

特集／第27回環境保全・公害防止研究発表会

[パネルディスカッション]

テーマ：生物機能を利用した環境修復

コーディネーター：岡田 光正

パネラー：藤江 幸一／片山 新太／岩堀 恵祐／高田 秀重

コメンテーター：矢木 修身

パネルディスカッションは岡田光正・広島大学教授にコーディネーターをお願いし、各パネラーの意見発表の後、矢木教授にもコメンテーターとして討論に加わっていただきました。

冒頭で岡田教授は、バイオレメディエーションにおいて場の環境条件が非常に重要であることを強調され、環境条件の制御ということで干潟を中心に話題提供をいただきました。

藤江教授は、生物機能を利用した悪臭物質の除去技術ということで、生物脱臭装置について微生物が活動できる環境条件を整えるためには、水分とpHコントロールが重要であることを強調され、下水処理場の規制基準を十分に満たせる性能の生物脱臭装置が可能であると、話題提供をいただきました。

岩堀助教授からは、微生物による有害廃棄物中の多環芳香族炭化水素（PAHs）の取込みについての基礎的な研究成果の紹介を通して、バイオレメディエーション技術研究のヒントをいただきました。

高田助教授からは、ナホトカ号石油流出事故により漂着した重油からのPAHsの残留性や分解性についての話題提供をいただきました。

片山教授からは、土壌・地下水浄化を中心にバイオレメディエーション技術についてまとめた話をいただき、生物浄化の長所・欠点に配慮する必要性、環境条件の制御方法と制御した環境での微生物の挙動の相関関係を見つけることの必要性が強調されました。

以下に各パネラーの発言の要旨を発表順に記載し、最後に総合討論の内容を記します。

* * *

岡田 先ほど基調講演で矢木先生から、バイオレメディエーションの中にはバイオスティミュレーションのような自然の生物を使う場合と、バイオオーグメンテーションのような特定の生物や機能の高い生物を使う場合があるとの話をうかがった。私は前者のバイオスティミュレーションを考えていく場合、環境をどのように制御していくか、環境の制御がいかに重要であるかという視点から、とくに干潟を中心に話をする。

自然干潟と人工干潟を比べた場合、自然干潟はシルト含有量が多く、干潟の浄化等さまざまな機能を司る微生物が多く生息している。この原因を調べていくと、自然干潟では還元層の発達が見られる。これは土壌の透水性が低く、酸素の供給が十分起こらないためと考えている。土壌の透水性に影響を及ぼすサイズの小さいシルト、クレイ粒子の割合は、還元層の発達していない人工干潟では、1%以下とほとんど存在していない。人工干潟において土壌中のシルト・クレイ含量を高く設定、維持することによって、自然干潟の土壌環境の特徴である低い透水性と還元層の発達を促し、その結果として高い細菌現存量を維持し、自然干



岡田 光正
（広島大学工学部環境基礎学
講座教授）

濁に近い干潟生態系が形成できると考えられる。

しかし、これは造成時にシルト・クレイ含量の高い土壌を用いるということの意味しない。土壌表面に働くせん断応力が大であると、シルト等の粒子が巻き上げられ流出するためである。せん断応力を小さくするためには、干潟の勾配という物理的な因子が大きいと考えている。自然干潟に近い干潟をどのように造るのかと考える場合、勾配を緩やかにし、せん断応力を小さくする、外力に対して安定化するような場を造ってあげることが非常に重要であると考えている。

また矢木先生の話にもあった油汚染について、場の管理という考え方で話す。油汚染が起きると、潮汐、波の物理的な外力によって油が干潟土壤中に浸透し、生態系が破壊される。実験結果では、油汚染があるとベントスの個体群は約1カ月あるいはもう少し長い期間抑制される。この原因は、油が入ることにより海水の浸透、酸素の供給がストップしたためである。油汚染から58日目頃からベントスの回復があるが、その理由は潮汐により海水の浸透量が回復したためである。ここで早く回復させたい場合、油による海水の浸透が少なくなならないような方策、たとえば耕運機をかけるなどの方法により環境を変化させるのも、バイオレメディエーションの一つの方法ではないかと考えている。

藤江 悪臭と騒音は感覚公害であるので、個人差やその人が置かれている状況により感覚が変わってくるので対策が難しい。今日は、生物機能を利用した悪臭物質の除去技術ということで話をします。昔から、土壌の吸着効果と土壌微生物による分解効果で悪臭物質を除去しようとする技術があった。

悪臭は、ウェーバー・ヘフナーの法則 ($S=a \cdot \log X$) に従うとされている。ここでXは悪臭物質



藤江 幸一
(豊橋技術科学大学エコロジー工学系教授)

濃度である。排水の場合はBOD等で代表される汚濁物質を90%除去すればよしとなるが、脱臭の場合は99%、場合によっては99.9%の除去効率が求められる。

有機物が嫌気的狀態で分解されると、硫黄系の硫化水素やメルカプタン、窒素系のアンモニア類やアミン類、さらに低級脂肪酸などが発生する。これらは代表的な悪臭物質である。生物脱臭とは、このような物質を好気的な狀態で生物分解をして、硫黄分を含むものは硫酸まで、窒素を含むものは硝酸まで、炭素が主体のものはCO₂まで分解除去するものと考えてよい。

生物脱臭装置では微生物が活動できる環境条件を整えれば良く、操作上もっとも注意を要するのは水分とpHである。まずpHは、一般的に微生物は中性付近でもっとも活性が高いので、生物脱臭装置においてもpHを中性付近に維持する必要がある。ただし、硫化水素の除去に限ってはpHが2くらいまで低下しても反応速度は低下せず、脱臭効果も高い。したがって硫化水素を対象とした生物脱臭では、pHコントロールをあまり気にしなくてもよい。

生物脱臭装置には、①脱臭微生物を高濃度に保持すること②容易な維持管理③低いランニングコスト・イニシャルコスト、などが求められる。私たちはポリビニルアルコール (PVA) ゲルの表面に活性炭粉末を付着した粒子に脱臭微生物を固定化し、充填塔方式で利用する脱臭装置を開発した。すでに下水処理場を中心に多数稼働している。水処理系と汚泥処理系に設置して脱臭試験を実施したときの結果を紹介する。

原臭の硫化水素濃度が高いと他の悪臭物質除去率が下がった。これは最適pH域の違いの問題なので、装置内pHを中性付近に維持するか、装置の前段で硫化水素を、後段でpHを中性付近に制御しながらメルカプタン等の除去を行うことで解決できる。硫化水素は99%程度、メルカプタンは95%程度と高い除去性能が得られた。固定化微生物を利用した生物脱臭を適切に運転管理すれば、活性炭のバックアップを必要としない程度の性能が得られる。低級脂肪酸、アルデヒド類、スチレンなどの生物脱臭も可能であるが、菌体の増殖が早いので、増殖した菌体による充填担体の目づま

りに注意が必要である。

繰返しになるが、生物脱臭装置では微生物固定化に適した担体の選択、水分と pH の管理が重要である。脱臭微生物として活性汚泥の利用が最適であることを付け加えておきたい。

岩堀 有害廃棄物とバイオレメディエーションと題して、とくに微生物による PAHs の取込みを中心に話をする。米国では、一般的に発生する有害廃棄物として石油系炭化水素、ハロゲン化脂肪族化合物、工業廃棄物および木材防腐剤の3つに分類している。PAHs は2環のナフタレンから5環のベンゾ(a)ピレンのようなものまでであるが、その性質は環の数が多くなるほど溶解度が低く、生分解性も低い。また、遺伝毒性は環の数が多くなるほど高くなる。したがって、PAHs は環境中では土壌などの固相マトリックスに付着し、残留しやすいものである。このため、たとえ分解菌が存在しても、実際の環境中では PAHs の分解性は低いと認識されている。

微生物の PAHs に対する作用は、①固相マトリックスへの吸着による直接的な摂取②固相マトリックスから脱着した PAHs の摂取③界面活性剤により乳化した PAHs の摂取が想定できる。作用③を促進するためアラシンという陰イオン高分子乳化剤の添加が検討されているが、作用①に対しては逆効果となる可能性も高い。したがって、効果的なバイオレメディエーションを行うためには、微生物と PAHs との相互作用を明らかにする必要がある。

PAHs の中でナフタレンを対象にしたバイオレメディエーションでは、マイコバクテリウムに着目している。マイコバクテリウムは普遍的に土壌に存在するグラム陽性細菌で、細胞壁にミコール酸を含むため、細胞表面がきわめて疎水的な菌である。宮田助手がアルバータ大学に留学した時、シュナイダー博士から分与されたマイコバクテリウム RJG II-135株を使って、フェナントレンの取込みについて基礎的な検討をしたので紹介する。

培地組成の影響については、一般細菌用培地、酢酸培地、フェナントレン培地で対数増殖期後期まで菌体を培養し、放射性同位体でラベル化したフェナントレンを添加した。その結果、菌体への移行はフェナントレン培地が非常に高く、フェナ



岩堀 恵祐
(静岡県立大学環境科学研究
所助教授)

ントレン存在下で培養する(馴養すること)により、フェナントレンの取込み量が約3倍上昇した。しかし、細胞表面疎水性とフェナントレンの取込みについて、明確な関係はまだ得られていない。これらの機構を詳細に検討し、PAHs の取込みの効率化や取込み能力を賦与した PAH 分解菌を育種できれば、新しいバイオレメディエーション技術の開発につながるものと期待される。

高田 PAHs について、ナホトカ号石油流出事故により漂着した重油からどのように PAHs が残留していくか、実験系による PAHs の減少の確認結果、栄養塩を添加した場合の変化について話をする。流出した C 重油は非常にベンゼン環の数の大きい PAHs が多く、遺伝毒性あるいは発がん性の高い物質が多く含まれていたと考えられる。

私たちは兵庫県の日海側の地点で調査を2年間にわたって行った。半年に1回程度、漂着している重油を採取して PAHs の分析をした結果、ベンゼン環の数が2~3のものは事故後、数カ月あるいは10カ月足らずでかなり濃度が減少するが、ベンゼン環が4~6のものは21カ月経過しても、初めの状態の7割程度が残っていた。このことから、除去などの人為的な対策を取らない場合、かなり長い期間にわたって分子量の大きい成分からの PAHs は残留していることが明らかとなった。

次に除去過程について話す。メソコズムという直径1m、高さ3mほどのタンクに海水を汲み上



高田 秀重
(東京農工大学農学部環境資
源科学科助教授)

げ、それに石油を入れ分解過程を調べた。重油中の水溶性成分はエマルジョンとなり水の中に移行する。また石綿トラップを設置して沈降成分も把握するとともに、水中での微生物分解、粒子と水との間の吸脱着、沈降により下に運ばれる PAHs 量、揮発や光分解などを検討した結果、ベンゼン環の数が2のナフタレン、3のフェナントレンは比較的急速に減少し、ベンゼン環が4以上のものは減少が非常に悪いことが明らかになった。

上から落ちてきた粒子中には PAHs がほとんど存在せず、粒子に付着してタンクの下に運ばれていた。最終的な物質収支についてはいくつかの仮定を設けて現在も検討を進めているが、フェナントレンについては59%が微生物分解により消失し、残りの40%くらいが大気中に揮散する。

次に、マイクロコズムという非常にシンプルな系（三角フラスコ）を組み実験した。フェナントレンの実験結果からは、好気条件で栄養塩を添加した場合、無添加に比較し非常に分解が促進され、約10日で70%くらい残っていたものが、栄養塩を添加するとわずか10日で数%になった。しかし、ベンゼン環4では分解が遅くなり、5のベンゾ(a)ピレンでは栄養塩を添加してもなかなか減ってこない。

今後は、非常に分解され難い化合物をどのように分解していくか、好気条件で良好に進む分解を嫌気条件でどのように進めていくか、進めていくような微生物をいかに見つけていくか、このようなことが鍵になってくると思う。

片山 土壌、地下水の生物浄化技術とは、すなわち環境中での微生物制御である。バイオレメディエーションに関しては、長所として、①大量のエネルギーを必要としないこと②安価であること③現地での浄化が可能で低濃度や広域の浄化に適していることであり、短所として、①浄化に時間がかかること②高濃度汚染に適さないこと③途中で有害な分解代謝産物が発生する場合もあること、などであり使用に際しては十分な配慮が必要である。

有効性が明らかになった技術と開発の観点について話す。固層処理は、汚染土壌を掘削し栄養分を添加し切返しを行い、次に処理槽に移し条件制御をしながら分解を促進する方法である。蒸気圧



片山 新太

(名古屋大学難処理人工物研究センター教授)

の低い油など比較的分解しやすい物質を対象としており、利点として浄化した土壌の再利用が可能なこと等があるが、欠点として広い場所が必要なこと等がある。米国の例であるが、処理費用は土壌1m³当たり25~65ドルくらいである。

バイオリクターは、掘削した汚染土壌に水を5~50%くらい加え、スラリー状にし微生物反応を行う方法である。対象は比較的難分解性の多環芳香族化合物、爆薬、農薬などである。利点としてはプロセスの監視制御が可能なこと等であり、欠点は建設費や運転費が高いこと等である。処理費用は土壌1m³当たり400ドルくらいである。

原位置処理技術の一つとしてバイオベンティングがある。原位置で土壌を通気し微生物の分解活性を高める方法である。対象は石油のような中程度の蒸気圧の化学物質で汚染された不飽和土壌層等である。利点は安価なこと、欠点は分解速度が遅いことである。処理費用は土壌1m³当たり15ドルくらいである。

生物浄化技術の今後の課題は、①すでに実用化している処理技術の改善、②ダイオキシン類やPCBなど難分解性有害化合物で汚染された土壌・底質の原位置処理技術、③汚染が3次元に広がる実際の土壌中で原位置バイオレメディエーションを行うことを想定した養分や微生物の導入・分散技術、④野外へ適用した微生物の生存と拡散の評価技術——などの開発・確立と考えられる。

土壌微生物の立場から重要な課題は、屋外条件下で働く分解微生物群集とその活性化メカニズムの解明と考えている。これは、合理的な生物浄化の制御技術の確立に重要な基礎情報になると期待される。

【参加者からの質問】

岡田 まず最初に個別のご質問をお受けたいと思います。

—— 矢木先生に ml 中の菌体数を、藤江先生に消臭の時間をうかがいたい。

矢木 栄養を入れなくても 1 億匹ぐらいはいる。栄養を与えると 100 億匹ぐらいになる時もある。

藤江 空間速度で 500 から 1,000 ぐらい。接触時間では 4 秒から 8 秒ぐらい。水への溶解度の高い方がとれやすい。

—— 高田先生に、PAHs の生物分解試験で増殖した菌体に吸着とか取り込まれたものが十分抽出されているか。

高田 固形物のほうは凍結乾燥後ソックスレー抽出しているので、細胞の中のものもすべて抽出されている。

—— 岩堀先生に、廃棄物処分場の浸出水中の有害物質の処理についてうかがいたい。

岩堀 浸出水は BOD が低く、COD がきわめて高く、アンモニアが高い。したがって COD とアンモニアを取るシステムが必要。排出水に馴化した汚泥と対象有害物質を効率的に除去できる微生物を包括固定化した共生系で処理すると非常に高い除去効率が得られた例がある。

—— 矢木先生に、硝酸汚染のバイオレメディエーションの可能性をうかがいたい。

矢木 硝酸汚染は嫌気条件をどのように作るかが問題。食用油やエタノールを注入して嫌気状態を作るが、これらは環境中で分解するので問題ないが、多く加え過ぎると汚染を招く。良好な実験データが得られているので、上手にコントロールすることにより可能と思う。

—— 矢木先生、他の先生方も含めて、PCB はリスクの上がる方向へ脱塩素されるが、土壤、河川、海域の汚泥などへの実用化例を教えてください。

矢木 PCB は塩素が 3 つ、4 つであれば好氣的に分解できる。一般に塩素化合物の場合、好氣的な処理ができないものは、嫌気で処理する研究がなされている。水系であれば紫外線照射で、土壤では化学的反応で塩素を外す。PCB の高塩素化合物の嫌気分解はこれからの課題と思う。

片山 PCB を直接分解できる微生物は、白色腐朽菌くらいしか知られていない。バクテリアでは嫌氣的にして脱塩させるか、もしくは紫外線照

射の後、好氣的な微生物で分解する。後者は、鉄道総合研究所の金原先生のグループがパイロットスケールですでにうまくいっている。

〔総合討論〕

岡田 ここで各パネラーの先生に、現在バイオレメディエーションがどのような問題や限界を抱えていて、将来どのように解決していきたいか、ということをお話いただきたい。

藤江 先ほどのご質問にも関連して 2 つほど話す。まず、浸出水中の難分解性有機物に対しては活性炭吸着、化学的な酸化分解あるいは膜分離などの利用が考えられる。分子量が数千以下の低極性有機物には活性炭が利用できる。化学酸化では、それなりのコスト上昇と汚泥発生がある。NF 膜による膜分離も選択肢であるが、透過流速の低下、膜寿命およびランニングコストの問題が残っている。

もう一つは、循環型社会といえば有機物循環のためのコンポストとメタン発酵がまずあげられる。しかし、メタン発酵からは高濃度の脱離液、すなわち排水が排出され、この処理が問題である。コンポストは、そこに含まれる炭素や窒素の 7 割程度が二酸化炭素や硝酸となって大気や水環境に移動する。決して環境にやさしいわけではないことも知って欲しい。

片山 一つは、いかに汚さないかという技術を考える必要がある。もう一つは、予防技術の中に微生物をうまく使えば、いろいろな所で利用の可能性がある。生活環境を守るという中に微生物の機能を取り込んだ暮らしができれば、技術としてもわれわれの生活としても豊かになるのではないか。

岩堀 先ほど岡田先生が場の管理を言われた。マイコバクテリウムでも同様で、下水処理場ではスカム発生の障害微生物だが、汚染現場では疎水性の細胞表面がおもしろい作用をする。微生物の活用では、その場に適したものをどう配置するかということが重要である。また物理化学的な処理の併用や、中間代謝物が毒性の高いものに変化する 2 次汚染の問題も考慮する必要がある。

高田 高分子あるいは疎水性の大きいものを分解できるような技術の開発が必要になってくる。PAHs でも高分子のものは残りやすいし毒性も大

きい。直鎖のものでも高分子のものは多環芳香族と同じくらい分解され難いということ、ベンゼン環の有無よりは分子量あるいは水溶性が効いていそうだと、ということが分解実験から見えてきた。高分子のものについても展望が開けてくると考えている。

矢木 今後の課題として、一番の問題点は効果と安全性の問題です。安全性の問題については、ガイドラインもできたのでそれをクリアする。全体的なコメントでは、今まで場を変える考えはあまり無かったが、今日の話をして聞いて工学的なアプローチがよい気がしてきた。もう一つは有効性の問題で、何らかのファンドでその土地を買い上げてしまい一挙に浄化する。そうすると多くのデータが集まり技術が進むので、そんなシステムができればいいと考えている。自然の浄化力を正しく理解し、これをいかに活用するかが、今後の重要なポイントと思う。

岡田 環境庁の勝又環境研究技術課長に、環境

庁の立場からもしくはその技術行政を推進する立場からコメントをいただきたい。

勝又 バイオレメディエーションについては、環境庁としてもそれを正しく使うための注意点を、土壌への利用などについての指針も作っていききたい。バイオの関係は正しく使えるように頑張っていきたい。

岡田 終りに、「正しく使う」ためのキーワードをいくつかまとめます。

- ① バイオレメディエーションの中にはバイオステイミュレーション、バイオオーグメンテーション、ナチュラルアテニューエーションがある。
- ② 現場で行うのか、それともいったん外に取り出してやるのか。
- ③ 対象になる物質をきちっと把握することが重要である。

これらを適切に使っていくのがバイオレメディエーションを成功に導くと考えている。