

合流式下水管渠内生物膜の降雨による生物活性減少機構に関する基礎的検討

東京大学工学部 学生会員 ○水谷 司
 東京大学大学院環境学系 正会員 佐藤 弘泰
 正会員 味埜 俊

1. 研究の背景と目的

合流式下水道では降雨後数日間処理場の生物学的リン除去が悪化することがある。その原因の一つとして、降雨後の流入下水中の有機酸濃度の減少が考えられている。流入下水中の有機酸生成に関与する因子の一つとして、管渠内壁に生成した生物膜の流失が考えられるが、流失機構は十分に理解されているとはいえない。そこで、本研究では管渠壁面に付着した生物膜が降雨時に受ける影響を明らかにすることを目的とした。まず晴天時を想定した水理学的条件下で塩ビチューブ内に生物膜を形成させた。次いで降雨時を想定した流量の水を流し生物膜を剥離させ、剥離前後の生物活性の変化を調べた（水理学的剪断応力による流失実験＝剪断応力実験）。また、降雨時には砂等の粒子も下水管に入ってくるのが想定されるので、砂の流下による生物膜への影響を調べる実験も行った（固形分の擦過作用による流失実験＝擦過実験）。

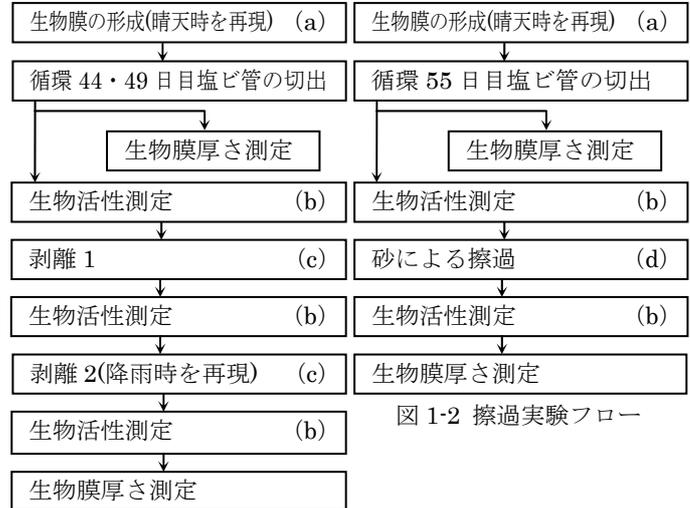


図 1-1 剪断応力実験フロー

図 1-2 擦過実験フロー

2. 本研究における想定

本研究では管径 800mm・管路勾配 5.92‰の硬質塩化ビニル製合流式下水管渠が晴天時および降雨時に受ける水理的負荷を想定した。この条件では、晴天時に受ける壁面剪断応力は $\tau_{01}=2.7\text{Pa}$ 、また降雨時に受ける最大壁面剪断応力は $\tau_{03}=14.1\text{Pa}$ と算出される。それぞれの壁面剪断応力を以下の 3.以降で述べる実験室モデル下水管内に満管状態で生じさせることによって晴天時・降雨時の状態を再現した。

3. 実験方法

本実験では冒頭で述べた通り水理学的剪断応力と擦過作用の生物膜への影響をそれぞれ調べるため、剪断応力実験と擦過実験の 2 つに大別した。各実験フローを図 1-1、図 1-2 に示す。フロー中 a~d の詳細については以下で説明する。

a. 生物膜形成方法：生物膜は図 2 のように内径 $\phi=15\text{mm}$ の塩化ビニルチューブ 10m に満管状態で表 1 の人工下水を表 2 の条件下で晴天時壁面剪断応力を再現する流量で循環させることにより形成させた。チューブは基本的に水平に置くものとし、また、人工下水への酸素供給は行わなかった。生物膜が形成された後、650mm 程度の長さで切断し、b, c, d の実験に供した。

b. 生物活性測定方法：生物膜形成時と同構造のリアクタを用いて、表 2 の条件下で剥離・擦過前後の 650mm のチューブ内に表 1 に示す組成の人工下水 5L を 24 時間循環させた。その際循環直後から 24 時間後まで計 12 回のサンプリングを行ない、それぞれのサンプルの DOC（溶存有機炭素濃度）及び酢酸をはじめとする有機酸 12 項目を測定し、その経時変化を調べた。

c. 剪断応力実験方法：剪断応力実験は、降雨時を想定した壁面剪断応力を剥離 2 で再現した。また晴天時と降雨時の中間段階として本実験では晴天時と降雨時の壁面剪断応力の平均値 $\tau_{02}=8.4\text{Pa}$ を剥離 1 で再現した。生

キーワード：合流式下水管渠、生物膜、生物活性変化、流失、水理学的剪断応力、擦過
 連絡先：〒277-8563 千葉県柏市柏の葉 5-1-5 e-mail: hiroyasu@k.u-tokyo.ac.jp

表 1 人工下水組成

物質名	濃度 (g/L)
$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$	0.25
$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.011
$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.113
KCl	0.053
NH_4Cl	0.088
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	0.108
K_2HPO_4	0.023
KH_2PO_4	0.005
-	0.013

表 2 リアクタ循環条件

内径	15mm	
流量	6.1L/min	
τ_0	2.7Pa	
人工下水量	10L (5L)	
pH	6.3~7.3	
人工下水交換頻度		
	0~25 日	24 時間おき
	26 日以降	48 時間おき

()内は生物活性測定時

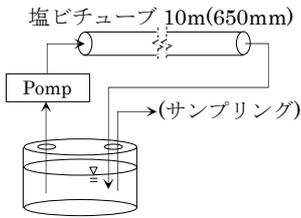


図2 リアクタ循環方法
(0内は生物活性測定時)

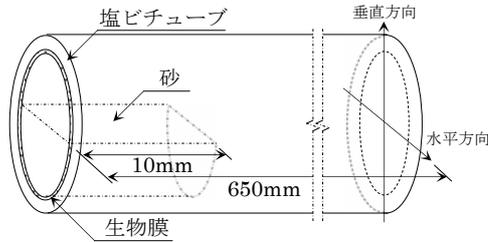


図3 砂の堆積方法

表3 生物膜厚さ及び流失率

	形成 日数	流失前 厚さ	流失後* 厚さ	流失率
剪断応力	44日	370 μm	220 μm	40%
実験	49日	300 μm	230 μm	25%
擦過実験	55日	400 μm	$\geq 50 \mu\text{m}$	$\leq 90\%$

*剪断応力実験では剥離2後、擦過実験では擦過後を示す

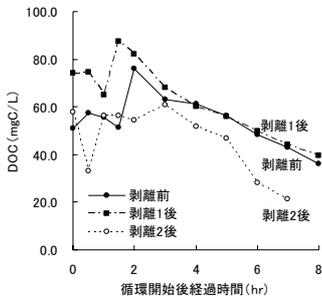


図4-1 生物活性測定結果
(DOC, 44日目生物膜)

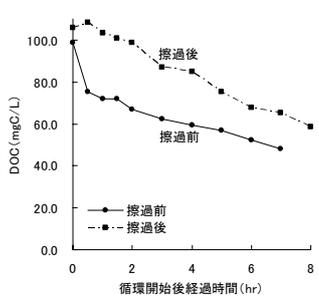


図4-2 生物活性測定結果
(DOC, 55日目生物膜)

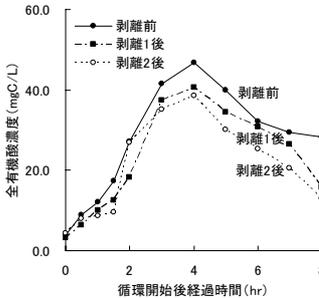


図5-1 生物活性測定結果
(全有機酸, 44日目生物膜)

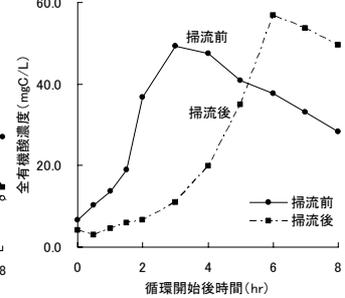


図5-2 生物活性測定結果
(全有機酸, 55日目生物膜)

物活性測定を行った剥離前あるいは剥離1後のチューブ内に、剥離1では τ_{O_2} を生じる15.9L/min、剥離2では最大流速時の τ_{O_3} を生じる19.7L/minで水道水を流した。

d. 擦過実験方法: 擦過実験では生物活性測定後のチューブ650mmを水平に置き、最上流に最大粒径1mm強の砂45g程度を図3に示すようにに堆積させた後、剥離1と同流量で3分間水道水を流した。さらにその後チューブ上下をひっくり返し、同様の操作を行った。

分析方法: DOCはNPOC法（SHIMADZU TOC5000）、有機酸はイオン排除法によるHPLC法（HEWLETT PACKARD SERIES 1100）により測定した。また生物膜厚さは冷凍後にチューブ左右どちらか一方の点とチューブ上下の点の計3点を測定し平均することで求めた。

4. 実験結果及び考察

剪断応力実験・擦過実験前後の生物膜厚さを表3に示す。表3から44日目・49日目生物膜共に剥離2後に膜厚さが25~40%程度減少し、厚さ200~250 μm 程度となった。一方、擦過後は90%以上が流失し厚さ50 μm 以下となっていた。すなわち、水理的剪断応力により流失することのなかった下層200 μm の生物膜の大部分が、擦過により流失した。本結果より水理的剪断応力によっても流失は見られたが、それ以上に砂流下に伴う擦過作用が生物膜を大きく流失させることが確認された。

次に流失前後のDOC減少速度の変化を図4-1および図4-2に示す。44日目生物膜、55日目生物膜のいずれについても、DOC減少速度について剥離前後で明確な違いは見られなかった。すなわち、DOC減少速度からは剥離前後の生物活性の変化を捉えることができなかった。その原因として、DOCの減少が活性のある生物の量よりもむしろ系への酸素の混入に依存していた可能性が挙げられる。

また、人工下水中の主成分であるグルコースから嫌気性反応により生成された有機酸濃度（全有機酸濃度）の変化を図5-1および図5-2に示す。44日目生物膜では、生成された有機酸の最大濃度が剥離前、剥離1後、剥離2後の順となったものの、その差はそれほど明確ではなかった。一方55日目生物膜を用いて行った擦過実験の場合、擦過前と擦過後では全有機酸の初期の生成速度に大きな違いが見られた。すなわち、例えば初期3時間の間に生成された全有機酸は、擦過後では擦過前の75%以下であった。

以上、DOC、全有機酸の結果より水理的剪断応力には生物膜の生物活性に顕著な変化をもたらす作用はなかったものの擦過作用には生物膜の生物活性を大幅に失わせる作用があったと考えられる。

以上の生物膜流失と生物活性それぞれの結果から、降雨による合流式下水管渠内生物膜の流失に関して、次の二つの可能性が示された。

- (1) 合流式下水管渠において降雨時の水理的剪断応力増大により生物膜のある程度の流失は見込まれるが、それによる大幅な生物活性減少の可能性は低いと考えられる。
- (2) 降雨時に固形分流下により擦過作用が生物膜に生じることで生物膜が大部分流失し生物活性が大幅に減少している可能性が高いことが示唆された。

従って、今後合流式下水管渠の降雨前後の生物活性変化のメカニズム解明には、水理的剪断応力だけでなく固形分流下に伴う擦過による生物膜への影響を考慮に入れる必要があると言える。