

光合成細菌成分による放射性核種の除去と海水の浄化

佐々木 健*・森川 博代・竹野 健次

光合成細菌による環境浄化と再資源化の研究と実用化は、約30年前に小林や北村により始められた我が国固有のバイオ技術であり、特に食品排水処理やし尿、家畜糞尿処理などに適用され、さらに副生する菌体を農業肥料や動物資料にリサイクル利用する、現在の循環型社会の仕組みの先がけをなす新技術であった。残念ながら我が国では当時はコストの高い技術としてあまり普及しなかったが、一部の食品企業や、台湾、韓国では今なお、排水処理と資源再利用という、環境保全に対し有用な技術として実際に使われている。また、我が国でも光合成細菌の農業用肥料や環境浄化資材への販売は着実に行われており、最近の循環型社会構築や地球環境保全、二酸化炭素固定の機運の高まりで、光合成細菌の利用は再び注目されつつある。お隣中国でも光合成細菌の多方面への利用が進みつつある。

筆者らも30年前より小林や北村に続き、光合成細菌による排水処理や菌体の利用、さらには光合成細菌のさまざまな機能性を利用した医療や環境浄化への応用技術の開発と実用化を行ってきている^{2,3)}。2009年、本会第61回大会（名古屋）の「地球環境と地域環境保全のための光合成微生物」のシンポジウムでは、「光合成細菌による環境浄化と再資源化」と題して、筆者らが過去30年行ってきた光合成細菌に関する研究、実用化された技術などを紹介した。

光合成細菌による環境浄化と再資源化

この演題で発表した内容は次のとおりである。(1) 光合成細菌による有機性排水処理、(2) 固定化光合成細菌による効率的排水処理、(3) 耐熱性光合成細菌による、油含有廃水の効率的処理、(4) 光合成細菌の養魚、錦鯉養殖と色揚げへの利用、(5) 光合成細菌による環境中の重金属処理、(6) 養殖場海底に畜積されたヘドロの浄化と生分解プラスチック生産等再資源化、(7) 光合成細菌による5-アミノレブリン酸 (ALA) の生産と農業及び医療への利用、(8) 光合成細菌による放射性核種の除去と環境浄化、(9) ALAを用いたアオサの増殖促進と海水の浄化などを発表した。

この中で、上記(1)から(7)については、2009年に「バイオマスを資源化する」という本誌特集記事にて「光合成細菌による環境浄化および再資源化」と題して主な部分は発表している⁴⁾ので、本稿では最新の技術開発である(8)の光合成細菌による放射性核種のウラン

(U)、ストロンチウム (Sr) やコバルト (Co) および関連金属の除去回収技術、(9)のALAを用いたアオサ(青のり)の増殖促進と、窒素やリンの吸収による瀬戸内海海水の浄化などについて詳しく紹介する。

光合成細菌による放射性核種と重金属野除去回収

光合成細菌が菌体表面に生産する高分子物質 (extracellular polymeric substances, EPS) によりカドミウム (Cd) やクロム (Cr) およびヒ素 (As) などを吸着でき、環境水中から取り除くことができることはすでに報告している⁴⁾。一方、広島は世界で初めての被爆地であり、平和や放射性物質への関心が高く、イランやイラク、また湾岸戦争での劣化ウラン弾 (depleted uranium, DU) の放射能による飲料水や土壌の環境汚染に対しても関心は高い。また、被爆語り部の方からも放射能を含む「黒い雨」による体内被ばくの実状も平和学習などでよく耳にしてきた。環境関連の技術者として、何とかこの汚染浄化はできないものかと長く思っていた。

Bioremediationによる環境修復技術は多く報告されている。しかしながら、放射能除去の研究は見当たらない。バイオによるウランなどの回収は、主として資源確保として、また核燃料再生の技術が主であり、環境浄化を目標とするものは見当たらないのが現状である⁵⁾。そこで光合成細菌の重金属除去機能を利用して、放射性核種の除去の可能性を検討した⁶⁾。

図1に新規に開発した回収型多孔質セラミックと、このセラミックに光合成細菌を固定化して、放射性核種重金属を吸着した後、電磁石で水系や土壌、ヘドロなどから回収する状況を示す。低濃度の放射性核種や重金属汚染に対応できる。光合成細菌の固定化には、減圧下でアルギン酸ナトリウムで固定化する減圧固定化法を用いた⁶⁾。

この多孔質セラミックに、排水処理や水質浄化に実用化されている *Rhodobacter sphaeroides* S (S株)、*R. sphaeroides* IFO12203 (IFO株)、*Rhodospseudomonas palustris* (P株)、S株の自然変異株である *R. sphaeroides* SSI (SSI株) などを固定化して、1.5 l円筒型容器内の1 lの人工下水に固定化セラミック4個を入れ、30°Cで通気 (1 vvm) を行いつつ、放射性核種のUとSrおよび関連のCoの吸着実験を行った。図2に示すように、SSI株がいずれの金属もよく吸着できることが明らかとなった。SSI株はS株が自己変異し自己凝集性を持つようになった株で、表面に多糖類やタンパク質、RNAを主体とするEPSを

*著者紹介 広島国際学院大学大学院工学研究科物質工学専攻 (教授) E-mail: sasaki@hkg.ac.jp

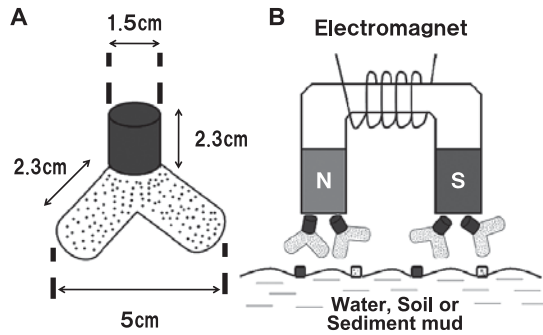


図1. 回収型多孔質セラミック(A)と光合成細菌固定化セラミックの、電磁石による環境中からの回収(B)。回収型多孔質セラミックの一枝には5%の鉄を含む。

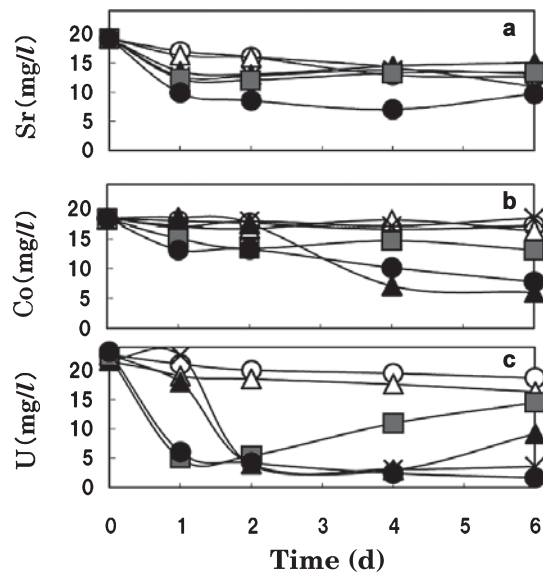


図2. 種々の光合成細菌の固定化セラミック(4個/l)によるSr, Co, Uの吸着除去。○, 対照:通気のみ; △, セラミック:通気のみ; ×, P株; ■, S株; ▲, IFO株; ●, SSI株。

生産し、そのマイナスチャージにより金属を吸着していると推定される^{4,6)}。

次にSSI株を固定化した固定化セラミックを用いた、Uの吸着と人工下水のCODおよびリン酸イオンの除去を示す。図3に示すように、セラミック4個および8個/l人工下水を加えた時、SSI株を固定化した固定化セラミックを1-8個で、20 mg/lものUが効率よく吸着できるとともに、CODやリン酸イオンの同時除去も可能で、放射性核種の除去ばかりでなく水質浄化も可能であることが明らかとなった。また図には示していないが、SrやCoの場合もほぼ同じような除去が可能となった。ただ、Coはやや光合成細菌に毒性が見られるようで、Coの吸着やCOD、リン酸イオンの除去はUやSrの場合と比較してやや緩やかであった⁶⁾。

次にSSI株による他の重金属の除去について検討した。

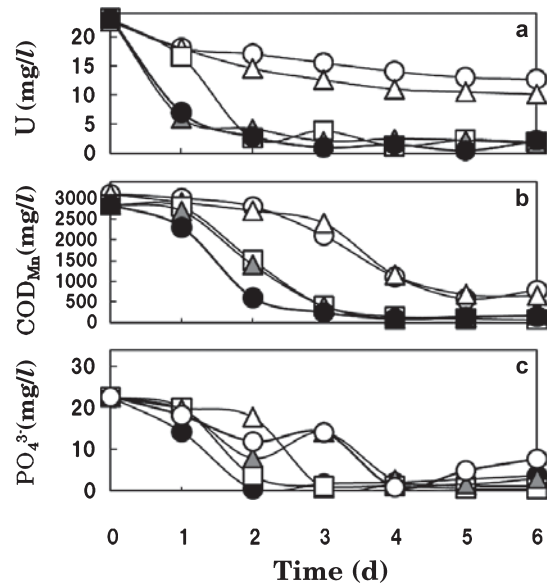


図3. SSI株固定化セラミックによるU, COD, リン酸イオンの除去。○, 対照:通気のみ; △, セラミック:通気のみ; □, 固定化セラミック1個/l; ▲, 4個/l; ●, 8個/l。

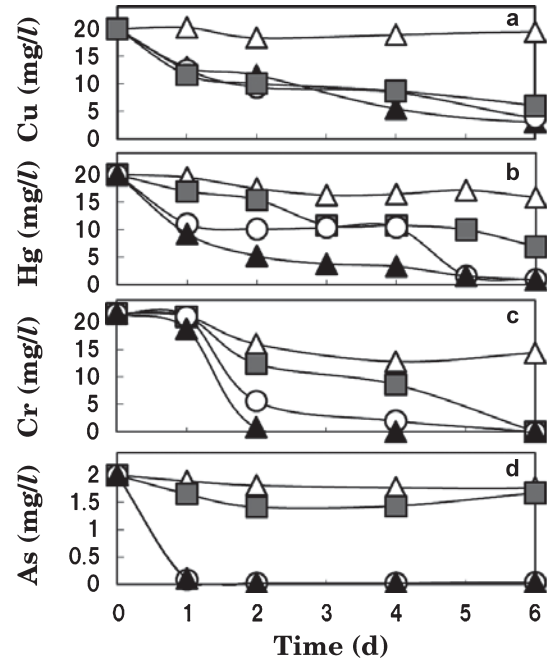


図4. SSI株固定化セラミックによる重金属, Cu, Hg, Cr, Asの除去。人工下水, 通気は図2, 3と同じ。△, セラミック1個/l, 通気のみ; ■, 固定化セラミック1個/l; ○, 2個/l; ▲, 4個/l。

図4に示すように、SSI株はCuを始め、有害重金属であるHg, CrおよびAsも、固定化セラミック4個/lで効率よく吸着することができた。

このように、凝集性を有し菌体表面に高分子物質、

EPSを生産しうるSSI株で、放射性核種ばかりでなく、その他の重金属も吸着できることが明らかとなった。

UやSrのSSI菌体あたりの吸着量は7.8–11.1 mg U/g cellsと推定され、カビ、バクテリア、放線菌などに比べると1/3以下とそれほど高くないが⁵⁾、CODやリン酸イオン除去なども同時に可能なシステムなので、実用性は高いと思われる。環境中のこれら放射性核種やCoの除去回収は報告がなく、現在実用化を進めている。

金属が吸着された固定化セラミックは電磁石により回収でき、薄い塩酸溶液中で超音波処理を行えば、容易に溶液中に溶出でき、ふたたびSSI株を固定化して再利用可能である。放射性核種や重金属は濃縮された溶液状態で回収できるので、再利用などしかるべき処置が可能となる。特筆すべきは、低い濃度で汚染された環境中（水系、土壌、ヘドロ）の放射性核種や重金属を濃縮して回収できることである。放射能や重金属の汚染により不毛の地となった土地は世界中に多く存在するので、このような技術は有用と思われる。

5-アミノレブリン酸 (ALA) を用いた 海藻の増殖促進と海水の水質浄化

筆者らが1987年に光合成細菌*R. sphaeroides*による低いコスト大量生産技術を開発⁷⁾した菌体成分、ALAは、植物の光合成を促進し、二酸化炭素吸収を促進して穀物や野菜の収量増加をもたらすことが知られている²⁻⁴⁾。

一方、広島湾では、近年沿岸部に大量のアオサ（青ノリ）が異常繁殖し、腐敗して環境を損なっている。瀬戸内海に従来あるアオサは食用になるが、異常繁殖のアオサは外国由来とみられ食用に適さず、用途もなく処理に苦慮している。世界遺産の宮島周辺でもアオサの異常繁殖で、観光地ゆえに除去と処理に苦慮している地域の現状がある。

そこで、ALAの光合成促進作用を応用して、食用のアオサを優先的に増殖させ、窒素やリンを除去して瀬戸内海沿岸部の水質浄化を図り、外国由来のアオサやその他の藻類の異常増殖を抑制できないかと着想して、ALAの食用アオサ（アナアオサ）の増殖促進を検討した。

瀬戸内海の沿岸部の海水にALAを100–200 mg/l程度添加し、5 klux程度の光照射を行った場合の海洋性藻類の増殖促進効果を検討した。ALAを添加すると10日で常に藻類の増殖は促進され、ALAが海洋性藻類の増殖促進（光合成促進作用）を有することが新規に明らかとなった。この増殖促進効果は別に分離した多くの海洋性藻類（未同定）でも認められた。

次に食用アオサへの増殖促進効果を、25 lの水槽に人工海水を20 l入れ、ALAを100–200 mg/l加え検討した。光照射は蛍光灯で表面照度約10,000 luxで24時間照射した。図5にその実験の様子を示す。海から採取した食

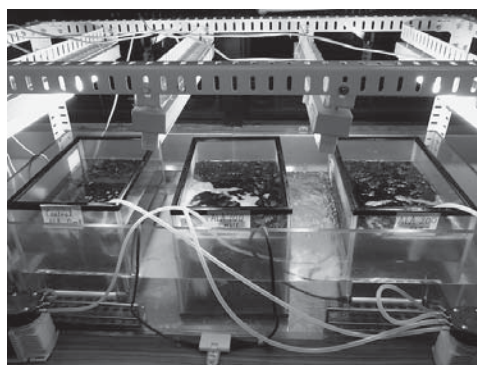


図5. ALA添加による食用アオサの増殖促進実験

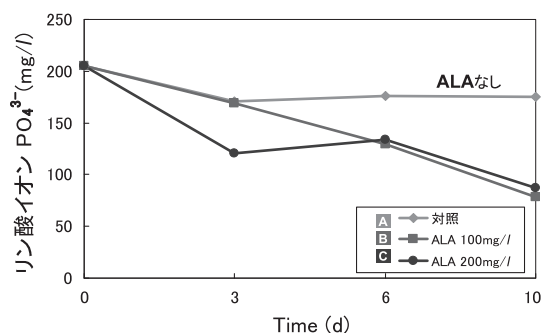


図6. ALAによる食用アオサ増殖促進時の海水中のリン除去

用アオサ20 g（湿重量）を均等に種として接種した。

その結果、約10日で明らかに増殖が促進され、200 mg/lのALAの添加では特に増殖促進が認められた。この時、人工海水中のリン酸イオンはALAの添加でより多く減少していた。これは藻類の増殖促進により、リン酸イオンが吸収されていることを示している（図6）。窒素分についてはデータを示していないが、硝酸態窒素もリンと同じように減少しており、藻類の増殖促進と水質浄化が連動している可能性が示唆された。

海に仕切りを設けるなど、何らかの方法でALAを徐々に供給するシステムを構築して、食用アオサの生産と水質浄化が同時に達成できるよう研究中である。

文 献

- 1) 北村 博ら：光合成細菌（北村 博ら編），p.113，学会出版センター（1982）。
- 2) 佐々木 健ら：生物工学，**80**，234（2002）。
- 3) Sasaki, K. et al.: *Appl. Microb. Biotechnol.*, **58**, 23（2002）。
- 4) 佐々木 健ら：生物工学，**87**，478（2009）。
- 5) 大村直也ら：電力中央研究所報告，p.1（1996）。
- 6) Sasaki, K. et al.: *Japanese J. Water Treat. Biol.*, **46**，119（2010）。
- 7) 田中 亨ら：生物工学，**88**，455（2010）。