

研究課題名・研究番号＝バイオ技術を中心とした不法投棄現場及び不適正最終処分場の修復・再生システムの開発（K1853）

国庫補助金精算所要額（円）＝62,198,000

研究期間（西暦）＝2004-2006

代表研究者名＝古市 徹（北海道大学）

共同研究者名＝谷川 昇（北海道大学），石井一英（北海道大学），小松敏宏（北海道大学），稲葉陸太（北海道大学），亀井克彦（千葉大学），矢口貴志（千葉大学），惣田昱夫（静岡理工科大学），岡村和夫（清水建設（株）），峠 和男（（株）大林組），笹井 裕（東和科学（株）），郷田浩志（東和科学（株））

## 1. 研究目的

循環型社会の構築に向けた廃棄物管理技術をより安全、安心なものとするためには、特に重要課題である青森・岩手県境に代表される不法投棄現場の原状回復を適切に行う技術（修復）の開発と、さらに、不適正最終処分場の適正化を図るシステム開発（再生）が必要である（図1参照）。その際には、環境にやさしい方法として、二次汚染の可能性が少ない省エネ型のバイオ技術の積極的な導入が望まれる。

また、修復と再生作業においては、処理施設の数や規模、処理できる廃棄物の種類に制約がある場合が多く、それらの制約条件に応じて、廃棄物の撤去作業を行う必要がある。

つまり、掘削から運搬、処理・リサイクルといった全体の原状回復作業を適正かつ効率的に行うためには、図2に示すような「前処理（リスク低減化プロセス）」が重要である。この前処理を徹底することにより、掘削された廃棄物中の有害物質濃度を低減化ができ、作業環境の安全性管理や処理施設の確保が容易になるだけでなく、資源化の選択肢も可能となる。さらに、運搬・処理・リサイクルにかかる全体コストの低減化も期待される。また、無害化物の残置の検討も可能となる。

そこで、本研究では、室内及び現地試験を通して、我々が提案するリスク低減化プロセスを、現地への適用性を考慮し具現化する。そして、撤去作業のバッファとして機能する前処理が、後段プロセス（運搬、処理・リサイクル）に及ぼす効果を明らかにし、既存の物理化学的技術との組み合わせによる修復・

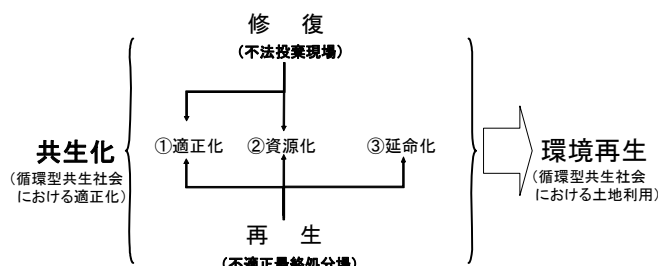


図1 環境再生に向けた修復と再生の考え方

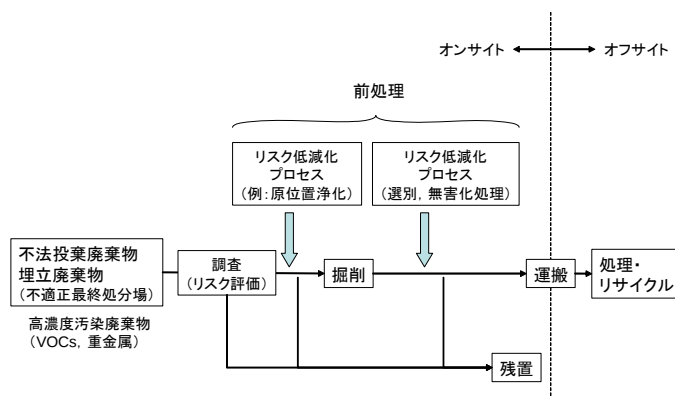


図2 前処理（リスク低減化プロセス）の位置づけ

再生作業全体が、安全、適正かつ効率的に行えることを示す。以上より、不適正最終処分場及び不法投棄現場の廃棄物の掘削から処理までの全体作業を安全かつ効率的に実施できる、バイオ技術と物理化学技術を組み合わせた修復・再生（適性化、資源化、延命化）システムの提案を行うこととする。具体的な研究課題としては、図3のように、以下の①～⑤を設定した。

### ①作業環境リスク低減化プロセスの開発

撤去等作業の安全性確保のために重要なメタンや硫化水素ガスの簡便なモニタリング方法として、オープンパス型ガス測定機器を用いた手法の適用性を現地で検証する。また、リスク低減化プロセスとしての廃棄物層内のメタンガス、硫化水素の除去方法の実証試験を行う。

### ②汚染廃棄物のリスク低減化プロセスの開発

ベンゼン等の油分やVOCの分解除去を目的とした空気注入法及びバイオレメディエーション技術の適用性を、バッチ試験、実汚染現場を模擬した室内カラム・大型模擬土槽試験及び数値解析により検討する。また、ダイオキシン汚染土壌のバイオリアクター設計のために必要な分解速度のモデル化を行う。

### ③不適正最終処分場及び不法投棄現場の廃棄物資源化の検討

撤去された廃棄物の資源化の一つの手法として、有機物リッチな廃棄物を対象とした場合のバイオガス化技術の適用性を、バッチ試験及びリアクター連続実験により検討する。

### ④バイオ技術を用いたモニタリングシステムの開発

バイオレメディエーション等のバイオ技術を現地へ適用するために必要な安全性評価を、関連微生物の安全性評価とモニタリング手法の開発という点から行う。

### ⑤不適正最終処分場及び不法投棄現場の修復・再生システムの提案

以上①～④の成果を集約して、既存の物理化学的技術との組み合わせによる修復・再生作業全体が、安全、適正かつ効率的にできることを示し、本研究の最終目標であるバイオ技術と既存の物理化学的技術を融合した不適正最終処分場及び不法投棄現場の修復・再生システムの提案を行う。

## 2. 作業環境リスク低減化プロセスの開発

### 2.1 不法投棄原状回復現場での作業環境モニタリング

#### (1) 試験方法

不法投棄現場や不適正最終処分場に設置されている調査用ボーリング孔やガス抜き管等に滞留している埋立ガスをポリエ

テル製バック

に採取し、実験室にて、メタン、二酸化炭素、その他有害ガス

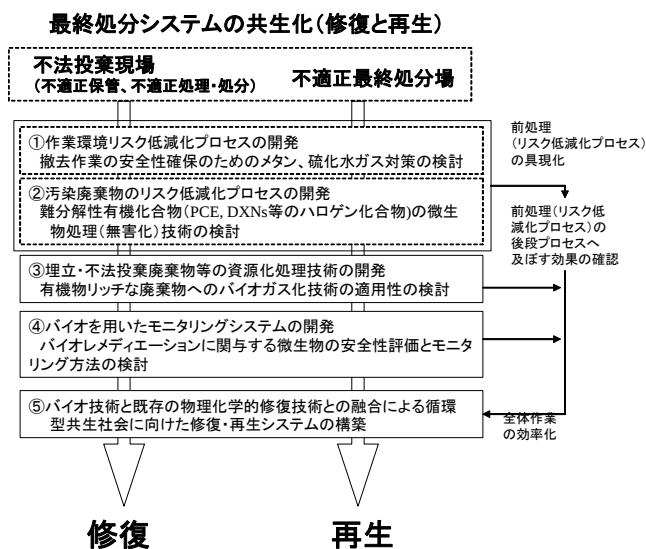


図3 本研究の構成

表1 有機物リッチな最終処分場の埋立ガスの測定例

| サンプル名     | 最終処分場B |      | 最終処分場C |      |      |
|-----------|--------|------|--------|------|------|
|           | No.1   | No.2 | No.1   | No.2 | No.3 |
| メタン(%)    | 51.7   | 56.7 | 49.4   | 54.5 | 54.6 |
| 二酸化炭素(%)  | 42.0   | 40.3 | 40.9   | 41.8 | 42.4 |
| 硫化水素(ppm) | 76     | 15   | 50     | 55   | 18   |

表2 不法投棄現場でのガス測定例

| サンプル名        | No.7-2 | No.7-3 | No.7-4 | No.7-5 | No.8 | H16-10 | H16-11 |
|--------------|--------|--------|--------|--------|------|--------|--------|
| メタン(%)       | 40     | 10     | 23     | 3      | 17   | 55     | 69     |
| 二酸化炭素(%)     | 14     | 10     | 5      | 1      | 11   | 2      | 16     |
| 硫化水素(ppm)    | 25     | <0.2   | 6      | <0.2   | 14   | 400    | 400    |
| 発生ガス量(L/min) | 0.3    | 0.008  | 0.4    | 0.008  | 1    | 1.2    | 1.1    |

(二酸化硫黄、一酸化炭素、二酸化窒素、窒素酸化物、硫化水素、ベンゼン、トルエン、トリクロロエチレン、テトラクロロエチレン、ジクロロメタン、メチルメタプタン、アセトアルデヒド、アンモニア、アミン類等)の濃度を計測し、メタン濃度と有害ガス濃度の比を検討した。同時に、文献調査による過去のガス測定例に関するデータも収集した。また、簡便、迅速、かつ正確に発生ガスの存在をリアルタイムでモニタリングできるハンディタイプオープンパス型計測器により、掘削中に発生するメタンをモニタリングできるかどうか検討した。

## (2) 結果と考察

結果の一例として、表1と表2に示すように、埋立ガス中の有害物質の中では硫化水素の濃度が最も高いこと、埋立ガス中に硫化水素が検出される場合にはメタンも共存することがわかった。したがって、メタン濃度を埋立ガス発生指標として利用することの妥当性が確認された。また、現地測定試験では、ハンディタイプオープンパス型メタン計測器と反射板を使うモニタリング手法により、大気中のメタンの濃度変化を0.2ppmのレベルで検知することが分かった。以上より、掘削時の埋立ガス発生に伴う作業員の安全確保のためのモニタリング方法を確立することができた。

## 2. 2 作業環境改善のための吸引試験

### (1) 試験方法

A県不法投棄現場を対象に、廃棄物層内に滞留しているメタンガスや硫化水素ガスの吸引法による濃度低減効果の確認試験を行った。事前に表層ガス調査により、メタンガス、硫化水素ガス濃度の高いポイントを選定した。そして、図4に示すように、その濃度の高かったポイントに、吸引井を設置し、その周辺にモニタリング井(12個所)、空気供給井(3個所)を設置した。吸引量は、吸引開始1日目は0.5 m<sup>3</sup>/hr、2日目は1.0 m<sup>3</sup>/hr、3日目は1.5 m<sup>3</sup>/hr、4日目は1.7 m<sup>3</sup>/hrである。モニタリング井(深度0.7m及び1.7mの2地点)のメタン濃度と吸引井との差圧を測定した。

### (2) 結果と考察

図5に、モニタリング井のメタン濃度の経時変化を示す。メタン濃度は最大70%を示し、非常に高濃度であった。深度0.7mでは、吸引開始2日後からメタン濃度は低くなった。一方、深度1.7mでは、吸引井戸を中心にメタンが残留していた。差圧測定により、深度1.7mでは十分に圧力が低下してい

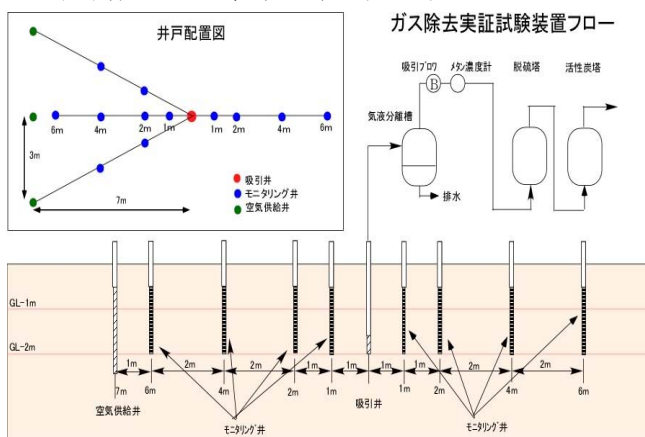


図4 廃棄物層内ガス吸引実証試験装置フロー図

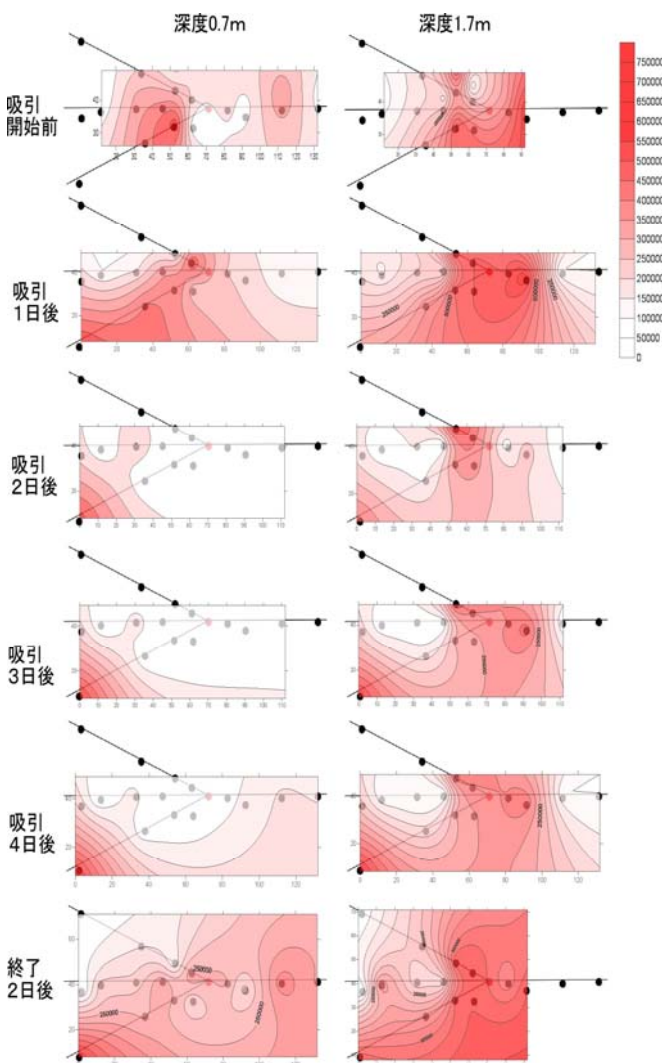


図5 モニタリング井のメタン濃度の経時変化

たことから、下部層からのメタンの供給が多くなり、吸引井戸周辺でメタン濃度が高くなったものと考えられた。なお、吸引終了2日後には、メタン濃度が全域で吸引試験前と同レベルにまで回復しており、廃棄物層内では、予想以上にメタンガスが発生していることが分かった。これらにより、吸引時間など運転条件の設定等の課題は残るが、廃棄物掘削前の廃棄物層内のガス吸引は、作業環境リスクを低減化するために有効であることが示された。

### 3. 汚染廃棄物のリスク低減化プロセスの開発

#### 3. 1 不飽和帯への空気注入による好気分解促進技術の開発

##### (1) 試験方法

A 県不法投棄廃棄物 (H18 年 6 月採取、GL-3m 地点バーク様廃棄物) を用いて、図 6 に示すように、容量 20L の容器下部から、空気 (あるいは、空気+酸素) を注入した。カラム入り口と出口の酸素濃度の差を測定し、酸素消費量を求めると共に、廃棄物サンプルの溶出試験により有機物除去効果を確認した。また、別途、空気を注入しないコントロール系も用意した。

##### (2) 結果と考察

図 7 に酸素消費量の経時変化を示す。空気のみ注入の場合は約 8 週間、酸素を付加して注入した場合は約 4 週間で、酸素消費はほとんど見られなくなった。そこで、8 週間経過以降、空気等の注入を停止し、さらに 80 日後の廃棄物層内のガス濃度を測定した。その結果、空気を注入しないコントロール系では、常に、40%以上のメタンが検出されたが、空気注入の場合は、3.8%、空気+酸素注入の場合は 2.0%とメタン濃度は低く、好気処理におけるメタン発生抑制効果を確認することができた。また、別途バッチ試験により、好気的条件下では、ベンゼン、トルエン、キシレンなどの有害物質が微生物分解されることを確かめている。以上より、廃棄物中の油分、易分解性有機物に対して、空気注入による好気処理が有効であることを確かめた。

#### 3. 3 テトラクロロエチレン汚染廃棄物の原位置バイオレメディエーション技術の開発

##### (1) 試験方法

A 県不法投棄廃棄物 (H18 年 6 月採取、GL-2～2.5m のバーク①, GL-3m のバーク②, GL-4～5m の汚泥) を用いて、テトラクロロエチレン (PCE) の分解プロセス及び分解生成物への変換率を確認し、さらに、廃棄物種類、温度、有機物等の栄養注入が分解速度に及ぼす影響確認するためのバッチ試験を行った。次に、実際の原位置バイオレメディエーションの適用を想定し、移流分散条件下における分解速度をカラム試験 (内径 80mm, 長さ 1000mm) により確かめた。なお、カラム試験は、バーク①とバーク②を対象に行った。

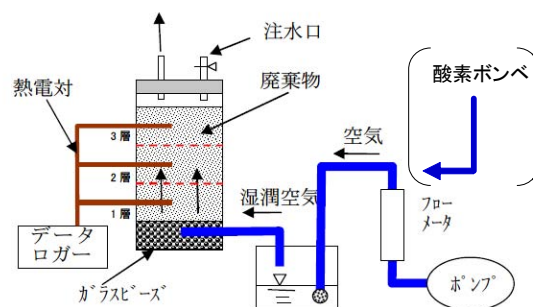


図 6 中型カラム試験概要図

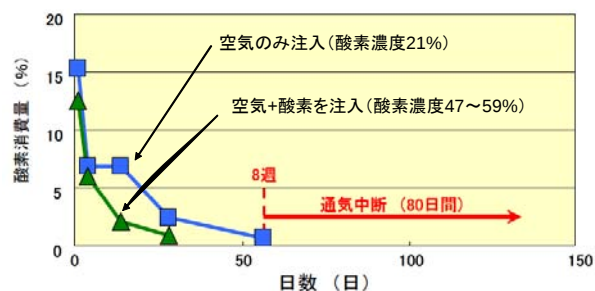


図 7 酸素消費量の経時変化

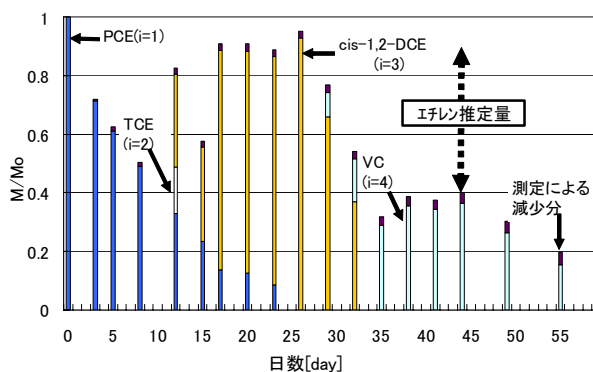


図 8 バッチ試験による PCE 脱塩素分解の確認

## (2) 結果と考察

図 8 に示すように、バッチ試験（バーク①、25℃）の結果、PCE→トリクロロエチレン（TCE）→シス-1,2-ジクロロエチレン（cis-1,2-DCE）→塩化ビニル（VC）→エチレンの分解経路が確認され、注入 PCE 量の約 9 割が、VC とエチレンにまで分解されていることが分かった。また、バーク①とバーク②では、性状がほぼ同じなので PCE の分解速度はほとんど同じであったが、汚泥のみ分解速度が遅かった。栄養添加の影響としては、分解速度の遅かった汚泥に分解促進効果が見られた。一方、温度の影響は大きく、10, 15℃よりも、25℃の場合が、cis-1,2-DCE 以降の脱塩素反応が促進される結果が得られた。

また、カラム試験においては、図 9 に、PCE 注入濃度 0.03mmol/L の場合の PCE 及び分解生成物の分布の定常値を示す。移流分散条件下においても、PCE の脱塩素反応が確かめられた。また、移流分散方程式に微生物分解項を加えたモデルを構築し、実験値を表現できることを確認し、移流分散条件下における微生物分解速度を算出できた。

また、スケールアップを想定した大型実験槽（横 1600×幅 300×高さ 1500mm）の実験により、注入 PCE の脱塩素反応を確認した。さらに、上記カラム試験において、微生物相の変化を DGGE 法により追跡し、PCE 分解に関連する微生物の探索を行った。

以上より、PCE で汚染された廃棄物に対して、原位置嫌気性バイオレメディエーションを適用し、掘削前の廃棄物のリスク低減化が可能であることが確かめられた。

## 3. 4 *Pseudallesheria boydii*による 2,3,7,8-TCDD の分解特性に関する研究

### (1) 試験方法

バッチ試験により、*Pseudallescheria boydii*（以下、*P. boydii* 北大株）の 2,3,7,8-TCDD 分解特性を把握すると共に、バイオリアクター設計に必要な数学モデル化の検討を行った。

### (2) 結果と考察

図 10 に示すように、*P. boydii* 北大株による 2,3,7,8-TCDD の減少が確かめられた。また、その減少速度が、菌体増殖を表す Monod 式と、2,3,7,8-TCDD の濃度変化が菌体増殖速度に比例すると仮定した分解速度式で、モデル化できることを確かめ、リアクター設計にまで応用できることを示した。

## 4. 埋立・不法投棄廃棄物の資源化の検討

### 4. 1 最終処分場廃棄物のバイオガス化の適用可能性

#### (1) 試験方法

2つの最終処分場から、1980, 1990, 2000 年代の廃棄物サンプルを採取し、組成調査（10 分類）を行った。その後、埋立廃棄物からバイオガス回収可能性を検討するために、バイアル瓶（227mL）、20L 培養槽、及び 200L 培養槽を用いた実験を行った。バイアル瓶を用いた試験では、種汚泥（生ごみバイオ

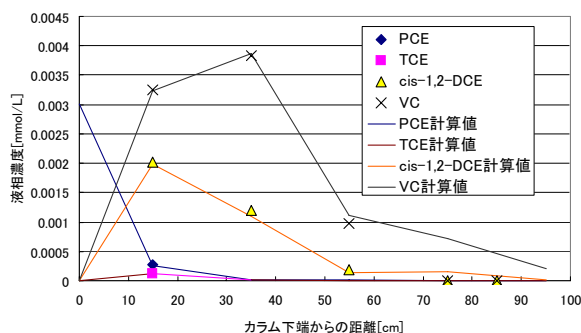


図 9 カラム中の PCE 及び分解生成物の分布と計算値の比較

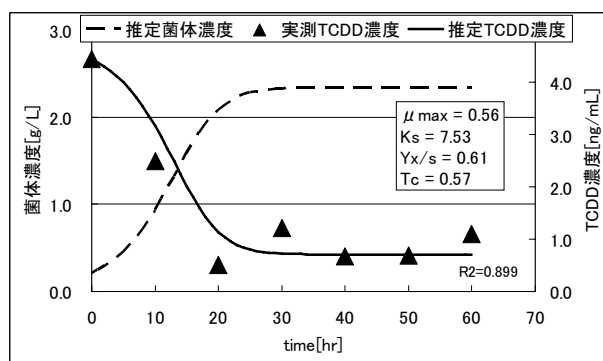


図 10 菌体濃度変化の推定と TCDD 濃度変化とのパラメータフィッティング結果

ガス化施設より採取) 100mL と廃棄物サンプル (紙または組成分別できなかったその他の部分) 10g を投入し、55℃の高温発酵条件にて振とう培養した。一方、20L 培養槽では、種汚泥 (豚糞) 2kg、水 16L、廃棄物 2kg (1990 年廃棄物又は 2000 年廃棄物) を投入し、室内で試験を行った。さらに 200L 培養槽では、メタン発酵培養液 80L、水 70L と 1990 年と 2000 年廃棄物の混合物を投入し、戸外で試験を行った。

## (2) 結果と考察

図 11 に、埋立廃棄物の組成分析結果を示す。地域や埋立年代により組成がかなり異なることが分かる。過去の研究により、「紙」と粒径が小さく組成の判別ができなかった「その他」の部分を実別してメタンガス発生量 (20 日間培養) を測定した結果を図 12 に示す。「その他」よりも「紙」の方が、メタンガス発生量が大きい傾向であった。また、年代の古い廃棄物からのメタンガス発生量が小さい傾向にはあった。さらに、同じ年代であっても、処分場が異なれば、発生量が大きく異なることが明らかとなった。

## 4. 2 不法投棄廃棄物のバイオガス化の適用可能性

### (1) 試験方法

A 県不法投棄廃棄物 (バーク堆肥様物及び汚泥様物) を用いて、上記バッチ試験と同様の手順でメタン発生量を測定した。なお、比較のために、種汚泥のみのブランク、基質として、生ごみとろ紙の場合も同時に実験した。

### (2) 試験結果

図 13 に示すように、難分解性の有機物が多く含まれていると思われるバーク堆肥様物からは、ほとんどメタンガスは発生しなかった (種汚泥のみのブランクからのメタン発生量を差し引いているので、負の値となっている)。一方、汚泥の鉛の溶出値は 0.17mg/L と、微生物の成長阻害の可能性があったが、バイオガスの発生は見られた。生ごみやろ紙に比べると発生量は少ないものの、不法投棄廃棄物である汚泥からのバイオガスの回収の可能性があることが分かった。

## 5. バイオ技術を用いたモニタリングシステムの開発

### (1) 試験方法

ダイオキシン分解菌である *P. boydii* 北大株の安全性を確認することとした。*P. boydii* 北大株は、アスペルギルス属菌を体表とする糸状菌感染のような単純な胞子の気道内注入では感染が起こりにくいことから、免疫抑制を最小に抑えながら、本菌株の胞子を繰り返し気道内に注入するという方法により

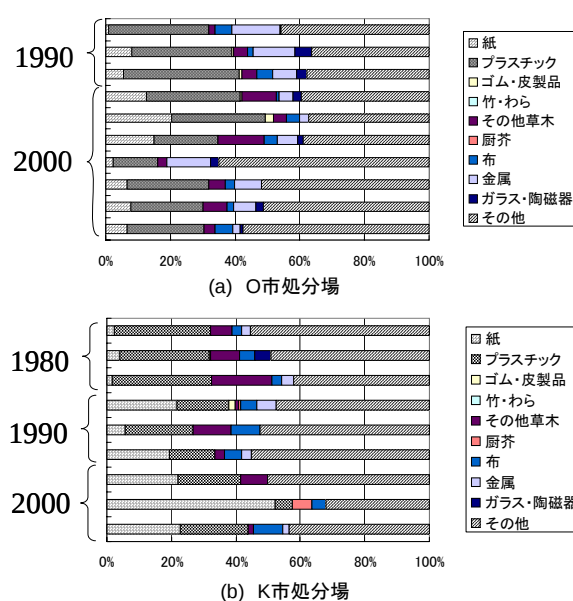


図 11 埋立廃棄物の組成分析結果

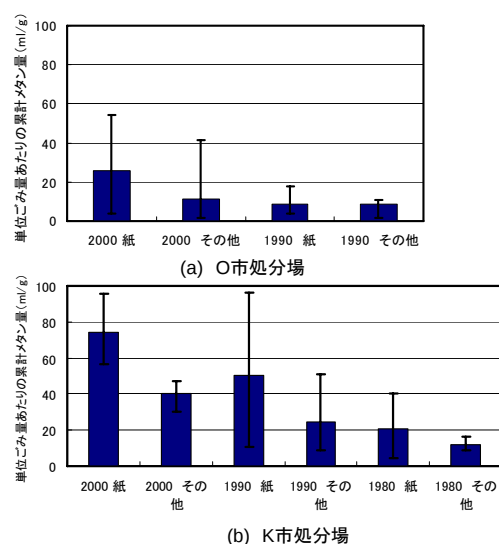


図 12 メタンガス発生量 (20 日間培養)

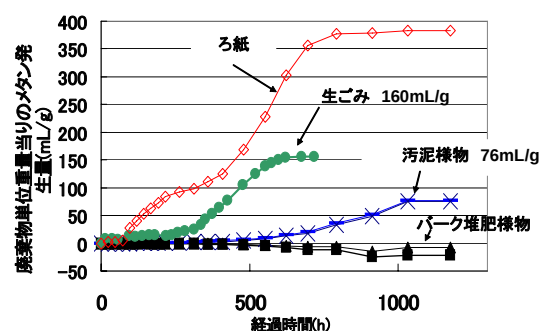


図 13 不法投棄廃棄物からのメタンガス発生量

評価を試みた。

また、*P. boydii* 北大株を用いたバイオリアクター等の修復技術を汚染現場へ適用した際、周辺環境への菌の漏洩が無いことをモニタリングする手法を確立するために、土壌などの環境中から *P. boydii* 北大株を含むグループを、遺伝子として特異的に検出できるプライマーを作成すると共に、検出感度向上策を検討することとした。

## (2) 試験結果

繰り返しの気道注入により、*P. boydii* 北大株の肺感染が確認されたが、 $1 \times 10^8/\text{mL}$  ( $2.5 \times 10^6$  個/mouse) とかなり大量の菌体量が必要であることが分かった。これは、体重換算で、成人男性が  $5 \times 10^9$  個程度の胞子を一時に吸入し、それを連日反復した状況に相当する。さらに、著しい免疫抑制を伴う人が前提となる。すなわち、*P. boydii* 北大株の一般人への感染のおそれは、極めて小さいものであることが示された。

また、*P. boydii* の菌学的な基礎検討結果を利用して、北大株を含む特異的に認識するプライマーを設計し、北大株と土壌の混合物から北大株を検出する方法を見出した。さらに nested PCR を使用することにより、この検出感度を高めることができた。上記の感染に必要な菌体量から推定する（体重換算すると、 $10^{10}$  cells を吸引すると感染の可能性があるが、今回のモニタリングの検討では、このレベルの菌体量が環境中に飛散した場合、土壌中からの DNA の抽出効率を勘案しても十分感知することができると考えられる。

## 6. 不適正最終処分場及び不法投棄現場の修復・再生システムの提案

### (1) 方法

次に、不法投棄現場をモデルケースとして、本研究で提案するリスク低減化プロセスを考慮した修復システムの適用を試み、その効果を検討することとした。前提条件として、特別管理廃棄物に相当する廃棄物が  $263,000 \text{ m}^3$ （内、VOC で判定基準を超過する廃棄物  $156,000 \text{ m}^3$ ）、そして特別管理廃棄物に相当しない普通の産業廃棄物が、 $312,000 \text{ m}^3$  であると仮定する。想定する修復システム代替案は、表 3 に示すように、No.1: 全量撤去（なお、選別工程は含水率調整と篩い分け、及び撤去物の熱処理を想定）、No.2: 撤去前にガス吸引処理を行い VOC 成分を除去する。VOC 汚染廃棄物を対象に、判定基準値以下まで処理を行うものとする。No.3: 撤去前にバイオレメディエーションを行う。No.2 と同様に、VOC 汚染廃棄物を対象に、判定基準値以下まで処理を行うものとする。No.4: No.3 に加えて、有機物リッチな撤去廃棄物からのバイオガス化（資源化）を考える。No.5: 廃棄物の撤去は行わず、長期管理することとした（なお、これら修復代替案は、あくまでも本研究でのモデルであり、実際の対策とは何ら関係はない）。また、各処理費については、一般的な処理費用額を用いて検討を行った。なお、別に、不適正最終処分場へバイオガス化技術を導入した再生システムの効果についても検討を行った。

### (2) 結果と考察

表 3 に、修復システム代替案の比較一覧を示す。いわゆる全量撤去の No.1 との相対的な比較を示したものである。技術的側面では、リスク低減化プロセスである、ガス吸引やバイオレメディエーション手法を導入することにより、掘削時、運搬時、処理時のリスクがいずれも低減化され、また処理期間の短縮も期待される。一方、社会的側面のコストについては、ガス吸引を導入した No.2 は、従来型の No.1 とそれほど変わらないが、バイオレメディエーションを導入した No.3 は、No.1 に比べて 3%程度ほど、コスト削減の可能性がある。廃棄物を撤去しない No.5 については、当然ながら、60%程度の大きなコスト削減の可能性があることが分かった（但し、モニタリング費用含まず）。住民合意については、リスク低減化プロセスを導入した方が、廃棄物の処理先、つまり受入施設周辺住民の合意が得られやすく

なる可能性を示した。一方、No.5 の長期管理では、コスト対効果などのリスクコミュニケーションが必要である。

表 3 修復システム代替案の比較一覧表（不法投棄現場）

| No. | 修復システムの代替案 | 技術的側面                      |                    |                                 | 期間                                                         | コスト                      | 社会的側面                        |                            | 総合評価                                                                                     |
|-----|------------|----------------------------|--------------------|---------------------------------|------------------------------------------------------------|--------------------------|------------------------------|----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
|     |            | 掘削時                        | 運搬時                | 処理時                             |                                                            |                          | 地元住民                         | 住民合意<br>受入施設周辺住民           |                                                                                          |
| 1   |            | 有害ガス放出によるリスク大              | 汚染物質の漏洩、揮発のリスク大    | 特別管理廃棄物処理施設の確保困難                | 基準                                                         | 基準                       | 容易                           | 汚染レベルの高い廃棄物の受入のため困難        | 技術的、社会的の両側面から、リスクが高い。                                                                    |
| 2   |            | 有害ガス成分が低減、あるいは除去されるため、リスク小 | 汚染レベルが低減されるため、リスク小 | 特別管理廃棄物相当の廃棄物が減少することから、施設の確保が容易 | 施設の確保が容易、さらに掘削時、運搬時のリスクが低減され、作業がスムーズに進むと考えられることから、期間の短縮が可能 | No.1と同程度                 | 容易                           | 汚染レベルの低い廃棄物の受入のためNo.1よりも容易 | コストはNo.1と同等になるが、有害ガスの除去により、掘削作業時の安全性が確保される。また、特管物としての処理量が削減されるため、運搬・処理効率が向上し、処理期間が短縮される。 |
| 3   |            |                            |                    |                                 |                                                            | No.1よりも3%程度低い            |                              |                            | 特管物としての処理量が大幅に削減されるため、運搬・処理効率が向上し、処理期間が短縮される。                                            |
| 4   |            |                            |                    |                                 |                                                            | No.3と同等度、バイオガス化によるメリットあり |                              |                            | 特管物としての処理量が削減されるため、運搬・処理効率が向上し、処理期間が短縮される。バイオガス化によるエネルギー回収(資源化)も可能となる。                   |
| 5   |            |                            |                    |                                 | 長期管理                                                       | No.1よりも60%程度、低い          | No.1よりも困難、適切なリスクコミュニケーションが必要 | -                          | 掘削・運搬を伴わないため、作業時のリスクは最も低い。管理期間は長期を要する(予測困難)。                                             |

以上より、本研究で提案するリスク低減化プロセスを導入した修復システムは、技術的・社会的の両側面において効果があり、これまでの従来システム（単純全量撤去）より、安全、効率的に修復作業を実施できることを示した。また、表 3 には記載しないが、不適正最終処分場については、特に、有機物リッチな廃棄物が多く埋め立てられている処分場へのバイオガス化の適用により、環境影響削減効果や延命化効果だけではなく、資源化のメリットも期待できることを示した。

## 7. 結論

### ①作業環境リスク低減化プロセスの開発

- ・実際の現場調査を通じて、廃棄物層内には、爆発性のメタンや有害な硫化水素ガスが、高濃度で滞留している場合があることが判明した。そのため、実汚染サンプルの分析に基づき、廃棄物撤去時の作業者の安全性を確保するためには、これらガスの原位置前処理が必要であることを明らかにすることができた。
- ・不法投棄現場及び不適正最終処分場の現地調査事例より、メタンガスを指標として有害な硫化水素等のガスの検出が可能であることを示した。さらに、指標であるメタンガスを、簡便、迅速、そしてリアルタイムで測定できる、オープンパス型簡易計測器を用いたモニタリングシステムを提案した。
- ・実不法投棄現場での、空気吸引法の実証試験により、廃棄物内に滞留していたメタンガスの除去が可能であったことから、作業安全性向上のためには、廃棄物掘削前にガス吸引法を適用することの有効性が示された。

### ②汚染廃棄物のリスク低減化プロセスの開発

- ・好氣的条件下では、不法投棄廃棄物中のベンゼン、トルエン、キシレンなどの有害物質が微生物分解されることを、バッチ試験により確かめた。
- ・不法投棄現場廃棄物サンプルを用いた室内空気注入実験（20L リアクター）により、廃棄物中の有機

物の好気分解促進効果が確かめられた。特に、メタン発生抑制や廃棄物中の油分の低下に効果的であり、実不法投棄現場での原位置浄化法として、空気注入法が適用できることを示した。

- ・本研究で対象とした不法投棄現場の廃棄物中には、PCE, TCE をエチレンにまで脱塩素する微生物が存在し、栄養注入や温度制御等によるその微生物の活性化によって、PCE, TCE の原位置バイオレメディエーションが可能であることを示した。
- ・*P. boydii* 北大株による 2,3,7,8-TCDD 分解は、炭素源であるグルコースとの共代謝により、その増殖期において、生じることが分かった。また、既存の菌体増殖式(Monod 式)と分解速度式により *P. boydii* 北大株の 2,3,7,8-TCDD 分解速度をモデル化でき、リアクター設計にまで応用できることを示した。

### ③不適正最終処分場及び不法投棄現場の廃棄物資源化可能性

- ・最終処分場に長期間、埋め立てられた廃棄物サンプルを用いた実験的検討により、紙などの有機物リッチな廃棄物からのメタンガス回収が可能であることを示した。また、本研究で対象とした不法投棄廃棄物では、汚泥からメタンガス回収が可能であることを示した。以上より、不法投棄現場や不適正最終処分場に長期埋設された廃棄物であっても、掘削後の分別などの前処理を実施できれば、バイオガス化が可能であり、エネルギー回収等の資源化が可能であることを示した。

### ④バイオ技術を用いたモニタリングシステムの開発

- ・ダイオキシン分解菌である *P. boydii* 北大株の一般人への感染のおそれは、極めて小さいものであることが示された。また、土壌環境中 *P. boydii* 北大株を高感度で検出できる遺伝子モニタリング法を確立したことから、*P. boydii* を用いたダイオキシン分解バイオリアクター処理技術の実現可能性を高められた。

### ⑤不適正最終処分場と不法投棄現場の修復・再生システムの提案

- ・本研究で提案する、ガス吸引法やバイオレメディエーションをリスク低減化プロセスとして、廃棄物掘削前に適用することで、従来の単純全量撤去の場合よりも、掘削、運搬、処理時のリスクが削減され、有害廃棄物の撤去作業が全体として安全、効率的に実施できることを示した。さらに、社会的側面としてコストや住民合意についても、効果があることを示した。
- ・不適正最終処分場について、特に、有機物リッチな廃棄物が多く埋め立てられている処分場に、本研究が提案するバイオガス化の適用が可能であることを示した。これにより、不適正最終処分場の環境影響削減効果や延命化効果だけではなく、資源化のメリットも期待できることを示した。
- ・以上より、物理化学技術のみならずバイオ技術を組み合わせることにより、不法投棄現場と不適正処分場を修復・再生するシステムを、技術的、社会的両側面から効果的に構築できた。

## 英語概要

・研究課題名 : Development of restoration and reclamation systems for illegal dumping sites and inappropriate landfill sites using biological methods

・代表研究者 : Toru Furuichi (Hokkaido University)

・共同研究者名 = Noboru Tanikawa (Hokkaido University), Kazuei Ishii (Hokkaido University), Toshihiro Komatsu (Hokkaido University), Rokuta Inaba (Hokkaido University), Katsuhiko Kamei (Chiba University), Takashi Yaguchi (Chiba University), Ikuo Souta (Shizuoka Institute of Science and Technology), Kazuo Okamura (Shimizu Corporation), Kazuo Touge (Obayashi Corporation), Yutaka Sasai (Towa Kagaku Co. Ltd), and Hiroshi Gouda (Towa Kagaku Co. Ltd)

・要旨 (200 語以内) :

There is concern about large illegal dumping of solid waste, including hazardous waste, at sites such as Aomori-Iwate. In addition, there were 538 inappropriate landfill sites that lacked liners and/or leachate treatment facilities. This study proposed risk reduction processes before removal of waste to reduce risk during digging, transportation and treatment of waste, and developed a restoration and reclamation (appropriate treatment, recycling and life prolongation of landfill sites) systems for illegal dumping and inappropriate landfill sites, considering the risk reduction processes with biological methods. Achievement of this study is as follows. 1) A convenient monitoring method for hazardous gases were developed using open-path analyzers. 2) To improve working environment during digging wastes, gas extraction system to remove methane gas is applicable. 3) To reduce oils and PCE levels within waste, air injection system and/or in-situ anaerobic bioremediation system is applicable before removal of waste, which can reduce significantly risks during digging, transportation and treatment. 4) There is a possibility of energy recovery using biogasification of waste from illegal dumping sites or inappropriate landfill sites. 5) Consequently, restoration and reclamation systems for illegal dumping sites and inappropriate landfill sites were developed from both technical and social aspects by integration of physicochemical and biological methods.

・キーワード (5 語以内) : illegal dumping sites, inappropriate landfill sites, restoration and reclamation system, biological methods, risk reduction processes