鹿 島 技 術 研 究 所 年 報
第 51 号 2003 年 9 月 30 日

水平井戸を用いたエアースパージング工法の開発

Air Sparging with Horizontal Wells

小澤　一喜　　川端　淳一　　河合　達司
小林　弘明　　上沢　進 1)

要　約

エアースパージング工法は空気を注入する注入井と，注入した空気や揮発した VOC を吸引する吸引井から構成されている。本研究では，空気注入井を鉛直井とした場合，水平井とした場合のそれぞれについて現場実証試験を行い，水平井を注入井としたエアースパージング工法の浄化特性について検討した。定性的には水平井を注入井とした場合，鉛直井を注入井とする場合と比較して，ストレーナ面積を大きく取る事が可能となるので，空気注入量が増加し，浄化効果も高いと考えられる。しかし，井戸の設置コストは水平井の方が鉛直井より高いため，両者の費用対効果は汚染サイトの面積や深度に依存し，一概には決定できない。そこで，鉛直井，水平井のそれぞれを用いた場合の費用対効果を試算し，汚染サイトの条件と費用対効果の関係についても検討した。

目　次

Ⅰ．はじめに
Ⅱ．試験サイトの詳細と井戸仕様
Ⅲ．試験結果と考察
Ⅳ．水平井を用いたエアースパージング工法の費用対効果
Ⅴ．まとめと今後の予定

Ⅰ．はじめに

エアースパージング工法は帯水層中に空気を注入して VOC の剥離や揮発を促進し，併せて不飽和層中でガス吸引を行なう事により剥離・揮発した VOC を回収する土壌・地下水浄化工法である。VOC による土壌・地下水汚染の浄化工法として，同工法は国内外で用いられるようになっており，いくつかの実証例が報告されている[1)2)]。このうち，注入井に水平井を用いたエアースパージング工法については欧米においては実施例があるが，日本国内ではそれについての報告例はない。水平井を用いることにより同じ空気量を鉛直井から注入する場合と比較して平面的により広い範囲に注入することが可能となり，効率的な浄化効果が期待できる一方で，水平井の設置には，鉛直井よりも高額なコストを要するため，すべてのサイトにおいて一概に水平井が有利であるとは判断できない。本報告は原位置の隣り合うサイトで実施した鉛直井によるエアースパージング工法の結果と比較することにより水平井を用いたエアースパージング工法の注入特性，浄化特性，鉛直井を用いた場合との効果の比較などについて検証するものである。

Ⅱ．試験サイトの詳細と井戸の仕様

1．試験サイトの詳細

本試験サイトの土層構成は，Fig. 1 に示すように表層から埋土

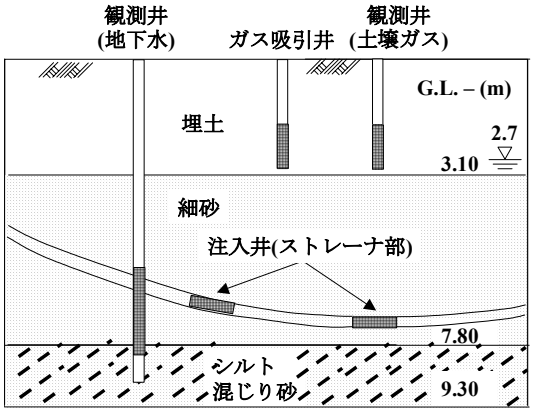

Fig.1　土層構成と各井戸の位置(鉛直分布)
(Cross section of Field Test Site)

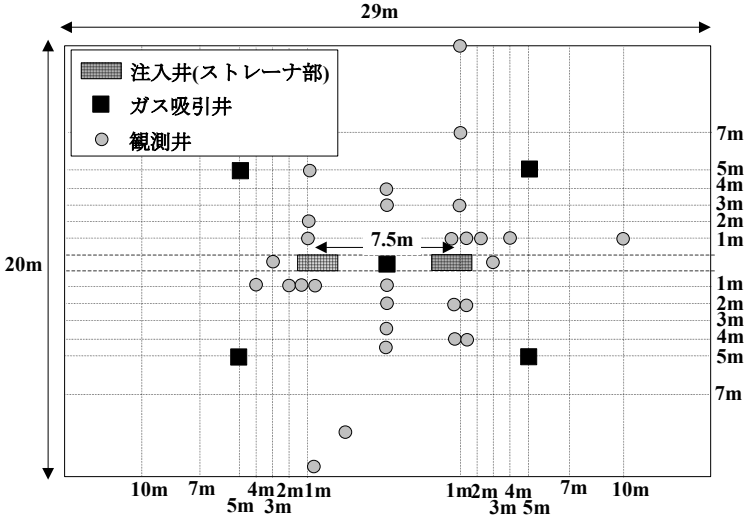

Fig.2　各井戸の位置(平面分布)
(Layout of Wells)

1）株式会社ケミカルグラウト

キーワード：VOC による地下水汚染，エアースパージング工法，鉛直井，水平井，影響範囲

(G.L.0～-3.1m)，細砂(G.L.-3.1～-7.8m)，シルト混じり砂(G.L.-7.8～-9.3m)となっており，地下水中にはベンゼンの存在が確認されている。帯水層(細砂層)の透水係数は 10^{-5}m/sec，地下水位は G.L.－2.7m となっている。また，地下水流速は極めて小さく，その季節変動なども非常に少ない。

空気注入井，土壌ガス吸引井，観測井(地下水位，土壌ガスなど)の平面分布は，Fig. 2 に示すとおりであり，注入井を取り囲むように設置された観測井によりエアースパージングによる不飽和帯の圧力上昇や地下水位の変動を測定することが可能である。また，Fig. 1 に示すように，注入井のストレーナは帯水層の下端に，地下水観測井のそれは帯水層全体に，ガス吸引井，ガス観測井のそれは不飽和層にそれぞれ設置されている。

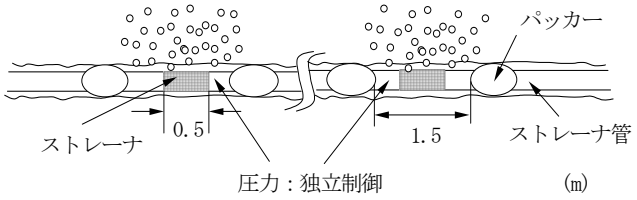

Fig.3　注入井のストレーナ部

(Strainer of Horizontal Well)

２．注入井の仕様

注入井は Fig. 1 に示すように深度 7.8m 付近にストレーナが設置されており，管径は 65mm，ストレーナ部の長さは 500mm となっている。管内に送り込まれた空気は，ストレーナ部から地盤中へ注入されるが，Fig. 3 に示すように２箇所のストレーナ部は両端に設けられたパッカーにより，管と地盤との間を空気が短絡して流れることを防止する構造となっている。この構造ではストレーナ部をはさむパッカー同士の距離が 1.5m となっていることから，地盤内ではこの部分が実質的なストレーナとして機能し，1.5m の区間から空気が注入される。また，２箇所のストレーナへの空気注入は別系統で行なうことから，注入圧力の独立制御が可能である。各ストレーナの注入圧を独立制御することにより，各ストレーナ付近の地盤状況（間隙率，含水率，透気性など）が著しく異なる場合においてもそれらに合わせた注入圧の設定が可能であるため，一方のストレーナ（周辺地盤透気性が高い）のみから空気が注入され，浄化効果が局所的なものとなるような事態を回避することができる。

Ⅲ．試験結果と考察

１．注入状況

Table.1 に鉛直井（ストレーナ位置:G.L.－7.5m）を用いた場合のエアースパージング [3]の運転条件（空気の注入により注入井付近の地盤が過度に撹乱されない最大の圧力と流量から決定）と，水平井

Table 1　運転条件

(Running Condition)

	注入圧力(kPa)	流量(L/min)
鉛直井戸	85	124
水平井戸 1	68	257
水平井戸 2	35	281

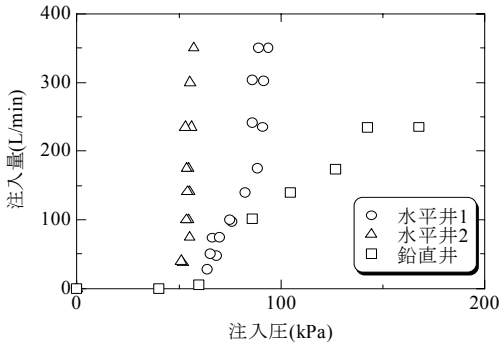

Fig.4　流量と注入圧の関係

(Relation between Injection Volume and Injection Pressure)

を用いた場合のそれとの比較を示す。水平井によるエアースパージングでは，鉛直井と同等あるいは，それ以下の注入圧であっても，注入量が５倍以上（２ヵ所の注入量の和）大きくなっていることが分かる。これは，注入圧と注入量の関係は，地盤への注入面積（ストレーナ面積）と地盤条件により異なるものの，水平井を用いることにより鉛直井を用いる場合と比較してより大きな注入量を低い注入圧で確保できることを意味している。Fig. 4 には原位置で実施した各井戸の試験注入の結果を示すが，この関係からも本試験サイトにおいては，注入井として水平井を用いることにより大きな注入量が確保できることが分かる。なお，鉛直井によるエアースパージング工法（注入井，吸引井が同地点に各１箇所，観測井はそれらを中心に同心円状に配置）は水平井によるそれを実施したサイトの隣接サイトにおいて時期をずらして実施されたものであり，両サイトの地盤条件や汚染状況はほぼ同等なものであると見なすことができる。以後，本報告の中で比較のために引用される鉛直井によるエアースパージング工法の結果はこの隣接サイトにおいて実施されたものを指す。

※表中，図中の水平井戸１は水平ボーリングの発進側のストレーナを示し，水平井戸２は水平ボーリングの到達側のストレーナを示す。両者は構造的には全く同等であるが，ストレーナ付近の地盤性状の相違により注入量と注入圧の関係が異なっていると考えられる。

２．影響範囲の比較

エアースパージング工法による地下水浄化工の詳細設計を行なう際には，同工法による浄化効果の影響範囲の決定が必要不可欠となる。しかし，この影響範囲は幾つかの概念によって定義することが可能であり，それぞれの定義と地下水の浄化効果との相関性は明確ではない。そこで本研究では，(１)地下水位の変化範囲，(２)溶存酸素(DO)濃度の変化範囲，(３)電気伝導度(EC)の変化範囲をそれぞれ計測することによりエアースパージングの影響範囲を定義し，浄化効果との関係について検討した。

（１）地下水位の変化範囲

地下水位は通常，自然状態においては地下水流の上流から下流へ向かうなだらかな勾配を有している。本サイトでは事前調査により

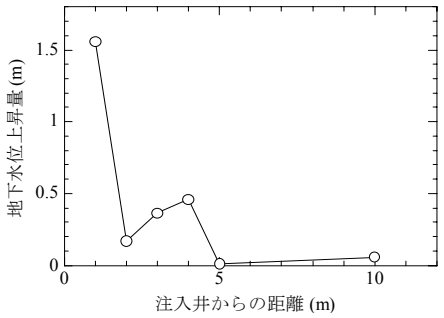

Fig.5　鉛直井を用いた場合の地下水位の変化範囲

(Distribution of Water Level on Air Sparging with Vertical Well)

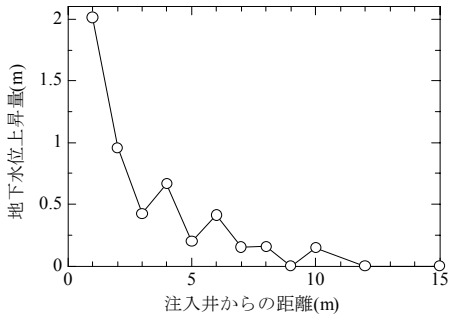

Fig.6　鉛直井を用いた場合の地下水位の変化範囲

(Distribution of Water Level on Air Sparging with Horizontal Well)

地下水流速が極めて小さいことが確認されており，地下水位は地表面に対してほぼ水平であると考えられる。このような帯水層に対してエアースパージングを実施することにより，注入井付近を中心として円錐形状に地下水位が上昇することが予想される。このことからエアースパージング実施時に各観測井で地下水位を測定し，地下水位の上昇範囲を明確にすることによりエアースパージングの影響範囲を推定することが可能となる。Fig. 5 に鉛直井を用いた場合，Fig. 6 に水平井を用いた場合，それぞれのエアースパージング実施時の地下水位と注入井からの距離との関係を示す。それらの関係はやや不連続的ではあるが，鉛直井を用いた場合では注入井から半径４m付近まで，水平井を用いた場合では注入井から半径 10m 付近まで地下水位の上昇が確認され，それらが地下水位の変化範囲として定義される影響範囲であることが分かる。

（２）DO 濃度の変化範囲

帯水層に対してエアースパージングを実施することにより注入された空気中の酸素が地下水中に溶解し，地下水の DO（溶存酸素）濃度が上昇する。そのため，エアースパージングによる気泡の到達範囲とその周辺においては DO 濃度の上昇が見込まれ，DO 濃度が上昇する範囲からエアースパージングによる影響範囲を推定することが可能となる。また，DO 濃度が 3 mg/L 以上となると地盤中の好気性微生物が活性化されることから[4]，DO 濃度の上昇範囲は好気性微生物による VOC の生物分解が期待できる範囲であると考えることもできる。Fig. 7 に鉛直井を用いた場合，Fig.8 に水平井を用いた場合のエアースパージング開始から１ヶ月後の DO 濃度の平面分布(深度 G.L.-4.5m)を示す。この時点で DO 濃度が 3 mg/L 程度（初期値は約 0mg/L）まで上昇している範囲を比較すると，鉛直井では半径約 7 m の同心円内，水平井では長軸約 16m，短軸約 10m の楕円範囲内となっていることが分かる。このことから DO 濃度の上昇範囲として定義される影響範囲は，水平井を用いることにより鉛直井を用いる場合と比較して，面積比にして約２倍ほど大きくなることが分かる。

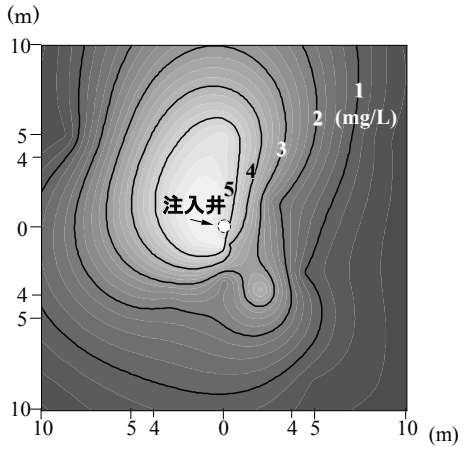

Fig.7　DO 濃度の平面分布(鉛直井)

(Distribution of Dissolved Oxygen on Air Sparging with Vertical Well)

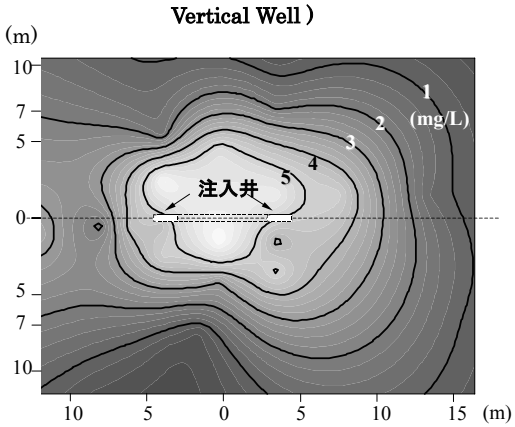

Fig.8　DO 濃度の平面分布(水平井)

(Distribution of Dissolved Oxygen on Air Sparging with Horizontal Well)

（３）電気伝導度（EC)の変化範囲

本研究では，上記の地下水位と DO に加え，エアースパージングによる気泡の到達範囲を確認するために EC（電気伝導度）を測定した。通常，観測井を用いて固定点の地下水の EC を連続的に測定すると地下水の温度，溶解イオン濃度などに応じた値が得られるが，地下水中にエアースパージングによる気泡が存在する場合は，EC 計の電極が不規則かつ不連続に気泡によって絶縁されるため測定値が一定とならずに変動する。さらに，電極付近に存在する気泡が多いほど振動幅が大きくなる。この現象を利用し，気泡の到達の有無やその程度を EC の測定値から検討した。Fig.9，10 に鉛直井，水平井のそれぞれを用いてエアースパージングを行なった場合の EC の最大値と最小値の差（読み値に変動がなければ 0 となる）の分布を示す。鉛直井を用いた場合，注入井から遠くなるほど値は小さくなるものの半径約 10m 付近まで，また，同様に水平井を用いた場合，

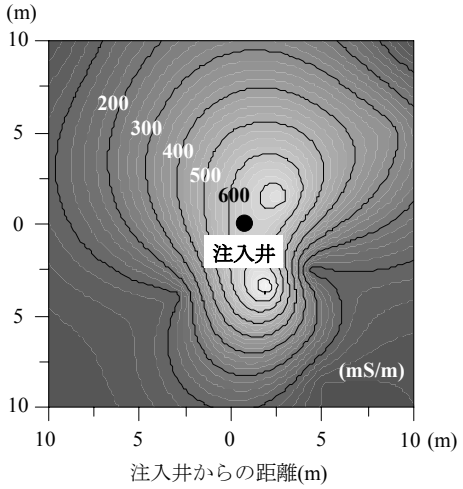

Fig.9　EC の変動範囲(鉛直井)

(Fluctuation of Electric Conductivity on Air Sparging with Vertical Well)

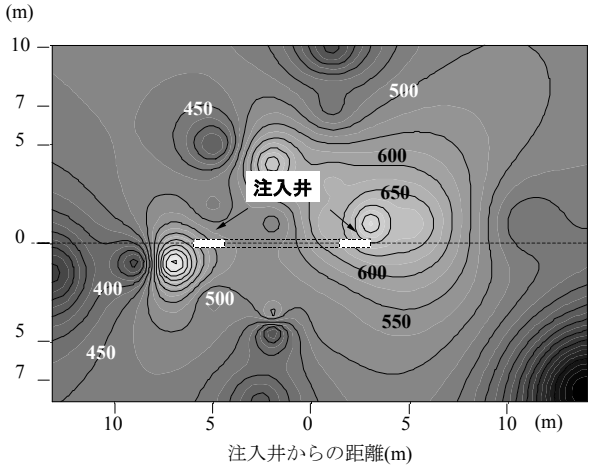

Fig.10　EC の変動範囲(水平井)

(Fluctuation of Electric Conductivity on Air Sparging with Horizontal Well)

長軸方向 30m，短軸方向 20m範囲内まで影響が及んでいることが分かる。このことから気泡の到達範囲（EC 計の測定値から推定される）として定義される影響半径は地下水位の変化範囲や DO 濃度の上昇範囲によって定義される影響範囲よりも大きな値となっていることが分かる。

（4）水平井を用いた場合の影響半径と注入量の関係

水平井を用いたエアースパージングの実施時に注入量をパラメトリックに変化させ，その際の DO 濃度の測定値から注入量の変化に対する影響範囲（DO 濃度の上昇範囲）の変化について考察した。Fig.11 に DO 濃度が 4 mg/L 以上となる領域の面積と注入量の関係を示す。注入量の増加に応じて，DO 濃度の上昇範囲の拡大が認められており，DO 濃度が 4 mg/L 以上となる範囲を影響範囲とした場合，その領域の面積は注入量とほぼ比例関係にあることが分かる。このことから，図中に示す注入量の範囲（本施工試験で実施した注入条件の範囲）では，影響範囲の面積が注入量の増加に対して線形関係にあり，その注入圧力が妥当な値の範囲内であったと考えられる。地盤中への空気注入により注入井付近の地盤が過度に撹乱されない，また，間隙水圧の増加が過大にならない圧力範囲であれば，今回の試験においては，さらに高い注入圧を付与し，大きな流量で運転することも可能であったものと考えられる。

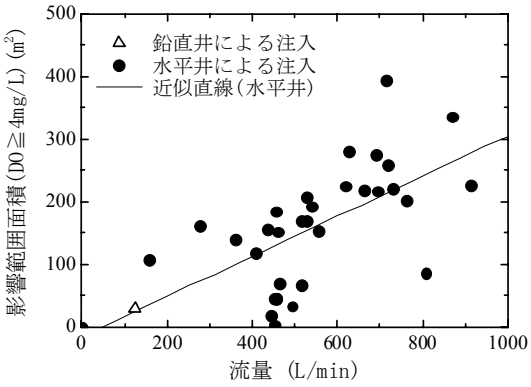

Fig.11　注入流量と DO の影響範囲面積との関係

(Relation between Injection Volume and Influenced Area defined as High DO Concentration Area)

３．浄化効果の検討

（1）浄化率の評価

実証試験の実施期間中は，ほぼ 1 回/24 時間の頻度でサイト内の地下水を採取し，PID/GC－ヘッドスペース法により地下水中のベンゼン濃度を測定している。この結果を基にエアースパージングによる地下水浄化効果を鉛直井，水平井を用いた場合，それぞれについて評価した。

Fig. 1 2 に鉛直井を用いた場合のベンゼンの除去率と浄化期間の関係を示す。図中に示すように注入井から半径 1 m 以内では浄化期間が 10 日ほどで 90%以上の除去率を達成し，95%程度で収束していることが分かる。また，半径 2～3 m 以内では約 1 ヶ月の浄化期間内で，除去率がほぼ線形となっており，浄化期間の延長によって 90%程度の除去率の達成が可能である事が予想される。一方，半径 5 m 付近では 60%程度の除去率を示しているものの，除去率は収束気味で浄化期間の延長によってこれ以上の除去率の達成が可能であるとは判断し難い。Fig.13 には地下水中のベンゼンの除去率（浄化率）の平面分布を示す。ベンゼンの除去率が 70%以上となっている部分の面積は約 53.4m² であり，これは影響範囲を同心円状と仮定すると半径約 4 m以内の範囲を示している。ベンゼン除去率の分布

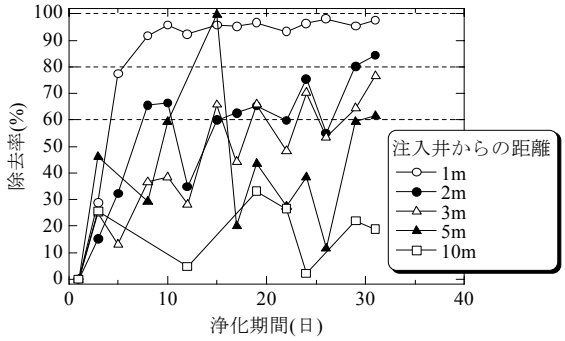

Fig.12　ベンゼン除去率と浄化期間（鉛直井）

(Relation between Cleanup ratio and Elapsed Time on Air Sparging with Vertical Well)

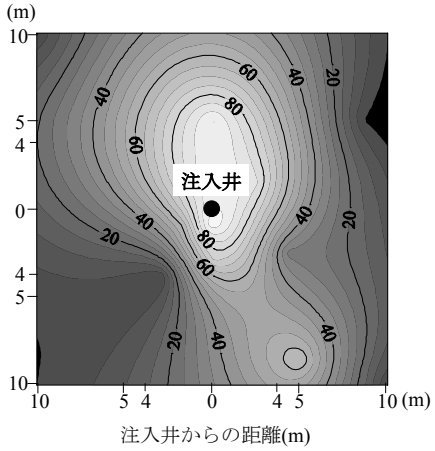

Fig.13　鉛直井を用いた場合のベンゼン除去率(%)の分布

(Distribution of Cleanup Ratio on Air Sparging with Vertical Well)

は DO の濃度分布や EC の変化範囲と同様に同心円状にはならないが，これは地盤の不均一性，特に透水係数や間隙率の不均一性に起因していると考えられる。

Fig.14 に水平井を用いた場合のベンゼンの除去率と浄化期間の関係を示す。図中に示すようにベンゼン除去率と注入井との距離との関係は鉛直井を用いた場合ほど顕著ではなく，また，濃度の上下変動も大きい。これは，２ヶ所のストレーナ部から注入された気泡が相互に干渉し，ベンゼンの濃度の低下した地下水（既浄化）とそうでない地下水（未浄化）が不規則に攪拌されてしまうためであると推定される。しかし，Fig.15 に示すベンゼン除去率の平均値の分布に着目すると，浄化率が 70%以上になっている部分は長軸 14m，短軸 8 m の楕円範囲内となっており，その領域の面積は約 88m^3 であることから鉛直井を用いた場合と比較して 1.8 倍程度大きくなっていることが分かる。

これらの結果と Fig.7～8 に示した DO 濃度の分布形状を比較すると，鉛直井，水平井のいずれを用いた場合においても両者は類似した傾向を示しており，特に DO 濃度が約 4 mg/L 以上となる範囲内で 70%以上の除去率を達成していることが分かる。このようにベンゼン除去率と DO 濃度は非常に相関性が高く，DO 濃度はエアースパージング実施の際に，VOC の浄化率範囲の指標として非常に有効であるものと考えられる。

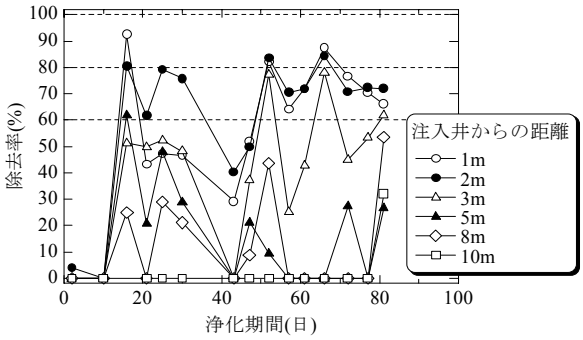

Fig.14　ベンゼン除去率と浄化期間（水平井）

(Relation between Cleanup ratio and Elapsed Time on Air Sparging with Horizontal Well)

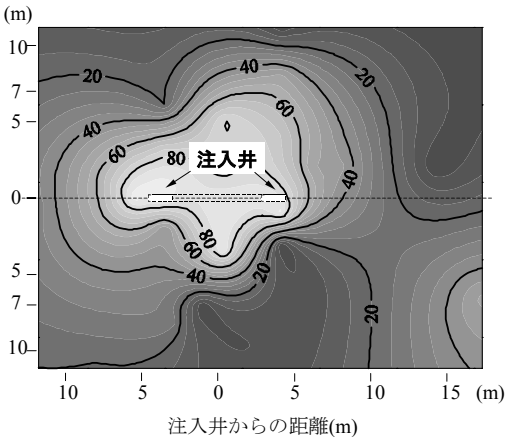

Fig.15　ベンゼン除去率(%) (水平井)

(Distribution of Cleanup Ratio on Air Sparging with Horizontal Well)

（２）浄化速度係数の算定と比較

エアースパージングの影響範囲内における濃度と浄化期間の関係を明確にするために以下のような手順で浄化速度係数を算定し，評価した。

地下水中のベンゼン濃度の時間変化を(1)式で近似する。

$$C_t = C_0 e^{-kt} \quad \cdots\cdots (1)$$

C_t:地下水中のベンゼン濃度(mg/L)

C_0:地下水中のベンゼン初期濃度(mg/L)

k:浄化速度係数(1/day)　t:経過時間(day)

各観測井の初期濃度の平均値を基準として，注入井からの距離ごとのベンゼン濃度の経時変化（基準値からの変化），浄化期間を(１)式に代入し，k を算出した。その結果を Fig.16 に示す。鉛直井と水平井のそれぞれ 4 m，7 m における浄化速度係数は約 0.015 (1/day)（半年で濃度が 1/10 以下に低減できるレベル）と同等であり，水平井を用いたエアースパージングでは鉛直井を用いたそれと比較して，同等の浄化期間でより広い範囲の浄化が可能であることが分かる。また，この地点では DO の値が両者とも約 3～4 mg/L となっており，

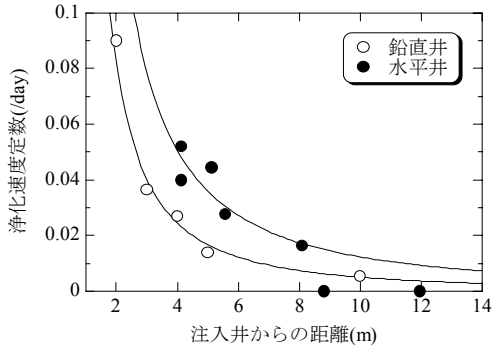

Fig.16 浄化速度定数と注入井からの距離の関係

(Relation between Cleanup Rate and distance from Sparging Well)

DO 濃度がその地点の単位体積当たりに供給された空気量に比例すると考えると，DO 濃度が浄化速度係数に対応する指標として有効であるものと考えられる。

地下水の DO 濃度が 3 mg/L 以上になると地盤中の好気性微生物が活性化し，VOC の分解が促進されることが知られている[4)]。本試験において DO 濃度が 3 mg/L 以上まで上昇している範囲は，鉛直井を用いた場合で半径 7 m 円内，水平井で長軸方向 16m，短軸方向 10m 楕円内程度となっている。これは、この範囲内では本試験の運転条件においてさらに長期的なエアースパージングを実施することにより，エアースパージングの物理的な作用（地下水中の VOC の揮発，剥離作用）に加えて，好気性生物による分解作用によって浄化の促進が期待できることを示唆している。

Ⅳ．水平井を用いたエアースパージング工法の費用対効果

前述のように本試験サイトにおいては，水平井を用いたエアースパージング工法を実施することにより鉛直井を用いたそれと比較して，より効率的な浄化が可能となることが分かった。しかし，水平井 1 本当たりの削坑・設置に要するコストは，鉛直井に比べて割高になるために，浄化サイトが狭く，設置する井戸の本数が少ない場合には鉛直井を採用する方が効果的になる可能性もある。そこで，鉛直井，水平井の浄化影響範囲を仮定した上で，浄化コストと浄化サイトの面積との関係について評価し，両者の費用対効果について検討を行なった。この評価によれば，浄化サイトの面積が広くなるほど，水平井による浄化が有利になっていくことが分かった。このことから，浄化サイトの形状や汚染深度にも依存するものの，多くの汚染サイトにおいては，水平井を用いたエアースパージング工法の適用が可能であると考えられる。

Ⅴ．まとめと今後の予定

土壌・地下水浄化工法として広く用いられるエアースパージング工法に関して，空気注入井を一般的な鉛直井から水平井に変更することにより費用対効果の向上が期待できることが分かった。今後は，好気性生物の活性化により VOC の分解を促すバイオスパージング工法などへの水平井の適用について検討する予定である。

参考文献

1） 江種伸之，平田健正，福浦清，松下孝；帯水層スパージングの現場実験，第 6 回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会，（1998），pp.147-148.

2） Looney B.B.,Kaback D.S. and Corey J.C.;Field Demonstration of Environmental Restoration Using Horizontal Wells,Bioventing and Vapor Extraction：Uses and Applications in Remediation Operations, Air and Waste ManagementAssociation,(1992),pp.104-118.

3） 小澤一喜，河合達司，川端淳一，中山等，佐藤義幸，長澤知紀；実サイトでのエアースパージングの浄化特性と影響範囲に関する研究，第 9 回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会，（2003），pp. 356-359.

4） Wickramanayake G.D.;Physical and Thermal Technology,Battelle press,p.13,2000.