

# 寒冷地における複合微生物製剤を利用した油汚染の浄化

## Purification Work of Oil Contamination using Complex Microbial Preparations in Cold Regions

環境・エネルギー技術部 伊藤 哲郎 TETSURO ITO  
北海道支店 岡崎 久男 HISAO OKAZAKI

寒冷地（北海道）におけるA重油を対象とした油汚染浄化工事において、微生物の分解能力を活用したバイオレメディエーション（バイオオーグメンテーション）技術を適用した。一般に微生物製剤は、微生物活性の関係から、寒冷地における浄化は不向きとされてきたが、本施工事例から、寒冷地でも補助工法を用いることにより、比較的短期間で浄化に適用できることが確認された。本稿では、浄化工事の概要とモニタリング結果、生態系リスク回避などについて報告する。

**キーワード：** バイオレメディエーション、寒冷地、油汚染、A重油、複合微生物製剤、サステナビリティ

In the purification work for oil contamination by heavy fuel oil A in cold regions (Hokkaido), we applied bioremediation (bioaugmentation) technology that utilizes the ability to decomposed by microorganisms. In general, microbial preparations was considered unsuitable for purification works in cold regions due to microbial activities, but from the results of this purification work case, it has been confirmed that bioremediation technology can be applied even in cold regions in a relatively short period of time by using the auxiliary method. This paper reports the outline of the purification work, monitoring results, ecosystem risk aversion methods.

**Key Words:** Bioremediation, Cold regions, Oil contamination, Heavy fuel oil A, Complex microbial preparations, Sustainability

### 1. はじめに

近年、多発する気候危機による自然災害、かつての東日本大震災の津波災害では、多くの油流出災害が発生した。このような災害では、被災範囲が広く、「掘削除去（場外搬出）ではコスト的に現実的でないばかりでなく、環境負荷は過大である。

このような観点から、微生物の分解能力を活用したバイオレメディエーション（バイオオーグメンテーション）技術が徐々に浸透してきたが、適用に際しては、生態系保全の観点から、使用する複合微生物の安全性の確認は重要である。

A重油が対象となる本浄化工事で利用した複合微生物製剤は「オープンハイマー・フォーミュラー・テラザイム」（以下、「バイオ製剤等」）であり、主に親油性の好気性菌から構成され、安全性が確認されたものである。浄化サイト（北海道）は、厳寒期には外気温がマイナ

ス10℃を下回り、地表は春先まで根雪に覆われる厳しい環境である。また、汚染エリアには施設機能上、重要な構造物が点在しており、その機能を生かしながらの構造物下の浄化工事になる。さらに、漏油点付近には不飽和な汚染部位があったほか、埋設配管の関係で地上からの注入が不可能な部位も存在した。寒冷地における微生物を活用した浄化（バイオ浄化）事例の多くは、温暖期に油汚染土壌を一時的に掘削、ランドファーマーミングなどの手法で浄化して浄化土壌を埋め戻す外科的手法が多く用いられている。

しかしながら、これらの手法では、掘削を伴うため、上部の構造物の機能を活かした浄化は不可能となり、浄化施工は温暖期に限定される事になる。

工法の選定にあたっては、掘削除去とバイオ浄化の経済側面と環境側面の比較提案を行い、総合評価の結果、本工法が採用されたが、発注までに時間を要し、浄化工期が大幅に短縮される厳しい工程となった。



写真-1 テラザイム（灰色の粉体）

表-1 浄化対象土量1m<sup>3</sup>あたりの配合

複合微生物製剤(テラザイム)	: 2 kg/m <sup>3</sup>
栄養剤(バイオニュートリエント)	: 2 kg/m <sup>3</sup>
必須元素水溶液	: 50 mL/m <sup>3</sup>
溶媒(希釈水)	: 20 L/m <sup>3</sup>



写真-2 バイオ製剤等の投入



写真-3 攪拌混合

## 2. 浄化工事の概要

### (1) 設計条件

油（A重油：寒冷地用LSA重油）の流出は、地中油送配管の電蝕が原因で地中流出量は約800リットルである。浄化対象は、ボーリング調査による絞り込み調査の結果、面積は1,160m<sup>2</sup>、浄化対象土量は約2,320m<sup>3</sup>（GL-1.0m～3.0mの層厚2m）であった。

浄化対象範囲内には、供用中のボイラー室建屋と貯油タンクがあり、供用を継続しながらの浄化工事であった。

地形は沢筋で地下水流が確認され、河川も存在していたため、浄化施工中の地下水流、河川を介しての汚染拡散、バイオ製剤等注入による汚染の汚染区域外への押出しなどを防止する目的で浄化範囲の外周には軽量鋼矢板遮水壁を設置してから浄化施工に着手した。

### (2) 浄化前の油分濃度

浄化前の油分濃度は、事前の対象範囲の絞り込みボーリング調査の試料を分析した結果から、土壌の油分濃度（TPH）は最大 11,000mg/kg、地下水油分濃度（TPH）は最大 25,000mg/L と高濃度であり、試掘調査では、地下水面に重油のプルーム（原液溜まり）も確認された。

また、鉱油に比べ分解が難しい原因不明の植物性油脂も検出されたため、浄化設計上の検討課題となった。

### (3) 浄化設計（製剤の選定）

土中への漏油量と油種、事前調査の土壌（土性値）ならびに地下水油分濃度、油の流出量、与えられた工期

（約9ヶ月）、発注者の環境保全志向などから、複合微生物製剤「テラザイム（写真-1）」を選定、事前のトリータビリティ結果に基づき、浄化対象土量1m<sup>3</sup>あたりの配合を表-1のように決定した。

バイオ水溶液は、ポリタンクとハンドミキサーを用いて注入直前に混合した（写真-2、写真-3）。

### (4) 浄化工程と浄化目標

浄化工期は、実質6月から翌年2月までの9ヶ月であり、工期後半の3ヶ月は厳寒期であった。

浄化目標は、土壌で 1,000mg/kg 以下、地下水で 10mg/L 以下であった。

土壌の浄化目標については、浄化対象範囲の周囲が、軽量鋼矢板（一部不連続部分は薬液注入工法を併用して連結）で遮水されていて外部からの地下水流入がない事、「油汚染対策ガイドライン」などを判断の基準として、監督官庁と協議のうえ決定した。浄化工期については、漏油からの経過時間、植物性油脂の分解時間なども考慮して決定した。

### (5) バイオ注入施工

設計混合されたバイオ混合液の浄化対象層への注入は、ジオプローブ（写真-4）で行い、水平注入ピッチは原則2mメッシュ（格子）、238箇所とした。注入深度



写真-4 ジオプローブ

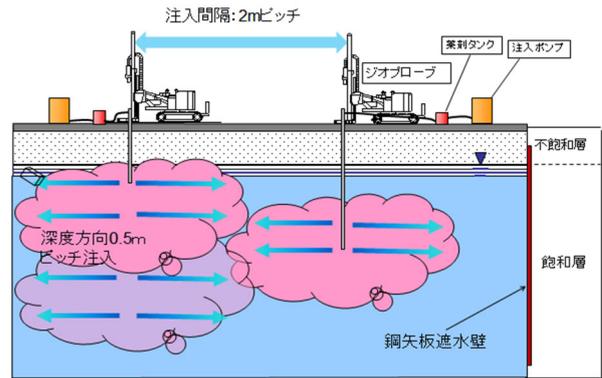


図-1 注入施工のイメージ

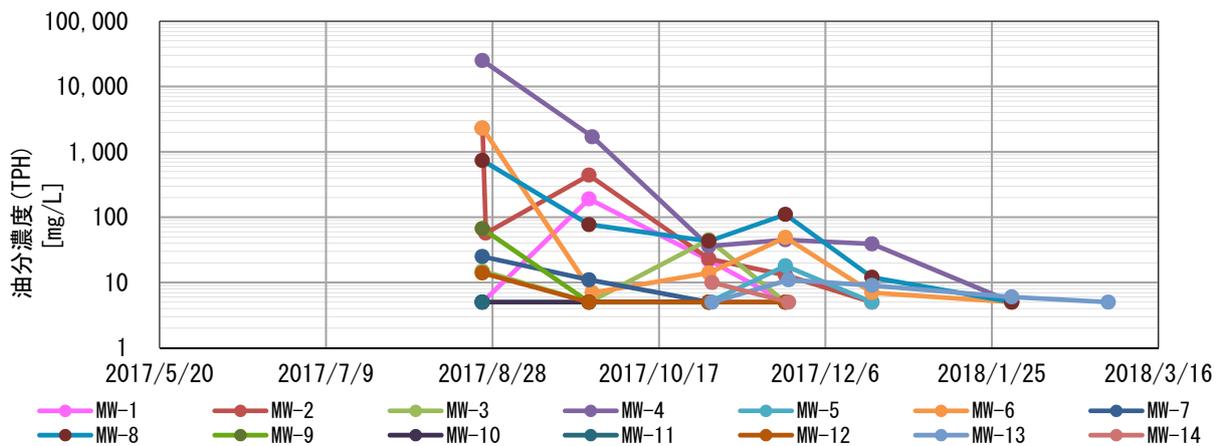


図-2 地下水油分濃度 (TPH) の推移

は、浄化対象層に 50cm ピッチで行った (図-1)。なお、地下埋設配管などの関係から正規の注入位置に注入できない地点については、注入ロッドを斜めにして打設、縦穴からの自然注入を行うなどの工夫を行い、設計注入量を確保した。

(6) 浄化のための補助工法 (複数技術の組み合わせ)

浄化促進には、地中に点在する油の原液溜まり (プルーム) の油を回収する必要があったため、浄化対象範囲内に 14ヶ所のモニタリング井戸を設け、これまでの施工経験から、適宜、揚水位置と注水位置をチェンジしながら、地盤内に人為的な地下水流を生じさせる地下水揚水循環を行い、原液の回収を行なう事で工期の短縮を図った。

また、漏油点付近の不飽和な汚染部位については、浄化に必要な地下水が存在しないため、浄化不良が発生するので、微生物活性に支障の無い界面活性剤を助剤として加えたバイオ混合液を地表面から浸透させ、油分の飽和層への降下を促進して浄化不良を回避した。

3. 浄化進捗モニタリング結果

(1) 地下水油分濃度の推移

浄化前の地下水油分濃度 (TPH) は、プルームが存在したモニタリングポイントで最大 25,000mg/L であったが、図-2 に示したとおり、おおむね 6ヶ月で 10mg/L を下回った。夏から秋には、異常気象で気温が高い期間が続き、想定以上に浄化が進み、栄養剤の消費が激しい状況が進捗モニタリングで確認された。油分濃度にリバウンド傾向も見られたため、栄養剤を追加したほか、地下水の温度、溶存酸素量の管理、揚水循環など、いくつかの補助工法を併用する事により、浄化目標を達成できた。モニタリングポイントは、漏油事故直後の試掘結果、地下埋設物の状況などから 17点を設定 (浄化面積約 700 m<sup>2</sup> 毎に 1点の割合) した。

(2) 土壌油分濃度の推移

浄化前の土壌油分濃度 (TPH) については、プルームが存在したモニタリング井戸の周辺でサンプリングした土壌で最大 16,000mg/kg であったが、図-3 に示したと

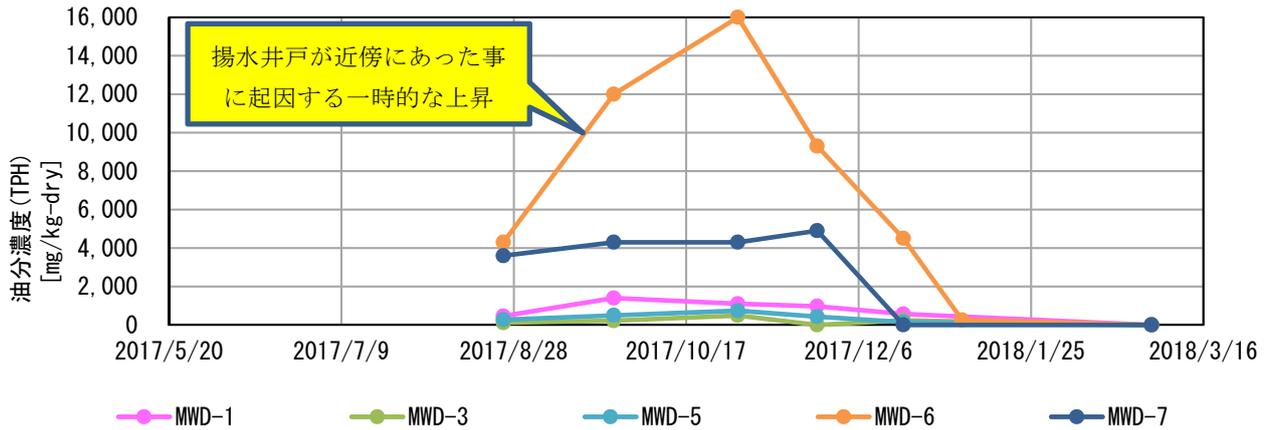


図-3 土壌水油分濃度 (TPH) の推移

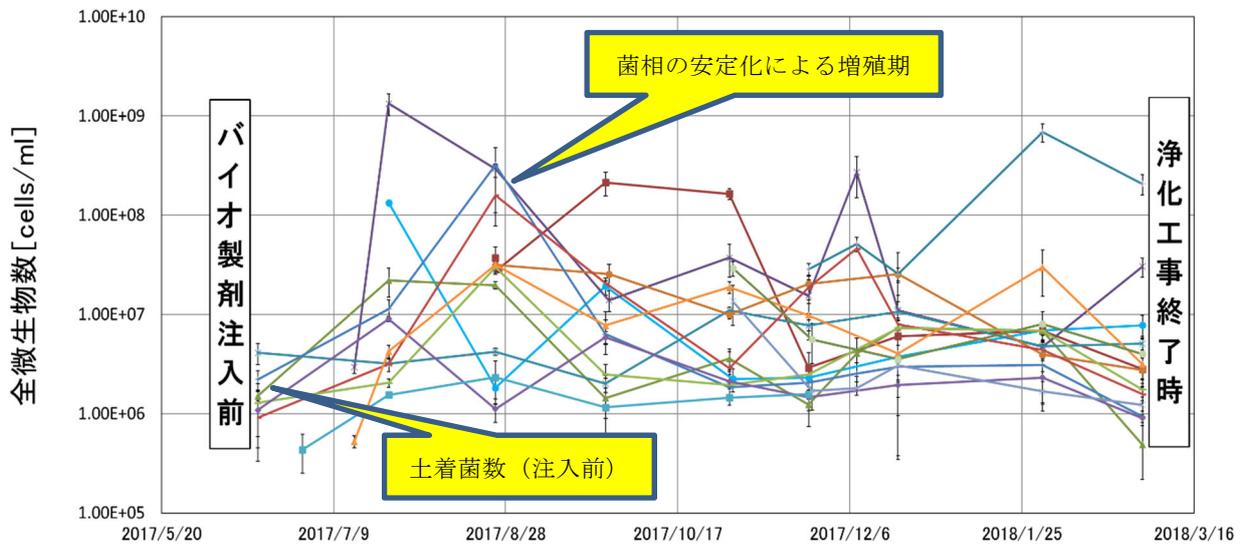


図-4 浄化期間中の全微生物数の推移

おり、おおむね 6 ヶ月で 1,000mg/kg を下回った。一部のモニタリングポイントでは、地下水揚水循環の影響で油分濃度が大きく上昇した。夏から秋には、異常気象で気温が高い期間が続き、地下水同様に想定以上に土壌の浄化が進み、栄養剤の消費が激しい状況が進捗モニタリングで確認され、油分の分解に停滞期が発生したものの、栄養剤追加、補助工法を併用する事により、浄化目標を達成できた。

### (3) 全微生物数の推移

バイオ製剤等注入開始前と浄化完了後の全微生物数の総体的な変化(増殖→漸減)の傾向を図-4に示す。

同図から、複合微生物系(コンソーシア)による油分解中は、全微生物数が大幅に増加するが、浄化の進行に伴い、エサである油の減少とともに油類分解微生物も減少(死滅)し、最終的には、汚染物質である油の分解とともに、その場に適した微生物相、微生物数(注入前の土着菌数)に移行、分解を継続すると推察された

(浄化終了後も緩やかに移行)、自主モニタリングを継続してきた。浄化完了から2年が経過した現在では、油分濃度(TPH)は定量下限値未満、油膜・油臭なしの状態まで浄化が進捗、微生物数が注入前の土着菌の微生物数に戻りつつある状況を確認している。

### (4) 浄化サイトの地中温度の推移

寒冷地施工の可能性を判断するひとつの指標を得るため、厳寒期における地中温度のモニタリングを併せて実施、その測定結果を図-5に示す。測定は12月から3月下旬で、2月の最低気温はマイナス14℃、根雪80cm、地下水位はGL-1.0m~-1.5m、凍結深度は約GL-0.5mの環境下での測定である。

測定結果から、地表面は凍結状態となる厳寒期であっても、地下水は4~8℃のプラス領域にあり、図-2、図-3の結果と併せて考察すれば、浄化は進行していると判断でき、補助工法を用いる事で寒冷地であってもバイオ浄化技術の適用が可能である事が裏付けられた。し

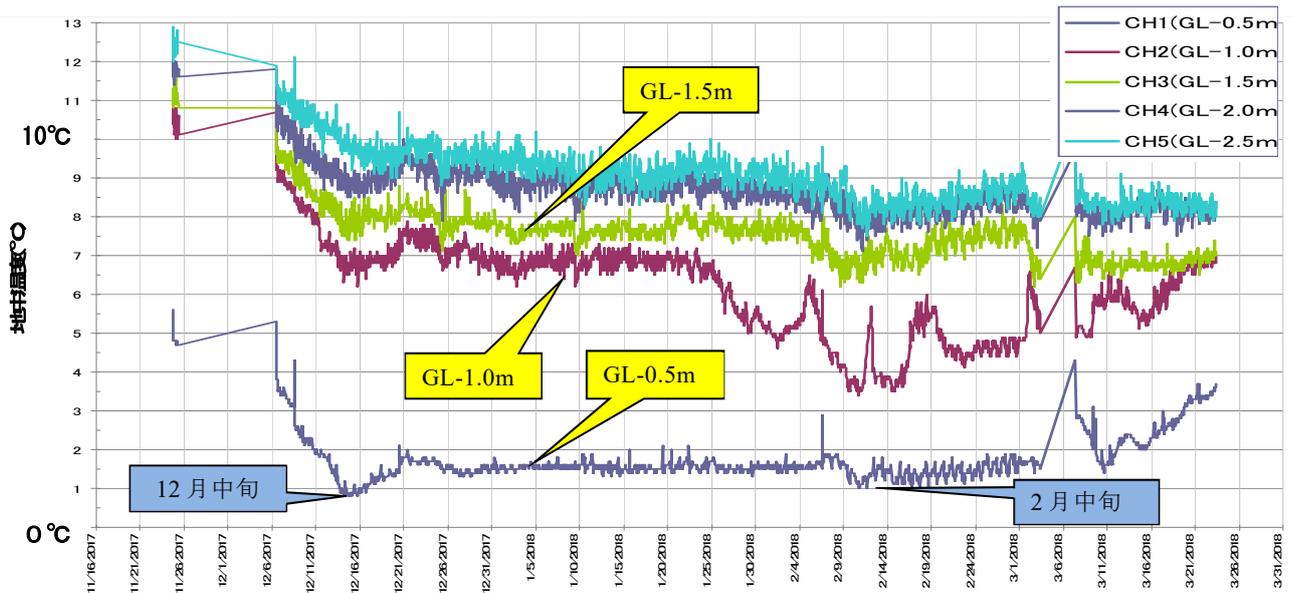


図-5 厳寒期の地中温度の推移

かしながら、厳寒期に凍結した凍結土壌中の微生物については、休眠状態となることから、土壌中の油分の分解は進まないため、凍結深度以浅の浄化は温暖期に進めておく必要がある。

#### 4. 浄化工事費

土留め仮設工事を伴う、掘削除去（良質土埋戻し）の1m<sup>3</sup>あたりの単価は、一般的に¥40,000～50,000といわれているが、本工場の油汚染土壌の浄化費用は、浄化対象区域周囲に設けた軽量鋼矢板遮水壁の設置費用を含め、上記金額の半分以下の工事費で収まった。掘削除去工事に伴う環境負荷、生態系攪乱などの環境リスクがほとんどない事を考えれば、バイオレメディエーションを活用した原位置浄化工事を普及すべきと判断する。

なお、地盤内への過剰な栄養剤注入を注入することは工事費の増加原因となるだけではなく、地下水への環境負荷増大ともなるため、継続的なモニタリングとその結果のフィードバックが土壌生態系保全の観点から重要である。

#### 5. バイオ製剤の安全性

今回採用した複合微生物製剤「テラザイム」については、自然界に存在する石油分解能力に優れた、分類上、古細菌<sup>3)</sup>と呼ばれるドメインに属し、多種多様な微生物群により構成される。

複数の親油性、好気性菌及び通性嫌気性菌から構成さ

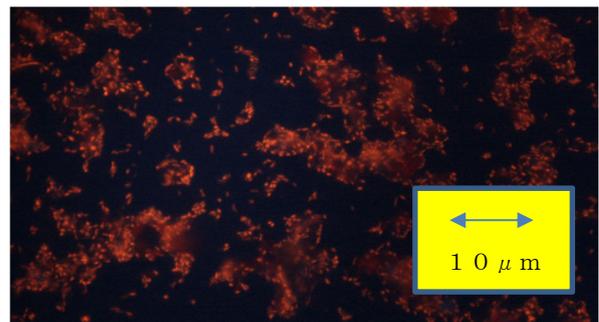


写真-5 染色された微生物群の電子顕微鏡写真

れ、注入された土壌・地下水環境に適した微生物（写真-5）が分解を受け持ち、増殖するため、単一菌と比較すると、適用環境は広いといわれる。

安全性については、国内外の第三者機関によって、マイクロアレイ解析による病原性細菌の有無、水生生物等に対する影響など、生態系に対する安全性試験が行われ安全性が立証されている。また、本技術は「微生物によるバイオレメディエーション利用指針」<sup>2)</sup>に示された、バイオオーグメンテーションに相当する技術である。

今回の浄化進捗モニタリング結果の全微生物数の推移（図-4）から、浄化完了後には、バイオ製剤注入前の微生物数に戻ることが確認できた。

しかしながら、あくまでも全微生物数の推移であり、微生物種の詳細分析については、今後の研究による解明を待ちたい。

## 6. サステナビリティの確認

微生物を活用した土壌・水質浄化技術は、投入する微生物により、原位置土壌環境に一時的な菌相変化を及ぼすため、周辺の土地利用に配慮した対策工法がサステナビリティ確保の観点から必要となる。

施工にあたっては、生態系リスク回避の観点から、

- ①地形
- ②土質（土層構成）
- ③水文条件
- ④周辺土地利用（特に農業利用）
- ⑤動植物生態系

などを十分に検討、必要に応じて、遮水工の併用と遮水工の性能保全（管理）を行う事が必要となる。

また、上記①～⑤の環境条件を考慮した上で、土地の利活用に応じて浄化基準を検討する事が、浄化コストの削減にもつながる。

## 7. まとめ

複合微生物製剤「テラザイム」による寒冷地施工では、9か月という短工期で所定の浄化を成し遂げ、バイオ浄化の寒冷地施工が可能であることを実証、補助工法の採用により、寒冷地での通年浄化施工も実現できた。浄化サイトでは、発注者のご厚意により、浄化完了後も2年間の自主モニタリングを継続、長期的なデータを集積、地下水の油膜・油臭なしの完全浄化を実現できた。

本施工での実績により、補助工法を組み入れることにより、「バイオ浄化は寒冷地には向かない」、「冬期間は浄化工事には進まない」という一般的な考え方から脱却させることができた。

複合微生物製剤を活用した、油及び揮発性有機化合物（VOCs）汚染浄化の生物分解メカニズムについては、明解な説明が難しい部分があるが、これまでの浄化施工経験から判断すれば、微生物に「より居心地の良い環境」を供与できれば、更なる浄化能力の向上、浄化工期の短縮が可能である事がわかった。厳寒期の凍結深度以浅以外は、低温であっても緩やかに浄化は進むことも分かった。

## 8. おわりに

土壌汚染対策は、SDGsの思想から、サステナブル手法で行われるのが原則であるが、現実的には未だ、掘削除去など環境負荷の高い手法が選択されていることは少なくない。特に、掘削除去時の埋戻し土に起因するさま

ざまな生態系攪乱が生じていることは、あまり知られていない。

そのような観点から、安全性の確認されている微生物<sup>2)</sup>を活用した浄化技術普及、LCA、CO<sup>2</sup>発生抑制など、環境保全の観点からの工法選択は、今後、益々重要となる。今後の油汚染を対象とした微生物浄化の課題は、適用可能油種の拡大、補助工法の開発による浄化期間の短縮、浄化メカニズムの更なる解明であると考えられる。また、浄化に関する新たな補助工法、斜面地における浄化手法などの開発も進めたい。また、分解生成物として僅かに発生するCO<sup>2</sup>への対策技術の開発も忘れてはならない。

バイオ製剤を活用した浄化技術では、バイオ製剤や栄養剤の追加注入にコストがかかるため、過剰に注入するケースが見受けられるが、過剰な栄養剤の注入は、流末河川の富栄養化などに繋がる観点から、追加注入コストの低減を図るための技術開発も進めたい。

**謝辞：**本工事の受注にあたりましては、施工実績の少ない寒冷地でのバイオレメディエーション浄化工事ながら、発注者ならびに北海道支店・土木部のご理解、ご協力のもと、さまざまな実証施工にトライさせて頂きました。また、工事竣工後の自主モニタリングに快くご協力、ご指導下さいました発注者ならびに監督官庁のみなさまに深く感謝致します。

## 参考文献

- 1) 中央環境審議会土壌農薬部会土壌汚染技術等専門委員会（環境省）：油汚染対策ガイドライン，平成18年3月
- 2) 経済産業省・環境省：微生物によるバイオレメディエーション利用指針，平成17年3月
- 3) 染谷孝：土壌微生物の世界，築地書館，pp.9-10，2020.9
- 4) 経済産業省 環境管理推進室：事業者の土地の利用のための土壌汚染対策ガイド（改訂版），平成31年3月