

# 大豆ホエーを用いたバイオレメディエーション技術

田中 宏幸・芦田 茂

揮発性有機塩素化合物（VOC）による土壤・地下水汚染に対して行われるバイオレメディエーションは、微生物の働きを利用した環境浄化技術であり、低コスト・低環境負荷技術として普及が期待されている。当社は、バイオレメディエーションの浄化促進剤として、大豆食品素材から生成され低利用であった素材の大豆ホエーを利用したバイオレメディエーション技術を開発した。大豆ホエーは糖質やたんぱく質、ミネラル等を豊富に含み、また従来の薬剤と比較して低コストである。本発表では、本浄化技術の有効性を評価するためにVOCにより汚染された地下水を対象として実施した、大豆ホエーを用いたバイオレメディエーション実証試験について報告する。

キーワード：バイオレメディエーション, 大豆ホエー, 揮発性有機化合物質, 地下水汚染

## 1. はじめに

現在、成熟期を迎えつつある土壤地下水汚染の対策技術は、それぞれの現場では種々の施工上の条件・制約等をふまえて適切なものが採用されている。そうした際における課題としては、コスト軽減、処理能力の向上に加え、持続可能性への対応もあげられる。既に導入の進む海外での動向に続き、国内においてもそうした検討<sup>1), 2)</sup>は取り組まれつつあり、対策工法の選定に際した指標としては省エネルギー、生態系への影響、地域振興等といった様々なものがあげられる。こうした指標群に含まれているように、資源の有効利用は社会的に広く要請されている課題としても周知の通りである。

揮発性有機化合物質（VOC）や油分を対象としたバイオレメディエーションにおいてもこれまでは、例えばBDF副生成物<sup>3)</sup>、泡盛蒸留粕<sup>4)</sup>あるいはワインの搾りかす<sup>5)</sup>といったような材料に対して浄化促進剤としての利用の試みがなされている。

上記のような背景から当社は、食品産業のプロセス上に副生される大豆ホエーに着目し、バイオレメディエーションの浄化促進剤としての適用効果の確認を行ったので、その結果について紹介する。

## 2. 実施方法

### (1) 大豆ホエー

本試験に用いた大豆ホエー（写真—1）は、分離大

豆たんぱくを製造する工程において豆乳を酸沈・分離する際に生じる上澄み液であり、濃縮することで褐色の液体となる。これは、水と容易に混和できるため、溶液の調製が容易という性状を有している。なお、本検討の対象とした大豆ホエーは、加熱濃縮されているため、栄養価や保存性が高く、一般的なホエーの性質とは異なったものである。また、これまで産業上の利用としては飼料用途などに限られていた。

濃縮した大豆ホエーの成分は、季節の変動などがあるものの、上澄みに残留した固形分はおおむね350～450 g/Lで、たんぱく質60～80 g/L、炭水化物200～250 g/L、灰分50～100 g/L等を含有している。また、全窒素を約11,000 mg/L、全リンを約3,000 mg/L含むため、揮発性有機化合物質（VOC）や油分を分解する微生物の栄養源としての活用が期待でき



写真—1 大豆ホエーの外観

る。pHは3.3～4.3の酸性で、糖度は26%以上である。なお、土壤汚染対策法で指定されている特定有害物質については、分析の結果、定量下限値未満であった。

上記のような性質から、天然由来成分による浄化促進剤という新たな活用効果を検討するに至った。

(2) 試験対象地

実証試験の対象地（以下、サイト）において実施した地下水の事前調査によると、トリクロロエチレン（以下、TCE）およびシス-1,2-ジクロロエチレン（以下、c1,2DCE）が土壤汚染対策法に係る指定基準（以下、基準値）を超過していた。サイトにおいては、過去に有機溶剤等が使用された記録はなく、また、VOCの土壤溶出量が定量下限値未満であったことより、地下水のVOC汚染は敷地外からの汚染だと考えられる。

サイトの断面図及び平面図を図-1に示す。サイト内の地質はGL 0～-2.3 mが盛土層、GL-2.3～-4.5 mが粘土層（以下、不透水層）、GL-4.5～-7.8 mが砂礫層（以下、帯水層）、GL-7.8 m以深が不透水層である。事前の地下水調査によると、帯水層の透水係数が $10^{-1} \sim 10^{-2}$  cm/sec、動水勾配が0.7%、および地下水位が約GL-4 mであり、帯水層内の地下水の流速は0.1～1 m/dayと推定された。

(3) 現地試験

現場における大豆ホエーを用いたバイオレメディエーションの適用効果を評価するため、次のような仕様で実証試験を行った。前述の通りサイト内の地下水流は速く、注入した大豆ホエーの滞留時間を十分に確

保できない可能性があったため、M-1の下流側10.7 mの位置に、L = 8.0 mの鋼矢板をオーガー併用圧入工法で打設し、4 m × 4 mの注入エリアを設置した。注入エリアの中心にφ = 50 mm、L = 7.5 mの観測井戸M-2を1地点、大豆ホエーが均等に注入されるようにφ = 40 mm、L = 7.5 mのダブルパッカー注入用の注入井戸DP-1～DP-4をM-2の周りに4地点設置した。井戸設置の際、上部の非汚染層への地下水および大豆ホエーの流入を防ぐため、遮水材（セメントベントナイト）をGL-2.3～-4.5 mに存在する不透水層のボーリング貫通箇所を充填した。

大豆ホエーの注入条件を表-1に示す。注入物質は浄化促進剤の大豆ホエー、中和剤の炭酸水素ナトリウム（以下、NaHCO<sub>3</sub>）およびトレーサーの臭化カリウム（以下、KBr）の3つであり、上水に混合シダブルパッカー工法を用いて注入を行った。実証試験では1回目の注入から約50日後にTOCが減少したため、追加で2回目の注入を行った。1回目の注入量は、注入によるVOCの希釈を懸念し1.5 m<sup>3</sup>とし、2回目では1回目の注入によるVOCの希釈が確認されなかったため3.0 m<sup>3</sup>を注入した。

表-1 実証試験における注入物質

項目	注入条件		備考	
	1回目	2回目		
注入量	1.5 m <sup>3</sup>	3.0 m <sup>3</sup>		
注入物質	大豆ホエー	60 g/L	60 g/L	浄化促進剤
	NaHCO <sub>3</sub>	36 g/L	36 g/L	中和剤
	KBr	9 g/L	9 g/L	トレーサー

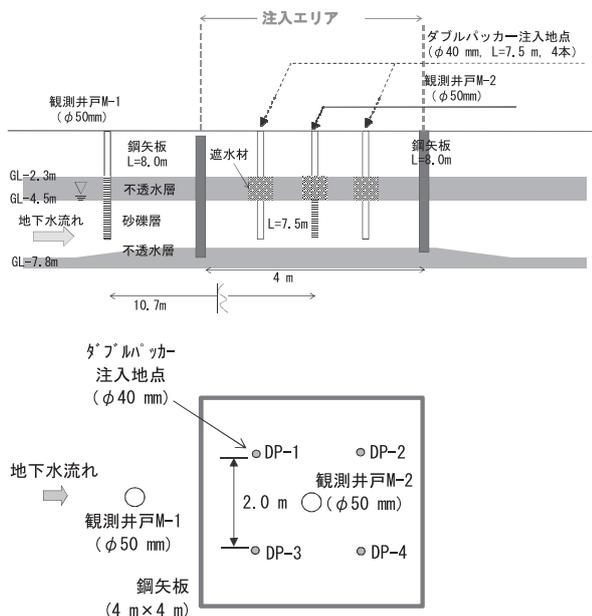


図-1 実証試験サイトの断面図及び平面図

注入エリア内の観測井戸M-2および比較対象として注入エリアの地下水の上流側にある観測井戸M-1の2地点において、モニタリングを1～3回/週の頻度で行った。実証試験では地下水のVOC濃度、VOC分解性微生物の活性に影響する地下水と注入水のpHおよび酸化還元電位（以下、ORP）、注入溶液の移流分散を把握するトレーサーとして臭化物イオン濃度（以下、Br<sup>-</sup>）および微生物の栄養の指標としてTOCを分析した。対象とするVOCはテトラクロロエチレン（以下、PCE）、TCE、c1,2DCEおよびクロロエチレン（以下、VC）とし、同時に最終生成物のエチレンを分析した。VOC濃度の分析はガスクロマトグラフ質量分析（GC/MS）、エチレンの分析はガスクロマトグラフ/水素炎イオン化型検出器（GC-FID）で行った。pHおよびBr<sup>-</sup>はガラス電極法、ORPは白金電極を用いた複合電極、TOCは燃焼触媒酸化方式で分析

を行った。また、大豆ホエー注入による VOC 分解性微生物の増加を把握するため、注入前および VOC の低減確認後に M-1 および M-2 における *Dehalococcoides* 属細菌群の 16S rRNA, *bvc A* および *vcr A* を定量 PCR 法により分析した。

### 3. 結果及び考察

#### (1) VOC

地下水中の VOC 濃度を図-2 に示す。注入エリアの上流側（以下、上流エリア）の M-1 では、TCE は指定基準 0.03 mg/L 前後、c1,2DCE は 0.2 mg/L 前後で推移していた。一方、注入エリアの M-2 では注入後 25 日目から TCE が、50 日目から c1,2DCE が低減し始めた。それに伴い、VC、エチレンが順次、増加した。大豆ホエーの注入は 100 日目にも再度、実施しているが、その後に VC は一時的に上昇した後で 150 日目に指定基準まで低減した。

2 回目の注入以降、VC の低減にかかわらず、エチレンの上昇は確認できなかったが、その要因としては、有機分の供給によってメタンや二酸化炭素のガス発生が活発化に伴うエチレンの系外への拡散の促進化があげられる。

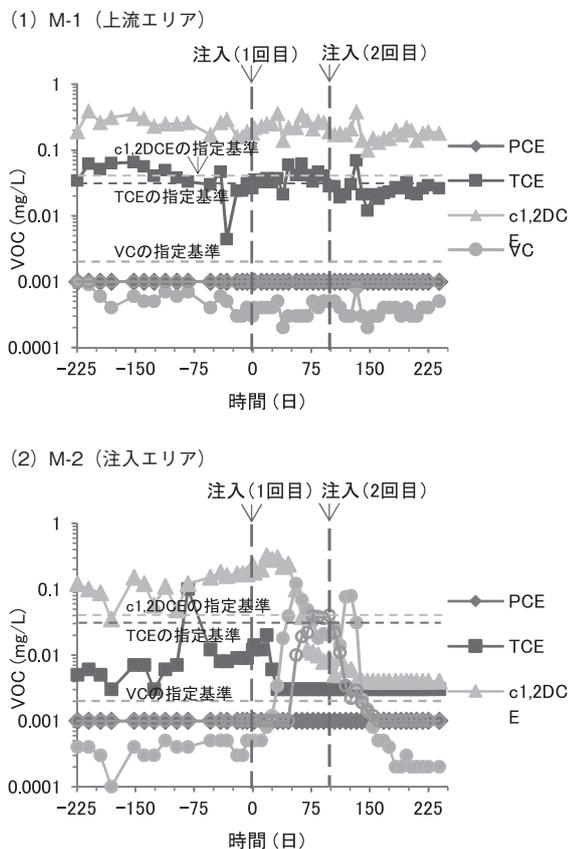


図-2 地下水中の VOC 濃度

#### (2) 臭化物イオン (Br<sup>-</sup>) 及び全有機炭素 (TOC)

トレーサーとして注入水に溶解させた臭化物イオンの影響については、上流エリアの M-1 では変化はみられず、注入エリアの M-2 では注入直後に 1,000 mg/L 程に高まった後、1/2 程度に低下し横ばい状態で推移した（図-3）。これは、注入時の注入井戸から観測井戸への短絡流の発生と、その後の注入水の分散による均一化の過程、ならびに、封じ込められた空間における地下水の著しい出入りの生じなかったことを示唆している。

TOC は大豆ホエーの指標となるが、注入に伴い 1,000 mg/L まで上昇した後、50 日目で 1/10 程度になる速度で減少が確認された（図-4）。上流エリアの M-1 では僅かな上下を繰り返しながらもこうした傾向は確認されなかった。上記の結果より、注入エリアでは VOC の嫌氣的分解に必要な有機分が供給されていたと示唆される。

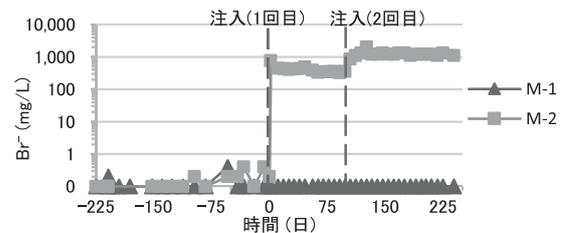


図-3 地下水中の Br<sup>-</sup> 濃度

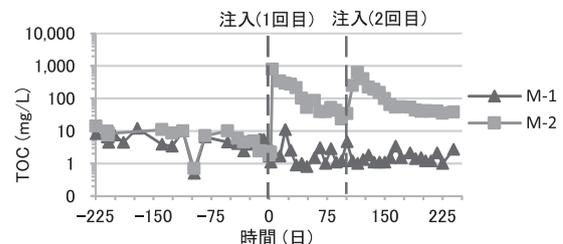


図-4 地下水中の TOC 濃度

#### (3) *Dehalococcoides* 属細菌群の遺伝子量

DCE や VC の嫌氣的な分解に関与する微生物として知られている *Dehalococcoides* 属細菌群の遺伝的保存領域 (16S rRNA), DCE から VC への分解に関与する遺伝子 *bvc A*, あるいは、DCE からエチレンへの分解遺伝子 *vcr A* について、注入前後で比較した結果を表-2 に示す。

これによると、上流エリアの M-1 では顕著な増減はないものの、注入エリアの M-2 では VC が指定基準まで低減した時期に該当する 154 日目ではいずれでも増加が確認できる。*vcr A* に比して *bvc A* の増加が小さいが明確な要因は明らかではないが、16S rRNA と *vcr A* では有意と評価できる。したがって、これら

表一 地下水中の VOC 分解微生物量

項目	遺伝子量 (copies/mL)			
	M-1		M-2	
	0日 (注入前)	154日 (VOC低減 確認後)	0日 (注入前)	154日 (VOC低減 確認後)
Dehalococcoides 属細菌 16S rRNA 遺伝子	$7.3 \times 10^0$	$3.5 \times 10^1$	$6.3 \times 10^0$	$6.3 \times 10^3$
Dehalococcoides 属細菌 <i>bvcA</i> 遺伝子	$< 2.0 \times 10^0$	$4.0 \times 10^0$	$< 2.0 \times 10^0$	$6.7 \times 10^1$
Dehalococcoides 属細菌 <i>vcrA</i> 遺伝子	$3.8 \times 10^0$	$1.8 \times 10^1$	$3.3 \times 10^0$	$2.5 \times 10^3$

の結果は、VOCの低減が嫌気的な微生物分解によるものと裏づけられる。

なお、平均水温は約20℃、注入後のpHは中性付近、ORPについては-100 mV以下まで低下が確認されており、嫌気性微生物の生息に適した環境条件は維持されていた。

#### 4. おわりに

本試験の結果を以下に整理する。

- ①大豆ホエー溶液を鋼矢板で封じ込めた帯水層に注入した結果、地下水中のc1,2DCEを中心としたVOCの低減が確認できた。
- ②指定基準の約8倍のc1,2DCEは6ヶ月でVCの指定基準以下まで低減した。
- ③エチレンの生成、*Dehalococcoides*属細菌群の増殖が確認されたため、嫌気的な微生物分解の関与が示唆された。

以上から、食品産業のプロセス上に副生される大豆ホエーは、土壤汚染対策の分野における資源循環型のバイオレメディエーションの浄化促進剤として活用可能であることが評価できた。

今後は、商品化に向けた検討、汚染土壤浄化分野における持続可能な取り組みを進めていく所存である。

J|C|MA

#### 《参考文献》

- 1) 水澤克哉, 加藤明, 佐藤徹朗, 高畑陽: サステイナブル・レメディエーション (SR) の取り組みと豪州での事例紹介, 第23回地下水・土壤汚染とその防止対策に関する研究集会, pp.274-279, 2017.
- 2) 保高徹生, 張銘, 前川統一郎, 鈴木寿一, 古川靖英: Sustainable Remediationの社会実装に向けた取り組み, 第23回地下水・土壤汚染とその防止対策に関する研究集会, pp.678-681, 2017.
- 3) 緒方浩基, 四本瑞世, 佐藤祐司, 久保博: BDF副生成物の原位置バイオ浄化用栄養材としての適用性, 第19回廃棄物学会研究発表会講演論文集, B5-5, 2008.
- 4) 渡嘉敷唯章, 廣瀬美奈, 崎濱秀明: バイオレメディエーション剤, 特許第5725487号, 2015.
- 5) 高橋季之, 井上潤一, 山口和昭, 大橋貴志, 大保義秋, 三橋秀一: ワインの搾りかすを用いたVOC汚染浄化に関する検討, 第23回地下水・土壤汚染とその防止対策に関する研究集会講演集, pp.85-88, 2017.

#### 【筆者紹介】



田中 宏幸 (たなか ひろゆき)  
 (株)鴻池組  
 土木事業統括本部 技術本部  
 環境エンジニアリング部  
 課長



芦田 茂 (あしだ しげる)  
 不二製油グループ本社(株)  
 事業開発部門 大豆・機能性素材グループ  
 マネージャー