

水分飽和多孔体へ注入した 空気の移動に関する室内実験

LABORATORY EXPERIMENTS ON AIR MIGRATION IN SATURATED POROUS MEDIUM

江種伸之¹・中藤康拓²・平田健正³

Nobuyuki EGUSA, Yasuhiro NAKATOU and Tatemasa HIRATA

¹正会員 博(工) 和歌山大学助教授 システム工学部 (〒640-8510 和歌山市栄谷930)

²学生会員 和歌山大学大学院 システム工学研究科 (同上)

³正会員 工博 和歌山大学教授 システム工学部 (同上)

Air sparging coupled with soil vapor extraction has been developed and applied to remove volatile contaminants from subsurface environment instead of groundwater extraction coupled with soil vapor extraction. In this paper, laboratory experiments, using 1mm glass beads as the porous medium, were conducted to examine air sparging performance. The purpose of these experiments was to observe the basic mechanisms of injected air and water flows in saturated porous medium during air sparging. The results obtained in this study were the following. The continuous air channels formed inside the porous medium when the grain size of the medium was 1 mm. The pulsed operation for air injection spread the region of injected air flow more than in the continuous operation. Water in the medium gradually moved outside the air flow region by pulsed operation.

Key Words : groundwater remediation, volatile organic compound, air sparging, laboratory experiment, air flow pattern,

1. はじめに

トリクロロエチレンなどの揮発性有機化合物によって汚染された土壌・地下水環境から汚染物質を除去する技術としては、不飽和帯に負圧をかけて土壌ガスの吸引を行いガス態の物質を除去する土壌ガス吸引技術と、地下水が汚染されている場所では地下水の揚水を同時に行う二重抽出法が一般的である¹⁾。ただし、この方法では揚水した地下水を地上で処理する必要がある、処理水の処分が問題となる。そこで、最近では、エアースパージング技術(空気注入技術)が多くの現場で適用されてきている²⁾。エアースパージング技術は、地下水中に空気を吹き込み、地下水の流れを攪拌することで溶解している汚染物質を注入空気に揮発させ、不飽和帯でガスとして回収する。この方法は、①汚染された地下水の処理が不要になる、②

土壌ガス吸引技術と同様な地上設備で設置が簡単、③費用が安くなるなどの利点がある。しかし、空気を吹き込むことで地下水が乱されるため、地下水や土壌ガス中の物質回収量に影響が生じる。また、汚染物質を周辺へ拡散させる危険性もある。

これまでエアースパージング技術に関する研究は、Ji et al.の室内実験³⁾、Lundegard and LaBrecqueの現場実験⁴⁾、Brooks et al.のカラム実験⁵⁾など数多く報告されている。また、著者らもトルエンやテトラクロロエチレンによって土壌・地下水環境が汚染された現場で野外実験を行い、エアースパージング技術の効果を検討してきた⁶⁾⁷⁾。しかし、注入空気の移動や地下水の攪拌といったエアースパージング技術の効果に影響を与える現象が十分解明されてきたとは言えない。

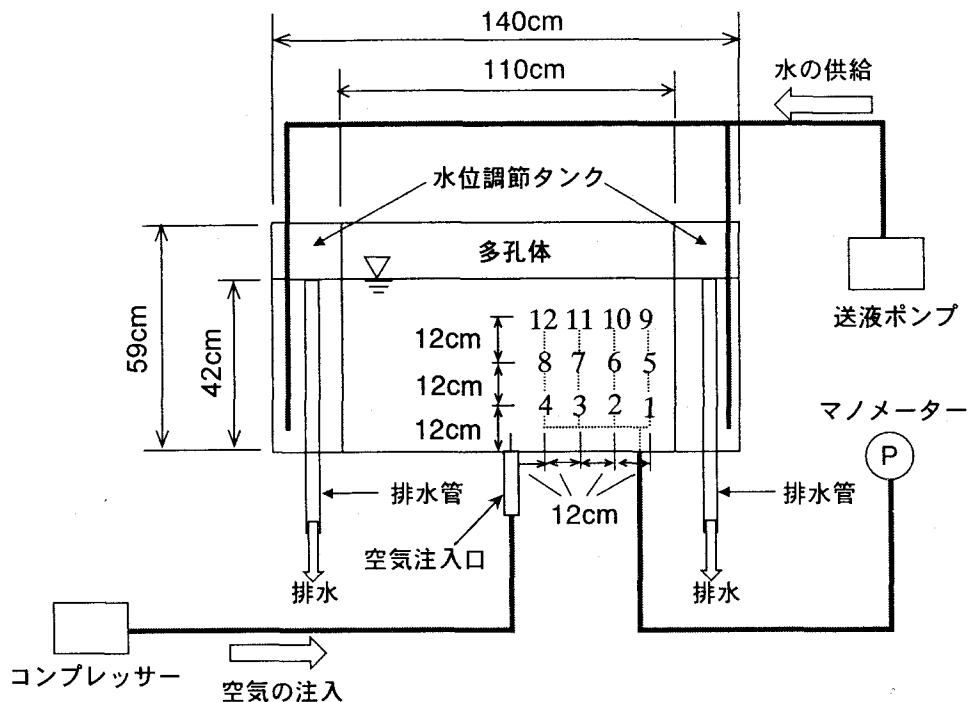


図-1 実験装置の概略図

そこで、本研究では室内実験を行い、地下水中へ注入した空気の移動特性と、地下水の攪拌効果に関する基礎的な検討を行った。

2. 実験概要

図-1に実験装置の概略図を示している。実験には、幅140cm、高さ59cm、奥行き7cmの亚克力製の水槽を用い、粒径1mmのガラスビーズをつめて多孔体を形成した。多孔体の左右両側は実験水槽内の水位を一定に保つための水位調節タンクとして利用した。中央より右側の12カ所(縦3列×横4列)に圧力水頭測定用のマンメーターを取り付けた。図中の番号(1~12)は、マンメーターの取り付け位置を示している。なお、多孔体の飽和透水係数は5.07cm/sec、間隙率は0.36であった。

表-1に実験方法を示している。土壌・地下水汚染現場にエアースパージング技術を適用する場合の空気注入方法には、空気注入を断続的に行う間欠運転と連続的に行う連続運転がある。そこで、今回は空気注入方法の異なる二つの実験を行った。Run1は空気注入1分間、停止1分間を1サイクルとした運転を5サイクル行った間欠運転、Run2は空気注入を5分間続け、その後1分間注入を停止した連続運転である。空気注入は、水槽底面中央

表-1 実験方法

	Run1	Run2
空気注入方法	間欠運転	連続運転
実験時間	10分間 (空気注入1分 + 停止1分) × 5	6分間 空気注入5分 + 停止1分
空気注入量	11.5 L/min	11.5 L/min
測定項目	注入空気の流れ 圧力水頭 透水係数 排水量	注入空気の流れ 圧力水頭 透水係数

部の空気注入口から流量11.5L/minで行った。また、実験中は水槽の水位を一定に保つために、送液ポンプを用いて左右の水位調節タンクにそれぞれ1L/minの流量で水道水を供給した。

実験中は注入空気の流れをビデオカメラで撮影し、マンメーターで圧力水頭を計測した。なお、Run1では各サイクル中に水槽から排出される水量を測定し、また、各実験後には、水平方向の透水係数を測定した。

3. 結果と考察

(1) 多孔体中の空気移動特性

図-2に注入空気の流れ(Run1の1サイクル目)を

模式的に描いている。実験では、空気注入開始から1.5秒後に空気が多孔体に進入して流れ始める。その後、5.5秒後に注入空気が水面に達し、10秒後にほぼ定常状態に達する。また、注入空気は多孔体中を連続した細い流路を形成して移動している。

Ji et al.³⁾は、多孔体を構成するガラスビーズの粒径が注入空気の移動に与える影響を鉛直2次元の水槽を用いた室内実験によって検討している³⁾。それによると、ガラスビーズの粒径が大きい多孔体では空気は気泡で移動し、粒径が小さい多孔体では連続した細い流路を形成する。気泡から流路への変化は粒径2mm付近で生じることが確認されている。また、Brooks et al.⁵⁾は鉛直1次元のカラム実験および理論的考察により、気泡流れと流路流れの違いについてより詳細に検討している⁵⁾。ここでは、気泡から流路への変化は粒径1~2mmで生じることが確認されている。

多孔体中を気泡が移動するときには、気泡に毛管圧が作用するため、その移動は浮力以外に毛管圧の影響を受ける。すなわち、気泡の上昇を抑える方向に働く毛管圧よりも浮力が大きいと気泡は上昇するが、毛管圧よりも浮力が小さいと気泡は多孔体中を上昇できない。水-空気界面に働く表面張力を一定と考えると、多孔体を構成するガラスビーズの粒径が大きいほど毛管圧は小さくなる。したがって、粒径の大きなガラスビーズで構成された多孔体中を空気が気泡で移動するのは、このとき生じる毛管圧が浮力よりも小さいためである。

一方、粒径の小さなガラスビーズで構成された多孔体では毛管圧が大きくなるため、空気は気泡で移動できない。このとき、空気は流路を形成するが、その移動には浮力と毛管圧に加えて管頭圧が必要となる。管頭圧とは注入口から多孔体中に空気が進入するときに働く空気圧力である。気泡が移動できない多孔体では、上向きの管頭圧と浮力が毛管圧よりも大きくなって初めて空気が上昇し始める。この場合は管頭圧が常に空気に加わっている必要があるため、注入空気は連続した流路を形成する。すなわち、多孔体に注入された空気が気泡で移動するか、連続した流路を形成するかは、毛管圧の大きさに依存することになる。

●：圧力水頭観測点

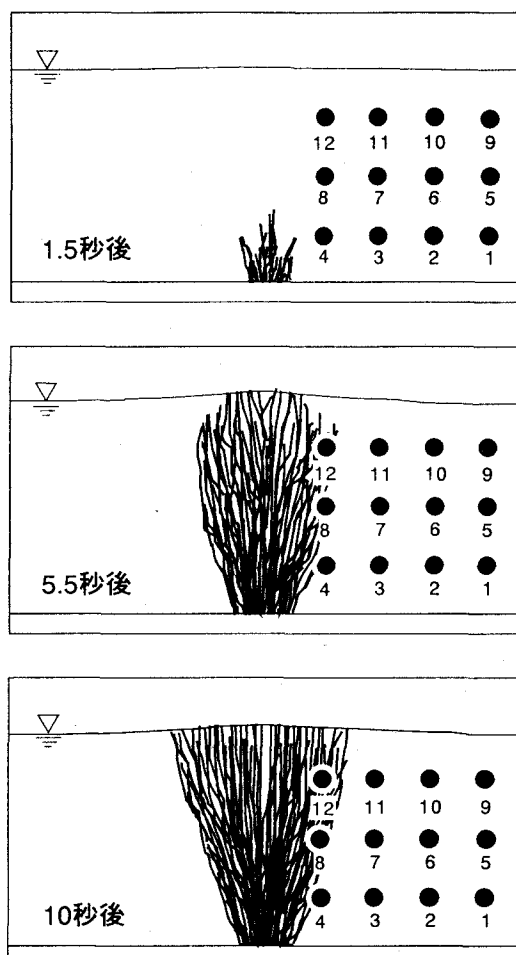


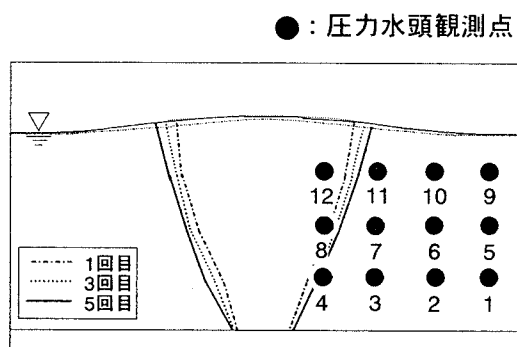
図-2 注入空気の流れ (Run1の1サイクル目)

今回の多孔体は粒径1mmのガラスビーズで構成されており、Ji et al.³⁾やBrooks et al.⁵⁾の検討結果から考えて、多孔体中に連続した細い流路が形成された現象は妥当な結果といえる。

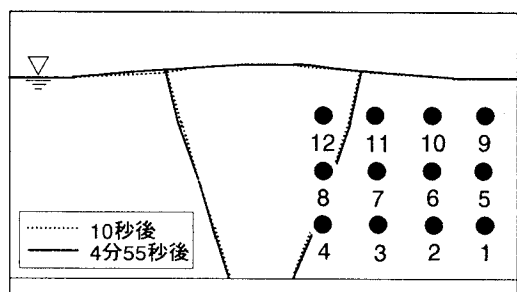
自然土壌は様々な粒径の土粒子で形成されている。扇状地や旧河道など粗礫を中心とした所を除けば、多くの地盤では細粒分を含んでいるため間隙サイズは2mm径のガラスビーズで構成されたものより小さくなる。したがって、現場地下水中に注入された空気は気泡ではなく、今回観察された状態、すなわち連続した細い流路を形成して流れていると判断できる。

(2) 注入方法が空気の拡がりに与える影響

図-3にRun1の1,3,5サイクル目とRun2の10秒後、4分55秒後の注入空気の拡がりを模式的に描いている。Run1では注入空気の移動領域が、注入運



Run1 (1・3・5サイクル目, 10秒後)



Run2 (10秒後・4分55秒後)

図-3 注入空気の流れ

転ごとに徐々に広がっている。一方、Run2では注入空気はほとんど広がらず、その流れはRun1の1サイクル目とほぼ同じである。

Run1では空気注入を停止すると空気の一部が間隙に取り残される現象が確認されている。したがって、2サイクル目以降の空気注入は多孔体の一部分に空気が残った状態で行われることになり、間隙が水で満たされているRun1の1サイクル目やRun2とは、多孔体の状態が大きく異なっている。そこで、各実験後に左右の水位調節タンクに水位差をつけて右から左に水を流して、空気残留部分の水平方向の透水係数を測定した。このとき、空気残留部分の左右に取り付けたマンメーターの読みから、動水勾配を計算している。なお、多孔体中に残留した空気は不均一に分布しているため、空気残留部分の透水係数は場所によって異なる。したがって、空気残留部分の上部、中部、下部にマンメーターを取り付けて3カ所の透水係数を測定した。実験開始前の飽和透水係数の平均が5.07cm/secであるのに対し、Run1後は4.06cm/sec、Run2後は4.38cm/secと共に透水係数が小さくなっている。これは多孔体中に残った空気が水の移動を妨げ、透水性を低くしているためである。

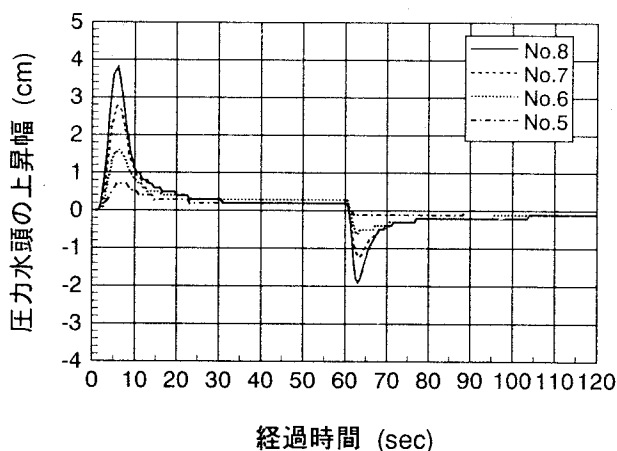


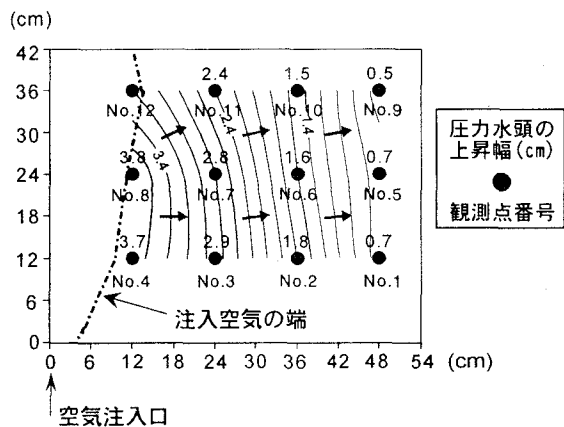
図-4 圧力水頭の時間変化(Run1の1サイクル目)

注入空気は間隙内の水を押しのけながら多孔体中を移動するが、多孔体中の空気が残った領域は透水性が低く水が排除されにくいため、注入空気の通過量が少なくなる。すなわち、Run1では、間隙中に空気の一部が取り残されて透水性が低下するために、注入空気の一部が透水性の高い場所(間隙が水で満たされた場所)を流れることになり、空気の移動領域が外側に広がっていると推察される。一方、Run2では、空気注入を停止するまで空気の流れが定常状態を保つため、空気の移動領域がほとんど変化していない。

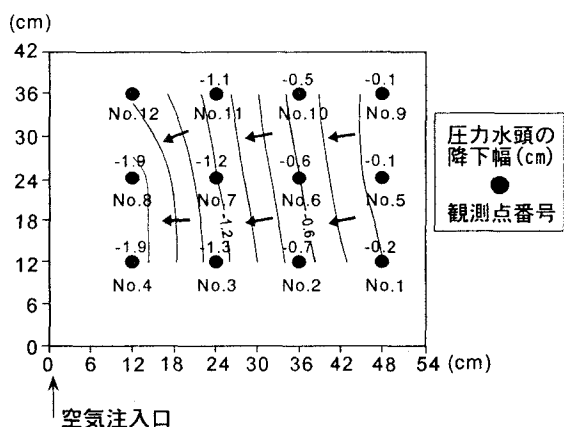
エアースパーキング技術を適用する場合には、注入空気への汚染物質の揮発量が浄化期間やコストなどに大きく影響する。本節で述べたように、間欠運転によって注入空気の移動領域が連続運転よりも広がることは、より広い範囲の地下水から汚染物質を除去することが可能になることを示唆している。また、空気の注入と停止を繰り返すことで空気の流路が絶えず変化するため、注入空気と地下水の接触が多くなり、揮発による地下水中濃度の低下が進むものと考えられる。一方、連続運転では、空気の流路が注入を停止するまでほとんど変化しない。すなわち、空気の移動に選択的な通り道ができ、間欠運転ほど浄化効果が上がらない可能性が高くなる。

(3) 空気注入による水の攪拌効果

図-4に観測点No.5～8における圧力水頭の時間変化(Run1の1サイクル目)を示している。各観測点では多孔体に進出した空気の影響を受けて1.5秒後から圧力水頭の上昇が始まる。空気が地下水面に



Run1 (5.5秒後)



Run1 (62.5秒後)

図-5 圧力水頭の等値線図

達する5.5秒後に最大値を取った後は、注入空気が大気と接することで注入空気の圧力が低下し、それにともない圧力水頭も低下する。そして、20秒後にはほぼ初期状態に戻る。このとき、空気注入口に近いほど圧力水頭の上昇幅は大きくなっている。その後、空気注入を停止する60秒後まで圧力差のない定常状態が続くが、空気注入を停止すると圧力水頭の低下が始まる。これは、空気注入の停止によって注入空気の圧力が低下した影響である。各観測点の圧力水頭は62.5秒後に最小値を取り、以後は回復してほぼ105秒後には全ての観測点で初期状態に戻る。このときも空気注入口に近い観測点ほど圧力の低下が大きくなっている。なお、本文中に載せていないが、下段(No.1～4)および上段(No.9～12)の観測点でも、上昇幅に多少の違いはあるものの、ほぼ同じ動きをしている。また、2サイクル目以降もほぼ同様な変化が繰り返された。

空気注入開始前には各観測点間で圧力水頭にほ

表-2 空気注入による排水量(Run1)

	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目
排水量 (mL)	246	271	241	284	276

とんど差がないので、実験中の観測点間の水頭差から多孔体中の水の動きがわかる。図-5に圧力水頭が最大値を取る5.5秒後と最小値を取る62.5秒後における圧力水頭の等値線図を示している。なお、各観測点を黒丸で示し、黒丸の上に圧力水頭の上昇幅を、黒丸の下に観測点番号を記している。また、矢印は水の流向を示している。5.5秒後には、下段から中段にかけてほぼ水平方向に水が流れているが、中段から上段にかけては中央に近いほど注入空気の影響を受けて上向きの流れが大きくなっている。一方、空気注入を停止すると(62.5秒後)、水が排除された中央部に水が戻ってくる様子が理解できる。

以上から、間欠運転の1サイクルにおける水の動きは以下のように説明できる。空気注入を開始してからほぼ注入空気の流れが定常状態に達するまでの短い期間に、注入空気によって水が周辺に押し出される。注入空気の流れが定常状態の間は水はほとんど動かず、空気注入を停止することで水が戻ってくる。間欠運転では、このような水の動きが各サイクルに繰り返される。一方、本文中に載せていないが、Run2の圧力水頭の時間変化はRun1の1サイクル目とほぼ同様であった。すなわち、連続運転では空気注入を開始してから注入空気の流れが定常状態に達するまでの短い期間のみ水が動かされることになり、空気注入による水の攪拌効果は間欠運転よりも小さい。

表-2にRun1の各サイクルの空気注入による排水量(水槽より排出された水量から供給された水量を減算したもの)を示している。各サイクルの排水量にはほとんど差がない(平均263.6mL)。この平均排水量は多孔体中では幅約2.5cm(高さ42cm、奥行き7cm、間隙率0.36)に相当し、これが1回の空気注入で水平方向に水が移動した距離になる。また、空気注入停止によって水位調節タンクから多孔体内に供給された水量の平均は154mLであり、同様な方法で水平方向に水が戻った距離を算定すると約1.5cmである。排水量の半分程度しか水が戻ってこ

ないのは、多孔体中に空気が取り残されている影響である。したがって、本実験では、間欠運転の1サイクルごとに約1cmずつ外向きに水が移動していく。間欠運転ではこのような水の動きが繰り返されることになるので、注入空気の影響を受けた水が徐々に周辺に拡がっていく。

エアースパーキング技術に関する野外実験から、間欠運転を行うと、連続運転時の空気移動領域よりも広い範囲で汚染物質濃度の低下が確認されている^{6,7)}。これは、今回得られた水の動き、すなわち空気注入によって地下水が攪拌される影響、注入空気への揮発により汚染物質濃度が低下した地下水と周辺地下水が混合するためと考えられる。したがって、間欠運転では地下水の攪拌効果が高まり、空気注入の影響範囲を連続運転より拡げることが可能になる。しかし、一方では、空気移動領域周辺の汚染物質を周辺に拡散させる危険性もあるため、現場において空気注入井を設置する場合には、地下水の攪拌効果を考慮する必要がある。

4. おわりに

本研究では、多孔体へ注入した空気の移動特性に関する室内実験を行った。得られた知見は以下のとおりである。

- (1) 粒径1mmのガラスビーズで構成された多孔体へ注入した空気は、連続した細い流路を形成して流れる。
- (2) 間欠運転では、多孔体に取り残された空気によって透水性が低下するために、注入空気の移動領域が徐々に周辺へ拡がっていく。
- (3) 空気注入開始からほぼ注入空気の流れが定常状態に達するまでの短い期間に水は周辺に押し出される。注入空気の流れが定常状態の間は水はほとんど動かず、空気注入を停止することによって水が戻ってくる。
- (4) 連続運転では、水は空気注入開始直後の短い期間しか移動しない。間欠運転では、空気注入と停止を繰り返すことによって、徐々に水が周辺へ移動していく。

エアースパーキング技術は、地下水中への酸素供給方法として利用することも可能である⁸⁾。した

がって、今後は、今回得られた多孔体中の空気と水の移動特性をもとに室内実験を発展させ、好気性の微生物分解を促進させる酸素の供給方法について検討を行っていく予定である。

謝辞：実験に協力いただきました和歌山大学大学院修士課程1年の塩谷剛氏をはじめ和歌山大学システム工学部水土環境研究室の学生諸君に感謝いたします。

参考文献

- 1) 平田健正編：土壌・地下水汚染と対策，社団法人日本環境測定分析協会，1996。
- 2) 例えば，笠水上光博・山内仁：粗粒堆積物中の揮発性有機塩素化合物の挙動とエアースパーキング・揚水システムによる浄化，日本地下水学会誌，Vol.40, No.4, pp.417-428, 1998。
- 3) Ji,W., Dahmani,A., Ahlfeld,D.P., Lin,J.D., and Hill,E.: Laboratory Study of Air Sparging: Air Flow Visualization, *Groundwater Monitoring and Remediation*, Fall 1993, pp.115-126, 1993。
- 4) Lundegard, P. D. and D. LaBrecque : Air Sparging in a sandy aquifer (Florence, Oregon, U.S.A.): Actual and apparent radius of influence, *Journal of Contaminant Hydrology*, Vol.19, pp.1-27, 1995。
- 5) Brooks,M.C., Wise,W.R., and Annabl,M.D.: Fundamental Changes in In Situ Air Sparging Flow Patterns,*Groundwater Monitoring and Remediation*, Spring 1999, pp.105-113, 1998。
- 6) 江種伸之，平田健正，福浦清，松下孝：地下水へ注入された空気による水質回復効果について，日本地下水学会誌，40(4)，pp.417-428, 1998。
- 7) 江種伸之，平田健正，福浦清，松下孝：地下水中への長期間の空気注入による汚染物質濃度変化について，土木学会水工学論文集，43，pp.193-198, 1999。
- 8) Johnston, C. D., J. L. Rayner, B. M. Patterson and G. B. Davis : Volatilization and biodegradation during air sparging of a petroleum hydrocarbon-contaminated sand aquifer, *Groundwater Quality : Remediation and Protection*, IAHS Publ. No.250, pp.125-131, 1998。

(2000. 10. 2受付)