

## 瀬と淵における河床附着物および堆積物の硝化活性について

Nitrification Activities of Streambed Biofilms and Sediments at Rapids and a Pool

古米弘明\*・谷口佳生\*\*

Hiroaki FURUMAI\*, Yoshio TANIGUCHI\*\*

**ABSTRACT;** Several surveys were conducted to investigate nitrification activity and pyramid of biomass in periphyton biofilms at rapids and a pool in a local river. The nitrification activity was higher at the pool than the rapids on the basis of the river bed area. However, the relationship was reverse on the basis of volatile solid mass. The potential rate of nitrification was around  $40\text{mg/m}^2$  per day, which corresponded to a few percents of the amount of nitrogen in the periphyton biofilms at the rapids. The mass of feeding benthos ranged from 5 to 10 % of standing periphyton biomass on river bed stones from autumn to winter. The percentage is in good agreement with the value of 1/10 which is known as a ratio of the phytophagous animals to the primary producers in the pyramid of biomass. Particulate nutrients were settled more densely at the upper part of river bed than deeper part. A phenomenon of trapping particulate nutrients was observed in the transient region of river beds from pool to rapid due to infiltration flow.

**KEYWORDS;** Nitrification Activity, Periphyton Biofilm, Benthos, Rapid and Pool, River Sediments

### 1. はじめに

近年、河川が本来有する生物にとって良好な生息環境に配慮し、その創造・復元をめざした河川づくりが提唱され、この考え方に沿った河川改修などが検討され一部では実施されてきている。河道の低水路内において、多様な生息空間を形成しているものとして瀬と淵が知られている。そこでの物質変換にかかわる機能を考えると、瀬では河床を形成する礫表面で、栄養塩類の一時的な貯留を行う附着生物膜の増殖と剥離が繰り返し行われ、またそれらを餌とする底生生物が生息している。また淵では、流速の減少による流下物の堆積や、それらを分解・除去する微生物の働きが重要な役割を河床での生態系において担っている。流速や河床材の変化による多様性が生物にとって有効な生息空間を提供するだけではなく、河川水質の浄化作用にも寄与していると推測できる。

本研究では、上述の瀬と淵が有する様々な機能を定量的に評価することを最終的な目的として、比較的自然が残っている地方河川を対象に、まず中流部の瀬と淵における窒素循環に関わる硝化活性を調べるとともに、淵での河床堆積物中の窒素とリンの存在量ならびに瀬での河床附着生物と底生生物の現存量の調査分析を行った。

### 2. 調査地点の概要

対象河川の溜沼川は、茨城県中部に位置する流域面積  $446\text{km}^2$ 、流路延長  $65\text{km}$  を有する那珂川水系に属する1級河川である。図-1に示すように、笠間市北部に源を発し溜沼を経て那珂川河口部に注いでおり、地方中小河川に分類できる。途中笠間市、友部町からの未処理生活雑排水の流入があり、水質汚濁が進行しつつある。平成5年度に、この未処理生活雑排水の流入のある地点を中心に河床附着生物膜の成長や硝化活性について調査を行い、秋季から冬季にかけて生物膜の成長が約2ヵ月程度で安定化することや、硝化活性の定量的評価には動力学的な解析が必要であることを指摘した<sup>1)</sup>。

本調査対象である瀬と淵は、河口から約  $33\text{km}$  の河道蛇行部に位置する。河道の流況把握のため現場において横断測量、水深測定を平成6年10月28日と平成7年1月13日に、浮子による表面流速測定、河床材調査を平成6年11月22日に行った。その測量および測定結果を図-2に示す。図-2b) c) に示されているように、淵の最深部の水深は  $1.2\text{m}$  程度で流速は  $0.2\sim 0.5\text{m/s}$  で、その前後にある早瀬と平瀬は水深約  $20\text{cm}$  程度で流速  $0.5\sim 0.8\text{m/s}$  である。瀬と淵とは侵食、運搬、堆積などの河川の作用により形成され、流速の違いや河床形状の影響を受けて河床材の種類も異なることが知られている。図-2c) にあるように、流速が最も遅い最深

\* 茨城大学工学部都市システム工学科 (Department of Urban and Civil Engineering, Ibaraki University)

\*\* 茨城大学大学院修士課程 (Graduate School, Ibaraki University)

部付近の河床材が細・中礫でありながら、淵から平瀬への移行付近ではかえって粒径の細かい粗砂になっていた。これは、砂がこの移行部分で捕捉されている可能性を示している。一方、流速の早い瀬ではともに粗礫で河床が構成されている。なお、約2カ月半の間に総降水量で95mm、内4回の10mm以上の降水が観測されたが、水深や河床材の極端な変動は見られず瀬と淵の構造に大きな変化は見られなかった。

参考のために、写真-1に現場の様子を示したが、水面形状は早瀬、平瀬では波立っているのに対し、淵では波立ちのない穏やかな状態であり、河道周辺の植生は、蛇行している左岸側に遷移初期の植物が繁茂しており、右岸側は樹木が川に覆いかぶさる形で存在している。以上の測量結果から、調査地点の河床型<sup>2)</sup>はB b型(中流型)で淵はM型(蛇行型)に分類できた。

### 3. 調査項目および作業手順

#### 3.1 河床付着物と河床堆積物の採取と分析手順

図-2 a) に示した地点Aおよび地点Cの瀬、及び地点Bの淵において、河床の粗礫や砂とともに堆積物を回収し、次に述べる手順で調整・分析を行った。粗礫付着物については、蒸留水とブラシを用いて剥がし取り懸濁態として回収し、2mmメッシュの金網を通過させた。メッシュに捕捉された付着物の中から底生生物を種別に採取した。底生生物を採取後の捕捉物はメッシュを通過したものと混合して、懸濁液として硝化活性試験や組成分析に用いた。また、付着物を剥がし終えた粗礫を覆うのに必要としたアルミ箔の質量と、単位面積当たりのアルミ箔の重量から礫の表面積測定を行った。

なお、ここで2mmメッシュの金網を用いて捕捉されたものについてのみ底生生物を回収した理由は、底生生物の回収方法の簡略化と、底生生物の現存量のうちサイズの小さい底生生物の占める割合は無視できると考えられたためである。実際の作業中、メッシュ通過の懸濁液中には、微小なユスリカが存在が確認できたが、その量は捕捉物中の量に比べ非常に少なかった。

ピンセットで回収した底生生物はその体長サイズと数を記録した後、現存量をVSで評価した。懸濁態試料として回収した付着物については、その現存量の指標としてTSとVS分析を、付着藻類量の指標としてchl-a分析を行った。

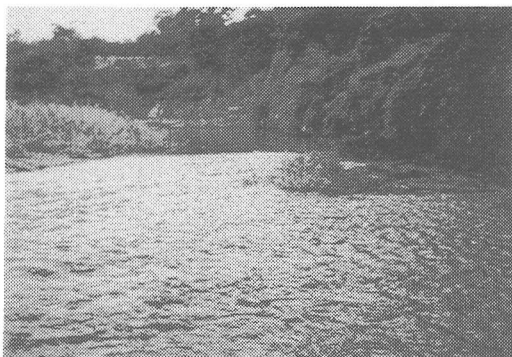


写真-1 早瀬から淵の移行部

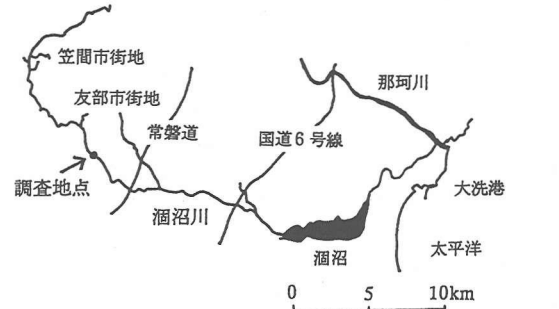
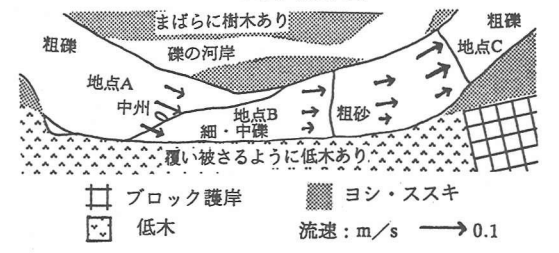
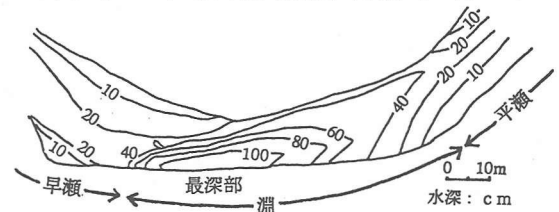


図-1 涸沼川全体図

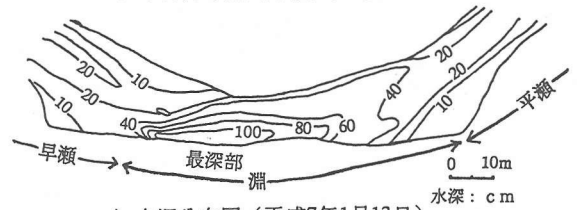


1μ	5μ	74μ	0.42mm	2mm	5mm	20mm	75mm
コロイド	粘土	シルト	細砂	粗砂	細礫	中礫	粗礫
			砂		礫		

a) 周辺植生と流速、河床材調査(平成6年11月22日)



b) 水深分布図(平成6年10月28日)



c) 水深分布図(平成7年1月13日)

図-2 測量および調査結果

淵での河床堆積物については、内径2.5cmの塩化ビニールパイプを用いて採取した河床コアからゆっくりと水抜きを行った後、コア試料を深さ方向に2cm間隔に分取した。分取した河床試料を蒸留水と混合後振とうして、堆積物や河床材への付着物を懸濁態として回収した。そして、硝化試験と全窒素と全リンの分析に用いた。

### 3.2 硝化試験の手順

分析に用いた試料は、早瀬(地点A)の底生物を採取した後の懸濁態の粗礫付着物と淵(地点B)の河床堆積物(表層2cm分)を懸濁態として回収したものである。試験方法は、両試料をバイアルビンに入れアンモニア性窒素、亜硝酸性窒素の濃度が20mg/lになるように濃縮基質とろ過河川水を用いて調整した。さらに同試料を20℃、暗条件で10日間振とう培養し(100回/分)、アンモニア性窒素と亜硝酸性窒素、硝酸性窒素の分析を行い硝化過程を調べた。またアリチオ尿素(2mg/l)を用い、硝化を抑制した状態での対照試験も行った。

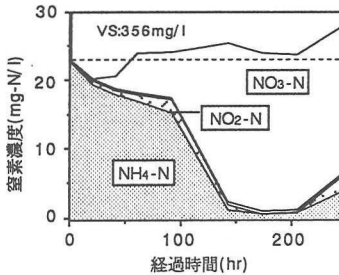
### 3.3 分析方法

付着物と堆積物の全窒素分析には、アルカリ性ペルオキシ二硫酸カリウムによる分解法(下水試験方法)、全リン分析には、ペルオキシ二硫酸カリウムによる分解法(下水試験方法)、c h l - a 分析にはメタノール抽出<sup>3)</sup>した試料に対して上水試験方法にしたがって濃度計算を行った。また、硝化試験におけるアンモニア性窒素と亜硝酸性窒素の分析には、インドフェノール青吸光度法とN-(1-ナフチル)エチレンジアミン吸光度法、硝酸性窒素にはイオンクロマト法を用いた。

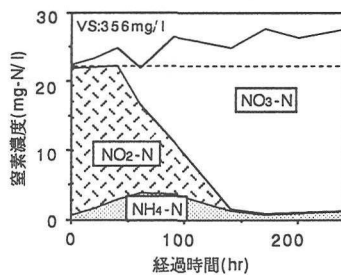
## 4. 分析結果および考察

### 4.1 瀬と淵における硝化活性量の評価

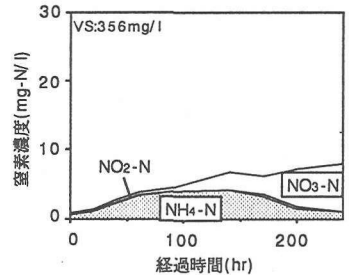
図-3に示したアンモニア性窒素添加の硝化試験結果より、瀬の粗礫付着生物膜ではアンモニア性窒素の消費が140時間程度でほぼ完了しており、亜硝酸性窒素の蓄積も無く、ほぼ試験期間内に硝酸性窒素に酸化されている。一方、淵の河床堆積物の試料ではアンモニア性窒素の消費に200時間程度かかっており、亜硝酸性窒素も蓄積があり、期間内に硝化が終了していない。図-4に示した亜硝酸性窒素添加の硝化試験結果からも、亜硝酸塩の酸化に要する時間に差がみられ、前述の淵試料での亜硝酸塩蓄積と対応している。これらの濃度変化の違いは、試験に用いた懸濁試料中の硝化菌群の量に関係していることが考えられ、この試験条件下では、瀬の礫付着物試料懸濁液中により多くの硝化菌が存在していたと推察できる。



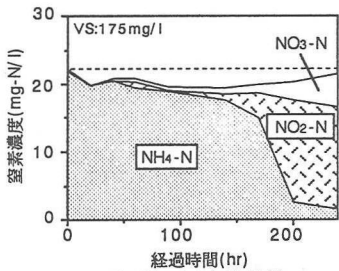
a) 瀬の粗礫付着物



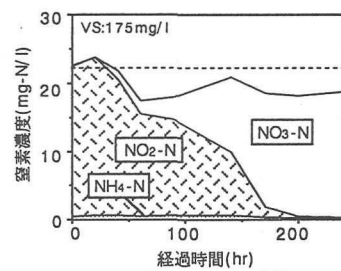
a) 瀬の粗礫付着物



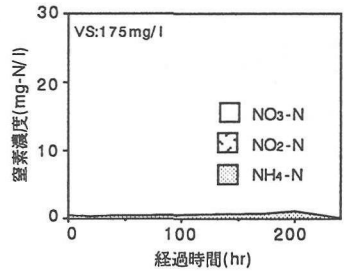
a) 瀬の粗礫付着物



b) 淵の河床堆積物



b) 淵の河床堆積物



b) 淵の河床堆積物

----- : 試験開始時の窒素濃度  
VS: 実験試料中のVS

図-3 NH<sub>4</sub>-N添加試験

----- : 試験開始時の窒素濃度  
VS: 実験試料中のVS

図-4 NO<sub>2</sub>-N添加試験

VS: 実験試料中のVS

図-5 対照試験(ATU添加)

次に、添加した窒素の収支に着目すると、礫付着物では両試験とも無機態窒素の合計濃度が添加濃度より増加しているが、河床堆積物はほぼ一定か、減少気味であった。これは、図-5に示すアрилチオ尿素(ATU)を添加した対照試験の結果において、瀬の礫付着物では全無機態窒素の溶出量が経時的に増加しているが、淵の河床堆積物の試料では溶出がほとんど無いことと呼応している。また、その溶出窒素の形態は当初アンモニア性窒素であったが、100時間程度から硝化反応が起こり硝酸性窒素に変化している。これは、アрилチオ尿素が分解されるなどして硝化抑制能が消失していることを示している。言い替えれば、アンモニア性窒素が付着生物膜自体の加水分解ならびに脱アミノ反応により生成されており、同様にアрилチオ尿素も分解されていることが伺える。

以上の試験結果を用いて、懸濁液中の亜硝酸生成菌(アンモニア酸化細菌)と硝酸生成菌(亜硝酸酸化細菌)の菌体存在量の推定を動力学的に試みた。回分培養での菌体の見かけの増殖は、一般に式(1)で表現される。なお、本硝化試験では、遅滞現象が起きないようにろ過河川水などを用いて環境条件を現場の条件に近づけた。したがって、基質濃度変化は菌体増殖と共役しており、基質濃度の減少量に対する活性菌体量の増加量の関係式(2)が成立しているものと考えられる。硝化菌の飽和定数に比べ十分に高い基質濃度条件(基質濃度(S) > 飽和定数(Ks))では、式(1)の死滅項(bX)は無視できることになり、初期菌体濃度を変数とする基質濃度の時間変化の式(3)が得られる。この式を用いて試料中の亜硝酸生成菌および硝酸生成菌の活性量の算出<sup>4)</sup>を行った。

$$\frac{dX}{dt} = \mu_m \frac{S}{K_s + S} X - bX \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$X = Y(S_0 - S) + X_0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$t = \frac{1}{\mu_m} \ln \left\{ \frac{X_0 + Y(S_0 - S)}{X_0} \right\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

- $\mu_m$  : 最大比増殖速度(1/hr)
- Ks : 飽和定数(mg/l)
- Y : 増殖収率(mg/mg)
- b : 死滅係数(1/hr)
- X : 菌体濃度(mg/l)
- t : 経過時間(hr)
- S : 窒素濃度(mg/l) (添字<sub>0</sub>は初期濃度を意味する)

まず、式(3)における $\mu_m$ 、Yの代表的な文献値<sup>4)</sup>(亜硝酸生成菌 $\mu_m=0.02(1/hr)$ 、硝酸生成菌 $\mu_m=0.04(1/hr)$ 、 $Y=0.1(mg/mg)$ )とアンモニア性窒素および亜硝酸性窒素の初期濃度( $S_0$ )を代入し、時間(t)と基質濃度(S)の試験値へのカーブフィッティングにより初期活性菌体濃度( $X_0$ )を推定した。推定結果の例を図-6に示す。なお、瀬の試料については、対照実験で観測された窒素溶出量を差し引く形で濃度データを調整している。

推定された硝化菌の活性量を回収した全懸濁液中の存在量に換算したのち、瀬では採取した粗礫に太陽光が当たっている部分(アルミホイルを用いて測定した表面積の1/2の値)を、淵の河床堆積物では採取した河床の表面積を用いて、面積当たりの活性菌体量密度と両試料のVS当たりの活性菌体量を算定した。その結果を表-1にまとめた。亜硝酸生成菌、硝酸生成菌とも、河床面積当たりでは淵の堆積物の方が付着生物膜より若干多量に存在していることが見積もられたが、VS当たりでは逆の結果となった。言い替えれば、淵には予想以上に沈降性固形物が堆積しており河床面積あたりでの硝化能は瀬より高いことになる。しかしながら、VS基準では瀬の付着生物膜には不活性な有機固形物の割合が低く、硝化菌が付着藻類や従属栄養菌と共存する形で淵以上に集積していることも伺える。この場合、硝化菌は河川水中の窒素ではなく、主として一旦付着藻類に取り込まれたのち分解により供給される窒素を基質として利用していることが想像される。

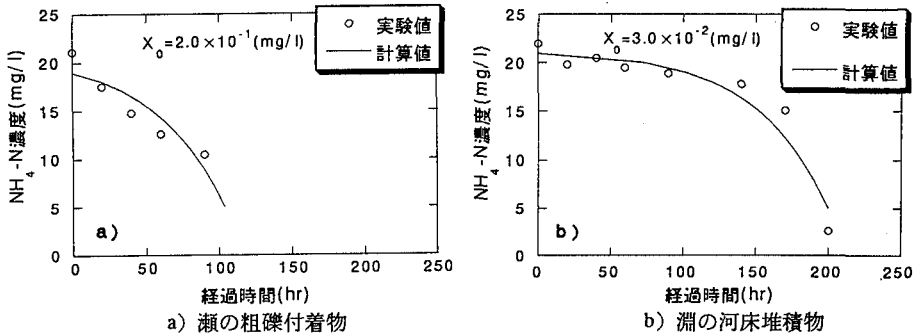


図-6 亜硝酸生成菌存在量の推定

活性硝化菌量と動力学定数の値を与えて面積当たりの硝化速度を計算した。そして、対象とした瀬（早瀬と平瀬）と淵の概略面積をそれぞれ1000m<sup>2</sup>、500m<sup>2</sup>と考えると、全体で1日当たり約60gの窒素が硝化されるポテンシャルがあることがわかった。この量は、この区間の付着生物膜中に存在する窒素量の数%に相当している。

表-1 硝化活性菌体量

調査地点	試料	TS (g/m <sup>2</sup> )	VS (g/m <sup>2</sup> )	面積当たりの硝化活性菌密度* (mg/m <sup>2</sup> )	VS当たりの硝化活性菌密度* (mg/g-VS)	面積当たりの硝化速度* (mg/m <sup>2</sup> day)
瀬	粗礫付着物	5.2×10	1.4×10	7.5	5.6×10 <sup>-1</sup>	36
				3.0	2.2×10 <sup>-1</sup>	29
淵	河床堆積物	3.6×10 <sup>2</sup>	5.7×10	9.8	1.7×10 <sup>-1</sup>	48
				6.5	1.1×10 <sup>-1</sup>	62

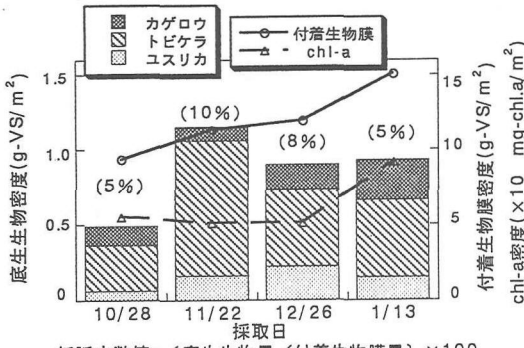
\*上段：亜硝酸生成菌 下段：硝酸生成菌

#### 4. 2 瀬における付着生物膜と底生生物の現存量変化

早瀬（地点A）と平瀬（地点C）の粗礫の付着生物膜と底生生物の現存量測定結果を図-7に示す。図から付着生物膜は10月末から1月中旬まで緩やかに増加しており、それにほぼ対応するようにchl-a量も増加している。井上ら<sup>5)</sup>による酒沼川での付着生物膜現存量調査（1987年から1990年まで）では、10月から12月までは増加傾向にあるものの、水温が低下する1月からは低い状態になるという報告がある。しかし、本調査では1月に入ってもさらに増加傾向を示した。

また2mmメッシュの金網に捕捉される底生生物は早瀬、平瀬ともカゲロウ、トビケラ、ユスリカの3種がほぼ全てであり、優占種はトビケラであった。津田、森下ら<sup>6)</sup>の方法に従い底生生物の同定を細かく行うことにより水質階級の分類も可能となるが、実体顕微鏡などを用いて形態やサイズなどから種を同定する作業には非常に専門的な知識が必要である。したがって、ここではあくまでも生産者である付着藻類とそれらを捕食している消費者である底生生物のバイオマス量の関係性を評価した。早瀬と平瀬での底生生物量と付着生物膜量の関係に違いがなかったため、両者を合計して付着生物膜に対する底生生物の割合（図-7の括弧内）を求めたところ、5~10%となり、生態学分野で言われている生産者に対する一次消費者の存在量の割合が1/10<sup>7)</sup>程度という知見とほぼ同じ結果となった。

さらに、採取した底生生物の体長の最大値を図-8に示したが、10月から11月において増加があるが、それ以降はさほど変化しない傾向が見られた。今後、底生生物種ごとの成長の季節特性に関する文献情報と突き合わせて検討する必要がある。



括弧内数値 = (底生生物量/付着生物膜量) × 100  
図-7 付着生物膜と底生生物の現存量

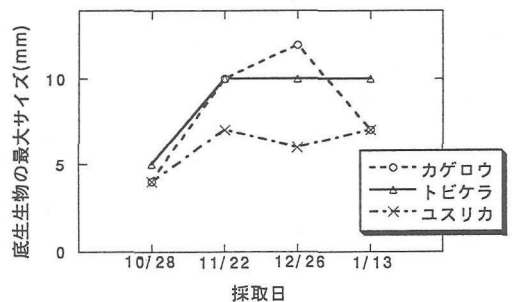


図-8 底生生物の体長（最大値）の変化

#### 4. 3 淵における栄養塩類の堆積分布状況

10月28日に採取した地点1（深さ12cm）、地点2（深さ6cm）と11月22日に採取した地点3（深さ6cm）の河床堆積物を用いて行った全窒素、全リン分析の結果を図-9に示す。淵最深部付近の細・中礫河床の地点1では、窒素、リンが表層2cmに集中して堆積しており、水深が徐々に減少している地点3では2~4cmにも堆積物がある。さらに、平瀬への移行付近である地点2の粗砂河床では、量は少ないものの6cmまでほぼ均等

に分布している。一般に、細・中礫河床よりも粗砂河床の方が、浸透流は起きにくいと考えられる。しかし、淵から平瀬への移行付近の傾斜河床への河川流が直接当たり浸透流が起りやすいため、浮遊砂とともに懸濁あるいは沈降性物質も堆積したり捕捉されているものと推察できる。

さらに、剥離した付着藻類も含まれると思われる堆積物について、そのN/P比に着目した。付着藻類の組成が植物プランクトンの組成化学式 ( $C_{106}H_{263}O_{110}N_{16}P$ )<sup>8)</sup> と同じとすれば、N/P比は7.2であると考えられるが、観測値はこの比より全体的に低い。したがって、堆積物が付着藻類以外の沈降性物質を含むことや、分解や脱窒などにより堆積物から窒素分が除去されている可能性が推察された。

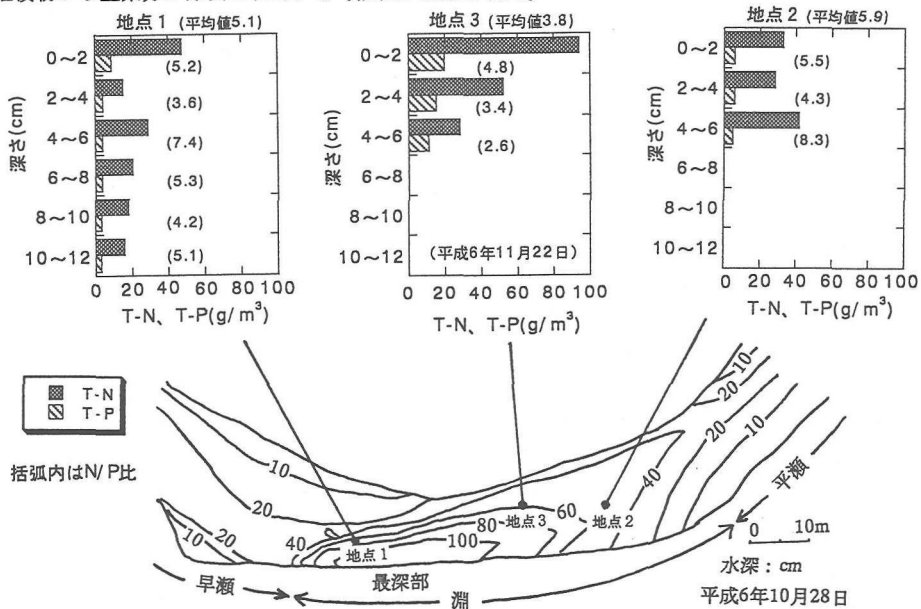


図-9 淵での窒素・リンの深さ方向への堆積分布

## 5. 結論

- 1) 回分式の硝化活性試験から得られる基質濃度変化から、動学的に硝化菌の活性菌体量を推定し、その推定値から瀬と淵での河床面積当たりの硝化活性能を評価した。その結果、生物膜が付着している瀬に比べ、堆積物が多い淵で高くなった。しかしながら、V S 当たりの硝化活性能は、不活性な有機固形物が少ないと考えられる瀬が高い値を示した。また、対象とした全長100~150m程度の1組の瀬と淵における1日当たりの硝化可能量は、その区間に付着している生物膜中に存在する窒素量の数%に相当していた。
- 2) 河床付着生物膜量は、流量が安定している秋から冬にかけて増加傾向を示し、藻類量 (chl-a 量) の増加と対応している。また、河床付着生物膜量に対する底生物量の存在比として、安定した生態系において見られる生産者と一次消費者との生物量の比率 (1/10) に近い値が観測された。
- 3) 淵最深部付近では堆積物が表層に集中し、平瀬への移行付近では河川流が河床に浸透するため、堆積物として窒素、リンの捕捉があると考えられる。また堆積物のN/P比は藻類のN/P比に比べ低い値であり、堆積物が付着藻類以外の沈降性物質を含むことや、分解や脱窒などにより窒素分が除去されている可能性がある。

## 参考文献

- 1) 古米弘明ら(1994): 地方中小河川における河床生物膜の成長と硝化活性について、環境システム研究 Vol.22、182-187
- 2) 沼田真、水野信彦、御勢久右衛門(1993): 「河川の生態学」、築地書館、第1章、5-13
- 3) Osmud H.H et al. (1978): Chlorophyll a determination: improvements in methodology, OIKOS, Vol.30, 438-447, Copenhagen
- 4) 二渡了ら(1993): 強混合河川感潮部における硝化・脱窒過程に関する研究、土木学会論文集、No.479/II-25、111-120
- 5) 井上隆信ら(1993): 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変化、水環境学会誌、Vol.16, No.7、507-515
- 6) 津田松苗、森下郁子(1964): 「生物による水質調査法」、山海堂、第1編第3章、76-103
- 7) R.H.ホイタッカー(1974): 「ホイタッカー生態学概説」、培風館、第5章、195-199
- 8) 末石富太郎、住友恒、山田淳、和田彦彦(1987): 衛生工学、第1編第4章、52-57