

(S3-04) 土壌・地下水汚染調査段階へのCSM手法の適用に関するケーススタディ

○柴田健幹<sup>1</sup>・和知剛<sup>1</sup>・長千佳<sup>1</sup>・有馬孝彦<sup>1</sup>・奥田信康<sup>1</sup>・  
CSM・モニタリングを活用した土壌・地下水汚染の管理手法検討部会<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>土壌環境センター

1. 背景および目的

土壌汚染状況調査の結果、汚染が認められた場合には掘削除去により土壌汚染の除去を求められることが多い。土壌汚染の措置として、原位置浄化や原位置封じ込め・遮水工封じ込めなどの適用も認められているが、依然、高い割合で掘削除去が採用されている。その理由として、基準超過した土壌を残置することへの抵抗感があることや、土地所有者が関係するステークホルダーに対してゼロリスクの説明が容易であることなどが挙げられる。しかし、土壌汚染対策の目的は、土壌中の汚染物質により人や環境への悪影響を生じさせないように土壌汚染による環境リスクを適切に管理することであり、原位置浄化や封じ込めなどの方法でもこれらの環境リスクを管理することは可能である。原位置浄化や封じ込めなどの措置が主流にならない背景として、措置の効果を適切に評価するための手法が確立されていないことが原因の一つと考えられる。

サイト概念モデル（Conceptual Site Model：以下、CSM）は、海外、特に欧米の土壌汚染対策では一般的に活用されている手法で、個別の各サイトで起こった問題の整理に有効であり、サイト評価の最初に検討されるものである。CSM構築の目的は、シンプルで簡潔な汚染サイトの状況表現、汚染源・汚染物質の移動経路・受容体の明確化、汚染物質の輸送制御プロセスの説明、及び利害関係者への汚染状況及び曝露に関する共通理解の促進である<sup>1)</sup>。我が国においてこのようなCSM構築の一般化を進めることで、土地所有者や対策実施者の目的をゼロリスクへの対応から、適切な環境リスクの管理を進めることへ移行する一助となると考えられる。

そこで、土壌・地下水汚染の調査段階のサイトに対してCSM手法を適用させたケーススタディにより、「シンプルで簡潔な汚染サイトの状況表現」及び「汚染源・経路・受容体の明確化及び汚染物質の輸送制御プロセスの説明」までを明確にすることを目的とした。

2. ケーススタディ

土壌・地下水汚染の調査段階のサイトに対してCSM手法を適用させたケーススタディを実施した。本ケーススタディは汚染確認を契機としたライフサイクルCSMではなく、過去に対策を行ったサイトにおいて行ったモニタリングの結果、地下水における汚染物質濃度が上昇したことを契機とした事例を用いたものである。本ケーススタディのサイト概要を表1に示す。

表1 ケーススタディ サイト概要

業種	産業用機器
操業開始年	1950年代
操業状態	稼働中
地理的条件	工業地域で100m程の距離に海域がある。
敷地面積	約4,400m <sup>2</sup>
使用物質	トリクロロエチレン（脱脂工程）
主な作業内容	切削油を使った金属部分加工
調査の契機	自主調査・対策

2.1 汚染発見の経緯

2.1.1 汚染調査の契機

当該サイトは、1950年代に操業を開始した産業用機器の機械工場である。切削油を使った金属部品加工を

Case study on application of CSM method to soil and groundwater contamination investigation stage

Takemi Shibata<sup>1</sup>, Takeshi Wachi<sup>1</sup>, Chika Cho<sup>1</sup>, Takahiko Arima<sup>1</sup>, Nobuyasu Okuda<sup>1</sup> and Study group on application of conceptual site model and monitoring methods for soil remediation in Japan<sup>1</sup> (<sup>1</sup>GEPC)

連絡先：〒102-0083 東京都千代田区麹町4-5 KSビル3F (一社) 土壌環境センター

TEL 03-5215-5955 FAX 03-5215-5954 E-mail info@gepc.or.jp

主力商品としており、1980年代から脱脂工程においてトリクロロエチレンを使用してきた。

本工場は、最初に調査を実施した2002年当時は機械工場として操業しており、事故による有害物質の漏洩や工場の大規模改修等はなかった。しかしながら、土壌汚染対策法施行前である1998年の大手電機メーカーや2001年の大手自動車メーカーによる地下水汚染問題発覚したことで、業界団体からの通達により、自主的な土壌地下水汚染状況の調査及び業界団体への報告が求められた事案である。

### 2.1.2 土壌ガス及びボーリング調査

本工場では、業界団体の通達を受けて自主的な土壌地下水汚染状況調査を行うこととなり、敷地内の全域において土壌ガス調査、次いでボーリング調査を実施した。調査の結果、土壌ガス調査では有害物質の使用位置周辺にて最高濃度が1 volppmを超える高濃度域を確認した(図1)。土壌ガス濃度の最高濃度域においてボーリング調査(土壌及び地下水調査)を行い、トリクロロエチレンおよびシス-1,2-ジクロロエチレンを測定した。その結果を表2に示す。土壌からは表層付近のGL-0.5 m以深で土壌汚染が確認され、最高濃度はGL-4.0 mでトリクロロエチレンが0.2 mg/L、シス-1,2-ジクロロエチレンが1.1 mg/Lであった。地下水は、トリクロロエチレンが0.14 mg/L、シス-1,2-ジクロロエチレンが4.5 mg/Lであった。地下水位は、地表から深度3.0 m付近に存在することが分かった。

表2 土壌ガス及びボーリング調査結果概要

調査項目		結果	備考
土壌ガス調査	—	1 volppm 以上	
土壌調査	トリクロロエチレン	0.2 mg/L	最高濃度
	シス-1,2-ジクロロエチレン	1.1 mg/L	最高濃度
地下水	トリクロロエチレン	0.14 mg/L	最高濃度
	シス-1,2-ジクロロエチレン	4.5 mg/L	最高濃度

## 2.2 サイト周辺の水文情報等

### 2.2.1 周辺の地形

サイトは、大きな河川の河口付近に位置し、地盤の標高は約1 mでほぼ平坦な地形をなす。周辺の河川は、概ね工場建屋から海側へ向かって流れている。なお、当該地は、海を人工的に埋め立てた土地ではない。

### 2.2.2 水理地質情報

ボーリング調査により判明した汚染源エリアのMW-1(図1参照)における地質状況は表3のとおりである。

表3 地質及び水理地質概要

深度	地質概要	水理地質
地表～深度1.7 m 付近	盛土 (礫混じり砂～シルト混じり砂)	不飽和帯
深度1.7 m～2.0 m 付近	シルト混じり砂	不飽和帯
深度2.0 m～7.0 m 付近	礫混じり砂	地下水位2.7 m 付近、第1帯水層(2.7 m～)
深度7.5 m～10.5 m 付近	シルト質粘土	第1帯水層(～7.5 m)

### 2.2.3 地下水流向調査

長方形の形状をした敷地内の四隅においてボーリング調査を実施し、地下水流向の把握を行うため、まず設置した地下水観測井戸を用いて地下水位標高を測定し、地下水位コンターから地下水流向を評価した。MW-1で確認されたトリクロロエチレン等による土壌・地下水汚染についても同様に、拡散方向を把握する目的で、上記のボーリング孔において、汚染の有無による拡散を把握するとともに、地下水の流向調査を実施した。調査の結果、上記により地下水位標高コンターを作成した結果、地下水は敷地の南西から北東方向もしくは西南西から東北東方向に流れていることが分かった(図1)。なお、土壌・地下水ともに敷地内の四隅においてトリクロロエチレン等は検出されず、汚染の拡散は認められなかった。

## 2.3 汚染分布

自主調査により土壌・地下水汚染が発覚し、追加調査により汚染分布の概略を把握した。

### 2.3.1 地下水下流方向への拡散状況の調査結果

汚染源と想定される MW-1 から概ね地下水流動方向の下流に位置する MW-2 および敷地境界の MW-3 においてボーリング調査を実施した結果を表 4 に示す。

調査の結果、MW-2 においては表層付近から GL-6.0 m までは土壌汚染は確認されず、GL-6.5~7.0m において、シス-1,2-ジクロロエチレンが 0.016~0.069 mg/L が確認された。工場で使用していたトリクロロエチレンの土壌汚染は、検出されなかった。調査後に観測井戸を設置し地下水を分析した結果、地下水ではシス-1,2-ジクロロエチレンが 15 mg/L、トリクロロエチレンは 0.02 mg/L が確認された。

MW-3 では、トリクロロエチレンおよびシス-1,2-ジクロロエチレンの土壌汚染は検出されなかった。しかし、MW-3 の地下水では、トリクロロエチレンは 0.06 mg/L、シス-1,2-ジクロロエチレンは 0.08 mg/L が確認された。

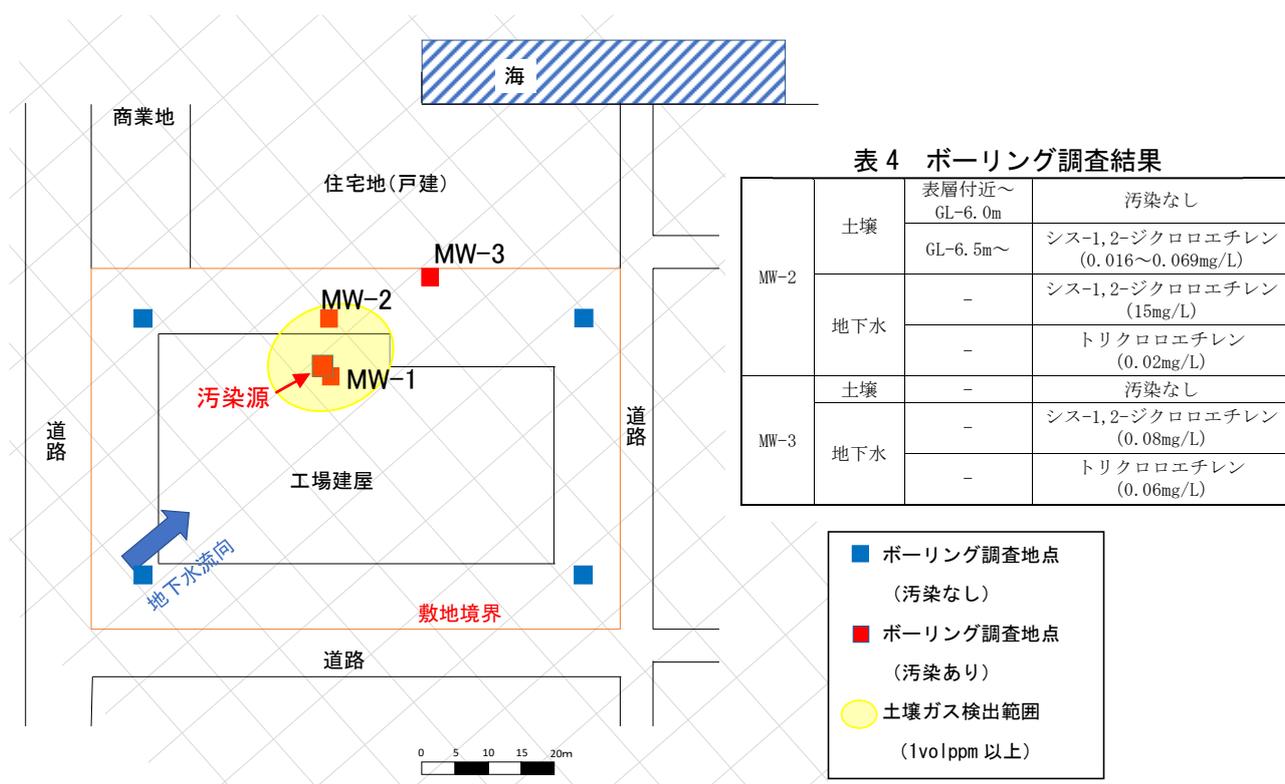


図 1 土壌ガス及びボーリングサイト地下水流向調査結果

## 3. 汚染源及び拡散エリアの特定

### 3.1 汚染源エリア

本ケースでは、土壌ガス調査により汚染範囲の大きめに把握及び対象となる有害物質を特定し、その後ボーリング調査を実施することで汚染源と汚染濃度の特定を試みた。ただし、土壌汚染対策法で定められる方法では、10 m×10 m の単位区画に 1 地点、調査深度は 1 m 毎となるため、その中間においては汚染源エリアの詳細な特定が困難となる可能性がある。そのため、詳細に汚染源エリアを特定するために土壌ガス調査により高濃度であった地点を中心として、8 箇所 MIP (Membrane Interface Probe) によるダイレクトセンシングを行うこととした。

土壌ガス調査の地点は、ボーリング調査時の地下水調査の結果から地下水汚染が生じている可能性があると考えられる範囲内の単位区画の中心点とした。土壌ガス調査により汚染が確認された 4 地点、及び汚染源と想定される MW-1 のある 10 m 格子の四隅をダイレクトセンシングの調査地点に設定し (図 2)、深度方向に連続して VOC 濃度を測定した。ダイレクトセンシングの結果から汚染源エリアを特定した上で、汚染源エリアの中心地点でボーリング調査を実施し、特定有害物質毎の汚染濃度を測定した。この際、試料採取の対象は深さ 1 m 毎及びダイレクトセンシングにより高濃度と判断された深度とした。

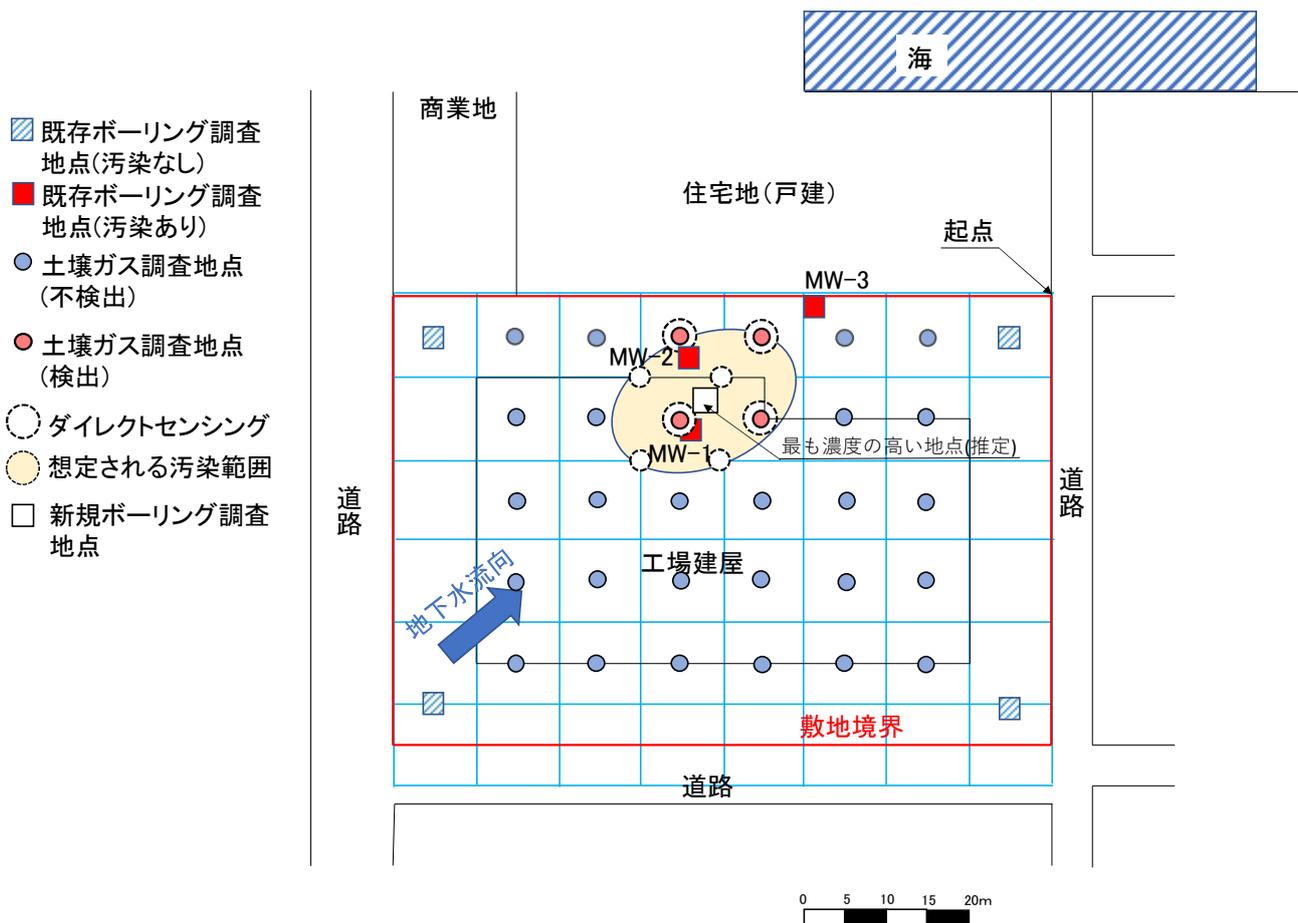


図2 調査地点

### 3.2 地下水汚染の範囲

3.1により汚染源は特定できたが、汚染源及び地下水汚染への暴露の可能性を評価するにあたり、汚染範囲を特定し把握する必要がある。汚染源については前述の3.1に示すとおりであるが、地下水汚染の範囲については各汚染物質の化学的特性及び地下水の状況（地下水流向）に影響される。本ケーススタディでは、段階的に新たな観測井戸を設置することで地下水汚染の範囲を確定する手順を検討した。具体的には、既存調査結果より新規観測井戸の場所を決定し、新設井戸でのモニタリング結果を基に、さらに絞り込みのための観測井戸の追加とモニタリングを繰り返し、最終的に3段階の追加観測井戸設置により、地下水汚染の範囲を確定し、地下水汚染の範囲特定までの調査方法について考察した。

#### 3.2.1 第一段階

地下水汚染の範囲特定のための第一段階として、ライン状地下水調査法に基づき観測井戸を設定した（図4）。汚染源脇のMW-1を中心に地下水流向に対して垂直方向に概ね10m間隔で4箇所（a~d）、MW-1から地下水流向で上下流に概ね10m間隔で1箇所ずつ計2箇所（e, f）、MW-1の下流に設定した1箇所から地下水流向に対して垂直に概ね10m間隔で2箇所（g, h）、下流側建屋脇に1箇所（i）、汚染なしと判断された既設MWよりさらに海側の敷地境界に1箇所（j）設定した。モニタリングは2か月連続で2回実施し、地下水基準に基づく監視を行った。

#### 3.2.2 第二段階

第一段階で設定した観測井戸での地下水調査の結果、bとfの計2地点について汚染が確認された。この結果より、第1段階においては、地下水流向に対して直交する方向への汚染源からの広がり状況について概ね把握できた。

第二段階では、地下水流向に対して直交する方向への汚染源からの広がりについての詳細な把握した。汚染源から地下水流向で下流側の地下水汚染の範囲を把握するため、8地点（k,l,m,n,o,p,q,r）の観測井戸を概ね10mの間隔で設置した。モニタリングは2か月連続で2回実施し、地下水基準に基づく監視を行った。

### 3.2.3 第三段階

第二段階で設定した観測井戸での地下水調査の結果、l, n, o, q 及び k の 5 地点で汚染が確認された。汚染源から地下水流向の下流側及び汚染源から上流側の隣接地点では概ね汚染が広がっていることが判明した。一方、第三段階までに設定した観測井戸の結果より、敷地境界の観測井戸 6 地点 (a, g, p, MW-3, r 及び j) のうち MW-3 を除く 5 箇所では汚染は確認されなかった。

第三段階では、汚染源及び MW-1 周辺に観測井戸 (s, t, u) を設定した。汚染源及び MW-1 周辺の地下水汚染の範囲を詳細に把握するため、設置間隔は概ね 5 m とした。モニタリングは 2 か月連続で 2 回実施し、地下水基準に基づく監視を行った。

### 3.2.4 地下水汚染の範囲確定

第一段階から第三段階の観測井戸の設定により、汚染源では汚染物質の広がりが確認でき、上流では地下水汚染の分布がほとんど確認されなかった。汚染物質は汚染源から地下水流向の下流側に広がっており、概ね工場の敷地境界まで広がっていることが確認された (図 4)。

第三段階までの詳細調査の結果、汚染源から地下水流向に沿った土壌・地下水汚染分布の断面を表すと、図 3 のとおりとなった。当初、地下水基準不適合範囲は、地下水位以深の第 1 帯水層全体に広がっていると考えられたが、第三段階までの詳細調査の結果、MW-3 付近では土壌汚染は認められず、地下水汚染の分布境界付近であると推定された。なお、汚染源の上流側には地下水汚染がほとんど広がっていないことも確認された。

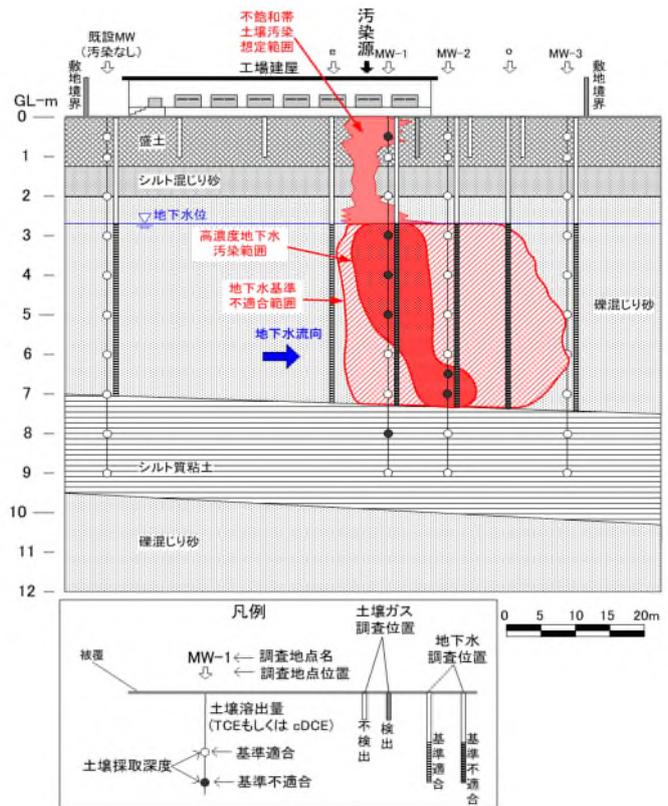


図 3 土壌・地下水汚染分布の断面図

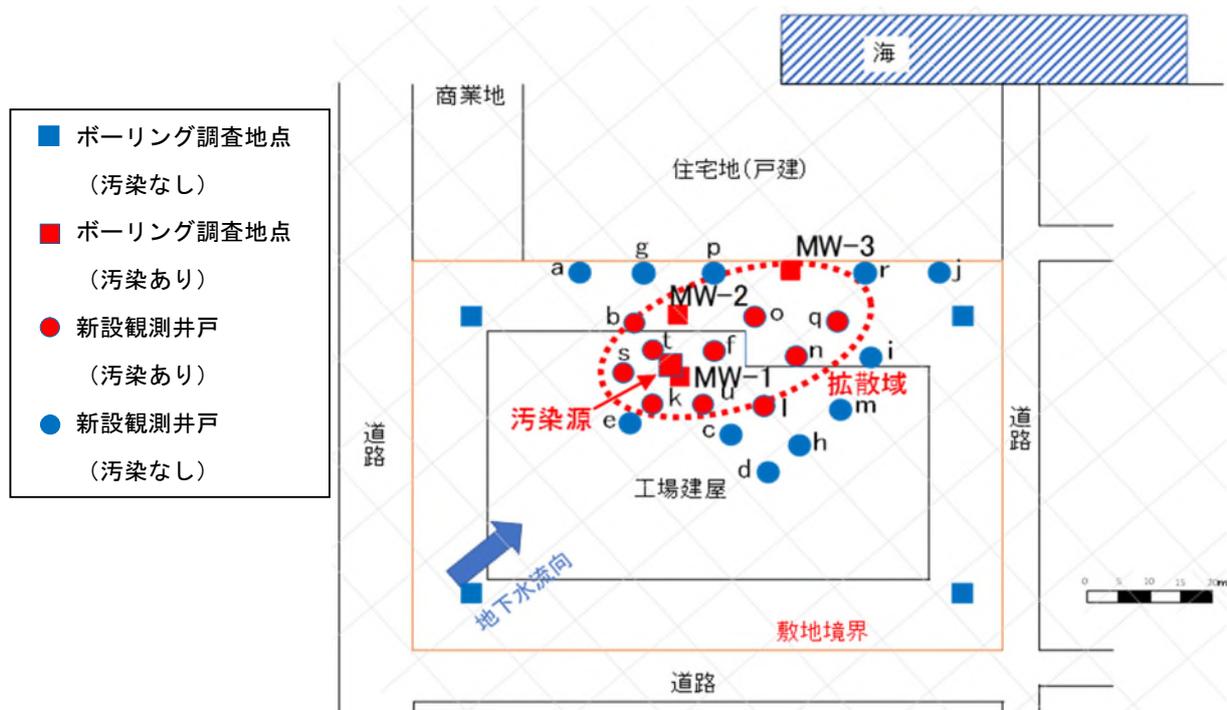


図 4 地下水汚染の範囲確定状況

#### 4. 対策の方向性

本サイトでは、工場が稼働中であることから掘削除去や遮水工封じ込めなどの措置は取りにくく、過去には薬液注入により浄化対策を行っている。今回、段階的な調査をふまえた CSM の設定により汚染源及び汚染の拡散エリアにおける汚染の分布状況が明確になったが、この結果を用いてどういった対策を行うかの検討が必要である。対策の検討を行うために、上記の汚染の状況を踏まえた今後の対応の方向性を以下に記す。

- ① 最優先の管理事項としては、敷地境界での監視地点 MW-3 における 4 回/年の頻度での地下水モニタリングである。その際、年間平均値の地下水基準超過状況をもとに、追加対策の要否を判断する。
- ② 地下水流向に沿って汚染源～MW-3 の地点（例えば、観測井戸 MW-2 あるいは o）においても地下水モニタリングを実施して、MW-3 における水質の挙動を推定できる体制を確保する。
- ③ 図 4 に示す観測井戸のネットワークを構築したうえで地下水モニタリングを実施し、地下水汚染分布の挙動の把握に努める。②及びこの結果を総合的に評価し、必要に応じて早期対策の検討を行う。

なお、本サイトでは、近傍に海が広がる立地であることから、地下水には海水が混入している可能性が高く汚染の下流側にある住宅地において地下水を飲用や生活用水として利用している可能性は少ない。一方で、近隣に住宅地があるといった立地から、地域住民とのリスクコミュニケーションは必要不可欠である。

#### 5. CSM 構築に向けての今後の課題

本ケーススタディにおいて概ね CSM 構築の進め方を明確にすることができた。一方、調査段階のケーススタディであることから、利害関係者への共通理解の促進まで言及していない。一方、先にも述べたとおり CSM は「シンプルで簡潔な汚染サイトの状況表現、汚染源・経路・受容体の明確化及び汚染物質の輸送制御プロセスの説明、利害関係者への汚染状況及び曝露に関する共通理解の促進」が必要である。そのため、今後は調査から対策へ至る過程において利害関係者を含めたケーススタディが必要になると考えられる。

また、各サイトに応じた CSM 構築についてサイト毎にケーススタディを作成することは時間的に合理的ではないため、相当数のケーススタディ構築により得られた知見をもとに、CSM 構築のために必須となる内容をリストアップしマニュアル化しておく必要がある。更に、今後 CSM 構築を行っていく中で、土壤汚染対策法に準拠し調査対策を行うことで対応できるサイトと CSM 構築により対応していくサイトを分けることで合理化及び効率化が図れると考えられる。そのため、CSM 構築が必要なサイトについての整備を行っていく必要がある。

#### 【参考文献】

- 1) ASTM E1689-95(2014) : Standard Guide for Developing Conceptual Site Models for Contaminated Sites ,<https://www.astm.org/Standards/E1689.htm>
- 2) ITRC (Interstate Technology & Regulatory Council).(2011): Integrated DNAPL Site Strategy.IDSS-1. Washington, D.C.: Interstate Technology & Regulatory Council, Integrated DNAPL Site Strategy Team. [www.itrcweb.org](http://www.itrcweb.org), pp.20-26.