

B-49 バイオフィームが形成された 水道配水管壁面における夾雑物の付着・滞留特性

○山 鎮^{1*}・笠原 伸介²・石川 宗孝²

¹大阪工業大学大学院工学研究科環境工学専攻（〒535-8585大阪市旭区大宮5丁目16番1号）

²大阪工科大学工学部環境工学科（〒535-8585大阪市旭区大宮5丁目16番1号）

* E-mail: yama@env.oit.ac.jp

1. はじめに

水道水中には剥離した活性炭やライニング鋼管のコーティング材など、様々な粒子状の夾雑物が存在している¹⁾が、水道水質保持の観点からそれらは削減されることが望ましい。しかし、配水管壁面にバイオフィームが形成されると、夾雑物の配水管内での滞留が促進され、結果的に水道水質が低下すると考えられる²⁾。

本研究では、バイオフィームの形成と夾雑物の挙動との関係性を評価するため、回転式反応装置（以下、AR）を用いて配水管内の微生物再増殖を模擬的に再現し、直径 1 および 5μm の蛍光ビーズをトレーサーとして供給した。AR 内での AOC 消費と菌体増殖およびバイオフィーム形成に及ぼす残留塩素の影響について検討するとともに、蛍光ビーズの粒径の違いや残留塩素の有無がビーズ滞留時間に及ぼす影響について検討した。

2. 実験概要

図-1 に、本実験で用いた AR の概要を示す。実験原水として表-1 に示す本学水道水を用いた。実験当初はチオ硫酸ナトリウムを添加した後 AR に供給（残留塩素無）し、その後は水道水を直接 AR に供給した（残留塩素有）。AR の水理学的滞留時間（以下、HRT）はいずれも 0.1 h とした。AR 内部では、付着試料を採取するための着脱可能なスライドが約 20 枚装着された直径 14 cm の円柱状ドラム（材質：PVC）を 60 rpm で回転させ、配水管壁面での水流せん断を再現した。通水開始後、菌体の浮遊濃度および付着密度を継続的に測定し、定常状態を確認した後、直径 1 および 5μm の蛍光ビーズ（材質：ラテックス）を $1.1 \sim 3.5 \times 10^3$ 個/mL となるよう連続的に添加した。定常状態における菌体および蛍光ビーズ

の浮遊濃度と付着密度を求め、スライド表面に付着した菌体の滞留時間³⁾を式-1 および 2 より、蛍光ビーズの壁面上での滞留時間を式-3 より、それぞれ算出した。また、水道水中の浮遊状態での菌体増殖特性を評価するため、連続実験とあわせて回分実験を行った。回分実験では、チオ硫酸ナトリウムの添加により残留塩素を除去した本学水道水に、水道水中に生息する土着細菌を摂取し 15°C で培養した。連続実験、回分実験とも、菌体の浮遊濃度と AOC 濃度より増殖収率を求めた。

$$\frac{Q}{V}(X_b - X_{b0}) = \gamma_b X_{ba} \frac{A}{V} \dots\dots\dots (式-1)$$

$$\text{菌体の滞留時間} = \frac{1}{\gamma_b} \dots\dots\dots (式-2)$$

$$\text{蛍光ビーズの滞留時間} = \frac{X_{ba} A}{Q X_t} \dots\dots\dots (式-3)$$

Q: 流量 (mL/h)、V: リアクター容積 (cm³)、A: リアクター内表面積 (cm²)、X_{ba}: 付着蛍光ビーズ密度 (個/cm²)、X_t: 流出浮遊蛍光ビーズ濃度 (個/mL)、X_{ba}: 付着菌体密度 (CFU or cells/cm²)、X_{b0}: 流入浮遊菌体濃度 (CFU or cells/mL)、X_b: 流出浮遊菌体濃度 (CFU or cells/mL)、γ_b: 比剥離係数 (h⁻¹)

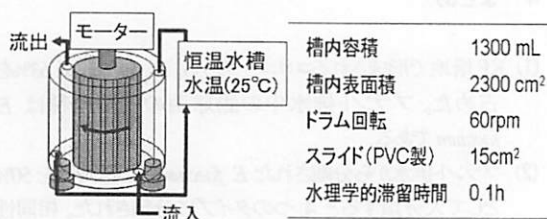


図-1 回転式反応装置

表-1 本学水道水質

濁度(度)	0.02~0.1
AOC($\mu\text{g ac-Ceq/L}$)	40~80
TOC(mg/L)	0.5~1.0
T-N(mg/L)	1.2
T-P(mg/L)	N.D.
遊離残留塩素(mg/L)	0.1~0.4

3. 結果と考察

(1) バイオフィームの形成特性

a) AOCの消費と菌体の増殖

図-2 に、回分実験における浮遊菌体濃度の経日変化を、図-3 および図-4 に、連続実験における付着菌体密度および浮遊菌体濃度の経日変化をそれぞれ示す。回分実験では、水道水中の浮遊菌体に2日間の遅滞期が認められたが、連続実験では通水開始より約60日後に付着菌体密度がほぼ一定となり、浮遊菌体濃度はAR内で約10倍に増加している様子が確認された。このことは、壁面に供給される菌体の活性が低くても、バイオフィームを形成することで菌体数が顕著に増加することを意味している。また、回分実験で算出された増殖収率は 1.2×10^7 (cells/ μg)、連続実験で算出された増殖収率は 1.4×10^7 (cells/ μg) と両者に違いが見られなかったことから、AR内の付着菌体は回分実験における浮遊菌体と同様の基質を摂取する同様の菌体であったと考えられる。

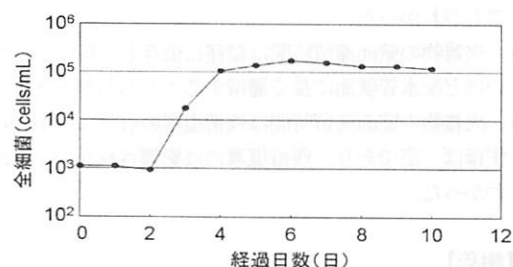


図-2 浮遊菌体濃度の経日変化 (回分実験)

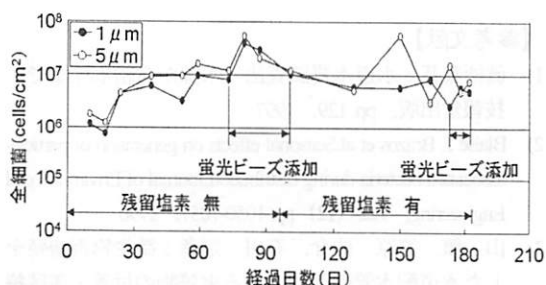


図-3 付着菌体密度の経日変化 (連続実験)

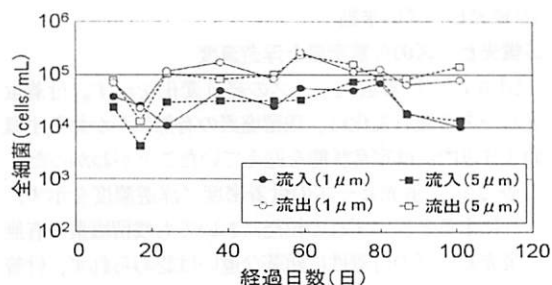
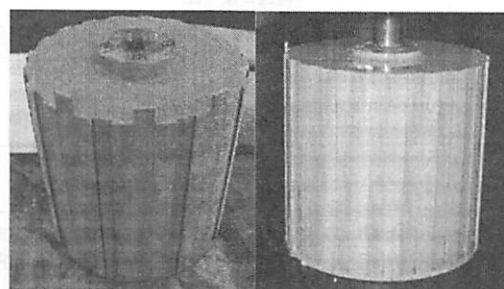


図-4 浮遊菌体濃度の経日変化 (連続実験)

b) 残留塩素の影響

写真-1 に、通水開始 90~180 日後に撮影したドラム表面を示す。残留塩素が存在しない場合のバイオフィームは粘性が高く、色は黄色みがかかった白色であったのに対し、残留塩素が存在する場合のバイオフィームは粘性が低く、色は無色とその外観は大きく異なり、残留塩素によってバイオフィームの性状が変化していた様子が示唆された。しかし、図-5 に示すように定常状態における付着菌体密度を比較すると、HPC については残留塩素が存在することで付着菌体密度が約3オーダー低下したが、全細菌については残留塩素の有無にかかわらず付着菌体密度に大きな違いはなく、量的な変化は見られなかった。これらのことから、実験原水程度の残留塩素濃度では、微生物を不活化させる効果はあるが、剥離させるほどの効果は示さないことが分かった。



残留塩素 無

残留塩素 有

写真-1 残留塩素の有無による生物膜の性状

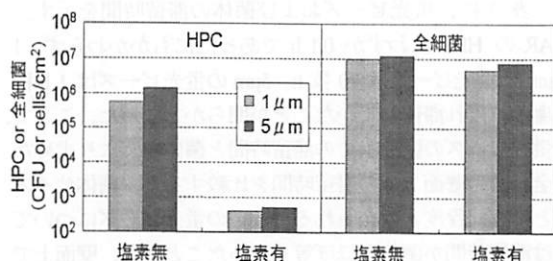


図-5 定常状態における付着菌体密度

(2) 蛍光ビーズの挙動

a) 蛍光ビーズの付着密度と浮遊濃度

図-6 に、付着蛍光ビーズの経日変化を示す。付着蛍光ビーズの経日変化は、残留塩素の有無にかかわらず概ね3日以内には定常状態を迎えていたことがわかった。

表-2 に、蛍光ビーズの付着密度/浮遊濃度を示す。これによると、いずれの粒径においても残留塩素の有無で蛍光ビーズの付着性に顕著な違いは認められず、付着菌体の活性は蛍光ビーズの付着性に大きく関与しないことが示唆された。さらに、蛍光ビーズの粒径別に比較すると、1 μ m は 5 μ m より付着密度/浮遊濃度が 10~20 倍ほど高く、蛍光ビーズの付着性は粒径に依存することがわかった。

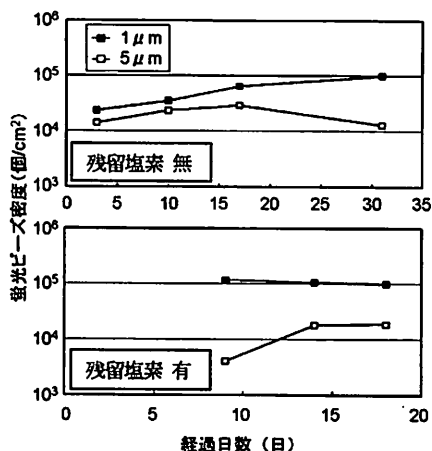


図-6 付着蛍光ビーズの経日変化

表-2 蛍光ビーズの付着密度/浮遊濃度

	1 μ m		5 μ m	
	塩素無	塩素有	塩素無	塩素有
付着密度(個/cm ²)	1.0×10 ⁵	1.0×10 ⁵	1.3×10 ⁴	1.9×10 ⁴
浮遊濃度(個/cm ³)	1.6×10 ³	1.2×10 ³	1.4×10 ³	4.4×10 ³
付着密度/浮遊濃度(1/cm)	62.5	83.3	9.3	4.3

b) 蛍光ビーズの滞留時間

表-3 に、蛍光ビーズおよび菌体の滞留時間を示す。AR の HRT はわずか 0.1 h であったにもかかわらず、1 μ m の蛍光ビーズは 10 数 h、5 μ m の蛍光ビーズは 1 h 程度それぞれ滞留していたことが明らかとなった。ここで、蛍光ビーズの壁面上での滞留時間と菌体収支より求めた全細菌の壁面上での滞留時間を比較すると、菌体サイズとほぼ同程度と考えられる 1 μ m の蛍光ビーズについては滞留時間が菌体とほぼ等しかったことから、壁面上では菌体の付着から剥離に伴って夾雑物も同じスパンで置換されていたことが示唆された。一方、5 μ m の蛍光ビ

ーズについては壁面上での滞留時間が菌体の 1/10 程度にとどまり、比較的短いスパンで置換されている様子が示された。

表-3 蛍光ビーズおよび微生物の滞留時間

	1 μ m		5 μ m	
	塩素無	塩素有	塩素無	塩素有
水理学的滞留時間(h)	0.1	0.1	0.1	0.1
蛍光ビーズの滞留時間(h)	11.1	14.3	1.6	0.8
全細菌の滞留時間(h)	27.0	14.8	16.7	13.7

4. おわりに

本研究では、AR を用いて水道配水管壁面におけるバイオフィームの形成および夾雑物の付着・滞留特性について検討した結果、以下のような知見が得られた。

- 1) 本実験では、活性の低い菌体でもバイオフィームを形成することにより、水中の菌体数は顕著に増加することが示された。また、連続実験より求めた菌体の増殖収率と回分実験より求めた増殖収率はほぼ等しかった。
- 2) 残留塩素は壁面上の菌体を不活化させる効果は示すが、菌体を剥離させるほどの効果は示さないことがわかった。
- 3) 夾雑物の壁面滞留時間は、HRT の 10~100 倍に及ぶことがわかった。
- 4) 夾雑物の壁面滞留時間は粒径に依存し、粒径が小さいほど配水管壁面に長く滞留することがわかった。
- 5) 夾雑物の壁面滞留時間は残留塩素の有無にかかわらずほぼ一定であり、残留塩素には影響されないことがわかった。

【謝辞】

本実験に協力頂いた本学卒業生の毛利力君、吉岡成仁君、上野真弓さんに対し、心より感謝致します。

【参考文献】

- 1) 眞柄泰基：水道水質調査法（水源から給水栓まで），技報堂出版，pp. 129, 1997
- 2) Blaise J. Brazos et al: Seasonal effects on generation of particle-associated bacteria during distribution, Journal of Environmental Engineering, 122 (12) pp. 1050-1057, 1996
- 3) 山 鎮, 笠原 伸介, 石川 宗孝：微生物再増殖をした水道配水管壁面における夾雑物の付着・滞留特性，第 59 回全国水道研究発表会講演集，pp. 488-489, 2008