

(S6-13) オゾンマイクロバブルによる地下水浄化工法の適用事例(その2)

○長谷川展男・小山真樹・高木一成  
地盤環境エンジニアリング(株)

1. はじめに

筆者らは、オゾンマイクロバブル(以下 OMB という)による地下水浄化工法を、揮発性有機化合物による汚染サイト、油類による汚染サイト、揮発性有機塩素化合物(以下 VOC という)・トルエン・キシレンによる複合汚染サイト等で実施した<sup>1)</sup>。本稿では、OMB による浄化が短期間で完了したサイトと、浄化を継続中のサイトの経過を示し OMB による浄化の効果について述べたい。

2. 浄化の原理

オゾンによる水処理は、水道水や食品の殺菌・消毒や工場廃水の脱色・脱臭などの目的で行われている。いずれもオゾンおよびオゾンが水中で自己分解する際に生成される OH ラジカルが、その強い酸化力で有機物(微生物や有害物質)を分解する効果を利用している<sup>2),3)</sup>。

オゾンによる地下水浄化は、この酸化力を利用して地下水中の VOC や油を二酸化炭素や水などに分解しようとするものである(図-1 参照)。

本工法では、マイクロバブルの特性とオゾンの酸化力に着目し、オゾンマイクロバブル化して地下水に添加している。マイクロバブルとは直径が概ね 50 μm 以下の微細な気泡のことであり、通常の気泡と比較して浮上速度が遅い、同体積の気泡(群)を比較した場合に径が小さくなるほど表面積が大きくなる、などの性質がある<sup>4)</sup>。したがって、地下水浄化に OMB を使用した場合、水中でのオゾンの滞留時間が長くなることで分解効果が持続し、かつ汚染物質とオゾンとの接触機会が増えて、効率的に分解することが可能になると考えられる。また、マイクロバブルが土粒子から汚染物質を剥離する効果や、マイクロバブルが地下水中で収縮・圧潰する際に気泡内部の圧力や温度が上昇し、これによる化学物質の分解効果があるとも言われている<sup>5)</sup>。

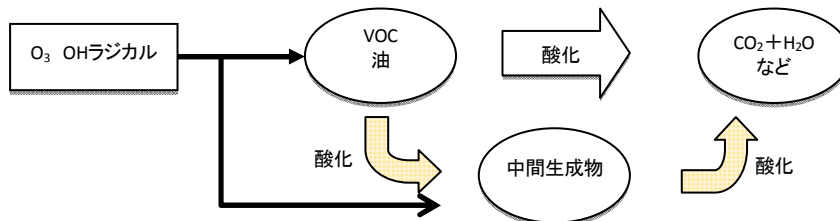


図-1 浄化原理の概要図

3. 浄化工法の概要

筆者らが採用した工法は、地中に直接 OMB を吹き込むのではなく、OMB 含有水を地下水中に注入する。OMB 含有水は原則として汚染源に設置した揚水井の地下水を用いて作る。これは、①汚染源で揚水することで汚染物質を回収するとともに拡散を防止する、②揚水した地下水中の汚染物質を地上の設備で OMB により浄化する、③浄化した地下水に OMB を添加して地盤に注入して地中の VOC を分解する、という三段階の浄化効果を期待している。

図-2 に浄化工法の概要図を示す。次章以降に施工事例の経過について記すが、実際に施工した際は揚水井 1 本、OMB 注入井を 6~12 本とし、注入井 1 本当たりの OMB 含有水の注入量は 1~2 L/min 程度としている。オゾン発生量は 20 g/h で、地下水の処理と OMB 含有水の作成に 4 L/min 程度のオゾンを使用している。

## 4. サイトでの施工事例

### 4.1 油類による汚染サイト

#### (1) サイトの概要

サイトは営業中のガソリンスタンドであり、既存の調査で地下水からベンゼンが環境基準を超過する濃度で検出された。調査およびモニタリングの結果、敷地中央部の B-1 ではベンゼンが最大 0.25 mg/L、敷地境界付近の B2-1 では 0.083 mg/L の濃度であった。大規模な漏油の記録はなく、観測井に油層等は認められないことから、汚染状況は比較的軽微と考えられた。揚水井はベンゼンの濃度が最も高かった B-1 近傍に設置し、ベンゼンが検出された観測井の周囲に OMB スパージング井を設置した。

#### (2) 浄化の経過

図-3 に各井戸のベンゼン濃度の推移を示す。B-1 および B-2 が敷地中央部、B2-1、B2-2 は敷地境界付近の観測井である。

汚染源の揚水井を掘削した直後に各井戸のベンゼン濃度を測定したところ、揚水井は 0.25 mg/L、B-1 は 0.16 mg/L、B2-2 は 0.021 mg/L であった。B-2 は不検出、B2-1 は 0.003 mg/L と、調査時に比べ濃度が低下していた。その後、本格的な浄化運転の開始前にオゾンの添加量や注入量を調整している間に、揚水井および B2-2 でもベンゼンは不検出となり、浄化を開始した際にベンゼンが基準を超過していたのは B-1 で 0.21 mg/L であった。なお、浄化開始 1 か月後のモニタリングで B-1 のベンゼン濃度は 0.006 mg/L と基準を満足した。

その後、浄化装置の運転を継続しながらモニタリングを行い、すべての井戸で基準を満足する状態が続いたことから、8 か月後に装置の運転を停止し、浄化確認のためのモニタリングに移行した。浄化確認のモニタリングを 1 年間(4 回)実施したが、ベンゼンが基準を超過した地点はなく、本サイトの浄化は完了したと判断した。

### 4.2 VOC による汚染サイト

#### (1) サイトの概要

サイトは機械工場の一角であり、テトラクロロエチレン (PCE) の使用履歴がある。既存の調査で地下水から、PCE、トリクロロエチレン(TCE)、および cis-1,2-ジクロロエチレン(cis-1,2-DCE)が環境基準を超える濃度で検出された。そのため、地下水浄化対策として水素供給材によるバイオレメディエーション法を実施してきた。

浄化対策により、PCE と TCE については環境基準前後まで低下したが、cis-1,2-DCE については 1 mg/L 前後の濃度で推移し、塩化ビニルモノマー(VC)も環境基準を超える濃度であることが判明した。このため、バイオレメディエーションでは cis-1,2-DCE や VC の分解に時間を要すると判断し、化学的な酸化力で VOC を分解する OMB による浄化工法に切り換えた。

#### (2) 地下水モニタリング結果

図-4 および図-5 に観測井と揚水井のモニタリング結果を示す。

特徴的なのは浄化開始後、cis-1,2-DCE および VC の濃度が観測井では低下傾向、揚水井ではほぼ横ばいなのに対して、PCE は上昇傾向にあることである。また、観測井では装置の運転を継続し各物質の濃度が低下傾向にある時、ポンプの不具合等で装置の運転が停止すると、再起動後のモニタリングで濃度の上昇が認められることである。この過程で、当初 cis-1,2-DCE 濃度の 10 分の 1 以下であった PCE 濃度が cis-1,2-DCE よりも高くなった。

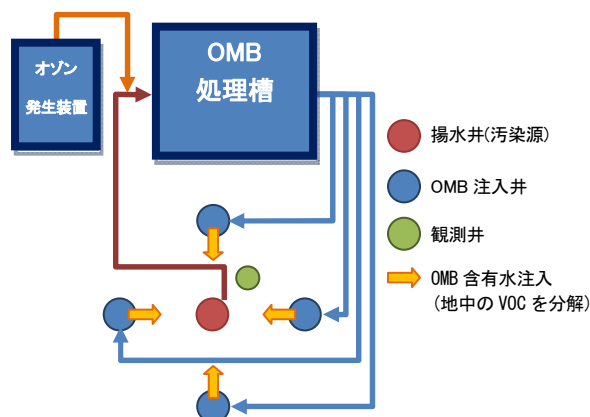


図-2 OMBによる浄化工法の概要図

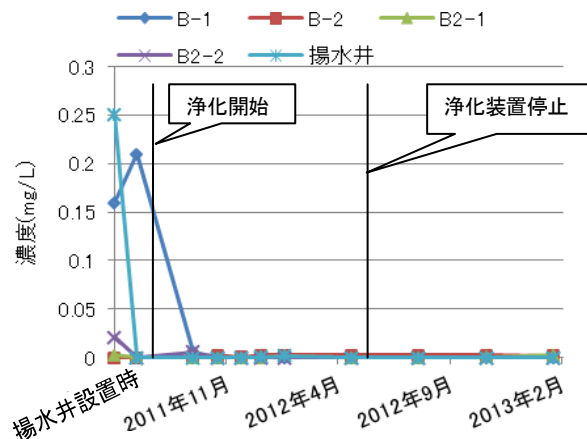


図-3 ベンゼン濃度の推移

なお、装置の停止・再起動を繰り返すたびにリバウンドの際の濃度の上昇幅は小さくなっていったが、2012年9月に装置が停止した際のリバウンドの上昇幅はこれまでよりも大きかった。このときの装置停止の原因は記録的な豪雨によりサイト一帯が冠水したためであり、これによる地下水位の一時的な上昇や装置の停止期間が長引いたこと等がリバウンドに影響を与えた可能性がある。

なお、再起動後に揚水井のPCEは大幅に低下したが、cis-1,2-DCEおよびVCの濃度は上昇する傾向にある。また、観測井ではPCEとcis-1,2-DCEの濃度が再び低下傾向を示したものの、PCEが0.84 mg/Lと、初期濃度よりも高い状態であることから、浄化装置の運転とモニタリングを継続している。

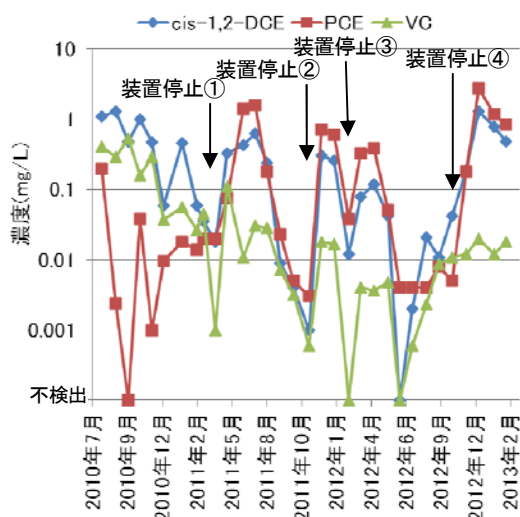


図-4 モニタリング結果 (観測井)

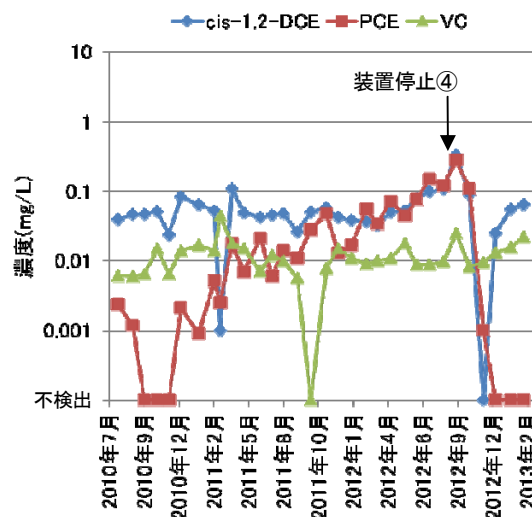


図-5 モニタリング結果 (揚水井)

## 5. 考察

本稿では OMB スパーキングによる浄化事例を2例示したが、先に紹介した油類による汚染サイトでは速やかに浄化が完了したのに対し、後に紹介した VOC による汚染サイトでは現在も浄化完了には至らず、浄化装置の運転を継続中である。

各サイトの特徴を表-1 に示すが、油類による汚染サイト A は、初期の汚染物質の濃度が VOC による汚染サイト B よりも低く、汚染の程度が軽微だったことに加え、油由来の汚染であることから深度分布が地下水表面付近の浅い範囲に限られていた。一方、サイト B では調査時の PCE 初期濃度が 7.5 mg/L と高く、PCE の比重が重いことから深度 10 m 付近まで浸透し、土壌でも基準を超過していた。また、地質を比較するとサイト A は砂であるが、サイト B は砂質シルトやシルト混じりの砂礫であり、細粒分の多いサイト B では、土粒子への汚染物質の吸着も多いと考えられる。

以上のような汚染物質の違いも含めた汚染状況の違いや、地質の違いがあり、比較的条件の良いサイト A では浄化完了までの時間が短かったと思われる。

表-1 各サイトの特徴

	サイト A (油類)	サイト B (VOC)
浄化速度	速い (浄化完了)	時間を要す (浄化継続中)
汚染状況	軽微 土壌分析ではベンゼン検出されず、油層はない 油由来であるため、地下水表面付近の比較的浅い範囲までに限られる	汚染の程度高い 地下水の PCE 初期濃度は 7.5 mg/L と高く、土壌でも基準を超過した 深度 10 m 付近まで PCE が浸透していることが確認されている
地質	砂	砂質シルト・シルト混じりの砂礫

なお、現在のところ浄化に至っていない VOC による汚染サイトであるが、対策当初は cis-1,2-DCE や VC などの分解生成物質の濃度が高かったが、OMB 含有水の注入により元の物質である PCE の濃度が上昇するという特徴が認められた。このことから、OMB 含有水による剥離効果により、以前の浄化工法では除去出来なかった土粒子に吸着した汚染物質を揚水によって回収する効率が促進しているといえる。

また、これまで装置の不具合によりやむを得ず生じていた装置の停止-再運転であるが、これにより再運転時の濃度上昇が認められたことから、水みちの形成などで浄化効率が低下した場合に、断続運転によって浄化効率を維持できるのでないかと考えられる。

したがって今後は、モニタリング結果をもとに装置停止-再運転の時期を選択的にコントロールすることで、シルトなどの細粒分が多く、土粒子に汚染物質が吸着しやすい、浄化の比較的困難なサイトでもより効果的に浄化促進が行えると考えている。

## 6. 参考文献

- 1)高木一成(2012): オゾンマイクロバブルによる地下水浄化工法の適用事例, 第18回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集, p297~300
- 2)日本オゾン協会(2009):オゾンハンドブック
- 3)海賀伸好(2008):オゾンと水処理
- 4)上山智嗣,宮本誠(2009):マイクロバブルの世界
- 5)高橋正好:マイクロバブルおよびナノバブルの基礎と工学的応用, 産業技術総合研究所 環境管理技術研究部門 水環境工学研究グループホームページ, <http://unit.aist.go.jp/emtech-ri/26env-fluid/pdf/takahashi.pdf>, (2011年閲覧)