

総 説

サハリン油田開発に伴う原油汚染事故を想定した バイオレメディエーション技術の可能性

坂口 直史^{1,2}・Ahmad Iskandar Bin Haji Mohd Taha³・牧 秀明⁴
濱田 誠一⁵・森川 正章^{1,2,3}・奥山英登志^{1,2,3*}

¹ 北海道大学理学部生物科学科, ² 北海道大学大学院地球環境科学研究院・環境生物学部門,
³ 北海道大学大学院環境科学院・生物圏科学専攻, ⁴ 国立環境研究所・水圏環境研究領域,
⁵ 北海道立地質研究所

(2010年1月12日受付 2010年2月25日受理)

Feasibility of bioremediation technologies for managing oil spills caused by the development of the Sakhalin oil fields —Review—

Naofumi Sakaguchi^{1,2}, Ahmad Iskandar Bin Haji Mohd Taha³, Hideaki Maki⁴, Seiichi Hamada⁵, Masaaki Morikawa^{1,2,3}, and Hidetoshi Okuyama^{1,2,3*} (*Department of Biological Science, Faculty of Science¹, Laboratory of Environmental Molecular Biology, Faculty of Environmental Earth Science², Course in Environmental Molecular Biology and Microbial Ecology, Division of Biosphere Science, Graduate School of Environmental Science³, Hokkaido University, Kita-ku, Sapporo 060-0810; Marine Environment Research Team, Water and Soil Environment Division, National Institute for Environmental Studies, Tsukuba 305-8506⁴; Geological Survey of Hokkaido, Otaru 047-0008⁵) Seibutsu-kogaku 88: 150-157, 2010.*

The oil fields at Sakhalin Island, Russia, reached a high level of operation in 2008. The Japanese island of Hokkaido is located to the south of Sakhalin, and is at risk of oil spills following explosions at the Sakhalin oil fields and from accidents involving pipelines and tankers at the fields and in the surrounding seas. Physical, chemical, and biological treatments are indispensable in cleaning up any contaminated regions, such as seas and seashores. In this review, we describe various types of accidents, particularly those involving tanker oil spills around the world and the bioremediation (BR) treatment employed. We emphasize the usefulness of BR in colder regions, such as Hokkaido. Pioneering on-site biostimulation (BS) testing has been performed on the Hokkaido coast with the aim of dealing with oil contamination caused by oil spills at Sakhalin. In the BS process, appropriate nutrients other than carbon sources are supplied to contaminated soils or waters to activate native degraders of the contaminants. In another bioaugmentation (BA) process, isolated microorganisms and their mixtures can be used as degraders of xenobiotics. We proposed and tested a new bioremediation technology, autochthonous bioaugmentation (ABA), in which contaminant-degrading microorganisms indigenous to the contaminated site or predicted contamination site are isolated and used. The feasibility of applying ABA to oil spills caused by the development of the Sakhalin oil fields is discussed.

[**Key words:** autochthonous bioaugmentation, bioremediation, biostimulation, oil spill, Sakhalin oil field]

*連絡先 E-mail: hoku@ees.hokudai.ac.jp

はじめに

サハリン油田はロシア・サハリン島の北東部沖合のオホーツク海にある油田と天然ガス田であり、6箇所の鉱区（サハリンIからVI）が開発されている。サハリンIとIIを合わせた原油の推定可採埋蔵量は34億バレルとされ、現在この2鉱区が本格稼働している。原油の生産は1999年から開始され、日本や韓国へ輸送されている。冬期は結氷のため、タンカー輸送が不可能であったが、2008年12月からのサハリンIIフェーズ2による原油生産活動の本格化とともに、サハリンIIからサハリン南部アニワ湾の不凍港、プリゴロドノエへのパイプラインが完成し、同港から原油の通年出荷が開始された。これにより、年間約90隻のタンカーがアニワ湾を航行することになる¹⁾。

わが国では、サハリン油田開発に伴う油流出事故が起きた場合の対策が強化されている。たとえば、海上保安庁は2000年、津軽海峡および宗谷海峡における原油輸送タンカー事故を想定して、北海道沿岸海域排出油防除計画を改訂し²⁾、北海道に大型油防除資材を重点的に配備した。北海道は2004年に流出油事故災害対応マニュアルを作成している^{3,4)}。また、大規模な油汚染事件発生時における日本、中国、韓国、ロシアの協力関係などを定めたNorthwest Pacific Action Plan（北西太平洋地域海行動計画）の油流出緊急時計画も見直され、その地理的対象範囲がサハリン油田の鉱区があるサハリン東部沿岸まで拡大されている⁵⁾。海上保安庁は北海道沿岸地域を油汚染の影響の大きさ（環境脆弱性指標）によって区分した詳細な環境脆弱性指標図（略称：ESIマップ；Fig. 1）を作成しており、これによって重点的に浄化作業を行う地域の把握が可能になった⁶⁾。

サハリン油田開発に伴う油汚染事故が実際に起きた場合の被害額の想定が行われている⁷⁾。1月に宗谷海峡でタ

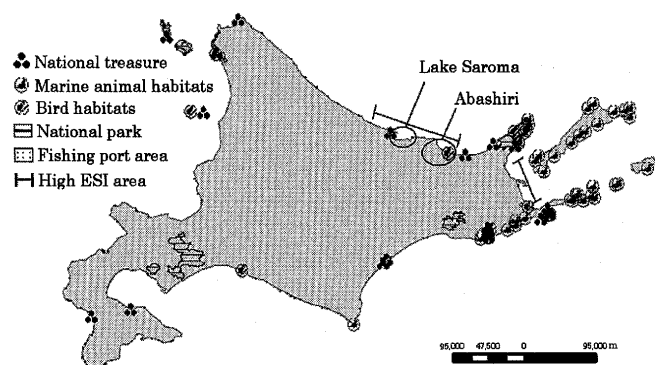


Fig. 1. The environmental sensitivity index (ESI) map of Hokkaido. This figure was cited from reference 47 and has been modified with permission.

ンカーからの漏洩事故が起こり、約5,800 klの原油が流出した場合、網走市の漁業に限定したものではあるが、その予想被害額は最大で23億円に上るとされている。後述するナホトカ号からの重油流出事故の際の被害請求総額が358億円であったのに対し、補償額は261億円であり、漁業被害の請求額50億円に対する補償額が15億7千万円に過ぎなかった⁸⁾というのは興味深い事実である。

以上のように法的な整備、国際的協力関係、また国・関係自治体の協力体制も整い、被害の予想もされているが、石油汚染の生物学的処理法（バイオレメディエーション、BR）の実施についてはほとんど考慮されていない。わずかに国立環境研究所や北海道立地質研究所などの取り組みはある（後述）ものの、研究者個人に任されているのが現状である。土壌汚染対策目的であり、海岸漂着油は対象になっていないが、2003年2月に施行された土壌汚染対策法に基づく環境省と経済産業省による「微生物によるバイオレメディエーション利用指針」の策定（2005年）、環境省による「油汚染対策ガイドライン」の発表（2006年）はわが国におけるBR技術の実用に道を拓いたといえよう。

石油で汚染された環境の修復技術には機械力や人力による物理的方法、油吸収剤や油処理剤の散布を行う化学的方法、およびBRがある。労力やコスト、環境に与える影響を最小限に抑えることが可能な点でBR技術が優れていると考えられるが、わが国の実用例は非常に少ない。

BRにはバイオスティミュレーション法（BS）と一般的には汚染箇所と異なる場所で取得された単一の汚染物質分解菌やその混合物からなるコンソーシアを大量培養し汚染現場に直接投入するバイオオーグメンテーション法（BA）がある。BS、BAと、後述する原地性バイオオーグメンテーション法（autochthonous bioaugmentation, ABA）の違いを模式的にFig. 2に示し、それぞれの特徴についてFig. 3にまとめた。

ABAはBSとBAの長所を生かし、短所を補う汚染除去方法として提案されている⁸⁾。ABAは汚染箇所、または油井の近接地、港湾、原油貯蔵地、タンカーの航路沿いの海域や海岸など汚染の可能性が高い場所から予め得たサンプル（水、土壌、海砂など）を用いて原油分解能力を有する微生物群を、実際に汚染処理を行う環境に類似した条件で選択的に集積し、その微生物群または単離株を汚染箇所に還元することで汚染を除去するという、いわばready-madeのBAである。

サハリン油田で油井の暴噴、パイプラインの破損、タンカーなど船舶の事故により多量の原油・石油類が流出した場合、北海道沿岸の汚染は避けられない⁹⁾。漁業が

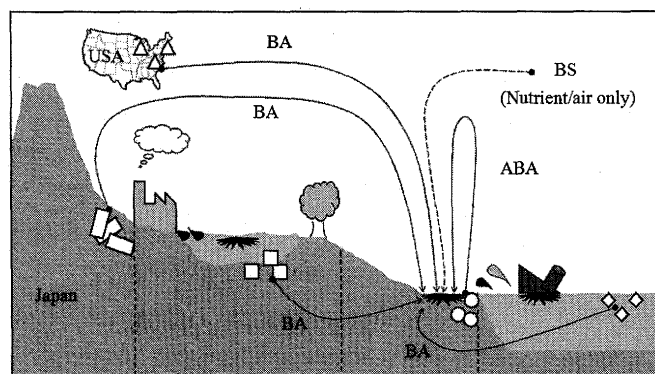


Fig. 2. Illustrational presentation of biostimulation (BS), bioaugmentation (BA), autochthonous bioaugmentation (ABA) treatments. In BS (broken arrow), only nutrients and/or oxygen are introduced to soils to enhance the activity of native contaminants-degrading microorganisms. Foreign microorganisms derived from the various places are added to contaminated sites in BA. In ABA, native (autochthonous) microorganisms are used and these organisms should be enriched under the conditions mimicking the sites, where ABA will be implemented. Open symbols with different shape indicate individual site-specific oil-degrading microorganisms and/or their mixture, whose routes of transfer are shown by the solid arrow. Native microorganisms for ABA are shown by the open circle in this figure. See Figure 3 for details of BA, BA and ABA.

主産業である北海道において原油汚染が与える影響は大きく、汚染事故が起きた場合はできるだけ迅速、かつ短期間でその影響を抑えるための備えが必要である。本稿では、これまでにわが国を含め世界で起きた海洋・海岸の石油汚染事故とその対応を概観する。次いで、低温下でのBRの実例、サハリン油田を原因とする北海道沿岸における原油汚染を想定したBSの実例とABAの利用性について解説する。ABAについてはまだ実験室レベルの結果であるが、原油分解菌群の集積を、液体培地で行うのではなく、油汚染が予想される現地の海砂（土壌）と

予想される汚染物質である原油を用いて土壌中で集積し、それを汚染された土壌に投与するのが特徴である。また、コンソーシアだけではなく、単離株を使った実験結果についても触れる。

海岸の石油汚染とバイオレメディエーション (BR)

わが国近海で起きた石油流出事故として1997年1月2日のナホトカ号の例がある¹⁰⁾。ロシア船籍のタンカー「ナホトカ号」が島根県沖106 kmで波浪により船体が破断し、約6,200トンの重油が流出した⁷⁾。1月7日には福井県坂井郡三国町（当時、現・坂井市三国町）の海岸にナホトカ号の船首部分と重油が漂着した。この事故で、島根県から秋田県にかけて広範囲の海岸が汚染された¹¹⁾。

流出した重油の回収は、ほとんどが物理的手法によって行われた。海上での浮流油の回収は主に油回収船などの機械の力を借りて、砂浜などの漂着油は約30万人近くと言われるボランティアの人力によって回収された。海上で回収された重油が約6,400 klであったのに対し、陸上で回収された重油は約40,300 kl（海水、土砂などを含む）であった。陸上での回収方法は先に述べたように主に手作業であり、作業に関わったボランティアのうち5人が過労死するなどの二次災害も起きている¹²⁾。ナホトカ号の事例を含めて本稿で扱うタンカーからの石油流出事故についてTable 1にまとめた。

1989年3月24日、アメリカ船籍のタンカー、エクソン・バルディス号がアラスカで座礁し、約40,000トンの原油が流出したのは歴史に残る石油流出事故であろう。洋上での回収作業も行われたが、2,400 kmの海岸が汚染された。1989年に最初のBRのフィールド試験が、Knight Islandの2箇所で行われた。この試験は親油性肥料Inipol22 (CECA S.A. Paris La Defense, France) と親水

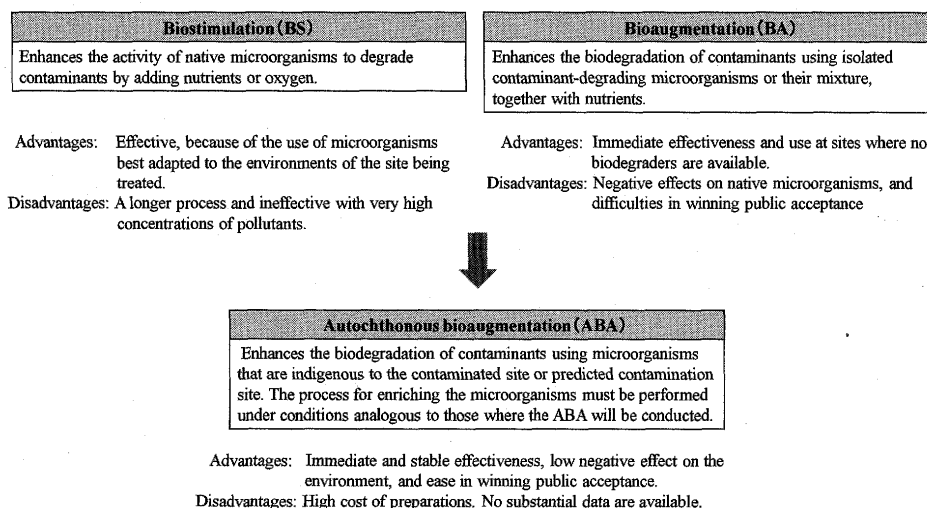


Fig. 3. Biostimulation (BS), bioaugmentation (BA), autochthonous bioaugmentation (ABA) and their characteristics.

Table 1. Tanker oil spills and bioremediation (BR) treatment.

Year/ Month	Name of the tanker	Flag state	Oil spilt (tons)	Oil type	Country polluted	Type of BR implemented ^a	Ref.
1989/3	<i>Exxon Valdez</i>	USA	40,000	Crude oil	USA	BS	10,13,14
1991/8	— ^b	—	100	Crude oil	Israel	BS	15
1997/1	<i>Nakhodka</i>	Russia	6,200	Heavy oil	Japan	BA ^c	10,11
2002/11	<i>Prestige</i>	Bahamas	60,000	Heavy oil	Spain	BS	16
2007/12	<i>Hebei Spirit</i>	Hong Kong	10,800	Crude oil	Korea	—	42

^a BS, biostimulation; BA, bioaugmentation.^b No information is available.^c Experimental tests.

性肥料 Customblen28-8-0 (Sierra Chemicals, Milpitas, Calif.) を添加した BS であり, その有効性が確認されている. 上記の2種類の肥料を用いた BS は 1990 年と 1991 年の夏期に, それぞれ 1426 件, 223 件行われている^{13,14}.

タンカーからの石油流出による海岸汚染は多数の事例が知られているが, イスラエルでの原油流出事故 (1991 年 8 月)¹⁵ や北スペインでの重油流出事故 (2002 年 11 月)¹⁶ の際も BS 試験が行われ, 施肥による効果的な油分解が報告されている. 一方, 1994 年夏に Venosa ら¹⁷ は, アメリカ デラウェア州の海岸で原油を意図的にまき, BS のフィールド試験を行い, その有効性を報告している.

以上紹介した事例は油種を問わず, 石油の汚染除去に BS が有効であることを示している. これらの事実, ほとんどの海岸域には石油分解菌が常在しており, 施肥によってその賦活化が可能であること, また, これらの石油分解菌を有効に利用することが, より優れた浄化効果をもたらす可能性を示唆しているといっていよいであろう.

北海道沿岸地域でのバイオレメディエーション (BR) 適用の可能性

低温環境下の BR とその有効性 気温は, 流出油の性状, 細菌の個体数, 油分解活性などに大きく影響する. 低温環境下では, 原油の粘度が上がり, 一方でより毒性の高い低分子量の炭化水素の揮発量が小さくなり, 生物分解の速度を低下させる¹⁸.

一般的に土壤中では 30°C から 40°C の範囲, 淡水中では 20 から 30°C の範囲, 海水中では 15 から 20°C の時にもっとも分解率が高い. 北海道網走の 8 月と 2 月の平均気温は, それぞれ 19.1°C, -7.2°C である¹⁹ ことから, 北海道沿岸で BR を実施するに当たって克服しなければならない課題の 1 つが低温である.

Mulkins-Phillips と Stewart²⁰ は, 海砂と海水をサンプルとして, 石油分解菌を液体培養により集積した. この集積物で液体培地中の燃油 (bunker C fuel oil) の分解率を調べた. 15°C では 7 日間の培養で可溶性芳香族化合物の 41~85% が分解されたが, 5°C, 14 日間の分解率は 21~52% であった. また, Ferguson ら²¹ は南極の重機専用燃油 (SAB) で汚染された土壌サンプル由来の液体集積物を用いて, 液体培地中の SAB 油の分解率が 4°C では 10°C とほぼ同程度であること, またその分解率は最大分解率 (42°C) の約 15% であったと報告している. これらの実験結果は, 分解速度は低下するものの, 低温環境でも BR は有効であることを示している. 南極の土壌を用いた Stallwood ら²² の室内実験, Mohn ら²³ や Thomassin-Lacroix ら²⁴ が北極で行った石油分解の小規模なフィールド実験においても, 低温下での BS の有効性が示されている.

サハリン産ヴィーチャーズ原油の性状 原油は黒褐色の粘性のある液体で, その中に非常に多くの化合物を含む. 主要化合物は炭化水素であるが, 硫黄, 窒素, 酸素を含む化合物も存在する. 炭化水素は飽和分と芳香族分, レジン分, アスファルテン分と 4 つに分けられ, それぞれの成分含有比は, その原油が産出された地域によって大きく異なる. また, 成分の違いが生分解性に大きな影響を与える²⁵.

サハリン産ヴィーチャーズ原油の際立った特徴はその粘性の低さで, 日本にも大量に輸入されている中東産アラビアンライト原油の約 3 分の 1 である. また, 硫黄含有量もアラビアンライト原油の約 8 分の 1 と低く, 工業利用の観点からは, ヴィーチャーズ原油は良質な原油である. また, ヴィーチャーズ原油はレジン分の含有量がアラビアンライト原油の半分程度で, アスファルテン分は検出されず, アラビアンライト原油に比べ, 分枝状アルカン, 多環芳香族炭化水素であるフェナンスレン類が多く含ま

れる。分枝状アルカンハ直鎖状アルカンに比べて生分解されにくく、フェナンスレン類も難分解性の物質であることから、環境中への残留による被害が懸念される²⁶⁾。

サハリン油田開発に関わる石油流失事故の事例 サハリンでは油田の開発に伴ってさまざまな石油流出事故が起きている。1999年にサハリンIIの掘削基地の貯蔵タンカーが流され約480 lの重油が流出し、2004年には座礁した浚渫船から189トンの重油が流出している。一方、2004年にはパイプラインの油漏れによって30,000 lの原油が流出している。さらに、2005年にはサハリンIのチャイボ鉱区で作業船から約5.5トンのディーゼル油が流出している²⁷⁾。ロシアの環境保護団体「サハリン環境ウォッチ」の2009年4月の報告によると、サハリン北部でパイプラインから流出した原油が川に流れ込み、同年2月上旬からの流出量が計150トン以上に上る事故が起きている²⁸⁾。

サハリン油田およびサハリン近海での油流出事故は北海道沿岸地域にも影響を与えると考えられる。実際、2006年早春知床半島を中心にした北海道オホーツク海沿岸に油に汚染された多数の海鳥が打上げられているのが発見された²⁹⁾。この原因は特定されていないが、オホーツク海の流れと流氷の流れから、サハリン油田開発との関連性が指摘されている²⁷⁾。

北海道沿岸地域でのBSの取り組み 北海道はサハリン島の南に位置しており、東サハリン海流がサハリン島の東海岸を南下することは北海道がサハリン油田開発の影響を受けやすい主要因のひとつである (Fig. 4)。多数のタンカーの航行が見込まれる宗谷海峡 (42 km) の強風や、春から夏にかけて頻発する霧はタンカーの事故の可能性を高め⁹⁾、冬期間の低温とともに流氷は汚染事故の処理をいっそう困難にするとと思われる。一方で、オホーツク海は日本近海有数の漁場であり、2005年知床半島を中心とした地域、海域は世界遺産に登録されている³⁰⁾。石油流出事故が何時起こるかは予測不能だが、事故が起きる場所と、被害が及ぶ場所・その程度は想定可能である。油汚染事故の被害を最小限に抑えるため、BR法を含む可能な限りの対応策を備えておくべきと考えられる³¹⁾。

牧ら^{26, 32)}の国立環境研究所、北海道地質学研究などのグループはサハリン油田を原因とする石油汚染事故を想定して、北海道・オホーツク海沿岸のサロマ湖岸において、BSのフィールド試験を行った。Fig. 1に示すように、この地域は特に脆弱な環境であるとされている。実験は、寒冷期である10月から翌年6月まで (平均気温5.4℃) と、温暖期である6月から11月まで (平均気温16.5℃) の2回に分け、ヴィーチャーズ原油を用いて行われた。農業用肥料を添加した実験区と、添加しないコ

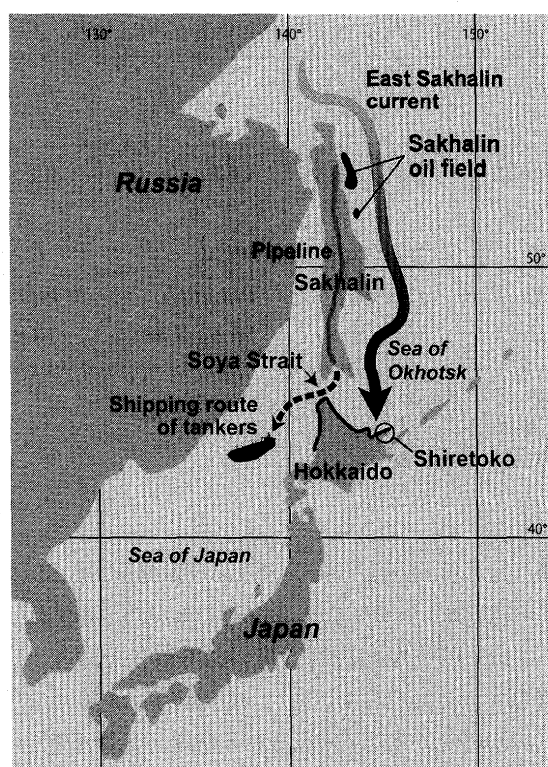


Fig. 4. The locations of Hokkaido and Sakhalin Islands. The Hokkaido coastlines that are at risk of oil contamination from the Sakhalin oil fields are shown by the solid line. This figure is from reference 31 and has been modified with permission.

ントロール区を設定し、経時的にサンプルを採取し、原油総量の減少率と、代表的な炭化水素成分の分解率が調べられた。肥料添加区では、シクロヘキシルアルカン類などの炭化水素の分解が促進されることがわかった。しかし、難分解性の高分子芳香族化合物であるフェナンスレン類や、ジベンゾチオフェン類については、肥料の添加による分解促進効果があまりみられず、土中に残留する傾向が見られた。この実験で得られた肥料添加による比較的易分解性の炭化水素の分解促進効果が、寒冷期の実験においてより顕著であったのは興味深い事実である。この実験によって、北海道の沿岸域で、しかも寒冷期でもBR (BS) が有効であることが示された。

原地性バイオオーグメンテーション法 (ABA) とその可能性

ナホトカ号の事故後、アメリカのオッペンハイマー社の石油分解菌製剤「TerraZyme™」を用いたBA試験が兵庫県香住町において試みられ、その有効性が示されているが、この実験は微生物製剤を大規模に石油汚染現場に投入してBAを行ったわが国では貴重な事例である³³⁻³⁵⁾。海岸線が薄く広範囲に漂着油によって汚染された場合は、人力による回収よりもBRがより有効と考えられる³¹⁾。

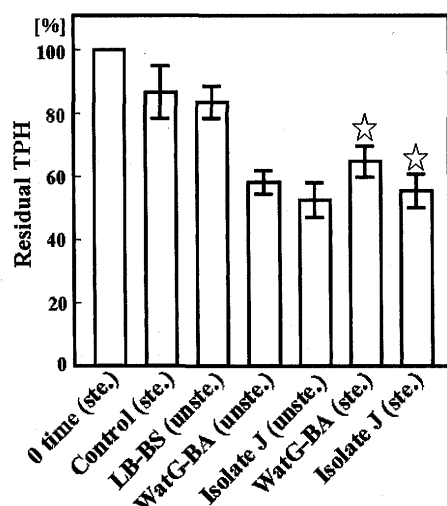


Fig. 5. Autochthonous bioaugmentation (ABA) using isolate J (*Rhodococcus erythropolis*) in paddy soil microcosms. Isolate J, an isolate from the paddy soil, was inoculated to sterilized (ste.) and unsterilized (unste.) soil microcosms consisting of paddy soil contaminated with diesel oil. *Pseudomonas aeruginosa* strain WatG (WatG), which had been isolated as a diesel oil degrader from a water interceptor attached to the oil tank of a resident of Sapporo City, Hokkaido (ref. 38), was used as a control bacterium. All the soil microcosms were left at 20°C for one week. Luria-Bertani medium (LB) was used to supply nutrients. The percentage of residual total petroleum hydrocarbon (TPH) was compared with the zero time samples. Each bar represents the mean value with the standard deviation ($n=5$). Stars indicate a significant difference at the $P<0.05$ level of significance. This figure is from reference 8 with permission.

アメリカ合衆国においてはBAの実施例が多く、アメリカ環境保護庁 (US Environmental Protection Agency) のHP³⁶⁾には20種類を超える微生物剤 (bioremediation agents) が登録されている。しかし、BAがわが国において広く用いられることがなかったのは、外来性微生物を自然界に投与することが地域住民の同意を得にくいという問題があると思われる³¹⁾。

Ueno ら⁸⁾は人工的にディーゼル油で汚染させた水田土壌から単離した菌株、*Rhodococcus erythropolis* strain J, が同じ水田土壌中ではディーゼル油分解菌として取得されていた*Pseudomonas aeruginosa* WatG^{37,38)}よりも高いディーゼル油分解活性を示す (Fig. 5) ことから、BAを実施する際に、土着の分解菌またはその混合物を利用することの有用性を指摘し、このようなBAをAutochthonous bioaugmentation (原地性バイオオーグメンテーション, ABA) と名づけた (Fig. 2, 3)。

Hosokawa ら³⁹⁾および永井⁴⁰⁾はサハリン油田を原因とする石油汚染事故が北海道沿岸に及んだ場合を想定し、オホーツク海に面した網走市の海岸から採取した砂を微生物源、原油 (アラビアンライト) を炭素源として、同じ海砂を培養基質として集積培養を行い、原油分解微

生物群 (コンソーシアム 2) を取得した。また、通常行われる無機塩を含む液体培地を用いて集積した原油分解微生物群 (コンソーシアム 1) も取得し、網走市海岸の同じ場所で採取した海砂を原油で汚染させ、それにコンソーシアムを接種し、実験室レベルのABAを行った。その結果、コンソーシアム2がコンソーシアム1の2倍の原油分解率を示したが、コンソーシアム1を用いたBAとBSに差はなかった。BSおよびABAの過程の海砂中の微生物群集構造を16S rRNA 遺伝子の高度可変領域を対象としたPCR-変性剤濃度勾配ゲル電気泳動法 (PCR-DGGE) で解析したところ、コンソーシアム2を接種した海砂には、原油分解菌に由来すると思われる多数の薄いDNAバンドがみられたのに対し、BSを行った海砂とコンソーシアム1を接種した海砂には、優占している数本の濃いDNAバンドがみられた。コンソーシアム1と2の原油分解率の差から、これらの濃いDNAバンドに由来する細菌の増殖が、コンソーシアム2でみられる原油分解菌の増殖を阻害していると考えられている。つまり、海砂中には多様な原油分解菌が存在するが、これらの菌の増殖は、特定の優占種によって妨げられ、それが原油の分解に影響を及ぼしている可能性が高いことが示唆されている。

また、コンソーシアム1由来の単離株は、無機塩液体培地中の原油を2週間で約50%分解したが、海砂培地ではほとんど分解活性を示さなかった。一方で、コンソーシアム2からの単離株は、液体培地中では原油分解能を示さず、海砂培地では分解能を示した。この結果から、細菌を含む微生物の集積培養では、通常微生物がよく増殖する液体培地が用いられるが、そのようにして得られた菌群 (または単離菌) はBAを液体培養条件で行わない限り、その能力を示さないと考えられる。海岸の漂着油をBAにより処理する場合には、その処理条件と類似した条件下で集積した微生物群、あるいはそれからの単離株を用いて行うBA、すなわちABAがより有効であると考えられる。先に述べたVenosa ら¹⁷⁾の実験では現地の海水から取得した液体培養により集積した石油分解菌群を用いたBA (ABAとみなすことができる) も行われているが、その分解活性はBSと差がなかった。この事実もBAに用いる分解菌 (群) の取得方法 (集積方法) の重要性を示唆している。

結 語

ITOPF (The international Tanker Owners Pollution Federation, UK) の統計によれば過去30年間でタンカー事故の件数は約6分の1に減少している⁴¹⁾。タンカーの貯油槽を細分化して、仮に事故が起こっても漏洩を最小

限にするなどの工夫も施されているという。しかし、2007年12月韓国西岸のTaean近海で起きたヘベイ・スプリット号の原油流出事故はエクソン・バルディス号の事故の3分の1の規模といわれ、韓国に大きな被害をもたらした⁴²⁾ように、タンカー事故を含む石油流出事故は石油を使う限り避けられないと見るべきである。特にわが国のように石油を産することがなく、かつ海に囲まれている国の場合はその対策を怠ってはならないと考えられる。

ABAの概念は新しいものではなく⁴³⁾、かつて“reinoculation (再接種)”と呼ばれ、実験室レベルで有効性が確認された事例も少なくない³¹⁾。しかし、Thompsonら⁴⁴⁾の「汚染が起きてからの分解微生物を得るのは実用的でない」という指摘もあるように、従来はほとんど顧みられることはなかった。しかし、自然界の細菌類のほとんどが難培養性であるか、培養不可能である事実⁴⁵⁾がある一方で、それらの微生物は自然条件では連綿と種を維持していることを考えれば、自然により近い条件で、難培養性のものを含め、できるだけ多様な石油分解菌を培養(集積)してBAに利用しようとする技術(ABA)は理にかなっていると見ることもできるであろう。

サハリン油田を原因とする石油流出事故の影響を受ける海岸線は北海道に限定した場合でも総海岸距離3,062 km⁴⁶⁾の約半分の1,500 kmに及ぶ。そのすべての区域でABAの実施を前提とした石油分解微生物の集積と蓄積は非現実的である。しかし、先に述べたESIマップを参考にした自然環境の脆弱性と、地域の経済的重要性など

も考慮して、その沿岸域の微生物叢、石油分解菌の種類を調べ、ヴィーチャーズ原油分解菌群や単離株を取得し、その利用性についてのデータを蓄積して、万が一に備える必要があると考えられる。ABAをより実用的なものとするには、集積培養過程の迅速化など方法の改善と集積した菌群の有効な維持・管理方法の確立が必要である。また、微生物学、地質学、気象学、海洋学、石油工学の分野との連携により汚染が予想される地域、海域のデータ、予想される汚染物質の種類や特性に関するデータを蓄積しておくことによって、いったん汚染事故が起きたときに、より短時間で効果的な汚染浄化が可能になると考えられる (Fig. 6)。

要 約

2008年ロシア・サハリン島の油田開発は商業段階に入った。北海道沿岸域はサハリン油田開発を原因とする油井の暴噴、パイプラインやタンカーなど船舶の事故による汚染の危険に曝されている。石油により汚染された海域、海岸域の回復にはさまざまな対応が必要である。本総説では、これまで起こった主にタンカーの石油流出事故とそれに対する生物学的処理法(バイオレメディエーション, BR)による対応、特に北海道の冷涼な気候とBRについてその有用性を考慮しながら紹介した。北海道オホーツク海沿岸ではすでに石油汚染除去を想定したバイオスティミュレーション法(BS)が試験的に実施されている。BSは汚染現場に栄養塩などを与え土着の微生物の石油分解能を賦活化する方法である。一方、筆者らはBSと、別に取得した石油分解能力の高い細菌を汚染現場に投与するバイオオーグメンテーション法(BA)の特長を併せ持つ原地性バイオオーグメンテーション法(ABA)の有効性を検討している。サハリン油田が原因で汚染事故が起きた場合のABAの実用の可能性について論じた。

本研究は北海道大学大学院学生として在籍していた上野晃生氏(現、帯広畜産大学)、永井基規氏(現、メグミルク)、寺垣純氏(現、ホクレン農業共同組合連合会)、細川玲亜氏(現、東京大学大学院)の成果によるところが大きい。斜里町役場の増田泰氏には海砂サンプリングで協力を頂いた。本研究は科学研究費基盤(C; 17510061)、ノーステック財団、ホクサイテック財団、住友財団、財団法人発酵研究所(IFO)の支援により行われた。お礼を申し上げる。

文 献

- 1) <http://www.foejapan.org/en/>
- 2) <http://www.kaiho.mlit.go.jp/syokukai/soshiki/keikyu/kan-kyou/>
- 3) 戸田 宏: スラブ研究センター研究報告シリーズNo. 78.

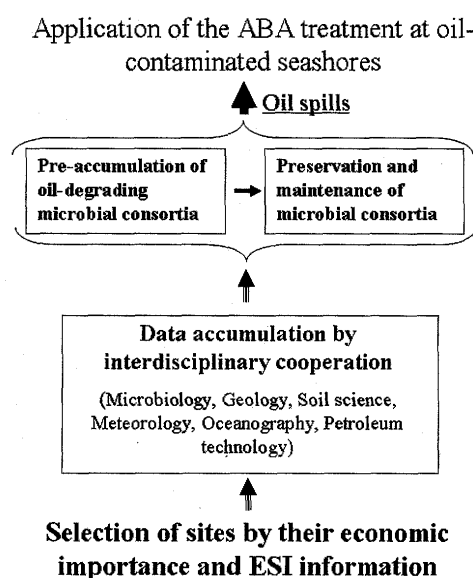


Fig. 6. Schematic presentation of the expected application process of autochthonous bioaugmentation (ABA) treatment. ESI is an abbreviation of environmental sensitivity index.

- サハリン北東部大陸棚の石油・ガス開発と環境, p.41-46, 北海道大学スラブ研究センター (2001).
- 4) 真柳直幸: スラブ研究センター研究報告シリーズ No. 78. サハリン北東部大陸棚の石油・ガス開発と環境, p.47-66, 北海道大学スラブ研究センター (2001).
- 5) http://www.mlit.go.jp/index_e.html
- 6) 濱田誠一: 平成21年北海道立地質研究所調査研究報告会報告資料集, p.18-23, 北海道立地質研究所 (2009).
- 7) 矢崎真澄, 後藤真太郎, 濱田誠一, 沢野伸浩, 佐尾邦久, 佐尾和子: 地域安全学会梗概集, **17**, 11-14 (2005).
- 8) Ueno, A., Ito, Y., Yumoto, I., and Okuyama, H.: *World J. Microbiol. Biotechnol.*, **23**, 1739-1745 (2007).
- 9) 佐伯 浩, 大塚夏彦: サハリン大陸棚石油・ガス開発と環境保全 (村上 隆), p.189-204, 北海道大学図書刊行会 (2003).
- 10) http://www.mlit.go.jp/kaiji/seasafe/safety11_.html
- 11) 増田信彦: ナホトカ号沈没に伴う日本海沿岸地域への被害に関する社会経済的・生態的影響調査- 1999 年日本海経済白書, p.93-105, 富山大学環日本海地域研究センター (1999).
- 12) <http://www.jprn.org/japanese/library/ronbun/saigai.html>
- 13) Lindstrom, J. E., Prince, R. C., Clark, J. C., Grossman M. J., Yeager, T. R., Braddock, J. F., and Brown, E. J.: *Appl. Environ. Microbiol.*, **57**, 2514-2522 (1991).
- 14) Swannell, R. P. J., Lee, K., and McDonagh, M.: *Microbiol. Rev.*, **60**, 342-365 (1996).
- 15) Rosenberg, E., Legmann, R., Kushmaro, A., Taube, R., Adler, E., and Ron, E. Z.: *Biodegradation*, **3**, 337-350 (1992).
- 16) Jiménez, N., Viñas, M., Bayona, J. M., Albaiges, J., and Solanas, A. M.: *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **77**, 935-945 (2007).
- 17) Venosa, A. D., Suidan, M. T., Wrenn, B. A., Strohmeier, K. L., Haines, J. R., Loyebeerhart, B., King, D., and Holder, E.: *Environ. Sci. Technol.*, **30**, 1764-1775 (1996).
- 18) Venosa, A. D. and Zhu, X.: *Spill Science & Technology Bulletin.*, **8**, 163-178 (2003).
- 19) <http://www.jwa.or.jp/>
- 20) Mulkins-Phillips, G. J. and Stewart, J. E.: *Appl. Microbiol.*, **28**, 915-922 (1974).
- 21) Ferguson, S. H., Franzmann, P. D., Snape, Ian., Revill, A. T., Trefry, M. G., and Zappia, L.R.: *Chemosphere*, **52**, 975-987 (2003).
- 22) Stallwood, B., Shears, J., Williams, P. A., and Hughes, K. A.: *Appl. Microbiol.*, **99**, 794-802 (2005).
- 23) Mohn, W. W., Radzinski, C. Z., Fortin, M. C., and Reimer, K. J.: *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **57**, 242-247 (2001).
- 24) Thomassin-Lacroix, E. J., Eriksson, M., Reimer, K. J., and Mohn, W. W.: *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **59**, 551-556 (2002).
- 25) Atlas, R. M.: *Appl. Microbiol.*, **30**, 396-403 (1975).
- 26) 牧 秀明, 前川公彦, 岡本 康男, 濱田誠一: 用水と廃水, **50**, 1005-1011 (2008).
- 27) <http://www.foejapan.org/aid/jbic02/sakhalin/okhotsk/20060406.html>
- 28) <http://mediajam.info/topic/876531>
- 29) <http://www.town.shari.hokkaido.jp/he2005/umidori/umidori2.html>
- 30) <http://whc.unesco.org/en/list/1193>
- 31) Hosokawa, R., Nagai, M., Morikawa, M., and Okuyama, H.: *World J. Microbiol. Biotechnol.*, **25**, 1519-1528 (2009).
- 32) 牧 秀明: 平成21年北海道立地質研究所調査研究報告会報告資料集, p.15-17, 北海道立地質研究所 (2009).
- 33) Hozumi, T., Tsutsumi, H., and Kono, M.: *Mar. Pollut. Bull.*, **40**, 308-314 (2000).
- 34) Tsutsumi, H., Hirota, Y., and Hirashima, A.: *Mar. Pollut. Bull.*, **40**, 315-319 (2000).
- 35) Tsutsumi, H., Kono, M., Takai, K., Manabe, T., Haraguchi, M., Yamamoto, I., and Oppenheimer, C.: *Mar. Pollut. Bull.*, **40**, 320-324 (2000).
- 36) <http://www.epa.gov/>
- 37) Ueno, A., Hasanuzzaman, M., Yumoto, I., and Okuyama, H.: *Curr. Microbiol.*, **52**, 182-185 (2006).
- 38) Wongs, P., Tanaka, M., Ueno, A., Hasanuzzaman, M., Yumoto, I., and Okuyama, H.: *Curr. Microbiol.*, **49**, 415-422 (2004).
- 39) Hosokawa, R., Nagai, M., Kondo, H., Teragaki, J., and Okuyama, H.: *Contaminated Soils: Environmental Impact, Disposal and Treatment* (Steinberg, R.V.), Nova Science Publishers, Inc., Hauppauge, NY (2010). 印刷中.
- 40) 永井元規: 北海道大学・大学院環境科学院 平成20年度修士論文 (2008).
- 41) <http://www.itopf.com/>
- 42) <http://news.bbc.co.uk/2/hi/asia-pacific/7135896.stm>
- 43) Weber, W. J. Jr. and Corseuil, H. X.: *Water Res.*, **28**, 1407-1414 (1994).
- 44) Thompson, I. P., van der Gast, C. J., Ciric, L., and Singer, A. C.: *Environ. Microbiol.*, **7**, 909-915 (2005).
- 45) Torsvik, V., Goksoyr, J., and Daae, F. L.: *Appl. Environ. Microbiol.*, **56**, 782-787 (1990).
- 46) <http://www1.kaiho.mlit.go.jp/KAN1/soudan/kyori.html>
- 47) <http://www2.kaiho.mlit.go.jp/index.html>