

水生植物と根圏細菌の共生作用を活用した持続可能な環境浄化

森川正章

微生物活性を利用した環境浄化法は地球への負荷が少ない技術として広く認知されている。しかし、実際の実用に際して有用微生物の現場での定着率の低さによるコスト高や浄化後に危惧される二次汚染の問題が常に指摘されてきた。いま、植物と共生関係にある根圏微生物の作用が注目されている。植物の光合成作用と微生物の汚染物質分解活性を連携させることによって、これらの問題を一举に解決できる可能性がある。

1. 生物環境浄化技術：バイオレメディエーションの課題

生物は環境との相互作用の中で動的平衡を保ちながら生きてゆく宿命にある。また生物間には直接あるいは間接的な共生関係が成立しているため、健全な地球環境と潤滑な元素循環はあらゆる生態系の維持に欠かすことのできない根底条件である。60年代以降の急激な温室効果ガスの蓄積も元素循環が滞っていることの現れの一つといえる。環境浄化技術には物理的方法、化学的方法、そして生物学的方法があり、微生物を活用した環境浄化技術（狭義のバイオレメディエーション技術）は環境負荷の少ない技術であるが、汚染現場で有効な微生物の細胞数とその活性をいかに持続させるかが実用の鍵である。つまり、実験室で検証された微生物による環境浄化効果を野外の現場で発揮するためには、自然環境中で不足しがちな窒素化合物やリン酸塩、さらに有機汚染物質を好気性微生物が分解する場合には電子受容体として酸素を大量に供給することが必要となる。ところがこれらの投入は、コストや二酸化炭素発生量を高める要因となるばかりでなく、過剰な栄養塩類によるお呼びでない微生物の異常増殖および生態系の攪乱といった新たな二次汚染を引き起こすことが危惧される。また、原生動物などによる捕食を含めた土着微生物との生存競争による汚染物質分解微生物の定着性の低さも無視することのできない問題である。つまり栄養分や酸素を投入することなく、微生物を汚染現場に定着させてその活性を持続的に発揮させることができれば、より低コストで地球に優しく安全な環境浄化技術として広く普及することが期待される。

一方において、微生物を利用したバイオレメディエーション技術以外に植物を用いた技術は特にファイトレメディエーション技術と呼ばれる。この技術はファイトケラチンやメタロチオネインといった植物固有のタンパク質、および発達した管系作用による重金属などの有害物質の植物体への吸着固定あるいは蒸散による除去において有効な方法であることが実証されている。特にアブラナ科やキク科あるいはポプラ科植物などはハイパーアキュムレーターと呼ばれ、鉛やカドミウムなどの重金属汚染地への適用が検討されている。しかし植物体（特に陸生植物）を媒介した環境浄化法は、適用範囲が植物体周辺に限られることとその効果が認められるまでに長期間を要するため、微生物を利用した浄化法に比べて効率的とは言えない。その一方で、植物を利

用する最大のメリットは太陽エネルギーを利用する経済性および環境適合性という点であり、食糧やバイオマスエネルギー資源の増産技術という側面まで含めると、そのポテンシャルは低炭素化技術という視点から非常に魅力的である。

2. 根圏浄化技術の可能性

これらに対して近年、微生物と植物双方のメリットを生かした技術、すなわち植物の根周囲に生息する微生物（根圏微生物）と植物の共生的関係を利用した浄化法が注目されている。この方法は根圏浄化（リゾレメディエーション）技術とよばれている。実は先に述べたファイトレメディエーションのうちトリクロロエチレンや原油など有害有機物の分解や窒素化合物除去による環境浄化法の多くが根圏微生物の分解活性を利用したものである。

根圏とは1904年ドイツ人科学者 Lorenz Hiltner により「植物の根から影響を受ける土壌領域」と定義された。根圏は、根浸出液が微生物を活性化し、またこれら微生物も植物の栄養分摂取および健全性へ多大な影響を及ぼすなど興味深い相互作用が存在する領域である。具体的にいうと根圏とは、根の周囲 0.1 mm 程度の土壌領域であり、この領域では、植物体から微生物にアミノ酸、糖、有機酸といった二次代謝産物が供給され、これらは根圏微生物にとって豊富な栄養源となる。また、植物は根圏への酸素輸送能に優れていることから、根圏には酸素も豊富に存在し、微生物の付着と生育および好氣的代謝反応が促進されやすい。さらに、一部の水生植物の場合では根でも光合成が起こっているため、根圏の酸素濃度は極めて高い。一方、微生物から植物への作用として代表的なものとして第一に、根圏微生物によるオーキシシンやジベレリンなど植物成長ホルモンの分泌や植物の利用できないかたちで土壌粒子に結合しているリン、窒素などを可溶化または固定することで植物へ栄養物質を供給する直接作用である。また第二に、間接的作用として、根圏微生物が分泌する抗生物質等の作用により、植物を病害微生物から防御することが知られている。このような、植物の成長促進や病害の防除に関係する根圏微生物を PGPR (Plant Growth Promoting Rhizobacteria) と呼んでいる。

つまり、このような植物と根圏微生物の相互活性化作用を積極的にバイオレメディエーションへ適用し、より効率のよい浄化を目指す技術が根圏浄化技術である。クウェートの原油汚染砂漠で生育している土着植物の根圏を調べたところ1グラム当たり数億個もの原油分解細菌細胞が付着していた。また陸生植物と特定の根圏細菌の組み合わせを用いてクロロニトロベンゼンやナフタレンといった有害有機化合物を効率的に除去することに成功した報告例がある。芳香族化合物汚染浄化に関して、植物根圏ではポリフェノール類やフラボノイド類など多種の芳香族化合物が根から分泌されていることから、根圏にはこれらの分解細菌が集積しておりそれらの働きにより類似構造を持つ芳香族化合物の浄化が効率よく行えると考えられている。さらに、植物根に強く付着し依存して生育する微生物であれば外部から栄養塩や酸素を投入しなくても

植物表面で生育が可能であり、汚染浄化後に植物体を根こそぎ除去すれば同時に微生物も除去されるので残留微生物による二次汚染のリスクも低減できる。このように根圏における植物と微生物の相利的な相互作用を最大限に活用することで、微生物や植物単独では解決できない課題を克服し、より持続的で二次汚染リスクの低い安全な環境浄化法が開発できるであろう。

本講座では、浮遊性水生植物の代表種であるアオウキクサとその根圏細菌を使った新しい水浄化技術の開発研究例を紹介しながら、身近な自然の奥深い共生の世界を解説する。詳しくは以下のホームページを参照のこと。

<http://noah.ees.hokudai.ac.jp/emb/morikawalab/index.html>

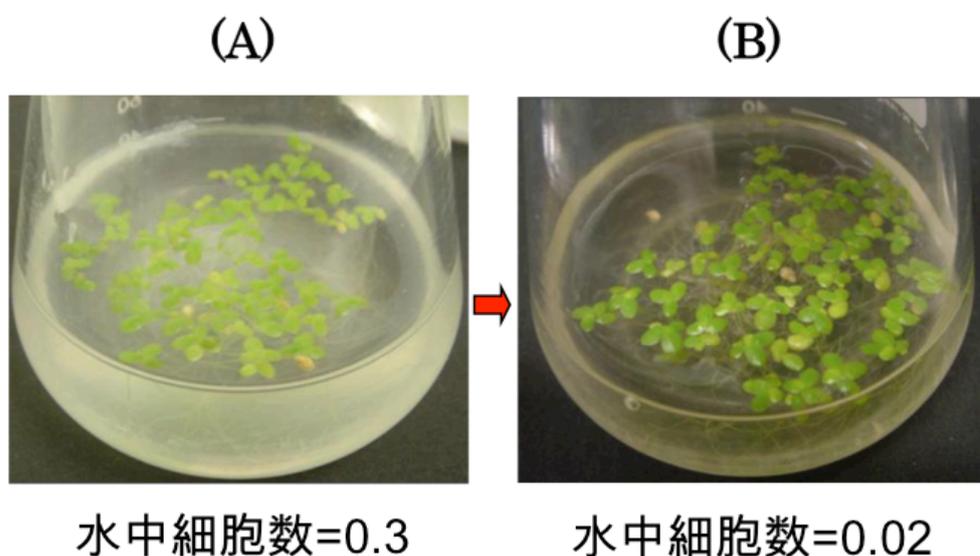


図1. 根圏細菌 *Acinetobacter calcoaceticus* P23 はアオウキクサによく付着する
(A) P23 とアオウキクサ共存直後 ($OD_{600} = 0.3$)
(B) P23 とアオウキクサ共存 72 時間後 ($OD_{600} = 0.02$)

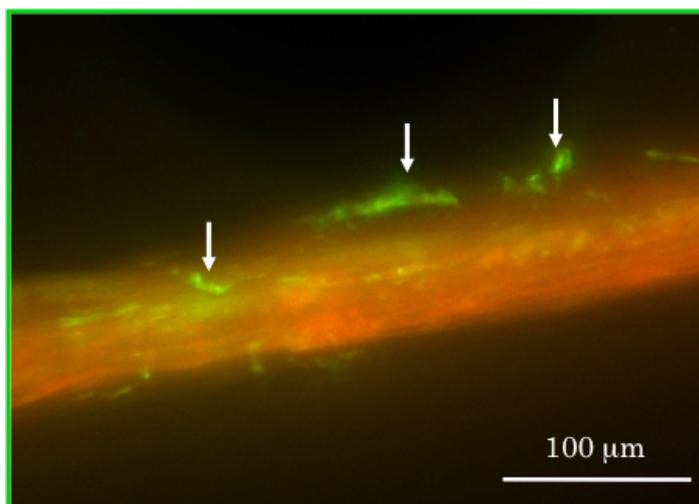


図2. 蛍光顕微鏡を用いたアオウキクサ根への細菌付着の観察
P23 (緑色) が付着している部分を矢印で示した。

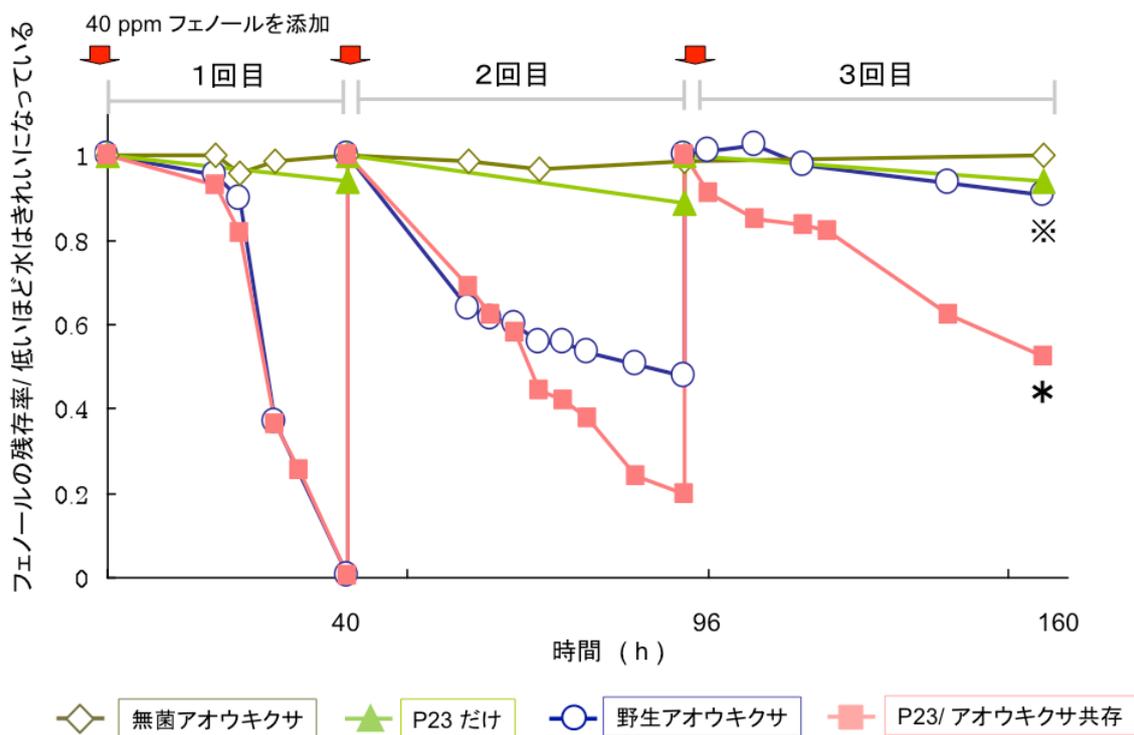


図3. アオウキクサと P23 の共存による持続的な汚染物質フェノールの分解
 滅菌アオウキクサおよび P23/アオウキクサ共存をそれぞれのフラスコに 10 株ずつ入れた。
 40 mg/ l フェノールを 0, 40, 96 時間後に 3 回添加した (矢印部分)。添加直後のフェノール残
 存量を 1 として相対値で分解活性を示した。(* と ※ は図 4 を参照のこと)

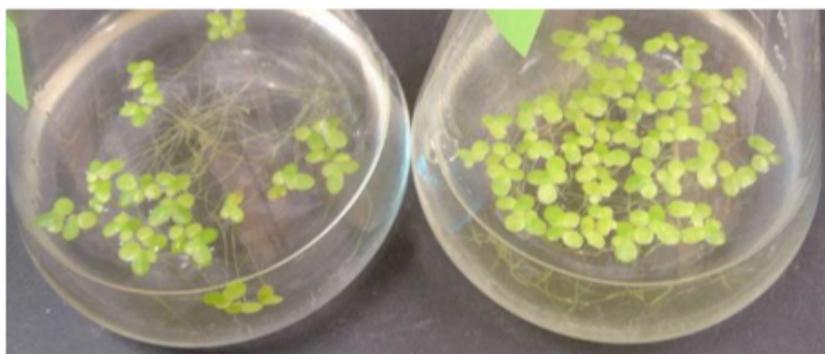


図4. P23 が付着するとアオウキクサは約 2 倍成長促進した！
 いずれも 10 株で実験を開始した。160 時間後のフラスコの様子。
 左の無菌アオウキクサ (※印) は 18 株、右の P23/アオウキクサ共存 (*印) は 31 株に増えた。
 無菌アオウキクサは根が長く伸びていることから、栄養失調と思われる。

3. まとめ

アオウキクサ根圏細菌を制御すれば水浄化と植物成長が同時に加速できる。
 その鍵は、光エネルギー/ 光合成/ 分解微生物をデザインした持続可能環境浄化技術。
 以上