平成２３年度
環境研究総合推進費補助金　研究事業
総合研究報告書

不法投棄によるＶＯＣ汚染サイトの環境修復技術・評価に関する研究

Ｋ２２０１５，Ｋ２３５３

平成２４年３月

三重県保健環境研究所　巽　正志

補助事業名　　環境研究総合推進費補助金研究事業（平成２２年度～平成２３年度）

所　　管　　環境省

国庫補助金　　３０,９７６,０００円

研 究 課 題 名　　不法投棄による VOC 汚染サイトの環境修復技術・評価に関する研究

研 究 期 間　　平成 22 年 4 月 1 日　～　平成 24 年 3 月 31 日

代表研究者名　　巽　　正 志（三重県保健環境研究所）
共同研究者名　　岩 出 義 人（三重県保健環境研究所）
古 市　　徹（北海道大学）
小 幡 博 志（日本国土開発株式会社）
片 山 辰 雄（株式会社環境総合テクノス）

研究協力者名（プロジェクト会議参加者）

山 口 哲 夫（三重県保健環境研究所）
宇佐美敦子（三重県保健環境研究所）
西 田 憲 一（三重県環境森林部）
窪 田 哲 也（三重県環境森林部）
石 井 一 英（北海道大学）
赤 神 元 英（日本国土開発株式会社）
杉 山 勝 彦（株式会社環境総合テクノス）
青 木 健 二（株式会社環境総合テクノス）

平成 23 年度

環境研究総合推進費補助金　研究事業

総合研究報告書

不法投棄による VOC 汚染サイトの環境修復技術・評価に関する研究
（K22015，K2353）

目　　次

【第Ⅰ編　研究概要】

1.1 **研究名称** …… 1
1.2 **研究の背景** …… 1
1.3 **研究の目的** …… 6

【第Ⅱ編　不法投棄による VOC 汚染サイトでの廃棄物を残置した場合の修復システムの提案】

2.1 **廃棄物の不法投棄等の現状** …… 8
2.2 **廃棄物を残置する場合の調査・修復上の課題** …… 10
2.3 **廃棄物を残置した場合の修復システムの提案** …… 13
2.4 **開発すべき各要素技術の開発レベルの考え方** …… 14

【第Ⅲ編　研究目的、研究方法、結果、考察及び結論】

3.1　調査法の開発
3.1.1 **研究目的** …… 15
3.1.2 **研究方法** …… 15
3.1.3 **研究結果及び考察** …… 26
3.1.4 **調査法研究の結論** …… 66

3.2　浄化法の開発
3.2.1 **研究目的** …… 67
3.2.2 **研究方法** …… 70
3.2.3 **研究結果及び考察** …… 82
3.2.4 **浄化法研究の結論** …… 119

3.3　微生物評価法の確立
3.3.1　**研究目的** …… 120
3.3.2　**研究方法** …… 124
3.3.3　**研究結果及び考察** …… 134
3.3.4　**評価法研究の結論** …… 175

【第Ⅳ編　研究総括】
4.1　**研究内容** …… 177
4.2　**技術開発の成果** …… 177
4.3　**本研究の成果** …… 180

【第Ⅰ編　研究概要】

1.1　研究名称

不法投棄による VOC 汚染サイトの環境修復技術・評価に関する研究

研究期間：平成 22 年 4 月 1 日～平成 24 年 3 月 31 日

1.2　研究の背景

国内の不法投棄の環境修復現場で、特定産業廃棄物に起因する支障の除去等に関する特別措置法（産廃特措法）による支援を受けて修復対策が実施されている大規模事案のうち、廃棄物の全量が撤去されている事案は、香川県豊島事案、青森・岩手県境事案の 2 事案のみである。その他の事案では、修復コストや受入先となる処理施設の確保が困難である等の理由から、廃棄物を残置したまま修復対策を実施する原位置修復が採用されている。特に、汚染地下水の対策には、鉛直遮水壁による囲い込みと水処理施設による汚染地下水浄化による修復対策が実施されている。今後、原位置修復における汚染地下水対策では、汚染拡散防止対策を中心とした修復システムが適用される事案が多いと見込まれるが、現在実施されている事案においても未だ修復が完了した事例が少ないことから、環境修復技術及びその評価に関する修復システムの構築が必要となっている。

本研究で対象とした不法投棄現場（三重県桑名市五反田多々星）は、近隣で実施された農業集落排水処理施設の建設工事において、掘削した法面よりタール状の油分が浸出したことにより不法投棄が発覚した。調査の結果、当該現場には、平成 7 年～平成 8 年頃に産業廃棄物処理業者により自社処分場と称した素掘りの窪地約 2,900m^2 に、燃えがら、汚泥、廃油等の廃棄物約 27,000m^3 が投棄されていた。

その後、原因者による調査（平成 11 年 3 月：ボーリング調査 6 本）や(財)廃棄物研究財団による調査(平成 10 年 10 月～平成 13 年 3 月：平成 10 年度：ボーリング調査 8 本、平成 11 年度：ボーリング調査 5 本、平成 12 年度：ボーリング調査 8 本)、また、県による調査（ボーリング調査 6 本）の結果、主にトリクロロエチレン、ジクロロメタンなどの揮発性有機化合物(VOC)が、表 1.1 に示すとおり埋め立て判定基準、及び地下水の環境基準を大幅に超えて検出した。

原因者による是正措置が講じられないことから、三重県が行政代執行による環境修復を行うこととされ、技術検討委員会等により対策工法の審議により、廃棄物の全量撤去は困難であり、原位置環境修復が適当であるとの結論に至った。そして、環境修復目標として、①遮水壁による VOC 汚染地下水の拡散防止、②遮水壁内の地下水の環境基準の 10 倍レベルまでの浄化、③遮水壁外の地下水の環境基準レベルまでの浄化、について概ね 5 年間で達成することとした。(図 1.1、図 1.2)

表 1.1　調査結果（単位：mg/L）

項　目	不法投棄廃棄物（溶出試験）		不法投棄地内地下水		不法投棄地周辺地下水		地下水環境基準 (判定基準*)
	最高値	判定基準比	最高値	環境基準比	最高値	環境基準比	
ﾄﾘｸﾛﾛｴﾁﾚﾝ	2.5	8.3	1.3	44	—	—	0.03 以下 (0.3 以下)
ﾃﾄﾗｸﾛﾛｴﾁﾚﾝ	2.2	22	1.7	170	—	—	0.01 以下 (0.1 以下)
ｼﾞｸﾛﾛﾒﾀﾝ	8.2	41	54	2700	2.0	100	0.02 以下 (0.2 以下)
1,2-ｼﾞｸﾛﾛｴﾀﾝ	4.5	110	6.7	1700	0.009	2.3	0.004 以下 (0.04 以下)
1,3-ｼﾞｸﾛﾛﾌﾟﾛﾍﾟﾝ	0.31	16	—	—	—	—	0.002 以下 (0.02 以下)
ﾍﾞﾝｾﾞﾝ	1.0	10	1.2	120	0.25	25	0.01 以下 (0.1 以下)

＊　管理型処分場で埋立処分できる基準（金属等を含む産業廃棄物に係る判定基準を定める省令；S48.2.17 総理府令第 5 号）

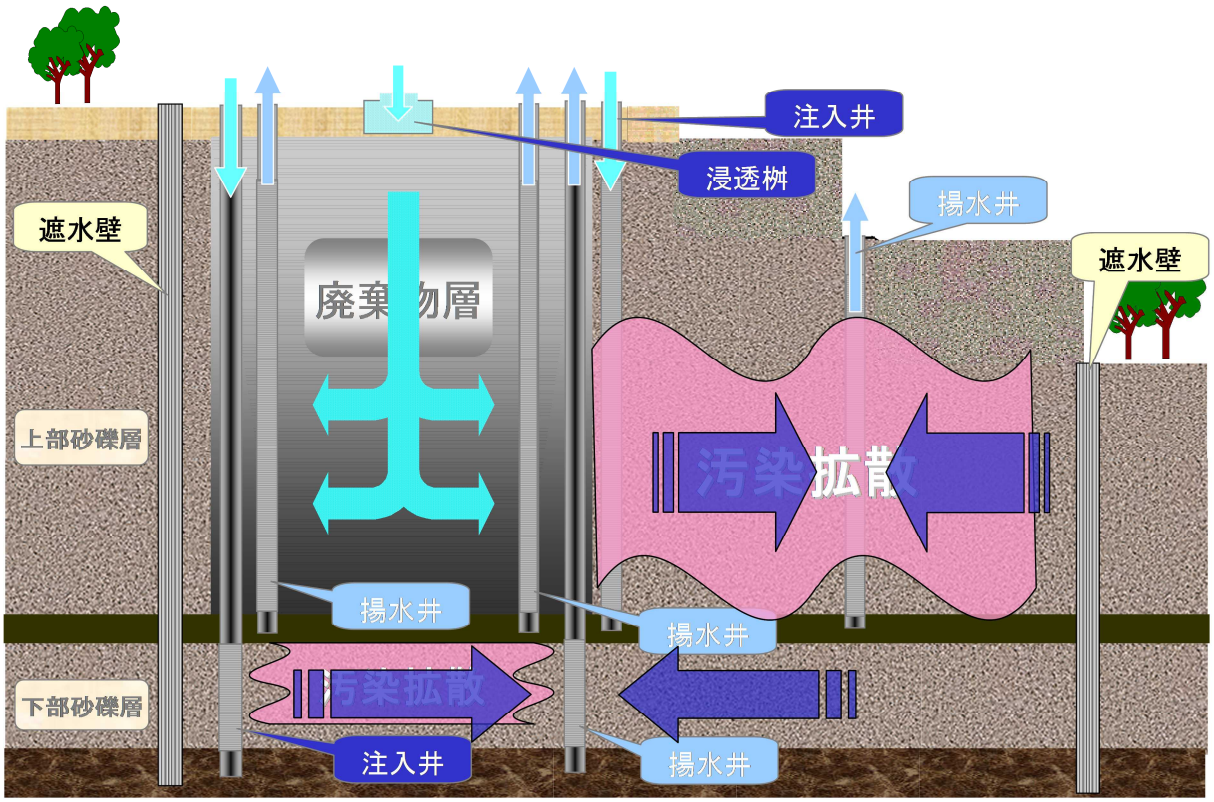


図 1.1　環境修復工法（揚水循環浄化法）の概要

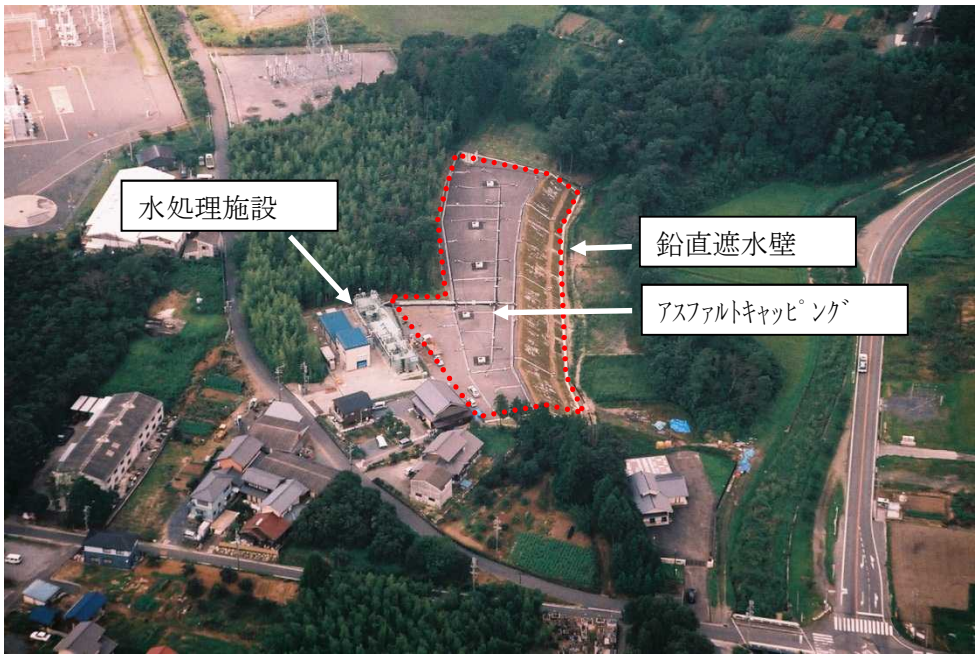


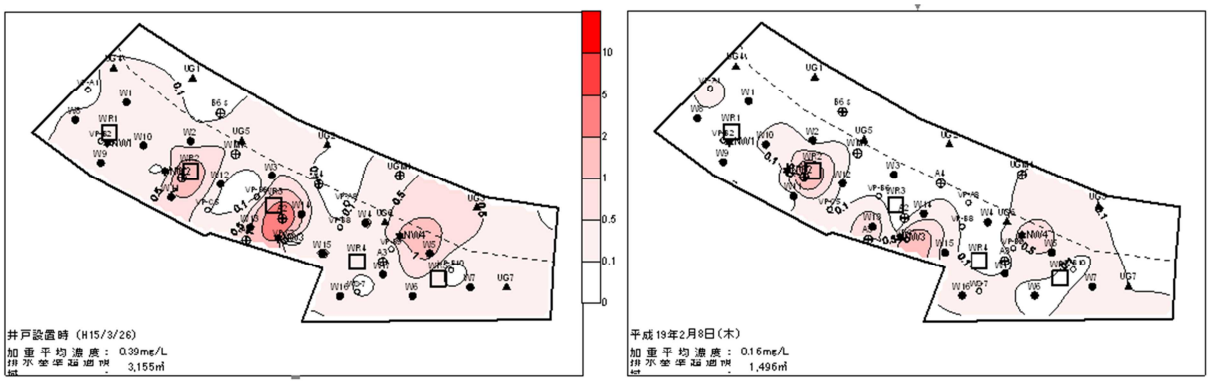
図 1.2　不法投棄現場の状況

平成 13 年度から汚染地下水の拡散防止のために鉛直遮水壁を設置し、遮水壁内外の汚染地下水の浄化のために水処理施設を整備し、平成 15 年度から平成 19 年度の 5 カ年を計画期間とする汚染地下水浄化対策を実施した。遮水壁内の地下水浄化は経時的に進行したが、遮水壁内の地下水は部分的に汚染が残留する箇所が存在した。部分的な汚染残留により目標達成が困難となることが予測されたことから、平成 19 年度に浄化促進追加対策工事として、汚染残留箇所からの揚水量を増加させるため、大口径揚水井戸 φ4, 000mm を 3 箇所設置する局所的な掘削工事を実施した。大口径揚水井戸の効果により、不法投棄地内の地下水は平成 19 年度末に平均的に目標レベルとなり、当初の目標を達成したところである。

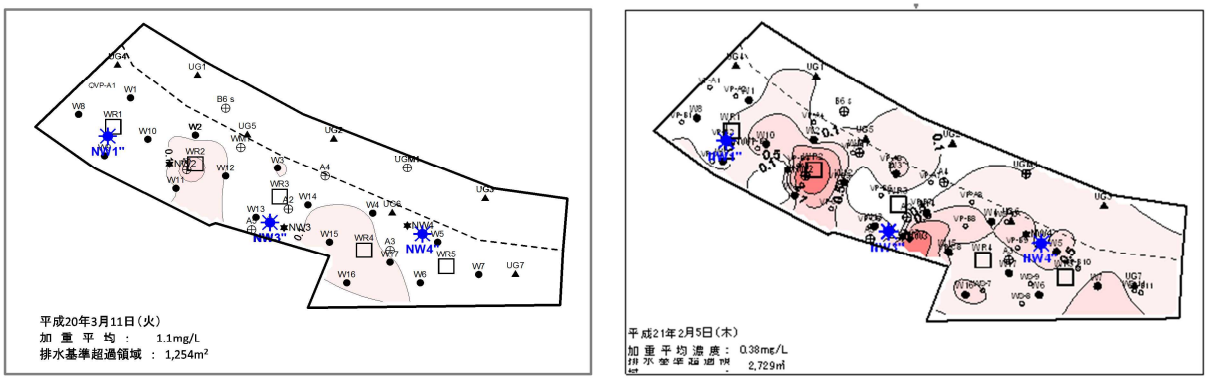
その後、平成 20 年 4 月に遮水壁内の地下水の揚水を停止し、遮水壁内外の地下水モニタリングを行ったところ、ベンゼン濃度の上昇が確認され、その濃度は平成 21 年 2 月時点で目標レベルの 3.8 倍となり、浄化開始当時（平成 15 年 3 月）のレベルまで上昇していることが明らかとなった（図 1.3、図 1.4）。

さらに、要監視項目であるトルエン、キシレンや有機性汚濁指標の BOD についても、揚水停止に伴い、ベンゼンと同様に濃度の上昇が認められた。

これらのことから、これまでの対策により地下水の浄化は進んだものの、残置した廃棄物には浄化されていない有害物質等が残存し、地下水を再汚染することが示唆された。

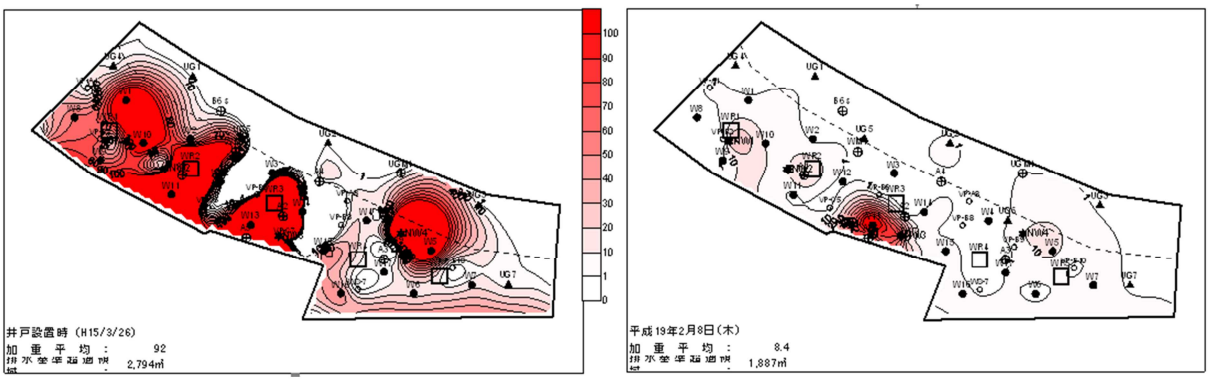


(1)平成15年3月（井戸設置時）　(2)平成19年2月（追加井戸設置後）

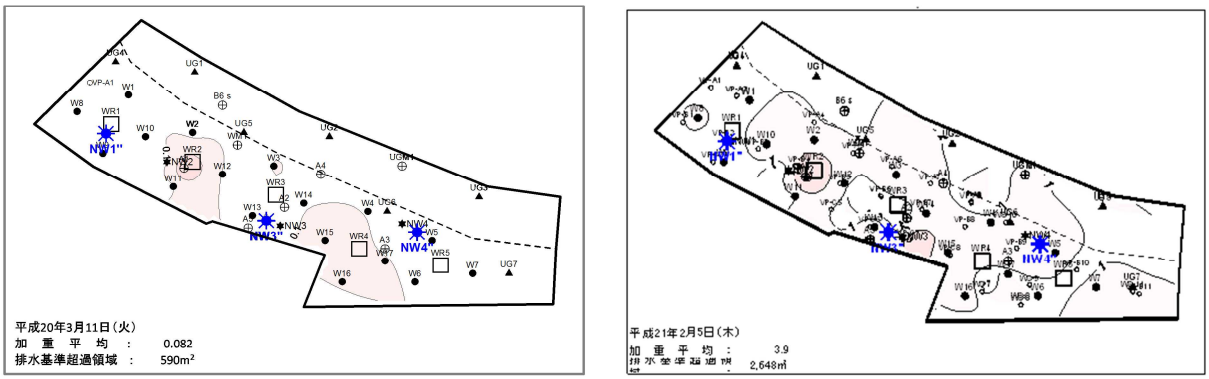


(3)平成20年3月（計画期間終了時）　(4)平成21年2月（現時点）

図 1.3　総 VOC 濃度当量コンターの経時変化



(1)平成15年3月（井戸設置時）　(2)平成19年2月（追加井戸設置後）



(3)平成20年3月（計画期間終了時）　(4)平成21年2月

図 1.4　ベンゼン濃度コンターの経時変化

このため、平成 21 年度に遮水壁内のベンゼンの再溶出が顕著なエリアを対象に、追加対策を実施した。平成 19 年度に実施した大口径揚水井戸の設置は、汚染地下水の集水による浄化効果に加え、井戸設置のため局所的に汚染の残留した廃棄物を除去した効果があったことから、再汚染箇所に新たな大口径揚水井戸（φ7,500mm）を設置した。

さらなる追加対策の実施により、再溶出による遮水壁内地下水のベンゼン濃度は低減したが、掘削した除去廃棄物には高濃度の VOC が残存していることが判明した。こうした汚染の残留は、掘削した区域以外にも存在していると考えら、その存在位置が確実に把握できていないことから、今後、新たな箇所からのベンゼン等の再溶出の可能性は否定できない。

したがって、将来にわたり地下水の再汚染がない状態とするために、以下の技術的課題を解決する必要があると考えられる。

①平成 19 年度及び平成 21 年度に局所的に掘削した廃棄物は、高濃度 VOC を含んでおり、揚水循環浄化により不法投棄された廃棄物は部分的に浄化されているだけで、透水性の低い区域は汚染が残留していると考えられる。地下水の再汚染を未然防止するためには、汚染源となる高濃度 VOC 汚染箇所を特定し除去しなければならない。そのため、汚染箇所を特定するための調査が必要であるが、ボーリングで現場を密に調査することは、コアリングや試料のサンプリング及び分析に係る経費が高く、検体数が多いと即時性がないことが課題となる。そこで、簡易迅速で安価な VOC 等の調査技術を開発する必要が生じている。

②高濃度の VOC で汚染された廃棄物や汚染土壌は、今後、地下水の再汚染の原因となる可能性があり、掘削等による除去が必要である。掘削した場合、有害な産業廃棄物等として処理する必要があるが、オフサイト処理する場合、処理費用が高額であることに加え、運搬・処分に伴う汚染拡散リスクも高い。そのため、オンサイト処理によって VOC 濃度レベルを低減できれば、処理費用及び汚染拡散リスクの低減が期待される。これまでに開発されているオンサイト工法に、石灰混合攪拌工法（ホットソイル工法）やフェントン法、過硫酸塩等の酸化剤添加による分解法が開発されているが、それらは、pH の変化による金属の溶出や腐植質等有機物の混在による分解阻害の課題がある。当該現場での適用は困難であることが判明しており、オンサイトでの有効な VOC 低減化工法を開発する必要がある。

③当該汚染現場では、修復完了と判断されるまでの間、周辺環境も含めた地下水の揚水等の対策が必要となっているが、地下水浄化が環境基準レベルなど低濃度にまで進んだ段階では、揚水浄化等は費用対効果の面で有効な対策とは言えない。したがって、効果の低い対策を長期間実施するよりも、自然減衰現象を浄化手法に取り入れた浄化手法である科学的自然減衰（Monitored Natural Attenuation; MNA）が有効と考えられる。しかし、MNA の導入には自然減衰を科学的に証明しなければならない。VOC 汚染地下水に対する MNA の効果には、微生物による VOC の分解が重要な要素となることから、当該現場の地下水に VOC 分解能を有する微生物が存在しているか否かを明らかにする必要がある。

また、地下水及び土壌中の微生物は、VOC を資化等利用するものや、逆に生育の阻害となるものが存在している。環境中に放出された VOC 等の有害物質の影響は、微生物叢を把握す

ることで汚染修復の状況等を把握することができると考えられ、これまで物理・化学的な現象を観測することで環境修復の状況を捉えていたが、新たな補完的指標として微生物叢及びその変移を把握することで、環境修復の程度を捉えられる可能性があり、そのための知見が必要となっている。

本不法投棄現場を効率的、かつ合理的に修復するために、上記の①～③の技術的課題の解決等が必要不可欠である。

1.3 研究の目的

本研究では、今後、廃棄物の全量撤去だけではない修復システムを構築する必要性があることから、廃棄物を残置した場合の環境修復技術及びその評価に関する修復システムの提案を行うものである。その際、当該現場の環境修復を行う過程で必要と考えられる下記の要素技術について開発を行う。なお、本研究で提案する修復システムは、当該現場だけではなく、同様の廃棄物を残置し、水処理等の継続により長期的な管理が求められる汚染現場への適用が可能なシステムとして提案するものである。

なお、平成 23 年度は、平成 22 年度の研究成果を踏まえ、研究をさらに進め成果を得ることとした。

(1) 簡易迅速かつ安価な VOC 残存量調査技術の開発（以下、調査法開発）

廃棄物不法投棄現場は、廃棄物が無秩序に埋め立て処分されているため、廃棄物の種類や含まれる有害物質濃度は不均一である。環境修復を実施するためには、汚染状況を詳細に把握する必要があるが、従来のボーリングによる試料採取・化学分析による調査では、経済性や、結果を得るまでの時間に課題があった。本研究では、既存技術である CPT（コーン貫入試験）手法を活用し、オンサイトで不法投棄現場の地中の廃棄物及び土壌層中の VOC を簡易、迅速で安価に測定する手法を開発することを目的とする。

(2) 安全で確実な浄化方法の開発（以下、浄化法開発）

VOC 汚染土壌浄化工法については、石灰混合攪拌工法（ホットソイル工法）やフェントン法、過硫酸塩等の酸化剤添加による分解法が既存技術として開発されている。しかし、これら技術を当該不法投棄現場に適用した場合、pH の変化による金属の溶出や腐植質等有機物の混在による分解阻害が発生し、目的とした土壌等の浄化が達成できなかった。本研究では、当該現場での土壌等特性を踏まえた浄化技術として、簡易で安価な浄化技術として熱風送風機能等を付加した回転式混合破砕機（ツイスター）と加温回転ドラムを用いたオンサイト浄化システムの構築を目的とする。

(3) 微生物による不法投棄地の安定化評価法の確立（以下、微生物評価法確立）

当該不法投棄現場は、汚染地下水の浄化に関し原位置環境修復技術を適用した国内最初のサイトであるが、目標とした環境基準レベルまでの地下水浄化は達成したものの、一部の井戸では、環境基準を超過する値も検出されている。こうした揚水対策によって、残留する汚染が低濃度となった場合、揚水による浄化を継続することは、費用対効果の面から合理的でなく、自然減衰による効果を活用した MNA を浄化手法とすることが適当と考えられる。そこで、MNA の適用の重要な要素として、当該現場地下水中の VOC 分解微生物の生息の有無を確認し、MNA の現場適用性について研究を行った。

また、地下水中に拡散した VOC 等有害物質は、微生物の生育環境に影響を与えていると考えられる。これまで、不法投棄地に環境修復は、物理・化学的現象を観測し、修復の程度、安定化の状況を把握してきたが、これを補完する指標として、新たに微生物叢を指標とした評価を行うことで、より多面的に現場状況の把握ができ、総合的な環境修復や安定化の程度を評価できると考えられる。したがって、VOC 等有害物質による不法投棄現場を補完的に評価する手法の１つとして、微生物叢の安定化評価指標としての確立を研究目的とする。

【第Ⅱ編　不法投棄によるVOC汚染サイトでの廃棄物を残置した場合の修復システムの提案】

2.1　廃棄物の不法投棄等の現状

環境省の報告[1)]によれば、平成10年度の1197件をピークとして不法投棄件数と不法投棄量は年々減少傾向にあり、平成22年度は216件、6.2万tであった。また5,000t以上の大規模事案も平成13年度～平成17年度は毎年5～7件だったものが、平成18年度～平成22年度では毎年2～4件と少なくなってきている。

しかしながら、不適正処理や不適正処理の案件も含めた残存件数と残存量に注目すると、平成22年度末時点では、残存件数2610件、残存量17,816,521tとなっており、その内、5,000t以上の大規模事案は347件であり廃棄物量として92.3%を占めている。また、2610件の内、現に支障が生じている事案は18件（廃棄物量で22.9%）であり何らかの支障除去措置が行われている。また、現に支障のおそれがある事案は142件（廃棄物量で31.2%）存在し、その内、支障のおそれの防止措置（一部着手を含む）を行っているのは25件、周辺環境モニタリングは27件、定期的な立入検査を行っているのは90件ある。また、現在支障等の調査を行っている案件が51件も存在する。すなわち、毎年新たに発見される不法投棄等の案件は少なくなっているが、残存事案については、今後も支障の除去措置、あるいは支障のおそれの防止措置を継続的に行っていく必要があることが伺える。

また、産廃特措法に基づく特定支障除去等事業については、10年の延長が閣議決定された[2)]。表1に示すように、岐阜市と福岡県宮若市の2事案を除いては、事業が継続される。また今後環境大臣の同意への申請見込みのある事案も4つ存在する（表2)。香川県豊島と青森県田子町、岩手県二戸市の3つの事案では廃棄物が全量撤去されるのに対して、他の事案は修復コストが膨大となることから、基本的に廃棄物を残置し、汚染拡散防止対策を図りながら、廃棄物の浄化や安定化を行うこととしている。すなわち、今後は、廃棄物を残置しながら、生活環境等の支障の除去、あるいは支障の恐れの防止措置を行っていく修復対策が主流であると考えられる。

表１　産廃特措法により支障除去等を実施中の事案[2)]

都道府県等名	場所の形態	投棄等量※1
香川県豊島	中間処理施設	約 56 万 m^3（汚染土壌等を含む）
青森県田子町 岩手県二戸市※2	中間処理施設 （岩手県側には施設なし）	約 91.8 万 m^3
秋田県能代市	中間処理施設、管理型最終処分場、安定型最終処分場	約 101 万トン
福井県敦賀市	管理型最終処分場	約 119 万 m^3 （内産廃約 84 万トン、一廃約 35 万トン）
宮城県村田町	中間処理施設、安定型最終処分場	約 103 万 m^3
横浜市	管理型最終処分場	約 91 万 m^3
岐阜市※3	中間処理施設	約 75.3 万 m^3
福岡県宮若市※3	中間処理施設	約 3.3 千 m^3
三重県桑名市（五反田）	山林（自社安定型処分場と称す）	約 2.7 万 m^3

※１：投棄等量は、都道府県から当初提出された実施計画に基づくもの

※２：青森県、岩手県事案については各県ごとに１事案とする。

※３：岐阜市、福岡県宮若市の事案については平成 24 年度中に事業完了見込

表２　今後、環境大臣の同意への申請見込のある事案[2)]

三重県四日市市（内山）
三重県四日市市（大矢知・平津）
三重県桑名市（源十郎新田）
滋賀県栗東市

2.2　廃棄物を残置する場合の調査・修復上の課題

前節で述べたように、今後、不法投棄等の事案を適正に修復するためには、廃棄物の全量撤去以外の修復対策を考えていかなければならない。ここで、廃棄物の全量撤去以外の修復対策とは、図 1 に示すような、リスク調査、解析・評価に基づいた鉛直遮水壁、表面キャッピング、汚水処理施設による汚染拡散防止対策、高濃度廃棄物の部分撤去、低濃度廃棄物の原位置浄化（廃棄物洗浄、バイオレメディエーションなど）、そしてモニタリング（情報公開）である。

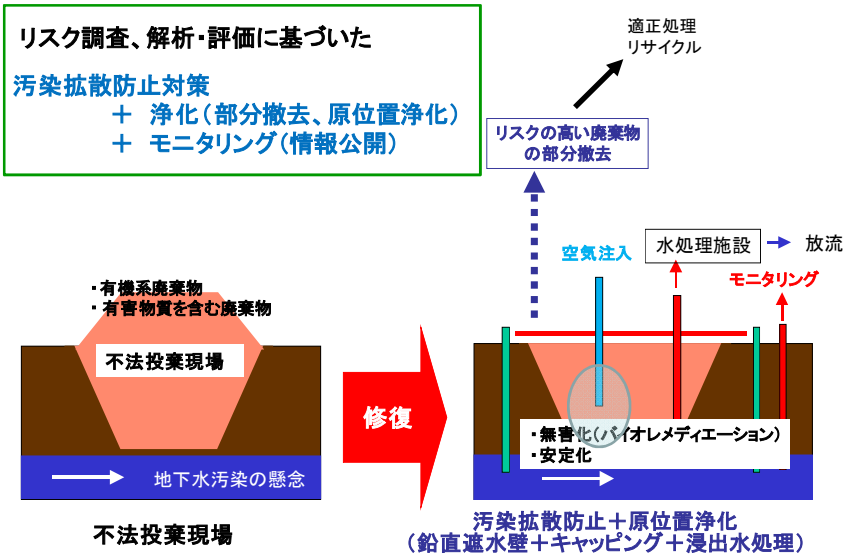


図 1　廃棄物を残置した場合の修復対策の例

このような修復対策を想定した場合、調査・解析、対策実施、モニタリングの各段階で下記のような課題が存在する。

(1)　調査・解析段階

1)　地形・地質構造と廃棄物層の範囲

汚染拡散防止対策を目的とした遮水壁ラインや根入れ深さを決定する上で、廃棄物層の 3 次元的範囲及び当該現場の地形・地質構造を正確に把握することが必要である。ボーリング調査のみでは不十分な場合が多く、低コストで迅速な手法が求められている。

(2)　高濃度汚染領域の把握

次に、廃棄物層内に存在する VOC、重金属等の汚染物質の種類や濃度レベルを迅速に把握する必要がある。一般的な土壌汚染とは異なり、廃棄物由来の汚染の場合は、VOC と重金属、油類などの複数の汚染物質による混合汚染である場合が多い。また、それら汚染物質を含んだ廃棄物が不均質に埋設されていることを考慮する必要がある。従って、高濃度汚染

分布を見つけることが容易ではないケースも存在する。相対的な分布でもかまわないので、汚染物質の種類と濃度分布を迅速に把握することができれば、次の段階の調査・解析、あるいは部分撤去すべき廃棄物の特定につながることが期待される。

3) 周辺環境への影響

廃棄物の不法投棄は、投棄直後に発見されるケースは極めて希であり、数年経過した後発見される場合が多い。従って、不法投棄が発見された頃には、既に周辺環境に汚染物質が、表流水や地下水を通じて拡散してしまっている場合も少なくない。一般に、周辺環境への影響は、ボーリング孔を用いた地下水のサンプリングと分析により、環境基準項目にある汚染物質の特定や濃度レベルが求められ、周辺環境への影響が評価される。しかしながら、周辺住民感情を考えると、環境基準項目以外の化学物質の摂取による健康影響も重要である。周辺住民の安全・安心を確保し、また発見された不法投棄現場の修復をリスクコミュニケーションに基づいて円滑に推進することを考えれば、住民の不安に答えていく姿勢が重要となる。

4) 周辺環境の自浄能力の評価

一般に汚染地下水の揚水処理、土壌ガス吸引法などの原位置浄化技術は、技術適用直後の浄化効率は高いが、浄化が進み濃度レベルが低減すると、浄化効率も悪くなる。そのため、酸化剤を加えたり、バイオレメディエーションの適用を考えるなど、浄化促進のための対策を講ずることとなる。特にバイオレメディエーションの場合、現場に元来存在するどの微生物が分解に貢献するか、どのように活性化させるかといった評価が重要となる。

そしてさらに、当初より十分に汚染濃度は低下したが、未だ環境基準よりも高いレベルにある場合も想定される。濃度レベルにもよるが、モニタリングをしながら、希釈や微生物分解、揮発等により、科学的に濃度減衰の傾向が確認されたならば、MNA（Monitored Natural Attenuation）に移行することも可能である。この場合も、濃度減衰の機構を科学的に証明することが重要となり、特に微生物分解に期待する場合には、微生物分解機構を明確にしておく必要がある。

(2) 対策段階

1) 高濃度部分の撤去・処理

高濃度に汚染された廃棄物の撤去処理は、基本的に廃棄物が特別管理廃棄物に相当するレベルで汚染されている場合が多いため、運搬・処理に多大なコストが必要となる。また、運搬時のリスクも存在する。よって、オンサイトで高濃度廃棄物の前処理が効果的になる。その前処理方法は、汚染物質にもよるが、先に述べたように廃棄物の不法投棄は、VOC、重金属、油類の複合汚染の場合が多く、それらに対応した技術が必要となる。例えば、VOCの揮発を促進するために生石灰混合が良く用いられるが、油分が多いと十分に揮発効果が得られない場合や、生石灰投入による pH がアルカリ域になると鉛などの重金属の溶出が懸

念される場合もある。このような複合汚染に対処できる技術が必要となる。

2) 周辺環境の原位置浄化

廃棄物が存在しない領域の土壌・地下水汚染の浄化対策としては、揚水処理が一般的であるが、前節で述べたように、時間が経過すると浄化効率は悪くなるため、バイオレメディエーション等の技術やMNAの適用を検討する必要性が生じてくる。この際、微生物分解機構に基づく浄化設計が可能であれば、より効率的な原位置浄化が可能である。また、特にバイオレメディエーションを適用した際には、一時的に地下水層内の微生物菌叢が浄化前の状態とは異なり、浄化時特有の菌叢を呈する。そして浄化が終了すると、徐々に汚染前の状態に戻ると考えられている。このような、汚染－浄化－浄化終了の各ステップで菌叢をモニタリングし、その変化の状況の説明可能になれば、住民とのリスクコミュニケーション上、有益なものになる。

(3) モニタリング

残置された廃棄物中の汚染物質濃度の減衰のモニタリングの必要性について述べる。一般に、鉛直遮水壁やキャッピングで汚染拡散防止対策が施された場合、その内側の廃棄物層は、管理型最終処分場に埋設可能な廃棄物と同等のレベルにまで汚染物質が浄化されるべきであり、これで長期的な汚染拡散防止対策が可能となる。よって、残置された廃棄物であっても、洗い出しや微生物分解等による浄化を促進することがポイントとなる。
また、その進行管理として、1年に一度程度のモニタリングで残置された廃棄物中に存在する汚染物質濃度の相対分布の経時変化を把握することができれば、周辺住民にとっても残地された廃棄物に対する不安の減少に貢献するものと考える。また、浄化速度が遅い部分に対しては、何らかの促進対策、或いは追加的な部分撤去を行うことも検討できる。

また前述したように、周辺環境においては、環境基準項目以外の化学物質影響も重要である。これまでの理化学的な地下水環境基準項目の測定に加え、地下水細菌叢調査により、微生物という視点から未規制物質も含めた有害物質レベルに関する情報を総合的に評価できる可能性もある。

2.3　廃棄物を残置した場合の修復システムの提案

図 2 に、前節で述べた課題解決につながる廃棄物を残置した場合の修復システムの提案を行う。図 2 には、調査・解析、対策、進行管理といった修復事業の流れと、前節で述べた各段階における課題を記載し、本研究で開発すべき技術を解決技術として記載した。

すなわち、第 1 編 1.3 節で述べられたように、
①簡易迅速かつ安価な VOC 残存量調査技術の開発（MIP）
②VOC、重金属、油類の複合汚染廃棄物のオンサイト加熱処理法の開発
③微生物による不法投棄地の安定化評価法の確立

以上、3 つの要素技術を組み入れたシステムとして提案するものである。これら 3 つの要素技術の開発は、三重県桑名市五反田の不法投棄現場への適用を通して行うことにするが、本システムは、廃棄物が残置された（全量撤去ではない）不法投棄等現場の修復及びモニタリングに有効であり、国内に存在する多くの不法投棄等現場に有用であると考えられる。

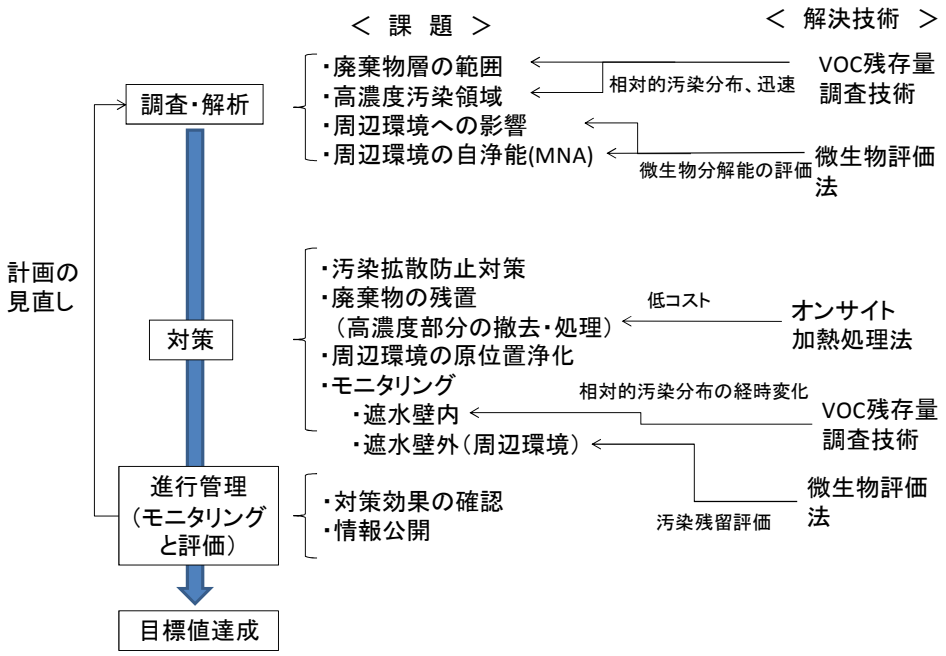


図 2　廃棄物を残置した場合の修復システムの提案

2.4　開発すべき各要素技術の開発レベルの考え方

1)　簡易迅速かつ安価な VOC 残存量調査技術の開発（MIP-CPT システム）

・ボーリング調査を補間する情報として、廃棄物層や周辺地質状況を相対的に的確に把握できる技術（調査箇所数の増加、掘削深度に対して連続値の取得が可能）
・公定法による分析よりも短時間で、VOC の種類と相対濃度レベルが把握できる技術（公定法による分析値と MIP-CPT システムによる分析値の対応可能性の把握）
・部分撤去や原位置浄化すべき高濃度廃棄物分布の特定が可能な技術
・周辺地下環境も含め、汚染サイトの修復効果（汚染レベルの低減効果）の経時変化を捕まえることができる技術

2)　VOC、重金属、油類の複合汚染廃棄物のオンサイト加熱処理法の開発

・オフサイト処理の前処理（汚染レベルの低減化、処理量の低減化）として位置づけられ、運搬費用も含め特別産業廃棄物として処理するよりも低コストである処理技術
・VOC、重金属、油類の複合汚染廃棄物中の、特に VOC を、短時間、省スペース空間で除去できる処理技術
・VOC 除去に際しては、油類による除去阻害、および重金属の溶出を最小限に抑えることができる処理技術

3)　微生物による不法投棄地の安定化評価法の確立

・MNA 適用の前提となる現場地下環境中での VOC 微生物分解の確認および微生物分解機構の解明（分解微生物の同定、分解に関連する遺伝子の検出）
・未規制物質も含めた総合的地下環境の安定化指標としての細菌叢調査の適用可能性

【参考文献】

1)　環境省報道発表資料：産業廃棄物の不法投棄等の状況（平成 22 年度）について, 2011
http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=14644
2)　環境省報道発表資料:特定産業廃棄物に起因する支障の除去等に関する特別措置法の一部を改正する法律案の閣議決定について、2012
http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=14823

【第Ⅲ編　研究目的、研究方法、結果、考察及び結論】

3.1　調査法の開発

3.1.1　研究目的

廃棄物不法投棄地からは、多種の VOC 成分が検出されることが多い。不法投棄された範囲や汚染の概要を効率的かつ安価に把握する手法として、コーン貫入試験機(CPT 機)を用いた MIP-CPT システムがある。このシステムは地盤状況（先端抵抗、周面摩擦、間隙水圧）と、VOC による汚染状況（VOC の総量）を同時に、掘削深度に対し連続して把握することができる。

これに対し、公定法では、ボーリングによる掘削、土壌等の採取、土壌溶出量の分析を実施しなければならず、かなりの時間と経費が必要となるが、汚染物質の種類と汚染量を正確に把握することができる。

本研究では、オンサイトで不法投棄現場の廃棄物及び土壌の VOC を簡易・迅速で安価に測定する手法を開発するために、携帯型キャピラリーカラムを装着したガスクロマトグラフ検出器を利用し、採取ガスを各成分に分離・定量可能な機能を備えた VOC の一斉分析が可能な MIP-CPT 機を開発することを目的とする。

3.1.2　研究方法

(1)　MIP-CPT とは

既存の MIP-CPT 調査技術は CPT３成分（先端抵抗、周面摩擦、間隙水圧）と VOC による汚染状況（VOC の総量）を同時にリアルタイムに把握することができる。ただし、VOC の各成分は不明である。MIP-CPT の概念図を図 3.1.1 に、既存の MIP-CPT システム概念図を図 3.1.2 に、MIP-CPT システム計測機器写真を図 3.1.3 に示す。コーン先端から約 50cm のところに、ヒータ部およびヒータで熱した周辺土壌の気化ガス吸入口（MIP メンブレン）が設置されている。

計測車に設置されたガス調整器から排出したキャリアーガス（窒素ガス）をコーン先端に圧送し、MIP メンブレンから吸引した土壌中の気化ガスとともに地上のガス測定器へ還送する。このガスをガス測定器（ガスクロマトグラフ）に送りガス分析を行うものである。ガスクロマトグラフには、FID（Flame Ionization Detector）、PID（Photo Ionization Detector）、DELCD（Dry Electrical Conductivity Detector）の３種類の検知器が搭載されており、それぞれ、表 3.1.1 に示すガスに対応して反応する。各検知器の反応により大まかな VOC 汚染物質の推定が可能である。

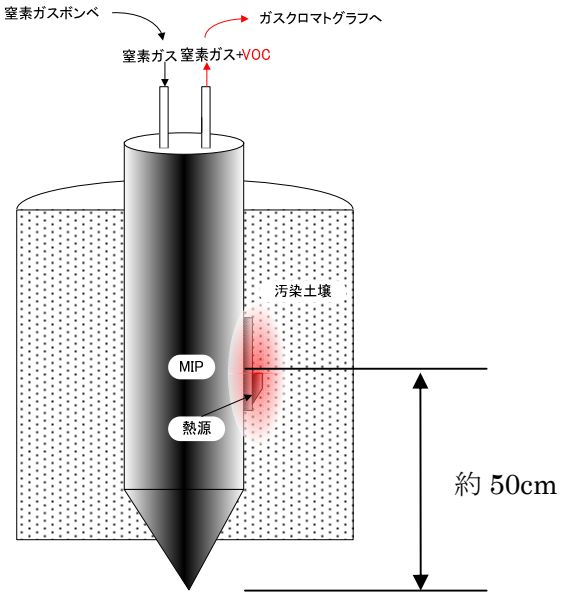


図 3.1.1　MIP-CPT 概念図

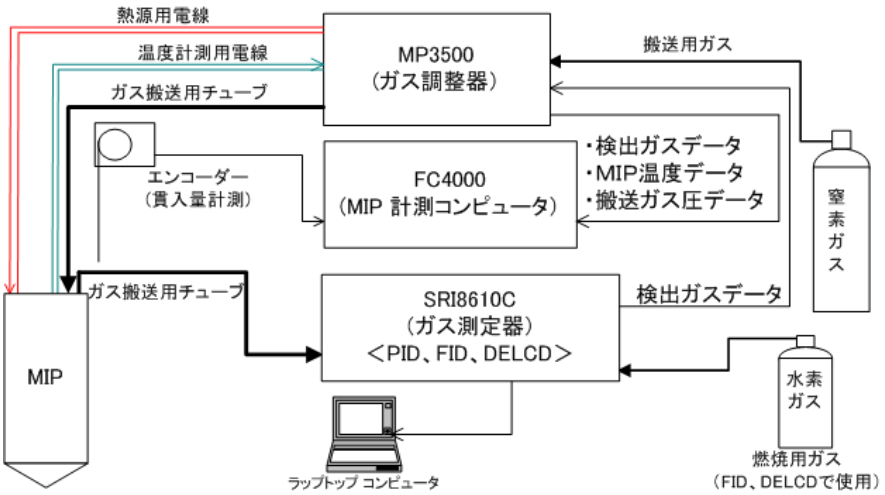


図 3.1.2　MIP-CPT システム概念図

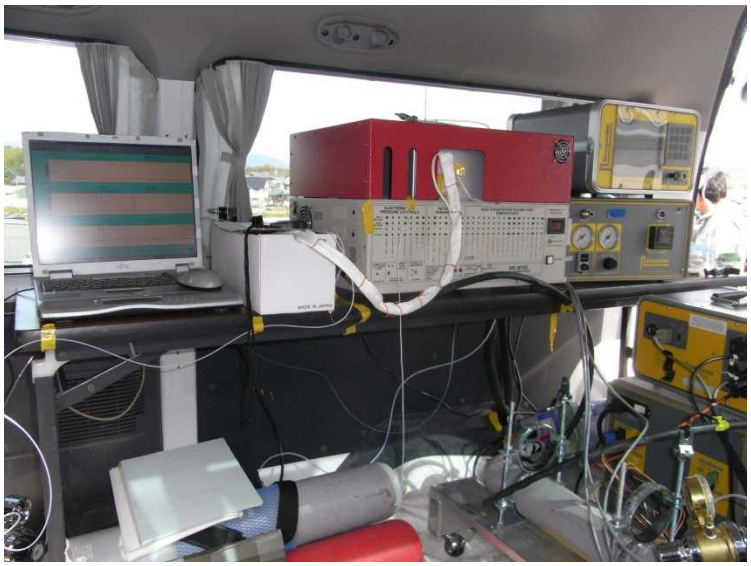


図 3.1.3　MIP-CPT システム計測機器写真

表.3.1.1　検知器と反応物質

感知器名称	FID	PID	DELCD
有機化合物(ﾒﾀﾝ、ﾌﾟﾛﾊﾟﾝ等、炭素が一重結合する物質)	○	－	－
芳香族等(ﾍﾞﾝｾﾞﾝ、ﾄﾙｴﾝ等、炭素が二重結合する物質)	○	◎	－
有機塩素化合物(TCE、PCE、四塩化炭素等)	○	△	◎

注）－：反応しない。△：物質により反応が異なる。○：反応が見られる。
◎：良く反応する。

本研究における MIP-CPT システムは、図 3.1.4 に示すｽｸﾘｭｰｱﾝｶｰ方式貫入機を使用し、次の手順で行う。

① 貫入前に、MIP で吸引したガスが地上の検知器まで還流する時間を計測する（ﾌﾗｯｼｭﾃｽﾄ）。
② MIP を油圧により一定の速度で静的に貫入させる。
③ 貫入と同時に既存 MIP システムによるガス分析をリアルタイムに行う。

図 3.1.4　ｽｸﾘｭｰｱﾝｶｰ方式貫入機

(2)　本研究の新 MIP-CPT システム

本研究は、既存の MIP-CPT システムにガスクロマトグラフを接続することにより、VOC 成分分析を必要深度においてリアルタイムに把握できるシステムを開発するものである。新 MIP-CPT システム計測機器写真を図 3.1.5 に、システム概念図を図 3.1.6 に示す。

新システムでは、従来のシステムにおいてガス計測器に還送されてきた採取ガスを、六方コックを用いて計量管に採取し、別に設置したガスクロマトグラフにより VOC の成分分析を行うものである。MIP-CPT による 3 センサーの出力を中断せずに成分分析ができるため、コーン貫入中の任意の深度での VOC ガス分析が可能である。ただし、成分分析に必要な時間（約 15 分間）は次の分析が実施できない。

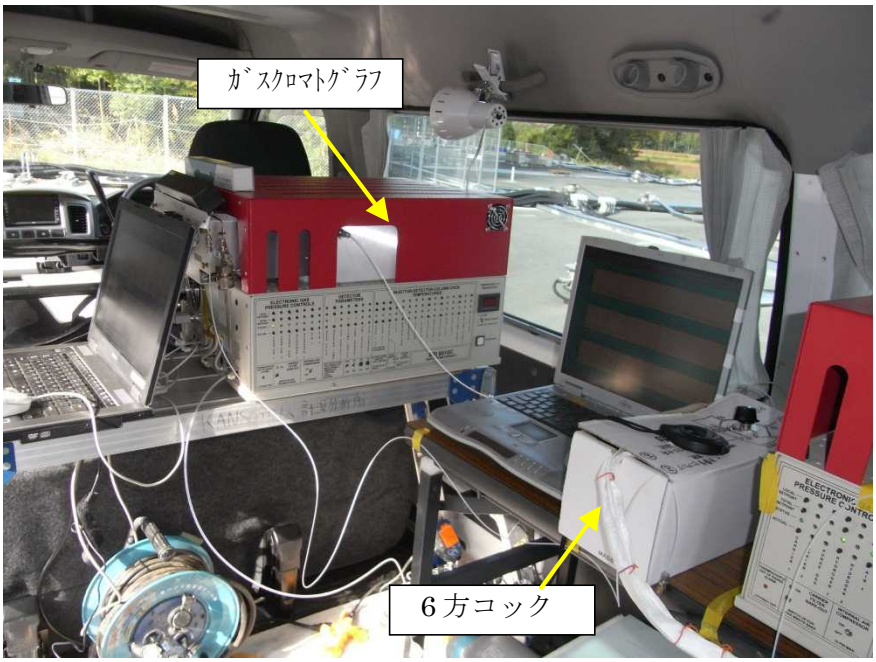
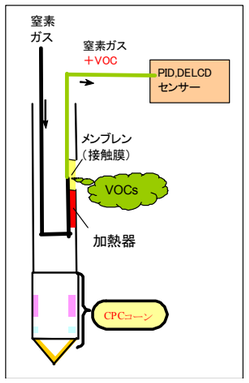
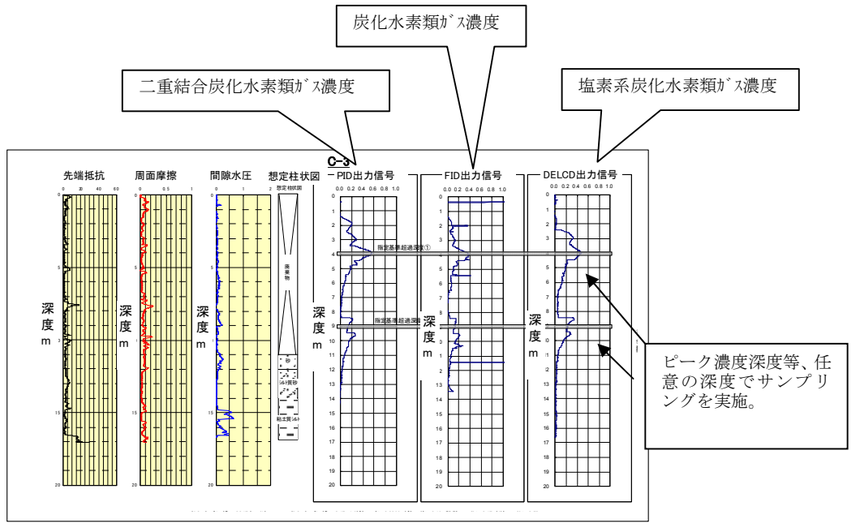


図 3.1.5　本提案 MIP-CPT システム計測機器写真

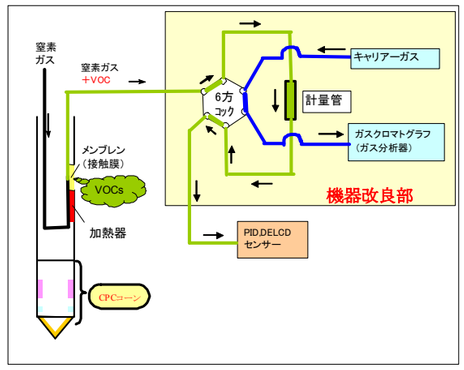


現状の MIP-CPT の概念図



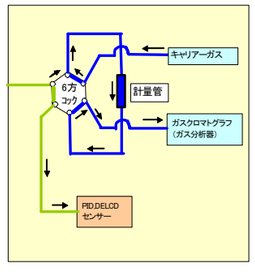
MIP-CPT 出力の深度プロファイ

分析機器の改良



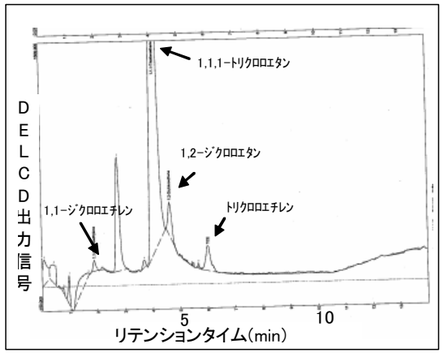
ガス成分分析が待機中のガスフロー

6 方ｺｯｸを切り替えることで分析を開始できる。



ガス成分分析時のガスフロー
（ｶﾞｽ成分の分析中も MIP-CPT 稼働できる）

ガスクロによる廃棄物中の VOC 分析結果



ガス成分分析結果
（例：DELCD ガスクロマトグラム）

図 3.1.6　本提案の MIP-CPT システム概念図

(3)　平成 22 年度の研究

三重県桑名市大字五反田の不法投棄現場において CPT コーン貫入を行った。貫入深度は廃棄物層の下の難透水層までを想定した（GL-12～15m 程度）。試験場所を図 3.1.7 に、貫入地点を図 3.1.8 に示す。三重県が実施した公定法による VOC の土壌溶出量分析結果と、本研究の MIP-CPT システムにより得られた VOC ガス分析結果を比較し、本システムの有効性について検討を行った。

1)　現地試験場所・工程

（現地試験場所）三重県桑名市大字五反田字多々星

図 3.1.7　試験場所

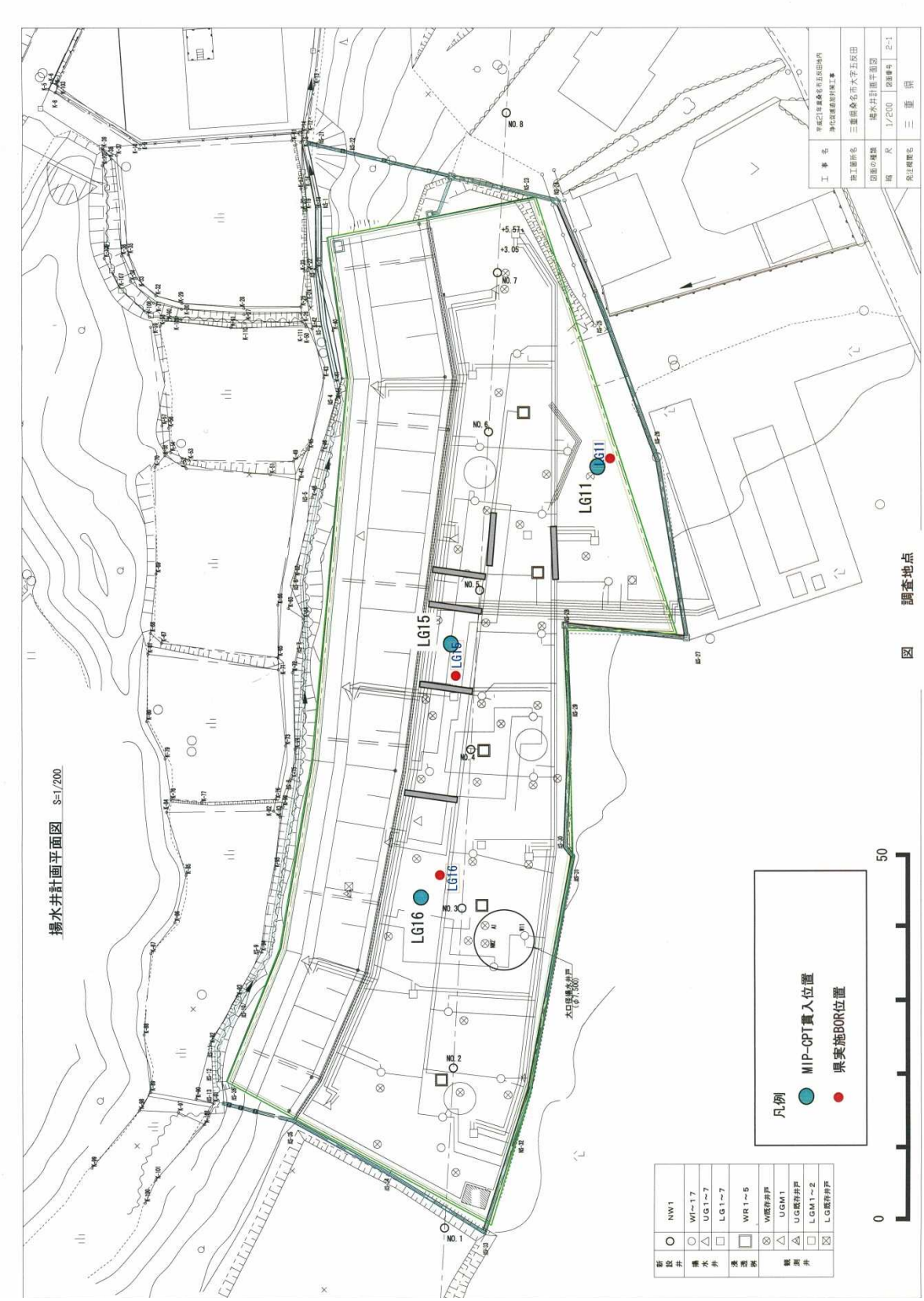


図 3.1.8 貫入地点（平成 22 年度）

MIP-CPT 現地試験工程を表 3.1.2 に示す。三重県が別途実施したボーリングのうち、3 地点（LG11,LG15,LG16）の近傍においてコーンを貫入し、センサー（FID,PID,DELCD）の出力（濃度）が高くなった深度（ボーリング 1 本につき 3～4 深度）で VOC 成分分析を実施した。

表 3.1.2　MIP-CPT 現地試験工程

調査日	調査対象孔名	貫入深度(GL-m)	VOC 成分分析深度(GL-m)（MIP ﾒﾝﾌﾞﾚﾑ位置）
平成 22 年 11 月 28 日	LG15	2.0～14.5	5.0, 7.5, 10.0, 13.5　計 4 深度
平成 22 年 11 月 30 日	LG16	2.0～13.0	3.0, 11.0, 11.5　計 3 深度
平成 22 年 12 月 1 日	LG11	2.0～13.5	6.5, 9.0, 12.0, 13.0　計 4 深度

2)　計測条件

下記条件で実施した。

・MIP-CPT 調査では、①キャリアーガスの流速、②CPT コーン貫入速度の変化によりガス検出感度に違いが生じる。これまでの実験結果によると、キャリアーガス流速 50cm/s、CPT コーン貫入速度 1cm/s が最適と考えられたことから、今回の現地試験においては、この条件となるように調整を行った。

・CPT コーンは、地盤下 2.0mから貫入を開始し、0.5m毎にコーン貫入を停止させた。MIP メンブレンにあるヒータにより、採取時のガス温度が 100℃以上の状態を保ち、センサー出力の変動が落ち着くまでコーン貫入を停止した。

・ガスクロマトグラフによるガスの分析は、停止中に現れるセンサー出力のピークをねらって実施した。

・実際の貫入孔の位置は、県実施ボーリングと CPT コーン貫入で 2～5m離れていた。

(4)　平成 23 年度の研究

ヒータ部周辺で気化した VOC ガスは地上のガス分析器に還送されてくるが、その間のガスライン（キャリアガスライン）の間で冷やされ、凝縮や吸着を起こしている可能性がある。平成 23 年度の研究ではこれを極力防ぐため、キャリアガスラインをテフロン管からステンレス管に変更し、そのライン全体を 100℃で加熱した新たなシステムを導入し、現地試験を実施した。

1)　現地試験場所・工程

MIP-CPT 現地試験工程を表 3.1.3 に示す。平成 22 年度に実施した 3 地点（LG11,LG15,LG16）のうち、LG15,LG16 の 2 地点の近傍において実施した。MIP-CPT 貫入深度は、廃棄物層および廃棄物層下難透水層まで（アスファルト下約 3～14m）とし、MIP-CPT システムの出力信号の大きくなった 2 深度と廃棄物層底の 3 深度において、公定法と新 MIP システムにおける VOC 成分分析を実施した。貫入地点を図 3.1.9 に示す。

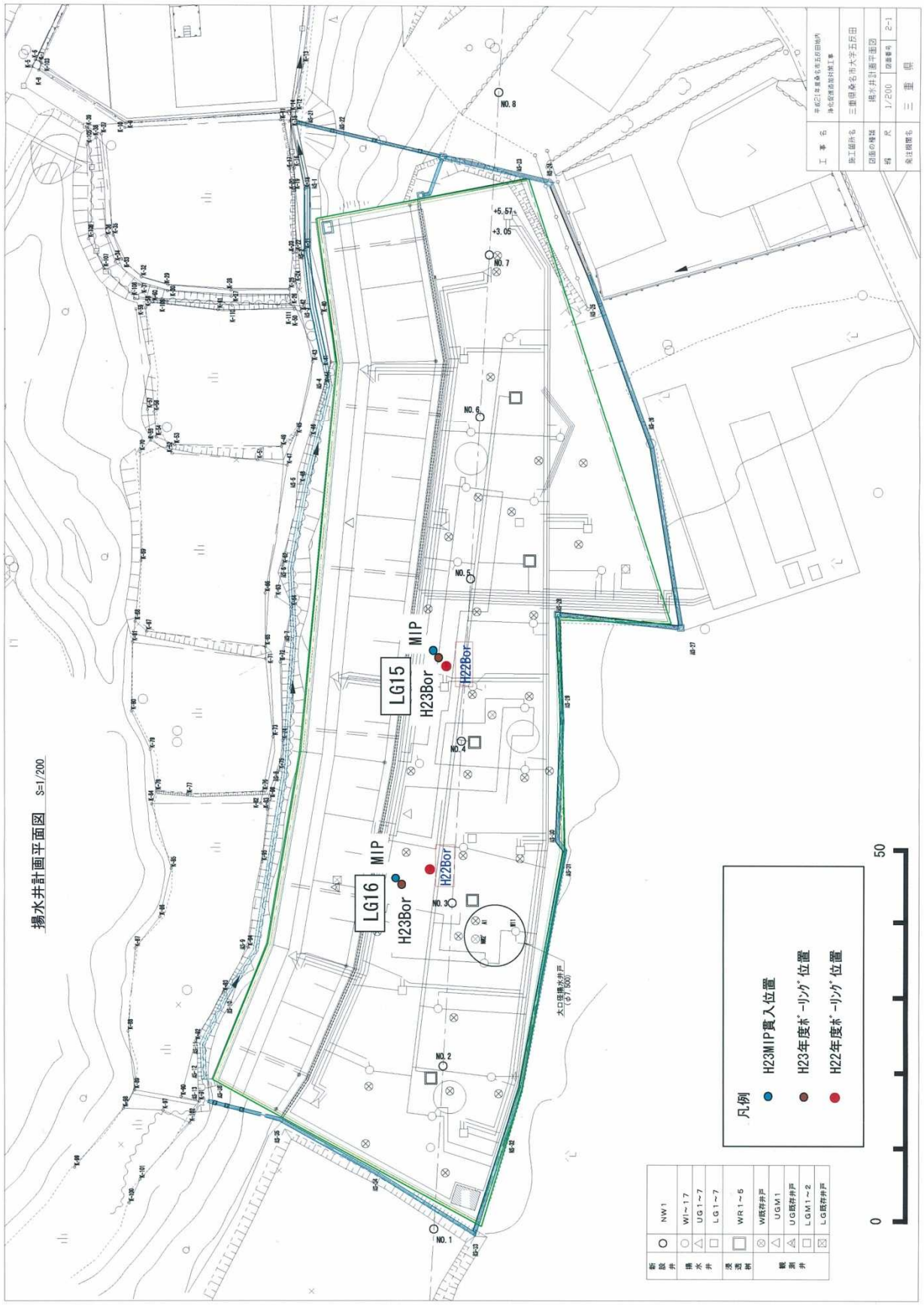


図 3.1.9　貫入地点　（平成 23 年度）

表 3.1.3　MIP-CPT 現地試験工程

調査日	調査対象 孔名	貫入深度 (GL-m)	VOC 成分分析深度 （ MIP メンブレン深度）
平成 23 年 11 月 10～15 日	LG15	14.0	9.0, 11.5, 13.5　計 3 深度
	LG16	14.0	3.5,　9.0, 12.0　計 3 深度

2)　計測条件

平成 23 年度は新 MIP-CPT システムの改良によるガス分析能力を公定法による分析結果と比較することが目的であることから、下記条件で実施した。

・コーン貫入中の出力変動を無視し、コーン停止時の出力変動に着目した。コーン貫入速度は 4～12cm/s と変動しているため、貫入中のデータは有効なデータではない。
・45mの MIP-CPT ケーブルを使用した（ガスラインの長さは 90mとなる）。
・キャリアーガスの流速は平成 22 年度と同じ 50cm/s（MIP メンブレンから吸入されたガスがガス計測器に到るまでの時間約 90 秒）とした。
・MIP メンブレン位置が所定の深度に到達するとコーン貫入を停止させ、MIP メンブレンにあるヒータにより、採取時のガス温度が 100℃以上の状態になることを確認してからガス分析を開始した。
・VOC 成分分析は、MIP-CPT システムの出力信号の大きくなった 2 深度と廃棄物層底の 3 深度において、ヒータ部温度が 100℃に到達後の吸引ガスがガス測定器に到達した後で実施した。
・コーン貫入による試料の撹乱の影響を避けるため、公定法分析用ボーリング位置はコーン貫入位置から約 50cm 離して実施した。

3.1.3 研究結果及び考察

(1) 平成 22 年度の研究結果

1) MIP-CPT 連続貫入時の検討

三重県が実施したボーリングの柱状図と新 MIP-CPT システムによる FID の深度分布を図 3.1.10 に示す。廃棄物層の深さは、地点により異なるが、LG11 で GL-2～7.5（標高 47～52）m、LG15 で GL-2～13（標高 41～52）m、LG16 で GL-2～14（標高 40～52）mに存在していた。FID は有機物に対して反応する感知器であり、廃棄物層の位置を推定する一つの指標となるが、LG15、LG16 の廃棄物層についてはボーリング結果とよく一致しており、本システムが廃棄物深度分布推定の一手段となることが確認できた。

ボーリング柱状図と CPT３成分（コーン先端抵抗、周面摩擦、間隙水圧）の深度分布を図 3.1.11 に示す。廃棄物層貫入時の先端抵抗は、一次的に 40MPa 近くの高い値を示す箇所があったが、ほとんど 10MPa 以下の値であり、CPT コーンの貫入に支障のない地盤の硬さ（コーン強度として、凡そ 60MPa 以下が望ましい）であった。廃棄物埋設地における本システムの導入については、機器強度的にも十分対応可能と考えられる。

公定法による土壌溶出量の深度分布と MIP-CPT 連続貫入中のガス検出感度の深度分布を図 3.1.12 に示す。公定法による土壌分析は、地盤下 3.5mから 1m毎に実施している。今回、本システムにおいて FID の感度は良好であったが、PID および DELCD の感度が悪く、公定法による VOC の深度分布と異なる分布を示していた。感度悪化の要因については、4)課題と推定される要因において示す。

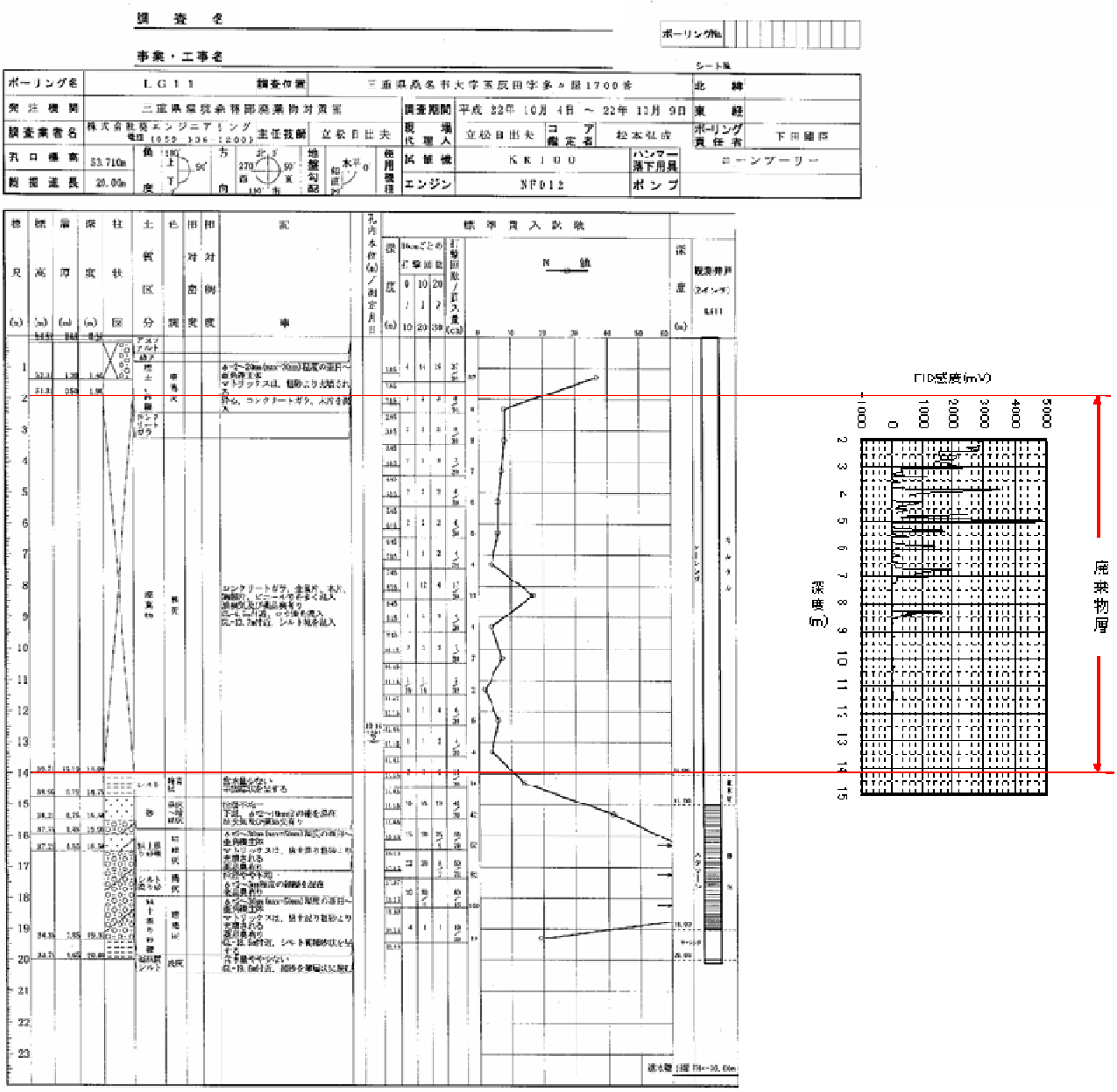


図 3.1.10(1)　ボーリング柱状図と FID 深度分布(LG11)

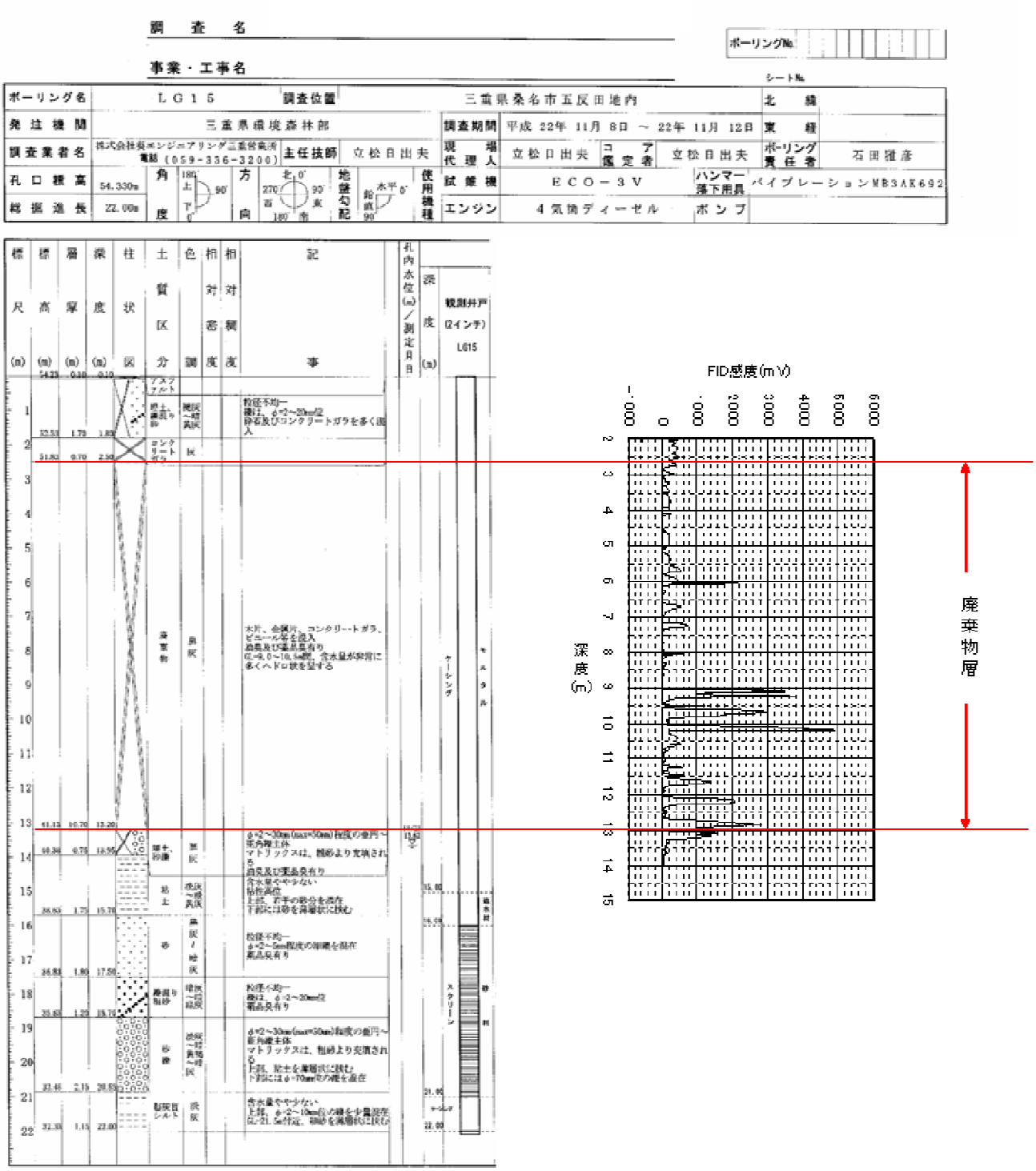


図 3.1.10(2)　ボーリング柱状図と FID 深度分布(LG15)

ボーリング柱状図

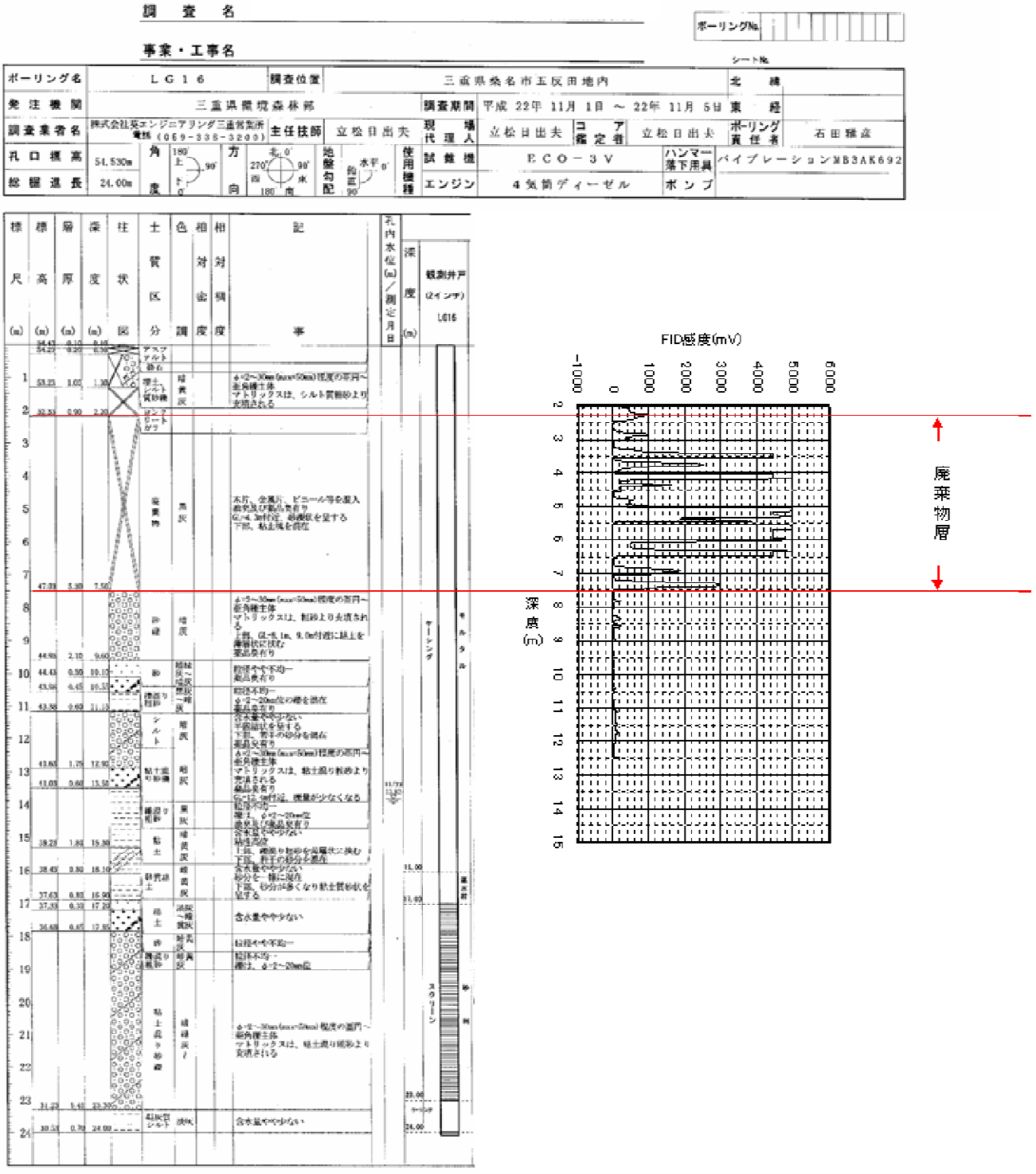


図 3.1.10(3)　ボーリング柱状図と FID 深度分布(LG16)

ボーリング柱状図

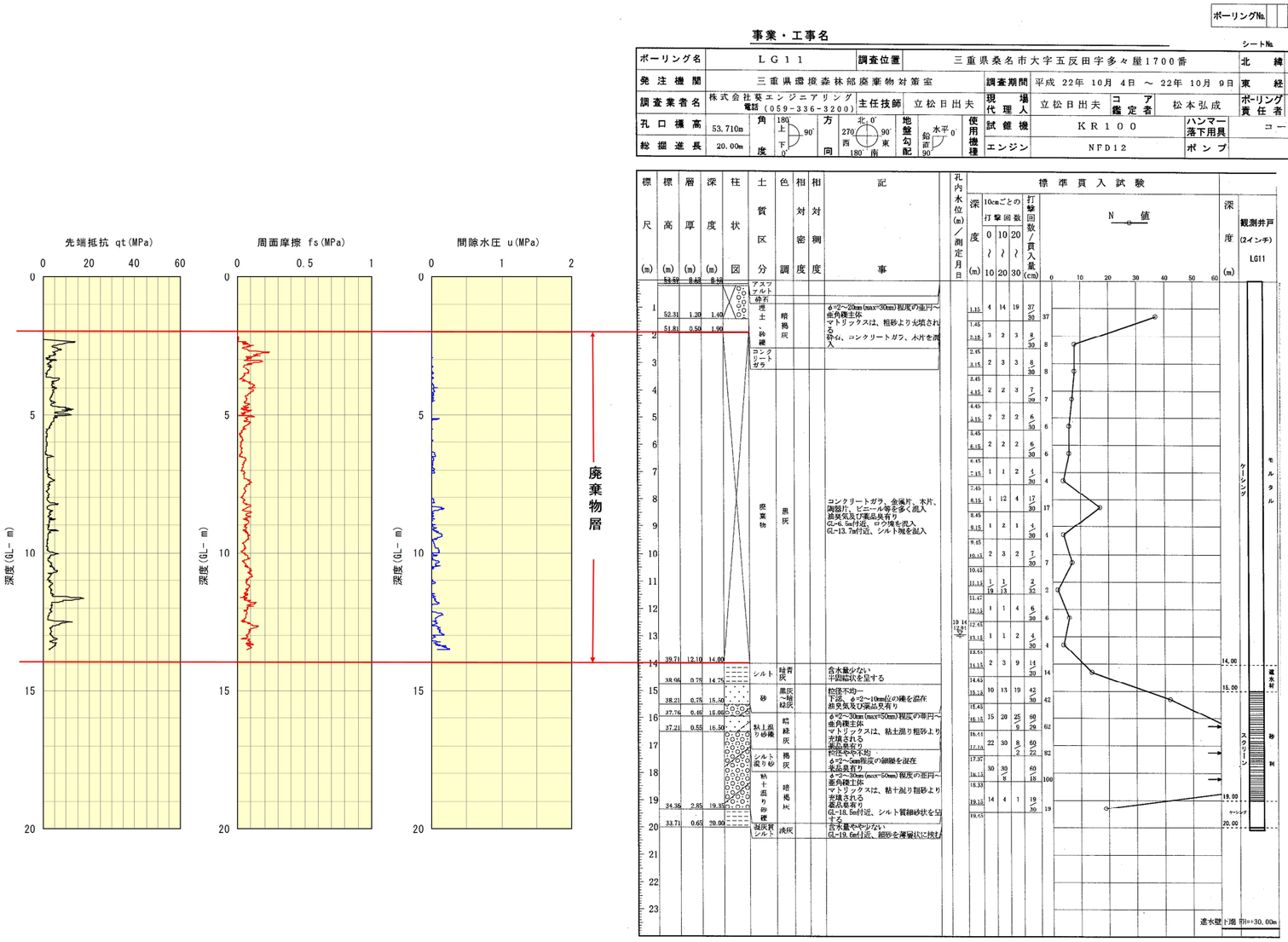


図 3.1.11(1)　ボーリング柱状図と CPT3 成分(LG11)

ボーリング柱状図

調　査　名

事業・工事名

ボーリングNo.

シートNo.

ボーリング名	ＬＧ１５	調査位置	三重県桑名市五反田地内			北　緯	
発注機関	三重県環境森林部			調査期間	平成 22年 11月 8日 ～ 22年 11月 12日	東　経	
調査業者名	株式会社英エンジニアリング三重営業所 電話（059-336-3200）	主任技師	立松日出夫	現場代理人	立松日出夫	コア鑑定者	立松日出夫	ボーリング責任者	石田雅彦
孔口標高	54.330m	角度	上180° 90° 下0°	方向	北0° 90°東 180°南 270°西	地盤勾配	水平0° 鉛直90°	使用機種	試錐機	ＥＣＯ－３Ｖ	ハンマー落下用具	バイブレーションMB3AK692
総掘進長	22.00m								エンジン	４気筒ディーゼル	ポンプ	

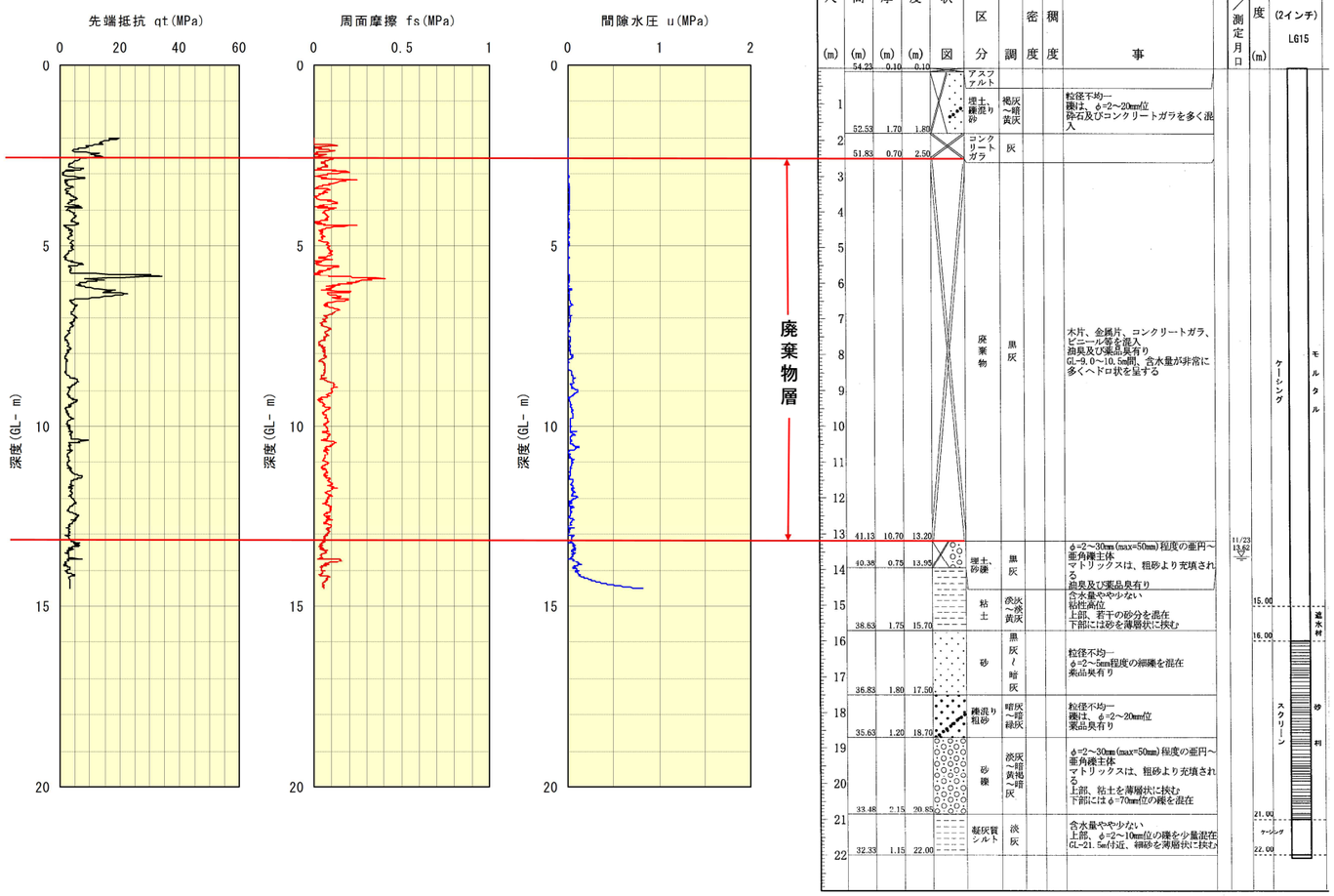
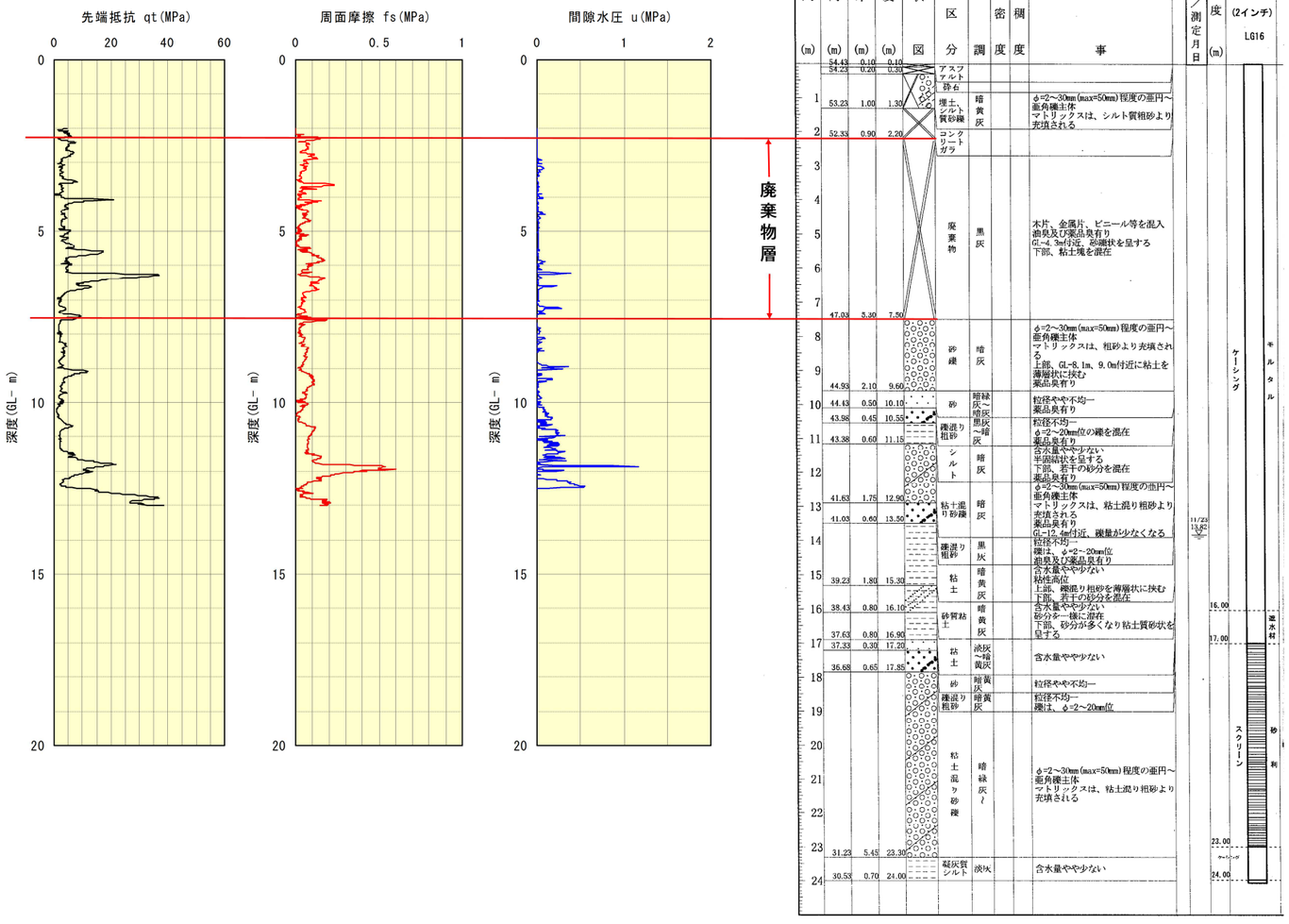


図 3.1.11(2)　ボーリング柱状図と CPT3 成分(LG15)

ボーリング柱状図



調　査　名

事業・工事名

ボーリングNo.

シートNo.

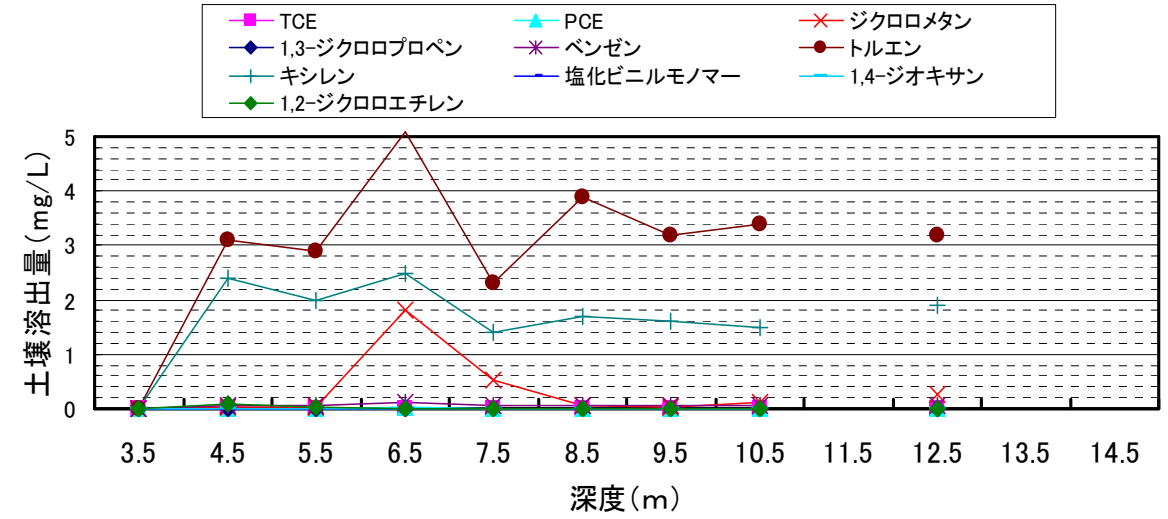
ボーリング名	ＬＧ１６	調査位置	三重県桑名市五反田地内			北　緯	
発注機関	三重県環境森林部			調査期間	平成 22年 11月 1日 ～ 22年 11月 5日	東　経	
調査業者名	株式会社英エンジニアリング三重営業所 電話（059－336－3200）	主任技師	立松日出夫	現場代理人	立松日出夫	コア鑑定者	立松日出夫	ボーリング責任者	石田雅彦
孔口標高	54.530m	角度	180°上 90° 下 0°	方向	北 0° 東 90° 南 180° 西 270°	地盤勾配	水平 0° 鉛直 90°	使用機種	試錐機	ＥＣＯ－３Ｖ	ハンマー落下用具	バイブレーションMB3AK692
総掘進長	24.00m								エンジン	４気筒ディーゼル	ポンプ	

標尺 (m)	標高 (m)	層厚 (m)	深度 (m)	柱状図	土質区分	色調	相対密度	相対稠度	記事	孔内水位(m)／測定月日	深度 (m)	観測井戸(2インチ) LG16
	54.43	0.10	0.10		アスファルト							
	54.23	0.20	0.30		砕石							
1	53.23	1.00	1.30		埋土 シルト質砂礫	暗黄灰			φ=2～30mm(max=50mm)程度の亜円～亜角礫主体 マトリックスは、シルト質粗砂より充填される			
2	52.33	0.90	2.20		コンクリートガラ							
3												
4												
5					廃棄物	黒灰			木片、金属片、ビニール等を混入 油臭及び薬品臭有り GL－4.3m付近、帯状を呈する 下部、粘土塊を混在			
6												
7	47.03	5.30	7.50									
8					砂礫	暗灰			φ=2～30mm(max=50mm)程度の亜円～亜角礫主体 マトリックスは、粗砂より充填される 上部、GL－8.1m、9.0m付近に粘土を薄層状に挟む 薬品臭有り			
9	44.93	2.10	9.60									
10	44.43	0.50	10.10		砂	暗緑灰～暗灰			粒径やや不均一 薬品臭有り			
11	43.98	0.45	10.55		礫混り粗砂	黒灰～暗灰			粒径不均一 φ=2～20mm位の礫を混在 薬品臭有り			
12	43.38	0.60	11.15		シルト	暗灰			含水量ややすない 半固結状を呈する 下部、若干の砂分を混在 薬品臭有り			
13	41.63	1.75	12.90		粘土混り砂礫	暗灰			φ=2～30mm(max=50mm)程度の亜円～亜角礫主体 マトリックスは、粘土混り粗砂より充填される 薬品臭有り GL－12.4m付近、礫量が少なくなる	11/23 13.62		
14	41.03	0.60	13.50		礫混り粗砂	黒灰			粒径不均一 礫は、φ=2～20mm位 油臭及び薬品臭有り			
15	39.23	1.80	15.30		粘土	暗黄灰			含水量ややすない 粘性高位 上部、礫混り粗砂を薄層状に挟む 下部、若干の砂分を混在			
16	38.43	0.80	16.10		砂質粘土	暗黄灰			含水量ややすない 砂分を一様に混在 下部、砂分が多くなり粘土質砂状を呈する		16.00	
17	37.63	0.80	16.90								17.00	
	37.33	0.30	17.20		粘土	淡灰～暗黄灰			含水量ややすない			
18	36.68	0.65	17.85		砂	暗黄灰			粒径やや不均一			
19					礫混り粗砂	暗黄灰			粒径不均一 礫は、φ=2～20mm位			
20												
21					粘土混り砂礫	暗緑灰～			φ=2～30mm(max=50mm)程度の亜円～亜角礫主体 マトリックスは、粘土混り粗砂より充填される			
22												
23	31.23	5.45	23.30								23.00	
	30.53	0.70	24.00		凝灰質シルト	淡灰			含水量ややすない		24.00	

ケーシング　スクリーン　ベントナイト　珪砂　珪砂

図 3.1.11(3)　ボーリング柱状図と CPT3 成分(LG16)

[公定法による土壌溶出量の深度分布]



[MIP-CPT 連続貫入中のガス検出感度の深度分布]

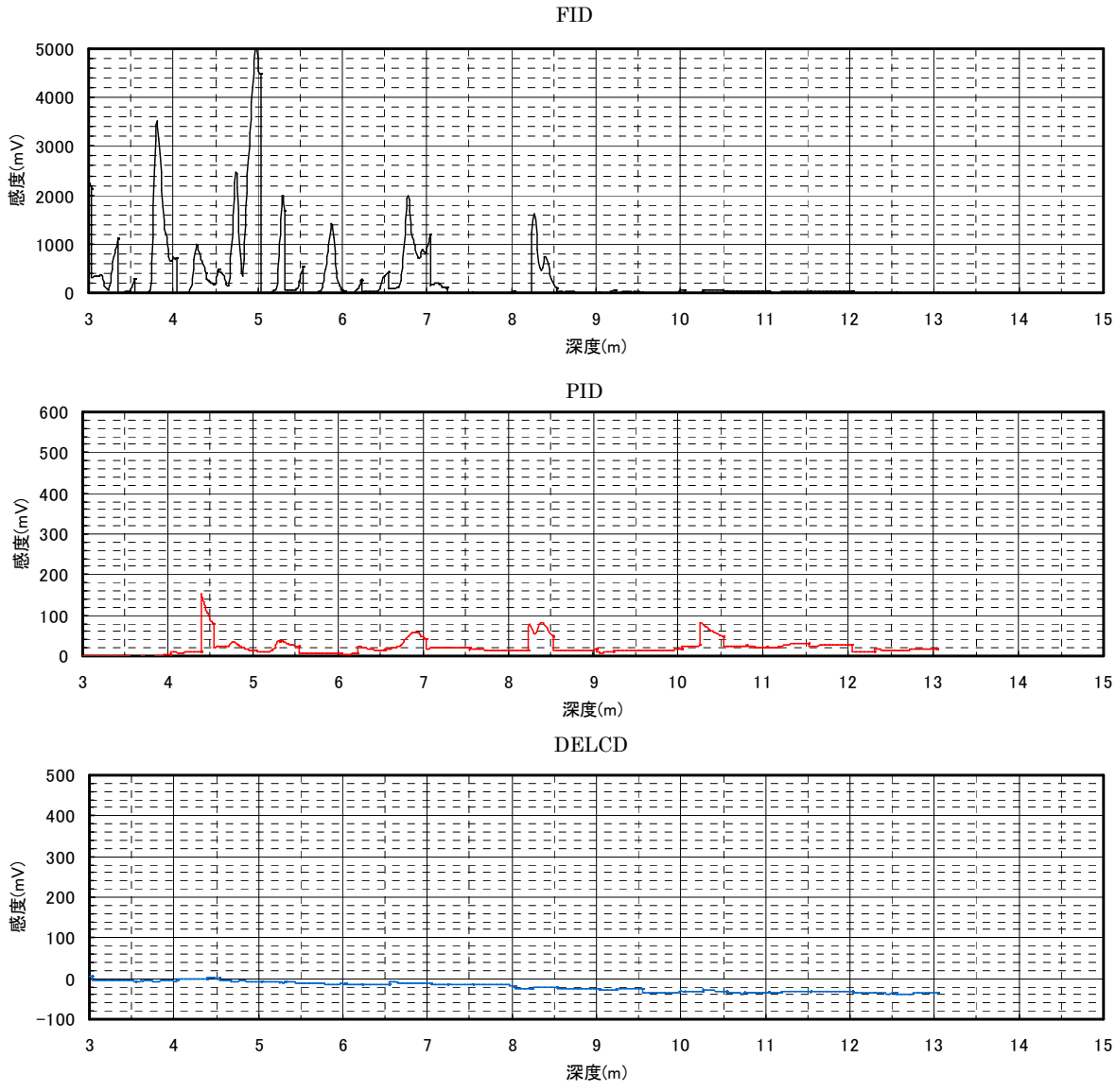
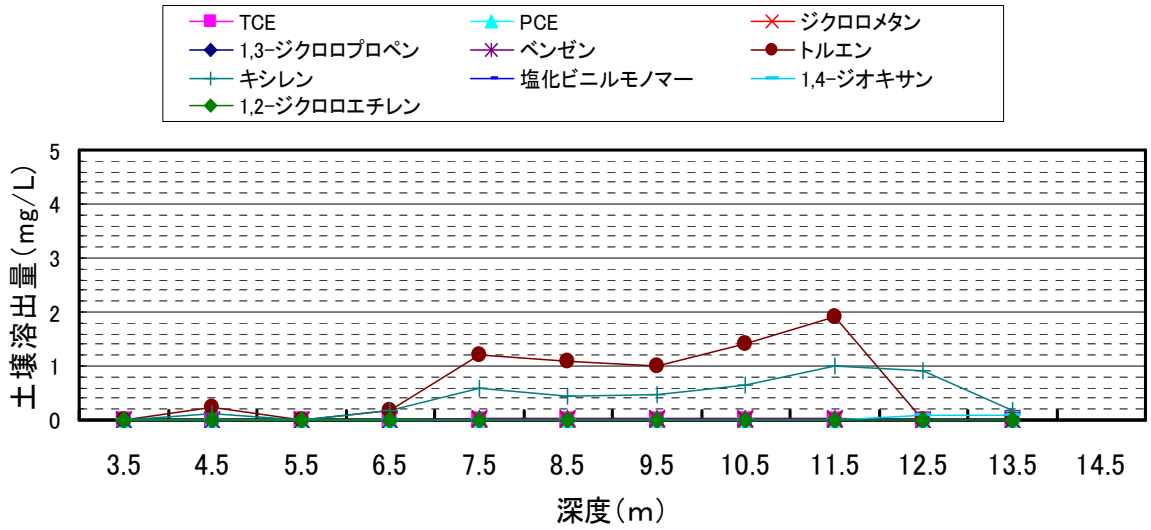


図. 3.1.12 (1)　公定法による土壌溶出量と MIP-CPT 連続貫入時の感度（LG11）

[公定法による土壌溶出量の深度分布]



[MIP-CPT 連続貫入中のガス検出感度の深度分布]

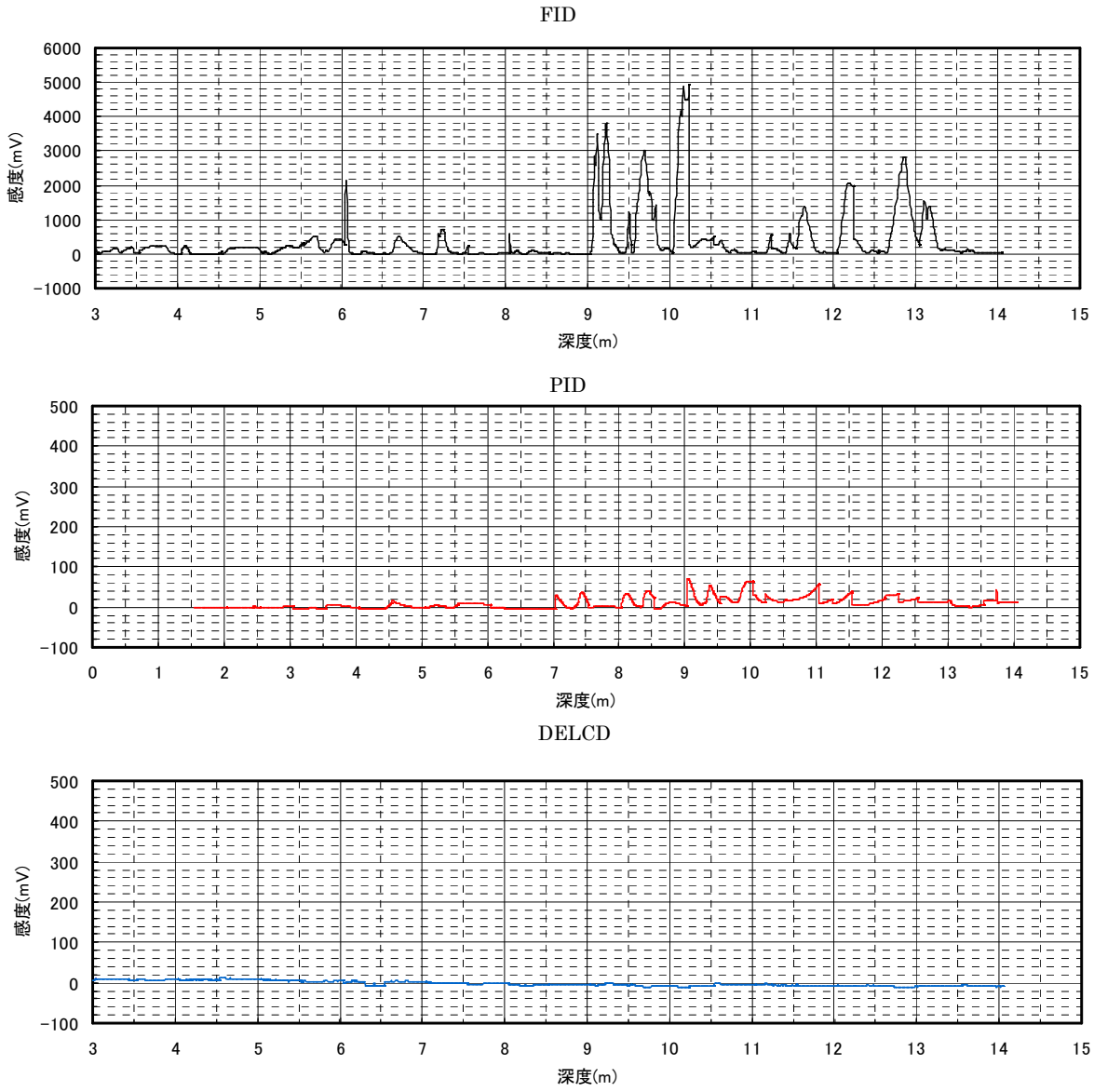
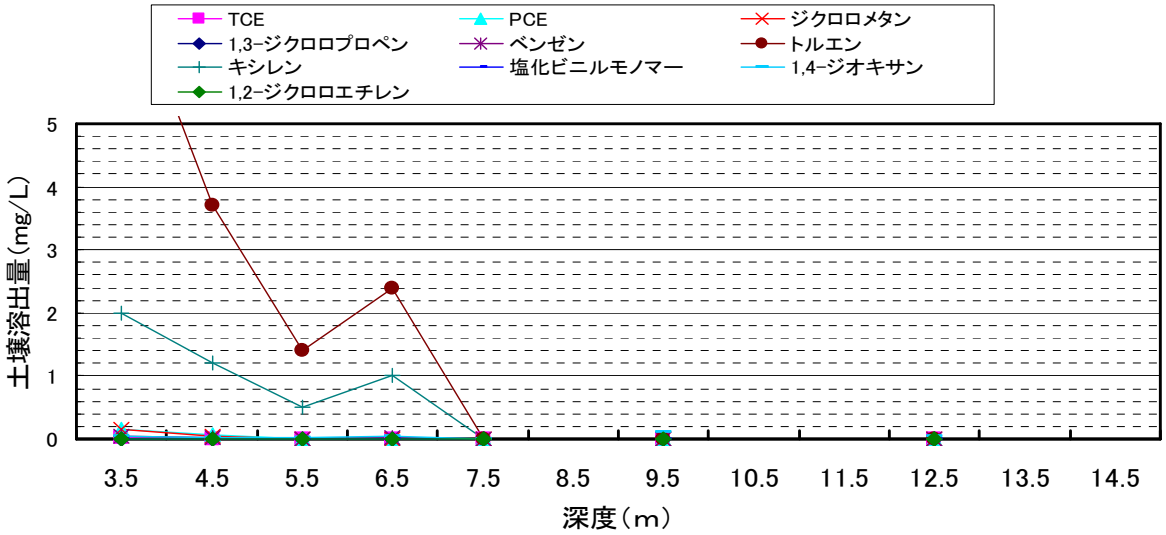


図. 3.1.12 (2)　公定法による土壌溶出量と MIP-CPT 連続貫入時の感度（LG15）

[公定法による土壌溶出量の深度分布]



[MIP-CPT 連続貫入中のガス検出感度の深度分布]

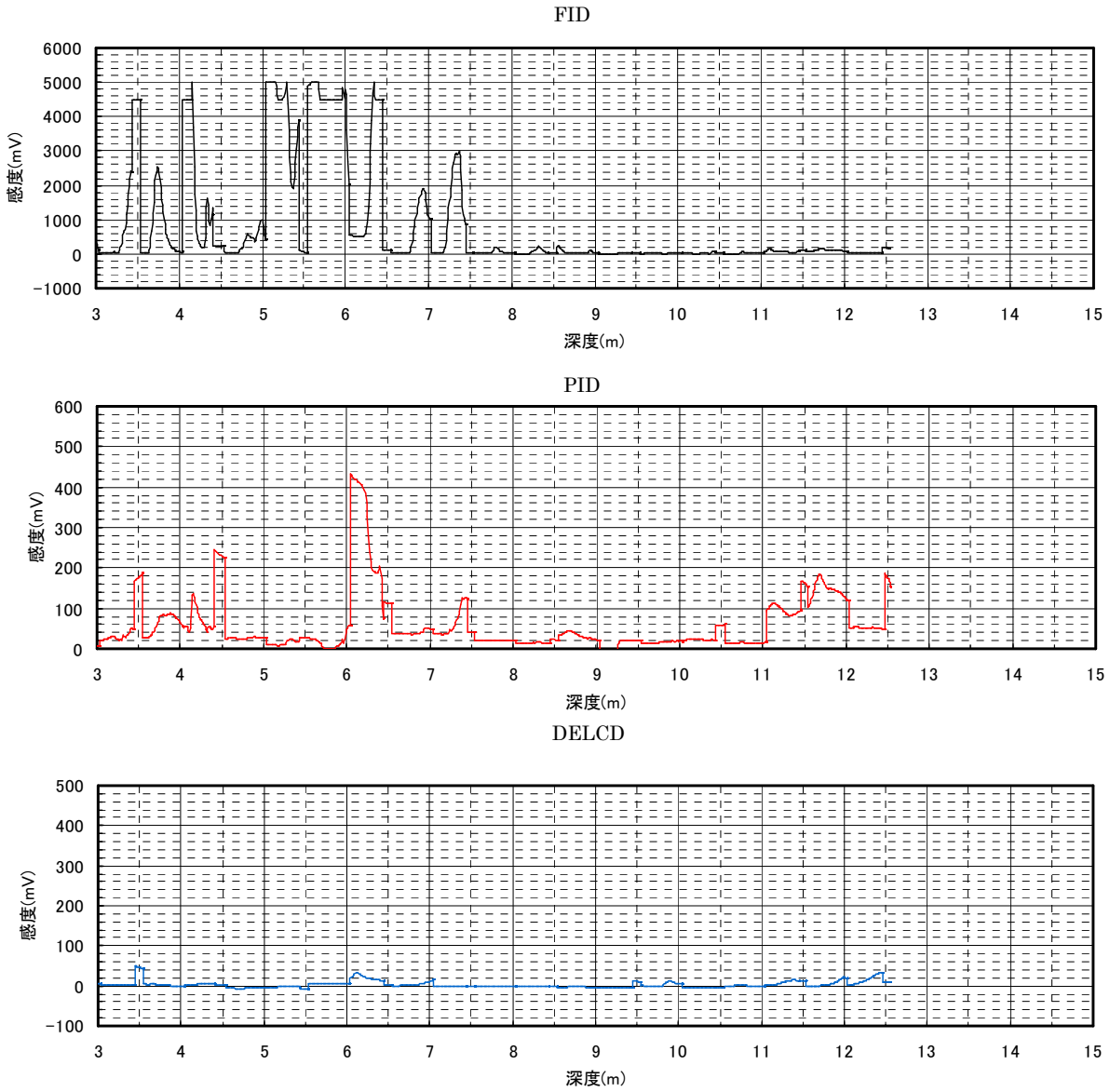
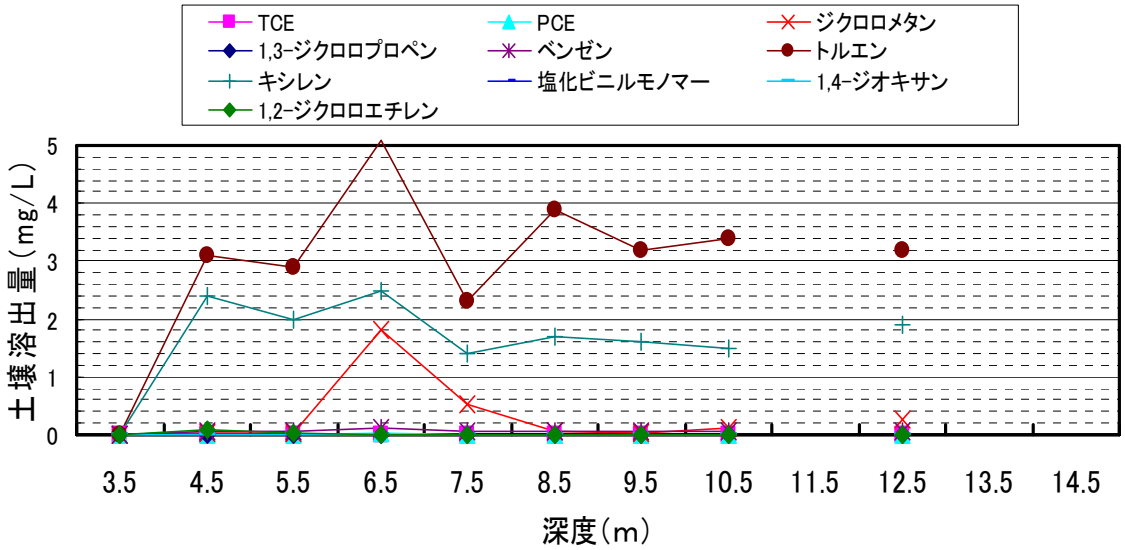


図. 3.1.12 (3)　公定法による土壌溶出量と MIP-CPT 連続貫入時の感度（LG16）

2) MIP-CPT 貫入停止時の検討

貫入停止中の感度がピークとなる値の深度分布を図 3.1.13 に示す。この分布も公定法による VOC の深度分布と異なる分布を示していた。

[公定法による土壌溶出量の深度分布]



[MIP-CPT 貫入停止中のガス検出感度の深度分布]

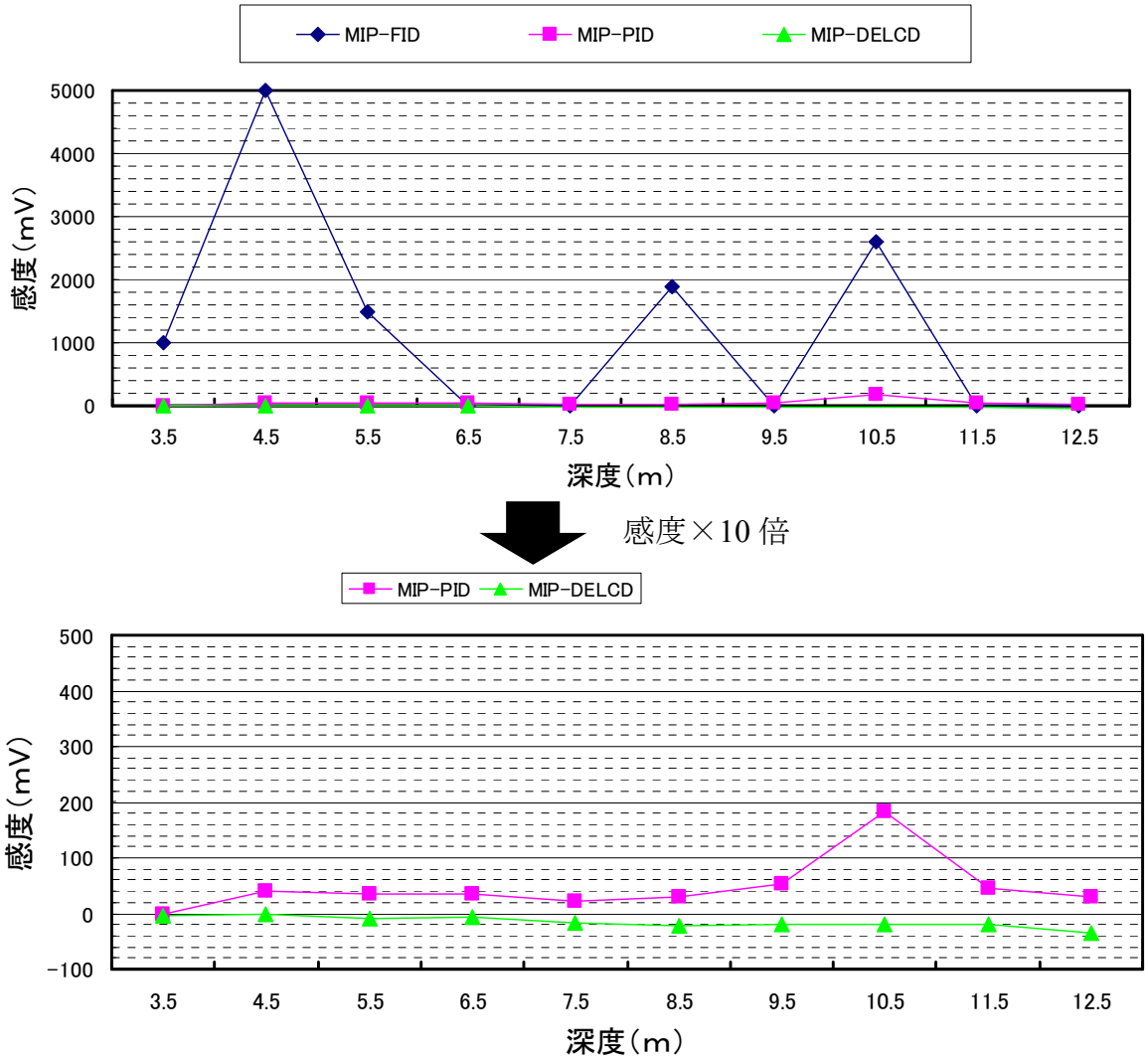
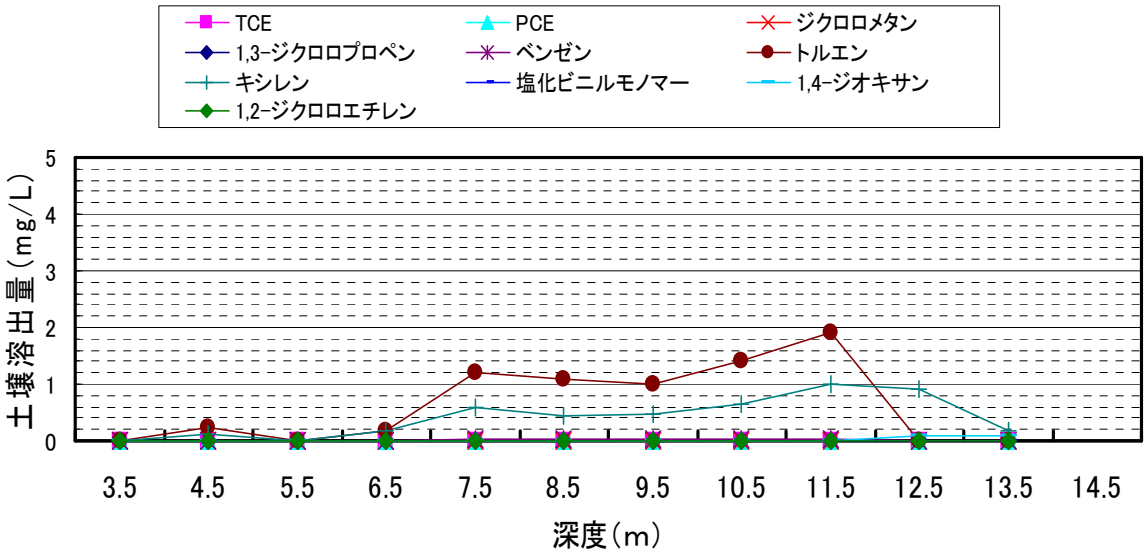


図.3.1.13 (1)　公定法による土壌溶出量と MIP-CPT 貫入停止時の感度（LG11）

[公定法による土壌溶出量の深度分布]



[MIP-CPT 貫入停止中のガス検出感度の深度分布]

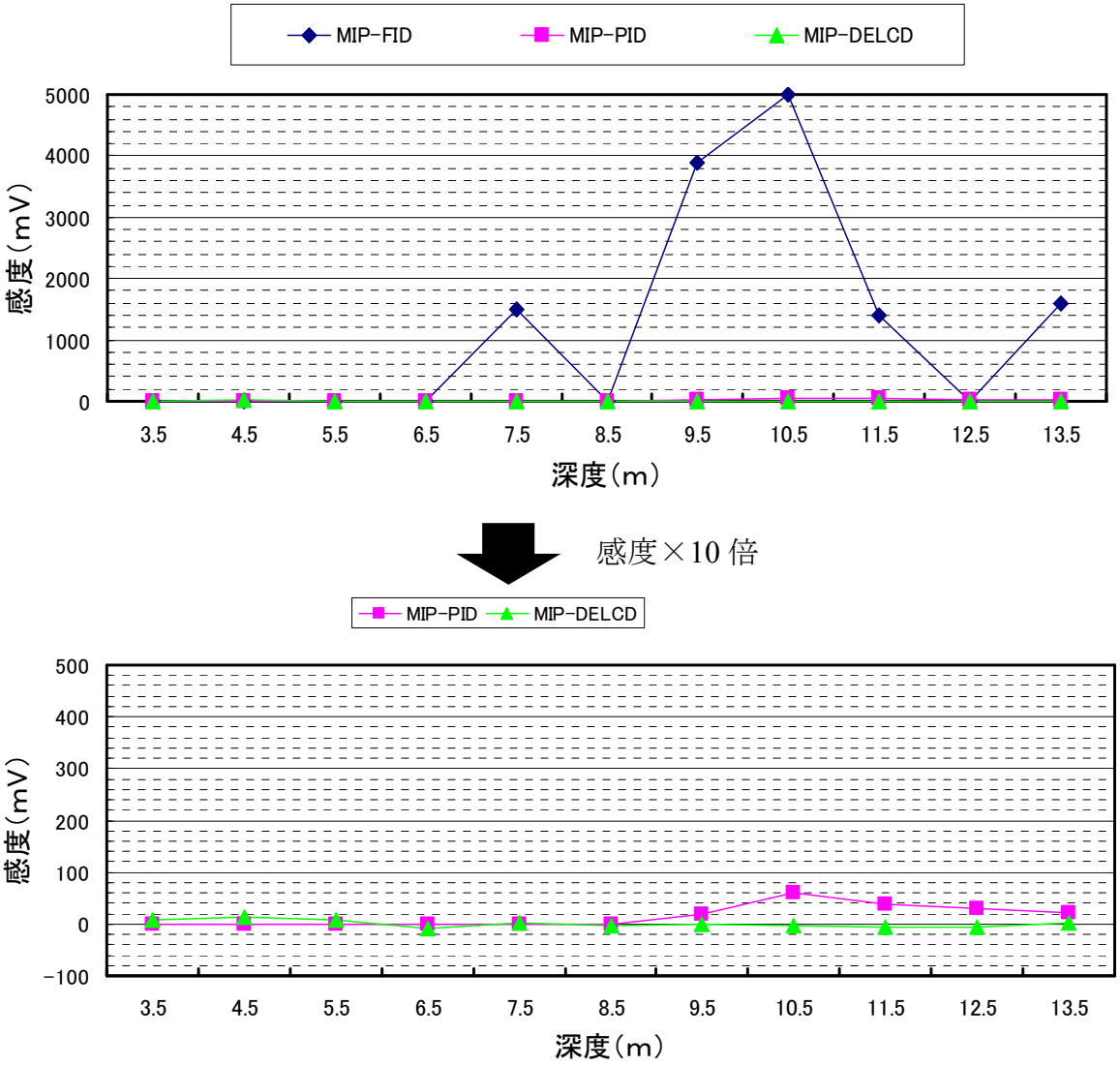
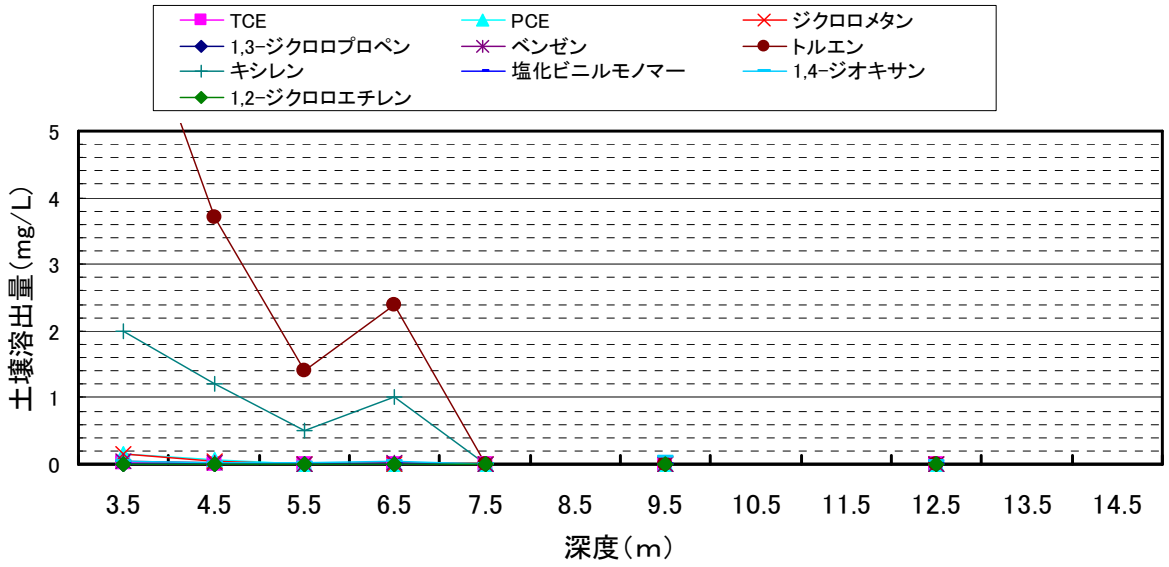


図.3.1.13 (2)　公定法による土壌溶出量と MIP-CPT 貫入停止時の感度（LG15）

[公定法による土壌溶出量の深度分布]



[MIP-CPT 貫入停止中のガス検出感度の深度分布]

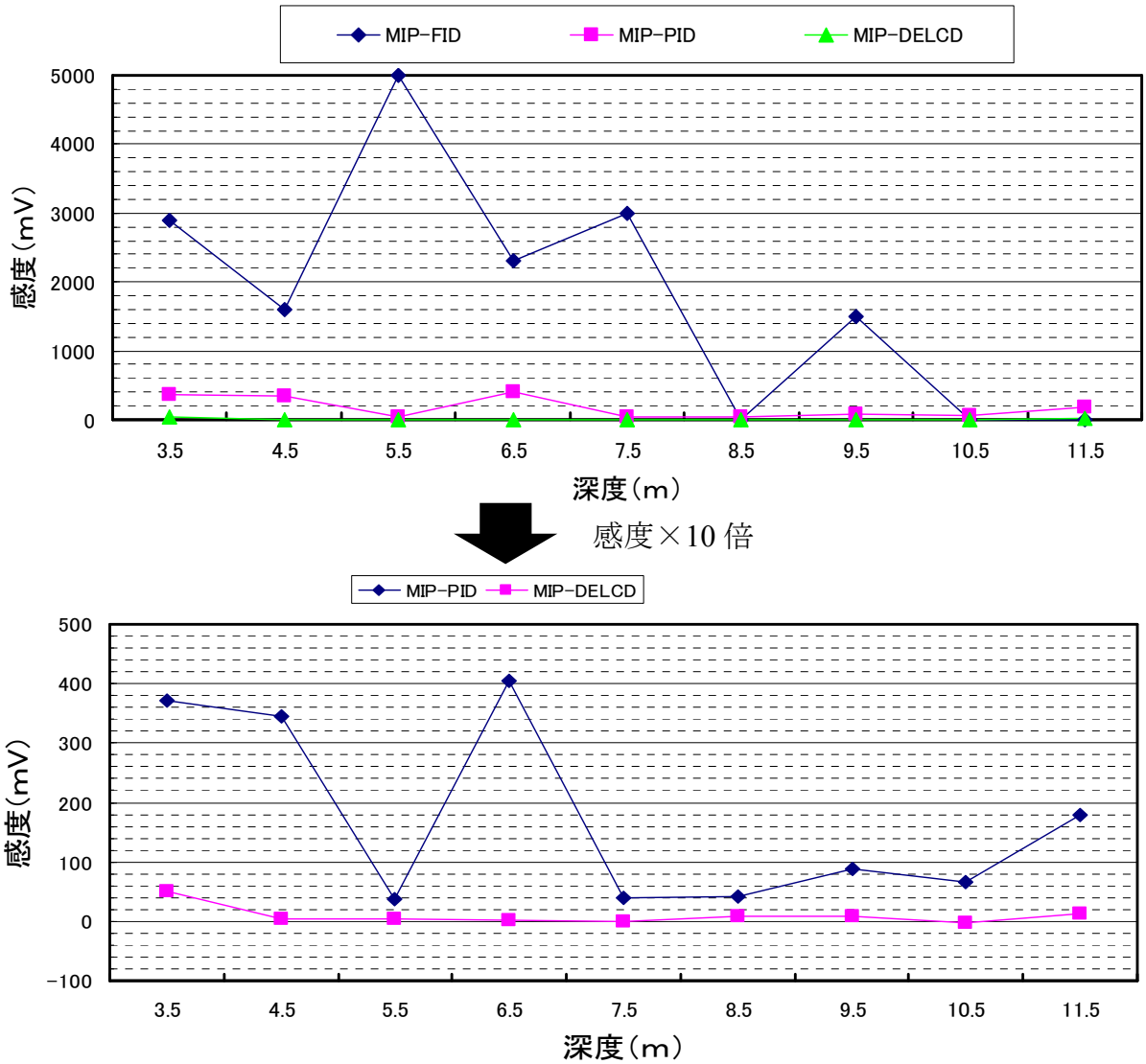


図.3.1.13 (3)　公定法による土壌溶出量と MIP-CPT 貫入停止時の感度（LG16）

3) 公定法による VOC 汚染物質と新 MIP-CPT システムによる VOC 汚染物質の比較

公定法による VOC 各成分の土壌溶出量分析結果とガスクロマトグラフによるガス分析結果の比較を表 3.1.4 に示す。ガスクロマトグラフによるガス分析は、各地点とも貫入停止時に実施した。3 地点で検出された VOC は、土壌溶出量分析においては、8 物質（TCE、PCE、ジクロロメタン、1,2-ジクロロエチレン、ベンゼン、トルエン、キシレン、1,4-ジオキサン）であったが、ガス分析では 6 物質（TCE、PCE、ジクロロメタン、ベンゼン、トルエン、キシレン）であった。かなり高濃度な物質はガスで検出できているが、それ以外の物質については検出できていない。4)においてその要因を検討しているが、LG11 の深度 6.5mにおいて、高濃度のジクロロメタンおよびベンゼンが検出できていないことは、貫入孔の位置の違い（約 2mの距離）がその要因と思われる。

表.3.1.4(1)　VOC 各成分の分析結果（LG11）

[公定法による土壌溶出量の深度分布]

：検出されたもの

：土壌第１溶出基準を超過したもの

：土壌第2溶出基準を超過したもの

単位：mg/L

項目	深度（m）											
	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5	14.5
TCE	－	－	－	0.006	－	－	－	－		－		
PCE	0.0006	0.0019	0.0010	0.043	0.0006	0.0005	0.0007	0.0009		－		
ジクロロメタン	－	0.024	0.015	1.8	0.54	0.045	0.017	0.13		0.25		
1,2-ジクロロエチレン	－	0.080	0.025	0.014	－	－	－	－		－		
1,3-ジクロロプロペン	－	－	－	－	－	－	－	－		－		
ベンゼン	－	0.050	0.069	0.13	0.060	0.057	0.051	0.049		0.054		
トルエン	0.010	3.1	2.9	5.1	2.3	3.9	3.2	3.4		3.2		
キシレン	0.007	2.4	2.0	2.5	1.4	1.7	1.6	1.5		1.9		
塩化ビニルモノマー	－	－	－	－	－	－	－	－		－		
1,4-ジオキサン	－	－	－	－	0.008	0.009	0.008	0.006		－		

[MIP-CPT 貫入停止中のガス濃度の深度分布]

単位：ppm

項目	深度（m）											
	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9	10.5	11.5	12	13.5	14.5
TCE				－			－			－		
PCE				－			－			－		
ジクロロメタン				－			－			0.53		
1,2-ジクロロエチレン				－			－			－		
1,3-ジクロロプロペン				－			－			－		
ベンゼン				－			－			－		
トルエン				2.3			1.4			1.1		
キシレン				0.94			0.25			0.86		
シス-1,2-ジクロロエチレン				－			－			－		
1,4-ジオキサン				－			－			－		

表.3.1.4(2)　VOC 各成分の分析結果（LG15）

[公定法による土壌溶出量の深度分布]

：検出されたもの

：土壌第１溶出基準を超過したもの

：土壌第2溶出基準を超過したもの

単位：mg/L

項目	深度（m）										
	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5
TCE	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－
PCE	－	－	－	－	－	0.0005	－	－	－	－	0.0008
ジクロロメタン	－	0.004	－	－	－	0.009	0.002	0.002	0.003	－	0.002
1,2-ジクロロエチレン	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－
1,3-ジクロロプロペン	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－
ベンゼン	－	0.002	－	0.003	0.015	0.018	0.016	0.022	0.032	－	－
トルエン	0.002	0.23	0.006	0.19	1.2	1.1	1.0	1.4	1.9	－	－
キシレン	0.004	0.13	0.004	0.18	0.58	0.45	0.48	0.66	0.99	0.92	0.19
塩化ビニルモノマー	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－
1,4-ジオキサン	－	－	0.010	－	－	－	－	0.011	0.009	0.081	0.096

[MIP-CPT 貫入停止中のガス濃度の深度分布]

単位：ppm

項目	深度（m）										
	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10	11.5	12.5	13.5
TCE					－			－			－
PCE					－			－			－
ジクロロメタン					－			0.7			1.1
1,2-ジクロロエチレン					－			－			－
1,3-ジクロロプロペン					－			－			－
ベンゼン					－			0.16			0.13
トルエン					1.4			3.7			1.7
キシレン					0.66			2.62			0.91
シス-1,2-ジクロロエチレン					－			－			－
1,4-ジオキサン					－			－			－

表.3.1.4(3)　VOC 各成分の分析結果（LG16）

[公定法による土壌溶出量の深度分布]

：検出されたもの

：土壌第１溶出基準を超過したもの

：土壌第2溶出基準を超過したもの

単位：mg/L

項目	深度（m）											
	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5	14.5
TCE	0.018	0.004	－	－	－		－			－		
PCE	0.15	0.056	0.0053	0.0007	－		－			－		
ジクロロメタン	0.15	0.044	0.002	－	－		－			－		
1,2-ジクロロエチレン	0.010	－	－	0.006	－		－			－		
1,3-ジクロロプロペン	－	－	－	－	－		－			－		
ベンゼン	0.038	0.027	0.008	0.012	－		－			－		
トルエン	7.5	3.7	1.4	2.4	0.005		0.001			－		
キシレン	2.0	1.2	0.51	1.0	0.006		0.001			－		
塩化ビニルモノマー	－	－	－	－	－		－			－		
1,4-ジオキサン	0.038	0.031	0.020	0.036	0.008		0.10			0.047		

[MIP-CPT 貫入停止中のガス濃度の深度分布]

単位：ppm

項目	深度（m）											
	3	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	11	11.5	12.5	13.5	14.5
TCE	－							－	0.12			
PCE	0.11							－	0.18			
ジクロロメタン	0.1							0.28	0.38			
1,2-ジクロロエチレン	－							－	－			
1,3-ジクロロプロペン	－							－	－			
ベンゼン	－							－	－			
トルエン	8.8							5.7	44			
キシレン	5.5							3.1	1.1			
シス-1,2-ジクロロエチレン	－							－	－			
1.4-ｼﾞｵｷｻﾝ	－							－	－			

表.3.1.4(4)　VOC 各成分の分析結果（まとめ）

地点：LG11

[公定法による土壌溶出量の深度分布]

単位：mg/L

項目	深度(m)		
	6.5	**9.5**	**12.5**
TCE	0.006	－	－
PCE	0.043	0.0007	－
ジクロロメタン	1.8	0.017	0.25
1,2-ジクロロエチレン	0.014	－	－
1,3-ジクロロプロペン	－	－	－
ベンゼン	0.13	0.051	0.054
トルエン	5.1	3.2	3.2
キシレン	2.5	1.6	1.9
塩化ビニルモノマー	－	－	－
1,4-ジオキサン	－	0.008	－

地点：LG15

単位：mg/L

項目	深度(m)		
	7.5	**10.5**	**13.5**
TCE	－	－	－
PCE	－	－	0.0008
ジクロロメタン	－	0.002	0.002
1,2-ジクロロエチレン	－	－	－
1,3-ジクロロプロペン	－	－	－
ベンゼン	0.015	0.022	－
トルエン	1.2	1.4	－
キシレン	0.58	0.66	0.19
塩化ビニルモノマー	－	－	－
1,4-ジオキサン	－	0.011	0.096

地点：LG16

単位：mg/L

項目	深度(m)
	3.5
TCE	0.018
PCE	0.15
ジクロロメタン	0.15
1,2-ジクロロエチレン	0.010
1,3-ジクロロプロペン	－
ベンゼン	0.038
トルエン	7.5
キシレン	2.0
塩化ビニルモノマー	－
1,4-ジオキサン	0.038

[MIP-CPT貫入停止中のガス濃度の深度分布]

単位：ppm

項目	深度(m)		
	6.5	**9**	**12**
TCE	－	－	－
PCE	－	－	－
ジクロロメタン	－	－	0.53
1,2-ジクロロエチレン	－	－	－
1,3-ジクロロプロペン	－	－	－
ベンゼン	－	－	－
トルエン	2.3	1.4	1.1
キシレン	0.94	0.25	0.86
シス-1,2-ジクロロエチレン	－	－	－
1,4-ジオキサン	－	－	－

単位：ppm

項目	深度(m)		
	7.5	**10**	**13.5**
TCE	－	－	－
PCE	－	－	－
ジクロロメタン	－	0.7	1.1
1,2-ジクロロエチレン	－	－	－
1,3-ジクロロプロペン	－	－	－
ベンゼン	－	0.16	0.13
トルエン	1.4	3.7	1.7
キシレン	0.66	2.62	0.91
シス-1,2-ジクロロエチレン	－	－	－
1,4-ジオキサン	－	－	－

単位：ppm

項目	深度(m)
	3
TCE	－
PCE	0.11
ジクロロメタン	0.1
1,2-ジクロロエチレン	－
1,3-ジクロロプロペン	－
ベンゼン	－
トルエン	8.8
キシレン	5.5
シス-1,2-ジクロロエチレ	－
1,4-ジオキサン	－

：検出されたもの

：土壌第１溶出基準を超過したもの

：土壌第2溶出基準を超過したもの

4) 課題と推定される要因

a) MIP における分析感度が悪く、汚染物質の深度変動が明確でない。

・試料ガス中の水分による負の干渉のため、PID 検出器の出力値が安定しなかった可能性がある。

・現地に搬入した分析機器（ガスクロマトグラフ）の感度が不十分であった。

b) 公定法による土壌溶出量分析結果と比較すると、広範囲に分布している高濃度のトルエン、キシレン等については検出され、濃度分布傾向も一致しているが、低濃度の VOC については検出できなかった。

・公定法分析用ボーリング位置と MIP 掘進位置が 2～5m離れていたため、本現場のような不法投棄現場では、廃棄物埋設状況自体が異なっていた。

・コーン先端ヒータ部周辺で気化した VOC ガスは、コーンのメンブレン部から浸透し分析機器まで搬送される。廃棄物層の VOC 濃度が非常に濃かったため、キャリアガスライン（テフロン管）の間で冷やされたガスが、ガスライン中である程度の凝縮や吸着を起こしている。

これらの要因による課題を解決するため、平成 23 年度の研究では、

・ガス分析機器（ガスクロマトグラフ）のオーバーホール

・キャリアガスラインをテフロン管からステンレス管に変更

・キャリアガスライン全体を 100℃で加熱保温したケーブルを導入

を行い研究を実施した。

(2) 平成 23 年度の研究結果

新 MIP-CPT 法によるガス分析は、3 つのセンサー（FID,PID,DELCD）の出力信号が大きくなった 2 深度と廃棄物埋設層底の 3 深度で実施した。

1) 公定法分析結果（H22 年度との比較）

平成 22 年度に三重県が実施した公定法分析結果と、平成 23 年度に本研究で実施した公定法分析結果の比較を各物質毎に図 3.1.14 に示す。平成 22 年度に比べ、平成 23 年度の濃度が高くなっている。その要因としては、

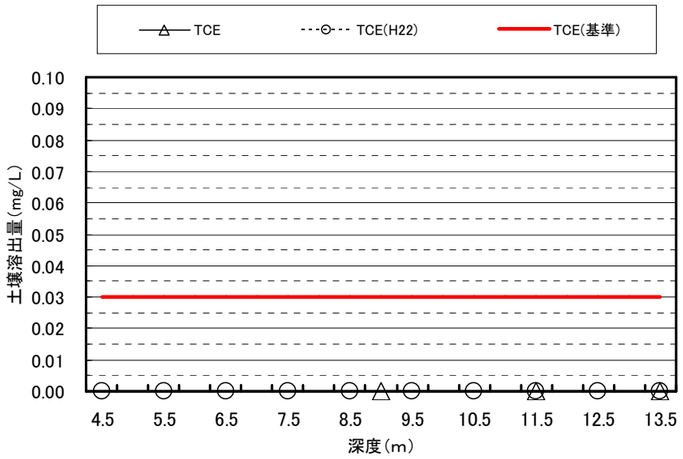
・H22 年度と H23 年度のボーリング位置は、LG15 で約 2m、LG16 で約 3m離れた位置となっている。当該不法投棄現場では、この程度の位置の違いにより廃棄物埋設状況がかなり異なっていると考えられる（図 3.1.15 ボーリング柱状図参照）。

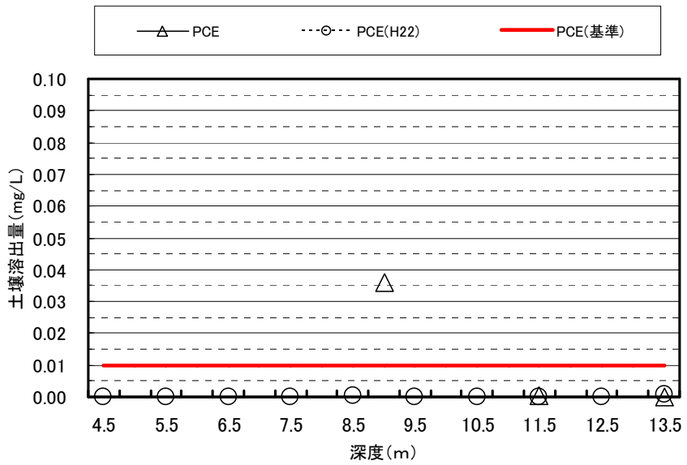
・公定法による分析では、現地でのボーリングによる採取試料を分析所に持ち込んで分析するため、VOC の場合、できるだけ揮発しないように処置をするが、その処置の仕方によっては揮発量に差がでることになる。ほとんど全ての深度において、H22 年度の方が H23 年度より濃度が低いことから、H22 年度の土壌採取時に VOC が揮発した可能性がある。
特に当該地では、試料採取深度が 0.5m程度異なった場合でもかなりの濃度の差異があったことから位置の違いによる要因が大きいと思われる。

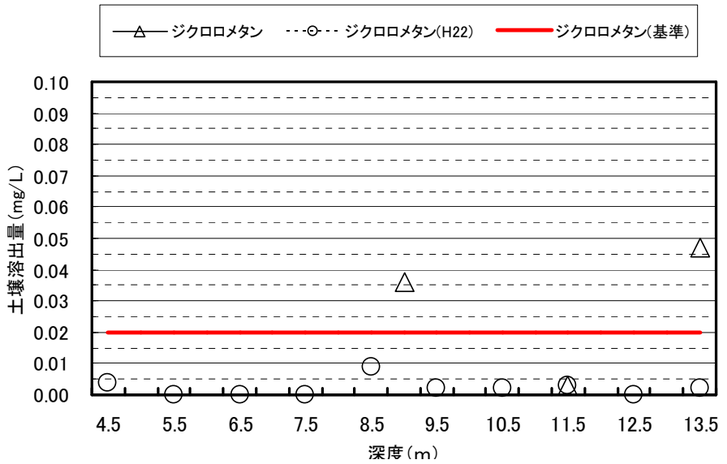
H23 年度の土壌溶出量を土壌汚染対策法における指定基準等と比較すると、

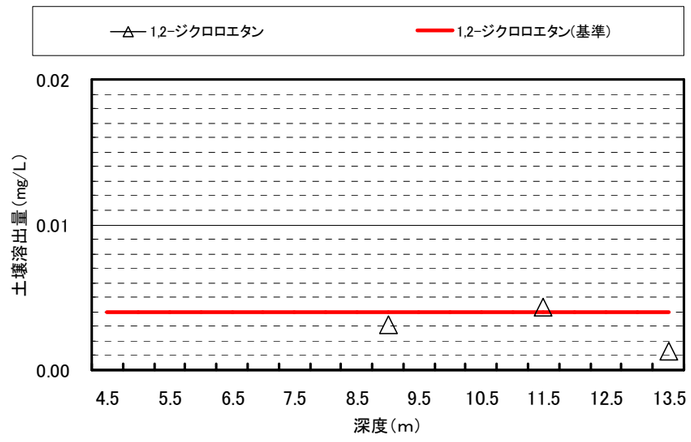
・LG15 では、PCE、ジクロロメタン、ベンゼンが土壌溶出量基準値を超過していたほか、溶出液のトルエン、キシレン濃度が地下水の監視基準値を超過していた。また、溶出液の 1,4-ジオキサン濃度は、分析データが 1 深度のみであるが地下水環境基準値以下であった。

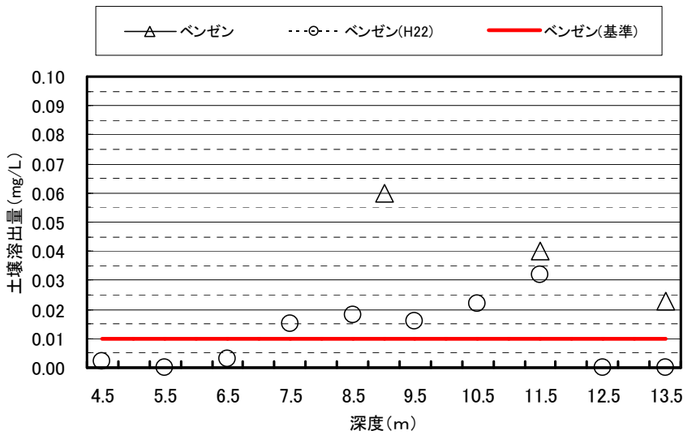
・LG16 では、PCE、ジクロロメタン、1,2-ジクロロエタン、ベンゼンが土壌溶出量基準値を超過し、溶出液のトルエン、キシレン濃度が地下水の監視基準値を超過し、溶出液の 1,4-ジオキサン濃度が地下水環境基準値を超過していた。

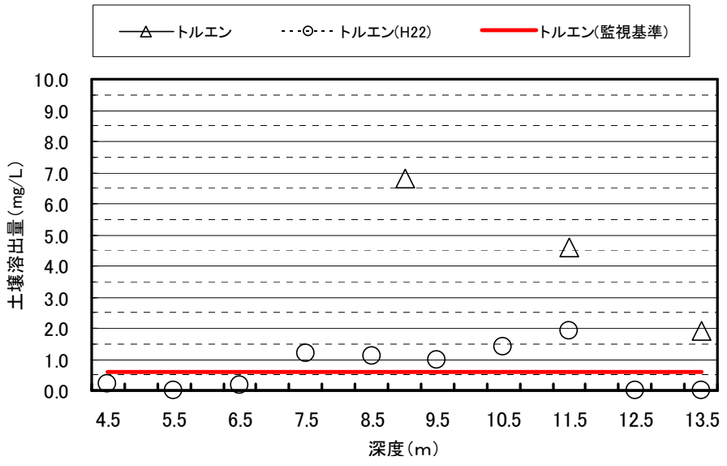


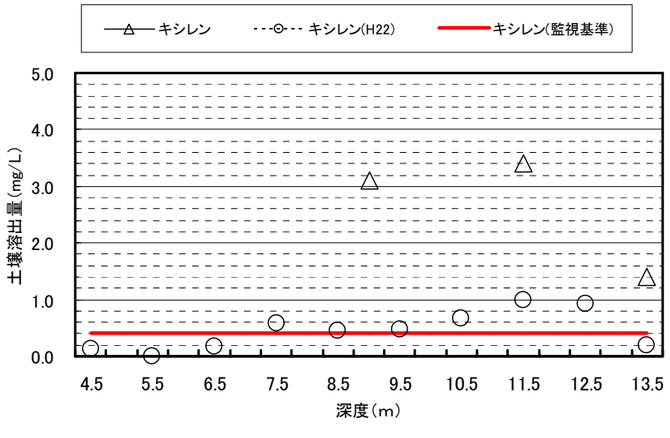


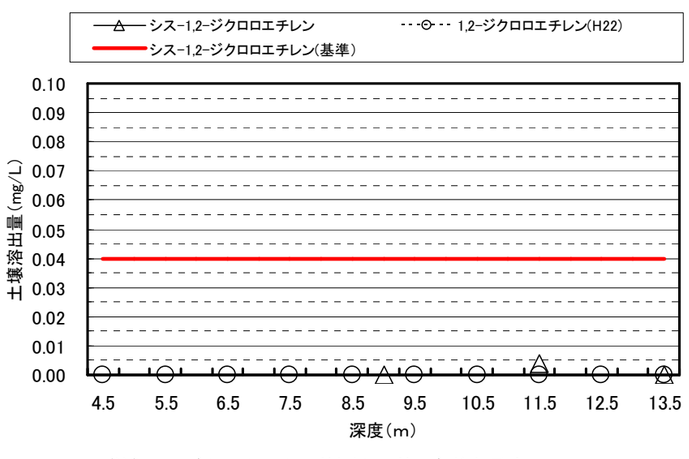


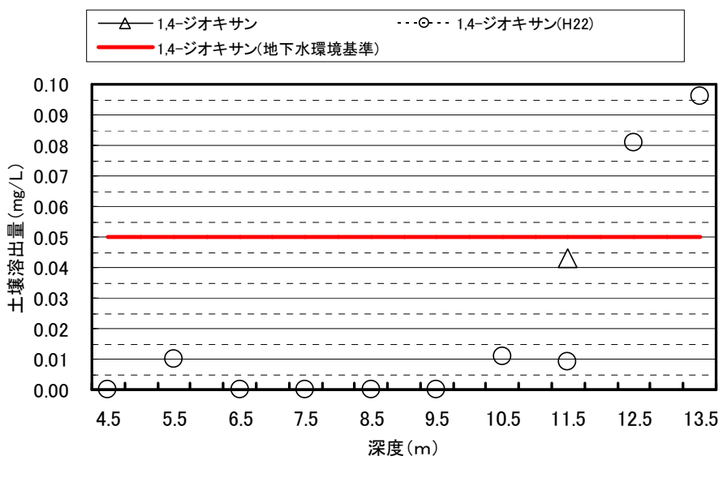






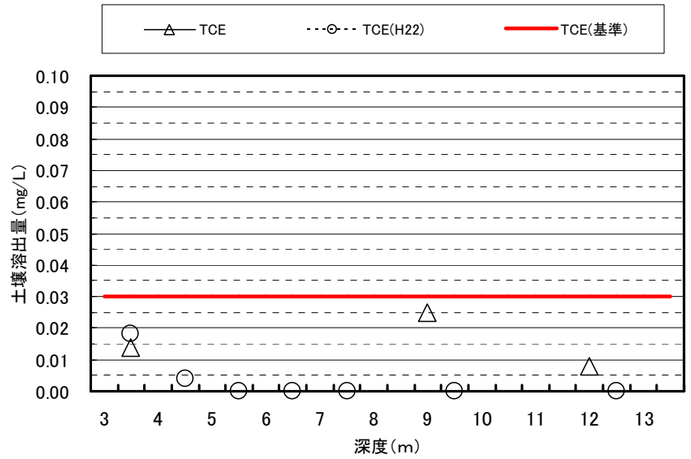


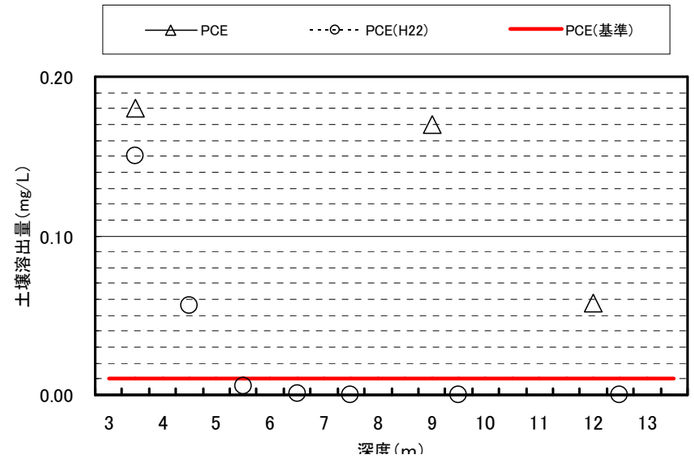


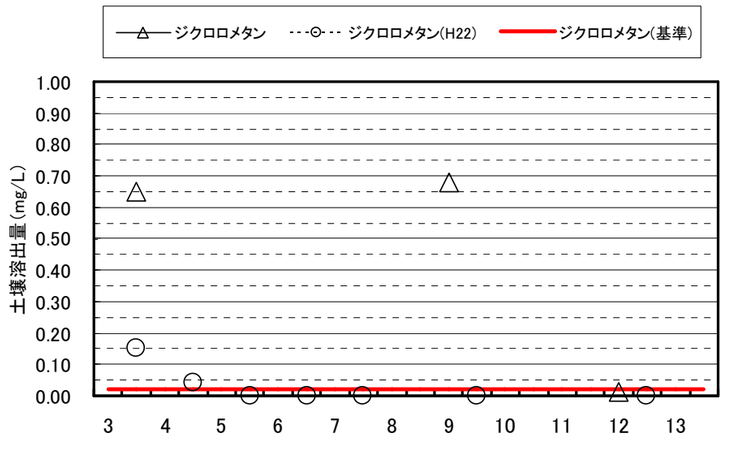


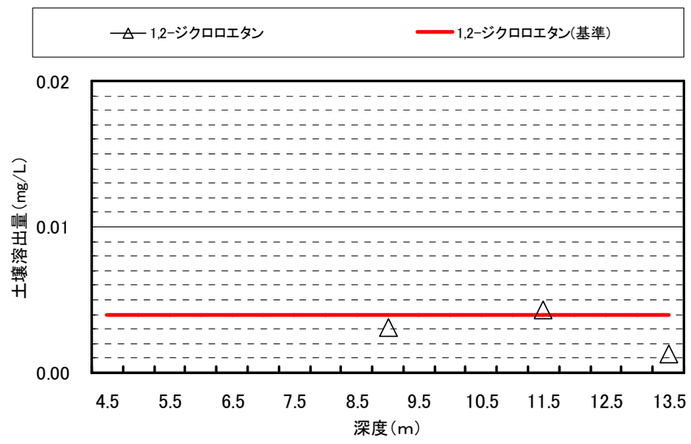
（注）1,2-ｼﾞｸﾛﾛｴﾁﾚﾝはｼｽ型とﾄﾗﾝｽ型の合計を示す。

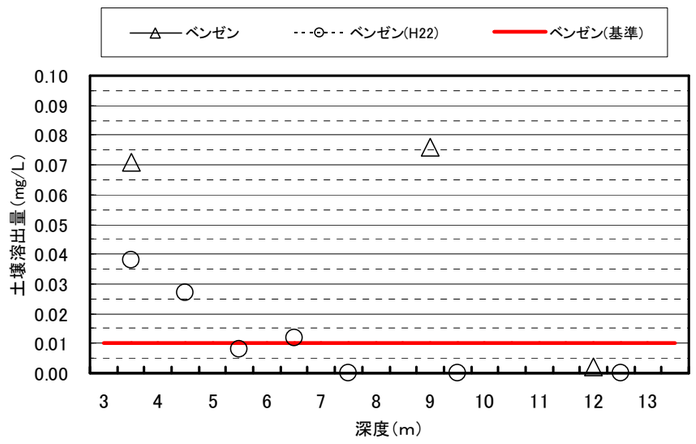
図 3.1.14(1)　公定法分析結果の比較（LG15）

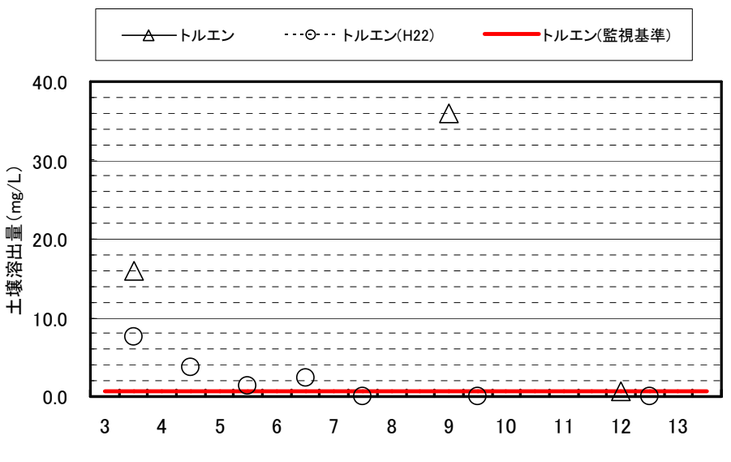


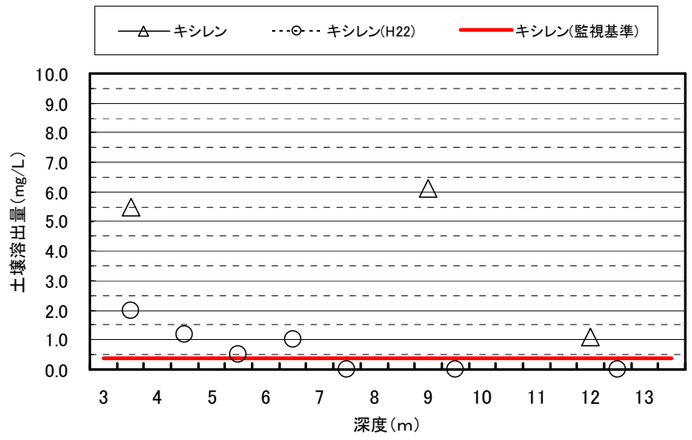


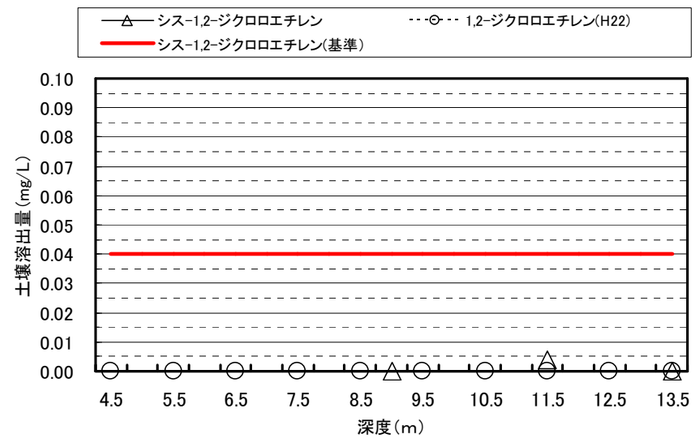


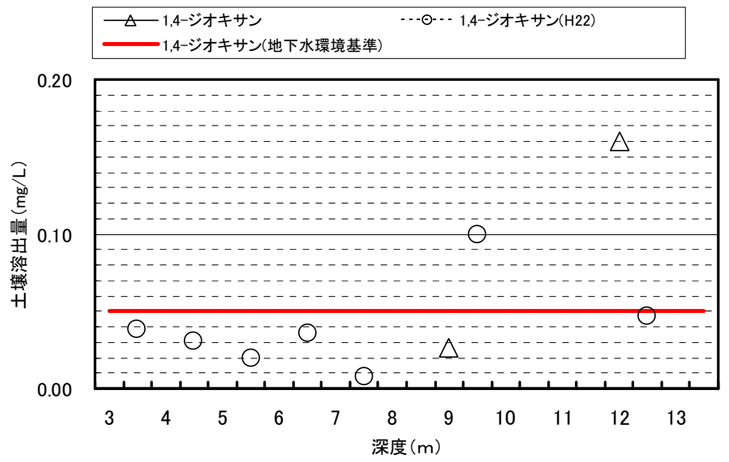












（注）1,2-ｼﾞｸﾛﾛｴﾁﾚﾝはｼｽ型とﾄﾗﾝｽ型の合計を示す。

図 3.1.14(2)　公定法分析結果の比較（LG16）

H22 年度
（三重県資料）

ボーリング柱状図

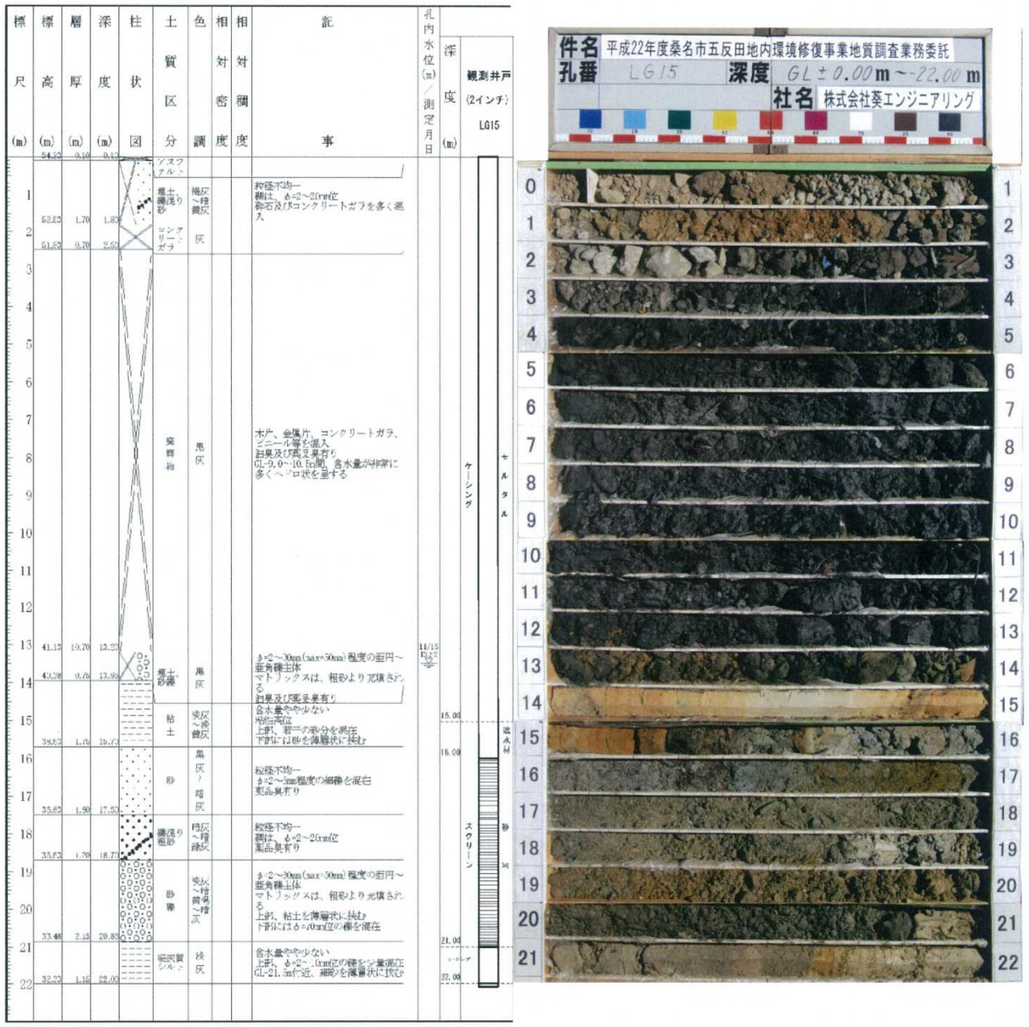
調査名　平成22年度桑名市五反田地内環境修復事業地質調査業務委託

ボーリングNo.

事業・工事名

シートNo.

ボーリング名	LG15	調査位置	三重県桑名市大字五反田字多々屋1700番			北緯	
発注機関	三重県環境森林部廃棄物対策室			調査期間	平成 22年 11月 8日 ～ 22年 11月 12日	東経	
調査業者名	株式会社基エンジニアリング 電話（059-336-3200）	主任技師	立松日出夫	現場代理人	立松日出夫	コア鑑定者	松本弘成	ボーリング責任者	石田雅彦
孔口標高	b4.330m	角度	180°上 90° 下 0°	方向	北 0° 西 270° 90° 東 180° 南	地盤勾配	水平 0° 鉛直 90°	使用機種	試錐機	ECO－3V	ハンマー落下用具	バイソレーションMB3AK692
総掘進長	22.00m								エンジン	4気筒ディーゼル	ポンプ	



H23 年度
（本研究データ）

ボーリング柱状図

調査名

ボーリングNo. LG15

事業・工事名

シートNo.

ボーリング名	LG15	調査位置					北緯	
発注機関	株式会社環境総合テクノス			調査期間	平成23年11月15日～23年11月15日		東経	
調査業者名	株式会社地盤試験所 電話（03-5600-2911）	主任技師		現場代理人	山本 伊作	コア鑑定者	嘱志田 尚志	ボーリング責任者	嘱志田 尚志
孔口標高		角度	180°上 90° 下 0°	方向	北 0° 西 270° 90° 東 180° 南	地盤勾配	水平 0° 鉛直 90°	使用機種	試錐機	Geoprobe社製 66DT	ハンマー落下用具	－
総掘進長	14.30m								エンジン	－	ポンプ	－

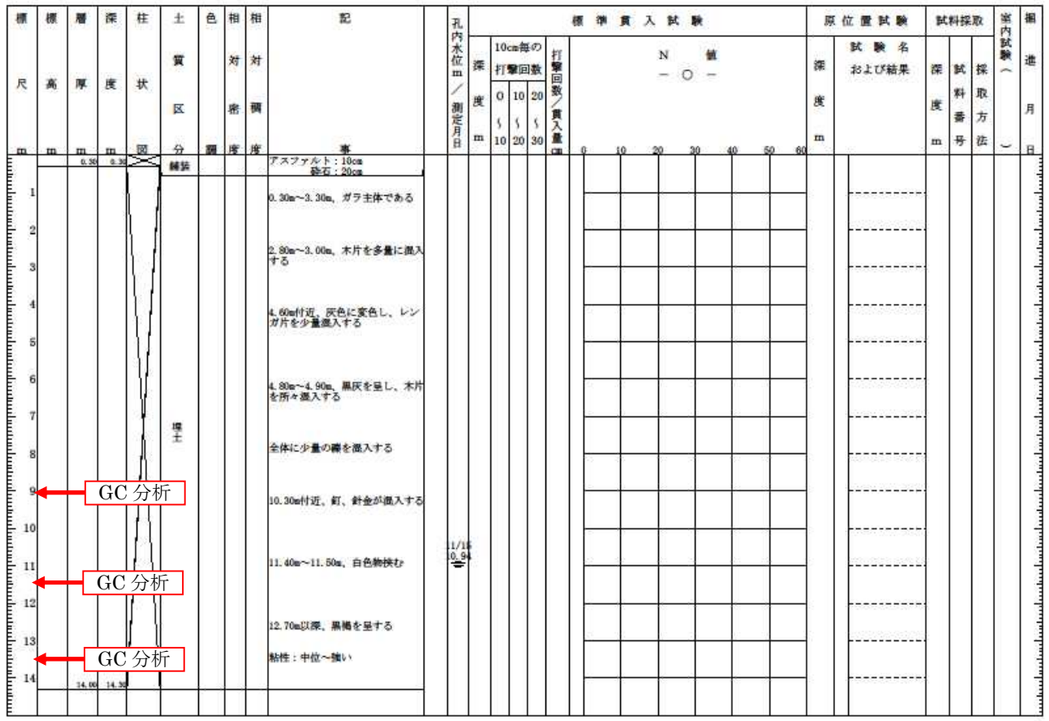


図 3.1.15(1)　柱状図の比較（LG15）

ボーリング柱状図

H22 年度
（三重県資料）

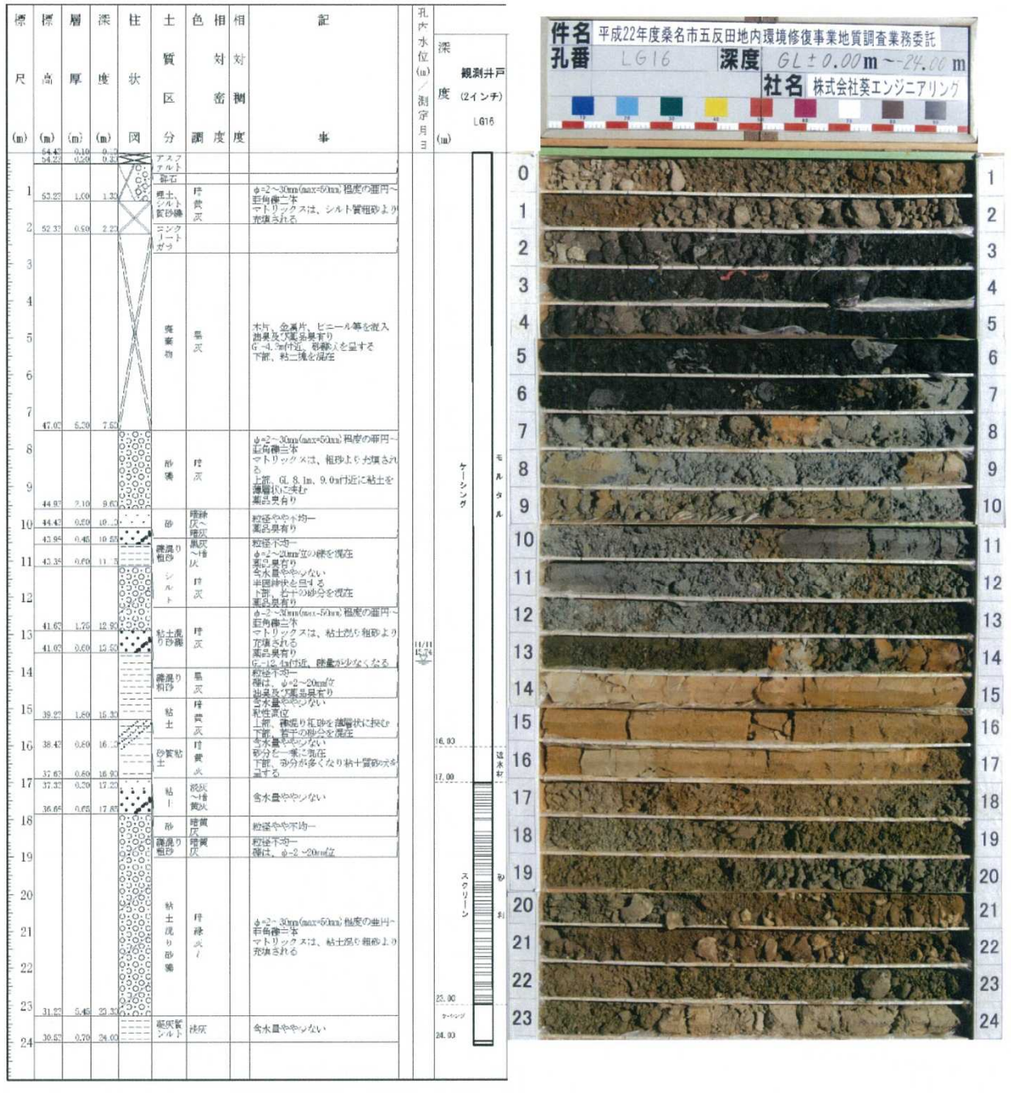
調査名　平成22年度桑名市十反田地内環境修復事業地質調査業務委託

ボーリングNo.

事業・工事名

シートNo.

ボーリング名	LG16	調査位置	三重県桑名市大字五反田字多々屋1700番		北緯		
発注機関	三重県環境森林部廃棄物対策室		調査期間	平成 22年 11月 1日 ～ 22年 11月 5日	東経		
調査業者名	株式会社英エンジニアリング 電話（059-336-3200）	主任技師	立松日出大	現場代理人	立松日出大	コア鑑定者	松本弘成	ボーリング責任者	石田雅彦
孔口標高	54.550m	角度	180° 上 90° 下 0°	方向	北 0° 西 270° 90° 東 180° 南	地盤勾配	水平 0° 鉛直 90°	使用機種	試錐機	ECO－3V	ハンマー落下用具	パイブレーションMB3AK692
総掘進長	24.00m								エンジン	4気筒ディーゼル	ポンプ	



ボーリング柱状図

H23 年度
（本研究ﾃﾞｰﾀ）

調査名

ボーリングNo. LG16

事業・工事名

シートNo.

ボーリング名	LG16	調査位置			北緯		
発注機関	株式会社環境総合テクノス			調査期間	平成23年11月14日～23年11月14日	東経	
調査業者名	株式会社地盤試験所 電話（03-5600-2911）	主任技師		現場代理人	山本 伊作	コア鑑定者	鴨志田 尚志	ボーリング責任者	鴨志田 尚志
孔口標高		角度	180° 上 90° 下 0°	方向	北 0° 西 270° 90° 東 180° 南	地盤勾配	水平 0° 90°	使用機種	試錐機	Geoprobe社製 66DT	ハンマー落下用具	－
総掘進長	13.80m								エンジン	－	ポンプ	－

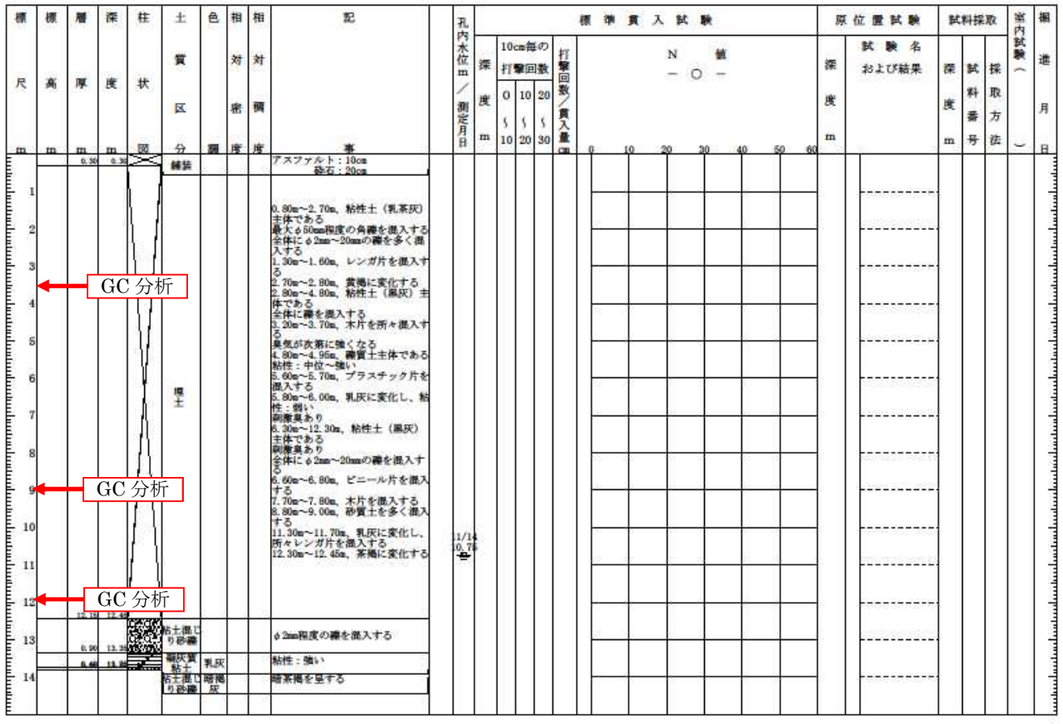


図 3.1.15(2)　柱状図の比較（LG15）

2) 検出された物質

表 3.1.6 に分析項目と公定法および新 MIP-CPT システムにおいて検出された物質を示す。表 3.1.7 に LG15、LG16 の試験結果を示す。

表 3.1.6 に示すとおり、LG15 においては、公定法により検出された 8 物質のうち、新 MIP-CPT システムによるガス分析で検出されなかった物質は 2 物質（1,2-ジクロロエタン、シス-1,2-ジクロロエチレン）であった。これらの物質は LG16 では検出されている。LG16 においては両法で検出された物質は同一で 9 物質であった。

公定法による分析に比べて、新 MIP-CPT システムによるガス分析では、微量の VOC 成分の分析が未検出となり定量できていない。

表 3.1.6　検出された物質

公定法分析項目	地点	公定法において検出された物質	新 MIP-CPT システムにおいて検出された物質
四塩化炭素 TCE PCE ジクロロメタン 1,2-ジクロロエタン 1,1-ジクロロエチレン シス-1,2-ジクロロエチレン 1,3-ジクロロプロペン 1,1,1-トリクロロエタン 1,1,2-トリクロロエタン ベンゼン トルエン キシレン 1,4-ジオキサン	LG15	PCE、 ジクロロメタン、 1,2-ジクロロエタン、 ベンゼン、 トルエン、 キシレン、 シス-1,2-ジクロロエチレン、 1,4-ジオキサン 以上 8 物質	PCE、 ジクロロメタン、 ベンゼン、 トルエン、 キシレン、 1,4-ジオキサン 以上 6 物質
	LG16	TCE、 PCE、 ジクロロメタン、 1,2-ジクロロエタン、 シス-1,2-ジクロロエチレン、 ベンゼン、 トルエン、 キシレン、 1,4-ジオキサン 以上 9 物質	TCE、 PCE、 ジクロロメタン、 1,2-ジクロロエタン、 シス-1,2-ジクロロエチレン、 ベンゼン、 トルエン、 キシレン、 1,4-ジオキサン 以上 9 物質

表 3.1.7(1)　VOC 各成分の分析結果（LG15）

[公定法による土壌溶出量の深度分布]

項目	深度（m）		
	9	11.5	13.5
TCE	－	－	－
PCE	0.036	0.0005	－
ジクロロメタン	0.036	0.003	0.047
1,2-ジクロロエタン	0.0031	0.0043	0.0013
ベンゼン	0.060	0.040	0.023
トルエン	6.8	4.6	1.9
キシレン	3.1	3.4	1.4
シス-1,2-ジクロロエチレン	－	0.004	－
1,4-ジオキサン		0.043	

（注）ハッチングは新 MIP-CPT システムでも検出された項目・深度を示す。
　　－は定量下限値未満を示す。

[新 MIP-CPT 法によるガス濃度の深度分布]

項目	深度（m）		
	9	11.5	13.5
TCE	－	－	－
PCE	0.012	－	－
ジクロロメタン	－	0.048	0.070
1,2-ジクロロエタン	－	－	－
ベンゼン	0.033	0.034	0.025
トルエン	6.2	2.9	2.0
キシレン	5.8	1.8	2.0
シス-1,2-ジクロロエチレン	－	－	－
1,4-ジオキサン	－	0.66	－

（注）－は定量下限値未満を示す。

表 3.1.7(2)　VOC 各成分の分析結果（LG16）

[公定法による土壌溶出量の深度分布]

項目	深度（m）		
	3.5	9	12
TCE	0.014	0.025	0.008
PCE	0.18	0.17	0.058
ジクロロメタン	0.65	0.68	0.014
1,2-ジクロロエタン	0.048	0.0050	－
ベンゼン	0.071	0.076	0.002
トルエン	16	36	0.66
キシレン	5.5	6.1	1.1
シス-1,2-ジクロロエチレン	0.006	0.007	0.007
1,4-ジオキサン		0.026	0.16

（注）ハッチングは新 MIP-CPT システムでも検出された項目・深度を示す。

－は定量下限値未満を示す。

[新 MIP-CPT 法によるガス濃度の深度分布]

項目	深度（m）		
	3.5	9	12
TCE	0.026	0.009	－
PCE	0.032	0.10	0.006
ジクロロメタン	0.5	0.016	－
1,2-ジクロロエタン	0.032	－	－
ベンゼン	0.043	0.040	－
トルエン	12.2	23.2	3.8
キシレン	5.7	11.1	2.4
シス-1,2-ジクロロエチレン	0.026	－	－
1,4-ジオキサン	－	－	0.14

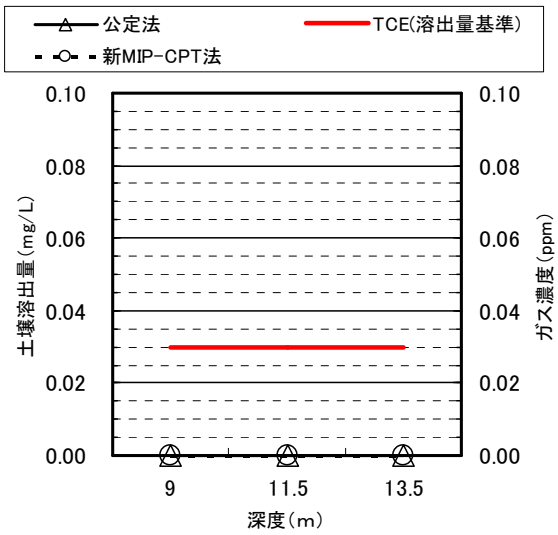
（注）

－は定量下限値未満を示す。

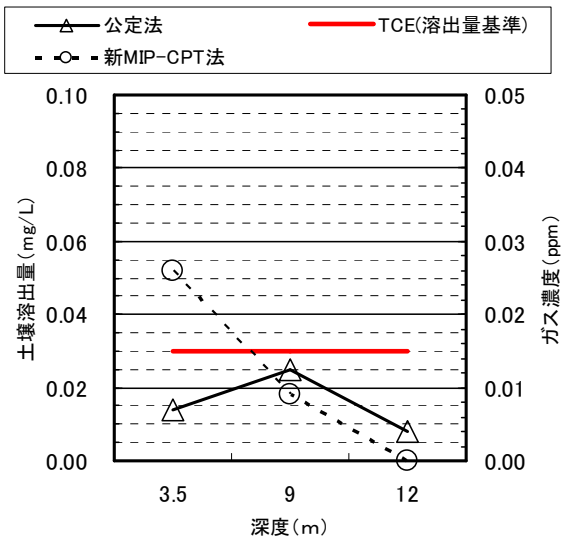
3) 深度分布の比較

公定法の深度分布との比較を図 3.1.16 に示す。図の縦軸は、公定法が土壌溶出量（mg/L）を、新 MIP-CPT システムがガス濃度（ppm）を示す。深度による濃度変動は同様の傾向を示していた。

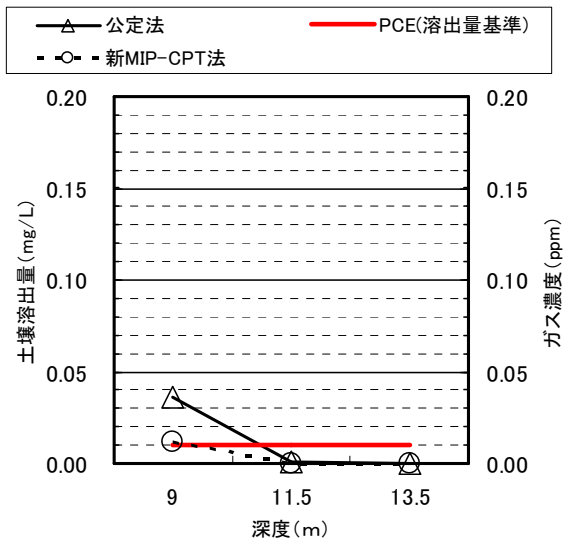
LG15-TCE



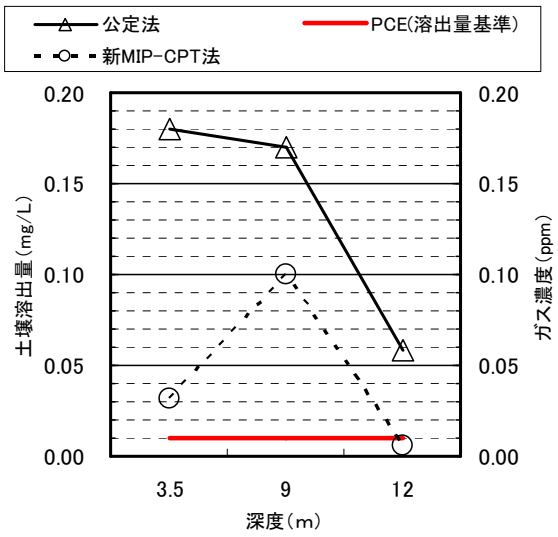
LG16-TCE



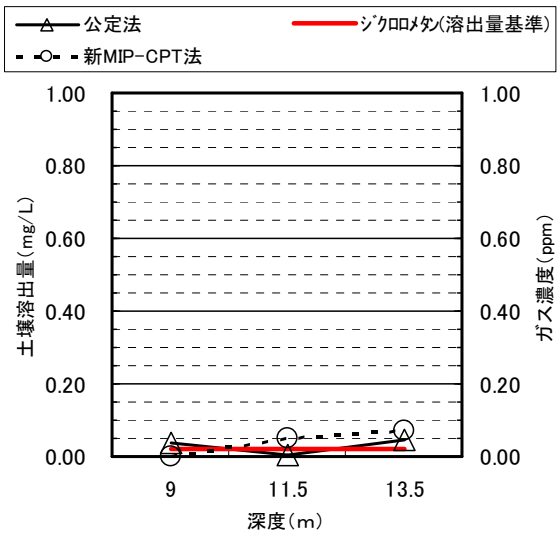
LG15-PCE



LG16-PCE



LG15-ジクロロメタン



LG16-ジクロロメタン

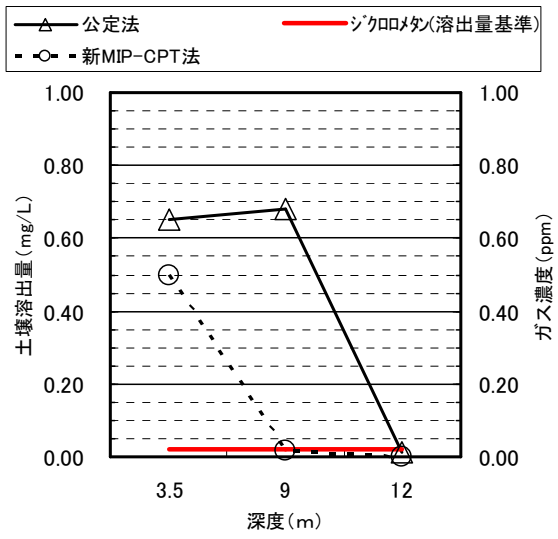
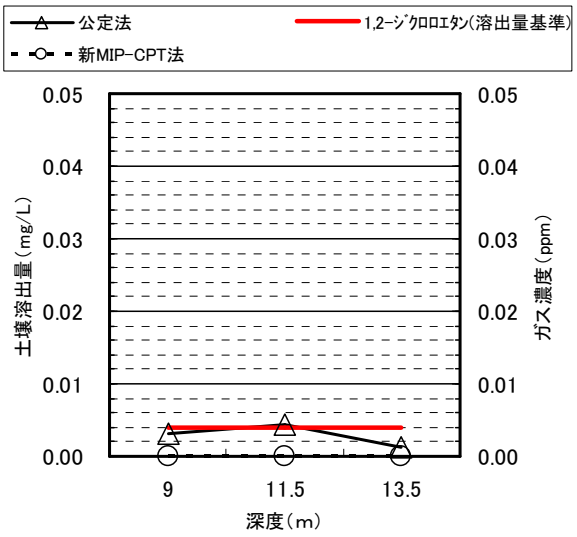
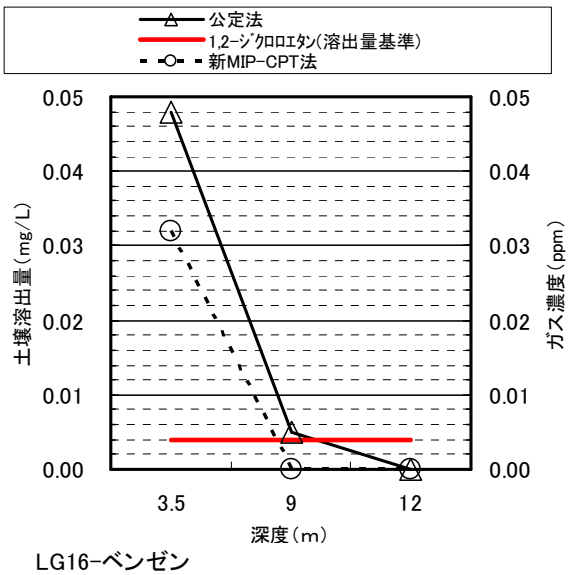


図 3.1.16(1)　VOC 各物質毎の深度比較

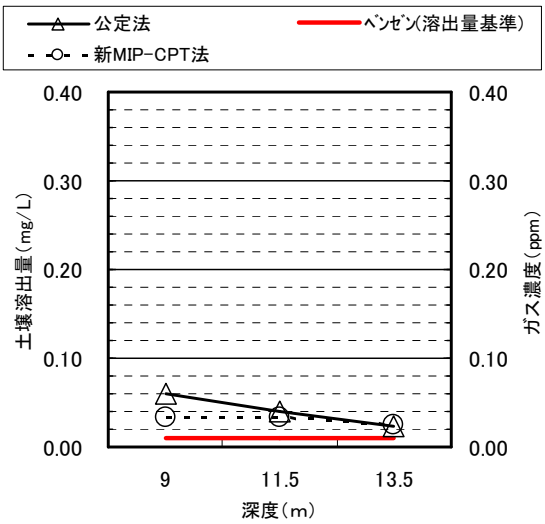
LG15-1,2-ジクロロエタン



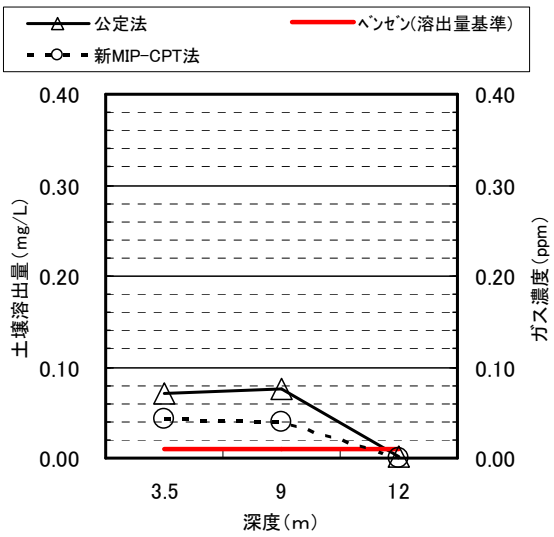
LG16-1,2-ジクロロエタン



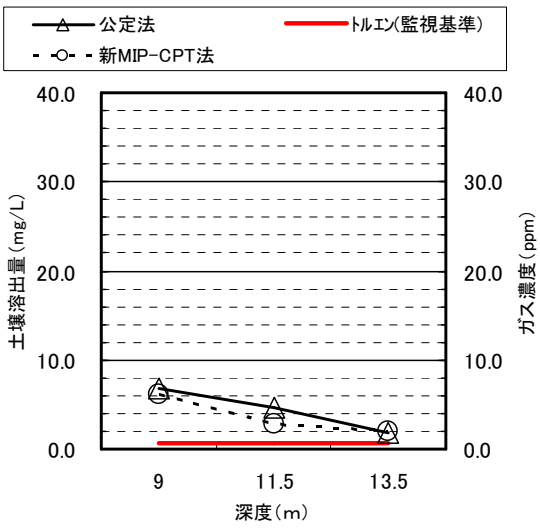
LG15-ベンゼン



LG16-ベンゼン



LG15-トルエン



LG16-トルエン

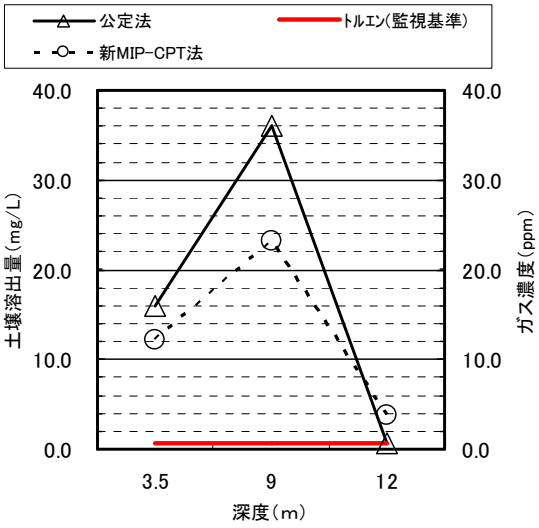
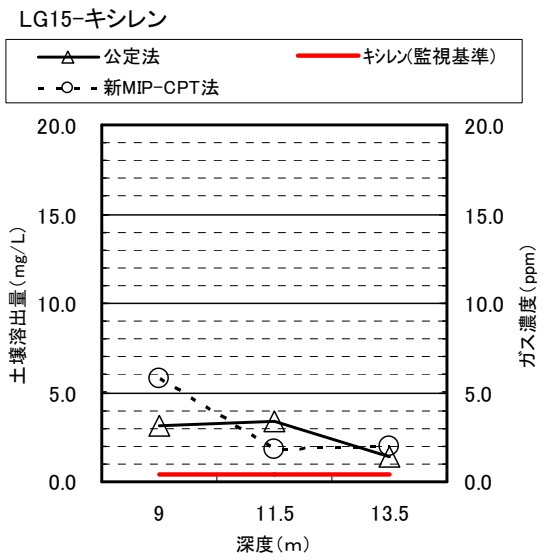
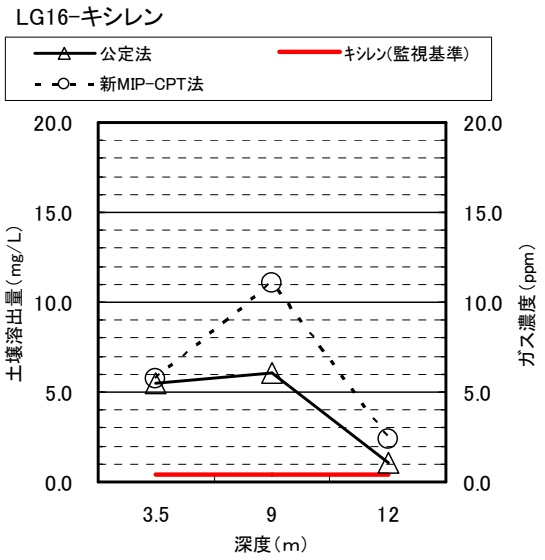
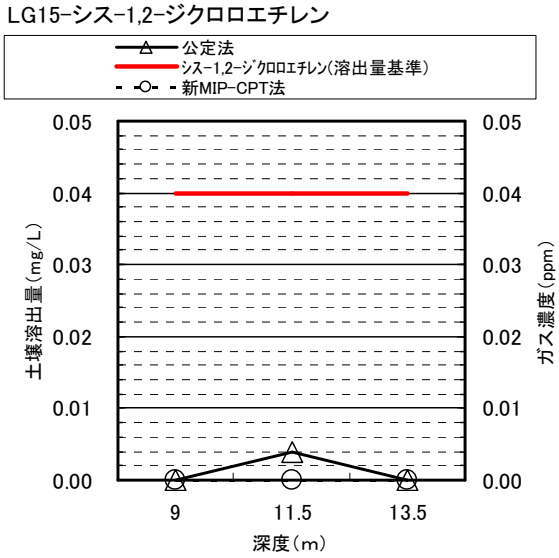
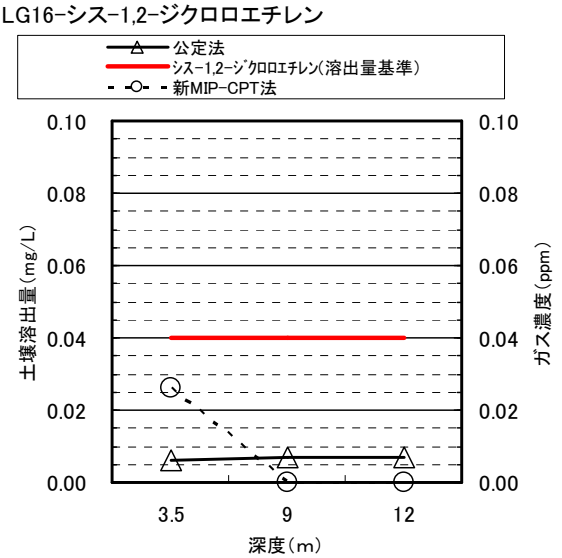


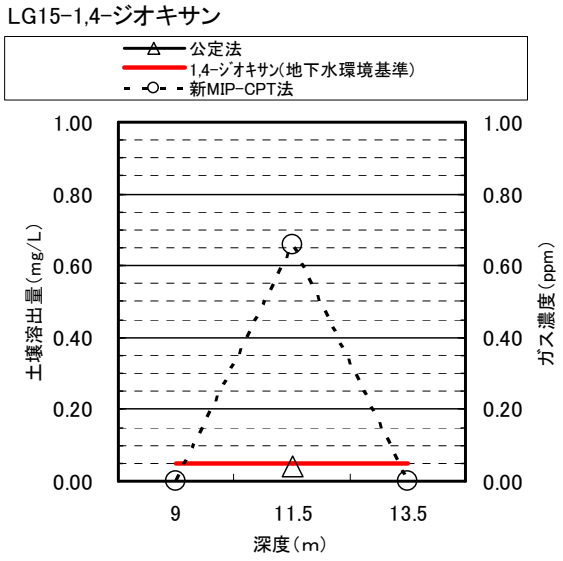
図 3.1.16(2)　VOC 各物質毎の深度比較











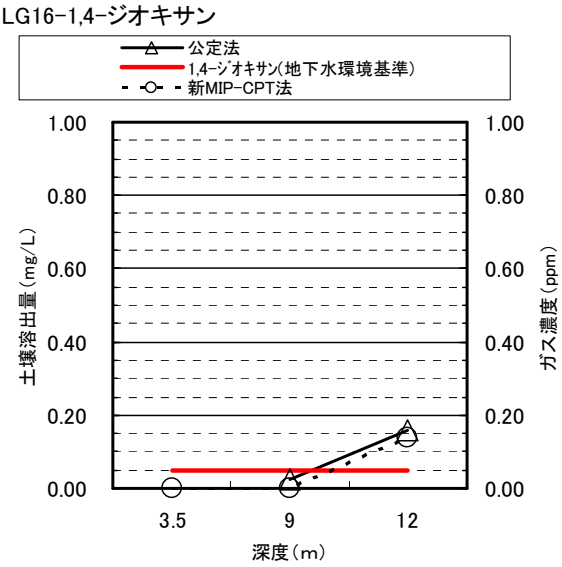


図 3.1.16(3)　VOC 各物質毎の深度比較

(3) 考察

新 MIP-CPT システムにおけるガス分析では、公定法の溶出試験で検出された VOC は概ね検出できたが、土壌溶出量が低濃度の場合に未検出となる場合もあった。したがって、新 MIP-CPT システムを使用した実際の現場において、各地点の VOC による土壌汚染の原因物質を大まかに特定することができる。また、深度方向の濃深度分布についても、相対的に把握できると思われる。

しかしながら、さらに正確な濃度変動を把握するため、以下の検討が必要と思われる。

現地試験においては、コーン貫入を停止させ、新 MIP-CPT センサーの出力変化をリアルタイムにモニタリングしながら、出力がピークとなるタイミングをねらってガス分析を実施した。しかしながら、ヒータ部の加熱によりその周辺の土壌中の VOC の急速な気化が開始するため、ガス分析のタイミングが遅れるほど VOC 濃度が小さくなると考えられる。すなわち、どのタイミングでガス分析を実施するかにより、検出される VOC の種類や濃度が変動する可能性が考えられる。

メンブレンが所定深度に到達後 5 分間の新 MIP-CPT 法によるセンサー出力変動（FID、PID、DELCD）を図 3.1.17 に示す。図中の「ガス到達」はコーンが所定深度到達後、吸入されたガスが地上の計測器に到達した時点（約 90 秒後）を、「100℃」はヒータ部温度が 100℃に到達した時点のガスが地上の計測器に到達した時点を、「GC 分析」はガス分析した時点を示す。100℃到達後のセンサー出力は変動しており、ガス分析のタイミングにより沸点の異なる VOC 各物質の濃度が変化することが考えられる。

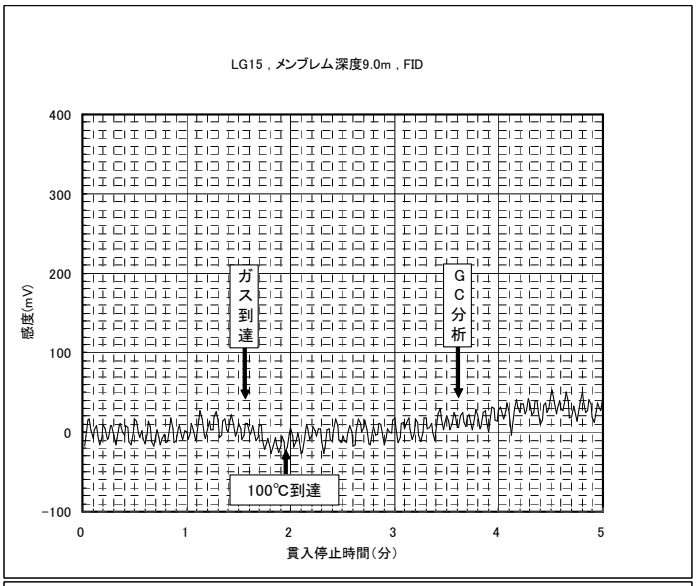
現地試験の各深度におけるガス分析のタイミングを表 3.1.8 にまとめたが、100℃到達の直後から約 2 分後までかなり時間の幅があった。

表 3.1.8　ガス分析のタイミング

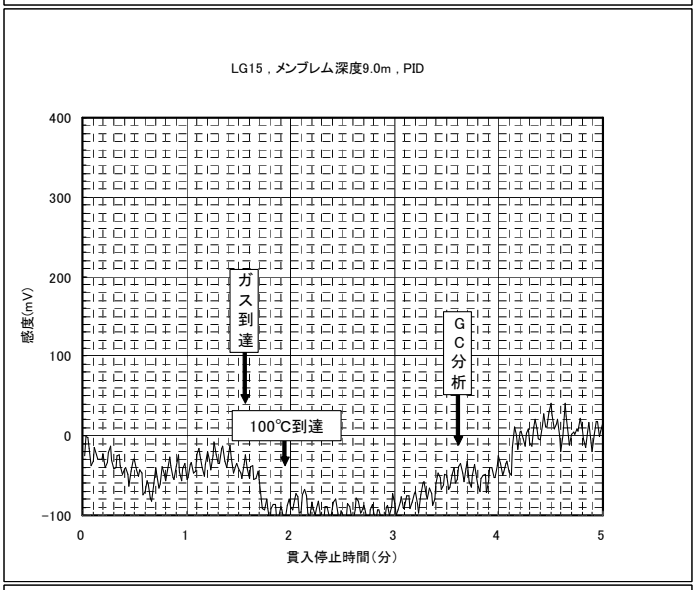
ガス分析位置		100℃到達後 ガス分析までの時間
LG15	9.0m	2 分 7 秒後
	11.5m	1 分 4 秒後
	13.5m	1 秒後
LG16	3.5m	2 分 5 秒後
	9.0m	58 秒後
	12.0m	58 秒後

なお、室内実験によると、トルエンまたは沸点の低いジクロロメタンの入った水溶液にヒータ温度が 100℃に到達したセンサーを漬けた場合、トルエン、ジクロロメタンの両物質ともに、ガス流速に関わりなく、約 20 秒で最大出力信号が出た後、出力信号が急激に減少していた。水中では、ヒータ周辺の VOC が揮発しても新たに液が供給されるため、VOC 成分がなくなるまである程度の時間がかかるが、土壌中では、揮発してしまう時間は水中より早いと思われる。土壌汚染の状況をさらに正確に把握するためには、土壌中のガス分析のタイミングの影響について、今後検討していく必要がある。

FID



PID



DELCD

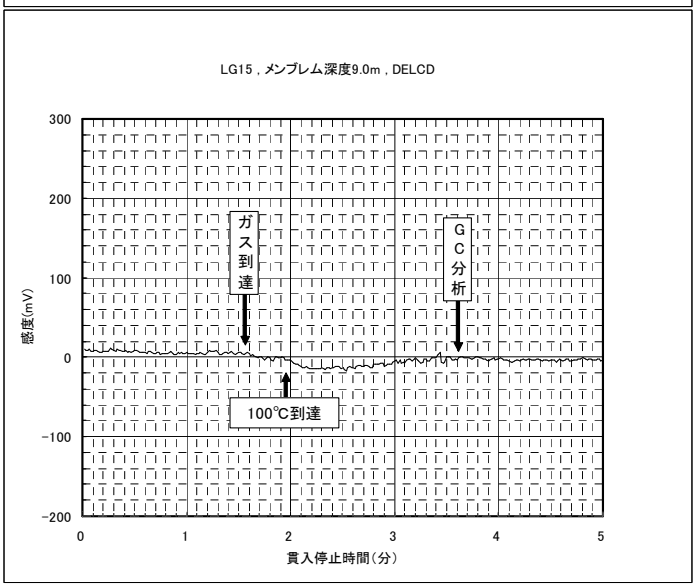
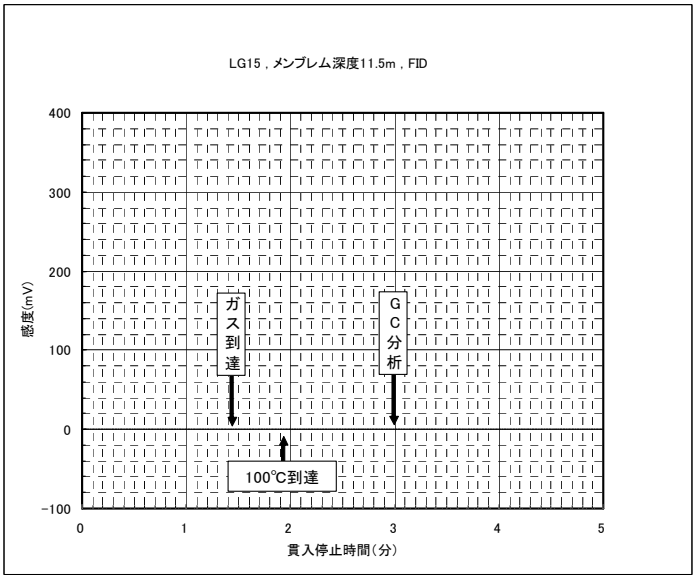
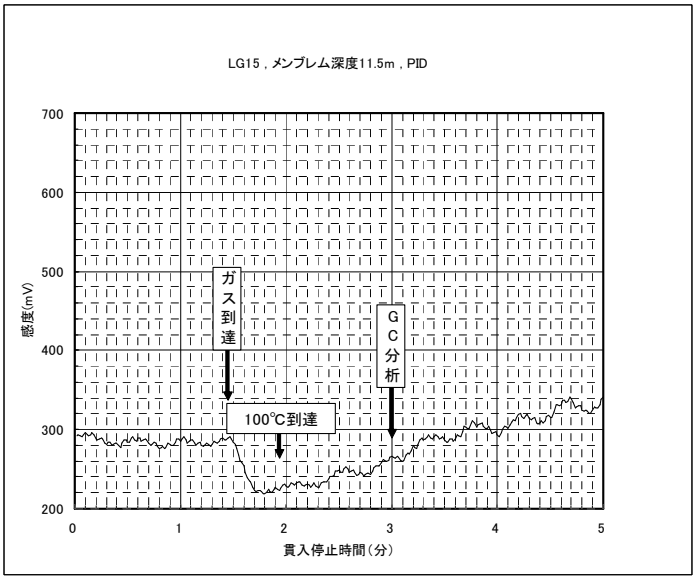


図 3.1.17(1)　MIP-CPT 出力変動と GC 分析位置（LG15、深度 9.0m）

FID



PID



DELCD

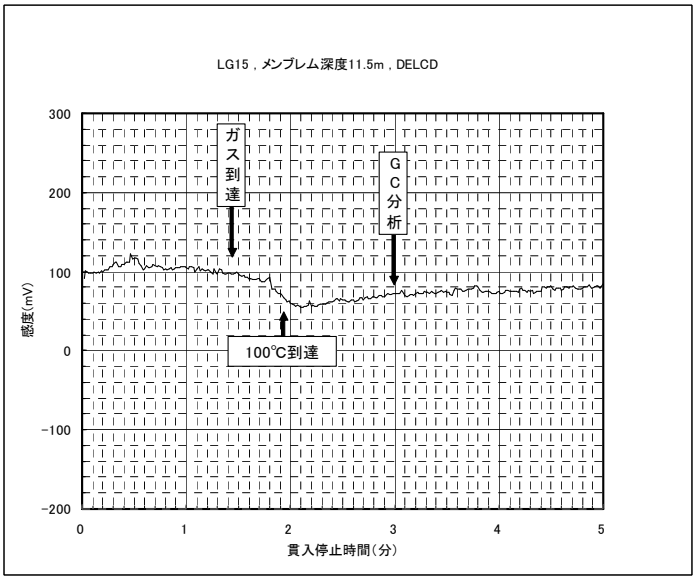
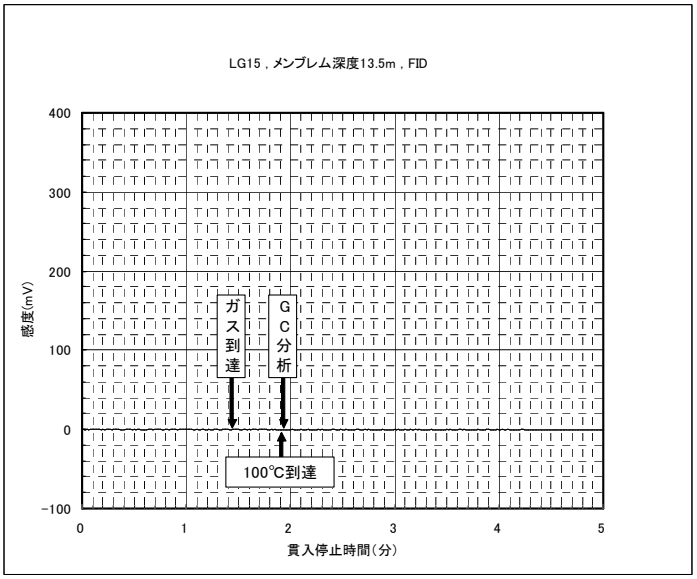
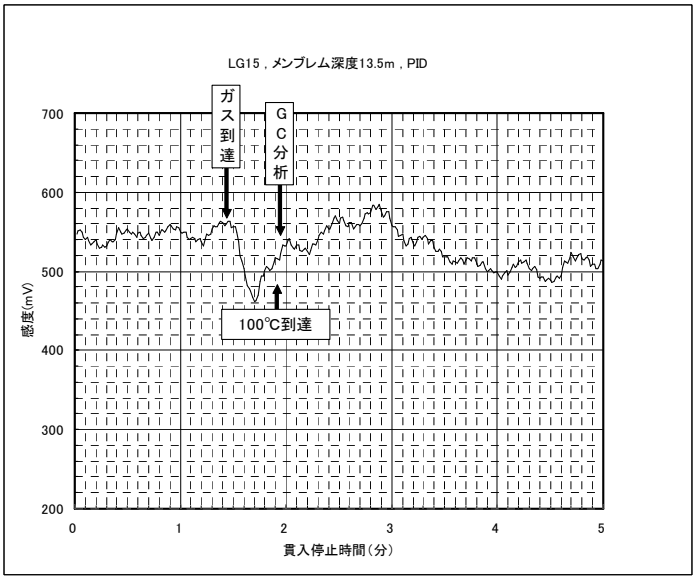


図 3.1.17(2)　MIP-CPT 出力変動と GC 分析位置（LG15、深度 11.5m）

FID



PID



DELCD

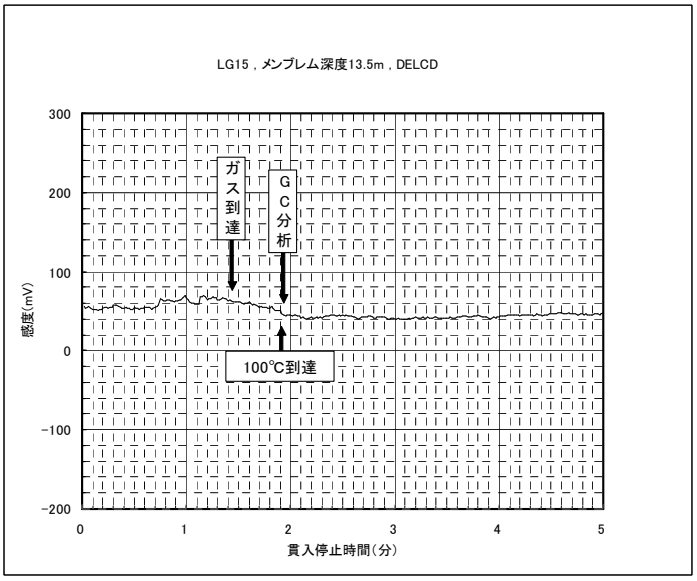
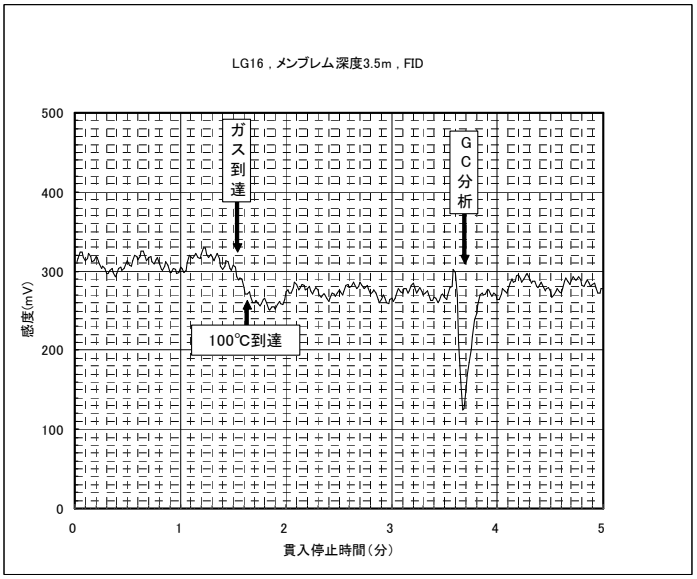
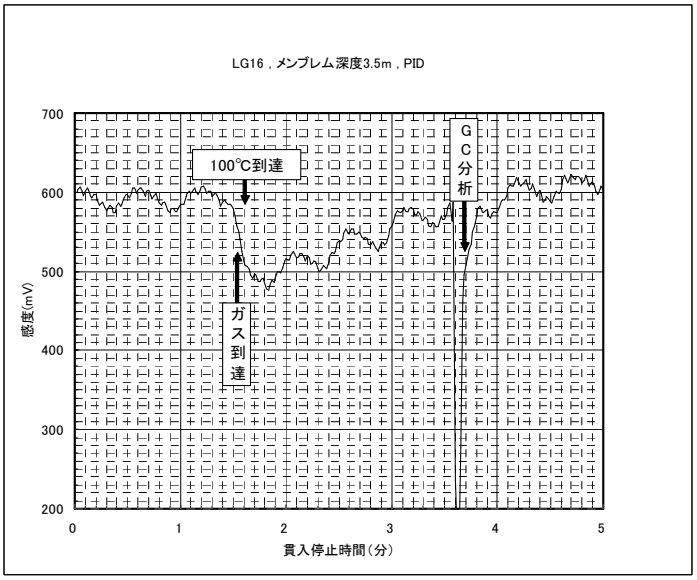


図 3.1.17(3)　MIP-CPT 出力変動と GC 分析位置（LG15、深度 13.5m）

FID



PID



DELCD

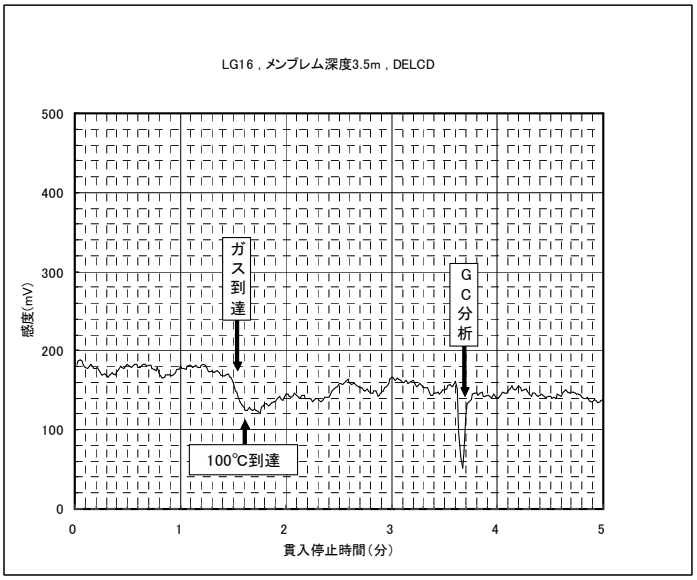
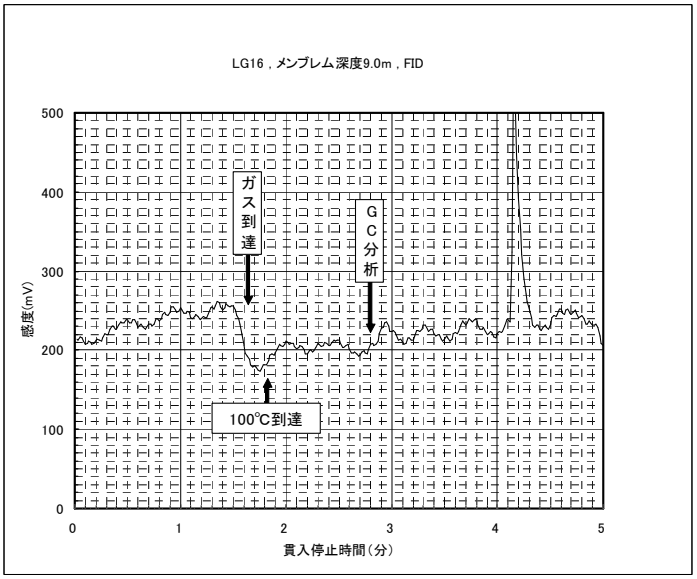
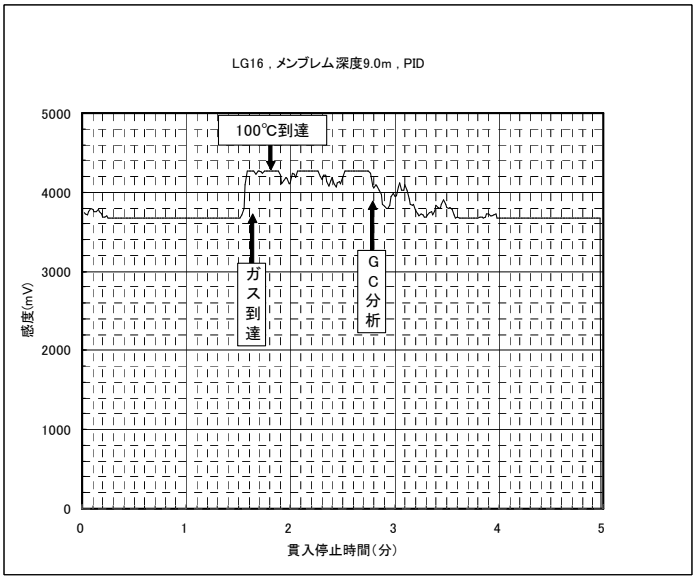


図 3.1.17(4)　MIP-CPT 出力変動と GC 分析位置（LG16、深度 3.5m）

FID



PID



DELCD

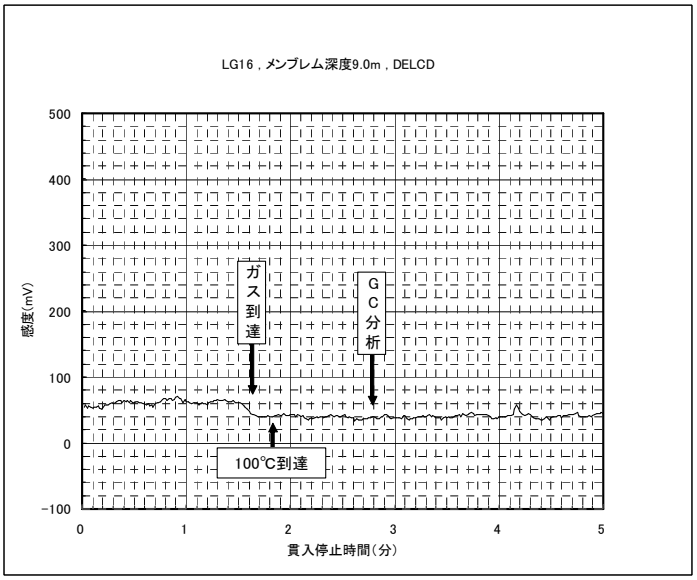
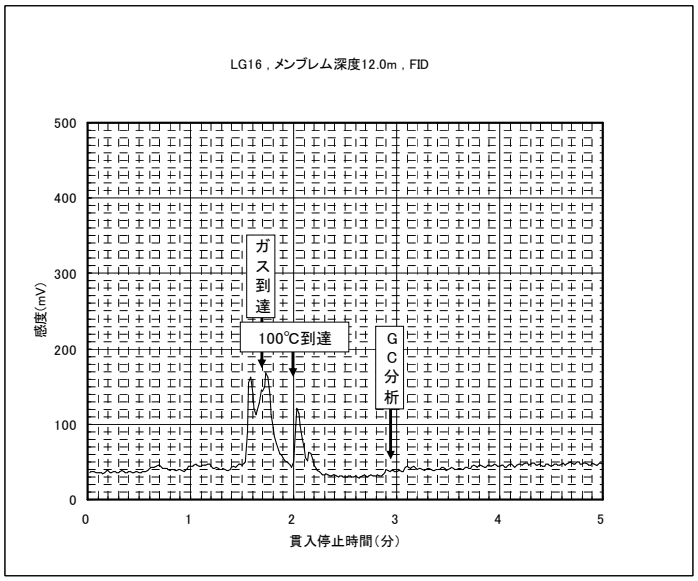
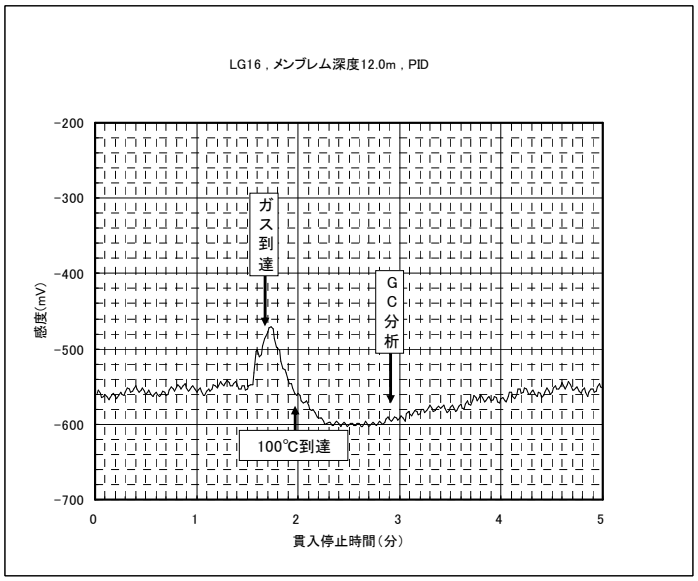


図 3.1.17(5)　MIP-CPT 出力変動と GC 分析位置（LG16、深度 9.0m）

FID



PID



DELCD

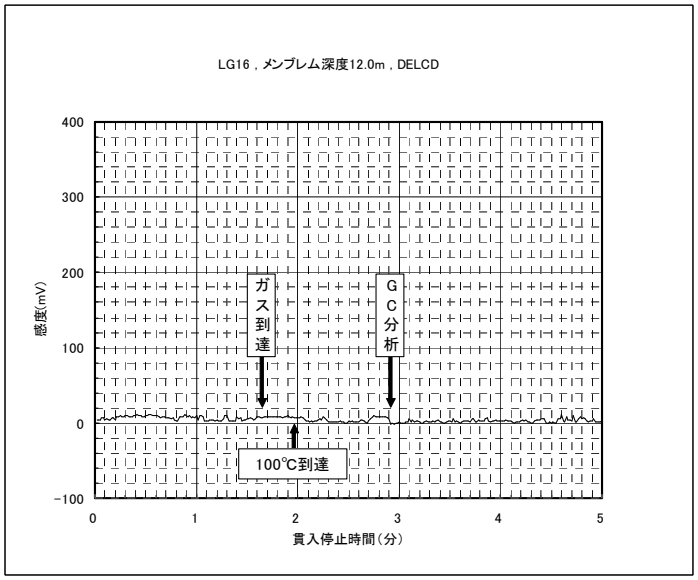


図 3.1.17(6)　MIP-CPT 出力変動と GC 分析位置（LG16、深度 12.0m）

3.1.4　調査法研究の結論

平成 22 年度の研究では、VOC の検出感度が低いことが課題として明らかとなり、これは、コーンヒータ部周辺で気化した VOC ガスは、分析機器までのキャリアガスラインの間で冷やされ、ガスライン中で凝縮や吸着を起こしていると考えられた。平成 23 年度の研究では、VOC の凝縮及び吸着を防ぐため、キャリアガスラインをテフロン管からステンレス管に変更し、そのライン全体を 100℃で加熱保温する新たなシステムを開発し、現地試験を実施した。

試験位置は H22 年度に実施した 3 ヶ所の内、2 ヶ所（LG15、LG16 ）で実施した。同時に近傍（約 50cm 離れた位置）において新たにボーリングによる土壌採取を行い、公定法（土壌溶出量試験）による VOC の分析を実施した。結論は以下のとおり。

・新 MIP-CPT 法では、公定法による分析で土壌溶出量が極く低濃度の場合に未検出となる場合もあったが、対象とした VOC は概ね検出できており、地中の VOC の定性が可能である。
・新 MIP-CPT 法を用いた VOC 濃度の深度分布（3 深度）の調査結果は、公定法での濃度分布とほぼ同様の傾向を示し、深度方向の相対的な深度分布の概略を把握することができる。
・現地試験においては、コーン貫入を停止させ、新 MIP-CPT センサーの出力変化をリアルタイムにモニタリングしながら、出力がピークとなるタイミングをねらってガス分析を実施したが、ヒータ部の温度が上昇するにつれ低沸点の VOC から気化が開始するため、ガス分析のタイミングが遅れるほど VOC の揮発量が大きくなると考えられる。すなわち、どのタイミングでガス分析を実施するかにより、濃度が変動する可能性が考えられる。土壌中のガス分析タイミングの影響については、今後検討していく必要がある。

3.2　浄化法の開発

3.2.1　研究目的

(1)　研究の背景

三重県桑名市内の不法投棄現場における環境修復対策は、廃棄物の全量撤去を行わない方針で「遮水壁による汚染拡散防止」および「揚水循環浄化法による地下水浄化」が採用され、措置が講じられてきた。平成 15 年～平成 19 年度末までの地下水浄化措置により、平成 19 年度末には、遮水壁内外の地下水の VOC 汚染は、目標とした水質基準レベル以下に到達した。その後、平成 20 年に揚水を停止したところ、ベンゼン等一部の物質で濃度の上昇が確認された。

平成 19 年度、遮水壁内の地下水の汚染残留区域に大口径揚水井戸を設置し、その際、廃棄物の溶出試験を実施したところ、高濃度の VOC が検出されたことから、遮水壁内の廃棄物は一様に浄化されておらず、汚染が残留していることが判明した。このことから、地下水の再汚染は、残置した廃棄物及び汚染された土壌に残留する有害物質が原因と考えられた。

そのため、当該場所の今後の管理のあり方を検討するうえで、有害物質が残留する廃棄物及び土壌の除去が必要になると考えられ、廃棄物を掘削した場合、オンサイトで確実に無害化できる簡易で安価な浄化技術が必要となっている。

(2)　汚染土壌浄化技術を適用した場合の課題

高濃度の VOC で汚染された廃棄物や汚染土壌を掘削した場合、有害な産業廃棄物等として処理する必要があるが、オフサイト処理する場合、処理費用が高額であることに加え、運搬・処分に伴う汚染拡散リスクも高い。そのため、オンサイト処理によって VOC 濃度レベルを低減できれば、処理費用及び汚染拡散リスクの低減が期待される。これまでに開発されているオンサイト工法に、石灰混合攪拌工法（揮発性有機塩素化合物で汚染された土壌に生石灰を添加し浄化する工法をホットソイル工法という。）やフェントン法、過硫酸塩等の酸化剤添加による分解法が開発されているが、当該現場の廃棄物及び土壌に適用した場合、pH の変化による金属の溶出や腐植質等有機物の混在による分解阻害の課題がある。

こうした性状を示す処理対象物を対象とした既存の浄化には、中温加熱（200～600℃）や高温加熱（600～800℃）工法が実用化されているが、大規模な設備で広い用地を必要とし、高コストであるという課題がある。

(3)　研究の目的

処理対象物質は、揮発性有機化合物であり、土壌温度を高くすることが、浄化の有効手段である。本サイトで対象としている汚染物質のうち最も高い沸点は、キシレンの 144℃であることから、汚染土を比較的低温の 150～200℃に加熱することで浄化が可能であると考えられる。そこで、pH の変化を伴わない簡易な加熱手法として、熱風送風による方法に着目し、石灰混合攪拌工法で用いる攪拌設備等を活用し、熱風送風機能を付加した回転ドラム及びツイスターの浄化システムを考案した。

本研究では、当該現場の VOC 汚染廃棄物及び汚染土壌の浄化を対象としているが、VOC 汚染土壌に広く適用可能な技術として開発するものであり、実用化に向けた中性域における中低温オ

ンサイト加熱処理工法の基礎技術開発を目的とする。また、実規模装置のコスト試算、浄化コスト試算をおこない、実用化への指針を立てる。図 3.2.1 に既存のホットソイル工法のフロー及び課題、開発する工法の概要を示す。

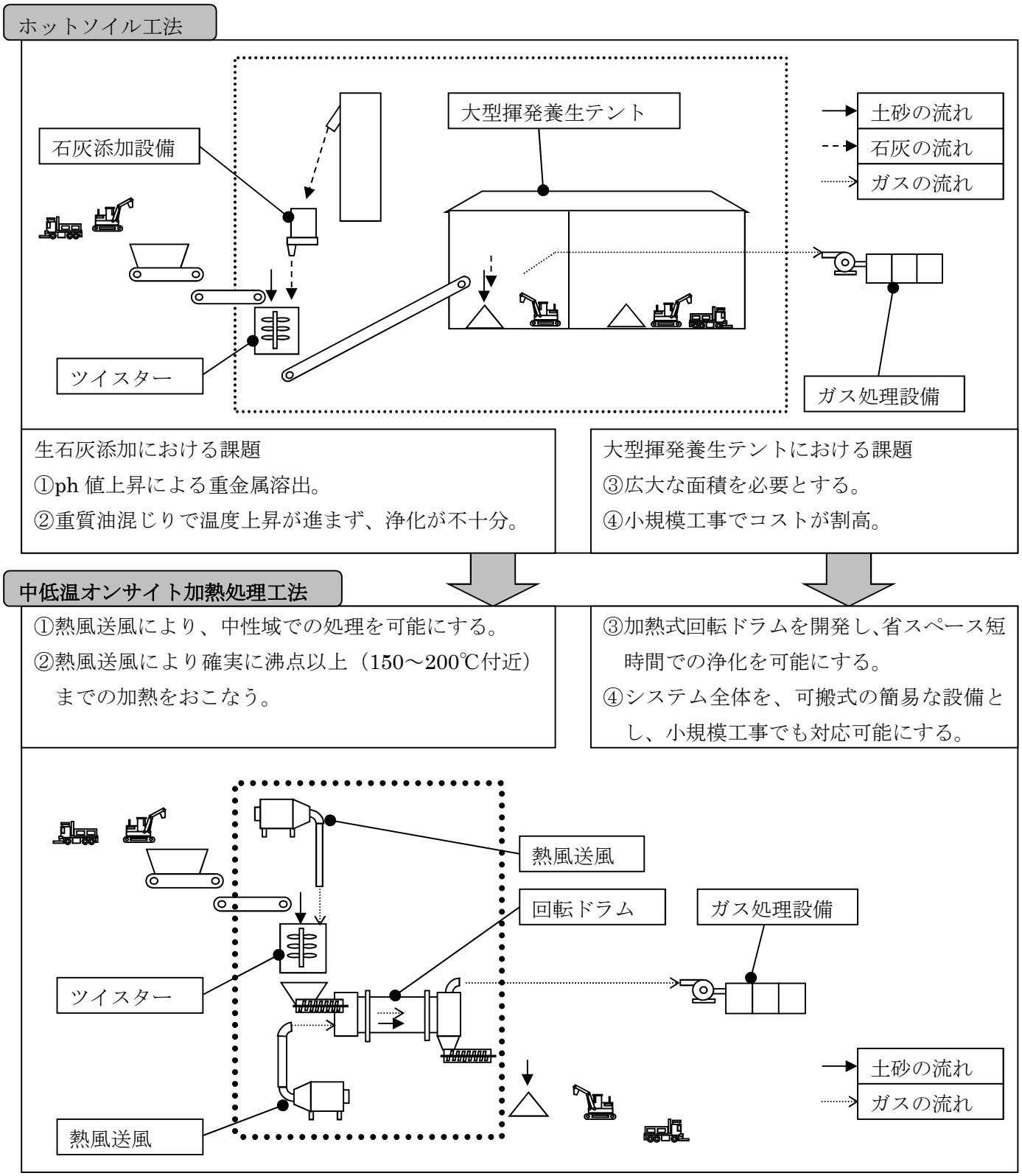


図 3.2.1　開発する工法の概要

図 3.2.2 と表 3.2.1 に本研究で開発する工法の位置付けを示す。開発する工法は、掘削除去のうち、オンサイトでの加熱処理工法に分類される。加熱処理工法としては、低温から高温まで種々の工法が開発され実用化されている。しかし、土壌温度を汚染物質の揮発温度程度まで上昇させる中低温での工法の実用化例は少ない。

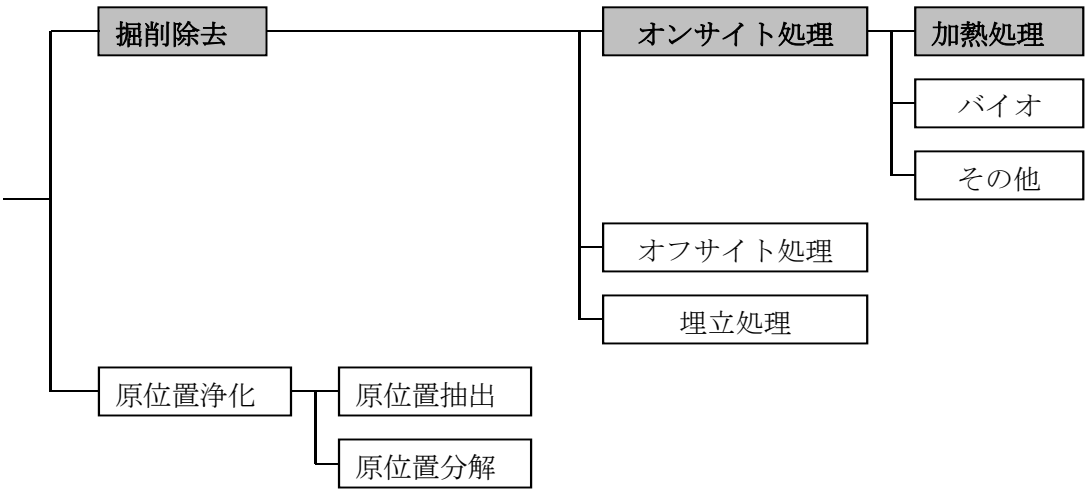


図 3.2.2　VOC 汚染土壌浄化工法の分類

表 3.2.1　掘削除去のうちオンサイト加熱処理の分類

処理方法	土壌温度	加熱方式	実用化状況
燃焼・分解処理	高温 (600～800℃以上)	バーナーの燃焼ガスによる直接加熱	焼成プラント 分解処理プラント
脱着・揮発処理	中温 (200～600℃)	間接加熱	分解処理プラント 揮発処理プラント
	中低温 (100～200℃)	**熱風（燃焼ガスまたは、間接加熱した熱風）**	**中低温オンサイト加熱処理工法**
	低温 (100℃程度)	生石灰の水和反応を用いた加熱	ホットソイル工法

3.2.2　研究方法

本研究の主目的は、加熱式回転ドラムの開発であり、原料の解砕・予熱をおこなうツイスターは、前処理設備と位置づけている。本研究では、まず、ツイスター、回転ドラム単体で加熱試験、浄化試験をおこない、目標温度 150℃以上に達する条件を見出す。その後、ツイスターと回転ドラムを組み合わせた連続的なシステムとし、システムとして加熱試験、浄化確認試験をおこなう。

(1)　ツイスター

1)　試験装置

図 3.2.2 にツイスター試験装置外観、図 3.2.3 にツイスター内部、図 3.2.4 に試験装置系統を示す。ツイスターは、円筒内で高速回転する複数本のフレキシブルなチェーンの打撃力で地盤材料を破砕・細粒化するとともに、添加材料を均一に分散する効果のある破砕・混合装置である。本研究では、円筒直径 = 500mm の試験用ツイスターを使用する。チェーンの回転は、インバータにより任意に設定できる。

熱風発生にはジェットヒータを用い、土砂投入口から、熱風を供給できる構造に改造している。

土砂の供給には、ベルトコンベアを使用する。ベルト上に単位長さ当り均等に土砂を敷き並べ、ベルト速度を変化させることで、供給量を変化させる。ツイスターで破砕・細粒化された土砂は、下部に設置したトレイに受ける。

土砂の含水比測定は、加熱乾燥式水分計を使用する。

各部のガス温度測定は、熱電対を使用し、データロガーを介しパソコンで表示する。

土砂温度測定は、赤外線放射温度計を使用する。図中の青矢印は熱電対設置個所を示す。

図 3.2.3　ツイスター試験装置外観

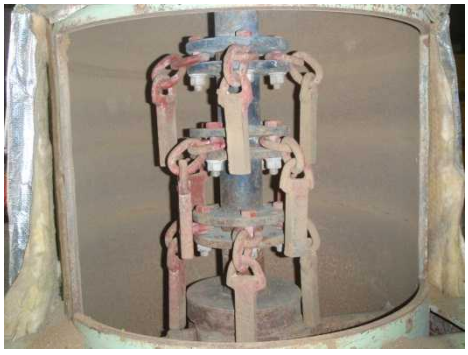


図 3.2.4　ツイスター内部

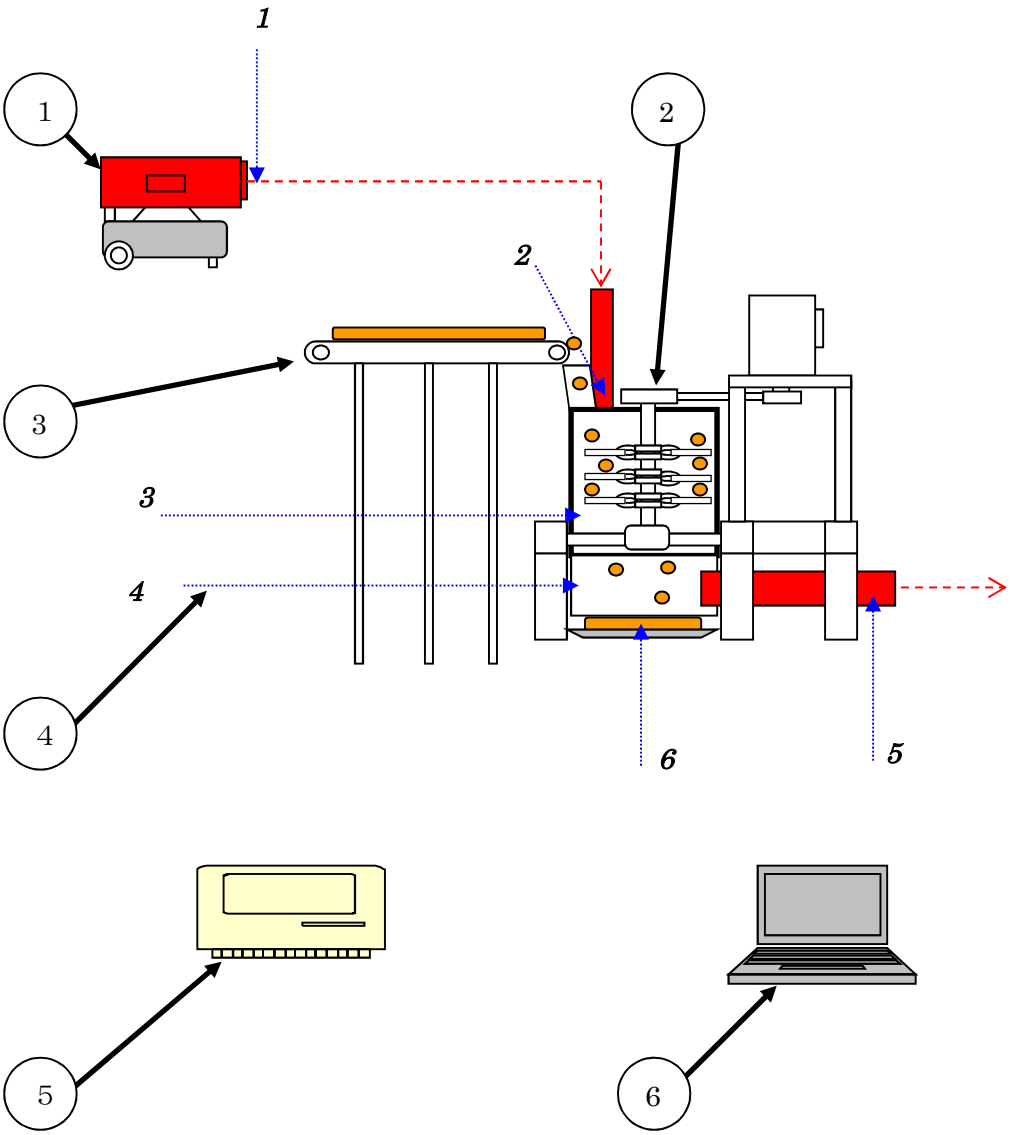


図 3.2.5　試験装置系統

表 3.2.2　試験装置仕様

番号	項目	仕様
①	ジェットヒータ	30,100 kcal/hr
②	ツイスター	直径 =φ500mm、モータ　= 11kW
③	ベルトコンベア	幅 = 100mm、全長 = 4m
④	熱電対	K 熱電対
⑤	データロガー	16ch
⑥	パソコン	

2) 試験内容

表 3.2.3 に試験内容を示す。

表 3.2.3　試験内容

項目	供給材料	内容
a）含水比低下試験	清浄土 A（砂質土） 清浄土 B（粘性土）	ツイスター処理による含水比低下状況を確認する。
b）加熱試験	清浄土 A（砂質土） 清浄土 B（粘性土）	ツイスター内部に熱風を吹き込み、土砂温度上昇、含水比低下状況を確認する。
c）模擬汚染土浄化試験	模擬汚染土 A（砂質土） 模擬汚染土 B（粘性土）	加熱の有無による汚染土浄化効果を確認する。

3) 試験方法

a) 含水比低下試験

表 3.2.4 に含水比低下試験項目を示す。2 種類の土砂について、土砂供給量、チェーン回転数を変化させた時の含水比の変化を測定する。

表 3.2.4　含水比低下試験項目

処理量	回転数
50kg/hr	500rpm
	750rpm
	900rpm
100kg/hr	500rpm
	750rpm
	900rpm
200kg/hr	500rpm
	750rpm
	900rpm

b)　加熱試験

表 3.2.5 に加熱試験項目を示す。ツイスター内部に熱風を吹き込み、2 種類の土砂について土砂供給量、チェーン回転数を変化させた時の土砂温度及び含水比の変化を測定する。

表 3.2.5　加熱試験項目

処理量	回転数
50kg/hr	500rpm
	750rpm
	900rpm
100kg/hr	500rpm
	750rpm
	900rpm
200kg/hr	500rpm
	750rpm
	900rpm

c)　模擬汚染土浄化試験

模擬汚染土の浄化効果は、土砂温度及び含水比に依存すると考えられるため、a)含水比低下試験、b)加熱試験で得られた結果を元に条件を選択する。

(2) 回転ドラム

1) 試験装置

図 3.2.5 に回転ドラム試験装置外観、図 3.2.6 に回転ドラム内部、図 3.2.7 に試験装置系統を示す。回転ドラムは、回転する円筒の中で生石灰を混合した地盤材料を転地返して空気との接触効果を高め、汚染物質の揮発を促進させる設備である。本研究では、新たに熱風吹き込みが可能な構造とした直径 = 700mm×長さ =2.3m の試験用回転ドラムを製作する。

内部に螺旋状のガイドを設置し、ドラムの回転速度を変化させることで土砂の滞留時間を調整できる構造となっている。また、熱風をドラム内全域に送風できるように、内部に吹き出し管を装備している。

熱風発生装置には、簡易で仮設対応可能なジェットヒータを用いる。回転ドラムへの熱風送風は、熱風集合管を介し複数台のジェットヒータから熱風を供給できる構造となっている。

土砂の供給には、スクリュウコンベアを使用する。スクリュウ速度を変化させることで、供給量を変化させる。回転ドラムで処理された土砂は、出口に設置したトレイに受ける。

含水比測定、温度測定には、ツイスターにおける試験と同様の機器を用いる。図中の青矢印は、熱電対設置個所を示し、データロガーを介し、パソコンで温度表示する。

図 3.2.6 回転ドラム試験装置外観

図 3.2.7 回転ドラム内部

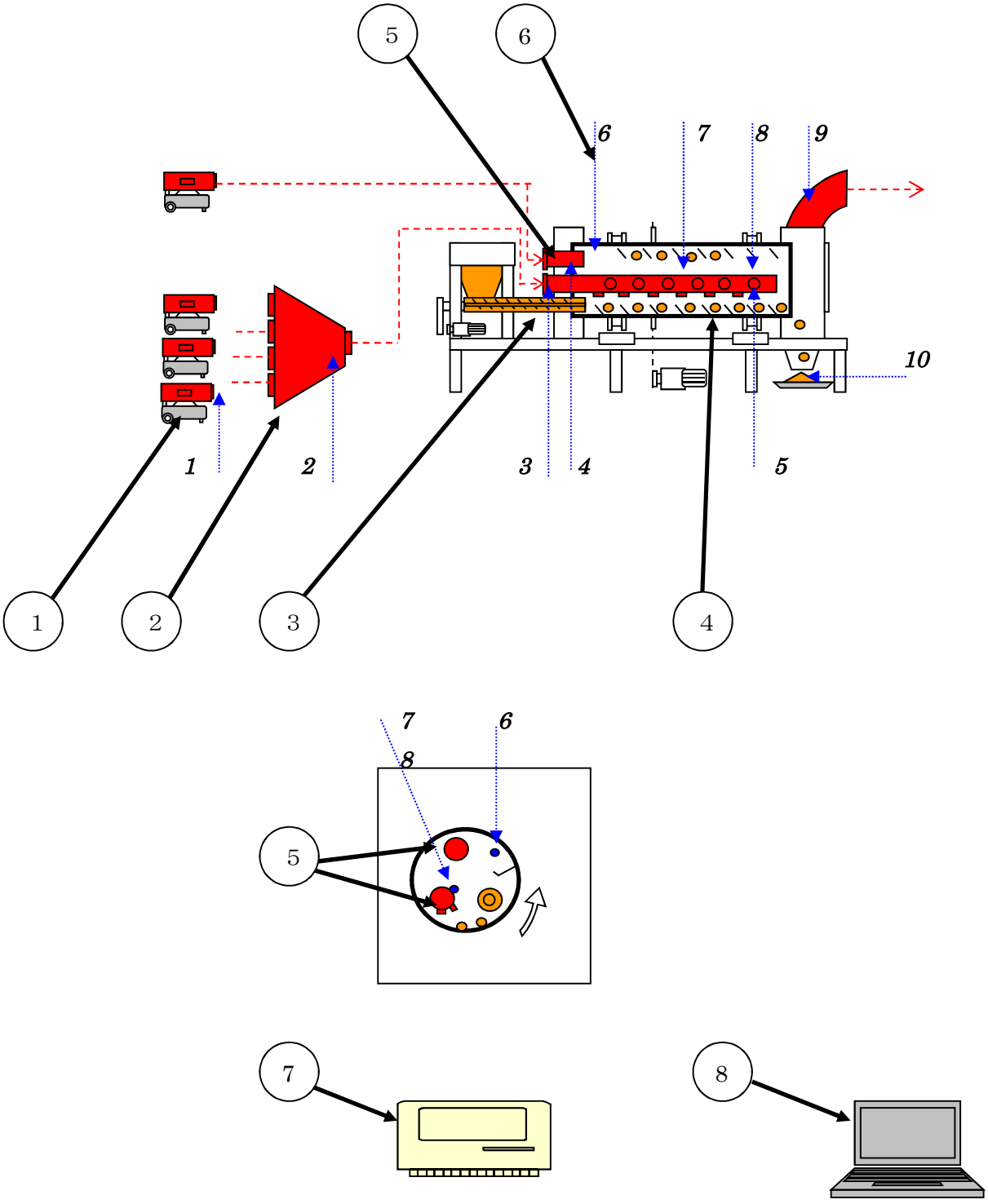


図 3.2.8　試験装置系統

表 3.2.6　回転ドラム試験装置仕様

番号	項目	仕様
①	ジェットヒータ	30,100 kcal/hr
②	熱風集合管	4 集合
③	スクリュウコンベア	φ150、0.4kW
④	回転ドラム	φ600mm×L2.3m、モータ =0.75kW
⑤	熱風送風管	φ150、吹出し口×6 箇所
⑥	熱電対	K 熱電対
⑦	データロガー	16ch
⑧	パソコン	

2)　試験内容

表 3.2.7 に試験内容を示す。

表 3.2.7　試験内容

項目	供給材料	内容
a) 加熱試験	清浄土 A（砂質土） 清浄土 B（粘性土）	回転ドラム内部に熱風を吹き込み、土砂温度上昇、含水比低下状況を確認する。
b) 模擬汚染土浄化試験	模擬汚染土 A（砂質土） 模擬汚染土 B（粘性土）	回転ドラム内部に熱風を吹き込み、汚染土浄化効果を確認する。

3) 試験方法

a) 加熱試験

表 3.2.8 に加熱試験項目を示す。回転ドラム内部に熱風を吹き込み、2 種類の土砂について土砂供給量、滞留時間を変化させた時の土砂温度及び含水比の変化を測定する。

表 3.2.8　加熱試験項目

処理量	滞留時間
50kg/hr	5 分
	10 分
	20 分
100kg/hr	5 分
	10 分
	20 分
200kg/hr	5 分
	10 分
	20 分

b) 模擬汚染土浄化試験

模擬汚染土の浄化効果は、土砂温度及び含水比に依存すると考えられるため、a)加熱試験で得られた結果を元に条件を選択する。

(4)　ツイスター・回転ドラム連続システム

1)　試験装置

図 3.2.9～10 にツイスター・回転ドラム連続システムの外観を示す。回転ドラムのホッパ上にツイスターを設置している。これによりツイスターで予熱・細粒化された土砂が、連続的に回転ドラム内に供給されるシステムとなっている。回転ドラムの熱源は、単体試験と同様のジェットヒータを設置した。また、熱風送風効率を高めたジェットヒータと最高熱出力が同程度(110,000kcal/hr)で温度制御が可能な熱風炉を設置できるよう改良をおこなった。土砂供給にはベルトコンベヤを使用し、ベルト速度により任意の供給量を設定できるようになっている。

図 3.2.9　ツイスター･回転ドラム連続システム（熱源：ジェットヒータ）

図 3.2.10　ツイスター･回転ドラム連続システム（熱源：熱風炉）

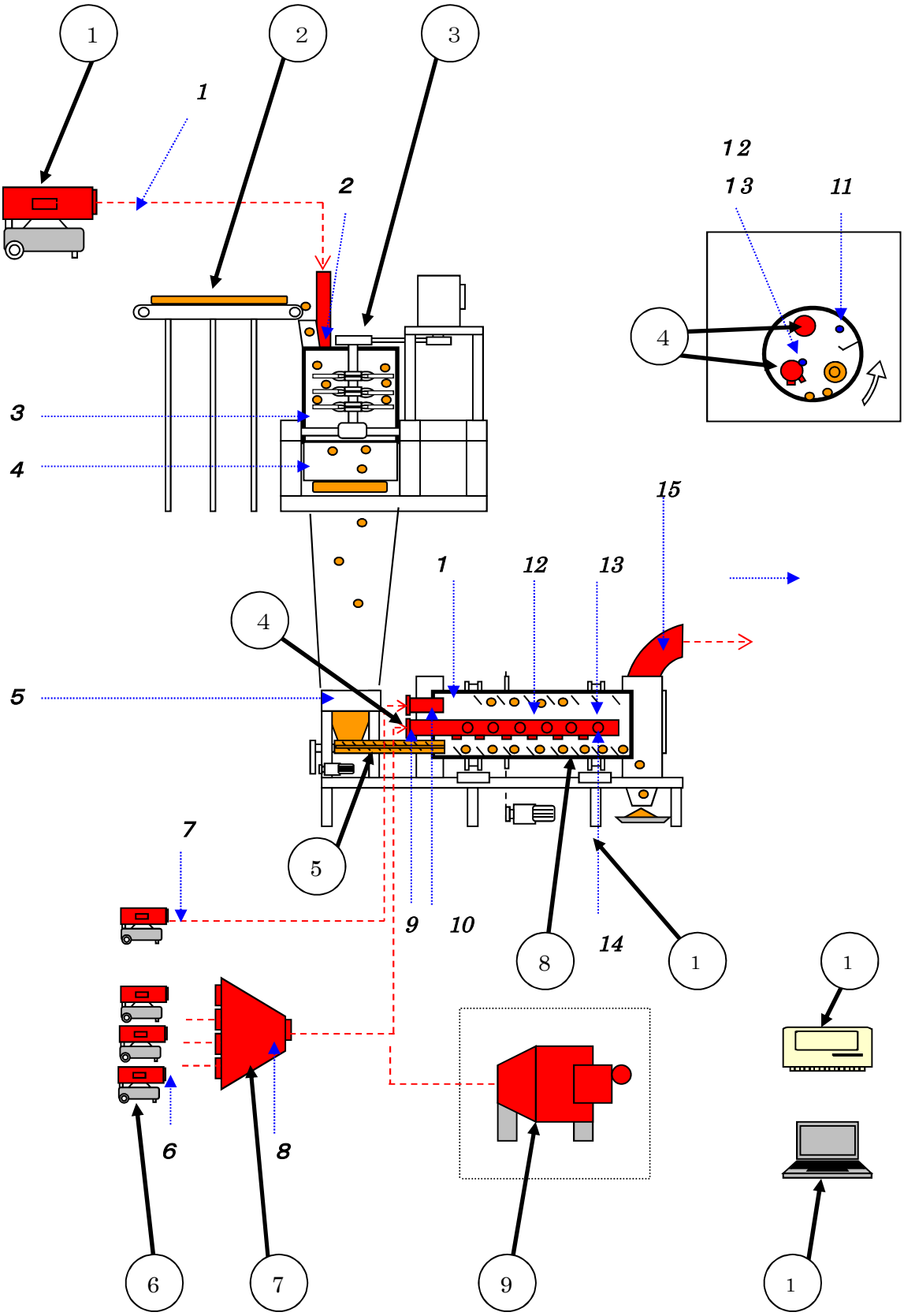


図 3.2.11　ツイスター･回転ドラム連続システム試験装置系統

表 3.2.4　ツイスター･回転ドラム試験装置仕様

番号	項目	仕様
①	ジェットヒータ	30,100 kcal/hr
②	ベルトコンベヤ	幅 = 100mm、全長 = 4m
③	ツイスター	直径 = φ500mm、モータ = 11kW
④	熱風送風管	φ150mm、吹出し口×6 箇所
⑤	スクリュウコンベヤ	φ150mm、モータ = 0.4kW
⑥	ジェットヒータ	30,100 kcal/hr×4 台 = 120,400 kcal/hr
⑦	熱風集合管	
⑧	回転ドラム	φ600mm×L2.3m、モータ = 0.75kW
⑨	熱風炉	最大 = 110,000 kcal/hr
⑩	熱電対	K 熱電対
⑪	データロガー	16ch
⑫	パソコン	

2)　試験内容

表 3.2.5 に試験内容を示す。

表 3.2.5　試験内容

項目	供給材料	内容
a) 加熱試験	清浄土 A（砂質土） 清浄土 B（粘性土）	ツイスター及び回転ドラム内部に熱風を吹き込み、土砂温度上昇、含水比低下状況を確認する。
b) 模擬汚染土浄化試験	模擬汚染土 A（砂） 模擬汚染土 B（粘性土） 模擬汚染土 C（砂、油分混入） 模擬汚染土 D（粘性土、油分混入）	ツイスター及び回転ドラム内部に熱風を吹き込み、汚染土浄化効果を確認する。

3) 試験方法

a) 加熱試験

表 3.2.6 に加熱試験項目を示す。各機器は、単体試験において目標温度 150℃以上となる設定とする。処理量を変化させ、加熱効果を確認する。熱源は、回転ドラム単体試験と同じ、ジェットヒータ及び熱風の送風効率を高めた熱風炉を使用し、比較する。

表 3.2.6　加熱試験項目

処理量	ツイスター設定 （回転数）	回転ドラム設定 （滞留時間）
25～350kg/hr	900rpm	20 分

b) 模擬汚染土浄化試験

模擬汚染土の浄化効果は、土砂温度及び含水比に依存すると考えられるため、a)加熱試験で得られた結果を元に条件を選択する。

(5) 汚染物質の物性

表 3.2.7 に汚染物質の物性を示す。VOC 汚染土浄化試験では、テトラクロロエチレンとキシレンを混合したもので模擬汚染土を作成した。油分を含んだ汚染土浄化試験には、A 重油を混合したもので模擬汚染土を作成した。

表 3.2.7　汚染物質の物性

番号	物質名	沸点 ℃	比熱 kcal / kg ・K	蒸発潜熱 kcal /kg
①	テトラクロロエチレン	121	0.205	50
②	キシレン	144	0.4	94
③	A 重油	300	0.4	
参考	水	100	1	539

3.2.3　研究結果及び考察

(1)　ツイスター

1)　含水比低下試験

図 3.2.12～14 に砂質土における含水比低下試験の結果を示す。いずれの供給量においても回転数が高い方が含水比の低下が大きい傾向があることがわかった。供給量の違いによる差異は、ほとんど見られない。供給量 100kg/hr、回転数 900rpm では、供給前 8.0%であったものが供給後は 6.1%となり、1.9%含水比が低下している。

図 3.2.15～17 に粘性土における含水比低下試験の結果を示す。回転数の違い、供給量の違いによる差異は、ほとんど見られないことがわかった。供給量 100kg/hr、回転数 900rpm では、供給前 82.4%であったものが、供給後は 77.3%となり、5.1%含水比が低下している。土質による傾向の違いは、砂質土の方が、粘性土より水の付着性が弱く、回転数が高いときは、ツイスターの分散効果が大きくなるためと考えられる。

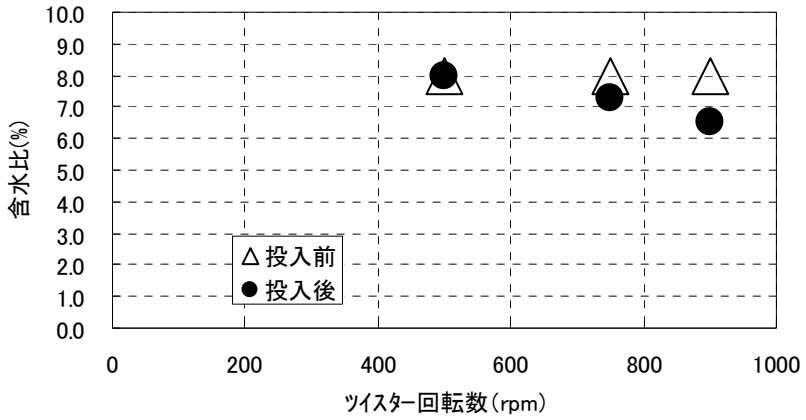


図 3.2.12　ツイスター回転数と含水比の関係（200kg/hr、砂質土）

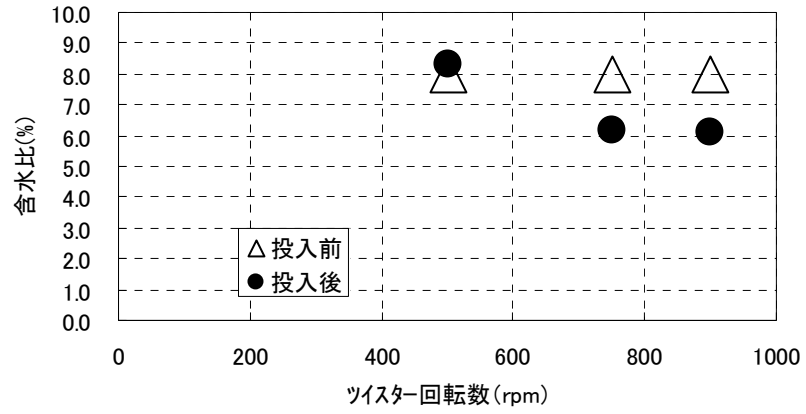


図 3.2.13　ツイスター回転数と含水比の関係（100kg/hr、砂質土）

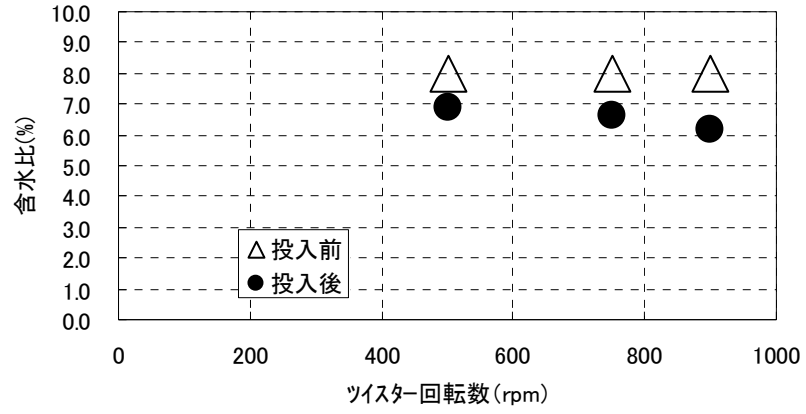


図 3.2.14　ツイスター回転数と含水比の関係（50kg/hr、砂質土）

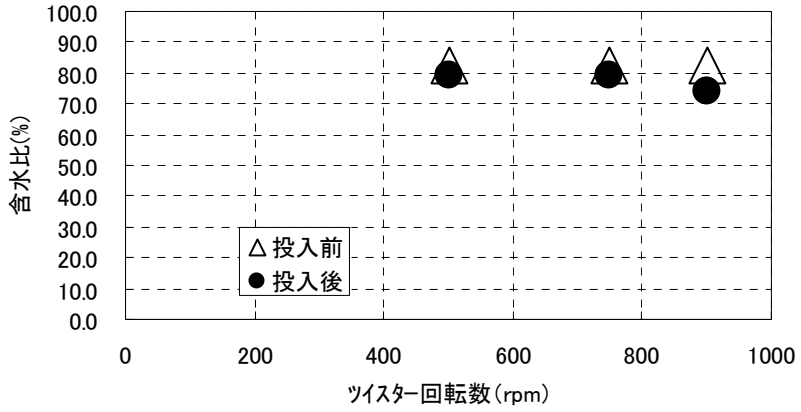


図 3.2.15　ツイスター回転数と含水比の関係（200kr/hr、粘性土）

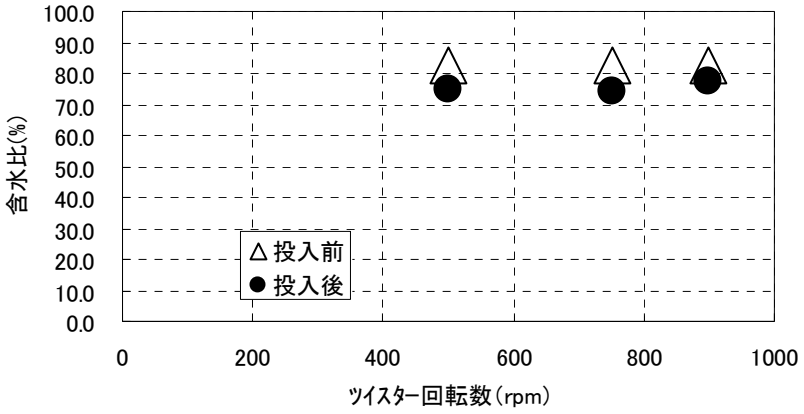


図 3.2.16　ツイスター回転数と含水比の関係（100kg/hr、粘性土）

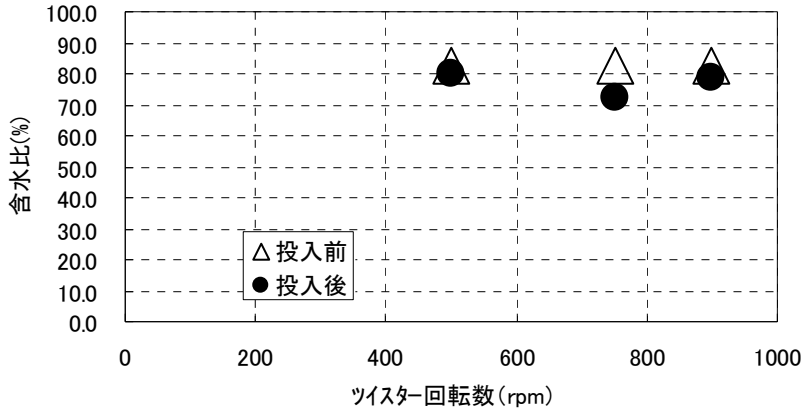


図 3.2.17　ツイスター回転数と含水比の関係（50kg/hr、粘性土）

2) 加熱試験

図 3.2.18～23 に砂質土における加熱試験の結果を示す。含水比は、回転数の違い、供給量の違いによる差異は、ほとんど見られない。供給後の含水比が 1%程度で、ほぼ絶乾状態となっているためと考えられる。土砂温度は、回転数が高い方が、温度が上昇することがわかった。回転数が高い方が、材料落下に時間を要し、熱風との接触時間が長くなるためと考えられる。図 3.2.24～29 に粘性土における加熱試験の結果を示す。含水比については、供給量の違いによる差異は、ほとんど見られない。回転数が高い方が、含水比の低下が大きい。土砂温度についても含水比同様の傾向がみられる。回転数が高い方がより効果が高いのは、熱風との接触時間が長くなるためと考えられる。

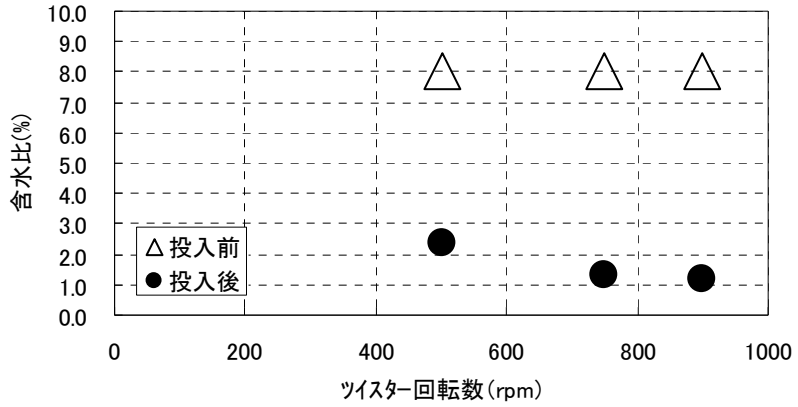


図 3.2.18　ツイスター回転数と含水比の関係（200kg/hr、砂質土、加熱）

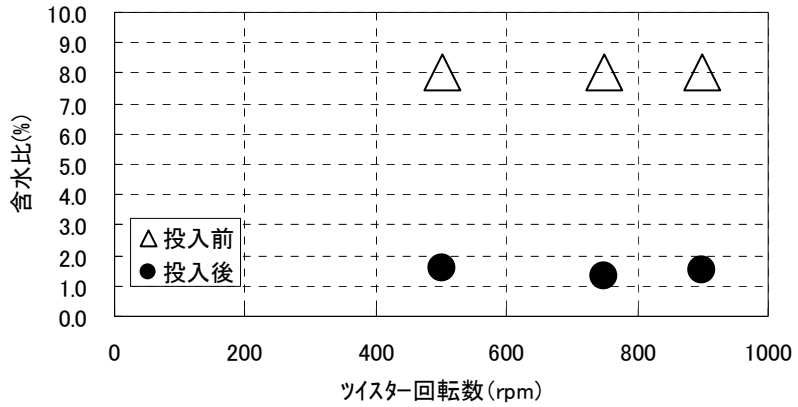


図 3.2.19　ツイスター回転数と含水比の関係（100kg/hr、砂質土、加熱）

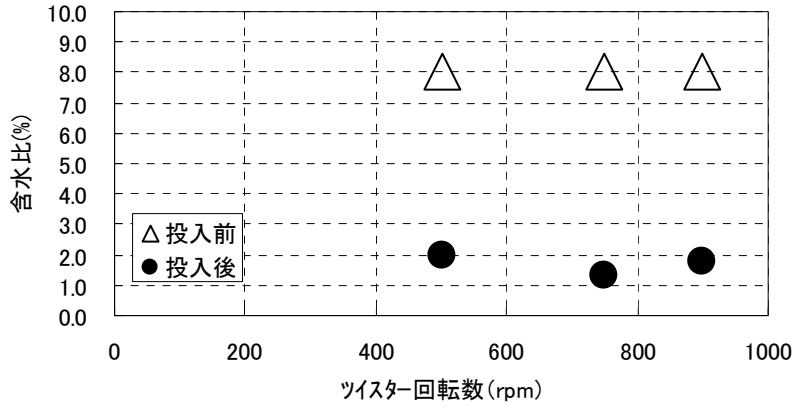


図 3.2.20　ツイスター回転数と含水比の関係（50kg/hr、砂質土、加熱）

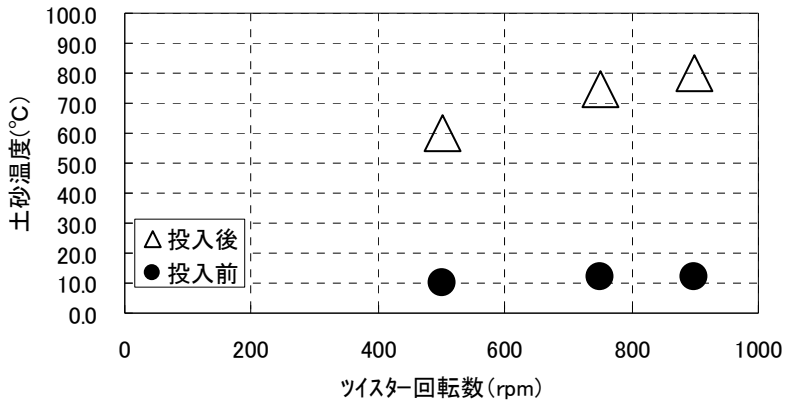


図 3.2.21　ツイスター回転数と土砂温度の関係（200kg/hr、砂質土、加熱）

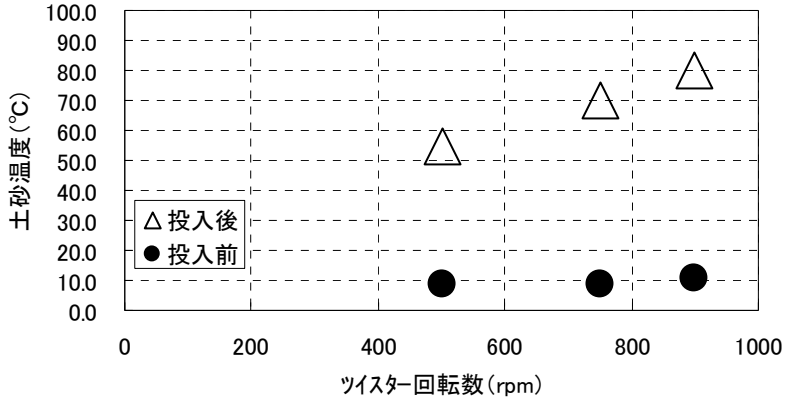


図 3.2.22　ツイスター回転数と土砂温度の関係（100kg/hr、砂質土、加熱）

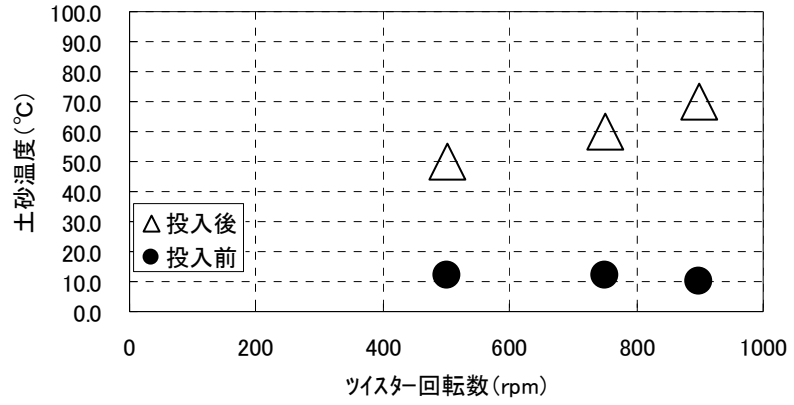


図 3.2.23　ツイスター回転数と土砂温度の関係（50kg/hr、砂質土、加熱）

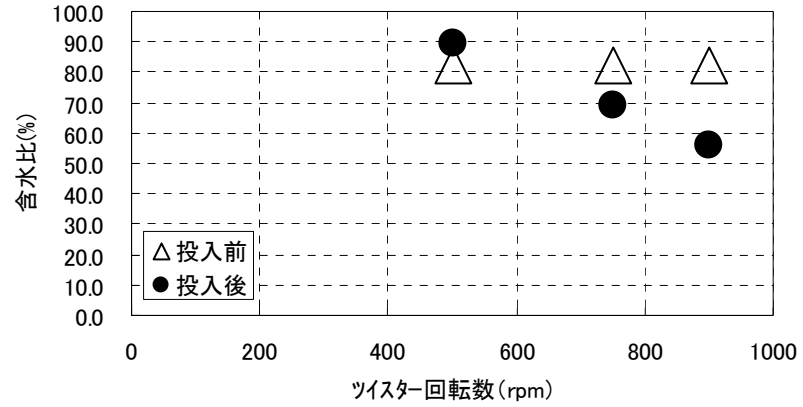


図 3.2.24　ツイスター回転数と含水比の関係（200kg/hr、粘性土、加熱）

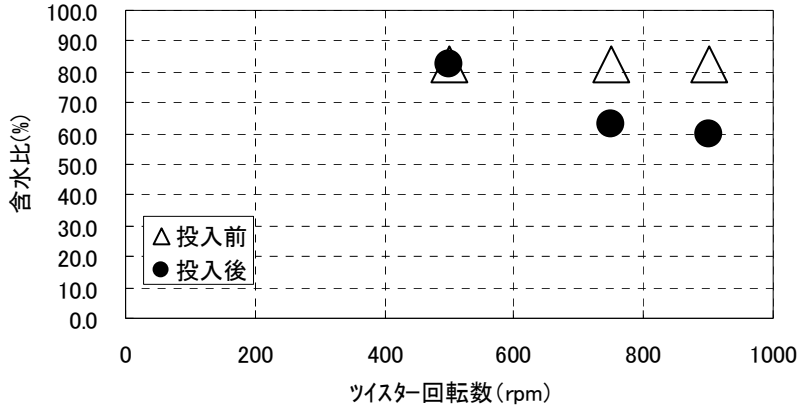


図 3.2.25　ツイスター回転数と含水比の関係（100kg/hr、粘性土、加熱）

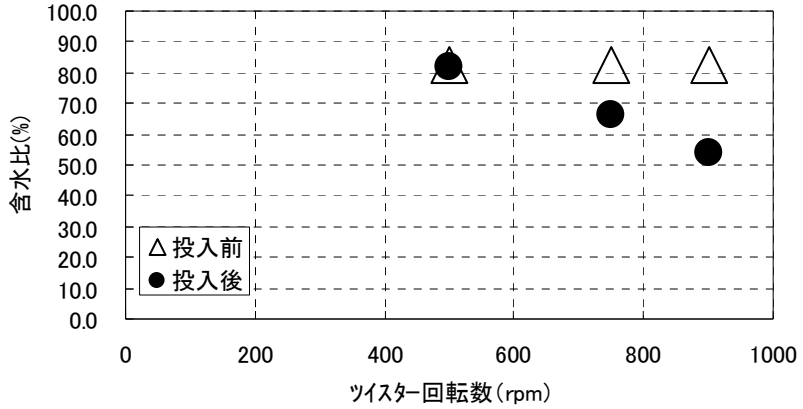


図 3.2.26　ツイスター回転数と含水比の関係（50kg/hr、粘性土、加熱）

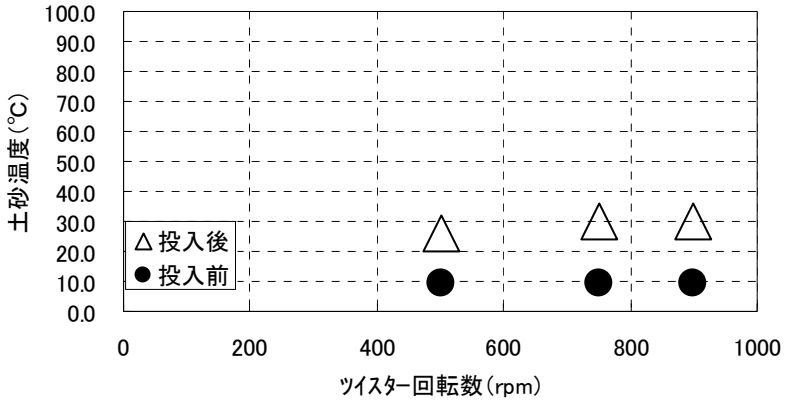


図 3.2.27　ツイスター回転数と土砂温度の関係（200kg/hr、粘性土、加熱）

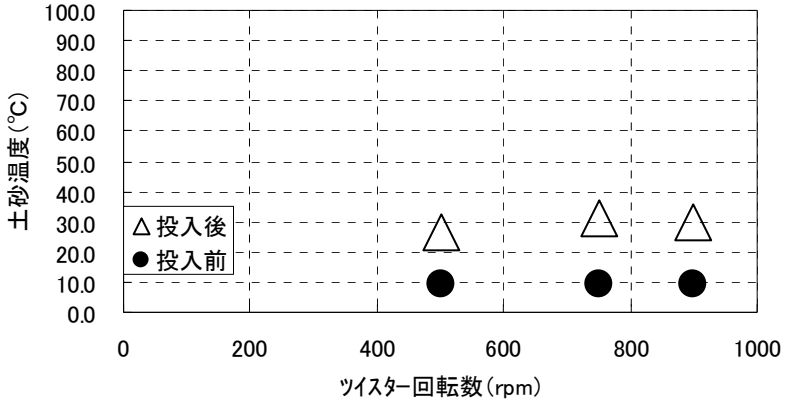


図 3.2.28　ツイスター回転数と土砂温度の関係（100kg/hr、粘性土、加熱）

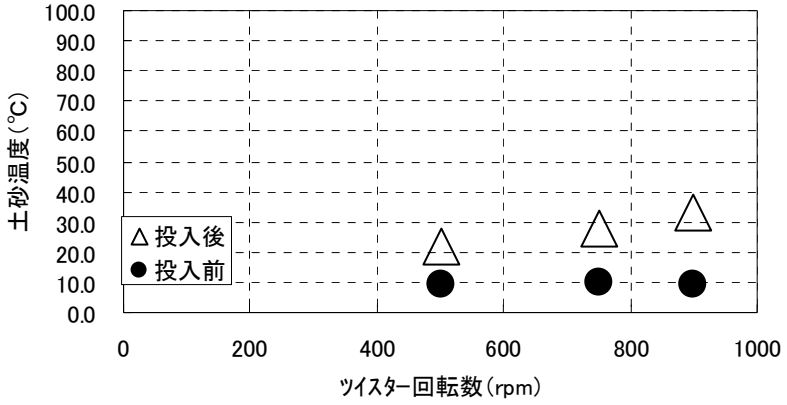


図 3.2.29　ツイスター回転数と土砂温度の関係（50kg/hr、粘性土、加熱）

3)　加熱試験における各部の温度推移

図 3.2.30 に加熱試験における各部の温度推移の一例を示す。各種条件は、表 3.2.8 のとおりである。図 3.2.30 中の①でツイスター内部に土砂を供給し始め、②で土砂供給を終了している。土砂供給中は、ツイスター内部温度が、160℃から 150℃程度まで下がっていることがわかる。

表 3.2.8　ツイスター条件と含水比、土砂温度

土砂	ツイスター設定	含水比 処理前 (%)	含水比 処理後 (%)	土砂温度 処理前 (℃)	土砂温度 処理後 (℃)
砂質土	750rpm、100kg/hr	8.0	1.3	8.8	70.0

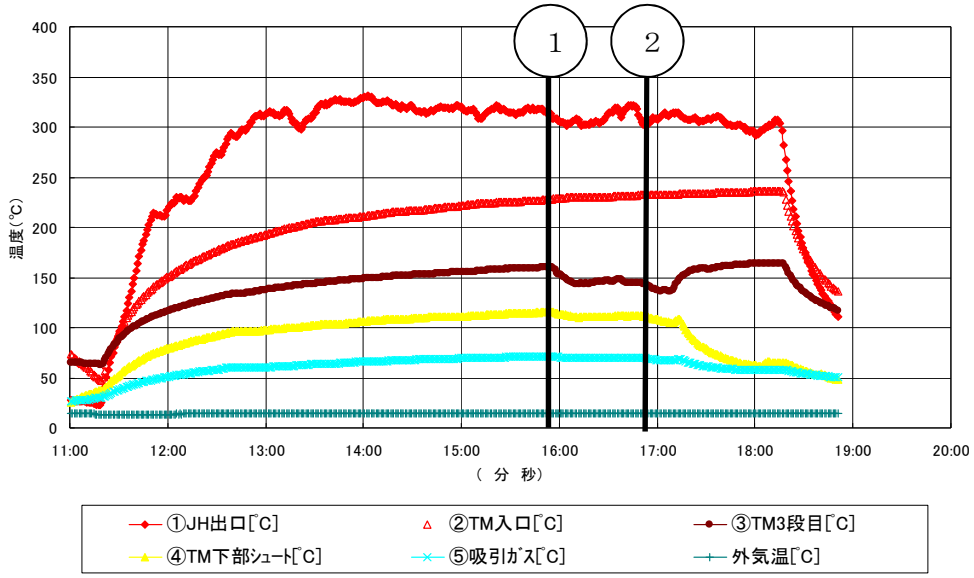


図 3.2.30　加熱試験における各部の温度推移

4) 模擬汚染土浄化試験

表 3.2.9 に模擬汚染土の配合を示す。2 種類の汚染物質をメタノールで希釈し、土砂 1kg に混合し、模擬汚染土を作成した。表 3.2.10 及び表 3.2.11 に模擬汚染土浄化試験の公定分析結果と含水比、土砂温度を示す。混入させた汚染物質の想定溶出量と公定分析の結果に大きな差異が見られる。これは、模擬土作成中の揮発および、ベルコン上に敷き並べる際の揮発が考えられる。砂質土・粘性土ともに、処理量による含水比低下・温度上昇に大きな違いが見られなかったため、最大の処理量において試験を実施した。また、浄化目標は、PCE 溶出量 0.1 mg / L 以下、キシレン溶出量 0.4 mg / L 以下とした。

表 3.2.9　模擬汚染土の配合

汚染物質	添加量 mL	比重 g/cm^3	重量 mg	想定溶出量 mg/L
テトラクロロエチレン	1	1.623	1.623	162.3
キシレン	1	0.88	0.88	88

表 3.2.10　公定分析結果と含水比、土砂温度（砂質土）

土砂	加熱	ツイスター設定	採取 位置	PCE (mg/L)	キシレン (mg/L)	含水比 (%)	土砂温度 (℃)
砂質土	なし	500rpm、200kg/hr	処理前	0.19	0.30	10.9	7.0
			処理後	0.027	0.032	10.6	6.8
		750rpm、200kg/hr	処理前	0.26	0.34	8.8	6.0
			処理後	0.007	0.009	7.6	4.0
		900rpm、200kg/hr	処理前	0.10	0.18	10.2	6.7
			処理後	0.019	0.021	9.0	4.6
	あり	500rpm、200kg/hr	処理前	0.076	0.14	8.0	10.5
			処理後	0.006	0.025	2.5	65.0
		750rpm、200kg/hr	処理前	0.18	0.28	10.5	11.2
			処理後	0.012	0.045	1.8	75.0
		900rpm、200kg/hr	処理前	0.059	0.10	12.0	9.8
			処理後	0.013	0.049	1.5	83.0

表 3.2.11　公定分析結果と含水比、土砂温度（粘性土）

土砂	加熱	ツイスター設定	採取位置	PCE (mg/L)	キシレン (mg/L)	含水比 (%)	土砂温度 (℃)
粘性土	なし	500rpm、200kg/hr	処理前	1.0	1.3	77.5	6.0
			処理後	0.60	0.77	73.2	5.0
		750rpm、200kg/hr	処理前	0.77	0.99	76.5	6.7
			処理後	0.26	0.42	72.3	6.6
		900rpm、200kg/hr	処理前	0.86	1.1	78.2	6.5
			処理後	0.22	0.35	73.0	6.6
	あり	500rpm、200kg/hr	処理前	1.3	1.7	73.5	10.0
			処理後	0.36	0.51	57.6	26.4
		750rpm、200kg/hr	処理前	1.2	1.4	73.6	10.0
			処理後	0.099	0.17	58.4	40.0
		900rpm、200kg/hr	処理前	0.64	0.86	75.8	8.8
			処理後	0.045	0.083	52.3	45.0

図 3.2.31～34 に砂質土におけるツイスター回転数と汚染物質溶出量・土砂温度・含水比の関係を示す。いずれの条件においても目標溶出量より低い値を示しており、加熱による効果は、顕著に表れず、回転するチェーンによる揮発拡散効果が高いことがわかった。

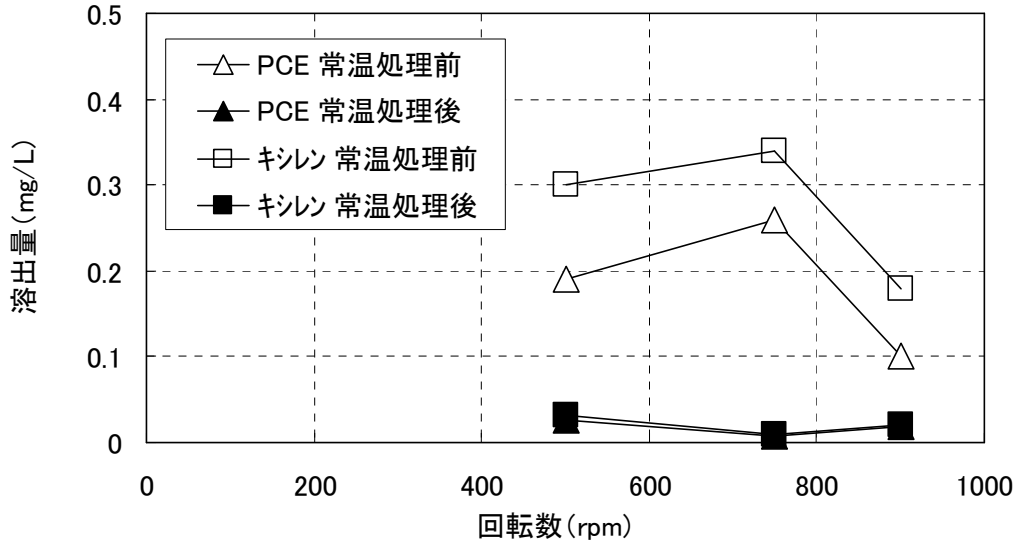


図 3.2.31　ツイスター回転数と汚染物質溶出量の関係（200kg/hr、砂質土、加熱なし）

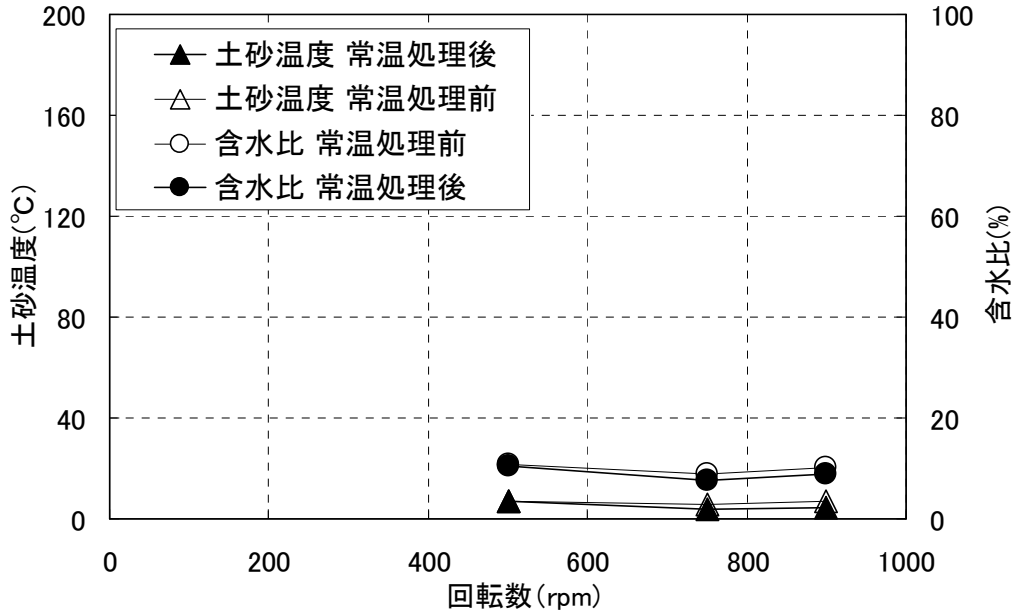


図 3.2.32　ツイスター回転数と土砂温度・含水比の関係（200kg/hr、砂質土、加熱なし）

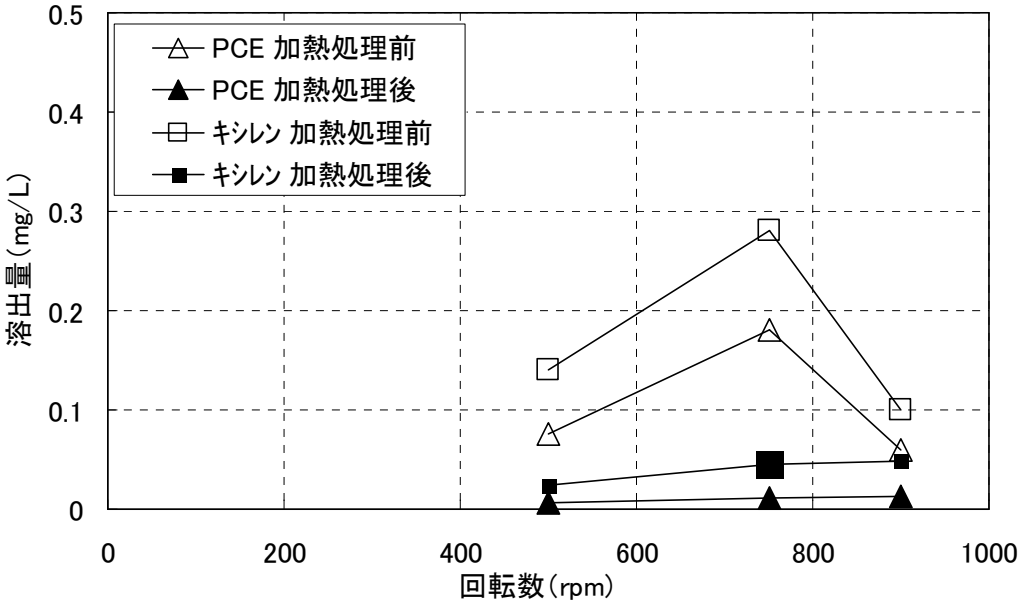


図 3.2.33　ツイスター回転数と汚染物質溶出量の関係（200kg/hr、砂質土、加熱あり）

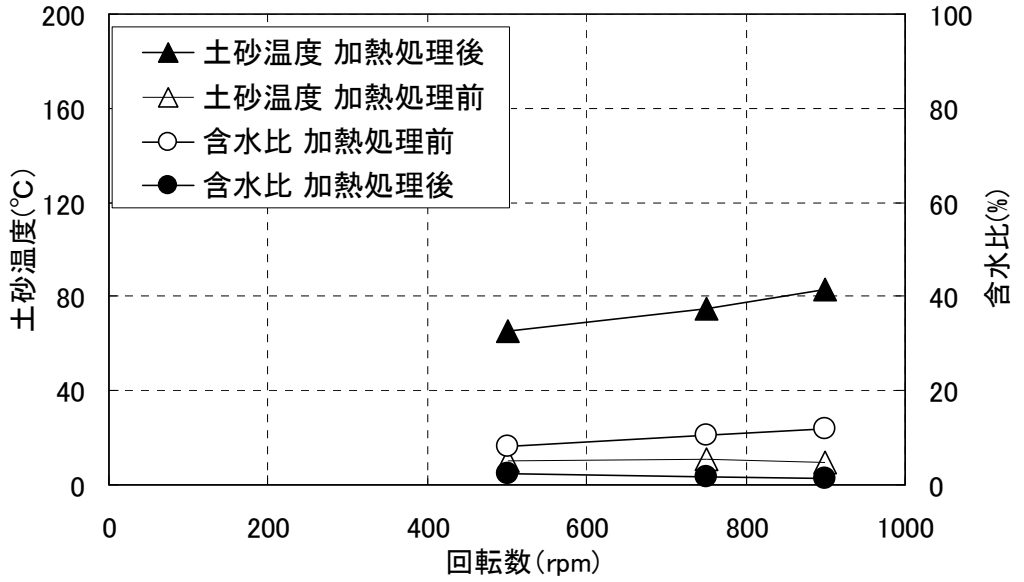


図 3.2.34　ツイスター回転数と土砂温度・含水比の関係（200kg/hr、砂質土、加熱あり）

図 3.2.35～38 に粘性土におけるツイスター回転数と汚染物質溶出量・土砂温度・含水比の関係を示す。回転数が高い方が、除去効果は高くなり、熱風を吹き込むことによりさらに除去効果が高くなっている。加熱した場合、900rpm において目標溶出量を下回った。砂質土において粘性土と同様の傾向がみられないのは、砂質土の方が水分の吸着性が少なく、汚染物質が揮発しやすいからと考えられる。

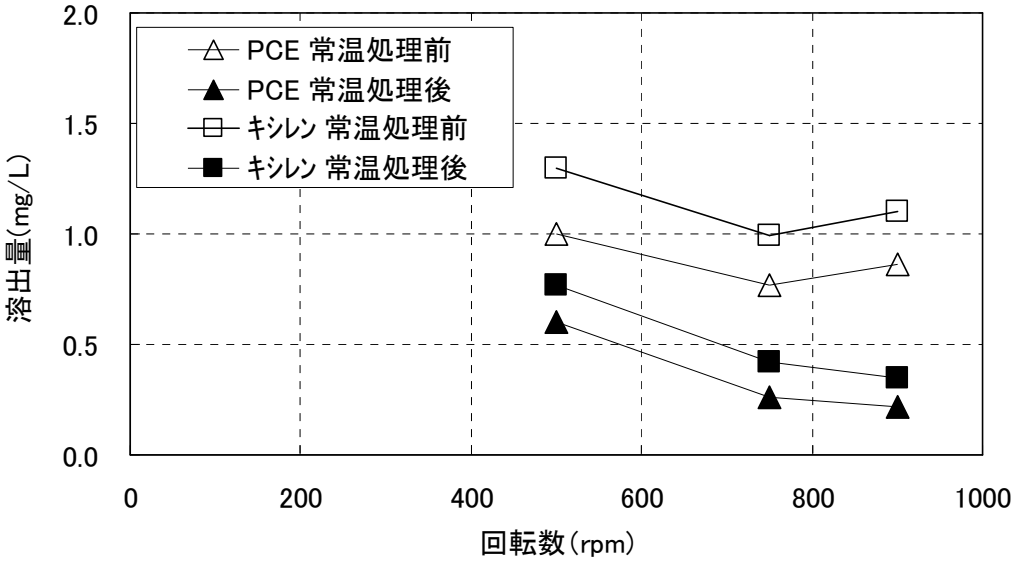


図 3.2.35　ツイスター回転数と汚染物質除去率・含水比の関係（200kg/hr、粘性土、加熱なし）

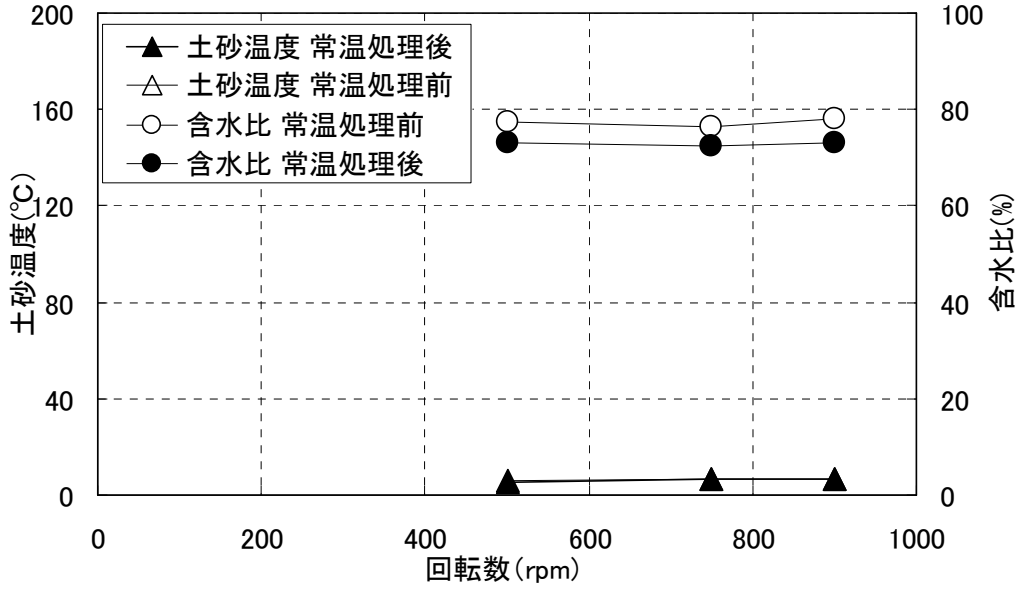


図 3.2.36　ツイスター回転数と汚染物質除去率・土砂温度の関係（200kg/hr、粘性土、加熱なし）

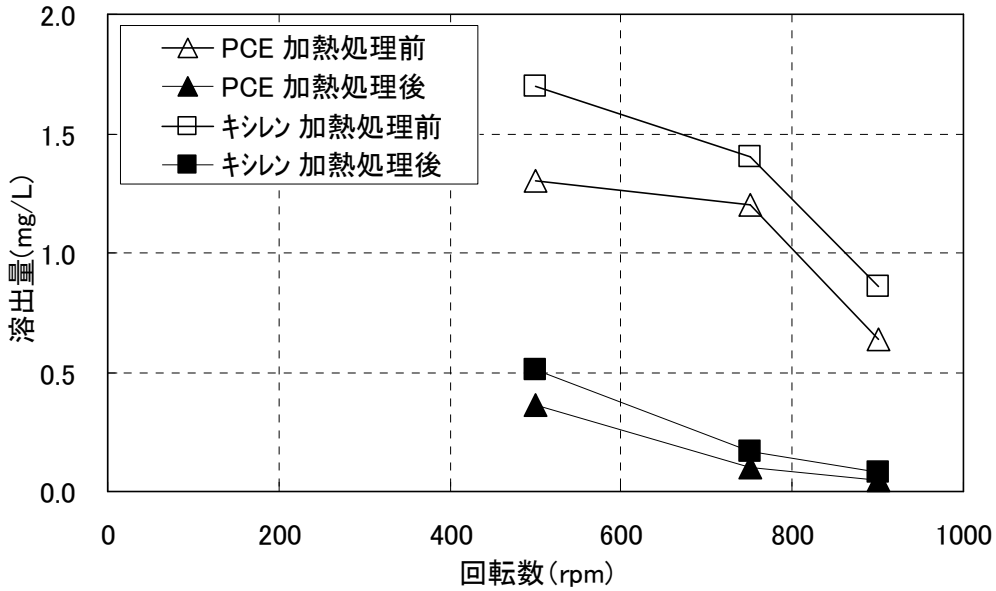


図 3.2.37　ツイスター回転数と汚染物質除去率・含水比の関係（200kg/hr、粘性土、加熱あり）

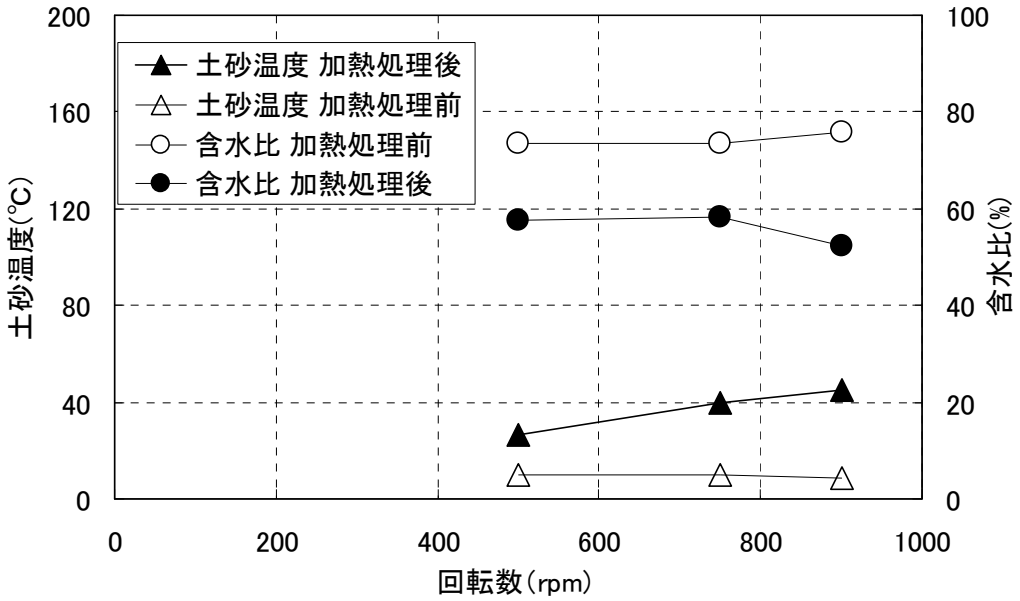


図 3.2.38　ツイスター回転数と汚染物質除去率・土砂温度の関係（200kg/hr、粘性土、加熱あり）

(2) 回転ドラム

1) 加熱試験

図 3.2.39～44 に砂質土における滞留時間と土砂温度・含水比の関係を示す。供給量 50kg/hr、100kg/hr では、土砂温度は、160℃に達することがわかった。含水比は、0.1%程度となりほぼ絶乾状態であった。供給量 200kg/hr では、目標とする 150℃まで土砂温度が上昇しなかった。

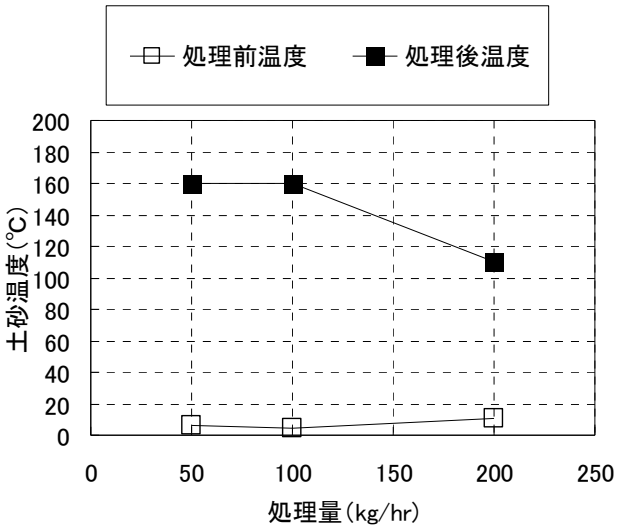


図 3.2.39　処理量と土砂温度の関係（滞留時間：20 分、砂質土）

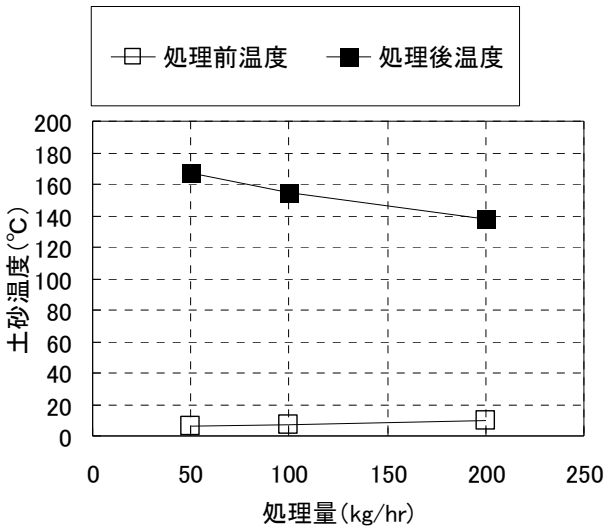


図 3.2.40　処理量と土砂温度の関係（滞留時間：10 分、砂質土）

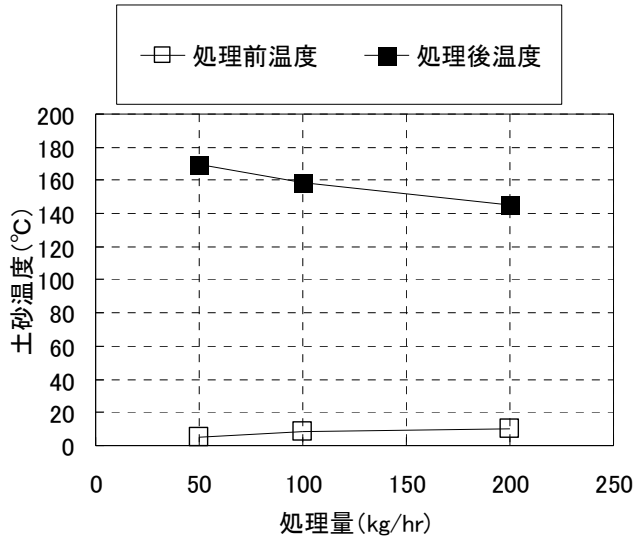


図 3.2.41　処理量と土砂温度の関係（滞留時間：5 分、砂質土）

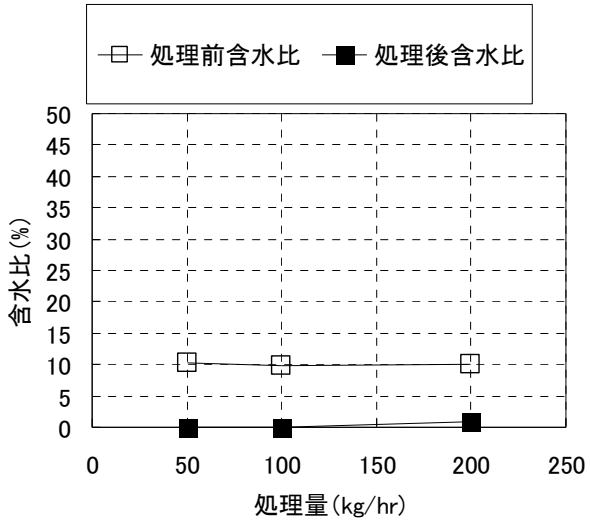


図 3.2.42　処理量と含水比の関係（滞留時間 20 分、砂質土）

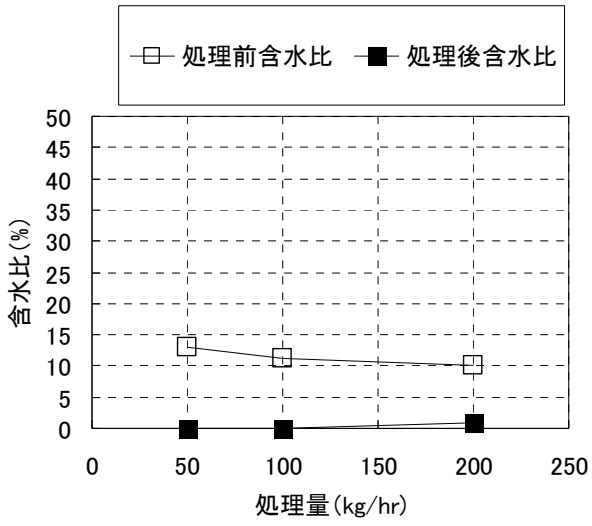


図 3.2.43　処理量と含水比の関係（滞留時間 10 分、砂質土）

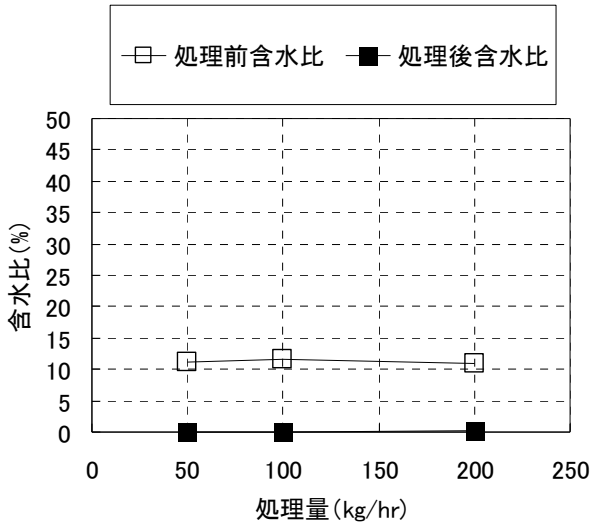


図 3.2.44　処理量と含水比の関係（滞留時間 5 分、砂質土）

図 3.2.45～50 に粘性土における滞留時間と土砂温度・含水比の関係を示す。供給量が少ないほうが土砂温度は高くなり、25kg/hr のとき 155℃に達することがわかった。含水比は、10%程度まで下がることがわかった。粘性土は、塊状のものが混入しており、これが、熱風の伝熱効果を低くしていると考える。これは、ツイスターにより破砕・細粒化処理をおこなったのちに、回転ドラムにて加熱をおこなうことにより、改善可能と考える。

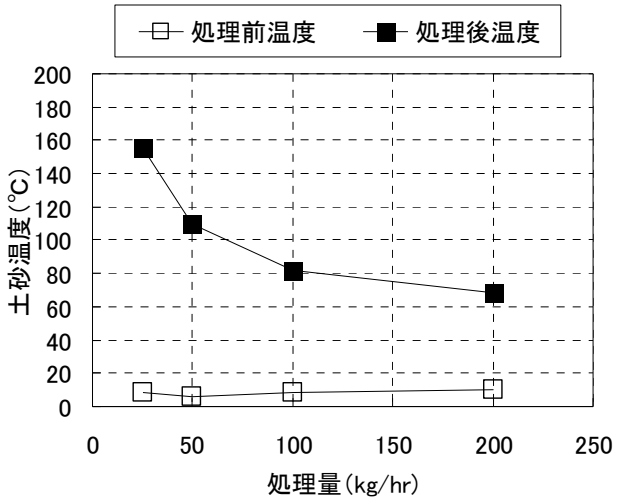


図 3.2.45　処理量と土砂温度の関係（滞留時間 20 分、粘性土）

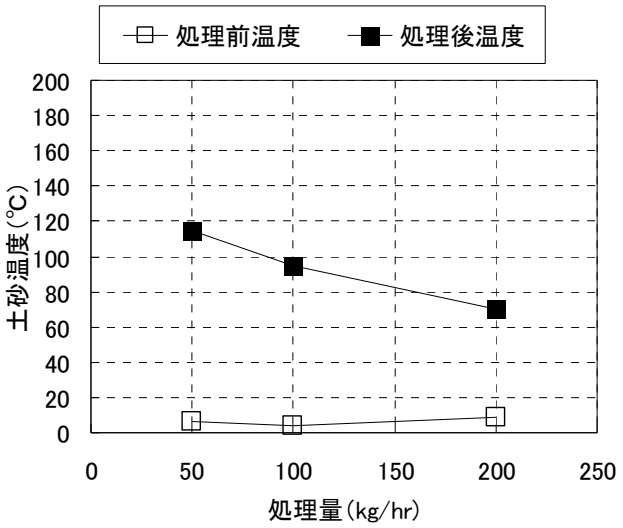


図 3.2.46　処理量と土砂温度の関係（滞留時間 10 分、粘性土）

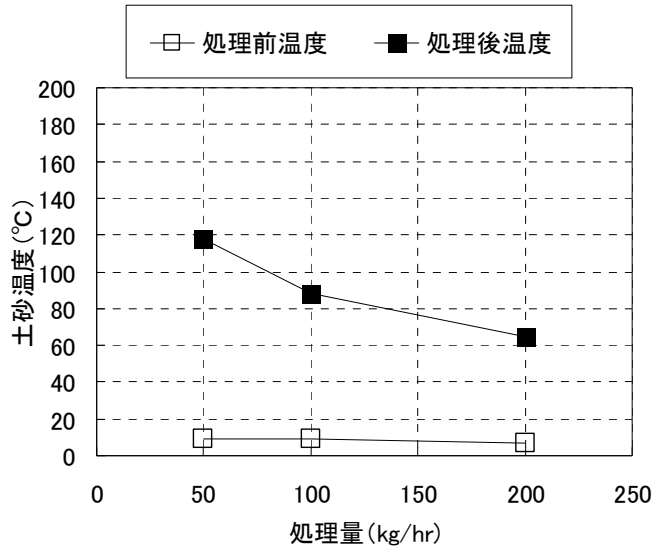


図 3.2.47　処理量と土砂温度の関係（滞留時間 5 分、粘性土）

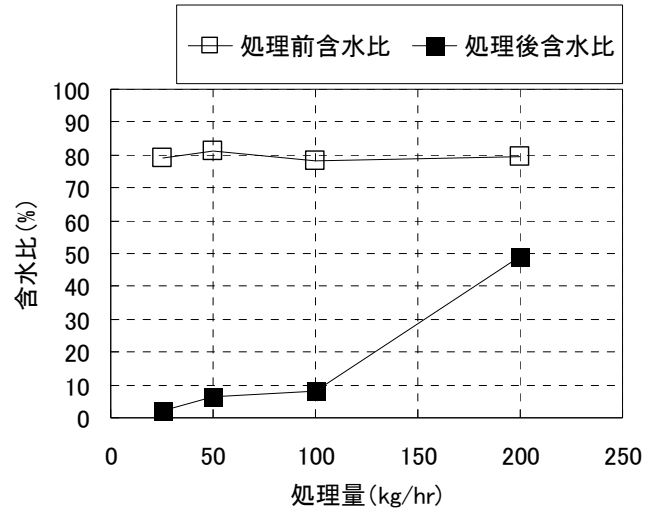


図 3.2.48　処理量と含水比の関係（滞留時間 20 分、粘性土）

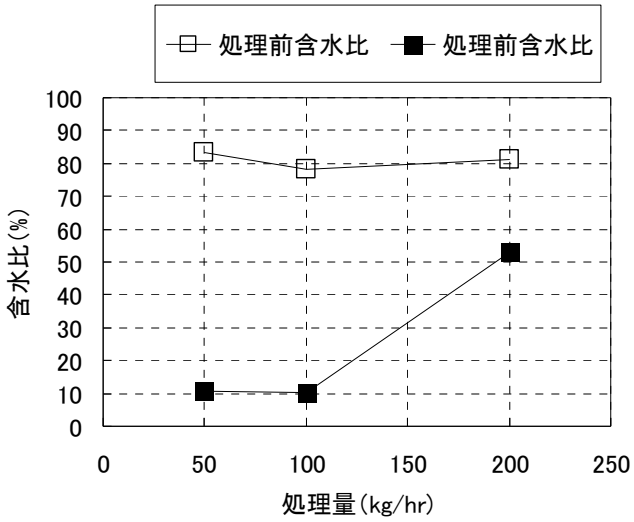


図 3.2.49　処理量と含水比の関係（滞留時間 10 分、粘性土）

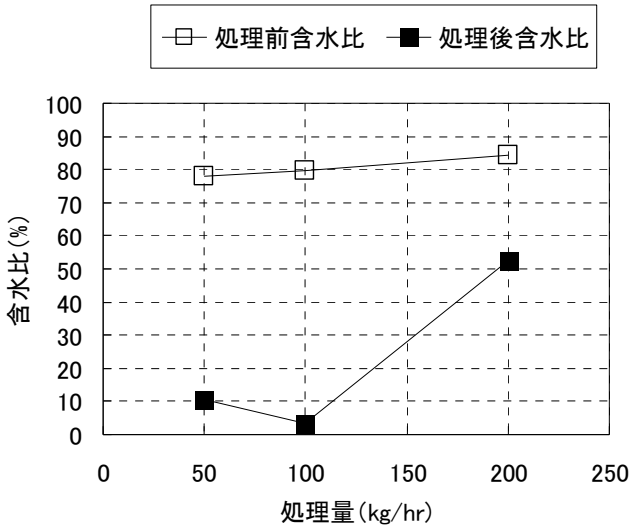


図 3.2.50　処理量と含水比の関係（滞留時間 5 分、粘性土）

図 3.2.51～54 に処理前と処理後の土砂状況を示す。図 3.2.54 に示すように、粘性土は、塊状のものが多数存在することがわかる。

図 3.2.51　砂質土(処理前)

図 3.2.52　砂質土（処理後）

図 3.2.53　粘性土（処理前）

図 3.2.54　粘性土（処理後）

2)　加熱試験における各部の温度推移

図 3.2.55 に各加熱試験における各部の温度推移の一例を示す。各種条件は、表 3.2.12 のとおりである。図 3.2.55 中の①で回転ドラム内部に土砂を供給し始め、②で回転ドラム出口から土砂が排出され、③で土砂供給を終了している。土砂供給中は、ツイスター内部温度が、180℃から160℃程度まで下がっていることがわかる。

表 3.2.12　回転ドラム条件

土砂	回転ドラム設定	含水比 処理前 (%)	含水比 処理後 (%)	土砂温度 処理前 (℃)	土砂温度 処理後 (℃)
砂質土	100kg/hr、20 分滞留	7.0	0.1	4.8	170

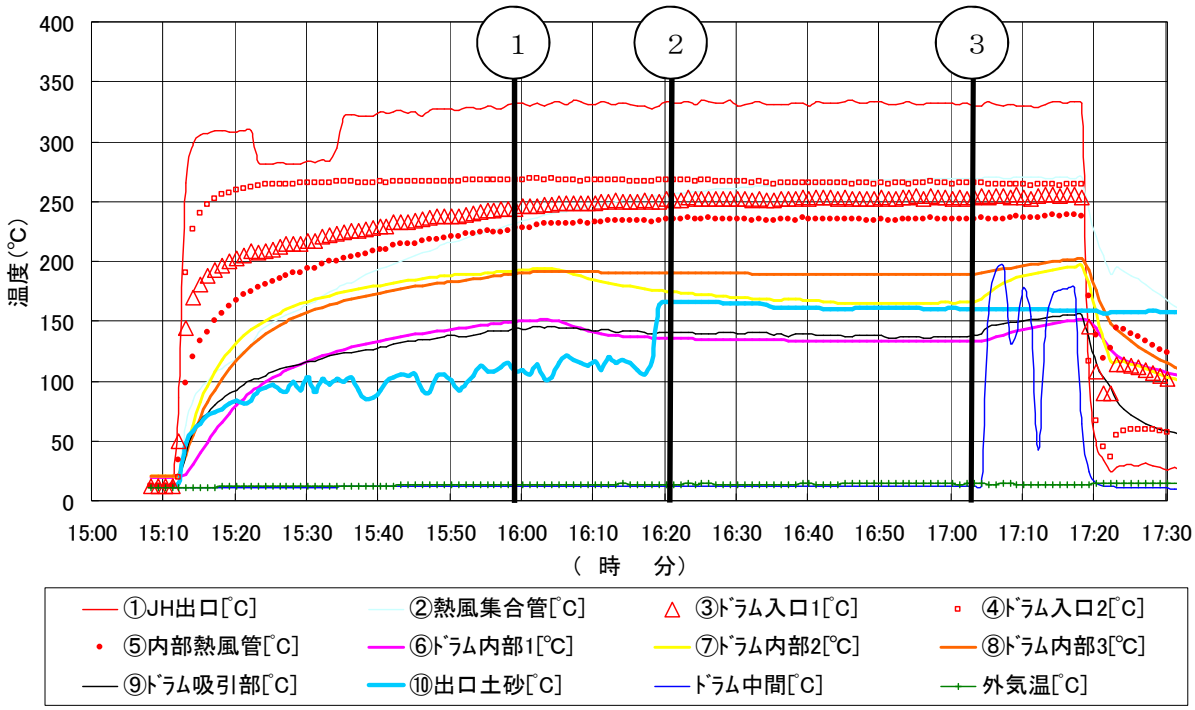


図 3.2.55　加熱試験における各部の温度推移

3) 模擬汚染土浄化試験

回転ドラムにおいてもツイスターと同様の配合で模擬汚染土を作成した。回転ドラム設定は、汚染物質除去効果が高くなると予想される土砂温度が高く、含水比が低くなった条件とした。また、時間経過による除去効果の違いを確認するため、土砂排出後 5 分後、15 分後の 2 回採取した。表 3.2.13 に公定分析結果を、図 3.2.56 に砂質土における汚染物質溶出量を、図 3.2.57 に粘性土における溶出量を示す。PCE については、どちらも処理前と比較し、溶出量が大きく低下し、目標とした溶出量 0.1mg/L 以下となった。キシレンについては、排出開始後 15 分後に採取したものの溶出量が上昇し、目標とした 0.4mg/L を僅かに超過した。これは、模擬汚染土の濃度ムラが原因と考えられる。

表 3.2.13　公定分析結果

土砂	回転ドラム設定	採取位置	PCE(mg/L)	キシレン(mg/L)
砂質土	100kg/hr、20 分滞留	処理前	3.8	3.7
		5 分後	0.022	0.47
		15 分後	0.018	0.55
粘性土	25kg/hr、20 分滞留	処理前	7.2	6.1
		5 分後	0.021	0.13
		15 分後	0.062	0.37

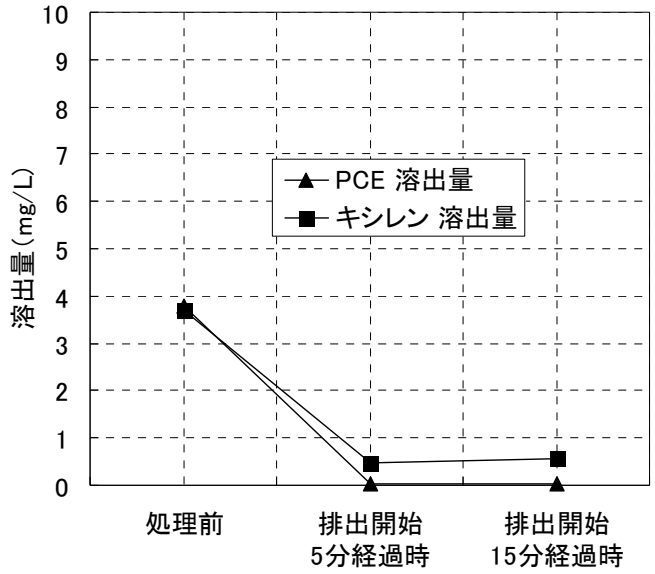


図 3.2.56　浄化確認試験（砂質土）

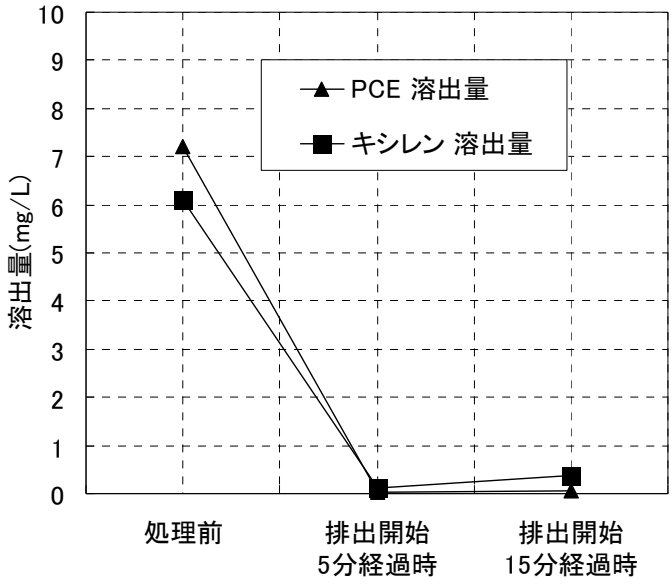


図 3.2.57　浄化確認試験（粘性土）

(3) ツイスター･回転ドラム連続システム

1) 加熱試験

加熱試験における熱源については、機器単体試験時に使用したジェットヒータ及び、熱風炉の2種類を用い、その効果の違いを確認した。

図 3.2.58～59 に砂質土における加熱試験の結果を示す。回転ドラム単体では、目標土砂温度150度以上に到達する、最大処理量は100kg / hr であった。ツイスター･回転ドラム連続システムでは、最大処理量は2倍の200kg / hr となった。加えた熱量は、回転ドラム単体のときと同量であることから、ツイスターによる予熱・細粒化効果が大きく、処理量を2倍にすることができたと考えられる。

熱源を熱風炉にした場合は、処理量300kg / hr まで目標温度150℃以上に土砂温度が上昇することがわかった。

図 3.2.60～61 に粘性土における加熱試験の結果を示す。回転ドラム単体では、目標温度150℃以上に達する最大処理量は、25kg / hr であった。ツイスター･回転ドラム連続システムでは、砂質土同様に最大処理量は、2倍となり 50kg/hr となった。これも、ツイスターによる予熱・細粒化効果によるものと考えられる。熱源を熱風炉にした場合は、処理量は、75kg / hr まで、目標温度150℃以上に土砂温度が上昇することがわかった。

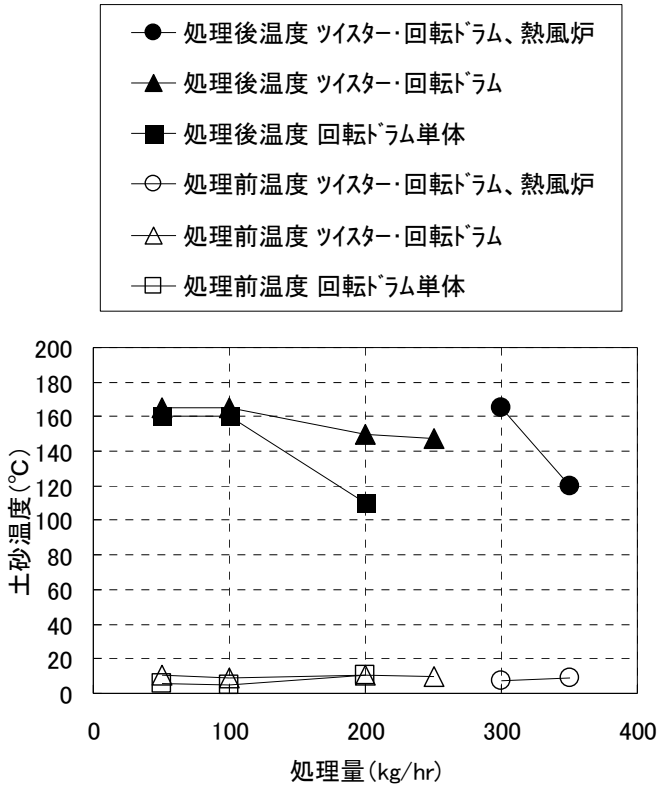


図 3.2.58　処理量と土砂温度の関係（砂質土）

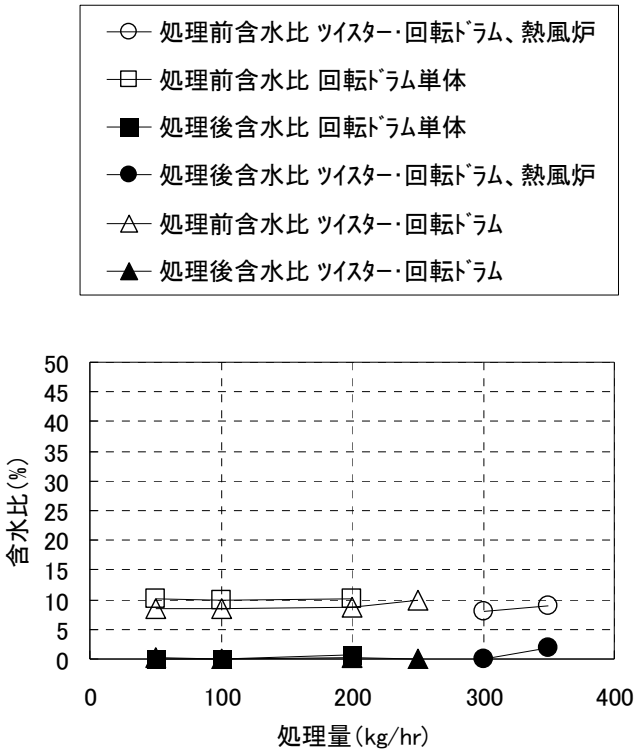


図 3.2.59　処理量と含水比の関係（砂質土）

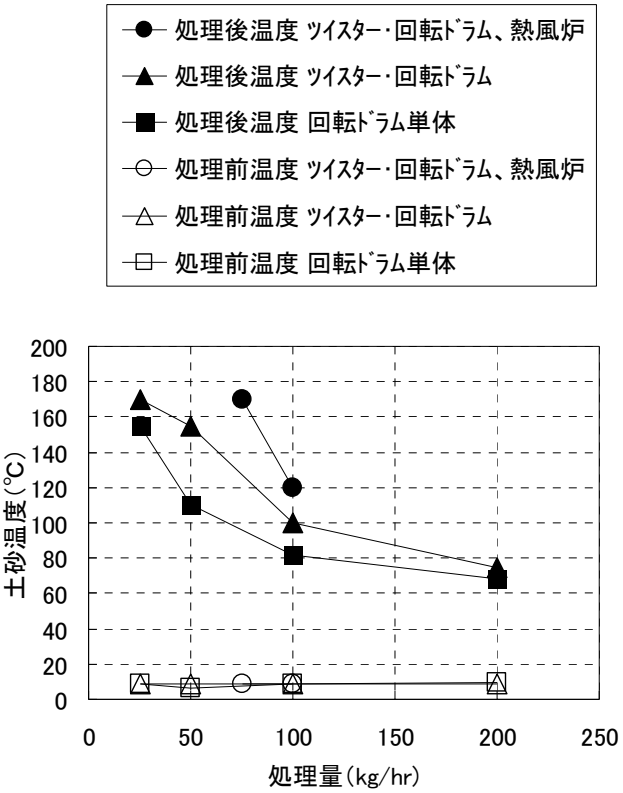


図 3.2.60　処理量と土砂温度の関係（粘性土）

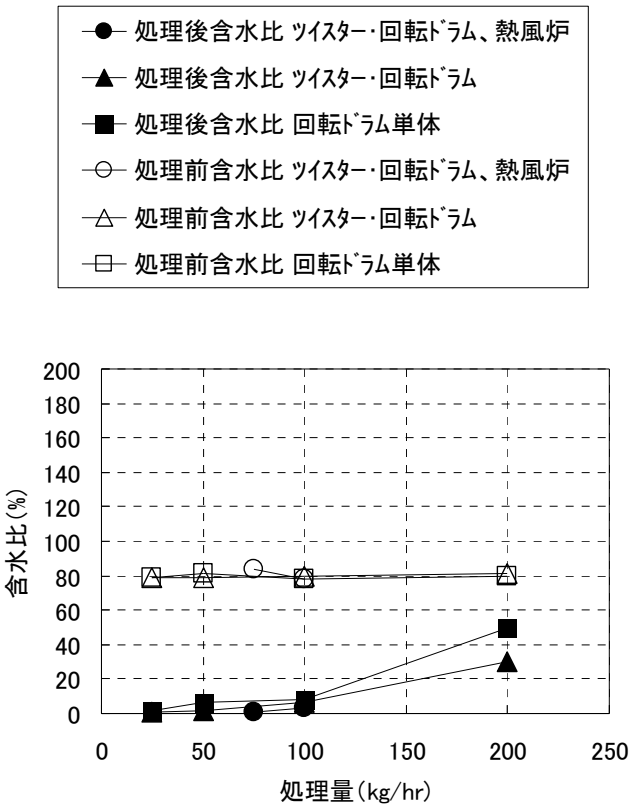


図 3.2.61　処理量と含水比の関係（粘性土）

2)　加熱試験における各部の温度推移

図 3.2.62～63 に加熱試験における各部の温度推移を示す。熱源がジェットヒータのときは、材料供給中は、内部温度が 180℃程度まで下がるのに対し、熱風炉では、ほぼ 250℃一定で推移している。熱風炉出口温度が 350～650℃程度まで変化しており、平均して最大供給熱量の約 60%程度しか供給していないことがわかった。熱風炉の方が、熱風の供給効率が良く、温度制御機能があることで、確実に目標温度 150℃以上に土砂温度を上昇できることがわかった。

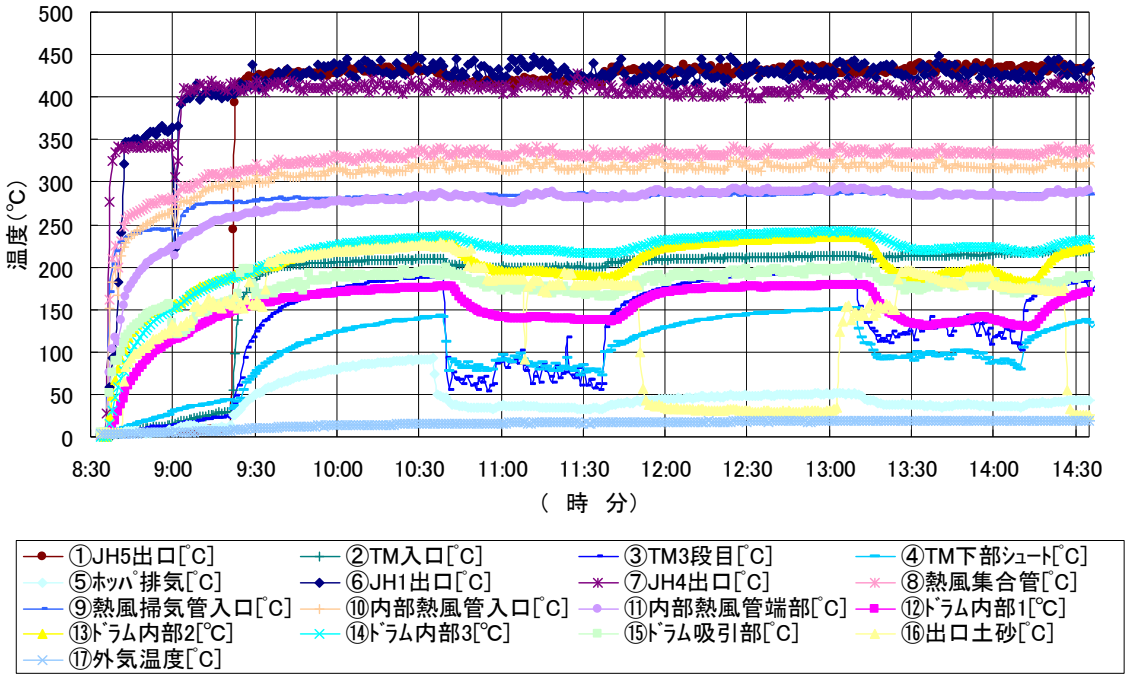


図 3.2.62　加熱試験における各部の温度推移（熱源：ジェットヒータ）

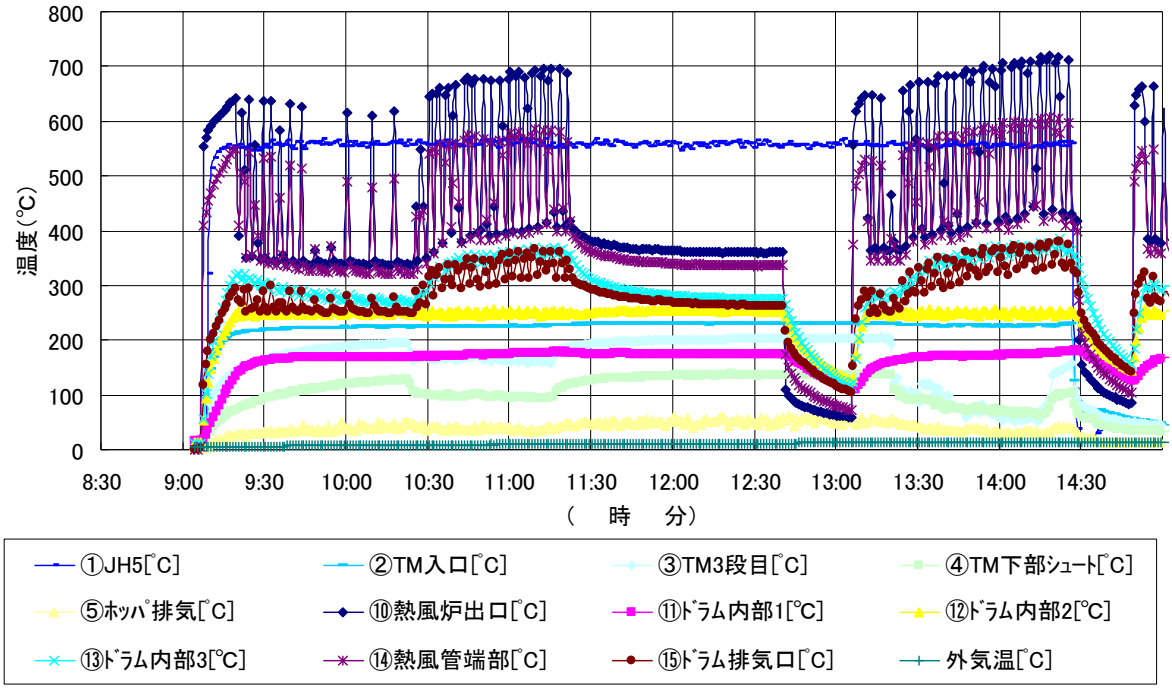


図 3.2.63　加熱試験における各部の温度推移（熱源：熱風炉）

3) 模擬汚染土浄化試験

a) VOC 模擬汚染土浄化試験

ツイスター･回転ドラム連続システムにおいても、各機器単体試験と同様の配合で模擬汚染土を作成した。ツイスター及び回転ドラムの設定は、汚染物質の浄化効果が高いと予想される土砂温度が高く、含水比が低くなる条件とした。測定サンプルは、模擬汚染土の濃度ムラを確認するため、無作為に２点採取し、処理前①、処理前②とした。また、時間経過による浄化効果の違いを確認するため、回転ドラムから排出後 3 回採取した。表 3.2.14 に公定分析結果を図 3.2.64 に砂質土における汚染物質溶出量を示す。PCE 浄化目標値 0.1mg / L、キシレン浄化目標値 0.4 mg L を大きく下回った。図 3.2.65 に粘性土における汚染物質溶出量を示す。こちらもそれぞれの汚染物質の浄化目標値を大きく下回った。加熱式ツイスターを前処理設備として導入することにより、土質材料の予熱・細粒化効果が発生し、浄化効果がより高まったと考えられる。

表 3.2.14 公定分析結果

土砂	機器設定	採取位置	PCE(mg/L)	キシレン(mg/L)
砂質土	処理量 ： 200kg/hr ツイスター：900rpm 回転ドラム：20 分滞留	処理前①	0.18	0.21
		処理前②	0.16	0.12
		15 分後	0.0093	0.0150
		25 分後	0.0061	0.0110
		35 分後	0.0051	0.0090
粘性土	処理量 ： 50kg/hr ツイスター：900rpm 回転ドラム：20 分滞留	処理前①	9.7	6.9
		処理前②	1.7	2.0
		15 分後	0.0028	0.0063
		25 分後	0.0023	0.0064
		35 分後	0.0061	0.0110

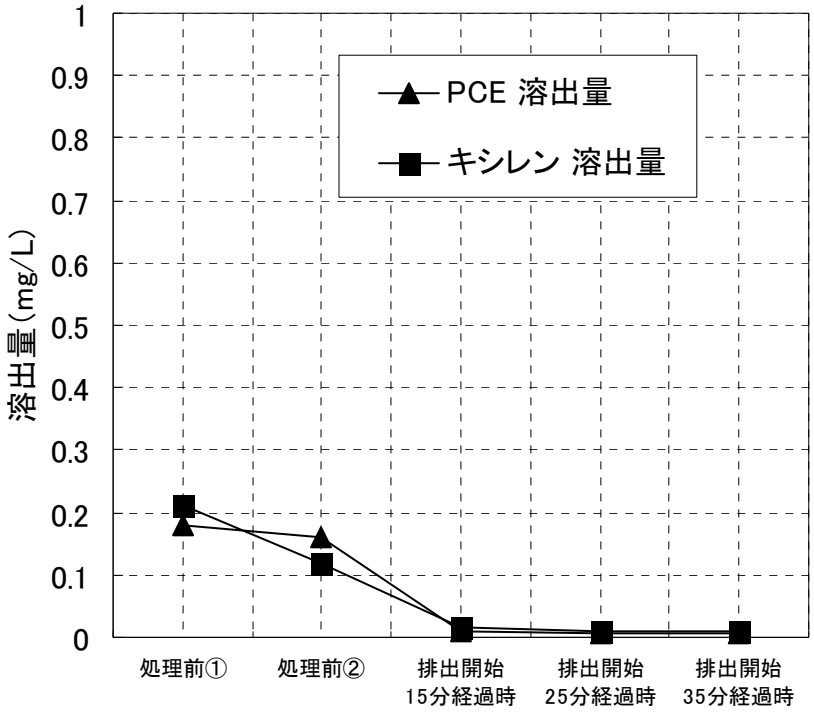


図 3.2.64　VOC 模擬汚染土浄化試験（砂質土）

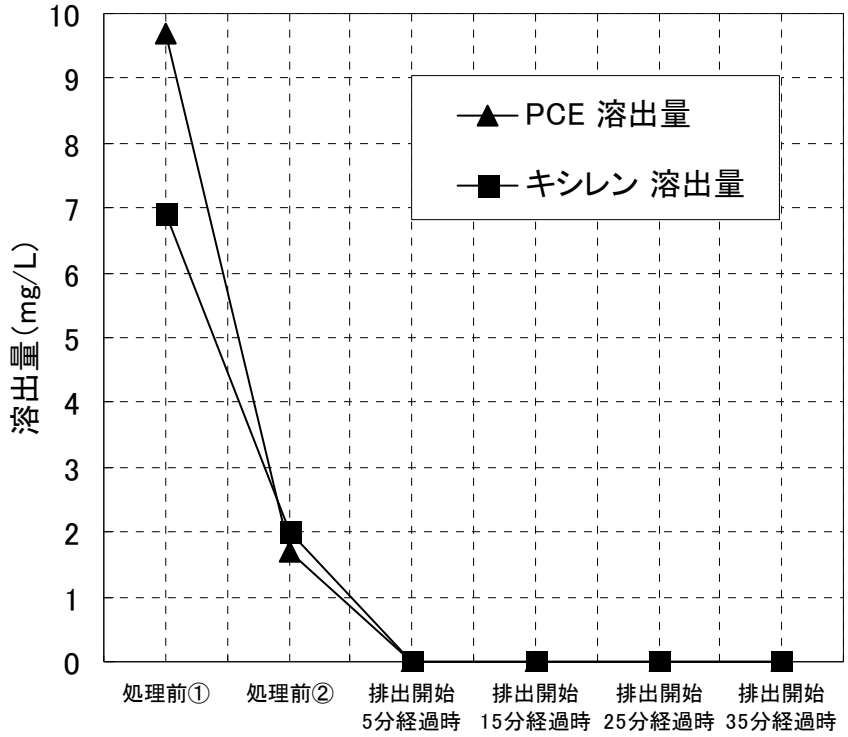


図 3.2.65　VOC 模擬汚染土壌化試験（粘性土）

b) 重質油混じり VOC 模擬汚染土浄化確認試験

本研究で開発するシステムの一般的な汚染サイトでの適用範囲を把握するため、重質油混じりの VOC 模擬汚染土を作成し、浄化効果の確認をおこなった。ツイスター及び回転ドラムの設定は、VOC 模擬汚染土壌化確認試験と同様の設定とした。測定サンプルは、模擬汚染土の濃度ムラを確認するため、無作為に 2 点採取し、処理前①、処理前②とした。また、時間経過による浄化効果の違いを確認するため、回転ドラムから排出後 4 回採取した。表 3.2.15 に重質油混じり模擬汚染土 1kg あたりの配合を示す。

表 3.2.15　模擬汚染土の配合

汚染物質	添加量 mL	比重 g/cm^3	重量 mg	想定溶出量 （抽出物） mg/L(mg/kg)
テトラクロロエチレン	1	1.623	1.623	162.3
キシレン	1	0.88	0.88	88
A 重油			12,000	12,000

表 3.2.16 に公定分析結果、図 3.2.66、67 に砂質土における重質油混じり VOC 模擬汚染土浄化試験結果、図 3.2.68、69 に粘性土における結果を示す。PCE 浄化目標値 0.1mg / L、キシレン浄化目標値 0.4 mg / L を大きく下回った。こちらもそれぞれの汚染物質の浄化目標値を大きく下回った。ノルマルヘキサン抽出物についても、浄化目標 1,000mg/kg 以下を大きく下回った。砂、粘性土共に土砂温度は、160℃以上に上昇、含水比は 0.1%に下がっており、この条件を満たすことで、ほぼ浄化可能と言える。

表 3.2.16　公定分析結果

土砂	機器設定	採取位置	PCE (mg / L)	キシレン (mg / L)	ノルマルヘキサン抽出物（鉱油）(mg / kg)
砂質土	処理量 ： 200kg/hr ツイスター：900rpm 回転ドラム：20 分滞留	処理前①	15	7.4	860
		処理前②	15	6.7	870
		5 分後	0.0008	0.0077	100 未満
		15 分後	0.0007	0.0084	100 未満
		25 分後	0.0005	0.0077	100 未満
		35 分後	0.0008	0.008	100 未満
粘性土	処理量 ： 50kg/hr ツイスター：900rpm 回転ドラム：20 分滞留	処理前①	11	5.5	1800
		処理前②	8	5.2	1200
		5 分後	0.0002	0.035	190
		15 分後	0.0017	0.02	120
		25 分後	0.022	0.05	100 未満
		35 分後	0.0019	0.04	100 未満

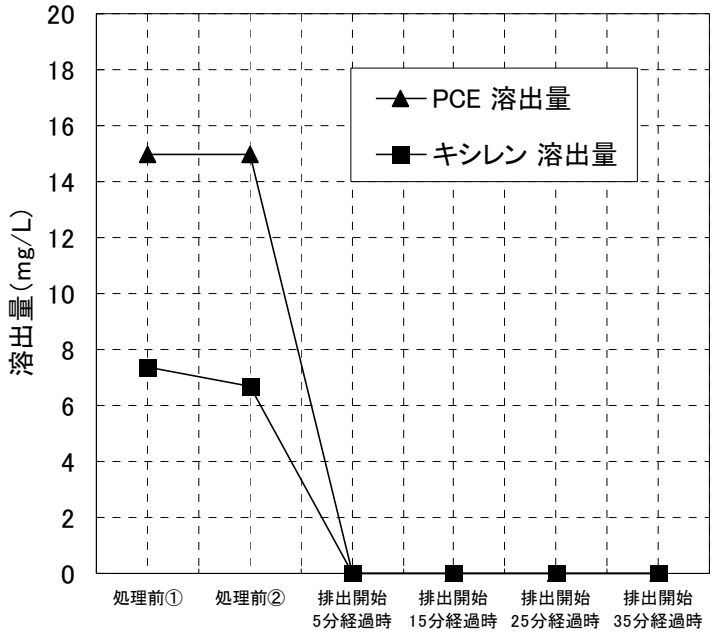


図 3.2.66　重質油混じり VOC 模擬汚染土浄化試験（VOC、砂質土）

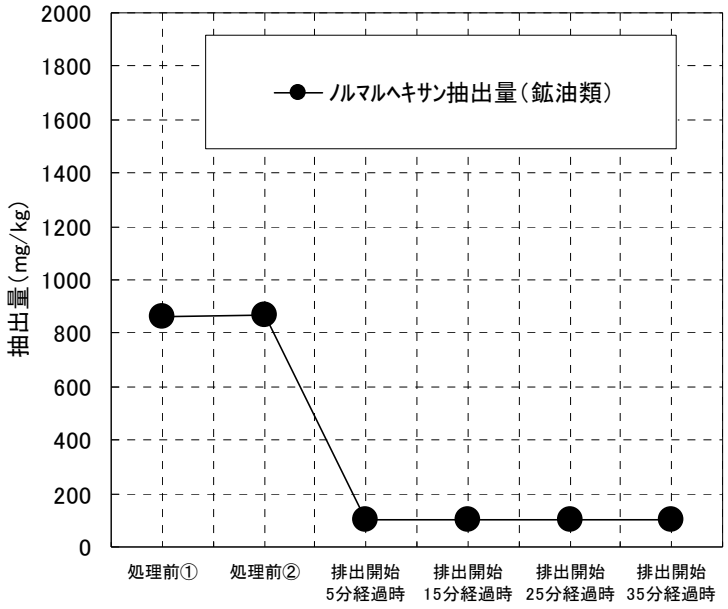


図 3.2.67　重質油混じり VOC 模擬汚染土浄化試験（重質油、砂質土）

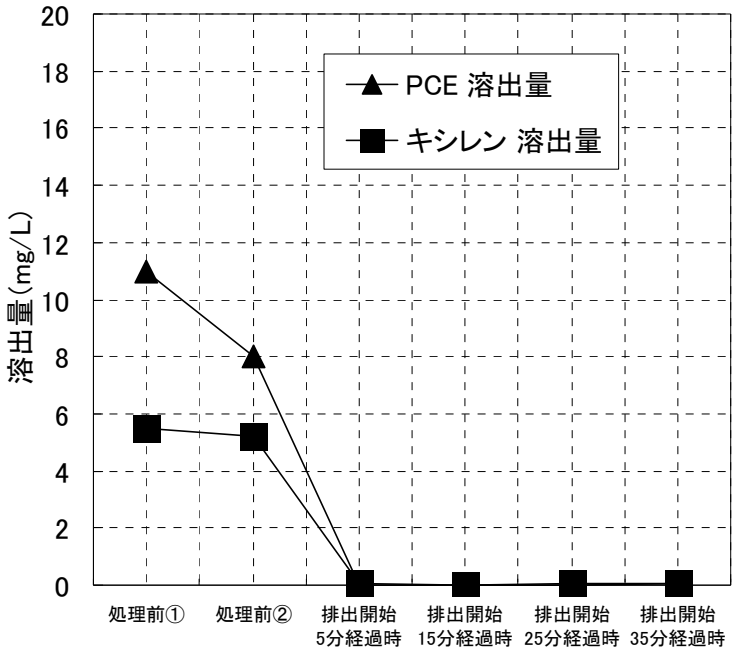


図 3.2.68　重質油混じり VOC 模擬汚染土浄化試験（VOC、粘性土）

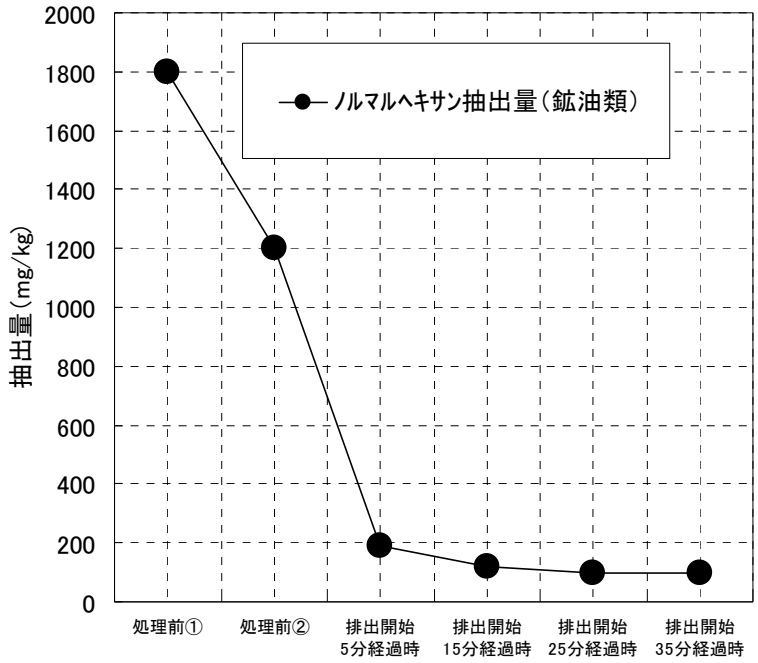


図 3.2.69　重質油混じり VOC 模擬汚染土浄化試験（重質油、粘性土）

(4)　熱効率の検証

表 3.2.16 に砂質土を 100kg/hr で供給する場合の、回転ドラムにおける必要熱量と加熱に必要な時間を示す。熱風の効率を 25%とした場合、152,500kcal/hr の熱量が必要で、選定したジェットヒータ 5 台で 0.2 時間（12 分）の加熱時間となり、ほぼ試験結果と等しくなる。表 3.2.17 に砂質土を 200kg/hr で供給する場合の、ツイスター･回転ドラムにおける必要熱量と加熱に必要な時間を示す。熱風の効率を 50%とした場合、152,500kcal/hr の熱量が必要で、選定したジェットヒータ 5 台で 0.2 時間（12 分）の加熱時間となり、ほぼ試験結果と等しくなる。ツイスター･回転ドラム連続システムでは、熱風の効率が 2 倍になり、処理量が 2 倍にできると言える。熱源を熱風炉にした場合は、燃料消費量から算出すると約 80,000kcal /hr であった。必要熱量からは、約 90%を有効に利用できることがわかった。以上の結果から、製作した試験装置（ツイスター・回転ドラム連続システム）では、一般的な 30%程度の含水比の土砂では、その処理量は、150kg / hr であると予想できる。

表 3.2.17　熱効率の検証（回転ドラム単体）

土と水の条件

土粒子重量	Ws		**91**	**kg**								
土粒子の比熱	Cs		**0.19**	**kcal/kg･℃**								
含水比	a		10	%								
土の初期温度	T0		10	℃								
水の蒸発温度	Tw		100	℃								
気化潜熱	Lw		**539**	**kcal/kg**								
水の比熱	Cw		**1**	**kcal/kg･℃**								
加熱温度	Tf		**160**	**℃**								
土中の水分重量	Ww	=	Ws	×	a	÷	100					
		=	91	×	10	÷	100					
		=	**9**	**kg**								

必要熱量

土を加熱するのに	Qs	=	Ws	×	Cs	×(	Tf	−	T0	)		
必要な熱量		=	91	×	0.19	×(	160	−	10	)		
		=	2,594	kcal								
水を加熱するのに	Qw	=	Ww	×{	Cs	×(	Tw	−	T0	)+	Lw	}
必要な熱量		=	9	×{	1	×(	100	−	10	)+	539	}
		=	5,724	kcal								
必要な熱量	Q	=	Qs	+	Qw							
		=	2,594	+	5,724							
		=	**8,317**	**kcal**								

加熱時間

風量	Vj	**60**	**m3/min**		
総熱出力	Qj	**152,500**	**kcal/hr**	(ｼﾞｪｯﾄﾋｰﾀｰ×5 台)	
効率	η	25	%		

実熱出力	Qjη	=	Qj	×	η	÷	100
		=	152,500	×	25	÷	100
		=	**38,125**	**kcal/hr**			
加熱に必要な時間	tj	=	Q	÷	Qjη		
		=	8,317	÷	38,125		
		=	**0.2**	**hr**			

表 3.2.18　熱効率の検証（ツイスター＋回転ドラム）

土と水の条件

土粒子重量	Ws		**182**	**kg**							
土粒子の比熱	Cs		**0.19**	**kcal/kg･℃**							
含水比	a		10	%							
土の初期温度	T0		10	℃							
水の蒸発温度	Tw		100	℃							
気化潜熱	Lw		**539**	**kcal/kg**							
水の比熱	Cw		**1**	**kcal/kg･℃**							
加熱温度	Tf		**160**	**℃**							
土中の水分重量	Ww	=	Ws	×	a	÷	100				
		=	182	×	10	÷	100				
		=	**18**	**kg**							

必要熱量

土を加熱するのに	Qs	=	Ws	×	Cs	×(	Tf	−	T0	)	
必要な熱量		=	182	×	0.19	×(	160	−	10	)	
		=	5,187	kcal							
水を加熱するのに	Qw	=	Ww	×{	Cs	×(	Tw	−	T0	)+	Lw }
必要な熱量		=	18	×{	1	×(	100	−	10	)+	539 }
		=	11,448	kcal							
必要な熱量	Q	=	Qs	+	Qw						
		=	5,187	+	11,448						
		=	**16,635**	**kcal**							

加熱時間

風量	Vj	**60**	**m3/min**	
総熱出力	Qj	**152,500**	**kcal/hr**	(ｼﾞｪｯﾄﾋｰﾀｰ×5 台)
効率	η	50	%	

実熱出力	Qj η	=	Qj	×	η	÷	100
		=	152,500	×	50	÷	100
		=	**76,250**	**kcal/hr**			
加熱に必要な時間	tj	=	Q	÷	Qj η		
		=	16,635	÷	76,250		
		=	**0.2**	**hr**			

(5) 浄化処理コスト

3,000t (2,000m3) の汚染廃棄物の浄化対策工事に適用した場合の処理コストの比較を表 3.2.19 に示す。

汚染廃棄物に中低温加熱処理工法を適用した場合、一般的な VOC 汚染土壌の浄化工法であるホットソイル工法に比較して 5 倍程度の浄化コストが必要となるが、無害化することで掘削現場周辺や運搬等に伴う 2 次環境汚染のリスクが低減できるメリットがある。また、処理後の廃棄物は管理型処分場での埋立処分が可能となることから、現場周辺に VOC 汚染廃棄物の焼却等処理先が確保できない場合でも、遠隔地に運搬する必要がなく、運搬にともなうコストや温暖化効果ガス排出抑制にメリットがあると言える。なお、無害化せず、特別管理産業廃棄物として処分した場合の約 70%程度の処理費用であり、重金属や重質油を含む VOC の複合汚染サイトにおける適用可能性を見い出すことができた。

浄化対象が土壌である場合でも、ホットソイル工法に比較して 5 倍のコストが必要となるものの、汚染拡散リスクの低減等のメリットがあることから、複合汚染サイトへの適用は、十分可能性があることが示唆された。

表 3.2.19　処理コストの比較

1)ホットソイル工法（汚染土壌） a)使用設備 ホットソイル混合：ツイスターφ1000（60 t /hr） 揮発養生　　：20m×30m×8m テント ガス処理　　：活性炭集塵機 b)施工日数 10 日（プラント稼動時間 = 5 時間 /日） c)試算処理コスト 5,000 円 / t
2)中低温加熱処理工法 a)使用設備 予熱・細粒化　：ツイスターφ1000 加熱養生　　：φ1500×L6m 加熱式回転ドラム(3t / hr)×2 台 ガス処理　　：熱交換器付き活性炭集塵機 b)施工日数 100 日（プラント稼動時間 = 5 時間 /日） c)試算処理コスト 26,000 円 / t
3)特別管理産業廃棄物扱い 35,000～40,000 円 / t

3.2.4　浄化法研究の結論

(1)　結論

1)　ツイスター

a)ツイスター内部に熱風を吹き込むことにより、チェーンの打撃力による土質材料の破砕・細　粒化による含水比低下に加え、土砂温度が上昇することがわかった。

b)加熱無しでも細粒化により気散が促進される浄化効果があり、加熱することでより効果が高くなることがわかり、ツイスターが前処理設備として効果を期待できると判断できた。

c)含水比低下、土砂温度上昇、浄化は、ツイスター回転数を 900rpm の高回転にすることでより効果があることがわかった。

2)　回転ドラム

a)回転ドラム単体で、対象とした汚染物質の沸点（テトラクロエチレン 121℃、キシレン 144℃）以上に土砂温度が上昇（砂質土 155℃、粘性土 155℃）することが確認できた。

b)回転ドラム単体で汚染物質の浄化効果を確認した。テトラクロロエチレンは、目標とした 0.1mg/L 以下に浄化でき、キシレンは、目標とした 0.4mg/L を僅かに超過した。

3)　ツイスター･回転ドラム連続システム

a)回転ドラム単体の時と比して、処理量を 2 倍とした時にも対象とした汚染物質の沸点（テトラクロロエチレン 121℃、キシレン 144℃）以上に土砂温度が上昇（砂質土 170℃、粘性土 170℃）することが確認できた。

b)VOC 模擬汚染土浄化試験では、目標を十分達成できることが確認できた（テトラクロロエチレン 0.1mg/L 以下、キシレン 0.4mg/L 以下）。

c)重質油混じり VOC 模擬汚染土浄化試験では、VOC 模擬汚染土浄化試験同様に目標値を下回って浄化できることが確認できた。ノルマルヘキサン抽出物についても目標とした 1,000mg/kg 以下に浄化できることが確認できた。

d)対象汚染物質の沸点以上に土砂温度を上昇させると、含水比は、ほぼ 0%となり、浄化が確実に行われることがわかった。

4)　浄化処理コストの試算

熱計算に基づき、試験設備から処理量を想定し、汚染廃棄物の浄化処理コストを試算した。その結果、一般的な VOC 汚染土壌の浄化技術であるホットソイル工法の 5 倍のコストが必要であるものの、特別管理産業廃棄物として処理する場合に比較して 70%程度で処理可能であると試算できた。

3.3　微生物評価法の確立

3.3.1 研究目的

一般廃棄物及び産業廃棄物の最終処分場については、廃棄物処理法により維持管理基準や廃止基準が定められ、廃止基準については、処分場としての維持管理を続けなくても生活環境の保全上の問題が生じるおそれが無くなっていることを判断するためのものとして設定されている。また、「廃棄物最終処分場廃止基準の調査評価方法」（廃棄物学会廃棄物埋立処理処分研究部会：平成 14 年 3 月）では環境を汚濁・汚染する可能性を持つ廃棄物が自然還元状態に至る過程を安定化と位置づけ、安定化の最終状態は「もうそれ以上何の変化も起こさない状態で広義には環境に影響を与えない状態になること」であるとしている。

本研究の対象は、素掘りのくぼ地へ、特定有害産業廃棄物が埋め立てられた不法投棄現場であり、不法投棄発覚後に遮水壁を設置して汚染物質の拡散防止措置を行っているが、環境修復の完了には長期間の対策が見込まれるサイトである [1)]。一般に不法投棄による汚染サイトでは、油分や重金属類などを含む複合汚染が発生しやすく、国内で発生している大規模不法投棄現場においても、その殆どで VOC による汚染が発生している [2)]。そのため、VOC 対策として様々な方法が開発され実用化されており、当現場も揚水循環浄化工法などにより積極的な浄化対策が採られてきた現場である。その結果、周辺地下水の汚染物質濃度は大幅に低減されたが、ベンゼン、ジクロロメタンなど環境基準値程度の低濃度で検出される状態が継続している。VOC 汚染が残留する修復現場では取り得るべき積極的な対策実施後の低濃度残留地域のフォローアップ技術としての MNA 適用は重要な技術である。NA には①土粒子への吸着、②気相への揮散、③希釈・拡散、④地下水・土壌成分との化学反応による分解、⑤微生物分解などがあるが、地下に拡散した VOC 汚染の場合、汚染成分の微生物分解が期待できることから、現場地下水での微生物による VOC 分解能の確認と分解微生物の特定が MNA 適用に際し事前確認することが最良であると考えられる。MNA は既存の手法であり、環境基準項目に挙げられる特定の物質を対象として適用されるが、複合汚染が発生している汚染サイトや廃棄物の埋立処分地などの高度汚染地となった現場の安全性を担保するための評価方法については、現在、広く研究されているところである。「廃棄物最終処分場安定化監視マニュアル」を例にとっても、浸出水の理化学試験に加え、現場に存在する微生物活性の調査が取り入れられており、微生物は周辺の生息条件に高い感受性を有し、変化することから、それらを調べることは汚染地の安定化を評価できる有効な方法になる可能性が高い。対象サイトにおいても周辺に拡散した汚染物質が自然減衰により汚染拡散のない場所と同様の状態に戻るまでをモニタリングすることにより、安全性を確認することが必要である。当現場では、燃え殻、医療系、各種溶剤、塗料など多種類の廃棄物が投棄され、環境基準に規定されていない物質が汚染地下水中には含まれていることが推測されることから、環境修復程度の判断にはこれら未規制物質も含めた総合的な評価手法が必要とされている。

これらのことから、VOC 汚染残留地のモニタリング方法として、従来の理化学的な地下水環境基準項目等の測定に加え、地下水細菌叢調査を取り入れた新たな手法の研究を行った。地下水中の細菌叢を調べることで、次の①と②について同時に確認しながら安定化過程をモニタリングする方法の開発を目指した。

①MNA 適用の前提条件となる現場地下環境中での VOC 微生物分解の確認
②未規制物質も含めた総合的地下環境の安定化指標としての利用

次に、1)としてこれまでに汚染地や埋立処分地などでの適用が検討されている安定化指標について、2)にこれまで河川などで実施されている生物調査についての特徴について記す。

1) 安定化指標について

現在、廃棄物最終処分場の廃止時の調査方法として、安定化監視マニュアルが作成され、それを基に処分場の安定化程度を把握する手法が多くとられている。また、それ以外にも安定化に関する調査方法として、検討及び実用されている代表的な手法は下記の通りである。

a) 廃棄物最終処分場安定化監視マニュアル調査項目

・埋立廃棄物の調査（組成、有機物、水分量、細菌、元素）
・浸出液（pH、BOD、COD、NH_4、水温、 EC、ORP）
・湧出ガス（CH_4、CO_2、 H_2S、NH_3、O_2、N_2）
・内部温度（深度別、浸出液）
・表層調査（沈下量、力学性状、植生）

これらのデータ蓄積を行い、その傾向により安定化の程度を判断する。化学調査、物理調査を主としており、規制対象有害物質の測定と微生物活動による有機物の分解程度をその代謝生成物や温度などにより間接的に評価する方法である。

b) 指標生物等を用いた毒性試験

・魚類による急性毒性試験（LC_{50}）

検水の希釈液中に一定時間飼育し、その間に供試魚の 50%が死ぬような希釈液中の検水濃度で表す。

・MicrotoxTM テスト

サンプルを希釈し微生物に暴露して、5 分後、15 分後の光減少を測定し、50%光減少濃度で表す。

・ToxScree-Ⅱ

サンプル希釈後に微生物に暴露し 60 分後の光減少濃度を測定、50%光減少濃度で表す。陽イオン重金属に反応する試薬と有機汚染物質及び陰イオン重金属に反応する試薬を用いて試験する。

・RoTox

生後 24 時間以内の Rotifer を使用し、人工海水により希釈した各サンプルを用いて 24 時間、48 時間暴露後の致死率を測定し 50%致死濃度で表す。

生物を利用したこれらの試験は、規制物質に限らず未規制物質を含めた生態影響を評価することができるが、利用する指標生物により物質感受性に違いがある。

c) 存在微生物の機能性評価試験

・DNA マイクロアレイ法

処分場内の金属耐性、有機物分解にかかわる微生物の機能性遺伝子と結合し、蛍光を発するマイクロアレイを用いる。検液の DNA 抽出、増幅、精製を行い、マイクロアレイ上で反応させたのち、レーザースキャンにより画像解析を行い、得られるシグナルデータにより評価する。

微生物の代謝に関する既知の遺伝子情報を基に、対象地に存在する微生物の機能性遺伝子情報を得ることにより、物質循環について評価する。

本研究は、廃棄物投棄地周辺の地下環境調査を目的としており、一般に環境調査は化学調査、物理調査及び生物調査により構成されるべきものである。a) 、b) に示した調査方法は、化学調査と物理調査に該当する。c) は存在している微生物の機能を評価する方法であり、現場に生息する生物叢（微生物叢）を反映しており、a) 、b)よりは生物調査に近い方法であるが、調査する機能性遺伝子により採取できるデータが人為的に限定されてしまうという課題がある。地下環境の状態を先入観無しに評価するには、そこに存在する生物種を調べるという本来の生物調査が最も適切である。

2) 生物調査について

生物調査は河川の水質指標として利用されることが多く、生物種とその個体数により水質状態を評価する方法である。本研究では地中の微生物種とその存在比を調べる生物（微生物）調査により地下環境中の状態を評価する方法を試みている。従来からなされている生物調査から、本研究で試験している生物調査の特徴は次のようなものと考えられる。

長所

・有害物質等による複合的な汚染は、微生物の生育環境に大きな環境インパクトを与えることから、環境影響について総合的、複合的にとらえることができる。

・地下水が豊富に存在する今回のサイトのような場所では、刻々と変化する地下環境の様子を地下水質の理化学試験結果のみから正確に捉えることは困難であるが、その場に存在している生物はそれら変化する環境影響を反映した形態で存在していると考えられ、平均化された地下環境を把握することが可能である。

短所

・生物調査の結果は定性的で数量化できない。

汚染土壌の安定化状況の評価は総合的なもので数値化は難しいが、ある特定の指標細菌の存在量を捉えて数値化することは可能である。しかし、その指標細菌と要因との定量的な関わりが不明確であるため定量的評価は重要な意味を持たない。

・地域特性があり一般化できない。

微生物は栄養源となる有機物の量、溶存酸素量、微量金属類等の多少や水温により生育する種が異なり、汚染物質の代謝機能を持つ既知の微生物の有無や存在量を調べるだけでは地域特性によりあまり意味を持たない。

このことから、物理化学的調査と併行して総合的に判断することが最も良い調査方法であると考えられ、地域特性を有することを考慮し、汚染現場周辺の汚染のない地下環境と比較することにより安定化を評価する方法について検討を試みた。これまで、地下環境調査として実施される事例がほとんどなかった生物調査の方法として、地下水中の菌叢調査を実施し安定化の指標とする場合のイメージを図 3.3.1 に示す。

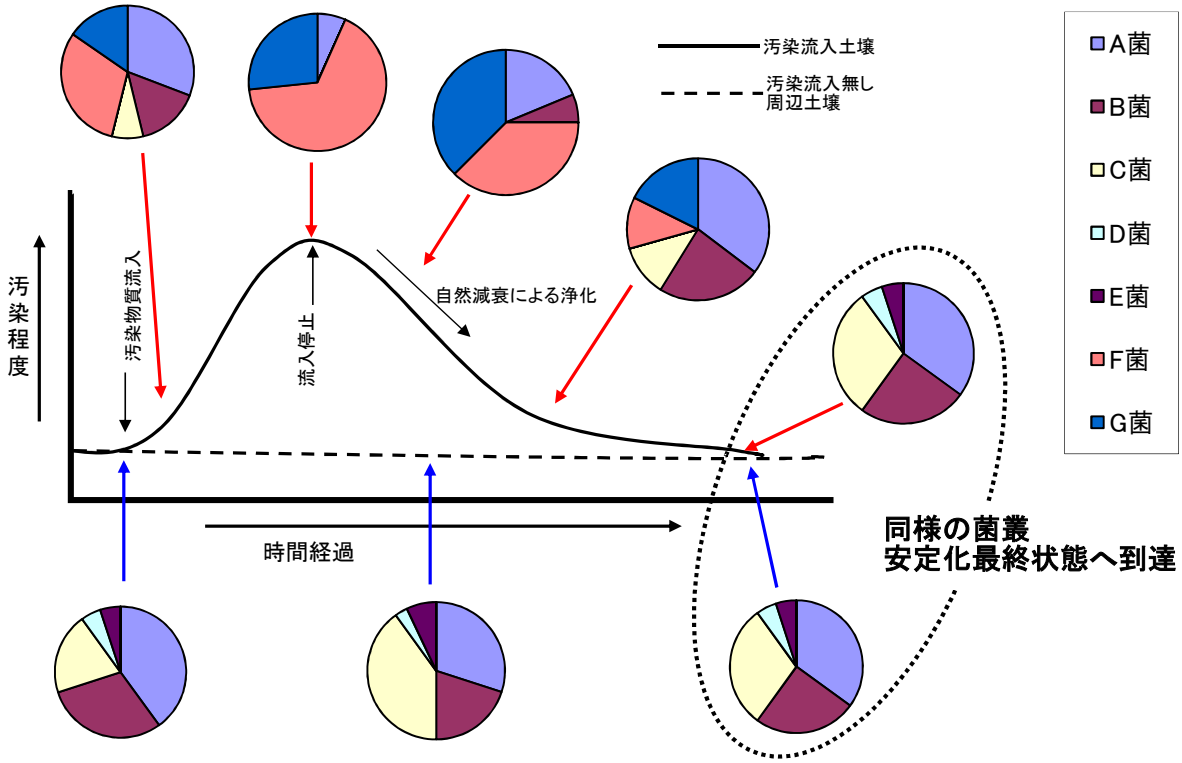


図 3.3.1　菌叢調査による安定化把握のイメージ

【参考文献】

1) 西田憲一、古市徹、石井一英：不法投棄現場の VOC 汚染地下水の浄化プロセスの評価とその対策に関する研究(2011):土木学会論文集 G（環境）,Vol.67,No.6,P489-499

2) 古市徹、西則雄　編著：不法投棄のない循環型社会づくり(2009)：(株)環境新聞社

3.3.2　研究方法

今回、研究対象とした修復現場の遮水壁内部と外部の土壌の菌叢調査を行い、汚染物質による菌叢への影響の有無について調査した。また、遮水壁外については、観測井から採取した地下水の菌叢調査を実施するとともに、周辺に拡散した汚染物質の微生物による分解能について、有害物質の添加・分解試験を行った。また、汚染拡散地の安定化過程における菌叢変化については、遮水壁外の地下水の流れ方向に沿った地下水中の菌叢調査結果から、汚染流入前後の菌叢を明らかとし、その安定化指標としての利用方法について解析を行った。菌叢調査は産業医科大学が開発したクローンライブラリー法により行った。さらに、簡易な菌叢確認方法として PCR-DGGE 法（濃度勾配ゲル電気泳動法）による調査もあわせて実施し、今後の日常検査における菌叢確認方法についての知見の集積も行った。実験方法は大別して下記のとおりである。

(1) 地下水中の微生物による汚染物質分解培養試験
(2) 地下水からの VOC 分解微生物単離試験
(3) 不法投棄地及び周辺土壌での菌叢調査及び有害物質等含有量調査
(4) 不法投棄地周辺地下水の菌叢及び水質調査
(5) 地下水中微生物からの VOC 分解に関与する遺伝子の検出

上記の順に従い試験方法を次に示す。
本研究で実施した全ての試験のサンプリング位置を図 3.3.2 に示した。

(1)　地下水中の微生物による汚染物質分解培養試験

微生物による汚染物質分解試験は、不法投棄地北側の B7-2 観測井と、同南側のオ-2 観測井の 2 地点の地下水を用いて次の(a)(b)の試験を実施した。周辺地下水からはベンゼンとジクロロメタンが環境基準値を超過して検出されていること、トルエン（要監視項目）が mg/L オーダーの高い濃度で検出されていることから、ベンゼン、トルエン、ジクロロメタンを対象物質として試験を実施した。実験は好気性条件と嫌気性条件で次の(a),(b)の内容で実施した。

(a) 好気性条件での VOC 添加分解培養試験
　a1) ベンゼンとトルエン添加分解培養試験
　a2) ジクロロメタン添加分解培養試験
　a3) 温度勾配培養によるベンゼン、トルエン添加分解培養試験（B7-2 地下水で実施）
(b) 嫌気性条件での VOC 添加分解培養試験
　b1) ベンゼンとトルエン添加分解培養試験
　b2) ジクロロメタン添加分解培養試験

続いてこれら(a)(b)の試験方法を順に示す。

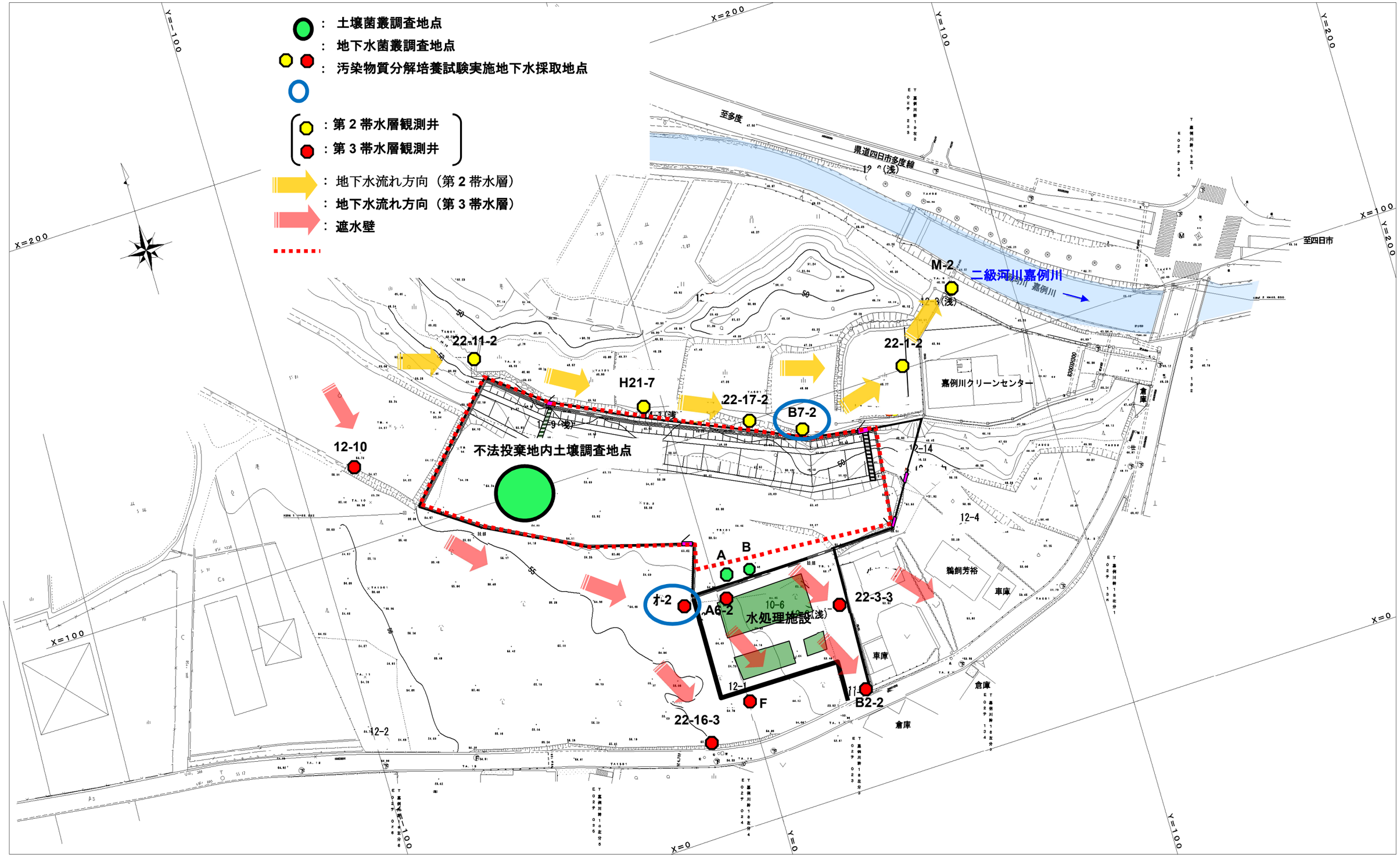


図 3.3.2 微生物評価法研究のための土壌及び地下水調査地点

0 10 20 30 40 50m

(a) 好気性条件での VOC 添加分解培養試験

a1) 好気性条件でのベンゼンとトルエン添加分解試験

地下水にベンゼン、トルエンを加え、好気性条件で分解培養試験を行った。試験系列を表 3.3.1 に示す。

表 3.3.1　地下水でのベンゼン、トルエン添加分解培養試験

名　称	試料水	VOC 添加
ブランク(BL)	滅菌蒸留水	有り
コントロール (B7-2 又は オ-2)	地下水	無し
B7-2 又は オ-2	地下水	有り

試験操作は、ガラス製 5L 瓶に現場から採取した地下水を 4.5L 分取し、ブランク（BL）と B7-2 又は オ-2 の系に VOC 成分として、ベンゼン、トルエンが約 5mg/L の濃度になるように添加した後、シリコン栓で密栓し、25℃で振とう培養を行った。サンプリング操作は全系列、同様に行った。培養中は 12 時間毎にサンプリングを行い、ヘッドスペースサンプラー（HSS）GC/MS でベンゼン、トルエンの濃度測定を行った。分解が確認されたサンプルでクローンライブラリー法による菌叢解析を実施し、菌叢変化を調べた。簡易な菌叢解析手法である PCR-DGGE 法による解析も実施した。

a2) ジクロロメタン添加分解試験

地下水にジクロロメタンを加え、好気性条件で分解培養試験を行った。試験系列を表 3.3.2 に示す。

表 3.3.2　地下水でのジクロロメタン添加分解培養試験

名　称	試料水	VOC 添加
ブランク(B7-2)	滅菌地下水(B7-2)	ジクロロメタン
B7-2	地下水　(B7-2)	ジクロロメタン
ブランク(オ-2)	滅菌地下水(オ-2)	ジクロロメタン
オ-2	地下水　(オ-2)	ジクロロメタン

試験方法は、ガラス製 2L 瓶に試料水（B7-2、オ-2）を 1.5L 分取し、ブランクには B7-2、オ-2 それぞれの地下水をオートクレーブ滅菌したものを用いた。VOC 成分としてジクロロメタンを約 10mg/L の濃度になるように添加し、シリコン栓で密栓した後、25℃で振とう培養を行った。サンプリング操作は全系列、同様に行った。培養中は適宜サンプリングし（HSS）GC/MS でジクロロメタンの濃度測定を行った。

a3) 温度勾配培養によるベンゼン、トルエン添加分解培養試験（B7-2 地下水で実施）

B7-2 地下水を用いて、培養温度条件の違いによる VOC 分解能について調べた。
試験は ADVANTEC 社製(TN-2148)温度勾配振とう培養試験機で行った。温度条件は図 3.3.3 に示すとおり、8.3～38.6℃の範囲で等間の温度差をつけて培養した。

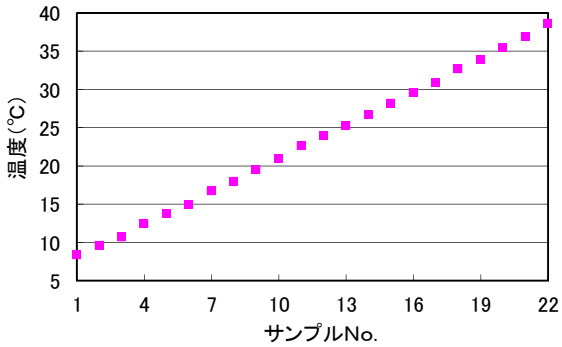


図 3.3.3 培養試験温度

培養は B7-2 地下水にベンゼン及びトルエンを約 5mg/L となるように添加し、培養用 L 型試験管に 25ml ずつ分取し、シリコン栓で密栓した後、培養試験機にセットした。また、培養中の揮散による影響を確認のブランクとして、滅菌地下水にベンゼン及びトルエンを添加した検液を L 型試験管に 25ml ずつ分取し、シリコン栓で密栓した後、40.5℃と 42.4℃の温度条件で培養するように培養試験機にセットした。培養は振とう培養で 8 日間行った。適宜、サンプリングを行い、ヘッドスペースサンプラー（HSS）GC/MS によりスキャン測定を行い、ベンゼン、トルエンの TIC(トータルイオンクロマト)ピークにより、分解の確認を行った。また、PCR-DGGE 法による菌叢調査もあわせて行った。

(b) 嫌気性条件での VOC 添加分解培養試験

b1) ベンゼンとトルエン添加分解培養試験

地下水にベンゼン、トルエンを加え、嫌気性条件で分解培養試験を行った。試験系列を表 3.3.3 に示す。

表 3.3.3 嫌気性条件における地下水でのベンゼン、トルエン添加分解培養試験

名　称	試料水	VOC 添加
ブランク(B7-2)	滅菌地下水(B7-2)	有り
コントロール(B7-2)	地下水　(B7-2)	無し
B7-2	地下水　(B7-2)	有り
ブランク(オ-2)	滅菌地下水(オ-2)	有り
コントロール(オ-2)	地下水　(オ-2)	無し
オ-2	地下水　(オ-2)	有り

試験操作は、コントロール及び B7-2 又はオ-2 の系は、ガラス製 5.0L 瓶に現場から採取した地下水を 5.0L 分取した。また、ブランクには B7-2、オ-2 それぞれの地下水をオートクレーブ滅菌したものを用いた。30 分間窒素ガスでばっ気後、ブランク（BL）と B7-2 又はオ-2 の系に VOC 成分として、ベンゼン、トルエンを約 5mg/L の濃度になるように添加した後、ガラス製 75mL バイヤル瓶に 50mL 分注した。バイヤル瓶の容器気相部分を嫌気性インキュベータ（SANYO MIP-1025）で窒素充填して嫌気状態にした後、クランプキャップで密栓し、25℃。35 日間静置培養を行った。サンプリング操作は全系列、同様に行った。培養中は 7 日間毎にサンプリングを行い、ヘッドスペースサンプラー（HSS）GC/MS でベンゼン、トルエンの濃度測定を行った。

b2) ジクロロメタン添加分解培養試験

地下水にジクロロメタンを加え、嫌気性条件で分解培養試験を行った。試験系列を表 3.3.4 に示す。

表 3.3.4　嫌気性条件における地下水でのジクロロメタン添加分解培養試験

名　称	試料水	VOC 添加
ブランク(BL)	滅菌蒸留水	有り
コントロール (B7-2 又は オ-2)	地下水	無し
B7-2 又は オ-2	地下水	有り

試験操作は、コントロール及び B7-2 又はオ-2 の系は、ガラス製 1.0L 瓶に現場から採取した地下水を 1.0L 分取した。また、ブランクには滅菌蒸留水を用いた。30 分間窒素ガスでばっ気後、ブランク（BL）と B7-2 又はオ-2 の系に VOC 成分として、ジクロロメタンを約 10mg/L の濃度になるように添加した後、シリコン栓で密栓し、25℃。28 日間静置培養を行った。サンプリング操作は全系列、同様に行った。培養中は 7 日間毎にサンプリングを行い、ヘッドスペースサンプラー（HSS）GC/MS でジクロロメタンの濃度測定を行った。

(2) 地下水からの VOC 分解微生物単離試験

B7-2 とオ-2 地下水で好気条件でのベンゼン、トルエンの分解能力が確認されたことから、それら地下水から、ベンゼン、トルエンの分解微生物の単離を行った。試験方法は、100ml 三角フラスコに BSM(1L 中に 1.0g K_2HPO_4, 1.0g $(NH_4)_2SO_4$, 0.2g $MgSO_47H_2O$, 0.01g $FeCl_3$, 0.05g NaCl, 0.05g $CaCl_2$)液体培地を 40ml 分取し、VOC 成分としてベンゼンとトルエンをそれぞれ、10mg/L となるように添加した。そこに、栄養源として yeastextract を添加し、地下水 200µl を加えて密栓した後、25℃で振とう培養を行った。培養開始から 4 日後に検液を採取しヘッドスペースサンプラー（HSS）GC/MS によりスキャン測定を行い、ベンゼン、トルエンのピークの確認を行った。それらの試験系列を表 3.3.5 に示す。

表 3.3.5　現場地下水での VOC 添加分解試験

検液名称	培養溶媒	添加地下水 (B7-2 or オ-2)	yeastextract （mg/L）	添加 VOC
ブランク	BSM 培地	添加無し	0.0	ベンゼン、トルエン
Ben 0	BSM 培地	200ml	0.0	ベンゼン
Ben 0.1	BSM 培地	200ml	0.1	ベンゼン
Ben 10	BSM 培地	200ml	10.0	ベンゼン
Tol 0	BSM 培地	200ml	0.0	トルエン
Tol 0.1	BSM 培地	200ml	0.1	トルエン
Tol 10	BSM 培地	200ml	10.0	トルエン
Mix 0	BSM 培地	200ml	0.0	ベンゼン、トルエン
Mix 0.1	BSM 培地	200ml	0.1	ベンゼン、トルエン
Mix 10	BSM 培地	200ml	10.0	ベンゼン、トルエン

BSM 液体培地により、ベンゼン、トルエンの分解が確認された系の検体を、ベンゼン、トルエンを添加した BSM 寒天培地に塗布し、菌のコロニー化を行った。コロニー化の際に調製した寒天培地を表 3.3.6 に示す。

表 3.3.6　コロニー化培養試験

	培地	塗布検液	yeastextract （mg/L）	添加 VOC
ベンゼン 寒天培養系	BSM	Ben 0	0.0	ベンゼン
	BSM	Ben 0.1	0.1	ベンゼン
	BSM	Ben 10	10.0	ベンゼン
トルエン 寒天培養系	BSM	Tol 0	0.0	トルエン
	BSM	Tol 0.1	0.1	トルエン
	BSM	Tol 10	10.0	トルエン
ベンゼン 寒天培養系	BSM	Mix 0	0.0	ベンゼン
	BSM	Mix 0.1	0.1	ベンゼン
	BSM	Mix 10	10.0	ベンゼン
トルエン 寒天培養系	BSM	Mix 0	0.0	トルエン
	BSM	Mix 0.1	0.1	トルエン
	BSM	Mix 10	10.0	トルエン

寒天培地上に成長したコロニーを釣菌し、SCD(1L 中に 15.0g トリプトン, 5.0g ソイペプトン, 5.0g 塩化ナトリウム, 15.0g カンテン)寒天培地にて継体培養を行い単コロニーを得た。それら採取した菌で BSM 液体培地を用いてベンゼン、トルエンの分解能確認試験を行った。分解能確認試験では yeastextract は添加せず、密栓した 100ml 三角フラスコを用いて、25℃で振とう培養を行い、培養開始から 3 日後に HSS-GC/MS によりスキャン測定を実施し、ベンゼン、トルエンのピークの確認を行った。ベンゼン、トルエン分解能を示した菌株は DNA 抽出した後、27F と 1492R Primer で 16S rDNA を増幅した。増幅した遺伝子を精製した後、シーケンス用 Primer を用いて遺伝子解析を行った [1)]。得られたシーケンスデータをデータベースと照合することにより分解菌の同定を行った.

(3) 不法投棄地及び周辺土壌での菌叢調査及び有害物質等含有量調査

不法投棄地内については土壌 6 検体(IN4.5①、IN4.5②、IN10.5①、IN14.5①、IN14.5②、IN14.5③)、遮水壁外については南側 A, B の 2 地点において土壌 4 検体(A10、A17、B10、B17)のサンプリングを行い、それぞれ理化学分析及び菌叢調査を行った。サンプリング位置を図 2.1 に示す。各試料のクローンライブラリー法による菌叢調査は、試料から抽出した DNA をテンプレートとして、16sRNA の V3 から V5 領域を含むよう Primer 341F と 907R を用いて PCR を行い、得られた PCR 産物 (約 580bp)を大腸菌にクローニングし、各サンプルにつき約 90 クローンの塩基配列を解析した後、データベースによる相同性検索(BLAST)を行った。菌数は、蛍光染色(EtBr 使用)法で行った。また、環境微生物用培地を用いた平板希釈法による好気培養菌数の測定も行った。PCR-DGGE 法による菌叢調査方法は、16sRNA の V3 から V5 領域を含むよう Primer 341F(GC クランプ)と 907R を用いて PCR を行い、得られた PCR 産物 (約 510bp)について DGGE 法により電気泳動を行った。DGGE 法は、変性剤濃度勾配 30～70%の 8%アクリルアミドゲルを用い、60℃の 0.5×TAE Buffer 中で 200V 定電圧、3 時間泳動を行った。泳動後のゲルを SYBR Green Gold で染色し、写真撮影をした。

(4) 不法投棄地周辺地下水の菌叢及び水質調査

当汚染サイト周辺で、地下水の流れにより汚染が拡散している状況を利用し、汚染物質混入前と汚染物質減衰中、減衰後の各段階で菌叢調査を実施した。菌叢の調査では、その地点での細菌の活性程度を知るために全菌数も併せて調査を実施した。

・調査地点の選定

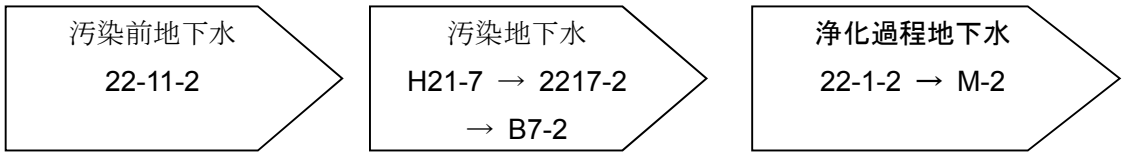
①不法投棄地北側：第 1、第 2 帯水層、不法投棄地南側：第 3 帯水層に地下水汚染が確認されている。

②第 1、第 2 帯水層の地下水の流れ方向は南西から北東方向、第 3 帯水層は北方向から南方向であり、汚染の拡散方向は、第 1、第 2 帯水層は北側、第 3 帯水層は南側となる。

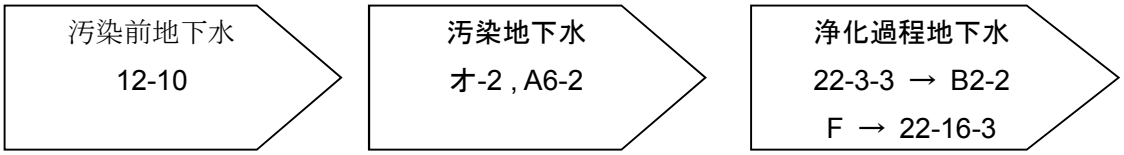
③第 1 帯水層と第 2 帯水層は投棄地中央部で連結していることが事前調査で推定されており、第 1 帯水層より第 2 帯水層の汚染物質濃度の方が高い。

上記①、②、③の理由から、投棄地北側については第 2 帯水層、投棄地南側については第 3 帯水層を調査対象とした。また、これまでの地下水の流れ方向の調査結果から汚染前地下水、汚染地下水、汚染浄化過程地下水それぞれに該当する観測井にて地下水をサンプリングし調査を実施した。サンプリングに当たっては各観測井体積の 3 倍量を事前にパージした後、検水のサンプリングを行った。

北側第 2 帯水層の調査地点（地点数 6）



南側第 3 帯水層の調査地点（地点数 7）



クローンライブラリー法による菌叢調査は、平成 22 年 11 月、平成 23 年 2 月、平成 23 年 5 月、平成 23 年 8 月に実施した。併せて、菌叢調査を実施した観測井で地下水水質分析を実施した。菌叢に強い影響を与える、水温、溶存酸素、pH、有機物等については同じ観測井で、平成 22 年 11 月から平成 23 年 10 月の間、毎月調査を行った。調査項目は次の通りである。

・毎月実施の調査項目
pH、EC、水温、DO、ORP、透視度、VOC、色度、濁度、TOC、菌叢（PCR-DGGE）

・クローンライブラリー法による菌叢調査月に追加して行う調査項目
n-ヘキサン抽出物質、T-P、T-N、NH_3-N、NO_2-N、NO_3-N、Cd、Pb、Cr、As、Cu、Zn、d-Fe、d-Mn、F、B、1,4-ジオキサン、臭気強度、菌叢（クローンライブラリー法）

クローンライブラリー法による菌叢解析及び菌数調査は前述の方法で行い、その他の水質測定項目については JIS K0102 に準拠し測定を行った。PCR-DGGE による菌叢解析は次の方法で行った。地下水及びベンゼン、トルエンを添加した経時的分解試験の各検体 100μL から MagNA Pure LC システムを使用して、DNA Isolation Kit Ⅲを用いて DNA 抽出し、100μL の抽出液を得た。検体から抽出した DNA を鋳型とし、細菌 16S rDNA の可変領域 V1 から V4 を含む増幅産物が得られるよう、GC クランプを付けた 27F 及び 518R Primer を用いて PCR を行った。PCR 増幅産物を 20%～70%変性剤濃度勾配の 8% Acrylamide ゲルを用いて、60℃の TAE buffer 中で 200V、

3 時間泳動した。泳動の終了したゲルを SYBR Gold で 30 分間染色し、蒸留水で 30 分脱色後、撮影装置で撮影した。

(5) 地下水中微生物からの VOC 分解に関与する遺伝子の検出

検体中に VOC 分解細菌が存在しているか確認するため、表 3.3.7 に示す遺伝子を Conventional-PCR 及び Real Time-PCR で検査した．反応液組成及び反応条件は，各参考文献に従って実施した。

表 3.3.7 標的とした VOC 分解遺伝子と Primer Set

Primer set	target		Reference
ALK1	alkan hydroxylase	*alk* B	2)
ALK2	alkan hydroxylase	*alk* M	2)
ALK3	alkan hydroxylase	*alk* B1	2)
NAH	Naphthalene dioxygenase	*nahAc, doxB, ndoC2, pahAc, pahA3, nahA3, nagAc, dntAc, phnAc, narA*	3)
TOD	Toluene dioxygenase	*todC1*	3)
	Benzene dioxygenase	*bedC1*	
	Chlorobenzene dioxygenase	*tcbAa*	
TOL	Xylene monooxygenase	*xylM, ntnM*	3)
	Subfamily 5 of hydroxylase component of two-component side chain mono-oxygenases		
BPH1	Biphenyl dioxygenase	*bphA, bphA1, bpdC1*	3)
BPH2-4	Biphenyl dioxygenase		3)
RMO	Toluene monooxygenase	*tmoF, tbuA1, tbhA, tbmD, bmoA*	3)
RDEG	Toluene monooxygenase		3)
PHE	Phenol monooxygenase	*dmpN, phhN, poxD,* Phenol hydroxylase alpha subunit	3)
TBMD	Subfamily 1 of alfa-subunit o fhydroxylase component of multicomponent mono-oxygenases		4)
TMOA	Subfamily 2 of alfa-subunit of hydroxylase component of multicomponent mono-oxygenases		4)
XYLA	Electron transfer component of two-component side chain mono-oxygenases		4)
TODC1	Subfamilies D.1.B, D.1.C,D.2.A, D.2.B, and D.2.C of -subunits of type D iron-sulfur multicomponent aromatic dioxygenases		4)
XYLE	Subfamily 1.2.A of catechol extradiol dioxygenases		4)
XYLE2	Subfamily 1.2.B of catechol extradiol dioxygenases		4)
CDO	Cdo (U01826) of subfamily 1.2.C of catechol extradiol dioxygenases		4)
TBUE	TbuE (U20258) of subfamily 1.2.C of catechol extradiol dioxygenases		4)
TODE	TodE (Y18245), TodE(Y18245), and TobE (AF180147) of subfamily 1.3.B of catechol extradiol di		4)
tceA	reductive dehalogenase	TCE→DCEs, DCEs→VC, VC→Ethylene	5)
vcrA	reductive dehalogenase	DCEs→VC	5)
bvcA	reductive dehalogenase	VC→Ethylene	5)

【参考文献】

1) 篠田吉史, 加藤暢夫, 森田直樹, (2000) 16S rRNA 遺伝子解析による細菌の系統分類, 島津評論, 57, 121-132.

2) Kohno, T., Y. Sugimoto, S. Kazunari, et. al.,(2002) Design of PCR Primers and Gene Probes for General Detection of Alkane-Degrading Bacteria. Microbes Environ., 17, 114-121.

3) Baldwin, B. R., C. H. Nakatsu, and L. Nies. (2003) Detection and Enumeration of Aromatic Oxygenase Genes by Multiplex and Real-Time PCR. Appl. Environ. Microbiol., 69, 3350-3358.

4) 秋山恭子, 紋川 亮. (2009) バイオレメディエーションに向けた遺伝子解析による VOC 分解菌のプロファイリング, 都産技研年報, 4, 12-15.
5) Holmes, V. F., J. He, P. K. H Lee, et. al., (2006) Discrimination of Multiple Dehalococcoides Strains in a Trichloroethene Enrichment by Quantification of Their Reductive Dehalogenase Genes. Appl. Environ. Microbiol., 72, 5877-5883.

3.3.3　研究結果及び考察

(1)　地下水中の微生物による汚染物質分解培養試験

(a) 好気性条件での VOC 添加分解培養試験

a1) ベンゼンとトルエン添加分解培養試験

B7-2 地下水での試験結果を図 3.3.4～図 3.3.7 に示す。B7-2 地下水にベンゼン、トルエンを約 5mg/L 加えて好気性条件で培養すると、それらは 48 時間後には分解され、検出下限値(0.001mg/L)以下となった。ブランク(BL)はサンプリング操作等による VOC 損失の確認用であるが、試験中は添加した VOC が試料水中に保持されていることが判る。培養 48 時間後の培養液の濁度(WL=620nm)測定では、ベンゼンとトルエンを添加したものは微増、添加無しのものは微減を示した。同じ検体での蛍光染色法による菌数測定では培養後の検体で菌数が増加した結果となっており、好気条件の培養及びベンゼン、トルエンの添加でそれらを炭素源とする菌数が増加し、それら増加した菌によりベンゼン、トルエンの分解が進んだと考えられた。菌叢解析の結果から培養により Betaproteobacteria が増加していることが判る。B7-2 地下水にも 4 割程度 Betaproteobacteria が存在していたが、培養後は約 8 割にまで増加していることから、Betaproteobacteria に属する菌がベンゼン、トルエンの分解に関与したと考えられる。

オ-2 地下水を用いた試験の結果を図 3.3.8～図 3.3.11 に示す。オ-2 の地下水では試験開始後、約 36 時間でベンゼン、トルエンの濃度の急激な低下が始まり、約 48 時間後にベンゼン、トルエンが分解され検出下限値以下となった。図 3.3.9 に示した培養中の濁度測定結果では、ベンゼン、トルエンの濃度低下がみられた時間帯に濁度の上昇が確認された。また、培養前と培養 60 時間後の検液の蛍光染色法による全菌数測定の結果からも、VOC を添加した試料では明らかに菌数が増加していることが確認できた。さらに、培養前と培養 60 時間後の菌叢解析を行ったところ、VOC を添加した試料では Gammaproteobacteria が 9 割以上を占める菌叢となっていた。

B7-2 とオ-2 地下水ではベンゼン、トルエンの分解傾向に違いが見られた。B7-2 地下水では、ベンゼン、トルエン濃度は培養開始直後から分解が始まっていると考えられ、オ-2 地下水では培養 36 時間までは BL と同様の濃度変化を示していることから、それまではほとんど分解は見られず、36 時間から 48 時間の間に分解されている。B7-2 地下水では、ベンゼンは環境基準(0.01mg/L)を超える濃度、また、トルエンは 0.07～0.10(mg/L)、キシレンについても 0.05～0.09(mg/L)の濃度で検出されていることから、BTX がもともと比較的高濃度で残留しており、それらを資化する細菌が存在していたと考えられる。そのため、培養試験でベンゼン、トルエンを添加した場合でも、菌にとっての環境変化は少なく、定常状態でそれらを分解したものと考えられる。一方、オ-2 地下水では、過去にはベンゼンが環境基準を超えて検出されていたが、現在、環境基準以下の低い濃度で残留しており、トルエン、キシレンも検出下限値以下である。そのことから、ベンゼン、トルエンの添加による環境変化により、それらを資化する細菌が 36 時間の誘導期の後、対数増殖期となり急激なベンゼン、トルエンの減少及び菌数の増加が見られたと考えられる。また、クローンライブラリー解析により、B7-2 地下水では Betaproteobacteria に属する *Comamonas sp.* が分解前後で多い存在割合を示しており、オ-2 地下水では分解後の検体で Gammaproteobacteria に属する *Acinetobacter* sp.が約 9 割を占める菌叢となっていることが判った。このことから、

B7-2 では *Comamonas sp.*が定常的に BTX を分解しており、オ-2 ではベンゼン、トルエンの添加がそれらを資化する *Acinetobacter* sp.の対数増殖をもたらしたと考えられた。

分解培養試験検体の DGGE 結果を図 3.3.12 （B7-2 地下水での培養試験）と図 3.3.13(オ-2 地下水での培養試験)に示す。B7-2 地下水にベンゼン、トルエンを添加した系では 12 時間から 60 時間まででバンドに変化が見られなかったものの、添加しない系の 48 時間目からバンドパターンに変化が見られた。オ-2 地下水ではベンゼン、トルエンを添加しない系のバンドパターンが 12 時間目から 60 時間目まで大きな変化を示さなかったが、添加した系では 12 時間目のバンドパターンはコントロールのものと似たバンドパターンを示したが、48 時間目にバンドパターンが変化し、60 時間後までそのパターンが維持されていることが判る。今回の培養試験では、B7-2 の地下水からはベンゼン、トルエンが検出されていたが、オ-2 の地下水からはベンゼン、トルエンが検出されていなかった。そのことが DGGE のバンドパターン変化に違いが生じた要因と考えられた。B7-2 の地下水の試験ではベンゼン、トルエンを添加した系で菌叢変化が少なく定常状態を維持し、添加無しの系で、炭素源となるベンゼン、トルエンの供給がなくなり菌叢に僅かであるが、変化が見られた。一方、原水中にベンゼン、トルエンがほとんど存在しなかった、オ-2 の地下水の試験では、添加なしの系では菌叢に変化が見られず、ベンゼン、トルエンを添加した系で 48 時間後に分解菌の対数増殖期への移行により菌叢に大きな変化が見られたと考えられ、クローンライブラリーの菌叢解析、濁度測定及びベンゼン、トルエン濃度測定の実験結果とも一致する結果となった。

また、DGGE 解析だけでは明瞭な結果を得ることは難しいが、DGGE 各バンドの遺伝子配列を明らかにし、多変量解析、系統樹作成などの手法を用いて、さらなる解析を加えることによりクローンライブラリー法と同等の結論が導き出せる可能性も示唆された。

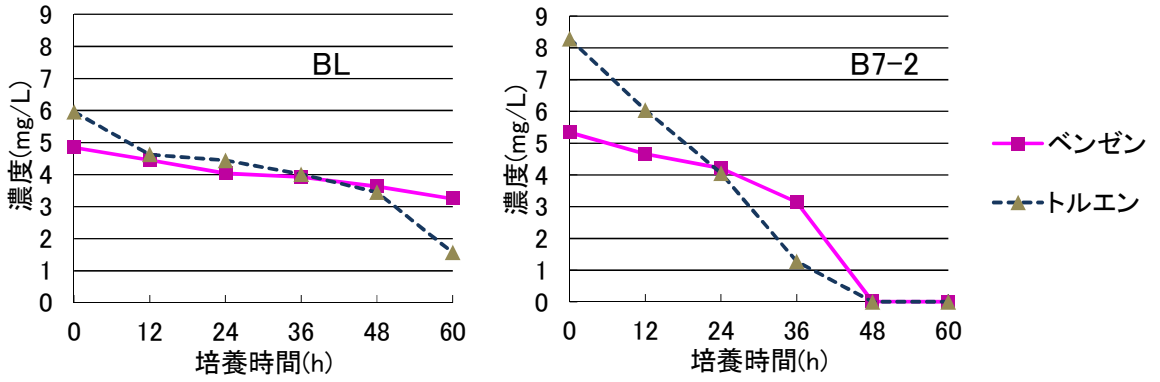


図 3.3.4　ベンゼン、トルエン分解試験での濃度変化

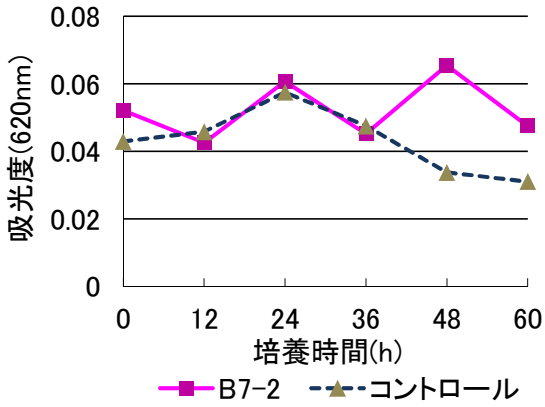


図 3.3.5 ベンゼン、トルエン分解試験の培養液の濁度変化

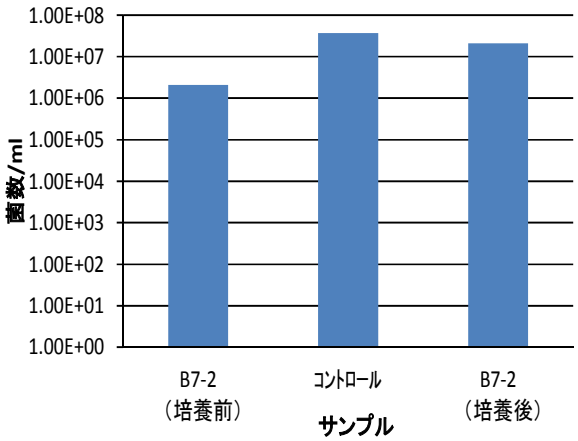


図 3.3.6 ベンゼン、トルエン分解試験前後の菌数（蛍光染色法）

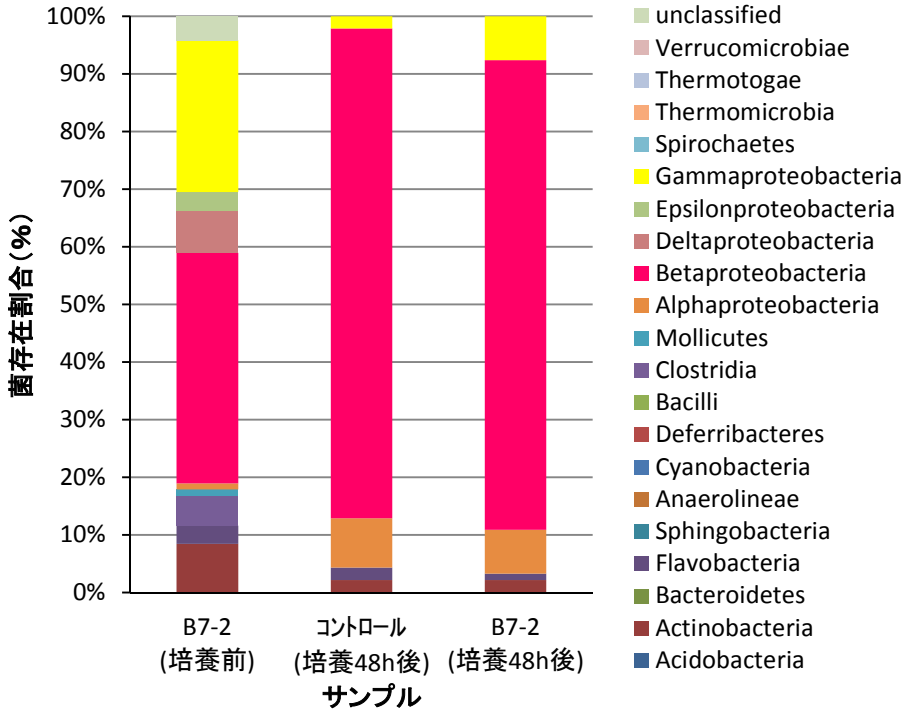


図 3.3.7　　ベンゼン、トルエン分解試験前後の菌叢(class level)

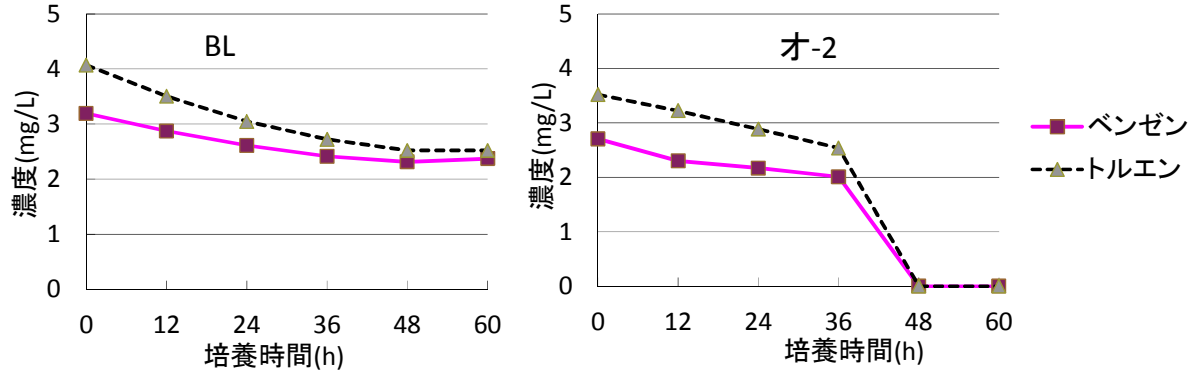


図 3.3.8　ベンゼン、トルエン分解試験での濃度変化

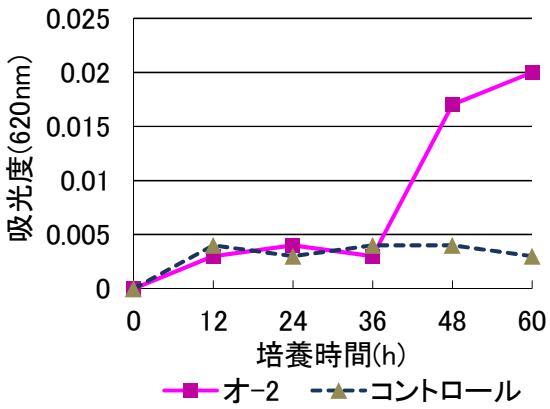


図 3.3.9 ベンゼン、トルエン分解試験の培養液の濁度変化

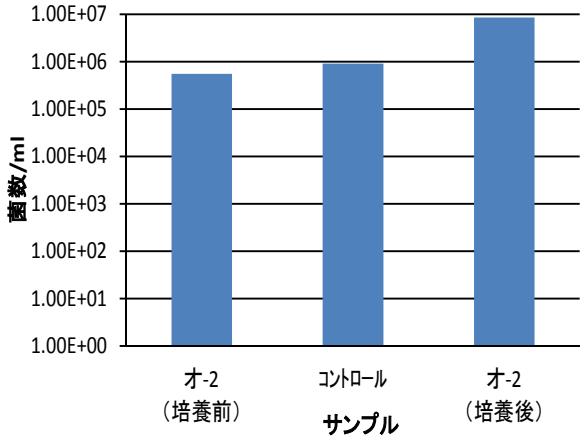


図 3.3.10 ベンゼン、トルエン分解試験前後の菌数（蛍光染色法）

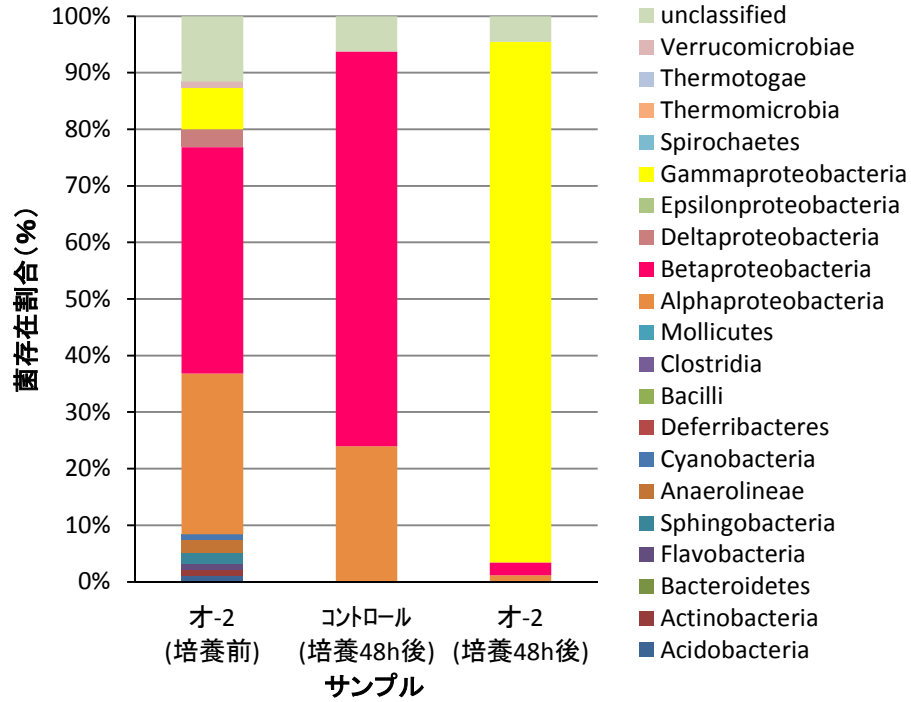


図 3.3.11 ベンゼン、トルエン分解試験前後の菌叢(class level)

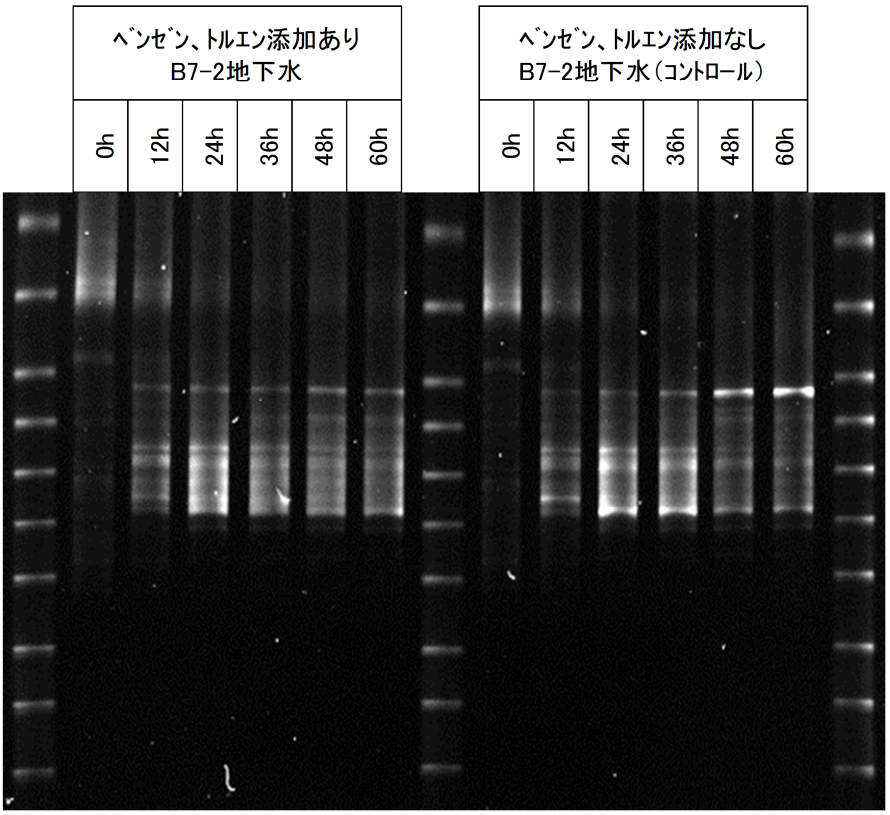


図 3.3.12　B7-2 地下水を用いたベンゼン、トルエン分解試験の DGGE 解析

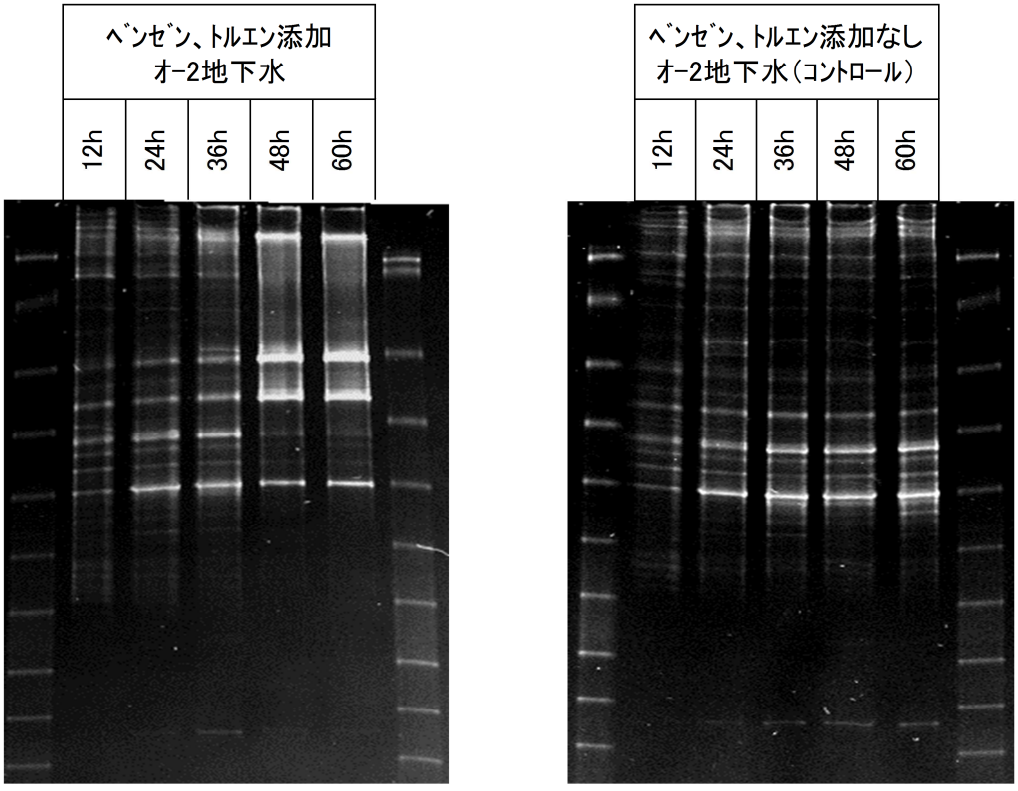


図 3.3.13 オ-2 地下水を用いたベンゼン、トルエン分解試験の DGGE 解析

a2) ジクロロメタン添加分解培養試験

地下水にジクロロメタンを添加し、菌による分解能を調べたジクロロメタンの濃度変化を図3.3.14に示す。オ-2地下水を用いた試験では4週間培養実施後もジクロロメタンの有意な低減は見られなかったが、B7-2地下水では培養13日から21日の間に分解により、ジクロロメタン濃度の急激な低下が見られた。また、ジクロロメタンの低減が見られた検体に、ジクロロメタンを約10mg/L濃度になるように追加したところ、2日後にはジクロロメタンのピークが見られなくなることからも、菌により分解されたものと考えられる。同じ北側の第2帯水層の上流側地下水から、好気性細菌でジクロロメタンデハロゲナーゼを有することで知られている[1)]、*Methylophilus sp.*が確認されていることから、その菌により分解されたとも考えられる。
現在、菌の単離操作を行っている。

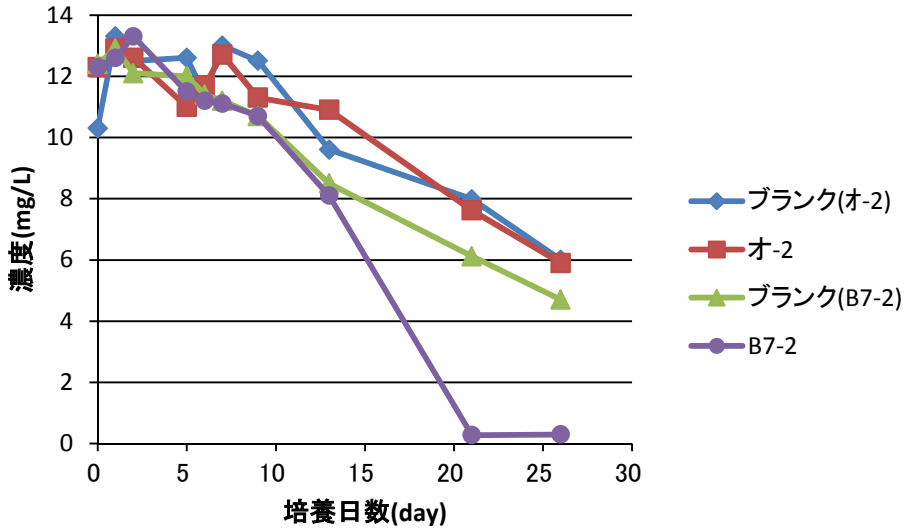


図 3.3.14　ジクロロメタン分解試験での濃度変化

a3) 温度勾配培養によるベンゼン、トルエン添加分解培養試験（B7-2 地下水で実施）

各温度でのベンゼン、トルエンの分解能について確認するため、温度勾配培養試験を実施した。結果を表3.3.8に示す。ベンゼン、トルエンの分解は25℃～36℃の温度範囲で最も速く進むと考えられる。毎月の地下水調査結果から、北側第2帯水層地下水は13℃～23℃、南側第三帯水層地下水は15℃～19℃の温度であり、現場温度条件でベンゼン、トルエンの微生物分解が進む温度条件であることが判る。地下水温が15℃程度以下となる1～3月期の北側第2帯水層では、ベンゼン、トルエンの微生物による分解活性が低下するとも考えられた。

表 3.3.8 ベンゼン、トルエン添加分解培養試験結果表

（ベンゼン添加試験）

サンプル No.	培養温度 (℃)	培養日数 1	2	3	4	5	8
1	8.4	○	○	○	○	○	○
2	9.6	○	○	○	○	○	○
3	10.7	○	○	○	○	○	×
4	12.5	○	○	○	○	○	×
5	13.7	○	○	○	○	△	×
6	15.0	○	○	○	○	×	×
7	16.7	○	○	×	×	×	×
8	18.0	○	○	○	×	×	×
9	19.5	○	○	×	×	×	×
10	20.9	○	△	×	×	×	×
11	22.6	○	○	×	×	×	×
12	23.9	○	△	×	×	×	×
13	25.3	○	×	×	×	×	×
14	26.7	○	×	×	×	×	×
15	28.2	○	×	×	×	×	×
16	29.6	○	×	×	×	×	×
17	30.9	○	×	×	×	×	×
18	32.7	○	×	×	×	×	×
19	33.9	○	×	×	×	×	×
20	35.5	○	×	×	×	×	×
21	36.9	○	×	×	×	×	×
22	38.7	○	○	△	×	×	×
BL1	40.6	○	○	○	○	○	○
BL2	42.4	○	○	○	○	○	○

○ :ピーク有り
△ :痕跡有り
× :ピーク無し

（トルエン添加試験）

サンプル No.	培養温度 (℃)	培養日数 1	2	3	4	5	8
1	8.4	○	○	○	○	○	○
2	9.6	○	○	○	○	○	△
3	10.7	○	○	○	○	○	×
4	12.5	○	○	○	○	△	×
5	13.7	○	○	○	○	×	×
6	15.0	○	○	○	○	×	×
7	16.7	○	○	×	×	×	×
8	18.0	○	○	△	×	×	×
9	19.5	○	×	×	×	×	×
10	20.9	○	×	×	×	×	×
11	22.6	○	○	×	×	×	×
12	23.9	○	△	×	×	×	×
13	25.3	○	×	×	×	×	×
14	26.7	○	×	×	×	×	×
15	28.2	○	×	×	×	×	×
16	29.6	○	×	×	×	×	×
17	30.9	○	×	×	×	×	×
18	32.7	○	×	×	×	×	×
19	33.9	○	×	×	×	×	×
20	35.5	○	×	×	×	×	×
21	36.9	○	×	×	×	×	×
22	38.7	○	○	△	×	×	×
BL1	40.6	○	○	○	○	○	○
BL2	42.4	○	○	○	○	○	○

(b) 嫌気性条件での VOC 添加分解培養試験

b1) ベンゼンとトルエン添加分解培養試験

嫌気性条件でベンゼン、トルエンの添加分解培養試験の結果を、それぞれ図 3.3.15 と図 3.3.16 に示す。両地下水にベンゼン、トルエンを添加し、嫌気性条件で培養したところ、35 日間の培養ではベンゼン、トルエン共に減少しなかった。

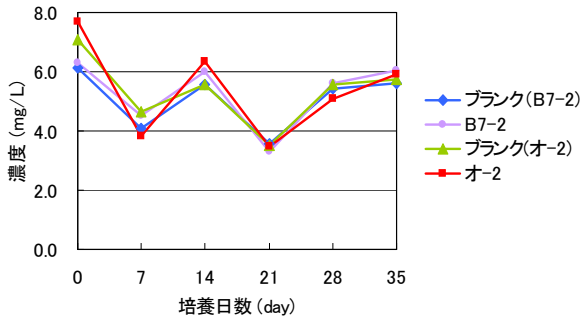


図 3.3.15 ベンゼン濃度変化

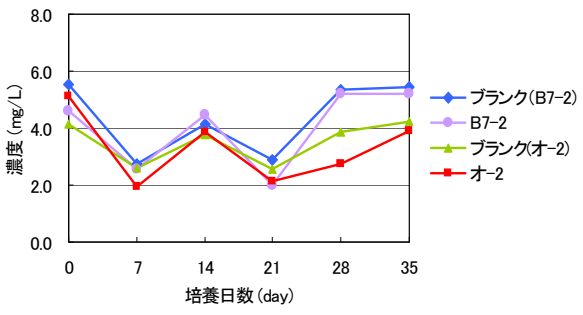


図 3.3.16 トルエン濃度変化

b2) ジクロロメタン添加分解培養試験

図 3.3.17 に嫌気性条件でのジクロロメタン添加分解培養試験の結果を示す。

B7-2 及びｵ-2 地下水にベンゼンを添加し、嫌気性条件で培養したところ、28 日間の培養ではジクロロメタンは減少しなかった。

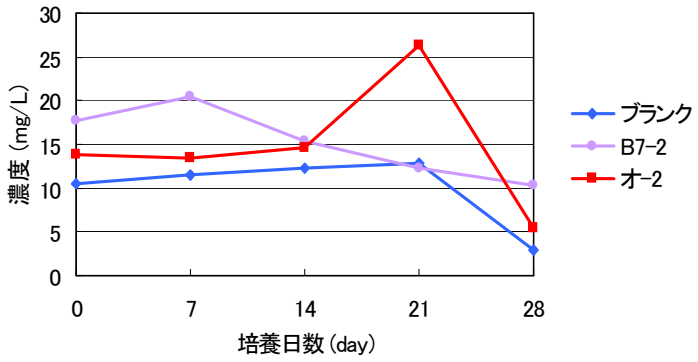


図 3.3.17 ジクロロメタン濃度変化

現場周辺地下水の嫌気性条件下ではベンゼン、トルエン、ジクロロメタンはほとんど分解されないと考えられた。しかし、毎月の溶存酸素測定結果から、22-17-2 を除く他の地点では好気性条件であることが確認されていることから、広い範囲でベンゼン、トルエンの微生物分解が進んでいるとも考えられた。また、後述の嫌気的 VOC の分解遺伝子の探索では、嫌気的条件である H21-7、22-17-2 地点から、嫌気条件下で VOC 分解を分解する遺伝子(tceA、vcrA、bvcA)が確認されており、それらの嫌気性状態の地下水中には、トリクロロエチレン及びテトラクロロエチレン類の分解能を有する菌の存在も示唆されている。

(2) 地下水からの VOC 分解微生物単離試験

表 3.3.9 と表 3.3.10 にそれぞれ B7-2 とオ-2 地下水から単離したベンゼン、トルエン分解菌の同定結果を示す。B7-2 から 7 株、オ-2 から 7 株の菌を分離し、計 14 株の菌種を決定することができた。14 株のうち 7 株が *Commonas testostroni* と最も多かった。13 株はベンゼン、トルエンとも分解したが *Pseudomonas fluorescens* はベンゼンのみ分解し、トルエンは分解しなかった。*Commonas testostroni* は培養試験で分解が見られた後の菌叢解析結果からも優占種となることが確認された。現場地下環境ではこれらの菌によりベンゼン、トルエンの分解が進んでいると考えられた。これら単離した分離株が保有する VOC 分解遺伝子を確認した。その結果を表 3.3.11 に示す。*Burkholderia cenocepacia* は 7 つの Primer set で増幅産物が確認されたが、*Stenotrophomonas acidaminiphila*、菌株 2011-57 の *C.testostroni* は今回使用した 25 の Primer set で全て陰性であった。このことから、分解遺伝子の調査で陰性であっても、ベンゼン、トルエンの分解能を有する菌が存在する可能性があることが判った。VOC 分解試験で分解能を示したものの、概知の分解遺伝子を検出する PCR 検査が陰性となったことから、分解遺伝子の変異、新たな VOC 分解遺伝子等の可能性が考えられた。

表 3.3.9　B7-2 地下水から単離　（63 株中）

菌株No.	ベンゼン分解	トルエン分解	16s RNA遺伝子配列による同定結果				
			class	order	family	genus	species
2	+	+	Actinomycetales	Corynebacterineae	*Nocardiaceae*	*Rhodococcus*	*erythropolis*
4	+	-	Gammaproteobacteria	Pseudomonadales	*Pseudomonadaceae*	*Pseudomonas*	*fluorescens*
13	+	+	Actinomycetales	Corynebacterineae	*Nocardiaceae*	*Rhodococcus*	*erythropolis*
14	+	+	Betaproteobacteria	Burkholderiales	*Burkholderiaceae*	*Burkholderia*	*cenocepacia*
37	+	+	Betaproteobacteria	Burkholderiales	*Comamonadaceae*	*Comamonas*	*testosteroni*
38	+	+	Betaproteobacteria	Burkholderiales	*Comamonadaceae*	*Comamonas*	*testosteroni*
58	+	+	Betaproteobacteria	Burkholderiales	*Comamonadaceae*	*Comamonas*	*testosteroni*

表 3.3.10　オ-2 地下水から単離　（40 株中）

菌株No.	ベンゼン分解	トルエン分解	16s RNA遺伝子配列による同定結果				
			class	order	family	genus	species
11-23	+	+	Betaproteobacteria	Burkholderiales	*Comamonadaceae*	*Comamonas*	*testosteroni*
11-28	+	+	Betaproteobacteria	Burkholderiales	*Comamonadaceae*	*Comamonas*	*testosteroni*
11-30	+	+	Gammaproteobacteria	Pseudomonadales	*Pseudomonadaceae*	*Pseudomonas*	*nitroreducens*
11-45	+	+	Betaproteobacteria	Burkholderiales	*Comamonadaceae*	*Comamonas*	*testosteroni*
11-50	+	+	Gammaproteobacteria	Xanthomonadales	*Xanthomonadaceae*	*Stenotrophomonas*	*acidaminiphila*
11-57	+	+	Betaproteobacteria	Burkholderiales	*Comamonadaceae*	*Comamonas*	*testosteroni*
11-72	+	+	Gammaproteobacteria	Xanthomonadales	*Xanthomonadaceae*	*Stenotrophomonas*	*maltophilia*

表 3.3.11 分離株のベンゼン, トルエン分解能と保有する VOC 分解遺伝子

菌株No.	ベンゼン分解	トルエン分解	菌名	NAH	RMO	PHE	TBMD	TMOA	TOL	bphA	XYLA	XYLE1
菌株2	+	+	*Rhodococcus erythropolis*							+		
菌株4	+		*Pseudomonas fluorescens*		+				+		+	+
菌株13	+	+	*Rhodococcus erythropolis*							+		
菌株14	+	+	*Burkholderia cenocepacia*		+	+	+	+		+		+
菌株37	+	+	*Comamonas testosteroni*	+	+	+	+					
菌株38	+	+	*Comamonas testosteroni*	+	+	+	+					
菌株58	+	+	*Comamonas testosteroni*		+	+	+					
菌株2011-23	+	+	*Comamonas testosteroni*		+							
菌株2011-28	+	+	*Comamonas testosteroni*		+							
菌株2011-30	+	+	*Pseudomonas nitroreducens*	+								
菌株2011-45	+	+	*Comamonas testosteroni*							+		
菌株2011-50	+	+	*Stenotrophomonas acidaminiphila*									
菌株2011-57	+	+	*Comamonas testosteroni*									
菌株2011-72	+	+	*Stenotrophomonas maltophilia*	+								+

(3)　不法投棄地及び周辺土壌での菌叢調査及び有害物質等含有量調査

菌叢調査を実施した土壌中の菌数測定結果を図 3.3.18 に示す。

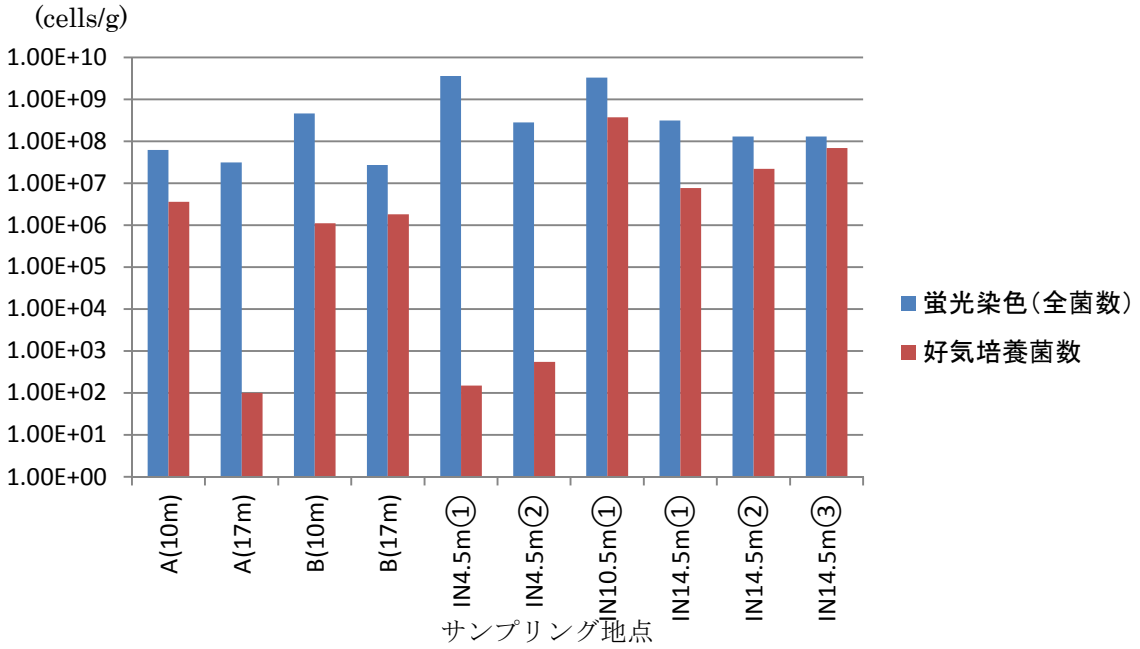


図 3.3.18　土壌中の菌数測定結果

全菌数は遮水壁外の土壌サンプルでは 10^7～10^8 cells/g、遮水壁内では 10^8～10^{10}cells/g であり、遮水壁内の土壌で高い値を示した。次に、菌叢調査を実施した付近の土壌及び廃棄物層の溶出試験結果を表 3.3.12 に示す。

表 3.3.12　土壌及び廃棄物溶出試験結果

地点名 / 項目	A (10m)	A (17m)	B (10m)	B (17m)	IN 4.5m ①	IN 4.5m ②	IN 10.5m ①	IN 14.5m ①	IN 14.5m ②	IN 14.5m ③
ﾄﾘｸﾛﾛｴﾁﾚﾝ	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	0.59	0.51	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002
ﾃﾄﾗｸﾛﾛｴﾁﾚﾝ	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	1.1	0.98	0.0008	<0.0005	<0.0005	<0.0005
ｼﾞｸﾛﾛﾒﾀﾝ	<0.002	<0.002	0.041	<0.002	2.4	4.3	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002
四塩化炭素	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.001	<0.001	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002
1,2-ｼﾞｸﾛﾛｴﾀﾝ	<0.0004	<0.0004	0.014	<0.0004	0.60	0.68	<0.0004	<0.0004	<0.0004	<0.0004
1,1-ｼﾞｸﾛﾛｴﾁﾚﾝ	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.001	<0.001	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002
1,2-ｼﾞｸﾛﾛｴｴﾁﾚﾝ	<0.004	<0.004	<0.004	<0.004	0.046	0.028	<0.004	<0.004	<0.004	<0.004
1,1,1-ﾄﾘｸﾛﾛｴﾀﾝ	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.001	<0.001	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005
1,1,2-ﾄﾘｸﾛﾛｴﾀﾝ	<0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.001	<0.001	<0.0006	<0.0006	<0.0006	<0.0006
1,3-ｼﾞｸﾛﾛﾌﾟﾛﾍﾟﾝ	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.0002	<0.0002
ﾍﾞﾝｾﾞﾝ	<0.001	<0.001	0.15	<0.001	0.27	0.24	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
ﾄﾙｴﾝ	0.001	<0.001	14	0.005	26	24	0.018	<0.001	0.001	0.001
1,4-ｼﾞｵｷｻﾝ	0.015	0.017	0.015	<0.005	0.033	0.19	<0.005	<0.005	0.015	0.015
ｶﾄﾞﾐｳﾑ及びその化合物	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.005	<0.005	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
鉛又はその化合物	<0.0005	<0.0005	0.009	<0.0005	<0.01	<0.01	<0.005	0.008	<0.0005	<0.0005
砒素又はその化合物	0.077	0.009	<0.005	0.010	<0.01	<0.01	<0.005	0.011	0.077	0.077
ホウ素含有量	<0.1	<0.1	3.2	<0.1	2	1	0.2	0.3	0.2	0.4
フッ素含有量	0.4	0.1	2.0	0.2	<1	<1	0.5	1.2	0.5	0.7
pH	8.7	7.6	9.8	7.6	10.4	10.8	8.0	8.3	8.0	8.6
BOD	24	9.2	70	2.6	160	310	8.3	20	19	56
COD	26	9.9	57	2.6	100	220	7.0	26	27	43
EC(μS/cm)	110	81	50	79	660	730	100	400	350	420
備　　考	土壌	土壌	土壌（廃棄物含有）	土壌	廃棄物	廃棄物	廃棄物	土壌	土壌	土壌

※数値は pH、EC 以外 mg/L

廃棄物層中の含水比は概ね 10%程度と揚水循環浄化を行っているにもかかわらず低い値を示しており、GL-14.5m 地点の砂礫層から油臭のする浸出水が確認された。その水質分析を行った結果、pH 8.0、ベンゼン濃度 0.054mg/L であった。次に、遮水壁外土壌菌叢の phylum level の解析結果を図 3.3.19 に示す。B(10m)は Firmicutes 優位であるが、A(10m)、A(17m)、B(17m)の土壌では Proteobacteria が優位であった。好気性及び通性嫌気性細菌が主である Proteobacteria が優位であることから、A(10m)、A(17m)、B(17m)は好気的環境にあり、偏性嫌気性の性質を持つ Firmicutes が優位であることから、B(10m)は嫌気的環境にあると考えられた。

Firmicutes が優位となった B(10m)は、土壌溶出試験結果から、高い BOD 値、COD 値を示しており、有機性の汚泥を多く含むことが判る。そのため、その地点での分解微生物の活性が上がり、酸素が消費されることにより嫌気状態となっていると考えられた。

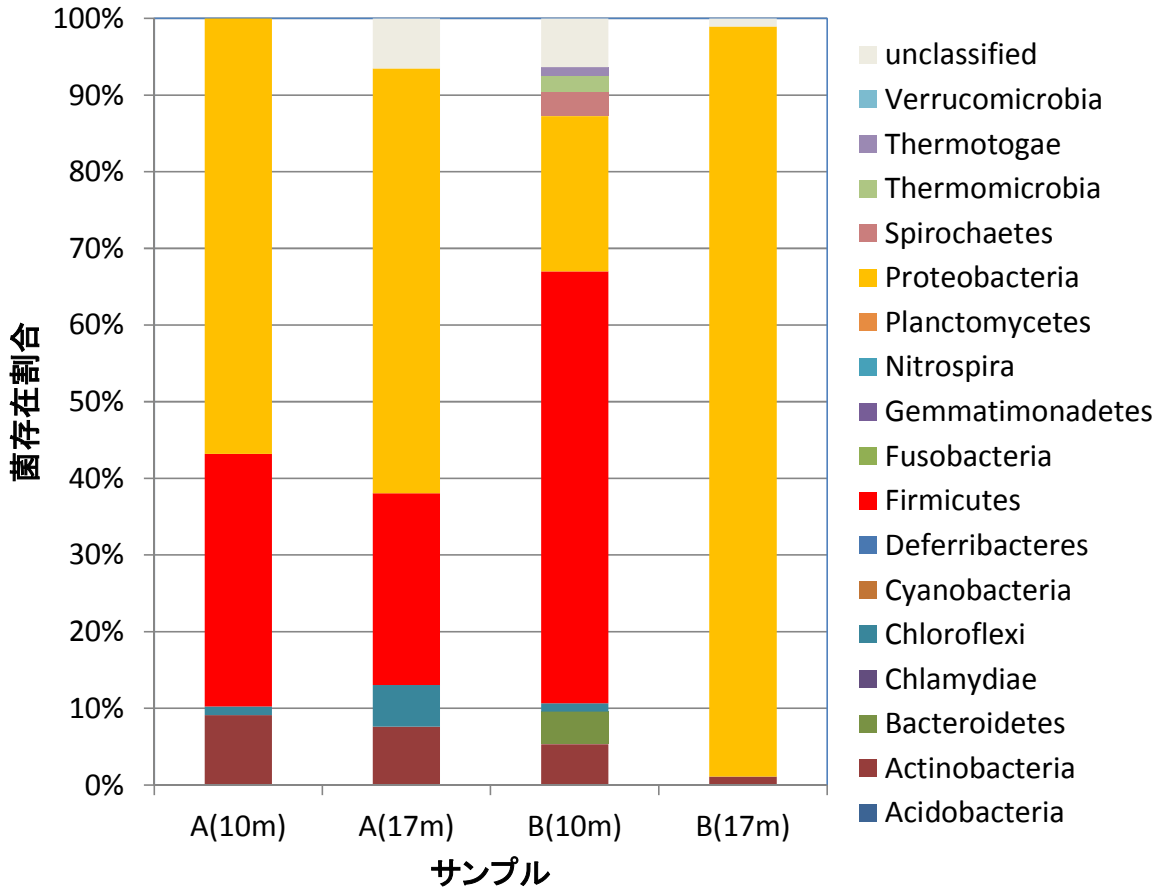


図 3.3.19 遮水壁外土壌の phylum level での菌叢解析結果

遮水壁内の土壌及び廃棄物の phylum level の菌叢解析結果を図 3.3.20 に示す。IN(4.5m)②は Firmicutes 優位であるが、10.5m より深い地点の試料についてはどれも Proteobacteria が優位であった。好気性及び通性嫌気性細菌が主である Proteobacteria の存在割合が多いことから、IN(10.5m)①、IN(14.5m)①、IN(14.5m)②、IN(14.5m)③の地点は主として好気的環境にあることが示唆された。溶出試験の結果、IN(4.5m)①と IN(4.5m)②付近の溶出試験値で高い有機物含量が示されていることから、遮水壁外 B(10m)地点と同様に微生物活動の活性化により酸素が消費されていると考えられた。また、好気性培養菌数測定結果が低い値を示していることからも、遮水壁内の 4.5m 付近は嫌気性環境にあると考えられた。IN(4.5m)①及び IN(4.5m)②は pH10 以上であることも菌叢に影響を与えていると考えられる。

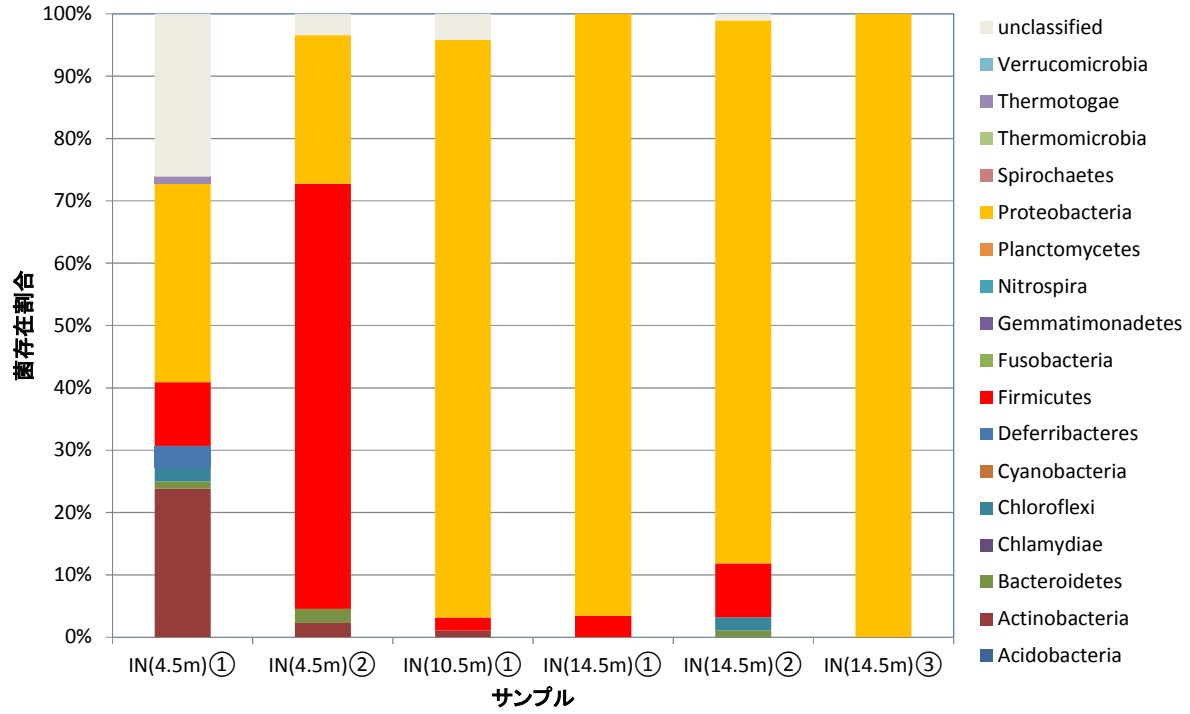


図 3.3.20 遮水壁内の土壌及び廃棄物の phylum level での菌叢解析結果

次に、菌叢の class level の解析結果を図 3.3.21 示す。

class level の菌層解析結果から、未だ汚染の残留する遮水壁内の 10.5m より深い地点では Gammaproteobacteria の高い存在割合が確認された。また、それらのサンプルでは Gammaproteobacteria に属する *Acinetobacter* sp.が 90%を占めていた。一方、遮水壁内上層部土壌の IN(4.5m)①、IN(4.5m)②では Gammaproteobacteria は数%程度の占有率で、多菌種が混在する菌叢を示した。

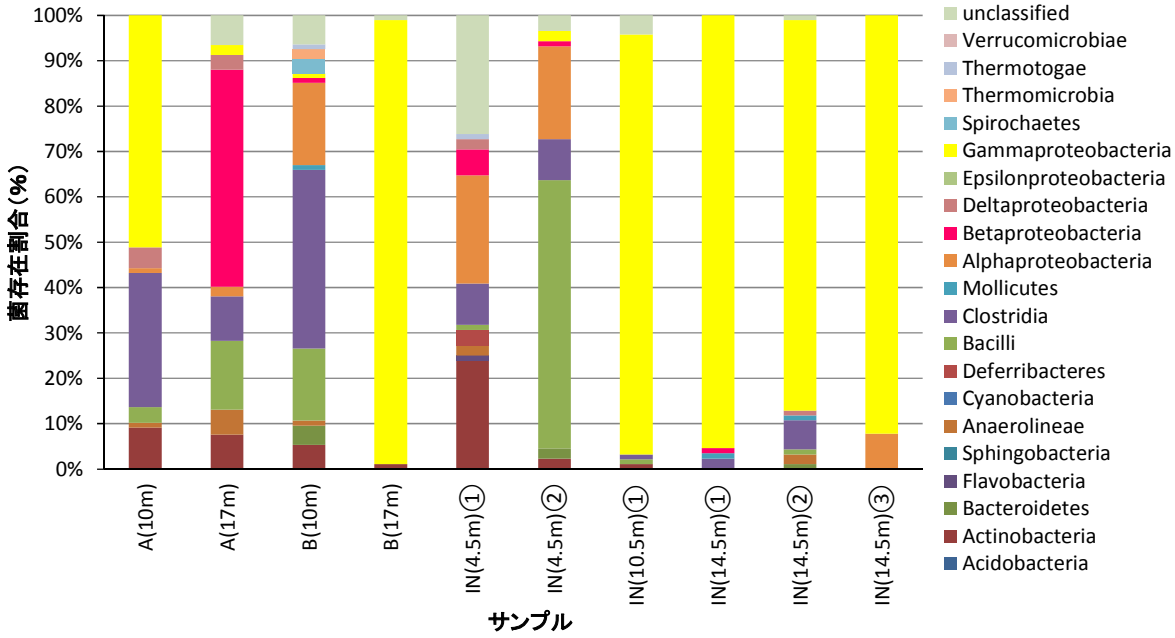


図 3.3.21　土壌及び廃棄物の class level での菌叢解析結果

(4) 不法投棄地周辺地下水の菌叢及び水質調査

2010 年 11 月から 2011 年 10 月までの不法投棄地周辺の地下水調査結果を表 3.3.13（北側第 2 帯水層）と表 3.3.14（南側第 3 帯水層）に示す。

表 3.3.13 北側第 2 帯水層地下水水質分析結果(水温,EC,DO,pH,ORP,透視度,色度,濁度)

水温 (℃)

	2010年11月	2010年12月	2011年1月	2011年2月	2011年3月	2011年4月	2011年5月	2011年6月	2011年7月	2011年8月	2011年9月	2011年10月
22-11-2	17.3	17.0	15.4	14.8	13.9	14.0	15.6	16.2	17.2	16.9	19.6	18.2
H21-7	18.1	17.5	15.0	14.3	12.9	13.1	14.6	16.8	17.6	19.0	21.5	20.1
22-17-2	18.4	17.1	15.0	14.7	12.9	13.0	14.2	16.3	16.8	18.1	20.1	19.6
B7-2	18.2	17.3	15.4	14.7	13.9	14.8	15.4	16.3	17.1	18.0	18.7	17.9
22-1-2	21.0	19.3	15.8	15.0	13.1	13.5	14.9	18.9	18.8	20.9	23.8	22.3
M-2	18.1	18.3	17.3	16.8	16.3	15.8	15.7	15.5	15.9	17.3	18.9	19.3

電気伝導率 (μS/cm)

	2010年11月	2010年12月	2011年1月	2011年2月	2011年3月	2011年4月	2011年5月	2011年6月	2011年7月	2011年8月	2011年9月	2011年10月
22-11-2	98	110	150	140	150	150	170	180	170	160	170	180
H21-7	1700	1700	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1500	1700
22-17-2	7700	6800	7400	6900	7300	7600	6300	7500	7600	6200	7400	8000
B7-2	1900	2000	1900	1900	2000	2000	2100	2100	2000	2100	2100	2200
22-1-2	690	510	600	630	670	680	410	520	550	220	85	96
M-2	38	72	73	79	73	91	180	230	210	79	63	62

DO (mg/L)

	2010年11月	2010年12月	2011年1月	2011年2月	2011年3月	2011年4月	2011年5月	2011年6月	2011年7月	2011年8月	2011年9月	2011年10月
22-11-2	5.5	4.3	3.4	2.8	13.0	2.3	7.4	5.1	5.1	7.8	10.0	2.9
H21-7	1.2	0.8	1.8	2.8	0.5	0.1	1.5	0.7	1.6	0.6	1.7	3.0
22-17-2	0.0	0.2	0.1	0.2	0.1	0.1	0.3	0.5	0.2	0.1	0.2	0.3
B7-2	3.7	3.1	2.3	2.1	2.0	2.5	3.0	5.2	2.9	3.0	3.9	9.9
22-1-2	0.8	0.4	1.5	8.8	0.7	0.8	5.2	2.7	2.2	6.7	5.5	10.0
M-2	7.6	4.0	4.9	5.9	6.0	3.7	2.2	1.7	2.6	13.0	2.2	4.9

pH

	2010年11月	2010年12月	2011年1月	2011年2月	2011年3月	2011年4月	2011年5月	2011年6月	2011年7月	2011年8月	2011年9月	2011年10月
22-11-2	6.4	6.5	6.6	6.5	6.5	6.2	6.6	6.7	6.5	6.3	6.6	6.5
H21-7	7.5	7.5	7.6	7.6	7.6	7.5	7.5	7.6	7.3	7.0	7.5	7.5
22-17-2	7.1	6.8	6.9	7.0	6.9	6.9	7.0	6.7	6.6	6.8	6.7	6.8
B7-2	7.6	7.3	7.7	7.6	7.7	7.8	8.0	8.8	8.5	8.4	8.6	8.3
22-1-2	6.1	6.1	6.3	6.3	6.3	6.2	6.3	6.1	5.9	6.0	7.1	9.5
M-2	6.4	6.3	6.5	6.5	6.5	6.4	6.4	6.4	6.3	6.1	5.9	6.3

ORP (mV)

	2010年11月	2010年12月	2011年1月	2011年2月	2011年3月	2011年4月	2011年5月	2011年6月	2011年7月	2011年8月	2011年9月	2011年10月
22-11-2	130	180	190	140	170	170	130	110	90	43	51	39
H21-7	−140	−140	−93	−110	−150	−130	−150	−98	−140	−180	−70	−110
22-17-2	−190	−130	−150	−140	−140	−150	−160	−140	−170	−190	−180	−190
B7-2	−120	−120	−120	−150	−150	−140	−180	−200	−210	−210	−200	−190
22-1-2	−150	−50	−100	−110	−96	−120	−44	−94	−120	10	64	−5
M-2	140	190	190	160	170	180	−24	−38	−43	26	93	55

透視度 (cm)

	2010年11月	2010年12月	2011年1月	2011年2月	2011年3月	2011年4月	2011年5月	2011年6月	2011年7月	2011年8月	2011年9月	2011年10月
22-11-2	26	41	59	44	98	82	32	46	70	35	93	89
H21-7	15	26	22	21	31	25	31	55	28	21	44	42
22-17-2	2	25	4	8	41	18	7	28	24	9	25	22
B7-2	40	29	10	30	45	48	43	58	104	54	33	13
22-1-2	6.5	11	9	19	27	28	8	61	45	10	40	39
M-2	45	57	130	56	130	52	17	25	22	77	125	84

色度 (度)

	2010年11月	2010年12月	2011年1月	2011年2月	2011年3月	2011年4月	2011年5月	2011年6月	2011年7月	2011年8月	2011年9月	2011年10月
22-11-2	2.2	0.3	1.0	0.7	3.4	0.1	0.7	1.3	1.1	1.0	0.7	1.5
H21-7	48.0	27.0	35.0	32.0	47.0	25.0	23.0	19.0	24.0	23.0	17.0	19.0
22-17-2	190.0	95.0	280.0	230.0	440.0	430.0	460.0	780.0	430.0	410.0	340.0	340.0
B7-2	31.0	36.0	31.0	39.0	46.0	26.0	21.0	13.0	14.0	14.0	16.0	22.0
22-1-2	19.0	41.0	15.0	58.0	21.0	32.0	32.0	24.0	48.0	35.0	26.0	22.0
M-2	2.6	1.8	1.6	1.5	5.6	2.5	18.0	12.0	21.0	2.0	1.9	2.3

濁度 (度)

	2010年11月	2010年12月	2011年1月	2011年2月	2011年3月	2011年4月	2011年5月	2011年6月	2011年7月	2011年8月	2011年9月	2011年10月
22-11-2	18.0	6.6	7.3	4.7	3.1	0.6	3.6	7.4	1.9	6.1	2.5	3.1
H21-7	14.0	11.0	18.0	11.0	18.0	14.0	11.0	8.3	10.0	19.0	7.6	12.0
22-17-2	200.0	18.0	170.0	66.0	31.0	100.0	190.0	49.0	47.0	87.0	60.0	74.0
B7-2	7.9	13.0	29.0	14.0	8.2	4.1	6.1	3.0	2.7	3.0	3.6	31.0
22-1-2	32.0	100.0	79.0	19.0	31.0	40.0	13.0	12.0	20.0	21.0	4.9	8.8
M-2	3.0	3.7	1.7	2.5	2.1	2.2	39.0	28.0	26.0	2.5	2.5	3.3

表 3.3.13 北側第 2 帯水層地下水水質分析結果

(TOC,ｼﾞｸﾛﾛﾒﾀﾝ,ﾍﾞﾝｾﾞﾝ,ﾄﾙｴﾝ,ｷｼﾚﾝ,1,4-ｼﾞｵｷｻﾝ,BOD,COD,SS)

TOC （mg/L）

	2010年11月	2010年12月	2011年1月	2011年2月	2011年3月	2011年4月	2011年5月	2011年6月	2011年7月	2011年8月	2011年9月	2011年10月
22-11-2	0.2	0.4	0.9	0.7	1.1	1.8	1.0	0.5	0.8	1.7	1.2	1.5
H21-7	33.0	36.0	36.0	36.0	42.0	37.0	39.0	33.0	38.0	35.0	33.0	33.0
22-17-2	480.0	410.0	460.0	500.0	470.0	480.0	550.0	370.0	360.0	420.0	360.0	350.0
B7-2	32.0	37.0	34.0	37.0	42.0	47.0	45.0	43.0	51.0	50.0	54.0	48.0
22-1-2	17.0	11.0	10.0	10.0	11.0	19.0	7.0	6.2	7.1	5.6	5.0	3.9
M-2	0.4	0.4	0.5	0.5	0.9	18.0	2.7	2.6	2.2	0.8	0.9	0.3

ジクロロメタン （mg/L）

	2010年11月	2010年12月	2011年1月	2011年2月	2011年3月	2011年4月	2011年5月	2011年6月	2011年7月	2011年8月	2011年9月	2011年10月
22-11-2	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002
H21-7	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002
22-17-2	0.018	0.008	0.008	0.007	<0.002	0.013	0.016	0.017	0.008	<0.002	0.005	<0.002
B7-2	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002
22-1-2	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002
M-2	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002

ベンゼン （mg/L）

	2010年11月	2010年12月	2011年1月	2011年2月	2011年3月	2011年4月	2011年5月	2011年6月	2011年7月	2011年8月	2011年9月	2011年10月
22-11-2	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
H21-7	0.010	0.007	0.011	0.011	0.009	0.012	0.013	0.009	0.013	0.010	0.007	0.009
22-17-2	0.110	0.110	0.100	0.100	0.110	0.129	0.100	0.110	0.120	0.097	0.091	0.092
B7-2	0.016	0.018	0.013	0.013	0.016	0.016	0.012	0.015	0.013	0.011	0.010	0.013
22-1-2	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
M-2	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

トルエン （mg/L）

	2010年11月	2010年12月	2011年1月	2011年2月	2011年3月	2011年4月	2011年5月	2011年6月	2011年7月	2011年8月	2011年9月	2011年10月
22-11-2	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
H21-7	0.017	0.003	0.006	0.005	0.005	0.008	0.008	0.002	0.003	0.003	0.001	0.003
22-17-2	6.800	5.900	6.000	6.900	6.400	1.923	6.200	4.100	5.200	6.000	3.500	3.600
B7-2	0.081	0.081	0.075	0.075	0.094	0.101	0.085	0.086	0.120	0.120	0.079	0.110
22-1-2	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
M-2	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

キシレン （mg/L）

	2010年11月	2010年12月	2011年1月	2011年2月	2011年3月	2011年4月	2011年5月	2011年6月	2011年7月	2011年8月	2011年9月	2011年10月
22-11-2	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
H21-7	0.099	0.074	0.089	0.094	0.072	0.081	0.110	0.049	0.059	0.079	0.036	0.075
22-17-2	0.810	0.850	0.930	0.910	1.000	1.128	0.920	0.690	0.640	0.960	0.500	0.500
B7-2	0.092	0.090	0.057	0.012	0.089	0.058	0.070	0.062	0.066	0.047	0.052	0.059
22-1-2	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
M-2	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

1,4-ｼﾞｵｷｻﾝ （mg/L）

	2010年11月	2010年12月	2011年1月	2011年2月	2011年3月	2011年4月	2011年5月	2011年6月	2011年7月	2011年8月	2011年9月	2011年10月
22-11-2	0.017	—	—	0.057	—	—	0.071	—	—	0.059	—	—
H21-7	0.810	—	—	0.870	—	—	1.000	—	—	0.810	—	—
22-17-2	6.800	—	—	6.700	—	—	7.100	—	—	6.400	—	—
B7-2	0.450	—	—	0.480	—	—	0.670	—	—	0.620	—	—
22-1-2	0.053	—	—	0.130	—	—	0.015	—	—	<0.005	—	—
M-2	0.012	—	—	0.012	—	—	0.015	—	—	0.010	—	—

BOD （mg/L）

	2010年11月	2010年12月	2011年1月	2011年2月	2011年3月	2011年4月	2011年5月	2011年6月	2011年7月	2011年8月	2011年9月	2011年10月
22-11-2	1.1	—	—	0.5	—	—	0.7	—	—	1.9	—	—
H21-7	24.0	—	—	23.0	—	—	23.0	—	—	18.0	—	—
22-17-2	410.0	—	—	420.0	—	—	330.0	—	—	270.0	—	—
B7-2	28.0	—	—	27.0	—	—	33.0	—	—	37.0	—	—
22-1-2	20.0	—	—	9.0	—	—	3.9	—	—	1.9	—	—
M-2	0.5	—	—	0.5	—	—	1.1	—	—	1.6	—	—

COD （mg/L）

	2010年11月	2010年12月	2011年1月	2011年2月	2011年3月	2011年4月	2011年5月	2011年6月	2011年7月	2011年8月	2011年9月	2011年10月
22-11-2	2.7	—	—	1.3	—	—	1.7	—	—	2.0	—	—
H21-7	49.0	—	—	50.0	—	—	51.0	—	—	45.0	—	—
22-17-2	380.0	—	—	450.0	—	—	410.0	—	—	400.0	—	—
B7-2	41.0	—	—	42.0	—	—	50.0	—	—	46.0	—	—
22-1-2	30.0	—	—	22.0	—	—	9.4	—	—	8.2	—	—
M-2	1.5	—	—	1.1	—	—	4.8	—	—	1.0	—	—

SS （mg/L）

	2010年11月	2010年12月	2011年1月	2011年2月	2011年3月	2011年4月	2011年5月	2011年6月	2011年7月	2011年8月	2011年9月	2011年10月
22-11-2	26	—	—	14	—	—	8	—	—	29	—	—
H21-7	17	—	—	25	—	—	26	—	—	19	—	—
22-17-2	190	—	—	53	—	—	100	—	—	49	—	—
B7-2	15	—	—	24	—	—	20	—	—	12	—	—
22-1-2	30	—	—	52	—	—	50	—	—	27	—	—
M-2	3	—	—	3	—	—	31	—	—	2	—	—

表 3.3.13 北側第 2 帯水層地下水水質分析結果(n-ﾍｷｻﾝ抽出物質,T-N,T-P,Cd,Pb,Cr,As,Cu,Zn)

n-ﾍｷｻﾝ抽出物質 (mg/L)

	2010年11月	2010年12月	2011年1月	2011年2月	2011年3月	2011年4月	2011年5月	2011年6月	2011年7月	2011年8月	2011年9月	2011年10月
22-11-2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
H21-7	<0.5	—	—	<0.5	—	—	<0.5	—	—	<0.5	—	—
22-17-2	1	—	—	0.8	—	—	<0.5	—	—	0.6	—	—
B7-2	<0.5	—	—	<0.5	—	—	<0.5	—	—	<0.5	—	—
22-1-2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
M-2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

全窒素 (mg/L)

	2010年11月	2010年12月	2011年1月	2011年2月	2011年3月	2011年4月	2011年5月	2011年6月	2011年7月	2011年8月	2011年9月	2011年10月
22-11-2	0.17	—	—	0.14	—	—	0.17	—	—	0.16	—	—
H21-7	36.00	—	—	19.00	—	—	36.00	—	—	35.00	—	—
22-17-2	97.00	—	—	160.00	—	—	130.00	—	—	130.00	—	—
B7-2	64.00	—	—	72.00	—	—	68.00	—	—	76.00	—	—
22-1-2	1.70	—	—	2.20	—	—	1.30	—	—	0.99	—	—
M-2	0.13	—	—	0.20	—	—	0.53	—	—	0.34	—	—

全リン (mg/L)

	2010年11月	2010年12月	2011年1月	2011年2月	2011年3月	2011年4月	2011年5月	2011年6月	2011年7月	2011年8月	2011年9月	2011年10月
22-11-2	0.028	—	—	0.022	—	—	0.013	—	—	0.043	—	—
H21-7	1.300	—	—	1.300	—	—	1.300	—	—	0.900	—	—
22-17-2	1.200	—	—	1.600	—	—	1.800	—	—	1.300	—	—
B7-2	2.600	—	—	3.100	—	—	2.800	—	—	3.000	—	—
22-1-2	0.021	—	—	0.020	—	—	0.100	—	—	0.150	—	—
M-2	0.022	—	—	0.025	—	—	0.140	—	—	0.031	—	—

カドミウム (mg/L)

	2010年11月	2010年12月	2011年1月	2011年2月	2011年3月	2011年4月	2011年5月	2011年6月	2011年7月	2011年8月	2011年9月	2011年10月
22-11-2	<0.001	—	—	<0.001	—	—	<0.001	—	—	<0.001	—	—
H21-7	<0.001	—	—	<0.001	—	—	<0.001	—	—	<0.001	—	—
22-17-2	<0.001	—	—	<0.001	—	—	<0.001	—	—	<0.001	—	—
B7-2	<0.001	—	—	<0.001	—	—	<0.001	—	—	<0.001	—	—
22-1-2	<0.001	—	—	<0.001	—	—	<0.001	—	—	<0.001	—	—
M-2	<0.001	—	—	<0.001	—	—	<0.001	—	—	<0.001	—	—

鉛 (mg/L)

	2010年11月	2010年12月	2011年1月	2011年2月	2011年3月	2011年4月	2011年5月	2011年6月	2011年7月	2011年8月	2011年9月	2011年10月
22-11-2	<0.005	—	—	0.005	—	—	<0.005	—	—	<0.005	—	—
H21-7	<0.005	—	—	0.006	—	—	<0.005	—	—	<0.005	—	—
22-17-2	<0.005	—	—	0.007	—	—	<0.005	—	—	0.024	—	—
B7-2	<0.005	—	—	<0.005	—	—	<0.005	—	—	<0.005	—	—
22-1-2	<0.005	—	—	0.020	—	—	<0.005	—	—	<0.005	—	—
M-2	<0.005	—	—	0.005	—	—	<0.005	—	—	<0.005	—	—

全クロム (mg/L)

	2010年11月	2010年12月	2011年1月	2011年2月	2011年3月	2011年4月	2011年5月	2011年6月	2011年7月	2011年8月	2011年9月	2011年10月
22-11-2	<0.04	—	—	<0.04	—	—	<0.04	—	—	<0.04	—	—
H21-7	<0.04	—	—	<0.04	—	—	<0.04	—	—	<0.04	—	—
22-17-2	0.04	—	—	0.04	—	—	<0.04	—	—	<0.04	—	—
B7-2	<0.04	—	—	<0.04	—	—	<0.04	—	—	<0.04	—	—
22-1-2	<0.04	—	—	<0.04	—	—	<0.04	—	—	<0.04	—	—
M-2	<0.04	—	—	<0.04	—	—	<0.04	—	—	<0.04	—	—

ヒ素 (mg/L)

	2010年11月	2010年12月	2011年1月	2011年2月	2011年3月	2011年4月	2011年5月	2011年6月	2011年7月	2011年8月	2011年9月	2011年10月
22-11-2	<0.005	—	—	<0.005	—	—	<0.005	—	—	<0.005	—	—
H21-7	0.027	—	—	0.031	—	—	0.007	—	—	0.024	—	—
22-17-2	0.024	—	—	0.046	—	—	0.017	—	—	0.019	—	—
B7-2	0.020	—	—	0.026	—	—	0.014	—	—	0.017	—	—
22-1-2	<0.005	—	—	<0.005	—	—	<0.005	—	—	<0.005	—	—
M-2	<0.005	—	—	<0.005	—	—	<0.005	—	—	<0.005	—	—

銅 (mg/L)

	2010年11月	2010年12月	2011年1月	2011年2月	2011年3月	2011年4月	2011年5月	2011年6月	2011年7月	2011年8月	2011年9月	2011年10月
22-11-2	0.01	—	—	<0.01	—	—	<0.01	—	—	<0.01	—	—
H21-7	<0.01	—	—	<0.01	—	—	<0.01	—	—	<0.01	—	—
22-17-2	0.01	—	—	<0.01	—	—	<0.01	—	—	<0.01	—	—
B7-2	<0.01	—	—	<0.01	—	—	<0.01	—	—	<0.01	—	—
22-1-2	<0.01	—	—	<0.01	—	—	<0.01	—	—	<0.01	—	—
M-2	<0.01	—	—	<0.01	—	—	<0.01	—	—	<0.01	—	—

亜鉛 (mg/L)

	2010年11月	2010年12月	2011年1月	2011年2月	2011年3月	2011年4月	2011年5月	2011年6月	2011年7月	2011年8月	2011年9月	2011年10月
22-11-2	0.02	—	—	0.01	—	—	0.02	—	—	0.03	—	—
H21-7	<0.01	—	—	0.01	—	—	<0.01	—	—	0.02	—	—
22-17-2	0.02	—	—	<0.01	—	—	<0.01	—	—	<0.01	—	—
B7-2	0.01	—	—	0.02	—	—	<0.01	—	—	<0.01	—	—
22-1-2	0.01	—	—	0.01	—	—	0.01	—	—	0.08	—	—
M-2	<0.01	—	—	<0.01	—	—	0.02	—	—	<0.01	—	—

表 3.3.13 北側第 2 帯水層地下水水質分析結果(Fe,Mn,F,B,NH_4-N,NO_2-N,NO_3-N,臭気強度)

鉄(溶解性) (mg/L)

	2010年11月	2010年12月	2011年1月	2011年2月	2011年3月	2011年4月	2011年5月	2011年6月	2011年7月	2011年8月	2011年9月	2011年10月
22-11-2	<0.1	—	—	<0.1	—	—	<0.1	—	—	<0.1	—	—
H21-7	1.1	—	—	0.1	—	—	0.8	—	—	0.6	—	—
22-17-2	6.8	—	—	8.1	—	—	15.0	—	—	1.9	—	—
B7-2	0.8	—	—	2.0	—	—	1.9	—	—	0.4	—	—
22-1-2	40.0	—	—	33.0	—	—	0.2	—	—	0.2	—	—
M-2	<0.1	—	—	<0.1	—	—	3.9	—	—	0.1	—	—

マンガン(溶解性) (mg/L)

	2010年11月	2010年12月	2011年1月	2011年2月	2011年3月	2011年4月	2011年5月	2011年6月	2011年7月	2011年8月	2011年9月	2011年10月
22-11-2	0.3	—	—	<0.1	—	—	<0.1	—	—	<0.1	—	—
H21-7	0.2	—	—	0.2	—	—	0.2	—	—	0.2	—	—
22-17-2	1.0	—	—	0.9	—	—	0.8	—	—	1.0	—	—
B7-2	<0.1	—	—	<0.1	—	—	0.1	—	—	<0.1	—	—
22-1-2	2.1	—	—	1.7	—	—	<0.1	—	—	<0.1	—	—
M-2	<0.1	—	—	<0.1	—	—	0.8	—	—	<0.1	—	—

フッ素 (mg/L)

	2010年11月	2010年12月	2011年1月	2011年2月	2011年3月	2011年4月	2011年5月	2011年6月	2011年7月	2011年8月	2011年9月	2011年10月
22-11-2	<0.1	—	—	<0.1	—	—	<0.1	—	—	<0.1	—	—
H21-7	0.7	—	—	0.7	—	—	0.7	—	—	0.7	—	—
22-17-2	0.5	—	—	0.6	—	—	0.6	—	—	0.4	—	—
B7-2	0.9	—	—	1.1	—	—	1.1	—	—	1.1	—	—
22-1-2	<0.1	—	—	<0.1	—	—	<0.1	—	—	<0.1	—	—
M-2	<0.1	—	—	<0.1	—	—	<0.1	—	—	<0.1	—	—

ホウ素 (mg/L)

	2010年11月	2010年12月	2011年1月	2011年2月	2011年3月	2011年4月	2011年5月	2011年6月	2011年7月	2011年8月	2011年9月	2011年10月
22-11-2	0.1	—	—	0.1	—	—	0.1	—	—	<0.05	—	—
H21-7	0.4	—	—	0.4	—	—	0.4	—	—	0.36	—	—
22-17-2	4.5	—	—	5.5	—	—	5.3	—	—	3.5	—	—
B7-2	3.4	—	—	3.6	—	—	3.8	—	—	3.5	—	—
22-1-2	0.1	—	—	0.1	—	—	0.1	—	—	<0.05	—	—
M-2	0.1	—	—	0.1	—	—	0.1	—	—	<0.05	—	—

アンモニア態窒素 (mg/L)

	2010年11月	2010年12月	2011年1月	2011年2月	2011年3月	2011年4月	2011年5月	2011年6月	2011年7月	2011年8月	2011年9月	2011年10月
22-11-2	<0.05	—	—	<0.05	—	—	<0.05	—	—	<0.05	—	—
H21-7	32	—	—	13	—	—	42	—	—	34	—	—
22-17-2	93	—	—	60	—	—	170	—	—	130	—	—
B7-2	68	—	—	27	—	—	94	—	—	76	—	—
22-1-2	<0.05	—	—	0.58	—	—	<0.05	—	—	<0.05	—	—
M-2	<0.05	—	—	<0.05	—	—	<0.05	—	—	<0.05	—	—

亜硝酸態窒素 (mg/L)

	2010年11月	2010年12月	2011年1月	2011年2月	2011年3月	2011年4月	2011年5月	2011年6月	2011年7月	2011年8月	2011年9月	2011年10月
22-11-2	<0.05	—	—	<0.05	—	—	<0.05	—	—	<0.05	—	—
H21-7	<0.05	—	—	<0.05	—	—	<0.05	—	—	<0.05	—	—
22-17-2	<0.05	—	—	<0.05	—	—	<0.05	—	—	<0.05	—	—
B7-2	<0.05	—	—	<0.05	—	—	<0.05	—	—	<0.05	—	—
22-1-2	<0.05	—	—	<0.05	—	—	<0.05	—	—	<0.05	—	—
M-2	<0.05	—	—	<0.05	—	—	<0.05	—	—	<0.05	—	—

硝酸態窒素 (mg/L)

	2010年11月	2010年12月	2011年1月	2011年2月	2011年3月	2011年4月	2011年5月	2011年6月	2011年7月	2011年8月	2011年9月	2011年10月
22-11-2	0.07	—	—	<0.05	—	—	0.55	—	—	0.1	—	—
H21-7	<0.05	—	—	<0.05	—	—	<0.05	—	—	0.28	—	—
22-17-2	<0.05	—	—	<0.05	—	—	3.1	—	—	<0.05	—	—
B7-2	<0.05	—	—	<0.05	—	—	<0.05	—	—	0.06	—	—
22-1-2	<0.05	—	—	<0.05	—	—	0.15	—	—	0.16	—	—
M-2	0.07	—	—	0.06	—	—	<0.05	—	—	0.39	—	—

臭気強度 (TON)

	2010年11月	2010年12月	2011年1月	2011年2月	2011年3月	2011年4月	2011年5月	2011年6月	2011年7月	2011年8月	2011年9月	2011年10月
22-11-2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
H21-7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
22-17-2	48000	—	—	152000	—	—	240000	—	—	140000	—	—
B7-2	950	—	—	1300	—	—	1100	—	—	750	—	—
22-1-2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
M-2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

表 3.3.14 南側第 3 帯水層地下水水質分析結果(水温,EC,DO,pH,ORP,透視度,色度,濁度)

水温 (℃)

	2010年11月	2010年12月	2011年1月	2011年2月	2011年3月	2011年4月	2011年5月	2011年6月	2011年7月	2011年8月	2011年9月	2011年10月
12-10	15.0	15.1	15.1	14.9	15.0	15.3	15.3	15.9	15.4	15.4	15.2	15.1
オ-2	16.2	16.2	15.7	16.2	16.5	17.0	17.7	17.9	18.2	18.0	17.8	17.0
A6-2	16.7	16.4	15.5	16.2	16.3	17.1	18.2	19.2	18.6	20.0	19.3	18.5
22-3-3	16.5	16.5	16.4	16.4	16.6	16.2	17.2	18.0	17.1	17.0	16.9	16.9
B2-2	16.4	16.5	16.4	16.3	16.5	16.7	16.7	17.7	16.8	16.8	16.9	16.9
F	15.6	15.8	15.1	15.5	16.0	15.9	16.5	16.7	16.9	17.2	16.9	16.7
22-16-3	16.2	16.1	15.8	15.9	16.1	16.7	16.3	16.9	16.5	16.6	16.6	16.3

電気伝導率 (μS/cm)

	2010年11月	2010年12月	2011年1月	2011年2月	2011年3月	2011年4月	2011年5月	2011年6月	2011年7月	2011年8月	2011年9月	2011年10月
12-10	87	75	85	84	87	72	74	82	79	88	86	82
オ-2	2700	2800	3000	3100	3000	3000	2800	3000	2900	2600	2400	1700
A6-2	710	670	700	850	810	800	680	730	780	930	800	890
22-3-3	520	290	270	330	280	210	290	500	880	1700	1100	1600
B2-2	160	160	130	190	180	170	190	560	260	380	640	77
F	1100	1100	1200	1100	910	1200	1200	2100	1800	1100	1100	520
22-16-3	170	170	180	210	170	260	560	320	340	450	370	250

DO (mg/L)

	2010年11月	2010年12月	2011年1月	2011年2月	2011年3月	2011年4月	2011年5月	2011年6月	2011年7月	2011年8月	2011年9月	2011年10月
12-10	1.7	0.6	2.3	2.5	2.8	2.9	0.9	2.3	2.1	4.7	2.8	2.4
オ-2	1.8	2.0	0.5	1.6	1.3	0.7	0.6	0.7	0.6	2.7	1.1	4.4
A6-2	1.6	2.0	1.0	0.7	0.7	0.7	0.7	0.9	0.8	2.9	0.4	0.7
22-3-3	0.6	0.4	0.4	0.6	1.0	0.4	1.0	3.4	4.7	10.0	3.2	3.7
B2-2	6.2	7.1	7.2	5.4	5.2	6.1	6.1	10.0	7.4	10.0	7.6	11.0
F	3.6	0.8	0.4	0.3	0.4	0.3	0.5	1.2	1.3	3.1	1.5	1.2
22-16-3	0.4	1.4	2.9	0.7	0.4	0.5	0.5	3.7	2.6	15.0	10.0	3.9

pH

	2010年11月	2010年12月	2011年1月	2011年2月	2011年3月	2011年4月	2011年5月	2011年6月	2011年7月	2011年8月	2011年9月	2011年10月
12-10	6.5	6.3	6.5	6.5	6.6	6.3	6.2	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3
オ-2	6.8	6.8	6.8	6.8	6.8	6.8	6.8	6.8	6.8	6.7	6.7	6.9
A6-2	6.9	7.0	6.8	7.0	7.1	7.1	7.0	7.0	6.9	6.7	6.7	6.7
22-3-3	6.4	6.1	6.1	6.2	6.1	6.4	6.2	7.1	6.8	6.4	6.2	6.7
B2-2	6.7	7.6	7.4	7.0	6.9	6.6	8.4	11.3	10.7	7.1	10.9	9.9
F	7.1	7.0	7.0	7.0	7.2	7.2	7.0	6.6	6.6	6.5	6.5	6.8
22-16-3	6.6	6.7	6.6	6.5	6.4	6.1	6.3	6.5	6.4	6.5	6.4	6.5

ORP (mV)

	2010年11月	2010年12月	2011年1月	2011年2月	2011年3月	2011年4月	2011年5月	2011年6月	2011年7月	2011年8月	2011年9月	2011年10月
12-10	54	88	170	130	140	130	96	67	44	24	18	36
オ-2	-74	77	-100	-91	-99	-110	-140	-130	-130	-120	-140	-120
A6-2	-66	-52	-62	-92	-100	-100	-130	-150	-150	-85	-91	-79
22-3-3	9.3	45	21	50	69	47	48	-52	-51	-13	-17	-23
B2-2	67	15	-8.1	30	13	26	-40	-100	-100	-6.2	-100	-43
F	-90	-100	-120	-120	-120	-140	-170	-120	-110	-120	-130	-130
22-16-3	62	89	130	62	76	44	65	84	48	44	44	64

透視度 (cm)

	2010年11月	2010年12月	2011年1月	2011年2月	2011年3月	2011年4月	2011年5月	2011年6月	2011年7月	2011年8月	2011年9月	2011年10月
12-10	25	67	31	39	52	46	47	34	35	31	35	39
オ-2	130	130	25	130	100	18	94	>130	59	54	99	>130
A6-2	94	84	73	94	56	130	48	110	118	105	28	40
22-3-3	1	1	4	1	2	2	1	29	27	8.5	>130	33
B2-2	15	12	15	8	7	6	18	44	9	12	98	27
F	130	130	110	61	100	107	130	>130	>130	>130	>130	38
22-16-3	1.5	1	37	1	2	3	1	20	10	5	77	52

色度 (度)

	2010年11月	2010年12月	2011年1月	2011年2月	2011年3月	2011年4月	2011年5月	2011年6月	2011年7月	2011年8月	2011年9月	2011年10月
12-10	1.4	0.0	0.5	0.2	0.1	0.5	0.6	1.0	0.9	0.2	0.6	0.2
オ-2	73.0	23.0	52.0	19.0	35.0	160.0	89.0	140.0	67.0	130.0	58.0	30.0
A6-2	4.5	10.0	6.0	21.0	6.9	14.0	4.1	28.0	23.0	14.0	9.4	5.1
22-3-3	0.9	0.0	0.4	0.9	0.5	1.6	4.0	1.0	3.3	2.6	3.4	5.2
B2-2	3.2	3.3	15.0	1.5	1.6	0.6	0.9	1.0	5.5	1.7	0.6	8.2
F	31.0	29.0	45.0	37.0	15.0	25.0	25.0	110.0	22.0	110.0	6.6	0.3
22-16-3	0.7	1.2	0.6	2.5	3.1	0.5	5.1	1.4	1.1	0.7	1.6	0.0

濁度 (度)

	2010年11月	2010年12月	2011年1月	2011年2月	2011年3月	2011年4月	2011年5月	2011年6月	2011年7月	2011年8月	2011年9月	2011年10月
12-10	9.4	1.0	5.9	7.5	3.5	4.1	6.4	8.0	7.3	16.0	8.3	6.5
オ-2	27.0	9.5	11.0	6.9	31.0	36.0	40.0	41.0	23.0	22.0	12.0	7.5
A6-2	5.0	2.0	4.1	4.0	6.6	1.9	11.0	4.8	3.8	10.0	7.9	9.9
22-3-3	1100.0	510.0	160.0	490.0	1000.0	350.0	510.0	3.9	10.0	12.0	3.4	10.0
B2-2	13.0	71.0	19.0	5.5	100.0	32.0	19.0	7.7	55.0	98.0	1.7	11.0
F	0.6	0.5	1.8	7.8	3.9	5.0	2.1	15.0	2.2	1.5	0.2	6.1
22-16-3	920.0	710.0	110.0	510.0	650.0	350.0	500.0	4.1	57.0	34.0	3.4	3.7

表 3.3.14 南側第 3 帯水層地下水水質分析結果

(TOC, ｼﾞｸﾛﾛﾒﾀﾝ,ﾍﾞﾝｾﾞﾝ,ﾄﾙｴﾝ,ｷｼﾚﾝ,1,4-ｼﾞｵｷｻﾝ,BOD)

TOC （mg/L）

	2010年11月	2010年12月	2011年1月	2011年2月	2011年3月	2011年4月	2011年5月	2011年6月	2011年7月	2011年8月	2011年9月	2011年10月
12-10	0.2	0.1	0.5	0.3	0.9	1.1	0.7	0.8	0.4	0.9	1.1	0.4
ｵ-2	31.0	35.0	36.0	36.0	36.0	38.0	38.0	41.0	38.0	36.0	33.0	18.0
A6-2	8.2	7.7	8.1	8.6	9.2	10.0	6.8	11.0	9.8	11.0	13.0	15.0
22-3-3	1.5	0.6	0.7	1.4	1.5	1.3	1.4	0.5	5.6	6.4	10.0	15.0
B2-2	0.2	0.3	0.7	0.2	0.8	0.9	1.1	0.6	1.5	1.5	1.2	1.8
F	19.0	17.0	15.0	15.0	14.0	18.0	19.0	23.0	19.0	15.0	14.0	3.5
22-16-3	0.6	0.5	0.6	0.7	0.9	1.1	5.2	0.6	1.8	2.3	3.8	2.0

ジクロロメタン （mg/L）

	2010年11月	2010年12月	2011年1月	2011年2月	2011年3月	2011年4月	2011年5月	2011年6月	2011年7月	2011年8月	2011年9月	2011年10月
12-10	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002
ｵ-2	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002
A6-2	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002
22-3-3	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002
B2-2	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002
F	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002
22-16-3	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002

ベンゼン （mg/L）

	2010年11月	2010年12月	2011年1月	2011年2月	2011年3月	2011年4月	2011年5月	2011年6月	2011年7月	2011年8月	2011年9月	2011年10月
12-10	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
ｵ-2	0.004	0.004	0.006	0.007	0.004	0.007	0.008	0.004	0.002	<0.001	0.001	<0.001
A6-2	0.012	0.011	0.011	0.009	0.004	0.010	0.001	0.016	0.010	0.007	0.002	0.002
22-3-3	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
B2-2	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
F	0.024	0.024	0.020	0.020	0.012	0.009	0.012	0.001	0.002	<0.001	<0.001	<0.001
22-16-3	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

トルエン （mg/L）

	2010年11月	2010年12月	2011年1月	2011年2月	2011年3月	2011年4月	2011年5月	2011年6月	2011年7月	2011年8月	2011年9月	2011年10月
12-10	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
ｵ-2	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.012	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
A6-2	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.001	<0.001	<0.001	<0.001
22-3-3	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
B2-2	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
F	<0.001	<0.001	<0.001	0.010	0.002	<0.001	<0.001	0.051	0.009	<0.001	<0.001	0.010
22-16-3	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

キシレン （mg/L）

	2010年11月	2010年12月	2011年1月	2011年2月	2011年3月	2011年4月	2011年5月	2011年6月	2011年7月	2011年8月	2011年9月	2011年10月
12-10	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
ｵ-2	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
A6-2	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.001	0.001	<0.001	<0.001	<0.001
22-3-3	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
B2-2	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
F	0.003	0.003	0.004	0.003	0.002	<0.001	<0.001	0.001	0.001	<0.001	<0.001	<0.001
22-16-3	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

1,4-ｼﾞｵｷｻﾝ （mg/L）

	2010年11月	2010年12月	2011年1月	2011年2月	2011年3月	2011年4月	2011年5月	2011年6月	2011年7月	2011年8月	2011年9月	2011年10月
12-10	<0.005	—	—	<0.005	—	—	<0.005	—	—	<0.005	—	—
ｵ-2	1.200	—	—	1.400	—	—	1.400	—	—	1.300	—	—
A6-2	0.098	—	—	0.200	—	—	0.110	—	—	0.180	—	—
22-3-3	0.130	—	—	0.088	—	—	0.040	—	—	0.610	—	—
B2-2	0.029	—	—	0.005	—	—	0.014	—	—	0.054	—	—
F	0.140	—	—	0.100	—	—	0.210	—	—	0.520	—	—
22-16-3	0.006	—	—	<0.005	—	—	0.220	—	—	0.130	—	—

BOD （mg/L）

	2010年11月	2010年12月	2011年1月	2011年2月	2011年3月	2011年4月	2011年5月	2011年6月	2011年7月	2011年8月	2011年9月	2011年10月
12-10	0.9	—	—	0.7	—	—	<0.5	—	—	1.3	—	—
ｵ-2	15.0	—	—	20.0	—	—	19.0	—	—	31.0	—	—
A6-2	6.1	—	—	6.8	—	—	4.6	—	—	8.1	—	—
22-3-3	2.1	—	—	3.7	—	—	3.9	—	—	6.1	—	—
B2-2	1.0	—	—	1.3	—	—	0.5	—	—	1.1	—	—
F	7.8	—	—	6.2	—	—	8.3	—	—	14.0	—	—
22-16-3	1.4	—	—	1.1	—	—	4.1	—	—	2.1	—	—

表 3.3.14 南側第 3 帯水層地下水水質分析結果(COD,SS,n-ﾍｷｻﾝ抽出物質, T-N,T-P,Cd,Pb,Cr)

COD (mg/L)

	2010年11月	2010年12月	2011年1月	2011年2月	2011年3月	2011年4月	2011年5月	2011年6月	2011年7月	2011年8月	2011年9月	2011年10月
12-10	1.3	—	—	0.8	—	—	1.3	—	—	2.2	—	—
ｵ-2	44.0	—	—	38.0	—	—	45.0	—	—	37.0	—	—
A6-2	11.0	—	—	13.0	—	—	12.0	—	—	21.0	—	—
22-3-3	10.0	—	—	7.9	—	—	6.9	—	—	6.7	—	—
B2-2	1.6	—	—	2.5	—	—	1.7	—	—	3.3	—	—
F	5.4	—	—	23.0	—	—	23.0	—	—	10.0	—	—
22-16-3	2.9	—	—	4.3	—	—	8.7	—	—	4.0	—	—

SS (mg/L)

	2010年11月	2010年12月	2011年1月	2011年2月	2011年3月	2011年4月	2011年5月	2011年6月	2011年7月	2011年8月	2011年9月	2011年10月
12-10	18	—	—	7	—	—	11	—	—	26	—	—
ｵ-2	7	—	—	18	—	—	14	—	—	50	—	—
A6-2	8	—	—	14	—	—	22	—	—	15	—	—
22-3-3	420	—	—	1700	—	—	1500	—	—	13	—	—
B2-2	18	—	—	68	—	—	80	—	—	130	—	—
F	3	—	—	19	—	—	10	—	—	2	—	—
22-16-3	970	—	—	680	—	—	1300	—	—	85	—	—

n-ﾍｷｻﾝ抽出物質 (mg/L)

	2010年11月	2010年12月	2011年1月	2011年2月	2011年3月	2011年4月	2011年5月	2011年6月	2011年7月	2011年8月	2011年9月	2011年10月
12-10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
ｵ-2	<0.5	—	—	<0.5	—	—	<0.5	—	—	<0.5	—	—
A6-2	<0.5	—	—	<0.5	—	—	<0.5	—	—	<0.5	—	—
22-3-3	1.3	—	—	0.6	—	—	<0.5	—	—	<0.5	—	—
B2-2	<0.5	—	—	<0.5	—	—	<0.5	—	—	<0.5	—	—
F	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
22-16-3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

全窒素 (mg/L)

	2010年11月	2010年12月	2011年1月	2011年2月	2011年3月	2011年4月	2011年5月	2011年6月	2011年7月	2011年8月	2011年9月	2011年10月
12-10	0.24	—	—	0.05	—	—	0.05	—	—	0.26	—	—
ｵ-2	7.00	—	—	11.00	—	—	10.00	—	—	7.90	—	—
A6-2	1.90	—	—	3.10	—	—	3.50	—	—	3.60	—	—
22-3-3	0.57	—	—	0.40	—	—	0.39	—	—	1.00	—	—
B2-2	0.17	—	—	0.27	—	—	0.38	—	—	1.00	—	—
F	3.60	—	—	3.10	—	—	2.80	—	—	1.50	—	—
22-16-3	0.30	—	—	0.24	—	—	0.93	—	—	0.71	—	—

全リン (mg/L)

	2010年11月	2010年12月	2011年1月	2011年2月	2011年3月	2011年4月	2011年5月	2011年6月	2011年7月	2011年8月	2011年9月	2011年10月
12-10	0.030	—	—	0.023	—	—	0.032	—	—	0.054	—	—
ｵ-2	0.260	—	—	0.360	—	—	0.470	—	—	0.340	—	—
A6-2	0.130	—	—	0.140	—	—	0.410	—	—	0.066	—	—
22-3-3	0.110	—	—	0.130	—	—	0.270	—	—	0.039	—	—
B2-2	0.099	—	—	0.160	—	—	0.061	—	—	0.071	—	—
F	0.220	—	—	0.240	—	—	0.250	—	—	0.065	—	—
22-16-3	0.310	—	—	0.290	—	—	0.330	—	—	0.120	—	—

カドミウム (mg/L)

	2010年11月	2010年12月	2011年1月	2011年2月	2011年3月	2011年4月	2011年5月	2011年6月	2011年7月	2011年8月	2011年9月	2011年10月
12-10	<0.001	—	—	<0.001	—	—	<0.001	—	—	<0.001	—	—
ｵ-2	<0.001	—	—	<0.001	—	—	<0.001	—	—	<0.001	—	—
A6-2	<0.001	—	—	<0.001	—	—	<0.001	—	—	<0.001	—	—
22-3-3	<0.001	—	—	<0.001	—	—	<0.001	—	—	<0.001	—	—
B2-2	<0.001	—	—	<0.001	—	—	<0.001	—	—	<0.001	—	—
F	<0.001	—	—	<0.001	—	—	<0.001	—	—	<0.001	—	—
22-16-3	<0.001	—	—	<0.001	—	—	<0.001	—	—	<0.001	—	—

鉛 (mg/L)

	2010年11月	2010年12月	2011年1月	2011年2月	2011年3月	2011年4月	2011年5月	2011年6月	2011年7月	2011年8月	2011年9月	2011年10月
12-10	0.022	—	—	<0.005	—	—	<0.005	—	—	0.031	—	—
ｵ-2	<0.005	—	—	<0.005	—	—	<0.005	—	—	<0.005	—	—
A6-2	<0.005	—	—	<0.005	—	—	<0.005	—	—	<0.005	—	—
22-3-3	0.033	—	—	<0.005	—	—	<0.005	—	—	<0.005	—	—
B2-2	<0.005	—	—	<0.005	—	—	<0.005	—	—	0.007	—	—
F	<0.005	—	—	<0.005	—	—	<0.005	—	—	<0.005	—	—
22-16-3	0.026	—	—	<0.005	—	—	0.008	—	—	<0.005	—	—

全クロム (mg/L)

	2010年11月	2010年12月	2011年1月	2011年2月	2011年3月	2011年4月	2011年5月	2011年6月	2011年7月	2011年8月	2011年9月	2011年10月
12-10	<0.04	—	—	<0.04	—	—	<0.04	—	—	<0.04	—	—
ｵ-2	<0.04	—	—	<0.04	—	—	<0.04	—	—	<0.04	—	—
A6-2	<0.04	—	—	<0.04	—	—	<0.04	—	—	<0.04	—	—
22-3-3	0.24	—	—	<0.04	—	—	<0.04	—	—	<0.04	—	—
B2-2	<0.04	—	—	<0.04	—	—	<0.04	—	—	<0.04	—	—
F	<0.04	—	—	<0.04	—	—	<0.04	—	—	<0.04	—	—
22-16-3	0.04	—	—	<0.04	—	—	<0.04	—	—	<0.04	—	—

表 3.3.14 南側第 3 帯水層地下水水質分析結果(Cu,Zn,Fe Mn,F,B,NH_4-N)

ヒ素 (mg/L)

	2010年11月	2010年12月	2011年1月	2011年2月	2011年3月	2011年4月	2011年5月	2011年6月	2011年7月	2011年8月	2011年9月	2011年10月
12-10	<0.005	—	—	<0.005	—	—	<0.005	—	—	<0.005	—	—
オ-2	0.032	—	—	0.039	—	—	<0.005	—	—	0.029	—	—
A6-2	0.006	—	—	0.011	—	—	0.011	—	—	0.007	—	—
22-3-3	0.01	—	—	<0.005	—	—	<0.005	—	—	<0.005	—	—
B2-2	<0.005	—	—	<0.005	—	—	<0.005	—	—	<0.005	—	—
F	0.007	—	—	0.008	—	—	<0.005	—	—	<0.005	—	—
22-16-3	0.059	—	—	<0.005	—	—	<0.005	—	—	<0.005	—	—

銅 (mg/L)

	2010年11月	2010年12月	2011年1月	2011年2月	2011年3月	2011年4月	2011年5月	2011年6月	2011年7月	2011年8月	2011年9月	2011年10月
12-10	<0.01	—	—	<0.01	—	—	<0.01	—	—	<0.01	—	—
オ-2	<0.01	—	—	<0.01	—	—	<0.01	—	—	<0.01	—	—
A6-2	<0.01	—	—	<0.01	—	—	<0.01	—	—	<0.01	—	—
22-3-3	0.08	—	—	<0.01	—	—	<0.01	—	—	<0.01	—	—
B2-2	<0.01	—	—	<0.01	—	—	<0.01	—	—	<0.01	—	—
F	<0.01	—	—	<0.01	—	—	<0.01	—	—	<0.01	—	—
22-16-3	0.09	—	—	<0.01	—	—	<0.01	—	—	<0.01	—	—

亜鉛 (mg/L)

	2010年11月	2010年12月	2011年1月	2011年2月	2011年3月	2011年4月	2011年5月	2011年6月	2011年7月	2011年8月	2011年9月	2011年10月
12-10	0.01	—	—	<0.01	—	—	0.02	—	—	<0.01	—	—
オ-2	0.01	—	—	<0.01	—	—	0.01	—	—	0.01	—	—
A6-2	<0.01	—	—	<0.01	—	—	<0.01	—	—	<0.01	—	—
22-3-3	0.11	—	—	0.01	—	—	0.01	—	—	0.03	—	—
B2-2	0.01	—	—	0.01	—	—	<0.01	—	—	0.04	—	—
F	<0.01	—	—	<0.01	—	—	0.01	—	—	<0.01	—	—
22-16-3	0.11	—	—	0.011	—	—	<0.01	—	—	0.02	—	—

鉄(溶解性) (mg/L)

	2010年11月	2010年12月	2011年1月	2011年2月	2011年3月	2011年4月	2011年5月	2011年6月	2011年7月	2011年8月	2011年9月	2011年10月
12-10	<0.1	—	—	<0.1	—	—	<0.1	—	—	<0.1	—	—
オ-2	4.3	—	—	2.9	—	—	5.3	—	—	3.3	—	—
A6-2	<0.1	—	—	<0.1	—	—	0.2	—	—	0.5	—	—
22-3-3	1.3	—	—	0.3	—	—	0.3	—	—	0.3	—	—
B2-2	<0.1	—	—	0.1	—	—	<0.1	—	—	<0.1	—	—
F	1.1	—	—	1.2	—	—	0.8	—	—	2.1	—	—
22-16-3	<0.1	—	—	0.1	—	—	0.1	—	—	0.1	—	—

マンガン(溶解性) (mg/L)

	2010年11月	2010年12月	2011年1月	2011年2月	2011年3月	2011年4月	2011年5月	2011年6月	2011年7月	2011年8月	2011年9月	2011年10月
12-10	<0.1	—	—	<0.1	—	—	<0.1	—	—	<0.1	—	—
オ-2	8.2	—	—	7.8	—	—	6.7	—	—	6.4	—	—
A6-2	2.5	—	—	2.6	—	—	1.0	—	—	6.2	—	—
22-3-3	1.1	—	—	0.3	—	—	0.4	—	—	3.1	—	—
B2-2	<0.1	—	—	<0.1	—	—	<0.1	—	—	<0.1	—	—
F	1.0	—	—	1.0	—	—	1.2	—	—	6.6	—	—
22-16-3	1.1	—	—	1.3	—	—	4.5	—	—	2.5	—	—

フッ素 (mg/L)

	2010年11月	2010年12月	2011年1月	2011年2月	2011年3月	2011年4月	2011年5月	2011年6月	2011年7月	2011年8月	2011年9月	2011年10月
12-10	<0.1	—	—	<0.1	—	—	<0.1	—	—	<0.1	—	—
オ-2	<0.1	—	—	<0.1	—	—	<0.1	—	—	<0.1	—	—
A6-2	<0.1	—	—	<0.1	—	—	0.1	—	—	0.1	—	—
22-3-3	0.2	—	—	0.3	—	—	0.3	—	—	<0.1	—	—
B2-2	<0.1	—	—	<0.1	—	—	<0.1	—	—	<0.1	—	—
F	0.1	—	—	0.1	—	—	0.1	—	—	<0.1	—	—
22-16-3	0.1	—	—	0.2	—	—	0.3	—	—	<0.1	—	—

ホウ素 (mg/L)

	2010年11月	2010年12月	2011年1月	2011年2月	2011年3月	2011年4月	2011年5月	2011年6月	2011年7月	2011年8月	2011年9月	2011年10月
12-10	0.1	—	—	0.1	—	—	0.1	—	—	<0.05	—	—
オ-2	1.0	—	—	1.4	—	—	1.5	—	—	1.1	—	—
A6-2	1.8	—	—	1.4	—	—	0.7	—	—	1.1	—	—
22-3-3	0.1	—	—	0.1	—	—	0.1	—	—	0.3	—	—
B2-2	0.1	—	—	0.1	—	—	0.1	—	—	<0.05	—	—
F	1.2	—	—	0.9	—	—	0.9	—	—	0.4	—	—
22-16-3	0.1	—	—	0.1	—	—	0.1	—	—	<0.05	—	—

アンモニア態窒素 (mg/L)

	2010年11月	2010年12月	2011年1月	2011年2月	2011年3月	2011年4月	2011年5月	2011年6月	2011年7月	2011年8月	2011年9月	2011年10月
12-10	<0.05	—	—	<0.05	—	—	<0.05	—	—	<0.05	—	—
オ-2	<0.05	—	—	0.97	—	—	4.20	—	—	5.30	—	—
A6-2	<0.05	—	—	<0.05	—	—	2.96	—	—	2.10	—	—
22-3-3	<0.05	—	—	<0.05	—	—	<0.05	—	—	<0.05	—	—
B2-2	<0.05	—	—	<0.05	—	—	<0.05	—	—	<0.05	—	—
F	<0.05	—	—	<0.05	—	—	<0.05	—	—	<0.05	—	—
22-16-3	<0.05	—	—	<0.05	—	—	<0.05	—	—	<0.05	—	—

表 3.3.14 南側第 3 帯水層地下水水質分析結果(NO_2-N,NO_3-N,臭気強度)

亜硝酸態窒素 (mg/L)

	2010年11月	2010年12月	2011年1月	2011年2月	2011年3月	2011年4月	2011年5月	2011年6月	2011年7月	2011年8月	2011年9月	2011年10月
12-10	<0.05	—	—	<0.05	—	—	<0.05	—	—	<0.05	—	—
オ-2	<0.05	—	—	<0.05	—	—	<0.05	—	—	<0.05	—	—
A6-2	<0.05	—	—	<0.05	—	—	<0.05	—	—	<0.05	—	—
22-3-3	<0.05	—	—	<0.05	—	—	<0.05	—	—	<0.05	—	—
B2-2	<0.05	—	—	<0.05	—	—	<0.05	—	—	<0.05	—	—
F	<0.05	—	—	<0.05	—	—	<0.05	—	—	<0.05	—	—
22-16-3	<0.05	—	—	<0.05	—	—	<0.05	—	—	<0.05	—	—

硝酸態窒素 (mg/L)

	2010年11月	2010年12月	2011年1月	2011年2月	2011年3月	2011年4月	2011年5月	2011年6月	2011年7月	2011年8月	2011年9月	2011年10月
12-10	<0.05	—	—	<0.05	—	—	0.06	—	—	<0.05	—	—
オ-2	<0.05	—	—	<0.05	—	—	4.50	—	—	0.12	—	—
A6-2	<0.05	—	—	<0.05	—	—	<0.05	—	—	<0.05	—	—
22-3-3	<0.05	—	—	<0.05	—	—	<0.05	—	—	<0.05	—	—
B2-2	0.09	—	—	<0.05	—	—	1.60	—	—	0.71	—	—
F	<0.05	—	—	<0.05	—	—	<0.05	—	—	<0.05	—	—
22-16-3	<0.05	—	—	<0.05	—	—	<0.05	—	—	0.06	—	—

臭気強度 (TON)

	2010年11月	2010年12月	2011年1月	2011年2月	2011年3月	2011年4月	2011年5月	2011年6月	2011年7月	2011年8月	2011年9月	2011年10月
12-10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
オ-2	1600	—	—	1600	—	—	1900	—	—	1958	—	—
A6-2	440	—	—	380	—	—	350	—	—	333	—	—
22-3-3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
B2-2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
F	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
22-16-3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

水質分析の結果から、北側第 2 帯水層の 22-11-2 と南側第 3 帯水層の 12-10 では汚染がほとんど見られず、EC が低値であり溶存酸素も存在している。TOC も低い値であることから有機物含有量が少なく、汚染されていない地下水であることが判る。北側第 2 帯水層の地下水は、溶存酸素が比較的高いことから表層からの浸透量が多く、これまでの調査から地下水流速も比較的速いことが確認されている [1)]。不法投棄地北側の H21-7、22-17-2、B7-2 では EC、TOC が高値を示し、ベンゼン、トルエン、ジクロロメタン汚染の残留が認められる。また、色度、濁度、透視度、臭気強度などの官能試験値も高い値を示すことから、これらの地下水は臭気の強い、濁り水であることが判る。北側調査地点では汚染は 22-17-2 で極大値を示し、その下流方向末端にある M-2 では、汚染の自然減衰が進んだ状態になっていることが確認できる。

南側第 3 帯水層は、汚染残留地点であるオ-2、F 及び A6-2 の地点で高い EC 値、TOC 値を示し、環境基準程度のベンゼンが検出されているが、ジクロロメタンは検出されていない。また、汚染地点から離れるに従い、22-3-3 → B2-2 → 22-16-3 の順に 12-10 に近い分析値になっている。22-16-3 では EC が僅かに高値であること以外はほぼ、12-10 と同様の水質であった。地下水温は、北側第 2 帯水層では 12.9℃～23.8℃の範囲で、南側第 3 帯水層では 14.9℃～20.0℃の範囲で変動しており、北側第 2 帯水層の方が外気温の影響を受けやすい環境となっていることが判る。

図 3.3.22 に蛍光染色法による全菌数測定結果を示す。全菌数は、北側第 2 帯水層では、汚染残留の見られる H21-7、22-17-2 で菌数が多く、水質調査結果で溶存酸素(DO)濃度が低い値である H21-7、22-17-2 では全菌数に対する好気培養菌数割合が低い値を示している。南側第 3 帯水層では汚染残留の見られる A6-2 と F では高い菌数を示しているが、ほとんど汚染のみられない 22-3-3 及び 22-16-3 でも全菌数が高い値を示した。22-3-3 と 22-16-3 では菌叢調査時の水質で高い SS 値を示しており、サンプルへの土壌粒子の混入により、検液中の全菌数が高い値を示したと考えられる。

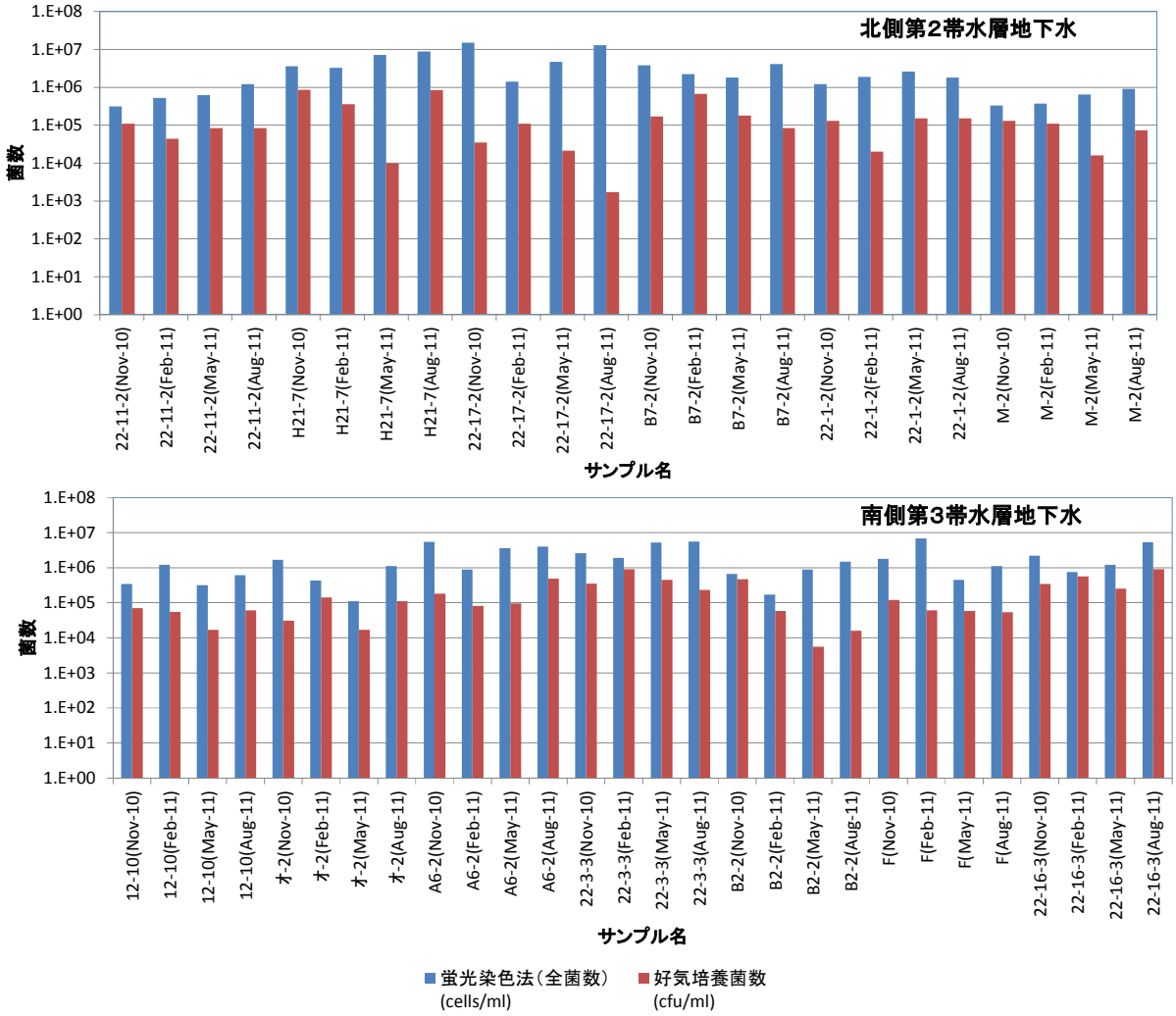


図 3.3.22 地下水菌数測定結果

次に、これらの地下水のクローンライブラリーによる菌叢解析結果(phylum level)を図 3.3.23 に示す。北側帯水層地下水の菌叢解析結果から H21-7 と 22-17-2 の菌叢は Firmicutes の存在比が他の地点に比べて高い同様の菌叢であることが判る。特に 22-17-2 地点の Aug-11 の検体では Proteobacteria に比べ Firmicutes の存在比が高いことから嫌気的環境が優位な状態にあると考えられた。また、22-1-2 地点の地下水が豊富な時期（May-11 と Aug-11）の検体では、電気伝導率(EC)や酸化還元電位(ORP)に他の時期と違いが見られることから、投棄地東側などの周辺地下水の流入により水質に変化が生じ、それに応じて菌叢も変化したものと考えられた。また、汚染が流入する前の 22-11-2 と、下流の M-2 地下水ではよく似た菌叢であることが判った。南側帯水層地下水の菌叢解析結果は汚染残留が低濃度であることを反映し、北側に比べ違いが分かりにくい菌叢であった。しかし、オ-2、A6-2、F の地点では高い有機物含量から Firmicutes が他地点に比べ高い存在比であり、嫌気的な環境が存在していることが判る。全体的に見ると、12-10→オ-2→A6-2 にかけて Firmicutes が増加し 22-3-3 でそれらが減少している菌叢を示した。B2-2 では Firmicutes が見られず他とは全く違った菌叢を示している。水質試験結果からも B2-2 地点は高い溶存酸素(DO)値を示し、菌叢調査と水質調査の両結果から、強い好気的環境であることが判る。これらの結果から、地下水の菌叢は地下環境を反映していることが明らかであることから、

菌叢を調査し、比較することで地下環境の汚染程度について、総合的判断が可能な指標となると考えられる。しかし、地下土壌が混入し懸濁物質濃度(SS)が高い場合には、菌数の増加が見られたことから、それら混入土壌に付着した菌により、菌叢に違いが生ずることも懸念された。観測井周辺の広い地下環境を代表する菌叢を調査するためには、サンプリング時に観測井内土壌の混入に注意が必要である。

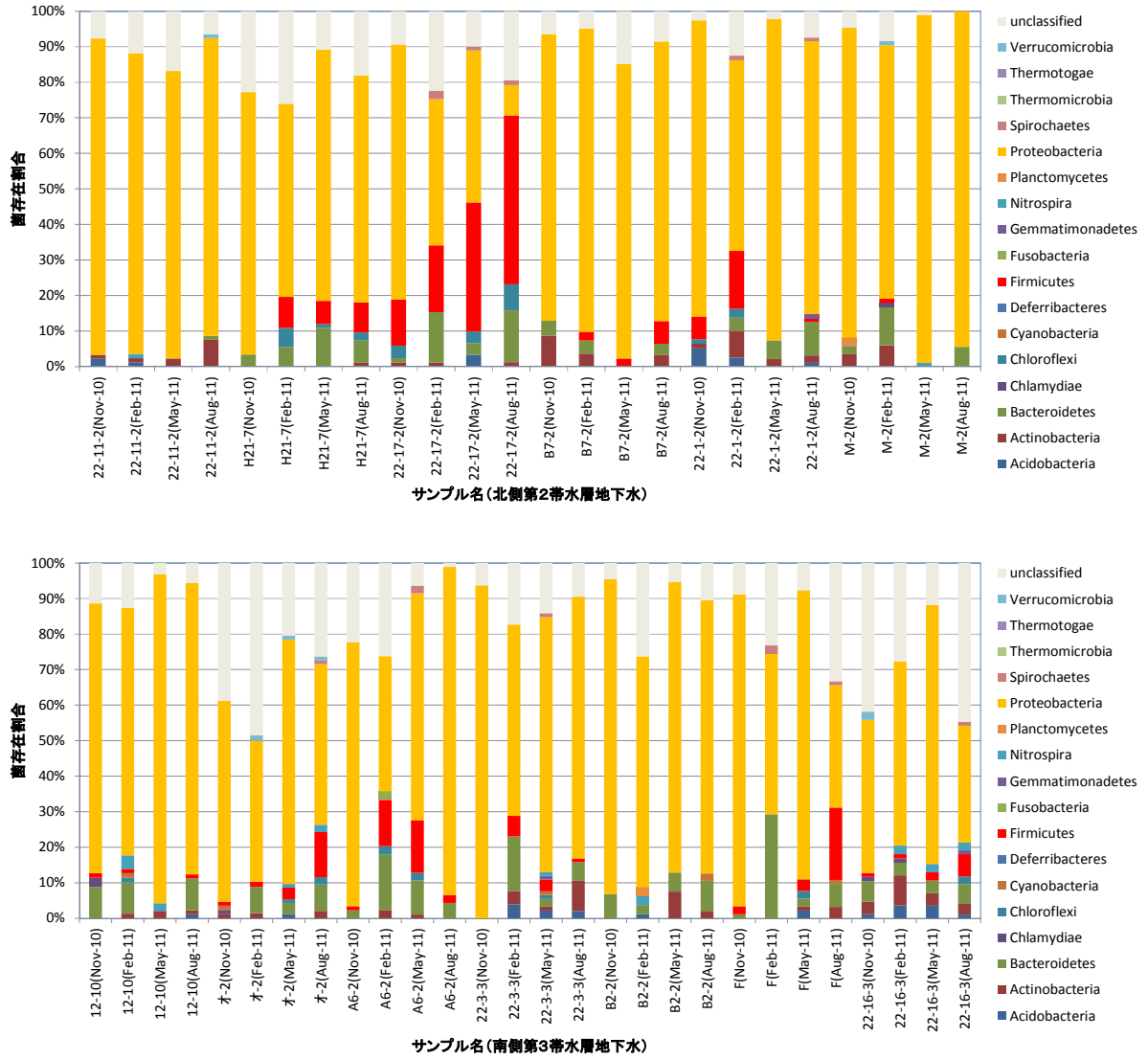


図 3.3.23　地下水菌叢解析結果(phylum level)

図 3.3.24 に genus level で分類した物質循環に関与する細菌の検出割合のグラフを示す[2)]。北側帯水層では H21-7 でメチル資化性細菌の割合が高く、有機物を分解していると考えられる。

22-1-2(Nov-10)の鉄細菌の割合が高い検体では、水質試験結果でも 40mg/L の高い溶存鉄(d-Fe)濃度を示し、また、M-2 地下水の内で最も多い鉄細菌存在割合示す(May-11)の地下水で 3.9mg/L と M-2 では高い d-Fe 濃度が見られている。南側帯水層では、上流の 12-10 と、水質理化学分析結果から最も自然減衰が進んでいると考えられる 22-16-3 では、一年を通じて安定した菌叢を示し、汚染残留が見られるオ-2、A6-2、F では菌検出割合にばらつきが見られた。地下水水質の変

動により菌叢が変化していると考えられることから、それらの地点では地下水水質が安定しない状況であると考えられた。

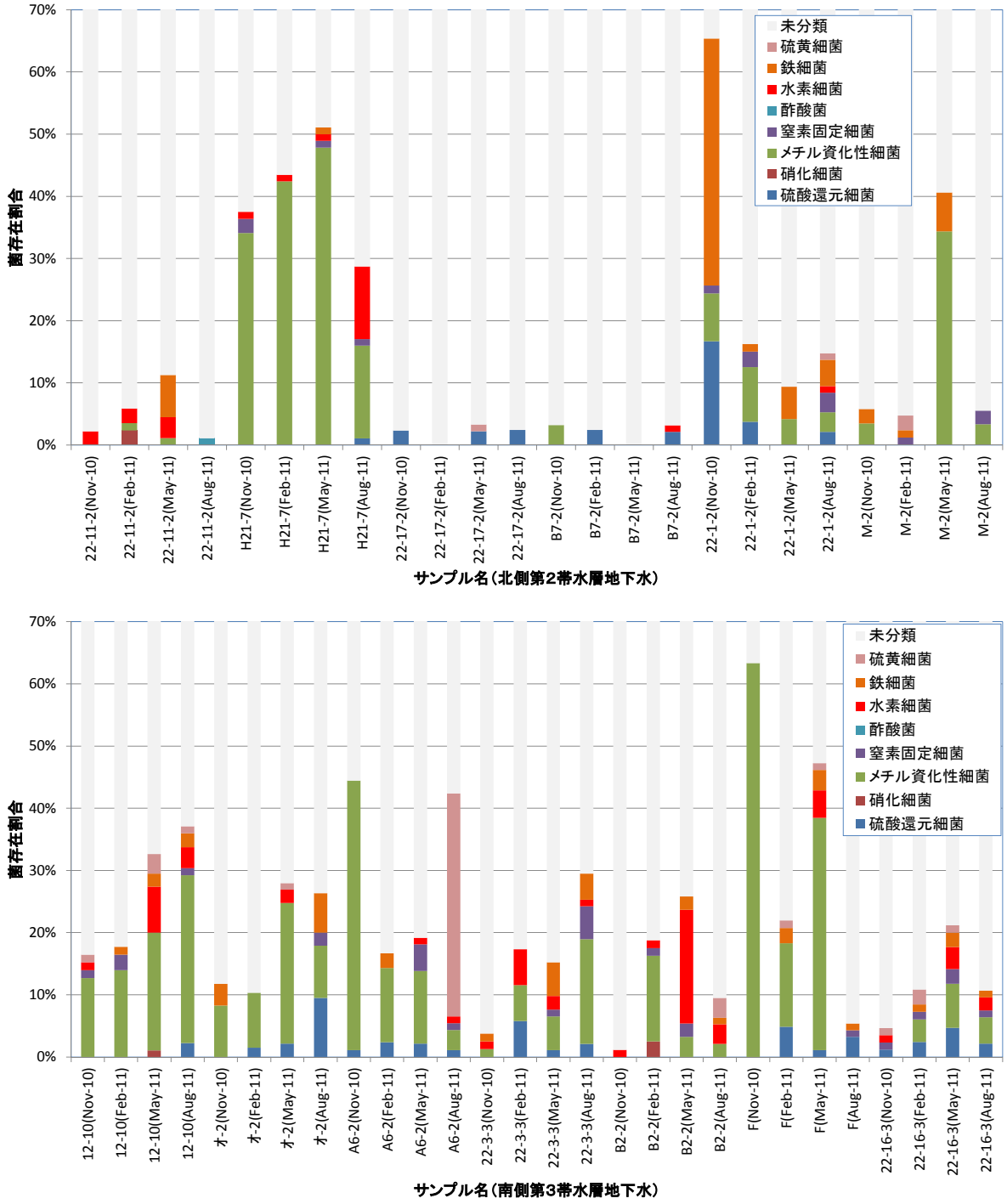


図 3.3.24　物質循環に関与する細菌の検出割合

図 3.3.25 に species level で確認した VOC 等汚染物質分解が報告されている細菌の検出割合のグラフを示す。クローンライブラリー法による菌叢解析では地下水中に存在する菌の species level まで検出することができるため、それらの菌種名から既知の情報を検索することにより、汚染物質を分解する可能性が高い菌の存在の有無について知ることができる(表 3.3.15)。菌種北側帯水層では H21-7、B7-2 にジクロロメタン分解が報告されている *Methylophilus leisingeri* の存在が確認され、芳香族類の分解が報告されている *Anaerolinea thermophila* が H21-7、22-17-2、

A6-2、F に広く分布していることが確認された。また、今回の試験でベンゼン、トルエンの分解が確認されている *Comamonas testosteroni* が B7-2、オ-2 に存在していることも確認できた。図 3.3.25 から汚染残留が見られる地下水中には、これら VOC、アルカン類、芳香族類を分解することができる菌が多く存在することが判る。また、汚染物質分解試験の結果も併ることにより、問題となる物質の分解に関与している菌を同定することができ、菌叢モニタリングにより分解菌を調べることで、微生物分解が進んでいることを確認することが可能となる。現場の地下水を用いた実験を併せて行い、分解菌及び分解関与菌を、現場地下水からモニタリングする本手法は、微生物分解を確認する最も信頼性の高い方法であると考えられる。

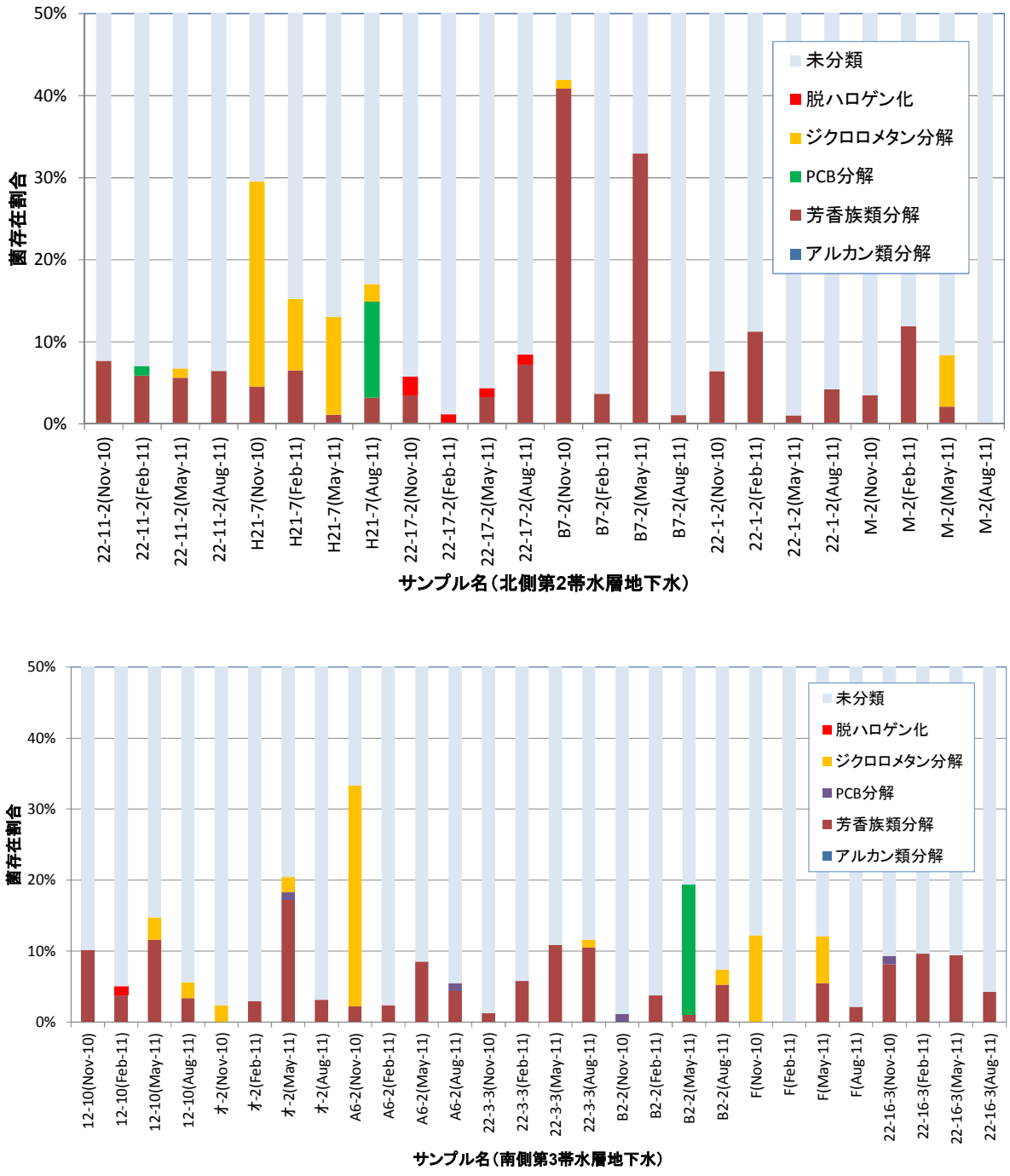


図 3.3.25　汚染物質分解細菌の検出割合

表 3.3.15　地下水調査で検出された VOC 類分解菌

菌　名	分解物	分解能確認等
Novosphingobium aromaticivorans	芳香族類分解	文　献 2)
Novosphingobium subarcticum	芳香族類分解	文　献 3)
Geothrix fermentans	芳香族類分解	文　献 4)
Holophaga foetida	芳香族類分解	文　献 5)
Rhodococcus erythropolis	芳香族類分解	本研究
Anaerolinea thermophila	芳香族類分解	文　献 6)
Sphingomonas sp.	芳香族類分解	文　献 7)
Comamonas testosteroni	芳香族類分解	本研究
Azoarcus anaerobius	芳香族類分解	文　献 8)
Denitratisoma oestradiolicum	芳香族類分解	文　献 9)
Nevskia ramosa	芳香族類分解	文　献 5)
Stenotrophomonas maltophilia	芳香族類分解	本研究
Acidovorax delafieldii	アルカン分解	文　献 10)
Hydrogenophaga taeniospiralis	PCB分解	文　献 11)
Dehalobacter restrictus	脱ハロゲン化	文　献 12)
Desulfitobacterium frappieri	脱ハロゲン化	文　献 13)
Desulfuromonas chloroethenica	脱ハロゲン化	文　献 13)
Methylophilus leisingeri	ジクロロメタン分解	文　献 5)
Alkanindiges illinoisensis	アルカン分解	文　献 14)
Hydrocarboniphaga effusa	アルカン分解	文　献 15)

クローンライブラリーによる菌叢解析と現場地下水を利用した汚染物質分解試験により、現場地下環境中で細菌による分解が進むことが判り、また、その分解菌または分解に関与する菌を明らかにすることがでた。明らかになった菌名から、文献調査により、至適温度、至適 pH、好気嫌気性条件など多くの情報を得ることができる。得られた情報を基に、現場での地下水水質と菌叢モニタリングの継続により、微生物による浄化が適正に進む地下環境にあるのかを判断をすることが可能であると考えられた。このことから、微生物分解を自然減衰の要因とした MNA の適用の際に重要であり、本研究の目的でもある「①MNA 適用の前提条件となる現場地下環境中での VOC 微生物分解の確認」についてはクローンライブラリー法による菌叢解析を利用した方法が有効であると考えられた。

本研究の目的である「②未規制物質も含めた総合的地下環境の安定化指標としての利用」については、菌叢解析結果をグラフ化する方法、物質循環に関与する細菌の割合をグラフ化する方法により、考察を行い地下水状態により菌叢に違いが生じるということは明らかとなり、また、清浄地と汚染地では菌叢が相違していることが確認された。次に、地下水菌叢解析より得た genus level の菌叢データで主成分解析を行い、第 1 主成分と第 2 主成分が、どの水質データを反映しているのかを確認するため、主成分得点順に水質データを並べ比較を行った。北側帯水層の主成分解析結果を図 3.3.26 に、対応する第 1 主成分得点と第 2 主成分得点の水質データをそれぞれ図 3.3.27 と図 3.3.28 に示す。南側帯水層の成分解析結果を図 3.3.29 に、対応する第 1 主成分得点と第 2 主成分得点の水質データをそれぞれ図 3.3.30 と図 3.3.31 に示す。

北側帯水層の主成分解析結果から、第 1 主成分軸（縦軸）で得点の高い位置に 22-17-2,B7-2,H21-7 の理化学試験結果で高濃度汚染の残留が確認されている地下水がプロットされた。それに対し、22-11-2,M-2 の汚染がほとんど見られない地下水は、第 1 主成分軸の低い位置にプロットされる結果となった。北側帯水層地下水の菌叢(genus level)での主成分解析から算出された、第 1 主成分得点と水質分析結果各項目とを比較した図 3.3.27 では、主成分得点の高い地下水で、TOC、BTX、1,4-ジオキサン、BOD、COD、T-N、T-P の有機物含量や富栄養を示す項目と、関連があると考えられる。第 2 主成分と水質分析結果各項目とを比較した図 3.3.28 では、有機物量や富栄養を示す項目との関連性は見られず、d-Fe 及び d-Mn の項目と僅かに関連が見られている。

南側帯水層の主成分解析結果では、第 1 主成分軸（縦軸）で得点の高い位置に 22-16-3、12-10、22-3-3 の理化学試験で汚染が見られない地下水がプロットされており、低い位置に、オ-2、A6-2、F の理化学試験結果で汚染の残留が確認されている地下水がプロットされる結果となった。南側帯水層地下水の菌叢(genus level)での主成分解析から算出された、第 1 主成分得点と水質分析結果各項目とを比較した図 3.3.30 では、主成分得点の高い地下水で、TOC、BTX、1,4-ジオキサン、BOD、COD、T-N、の有機物含量や富栄養を示す項目と関連性が認められる。第 2 主成分と水質分析結果各項目とを比較した図 3.3.31 では、どの水質分析結果とも関連性が認められなかった。

これらのことから、北側帯水層及び南側帯水層地下水中の菌叢解析(genus level)結果を主成分解析する方法により、水質理化学試験の結果の有機性汚濁を示す項目と関連性を見いだすことが可能であることと考えられた。

次に、時期による菌叢の違いを考慮し、サンプリング時系列毎に各地点の菌叢の違いについて解析を行った。有機性汚濁の程度を反映していると認められる第 1 主成分得点で、北側帯水層と南側帯水層それぞれで汚染流入最も少ない、上流側観測井（北側:22-11-2、南側:12-10）との差を算出した。北側帯水層、南側帯水層の算出結果をそれぞれ表 3.3.16、表 3.3.17 に示す。尚、北側と南側の第 1 主成分軸で汚染程度を示す方向が逆転しているため、汚染残留程度が正となるように、北側で算出された年平均の値の絶対値も表 3.3.16 に示した。

表 3.3.16 北側帯水層地下水 22-11-2 地点との第 1 主成分得点差

サンプル名	10-Nov	11-Feb	11-May	11-Aug	年平均	年平均(±逆)
22-11-2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
H21-7	-1.4	-2.4	-1.6	-0.7	-1.5	1.5
22-17-2	-2.3	-2.4	-2.7	-2.4	-2.4	2.4
B7-2	-2.1	-1.6	-2.0	-0.9	-1.7	1.7
22-1-2	-0.9	-0.5	-0.2	(3.6)	-0.5	0.5
M-2	-0.7	(8.4)	-1.0	0.4	-0.4	0.4

（ ）： 外れ値（欠測扱い）

表 3.3.17 南側帯水層地下水 12-10 地点との第 1 主成分得点差

サンプル名	10-Nov	11-Feb	11-May	11-Aug	年平均
12-10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
オ-2	1.2	3.1	1.1	2.7	2.0
A6-2	1.4	3.2	0.7	3.7	2.3
22-3-3	0.4	0.4	-0.1	(7.0)	0.2
B2-2	1.2	0.8	(2.9)	(3.5)	1.0
F	1.3	2.9	1.6	3.5	2.4
22-16-3	0.3	-0.8	-2.3	1.6	-0.3

( ) : 外れ値(欠測扱い)

表 3.3.16 と表 3.3.17 の結果、菌叢の時期的な変化も考慮した主成分得点差の年平均値でサンプリング位置毎の有機性汚濁程度を比較すると、次に示す順になる。

北側：22-17-2 ＞ B7-2 , H21-7 ＞ 22-1-2 , M-2

南側：F , A6-2 , ｵ-2 ＞ B2-2 ＞ 22-3-3 , 22-16-3

これら、菌叢から導き出された汚染の程度は、理化学試験結果の汚濁項目と類似しており、菌叢が汚染程度、安定化程度の指標になることが示唆された。

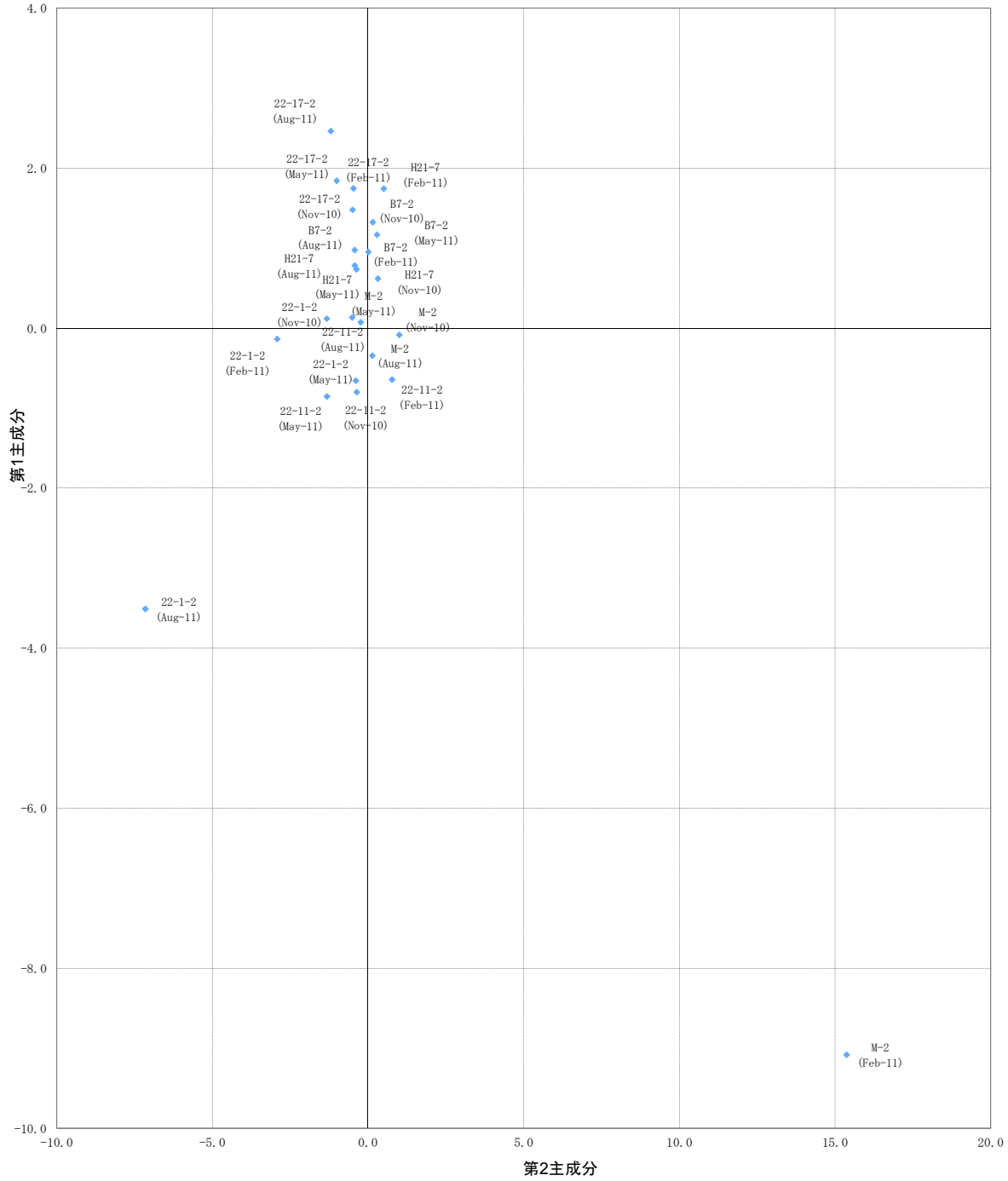


図 3.3.26　菌叢 genus level の主成分解析結果（北側帯水層）

	第1主成分得点
22−17−2 (Aug−11)	2.4618
22−17−2 (May−11)	1.8392
22−17−2 (Feb−11)	1.7436
H21−7 Feb−11)	1.7428
22−17−2 (Nov−10)	1.4765
B7−2 (Nov−10)	1.3207
B7−2 (May−11)	1.1643
B7−2 (Aug−11)	0.9740
B7−2 (Feb−11)	0.9491
H21−7 (Aug−11)	0.7800
H21−7 (May−11)	0.7345
H21−7 (Nov−10)	0.6156
M−2 (May−11)	0.1309
22−1−2 (Nov−10)	0.1170
22−11−2 (Aug−11)	0.0717
M−2 (Nov−10)	−0.0868
22−1−2 (Feb−11)	−0.1361
M−2 (Aug−11)	−0.3459
22−11−2 (Feb−11)	−0.6440
22−1−2 (May−11)	−0.6586
22−1−2 (Aug−11)	−3.5099
22−11−2 (Nov−10)	−0.8025
22−11−2 (May−11)	−0.8545
M−2 (Feb−11)	−9.0830

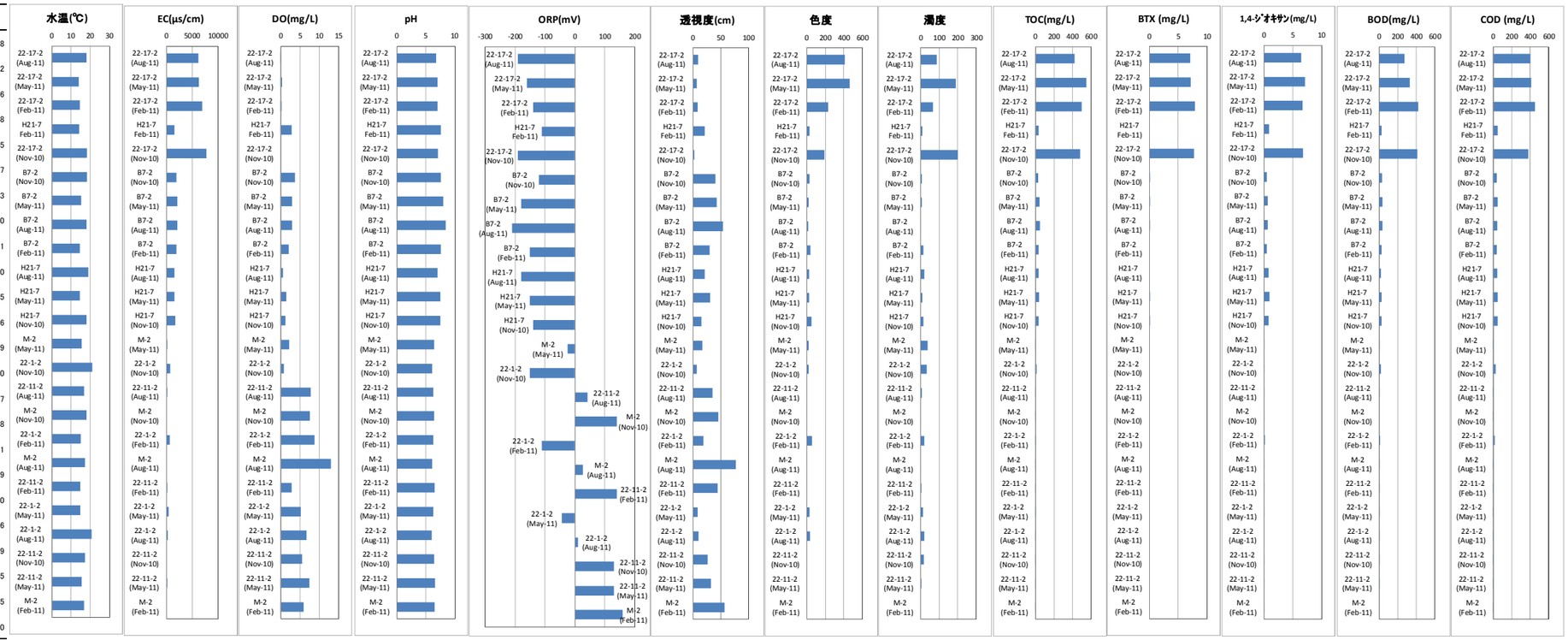


図 3.3.27　第 1 主成分得点順の各項目水質分析結果（北側帯水層）

図3.3.28　第２主成分得点順の各項目水質分析結果（北側帯水層）

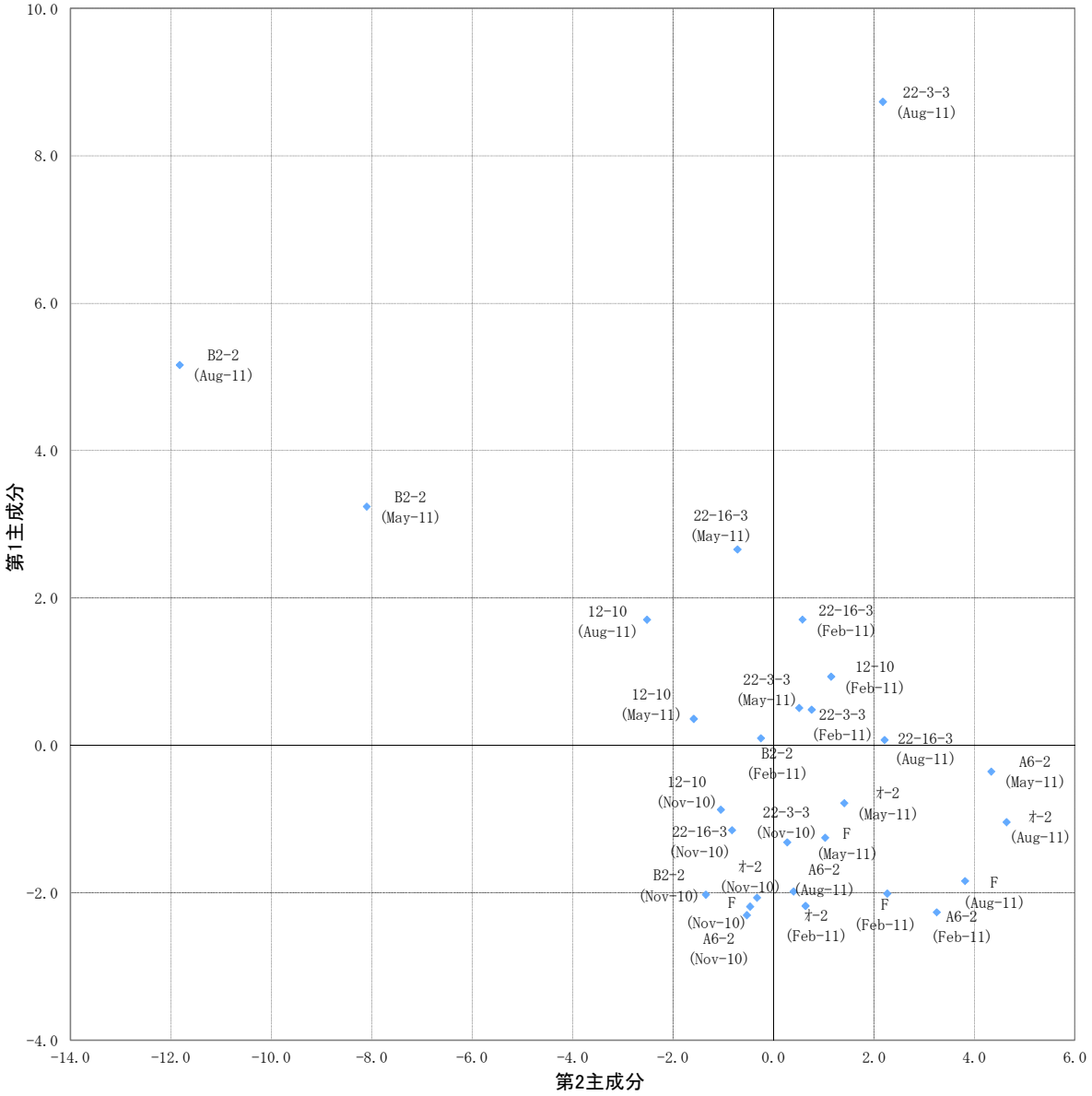
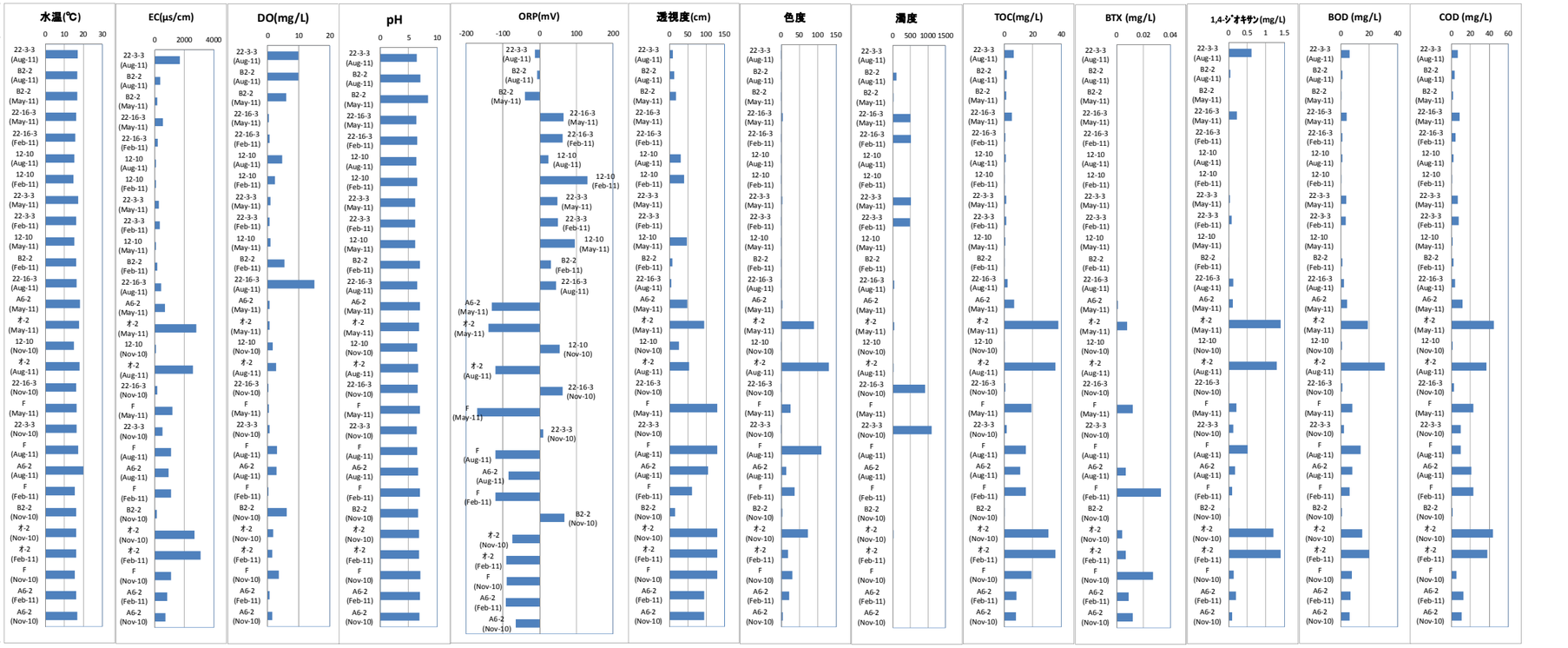


図3.3.29　菌叢 genus level の主成分解析結果（南側帯水層）

	第1主成分得点
22-3-3 (Aug-11)	8.7303
B2-2 (Aug-11)	5.1615
B2-2 (May-11)	3.2399
22-16-3 (May-11)	2.6567
22-16-3 (Feb-11)	1.7057
12-10 (Aug-11)	1.7038
12-10 (Feb-11)	0.9315
22-3-3 (May-11)	0.5064
22-3-3 (Feb-11)	0.4849
12-10 (May-11)	0.3576
B2-2 (Feb-11)	0.0961
22-16-3 (Aug-11)	0.0728
A6-2 (May-11)	−0.3552
オ-2 (May-11)	−0.7844
12-10 (Nov-10)	−0.8728
オ-2 (Aug-11)	−1.0429
22-16-3 (Nov-10)	−1.1519
F (May-11)	−1.2543
22-3-3 (Nov-10)	−1.3160
F (Aug-11)	−1.8407
A6-2 (Aug-11)	−1.9842
F (Feb-11)	−2.0123
B2-2 (Nov-10)	−2.0263
オ-2 (Nov-10)	−2.0672
オ-2 (Feb-11)	−2.1802
F (Nov-10)	−2.1884
A6-2 (Feb-11)	−2.2660
A6-2 (Nov-10)	−2.3041



	第1主成分得点
22-3-3 (Aug-11)	8.7303
B2-2 (Aug-11)	5.1615
B2-2 (May-11)	3.2399
22-16-3 (May-11)	2.6567
22-16-3 (Feb-11)	1.7057
12-10 (Aug-11)	1.7038
12-10 (Feb-11)	0.9315
22-3-3 (May-11)	0.5064
22-3-3 (Feb-11)	0.4849
12-10 (May-11)	0.3576
B2-2 (Feb-11)	0.0961
22-16-3 (Aug-11)	0.0728
A6-2 (May-11)	−0.3552
オ-2 (May-11)	−0.7844
12-10 (Nov-10)	−0.8728
オ-2 (Aug-11)	−1.0429
22-16-3 (Nov-10)	−1.1519
F (May-11)	−1.2543
22-3-3 (Nov-10)	−1.3160
F (Aug-11)	−1.8407
A6-2 (Aug-11)	−1.9842
F (Feb-11)	−2.0123
B2-2 (Nov-10)	−2.0263
オ-2 (Nov-10)	−2.0672
オ-2 (Feb-11)	−2.1802
F (Nov-10)	−2.1884
A6-2 (Feb-11)	−2.2660
A6-2 (Nov-10)	−2.3041

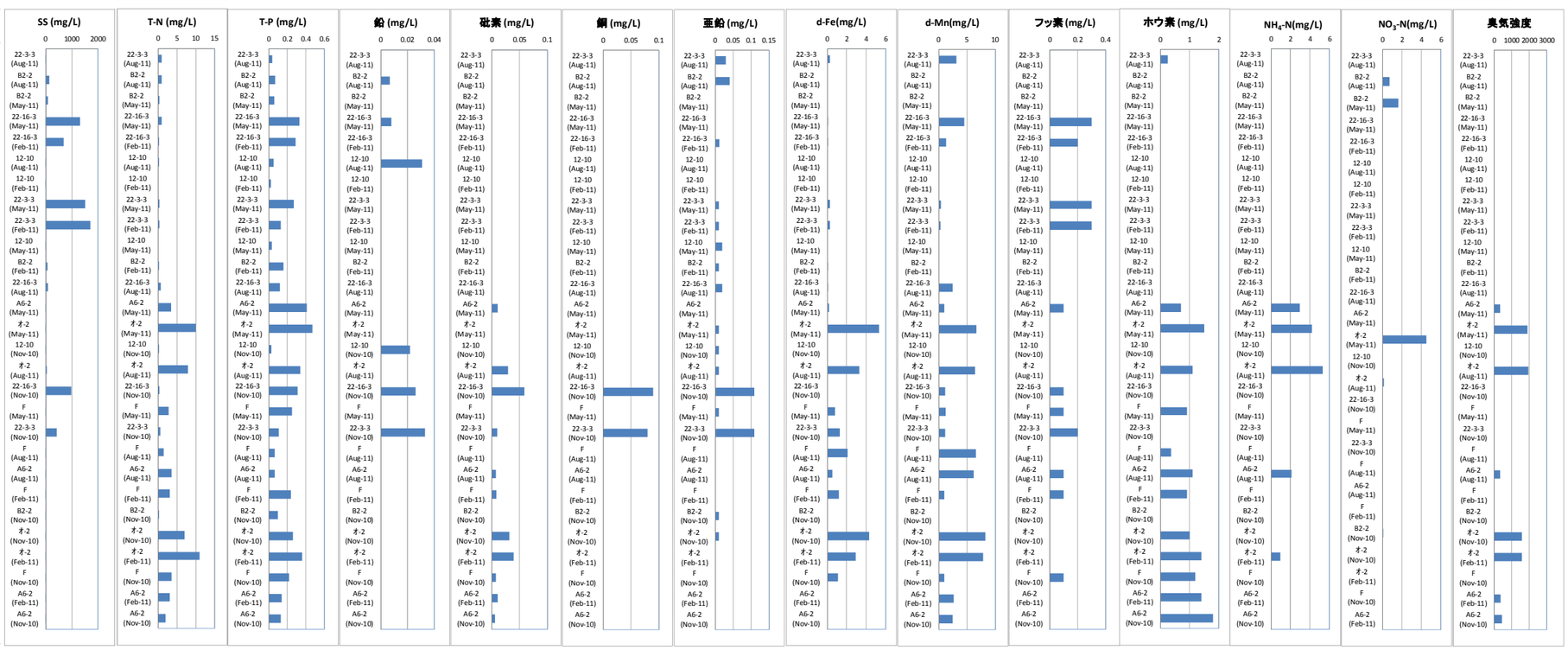


図 3.3.30　第 1 主成分得点順の各項目水質分析結果（南側帯水層）

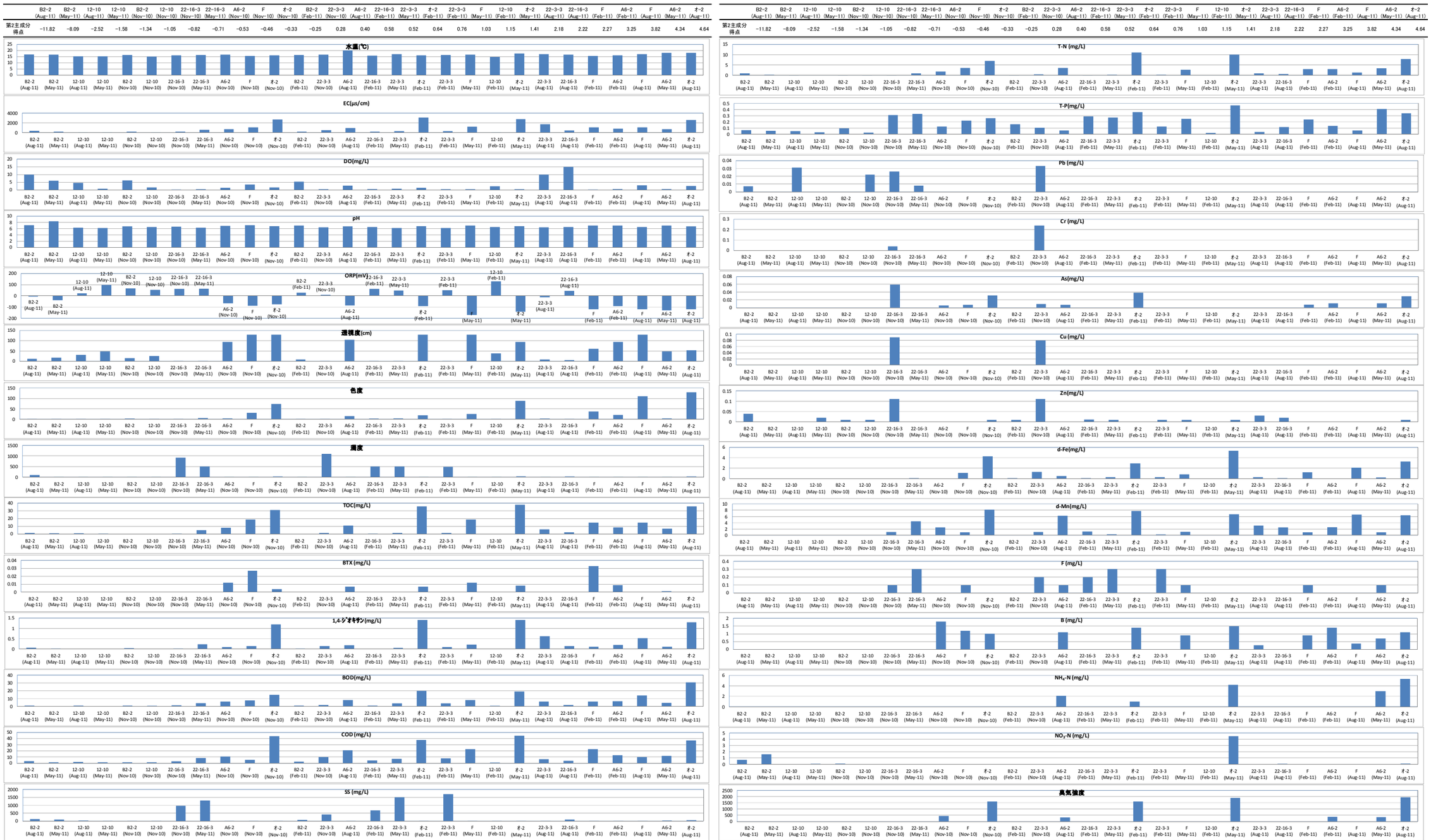


図 3.3.31　第 2 主成分得点順の各項目水質分析結果（南側帯水層）

次に、汚染程度の差が明確であった、北側帯水層観測地点で検出割合の高かった菌を表3.3.18に示す。

表 3.3.18 北側第２帯水層　細菌検出割合（年平均）

綱分類	菌 種	検出頻度(%)						菌の特徴
		22-11-2	H21-7	22-17-2	B7-2	22-1-2	M-2	
Anaerolineae	*Anaerolinea thermophila*	0	2	4	0	1	0	嫌気性、PAH分解、高汚染排水中
Clostridia	*Clostridium* sp.	0	2	6	0	2	0	嫌気性、H_2生成、
Alphaproteobacteria	*Thermincola carboxydiphila*	0	1	8	0	0	0	好アルカリ、H_2生成
	Rhodobacter blasticus	1	0	0	0	2	3	好気性、淡水中
	Novosphingobium subarcticum	2	0	0	0	1	4	好気性、PAH分解
Betaproteobacteria	*Acidovorax defluvii*	0	2	0	13	0	0	アルカン類分解
	Comamonas testosteroni	0	0	0	20	0	0	好気性、芳香族類分解
	Curvibacter delicatus	21	2	0	0	4	34	好気性、蒸留水中
	Rhodoferax ferrireducens	25	2	0	2	4	4	通性嫌気性、FeMn利用、沿岸堆積物中
	Aquabacterium sp.	3	0	0	0	2	1	微好気性、好貧栄養細菌
	Methylophilus leisingeri	0	13	0	0	0	2	好気性、メタノール資化性
	Aquaspirillum autotrophicum	1	0	0	0	1	5	好気性、湖水中
	Gallionella ferruginea	0	0	0	0	14	3	CO_2利用、鉄酸化性
	Dechloromonas hortensis	4	2	0	1	1	0	塩素酸利用、庭土中
	Sterolibacterium denitrificans	1	0	0	0	0	13	脱窒、高汚染排水中
Deltaproteobacteria	*Syntrophus gentianae*	0	1	5	1	0	0	PAH分解、H_2利用、高汚染スラッジ中
Epsilonproteobacteria	*Arcobacter cryaerophilus*	0	0	39	0	0	0	微好気性、硫黄循環、病原性有り、汚物表面
	Sulfate reducing bacteria	0	0	2	1	4	0	硫酸還元、H_2生成

これらのクローンライブラリーにより明らかとなった菌名により、既報の情報により、現場地下環境を次のように推測することができる。

22-11-2 では、Fe,Mnを電子受容体として利用できる低温菌である *Rhodoferax ferrireducens* 、有機酸資化性で貯留蒸留水中から単離されている *Curvibacter delicatus*が優占種であり、比較的清浄な環境に生存する菌種が多く検出された。

H21-7では、好気性でメタノール資化性の *Methylophilus leisingeri* が主要な菌叢となっており、この菌は好気性のジクロロメタンデハロゲナーゼを有する菌として知られており、この地点で有機塩素化合物が分解されていることが考えられる。

22-17-2 では、硫黄酸化細菌で人畜への病原性を有し、下水汚泥中や人畜糞便からも単離される *Arcobacter cryaerophilus* が優占種となっている。また、嫌気性で水素利用する PAH 資化性の *Syntrophus gentianae* が検出されており、同地点に生存する硫酸還元菌や、高濃度硫黄中でも成長可能で高い水素生成能を有する *Thermincola carboxydiphila*、およびセルロース資化性で水素生成能の高い *Clostridium* sp. とコンソーシアムを形成しており、汚れた環境に生存する菌種が多く検出された。

B7-2 では、 *Comamonas testosteroni* が主要な菌叢であり、この菌は好気性でベンゼン、トルエンを分解する菌として本研究で単離された菌種でもあり、この地点付近でそれらの VOC 類が菌により分解されているものと考えられる。

22-1-2では、微好気性でCO_2を炭素源として鉄をエネルギー源として利用することができる *Gallionella ferruginea* が優占種となっており、常時、その地点では比較的高い鉄濃度であると考えられる。

M-2では、 22-11-2 と同様に *C.delicatus* が優占種であり比較的清浄な環境であると推測されるが、嫌気性オキシゲナーゼを有する脱窒菌で、高濃度汚染排水中から単離される *Sterolibacterium denitrificans*も多く生存していることから、 22-11-2 に比べ汚染された環境であることなど、多くのことが明らかとなり、地下環境が菌名から推定しても未だ汚染が残留していることが判る。

以上のように、クローンライブラリー法による菌叢解析の実施により、地下環境の汚染程度また、その汚染物質の分解・浄化の進行程度を推測することができ、このような予測は菌叢を調査することでのみ把握することが可能となる。

次に、 2010 年 11 月から 2011 年 10 月までの第二帯水層地下水の DGGE 結果を図3.3.32、第三帯水層地下水の DGGE 結果を図3.3.33に示した。不法投棄地点に近い第 2 帯水層のH21-7、 22-17-2 、 B7-2 、浄化過程と思われる第 3 帯水層の22-3-3、 B2-2 は 2010 年 11 ～ 2011 年 5 月のバンドパターンが似ていた。同一採水日における採水地点別の比較では、 2010 年 11 月の第 3 帯水層 12-10 、オ-2、 A6-2 においてのみバンドパターンが類似していたが、他の期間では例え隣り合った採水地点であっても類似性は見られなかった

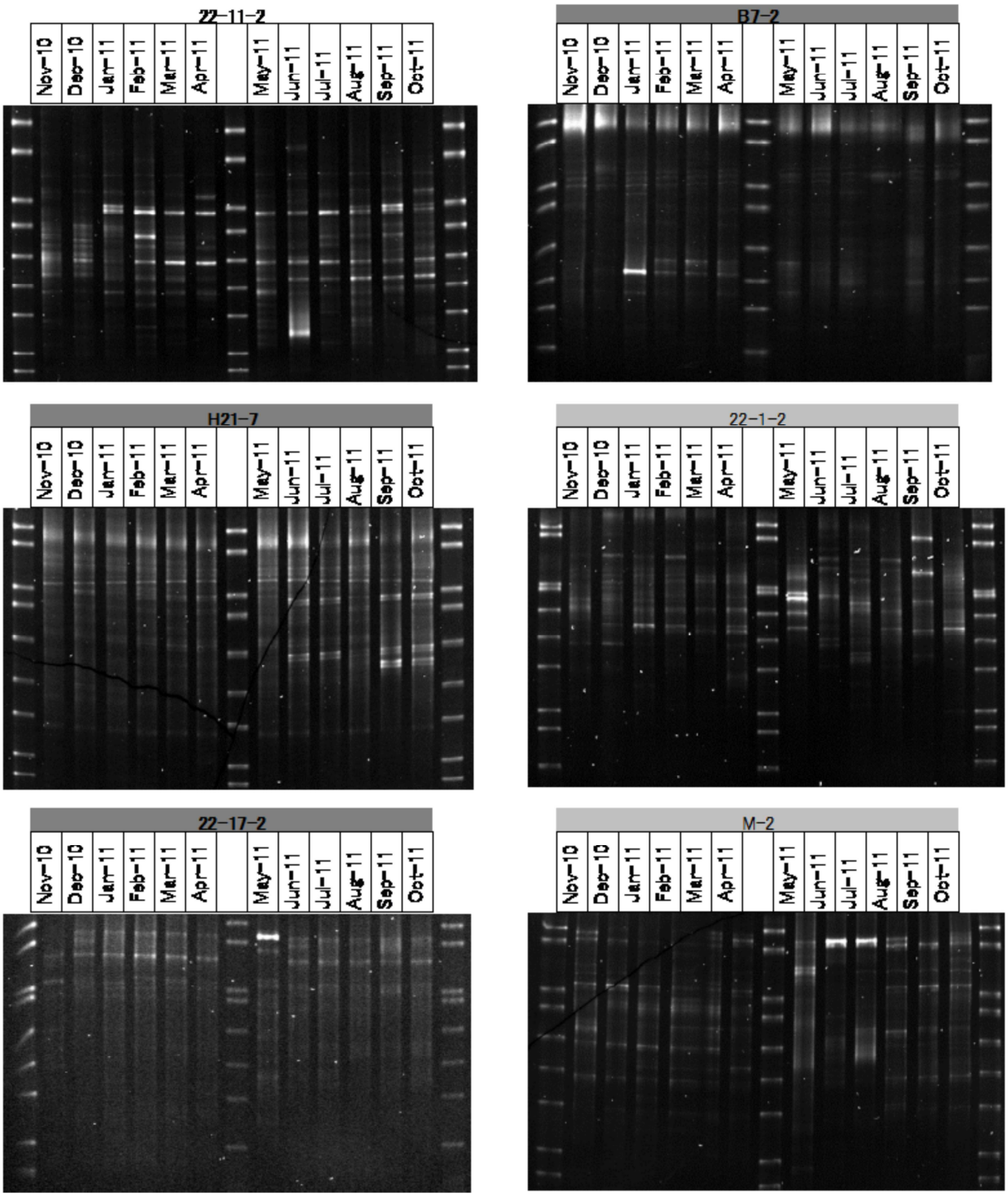


図 3.3.32　第 2 帯水層地下水のDGGE像

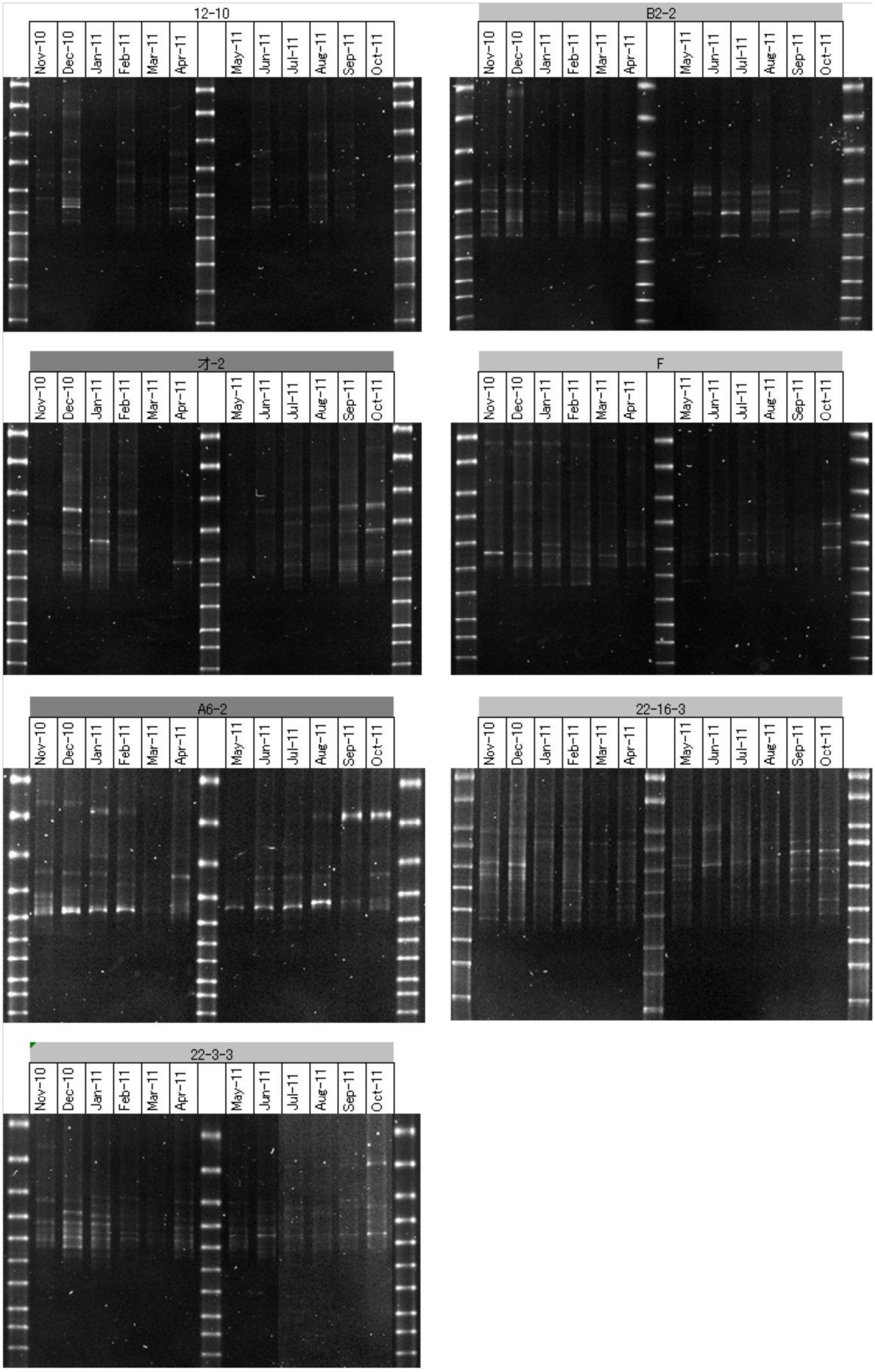


図 3.3.33　第 3 帯水層地下水のDGGE像

(5) 地下水中微生物からの VOC 分解に関与する遺伝子の検出

PCR 法で地下水中微生物の VOC 分解に関与する遺伝子の検出を試みた。第 2 帯水層では H21-7の地下水が 12 検体を各検体 25 Primer Set で検査したうち 69 回陽性となり最も多く検出された。特に NAH 、 TBMD 、 TMOA 、 bphA は 1 年間常に検出された。次いで B7-2 の 51 回、 22-17-2 の 45 回であった。第 3 帯水層では、オ-2が 18 回と最も多かったものの、汚染前の 12-10 でも 14 回と、第二帯水層に比べて、差は小さかった。嫌気的な VOC の分解に関連するといわれる tceA 、 vcrA 、 bvcA 遺伝子は、第 2 帯水層のH21-7、22-17-2 、M-2から検出され、特に bvcA 遺伝子は、 22-17-2 の地下水からのみ検出された。Primer set別では、 TBMD が全100検体のうち 90 回検出され、次いで bphA の 87 回、 TMOA の 77 回であった。ALK1、ALK2、ALK3、 BAF 、BPH1、BPH2、 RMO 、RDEG、 PHE 、TODC、 CDO 、TBUE、TODE、XYLAは、いずれの検体からも検出されなかった（表3.3.19 ）。 第 2 帯水層において、汚染前及び汚染地点から離れた地点で検出頻度が低く、汚染地点及びその直後の検出頻度が高かったことから、 PCR 法による VOC 分解関連遺伝子の検出が、既知の VOC 分解遺伝子に限られるものの、モニタリング手法として有用であると考えられた。標的とする検出遺伝子を精査し、全てを Real Time PCR で定量化することができれば、さらに詳細な変化も把握することができると思われる。

表 3.3.19 地下水中の VOC 分解に関与する遺伝子の検出

	検体数	tceA	vcrA	bvcA	NAH	TOD	TBMD	TMOA	TOL	bphA	XYLE1	XYLE2	検出数
22-11-2	12				2		11	11		11		1	36
H21-7	12	7	9		12	2	12	12	1	12		2	69
22-17-2	12	10	11	3	4	1	8	2		5		1	45
B7-2	12				12	2	12	9	1	12		3	51
22-1-2	12				4	2	12	10		12			40
M-2	12	1	1		2	1	10	8	1	9			33
12-10	4					1	3	4		4		2	14
オ-2	4				2		3	3		3			11
A6-2	4				2		4	3		4			13
22-3-3	4						4	4		4		2	14
B2-2	4						4	4		4	1	1	14
F	4				2	2	3	2		2			11
22-16-3	4						4	4		4		1	13

ALK1, ALK2, ALK3, BAF, BPH1, BPH2, RMO, RDEG, PHE, TODC, CDO, TBUE, TODE XYLAは全て検出限界以下

【参考文献】

1) 石井一英、古市徹、今井紀和、和田卓也；廃棄物起因の土壌・地下水汚染現場への数値シミュレーションと比抵抗法の適用，廃棄物学会論文誌 ,Vol.13,(2002)No.5,279-288
2) IFO微生物学概論；（株）培風館、(2010)
3) Nohynek, L.J.,et al., Int.J.Syst.Bacteriol.,(1996)46,1042-1055
4) Fredrickson,et al.,Appl.Environ.Microbiol.,(1991)57,796-803
5) John D.Coates,et al.,Int.J.Syst.Bacteriol.,(1999)49,1615-1622
6) Bergey's Manual of Systematic Bacteriology(Second Edition), Springer
7) Yuji Sekiguchi, et al., Int.J.Syst. & Evolut. Microbiol.,(2003)53,1843-1851

8) Andreas Stolz, et al., Int.J.Syst. & Evolut. Microbiol.,(2000)50,35-41
9) Nina Springer, et al., Int.J.Syst.Bacteriol.,(1998)48,953-956
10) Michael Fahrbach, et al., Int.J.Syst. & Evolut. Microbiol.,(2006)56,1547-1552
11) A.Willems,et al., Int. J. Syst. Bacteriol.,(1990)40,384-394
12) Adewale J. Lambo, et al., Journal of Basic Microbiology,(2006)46,Issue2,94-107
13) 土壌環境センター技術ニュース　No.12 2006.12
14) 東京都産業技術研究センター研究報告，第 4 号，(2009)
15) Bill W. Bogan, et al.,　Int.J.Syst. & Evolut. Microbiol.,(2003)53,1389-1395
16) Norberto J.Palleroni, et al.,　Int.J.Syst. & Evolut. Microbiol.,(2004)54,1203-1207

3.3.4 微生物評価法研究の結論

廃棄物の不法投棄に起因する VOC 汚染サイト周辺の低濃度汚染残留地の環境修復を進めるにあたり、現場地下水に存在する VOC 分解微生物による汚染物質の分解能力を環境修復に取り入れた MNA を現場適用するために、微生物分解の確認と分解微生物の単離を行うとともに、菌叢モニタリングにより分解菌の存在の有無を確認する方法について検討を行った。また、DGGE による菌叢確認と VOC 分解遺伝子の探索による分解能の確認方法についても検討を行った。さらに、廃棄物による汚染現場等では、法律で規制されていない化学物質による汚染も懸念されることから、それらの物質をこれまでの理化学的測定によるアプローチではなく、生物影響を評価する方法により、汚染物質の生物影響性を総合的に評価する方法の開発を試みた。

結論は以下のとおりである。

(1) VOC 汚染の残留する地下水に、さらに汚染物質を添加して微生物分解性試験を実施し、分解能の有無について確認し、分解が見られた地下水の菌叢解析を実施することにより、VOC 分解に関与した菌を特定することが可能である。

(2) VOC 分解遺伝子の探索によっても、VOC 分解能の有無を評価することが可能であるが、本研究により、単離した分解菌株に、既報の分解遺伝子を有しない株も存在することが明らかとなったことから、分解遺伝子の探索と菌叢解析 species level での分解菌の検索とを併せて実施することにより、VOC の分解能についてより正確に評価することが可能である。

(3) クローンライブラリー法により菌叢を菌種名からモニタリングすることにより、汚染が残留する地下環境中に存在する微生物名から物質循環に関する多くの情報を得ることができ、地下環境の状況を生物の観点から評価することが可能となる。本研究対象地の汚染残留が高い地点(22-17-2)では、嫌気状態で有機塩素化合物を分解できる細菌が存在しており、その周辺(H21-7,B7-2)の好気状態が保たれている地点では、ベンゼン、トルエン及びジクロロメタンが分解されていることが明らかとなった。また、さらに離れた地点(22-1-2)では鉄分の多い地下水の存在が予測され、最下流の観測地点(M-2)では、概ね浄化は終了段階にあるが、汚染の無い菌叢とは僅かに相違した菌叢を示すことから、生物影響のある化学物質の残留が予測された。

(4) 本研究により、地下水中の菌叢は、地下水の化学的性状の違いを反映することが確認され、菌叢を調べることにより、汚染地下水の総合的な生物影響性を評価することができる新たな指標となることが明らかとなった。検出された菌名から汚染程度と地下物質循環について情報を得ることが可能であり、汚染程度の判別も可能と考えられた。さらに、genus level で主成分解析し、汚染の無い地点の菌叢と比較することにより、汚染程度を数値化することができる新たな評価方法の可能性を示すことができた。

汚染地下水の汚染残留程度を生物影響性から総合的に評価可能なこの新規な方法について、今後は、同一地点での菌叢調査を継続することで、これらのモニタリング手法の精度向上、現場適

用性が確認され、新たなモニタリング手法の確立と実用例が示されるものと考えられる。この菌叢調査の手法は、環境修復地の安定化程度を、現場に生存する微生物調査により確認する方法であることから、今後のさらなる調査の継続により、情報を集積することが重要と考えられるが、そのことにより、多くの環境修復サイトに適用できる有用な手法に発展するものと考えられる。

【第Ⅳ編　研究総括】

4.1　研究内容

本研究では、廃棄物を全量撤去しない場合の環境修復システムとして、第Ⅱ編 3 節に示したとおり、汚染地の調査・解析、対策、進行管理の過程を経て汚染修復の目標値達成に至る新たな提案を行った。

この新たに提案したシステムの実施には、「調査・解析」、「対策」、「進行管理」の各段階で、既存技術が必要とされるレベルに達しておらず、システムの運用に新たに必要な技術として、次の①から③に示す課題が抽出された。

① 簡易迅速かつ安価な VOC 残存量調査技術の開発（MIP）

② VOC、重金属、油類の複合汚染廃棄物のオンサイト加熱処理法の開発

③ 微生物による不法投棄地の安定化評価法の確立

これらの新たな技術が必要となった経緯については第 I 編に示した通りであるが、平成 10 年から調査を実施し、全量撤去を行わない方針で環境修復を実施している三重県桑名市五反田の汚染サイトを対象として、平成 22 年度及び平成 23 年度の 2 カ年にかけ、新たな技術の開発や知見の集積により、それらの課題解決のための研究を行った。

4.2　技術開発の成果

提案した環境修復システムで、技術開発が必要とされる各要素につき、必要な開発レベルを設定し研究を進めた。

それらレベル設定は第Ⅱ編 4 章に述べた通りである。

1)　簡易迅速かつ安価な VOC 残存量調査技術の開発 (MIP-CPT システム)

廃棄物不法投棄現場は、廃棄物が無秩序に埋め立て処分されているため、廃棄物の種類や含まれる有害物質濃度は不均一である。環境修復を実施するためには、汚染状況を詳細に把握する必要があるが、従来のボーリングによる試料採取・化学分析による調査では、経済性や、結果を得るまでの時間に課題があった。既存技術である CPT（コーン貫入試験）手法を活用し、オンサイトで不法投棄現場の地中の廃棄物及び土壌中の VOC を簡易、迅速で安価に測定する手法を開発することを目的とし開発を行った。

MIP-CPT システムにおいて廃棄物層及び土壌中 VOC 環境基準項目物質の一斉分析のため、携帯型キャピラリーカラムを装着したガスクロマトグラム検出器を利用し、採取ガスを各成分に分離・定量する方法を採用し、試験を行った。本法では、ガス採取部のヒーターで加熱気化され、コーンのメンブレン部から浸透した VOC ガスが、分析機器までのキャリアガスライン中で凝縮や吸着を起こすなどの課題も見られたが、キャリアガスラインの材質をテフロン管からステンレス管に変更し、ライン全体を 100℃で加熱保温する技術開発等を行うことにより、新たな MIP-CPT システムを構築した。

現地での公定法との比較試験により、新 MIP-CPT システムでは、公定法と同等の感度で VOC 成分毎に土壌汚染の原因物質を特定することが可能となり、土壌汚染の深度分布状況をリアルタイムで迅速に把握することが可能となった。

新 MIP-CPT ではガス分析のタイミングにより、検出される濃度に変動が生じる課題も残されたが、調査地点の深度方向に連続的な汚染状況を把握することができ、公定法よりも短時間で VOC の種類と相対濃度レベルと高濃度汚染廃棄物の分布も把握することができる。また、この機能により、汚染サイトの修復効果（汚染レベルの低減効果）の経時変化も捕らえることができるものと考えられ、目標とするレベルに達する汚染地の調査技術が開発できた。

2) VOC、重金属、油類の複合汚染土壌のオンサイト加熱処理法の開発

既存の VOC 汚染土壌浄化工法は、石灰混合攪拌工法（ホットソイル工法）やフェントン法、過硫酸塩等の酸化剤添加による分解法が開発されている。しかし、これら技術を不法投棄現場に適用した場合、pH の変化による金属の溶出や腐植質等有機物の混在による分解阻害、油類による VOC の除去阻害により、目標したレベルまでの浄化が達成できなかった。そのため、当該現場の土壌等特性を踏まえた新たな浄化技術として、熱風送風機能等を付加した回転式混合破砕機（ツイスター）と加温回転ドラムを用いたオンサイト浄化システムの構築を目的に開発を行った。

試験は、法規制されている VOC としてテトラクロロエチレン(bp=121℃)とキシレン(bp=144℃)を添加した模擬土壌を作成し、室内に設置した浄化システムで浄化実験を繰り返すことで、加熱方法、運転条件などの検討・改良を重ね、現場利用可能なシステムの構築を図った。

模擬土壌には浄化が困難と考えられる粘性土も想定にいれた、砂質土と粘性土で試験を行った。また、油類を含む複合汚染土壌への適用検討のため、A 重油を添加した条件でも試験を行った。運転条件においては、添加した VOC の除去には処理土壌を 160℃にまで加温することが必要であることが判ったため、当初使用していたしていたジェットヒータでは熱効率が悪く土壌温度が効率よく 160℃まで加温できないという課題もあったため、熱効率の良い熱風炉をシステムに使用するなどの改良を加え、新たな浄化システムの構築を行った。

新たに構築された浄化システムでは、パイロット試験レベルで、砂質土については 300kg/hr、粘性土については 75kg/hr の処理速度で、VOC 汚染土壌を目標値まで浄化できた。さらに、油分含有量 2000mg/kg 程度の汚染土壌についても、同様の処理速度で油分含有量 100mg/kg 以下にまで低減可能であった。A 重油と VOC の混合汚染土壌では油分と VOC を同時に浄化できることも確認できた。その浄化システム稼働のコスト試算の結果、処理費用は約 26,000 円／t と算出され、処理後は土壌として現地に埋め戻しが可能となることも考えられることから、特別産業廃棄物としての処分費(35,000～40,000 円／t)に比べてコスト的にも実用可能な範囲であると考えられた。本開発の実施により、新システムへの適用レベルを満たす新たな浄化システムが構築された。

3) 微生物による不法投棄地の安定化評価法の開発

当該不法投棄現場では、平成 13 年度からの揚水浄化の適用により、目標とした環境基準レベルまでの地下水浄化を達成した。しかし、一部の井戸では環境基準を超過する値も検出されており、このように汚染残留が低濃度となったサイトでの揚水浄化の継続は、費用対効果の面から合理的でなく、自然減衰による効果を活用した MNA を浄化手法とすることが適当と考えられる。そこで、MNA の適用要素として、当該現場地下水中の VOC 分解微生物の生息の有無、その特徴を調べることにより MNA の現場適用性の検討を行った。

また、廃棄物不法投棄現場では複合汚染が発生する事例が多く、地下水中には生物影響のある未規制の化学物質による環境汚染も懸念されている。これまでの、物理・化学的現象の観測だけでは、それら多くの化学物質の影響についての把握は困難であり、修復の程度、安定化の状況を総合的に把握するためには、生物影響を考慮した評価手法の開発が必要であった。そのため、汚染残留地下水中の生物の生息状況（微生物叢）を汚染の無い地点と比較することで、汚染残留による生物影響を把握し、総合的な安定化評価手法の開発を試みた。

室内試験では現場地下水中に存在する VOC 分解微生物の確認と単離を行い、現場地下水の菌叢モニタリングにより、その菌名から分解菌の存在を確認する方法について検討を行った。また、DGGE による菌叢調査と VOC 分解遺伝子の探索による分解能の確認方法についても検討した。

現場から採取した地下水に VOC を添加した培養試験で、その分解能について確認し、分解がみられた培養検液の菌叢解析から、分解に関与した菌を特定した。VOC 分解遺伝子の探索によっても、その分解能の有無を評価することが可能であるが、単離により得た分解微生物の試験で、分解遺伝子を有しない分解微生物も存在することが明らかとなったことから、分解遺伝子の探索と菌叢解析による species level での分解菌の検索とを併せて実施することで、VOC の分解能についてより正確に評価することが可能であると考えられた。

本試験の実施により、対象とした環境修復サイト周辺の低濃度汚染残留地では、ベンゼン、トルエン、ジクロロメタンが好気性条件で微生物分解されることが明らかとなった。菌叢調査と地下水の理化学分析の結果から投棄地周辺地下水は好気的な環境にあることが確認され、そのことにより、本研究の対象サイトでは微生物分解による減衰を取り入れた MNA が適用可能であると判断できた。

安定化評価法の検討では、クローンライブラリー法により明らかとなった菌名から、地下環境中に生息する微生物の物質循環に関する状況を把握することが可能であった。

本研究対象地の北側第 2 帯水層の汚染残留が高い地点(22-17-2)では、嫌気状態で有機塩素化合物を分解する微生物が確認され、また、その周辺(H21-7,B7-2)の好気状態が保たれている地点では、ベンゼン、トルエン及びジクロロメタンが分解されていると推測された。さらに離れた地点(22-1-2)では鉄分の多い地下水の流入が見られており、最下流の観測地点(M-2)では、概ね修復は終了段階にあるが、汚染の無い地点の菌叢とは相違した菌叢を示すことから、生物影響のある化学物質の残留が予測された。さらに、検出された各地点の菌叢を genus level で主成分解析し、汚染の無い地点の菌叢と比較することで、汚染程度を数値化することができる新たな評価指標を示すことができた。微生物評価法についても目標とする開発レベルを概ね達成することができた。

4.3　本研究の成果

本研究で実施した技術開発により、

①簡易迅速かつ安価な VOC 残存量調査技術の開発(MIP)

②VOC、重金属、油類の複合汚染廃棄物のオンサイト加熱処理法の開発

③微生物による不法投棄地の安定化評価法の確立

①～③のこれら 3 つの技術課題において、目標とした開発レベルに達する成果を得ることができた。

これら開発された新たな技術は、本研究で提案した「廃棄物を残置した場合の修復システム」の運用に必要であり、本研究の成果により、初めてこの新たな修復システムが広く現場で適用されるものと考えられる。

今回、研究の対象とした桑名市五反田事案を含め、三重県内にも対策が必要な大規模不法投棄事案が現在 14 件程度存在しており、また、国内各所に対策が必要な不法投棄汚染カ所は多数存在している。不法投棄の現状として国内の廃棄物不法投棄件数は年々減少傾向にあるが、これまで既に投棄された廃棄物の残置件数と残置量は平成 22 年末時点で 2610 件、17,816,521t であり、それらの対策が今後必要になると考えられる。特に、大規模な不法投棄事案の場合には、コスト面や除去汚染物の受入先の確保の面からも全量撤去を選択することは困難であり、現場に廃棄物を残置しながら、生活環境等の支障除去、あるいは支障の恐れの防止措置を行う手法が、今後の環境修復対策の主流になると予測される。

それに先駆け、本研究で提案した「廃棄物を残置したままの環境修復システム」は、調査・解析の実施から、そのデータに基づく高濃度汚染廃棄物の撤去・浄化処理、及び、汚染が低濃度に至った段階で環境基準項目以外の化学物質影響にも考慮したモニタリング方法に至るまでの一連の手法である。低コストで周辺再汚染リスクの低い、この新たなシステムは、モニタリング結果を示すことで、周辺住民に対して、残留する化学物質の生物影響性についての不安に答えることも可能であり、リスクコミュニケーションに基づく円滑な修復を推進することができるものと考えられる。

本研究により提案した環境修復システムは、今後、国内の多くの汚染サイトでの適用が期待されるものである。

【発表実績】

1) 巽 正志・吉岡 理・新家淳治・市岡高男・山崎美香・片山貴幸・棚瀬敦史・塚田 進・大熊和行（三重県保健環境研究所），不法投棄現場での VOC 汚染除去対策について，第 19 回環境化学討論会講演要旨集 202-203，(2010.6) 春日井市

2) 巽 正志[1)]・西田憲一[2)]・岩出義人[1)]・谷口初美[3)]・福田和正[3)]・古市 徹[4)]・石井一英[4)]・秋永克三[1)]・吉岡 理[1)]・大熊和行[1)]， VOC 汚染サイトの微生物を利用した環境修復方法の検討，第 21 回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集 555-556，(2010.11) 金沢市

1) 三重県保健環境研究所 ， 2) 三重県環境森林部 ， 3) 産業医科大学 ， 4) 北海道大学

3) 小幡博志[1)]・赤神元英[1)]・西田憲一[2)]・巽 正志[3)]・古市 徹[4)]・石井一英[4)]・坂本 篤[1)]，低温オンサイト加熱処理による浄化効果に関する基礎的研究，第 22 回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集 485-486，(2011.11)東京都

1)日本国土開発（株），2)三重県環境森林部， 3)三重県保健環境研究所，4)北海道大学

4) 青木健二[1)]・杉山勝彦[1)]・片山辰雄[1)]・西田憲一[2)] ・巽 正志[3)]・古市 徹[4)]・石井一英[4)], MIP-CPT 法を用いた深度別の VOCs 現地迅速成分分析法の開発，第 22 回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集 533-534，(2011.11)東京都

1)（株）環境総合テクノス，2)三重県環境森林部， 3)三重県保健環境研究所，4)北海道大学

5) 巽 正志・岩出義人・新家淳治・市岡高男・柘植 亮・片山貴幸・宇佐美 敦子・秋永克三・天野秀臣・吉岡 理・山口哲夫(三重県保健環境研究所)，VOC 汚染サイトの微 生物を利用した環境修復方法の検討，第 38 回環境保全・公害防止研究発表会講演要旨集 87-88，(2011.11) 青森市

6) 坂本 篤[1)]・小幡博志[1)]・赤神元英[1)]・西田憲一[2)]・巽 正志[3)]・古市 徹[4)]・石井一英[4)], 産業廃棄物の不法投棄サイトにおける低温オンサイト加熱処理による浄化手法の研究，第 33 回全国都市清掃研究・事例発表会講演論文集 273-275，(2012.1) 函館市

1)日本国土開発（株），2)三重県環境森林部， 3)三重県保健環境研究所，4)北海道大学

7) 巽 正志[1)]・岩出義人[1)]・宇佐美 敦子[1)]・新家淳治[1)]・市岡高男[1)]・柘植 亮[1)]・片山貴幸[1)]・秋永克三[1)]・山口哲夫[1)]・西田憲一[2)]・谷口初美[3)]・福田和正[3)] ・古市 徹[4)]・石井一英[4]，揮発性有機化合物汚染が残留する環境修復サイトでの細菌叢モニタリングの有用性検討，第 46 回日本水環境学会年会講演集 188，(2012.3)東京都

1)三重県保健環境研究所，2)三重県環境森林部， 3)産業医科大学，4)北海道大学大学院

8) 宇佐美 敦子[1)]・巽 正志[1)]・岩出義人[1)]・秋永克三[1)]・山口哲夫[1)]・西田憲一[2)]・谷口初美[3)]・福田和正[3)] ・古市 徹[4)]・石井一英[4)]，環境修復地地下水中の微生物による揮発性有機化合物分解の力検討，第 46 回日本水環境学会年会講演集 571，(2012.3) 東京都

1)三重県保健環境研究所，2)三重県環境森林部， 3)産業医科大学，4)北海道大学大学院

9) 宇佐美 敦子[1)]・巽 正志[1)]・岩出義人[1)]・秋永克三[1)]・山口哲夫[1)]・西田憲一[2)]，環境修復地地下水中の微生物による揮発性有機化合物分解の力検討，第 46 回日本水環境学会併設全国環境研協議会研究集会 14-17，(2012.3)東京都

1)三重県保健環境研究所，2)三重県環境森林部

10) 岩出義人[1)]・巽 正志[1)]・福田和正[2)]・谷口初美[2)]，産業廃棄物不法投棄現場地下水の細菌学的調査，第 85 回日本細菌学会 日本細菌学会誌 vol.76 No.1(2012.1)93, (2012.3) 長崎市

1)三重県保健環境研究所， 2)産業医科大学