

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

GROWTH AND NITRIFICATION ACTIVITY OF PERIPHYTON BIOFILM IN A LOCAL RIVER WITH A RELATIVELY SMALL BASIN

古米弘明*・上田映子**

Hiroaki FURUMAI*, Eiko UEDA**

ABSTRACT; We conducted several field surveys on periphyton biofilm in a local river in the basin of which a sewage treatment system just began to spread. We investigated the development of the biofilm at different points along the Hinuma River. The periphyton biofilm were used to determine the nitrification activity which would be an overall index of nitrogenous pollution. The field survey showed that the periphyton density gradually increased to the maximum level around 2 months, if there were not significant change of river flow. In the nitrification tests, supply of ammonium nitrogen from the biofilms itself was observed. Therefore, nitrification activity was evaluated considering the degradation of attached algae as a biofilm component. The activity was higher for biofilms in the urban drainage receiving domestic wastewater than that at the upstream of the river which was less polluted. The biofilm receiving secondary effluent had little nitrification activity. This indicated that residual chlorine or by-product of chlorine disinfection might suppress the nitrification in the biofilm.

KEYWORDS; Periphyton Biofilm, River Bed, Domestic Wastewater, Nitrification Activity, Benthos, Aqua-ecosystem

1. はじめに

現在、人口5万人未満の地方中小都市では下水道の整備が遅れているため、地方中小河川において、生活雑排水が流入する市街地部では水質環境が悪化しつつある。水質環境は直接的に生態系に影響を与えるため、汚濁が進行しつつある地方中小河川も、河川改修や護岸工事などによる河川づくりと相まって比較的健全な水域生態系が変化しつつある。社会活動や人間活動を完全に抑制できない状況の中では、完全に自然な河川生態系に戻すことは不可能であると考えざるを得ない。したがって、水質環境から言えば、現実には下水道の整備が進行するまで当分の間、生活雑排水を受け入れ続けることとなり、整備がおこなれたところでも有機物を中心に汚濁物質が除去されているものの下水処理水を受け入れることになる。このようなインパクトを受けながらも、持続可能な水域生態系を創生する観点から河川を捉える必要性がでてきていると考えられる。

そのためには、生態系を考慮した河川づくり、下水道整備、処理技術や処理水の放流方法の改良、都市下水路での浄化機能の強化など人間活動との共存を目指した土木技術の在り方を検討することが重要となる。将来の河川環境や土木工学の技術の在り方を検討する際に、必要となる水域生態系の基礎的な知見として、自浄作用に深く関わり、水域エコシステムの重要な構成要素である河床生物膜の成長と硝化活性について調べることを本研究の目的とした。

そこで、本研究では下水道普及中の流域を持つ地方中小河川（涸沼川）において、生活雑排水や下水処理水を受け入れている地点付近の河床付着生物膜を対象に現場調査を行った。ここでは、対象河川区間での河床形態分布状況とともに、雑排水流入地点付近と下水処理水の放流水路における河床生物膜の成長過程やそこの底生生物の生息状況を調べた。また、河川汚濁物質である窒素に着目して生物膜の硝化活性を定量化することにより、河川での窒素変換過程と河床生物膜の関連を検討した。

* 茨城大学 Ibaraki University, ** (株)環境科学コーポレーション EAC Corporation

2. 調査および実験方法

2. 1 調査対象地域と調査地点の概要

図-1に示すように、最近広域下水道の供用が一部開始された（普及区域面積：190ha、処理量：1000m³/日）、笠間市及び友部町を流域に有する酒沼川中流部を、研究対象とした。酒沼川は、笠間市北部に源を発し、酒沼を経て那珂川河口部に注ぐ全長46km、流域面積145km²の一級河川である。水質環境基準の類型はAであるが、人口増加のために水質汚濁が進む傾向にある。こうした状況の中で平成17年度までの下水道整備の全体計画（1892ha、約59000人）が立案され、平成13年度までの認可計画（611ha、19110人）に沿って、今後徐々に友部町だけでなく笠間市の下水道整備が進行するものと思われる。したがって、下水道の普及に伴う河川における水域生態系を数年にわたって調査することで、下水処理や生活雑排水のもつ影響を評価できるものと考えている。

今回の調査では、比較的水質汚濁が少ない上流地点（地点1）、友部町からの生活雑排水の流入する都市下水路と酒沼川の合流点である矢戸橋付近（地点2）と下水処理水の放流水路（地点3）を選んで、主として生活雑排水や下水処理水の影響を受けていると考えられる地点での河床生物膜について調査を行った。

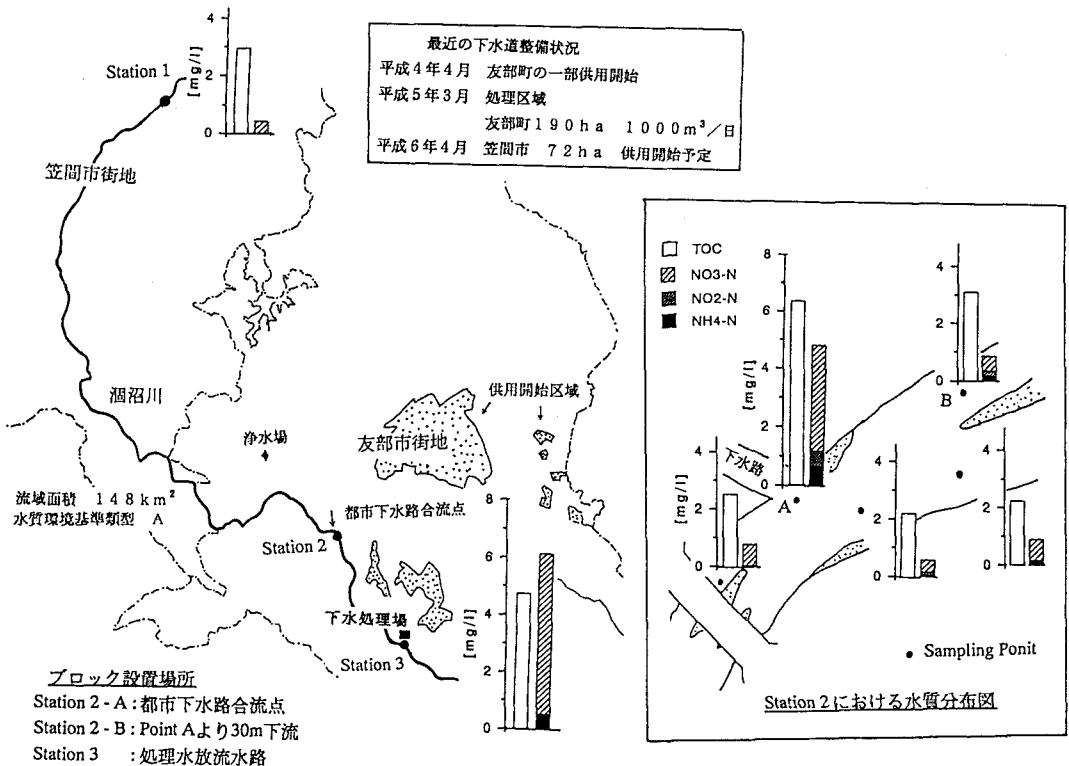


図-1 研究対象河川流域における下水道の普及状況と水質分布図（93年12月）

2. 2 河床付着生物膜の成長過程調査

地点2と地点3を対象として、河床付着生物膜の成長過程を比較的水量が安定している11月末より調査を実施した。サイズ11cm x 23cmのブロックを水中に設置して、礫に似せて加工されたブロック表面（吸水率3%程度）の付着生物膜量をSS、VSSで経目的に調べることで成長過程を評価した。地点2では、都市下水路合流地点（地点2-A）とその30m程度下流の地点（地点2-B）、地点3の3箇所におよそ水深20~30cm程度のところに、それぞれ10個程度設置した。同時に表流水も採水して水質分析に供した。水質の分析項目は、TOC、NH₄-N、Cl、NO₂-N、NO₃-N、PO₄-P、SO₄²⁻である。

回収したブロックから、ろ過河川水（500ml程度）とブラシを用いて付着膜をきれいに剥がし取り、河床付着物サンプルとした。このサンプルは、必要に応じて後で述べる硝化活性試験や底生生物の検鏡にも用いた。この全体の実験手順のフローを図-2に示した。

2. 3 硝化活性試験

上記のブロックや河床より採取した礫から剥がし取った付着生物膜の懸濁液に、無機塩類溶液（BOD希釈液用A～D液）を適量添加した後、 $\text{NH}_4\text{-N}$ の添加濃度が 5mg/l になるように濃縮基質を少量加えて、1日間隔でサンプリングを行い硝化活性を調べた。装置としては、120mlのガラスバイアルまたは300mlの三角フラスコを用いて、試料が均一になるように振とう培養または攪拌培養を、 20°C 暗条件で行った。なお、懸濁液を希釈調整しなかったために、培養液のVSS濃度として $450\sim1300\text{mg/l}$ までの範囲となり一律ではない。

2. 4 実体顕微鏡による底生生物の観察

回収した付着生物膜の中から、肉眼で確認できる底生生物などをピンセットやピペットで取りだし、5～10%のホルマリンで固定し検鏡の試料とした。実体顕微鏡（倍率 $\times 30\sim 256$ ）で観察して写真撮影を行い、地点ごとの生物相の違いを調べた。本来、底生生物相の調査ではコドラートなどを用いて行うべきである^{1)、2)}が、ここでは数個の礫や設置したブロックを対象に予備的調査とした。したがって、底生生物の同定は津田と森下の関連図書¹⁾を参考に大まかな分類にとどめ、個体のサイズや数も、半定量的に評価することとした。

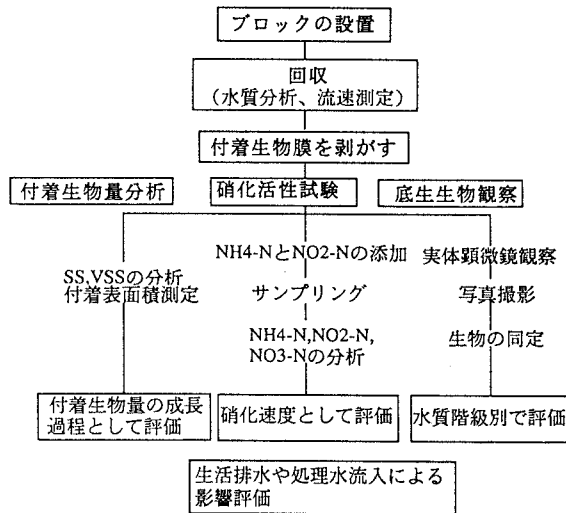


図-2 実験の内容と手順

3. 調査および試験結果と考察

3. 1 ブロック付着生物膜の成長過程について

まず、1993年12月に実施した水質調査結果を図-1の中に示した。上流部の汚染レベルの低さに比べて、都市下水路合流地点（地点2-A）でTOC、N濃度は高く、そのレベルは下水処理水の放流路（地点3）の水質と同程度である。また、別の調査で確認できた笠間市の雑排水を受けて一旦悪化している河川水は、笠間市から友部町まで流下する間に自浄作用により水質の回復があるものと考えられた。また、図-1右の水質分布図に示すように、地点2では雑排水の流入があるものの、希釈効果のため本流河川での汚濁物濃度は低下している。

次に、地点2、3での設置ブロック表面への付着生物膜量の経日変化をSS、VSSで定量した結果を図-3に示めた。ブロック表面積当りの付着VSS密度は、都市下水路合流点付近では2週間足らずで大幅に密度が増加した後、一度低下して再び増加する傾向を示している。12日目と23日目との間に降雨があったため剥離したことも考えられる。また、短期間での増加と23日目以降の増加傾向が異なる理由として、都市下水路の流量低下に

伴い水深が浅くなり、ブロック表面に付着する生物膜が剥がれ易い状態に流況が変化したことと、肉眼での観察からも生物膜構造の変化があったことが考えられる。

一方、地点2-Bや地点3では、約2カ月間にわたり次第に付着密度が増加している。これは、都市下水路と異なり、上記の降雨量が少なかったこともあり河川の流量や処理水放流水路での流量に変動があまりなかったためとも推測された。したがって、流量変動が大きいと思われる河川支流や都市下水路的な河川での生態系を取り扱う場合、井上³⁾が検討しているように降雨後の河床生物膜の成長過程を評価することが一層重要と思われる。

34日目以降では、地点2-Bや地点3では同程度の密度変化を持ちながら頭打ち傾向を示している。したがって、流量の変動などがない条件で約2ヶ月程度の間に、付着生物膜の増殖と剥離および底生生物などによる摂食がバランスした状態になったものと思われる。今回の調査では分析していないものの、生物膜の有機組成成分として付着藻類は重要であり、流速だけでなく照度や日照時間との兼ね合いで最終的に到達する生物膜密度が決定されてくるものと想像される。

河床生物膜は、上述のVSSで評価できる固形有機物だけでなく無機成分も重要な組成成分である。そこで、VSS/SS比の変化と地点ごとの違いについて検討した。潤沼川本流部にある地点2-Bに比べ、都市下水路流入点（地点2-A）や処理水放流水路（地点3）での付着生物膜のVSS/SS比は高く、粘土やシルトなどの無機性の懸濁物の影響を受けない傾向がはっきりと出ている。また、地点3では窒素やリンなどの栄養塩類の供給が多いために、付着藻類が増殖しやすい環境であることも関連していると思われる。

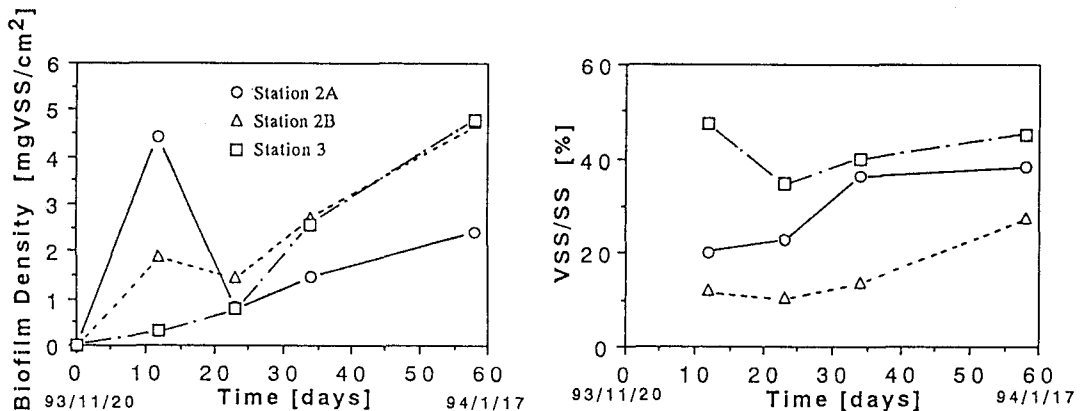


図-3 河床付着生物膜の成長過程（93年12月の現場調査結果）

3. 2 河床生物膜の硝化活性

現場の予備調査において、対象河川である潤沼川の中流部における河床形態は大きく4つに分類できることがわかった。それらは、礫からなる河床、砂質河床、シルト及び泥質の河床、改修済みの河床であり、都市下水路合流地点付近の本流部数百m区間でも、それらすべての河床が存在する。そこで、生活雑排水の影響をさほど受けていない上流地点（地点1）での礫付着生物膜、都市下水路の底泥、都市下水路暗渠内の礫付着生物膜、さらにブロック付着生物膜（地点2-A、2-B、地点3）を対象に硝化活性試験を行った。その結果のうちアンモニア性窒素を添加したものについて図-4に示す。

図からわかるように、底泥の場合、徐々に硝化が進行してアンモニア性窒素濃度が低下している。一方、付着生物膜の場合、この変化傾向とは異なりアンモニア性窒素濃度が培養中に一旦増加している。その増加傾向は懸濁液のVSS濃度にも依存するが、都市下水路流入点や下水処理放流水路の付着生物膜で大きく、同じ都市下水路でも暗渠部分の生物膜ではさほど増加は大きくない。このように、河床生物膜の場合、それ自体が硝化試験期間中に分解してアンモニア性窒素の供給源になるため、硝酸性窒素濃度の測定とともに動力学的な解析^{4)、5)}を行わないと直接的に硝化速度を評価することは困難であることがわかる。

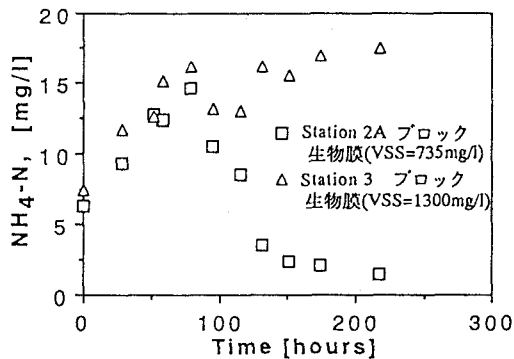
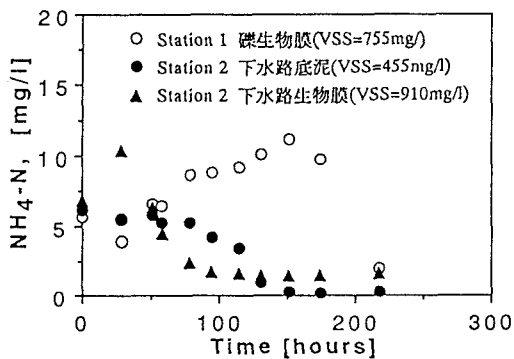


図-4 河床および付着生物膜の硝化活性試験におけるアンモニア性窒素の経時変化 (93年12月)

図-5に示すように、硝酸性窒素濃度の測定データが、地点1、地点2-A、地点3に限られており、すべてのサンプルを比較することができない。地点1と地点2-Aでは、アンモニア性窒素濃度の減少と対応して硝酸性窒素濃度の増加がともに見られる。これは、生物膜内に硝化菌が十分量存在していたにもかかわらず、見掛け上生物膜の分解由来のアンモニア性窒素の供給によりアンモニア性窒素濃度の減少が見られなかったものの、供給速度より硝化速度が上回った時点で変化が現われたことがわかる。ここで、はじめから硝化が進行していたとすれば、急激な変化がおこるまでにわずかも硝酸性窒素が検出されるはずであるが、両者とも長い時間硝酸性窒素が検出されていない。このことから、攪拌や振とうにより好気条件を確保していたものの生物膜の有機物を利用して脱窒がおこっていたことも考えられる。

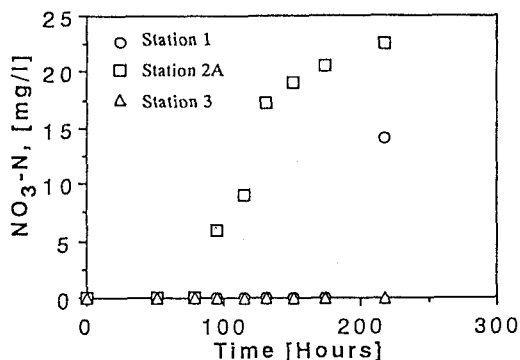


図-5 硝化活性試験における
硝酸性窒素の経時変化

窒素濃度の急激な変化が起こる時間が、地点1の方が地点2-Aより遅く現われている。これは、生物膜に存在していた硝化菌量の違いを反映しており、汚濁負荷のあまりない上流地点は硝化活性が低く、生活雑排水の流入のある地点で活性が大きいことがわかった。

一方、地点2と同程度のアンモニア性窒素を含んだ処理水を受けている地点3の生物膜では、アンモニア性窒素の減少だけでなく、硝酸性窒素の生成も全く見られない。このことから、この生物膜には硝化菌がほとんど存在していなかった可能性が高い。これは、下水処理の塩素処理にともなう残留塩素や副産物による硝化作用への影響が関連しているものと思われる。一般に、硝化菌は重金属や毒性物質への感受性が高いことからバイオアッセイにも利用が検討されてきており、この側面からも硝化活性を調べることの意義を検討することもできよう。

最後に、硝酸性窒素のデータはないものの、前述のように暗条件で成長した下水路生物膜では、さほどアンモニア性窒素の増加は大きくなく、地点1以上に硝化が速やかに進行している。これは、暗渠では藻類の増殖は抑制されていることと関係しているものと予想される。言い換えれば、付着生物膜の藻類が二次汚濁源として重要なことや、明条件より暗条件の方が硝化菌が存在するには有利であることを示唆しているとも解釈できる。以上の考察から、河床生物膜の硝化活性を河床生物膜自体の分解過程とリンクして調べるにより、その水域の汚濁負荷状況や水域生態系の長期的で総括的な分類指標として利用できることが考えられる。

3. 3 底生生物の生息状況

各地点で確認された底生生物を表-1に示す。ただし、この調査ではコドラートを使用しておらず、半定量的なものである。上流地点では数個の礫を、その他の地点では設置したブロックを1個持ち帰り実体顕微鏡による検鏡を行った。下水処理水が主として流れる水路（地点3）や生活雑排水が流入している友部町内の都市下水路（地点2-A）では、ユスリカのみが観察された。しかし、そのサイズには違いが見られ、それぞれ1cm、3mm程度のユスリカが主として繁殖していた。サイズの違いの原因は不明であるが、生息種が限られており、またその量が多いことから多様性の低い水環境であることが伺える。また、地点3の水質環境は硝化活性はないものの、ユスリカは存在できる環境であることも興味深い。

一方、都市下水路流入地点からわずか数十m下流の地点である地点2-Bでは、ユスリカのみでなく、数種の水生昆虫が確認され、生活雑排水などによる汚染が少ない上流地点と同種のものも見られた。これは、生活雑排水の流入にもかかわらず、都市下水路の流量の約20倍程度の流量を有する濁沼川本流により希釈効果によってある程度種の多様性を維持できる水環境が築かれていることが伺える。

汚水生物学の分野で知られているように、ユスリカは、汚濁に強く有機物を好む種であり、地点2-Bで観察されたその他の種は、水質階級で非常にあるいは比較的良好な水質に生息するものであった。

4. まとめ

以上の調査および実験により次のことが明かとなった。

- 1) 付着生物膜密度は、水中の無機成分の沈積の影響を受けながら、約2ヶ月（秋季から冬季）で安定状態へと達する。生物膜のVSS/SS比は、都市下水路や下水処理水放流水路において高く、粘土やシルト分などの沈積が考えられる河川本流部で低い結果が得られた。
- 2) 2ヶ月程度設置したブロックに生息した底生生物を調べることで、おおそ河川水質や雑排水の影響を評価できると推察される。これは、付着生物膜の成長と関連しているものと予想された。
- 3) 硝化活性試験では、生物膜自体の分解によりアンモニア性窒素が溶出し、その量は付着藻類などの生物膜組成に依存することが推察された。したがって、硝化活性を定量的に評価するには硝酸性窒素の挙動や脱窒を含めた動力学的な解析を必要とする。
- 4) 下水処理水の放流水路における生物膜は、アンモニア性窒素が十分存在した水質環境下で成長したにも関わらず硝化活性がほとんどなく、塩素消毒処理に関連した残留塩素やその副産物の影響を受けていた可能性が考えられた。しかしながら、底生生物としてユスリカは生存していた。
- 5) 都市下水路の暗渠内で成長した生物膜は、光が当たる同じ水路部分で成長した生物膜より硝化活性が高く、実質的な生活雑排水中の窒素変換において、暗渠内の生物膜が重要な役割を担っていることが考えられた。

参考文献

- 1) 津田、森下（1974）生物による水質調査法、山海堂
- 2) 安ら（1993）農業地域の小河川における底生動物相による生物学的な水質指数の季節変動、環境工学研究論文集、Vol.30,pp341-350
- 3) 井上、海老瀬（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評価、水環境学会誌、Vol.16,No.7,pp507-515
- 4) Furumai et al.（1988）Estimation of nitrification activity in a tidal river sediment, Proc. of 2nd IAWQ Asian Conference, pp81-87,
- 5) 二渡ら（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、No479, II-25, pp1010-110

表-1 底生生物観察結果（93年1月）

	生物名	水質階級	総体数
Station 1	カゲロウ	o s	+
	トビケラ	o s ~ β m	++
	カワケラ	o s ~ β m	+
	アユ	o s	+
Station 2A	ユスリカ	α m ~ p m	+
	ユスリカ	α m ~ p m	++++
Station 2B	カワケラ	o s ~ β m	++
	トビケラ	o s ~ β m	+
	ミズガモ		+
	ユスリカ	α m ~ p m	+++
Station 3	ユスリカ	α m ~ p m	++++

※ 総体数の多い順に
++++, +++, ++, +