

第1回（平成14年）技術報告会  
北海道土木技術会 土質基礎研究委員会

# 地盤環境問題に関する技術報告会

## 論文集

平成14年11月

主催 北海道土木技術会  
土質基礎研究委員会

# 目 次

|                         |       |    |
|-------------------------|-------|----|
| a. セッション1 (有効利用)        |       |    |
| a-1 石炭灰の地盤分野への適用        | ----- | 1  |
| 北海道電力(株) 五十嵐 由一         |       |    |
| 小野寺 収                   |       |    |
| a-2 石炭灰の土木材料への活用        | ----- | 11 |
| 北海道開発土木研究所 天野 公人        |       |    |
| 西川 純一                   |       |    |
| 佐藤 厚子                   |       |    |
| a-3 未分解チップおよび現地発生土を     | ----- | 17 |
| 有効利用したリサイクル緑化「ネッコチップ工法」 |       |    |
| 日特建設(株) 山田 守            |       |    |
| 鈴木 潔                    |       |    |
| 有光 重典                   |       |    |
| b. セッション2 (土壌浄化)        |       |    |
| b-1 重金属汚染土壌の洗浄分級技術の     | ----- | 23 |
| 開発                      |       |    |
| (株)竹中土木 技術本部 長沢 太郎      |       |    |
| b-2 油分汚染土壌のバイオレメディ      | ----- | 31 |
| エーションによる浄化              |       |    |
| 清水建設(株) 岡村 和夫           |       |    |
| 田崎 雅晴                   |       |    |
| 戸叶 春樹                   |       |    |
| b-3 協同組合地盤環境技術研究センターの   | ----- | 37 |
| 紹介とVOC汚染サイトの調査・対策実施例    |       |    |
| 協同組合地盤環境技術研究センター        |       |    |
| 技術開発委員会 堀内 康光 ((株)ドーコン) |       |    |

c. セッション3 (遮水壁)

c-1 TRD工法による鉛直遮水壁工の ----- 47

土壌・地下水汚染対策について

(株) テノックス 平山 勇治

上 周史

太田 和善

加藤 真也

(株) 大林組 小谷 克己

北海道大学大学院 古市 徹

c-2 三層構造遮水壁 (トリナー工法) ----- 53

不動建設 (株) シェンジンエンジニアリング 本部 原田 健二

小飼 善弘

佐藤 敏和

## 石炭灰の地盤分野への適用

北海道電力㈱ 五十嵐 由一

北海道電力㈱ 小野寺 収

### 1. はじめに

北海道電力は表-1に示すとおり、砂川・奈井江・苫東厚真の3箇所の石炭火力発電所を保有しており、これらの発電所からは、平成13年度実績で約65万トンの石炭灰が発生している。発生する石炭灰は、リサイクル法において、特に資源化を促進すべき副産物に指定されており、その利用推進は事業者の責務となっている。

表-1 北海道電力の石炭火力発電所

| 発電所名 | 許可出力 (kW) | 内訳 (kW) |         | 備考  |
|------|-----------|---------|---------|-----|
|      |           | 1号      | 2号      |     |
| 苫東厚真 | 1,735,000 | 1号      | 350,000 | 海外炭 |
|      |           | 2号      | 600,000 |     |
|      |           | 3号      | 85,000  |     |
|      |           | 4号      | 700,000 |     |
| 砂川   | 250,000   | 3号      | 125,000 | 国内炭 |
|      |           | 4号      | 125,000 |     |
| 奈井江  | 350,000   | 1号      | 175,000 |     |
|      |           | 2号      | 175,000 |     |

当社における石炭灰の発生量および有効利用の推移を図-1に示す。石炭灰の発生量は、近年60万t/年程度で推移しており、平成14年6月に苫東厚真発電所4号機（出力700MW）が営業運転を開始したことに伴い、今後は増加が予想される。石炭灰の有効利用拡大に向けた様々な取組みの結果、有効利用率は徐々に増加し、平成13年度で92%に達しているが、なお6万tは利用されずに処分場に埋立て処理している。

当社の主力発電所である苫東厚真発電所石炭灰利用の内訳を図-2に示す。セメント原材料（粘土代替）としての利用が大半を占めているが、これは今後の拡大は期待できず、土木材料としての利用拡大が重要となっている。

石炭灰の土木分野での利用のうち、特に地盤分野は大量利用が期待できることから技術開発に努め、着実に利用実績をあげてきている。本稿は、石炭灰の地盤分野への適用について、最近の事例を中心に紹介するものである。

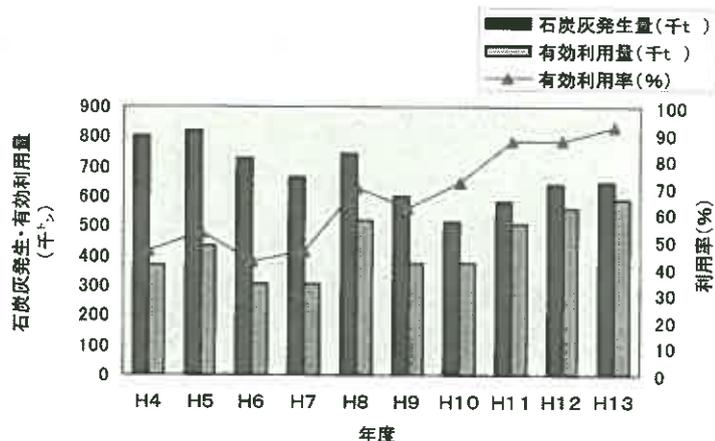


図-1 石炭灰有効利用実績

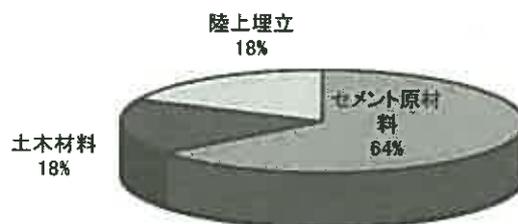


図-2 平成13年度

苫東厚真発電所石炭灰利用内訳

### 2. 石炭灰の性状

石炭火力の一般的な型式である微粉炭燃焼ボイラは、石炭を微粉炭機で粉砕し微粉にしてボイラに吹込み燃焼させるもので、発生する石炭灰は、高温の燃焼ガス中を浮遊する灰を電気集じん器で捕集した「フライアッシュ」と、ボイラ内で相互に凝集し、ボイラ底部に落下した石炭灰を粉砕した「クリンカアッシュ」に大別される。フライアッシュとクリンカアッシュの発生割合は、9：1程度である。

フライアッシュは球形の微粒子状を呈するポズランであり、セメントに混合してフライアッシュセメントとし

Yoshiichi IGARASHI, Osamu ONODERA (Hokkaido Electric Power Co., Inc.)

【連絡先】〒067-0033 北海道江別市対雁2-1 北海道電力㈱総合研究所, Tel 011-343-8008, Fax 011-385-7553

たり、コンクリート混和材として使用することで、コンクリートの単位セメント量の低減、水和熱の抑制、長期強度の増進など優れた特性を発揮することから、コンクリート分野では特にダムコンクリート等に古くから実績を有する。一方クリンカアッシュは、多孔質な砂礫状材料であり、締固め特性に優れ軽量で透水性が良いことから、道路の凍上抑制層材や軽量盛土材等として利用されている。

また、加圧流動床ボイラ（苫東厚真発電所 3 号機で採用）は、粉砕した石炭と石灰石を加圧容器内のボイラで混合燃焼するもので、炉内脱硫が可能なのが特徴のひとつであり、カルシウム化合物の含有量が約 30% と多い、いわゆる「PFBC 灰」が発生する。PFBC 灰は、フライアッシュと同様の粒度分布の粉体であるが、粒子形状は不定形である。水と反応する自硬性を有し地盤改良材として適するが、発生量が少なく安定供給に課題がある。

苫東厚真発電所産石炭灰の化学組成を表-2 に、また物理性状を表-3 に示す。

石炭灰のうち最も発生量の多いフライアッシュは、地盤分野への適用に関し以下のような特徴を有しており、これらを活かした利用技術の開発が進んでいる。

- ① 粒度分布はシルトを主体とするが、液性・塑性指数が NP で微細な砂の特性を持つ、ほぼ絶乾状態の粉体であり、粘性土の物性を砂質土系に改良し、含水比を低下させる。
- ② SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> を主成分とするポゾランであり、セメントと合わせて使用することで長期的に強度が増進する。
- ③ 砂質土より粒度が細かいシルト主体の粒度組成であり、砂質土に混合することで適度な粘性を付与し、材料分離を抑制する。

表-2 苫東厚真発電所産石炭灰の化学組成

| 石炭灰の種類   | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO           | MgO         |
|----------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------|-------------|
| フライアッシュ  | 46.5~<br>70.3    | 15.3~<br>31.2                  | 0.6~<br>11.8                   | 0~9.7         | 0.2~<br>2.5 |
| クリンカアッシュ | 49.2~<br>72.2    | 13.5~<br>30.3                  | 2.0~<br>12.7                   | 0~8.9         | 0.2~<br>2.9 |
| PFBC 灰   | 34.4~<br>40.0    | 10.2~<br>15.8                  | 1.9~<br>2.7                    | 32.6~<br>35.3 | 0.6~<br>1.1 |

表-3 苫東厚真発電所産石炭灰の物理性状

| 石炭灰の種類   | 密度<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 粒度組成 (%)   |              |            |           |
|----------|----------------------------|------------|--------------|------------|-----------|
|          |                            | 2~<br>75mm | 75μm~<br>2mm | 5~75<br>μm | 5μm<br>未満 |
| フライアッシュ  | 2.07~<br>2.37              | 0          | 1~18         | 58~94      | 2~26      |
| クリンカアッシュ | 2.11~<br>2.47              | 14~65      | 27~67        | 2~28       | 1~8       |
| PFBC 灰   | 2.51~<br>2.65              | 0          | 11~33        | 23~73      | 3~61      |

### 3. 石炭灰を用いた地盤分野への適用事例

#### (1) 不良土（粘性土）改良への適用

##### a. 概要

不良土改良を目的とした固化材として、一般に用いられるセメント、セメント系固化材あるいは石灰に替えてフライアッシュを用いるものである。

##### b. 特徴

フライアッシュは、液性・塑性限界が NP で微細な砂の特性を持つ粉体であり、不良土に適量混合することで、土の物性を砂質土系に改善し、特にトラフィカビリティ確保に効果的な材料である。また、フライアッシュ単独では、一軸圧縮強度の発現はさほど期待できないが、少量のセメントを添加することでポゾラン効果による強度改善も図れる。

苫東厚真発電所 3 号灰（PFBC 灰）は、酸化カルシウム（CaO）含有量（32.6~35.3%）が多く、自硬性があり、単独でも固化材として強度発現性が期待できる。

##### c. フライアッシュによるトラフィカビリティ改善効果<sup>1)</sup>

不良土のトラフィカビリティ改善に要する固化材添加量を求めるため、フライアッシュを固化材とした室内試験を実施し、改善効果を生石灰と比較した。

使用した不良土およびフライアッシュの物性を表-4 に示す。また、試験結果を図-3 に示す。

表-4 不良土およびフライアッシュ物性

|          | 単位                | 不良土   | 苫東1号灰 |
|----------|-------------------|-------|-------|
| 土粒子の密度   | g/cm <sup>3</sup> | 2.433 | 2.364 |
| 自然含水比    | %                 | 142.7 | 0     |
| 液性限界     | %                 | 146   | N, P  |
| 塑性限界     | %                 | 48.2  | N, P  |
| 塑性指数     |                   | 97.8  | -     |
| 最適含水比    | %                 | 69.8  | 40.7  |
| 最大乾燥密度   | g/cm <sup>3</sup> | 0.756 | 0.995 |
| 強熱減量     | %                 | 19.5  | 20.7  |
| 粒度       | 粒径分               | %     | 0     |
|          | 砂分                | %     | 0     |
|          | シルト分              | %     | 66.8  |
|          | 粘土分               | %     | 33.2  |
| コーン指数    | kN/m <sup>2</sup> | 109   | -     |
| 日本統一土質分類 |                   | CH    | ML    |

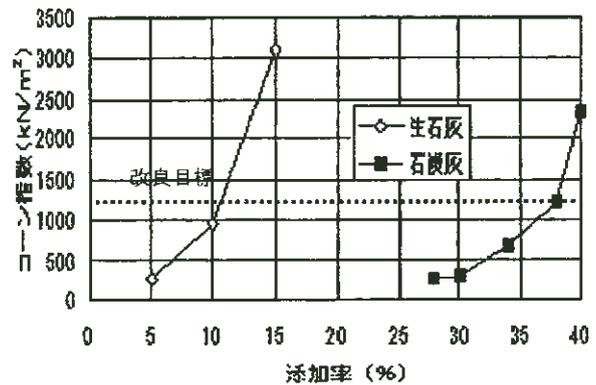


図-3 生石灰との改良効果の比較

目標強度 1200kN/m<sup>2</sup>に対し、フライアッシュの必要添加率（不良土の湿潤重量に対する添加率）は生石灰の約3倍となるが、石炭灰は安価な材料であり、運搬費を含めた現場渡し価格が生石灰の1/3以下となる場合は、経済的である。

d. セメント入りフライアッシュによるトラフィカビリティおよび一軸圧縮強度の改善効果

フライアッシュ単味では所定の一軸圧縮強度が得られないが、PFBC灰は安定供給上の問題があることから、フライアッシュにセメントを混合することで、PFBC灰と同等の改善効果を得ることを目標として、配合試験を行った。配合試験に使用した不良土とフライアッシュの物性を表-5および表-6に示す。

表-5 不良土の物性値

| 項目              |                   | 粘土 (CH) |
|-----------------|-------------------|---------|
| 自然含水比           | %                 | 41.5    |
| 土粒子の密度          | g/cm <sup>3</sup> | 2.715   |
| 液性限界            | %                 | 49.8    |
| 塑性限界            | %                 | 25.4    |
| 塑性指数            | %                 | 24.4    |
| 強熱減量            | %                 | 6.8     |
| コーン指数qc         | kN/m <sup>2</sup> | 193     |
| 一軸圧縮強さqu (材齢7日) | kN/m <sup>2</sup> | 33.7    |

表-6 フライアッシュの性状

| 灰種       | 1号FA  |       |       |       |      |
|----------|-------|-------|-------|-------|------|
|          | A灰    | B灰    | C灰    | PFBC灰 |      |
| 強熱減量     | 11.1  | 13.7  | 3.3   | 4.9   |      |
| 二酸化けい素   | 51.7  | 45.0  | 48.4  | 42.2  |      |
| 酸化アルミニウム | 22.4  | 22.3  | 22.9  | 9.7   |      |
| 酸化第二鉄    | 5.6   | 5.1   | 12.4  | 2.4   |      |
| 酸化カルシウム  | 2.4   | 6.5   | 4.3   | 30.3  |      |
| 三酸化硫黄    | 0.3   | 0.9   | 0.2   | 5.1   |      |
| 酸化マグネシウム | 0.8   | 1.5   | 1     | 1.4   |      |
| 土粒子の密度   | 2.287 | 2.299 | 2.420 | 2.969 |      |
| 最大乾燥密度   | 1.099 | 1.055 | 1.488 | 1.347 |      |
| 最適含水比    | 35.3  | 35.1  | 18.3  | 30.2  |      |
| 粒度       | 粒径分   | 0     | 0     | 0     | 0    |
|          | 砂分    | 13.7  | 15.1  | 6.7   | 12.5 |
|          | シルト分  | 82.5  | 75.6  | 84.4  | 79.8 |
|          | 粘土分   | 3.8   | 9.1   | 8.9   | 7.7  |

セメント入りフライアッシュの添加率（不良土の乾燥重量に対する添加率とする。）とコーン指数（混合30分後）及び一軸圧縮強度（材令7日）の関係を図-4および図-5に示す。

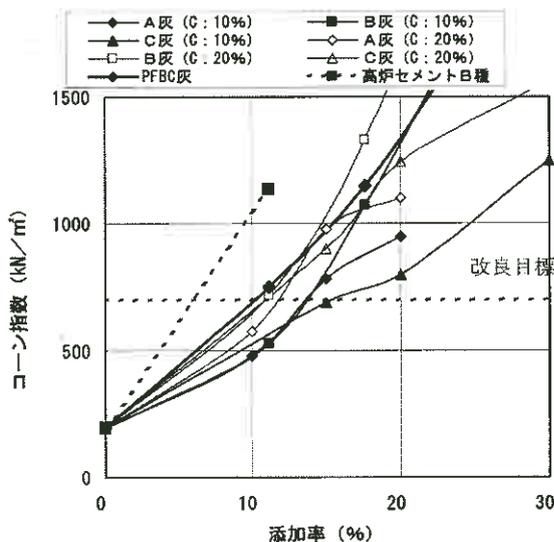


図-4 添加率とコーン指数

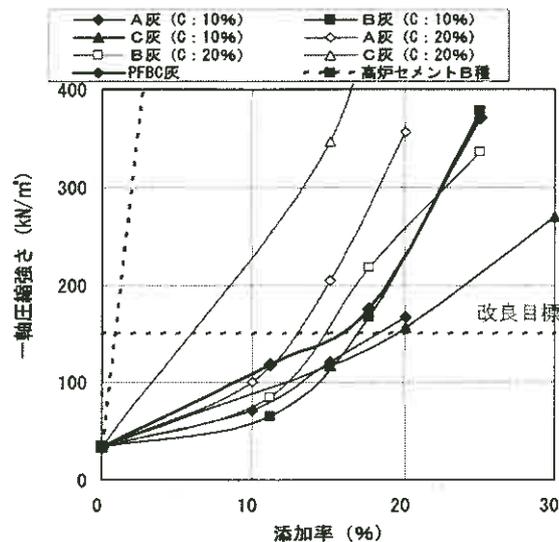


図-5 添加率と一軸圧縮強度

セメント入りフライアッシュによる改良土の強度は、セメント混合率（フライアッシュに対するセメントの重量比）10%では、PFBC灰による改良土の強度をやや下回るが、セメント混合率 20%とすれば、PFBC灰と同等以上となり、特に一軸圧縮強さの改善効果が大きい結果となった。

e. 適用事例<sup>2)</sup>

丘珠空港拡張工事において、不良土である現地発生土を盛土材として有効利用するため、土質安定処理の固化材にフライアッシュが用いられた。

配合試験に使用した現地発生土の物性を表-7に、事前に行った室内試験結果を図-6に示す。盛土材の改良目標値は、実施工に使用される「湿地ブルドーザー」のコーン指数  $300\text{kN/m}^2$  である。

室内試験結果から、改良に必要な固化材量は苦東1号灰で  $200\text{kg/m}^3$ （土の乾燥重量  $1.17\text{t/m}^3$  に対する添加率 17%に相当）、高炉セメントB種で  $100\text{kg/m}^3$ （同 9%に相当）となったが、現場渡し時の価格から、苦東1号灰が採用された。改良時期は、平成 13 年 9 月から 12 月までの間で、使用されたフライアッシュは約 7,000 t である。（一部路床改良のため PFBC 灰を使用）

表-7 現地発生土の物性値

|          | 単位              | 現地発生土 |    |
|----------|-----------------|-------|----|
| 土粒子の密度   | $\text{g/cm}^3$ | 2.669 |    |
| 自然含水比    | %               | 44.3  |    |
| 液性限界     | %               | 54.8  |    |
| 塑性限界     | %               | 28.4  |    |
| 塑性指数     |                 | 26.4  |    |
| 粒 度      | 礫分              | %     | 0  |
|          | 砂分              | %     | 38 |
|          | シルト分            | %     | 41 |
|          | 粘土分             | %     | 21 |
| コーン指数    | $\text{kN/m}^2$ | 47    |    |
| 日本統一土質分類 |                 | CHS   |    |

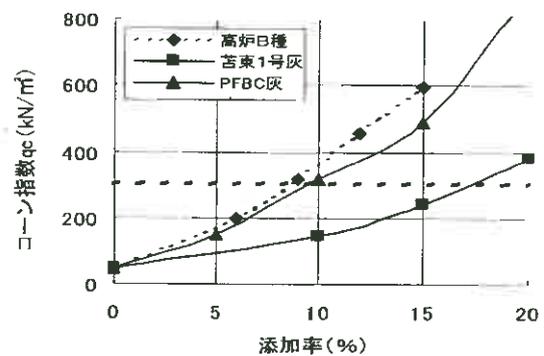


図-6 室内試験結果

(2) 建設汚泥再生利用への適用<sup>3)</sup>

a. 概要

当社苦東厚真発電所 4 号機建設工事において、柱列式地中連続壁工法及び高圧噴射攪拌工法から発生する建設汚泥（原位置の土砂とセメント固化材料の無機性の混合物で、発生時は泥状で流動性を有する。）に、苦東厚真 1 号機フライアッシュを攪拌混合して、構内の敷地造成材料に再利用した。

b. 特徴

- ・フライアッシュは一般の上質材料に比べて最適含水比が高く、また、ほぼ絶乾状態の紛体であることから、少ない添加量で汚泥を塑性化し、盛土材等としての再生利用を可能とする。
- ・汚泥を産業廃棄物処理する場合と比較して、コスト低減効果が大きい。

c. 再生材の所要条件

『建設工事等から発生する土砂由来の無機性汚泥の再生利用に関する取扱いについて：北海道生活環境部長通達（平成 10 年 10 月 9 日、環廃第 477 号）』

- ・強度：コーン指数  $q_c \geq 0.2\text{N/mm}^2$ 、または、一軸圧縮強度  $q_u \geq 0.05\text{N/mm}^2$
- ・微量物質の溶出：土壌の汚染に係る環境基準値を満足すること。
- ・水素イオン濃度： $5.0 \leq \text{pH} \leq 9.0$ 、但し条件に適合しない場合には、その状況が一過性のもので生活環境上支障がないと判断される場合。

d. 室内配合試験

配合試験に使用した原位置の上砂およびフライアッシュの物性を表-8に示す。

汚泥は、表-9に示すとおり、工法毎に発生が予想される 4 ケースを想定し室内で配合試験を行った。

フライアッシュの添加率とコーン指数の関係を図-7に、再生材含水比とコーン指数の関係を図-8に示す。

工法によらず再生材の含水比を指標として所定のコーン指数確保が可能であり、施工においては含水比が一定値以下となるようフライアッシュ添加率を管理した。

表-9 配合試験ケース

| 工法   | 汚泥含水比 (%) | 汚泥の内訳 (kg/m <sup>3</sup> ) |      |        |     | フライアッシュ添加率 (%) |
|------|-----------|----------------------------|------|--------|-----|----------------|
|      |           | 土砂(湿潤)                     | セメント | ベントナイト | 水   |                |
| 地中連壁 | 60        | 1258                       | 188  | 6      | 215 | 30~60          |
| 高圧噴射 | 60        | 867                        | 472  | 0      | 352 | 30~50          |
| 高圧噴射 | 80        | 716                        | 390  | 0      | 465 | 60~80          |
| 高圧噴射 | 100       | 609                        | 332  | 0      | 544 | 60~90          |

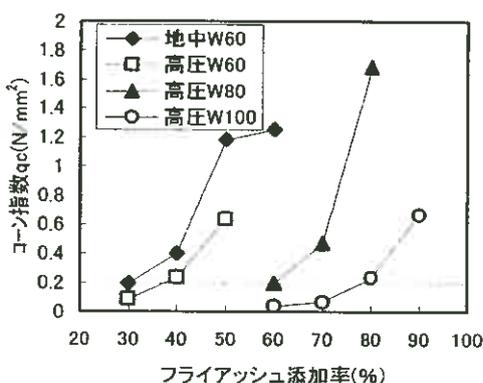


図-7 フライアッシュ添加率とコーン指数

表-8 土砂およびフライアッシュの物性

|        | 単位                | 土砂    | 苫東1号灰 |
|--------|-------------------|-------|-------|
| 土粒子の密度 | g/cm <sup>3</sup> | 2.693 | 2.151 |
| 自然含水比  | %                 | 48.3  | 0     |
| 最適含水比  | %                 | —     | 43.5  |
| 最大乾燥密度 | g/cm <sup>3</sup> | —     | 0.97  |
| 強熱減量   | %                 | 4.1   | 14.1  |
| 粒度     | 礫分                | %     | 0     |
|        | 砂分                | %     | 8     |
|        | シルト分              | %     | 41    |
| 粘土分    | %                 | 51    | 5     |

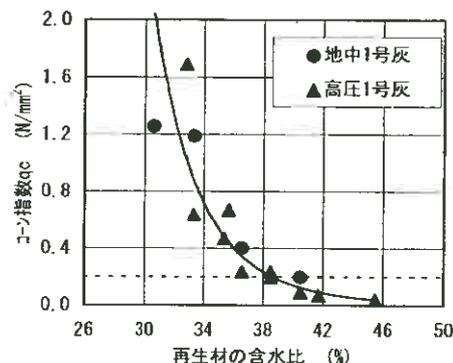


図-8 再生材含水比とコーン指数

#### e. 環境影響

微量物質の溶出試験と水素イオン濃度 (pH) の試験を実施して、再生材の所要条件を満足すること確認した。微量物質の溶出試験は、「環境庁告示 46 号溶出試験」により、pH 試験は固化した盛土材の表面に接触した雨水による溶出をモデル化した方法で実施した。

微量物質の溶出については、カドミウム、鉛、六価クロム、砒素、総水銀とも土壤環境基準値以下となった。また、pH 試験結果は図-9 に示すとおり浸せき日数の経過とともに pH が低下し、約 2 週間で所定条件  $5.0 \leq \text{pH} \leq 9.0$  を満足した。

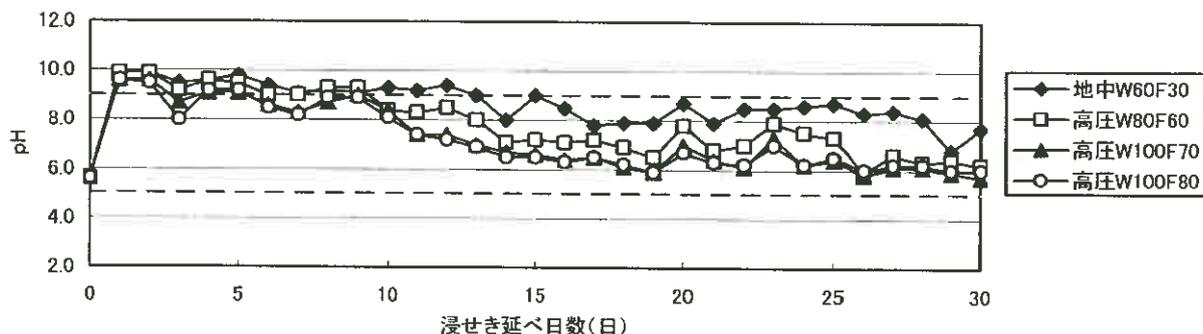


図-9 溶出モデル化による浸せき日数と pH 経時変化

### (3) 気泡混合軽量土への適用<sup>4)</sup>

#### a. 概要

軽量盛土や狭隘箇所の埋戻材等に用いられる、気泡混合軽量土のセメントの一部代替としてフライアッ

シュを使用し、セメント量の低減によるコスト低減を図るものである。

b. 特徴

フライアッシュは球形のポズランであり、セメントの一部置換による長期強度の増進、単位水量の低減などコンクリート混和材として優れた特性を有する。

c. 配合試験

より軽量で気泡混合軽量土の強度を確保するためには、砂セメント質量比S/Cを小さくすれば良いが、この場合単位セメント量が多くなり、フライアッシュ置換によるセメント量低減効果も大きくなると考えられる。

そこで表-10に示すS/C=0のエアミルクの品質条件（日本道路公団暫定配合K0-5）を対象として、これを満足する配合を室内試験で求めた。

C+F ≒ 295 kg/m<sup>3</sup>（K0-5配合に準拠）として、単位セメント量Cを変化させて強度試験を実施した結果を図-10に示す。

C=200 kg/m<sup>3</sup>（F=95 kg/m<sup>3</sup>）であれば、現場の品質変動を考慮しても所定の強度が得られると判断された。

d. 施工事例

一般国道229号狩場トンネル坑口部の保護盛土工として、平成13年度フライアッシュを使用したエアミルクが施工された。品質条件は、表-10に示した条件と同一であり、標準施工断面を図-11に、使用したフライアッシュの性状を表-11に、また、配合を表-12示す。

表-11 フライアッシュの性状

| 灰種    | 比表面積 (cm <sup>2</sup> /g) | 強熱減量 (%) | 密度 (g/cm <sup>3</sup> ) | 活性度指数 (%) | フロー値比 (%) |
|-------|---------------------------|----------|-------------------------|-----------|-----------|
| A 国内炭 | 3,480                     | 0.8      | 2.21                    | 85        | 116       |
| B 海外炭 | 3,460                     | 3.8      | 2.23                    | 91        | 104       |
| C     | 2,570                     | 1.3      | 2.15                    | 81        | 107       |

表-12 配合

| 灰種    | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |     |     |           | 空気量 (%)   |
|-------|--------------------------|-----|-----|-----------|-----------|
|       | C (BB)                   | F   | W   | 起泡剤       |           |
| A B C | 200                      | 110 | 236 | 1.12~1.15 | 64.5~65.1 |

フライアッシュを約35%置換使用（110 kg/m<sup>3</sup>）したが、表-13に示す現場品質試験結果のとおり、現場の一軸圧縮強度は全て500kN/m<sup>2</sup>以上となっており、灰種による強度変動も総じて小さいことが確認された。

平成13年度工事におけるフライアッシュ使用量は、約4,000tとなった。

表-10 エアミルクの品質条件

| 湿潤密度 (g/cm <sup>3</sup> ) | フロー値 (mm) | 空気量 (%) | 現場の一軸圧縮強さ qu28 (kN/m <sup>2</sup> ) |
|---------------------------|-----------|---------|-------------------------------------|
| 0.56                      | 180±20    | 64+5    | 500以上                               |

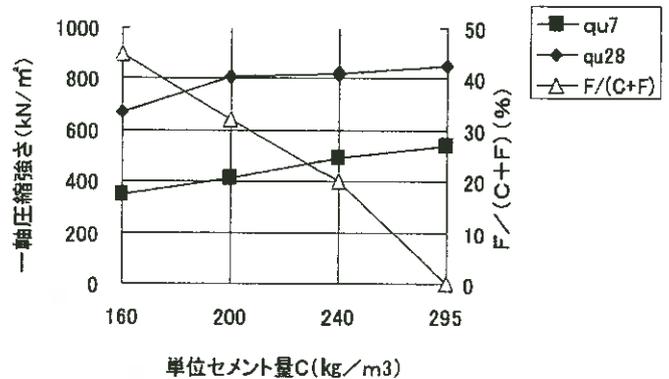


図-10 強度試験結果

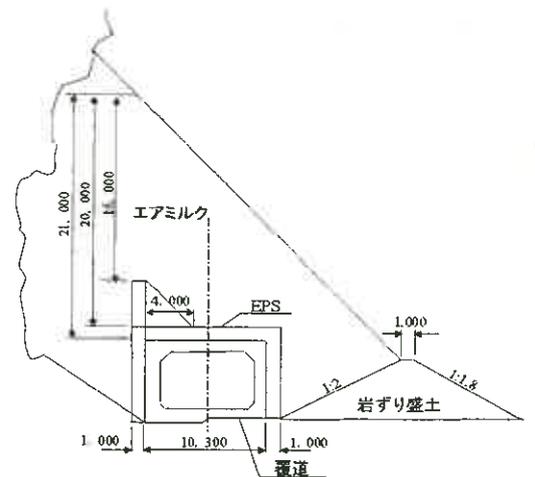


図-11 標準施工断面

表-13 圧縮強度 (qu28) の品質試験結果

| 項目                        | 灰種  |      |     | 計   |
|---------------------------|-----|------|-----|-----|
|                           | A   | B    | C   |     |
| データ数                      | 50  | 20   | 31  | 101 |
| 最大値 (kN/m <sup>2</sup> )  | 740 | 830  | 760 | 830 |
| 最小値 (kN/m <sup>2</sup> )  | 560 | 550  | 530 | 530 |
| 平均値 (kN/m <sup>2</sup> )  | 621 | 622  | 593 | 612 |
| 標準偏差 (kN/m <sup>2</sup> ) | 37  | 73   | 51  | 52  |
| 変動係数 (%)                  | 5.9 | 11.7 | 8.7 | 8.5 |

(4) 埋戻しスラリー材 (CLSM: 低強度抑制型の埋戻し材) への適用<sup>5)</sup>

a. 概要

CLSM (Controlled Low-Strength Material) は低強度抑制材料などと訳され北米で普及しているスラリー状の埋め戻し材であり、材料分離防止および強度制御のための紛体として、一般にフライアッシュが混合使用される。

b. 特徴

CLSMは、流動性・自己硬化性・自己充填性のあるスラリー状の埋戻材で、細骨材、セメント、水、フライアッシュを材料とし、生コンプラントでの製造が可能であり、施工性の向上や施工後の沈下防止等が図れる。目的により低強度に抑えることができ、施工後の再掘削も可能である。

c. 配合試験

CLSMに求められる品質条件は、流動性、材料分離抵抗性および強度であり、表-14に示す設計条件を満足する配合を室内試験で求めた。図-12および図-13は、一定フロー値におけるF/a (フライアッシュ体積 / (フライアッシュ+細骨材体積)) と単位水量、ブリーディング率との関係を示しており、F/a = 20%で単位水量最小となりブリーディングも1.5%以下となった。

表-14 CLSMの設計条件

| フロー値 (mm) | ブリーディング率 | 一軸圧縮強さ               |
|-----------|----------|----------------------|
| 220±20    | 1.5%以下   | 300kN/m <sup>2</sup> |

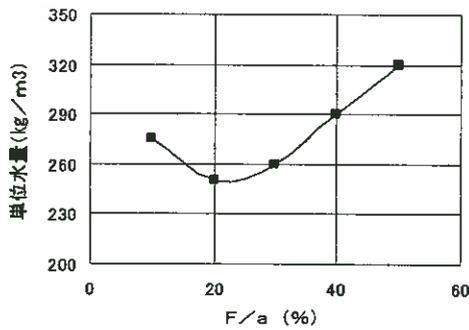


図-12 単位水量とF/aの関係

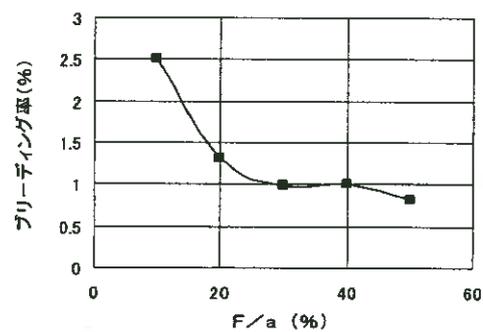


図-13 ブリーディング率とF/aの関係

F/a = 20%、フロー値 220±20 mmの配合で、セメント量を変化させて一軸圧縮強度試験を行った結果を図-14に示す。材令 28 日で  $qu \geq 300 \text{ kN/m}^2$  となる単位セメント量は  $20 \text{ kg/m}^3$  となった。

d. 適用事例

当社苫東厚真火力発電所 4 号機建設工事のうち循環水管路等の埋戻し材料として、計  $104 \text{ m}^3$  の CLSM を施工した。示方配合を表-15に示す。

現場において CLSM の充填状況を目視できるように作製した試験体の充填状況を図-15に示す。

無転圧で良好な充填性が確保されていることが判る。

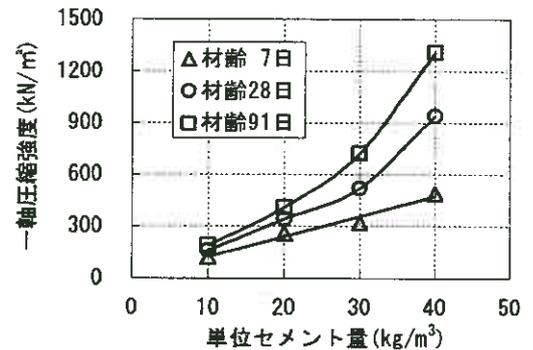


図-14 一軸圧縮試験結果

表-15 CLSMの示方配合

| 設計強度<br>N/mm <sup>2</sup> | フロー値<br>(mm) | 空気量<br>(%) | F/a<br>% | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |     |     |      | AE剤<br>g/m <sup>3</sup> |
|---------------------------|--------------|------------|----------|--------------------------|-----|-----|------|-------------------------|
|                           |              |            |          | C                        | W   | F   | S    |                         |
| 0.3                       | 220±20       | 5±1.5      | 20       | 20                       | 255 | 303 | 1488 | 3553                    |

#### 4. 当社石炭灰利用事例と全国の灰有効利用技術開発状況<sup>6)</sup>

平成10年以降の苫東厚真発電所石炭灰を用いた主な利用事例を表-16に示す。地盤分野を含めて幅広く土木工事に採用され、その特徴を活かして工事の品質確保、コスト低減に貢献している。

また、図-16に電力各社をはじめとする全国における石炭灰利用技術の開発状況を示す。各方面で石炭灰の利用促進に向けた技術開発が進められており、今後も石炭灰の用途拡大が期待されている。

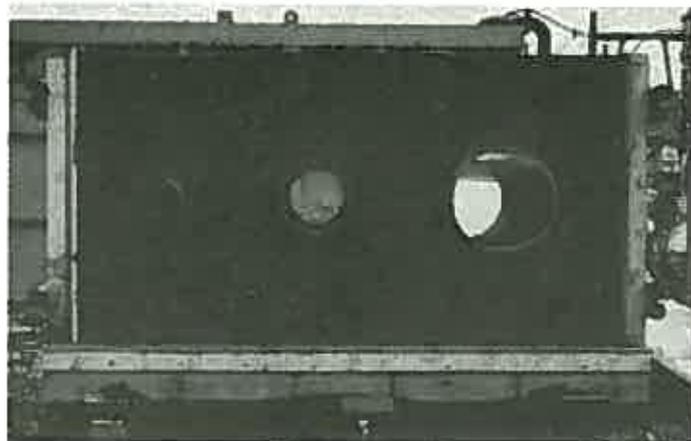


表-16 石炭灰（苫東厚真発電所）利用事例

図-15 充填状況

| 工事名                           | 工事実施年   | 標準配合              | 特徴   | 石炭灰利用数量 (t) |
|-------------------------------|---------|-------------------|--|-------------|
| 開発局苫小牧東港仮設道路工事                | H10     | FA+セメント           | プレミックスによるセメント安定処理工法で上層・下層路盤を施工                       | 700         |
| 開発局苫小牧西港海中盛土工事（第1期）           | H10     | 浚渫土+FA+セメント       | プレミックスにより固練り状態にし、バックホウで施工することにより、30%のコストダウン          | 7,900       |
| 開発局千歳空港エプロン工事                 | H10     | CA単味              | 凍上抑制層に利用   | 300         |
| 変電所・苫東コールセンター道路工事             | H10     | CA単味              | 凍上抑制層に利用   | 9,700       |
| 苫東4号・苫東コールセンター深層混合処理（F-CDM）工事 | H11     | 現地盛土+FA+セメント      | 粉体増量材として、セメントの一部代替し6千万円のコストダウン                       | 6,000       |
| 開発局苫小牧西港海中盛土工事（第1期）           | H11     | 浚渫土+FA+セメント       | プレミックスによりスラリー状態にし、ポンプ打設してコストダウン                      | 7,400       |
| 苫小牧港湾管理組合勇払マリーナ路盤工事           | H11~H13 | CA単味              | 凍上抑制層に利用   | 11,500      |
| 開発局苫小牧西港SGM工事                 | H11     | FA+ベントナイト+セメント+空気 | 軽量な水中不分離材料をスラリー打設ベントナイトの一部代替                         | 20          |
| 開発局寒地試験道路工事                   | H11     | CA単味              | 駐車場凍上抑制層に利用  | 200         |
| 苫東4号土木・建築コンクリート工事             | H11~H12 | セメント20%代替         | 11種の配合に対し、12種類のFAを用いて合計9,000m <sup>3</sup> のコンクリート打設 | 5,500       |
| 苫東4号建設汚泥改良工事                  | H11~H12 | 建設汚泥+FA           | 産業廃棄物である建設汚泥にFAを混合攪拌し、塑性化し造成材として利用することにより、1億円のコストダウン | 21,000      |
| 苫東コールセンター貯炭場固化盤工事             | H11~H12 | FA+セメント           | プレミックスにより固練り状態にし、バックホウ等で施工することにより、3千万円のコストダウン        | 45,000      |
| 苫東4号機循環水管流動化埋戻（CLSM）工事        | H12     | FA+砂+セメント         | 生コンプラントでスラリー状にして打設掘削も可能な低強度度材                        | 120         |
| 開発局岩見沢幌達布幹線建設汚泥改良工事           | H12     | 建設汚泥+FA           | 産業廃棄物である建設汚泥にFAを混合攪拌し、塑性化し造成材として利用                   | 16,800      |
| 苫東4号灰捨地鉛直遮水壁工事                | H13     | FA+ベントナイト+セメント    | 透水係数 $1 \times 10^{-6}$ 以下を満足する遮水壁材料として利用            | 7,000       |
| 苫東4号灰捨地不良土改良工事                | H13     | 粘性不良土+FA          | 盛土に適さない粘性土にFAを浅層混合処理し、道路の路床として利用                     | 4,800       |
| 開発局丘珠空港不良土改良工事                | H13     | 粘性不良土+FA（一部PA）    | 盛土に適さない粘性土にFAを浅層混合処理し、空港の路床および盛土として利用                | 7,000       |
| 開発局日高規格道路不良土改良工事              | H13     | 粘性不良土+PA          | 盛土に適さない粘性土にFAを浅層混合処理し、道路の路床として利用                     | 4,800       |
| トヨタ苫小牧工場建築コンクリート工事            | H13     | セメント20%代替         | 基礎・土間コンクリート4,000m <sup>3</sup> のコンクリート打設             | 240         |
| 開発局狩場トンネル気泡混合軽量土工事            | H13     | FA+セメント+空気        | スラリー打設工法、粉体増量材としてセメントの一部代替                           | 4,000       |

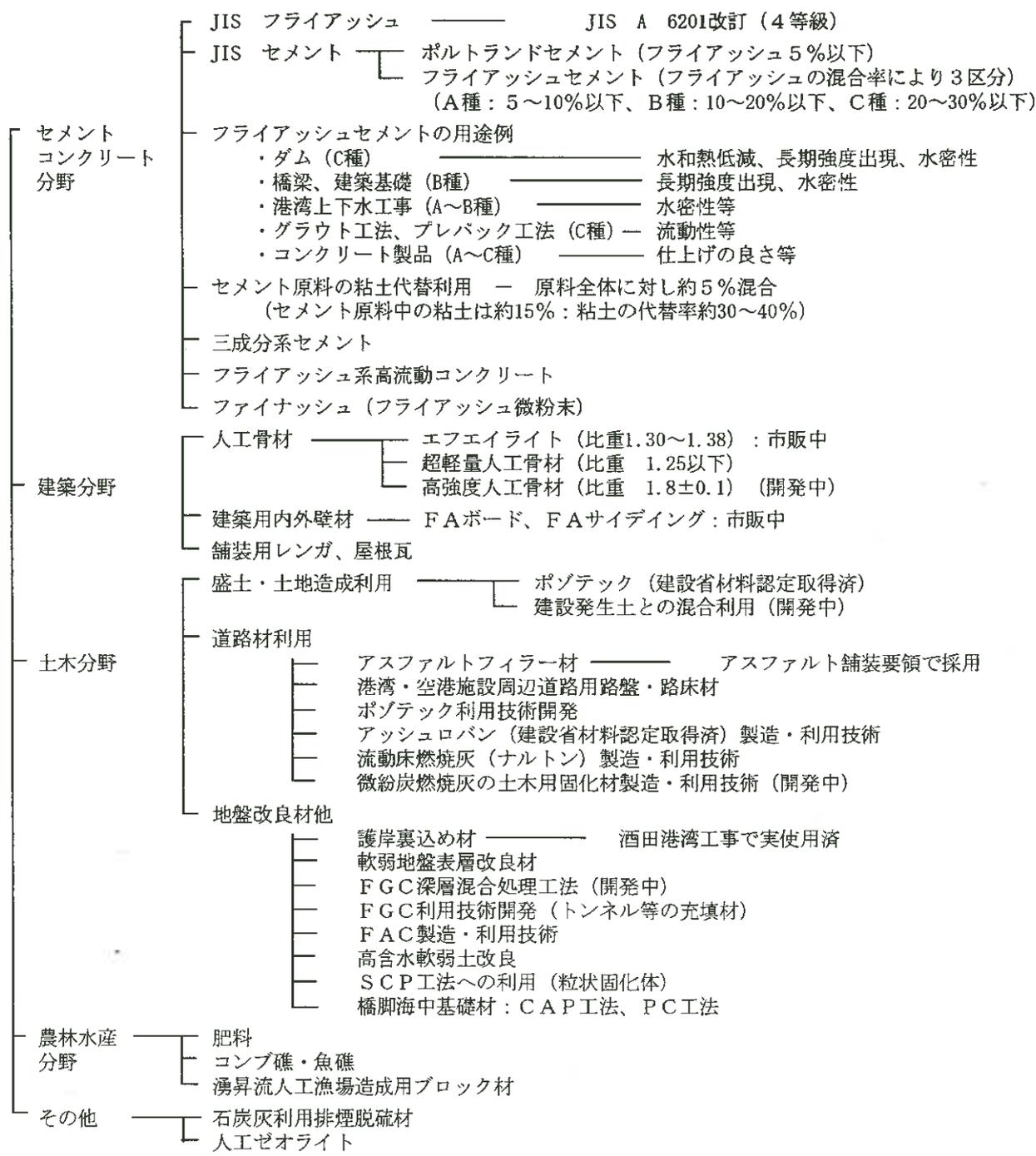


図-16 石炭灰有効利用技術の開発状況

5. おわりに

石炭灰は、発電に伴う副産物であり、燃料の安定確保のため多炭種を燃焼する海外炭火力では、石炭灰の品質も変動し、有効利用拡大を阻外する要因となっていた。また、運搬コストの面から遠隔地での利用に制約がある。これらの課題を解決するため、今回、苫東厚真発電所4号機増設に伴い、品質の均質化を図るため分級装置 (17.5 t/h × 2基) およびブレディングサイロ (3,800m<sup>3</sup> × 2基) 等を設置した。また、大量消費および通年利用が見込まれる地域への運搬コスト低減のため方策についても検討中である。

環境低負荷型社会の実現と建設コストの縮減は時代のニーズであり、リサイクル材としての石炭灰をより利用しやすいものとして提供できるよう、技術開発をはじめとした取組みを継続していく考えである。今後とも関係各位のご指導とご理解をお願いする次第である。

## 参考文献

- 1) 田中・角谷・飯塚・大草：石炭灰を利用した不良土改良工事について，地盤工学会北海道支部技術報告集第 42 号，pp325-330，平成 14 年 1 月
- 2) 中村雅博：丘珠空港における石炭灰添加による現地発生土の再利用について，第 2 回空港技術報告会，平成 14 年
- 3) 白戸・高橋（昌）：石炭灰を利用した建設汚泥の再生利用，土木学会北海道支部平成 11 年度年次技術研究発表会 VII - 1 pp564-569，平成 12 年 2 月
- 4) 深坂・小野寺・林・齋藤：石炭灰の気泡混合軽量土への適用性，地盤工学会北海道支部技術報告集第 42 号 pp337-340，平成 14 年 1 月
- 5) 工藤・齋藤・松浦・立田：石炭灰を利用した流動化埋戻材について，地盤工学会北海道支部技術報告集第 42 号 pp315-318，平成 14 年 1 月
- 6) 船坂秀夫：わが国の石炭灰利用状況について，クリーン・コール・テクノロジー，pp8-15，平成 14 年 7 月

# 石炭灰の土木材料への活用

北海道開発土木研究所 天野 公人  
同 上 西川 純一  
同 上 佐藤 厚子

## 1. はじめに

わが国では過去に2度にわたる石油危機以来、エネルギー供給源の多様化が図られている。このなかで石炭はその依存度こそ大きな変化はないが、使用量は増加している<sup>1)</sup>。とくに、エネルギー供給の4割を占める電力ではその18%余りが石炭からもたらされている。したがって、石炭火力発電所からは大量の石炭灰が発生し、その量も増加する傾向にある。

石炭灰は有価物として活用されない限り、産業廃棄物となり「廃棄物の処理および清掃に関する法律」に従って適正に処理されなければならない。しかし、近年は処分場となる土地の確保が難しくなっており、石炭灰の有効利用を一層図ることが重要になっている。

本報告では、土木分野における有効利用の現状を概観し、その利用技術の開発について述べるものである。

## 2. 石炭灰のリサイクルの現状と課題

### 2. 1. 石炭灰の発生状況

石炭の燃焼に伴い大量の石炭灰が排出される。石炭灰には全体の80%をしめる微粉状のフライアッシュと20%を占める砂礫状のボトムアッシュがある<sup>2)</sup>。国内の石炭灰は増加の一途をたどっており平成12年の発生量は843万tに達している<sup>3)</sup>。このうち76%は電気事業から発生するもので、残りは一般産業からの発生である。

### 2. 2. 石炭灰の利用状況

平成12年現在では、年間石炭灰発生量の82%にあたる693万tが有効利用されており、その71%はセメント分野への利用が占められている。土木分野では年間排出量の10%にあたる70万tが有効利用されている<sup>3)</sup>。土木材料としての主な用途には地盤改良材、道路路盤材、炭坑充填材がある。しかし、年間排出量の18%にあたる150万tの石炭灰は埋立処分されている。今後は処分地の確保が困難となることが予想されることや、環境問題を考慮すると再資源化が望ましく石炭灰の利用技術の開発が急務となっている。

## 3. 石炭灰の用途開発

### 3. 1. 石炭灰の用途

現在のところ、土木分野、特に地盤材料としての利用については以下のような研究開発がおこなわれている。<sup>1) 4) 5)</sup>

---

Kimihito AMANO, Jun'ichi NISHIKAWA and Atsuko SATO 札幌市豊平区平岸1条3丁目1番34号 独立行政  
法人北海道開発土木研究所 構造部 土質基礎研究室 (TEL:011-841-1709 FAX:011-841-7333)

- ・不良土土性改良材料—石炭灰はその含水比がほぼゼロであることと、転圧後時間経過とともに強度発現するものもあり、不良土の安定処理材に用いられる。
- ・流動化処理材料—セメントの代替材料として石炭灰を用いて、流動化処理土を作成する。流動性が高いことにより転圧困難な箇所にも用いられる。
- ・気泡混合固化材料—流動化処理土に気泡を加え軽量土としたものである。盛土荷重低減を目的として用いられる。
- ・盛土材料—石炭灰に適量の水を加えて、混合したものである。

### 3. 2. 石炭灰による施工事例（適用事例）

石炭灰の施工事例として北海道内における2例を紹介する。

#### ① 不良土の土性改良事例：日高自動車道<sup>6)</sup>

北海道開発局の施工した高規格道路建設事業に利用されたものである。高規格道路一連工事の中の切土区間より発生した不良土を土性改良した後、盛土区間に流用する計画であった。発生土はトラフィカビリティが確保できない不良土であったことから安定処理工法の採用となり、固化材として石炭灰が用いられた。使用した石炭灰は北海道電力より排出された酸化カルシウム含有率の高い、自硬性を持つものである。プラント混合方式を用いたため、混合精度の向上および飛散防止効果が得られた。石炭灰の使用により建設コストが縮減された。本工事の改良土量は37,000m<sup>3</sup>、石炭灰使用量は4,800tにのぼった。

#### ② 気泡混合固化土：狩場トンネル<sup>7)</sup>

①と同様に北海道開発局が施工したものであり、一般国道の防災工事に利用されたものである。トンネル坑口付近の急崖斜面における落石・岩石崩壊対策として、斜面に近接する覆道を含む坑口上部に気泡混合固化土の施工をした。気泡混合固化土のセメントの一部に石炭灰を用いている。使用した石炭灰は北海道電力より排出されたものである。本工事においても石炭灰使用により建設コストが縮減された。本工事の石炭灰使用量は4,000tであった。

### 3. 3. 石炭灰の用途開発

石炭灰の利用を促進するため、北海道開発土木研究所土質基礎研究室ではこれまでの石炭灰の用途開発に加えて、石炭灰を粒状加工した「造粒化石炭灰」の作成および利用を試みた。これまでの石炭灰の用途、とりわけ不良土土性改良にいたっては、微粉状であるため飛散し易い石炭灰は攪拌時に飛散がおり、施工の障害となっており、対策が必要とされている。また、石炭灰は主として盛土材料として利用されており、凍上抑制層や路盤材料への利用としての用途拡大も研究目的とした。

## 4. 造粒化石炭灰の活用

### 4. 1. 石炭灰の性状

試験に用いた石炭灰は、日本製紙㈱勇払工場火力発電所より排出された外国炭の新生灰3種である。石炭灰の性状を表-1に示す。石炭灰の含水比はほぼ0%、コンシステンシー限界はNPである。今回使用した石炭灰のpHは11.5~12.6と強アルカリ性である。この発電所のボイラにより排出される石炭灰を石炭種によりそれぞれA、B、C灰と区分した。石炭燃焼時に脱硫のために石灰石を混入することから、これらの石炭灰には酸化カルシウムが多く含まれている。

酸化カルシウムが多い石炭灰はポズラン活性が強くなり、強度も大きくなる<sup>8)</sup>。石炭灰の固化作用に関係すると見られる酸化カルシウム分は A、B、C 灰の順に大きく増加していることがわかる。強熱減量は A 灰 16.90%、B 灰 18.76%、C 灰 9.26%であり、C 灰は A、B 灰に比べて未燃分の少ない特徴がある。粒度分布については A、B、C 灰はほとんど差異がない。

#### 4. 2. 造粒化石炭灰の作成

造粒化に用いた試験機はバッチ式であり、材料となる石炭灰に水および必要により固化材を加え、容器の回転により造粒化をはかるものである。

今回使用した造粒機では、径 7mm 以上に造粒しようとする混合した材料が泥状になるが、おおよそ径 5mm 程度の粒子を作成することは可能であった。しかし、径 7mm の粒子を貯蔵すると圧縮により粒子同士が付着し、塊状となるため今回の実験では粒径 1mm および 3mm の粒子の作成を目標(目標粒径)とした。表-2 に示すように灰種、目標粒径および固化材(セメント)添加率を変え T-1 から T-8 までの 8 種類の試料を作成し、基本物性試験を行った。造粒化石炭灰の一例として A 灰にセメントを 2.5% 混合し粒径 3mm を目標に造粒化した試料(T-3)を写真-1 に示す。A、B 灰についてはセメントを添加しない試料と添加した試料を作成したが、C 灰については酸化カルシウム含有量が高いことからセメントを添加しなかった。造粒化石炭灰の性状を表-2 に、粒径加積曲線を図-1 に示す。図-1 によると、造粒化石炭灰の細粒分(粒径 75 $\mu$ m 未満)は造粒化前の石炭灰に対し、いずれも 40% 未満に減少しており、飛散を抑制した材料になったことがわかる。石炭灰に質量で 90% 以上含まれる細粒

分が施工時の飛散の原因と推測され、細粒分含有率の低下が飛散防止条件と考えられるため、セメント添加率と細粒分含有率の関係を調べた(図-2)。図-2 によれば、A 灰を用いて目標粒径 1mm

表-1 石炭灰の性状

| 石炭灰名                                       |                                     | A 灰 <sup>*1</sup>    | B 灰 <sup>*2</sup> | C 灰 <sup>*3</sup> |      |
|--|-------------------------------------|----------------------|-------------------|-------------------|------|
| 基本物性値                                      | 自然含水比 $w_n$ (%)                     | 0.2                  | 0.0               | 0.0               |      |
|  | 土粒子密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> ) | 2.522                | 2.530             | 2.690             |      |
|  | 粒度特性                                | 礫分 2~75mm(%)         | 0.0               | 0.0               | 0.0  |
|  |                                     | 砂分 75 $\mu$ m~2mm(%) | 5.3               | 4.5               | 8.1  |
|  |                                     | シルト分 5~75 $\mu$ m(%) | 90.8              | 89.8              | 86.3 |
|  |                                     | 粘土分 5 $\mu$ m以下(%)   | 3.9               | 5.7               | 5.6  |
|  |                                     | 均等係数 $U_c$           | 1.44              | 1.65              | 1.89 |
|  |                                     | 曲率係数 $U'_c$          | 1.05              | 1.14              | 1.05 |
|  | 最大粒径(mm)                            | 0.425                | 0.425             | 0.850             |      |
|  | 50%粒径 $D_{50}$ (mm)                 | 0.0118               | 0.0117            | 0.0131            |      |
| 日本統一分類名                                    | Fm                                  | Fm                   | Fm                |                   |      |
| pH   | 11.5                                | 12.6                 | 12.6              |                   |      |
| 強熱減量 L(%)                                  | 16.90                               | 18.76                | 9.26              |                   |      |
| 最大乾燥密度 $\rho_{d,max}$ (g/cm <sup>3</sup> ) | 1.038                               | 1.005                | 1.104             |                   |      |
| 最適含水比 $w_{opt}$ (%)                        | 45.5                                | 46.0                 | 38.3              |                   |      |
| 化学分析値                                      | SiO <sub>2</sub> (%)                | 37.50                | 38.69             | 42.52             |      |
|  | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)  | 27.07                | 22.37             | 22.08             |      |
|  | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)  | 3.58                 | 2.91              | 2.89              |      |
|  | CaO(%)                              | 7.99                 | 10.11             | 13.87             |      |
|  | MgO(%)                              | 0.59                 | 0.34              | 1.80              |      |

\*1 オーストラリア(ニューカース)90%とオーストラリア(サウスブライ)10%の混炭 \*2 オーストラリア(ブローラ)40%とオーストラリア(ニューカース)10%とオーストラリア(サウスブライ)50%の混炭 \*3 中国(東遼)50%とオーストラリア(サウスブライ)50%の混炭

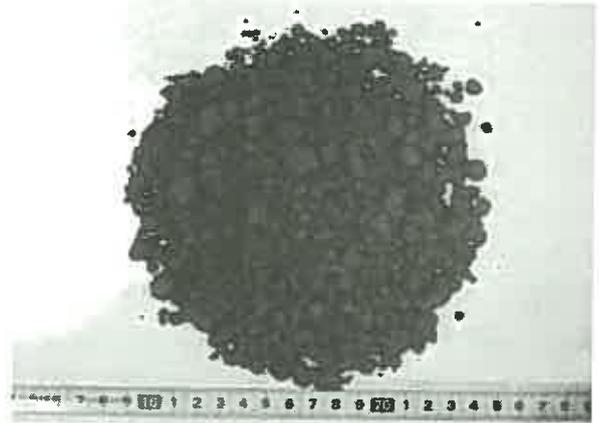


写真-1 造粒化石炭灰(T-3)

表-2 造粒化石炭灰の性状

| 造粒化石炭灰名                             |                     | T-1    | T-2   | T-3   | T-4   | T-5   | T-6  | T-7   | T-8   |
|-------------------------------------|---------------------|--------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|
| 作成条件                                | 石炭灰種                | A 灰    |       |       |       |       |      |       |       |
|                                     | セメント配合(%)           | 0.0    | 2.5   | 2.5   | 5.0   | 0.0   | 0.0  | 2.5   | 0.0   |
|                                     | 目標粒径(mm)            | 1      | 1     | 3     | 1     | 1     | 3    | 1     | 3     |
| 自然含水比 $w_n$ (%)                     |                     | 28.1   | 28.4  | 26.0  | 25.3  | 29.3  | 26.4 | 26.6  | 28.9  |
| 土粒子密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> ) |                     | 2.53   | 2.51  | 2.45  | 2.54  | 2.49  | 2.46 | 2.49  | 2.58  |
| 細粒分含有率(%)                           |                     | 33.9   | 27.0  | 8.5   | 16.7  | 22.0  | 3.9  | 15.1  | 3.8   |
| 粒度特性                                | 50%粒径 $D_{50}$ (mm) | 0.6    | 0.5   | 2.9   | 0.8   | 0.8   | 3.2  | 1.3   | 2.9   |
|                                     | 最大粒径(mm)            | 4.75   | 4.75  | 19.00 | 4.75  | 4.75  | 9.50 | 4.75  | 53.00 |
|                                     | 均等係数 $U_c$          | 134.99 | 62.63 | 9.51  | 64.44 | 78.57 | 2.89 | 97.06 | 12.2  |
|                                     | 曲率係数 $U'_c$         | 0.26   | 2.54  | 3.61  | 17.4  | 12.1  | 1.64 | 47.42 | 1.57  |

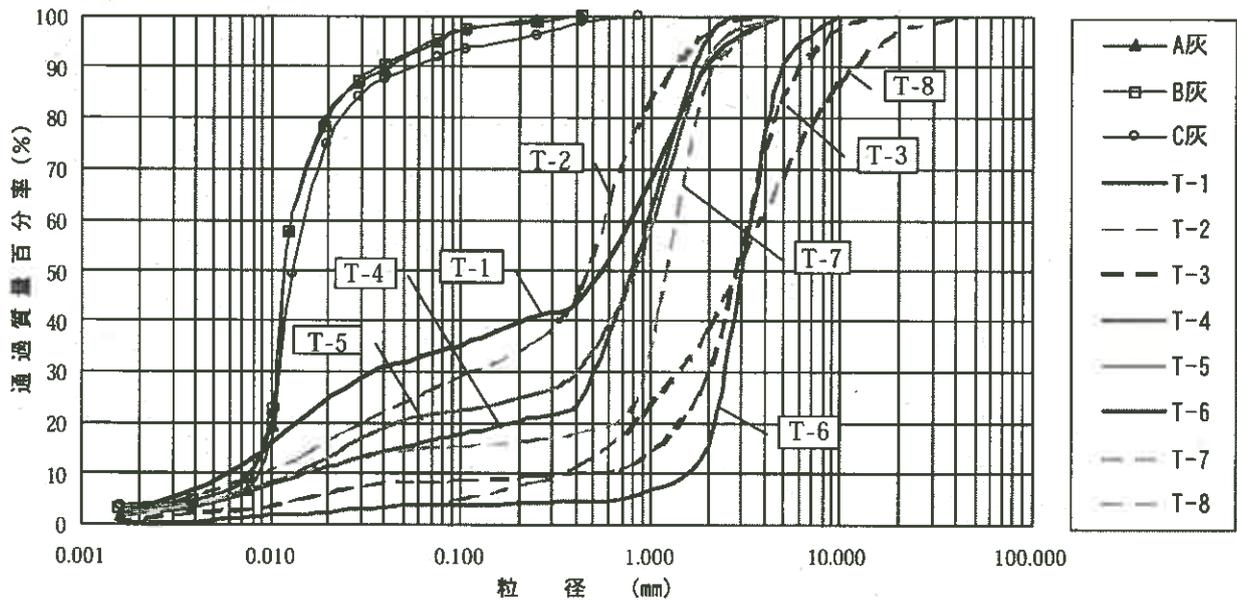


図-1 造粒化石炭灰の粒径加積曲線

としてセメント添加率のみを変化させたT-1、T-2、T-4の比較、同じくB灰を用いたT-5、T-7の比較から、セメント添加率が高い程、細粒分含有率が低下する傾向が明らかである。A、B灰についてセメントを添加せず目標粒径1mmとしたT-1、T-5の比較、同じく2.5%のセメントを添加したT-2、T-7の比較から、酸化カルシウム含有率の高いB灰を材料とする造粒物がA灰のそれよりも細粒分含有率が低下する傾向にあることがわかる。また、目標粒径のみ異なるT-2、T-3の比較、およびT-5、T-6の比較から、目標粒径が大きい程、細粒分含有率が低下する傾向にあるといえる。

飛散防止のために石炭灰の造粒化を行う場合、細粒分含有率を低下させなければならない。今回の試験結果から、そのためには酸化カルシウム含有量の高い石炭灰を使用することがよいことがわかった。酸化カルシウム含有量の低い石炭灰を用いる場合、適量のセメントを添加し、作成の目標粒径を大きくすることにより細粒分含有率を抑えることができた。

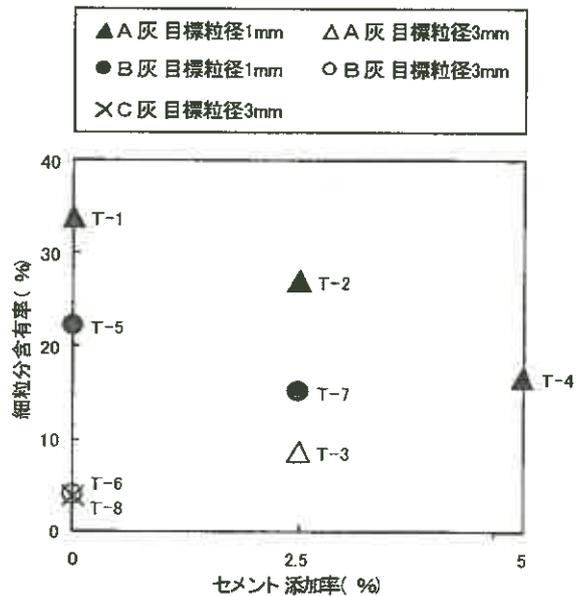


図-2 セメント添加率と細粒分含有率

#### 4. 3. 造粒化石炭灰の盛土材料への適用性

##### 4. 3. 1. 適用条件

盛土材料としてまず必要な条件は、施工においてトラフィカビリティが得られることである。一般にトラフィカビリティはコーン指数(qc)で示される。建設機械のうち接地圧が最低である超湿地ブルドーザを用いた場合、qc=200kPa以上が必要とされるが、普通ブルドーザ(21t級)を使う場合はqc=700kPa以上、さらにダンプトラックの走行を考慮するとqc=1,200kPa以上が必要とされる(表-3)。

#### 4. 3. 2. 試験結果

1ヶ月程度養生した造粒化石炭灰（T-1～T-7）の締固めた供試体の $q_c$ を求めたところ、いずれの試料も2,000kPa以上あった<sup>10)</sup>。これらのことから造粒化石炭灰は盛土材料として十分に利用できる材料といえる。

表-3 建設機械の走行に必要なコーン指数<sup>9)</sup>

| 建設機械の種類         | コーン指数(kPa) | 建設機械の接地圧(kPa) |
|-----------------|------------|---------------|
| 超湿地ブルドーザ        | 200以上      | 0.15 ~ 0.23   |
| 湿地ブルドーザ         | 300以上      | 0.22 ~ 0.43   |
| 普通ブルドーザ(15t級程度) | 500以上      | 0.50 ~ 0.60   |
| 普通ブルドーザ(21t級程度) | 700以上      | 0.60 ~ 1.00   |
| スクレープドーザ        | 600以上      | 0.41 ~ 0.56   |
| 非牽引式スクレーパ       | 700以上      | 1.30 ~ 1.40   |
| 自走式スクレーパ        | 1000以上     | 4.00 ~ 4.50   |
| タンクトラック         | 1200以上     | 3.50 ~ 5.50   |

#### 4. 4. 造粒化石炭灰の凍上抑制層材料への適用性

##### 4. 4. 1. 適用条件

造粒化石炭灰を凍上抑制層用材料に使用するためには、凍上を起こしにくいことが確認される必要がある。このためには、凍上試験に合格しなければならない(表-4)。

##### 4. 4. 2. 試験結果

T-1からT-8について、1試料各3個の供試体の凍上試験を実施した。凍上試験の試験結果を表-5に示す。この結果によれば、A灰を用いた目標粒径3mmの造粒化石炭灰（T-1、T-2、T-4）は極微細霜降状を含むコンクリート状凍結を示し、凍上抑制層材料として合格に至らなかったが、B灰、C灰を材料とするものは、コンクリート状凍結を示し、凍上率においても合格基準を満たしている。

また、目標粒径を3mmとしたものは石炭灰の種類、セメント添加率に関わらず、コンクリート状凍結であり、凍上率においても合格基準を満たしている。これらのことから、酸化カルシウム含有率の高いB灰およびC灰を材料とする造粒化、また目標粒径を3mmとする造粒化を行えば、条件を満たした凍上抑制層材料となり得ることがわかった。

表-4 凍上試験判定<sup>11)</sup>

| 番号 | 凍結様式                         | 凍上率   | 判定  |
|----|------------------------------|-------|-----|
| 1  | コンクリート状凍結<br>(氷粒散在を含む)       | 20%未満 | 合格  |
|    |                              | 20%以上 | 要注意 |
| 2  | 部分的な極微細霜降状凍結を含む<br>コンクリート状凍結 | 20%未満 | 要注意 |
|    |                              | 20%以上 | 不合格 |
| 3  | 微細霜降状凍結                      | -     | 不合格 |
| 4  | 霜降状凍結                        | -     | 不合格 |
| 5  | 霜柱状凍結                        | -     | 不合格 |

表-5 造粒化石炭灰の凍上試験結果およびCBR試験結果

| 造粒化石炭灰名     |             | T-1  | T-2  | T-3  | T-4  | T-5  | T-6  | T-7  | T-8  |
|-------------|-------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 作成条件        | 石炭灰種        | A灰   |      |      |      | B灰   |      |      | C灰   |
|             | セメント配合(%)   | 0.0  | 2.5  | 2.5  | 5.0  | 0.0  | 0.0  | 2.5  | 0.0  |
|             | 目標粒径(mm)    | 1    | 1    | 3    | 1    | 1    | 3    | 1    | 3    |
| 日本統一分類名     |             | SF-G | SF   | GS-F | SF   | SF-G | G-S  | SF-G | GS   |
| 細粒分含有率(%)   |             | 33.9 | 27.0 | 8.5  | 16.7 | 22.0 | 3.9  | 15.1 | 3.8  |
| 凍上試験結果      | 凍結終了時含水比(%) | 70.5 | 63.3 | 52.9 | 66.3 | 65.4 | 52.0 | 62.2 | 53.7 |
|             | 凍上率(%)      | 22.7 | 11.0 | 7.7  | 12.0 | 13.9 | 6.7  | 18.0 | 1.0  |
|             | 凍結様式*       | 2    | 2    | 1    | 2    | 1    | 1    | 1    | 1    |
|             | 判定          | 不合格  | 要注意  | 合格   | 要注意  | 合格   | 合格   | 合格   | 合格   |
| 95%修正CBR(%) |             | 11.9 | 8.2  | 17.1 | 9.7  | 10.0 | 11.2 | 3.0  | 92.0 |
| 塑性指数        |             | NP   |

\* 1-コンクリート状凍結(氷粒散在を含む) 2-部分的な極微細霜降状凍結を含むコンクリート状凍結

## 4. 5. 造粒化石炭灰による路盤材料への適用性

### 4. 5. 1. 適用条件

路盤材料に利用するためには、修正 CBR が少なくとも 20%以上あり、塑性指数(PI)が 6 以下でなくてはならないという基準がある<sup>12)</sup>。

### 4. 5. 2. 試験結果

表-5 に修正 CBR 試験結果を示す。塑性指数についてはいずれの試料も造粒化された固化体のため、非塑性であり、基準を満足する。修正 CBR については、試験をした試料のうち T-8 のみが 20%以上あり、路盤材として利用できることがわかる。T-8 のみが修正 CBR の基準値を満足したのは他の造粒化石炭灰と比較して粒度特性、粒子硬度の違いによる可能性があると考えられるが、詳細は今後明らかにしていきたい。T-8 は酸化カルシウム含有量の特により多い C 灰にセメントを添加せずに作成したものである。酸化カルシウム含有量のより少ない石炭灰でも粒度特性等の造粒化の条件を工夫することにより修正 CBR 試験値を満足させることができると考えられる。

## 4. 6. まとめ

本研究によって得られた知見をまとめると以下のようなになる。

- ① 石炭灰を造粒化することにより細粒分は大きく減少し、飛散の程度を抑えることができる材料となった。飛散防止目的からいえば、酸化カルシウムの少ない石炭灰の場合はセメントを適量添加した造粒化、粒径の大きい造粒化を行うことが望ましい。
- ② 造粒化石炭灰は、盛土材料として利用可能である。
- ③ 造粒化石炭灰のうち、酸化カルシウムの多い石炭灰を材料としたもの、または目標粒径を大きくしたものは、凍上抑制層材料として利用可能である。
- ④ 造粒化石炭灰は、条件により路盤材料として利用できる。

## 5. あとがき

今回の試験では、造粒化石炭灰が地盤材料として条件により適用可能であることがわかった。今後は各地盤材料について作成レベルからのテストを繰り返し、適用条件をさらに明確化すると共に経年変化の調査を行いたい。この研究が石炭灰の利用促進につながればよいと考える。

### 〈 参考文献 〉

- 1)資源エネルギー庁石炭部：コール・ノート,1995
- 2)地盤工学会：廃棄物と建設発生土の地盤工学的有効利用,1998
- 3)石炭灰利用総合センター：石炭灰全国実態調査報告書,2002
- 4)山澤文雄・西川純一・佐藤厚子：石炭灰の土木材料としての利用,北海道開発局開発土木研究所月報 No.563,2000
- 5)環境技術協会・日本フライアッシュ協会：石炭灰ハンドブック,1995
- 6)小林仁：石炭灰の地盤利用への取り組みについて,地盤工学会北海道支部技術報告集第 42 号,2002
- 7)土田和宏・深坂敏則・青木仁司：エアミルクの石炭灰利用の検討と施工について,第 45 回北海道開発局技術研究発表会,2002
- 8)篠崎貞行：日本の石炭灰有効利用技術,火力原子力発電 Vol.48 No.10,1997
- 9)日本道路協会：道路土工-施工指針,1987
- 10)佐藤厚子・西川純一・山澤文雄・仲里豊彦：造粒化した石炭灰の地盤材料への適用性,第 56 回土木学会,2001
- 11)日本道路協会：道路土工-排水工指針,1987
- 12)日本道路協会：アスファルト舗装要綱,1993

# 未分解チップおよび現地発生土を有効利用したリサイクル緑化『ネッコチップ工法』

日特建設株式会社 山田 守<sup>1)</sup>・鈴木 潔<sup>2)</sup>・有光 重典<sup>2)</sup>

## 1. はじめに

平成 12 年度に全国の建設工事で搬出された建設副産物(建設廃棄物および建設発生土)は、建設廃棄物が 8,500 万トン、建設発生土が 2 億 8,400 万 m<sup>3</sup> である。近年のリサイクルの取り組みが高まる中で、建設副産物のリサイクル状況は、コンクリート塊およびアスファルト・コンクリート塊のリサイクルは進展しているものの、建設発生木材については横ばい状態にある<sup>1,2)</sup>。

筆者らは、このような現状を鑑み、法面緑化工への建設副産物の積極的な利用工法の開発を進めている。中でも、造成工事などの伐開・除根作業を伴う建設現場から発生する伐採材(根、幹、枝葉など)や建設発生土(特に表土)は、本来、その土地の財産であり、元の場所に戻すことが自然と考えている。

本報告では、伐採材や根株などの建設発生木材を針状に粉碎処理した未分解チップを建設発生土(現地発生土)とともに混合して法面緑化工の生育基盤材とする「ネッコチップ工法」について紹介する。

## 2. ネッコチップ工法の概要

### 2.1 未分解チップの使用

現場で発生した伐採木は、従来焼却や埋め立て処分が一般的であった。しかし、産業廃棄物処理法の改定により、原則焼却、埋め立て処分は禁止されている。

伐採木の有効利用方法には、木材チップにしてマルチング材として利用する方法や堆肥化して土壌改良材にする方法がある。その他に、専用の処理装置が必要となるが炭化処理なども行われている。しかし、マルチング材への利用は使用量が少ないこと、炭化の処理装置は汎用性に欠けることなどの問題があった。また、堆肥化は、その処理に数ヶ月間を必要とするため、建設工事においては時間的な余裕が無かったり、堆肥化ヤードを確保することが困難であるなどの問題があった。

そこで、伐採木を未分解のまま利用する方法を検討・開発したのが『ネッコチップ工法』である。つまり、現場内で発生した伐採木を現場内でチップ化し、堆肥化せずに植物生育基盤として利用するものである。

### 2.2 施工方法

ネッコチップ工法の施工フローを図-1 に示す。伐採材(根・幹・枝葉など)は、粉碎処理を行い針状(最大長さ 15cm 幅 1cm 程度)のチップにする。粉碎処理状況を写真-1 に示す。また、現地発生土は、巨礫などの異物除去を行う(写真-2)。生育基盤製造は、専用の材料製造プラントで行う。プラントを写真-3 に示す。標準的な材料配合は、木材チップと現地発生土を 1:1 の割合(容積比)とし、それに団粒剤、接合剤、肥料、種子、水を加えている。材料配合を表-1 に示す。現地発生土の種類や性状は現場によって異なり、土壌の改良効果に差が生じる場合があるため、水の添加量は事前の配合試験により決定する。

プラントで製造された生育基盤材は、ダンプトラック等に積み込み、施工する法面まで運搬する。法面への生育基盤材の造成(撒き出し)は、本工法専用に開発した高速ベルトコンベア搭載の撒き出し装置によって行う(写真-4)。生育基盤材は、バックホウで撒き出し装置の上部ホッパーに投入し、下部の高速ベルトコンベアの

---

Mamoru Yamada, Kiyoshi Suzuki, Sigenori Arimitsu Nittoc Construction Co., Ltd.

<sup>1)</sup>〒104-0044 東京都中央区明石町 13 番 18 号 TEL:03-3542-9110 FAX:03-3542-9118

<sup>2)</sup>〒064-8513 北海道札幌市中央区南十三条西 11 丁目 2 番 32 号 TEL:011-561-5111 FAX:011-561-7210

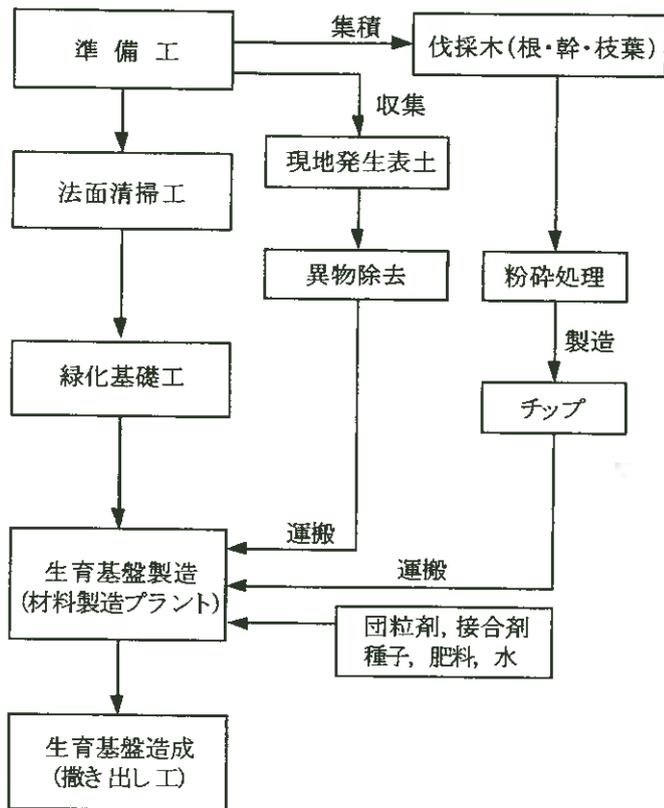


図-1 ネットチップ工法の施工フロー

表-1 ネットチップ工法材料配合表(1m<sup>3</sup>当り)

| 材料    | 規格・仕様     | 単位             | 数量  | 備考            |
|-------|-----------|----------------|-----|---------------|
| チップ   | 15cm以下    | m <sup>3</sup> | 0.5 | 伐採木を針状に粉砕したもの |
| 現地発生土 | 細粒分20%以上  | m <sup>3</sup> | 0.5 | 自然含水状態        |
| 団粒剤   | NCボンドA    | kg             | 3.0 |               |
| 接合剤   | NCボンドB    | kg             | 4.0 |               |
| 肥料    | 化成肥料8-8-8 | kg             | 3.0 |               |
|       | 緩効性肥料     | kg             | 2.0 |               |
| 種子    |           | 式              | 1   |               |
| 水     |           |                |     | 現場配合による       |



写真-1 伐採木の粉碎状況



写真-2 発生土の異物除去状況



写真-3 生育基盤材の製造プラント



写真-4 撒き出し機



写真-5 撒き出し状況

回転力によって吐出される。写真-5 に撒き出し状況を示す。また、撒き出し装置は、バックホウのアタッチメントとして装着する形式であるため、撒き出し可能な高さはバックホウの旋回範囲となる。なお、高所への施工は、撒き出し装置を専用架台でクレーンに固定し吊り下げ方式で行う場合と、ポンプで生育基盤材を圧送する方式もある。

### 2.3 工法の特徴

ネッコチップ工法にはつぎのような特徴がある。

(1) ゼロエミッション。

現場内で発生する伐採材、現地発生土を現場内で有効利用を図ることができる。

(2) 堆肥化作業が省略できる。

有機物を堆肥化せずに、未分解チップのまま利用することで、堆肥化のための時間やヤードを省略することができる。

(3) チップが生育基盤の補強材として働く(図-2 参照)。

伐採木を針状に粉碎処理されたチップは、絡み合いの補強効果により、侵食に強い生育基盤となる。

(4) 地域植生に最適である。

現地発生土には、自生植物種子、地下茎、微生物などが混入しており、地域植生の復元に最適な土壌である。これにより周辺植生と調和した緑化が期待できる。

(5) 撒き出し機による効率的な施工が可能である。

専用撒き出し機を使用することで、従来のモルタルガンでは吹付圧送が困難であった大きな針状のチップを含む材料を吹き付けることが可能である。また、吹付量は、モルタルガンの吹付に比べて2倍以上と効率的な施工が可能である。

(6) コスト縮減

建設副産物(伐採木、現地発生土)の有効利用するため、これらの処分費および緑化資材費を縮減することができ、撒き出し機による大容量施工により施工費が低減されるため、トータルコストの縮減を図ることができる。

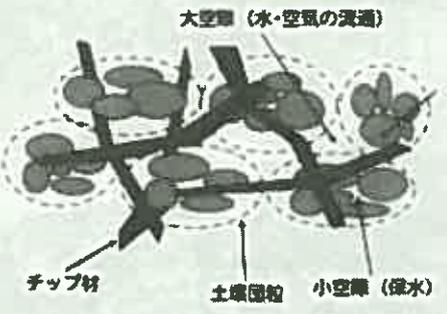
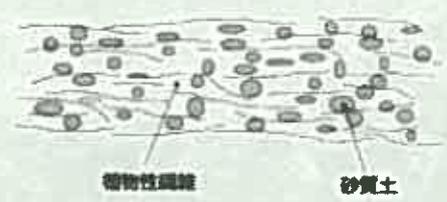
| ネッコチップ工法  |      | 厚層基材吹付工 (従来工法)   |
|---|------|--|
| チップ材、現地発生土、団粒剤、接合剤  | 構成材料 | 有機基材 (バーク堆肥+砂)、接合剤   |
|  <p>チップ材同士の絡み合い } 耐侵食性に優れた<br/>接合材による補強 } 生育基盤</p> | 土壌構造 |  <p>接合剤による補強</p> |

図-2 ネッコチップ工法と厚層基材吹付工の土壌構造の比較

### 3. ネットチップ工法の施工事例

#### 3.1 施工事例1 (寒冷地での事例)

当事例は、栃木県の標高 1,000~1,100m に位置し、積雪が 50~100cm 程度の寒冷地である。現場内で発生した伐採木チップおよび建設発生土のリサイクルを目的に当工法が適用された。導入植物は、ハギ類(ヤマハギ、コマツナギ、エニシダ)、在来草本(メドハギ、ススキ)および外来草本(オーチャードグラス)である。

施工は、平成 11 年 11 月上旬で発芽しない状況で越冬したが、生育基盤の侵食は見られなかった(写真-6)。施工後 2 年目の生育状況を写真-7 に示す。落葉低木のヤマハギ、エニシダが優占した落葉低木群落が完成している。

#### 3.2 施工事例2 (ネットチップ工法+苗木植栽)

当事例は、宅地造成工事に伴い発生した伐採木および黒ボク土を場内でリサイクルすること目的とした事例である。また、ネットチップ工法施工後に苗木植栽工を行っている。播種工による導入植物は、在来草本(メドハギ、ススキ)および外来草本(バミューダグラス、クリーピングレッドフェスク、レッドトップ)である。また苗木植栽工は、エゴノキ、ヤマザクラ、コナラ、アラカシ、ネズミモチ、イヌツゲ、アセビを導入した。

施工後 6 ヶ月の生育状況を写真-8 に、施工後約 3 年の生育状況を写真-9 に示す。当初は草本植物が優占していたが徐々に樹木が優占しつつある。



写真-6 施工事例1 施工後の越冬状況



写真-7 施工事例1 施工後約2年の生育状況



写真-8 施工事例2 施工後6ヶ月



写真-9 施工事例2 施工後3年

### 3.3 施工事例3 (ダムの流木と浚渫土の利用)

当事例は、ダムの浚渫工事で発生した流木と浚渫土砂(粘性土)を利用した事例である。写真-10に施工完了状況を示す。導入植物は、在来草本(メドハギ、ヨモギ)、外来草本(トールフェスク、クリーピングレッドフェスク、レッドクローバー)である。

施工は平成12年6月で、施工後1ヶ月程度で発芽が見られた。優占種は、イヌビエやメヒシバなどで、導入植物ではなく浚渫土砂(粘性土)の中に含まれていた埋土種子が発芽していた。写真-11に施工後2年後の生育状況を示す。優占種は、導入植物のヨモギ、メドハギである。

### 3.4 施工事例4 (吹付法枠内急勾配法面)

当事例は、ダム建設に伴って生じた急勾配法枠内の枠内緑化として、ネッコチップ工法を適用した事例である。導入植物は、ハギ類(ヤマハギ、コマツナギ)、在来草本(メドハギ)および外来草本(トールフェスク、クリーピングレッドフェスク、ケンタッキーブルーグラス)である。

施工は、平成13年1月で、施工後3ヶ月(4月中旬)には発芽が見られた(写真-12)。発芽初期は、外来草本植物が優占していたが、施工後8ヶ月後には、播種したものではなく、表土に含まれていた自生植物のイヌタデ、エノコログサ、カナムグラなどが優占していた(写真-13)。



写真-10 施工事例3 施工完了



写真-11 施工事例3 施工後約2年



写真-12 施工事例4 施工後3ヶ月



写真-13 施工事例4 施工後8ヶ月



写真-14 施工事例5 施工後6ヶ月



写真-15 施工事例5 法肩近景

### 3.5 施工事例5 (土捨場の盛土法面)

当事例は、ダム建設工事に伴って造成された土捨場盛土法面の事例である。現地の伐採木および表土のリサイクルを目的としている。当工事は試験工事で、播種あり区と播種なし区の2工区を設定している。播種植物は、在来草本(メドハギ)および外来草本(トールフェスク、クリーピングレッドフェスク、オーチャードグラス、ケンタッキーブルーグラス)である。

施工後6ヶ月後の生育状況を写真-14, 15に示す。生育状況は、播種あり・なし工区ともに、表土に含まれていた自生植物のハナウド(セリ科)が優占している。播種あり区では、ハナウドによって被覆された隙間にトールフェスク、クリーピングレッドフェスクが確認された。

## 4. おわりに

本報告は、現場発生土と伐採材を粉碎した未分解チップを堆肥化せずに法面緑化工の生育基盤材として再利用するネッコチップ工法の概要と施工事例を紹介した。当工法の生育基盤であれば植物の生育には悪影響もなく緑化工のための生育基盤材として再利用することが十分可能であることが示されたと考えている。

なお、未分解チップの生育基盤材への利用は、窒素飢餓などの影響が懸念されている。この問題に関しては、現在、長期的な土壌化学性の追跡調査を実施しており、施工1年程度ではあるが、有機物の腐朽は進むものの植物の生育に影響が無い範囲であるとの結果を得ている<sup>3,4</sup>。今後、長期的な腐朽過程や土壌状態および植生遷移を観察する予定である。

また、現地発生土には、多くの埋土種子が含まれている。施工事例においても、導入種以外の植物の成立が確認されている。埋土種子の中には、さまざまな植物種子混入の可能性があり、必ずしも、自然復元に適したものだけとは限らない。現地発生土に混入している埋土種子を有効に活用した郷土種の自然復元を行うためには、現地発生土の採取源や採取方法の検討を行う必要性を感じている。今後、これらの検討を含めたりサイクル緑化技術の研究開発を進めたいと考えている。

## 5. 参考および引用文献

- 1) 国土交通省総合政策局(2001)平成12年度建設副産物実態調査結果
- 2) 石口真実(2000)ゼロエミッションに挑戦したのり面緑化工法の開発・伐採樹木と現地表土の徹底利用・環境技術, 29(6): 21~26
- 3) 横塚享ほか(2000)未分解チップ施用土壌による法面緑化事例, 日本緑化工学会誌, 25(4): 471~474
- 4) 高橋正通・赤間亮夫・横塚享ほか(2001), 未分解チップ施用法面の土壌化学的特性および植生状況, 日本緑化工学会誌, 27(1): 181~184

## 重金属汚染土壌の洗浄分級技術の開発

○(株)竹中土木 技術本部 長澤 太郎

### 1.はじめに

工場敷地、跡地が有害物質により汚染されていることが判明する事例は年々増加し、それに対する社会的関心が年々高まっている。バブル崩壊や生産拠点の海外移転で工場が次々に姿を消し、跡地が再開発されるのに伴い、土壌汚染の判明件数は90年代から急増している。

社団法人土壌環境センターでは、土壌汚染調査の実施が望ましい場所が約93万ヶ所、汚染されている可能性のある場所が約31万ヶ所あり、調査と処理に要する費用は13兆円と試算している。また現在審議されている土壌浄化に関する新たな法律では、工場などを宅地として再開発するなど用途変更する場合、土地所有者に汚染調査と浄化を義務付けることになっている。

本報告では、この汚染土壌のなかでも重金属汚染土壌についての概要を紹介し、浄化対策技術として洗浄分級技術を適用した事例を紹介する。重金属は、他の汚染土壌対象物質である揮発性有機化合物(VOC)、油分と違い、分解・無害化処理ができないため、重金属に汚染された土壌を特に原位置で浄化することが非常に困難である。この洗浄分級技術により原位置で土壌を浄化し、再利用することが可能となる。

### 2.重金属汚染土壌の概要

汚染物質のうちいわゆる重金属と呼ばれるものは表-1に掲げるとおりである。

カドミウムや鉛等の重金属は、揮発性有機化合物や油分等の他の汚染物質と比較すると、環境中での移動性が低いために、地下水汚染が問題となることは比較的少ない。したがって汚染深度も地表面から浅い場合が比較的多い。ただし、六価クロム及びヒ素のようなイオンの形態で地下水を移動する重金属は地下水汚染を引き起こす場合もある。

近年、重金属汚染土壌において、土壌中の重金属含有量に対する評価を見直す機運が高まっている。これまで環境基準に定められていたのは地下水曝露の観点から溶出量のみで、含有量については参考値という形が取られてきた。しかし市街地における直接曝露の観点から、今後は含有量に対しても規制を設ける動きがある。土壌汚染対策法の施行でこれを検討している。

重金属汚染土壌の浄化対策を表-2に示す。これまで重金属汚染土壌の浄化対策としては、最終処分場への搬出処分か固化・不溶化処理、遮水壁による原位置での封じ込めが主流であった。しかし、最終処分場への搬出処分については、最終処分場の新規建設が住民の反対等により困難になってきており、処分場の残余年数が限られてきたことから処分費が年々上がってきてい

表-1 主な重金属類と用途

| 物質名    |                  | 用途・業種  |
|--------|------------------|--------|
| カドミウム  | Cd               | メッキ・合金 |
| シアン化合物 | CN               | 電気メッキ  |
| 鉛      | Pb               | 蓄電池・銃弾 |
| 六価クロム  | Cr <sup>6+</sup> | メッキ・合金 |
| ヒ素     | As               | 半導体・農薬 |
| 水銀     | Hg               | 医薬品・電池 |
| セレン    | Se               | 顔料     |

表-2 重金属汚染土壌対策概要

| 工法   |         | 技術概要      |
|------|---------|-----------|
| 浄化   | 原位置浄化   | バイオ、地下水揚水 |
|      | 掘削浄化    | 熱処理、洗浄    |
| 封じ込め | 原位置封じ込め | 地中壁、固化処理  |
|      | 掘削+封じ込め | 固化・不溶化後封入 |
| 搬出   | 掘削+廃棄   | 敷地外に最終処分  |

Nagasawa Taro:千葉県印西市大塚 1-5-1 竹中技術研究所 tel:0476-47-1700 fax:0476-47-6460

ることが問題となっている。また固化・不溶化処理と遮水壁による原位置での封じ込めについては、汚染物質の敷地外への溶出は抑制できるが、敷地内の汚染物質の含有量に関しては変わらない。これまでは対策として有効であったが、前述のとおり今後は含有量に対しても削減を求められる見通しであるため、これからの浄化対策は土壌から汚染物質を分離する技術が求められてきている。

重金属を土壌から分離する技術は、大きく分けると熱処理と洗浄処理になる。熱処理には鉛やヒ素など高沸点金属を 800～1200℃以上で焼却する方法や、水銀やシアン化合物など低沸点金属を 300℃程度で加熱気化させ土壌から分離する低温加熱法がある。焼却法は大規模なプラントが必要であり、原位置にプラントを設置し処理することは非現実的である。低温加熱法は実用化が始まっている。

一方、洗浄分級は土壌を洗浄しふるい分けをすることにより洗浄土壌と汚染物質を分離する方法で、浄化された土壌は埋め戻し等に再利用できるため、汚染土壌の処分量を減少することができる方法である。洗浄プラントは大規模な固定式プラントと原位置で仮設的に設置する移動式プラントの両者とも実用化されている。

### 3. 洗浄分級技術の概要

洗浄分級技術の概念図を図-1 に示す。

原理としては、①土粒子に吸着している重金属を洗浄剤を用いて溶解させる②汚染物質の吸着量は土壌の表面積に比例するため、汚染物質の吸着量の少ない粗粒分と吸着量の多い細粒分を分離する、の2つを組み合わせたものである。

洗浄分級フローは以下の通りとなる。

- ①重金属に汚染された土壌と、重金属を液中に溶解させる洗浄剤を、洗浄ミキサーで混合する。
- ②多量の水ですすぎ、土壌と汚染物質をよく分離させる。
- ③振動ふるい機により細粒分と粗粒分を分ける。粗粒分は洗浄土壌として回収する。
- ④洗浄廃水は濁水処理により上澄み水と濃縮汚泥に分離する。上澄み水は再利用し、濃縮汚泥は産廃処分する。

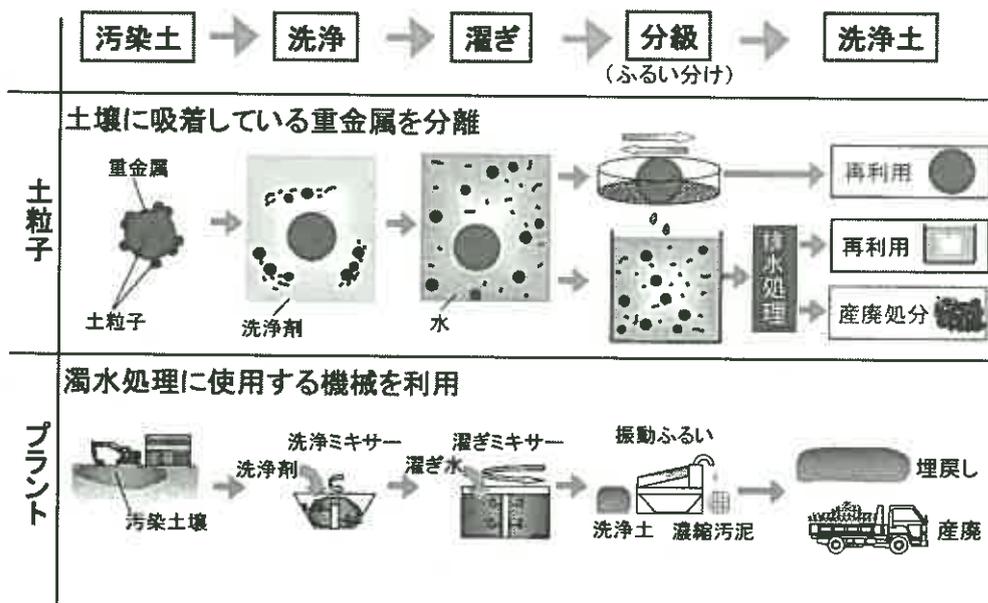


図-1 洗浄分級技術の概念

洗浄分級の効率は特に粒度に依存するとされている。洗浄しやすさと粒度の関係を図-2に示す。ここで、図中の範囲Ⅰでは水のみで洗浄可能な粒度であり、範囲Ⅱは洗浄剤等の補助により洗浄可能な粒度、範囲Ⅲは洗浄が困難な粒度である。

洗浄分級の目標値を表-3に示す。

今回の汚染対象物質は、サイト数が最も多いものの一つである鉛とした。

洗浄土壌の求められる品質は、洗浄土壌が再利用可能な品質であることであり、そのための目標値として溶出量が土壤環境基準値以下であること、含有量が参考値以下であることとした。また処理コストについては管理型処分場の処分費以下とした。また処理コストをなるべく抑えるため、使用機械は濁水処理で使用する汎用機械を使用することとした。

#### 4. 室内実験による検討

室内実験により、使用する洗浄剤、洗浄条件について検討を行った。

実験条件を表-4に示す。使用土壌は砂に細粒分を添加して表に示す粒度分布に調整したものを使用した。汚染土壌は、土壌を硝酸鉛溶液に含浸後、乾燥させた模擬汚染土壌を使用した。この模擬汚染土壌の粒度別の汚染物質分布状況を図-3に示す。溶出量については、レキ分を別として粒径が小さくなるほど小さくなり、含有量については、粒径が小さくなるほど大きくなる。これは土壌の粒径が小さくなるほど表面積が大きくなるため、鉛との吸着力が強くなるからである。

鉛の溶解度はpHに依存し酸性溶液で溶解することが知られている。この性質を用いて、洗浄液には酸性溶液を使うこととし、水を使用した場合との比較を行った。実験因子は表に示す項目について検討を行った。

##### 1) 洗浄液の検討

複数の洗浄剤を用いて土壌洗浄実験を行った。実験手順を写真-1に示す。洗浄とすすぎには室内実験用のモルタルミキサーを使用した。洗浄・すすぎ後ふるい分けし、ふるいに残った洗浄土を乾燥させ、この試料について溶出量と含有量の分析を行った。

実験結果を図-4に示す。これらの洗浄剤で最も含有量除去率が高かったのはシュウ酸であった。溶出量については原土より大きくなるものもあり、洗浄により溶出しやすくなっていると考えられた。この

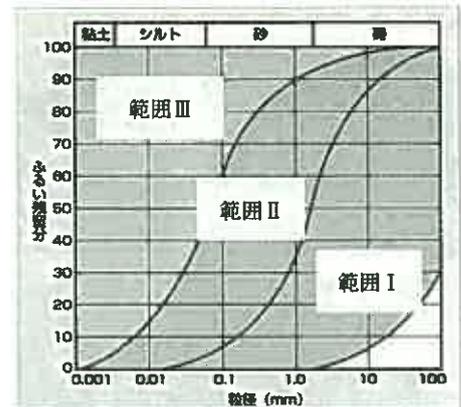


図-2 洗浄の粒度区分

表-3 洗浄分級目標値

| 項目    | 目標値        |
|-------|------------|
| 品質    | 溶出量基準値以下   |
|       | 含有量参考値以下   |
| 処理コスト | 管理型最終処分費以下 |
|       | 汎用機械を利用    |

表-4 実験条件

|       | 土質          | 山砂           |            |
|-------|-------------|--------------|------------|
|       | 模擬汚染土壌      | Pb含有量        | 2,990mg/kg |
| Pb溶出量 |             | 4.74mg/l     |            |
| 粒度分布  |             | >2.36mm      | 20%        |
|       |             | 0.85~2.36mm  | 20%        |
|       | 0.25~0.85mm | 30%          |            |
|       | <0.25mm     | 30%          |            |
| 実験因子  | 洗浄剤         | 水、硫酸、シュウ酸、硝酸 |            |
|       | 洗浄条件        | 固液比、洗浄時間     |            |
|       | その他         | 繰り返し洗い、不溶化   |            |
| 評価項目  | 品質          | 溶出量、含有量      |            |

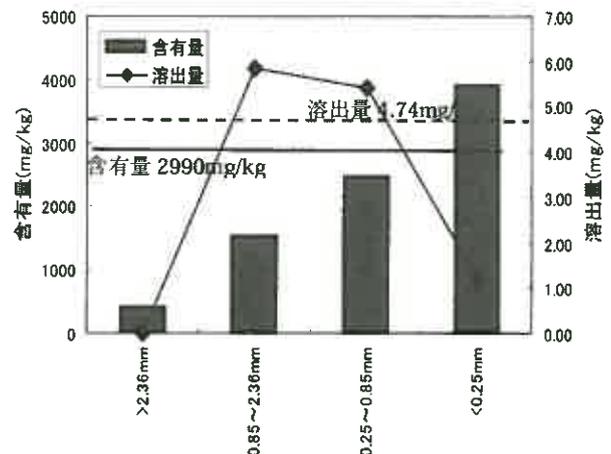


図-3 粒度別汚染分布

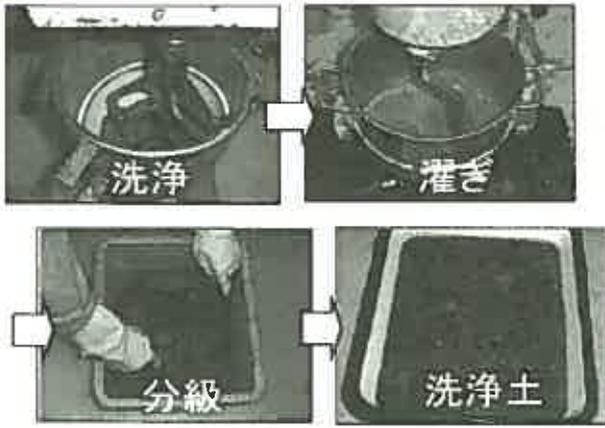


写真-1 室内実験手順

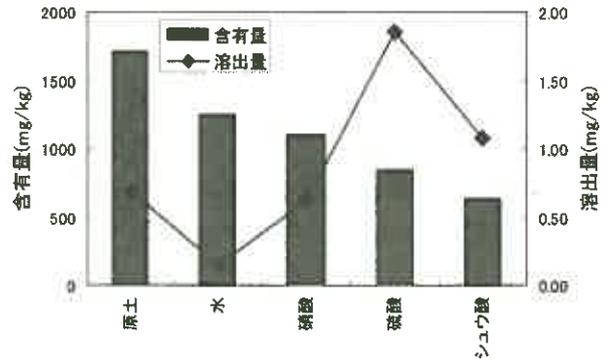


図-4 洗浄剤の検討

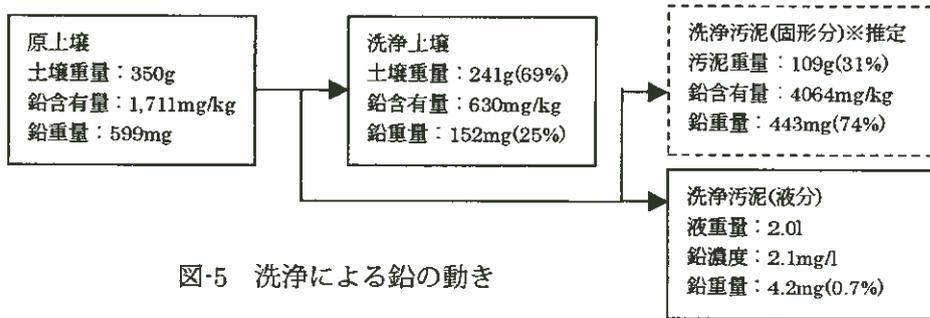


図-5 洗浄による鉛の動き

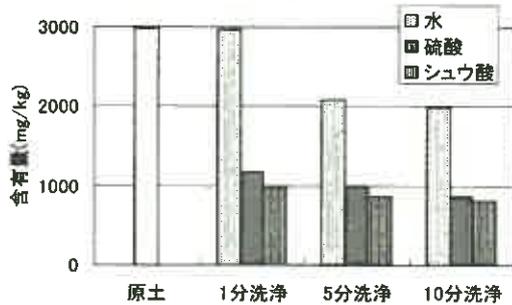


図-6 洗浄時間の検討

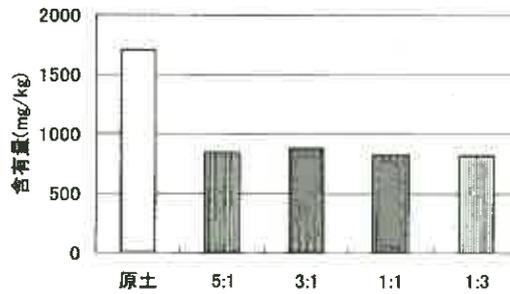


図-7 洗浄固液比の検討

ケースの鉛の動きを図-5に示す。鉛の除去率は重量比で75%であった。廃液中に溶解している鉛の量は模擬汚染土壌に含まれていた鉛重量の3%以下であり、除去した鉛のほとんどが汚泥として固形物化していた。

## 2) 洗浄条件の検討

土壌洗浄実験により洗浄条件を検討した。そのうち洗浄時間と洗浄固液比についての検討結果を図-6、7に示す。

洗浄時間については水、硫酸、シュウ酸について実施した。どのケースにおいても洗浄時間が5分から10分で除去率が漸減であったため、5分で適当と判断した。洗浄固液比についてはシュウ酸について実施した。どのケースも大きな差はなく、ハンドリングの面より1:1が良いと判断した。すすぎ時間、すすぎ固液比についても同様の検討を行い、洗浄条件を表-5のとおり決定した。

表-5 最適洗浄条件

| 項目     | 洗浄条件     |
|--------|----------|
| 洗浄剤    | シュウ酸     |
| 洗浄剤濃度  | 0.1M/l   |
| 洗浄時間   | 10分      |
| 洗浄固液比  | 固:液=1:1  |
| すすぎ時間  | 10分      |
| すすぎ固液比 | 固:液=1:10 |

### 3) 繰り返し洗浄の検討

洗浄、すすぎ、分級の3工程を繰り返す行う効果を検討するため、いくつかの工程の組み合わせについて洗浄実験を行った。

洗浄を行うと洗浄土壌が酸性を呈し、これに伴い溶出量が残留するという問題が起こり、これに対処するため仕上げのアルカリすすぎを実施することを考案した。前述したように鉛の溶解度はpHに依存し、pHが大きくなると鉛イオンはアルカリイオンと水酸化鉛を作り沈殿・不溶化する。pH=9.5程度で最も溶解度が低くなる。この性質を利用して、洗浄土壌をアルカリですすぎ、溶出成分を不溶化して洗浄土壌の残留溶出量を低減する。

上記のアルカリすすぎを含めた、洗浄条件と工程の組み合わせを表-6に、実験結果を図-8に示す。

洗浄→すすぎ→

表-6 繰り返し洗浄の検討

分級を2回繰り返したNo.5とNo.7が含有量除去率が大きかった。またアルカリすすぎを行ったNo.7は溶出量がただ一つ1mg/l以下となりアルカリすすぎの

| 実験ケース | 洗い | すすぎ | 分級 | 洗い | すすぎ | アルカリすすぎ | 分級 | 不溶化処理 |
|-------|----|-----|----|----|-----|---------|----|-------|
| No.1  |    |     |    | ○  | ○   |         | ○  |       |
| No.2  | ○  |     | ○  | ○  | ○   |         | ○  |       |
| No.3  |    | ○   | ○  | ○  | ○   |         | ○  |       |
| No.4  | ○  | ○   | ○  |    | ○   |         | ○  |       |
| No.5  | ○  | ○   | ○  | ○  | ○   |         | ○  |       |
| No.6  | ○  | ○   | ○  |    |     | ○       | ○  |       |
| No.7  | ○  | ○   | ○  | ○  |     | ○       | ○  |       |
| No.8  | ○  | ○   | ○  | ○  |     | ○       | ○  | 消石灰   |
| No.9  | ○  | ○   | ○  | ○  |     | ○       | ○  | 不溶化材  |

効果を確認することができた。

No.7の洗浄土壌はまだ溶出量が環境基準に達していないため、薬材を加え不溶化処理を行った。薬材には消石灰と市販の不溶化材(焼却灰をリサイクルしたもの)を使用した。結果は消石灰は環境基準値に達しなかったが溶出量を1/6、埋立基準(0.3mg/l)以下に減じることができた。市販の不溶化材では環境基準値以下に減じることができた。

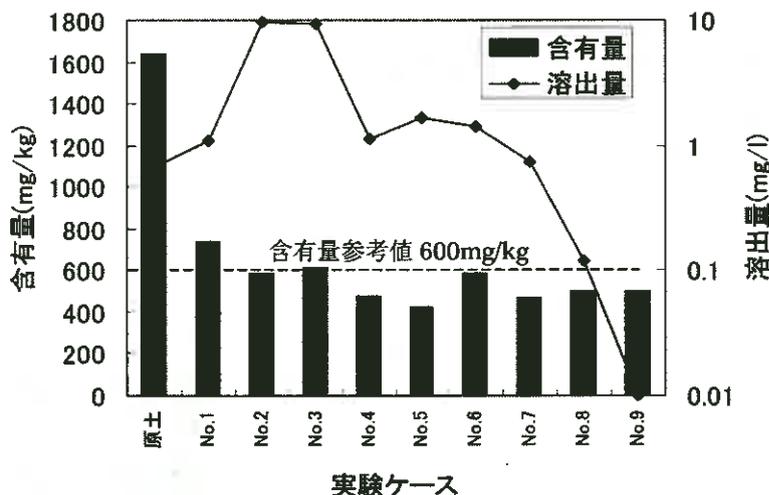


図-8 繰り返し洗浄・不溶化実験結果

### 5. 現場実証実験 1)

鉛汚染土壌の場外搬出対策工事を行っている某工場の協力を得て、搬出土壌の一部を用いて土壌洗浄の現地実証実験を行った。

#### 1) 対象土壌

実験に使用した土壌は、鉛単独の汚染土壌で、汚染濃度は溶出量が0~0.03mg/l、含有量が平均25mg/kgであった。粒度分布データでは、本実験の土壌分級点である75μm以上の粒度の割合は84%であった。また最大粒径は40mmであった。

#### 2) 使用機械

実験フローを図-9に示す。使用機械はすべてレンタル可能な汎用機器を組み合わせ実施した。

洗浄ミキサーには横型の骨材研磨機を使用した。スクリーンには汎用機の振動ふるい(サンドマスター)を使用した。水槽は角型水槽を使用し、砂の沈降防止のために水槽内部に攪拌ポンプを設置した。

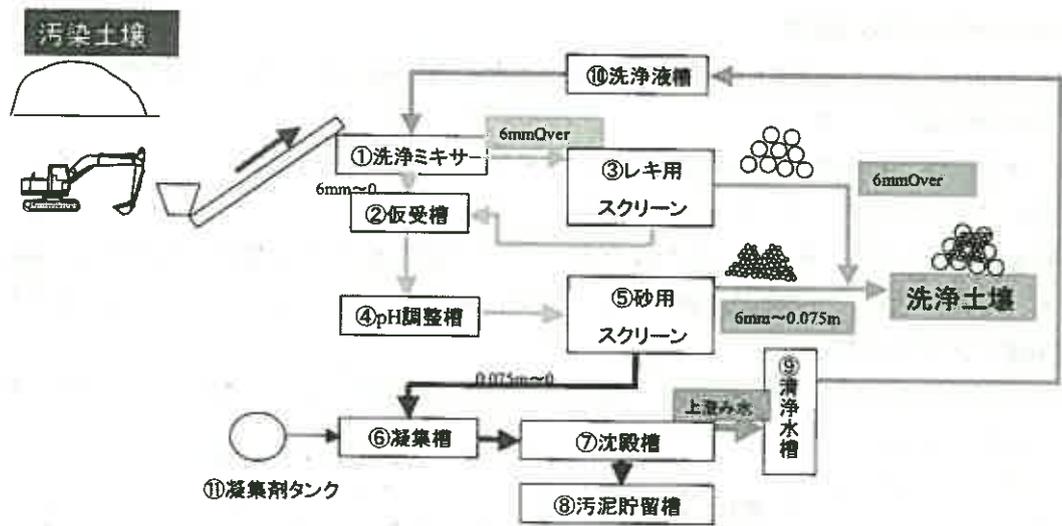


図-9 洗浄実験フロー

### 3) 実験方法

洗浄条件、実験ケース、評価項目を表-7に示す。

洗浄方法は図-9に示したフローにて、洗浄・分級後の土壌を一旦仮置きし、その後まとめてすすぎ工程を行う方法により実施した。洗浄液はシュウ酸と硝酸の混酸を使用し、洗浄中のpHを3以下となるように濃度を調整し投入した。洗浄時の固液比(土壌と液体の体積比)は1:1、すすぎ時は1:6.5とした。実験ケースは、洗浄時間と洗浄効率の関係を把握するために、洗浄ミキサーへの投入土壌量を変化させて3段階の洗浄時間で実験を行った。すすぎ時間は5分とした。

実験評価は以下の手順で行った。洗浄品質については投入土壌、洗浄後土壌、すすぎ後土壌について30分毎に採取し、溶出量と含有量を測定した。リサイクルについては、回収土壌量をベルトコンベアの落ち口で体積を測定し、濁水処理上澄水の鉛濃度を測定した。

### 4) 実験結果

#### ① 洗浄土壌含有量、溶出量

実験結果のうち、洗浄時間9分で得られたデータを図-10に示す。

原土壌の溶出量は10~30 μg/l、含有量

表-7 実験概要

| □ 洗浄条件  |                    |                        |                         |
|---------|--------------------|------------------------|-------------------------|
| 洗浄方法    | 洗浄→分級→すすぎ→分級       |                        |                         |
| 使用洗浄液   | 混酸(シュウ酸+硝酸) 0.1M/l |                        |                         |
| 洗浄固液比   | 1:1                |                        |                         |
| 分級点     | 75 μm              |                        |                         |
| すすぎ固液比  | 1:6.5              |                        |                         |
| □ 実験ケース |                    |                        |                         |
|         | 洗浄時間(min)          | 処理量(m <sup>3</sup> /h) | 洗浄液量(m <sup>3</sup> /h) |
| Case1   | 15                 | 3.0                    | 3.0                     |
| Case2   | 9                  | 5.0                    | 5.0                     |
| Case3   | 6                  | 7.5                    | 7.5                     |
| □ 評価項目  |                    |                        |                         |
| 洗浄品質    | 溶出量、含有量            |                        |                         |
| リサイクル   | 回収土壌量、排水水質         |                        |                         |
| 機械・洗浄効率 | 洗浄時間を変え、評価         |                        |                         |



写真-2 現場実証実験状況

は 20~25mg/kg であった。洗浄後の土壌では溶出量が環境基準値を超える試料もあったが、すすぎ後の土壌では環境基準を超える試料はなかった。含有量については、低い含有量の原土壌であったが、除去率はすべて 60~70%であった。

この結果より、実汚染土壌においても酸性洗浄液を用いて土壌を洗浄・分級することにより、土壌中の鉛含有量を低減させ、浄化した土壌をリサイクルすることが可能であることが確認できた。

### ②土壌の回収率

洗浄前後の粒度分布を図-11 に示す。

ここで原土壌は事前に測定した粒度分布であり、事前予測は予備洗浄実験で得た結果であり、結果は洗浄時間 9 分の場合の体積測定結果に基づき重量に換算した結果である。

実証実験の回収率は重量で 49%に留まり、予測より低い結果となった。この原因としては、すすぎ工程にも骨材研磨機を用いたため、すりもみ効果により土壌の細粒分への移行が大きかったこと、使用した水槽のデッドスペースへ砂分が堆積し回収できなかったことが考えられた。

## 6.コスト試算

これまで得られたデータより、コスト試算を行った。その結果を表-8 に示す。

汚染土壌量を 2000m<sup>3</sup>、施工期間を 2 ヶ月(日処理量 50m<sup>3</sup>)として計算し、汚染土壌をすべて管理型処分場に搬出した場合と比較した。

結果は管理型処分に比べ 2 割弱安くなった。この費用の中で、濃縮汚泥処分費が高く、土質により処分量変動するため、今後この部分を工夫し費用を下げる努力が必要である。

## 7.おわりに

重金属汚染土壌については溶出量だけでなく土壌中含有量も規制が検討されて来ているため、今後は固化・不溶化処理や封じ込めの対策が取りにくくなると見られている。また最終処分場の残余年数も相変わらず少ないため、今後は土壌を浄化し、再利用することが出来る土壌洗浄が適用される機会が増加するものと予想される。

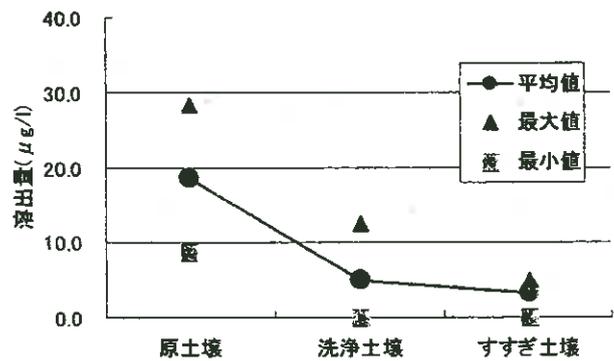


図-10 洗浄実験結果(Case-2)

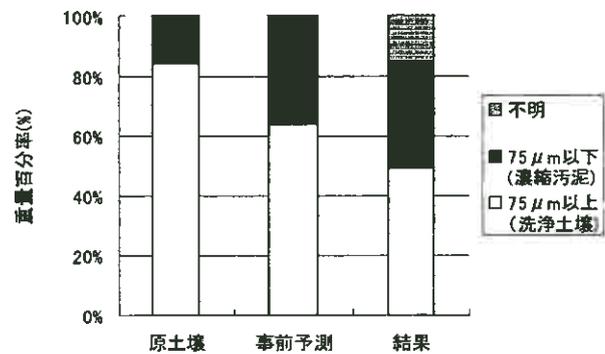


図-11 土壌の回収率

表-8 コスト試算結果

| 施工条件:                              |          |         |
|------------------------------------|----------|---------|
| ・汚染土壌量 2000m <sup>3</sup>          |          |         |
| ・施工期間 2ヶ月                          |          |         |
| ・濃縮汚泥処分費 6万円/m <sup>3</sup>        |          |         |
| ・濃縮汚泥処分量 500m <sup>3</sup>         |          |         |
| ・汚染土壌処分費(管理型) 4.5万円/m <sup>3</sup> |          |         |
| 名称                                 | 摘要       | 金額(千円)  |
| プラント機料                             | 洗浄プラント   | 10,000  |
|                                    | 濁水処理プラント |         |
|                                    | 汚泥処理プラント |         |
| 人件費                                | 土工       | 10,000  |
|                                    | BH       |         |
| プラント設置撤去                           |          | 5,000   |
| 薬剤費                                | 洗浄剤      | 20,000  |
|                                    | 凝集剤      |         |
| 濃縮汚泥処分費                            |          | 30,000  |
| 合計                                 |          | 75,000  |
| 汚染土壌処分費                            | 管理型      | 90,000  |
| 差額                                 |          | -15,000 |

今後の課題は以下のとおりである。

- ①プラントの工夫による土壌回収量の増加、汚泥量の減量
- ②他種金属への土壌洗浄法の適用
- ③複合汚染土壌への対応

今後改良を重ね、汚染土壌対策に貢献していきたいと考えている。

参考文献：1)矢部、長澤、清水(2002)：「土壌洗浄法による鉛汚染土壌の浄化実験」、地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会第8回講演集、pp.381-382

# 油分汚染土壌のバイオレメディエーションによる浄化

清水建設株式会社<sup>1</sup> 岡村和夫<sup>(1)</sup>、田崎雅晴<sup>(2)</sup>、戸叶春樹<sup>(3)</sup>

## 1. はじめに

油汚染土壌の生物浄化技術には、ランドファーマーミング、バイオパイル、バイオスパーキング等がある。ランドファーマーミングやバイオパイルは、浄化を行なう深度まで汚染土壌を掘削・移動しなければならないために、その浄化にはかなり広大なスペースを確保する必要がある。また、汚染土壌内に通気して生物浄化を行なうバイオスパーキング等は、掘削コストを削減できるが、確実に全範囲に通気されていることを確認することは難しい。

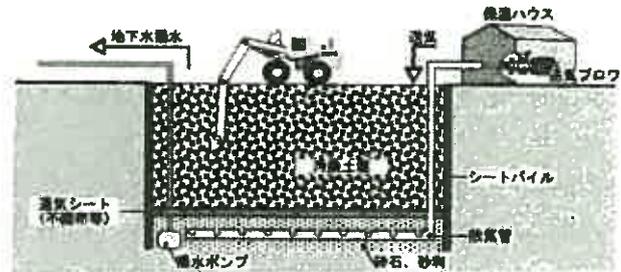


図1 バイオミキシング法の概念図

これに対し、今回報告するバイオミキシング法<sup>1)</sup>(図1)は、基本的に原位置での浄化が可能であり、

- ・ シートパイルにより汚染区域を囲うことで汚染の拡散を防止できる。
- ・ 攪拌耕転している土壌のためにほぼ均一の通気が期待できる。
- ・ 耕転した土壌はサンプリングが容易である。
- ・ 表面以外に地上部に汚染土壌が露出しないために飛散が極力押さえられる。
- ・ 土中での浄化のために、ランドファーマーミングやバイオパイルと比較して外気温の影響が少ない等のメリットが期待できる浄化方法である。

生物浄化は一般的に 10℃以下になると極めて効率が悪くなり、寒冷地での冬期には特殊な保温や加温設備が無ければ生物浄化は期待できないと考えられていた。しかしバイオミキシング法を寒冷地の重油汚染土壌の浄化に適用した結果、夏期の効率には及ばないものの、外気温が氷点下まで低下する冬期においても顕著な生物浄化効果が確認された。本報告は、ラボ試験の結果も併せて、バイオミキシング法による冬期生物浄化の結果について報告する。

また、一般的に石油系の化合物は大気へ気散する物質も多く含有しており、その分解が生物による分解であるのか大気への気散であるのか明確でなかった。石油系化合物の微生物分解の確認と、生物分解条件把握のため、石油系化合物を添加した土壌を純酸素を封入した密閉容器中に入れ、好気性条件下で試験を行った。本試験で生物による分解を確認するとともに水分量や温度の影響等について調査した。また各種石油系化合物の分解の程度についても調査もあわせて行った。

## 2 実験方法

### 2.1 可能性調査方法の検討

可能性調査には図2に示すブチルゴム栓付 300 mL の培養ビンを使用した<sup>2),3)</sup>。各培養瓶に模擬汚染土壌として 2mm ふるいにかけて乾燥重量 10 g の畑土を入れ、0.1g の油分量になるように、ガソリン、灯油、軽油、

(1)、(2) : Okamura Kazuo, Tasaki Masaharu, 東京都江東区越中島 3-4-17, Tel.03-3820-5537, Fax.03-3820-5959

(3) : Tokano Haruki, 札幌市中央区北 1 条西 2 丁目 1 札幌時計台ビル, Tel.011-861-2565, Fax.011-864-6002

アラビアンライト系の原油、A重油およびC重油をそれぞれ1%の濃度に調整した。栄養塩として尿素およびK<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>をOil:N:P=100:10:1になるように添加した。また、灯油を使用した実験では、培養温度を10、20、30、40、50℃に変化させ、最適条件の把握を行った。

必要酸素量は、石油系化合物0.1g当たり約0.35gである。この量を純酸素に換算すれば約245mLとなる。密閉容器中には石油系化合物を完全分解に必要な酸素量を確保するために純酸素を封入した。密閉瓶中では、好気性微生物により石油系化合物が分解されると、酸素は減少し、二酸化炭素が生成する。密閉瓶内部は二酸化炭素発生に伴い、土壌pHが低下することが予想されたので、クラリオバイアル中に10%NaOHを入れ、二酸化炭素を吸収した。そのため瓶中は減圧されるので、ストッパー付きのガスタイトシリンジにて0.3mL採取し、GC-TCD(島津製作所製GC-7A)にて酸素濃度を測定した。

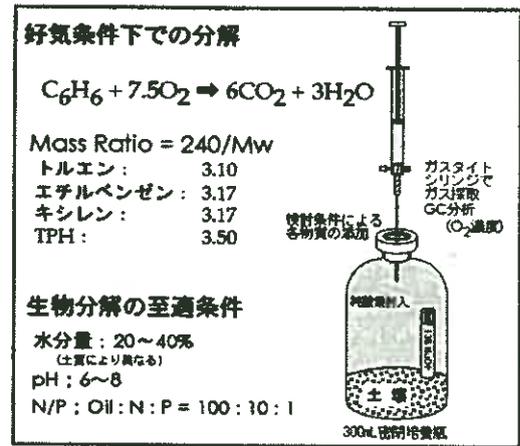


図2 可能性調査方法

## 2.2 適用可能性調査

実際に燃料油で汚染された土壌を修復するために、適用可能性調査として密閉式培養瓶を使用した分解試験を行った。試料はA重油に汚染されたシルト混じり砂質土壌で、油分をS316で抽出後、赤外分光光度法で測定した。その結果、試料の含有油分濃度は5,500mg/kgであった。図2に示す容積300mlのブチルゴム栓付培養瓶に試料を100g入れ、温度を30℃で20日間培養し、定期的に密閉ビン中の酸素消費量を測定した。また、20日後に内部の試料の油分濃度を測定した。密閉瓶中の酸素濃度が少なくなった時点で密閉瓶中のガスを酸素ガスに置換した。分解試験項目として、汚染土壌そのまま、NP源を添加したもの、NP源の他に微生物源として黒土を添加した系の3条件で試験を行った。

## 2.3 ラボ試験

図3に示したように、ガラス容器中に汚染土壌(2L、約3kg)を入れ、底部にガラスボールフィルター付きの散気管をセットした。試料は上記可能性調査で使用したA重油で汚染された実サイトの土壌を用い、栄養塩類と黒土を、可能性調査により得られた最適量を添加した。エアポンプにて純水を通した空気を10L/dayの割合で通気した。試験温度は15℃に保ち、乾燥を防ぐためにシートにて容器全体を包み、定期的に土壌中の含有油分濃度を測定した。

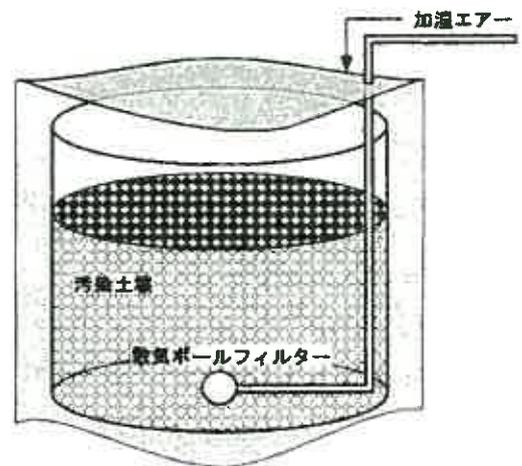


図3 可能性調査方法

## 3 実験結果

### 3.1 可能性調査方法の検討

#### 1) 土壌修復における温度の影響

図4に温度の影響を示す。1%の灯油を添加した畑土の水分量を40%に調整後、温度を変化させて43日間培養した。その結果、30℃で酸素の消費が多く、微生物による灯油分解の至適温度は30℃と考えられた。10℃および50℃での酸素消費は少なかった。

## 2) 各石油系化合物の生物分解比較

図 5 に各石油系化合物の酸素消費状況を示す。ガソリンは試験開始時にタイムラグが認められているが、灯油と同程度に酸素が消費された。A,C 重油は灯油ほど酸素消費が認められなかった。

これらの物質による酸素消費量の差は、各物質に存在する種々の石油化合物の成分の種類によるものであると考えられる。特にC重油類では比較的軽質油が多く、生物分解が難しい成分を多く含有しているためであり、灯油は直鎖の炭化水素が主体であることから分解が比較的良好であったものと考えられた。原油の分解は比較的良好であり、生物分解は容易と判断された。

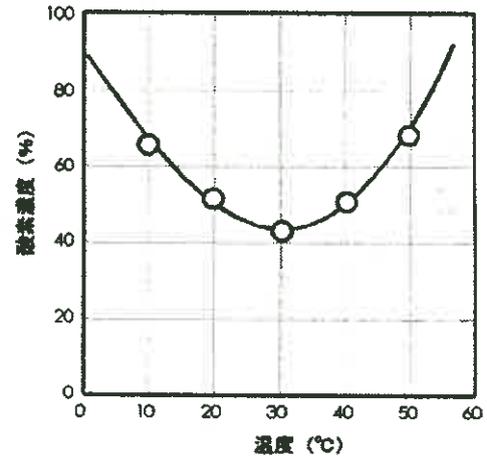


図 4 土壤修復における温度の影響

## 3) 栄養塩および畑土添加の効果

実際の燃料油汚染土を使用し、栄養塩および畑土添加の効果について図 6 に示す。汚染土を培養しても滅菌した汚染土と同様に酸素消費はほとんど認められなかったが、栄養塩の添加で酸素が消費されるようになった。汚染土の空隙を確保する目的で滅菌畑土を、分解微生物の供給を目的に畑土を添加することで酸素消費はさらに改善された。このことから、汚染物質の分解には栄養塩の存在が不可欠であり、汚染土の空隙を確保し、分解微生物の供給のため、畑土の添加が修復には効果的であるといえる。

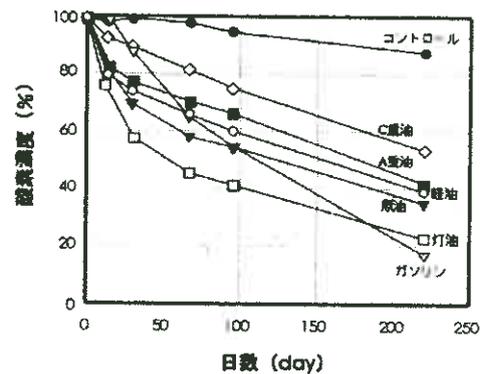


図 5 各石油化合物の微生物分解による酸素濃度の変化

## 3.2 可能性調査

可能性調査の結果を図 7 に示す。汚染土壌そのものでは酸素の消費が少なく、NP 源添加条件でも目立った効果は認められなかった。NP 源の他に微生物源として黒土を添加した系での酸素消費が著しかったことから、試料である汚染土壌中には油分を分解する微生物が少ないと推定されたので、実際の修復には微生物源として黒土を添加することとした。

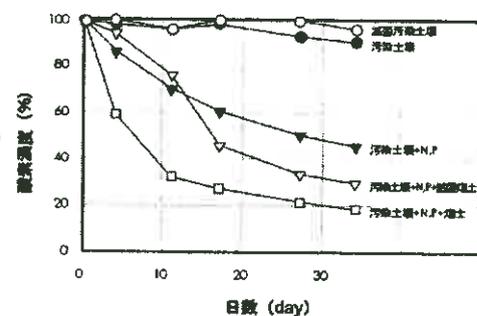


図 6 栄養塩および土添加の効果

## 3.3 ラボ試験

図 8 に通気後の土壤含有油分濃度の推移を示した。試験開始時には約 6,000mg/kg あった油分は試験開始後約 1 週間で 1/2 まで低下した。これは生分解とともに、分子量の低い揮発しやすい油分が、通気によって土壤から気化したためと推測された。その後は試験開始約 2 ヶ月で油分濃度は 500mg/kg 程度まで低下した。

本試験に使用した汚染土壌は、図 9 の GC/MS チャートが示す通り、A 重油を主とする油分で汚染された土壤である。この土壤が生物浄化後は分子量の低い油分を中心に、分解されたことが確認された。

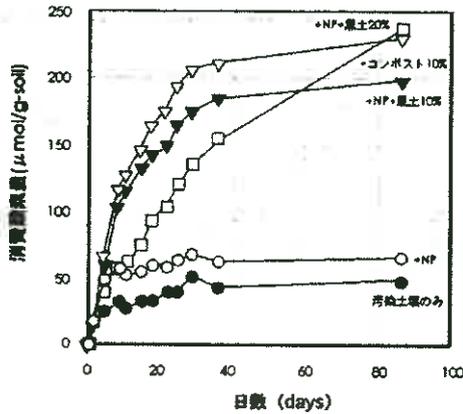


図7 可能性調査試験の結果 (例)

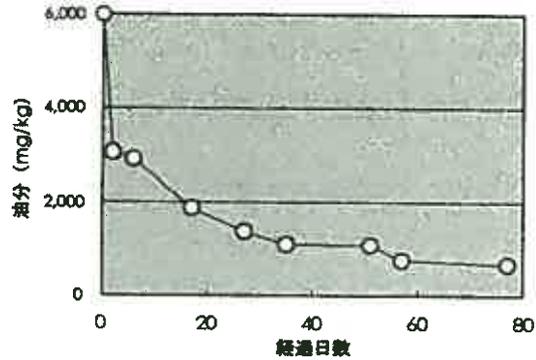


図8 ラボ試験の結果 (例)

#### 4 現地浄化工事

##### 4.1 浄化工事対象サイトの概況

バイオミキシングにより浄化を行ったサイトは、寒冷地の重油汚染サイトである。土質はシルト分を含む砂質が主で、地下水位はGL-1.5m~2.0m程度である。

##### 4.2 装置の概要

バイオミキシングを行うために、図10に示したように、シートパイルを打ち、地下水排水管及び通気管を設置した。汚染土壌には微生物源としての黒土と栄養塩類(N, P等)を事前の試験により得られている最適量を添加、攪拌した。

##### 4.3 浄化運転

装置の設置が完了後、ブロワにより給気を開始した。吸気は当初は3m<sup>3</sup>/minとしたが、土壌中の酸素濃度を測定することで通気量を調整した。また、通気のみではチャネリングを起こし均一な空気の供給が阻害されると予測されたため、バックホウによる耕耘を週1回程度行った。ただし、積雪時期(1~3月)はブロワーによる給気のみ継続し、耕耘を行わなかった。

浄化は10月上旬から4月にかけて実施し、温度および土壌の温度、油分濃度、酸素濃度、二酸化炭素濃度等の測定を行った。

##### 4.4 現地浄化工事

実サイトでのバイオミキシングによる浄化は、ブロワーによる通気と週1回の耕耘を平行して実施した。当初は、土壌酸素濃度が低すぎる場合は耕耘の頻度を高くすることを予定

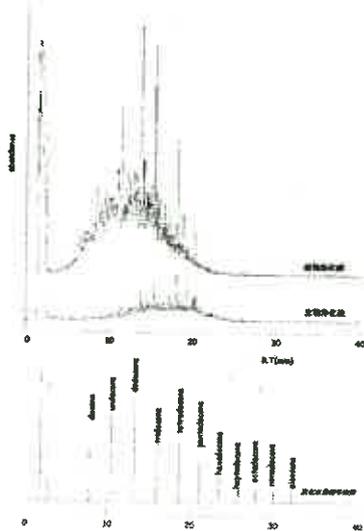


図9 生物浄化前後の油分(GC-MS)

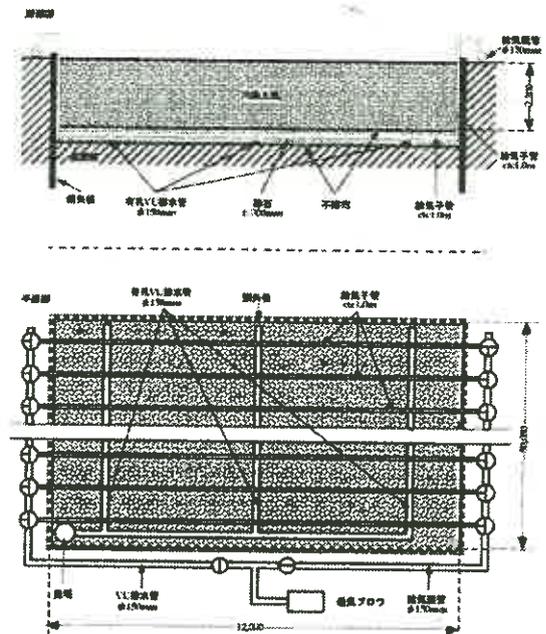


図10 バイオミキシング装置の構造

していたが、酸素濃度が異常に低下することはなかった。

バイオミキシングの外観写真を写真1に示す。

積雪が始まってからは、耕耘により屋外冷気との接触による土壌温度の低下と、融雪水による土壌含水率の上昇を防ぐために、バックホウによる耕耘は停止した。表面をシートで覆い、ブロワーの熱を効率的に土壌中に送るために、ブロワーをビニールハウスに入れ、給気配管を断熱材で保温した。これによりハウス内の温度は、好天であれば外気温が氷点下であっても30~40℃になり、給気温度も土壌に入る直前で15~20℃を維持できた。



写真1 バイオミキシング装置の外観

土壌の温度は図11に示した通り、外気温が氷点下が続く時期でも、50cm以深では氷点下になることはなく、1m以深では5℃を下回ることもなかった。つまり浄化装置内の土壌は最低でも5~10℃を保てることが確認された。本サイトでの冬期温度対策としては、ブロワー及び給気配管の保温程度であったが、地表面の保温、給気ガスの加温等もっと積極的な対策を行えば、さらに土壌温度を高いレベルで維持できると推測された。

浄化中の油分濃度の推移を図12に示した。寒冷地での秋季からの浄化開始であったが、最初の1ヶ月で約2,000mg/kgの油分がほぼ1/2に

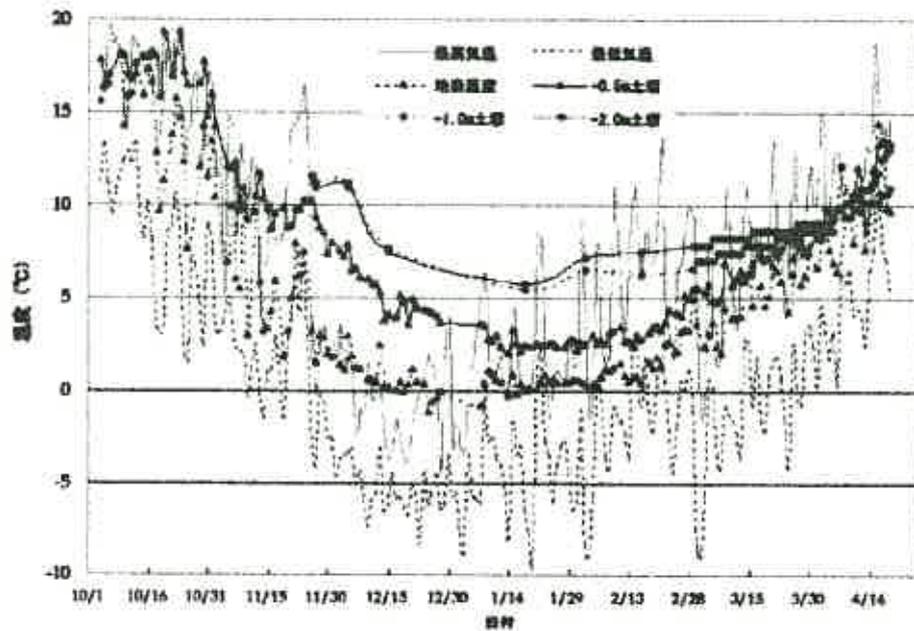


図11 外気温および土壌温度の推移

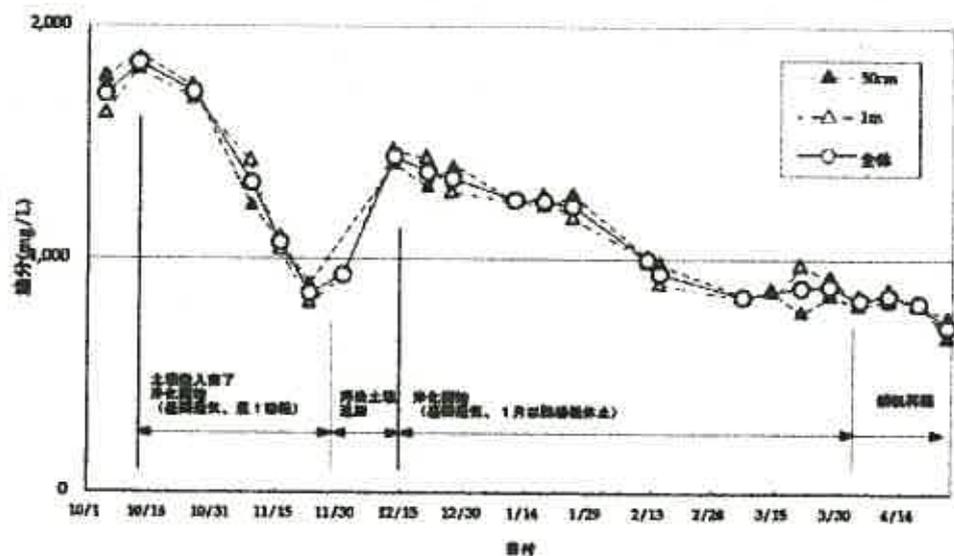


図12 油分濃度の推移

低下した。その後、汚染土壌を追加投入しての浄化は、日平均気温の月平均値が最も低かった 12 月(-3.6℃)でも土中の温度を 5~10℃程度に保持できた。このため、厳寒期の 12 月~3 月でも、浄化活性は 1/2 程度に低下したものの、石油分解菌の活動が停止せず、土壌の油分濃度が継続的に低下(油汚染土壌を浄化)したことを確認できた。また耕耘を停止した送気だけの条件下でも、確実に油分の減少が進んでいることが確認された。

耕耘の有無に係わらず、土壌中 50cm も 1m も浄化効率に殆ど変化がなかった。ただし、途中数回実施した底部土壌(2m)のサンプルは、同時期の 50cm、1m のサンプルと比較して、若干ではあるが油分濃度が低いことが確認された。これは底部より通気を行っていることと、底部の方が土壌温度が高いことが影響していると推測された。底部に若干の差が見られたものの、処理装置全体を考えると、殆どむらの無い油分浄化が進んでいたと考えられる。

4 月より残雪を除去し再び耕耘を開始した。冬期に比べるとより効率的な油分濃度の低下が確認された。秋季の油分濃度低下の効率を考え合わせると、より効果的な浄化を行うためには、通気と耕耘を組み合わせることが有効であると推測された。

## 5 おわりに

今回検討したバイオミキシング法による油分汚染土壌浄化について以下のことが確認された。

- 1 年を通じて微生物による浄化作用を維持できるため、浄化期間を短縮できる。特に気温が低い寒冷地での浄化工事については、大幅な浄化期間の短縮が期待できる。
- 原位置で浄化処理できるため、浄化ヤードが不要である。また、汚染土壌を山積みしなくて済むため、強風や大雨による飛散・流出を確実に防止できる。
- ラボ試験の結果、栄養塩類や通気条件を整えれば、10,000mg/kg 程度の重油汚染土壌を 2, 3 ヶ月で生物浄化できる可能性が高い。
- 栄養塩類や通気条件を整えれば、若干の微生物源を加えることで、複雑な処置や装置を用いなくとも、寒冷地冬期での生物浄化効果が期待できる。
- より効果的な浄化を期待するためには、必要量の通気と耕耘を組み合わせることが有効である。

## 参考文献

- 1) 田崎 雅晴、岡村 和夫、熊本 進誠、バイオミキシング法による油分汚染土壌の修復(寒冷地冬季生物処理の可能性)、平成 14 年度 地下水・汚染土壌とその防止に関する研究集会 p417-420 (2002)
- 2) 岡村 和夫、土壌汚染の修復と微生物の役割、地質と調査、(4). p43-47,(2000)
- 3) 岡村 和夫、微生物による汚染土壌の修復事例、BIO INDUSTRY, Vol.19, (1), p44-50, (2002)

# 協同組合地盤環境技術研究センターの紹介とVOC汚染サイトの調査・対策実施例

協同組合地盤環境技術研究センター 技術開発委員会 堀内 康光 (株式会社ドーコン)

## 1. はじめに

協同組合地盤環境技術研究センター (Geo-Environment Technology Research Center (GETReC)) は全国地質調査業協会連合会加盟会社の内、76社が出資し、個々の会社が保有する技術と独自の技術開発を中心に、土壌・地下水汚染の調査から修復設計、修復工事、モニタリングまでをシステム化し、新たなニーズに対応すべく設立したものである。

GETReCでは平成13年度に関東経済産業局から中小企業経営革新支援対策費等補助事業を受け、以下の新技術の開発を行った。

- ①簡易土壌・地下水サンプリングツールの開発
- ②調査機器除染ツールの開発
- ③ガソリンスタンドを対象とした浄化装置の開発
- ④クリーニング店を対象とした浄化装置の開発

本論文はGETReCの紹介と開発した新技術の概要を述べ、更に新技術開発の内、④クリーニング店を対象とした浄化装置の開発における汚染サイトの調査実施例、開発した装置の実証試験結果等を述べたものである。

## 2. 協同組合地盤環境技術研究センター (GETReC) の紹介

組合では、以下の3委員会により事業活動を進めている

### 【委員会名および活動分担】

#### ■総務企画委員会

- ・関連する技術・機器類のデータベースの構築
- ・技術・機器類の共同利用マニュアルの作成
- ・資機材等の共同購買事業の運営
- ・教育・研修等人材育成事業

#### ■市場開発委員会

- ・組合員間のネットワークシステムの構築
- ・関連法令および政策のデータベース化
- ・汚染源の実態調査と汚染マップの作成
- ・共同宣伝等広報活動

#### ■技術開発委員会

- ・機器類の検証と作業ルーチンの確立
- ・新技術の開発

技術開発委員会では前記した4つの新技術を開発した。

## 3. 各新技術の紹介

平成13年度に開発した各新技術について以下に紹介する。クリーニング店に特化した浄化装置については、4. VOC汚染サイトの調査・対策事例のなかで詳述する。

### 3. 1 簡易土壌・地下水サンプリングツールの開発

現在用いられているサンプリング機器は、全体にボーリングマシンをベースにしたものが多く、削孔能力は高いが、機器・機材が大がかりとなり、広い作業スペースの確保も必要となる欠点がある。

土壌・地下水汚染調査に必要とされる土質、サンプリング深度を限定することにより、大がかりな機器を使用せずに簡易なサンプラーで作業性の高いサンプリングが可能となる。

---

Yasumitsu Horiuchi : 札幌市厚別区厚別中央1条5丁目4-1 (株)ドーコン 地質部

TEL : 011-801-1570, FAX : 011-801-1571

本開発においては、下記のような対象深度・土質、開発のコンセプトを設定した。

#### 土壌サンプリング

- ・対象深度：2～3m（最大5m程度）の浅層
- ・対象土質：N値 $\leq 10$ 程度の軟質な粘性土、砂質土
- ・採取サンプル量：200g程度
- ・軽量、人力貫入、狭小箇所での作業

#### 地下水サンプリング

- ・軽易な採水作業
- ・長期、地層別の採水
- ・採水量：200cc程度
- ・土壌ガスのサンプリングにも適用可

本サンプラーは、サンプラー先端にコーンをセットした状態で所定の深度までサンプラーを貫入した後に、先端コーンを上部まで引き上げてからサンプリングを行う（図-1参照）。

従ってプレボーリングは不要であり、所定の深度のサンプリングであれば1工程でサンプリングを行うことができる。

また、本サンプラーは所定の深度到達後に、先端コーンを装着したインナーロッドを約60cm引き上げて、ロックバーを落とし込みインナーロッドを固定する機構を採用している。ロッドとインナーロッドがつながっているため、二重管は使用せずロッドのみの単管の操作で、所定の深度までの貫入・先端コーンの引き上げ・サンプリングを行うことができる。図-2に簡易土壌サンプラーの全体写真を示す。

地下水サンプリングツールは図-3に示したように、A、Bのラインを利用することにより、土壌ガス・地下水サンプリングの両方に対応できる性能を有している。

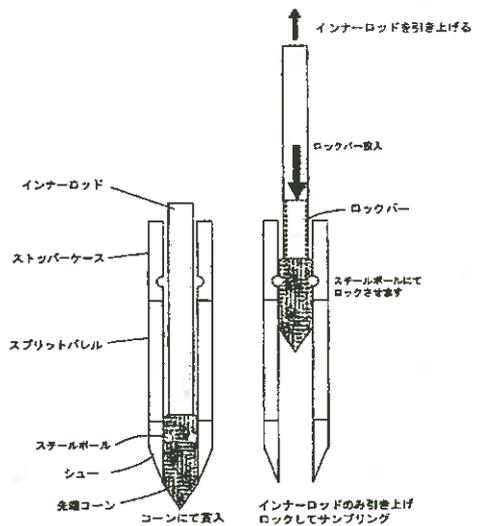


図-1 簡易土壌サンプリングの模式図

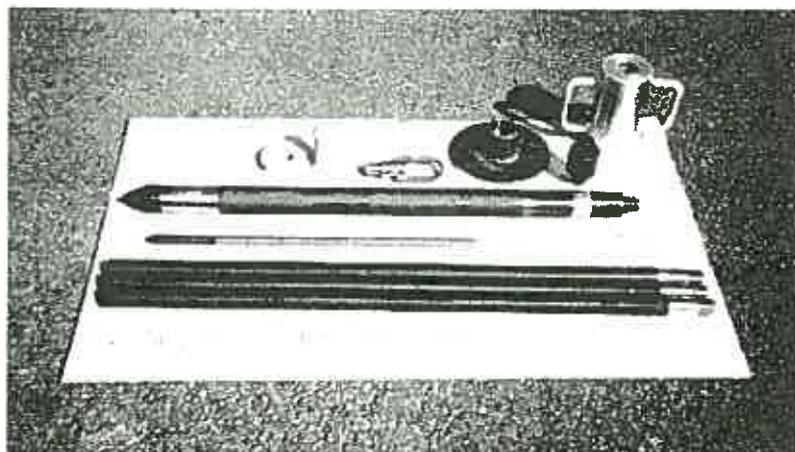


図-2 簡易土壌サンプラーの全体図

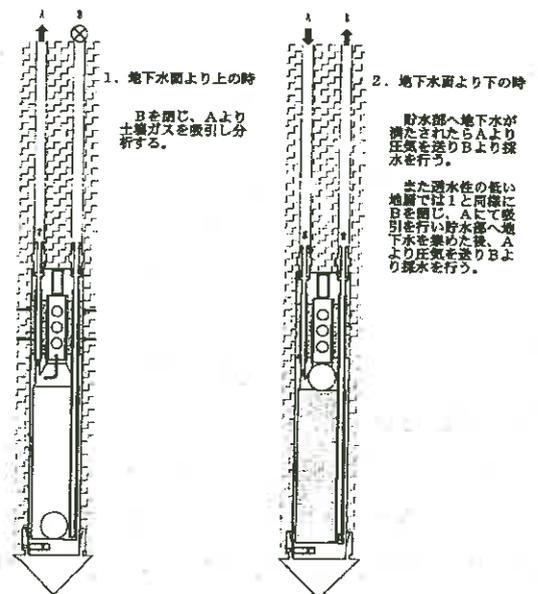


図-3 簡易地下水サンプリングの原理

### 3. 2 調査機器除染ツールの開発

土壌や地下水のサンプリングに当たっては「土壌・地下水汚染に係る調査・対策指針および運用基準（環境庁水質保全局）」（以下、対策指針と略す）に、各種の留意事項が記載されている。その中でサンプラーや採水器等のツールについては、以下のように記載されている。

- ・ サンプラーに付着した物質による汚染を避けるため、サンプラーは転用する前に必ず洗浄する。
- ・ 採水器やロープなど採取に用いた器具は、汚染を防ぐため資料を採取するたびに十分な洗浄を行う。

しかしながら具体的な除染の方法は明確に示されていない。そのほかでも我が国では具体的な手順を示したものはなかった。

そこで、今回の開発に当たっては米国環境保護庁（EPA）の資料および米国労働省労働安全衛生局（OSHA）の基準を参考として、次のような手順を設定した。

1. 泥をヘラやブラシで削ぎ落とす。
2. 付着物を水で洗い落とす。
3. 中性洗剤で洗浄する。
4. 浄水で濯ぐ

また、開発のコンセプトとして以下の点を設定した

- ・ サンプリングマシン等と一緒に現場へ搬入できる
- ・ 洗浄に使用する水等を最小限に押さえる
- ・ 除染された汚染物質などの処理が容易である

開発された除染装置を図-4に示す。除染ツールは、洗剤・水を管の内外から噴射しツールを除染・洗浄する槽（除染用洗浄槽）、ブラシおよびエアガン等によりツールを洗浄する槽（付着物除去用洗浄槽）との独立2槽式である。

除染効果を確認する目的で洗浄実験を行った。エンビパイプ（VU-50）を30cmの長さに切った物を用意し、テトラクロロエチレン（PCE）の2種類の溶液（1.9mg/l、20mg/l）に浸し、開発したツールにより除染を行った（PCEの環境基準は0.03mg/l）。除染効果の確認は洗浄後の排水、洗浄後のエンビパイプを1リッターの水道水の入ったビニール袋に入れ振動しながら溶出させた溶液をそれぞれ500mlの広口ビンに200ml採取し、気層部分を吸引して濃度をポータブルガスクロマトグラフにより測定することにより行った。

結果は1回の洗浄で両方の溶液とも環境基準以下、2回目以降はNDとなり、十分な除染効果が得られた。

また、1回の洗浄に要する水の量は1～2リッター程度のわずかな量であった。

### 3. 3 ガソリンスタンドを対象とした浄化装置の開発

小規模事業所であるガソリンスタンドでは、油による土壌地下水汚染の事例が報告されている。特に地下水汚染では周辺への汚染の拡散が生じ、臭気や油膜の発生など一般環境中で五感に感じる影響が生じる。ガソリンスタンドの汚染修復対策の実施は、多くの場合使用が廃止される時点であり、その技術は地下タンクの撤去に合わせた汚染土壌の掘削除去である。

一方では作業を継続する中での地下水汚染の浄化技術の要求も高くなっている。特にガソリンスタンドのような場所では、小型でスマー

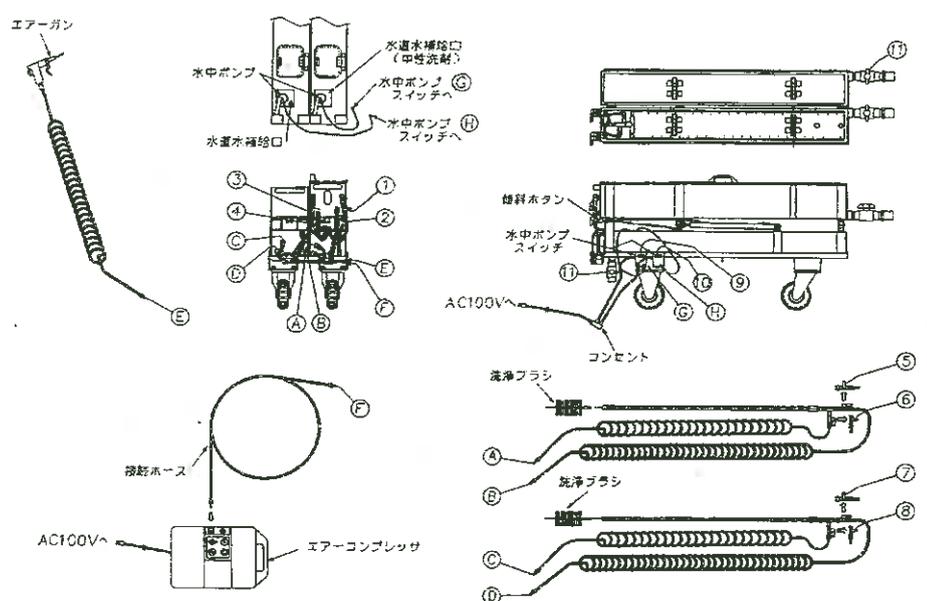


図-4 除染装置部品構成図

トな装置、つまり見た目に於いて特別な印象を与えるものでない装置が期待されている。更にはランニングコストが低いこと、専門家でなくともメンテナンスなどの一般的な扱いが可能な事も重要な点である。

これらの点を踏まえて、以下のような観点で浄化装置の開発を行った。

- ・営業中も継続して浄化可能
- ・小型で、スマートな装置として、コンテナまたはトレーラーハウス等に搭載した移動式の浄化装置
- ・バイオレメディエーションによる地下水浄化
- ・現場設置に当たり、装置の専門家をできる限り必要としない装置
- ・非燃焼性、防爆型

図-5に浄化システムの構成を示す。本装置はバイオレメディエーションによる地下水浄化装置であり、図-5のように酸化槽内において微生物により油分を分解し、沈殿・濾過した後に浄化された地下水を放流するシステムである。微生物製剤としては商品名テラザイム、栄養剤としては窒素、リンを用いている。この微生物製剤は油田地帯に自然に生息している微生物から、油分を特異的に分解する好気性の微生物群を抽出・培養・濃縮したものであり、毒性等はない。

本装置の浄化能力を明らかにするため以下の項目について水質分析を実施した。

- ・サンプリング試料：酸化槽前（処理前流入地下水：原水）、砂ろ過槽後（処理後放流水：処理水）
- ・分析項目：油分（ノルマルヘキサン抽出物質）、全有機炭素（溶解性）  
BTEX（ベンゼン、トルエン、キシレン、エチルベンゼン）

実証試験は約1ヶ月行い、水質分析は1週間に1度、計4回実施した。分析結果の一例を表-1に示す。ヘキサン抽出物質の原水濃度は6~410mg/lとばらつきがあったが、処理後はいずれも定量限界濃度未満となり、本システムは低濃度から高濃度までの幅広い油分の汚染水に対して柔軟に機能し、また適切に浄化する能力を有していると考えられた。全有機炭素に関しては処理前後で変化はなく、システムから微生物の抛出不はないものといえる。BTEXに関してはキシレンが若干低下傾向を示し、他の物質は処理前後で定量限界以下であった。

表-1 水質分析結果 単位：mg/l

| 採水日      | H14.2.18 |       |
|----------|----------|-------|
| 検体種別     | 原水       | 処理水   |
| ヘキサン抽出物質 | 90       | ND    |
| 全有機炭素    | 15       | 15    |
| ベンゼン     | ND       | ND    |
| トルエン     | ND       | ND    |
| キシレン     | 0.005    | 0.001 |
| エチルベンゼン  | ND       | ND    |

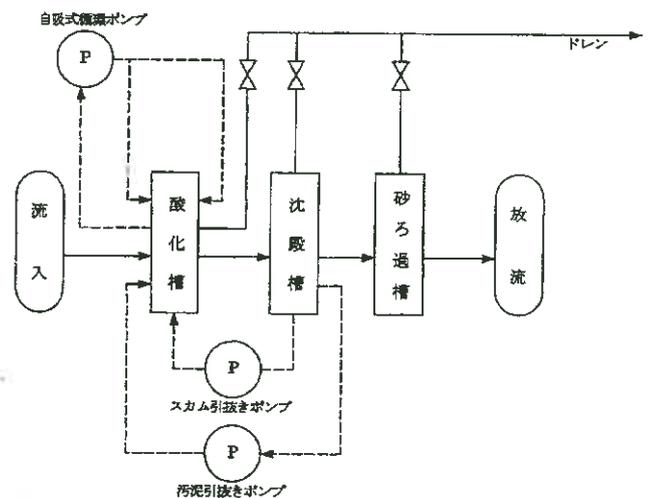


図-5 浄化システムの構成図

#### 4. VOC 汚染サイトの調査・対策実施例（クリーニング店を対象とした浄化装置の開発）

##### 4. 1 システム開発の目的と開発の概要

揮発性有機塩素系化合物（VOC）を取扱うクリーニング店においてはテトラクロロエチレンなどのVOCによる土壌・地下水汚染の潜在化が懸念されている。

本開発においてはクリーニング店のような小規模事業所における土壌・地下水汚染の浄化を効率的に行う装置（器具）を開発し、この効果を確認することを目的とした。

また、札幌市内のあるクリーニング店の協力により実施した VOC 汚染サイトの調査結果、開発した浄化装置による対策実施例も報告する。

システム開発コンセプト、解決すべき問題点は以下のとおりである。

開発のコンセプト

- ・市街地における小規模汚染を対象とするため、出来るだけシンプルかつ小型の機器・設備を使用し、かつ効果を明確に確認できることを目標とする。

解決すべき問題点

- ・汚染地下水や汚染物質そのものの移動によって汚染域が拡大しつつある恐れがあるので、とりあえず遮断し、しかる後に除染をすすめる必要がある。
- ・敷地面積の狭い事業所を対象とするので効率的かつ確実に汚染域拡大防止と浄化手法を考える必要がある。

このような問題点を解決するために以下に示す2種類の浄化装置の開発を行った。

1). 井戸構造体を用いた地下水汚染浄化手法 (図-6)

「連続壁を形成する打込み井戸」を使用する土壌・地下水汚染浄化法であり、汚染ブロックを遮断するように連続壁を構成し、連続壁そのものが有する井戸機能によって、地下水揚水浄化、地下水還元あるいは循環、地下水位低下+地中ガス吸引浄化、などの浄化対策を実現する。

2). 単孔式地下水浄化装置 (図-7)

原位置におけるばっ気・地下水循環浄化手法であり、汚染域の中心部に単一の井戸を掘削し、この井戸内で圧搾空気による原位置エアレーションによって気水分離を行い、地下水を浄化する。浄化された地下水をパッカーによって分離しつつ再度地盤内に循環させるものである。

図-8にシステム開発および現地調査(サイト評価)の流れ図を示す。本論文においては主としてサイト評価、単孔式地下水浄化装置の効果実証実験について述べる。井戸構造体を用いた地下水浄化装置については汚染サイトが住宅街の中にあり、矢板打設などの工事が不可能であったため、実際の汚染サイトにおける実証試験は行えなかった。

4. 2 サイト評価

サイト評価は「対策指針」に準拠して行った。すなわち、「対象地資料等調査」、「対象地概況調査」、「対象地詳細調査」である。

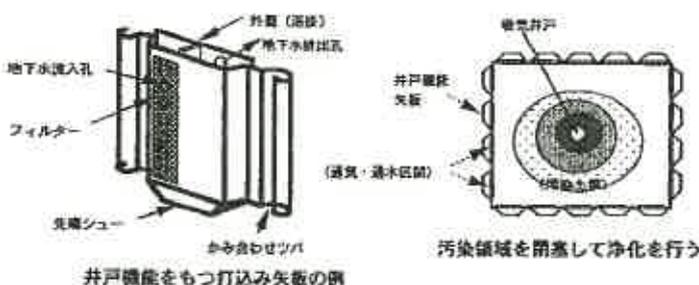


図-6 井戸構造体を用いた浄化装置の模式図

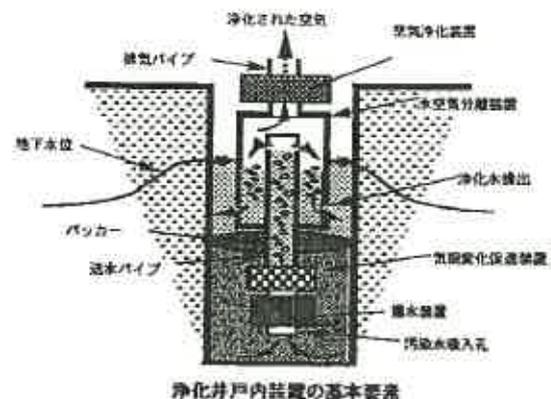


図-7 単孔式地下水浄化装置の模式図

#### 4. 2. 1 対象地資料等調査

対象地等資料調査は対象工場への聞き取り調査、周辺の既往地質・地下水資料の収集等である。

工場の社長への聞き取り調査の結果、以下の点が明らかとなった。

- ・トリクロロエチレン (TCE) は1年程前に実施した調査において建物横の極近傍にある井戸から検出された。
- ・現在はパークロロエチレン (テトラクロロエチレン、PCE) を用いている (機械は8年ほど前から使用)。
- ・現在使用しているドライクリーナはコンクリート土台上にあり、旧ドライクリーナはコンクリート土台無しで土台に腐食が発生していた。
- ・昔は、ドラム缶に入っていた TCE を移し替える際にこぼしたこともあった。
- ・ドライクリーニングあとに水洗クリーニングを行なうと排水に PCE が混じる。
- ・現在、排水は下水に流している。
- ・クーリングタワーは地下水を利用しており、PCE を冷やして乾燥させる。管が腐食した場合クーリングタワー中に PCE が混入する恐れがある。
- ・井戸の採水は深度 150m 前後である。
- ・ドライクリーニングの時にスラッジがでる。昔は一般ごみとして持って行ってくれた。
- ・排気には PCE が混じっているが、市条例での制限はない。
- ・PCE の他に、現在は石油系の洗浄剤を用いる (昔は、トリクロロエタンやフロンを用いていたが、現在は使用を中止している)。

また、既往地質調査資料によりまとめた調査地付近の模式断面を図-9に示す。調査地は支笏軽石流堆積物からなる丘陵地に位置し、旧地形図の判読結果から沢地形を宅地造成により埋め立て場所であることが判明した。地下水については既往資料はなかったが、旧沢地形に位置することから自由地下水位は浅部に存在する可能性が高いと判断された。

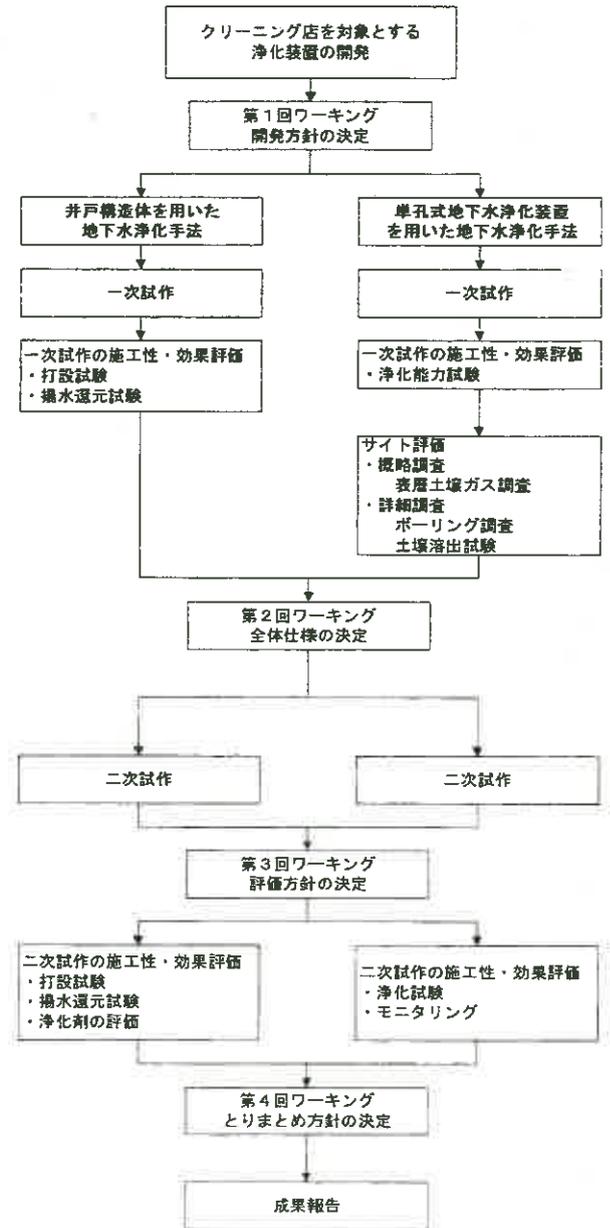


図-8 システム開発、サイト評価の流れ図

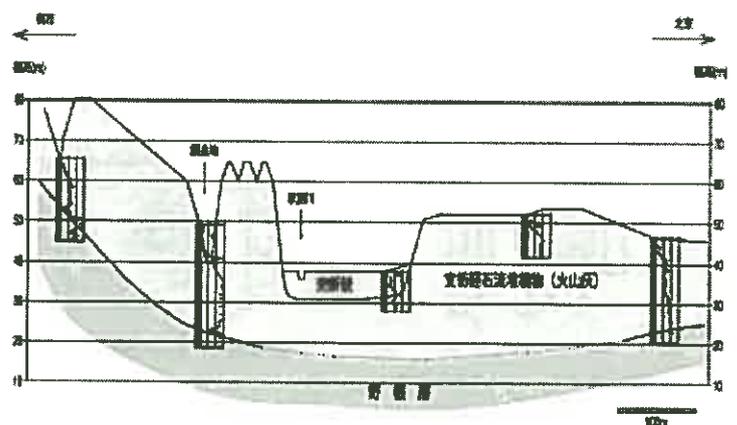


図-9 調査地付近の模式断面図

#### 4. 2. 2 対象地概況調査

対象地概況調査は土壌ガス調査法等の簡易測定法により VOC の土壌中の分布を把握し、詳細調査の対象範囲を絞り込むために行う調査である。

表-2 に土壌ガス調査に用いた主な使用機材と調査数量の一覧、図-10 に土壌ガス調査の位置図を示す。土壌ガス調査はガス検知管による方法とポータブルガスクロマトグラフによる測定の種類を行った。

土壌ガス調査の結果を図-11 に示す。

調査結果の特徴は以下のとおりである。

- ・以前クリーニング装置を設置して、漏洩の可能性が高いと言われていた付近で最も高濃度の汚染が発見された。
- ・PCE の分解生成物が検出された箇所もあったが、PCE の検出箇所と比較すると少ない。
- ・ホットスポットからの距離が大きい測点ほど、分解生成物の比率が高いという結果が得られた。
- ・汚染物質の濃度分布から推定される地下水流動方向は NNE である。

#### 4. 2. 3 対象地詳細調査

対象地詳細調査はボーリング調査等により地盤状況、汚染の深度方向の分布を把握して 3 次元的な汚染状況を明らかにするものである。

概略調査の結果から得られた詳細調査へ向けての検討課題は以下のとおりである。

- ・無水掘削等の高温にならない掘削手方法が必要である (SCSC ボーリング等の簡易ボーリング)。
- ・汚染物質の拡散防止対策：スライム等を回収し産廃処理する必要がある。
- ・汚染を下層に持ち込まない対策が必要である。
- ・適切なシーリングを行い、不透水層の上端まで掘進を止める。
- ・ボーリング地点：最も高濃度であると考えられる冷却塔付近に対策井戸、および地下水の流動方向であると考えられる北西側および北側に観測井戸を設置する。

これらのことを考慮して詳細調査の項目、数量を決定した。

詳細調査の調査項目・数量を表-3、調査に用いた主な機材を表-4 に示す。

表-2 土壌ガス調査機材、調査数量一覧

| 調査方法           | 器械名                      | 製造者                | 型式・規格              | 備考 | 調査点数 |
|----------------|--------------------------|--------------------|--------------------|----|------|
| ガス検知管による測定     | ・気体採取器                   | ガステック              | 50/100ml           | 2台 | —    |
|                | ・検知管                     |                    |                    |    |      |
|                | テトラクロロエチレン               | ガステック              | 133 (LL, L, M, HA) |    | 39   |
| トリクロロエチレン      | ガステック                    | 132 (LL, L, M, HA) |                    |    |      |
| ガスクロマトグラフによる測定 | ポータブルガスクロマトグラフ (Voyager) | パーキンエルマー ジャパン      | 光イオン化検出器 (PID)     | 1  | 16   |

材を表-4 に示す。

ボーリング結果から調査地における SE~NW 方向の地質断面を図-13 に示す。

詳細調査結果から得られた本汚染サイトにおける特徴は以下のとおりである。

- ・表層土壌ガス調査の結果、工場での旧ドライクリーナが設置されていた箇所付に PCE の高濃度汚染が検出された。

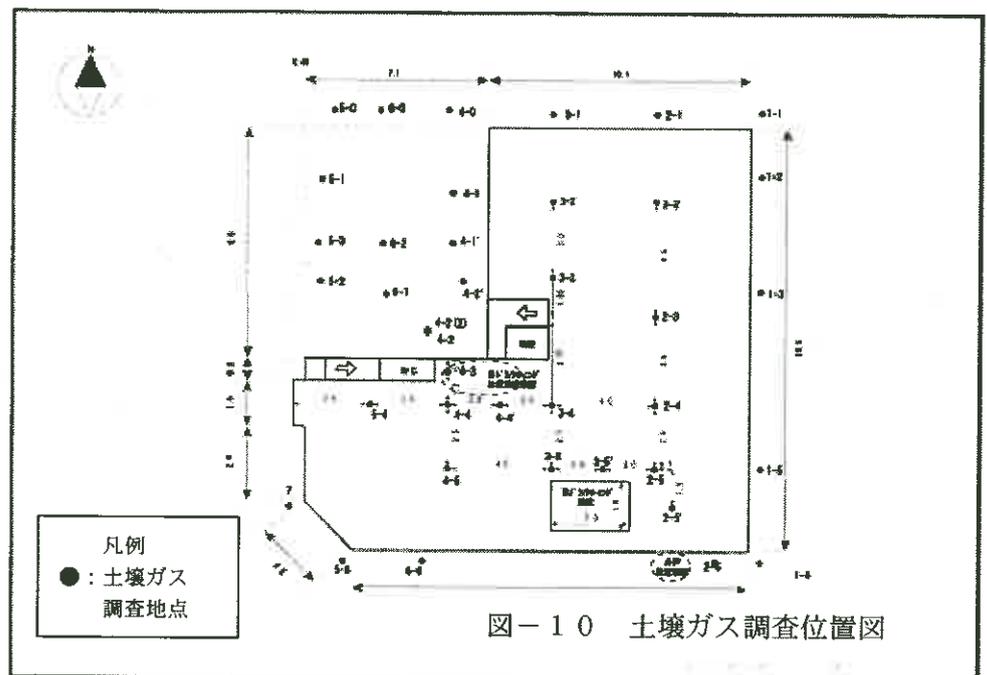


図-10 土壌ガス調査位置図

・深度方向では、深度 2~6m 付近に汚染の最大部分があり (S4-2、図-14 参照)、深度 6~7m 付近に細粒火山灰層からなる難透水層が存在すると推定される。

・対策井戸の深度はこの結果に従って決定する。

・この細粒火山灰層がより以深への汚染の拡大を防いでいる。

・地下水面より上で検出された PCE ガス成分は地下水から揮発したものと考えられ、対策については土壌ガス吸引よりも地下水の処理が重要であると考えられる。

・また、上記の火山灰層より下部の地下水位は上部の地下水位より若干高く、被圧している。このことも汚染物質の下部への浸入を防いでいる要因である。

・B4-2' 孔では極低濃度の汚染しか見られず、西方向には余り汚染が広がっていないことが確認された。

・北に向かったの汚染の減衰は未確認である。地下水の流動方向は北向きであることが想定されているので、今後の調査で確認するべきである。

### 4. 3 浄化対策

#### 4. 3. 1 浄化対策孔、モニタリング孔の設置

詳細調査結果を踏まえて、浄化対策孔、モニタリング孔の設置箇所および深度を決定した。設置箇所を前出の図-

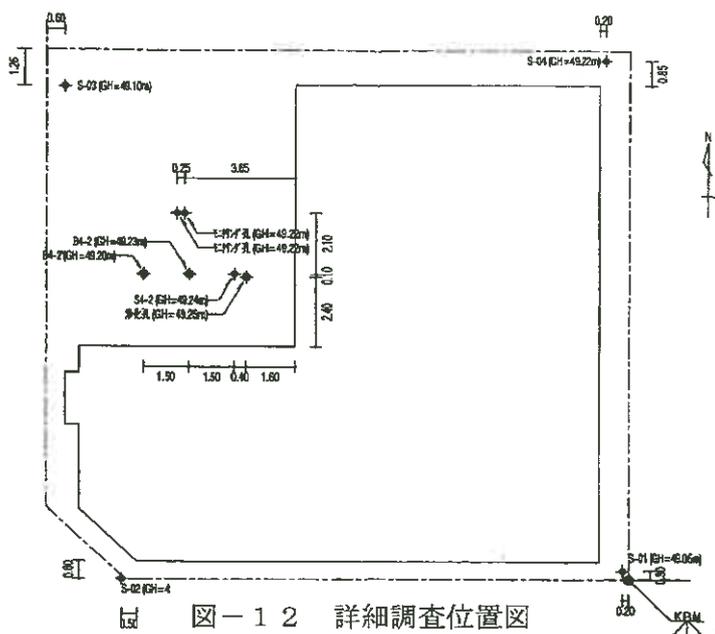


図-12 詳細調査位置図

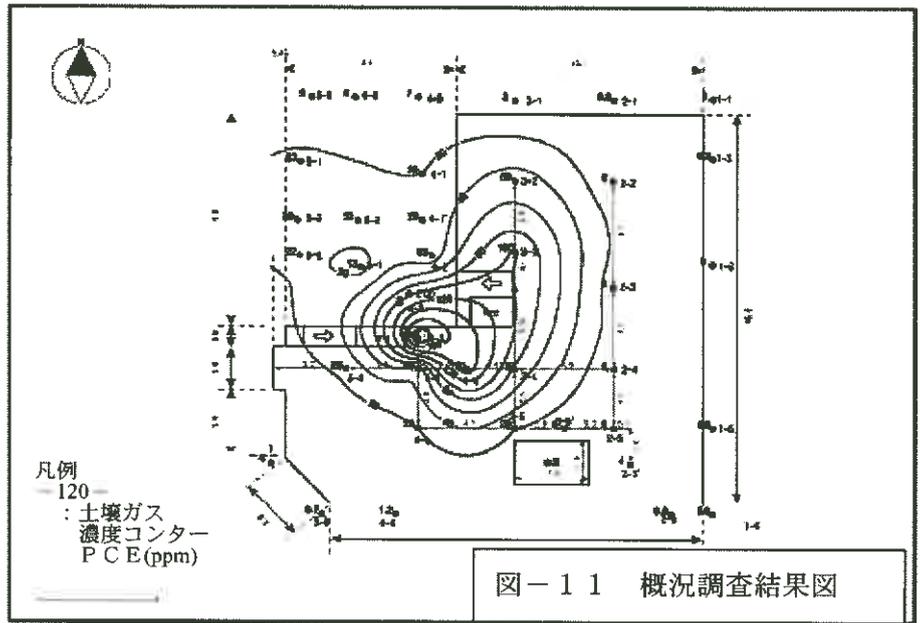


図-11 概況調査結果図

表-3 詳細調査項目、数量

| 調査項目           | 調査方法              | 第1次 詳細調査       |       |
|----------------|-------------------|----------------|-------|
|                |                   | 調査項目           | 数量    |
| 第1次 詳細調査       | 機械ボーリング           | B4-2           | 30m   |
|                |                   | B4-2'          | 10m   |
|                | 簡易ボーリング (SCSC)    | S4-2           | 7m    |
|                | 標準貫入試験            | 2箇所            | 59回   |
|                | 現場透水試験            |                | 4点    |
|                | 電気検層 (ノルマル法)      |                | 29.5m |
|                | 土壌ガス調査            |                | 19点   |
|                | 現地土壌溶出試験 (簡便法)    |                | 76点   |
|                | 室内土壌溶出試験 (GC-MS法) |                | 10点   |
|                | 地下水水質分析           |                | 1点    |
| 第2次 詳細調査       | 室内土質試験            | 土粒子の密度試験       | 34点   |
|                |                   | 土の含水比試験        | 34点   |
|                |                   | 土の粒度試験         | 33点   |
|                |                   | 土の液性限界・塑性限界試験  | 1点    |
|                |                   | 土の強靱量試験        | 2点    |
|                |                   | 簡易ボーリング (SCSC) | S-01  |
|                | S-02              | 6.5m           |       |
|                | S-03              | 7m             |       |
|                | S-04              | 6m             |       |
| 現地土壌溶出試験 (簡便法) |                   | 51点            |       |

表-4 詳細調査使用機材一覧

| 調査項目   | 試験方法              | 器械名        | 製造者        | 型式・規格 | 備考                 |    |
|--------|-------------------|------------|------------|-------|--------------------|----|
| 土壌溶出試験 | 現地土壌溶出試験 (簡便法)    | 恒温槽        | アライ        | -     | 1台                 |    |
|        |                   | 電子天秤       | メトラ        | PB    | 1台                 |    |
|        |                   | メジュームビン    | イワキ        | 500ml | 10本                |    |
|        | 室内土壌溶出試験 (GC-MS法) | 検知管        | テトラクロロエチレン | ガステック | 133 (LL, L, M, HA) |    |
|        |                   | パーミアンドトラップ | ユニフレックス    |       | 01-4560            | 1台 |
|        |                   | ガスクロマトグラフ  | HP         |       | MP58902            | 1台 |
|        |                   | 質量分析計      | 日本電子       |       | MS-AM50            | 1台 |

1 2中に示す。また、対策孔、モニタリング孔の設置深度の考え方を図-15に示す。

浄化孔は詳細調査で最もPCE濃度が高かったS4-2付近に設置し、深度は難透水層である細粒火山灰層の上面までとした。モニタリング孔は対策孔から3m北西側（地下水流の下流側）に設置し、後述する浄化手法の考え方で盛土部分に浄化された地下水を還元するため、宙水が盛土部分に発生すると予想されたため、深度6.5mと3.5mの2孔設置した。

#### 4. 3. 2 浄化対策（単孔式地下水浄化装置）

本汚染サイトにおける地下水浄化は4. 1章で概略を述べた「単孔式地下水浄化装置」で行った。浄化装置の概念図を図-16に示す。図のように汚染区間から揚水された汚染地下水を装置内でばっ気により気水分離し、汚染気体は活性炭吸着により浄化し、VOC を除去された地下水は装置上部の還元区間から地中に戻される仕組みである。

浄化装置は現地に設置後、2ヶ月間試運転・改良を行い、その後本稼働させた。本稼働後20日後のモニタリング結果を表-5に示す。

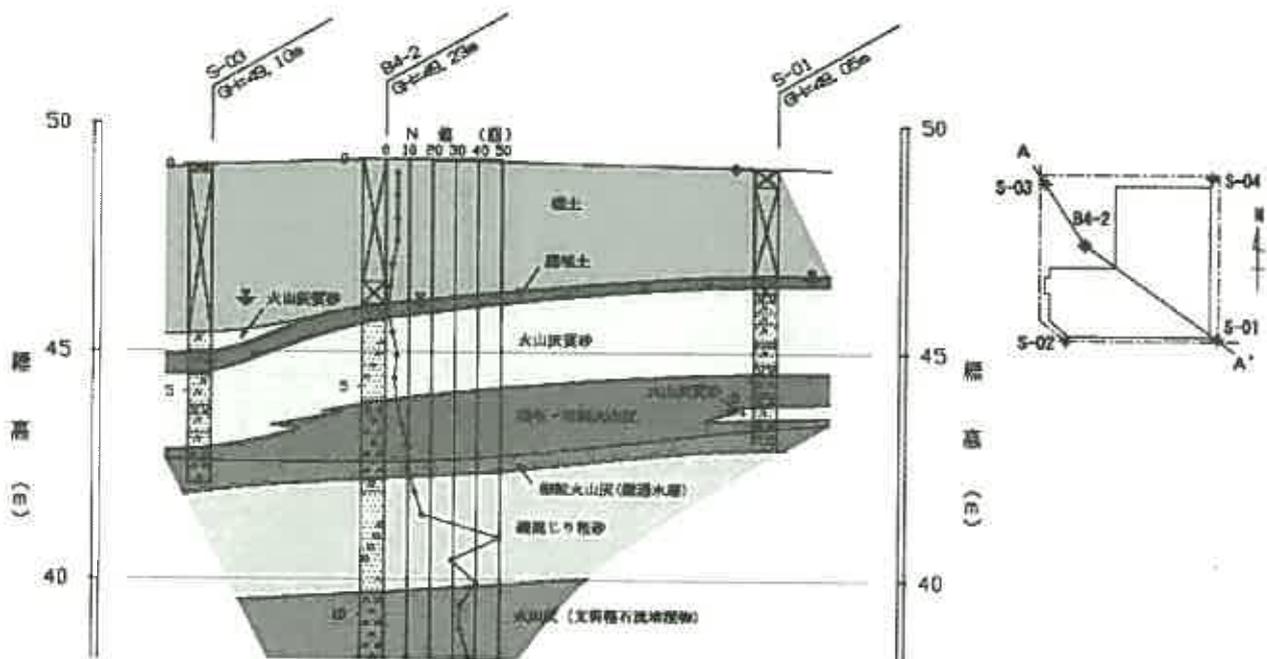


図-13 土層断面図(A~A'断面)

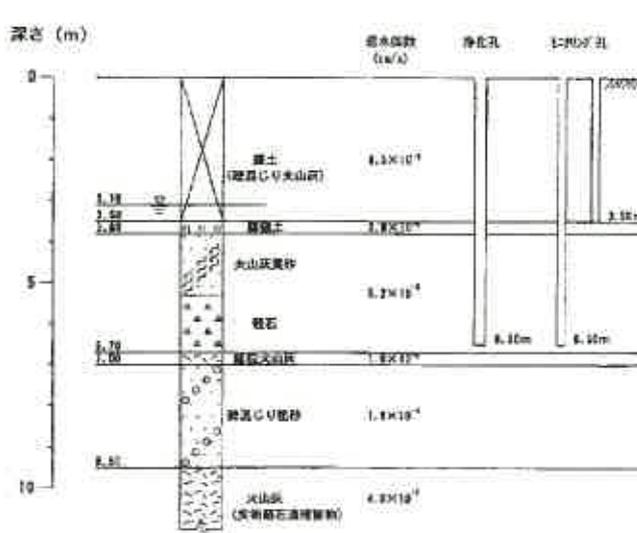


図-15 浄化孔、モニタリング孔設置の模式図

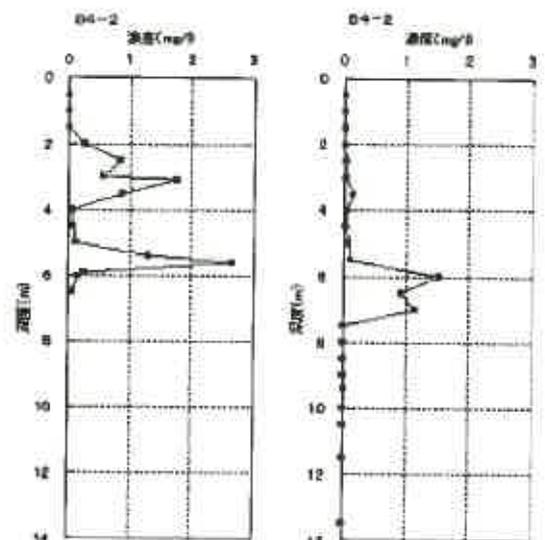


図-14 PCEの深度分布

単孔式地下水浄化装置実証試験による効果評価、問題点等を以下に述べる。

- ・実証試験のモニタリング結果では、運転開始後 30 分程度で濃度が 1/10 以下に低下した。
- ・しかし、還元区間の透水性の低さ、揚水区間と還元区間の遮水等および揚水量を多くできない地質であったことの問題から浄化は浄化孔の近傍に限られていると判断され、運転を停止すると濃度が上昇する傾向が見られた。
- ・還元区間の透水性が低い土質の場合、地表面近接涵養による地下水還元を行った方が浄化地下水が直接浄化孔の孔底付近に戻らず、揚水できる地下水の範囲が広がるため、浄化効率が上がると考えられる。その場合、排水基準に違反しないような還元手法を採る必要がある。
- ・装置のメンテナンス等の問題から、浄化運転は工場の作業時間中のみ行い夜間は停止したため、停止時間中に周囲から汚染物質が集まり、昼間だけ浄化できている状況にあると考えられた。
- ・以上の結果から、本手法は浄化時間はかかるが安価な浄化手法として一定の地質条件を満たす（帯水層条件）小規模な汚染に対して適用できると判断された。
- ・また、井戸構造体による浄化手法を併用することにより、浄化期間中の汚染物質の拡散防止、効率的な地下水還元等が可能となると判断された。

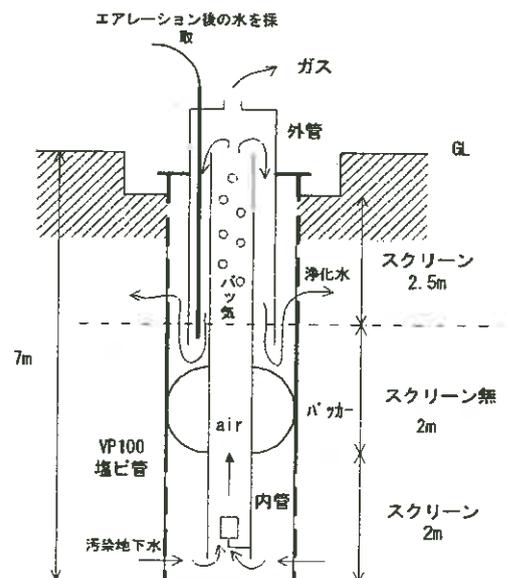


図-16 単孔式地下水浄化装置の模式

表-5 モニタリング結果 (20日後)

| 経過時間<br>(分) | 浄化孔排出<br>ガス濃度<br>(ppmV) | 地下水                    |                        |                       |                   |
|-------------|-------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|-------------------|
|             |                         | 浄化装置<br>内管濃度<br>(mg/l) | 浄化装置<br>外管濃度<br>(mg/l) | モニター孔<br>濃度<br>(mg/l) | S-03 濃度<br>(mg/l) |
| 0.0         | 6.0                     | 0.500                  | 0.500                  | 0.090                 | 1.240             |
| 35.0        | 1.5                     |                        | 0.048                  |                       |                   |
| 40.0        |                         | 0.072                  |                        |                       |                   |
| 45.0        |                         |                        |                        |                       |                   |
| 65.0        | 1.0                     |                        |                        |                       |                   |
| 70.0        |                         |                        | 0.030                  |                       |                   |
| 80.0        |                         | 0.042                  |                        |                       |                   |

## 5. まとめと謝辞

GETReC では本論文で述べた平成 13 年度の技術開発成果を広報・普及する目的で平成 14 年度に各種広報活動や教育研修活動を予定している。また、4 章で述べた汚染サイトにおいて 3.1、3.2 章で紹介した新技術を用いて汚染のホットスポット（室内）のサンプリングを行い、サイト全体での汚染物質総量の把握、地下水揚水による汚染の浄化などの調査・対策を予定している。

「土壌汚染対策法」の施行も平成 15 年 1 月に控え、今後はますます土壌・地下水汚染に対する調査・対策の需要が増加すると考えられ、客観的に調査・対策の手法を判断する建設コンサルタントの役割が重要視されてくるものと思われる。

4 章における汚染サイト評価、浄化対策は GETReC 技術開発委員会委員長 西田道夫氏（(株)ジオテック）、ワーキングメンバー 鐵川朋幸氏（(株)シンエイ）、二ツ川健二氏（北海道士質コンサルタント（株））、前原香織氏（野外科学（株）、現在退職）、亀和田俊一氏、和田哲氏（(株)レアックス）、若山悦昭（日本エルダルト（株））、松垣元広（(株)シアテック）、吉田愛氏（(株)親和テクノ）、GETReC 北海道グループワーキングメンバー 広田知保氏（北海道立地質研究所）、山下典雄氏、近藤務氏（三和土質基礎（株））、秋本豊氏、日野正勝氏（(株)シンエイ）、中尾融氏、川副透氏（(株)ドーコン）、遠藤秀博氏、佐藤莊平氏（北海道士質コンサルタント（株））、梅津和弘、松井宏之氏（マルイシジオテクノ（株））、榊保二氏、吉本達哉氏（野外科学（株））、亀海泰子氏（野外科学（株）、現在（株）ズコー社）、関根幸博氏（(株)ユニオンコンサルタント）、小泉謙氏（(株)レアックス）の方々による共同調査であり、ここに感謝の意を表します。

# TRD工法による鉛直遮水壁工の土壌・地下水汚染対策について

(株) テノックス 平山勇治, 上 周史, 太田和善, 加藤真也  
(株) 大林組 小谷克己  
北海道大学大学院 古市 徹

## 1 はじめに

土壌汚染対策法（平成 14 年 5 月，環境省）が公布されるなど，近年，土壌や地下水の汚染に関する地盤環境問題がクローズアップされている。廃棄物の最終処分場については，旧厚生省による 500 施設以上の不適正処分場が明確化されている<sup>2)</sup>。また，廃棄物の発生量が減少しない傾向であるにも拘らず，立地困難の現状から最終処分場の逼迫に伴う不適正な処理・管理および不法投棄等によって発生した有害物質の流出が，近隣住民の生活環境を脅かし，その適正化が社会的な問題となっている。

一方，溶剤等の化学薬品を取扱う工場などの事業跡地の再開発等については，重金属等に汚染された土壌が発見される事例が増加しており，土壌・地下水汚染について適切な調査・対策が求められている<sup>3)</sup>。

このような地盤環境問題に対し，土壌・地下水環境の保全に係る法制度が強化され，土壌環境基準<sup>4)</sup>や地

下水環境基準<sup>5)</sup>において有害物質の指定や溶出基準値等が示されている。また，土壌・地下水汚染に関する具体的な調査や対策を行う際の技術的な指針<sup>6)</sup>が通知されている。この指針では，重金属等で汚染された土壌を一般環境から隔離し，汚染の拡散を防止する対策として，鉛直遮水工による汚染物質の拡散防止法「原位置封じ込め対策」が示されており，共同命令<sup>7)</sup>にて定める構造基準に適合した鉛直遮水工（シート壁，鋼矢板壁，地中連続壁，ソイルセメント固化壁）が採用されている。

本論文では，ソイルセメント固化壁工法の一つとして，カッターチェーン方式によるソイルセメント地中連続壁工法「TRD 工法」の概要および本工法による工事事例を紹介し，本工法による鉛直遮水工の適用性について報告する。

## 2 TRD工法の概要<sup>8)</sup>

図 1，図 2 に TRD 工法の施工機械の概要および施工

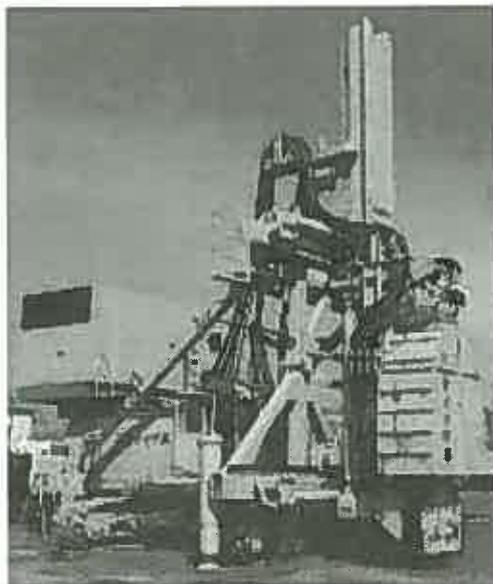
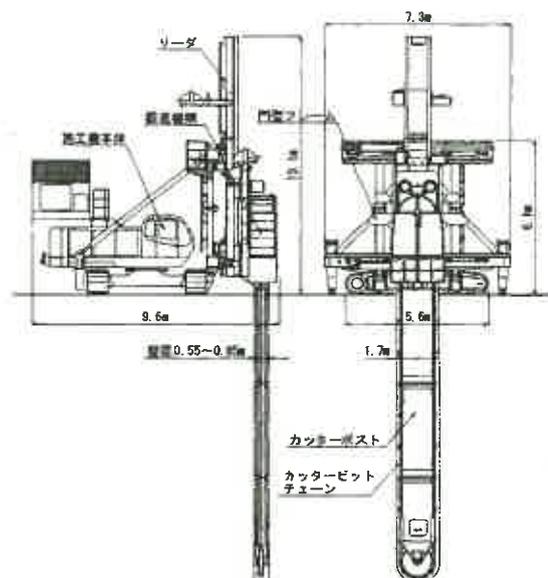


図 1 TRD 工法施工機械



Yuji HIRAYAMA, Chikashi KAMI, Kazuyoshi OHTA, Shinya KATO, Katumi KOTANI, Toru HURUICHI

連絡先：(株) テノックス 技術本部開発部 〒107-8533 東京都港区赤坂 6-13-7 TEL 03-3582-5168 FAX 03-3582-4714

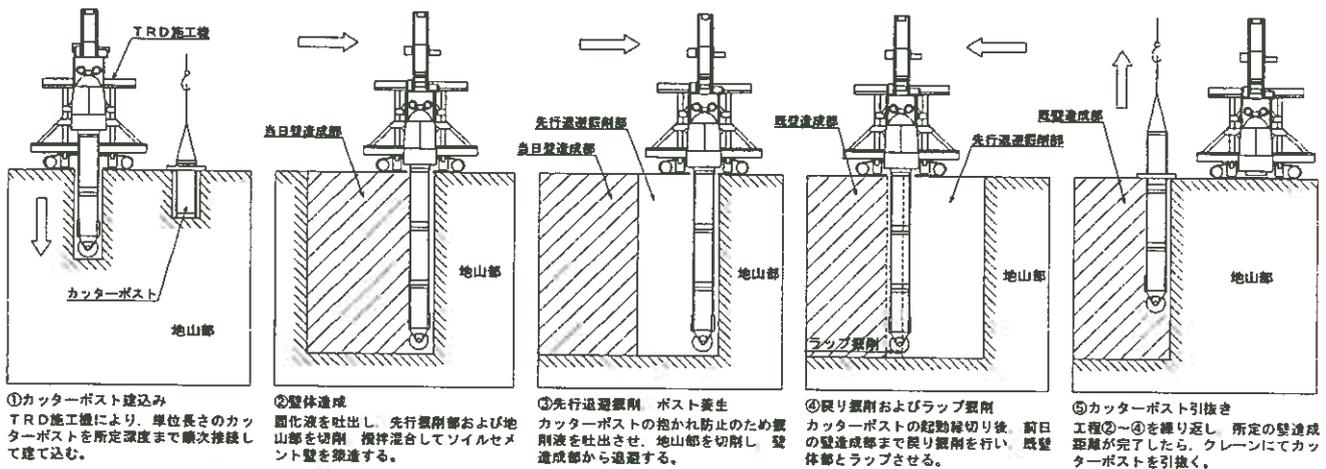


図2 TRD 工法施工手順



図3 カッターポスト(先端部)

手順を示す。TRD 工法 (Trench cutting Re-mixing Deep wall method) は、無端カッタービットチェーンを取り付けたチェーンソー型のカッターポスト (図 3) を地中内に挿入し、カッターポストの横行移動およびカッタービットチェーンの回転・循環により、地盤の切削とセメントスラリーによる固化液および切削土の攪拌混合を同時に行いながら地中に等厚で連続したソイルセメント壁を築造する工法である。従来の柱列式ソイルセメント壁工法と比較した場合、以下の特徴を有する。

- ① 目違いのない連続した壁体の築造が可能である。
- ② 造成深度全長の地盤を同時に切削および攪拌混合するため、砂質土と粘性土の互層地盤や腐植土層を狭在する地盤であっても深度方向に均質な壁体の築造が可能である。
- ③ 砂礫や泥岩などの硬質地盤に対しても高い切削能力を有する。
- ④ 直進性および鉛直性に優れ、リアルタイム管理装置 (カッターポストの傾斜管理) により大深度 (最

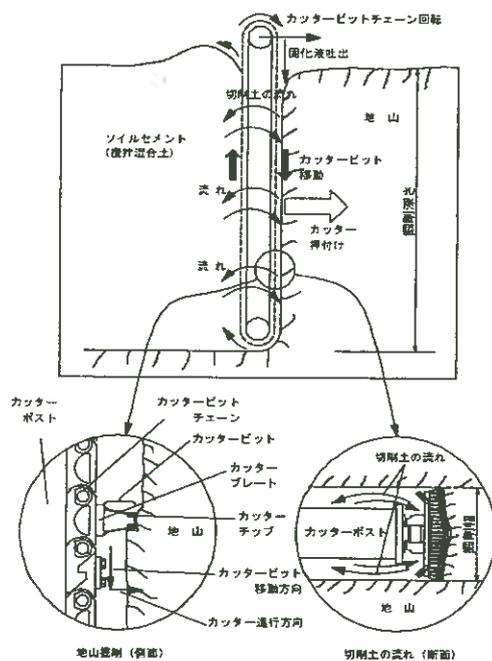


図4 切削および攪拌混合機構

大 60m) での施工が可能である。

- ⑤ 機械高さが低く (10~12m), 施工中は、カッターポストが挿入されているため転倒の恐れがなく、施工機の安定性が高い。

図 4 に切削および攪拌混合の機構を示す。カッターチェーンに装着された切削ビットを地盤に押し付けた状態で掻き下げ (上げ) 方向にビットを移動させることによりビットが地盤を切りほぐし、ほぐされた土はビットの移動およびそれによって生じる固化液の流れに乗って上昇する。その後、ほぐされた土と固化液はチェーンの回転によって溝内を対流し、造成深度全長に亘り均一に攪拌混合される。

表 1 TRD 工法による施工実績 (文献 9) に加筆, 修正)

| 現場 | 地盤構成       | 用途    | 壁体仕様<br>(壁厚/深度) | 添加量<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | W/C<br>(%) | q <sub>u</sub><br>(N/mm <sup>2</sup> ) | V<br>(%) | k<br>(cm/sec)                                     |
|----|------------|-------|-----------------|-----------------------------|------------|--|----------|---|
| A  | 砂質土, 粘性土互層 | 遮水壁   | 0.60m/36.0m     | 240                         | 250        | 2.58 (n=106)                           | 31.99    | 4.39 × 10 <sup>-8</sup> ~ 1.41 × 10 <sup>-8</sup> |
| B  | 砂礫層, 泥岩層   | 遮水壁   | 0.55m/29.0m     | 200                         | 200        | 4.94 (n=91)                            | 31.22    | 3.80 × 10 <sup>-7</sup> ~ 1.70 × 10 <sup>-7</sup> |
| C  | 砂質土        | 遮水壁   | 0.55m/32.0m     | 290                         | 120        | 2.28 (n=86)                            | 26.82    | 1.55 × 10 <sup>-8</sup> ~ 1.73 × 10 <sup>-9</sup> |
| D  | 砂質土        | 遮水壁   | 0.55m/36.5m     | 325                         | 150        | 3.32 (n=37)                            | 16.59    | 7.64 × 10 <sup>-7</sup> ~ 1.09 × 10 <sup>-7</sup> |
| E  | 砂質土        | 土留止水壁 | 0.55m/38.5m     | 200                         | 100        | 1.83 (n=9)                             | 38.49    | 2.31 × 10 <sup>-7</sup> ~ 2.04 × 10 <sup>-7</sup> |
| F  | 固結シルト, 砂質土 | 土留止水壁 | 0.80m/47.0m     | 250                         | 150        | 1.48 (n=102)                           | 28.12    | 3.69 × 10 <sup>-7</sup> ~ 6.79 × 10 <sup>-8</sup> |
| G  | 粘土質シルト     | 遮水壁   | 0.70m/15.0m     | 320                         | 180        | 2.43 (n=8)                             | 10.76    | 3.95 × 10 <sup>-8</sup> ~ 1.74 × 10 <sup>-8</sup> |
| H  | 砂質シルト      | 遮水壁   | 0.55m/14.0m     | 275                         | 150        | 6.08 (n=18)                            | 17.01    | 7.06 × 10 <sup>-9</sup> ~ 6.48 × 10 <sup>-9</sup> |
| I  | 砂質シルト      | 遮水壁   | 0.55m/15.0m     | 250                         | 120        | 9.86 (n=24)                            | 33.31    | 1.74 × 10 <sup>-7</sup> ~ 1.26 × 10 <sup>-8</sup> |

※W/C: 水セメント比, q<sub>u</sub>: 壁体の一軸圧縮強さの平均値, V: 造成深度全長における一軸圧縮強さの変動係数, k: 壁体の透水係数

### 3 TRD 工法による鉛直遮水工の適用性

TRD 工法により築造したソイルセメント壁を鉛直遮水工として適用する場合は, 以下に示す共同命令にて定める構造基準を満足しなければならない。

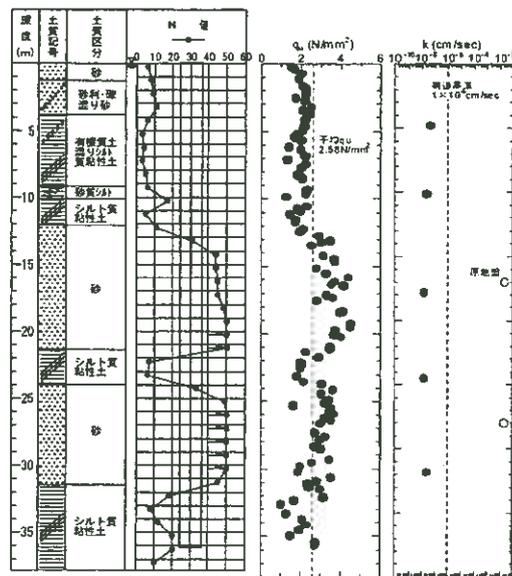
- ① 壁体の厚さが 50cm 以上であること。
- ② 壁体の透水係数が 1 × 10<sup>-6</sup> cm/sec 以下であること。
- ③ 遮水壁が不透水性地層まで設けられていること。

ここでは, TRD 工法による工事事例をもとに, 本法による鉛直遮水工の適用性について評価・検証する。

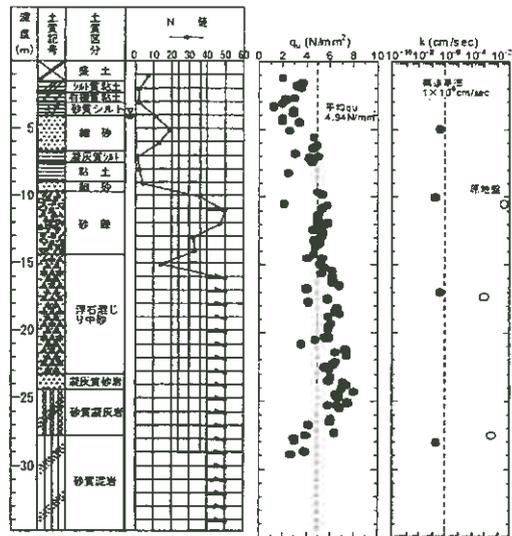
#### 3.1 ソイルセメント壁の特性

表 1 に TRD 工法にて施工した現場の工事事例<sup>9)</sup>を示す。同表には, 各施工現場の地盤構成 (砂質土系, 粘性土系), 用途, 壁体仕様 (壁厚, 深度), セメント添加量, 水セメント比, 壁体の強度および透水試験結果を示す。なお, 壁体の用途は主に, 共同命令を満足する必要がない仮設の遮水壁や土留止水壁である。ここでは, 代表として 3 現場 (現場 A, B, F) について説明する。

図 5 に現場 A, B, F の地盤構成および築造したソイルセメント壁から, 全長ボーリングにて採取したコア供試体の一軸圧縮試験 (JIS A1216) および透水試験 (JGS: 三軸試験装置を用いる透水試験) 結果の深度方向分布を示す。地盤概要は, 被圧帯水層が介在する砂質土・粘性土の互層地盤 (現場 A) や, N 値 50 以上の砂礫や泥岩が介在する硬質地盤 (現場 B, F) であり, 壁厚が 550~800mm, 壁深度が 29~47m の中~大深度



(a) A 現場: 砂質土(被圧 GL-14.0m), 粘性土互層

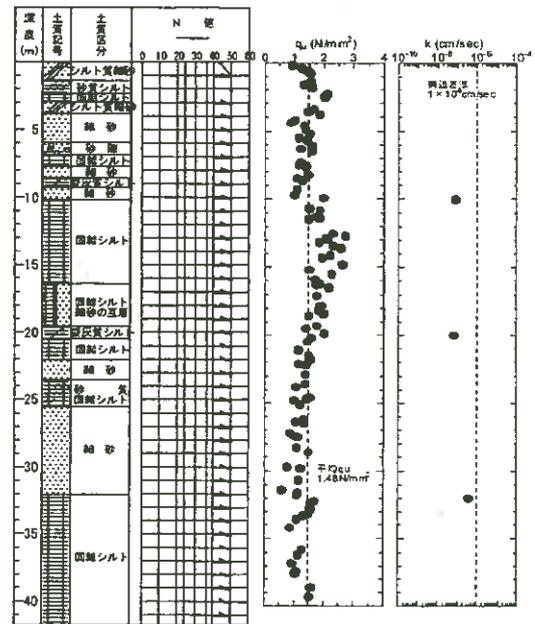


(b) B 現場: 砂礫層, 泥岩層

図 5.1 壁体の一軸圧縮強さと透水係数の深度方向分布

規模の壁体仕様である。また、壁体は、セメント添加量 200~250kg/m<sup>3</sup>、水セメント比 W/C=150~250%のスラリー配合で築造した。

現場 A,B,F における壁体の一軸圧縮強さは、平均強度  $\bar{q}_u = 1.48 \sim 4.70 \text{ N/mm}^2$ 、造成深度全長における強度の変動係数は  $V = 28.2 \sim 32.0\%$  であり、多種類の地盤条件にも拘らず上層、下層の強度のバラツキが小さく、造成深度全長に亘り均質な強度を有するソイルセメント壁が築造されたことが確認された。また、透水係数の深度分布は、 $k = 3.80 \times 10^{-7} \sim 1.41 \times 10^{-8} \text{ cm/sec}$  の範囲にありバラツキが小さく、原地盤の透水係数が  $k = 10^{-2} \sim 10^{-4} \text{ cm/sec}$  オーダーの透水性を有する砂層や礫層(図 5(a),(b)の○)に対し、造成深度全長に亘り「実質上不透水」の遮水性を有し、共同命令を満足するソイルセメント壁が築造されたことを確認した。



(c) F現場：固結シルト、砂質土互層

図 5.2 壁体の一軸圧縮強さと透水係数の深度方向分布

### 3.2 鉛直遮水工としての適用性の検証と適用方法

表 1 より TRD 工法にて築造したソイルセメント壁の透水係数は、地盤条件や配合条件により変化するものの、 $k = 7.64 \times 10^{-7} \sim 1.73 \times 10^{-9} \text{ cm/sec}$  の範囲にあり、鉛直遮水工の構造基準  $1 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$  以下に対して 1.3 ~ 578 倍の遮水性を有する。ここで、壁厚 50cm、動水勾配  $i=1$  と仮定した場合、浸出水が壁体を透過する時間を算出すると、構造基準では 1.6 年弱<sup>11)</sup>となるのに対し、本工法によるソイルセメント壁は計算上 2.1 ~ 916 年の透過時間を確保できることとなる。

以上のように、TRD 工法にて築造されたソイルセメント壁は、優れた切削および攪拌混合技術によって、造成深度全長に亘り均質で構造基準の約 1.5 倍以上の遮水性能を有しており、鉛直遮水工としては従来工法より有効であると思われる。以下に、本工法を用いたソイルセメント壁による鉛直遮水工のより有効な適用方法(図 6)を提案する。

#### ① 山間部や臨海平野部に対する適用

不透水層が岩盤で中間層の硬質地盤が介在する山間部や不透水層が深くなる臨海平野部の鉛直遮水工に対して、切削能力が高く、大深度施工への施工性が高い TRD 工法を適用する。

#### ② 最終処分場への適用

現状の最終処分場や不適正処分場の外周に TRD 工

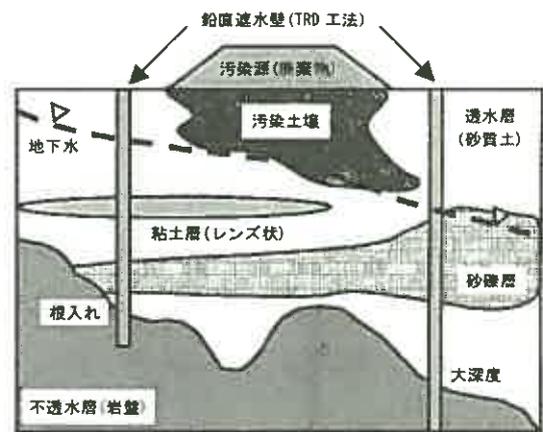


図 6 TRD 工法による鉛直遮水工の適用例

法による鉛直遮水工を設置することで安全性および信頼性の向上を図る。また、遮水シート破損事故や潜在的な溶出に対して、本工法により鉛直遮水工を設置する。

#### ③ 汚染土壌への適用

汚染土壌の域外への拡散を防止するために外周に TRD 工法による鉛直遮水工の設置を行うと共に、優れた攪拌混合技術を利用して内部の汚染土壌自身の固化による不溶化を図る。

### 4 鉛直遮水工の実施例

ここでは、封じ込め対策として、TRD 工法にて実施した鉛直遮水工の施工事例を紹介する。

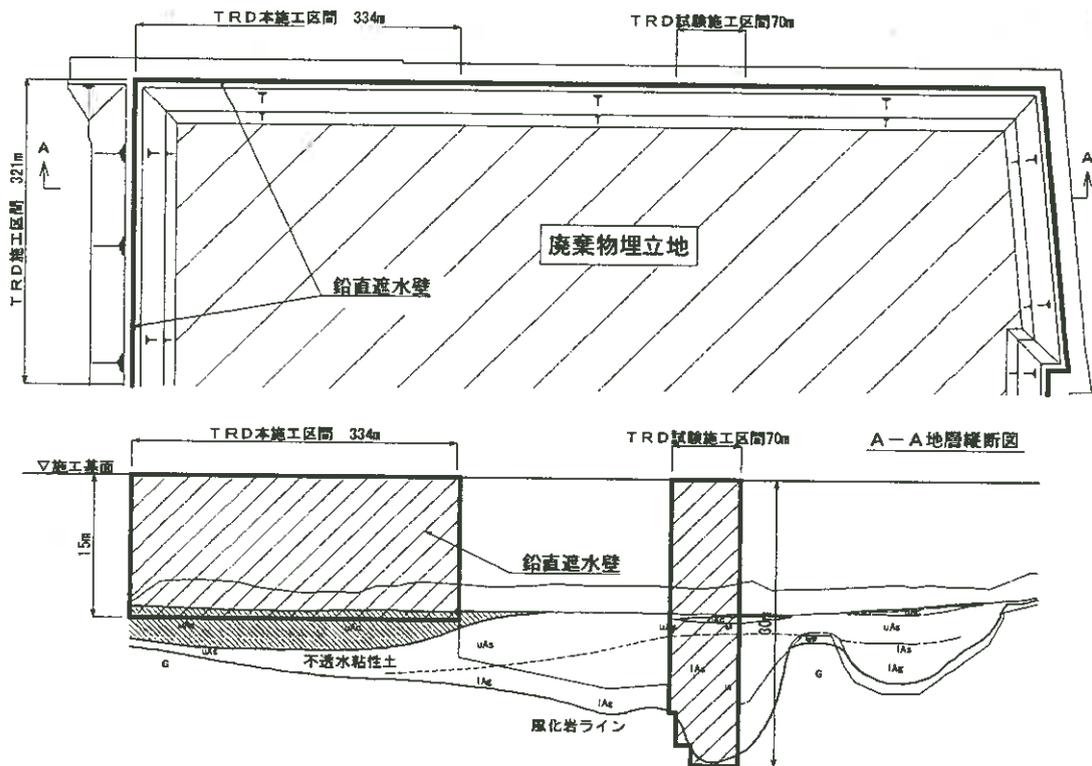


図7 鉛直遮水工概要図

#### 4.1 廃棄物最終処分場における鉛直遮水工

##### (1) 工事概要

臨海部での廃棄物最終処分場建設に伴い、臨海部への有害物質拡散防止として鉛直遮水工が計画された。図7に本工事の平面図および地層縦断面図を示す。共同命令に適用した遮水性を持ち、N値50以上の風化花崗岩への根入れ等の必要事項から、TRD工法による試験工事で施工性の確認を行い、施工性・効率性が良好なTRD工法によるソイルセメント遮水壁が本工事で採用された。なお、本工事では不透水性地層である粘性土地盤に1m以上の遮水壁の根入れを行った。

##### (2) 工事規模

- 壁厚 : 550mm
- 壁深度 : 13.5m~15.0m, 30.0m (試験工事)
- 壁延長 : 646m, 70m (試験工事)
- 総壁面積 : 10,884m<sup>2</sup>

##### (3) 施工結果

図8に施工状況を示す。本工事では、セメント添加量 300kg/m<sup>3</sup>、水セメント比 W/C=90%のスラリー配合にてソイルセメント壁を築造した。壁体頭部処理(頭コンクリート)や一部に捨石護岸部への遮水壁の構築があったが、N値10程度の緩い地盤での施工のため、



図8 鉛直遮水工施工状況

表2 強度、透水試験結果

| 採取深度                    | 材令  | $q_u$<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | $k$<br>(cm/sec)                                |
|-------------------------|-----|-------------------------------|--|
| 施工 GL<br>-3.60m, -10.6m | 28日 | 9.86                          | $1.74 \times 10^{-7} \sim 1.26 \times 10^{-8}$ |
| 設計値                     |     | $F_c=1.0$                     | $1 \times 10^{-6}$                             |

一日当たり従来工法の1.5倍の施工出来高を確保した。

表2に築造した壁体の強度および透水試験結果を示す。採取深度に拘らず、平均強度  $\bar{q}_u = 9.86 \text{ N/mm}^2$ 、透水係数  $k = 1.74 \times 10^{-7} \sim 1.26 \times 10^{-8} \text{ cm/sec}$  が得られ、設計値 ( $F_c = 1.0 \text{ N/mm}^2$ ,  $k = 1 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$  以下) を満足する遮水壁の品質を有していることが確認された。

## 4.2 他工法との組合せによる遮水技術<sup>12),13)</sup>

鉛直遮水工の高性能化として、ソイルセメント壁と他材料（部材）との組合せによる遮水技術が開発・実用化されている。これは、図9に示すように、ソイルセメント壁に（薄型）鋼矢板や合成樹脂シートを挿入することで、ソイルセメントの力学的特性とシートの持つ耐久性・化学的安定性との特徴を兼ね備えたより高い信頼性を有する遮水壁となる。また、硬質地盤に対する適用性が低い（施工困難、破損の恐れ）鋼矢板やシート壁と、適用性が高いTRD工法との組合せは、高性能の品質のみではなく施工性に対しても有効な工法となる。なお、TRD工法と鋼矢板またはシートとの組合せによる工事事例の詳細については文献13)を参照されたい。

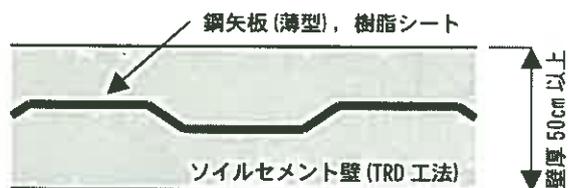


図9 ソイル壁+矢板・シートによる遮水工例

## 5 おわりに

今回紹介したTRD工法は、機械の転倒がない安定で安心なソイルセメント地中連続壁工法として平成5年に開発実用化され、平成14年3月までに仮設土留め壁や遮水壁を中心に200件、累計100万 $\text{m}^2$ を超える壁面積の工事を完了している。その内、土壌・地下水汚染対策として、地盤特性（互層地盤、硬質地盤）に対する適応性が広いこと、連続性があり均質で高い遮水性能が得られること、並びにコンクリート壁工法に比べて低コストであることなどから15件、約10万 $\text{m}^2$ の鉛直遮水壁工の施工実績があり、特に最近になり実績は急増している。これらの施工実績より、官公庁や設計コンサルへの認知が深まり、今後、不適正処分場における応急対策や臨海埋立地での廃棄物や汚染土壌の封じ込め対策として鉛直遮水工の設置に本工法の採用が多くなるものと期待される。

また、本工法による鉛直遮水工の特性を生かし、他工法との組合せによる技術向上や鉄粉混入などによる

浄化壁と遮水壁との組合せによる地下水浄化システムの開発、斜め（俯角30～70度）交差壁による底部遮水が不要の廃棄物処理施設構築等の技術展開が考えられる。また、二重壁間の水位管理による完全遮水壁の技術も考えられている。しかし、地震時における変形追従性や化学的耐久性など、ソイルセメント遮水壁の長期安定性についての課題があり、模型実験や現場計測等による研究が行われることが期待される。今後、これらの課題に対する研究や検証を行い、安全でより信頼性の高い鉛直遮水壁工の確立に努めていきたい。

## 文献

- 1) 環境省公布：土壌汚染対策法，平成14年5月
- 2) 旧厚生省水道環境部環境整備課：一般廃棄物最終処分場における処理の適正化について，平成10年3月
- 3) 古市徹：有害廃棄物による土壌・地下水汚染の診断，環境産業新聞社，2002.1
- 4) 環境省告示：土壌汚染に係る環境基準，平成3年8月
- 5) 環境省告示：地下水の水質汚濁に係る環境基準，平成9年3月
- 6) 環境省水質保全局長通知：土壌・地下水汚染に係る調査・対策指針運用基準，平成11年3月
- 7) 総理府・厚生省令：一般廃棄物の最終処分場及び産業廃棄物の最終処分場に係わる技術上の基準を定める命令の一部を改定する命令，平成10年6月
- 8) 日本建設機械化協会：TRD工法（ソイルセメント地中連続壁工法）建設機械化技術・審査証明報告書，1997.1
- 9) 金口義胤，上周史，太田和善，加藤真也：TRD工法によるソイルセメントの室内と現場における強度と透水係数，土木学会第56回年次学術講演会講演集，2001.10
- 10) 太田和善，上周史，加藤真也，小谷克己，古市徹：カッターチェーン方式（TRD工法）によるソイルセメント地中連続壁の遮水特性，第11回廃棄物学会研究発表会講演論文集，2000
- 11) 嘉門雅史：管理型廃棄物処分場の遮水構造基準のあり方について，第9回廃棄物学会研究発表会講演論文集，1998
- 12) 政策総合研究所：次世代型廃棄物最終処分場，総合政策提案誌「新政策」特集号，2001.5
- 13) 豊田浩：TRD併用鉛直シート工法による連続地中壁の施工－鶴見川多目的遊水地土壌対策工事－，土木施工43巻4号，2002.4

## 三層構造遮水壁（トリナー工法）

不動建設株式会社 エンジニアリング本部 原田 健二  
小飼 喜弘  
佐藤 敏和

### 1. はじめに

トリナー工法は、廃棄物等による地下水汚染の拡散を防止し、有害物質を封じ込める目的で開発され、平成10年の共同命令（廃棄物処分場の技術上の基準に対する命令〈総理府、厚生省〉）新構造基準においては地中壁工法とその他の工法を組み合わせた工法として位置付けられる。当工法は地盤を削溝し、低強度のソイルセメント遮水壁を構築し、さらに遮水シートを壁中に打設することで、サンドイッチ構造の難透水性壁を構築する。従来のシート壁工法と地中連続壁工法の利点を兼ね備えた信頼性の高い遮水工法である。

本文では、三層構造を有する遮水壁工法の特徴と適用事例について報告する。

### 2. 工法概要

トリナー工法は、図-1に示すようにソイルセメント壁体に遮水シートを打設し、遮水壁を三層構造とし信頼性を一層高めている。遮水板（シート）にはジオロック（高密度ポリエチレンシート）、またはシートウォール（薄鋼板）を用いる。ジオロックは、耐薬品性・耐久性に優れた合成樹脂シートと水膨潤性の止水材（シール材）で構成される。シートウォールは薄鋼板とジョイント部分に不透水性グラウト材を注入することで連続的な壁を構築する。

従来工法の課題と三層構造遮水壁工法の特徴について以下に述べる。

#### 1) 従来工法の課題

従来の鉛直遮水工は、単独工法では以下の課題がある。

##### < 連続壁 >

- ①連続壁の造成時におけるラップ部の遮水性の低下
- ②ソイルセメント壁の現地と室内試験における透水性の差異（現地でのソイルセメント壁の遮水性が室内試験のそれに比べて劣ること）

##### < シート >

- ①シート材料の継手部の遮水性の評価
- ②硬質地盤、岩盤への根入れの確保

#### 2) 三層構造遮水壁工法（トリナー）の特徴

##### ① 高遮水壁の構築

ソイルセメント壁体と高遮水性能の遮水板のサンドイッチ構造（三層構造）を構築することで、より遮水性に優れた鉛直遮水壁が構築できる。

##### ② 変形への対応

ソイルセメント壁単独で造成した場合には、地盤の変形や地震時によりクラックが発生し、遮水不良となる可能性があるが、そのような状況になっても、遮水シート自体は残在し、遮水機能が維持できる。

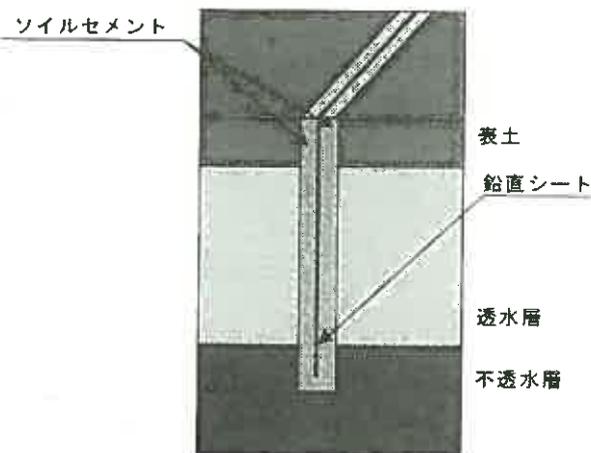


図-1 三層構造鉛直壁の模式図

Kenji Harada, Yoshihiro kogai, Toshikazu Sato (FUDO CONSTRUCTION CO.,LTD)

連絡先：札幌市中央区北3西2-1 TEL 011(281)6771 FAX (222)4727

③ 砂礫地盤や軟硬岩への対応

TRD 施工機は N=50 の砂礫地盤や軟硬岩などにも対応できる。

④ 施工性の向上

ソイルセメント壁体の造成と遮水板打設工の平行作業により、遮水板の打設はソイルセメント壁体が未固結状態で行えるため遮水板の貫入時の負担が軽減される。

3. シート材料の特性と遮水性の評価

シート材料の特性を表-1, 2に示す。ジオロックは図-2に示すように有効幅 1350mm、厚さ 2.0mm の高密度ポリエチレンシートにジョイント部はオスメス構造で間詰めに膨張性のシール材を挿入する。

シートウォールは図-3に示すように有効幅 1000mm、板厚  $t=2.7\sim 4.5\text{mm}$  の薄鋼板にジョイント部はセメント、ベントナイトを主成分とした充填材で一体化を図り高遮水性能を確保する。

表-1 ジオロック材料の特性

| 項目   | 試験方法       | 基準値                          |
|------|------------|------------------------------|
| 密度   | JIS K 7112 | 0.942g/cm <sup>3</sup> 以上    |
| 厚さ   | JIS K 6250 | 2.0mm+15%,-0                 |
| 引張強さ | JIS K 6251 | 1177N/3cm 以上<br>(120kgf/3cm) |
| 伸び   | JIS K 6251 | 560%以上                       |

表-2 シートウォール材料の特性

化学成分表

| P (%)    | S (%)    |
|----------|----------|
| 0.050 以下 | 0.050 以下 |

機械的性質表

| 引張強さ | 伸び                      |                         |
|------|-------------------------|-------------------------|
|      | 270N/mm <sup>2</sup> 以上 | 厚さ 1.6mm 以上<br>3.2mm 未満 |
|      | 厚さ 3.2mm 以上             | 31%以上                   |

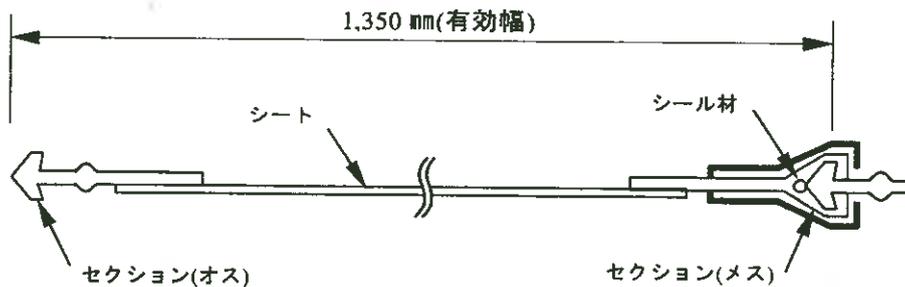


図-2 ジオロックシート形状

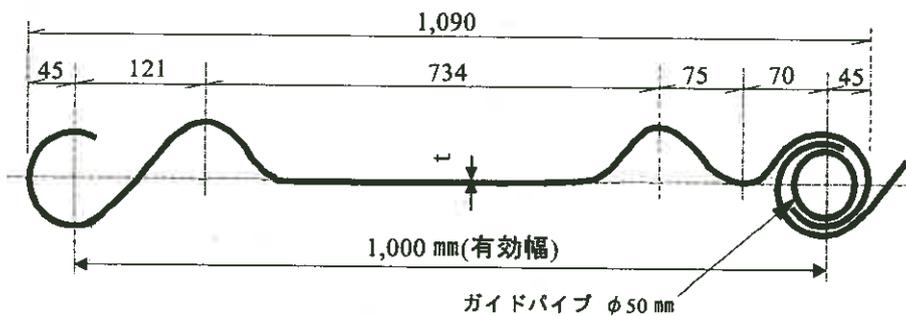


図-3 シートウォール形状

これらの鉛直シートの遮水性能について、図-4、写真-1に示す加圧型試験装置を用いて、表-3に示す条件で室内実験をした結果を図-6～8に示す。この時透水係数  $k$  (cm/sec) は以下のように定義している。

$$k = \frac{L}{H} \times \frac{Q}{A \cdot t}$$

ここに、

L : シートの厚さ (cm)

H : 水頭差 (cm)

A : 断面積 (透水面積) (cm<sup>2</sup>)

t : 通水時間 (sec)

Q : 透水量 (cm<sup>3</sup>)

これらの結果よりシート材料の遮水性能については以下のように評価できる。<sup>1)</sup>

- ① ジオロックシート単体の透水係数は  $1.0 \times 10^{-12}$  (cm/sec) 以下である。
- ② ジョイント部を含んだシートの透水係数は  $1.0 \times 10^{-9}$  (cm/sec) 以下である。
- ③ 三層構造 (ソイルセメント壁体+ジオロック) で  $1.0 \times 10^{-8} \sim 10^{-9}$  (cm/sec) の十分な遮水性を有している。

シートウォールの遮水性能については現場透水試験にて  $1.0 \times 10^{-6} \sim 10^{-7}$  (cm/sec) 程度の遮水性を確認している。

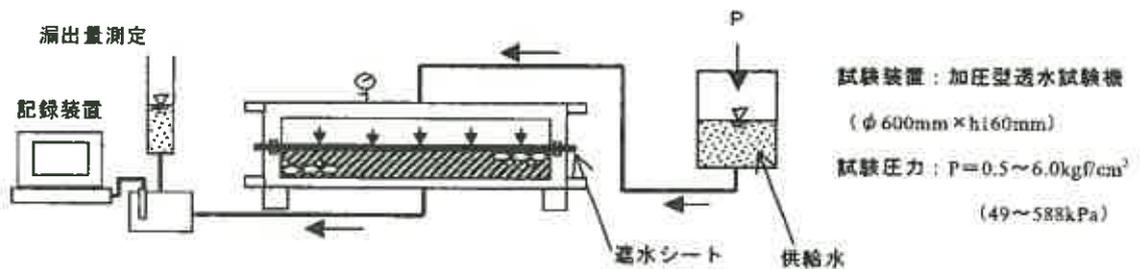


図-4 加圧型実験装置

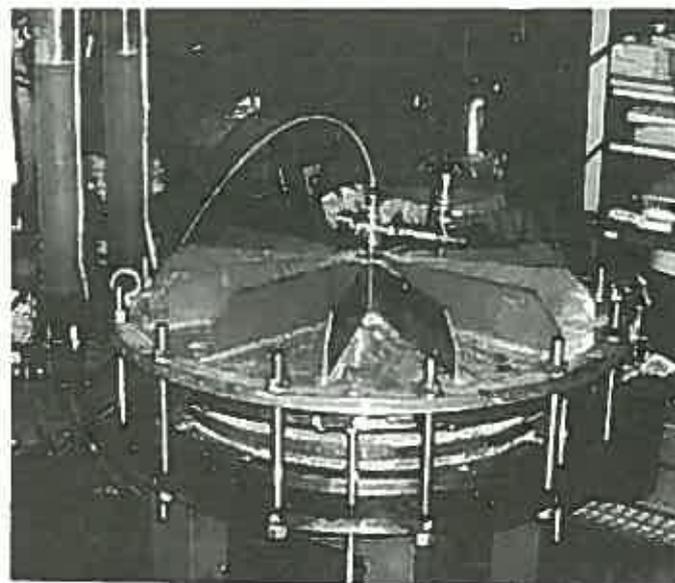


写真-1 加圧型実験装置

表-3 実験ケース

| CASE | 材料     | 仕様       |
|------|--------|----------|
| 1    | 母材部    | T=2.0mm  |
| 2    | ジョイント部 | 図-5(a)参照 |
| 3    | 三層構造   | 図-5(b)参照 |



(A-A' 断面図)

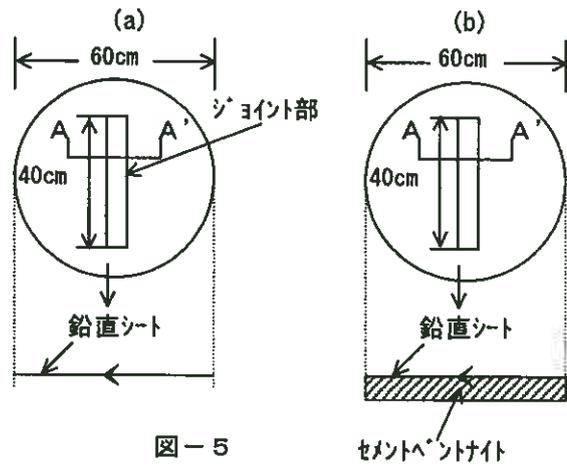


図-5

セメントベントナイト

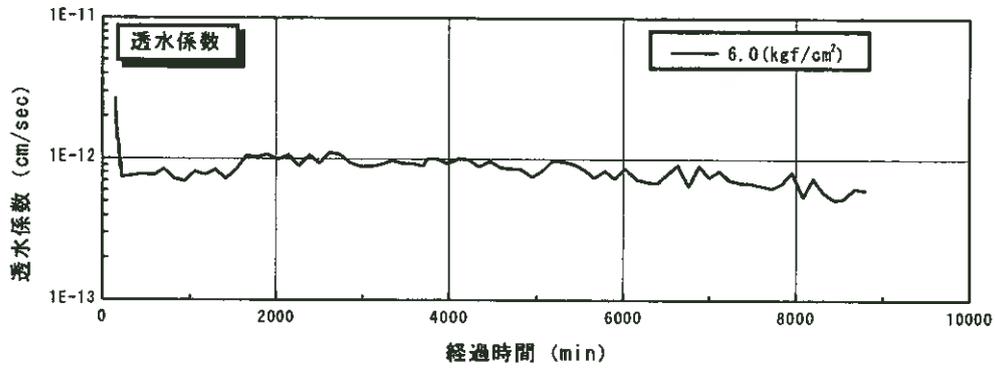


図-6 実験結果 (ケース1)

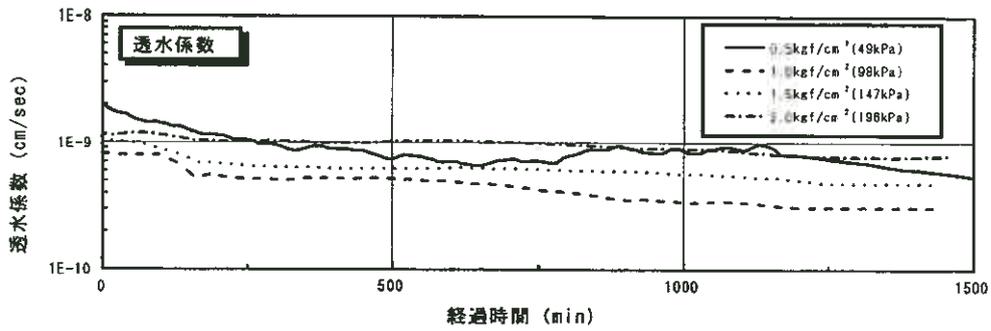


図-7 実験結果 (ケース2)

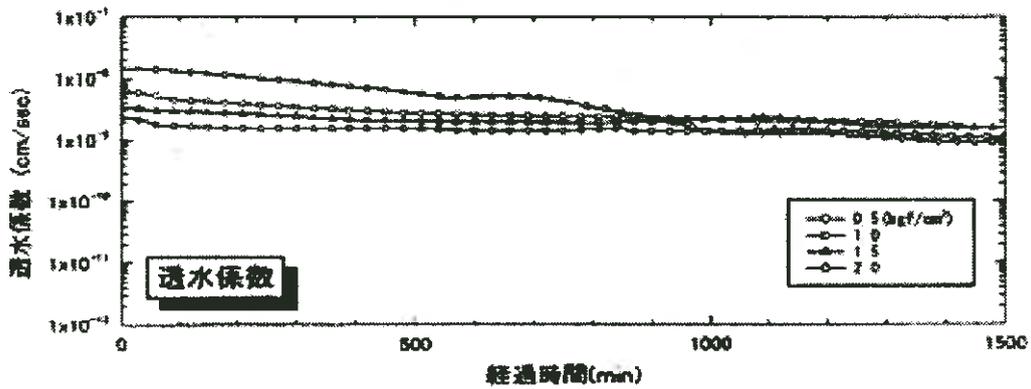


図-8 実験結果 (ケース3)



## 5. 適用事例

トリナー工法を廃棄物埋立地に適用した事例<sup>2)</sup>を紹介する。当地においては、事前調査により 0.1~1.5m 程度の覆土下に約 10m の廃棄物層が確認され、これらの廃棄物による地下水汚染対策としてトリナー工法が採用された。施工位置の地盤は、事前ボーリング結果より上層部はシルト質砂層であるが、下層部は N 値 20 以上（最大 50）の風化軟岩であった。

施工平面・断面図を図-12 に示す。また、同図に示す施工域内外にボーリング孔を設置し、地下水の水質調査を実施した。水位、pH、 $\text{Cl}^-$ （塩素イオン）、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ （化学的酸素要求量）の 10 年にわたる長期モニタリング結果を図-13 に示しているが、施工区域内の水位変動がほとんどなく安定している点や施工後の施工区域外の水質の濃度の増加などが認められないことから埋立跡地区域内からの流出はみとめられず長期的に見ても遮水効果が十分発揮されていることが確認された。

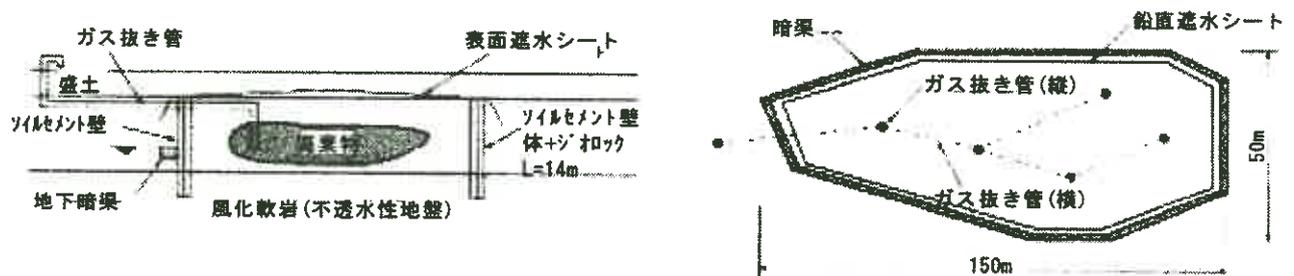


図-12 施工平面・断面図

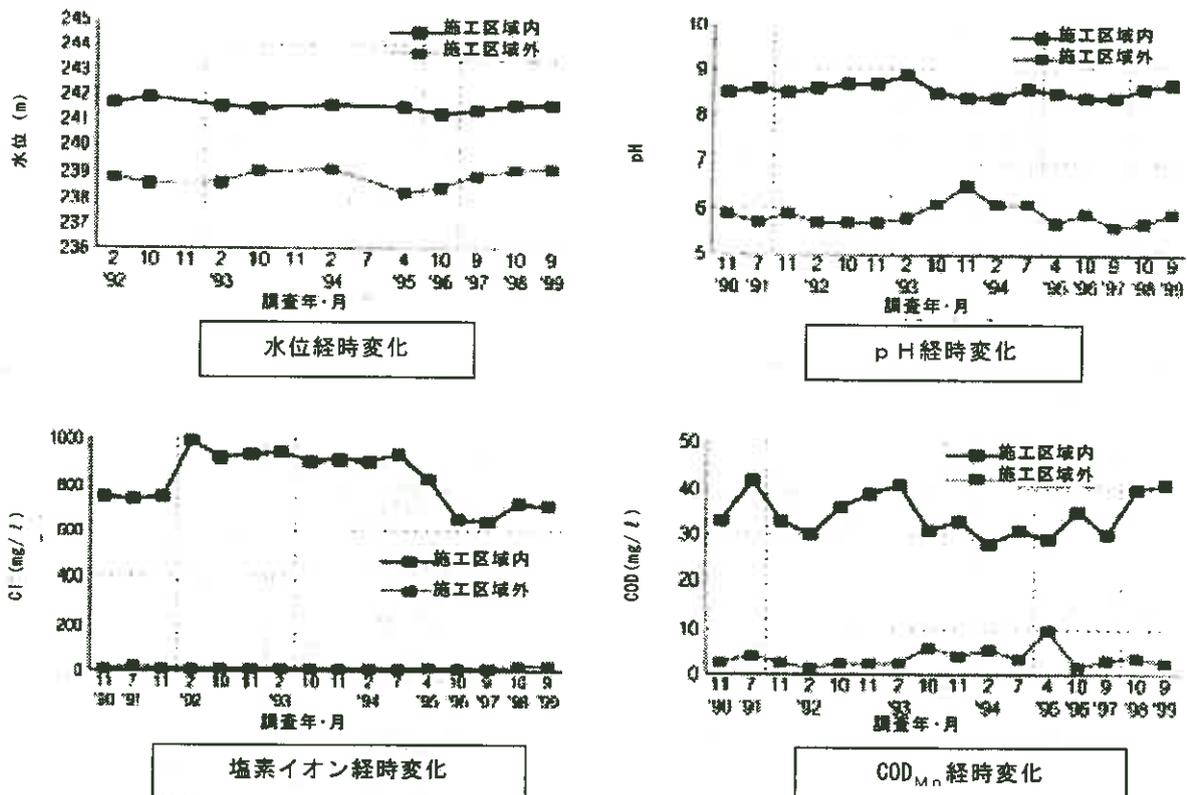


図-13 モニタリング結果

## 6. おわりに

一般廃棄物処分場および汚染土壌から汚染物質の拡散を防止する工法としてトリナー工法を紹介した。

当工法は透水試験、長期モニタリング結果からも有効な遮水性能が確認されている事などから、今後増加すると思われる処分場の適正化・汚染土壌の封じ込めに対して十分な効果を発揮するものと考えられる。

### 【参考文献】

- 1) 桑原正彦，原田健二，上田滋夫，今林 修：鉛直シート材料の遮水性確認試験，第 11 回廃棄物学会研究発表会，2000
- 2) 出口敏博，今林 修，花嶋正孝，柳瀬龍二：鉛直しゃ水工による廃棄物埋立地の地下水汚染対策後の水質モニタリング，第 6 回廃棄物学会研究発表会，1995