

誰が膜を詰まらせるのか？

稲葉 知大

地球上の水資源には限りがあり、近年における新興国の台頭や世界的な人口増加は、世界を深刻な水リスクに陥れつつある。こうした背景から、水処理膜を利用した廃水の処理再生技術に注目が集まっている。中でも微生物処理のための活性汚泥と処理水を膜で分離する膜分離活性汚泥法 (membrane bioreactor: MBR) は、小さな敷設面積で高度かつ高効率な廃水処理が可能であることから、水処理再生の中核技術として注目を集め、世界的に導入が進んでいる。

MBRに限らず、分離膜を用いた水処理・再生技術は水リスク回避のための有望な技術として研究開発が進められている。しかしその有用性の一方、膜分離ではほぼ確実に膜閉塞が発生し、プロセス全体に深刻な機能不全をもたらす。そのため、膜閉塞の検知や抑制、制御が水の膜処理におけるもっとも重要な課題の一つとされている。膜閉塞の中でも、水中の微生物が原因となって引き起こされるものは特にバイオフィウリングと呼ばれ、発生予測の困難さや再発のしやすさなどの面から対策技術の開発が待たれている。微生物はバイオフィウムと呼ばれる物質表面に固着した構造体を形成し集団で生息することが多く、バイオフィウリングの原因は水処理膜上でこのバイオフィウムが形成されるためであると考えられてきた¹⁾。こうした理由からバイオフィウリングの検知・制御技術の開発を目指し、水処理膜上でバイオフィウム形成機構の解析が行われている。

MBRの場合、廃水は活性汚泥と呼ばれる微生物の複合体を含む有機汚泥によって処理され、浄化された水は水処理膜を使用して活性汚泥と分離される。前述のように活性汚泥は微生物集団を含む複合体であり、水処理膜にバイオフィウムを形成する微生物も活性汚泥中に内在していると考えられている。実際にMBRを模して行われた試験では、活性汚泥中とバイオフィウム中では優占種が同じである場合がある。これは廃水処理を行う微生物とバイオフィウリングの原因微生物が同じである可能性を示している。しかし我々は、彼らに代謝を行うことで仕事 (廃水処理) をしてもらいたいが、膜に定住 (バイオフィウム形成) してほしくはない。こうした理由から、代謝を遮らずにバイオフィウム形成を抑制する都合の良い制御方法として、微生物の細胞間コミュニケーションを利用した制御方法が研究されており²⁾、将来的な実用化が望まれている。

制御に向けた研究開発の一方で、バイオフィウリン

グの発生機構に関する基礎的な研究も進められている。その成果によって、微生物がバイオフィウム形成に伴って分泌する細胞外高分子物質 (extracellular polymeric substance: EPS) や細菌由来溶解性有機物 (soluble microbial product: SMP) などの細胞外マトリクスの蓄積がバイオフィウリングを引き起こすというモデルが考えられた^{1,3)}。実際にバイオフィウリングを起こした水処理膜からは高分子化合物が検出されることが知られている。細胞外マトリクスは細胞間コミュニケーションによって制御されていることも多く、このモデルは広く受け入れられている。しかしながらバイオフィウリング研究は研究室内の限定的な条件で行われたものが多く、実現場でモデル通りのバイオフィウム形成が起こるのかについては不明な点が多い。

この研究室と現場とのギャップを埋めるため、近年では、実現場、もしくはそれを忠実に模した条件でのバイオフィウリング研究も進められており、バイオフィウリング機構がモデルに従った一様なものではないことが明らかになりつつある。これまでに、MBRに流入する廃水の有機物負荷が高い条件下において、バイオフィウム内で発生する捕食-被食相互作用によって捕食された微生物の死骸が累々と積み重ねられることでバイオフィウリングが発生する新たなモデルが示された⁴⁾。また、微生物を属種まで特定する高解像度な微生物解析を網羅的に行うことで、活性汚泥中からはほぼ検出されないが、バイオフィウム中に多数存在する微生物が閉塞を引き起こす細胞外脂質の蓄積に寄与していることが明らかにされた⁴⁾。これまでのバイオフィウリング研究は優占的な微生物にフォーカスしがちで、バイオフィウム内での微生物間相互作用やマイノリティの存在がそれほど重要視されてこなかった。しかしながら近年の研究はその重要性を改めて示しており、活性汚泥とは異なる特殊な生態系が水処理膜上に形成されている可能性が示され始めている。今後の研究の進展により、誰が膜を詰まらせているのかという謎が解き明かされることが期待される。

- 1) Flemming, H. C.: *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **59**, 6 (2002).
- 2) Bzdrenga, J. et al.: *Chem. Biol. Interact.*, DOI: 10.1016/j.cbi.2016.05.028
- 3) Fonseca, A. C. et al.: *Environ. Sci. Technol.*, **41**, 5 (2007).
- 4) Inaba, T. et al.: *npj Biofilm Microbiom.*, **3**, 5 (2017).