

Methanogens' Death Induced by Sulphide and its Kinetic Modelling

安井 英斉（北九州市立大学国際環境工学部）

水環境の保全に日本と世界の学術研究を主導する日本水環境学会から論文賞を授与されたことに望外の喜びを覚えます。選考委員会の先生方と学会の皆様、ならびに論文賞の基盤となった一連の研究に誠意と熱意を込めて取り組んできた共同研究者に深謝いたします。

私の研究室では、排水と廃棄物の生物学的処理をととして資源を回収可能な様々なプロセスを開発しています。処理対象ごとに適切な生物学的処理技術を選定することになるのですが、原水が高濃度の有機物基質を含むときは、メタン資源を容易に回収可能なメタン発酵プロセスがとくに向いています。メタン発酵プロセスのバイオリアクタにおいて反応に関わる主な微生物は、酸生成細菌とメタン生成古細菌です。前者は有機物を酢酸と水素まで分解し、後者はこれらをメタンに転換します。一方、原水に硫酸根が含まれていると、硫酸塩還元細菌が増殖し、その代謝物である硫化水素がバイオリアクタに蓄積します。硫化水素は、数百 mg-S L^{-1} の濃度であっても硫酸塩還元細菌自身も含め、バイオリアクタに生育する他の微生物にも阻害的影響を与えることが知られています。これは装置の設計や運転についてたいへん重要な事象なので、歴史的にも生物学的処理プロセス開発の黎明期から阻害度合いを定式化する研究が広く行われてきました。ところが、文献を紐解いてみると、基礎研究のほとんどは阻害剤を加えた系で回分的に微生物の増殖抑制（＝基質分解速度の低下）を調べたものばかりでした。阻害剤の種類や濃度によっては微生物の死滅促進（バイオマスの低下）を引き起こすことが容易に思い浮かぶのですが、このことを定量的に調べた研究はたいへん限られていました。この理由の一つは、基質分解速度の低下を調べる実験は数時間の作業で済むことに対し、メタン発酵の微生物は元々の死滅速度が遅いため、死滅促進の現象を計測するためにはかなりの日数を要することにあります。根気強い熱心な研究員と学生に恵まれたおかげで、このような多大の労力を要する研究を進めることができました。死滅促進の実験では、所定の硫化水素を添加した系で生細胞の数を一週間に亘って検鏡しました¹⁾。顕微鏡の視野はプレパラートの一部に過ぎないため、多数の検鏡でデータを取得し、統計解析によって死滅促進の動力学パラメータを算出する必要がありました。なお、統計の数理では、微生物の増殖と死滅は指数分布（一定の確率でその集団の中でランダムに発生）であらわすことができます。基質濃度が高いと微生物の増殖確率が上昇し、増殖抑制の阻害物が高濃度に存在するときは増殖確率が低下します。そして、死滅促進を導く阻害物（毒物）の場合は、死滅確率（負の増殖確率）が高まります。微生物

物あたりの増殖速度（比増殖速度）は、モノー式における基質や阻害物の濃度に半飽和定数を加えたスイッチング関数の積で経験的にあらわされます。これは、基質が十分に高濃度であれば微生物の増殖確率は最大になり、阻害物の濃度が高ければ増殖確率はゼロに近づくことを意味します。一方、微生物あたりの死滅速度（比死滅速度）は、指数分布の原理では、元々の死滅確率と各阻害剤（各毒物）によるそれぞれの死滅確率の和によってあらわされることになります。このような死滅確率の上昇は、高濃度の水素イオン（低 pH）でも発生することが見つかりました²⁾。いずれの物質も高濃度になるほどメタン生成古細菌の死滅を促進します。この状態を放置したバイオリアクタでは活性な微生物濃度が次第に低くなるため、再立ち上げに時間を要します。死滅促進現象を考慮していない従来の数理モデルでは、システムの性能低下は阻害物がなくなった時点で不調が直ちに解消される計算になります。実際のバイオリアクタでは直ちに性能が回復することはないので、死滅促進の上昇確率を加えた本研究の数理モデルは、不調になったシステムからの修復日数（あるいは事象発生後に何らかの対処を起こすまでの許容日数）を検討することに役立つはずです³⁾。原料の組成が定まっている工場と異なり、排水や廃棄物は決まった組成がありません。そのため、生物学的処理プロセスの開発では、連続運転や回分実験の結果から「試行錯誤的に」設計や運転の基準を設定するケースがかなりあります。実際にはこれで充分に対処できているのですが、阻害物や毒物は成分と濃度を同定できることから、これらによる増殖阻害や死滅促進をあらわす数理モデルを基準設定の検討に加えると設計と運転の信頼性がいっそう高まります。今後とも実験と数理モデルを組み合わせた研究をととして水環境の保全に資する学問の構築に精進いたします。

参考文献

- 1) Phung, T.O., Sun, M., Terashima, M., Goel, R., Yasui, H., 2024. Methanogens' death induced by sulphide and its kinetic modelling. *Journal of Water and Environment Technology* 22 (5), 220-231.
- 2) Sun, M., Yanagawa, K., Prasitwuttisak, W., Goel, R., Watanabe, R., Harada, H., Liu, B., Terashima, M., Yasui, H., 2023. Kinetics for the methanogen's death in the acidic environments. *Journal of Water and Environment Technology* 21(1), 59-75.
- 3) Sun, M., Zhang, X., Liu, B., Goel, R., Terashima, M., Yasui, H., 2023. Upgrading ADM1 by addition of lag phase sub-model to simulate acidic inhibition of methanogenic reactor. *Journal of Water and Environment Technology* 21(2), 129-140.