

# バイオスティムレーションによる土壌・地下水浄化の最適化

Optimum Remediation of Soil and Groundwater Contamination Using Biostimulation

鈴木 圭一\*      安藤 卓也\*  
Keiichi Suzuki      Takuya Ando

バイオスティムレーションとは、現地に生息する微生物を利用して、テトラクロロエチレンなどの塩素系溶剤による土壌・地下水汚染を浄化する手法である。本手法は、有機系薬剤の導入により有用微生物を増殖させ、対象物質を、脱塩素還元分解する技術である。安価な技術である一方、確実性が低いといわれているが、浄化計画全体への配慮、事前の各種試験を実施することにより、最適な浄化対策を実施した。

Biostimulation is a remediation method for soil and groundwater contaminated with chlorinated solvents such as tetrachloroethylene using in-situ biomicroorganisms. The cultivated microorganisms render contaminants harmless through reductive dechlorination when organic agents are introduced. We gave consideration to the overall remediation plan and conducted pretests, and then achieved optimum remediation even though biostimulation is believed to be low cost but also less effective.

## 1. 技術概要と実施事例における課題

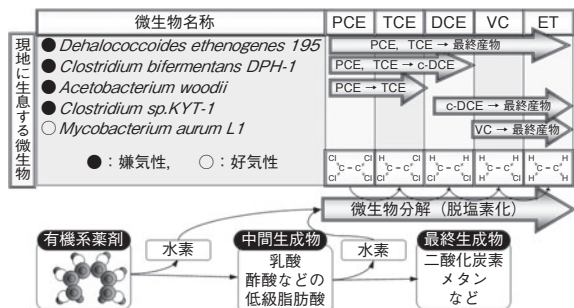
バイオスティムレーションとは、現地に生息する微生物を利用して、テトラクロロエチレン (PCE)、トリクロロエチレン (TCE)、シス-1, 2-ジクロロエチレン (c-DCE) などの塩素系溶剤による土壌・地下水汚染を浄化する手法である。第1図に模式図を示す。バイオスティムレーションは、有用な微生物を外部から持ち込むバイオオーグメンテーションと区別されており、現地に生息する微生物を利用するため、事前の有用微生物の検出[1]、室内試験による加速の確認試験[2]が重要である。有用微生物として、PCEなどを無害なエチレン (ET) まで脱塩素化分解できる *Dehalococcoides ethanogenes* や PCE を TCE まで脱塩素化できる *Acetobacterium woodii*、c-DCE を ET まで脱塩素化できる *Clostridium sp.* などさまざまな微生物が単離・研究されている。これらの微生物は、比較的多くのサイトに生息しており、使用した物質は

PCE, TCEのみであっても、自然分解により、c-DCEが検出される場合がある。一方、これらの微生物は普遍的に存在するわけではないため、DNA解析手法を用いた有用微生物の検出が重要である。また、バイオスティムレーションでは、微生物を増殖させるためにアムテクリーンP<sup>(注)</sup>などの有機系の薬剤が使用される。対象地盤への導入には、薬剤直接注入、薬剤井戸投入、薬剤連続投入、薬剤混合などの薬剤導入工法が用いられる[3]。導入された薬剤の生分解時に発生する水素が、塩素系溶剤中の塩素を置換し、無害化する。また、脱離した微量の塩素は塩酸、塩化物になる。なお、場合によっては、既に存在する有機物の影響により、微生物分解が加速している場合があるため、薬剤導入による分解加速の確認試験が必要である。

生物的反応は化学的反応と異なり、薬剤を導入するほど効果的であるとは限らない。対象範囲に適切に拡散させることが重要であり、徐々に拡散する薬剤や速やかに拡散する薬剤をサイト条件に応じて選定する必要がある。

近年、工場統廃合に伴う土壌地下水汚染の対策では掘削置換や化学的還元分解などの土木工事を伴う手法が多く用いられている[4]。これらの手法は、確実性は高いが、大規模工事になり、工期の確保やコストが問題になっていた。一方、バイオスティムレーションは、小規模工事で実施でき、比較的低コストであるが、確実性に劣るため、時間的制約がある場合には十分に活用されていなかった。

本技術解説では、時間的制約がある中で、確実性に劣るといわれているバイオスティムレーションを活用し、最適な浄化対策を提案、実施したので報告する。



第1図 バイオスティムレーション模式図

Fig. 1 Diagram of biostimulation

\* パナソニック環境エンジニアリング (株)  
Panasonic Environmental Systems & Engineering Co., Ltd

(注) 当社の登録商標

## 2. バイオスティムレーションの利用の事例

実施サイトでは平面積29 400 m<sup>2</sup>のPCE, TCE, c-DCEによる比較的広域の土壤・地下水汚染が敷地内に存在していた。当該サイトでは、土地取引を前提とし、操業終了1年後に浄化を完了させる計画を立案、実施することを目標とした。しかし、工期確保、経済性の観点から、確実性は高いが工期を確保できない土木工事を伴う手法の主な対策手法としての採用は困難であった。そこで、確実性は劣るが工事規模が小さく、操業中から施工できるバイオスティムレーションを主な対策手法とし、計画、設計、施工、管理上の問題点に対応しつつ、浄化を達成した。以下に本プロジェクトでの主要な問題点、解決策を示す。

### 2.1 マスタープランの策定

第1表に示すように、操業中から対応可能なバイオスティムレーションを適用し、解体工事終了までに汚染範囲を縮小した後、残存部分を確実性の高い化学的還元分解法で浄化完了するという不確実性に配慮したマスタープランを策定した。また、室内試験のほかに現場実証試験を行うことで、バイオスティムレーションの不確実性を低減させた。

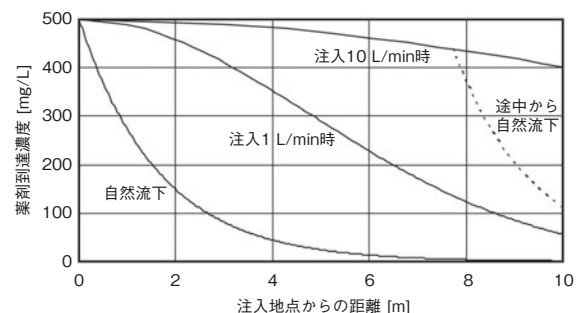
第1表 プロジェクト工程  
Table 1 Project time schedule

| 項目           | 1年度目 | 2年度目 | 3年度目 |
|--------------|------|------|------|
| 事業所操業        | →    |      |      |
| 解体工事         |      |      | →    |
| 引き渡し         |      |      | →    |
| 適用性試験・現場実証試験 | →    |      |      |
| パイロット試験      |      | →    |      |
| バイオスティムレーション |      | →    | →    |
| 化学的還元分解      |      |      | →    |

### 2.2 薬剤拡散方法の確立

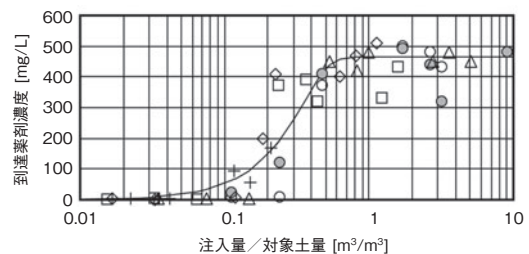
現場実証試験の結果、薬剤を有機物のまま対象範囲に広げる必要性を把握した。そこで、薬剤の分解反応速度を含めた一定容量の連続注入法による薬剤拡散予測を行った。薬剤は分解しながら広がるため、自然の地下水流速や注入量1 L/minでの物理的な拡散では十分な到達濃度が期待できないことを予測した。そこで、注入量を10 L/minとすることで到達濃度を確保することとした。なお、注入地点からの距離約8 mから10 mの範囲では自然流下で薬剤を拡散させ、注入地点から半径10 mの範囲に妥当な濃度、妥当な期間で薬剤を拡散させることを計画した(第2図)。さらに、パイロット施工による薬剤拡散データを測定し、薬剤拡散は対象土壤の間隙率(土

壤粒子の隙間の割合)相当の注入で最大濃度の1/2に到達すること、および、薬剤拡散は、移流拡散(移動経路により移動距離・移動時間が異なること)をとめない、対象土量の10%程度の注入量になると対象範囲外縁部に到達することを確認した(第3図)。これにより、薬剤拡散半径・注入薬剤濃度・注入量・注入期間などの実施設計値を得て、操業中からの薬剤導入・拡散方法を具現化した。



第2図 薬剤拡散予測  
Fig. 2 Diagnosis of dispersion

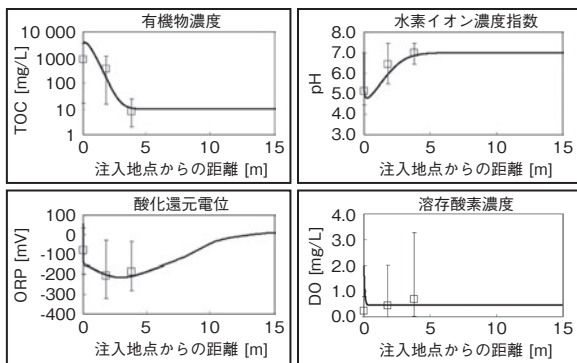
凡例：注入地点からの距離  
○1.0 m ●1.0 m △1.8 m □2.7 m ◇3.8 m +8.8 m



第3図 パイロット施工による薬剤拡散データ  
Fig. 3 Pilot test data of dispersion

### 2.3 水質環境の影響把握

バイオスティムレーションによる薬剤拡散に伴う周辺水質環境への影響を検討した。具体的には、現場実証試験などの測定データを活用し、地下水中の有機物濃度が上昇し、溶存酸素濃度、水素イオン濃度指数、酸化還元電位が低下するバイオスティムレーションの水質環境への影響が一定の範囲で収まることおよび薬剤分解後、地下水質が元の状態に戻ることを地下水質反応モデルを構築して予測した(第4図)。なお、構築したモデルは、地下水流向上流側からの溶存酸素などの酸化性物質の流入を組み込んでいないため、溶存酸素濃度は低下した状態となっている。しかし、実際には酸化還元電位が上昇した状態で、上流側から溶存酸素が流入すると、溶存酸素



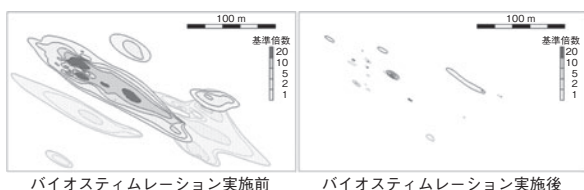
第4図 水質環境への影響

Fig. 4 Influence to water quality index

濃度は元の状態に戻ると予測した。実際の施工に当たっては施工範囲内外での地下水質モニタリングを計画した。また、実施に先立ち、関係行政機関・周辺住民に対して実施内容を説明し、プロジェクトを円滑に推進した。

### 3. バイオスティムレーション利用の成果

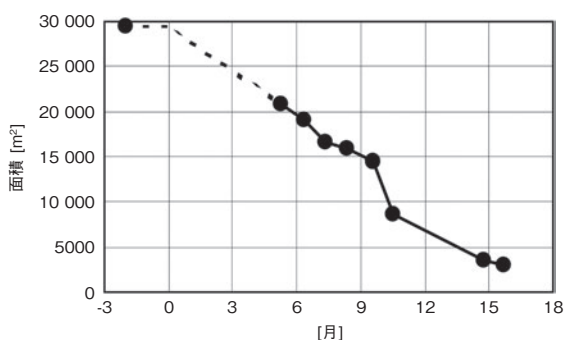
成果の一例として、第5図に対策前後の地下水汚染濃度分布図を、第6図に汚染されている地下水の面積の推移を示す。



第5図 地下水汚染濃度分布図

(PCE, TCE, c-DCE地下水基準超過範囲を併記)

Fig. 5 Contour maps of contaminated groundwater



第6図 汚染されている地下水の面積

Fig. 6 Area of contaminated groundwater

成果1：バイオスティムレーションにより解体工事終了時点での地下水汚染範囲は、当初の約10%の約3000 m<sup>2</sup>まで縮小し、化学的還元分解の実施により計画期間内で浄化完了を達成した。

成果2：実施可能な計画を立案するとともに、有機物の状態で薬剤を拡散させる工法の設計・施工方法を確立した。

成果3：薬剤拡散に伴う周辺水質環境への影響を事前予測するとともにモニタリングで影響がないことを確認した。

成果4：化学的還元分解のみで実施した場合と比較して、大型重機を用いる工事規模の90%、工事に伴う二酸化炭素排出量の57%を削減し環境負荷を低減した。

### 4. 今後の展望

経済性・環境負荷低減に配慮した上で、確実性が低いといわれるバイオスティムレーションを利用して浄化完了することができた。ただし、浄化総費用の確定が遅れるなどの問題もあり、バイオスティムレーションの浄化予測の精度向上によって、より優れた技術提案ができると考えられる。現時点では対象物質の分解反応速度を初期地下水質から設定することで一定の浄化予測は可能であるが、その精度は低い[5]。今後、予測精度を向上させるために、薬剤分解に伴う水質変化および微生物増殖に伴う対象物質の分解反応速度の予測方法の確立が必要である。また、本プロジェクトで得られた知見を利活用し、土壌・地下水環境修復の推進、社会資本の基盤を成す土地の持続可能な活用に寄与し、社会に貢献したい。

### 参考文献

- [1] 伊藤善孝 他, “土壌・地下水浄化有用微生物の検出技術とバイオレメディエーション,” *Matsushita Tech. Journal*, vol.53, no.1, pp.16-21, 2007.
- [2] 安藤卓也 他, “バイオレメディエーション法適用性試験に与える要因の解析,” 第13回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会, pp.581-584, 2007.
- [3] 鈴木圭一 他, “操業中事業所におけるバイオスティムレーション法実施事例,” *土壌環境センター 技術ニュース*, no.14, pp.22-28, 2008.
- [4] “平成21年度 土壌汚染対策法の施行状況及び土壌汚染調査・対策事例等に関する調査結果,” 環境省 水・大気環境局, 2011.
- [5] 鈴木圭一 他, “地下水質情報に基づくVOC汚染に対するバイオスティムレーションの事前予測の可能性,” *土木学会 論文集G (環境)*, vol.67, no.2, pp.54-59, 2011.