

過熱水蒸気による汚染土壌浄化・底泥浄化の可能性

稲田 勉

JST（独立行政法人 科学技術振興機構）の独創的シーズ展開事業を活用し、「過熱水蒸気による油汚染土壌浄化技術」の開発に成功した。過熱水蒸気と汚染土壌を攪拌接触させる処理装置により油分を蒸気蒸留して分離回収するものであり、油分を過熱水蒸気内に容易に溶け込ませることができることから、従来技術では困難であった油汚染濃度 30,000 mg/kg の細粒系土壌を 100 mg/kg 以下に浄化できる技術である。

本技術は、油汚染土のみならず、底泥浄化、VOC 汚染土壌処理、廃棄物処理等にも利用できるものと期待されており、本稿では、閉鎖性水域に堆積している汚染底泥の処理にも有効であることを確認した。

本技術を活用した汚染土壌浄化・底泥浄化の可能性は十分に高いものと考えている。

キーワード：過熱水蒸気、汚染土壌、底泥、油汚染土、高濃度、浄化、オンサイト処理

1. はじめに

環境関連法の相次ぐ制定・改正により、環境問題への取組みが本格化する中で、土壌浄化事業は急速に市場を拡大しようとしている。1997年に企業による土壌汚染が発覚し、社会問題化したことを背景に、全国の工場・事業所で土壌汚染の調査・浄化に対する需要が急増している。ベンゼンを除き直接的な法規制の対象から外れていた油汚染が問題になりつつある。

近年、土地再開発、売却等に伴う土壌調査や、事業者がISO14001に関連する環境管理の一環として行う自主調査で土壌汚染が判明する事例が多発しており、関心が高まるとともにこの対策が喫緊の課題となっている。

油汚染土の処理技術は、①土砂の洗浄、②セメントキルンによる処理、③焼却処理、④バイオレメディエーション等が現有しているが、それぞれ以下の問題点を有している。

- ①洗浄：洗浄水の処理・細粒分に付着した油分の処理
- ②キルン処理：油分濃度（高濃度）によっては引き受け不能。処理施設までの運搬費
- ③焼却処理：コスト高。処理施設までの運搬費
- ④バイオ処理：処理期間が長期に渡り、広いヤードを必要とする。高濃度には対応できない。

コスト及び周辺への環境負荷を低減するために、高濃度に対応可能で、オンサイト処理が可能な処理方法が望まれている。

また、環境省が毎年実施している全国調査によると、

BOD、CODの環境基準の達成率という尺度でも淡水域、海域ともに横ばい状態が何年も続いており、有機汚染問題は相変わらず未解決である。そればかりか、都市河川や湖沼・内湾の閉鎖性水域のなかには、かえって悪化しているところもある。河川・湖沼・海域などのいわゆる環境水を浄化することはいよいよ焦眉の課題となってきた。

これらに対応する従来の工法としては、ヘドロを浚渫等の海洋土木的な手法で除去する方法や海底に砂などをまいてヘドロを覆う方法等があった。しかし、浚渫土の廃棄場所不足や使用する適当な砂の枯渇等の問題点があり、浚渫土処理の問題が発生せず、新たな砂投入の必要もない現位置底泥浄化が可能な過熱水蒸気を用いた工法が開発が望まれている。

以上の課題を解決する技術の一つとして着目したのが、過熱水蒸気による土壌・底泥浄化技術である。

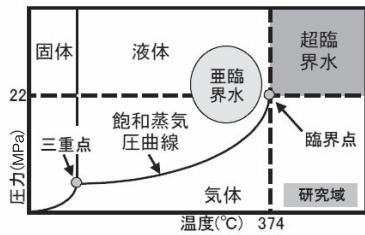
2. 過熱水蒸気の特徴

(1) 過熱水蒸気とは

過熱水蒸気とは、飽和水蒸気を常圧でさらに過熱した、無色無臭の高温の水蒸気のことである。

水の温度・圧力を 375℃、22 MPa まで上げると、水でもない蒸気でもない均一な流体となる。この点が臨界点で臨界点以上の状態を超臨界水、この水による反応を超臨界水反応と呼ぶ。臨界点よりも温度・圧力の低い熱水（亜臨界水）による反応を水熱反応と呼ぶ。

過熱反応は、有機溶媒のような化学物質でなく、水を溶剤として使用するため、環境に優しい安全な反応と言える。



図一 水の臨界点

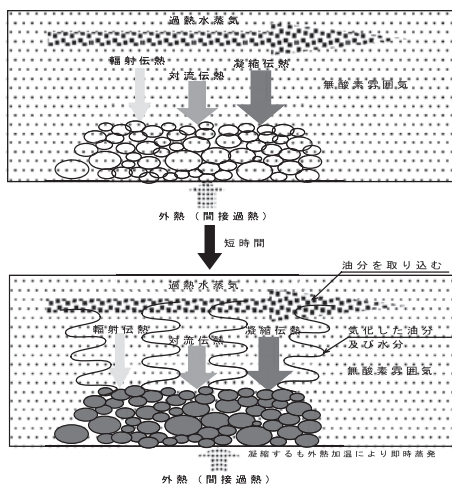
(2) 過熱水蒸気の特徴

過熱水蒸気は、以下の特徴が知られている。

- ①酸素をほとんど含まない雰囲気と比較的簡便にでき、防爆性・非酸化性を有する。
- ②同温度の空気（熱風）と比べると熱効率が高く、コンパクトな設備設計が可能である。
- ③排気を循環利用することにより、排気によるエネルギー損失が少なくなる。
- ④処理中に発生した水以外の成分を水蒸気とともに凝縮回収できる。

(3) 過熱水蒸気の浄化メカニズム

処理を無酸素雰囲気で行うため複合伝熱が起こり、即時に土粒子を加熱して油分・水分を蒸発させ過熱水蒸気内に取り込むことで効率的な処理が可能となる。



図一 外熱加熱による油分除去のメカニズム

3. JSTの独自のシーズ展開事業による技術開発¹⁾

(1) JSTの独自のシーズ展開事業

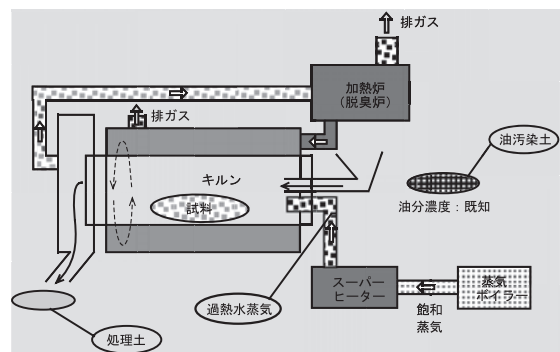
JST（独立行政法人 科学技術振興機構）の独自の

シーズ展開事業に、「過熱水蒸気による油汚染土壌浄化技術」を課題とした申請書を応募し、採択された。

平成17年3月より開発を開始し、平成19年9月に完了し、平成20年4月9日に成功認定を受けた。以下にその概要を示す。

(2) 装置の概要

開発した技術の処理原理は、500℃に過熱した水蒸気を汚染土壌に接触させ、土壌中から油分を過熱水蒸気中に取り込むことによって除去するものである。装置の概要を図一3に示す。



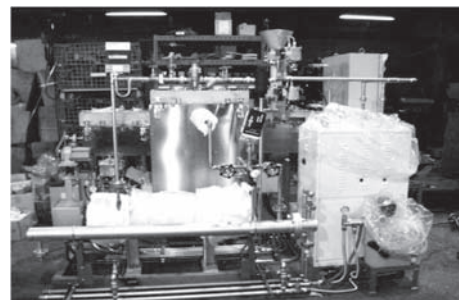
図一 開発した技術の概要

(3) 開発に使用した主要装置

開発は、表一1、2に示すラボ機と実験機で行った。開発に用いた実験機は、処理容量が100kg/時間、過熱水蒸気温度は最大500℃、装置のサイズは長さ7m、幅2.5m、高さ3mで可搬式8t車に搭載可能、

表一1 ラボ機の概要

| | |
|---------|----------------------------------------------------------------------------|
| 設備(装置)名 | 過熱水蒸気処理装置(ラボ機) |
| メーカー | ジョンソンボイラ社製 |
| 仕様目的・機能 | 過熱水蒸気処理 |
| 主な仕様 | 処理能力 10~30kg/時間 過熱水蒸気温度 最大500℃ 蒸気量 最大10kg/時間 外熱供給 500℃ 処理速度 可変 |



表一 実験機の概要

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| 設備（装置）名 | 過熱水蒸気処理装置（実験機） |
| メーカー | ジョンソンボイラ・タナベ社製 |
| 仕様目的・機能 | 過熱水蒸気処理 |
| 主な仕様 | 処理能力 100～300 kg/時間 過熱水蒸気温度 最大 500℃ 蒸気量 最大 10～30 kg/時間 外熱供給 500℃ 処理速度一定，可搬式 8t 車搭載 |
|  | |

熱源は灯油燃焼である。

過熱水蒸気が持っている高い伝熱性を処理に効率よく活用するためには，処理対象物中の水分量を低下させることが有効であり，回収油を燃焼させ，発生する廃熱を前処理に利用するなどの工夫が施されている。

(4) 開発成否認定基準

原泥濃度 30,000 mg/kg 程度の高濃度油汚染土砂について浄化処理後の油分濃度を 100 mg/kg 以下とする。

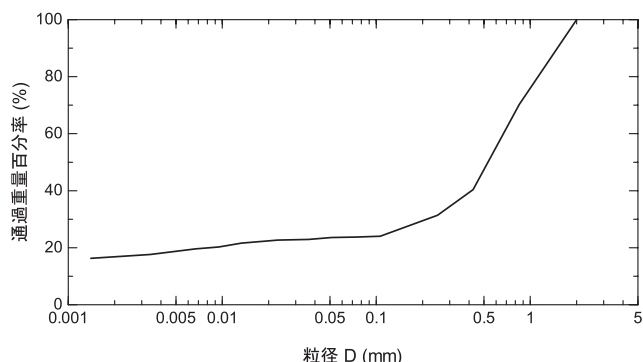
(5) 開発の概略工程

成否判定基準を満足すべく，表一 3 のような手順にて開発を行った。

(6) 実験に用いた原泥

原泥の油汚染土として，珪砂に Na 系ベントナイト

を混合した人工調整試料に A 重油を所定の割合で添加した模擬汚染土を用いた。使用した人工調整試料の粒径加積曲線を図一 4 に示す。



図一 4 粒径加積曲線

本試料は，比重 $G_s = 2.694 \text{ g/cm}^3$ ，強熱減量 $L_i = 1.8\%$ ，液性限界 $w_L = 189.0\%$ ，塑性限界 $w_P = 14.5\%$ ，塑性指数 $I_P = 174.5$ である。

(7) 実験の手順

ラボ機により，過熱水蒸気装置の基本性能の確認をし，メカニズム解明等のデータを収集した。必要に応じて改造し，その知見を活かした実験機を製作し，それを用いて，開発成否の認定基準を満足できる性能を有しているか否かについてのデータを収集し，その性能を確認した。なお，今回実施した分析方法は，赤外線吸光法による分析を行った。

(8) ラボ機を用いた実験

上記土壤に A 重油及び水分を添加し，1 kg/1 バッチをラボ機に投入し，残留濃度が 100 mg/kg 以下になる処理条件を見出す目的で下記の検討を行った。

[実験条件]

油分濃度：30,000 mg/kg，水分量：10%，模擬汚染土 1

表一 3 開発の概略工程

| 時期 | 項目 |
|--------------|---------------------------------|
| 平成 17 年 3 月 | 開発開始 |
| 平成 17 年 10 月 | ジョンソンボイラ過熱水蒸気処理装置にて基礎実験実施 |
| 平成 18 年 1 月 | アクリル模型製作 |
| 平成 18 年 2 月 | ラボ機搬入試運転，ラボ機軸部，投入排出部等の改造 |
| 平成 18 年 6 月 | 改造ラボ機搬入，メカニズム解明等のデータ収集 |
| | 実験機搬入 |
| | 炉内無酸素，ガス漏洩措置 |
| 平成 18 年 11 月 | 改良実験機搬入，実用機に関するデータ収集開始 |
| 平成 18 年 12 月 | 蒸気量 3 倍投入改造，脱臭炉燃焼用ブロワー 60 HZ 対応 |
| 平成 19 年 9 月 | 三者会議最終報告会 |

バッチ当たり：1.0 kg, 過熱水蒸気：500℃, 投入時反応室内温度：500℃, 過熱水蒸気量：投入土量の10%, 暴露時間：5分, 投入前品温上昇：90～100℃に加温

[実験結果]

実験結果を表-4に示す。

表-4 実験結果一覧表 (ラボ機)

| 過熱水蒸気温度 (℃) | 蒸気量 (kg/時間) | 処理時間 (分) | 処理量 (kg/処理時間) | 含水率 (%) |
|-------------|-------------|----------|---------------|---------|
| 500 | 1.8 | 5 | 1.5 | 10.0 |
| 処理前油分濃度 | | | 30,000 mg/kg | |
| 処理後 | | | 32 mg/kg | |

(9) 実験機を用いた実験

原泥濃度 30,000～50,000 mg/kg の高濃度油汚染土砂について浄化処理後の油分濃度を 100 mg/kg 以下とすることが可能であるかを確認するため、表-5に示す3ケースについて実験を行った。

表-5 実験ケース一覧表

| | ケース1 | ケース2 | ケース3 |
|-----------|--------------|--------------|--------------|
| 油分濃度 | 30,000 mg/kg | 40,000 mg/kg | 50,000 mg/kg |
| 水分量 | 10% | 10% | 10% |
| 処理土量 | 100 kg/時間 | 100 kg/時間 | 100 kg/時間 |
| 過熱水蒸気温度 | 500℃ | 500℃ | 500℃ |
| 投入時反応室内温度 | 350℃ | 500℃ | 500℃ |
| 過熱水蒸気量 | 16.6 kg/時間 | 15.5 kg/時間 | 15.5 kg/時間 |

[実験結果]

3ケースの実験結果を表-6～8に示す。処理速度

表-6 ケース1の実験結果 (実験機)

| 過熱水蒸気温度 (℃) | 蒸気量 (kg/時間) | 処理時間 (分) | 処理量 (kg/処理時間) | 含水率 (%) |
|-------------|-------------|----------|---------------|---------|
| 500 | 16.6 | 145.1 | 100 | 5.00 |
| 処理前油分濃度 | | | 30,000 mg/kg | |
| 処理後 | | | 53 mg/kg | |

表-7 ケース2の実験結果 (実験機)

| 過熱水蒸気温度 (℃) | 蒸気量 (kg/時間) | 処理時間 (分) | 処理量 (kg/処理時間) | 含水率 (%) |
|-------------|-------------|----------|---------------|---------|
| 500 | 15.5 | 92.2 | 100 | 10.0 |
| 処理前油分濃度 | | | 40,000 mg/kg | |
| 処理後 | | | 50 mg/kg | |

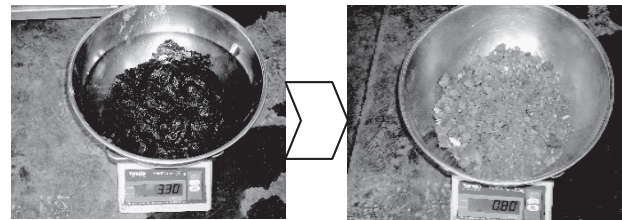
表-8 ケース3の実験結果 (実験機)

| 過熱水蒸気温度 (℃) | 蒸気量 (kg/時間) | 処理時間 (分) | 処理量 (kg/処理時間) | 含水率 (%) |
|-------------|-------------|----------|---------------|---------|
| 500 | 15.5 | 113.8 | 100 | 15.0 |
| 処理前油分濃度 | | | 50,000 mg/kg | |
| 処理後 | | | 110 mg/kg | |

が 100 kg/時間 (実用機換算 2.5 t/時間) では、含水率 5～15%, 油分濃度 40,000 mg/kg 以下の場合には処理後の平均濃度が 100 mg/kg 以下となり、JST 成否認定基準を満足することがわかった。

また、50,000 mg/kg でも平均濃度で 110 mg/kg まで除去可能であることがわかった。

実機による油汚染土の処理前と処理後の土壌状況を写真-1に示す。



処理前 30,000 mg/kg 処理後 100 mg/kg以下

写真-1 実機による処理前と処理後の状況

(10) 開発成否認定基準を満足

実験によって得られた結果は、JSTの開発成否認定基準である「原泥濃度 30,000 mg/kg 程度の高濃度油汚染土砂について浄化処理後の油分濃度を 100 mg/kg 以下とする」を満足するものであり、開発成功との認定を受けた。

なお、50,000 mg/kg でも平均濃度で 110 mg/kg まで除去可能であることがわかった。

(11) 期待される効果

本新技術は、油分を過熱水蒸気内に容易に溶け込ませることができることから、従来技術では困難であった油汚染濃度 30,000 mg/kg の細粒系土壌を 100 mg/kg 以下に浄化することが可能となった。

また、処理装置を車載方式にしたことで、高濃度油汚染土壌を移送させることなく汚染現場でのオンサイト処理が可能である。

さらに、特殊な薬剤や高圧処理を必要としないことから安全性が高く、土壌に付着した油分と浄化した土砂を分離回収することが容易であり、回収油の再利用など資源の有効利用も期待される。

(12) 従来技術との比較

開発した技術は、従来技術と比較して、表—9のような特徴を有している。

表—9 従来技術との比較 (油分濃度 30,000 mg/kg 程度の場合)

| | 従来技術 | 開発した技術 |
|-------------|-----------------------------|--------------------------------------------|
| 比較項目 | 焼却処理 | 過熱水蒸気処理 |
| 時間当り処理能力 | 5 t/時間 | 5 t/時間 |
| 処理場雰囲気 | 酸化雰囲気 (燃焼) | 無酸素雰囲気 |
| 除去率 | 95%以上 | 95%以上 |
| 処理 | 処理時の燃焼に伴うダイオキシン等の処理が必要 | 油の場合は燃料再利用, 処理土は現地還元 |
| 処理費用 (販売価格) | 2~3万円/m ³ (当社試算) | 1.3~2.4万円/m ³ 程度 (油分・土質条件により変動) |

4. 想定される過熱水蒸気の利用分野

過熱水蒸気は、食品・環境・材料・エネルギーなど多くの分野で注目されている。環境に関する利用分野としては、表—10のような用途が考えられる。

表—10 想定される過熱水蒸気の利用分野

| | 概要 |
|------------------------|--------------------------------------------------|
| 油汚染土壌処理 | 油槽所, ガソリンスタンド, 食品工場, レストラン等の跡地の油汚染土壌対策 |
| 底泥浄化 | 河川, 湖沼, 運河, 港湾等の閉鎖性水域内底泥浄化ため池, 養鰻場, 養殖場, 濠等の底泥浄化 |
| VOC 汚染土壌処理 | クリーニング工場・精密機器メーカー工場等の跡地の VOC 汚染土壌対策 |
| 廃棄物処理 (脱臭, 防臭処理, 乾燥減容) | 貝殻処理 (電力排水口の定期検査時の残渣対策) |
| 乾燥 (前処理の1次乾燥装置利用) | 食品残屑 (食品リサイクル法) 乾燥減容, メタン発酵残屑乾燥減容, 無汚染浚渫土の乾燥減容 |

5. 過熱水蒸気技術を用いた底泥浄化事例²⁾

上記 (表—10) の内、過熱水蒸気による底泥浄化の可能性について検討したので、その概要を以下に紹介する。

(1) 使用機と底泥

実験は、前述のラボ機 (表—1) によった。処理条

件は、水蒸気温度 500℃, 処理時間 10 分, 蒸気量は 20 L/時間であった。

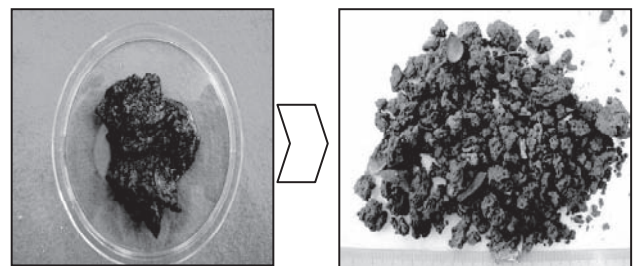
本実験で用いた汚泥は、東京海洋大学 (東京都港区) 近隣の高浜運河の堆積泥であり、閉鎖性水域に堆積した汚染底泥と言える。

(2) 実験結果

実験結果を表—11に示す。

表—11 実験結果一覧

| 分析項目および単位 | 高浜海原泥 | 処理底泥 |
|---------------------|-------|--------|
| 強熱減量 (%) | 14.5 | 7.1 |
| 有機炭素 (%) | 4.8 | 1.6 |
| 窒素含有量 (mg/g・Dry) | 5.38 | 1.84 |
| りん含有量 (mg/g・Dry) | 1.40 | 1.44 |
| 硫化物 (mg/g・Dry) | 1.30 | 0.11 |
| 化学的酸素要求量 (mg/g・Dry) | 70.0 | 2.1 |
| 油分 (%) | 0.64 | < 0.01 |



写真—2 高浜運河原泥と処理底泥の状況

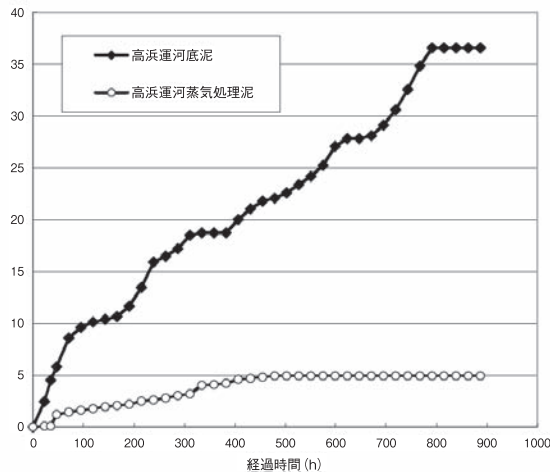
過熱水蒸気処理によって、硫化物の 91.5%が、化学的酸素要求量 (COD) の 97%が除去され、油分は検出限界以下になる等、著しい改善結果となっている。CODの著しい低下は、過熱水蒸気処理によって汚泥が引き起こす水環境へのインパクトを低減するものである。

さらに、原泥と過熱水蒸気処理泥の酸素消費へのインパクトを経時的に追うために、クーロメータ (BOD測定装置) を用いて BOD 量を調べることにした。その結果を図—5に示す。

これによると、高浜運河原泥は、試験後 790 時間まで BOD はほぼ一定に増え、790 時間後に一定となったことがわかる。一方、過熱水蒸気処理底泥の酸素要求速度は小さく、しかも 480 時間で一定に達し、その後の増加はなかった。

過熱水蒸気処理によって、高浜運河に堆積した汚泥の、環境水の酸素消費に与えるインパクトが著しく下がるものと推察される。

生物環境にとって、水質の溶存酸素の状況は重要で



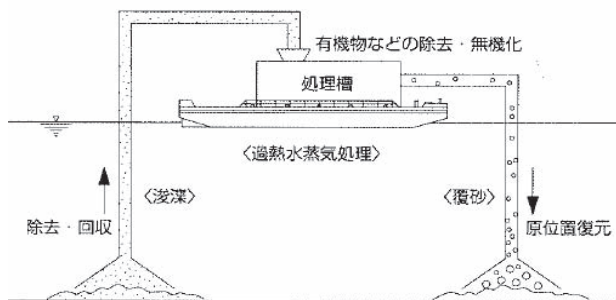
図一五 クーロメータ (BOD 測定装置) 試験結果

ある。当然、溶存酸素が低下すれば水生生物の成育は難しくなり、また貧酸素条件下では生物にとって有毒な硫化水素やメタンの発生が考えられる。このため、有機物を多く含む汚泥の、酸素消費に与えるインパクトが底質にとっても水質にとっても重要な問題になる。

未処理の底泥に対し、過熱水蒸気による処理底泥の酸素要求量が著しく低下することは、油分や、硫化物の削減以上に生物環境へのインパクトを低下できるものと期待される。

(3) 想定されるシステム

前述の成果をもとに、閉鎖性水域における底質改善システムの想定図を図一六に示す。



図一六 底質改善システムの想定図

有機汚濁した底泥は、従来法である浚渫法で除去・回収される。この汚泥は、過熱水蒸気槽にて含有する有機物等が除去され、無機化される。無機化された処理泥は、やはり従来工法の覆砂法によって原位置に戻されるというものである。

過熱水蒸気による処理を適用する以外には、従来工法の範疇であり、特段の技術開発を要しない適用性の高いシステムであると考えている。

6. おわりに

以上、JSTの独創的シーズ展開事業を活用して開発した過熱水蒸気による油汚染土壌浄化技術の概要を紹介した。

開発した技術は、過熱水蒸気と汚染土壌を攪拌接触させる処理装置により油分を蒸気蒸留して分離回収するものであり、油分を過熱水蒸気内に容易に溶け込ませることができることから、従来技術では困難であった油汚染濃度 30,000 mg/kg の細粒系土壌を 100 mg/kg 以下に浄化できるものである。

本処理装置は車載方式としており、高濃度油汚染土壌を移送させること無く汚染現場での処理が可能であるとともに、特殊な薬剤や高圧処理を必要としないことから、安全性が高く、土壌に付着した油分と浄化した土砂を分離回収することが容易であり、回収油の再利用など資源の有効利用も期待出来るものである。

本技術は、油汚染土のみならず、底泥浄化、VOC 汚染土壌処理、廃棄物処理等にも利用できるものと期待されており、本稿では、閉鎖性水域に堆積している汚染底泥の処理にも有効であることを確認した。

本技術を活用した汚染土壌浄化・底泥浄化の可能性は十分に高いものと考えている。

謝辞：JSTの独創的シーズ展開事業による本技術開発は、東京海洋大学・社会連携推進共同センターの中村宏准教授の研究成果を基に、平成17年3月から平成19年9月にかけて、東洋建設株式会社の佐藤道祐氏と柳畑亨氏が実施したものである。

本稿を執筆するにあたり、上記関係者から数々の貴重な資料の提供とアドバイスを受けた。ここに記して、お礼を申し上げます。

JICMA

《参考文献》

- 1) 佐藤道祐, 「過熱水蒸気による油汚染土壌浄化技術」開発実施報告書, 2007年10月, pp.1-21
- 2) 中村宏, 川口真記, 佐藤道祐, 過熱水蒸気の利用技術, 過熱水蒸気技術集成, 2007年, pp.143-151

【筆者紹介】

稲田 勉 (いなだ つとむ)
東洋建設㈱
土木事業本部 土木技術部

