

1,4- ジオキサン汚染の生物浄化

黒田 真史

環状エーテル化合物である1,4-ジオキサンは、発がん性が疑われる水環境の汚染物質であり、2009年に水質環境基準および地下水環境基準に追加され、2015年現在では土壤環境基準への追加も検討されていることから、いま日本でもっとも注目すべき汚染物質の一つであるといえる。

日常的に聞くことは少ない1,4-ジオキサンであるが、溶剤や安定剤として用いられる他、エチレンオキド重合反応において副生成物として発生するため、1,4-ジオキサンが規制されることは石油化学工業にとって非常に大きな問題である。生分解性がほとんどなく、水に近い物性を持つ1,4-ジオキサンは、通常の排水処理法で除去することが困難であり、また、オゾンなどの酸化剤を用いる促進酸化法は効果が認められるが、化学工業排水や環境水のような多量の廃水を浄化するためにはコストが掛かり過ぎる。つまり、現実的な対策が存在しない中、規制が先行しているのが現状であると言える。

近年になって、いくつかの1,4-ジオキサン分解細菌の単離が報告されており¹⁾、これらを活用した廃水処理技術の開発が進められている。Isakaらは、1,4-ジオキサン分解細菌である *Afipia* sp. D1 をポリエチレングリコールゲルに包括固定化し高濃度に維持することを特徴とするバイオリクターを構築した²⁾。これに、約400 mg/Lの1,4-ジオキサンを含むモデル廃水を連続的に流入させ好気条件下で運転したところ、水理学的滞留時間が24時間および16時間の条件において、安定して1,4-ジオキサンを5 mg/L以下まで除去することに成功した。これは日本の排水基準(0.5 mg/L)には満たないため、後段に促進酸化法などによる仕上げ処理を設ける必要があるものの、99%の1,4-ジオキサンを生物学的に除去することにより、促進酸化法単独で廃水処理を行う場合と比較して、コストを大幅に抑えることができると考察されている。本法は特に、高濃度の1,4-ジオキサンが含まれる工業排水の新たな処理法として期待される。

一方、廃棄物の不法投棄現場や工場跡地などで発生している地下水の1,4-ジオキサン汚染の浄化技術については、いまだ開発途上である。汚染された地下水の水量がある程度限定されていれば、汚染地下水を汲み上げバイオリクターで処理することも可能かもしれないが、汚染が高範囲にわたる場合は、より低コストとなり得る原位置浄化法を選択することが望ましい。

汚染環境中に存在する1,4-ジオキサン分解細菌を活性化すること、あるいは特定の1,4-ジオキサン分解細菌を添加することによって行われる生物学的な原位置浄化法では、環境中での1,4-ジオキサン分解細菌の働きを正確にモニタリングできる技術を確立することが求められる。Liらは、GeoChip 4.0(生物地球化学的循環や化学物質分解などに関わる機能性遺伝子群を網羅的に検出できるマイクロアレイスライド)を用いて、1,4-ジオキサン分解代謝経路において初発酸化に関わることが推測される soluble di-iron monooxygenase (SDIMO) 遺伝子群を、有機塩素化合物および1,4-ジオキサンによって汚染された地下水試料から検出することを試みた³⁾。その結果、SDIMOの一種である tetrahydrofuran monooxygenase をコードする *thmA* 遺伝子は、汚染源付近から採取された試料からもっとも強く検出された。続いて、地下水試料に1,4-ジオキサンを添加して分解特性を評価したところ、汚染源付近の試料においてもっとも良好な1,4-ジオキサンの無機化が観察された。また、別の環境試料中では、同遺伝子の転写が1,4-ジオキサン分解過程で促進されることも報告されている⁴⁾。これらより、1,4-ジオキサン汚染地下水中には1,4-ジオキサン分解細菌が存在し、また、*thmA* 遺伝子を定量することでそのポテンシャルを評価できることが示されたものといえる。

一方、肝心の汚染浄化については、さまざまな汚染現場で1,4-ジオキサンの自然減衰が生じていることを統計学的に示した報告はあるものの⁵⁾、積極的に1,4-ジオキサン分解菌を活用した事例は現在のところ報告されていない。生物を理解し、彼らが働きやすい環境を提供することは、まさに生物工学の得意とすることであり、1,4-ジオキサン汚染の解決に向けて、我々、生物工学研究者の貢献がこれからますます求められているといえるだろう。

- 1) 清 和成: 生物工学, **90**, 348 (2012).
- 2) Isaka, T. *et al.*: *J. Biosci. Bioeng.*, **121**, 203 (2016).
- 3) Li, M. *et al.*: *Environ. Sci. Technol.*, **47**, 9950 (2013).
- 4) Gedalanga, P. B. *et al.*: *Appl. Environ. Microbiol.*, **80**, 3209 (2014).
- 5) Adamson, D. T. *et al.*: *Environ. Sci. Technol.*, **49**, 6510 (2015).