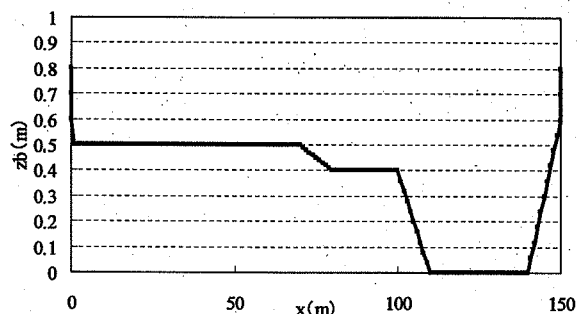


図-4 物質循環解析に用いた河床横断面形状

藻類繁茂率 p については、以下の手順で算出した。

対象とする河川区間での複数の河床断面形を平均化して、代表的な河床横断面形を設定した(図-4)。この断面に流量を与え、断面内各点での掃流力を計算した。掃流力と限界掃流力を比較することで、全河川幅に対して砂が移動せず藻類が増殖する割合(p)が算出される。この値を後に示す固定砂面上での付着藻類量(M_0)、付着性他栄養生物量(Het_0)の増殖式に乗ずることにより、砂の移動している面積割合を考慮した付着性生物の増殖を推定することとする。

b) 河床付着性生物の変化

付着藻類現存量の変化を以下の式で表すこととする。

$$\frac{dM}{dt} = p \frac{dM_0}{dt} \quad (2)$$

$$\frac{dM_0}{dt} = \mu M_0 \left(1 - \frac{M_0}{K}\right) \quad (3)$$

ここに、 M : 実河床での付着藻類量(g/m^2)、 M_0 : 固定河床での付着藻類量(g/m^2)、 μ : 付着藻類の比増殖速度(day^{-1})、 K : 付着藻類の環境容量(g/m^2)である。

付着性他栄養生物現存量の変化を次式で表す。

$$\frac{dHet}{dt} = p \frac{dHet_0}{dt} \quad (4)$$

$$\frac{dHet_0}{dt} = \mu_H Het_0 \left(1 - \frac{Het_0}{K_H}\right) \quad (5)$$

ここに、 Het : 実河床での付着性他栄養生物量(g/m^2)、 Het_0 : 固定河床での付着性他栄養生物量(g/m^2)、 μ_H : 付着性他栄養生物の比増殖速度(day^{-1})、 K_H : 付着性他栄養生物の環境容量(g/m^2)である。

c) 硝酸態窒素・リン酸態リン・DO・SSの変化

硝酸態窒素・リン酸態リン・DO・SSの変化をそれぞれ以下の式で表す。なお、本研究で対象とするSSとは、生物起源の有機態懸濁物質濃度であり、砂・シルト由来のSSは含んでいない。

$$\begin{aligned} \frac{\partial N}{\partial t} + U \frac{\partial N}{\partial x} = & -\frac{\alpha_N}{H} \frac{dM}{dt} + \frac{1-\sigma}{\sigma} \frac{\alpha_N}{H} \frac{d(Het)}{dt} \\ & + \frac{\alpha_N}{H} k_{ae}(SSH) + \frac{\partial}{\partial x} \left(Dis \frac{\partial N}{\partial x} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

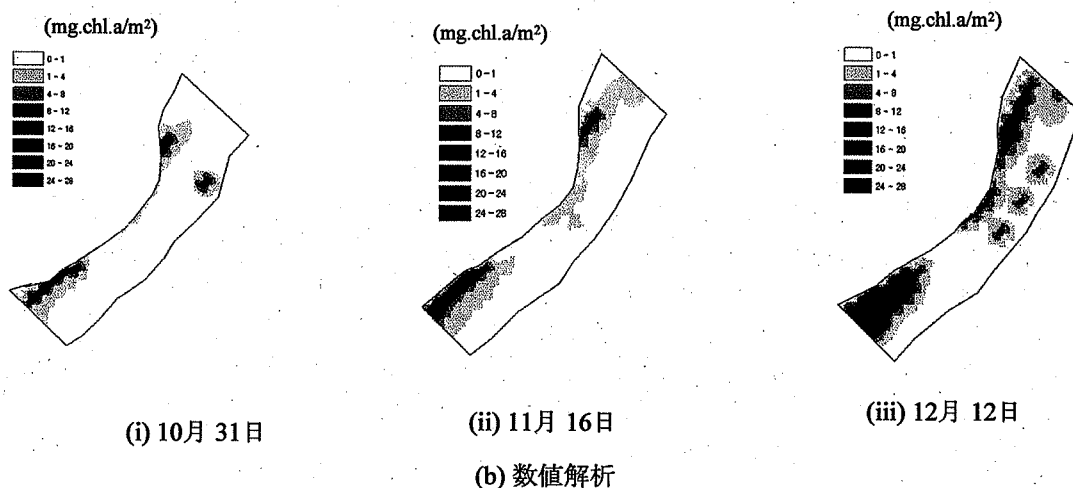
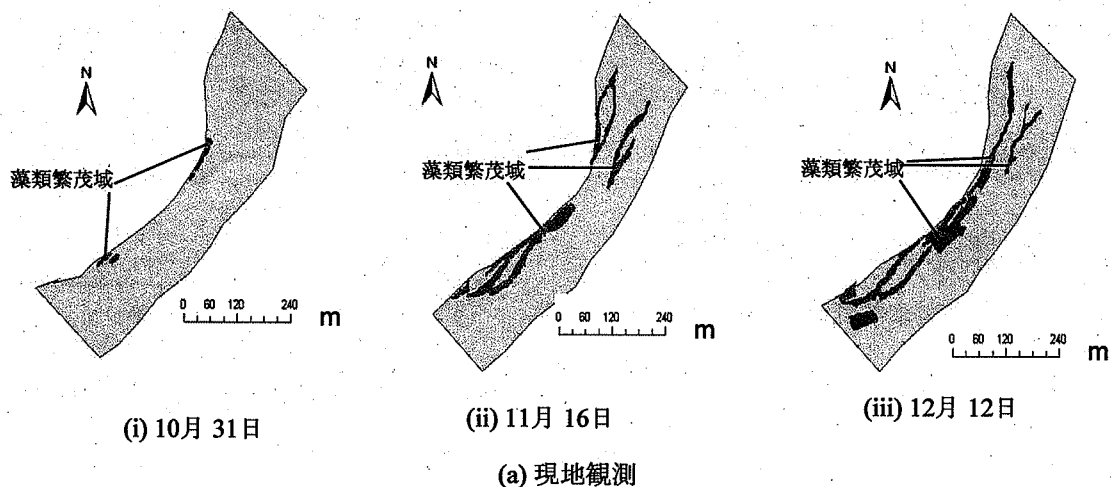


図-5 河床付着藻類の空間分布

$$\frac{\partial P}{\partial t} + U \frac{\partial P}{\partial x} = -\frac{\alpha_P}{H} \frac{dM}{dt} + \frac{1-\sigma}{\sigma} \frac{\alpha_P}{H} \frac{d(H_{et})}{dt} + \frac{\alpha_P}{H} k_{ae}(SS \cdot H) + \frac{\partial}{\partial x} \left(Dis \frac{\partial P}{\partial x} \right) \quad (7)$$

$$\frac{\partial(DO)}{\partial t} + U \frac{\partial(DO)}{\partial x} = \frac{K_L}{H} (DO^* - DO) + \frac{\alpha_{OA}}{H} \frac{dM}{dt} - \frac{\alpha_{OG}}{H} \frac{d(H_{et})}{dt} - \frac{\alpha_{OR}}{H} k_{ae}(SS \cdot H) + \frac{\partial}{\partial x} \left(Dis \frac{\partial(DO)}{\partial x} \right) \quad (8)$$

$$\frac{\partial(SS)}{\partial t} + U \frac{\partial(SS)}{\partial x} = -k_{ae} SS + \frac{\partial}{\partial x} \left(Dis \frac{\partial(SS)}{\partial x} \right) + \frac{1}{H} u \left(-\frac{dM}{dt} \right) \frac{dM}{dt} + \frac{1}{H} u \left(-\frac{d(H_{et})}{dt} \right) \frac{d(H_{et})}{dt} \quad (9)$$

ここに、 U : 断面平均流速(m/s), H : 平均水深(m), k_{ae} : 分解速度(day⁻¹), Dis : 分散係数(m²/s), K_L : 再曝気係数(m/s), DO^* : 飽和溶存酸素量(g/m³), α_N , α_P , α_{OA} , α_{OG} : 生物活動に伴う物質使用率, $u(x)$ はステップ関数で, $x>0$ のとき $u=1$, $x<0$ のとき $u=0$ となる。

d) 水理特性

断面平均流速の算定にはマンニングの平均流速公式を用いた。分散係数として、実河川、室内河川に対してともに適合性の優れているIwasa and Aya⁵⁾による以下の式を用いた。

$$\frac{Dis}{U_* H} = 2.0 \left(\frac{W}{H} \right)^{1.5} \quad (10)$$

ここに、 W : 川幅, U_* : 摩擦速度である。

e) 計算方法および条件

計算領域として流下方向に24kmの区間を設定し、その間を100メッシュに分割し、時間刻みを1時間として解析を行った。付着生物の成長を非定常で、それ以外の物質を定常として解いた。流量については、2005年8月から2006年1月の間の計算を実施した。川幅は150mとし、平均河床勾配を1/1500とした。計算に用いた生物生理パラメータについては戸田・池田⁶⁾と同じ値を用いた。

上流側の境界条件は硝酸態窒素、リン酸態リン、SSについては、現地観測で測定した物質濃度の日平均値を全時間において与えた。DO、水温変動は上流端の34km地点で測定した水温変動を近似して与えた。下流側の境界条件は、濃度の空間勾配がゼロになるようにした。付着藻類、付着性他栄養生物の初期条件としては、出水後で

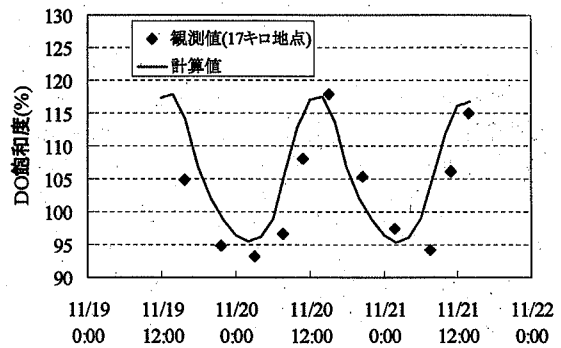
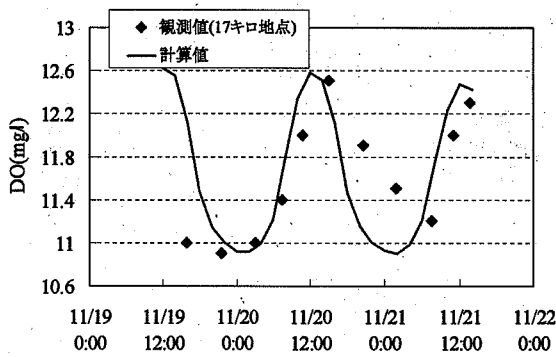
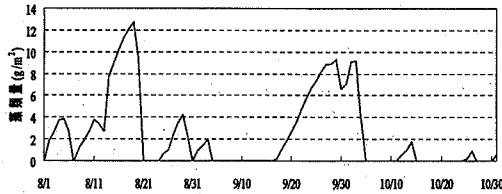
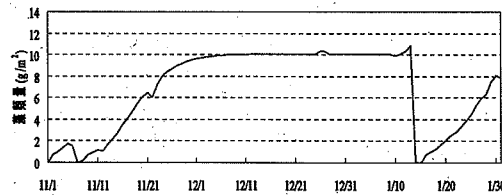


図-6 DO濃度, DO飽和度の日変化



(a)夏季



(b)冬季

図-7 河床付着藻類量の時間変化

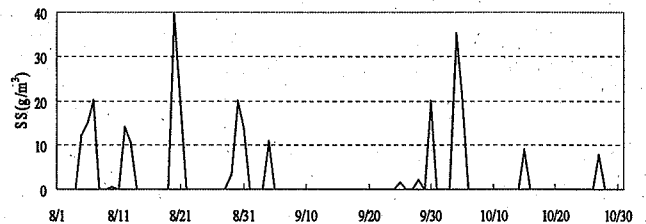


図-8 SS濃度の時間変化

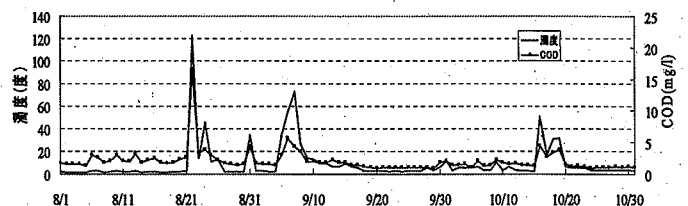


図-9 濁度・COD濃度の時間変化(米津水質観測所観測値)

ほとんど流されてしまった状態を想定して $M=1.0\text{g/m}^2$, $H_{ef}=1.0\text{g/m}^2$ とした。

4. 観測および計算結果

(1) 付着藻類の空間分布

現地観測によって得られた付着藻類の繁茂状況と、計算結果による付着藻類の分布を図-5に示す。観測結果と比較して計算結果はより広い範囲での付着藻類の繁茂が見られる。しかし、計算結果で得られた付着藻類の繁茂域の大部分は 4mg/m^2 以下のごく微量の付着藻類であり、現地観測時に同程度の付着藻類が繁茂していたとしても、目測では観察されないと考えられる。しかし、計算では河川右岸側での藻類の繁茂や、10月から12月に向けての藻類繁茂域の拡大などを再現しており、河床材料の移動頻度解析と藻類増殖モデルを組み合わせることで砂河床上の藻類繁茂域を推定できることを示している。

(2) 藻類繁茂に伴う水質変化

11/19～11/21の17キロ地点のDO濃度、DO飽和度の観測値とそれに相当する地点での計算値のDO濃度、DO飽

和度の時間変化を比較した(図-6)。数値計算結果は日射に伴う溶存酸素量の変化を絶対値、飽和度および変化の位相ともに概ね再現している。

図-7に付着性藻類量の変化を示す。夏季(8月～10月)は 10g/m^2 を越す増殖が1回あるものの、全般的にある適当な頻度での藻類の剥離が生じている。それに対して冬季(11月～1月)は、計算開始8日目に一旦剥離するものの、その後急速に増殖し、一ヶ月以上に亘って 10g/m^2 程度繁茂している。これは11月後半から1月前半にまとまった降雨がなく、日最大流量が $15\sim 20\text{m}^3/\text{s}$ を推移しており、流況が安定していたことによると考えられる。

夏季(8月～11月)、冬季(11月～1月)におけるSS濃度の変化を図-8に示す。SS濃度の変化は流量と対応しており、流量が増加した時に、急増し、すぐに低下したあと一定の値をとる。これは、流量の増加による河床材料の移動に伴って付着生物の剥離が生じ、それらがSSとなって濃度上昇を引き起こすためである。本計算区間の下流端近傍に位置する米津水質観測所(10km地点近傍)の自動水質観測データから、8月～10月の濁度・COD濃度を図-9に示す。計算によって得られた同時期のSS濃度の変化と計測された濁度、COD濃度は増加するタイミングや急増後すぐに低下する点など、変化の傾向が類似

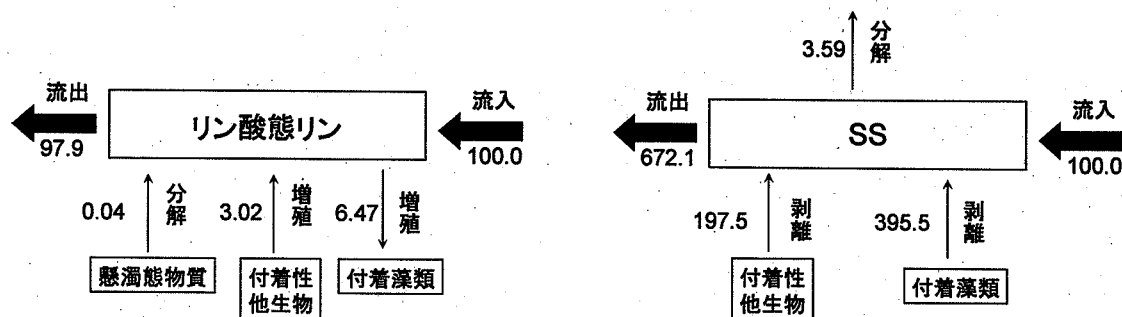


図-10 計算全期間・全区間におけるリン酸態リン・SSの収支（図中の数値は、計算全期間における上流端からの流入物質質量を100とした場合の全区間内での物質の配分量を示す）

していることが分かる。これは出水により剥離した生物が観測対象域の河川の濁度や浮遊有機物量の増加に寄与していることを示唆するものである。しかし、計算ではSS濃度のピーク値を持つ幾つかの出水に対して、観測された濁度ではピークを持たない時があるなど、ピークの大小関係には計算と観測の間に相違が見られる。これらの相違を生む原因としては、本計算では、SSの生成源として河床生物の剥離のみを考慮しているが、実際の出水時には河床材料の砂やシルトそのものもSSの生成源であり、それが本解析に含まれていないことや、計算は明治頭首工下流の限られた河道区間のみで行われているため、それより上流側での出水時の懸濁態物質の負荷特性が考慮されていないことが考えられる。

図-10に計算全区間・全期間におけるリン酸態リン、SS濃度の収支を示す。図では上流端より流入する物質質量を100とした場合の区間内での配分量を示している。リンについては、流入した物質質量の殆どが流下しており、区間内の生物活動による変化は1割以下であり、この傾向は溶存態の他の物質（DO、硝酸態窒素）についても同様であった。一方、SS濃度は生物の剥離によって増加し、流入量の6.7倍の量が流出していることがわかる。これらの増加量のうちの6~7割を藻類剥離が占めており、藻類剥離が下流域・河口域の浮遊有機物環境に与える影響は極めて強いといえる。区間内での生物活動によって分解されるSS量は流入量の4%以下であり、生物分解によって有機体SSが除去される可能性は低い。砂河川は、礫床河川と異なり流量の増加によって河床材料が容易に移動するため、それに伴って付着生物が剥離し下流へ流される。海域への負荷を考えると、砂河川に付着性生物が繁茂すると、粒子態有機物負荷が大きくなり、河口域・海域の環境に影響を与えることが予想される。

5. 結論

本研究で得られた主たる結論を以下に示す。

- 1) 浅水流解析と藻類増殖解析を結合した数値計算により、付着藻類の空間分布を概ね再現できた。
- 2) 河床に付着藻類が繁茂している場合は、繁茂していない場合に比べて、DOの日変動が大きくなる。
- 3) 付着藻類の繁茂を考慮した物質循環モデルを構築し、水質の変動を計算した。対象区間でDO・SS・栄養塩の収支をとったところ、DOと栄養塩は流入量とほぼ同じ量が流出していった。SSは流入量の約6.7倍流出していくという結果が得られた。このことから、砂河床に付着藻類が繁茂すると、下流域、河口域やそれにつながる海域への粒子態有機物の負荷量を増加させることが分かった。

謝辞：本研究は文部科学省科学技術研究費補助金若手研究(B)（代表者：戸田祐嗣，課題番号：17760405）の補助を受けたものである。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Vannote, R. L., Minshall, G. M., Cummins, K. W., Sidel, J. R. and Cushing, C. E.: The river continuum concept, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 37, pp.130-137, 1980.
- 2) 戸田祐嗣，辻本哲郎，藤森憲臣：取水量の大きな砂河川における河床付着藻類の繁茂について，*河川技術論文集*，第11巻，pp.541-546，2005.
- 3) SCOR/UNESCO: Determination of photosynthetic pigments in sea water, *Monograph of Oceanographic Methodology*, 1, pp.1-65, 1975.
- 4) 長田信寿：一般座標による河川流の計算，*水理公式集例題プログラム集*，例題2-8，2001.
- 5) Iwasa, Y. and Aya, S.: Predicting Longitudinal dispersion coefficient in open channel flow, *Proc. of Int. Symp. on Env. hydraulics*, pp.505-510, 1977.
- 6) 戸田祐嗣，池田駿介：礫床河川の物質循環シミュレーション，*土木学会論文集*，No. 635, pp.67-83, 1999.

(2006. 4. 6 受付)