

II-166 回転円板付着生物膜の構造に関する研究

鹿児島高専 ○正員 西留 清
九州大学 正員 楠田哲也

1. はじめに

半水没型回転円板の定常流入運転(流入汚水量および基質濃度が一定)開始直後は、円板支持体に液本体から他栄養性細菌(有機物酸化細菌と脱窒細菌)と硝化菌を含むSSが付着し、薄い膜が形成される。定常流入運転数週間経過後は、この膜内の他栄養性細菌と硝化菌が増殖・死滅し、さらに液本体から移動したSSが生物膜表面に付着し、付着膜の一部は剝離しつつ、ほぼ一定厚さの付着生物膜が回転円板支持体に形成される。この形成された半水没型回転円板付着生物膜内の他栄養性細菌と硝化菌の増殖を支配する主な因子は、生物膜内の酸素濃度、および基質(有機性炭素化合物、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$)濃度である。したがって、これらの因子により付着生物膜内の他栄養性細菌と硝化菌の濃度分布が決まると考えられる。そこで、本文では付着生物濃度(全付着物濃度)を生物膜表面から深部まで一定濃度分布と仮定し、コンピューターシミュレーションにより半水没型回転円板法の生物膜形成過程における液本体基質濃度と生物膜内他栄養性酸化細菌および硝化菌の濃度分布、すなわち生物膜の構造を求め、これに検討を加えることにより、半水没型回転円板法の合理的設計法の一助とする。

2. 回転円板付着生物膜増殖過程のシミュレーション

2-1. 仮定

①円板支持体面に平行な面内における微生物分布、生物反応速度、物質輸送速度等は、すべて一様で、一次元問題として扱える。②液本体基質濃度は常に一定である。③初期及び剝離時には円板支持体表面に付着生物膜が、所定の菌体の割合で、所定の膜厚存在する。④初期および剝離時の円板支持体表面に $10\mu\text{m}$ 厚の付着生物膜内の初期の有機物濃度、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度およびDO濃度は液本体濃度と等しい。⑤生物膜の支持体に平行な面における平均付着生物濃度(全付着物濃度)は、生物膜表面から深部まで、一定の分布形となる。⑥生物の増殖・死滅および分解速度は $\Delta t(0.5)$ 日毎に変化する。⑦ある分割膜内で増殖した生物は、合計生物濃度が一定濃度以上になると各層に存在していた割合の濃度で液本体側に移動し、移動量に応じ、膜厚が増加する。⑧所定の分割数(100, 生物膜厚さ約 $1500\mu\text{m}$)以上増殖した生物膜表面の生物は剝離する。⑨空中での付着水膜の厚さ及び水中での濃度拡散層厚は一定とする。⑩生物膜中のDOが一定の低濃度以下になると、脱窒が生じる。⑪死滅生物は一定速度で分解し、生物膜中で溶解性有機炭素となる。⑫水温等の温度変化はない。

2-2. 計算方法

①初発付着生物濃度と厚さを仮定し、渡辺、西留等¹⁾の有機物酸化・硝化過程のシミュレーションモデルにより、回転円板付着生物膜内の基質濃度分布を求める。求めた基質濃度分布と、生物増殖の基礎式(式-1~3)を用いて微小各層の生物濃度を計算する。

$$\frac{dX_c}{dt} = X_c \left(\mu_{c\max} \frac{C_c}{K_c + C_c} - \frac{O_c}{K_{oc} + O_c} \right) \quad (1)$$

$$\frac{dX_n}{dt} = X_n \left(\mu_{n\max} \frac{N_c}{K_n + N_c} - \frac{O_c}{K_{on} + O_c} \right) \quad (2)$$

$$\frac{dX_d}{dt} = X_d \left(\mu_{d\max} \frac{D_c}{K_d + D_c} - \frac{C_c}{K_{cd} + C_c} - \frac{K_{od}}{K_{od} + O_c} \right) \quad (3)$$

ここに、 X_c : 活性有機物酸化細菌濃度(mg/ℓ)、 t : 時間(day)、 $\mu_{c\max}$: 有機物酸化細菌最大比増殖速度定数(day^{-1})、 C_c : 有機物濃度(mg/ℓ)、 K_c : 有機物の飽和定数(mg/ℓ)、 O_c : DO濃度(mg/ℓ)、 K_{oc} : 有機物酸化におけるDOの飽和定数(mg/ℓ)、 X_n : 活性硝化菌濃度(mg/ℓ)、 $\mu_{n\max}$: 硝化菌最大比増殖速度定数(day^{-1})、 N_c : $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度(mg/ℓ)、 K_n : $\text{NH}_4\text{-N}$ の飽和定数(mg/ℓ)、 K_{on} : 硝化におけるDOの飽和定数(mg/ℓ)、 X_d : 活性脱窒菌濃度(mg/ℓ)、 $\mu_{d\max}$: 脱窒菌最大比増殖速度定数(day^{-1})、 D_c : $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度(mg/ℓ)、 K_d : 脱窒反応における $\text{NO}_3\text{-N}$ の飽和定数(mg/ℓ)、 K_{cd} : 脱窒における有機物

表-1 シミュレーションの条件

最大生物膜厚分割数	100
最大分割生物膜厚さ	$20(\mu\text{m})$
最小分割生物膜厚さ	$10(\mu\text{m})$
付着水膜厚	$50(\mu\text{m})$
拡散層厚	$70(\mu\text{m})$
硝化細菌の収率係数	0.1
他栄養性細菌の収率係数	0.5
円板回転速度	8.5(rpm)
$\text{NH}_4\text{-N}$ の分子拡散係数	$1.8(\text{cm}^2/\text{day})$
O_2 の分子拡散係数	$2.1(\text{cm}^2/\text{day})$
有機物の分子拡散係数	$0.6(\text{cm}^2/\text{day})$
$\text{NO}_3\text{-N}$ の分子拡散係数	$1.6(\text{cm}^2/\text{day})$
$\mu_{c\max}$	$8.6(\text{day}^{-1})$
$\mu_{n\max}$	$2.2(\text{day}^{-1})$
$\mu_{d\max}$	$0.8\mu_{c\max}$
液本体有機物濃度	$100(\text{mg}/\ell)$
液本体 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度	$10(\text{mg}/\ell)$
液本体 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度	$1(\text{mg}/\ell)$
液本体DO濃度	$1(\text{mg}/\ell)$
初発付着 X_c	$1000(\text{mg}/\ell)$
初発付着不活性物濃度	$98000(\text{mg}/\ell)$
K_c	$20(\text{mg}/\ell)$
K_{oc}	$0.1(\text{mg}/\ell)$
他栄養性細菌の死滅速度定数	$0.05\mu_{c\max}(\text{day}^{-1})$
初期付着 X_n	$1000(\text{mg}/\ell)$
K_n	$0.2(\text{mg}/\ell)$
K_{on}	$1.0(\text{mg}/\ell)$
硝化菌の死滅速度定数	$0.05\mu_{n\max}(\text{day}^{-1})$
付着生物の分解速度定数	$0.03(\text{day}^{-1})$
K_d	$0.1(\text{mg}/\ell)$
K_{cd}	$0.5(\text{mg}/\ell)$

の飽和定数(mg/ℓ), K_{od} : 脱窒におけるD0の飽和定数(mg/ℓ).

②前記仮定③④の初期条件で $\Delta t(0.02\text{sec})$ ずつ円板を回転させ、基質濃度分布を求めつつ、生物増殖式(1), (2), (3)を用いて Δt 秒後の生物濃度を求める。③1サイクル($T=7.2\text{sec}$)間の増殖速度が0.5日変化しないものとして、0.5日後の生物濃度を求める。④増加させた膜厚で①～③を繰り返し、再び生物および基質濃度分布を計算する。

3. 結果と考察

図-1は、定常流入運転開始経過後の活性他栄養性細菌と硝化菌濃度分布のシミュレーションの結果である。活性他栄養性細菌は液本体有機物濃度($100\text{mg}/\ell$)と有機物酸化細菌最大比増殖速度が液本体 $\text{NH}_4\text{-N}$ 窒素濃度($10\text{mg}/\ell$)と硝化細菌最大比増殖速度に比較して高いため、定常流入運転開始数日経過(5日)までは膜表層部で高くなっている。また、活性硝化菌は液本体有機物濃度が高く、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度と硝化菌最大比増殖速度が低いため、膜深部に低濃度だけ存在する。定常流入運転が約10日以上経過すると、生物膜が所定の厚さ(約 $1500\mu\text{m}$)となり、膜深部ではD0濃度が低下し、活性他栄養性細菌は脱窒に伴う増殖(脱窒が起こるD0濃度を $0.01\text{mg}/\ell$ 、液本体 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度を $1\text{mg}/\ell$ としている)により、膜深部でも高い。図-2は、定常流入運転開始経過日数と付着生物膜厚さの関係を表したシミュレーションの結果である。半水没型回転円板実装置の付着生物膜は付着生物の増殖に伴う膜厚の増加と、運転開始直後から付着生物の剝離を生ずる。この剝離は膜表面のみではなく、膜中層部および膜深部からも生ずる。このため、生物膜の平均厚さが所定の厚さになるには定常運転開始後約一ヶ月間を要する。本シミュレーションでは、生物膜表面からのみ剝離すると仮定したため、約1週間で所定の厚さとなった。したがって、約一ヶ月間を要して形成されている実際の生物膜の構造は、シミュレーションで表した約10日目までの生物濃度分布の平均化された構造になっているとも考えられる。図-3は、定常流入運転開始経過日数と生物膜表面における全円板面積当りの酸素フラックスの関係を表したシミュレーションの結果である。全円板面積当りの酸素フラックスは生物膜の増殖に伴い増加するが、定常流入運転開始3日後にはほぼ一定となっている。図-2に示す定常流入運転開始3日後の生物膜厚さは、約 $300\mu\text{m}$ である。すなわち、生物膜約 $300\mu\text{m}$ 以上の深部では、D0濃度が $0.01\text{mg}/\ell$ 以下となり、好気性生物反応が酸素律速となっていると言える。実装置の運転では、生物膜の厚さは所定の厚さ以下でも酸素フラックスは約1週間で所定の値となる。このことは、1週間経過後に形成される生物膜の深部では脱窒に伴う活性他栄養性細菌の増殖が生ずると考えられる。

4. おわりに

本報では半水没型回転円板付着生物膜内の有機物酸化、硝化、脱窒および死滅細菌の分解過程を考慮した付着生物膜の生物濃度分布をシミュレーションにより求めた。液本体基質濃度および基質の構成に依存する生物膜内の細菌群分布構造が解明されると、この構造のもとでの基質除去速度の推定が可能となる。また定常運転開始後の付着生物膜の実際の剝離特性を考慮にいれるとより実際の回転円板付着生物膜の構造が明かとなる。

参考文献

例えば、

Nishidome K. and Kusuda T.: Mechanism and Simulation of Biofilm Formation in a Rotating Biological Contactor, International Symposium ENVIRONMENTAL BIOTECHNOLOGY 22-25 April 1991, Ostend, Belgium

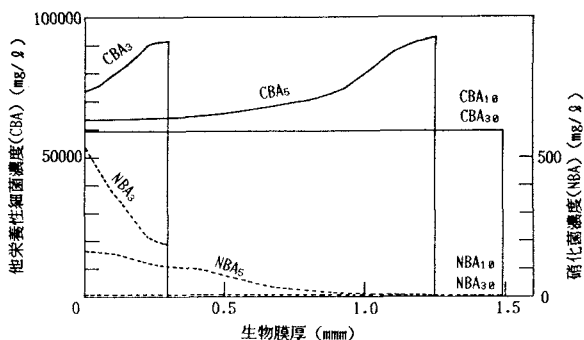


図-1 生物膜内の生物濃度分布(計算結果)

CBA₃: 3日経過後の他栄養性細菌濃度
NBA₃: 3日経過後の硝化菌濃度

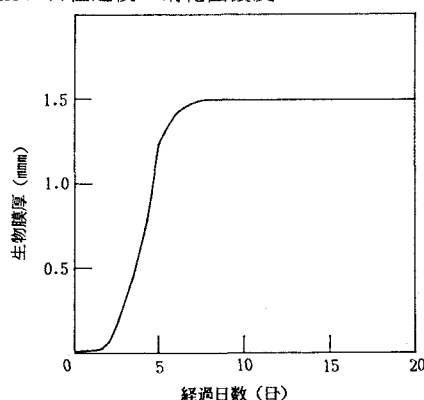


図-2 経過日数と付着生物膜厚さ(計算結果)

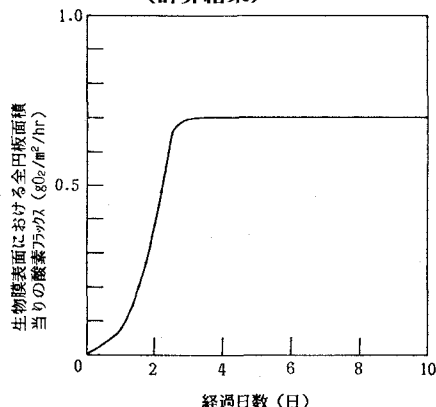


図-3 経過日数と酸素フラックス(計算結果)