

4.3 対策技術

化学物質によるリスクは生産から廃棄までの種々の段階で生じる。リスクを適切に低減するには、まず、化学物質の存在、曝露経路、およびリスクの大きさを把握するためのモニタリング技術が必要になる。そして、リスクが懸念される場合は、生産や使用の禁止や制限といった行政的施策がとられることもあるが、多くの場合は生産や使用を継続しつつ環境への影響を低減する対策技術が採用される。さらに、一旦環境汚染を生じてしまった後では、環境修復処理技術や曝露経路を遮断するといった対策がとられる。このような各段階での対策技術について図に示した(図4-37)。

生産技術を選択する場合、投入する資源・エネルギーと環境への廃棄物を最小化するクリーン・プロダクション(Clean Production: 化学物質生産の場合、グリーンケミストリーとも呼ばれる)の導入が最も好ましいが、都合のよいプロセスがいつも実用化しているわけではない。そこで、やむを得ず汚染物質が生じるプロセスを利用しなければならない場合には、生じた汚染物質の環境放出を減らす技術が採用される。これがエンド・オブ・ザ・パイプ・テクノロジー(End of the Pipe Technology)である。具体的には排水や排ガス処理技術などがこれに当たる。生産段階だけでなく、使用後の廃棄物を処理する段階においてもクリーンな処理プロセスとエンド・オブ・ザ・パイプ・テクノロジーが利用される。また近年は、廃棄段階を見据えて有害な化学物質の使用を減らし、害の小さい化学物質で代替する努力もなされている。もう一つ別の対策技術として、過去に汚染された土壌や底質の浄化・修復がある。一般に薄く広がってしまった汚染を浄化するのは多大なエネルギーを必要とし、効率的でない。そこで、エネルギー要求の少ない生物を利用した技術などの開発が進められている。また、浄化技術の採用が費用的に困難な場合は、汚染の拡散を防止する技術が採用される。

新しい対策技術は、コスト削減も同時に達成される場合は、放っておいても採用されるが、リスクは削減できてもコストは上昇するという、相反する場合も多い。このようなとき、社会的な要請や規制施策がその新しい技術の採用を促す。他方、一旦目標が達成されれば、さらなる社会的要請により、より優れた技術の開発が推進される。このように、行政施策と技術開発は相まって進んでいくことになる。

以下では、現在進められている化学物質対策技術について、いくつか紹介する。

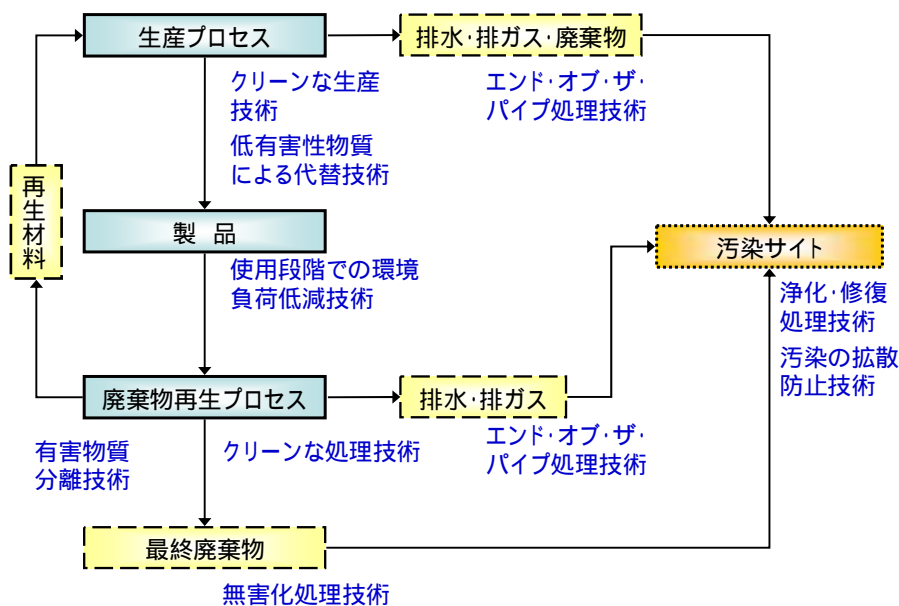


図 化学物質の生産から廃棄までの各段階での対策技術

図4 - 37

4.3.1 光触媒を用いた有害物質分解除去

我々の身の回りには、シックハウス症候群の原因とされるホルムアルデヒド、VOC や、難分解性ダイオキシンなど、微量であっても有害な物質が多く存在する。

そこで、我々は、光触媒を用いた有害化学物質の分解・除去手法の検討を行った。しかし、これまでの酸化チタン(TiO_2)に代表される光触媒には、以下のようないくつかの不安な点や要望事項があるとされていた。

- A. 有害物質の分解に伴い、あらたに有害な副生成物生まれる可能性があるのでは？
- B. 分解反応速度が遅いのでは？
- C. 触媒は粉末では扱いにくい。
- D. 紫外線ではなく、可視光のもとで利用できる触媒が必要。

こうしたすべての問題を、ひとつの光触媒で解決することは難しいが、各項目を克服する光触媒を提案することは可能であると思われる。よって本研究では、今後の光触媒開発に役立つ情報を提供するべく、以下のような取り組みを行った。

A. について；

有害物質の中には、二酸化炭素などの人体に直接影響のない物質には、簡単に分解しない、いわゆる難分解性有機塩素化合物（その多くは、内分泌かく乱物質（いわゆる環境ホ

ルモン)に指定されている)がいくつか存在する。その中でも、芳香族有機塩素化合物(例：ダイオキシン)は、分解反応中にあらたな有害有機塩素化合物を発生させる危険があると指摘されていた。

そこで、本研究では、これまでの酸化チタンではなく、あらたにホーランダイト型光触媒 ($K_2Ga_2Sn_6O_{16}$ 、結晶構造：図4 - 38)を用いた、難分解性芳香族有機塩素化合物の分解除去手法の検討を行った。ホーランダイト型化合物は、ちょうどレンコンのような結晶構造をしている。このレンコンの穴の中に、カリウムのようなアルカリ金属元素が収まっている構造をしており、この特徴的な結晶構造を、活性サイトとして機能させることを目的に実験を行った。

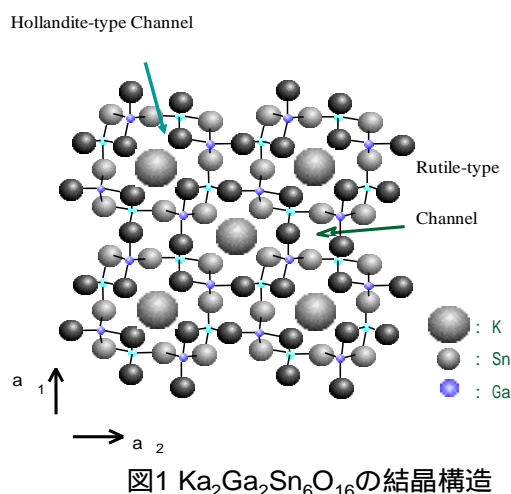


図4 - 38

芳香族有機塩素化合物の分解反応例として、まずブラックライトを用いたホーランダイト光触媒上での、ペンクロロフェノール(C_6Cl_5OH)の分解活性を示す。ブラックライトは、ちょうど室内の蛍光灯に含まれる微弱な紫外線量と同程度の紫外線を発する光源として知られている。

図4 - 39の分解実験で用いたホーランダイト型光触媒粉末は、球状の粉末と棒状の粉

末の2種類である。図4 - 38に示した結晶構造が、粉末表面に現れやすいと考えられる球状粉末を用いた場合に、光照射ONとOFFに対応して、分解生成物である二酸化炭素が、多量に発生している様子が明瞭に観察された。この実験では、500ppmの濃度のペンクロロフェノールが、約160分後に、ほぼ完全に二酸化炭素へとかわり、ペンクロロフェノール以外の有機塩素化合物は発生せず、塩素成分はすべて、塩化水素または塩素へと転化していることが確認された。

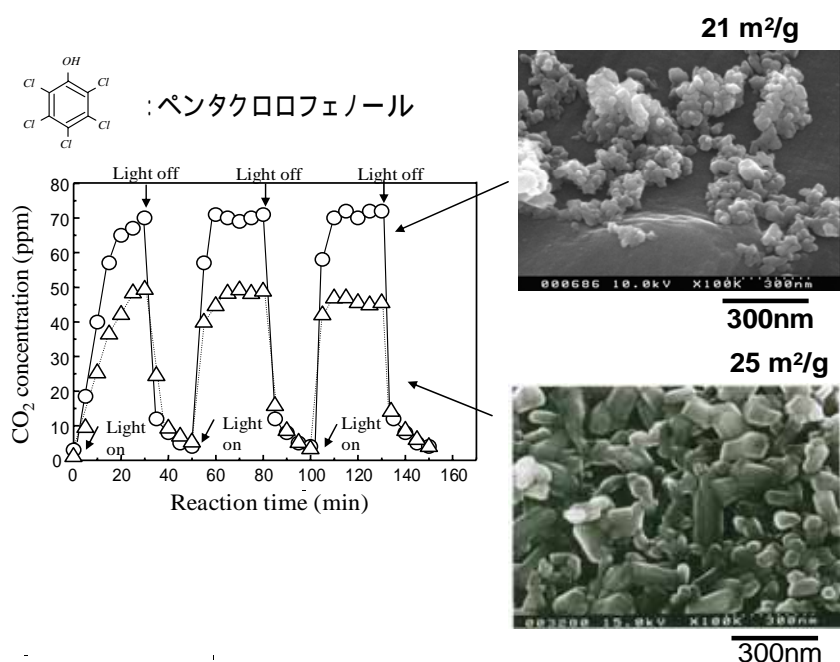


図2 ホーランド型光触媒上でのペンタクロロフェノールの分解活性の比較
Light source: black light (incident intensity: 1.3 mW/cm²).

図4 - 39

図4 - 40には、ダイオキシン (C₁₂Cl₇O₂H, 50,000ppm) を用いた場合の、ブラックライトによる光照射下における、分解反応結果を示す。分析精度を十分に高めるために、ダイオキシンの初期濃度は50,000ppmと、きわめて高くしてあることから、二酸化炭素に転化する時間が、先に示したペンクロロフェノールの場合に比較して長く見えるが、高濃度のダイオキシンを確実に分解していることが分かる。光照射開始から17時間後には、50,000ppmのダイオキシンが10,000ppmまでに減少しており(80%の分解活性)、塩素はすべて塩化水素と塩素に変わり、有害な有機塩素化合物の発生は認められなかった。

以上の結果から、生活空間に飛来する可能性のある有害な芳香族有機塩素化合物を、副

生成物である第2、第3の有害有機塩素化合物の発生なく、分解し無害化することに成功した。

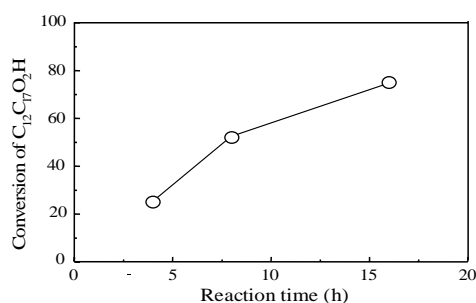


図3 ホーランド型光触媒上でのダイオキシンの分解活性
Light source: black light (incident intensity: 1.3 mW/cm²).

図4 - 4 0

BおよびCについて；

Aの項目においても、光触媒の性能向上の取り組みを行ったが、ここでは、従来のTiO₂光触媒の有害物質分解速度を大きく向上させ、あわせて、粉末ではなく、透明な膜として利用する技術開発を行った結果について紹介する。

通常、薄膜上における分解反応は、粉末上で起こる反応より遅くなることが知られている。本研究では、この問題を克服するべく、酸化アルミニウム膜の陽極酸化法という手法を用いて、図4 - 4 1に示すような多穴体膜を作製したのち、この膜を鋳型として、穴の中にTiO₂の成分を液体状にして流しこみ、空气中で焼成することで、同じく図4 - 4 1に示すようなナノサイズ(1ナノメートルは0.000000001メートルに相当する)のきわめて小さいチューブ状のTiO₂を、ガラス基板上に整然と配列させることに成功した。

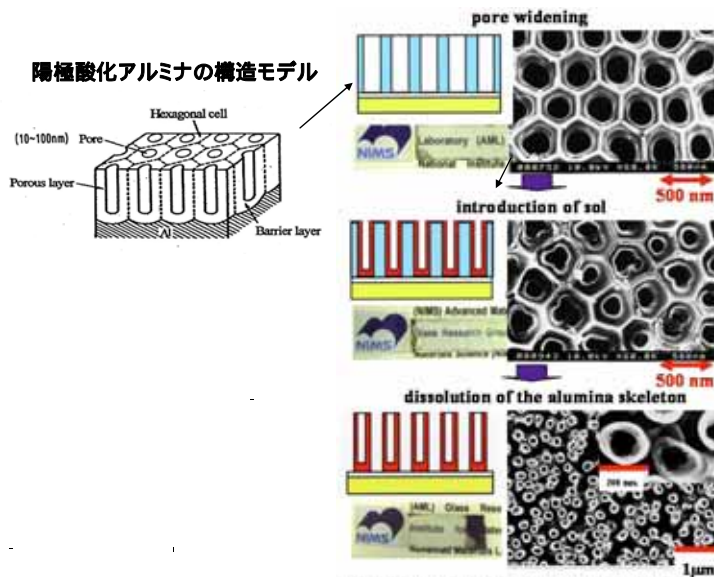


図4 TiO₂ナノチューブが配列した透明TiO₂膜の顕微鏡及び概観写真

図4 - 4 1

この図に示すように、チューブ状のTiO₂が配列した膜は、外観は透明な膜であり、生活空間において、この膜を必要な箇所のガラス上に形成することで、光触媒機能を発揮させることが可能になる。

図4 - 4 2には、このチューブ状のTiO₂が配列した透明膜の触媒活性を、市販のTiO₂光触媒粉末の中でも、もっとも活性が高いとされているTiO₂光触媒(グレード名: Degussa P25)を比較試料として評価した結果を示す。この図から分かるとおり、市販の高性能TiO₂触媒を大きく上回る特性を示す透明薄膜状光触媒の開発に成功した。

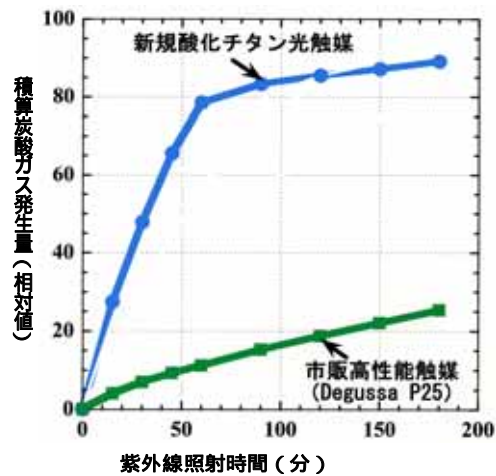


図5 光触媒上でのアセトアルデヒド分解活性の比較

図4 - 4 2

Dについて；

最後に、室内の蛍光灯の光のもとだけでなく、太陽の光のもとでも十分な活性を有する光触媒を開発する取り組みの一例を紹介する。

本研究では、新規な可視光励起光触媒として、窒素とフッ素をドーブした TiO_2 光触媒 (NFT) や、同じく窒素とフッ素をドーブした酸化タングステン (WO_3)/ TiO_2 複合光触媒 (NFWT)を開発したので、その性能の一部を紹介する。

本研究で合成した光触媒は、図4 - 4 3に示すような多孔質球状粒子であり、多孔質であることから、有害物質を表面において吸着により捕集し、高効率に分解することが可能である。

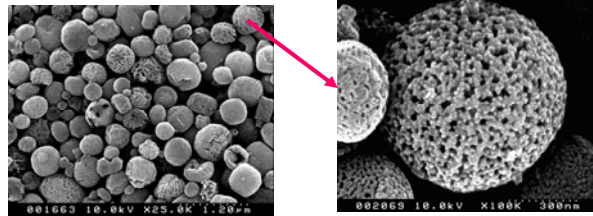


図6 可視光励起光触媒の概観写真

図4 - 4 3

図4 - 4 4には、従来のTiO₂光触媒、NFT及びNFWTの光吸収端の違いを検討した結果と、その光触媒活性（アセトアルデヒド（AAH）及びトリクロロエタン（TCE）の分解活性）を示す。これらの図から分かるとおり、通常の紫外線励起型のTiO₂に比して、本研究で合成したTiO₂系光触媒は、吸収端が可視光よりに移動しており、太陽光で十分に活性をあらわす可能性があることが示された。また、可視光照射下におけるアセトアルデヒド及びトリクロロエタンといった有害物質の分解実験においても、市販の高性能TiO₂光触媒を大きく上回る特性を確認した。

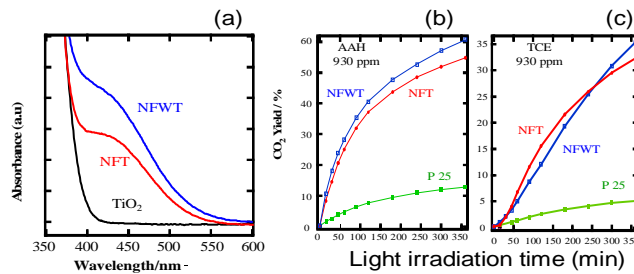


図7 吸収端の違い(図7-a)と可視光照射下における活性の比較(図7-b, c)

図4 - 4 4

以上のように、有害化学物質の分解除去技術開発には、多くの要望が寄せられており、そのすべてを一度に満たす光触媒の開発を行うことは、必ずしも容易ではないが、そのひとつひとつの要望を満たす光触媒の提案は、着実に進められている。今後、各種用途に応じて、もっとも適切な光触媒を生活空間において利用することが必要であると思われる。

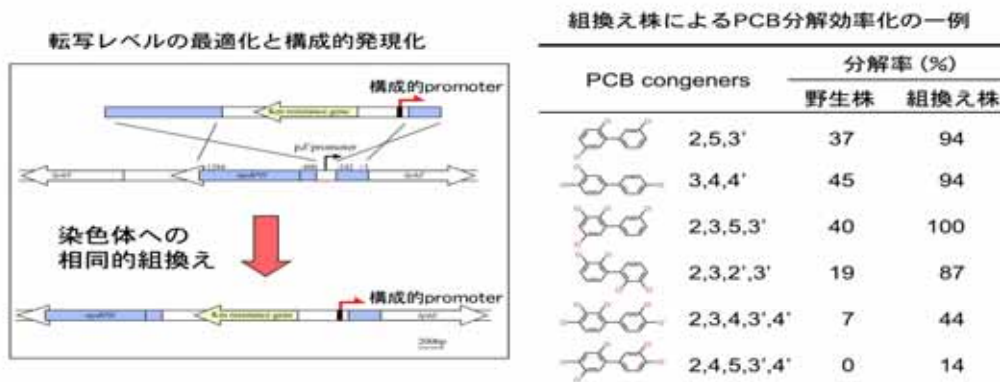
4.3.2 微生物を用いたPCB、ダイオキシンの分解除去技術に関する基礎研究

人間活動の急速な拡大に伴い、地球環境汚染は多様化し、深刻な様相を呈している。独立行政法人・理化学研究所では環境分子科学研究なる基礎科学研究課題において、広く環境問題に関する研究に取り組んでいるが、この中で化学物質リスク総合管理技術に関連するテーマとして、環境分子の情報科学研究ならびに同分解科学研究をあげることができる。本項では、微生物を用いた有害物質分解除去に関する研究について、最新の成果を紹介する。本研究では、環境汚染分子や環境未利用分子を環境低負荷型の物質や材料に変換するための基礎研究を行っている。特に重大な環境汚染問題としてその対策が急がれているPCB/ダイオキシン類について、分解微生物を利用した浄化修復を目指し、分解微生物の多様性や生態学的機能およびそれらの分解関与遺伝子群の構造・機能・進化に関する研究を通じて、強力な分解能やより広い汚染物質に対する分解能を持つ微生物の育種・開発を進めている。

(1) 転写機能の最適化によるPCB分解菌の分解能力増強に成功

グラム陰性のPCB/ビフェニル分解菌である*Pseudomonas sp.* KKS102株のビフェニル分解遺伝子クラスターの転写は、負の制御因子BphSにより制御されている。このオペロンの転写がコハク酸などの有機酸によるカタボライト抑制を受けることを明らかにし、その制御に関与するプロモーター領域を特定した。更に、発現調節領域の改良技術を開発し、これを利用することによりKKS102株の*bph*遺伝子群の転写レベルの最適化を行い、PCB分解能の増強に成功した(図4-45)。本研究は、分解遺伝子の改良による効率的な変換系の開発につながるブレークスルーとなると考えられる。

図1.転写機能の最適化によるPCB分解能の増強技術の開発



分解遺伝子の改良による効率的な変換系の開発

図4 - 4 5

(2) 複合代謝システムによる PCB の効率的な分解技術の開発

有機溶媒耐性 PCB 分解菌 *P. putida* CE2010 株は、*bph* operon をもたないにもかかわらずビフェニル/PCB を分解できることを発見した。本菌を解析した結果、*tod* (トルエン) 及び *cmt* (クメン酸) の2つの代謝系 operon から成るモザイク分解経路を形成することにより、ビフェニル/PCB を分解する能力をもつに至ることが分かった。これは従来提唱されていた、外部からの遺伝子群の伝播・挿入による新機能の獲得とは異なり、既存の operon から成るモザイク分解経路を形成することによって分解基質特異性を拡大するという、新たな進化の過程を示すものである。本研究は、難分解性化合物分解菌の育種に向けた新しい技術につながるブレイクスルーになると期待される (図4 - 4 6)。

図2. クメン酸とトルエンの代謝系を組み合わせることで PCB分解能を新たに獲得

(難分解性化合物分解細菌の育種に向けた新しいアプローチ)

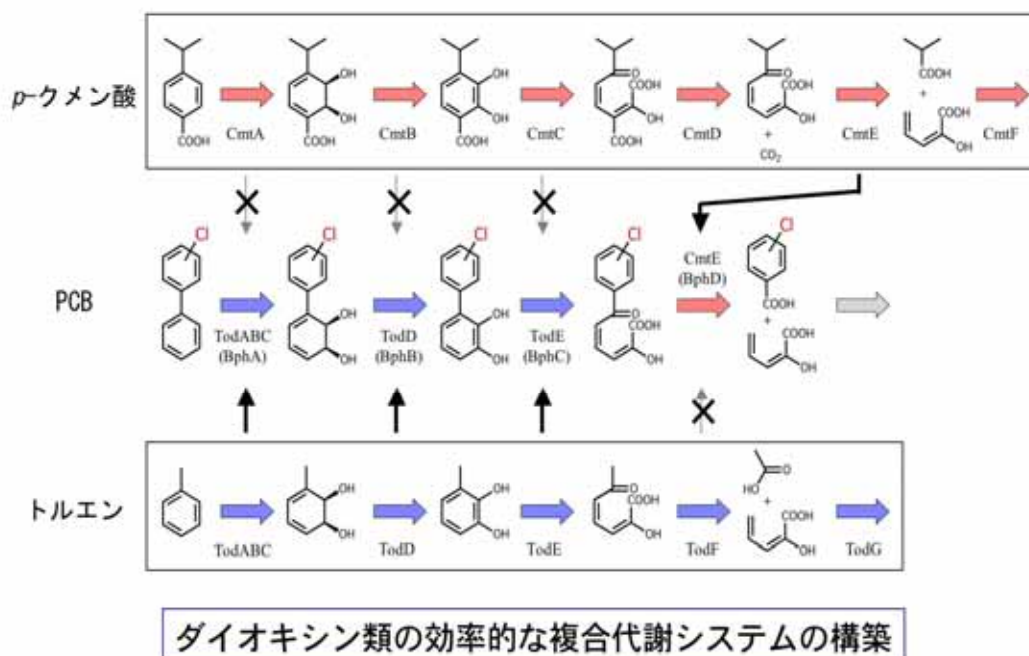


図4 - 4 6

(3) 新規ダイオキシン類分解菌の探索と単離ならびに応用

ダイオキシン類の骨格化合物を分解する多様な細菌を自然界より探索・単離し、その解析を行った。ジベンゾフラン分解性放線菌について代謝経路及び代謝系遺伝子群の解析を行い、新規ジベンゾフラン代謝系遺伝子クラスター (*dfdA-F*) を見出した。分解過程の最初のステップである芳香環の水酸化反応を触媒する酵素の解析を行った結果、5種の芳香環ジオキシゲナーゼの放線菌内での高発現に成功し、それら発現株は様々な芳香族化合物に対する広い変換能を有することを明らかにした。

従来知られているものとは異なる進化の道筋をたどってきたと思われる新規なPCB分解性 *Rhodococcus rhodochrous* K37株から、ビフェニル/PCB分解関与遺伝子群を取得した。その代謝系遺伝子群は従来のビフェニル/PCB分解菌由来のものよりむしろフェナントレン代謝系に相同性が高く、その由来や分解特性に興味を持たれた。このPCB/ビフェニル分解に関わる酵素遺伝子群の由来を調べたところ、これらの遺伝子は200 kbの線状プラスミド上に存在しており、更に、トランスポゾンを経たシステムによって様々な *Rhodococcus* 属細菌に水平伝播してきたことが明らかになった。これらの研究は分解菌の分子育種のための

新たな技術開発に寄与することが期待される。

(4) ステロイドホルモン類の微生物分解に関する基礎研究

動物し尿排水などには、多くのステロイドホルモン類が含まれ、それらによる内分泌攪乱作用も無視できない問題である。主要な男性ホルモンであるテストステロンの微生物分解経路の解明を目指し、*Comamonas*属細菌による代謝経路および代謝関与遺伝子群を解析した。遺伝子破壊株や蓄積する代謝中間体の解析により、同菌株のステロイド代謝経路を明らかにした。興味深いことに、いくつかの分解酵素はビフェニル等の芳香族化合物分解酵素と相同性を示し、分解様式に共通性が認められた。TA441株は様々なステロイド化合物をADDおよびその類縁体に変換して、その後はこの共通経路を経て代謝すると考えられる。都市生活排水などにおけるステロイドホルモン類による環境汚染に対して、新しい分解技術の開発につながる基礎的知見である。

(5) 植物-植物根圏微生物複合系を利用した環境汚染物質の浄化

分解微生物を用いたバイオレメディエーションを行う場合、土壤環境中での分解微生物の不安定性が問題となる。このような問題を解決するため、植物-植物根圏微生物複合系を利用して、ダイオキシン類等の有害環境分子を除去するための研究を行った。モデル環境汚染物質として、内分泌攪乱作用が疑われる有機塩素系化合物PCP（ペンタクロロフェノール）を用いた。根圏バクテリア *Pseudomonas gladioli* に、PCP 資化菌 *Sphingomonas chlorophenolica* 由来のPCP分解遺伝子群を導入し、宿主植物（ニラ）-形質転換 *P. gladioli* 複合系によるPCP浄化実験を行った結果、土壤中PCPの減少が認められ、植物-根圏微生物複合系の有効性が示された。今後、農地などにおける環境浄化技術への展開が期待される。

4.3.3 農耕地における有機汚染物質のリスク低減方法の開発

食料生産の場である農耕地土壤は、農薬をはじめとする農業用資材の施用や大気降下物としての混入を通して、様々な有機化学物質が負荷されている。また、POPs 条約対象物質のうち9物質が有機塩素系農薬（日本で農薬登録のあったものは6物質で、現在は全て登録失効）であり、さらにはダイオキシン類を不純物として含む農薬が使用されていた。これらの物質は土壤中で容易に分解しないため、使用禁止後10~30年が経過した現在においても農耕地土壤に残留している。このため、農耕地から水系への流出が懸念される一方で、一部の作物から残留基準値を超えて検出された事例もある。そこで、有機汚染物質の農耕地から系外への拡散防止、ならびに分解除去のための技術開発に取り組んでいる。

わが国の水田では、過去に水稲用除草剤としてPCPおよびCNP製剤が施用されたが、こ

これらの製剤中には不純物としてダイオキシン類が含まれていた。これらの除草剤の農薬登録はすでに失効しているが、ダイオキシン類の半減期は土壤中で15~20年程度と非常に長い。そのため、水田土壤中のダイオキシン類濃度は一般的な非農耕地土壌よりも高い傾向にある。これまでの研究から、イネは土壌からダイオキシン類を吸収せず、コメ中のダイオキシン類濃度は極めて低いことが明らかになっている。しかし、水田土壤中のダイオキシン類は代かき時に土壌粒子とともに水田から河川・湖沼・海域へと流出し、底質中の汚染源となっていることが指摘されている。

そこで、化学的手法による水田からのダイオキシン類の拡散防止技術の開発に取り組んだ。ダイオキシン類は疎水性が強く、水溶解度が低いため、土壌中では土壌粒子に強く吸着した形態で存在すると考えられる。そこで、代かき時に凝集剤としてイオン系資材を施用することにより、田面水中のイオン強度を高め、土壌粒子の沈降を促進させる。これにより、土壌粒子に吸着したダイオキシン類の水系への流出を抑制することができる。実際、土壌の分散性が高く懸濁を生じやすい黄色土の現地水田圃場に凝集剤としてhaあたり300kgの塩化カルシウムまたは塩化カリウムを施用して代かき作業を行うと、懸濁物質は速やかに沈降し、これに伴い田面水中のダイオキシン類濃度も大きく低下した(表4-4)。この技術を用いることにより、代かき~田植え作業を妨害することなく、排水路へのダイオキシン類の流出を抑制することが可能となった。また、凝集剤の施用により水稻の収量に影響はなく(表4-4) 施用コスト及び作業量の面からも、現地圃場に適応できる技術である。

表4-4 凝集剤施用による代かき3時間後の田面水中の懸濁物質、ダイオキシン類濃度の低減効果および施用区のコメ収量(無施用区を100としたときの相対値)

凝集剤	施用量 (kg/ha)	田面水中濃度		コメ収量
		懸濁物質	ダイオキシン類 (TEQ 値)	
塩化カルシウム	150	25.7	10.9	106.4
	300	5.1	8.9	101.6
塩化カリウム	150	49.5	36.4	119.7

農耕地土壌中に残留した農薬を、微生物によって分解除去する技術（バイオレメディエーション）の開発にも取り組んでいる。農薬による農耕地土壌の汚染は、工場跡地等で生じる有機化学物質汚染に比べると、はるかに低濃度で、かつ広範囲に分布しているという特徴があり、また、処理後には作物生産が可能な場を提供する必要があることから、原位置で土壌環境を大きく変えることなく分解除去を行う技術が求められる。この点において、バイオレメディエーションは有利と考えられる。しかし、培養によって得られた分解菌を汚染土壌に接種した場合、分解菌の栄養分である農薬が低濃度であることもあり、土着の菌との競合によって分解菌が定着できず、期待した効果が得られないことが多い。そこで、土壌から分離した農薬分解菌を木質炭化素材（木炭）に接種し、汚染物質を唯一の炭素・窒素源とした培養液を環流させることによって、分解菌のみを素材細孔内に集積させる技術を開発した（図4 - 47）。

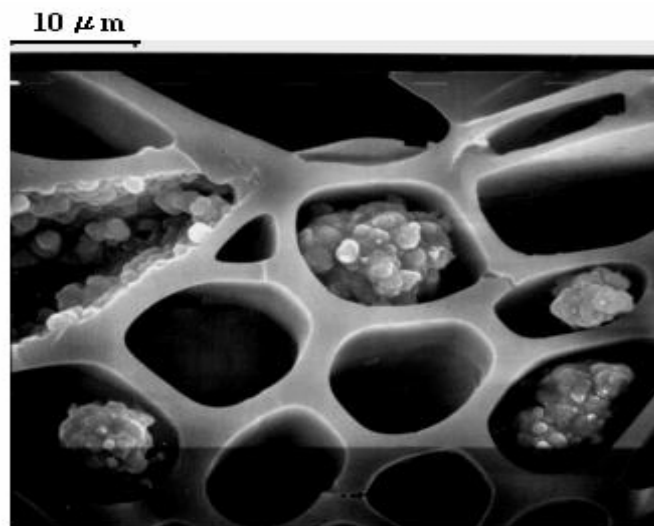


図4 - 47 木質炭化素材の細孔内に集積した農薬分解菌群（倍率 × 2000）

分解菌は細孔内という好適な住みかを与えられ、土着菌の影響を受けずに生存することができる。この技術を用いて、複数のトリアジン系除草剤を分解できる微生物素材の開発に取り組んだ。土壌から分離したシマジン（トリアジン系除草剤のひとつ）分解菌群を木質炭化素材に集積させた分解菌集積素材を作成し、土壌の下層（深さ 15cm）に 1cm の厚さに埋設したところ、土壌へシマジンを施用しても土壌浸透水中のシマジンの 60～90%を 2 年間分解除去されることができた(図 4 - 4 8)。この分解菌群は、*Arthrobacter* sp.(CD7w)、*Bradyrhizobium japonicum* (CSB1) 及び新属・新種の β -Proteobacteria (CDB21) の 3 種類の細菌から構成され、CDB21 がシマジンの分解に直接関与し、CSB1 は CDB21 菌体の増殖に、CD7w は炭化素材内への分解菌群の集積に必要であり、農薬の分解と生育に必要な栄養因子を互いに補完し合うような機能を持つコンソーシウム（複合微生物系）であることが明らかとなっている。このコンソーシウムはシマジン以外のトリアジン系除草剤であるアトラジン・プロパジン・テルブチラジンを分解することが可能であり、複合汚染現場でのバイオレメディエーションとして利用できる。現在、このコンソーシウムに別種の分解菌群を混合・集積させ、トリアジン系除草剤に加えて土壌中のペンタクロロフェノール(PCP) やヘキサクロロベンゼン(HCB) も同時に分解可能な微生物資材を開発中である。

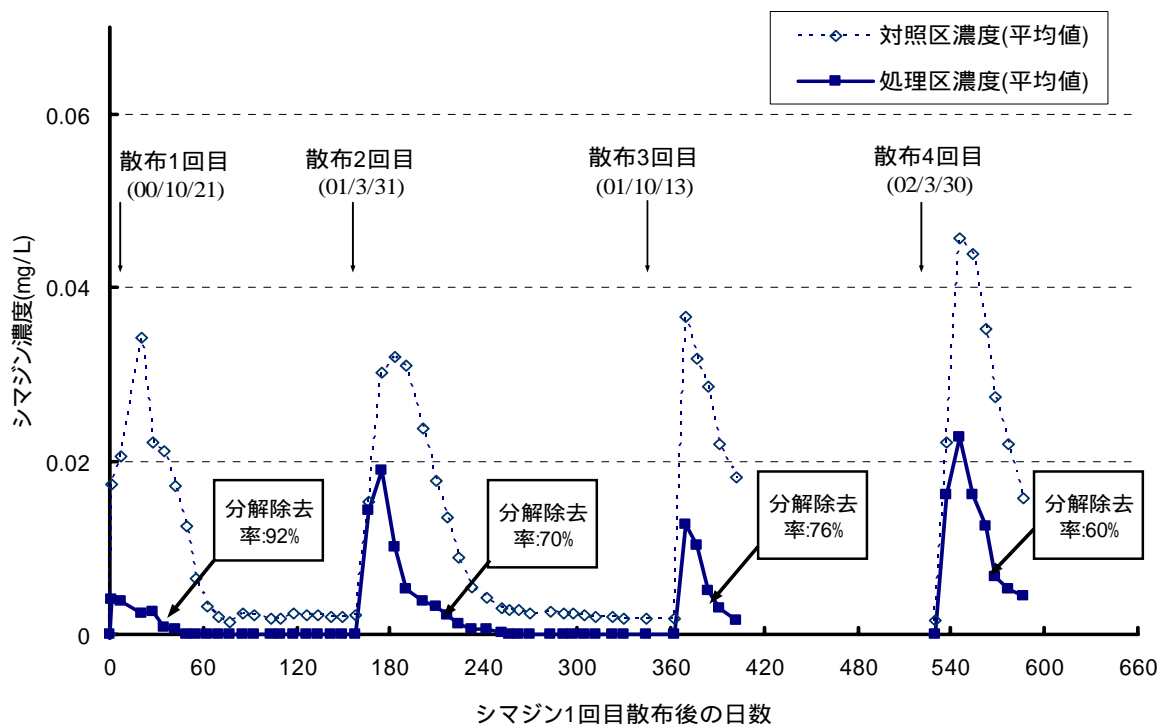


図4 - 4 8 汚染土壌浸透水中のシマジン濃度の経時変化と分解除去率

これらの取り組み以外にも、きのこの仲間である白色腐朽菌の接種による土壌中のダイオキシン類の分解技術や、品種間差あるいは吸着資材を用いたキュウリのドリリン系農薬吸収抑制技術の開発を行っている。また、将来に向けたシーズ研究として、薬物代謝酵素チトクローム P450 遺伝子を導入して有機化合物分解活性を持たせた植物によるファイトレメディエーションの試みや、PCB・ダイオキシン類・DDT 等の POPs 分解菌の改良による完全分解系の構築、土壌 DNA ライブラリーを構築して菌を分離・培養することなく有機化合物分解遺伝子を直接取得するための技術開発等の研究に取り組んでいる。

4.3.4 カドミウム汚染農地の修復技術の開発

重金属の 1 種であるカドミウム (Cd) は、その摂取量が多ければ人の健康に影響を及ぼすことになる。そのため、食の安全を確保するためには、コメ等の農作物に含まれる Cd 濃度を基準値以下とすることが必要である。わが国には旧鉱山や製錬所等が原因となった Cd 汚染農地があり、これまで客土工事による汚染土壌の修復が行われてきたが、費用や未汚染土壌の確保の面から実施が難しくなっている。このため、客土に代わる新しい対策技術として、ファイトレメディエーション (植物を利用した修復技術) と化学的洗浄法の開発に取り組んでいる。

(1) ファイトレメディエーション

土壌中の Cd を効率的に吸収する植物があることが、以前から知られている。たとえば、

キク科のセイタカアワダチソウやアブラナ科のゲンバイナズナはCdの吸収量が多いといわれている。また最近では、イネ科のソルガムやアオイ科のケナフなどもその例としてあげられている。これらの植物を、Cdで汚染された農地に栽培すれば、土壌からCdを吸収除去することができる。この技術は、現在ではファイトレメディエーション (phytoremediation) と呼ばれ、環境にやさしい土壌修復技術として注目されている。しかしながら、農地におけるCd汚染は、工場跡地等の汚染と異なりその汚染濃度がきわめて低く、また、修復後に再び農地として使用する必要があり、既往の技術をそのまま適用することはできない。

本研究では、特殊なイネ品種(インディカとジャポニカの交雑品種)を用いてCdで汚染された水田土壌の修復を試みている。イネを修復植物として用いることについては、栽培法や機械作業について既往の一般技術がそのまま適用できるので、実用化しやすいメリットがあり、また、他の修復植物のように雑草化する心配もない。全行程は図4-50に示したとおりで、イネの栽培、収穫・運搬、燃焼処理と大きく三段階に分かれる。焼却灰からはCdを回収してリサイクルに回す。この工程で回収されるCdは、現段階では200~400g/ha/年であるが、よりCd回収効率を高めるために、Cd吸収効率の高いイネ品種の選抜などの研究を続けている。

(2) 化学的洗浄法

汚染土壌中のCdの化学形態は様々であるが、植物に比較的吸収されやすい形態のものは、塩化第二鉄水溶液で溶出されることを明らかにした。この化学反応を利用して、Cdで汚染された土壌を洗浄修復する技術を試みた。

洗浄工程は図4-50に示したとおりである。水田をプラスチック板で囲み漏水を防止した後、塩化第二鉄を施用して代掻きを行い、Cdを溶出して排水し、さらに用水で数回水洗浄して残存Cdおよび塩素を除去する。現場設置型の排水処理装置はキレート資材を内蔵し、排水中のCdを選択的に回収した。0.1モル/Lの塩酸で土壌から抽出される形態のCdは、塩化第二鉄を用いた洗浄処理で、無洗浄区の50%程度まで大きく低下した。また、洗浄処理後の圃場に栽培した水稻(品種;あきたこまち)の生育および収量に対するマイナスの影響はなく、玄米中のCd含量を大幅に低下させることができた。