JNC TN8400 2001-012

MACRO Ⅱによる単一孔注水・揚水型トレーサー試験データの解析

２００１年４月

核燃料サイクル開発機構
東海事業所

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319－1194　茨城県那珂郡東海村村松4番地49
核燃料サイクル開発機構　東海事業所
技術展開部　技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to：
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
4－49 Muramatsu, Naka－gun, Ibaraki 319－1194,
Japan

©核燃料サイクル開発機構（Japan Nuclear Cycle Development Institute）
2001

JNC TN8400 2001-012
2001年4月

MACROⅡによる単一孔注水・揚水型トレーサー試験データの解析

白川敏彦[1)]，金澤康夫[2)]，畑中耕一郎[3)]

要旨

地層処分研究の天然バリア中の核種移行に係わる不均質岩盤中における巨視的分散現象を解明するために，多孔質媒体水理トレーサー試験装置（以下，「MACROⅡ」と記す）を用いて，多孔質媒体槽内にガラスビーズを用いて不均質場を人工的に作成し，種々の条件を設定したうえで，数多くのトレーサー試験を実施してきた。今回は室内試験における分散長のスケール依存性を調べることを目的として，媒体槽を水平状態に固定し，不均質場の任意の位置に設置した単一孔を使用して注水・揚水型トレーサー試験を実施した。

試験は，不均質場内に設置した注水・揚水型トレーサー試験に使用する単一孔の位置及び注入流量・注入時間を変えることによって，2地点において各々9ケース，6ケースの全15ケースを実施した。

本試験で測定された揚水時の破過曲線を解析解でフィッティングし，巨視的分散長を算定した結果，15ケースのうち12ケースについて不均質場を代表する分散長を得ることができた。算定した分散長，注入・揚水流量および不均質特性の関連について検討した結果，以下の事項が判明した。

- 算定された分散長と単一孔周辺に広がった濃度フロントの平均半径との関係は，濃度フロントの平均半径が大きくなるにしたがって分散長がほぼ単調増加する傾向が確認できた。
- トレーサーを注入・揚水する単一孔を2地点選び試験を実施したが，単一孔周辺の透水性が小さくなっている場合には分散長は大きくなり，単一孔周辺の透水性が大きくなっている場合には分散長は小さくなる傾向が確認された。
- フィッティングの精度が悪く分散長が算出できなかった3ケースについては，濃度フロントに分散が著しく小さい箇所が存在する可能性があることがわかった。

---

1) コンピュータソフト開発株式会社
2) 検査開発（株）
3) 東海事業所環境保全センター 処分研究部 システム解析グループ

JNC TN8400 2001-012
April, 2001

The Data Analysis of the Single Well Injection-Withdraw Tracer Experiment Using the MACRO II

Toshihiko Shirakawa[1], Yasuo Kanazawa[2], Koichiro Hatanaka[3]

Abstract

On understanding the radionuclide transport in natural barrier in radioactive waste isolation research, the macroscopic dispersion in heterogeneous permeability field in the underground rock is regarded as an important process. Therefore, we have conducted lots of tracer experiments by the MACRO II facility with an artificially constructed heterogeneous permeability field. In order to study the scale dependence of dispersion coefficients in case of laboratory experiments, we placed the flow cell horizontally, and conducted injection-withdraw tracer experiment with a single well.

We have conducted 15 cases experiments. These cases were prepared by changing a position of single well and the injection-withdraw time. At each position we have conducted 9 cases and 6 cases experiments.

In this report, we evaluated the macroscopic dispersion coefficients by the fitting of analytical solution to breakthrough curve measured by the 15 cases pumping tracer experiment. Consequently, we could evaluate the dispersion coefficients for 12 cases of 15 cases. Then, we discussed the relation between a injection-withdraw flow rate and a property of heterogeneous media and dispersion coefficient.

The conclusions obtained from the results of the evaluation are summarized as follows ,

- It was found that the macroscopic dispersion coefficients tend to be increased with increase of the average radius of tracer front spread around a single well.
- We have conducted any experiments with s single well settled at two positions. In case of that there is low permeability around a single well, we found dispersion coefficients are large. In case of that there is high permeability around a single well, we found dispersion coefficients are small.
- In three cases that we could not evaluate because of incorrect accuracy of fitting, we have found it possible that there is some points that dispersion coefficients were strikingly small in tracer front.

1) Computer Software Development Co., Ltd.
2) Inspection Development Corporation
3) Waste Isolation Research Division, Tokai Works.

目次

1. はじめに …… 1
2. MACROⅡ注水・揚水トレーサー試験 …… 2
2.1 試験装置構成 …… 2
2.2 試験方法 …… 2
2.3 試験条件 …… 3
2.4 試験結果 …… 4
3. 試験結果の考察 …… 29
4. 分散長の算定 …… 33
4.1 フィッティングに使用する解析解の導出 …… 33
4.2 分散長の算定手法 …… 40
4.2.1 フィッティングに使用する数式 …… 40
4.2.2 フィッティング方法 …… 41
4.2.3 解析条件 …… 44
4.2.4 解析結果 …… 47
5. 解析結果の考察 …… 56
5.1 フィッティング結果の考察 …… 56
5.2 巨視的分散長に関する考察 …… 57
6. おわりに …… 68
7. 参考文献 …… 69

表目次

表 2.1　ガラスビーズの呼び粒径と透水係数 …… 2
表 2.2　試験条件一覧（単一孔試験） …… 4
表 3.1　トレーサ注・揚水位置及び注入量での区分 …… 31
表 3.2　初期トレーサ濃度と周辺トレーサ濃度の関係 …… 31
表 3.3　各試験での平均注入・揚水流量 …… 31
表 3.4　トレーサ注入時間と揚水時間の関係 …… 32
表 4.1　分散長算出に使用する MACRO Ⅱ 試験データの例 …… 42
表 4.2　MACRO Ⅱ 試験データ中のパラメータ …… 42
表 4.3　分散長算出に使用する入力データファイルの例 …… 43
表 4.4　入力データファイル中のパラメータ …… 43
表 4.5　MACRO Ⅱ 揚水トレーサー試験条件 …… 45
表 4.6　MACRO Ⅱ 揚水トレーサー試験解析条件 …… 46
表 5.1　分散長の計算結果 …… 66

図目次

図 2.1　単一孔トレーサー試験の概念図 …… 5
図 2.2　ガラスビーズ・導電率計配置図 …… 5
図 2.3　トレーサープルームの時間変化（単一孔試験 htd100.1） …… 6
図 2.4　トレーサープルームの時間変化（単一孔試験 htd100.2） …… 7
図 2.5　トレーサープルームの時間変化（単一孔試験 htd100.3） …… 8
図 2.6　トレーサープルームの時間変化（単一孔試験 htd150.1） …… 9
図 2.7　トレーサープルームの時間変化（単一孔試験 htd150.2） …… 10
図 2.8　トレーサープルームの時間変化（単一孔試験 htd150.3） …… 11
図 2.9　トレーサープルームの時間変化（単一孔試験 htd200.1） …… 12
図 2.10　トレーサープルームの時間変化（単一孔試験 htd200.2） …… 13
図 2.11　トレーサープルームの時間変化（単一孔試験 htd200.3） …… 14
図 2.12　トレーサープルームの時間変化（単一孔試験 hte100.1） …… 15
図 2.13　トレーサープルームの時間変化（単一孔試験 hte100.2） …… 16
図 2.14　トレーサープルームの時間変化（単一孔試験 hte150.1） …… 17
図 2.15　トレーサープルームの時間変化（単一孔試験 hte150.2） …… 18
図 2.16　トレーサープルームの時間変化（単一孔試験 hte200.1） …… 19
図 2.17　トレーサープルームの時間変化（単一孔試験 hte200.2） …… 20
図 2.18　注水・揚水孔及びその周辺でのトレーサ濃度変化(単一孔試験 htd100.1) … 21
図 2.19　注水・揚水孔及びその周辺でのトレーサ濃度変化(単一孔試験 htd100.2) … 21
図 2.20　注水・揚水孔及びその周辺でのトレーサ濃度変化(単一孔試験 htd100.3) … 22
図 2.21　注水・揚水孔及びその周辺でのトレーサ濃度変化(単一孔試験 htd150.1) … 22
図 2.22　注水・揚水孔及びその周辺でのトレーサ濃度変化(単一孔試験 htd150.2) … 23
図 2.23　注水・揚水孔及びその周辺でのトレーサ濃度変化(単一孔試験 htd150.3) … 23
図 2.24　注水・揚水孔及びその周辺でのトレーサ濃度変化(単一孔試験 htd200.1) … 24
図 2.25　注水・揚水孔及びその周辺でのトレーサ濃度変化(単一孔試験 htd200.2) … 24
図 2.26　注水・揚水孔及びその周辺でのトレーサ濃度変化(単一孔試験 htd200.3) … 25
図 2.27　注水・揚水孔及びその周辺でのトレーサ濃度変化(単一孔試験 hte100.1) … 25
図 2.28　注水・揚水孔及びその周辺でのトレーサ濃度変化(単一孔試験 hte100.2) … 26
図 2.29　注水・揚水孔及びその周辺でのトレーサ濃度変化(単一孔試験 hte150.1) … 26
図 2.30　注水・揚水孔及びその周辺でのトレーサ濃度変化(単一孔試験 hte150.2) … 27
図 2.31　注水・揚水孔及びその周辺でのトレーサ濃度変化(単一孔試験 hte200.1) … 27
図 2.32　注水・揚水孔及びその周辺でのトレーサ濃度変化(単一孔試験 hte200.2) … 28
図 4.1　フィッティングの結果（ケース htd100.1） …… 48
図 4.2　フィッティングの結果(ケース htd100.2) …… 48

図 4.3　フィッティングの結果（ケース htd100.3）　…… 49
図 4.4　フィッティングの結果（ケース htd150.1）　…… 49
図 4.5　フィッティングの結果（ケース htd150.2）　…… 50
図 4.6　フィッティングの結果（ケース htd150.3）　…… 50
図 4.7　フィッティングの結果（ケース htd200.1）　…… 51
図 4.8　フィッティングの結果（ケース htd200.2）　…… 51
図 4.9　フィッティングの結果（ケース htd200.3）　…… 52
図 4.10　フィッティングの結果（ケース hte100.1）　…… 52
図 4.11　フィッティングの結果（ケース hte100.2）　…… 53
図 4.12　フィッティングの結果（ケース hte150.1）　…… 53
図 4.13　フィッティングの結果（ケース hte150.2）　…… 54
図 4.14　フィッティングの結果（ケース hte200.1）　…… 54
図 4.15　フィッティングの結果（ケース hte200.2）　…… 55
図 5.1　注水・揚水孔及びその周辺でのトレーサー濃度変化（ケース htd100.1）…… 59
図 5.2　注水・揚水孔及びその周辺でのトレーサー濃度変化（ケース htd150.1）…… 59
図 5.3　注水・揚水孔及びその周辺でのトレーサー濃度変化（ケース htd150.2）…… 60
図 5.4　注水・揚水孔及びその周辺でのトレーサー濃度変化（ケース htd150.3）…… 60
図 5.5　注水・揚水孔及びその周辺でのトレーサー濃度変化（ケース htd200.1）…… 61
図 5.6　注水・揚水孔及びその周辺でのトレーサー濃度変化（ケース htd200.2）…… 61
図 5.7　注水・揚水孔及びその周辺でのトレーサー濃度変化（ケース htd200.3）…… 62
図 5.8　再フィッティングの結果（ケース htd100.1）　…… 62
図 5.9　再フィッティングの結果（ケース htd150.1）　…… 63
図 5.10　再フィッティングの結果（ケース htd150.2）　…… 63
図 5.11　再フィッティングの結果（ケース htd150.3）　…… 64
図 5.12　再フィッティングの結果（ケース htd200.1）　…… 64
図 5.13　再フィッティングの結果（ケース htd200.2）　…… 65
図 5.14　再フィッティングの結果（ケース htd200.3）　…… 65
図 5.15　濃度フロントと分散長の関係　…… 67

1．はじめに

地層処分研究の天然バリア中の核種移行に係わる不均質岩盤中における巨視的分散現象を解明するために，多孔質媒体水理トレーサー試験装置（以下，「MACROⅡ」と記す）を用いて，多孔質媒体槽内にガラスビーズを用いて不均質場を人工的に作成し，種々の条件を設定し，数多くのトレーサー試験を実施してきた。今回は室内試験における分散長のスケール依存性を調べることを目的として，媒体槽を水平状態に固定し，不均質場の任意の位置に設置した単一孔を使用して，単一孔での注水・揚水型トレーサー試験を実施した。

本報告書は，MACROⅡ注水・揚水トレーサー試験で得られた揚水時のトレーサー濃度から破過曲線を測定した結果について検討したものである。また，揚水時の破過曲線と解析解（Gelhar and Collins，1971）とのフィッティングにより分散長を算定し，不均質特性と分散長の関連について検討した。

2．MACROⅡ注水・揚水トレーサー試験

2.1　試験装置構成

MACROⅡを使用した単一孔トレーサー試験とダイポールトレーサー試験の概念図を図 2.1 に示す。また，単一孔トレーサー試験は図 2.2 に示す同一の不均質場を使用した。MACROⅡ装置での不均質場の作成にはガラスビーズを使用し，図 2.2 に示すように 2000mm×1000mm×100mm の媒体槽内右半分に 950mm×950mm×100mm の不均質場を構築し，左半分には ϕ0.8mm ガラスビーズを均一に充填する。不均質場は 5cm×5cm の格子約 400 ブロックに，ϕ0.1mm から ϕ0.8mm の 6 種類のガラスビーズを充填することで作製した。不均質場作成に使用した 6 種類のガラスビーズの透水係数を表 2.1 に示す。また，トレーサー試験において使用する注水・揚水孔は，No.52，No.53，No.54 の 3 個所（図 2.2 参照のこと）に設けた。

単一孔トレーサー試験では，注水・揚水水頭圧の基準となる側方境界条件用タンクを多孔質媒体槽両端に接続し，任意の注水・揚水孔に三方弁でトレーサータンクと揚水タンクを接続し，三方弁を操作する事によりトレーサー注入から揚水への切り換えを行うことが可能である。

注水・揚水流量については，トレーサータンク及び揚水タンクとも上下に昇降可能であるため，任意の流量で注水・揚水が可能である。また，各タンクは常時オーバーフローさせることで，一定圧・一定流量での注・揚水を可能にしている。注水・揚水孔には導電率計を設置することで注・揚水時のトレーサー濃度の変化を測定できるようにした。

表 2.1　ガラスビーズの呼び粒径と透水係数

呼び粒径	透水係数	呼び粒径	透水係数
ϕ0.1mm	8.92E-03cm/sec	ϕ0.4mm	8.57E-02cm/sec
ϕ0.15mm	1.84E-02cm/sec	ϕ0.6mm	2.16E-01cm/sec
ϕ0.2mm	2.98E-02cm/sec	ϕ0.8mm	3.58E-01cm/sec

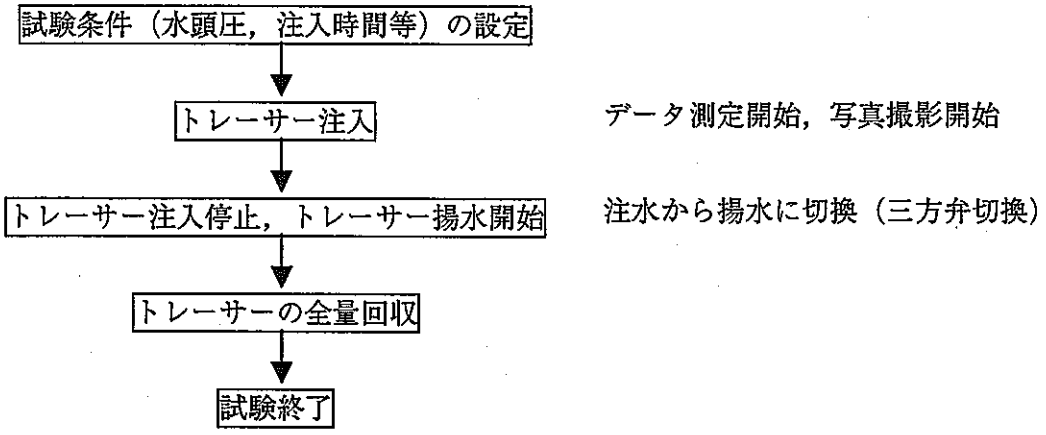
2.2　試験方法

今回報告する単一孔トレーサー試験では，図 2.2 の不均質場を用いて実施した。

単一孔トレーサー試験では，不均質場に一定流量で一定時間，染料 NaCl 溶液トレーサー（以下，「トレーサー」と記す）をトレーサータンクと，側方境界条件用タンクとの水頭差で注入を行う。その際，トレーサー注入流量と同量の間隙水が側方境界条件用タンクから排出される。一定時間のトレーサー注入後，三方弁で注水から揚水に切換え側方境界条件用タンクと揚水タンクとの水頭差で，トレーサー注入と同流量の揚水を行う。揚水時には

揚水圧が変動しないように側方境界条件用タンクに脱気水を常にオーバーフローするよう供給し，水位を保っている。これにより，トレーサー揚水流量と同量の脱気水を側方境界条件用タンクから多孔質媒体槽に供給し，注入したトレーサーの回収を行う。また，注水・揚水孔には導電率計を設置し，注・揚水時のトレーサー濃度の経時変化を測定する。

以下に試験開始から終了に至るまでの手順を記す。



(1) 側方境界条件用タンクと媒体槽を接続し，側方境界条件用タンクから脱気水が常時微量オーバーフローするよう，脱気水注入量を調整する。
(2) 側方境界条件用タンクを基準に，トレーサータンクと揚水タンクを試験条件に合う水頭差に調節する。
(3) トレーサータンクからトレーサーが常時微量オーバーフローするよう，トレーサー注入量を調整する。
(4) トレーサータンクと側方境界条件用タンクとの水頭差で，不均質場にトレーサーを定流量注入する。
(5) トレーサー注入開始と同時に，データ収集を開始する。
(6) 所定の時間，トレーサーの定流量注入を行う。その際，トレーサーが常時微量オーバーフローしていることを確認する。
(7) 所定の時間経過後，三方弁を操作し，トレーサー注入を停止し，揚水タンクと側方境界条件用タンクとの水頭差で揚水を開始する。その際，側方境界条件用タンクから脱気水が常時微量オーバーフローしていることを確認する。
(8) 注入したトレーサーが回収できるまで，揚水を行う。
(9) 注水・揚水孔に設置してある導電率計でトレーサー濃度の経時変化を測定し，トレーサー濃度が0になったことを確認し，試験と終了する。

2.3 試験条件

単一孔トレーサー試験は，表2.2に示すように全15ケースの条件で実施した。

単一孔トレーサー試験は，一つの注水・揚水孔を使用して，一定時間，一定流量トレーサーを注入し所定の時間経過後，注水流量と同流量で揚水を実施し，トレーサーの回収を行う試験である。本試験では，媒体槽に作成した不均質場内の位置の違いにより，トレーサーの移行挙動がどのように変化するのかを観察する。なお，注・揚水孔は図 2.2 に記載した No.52 と No.53 を使用した。なお，No.52 の注・揚水孔を使用した場合の不均質場を不均質場 A，No.53 の注・揚水孔を使用した場合の不均質場を不均質場 B と名づけた。

表 2.2　試験条件一覧（単一孔試験）

試験名称	使用注・揚水孔	注・揚水流量	注入時間	総注入量
htd100.1	No.53（不均質場 A）	100cc/min	24min	2400cc
htd100.2			36min	3600cc
htd100.3			48min	4800cc
htd150.1		150cc/min	16min	2400cc
htd150.2			24min	3600cc
htd150.3			32min	4800cc
htd200.1		200cc/min	12min	2400cc
htd200.2			18min	3600cc
htd200.3			24min	4800cc
hte100.1	No.52（不均質場 B）	100cc/min	24min	2400cc
hte100.2			36min	3600cc
hte150.1		150cc/min	16min	2400cc
hte150.2			24min	3600cc
hte200.1		200cc/min	12min	2400cc
hte200.2			18min	3600cc

なお，No.52 の注水・揚水孔での総注入量 4800cc での試験は，注水・揚水孔が多孔質媒体槽の側方境界に近く，また，周囲に充填してあるガラスビーズの粒径が大きく透水係数も大きいことから，トレーサーが，不均質場範囲を抜けて，側方境界の焼結金属まで達してしまう可能性が高いことが予備試験で確認されたため，今回は実施しないこととした。

2.4　試験結果

今回，実施した 15 ケースの単一孔トレーサー試験について，トレーサープルーム時間変化の写真を図 2.3 から図 2.17 に示す。また，注水・揚水孔及びその周辺に設置した導電率計で測定したトレーサー濃度変化のグラフを図 2.18 から図 2.32 に示す。

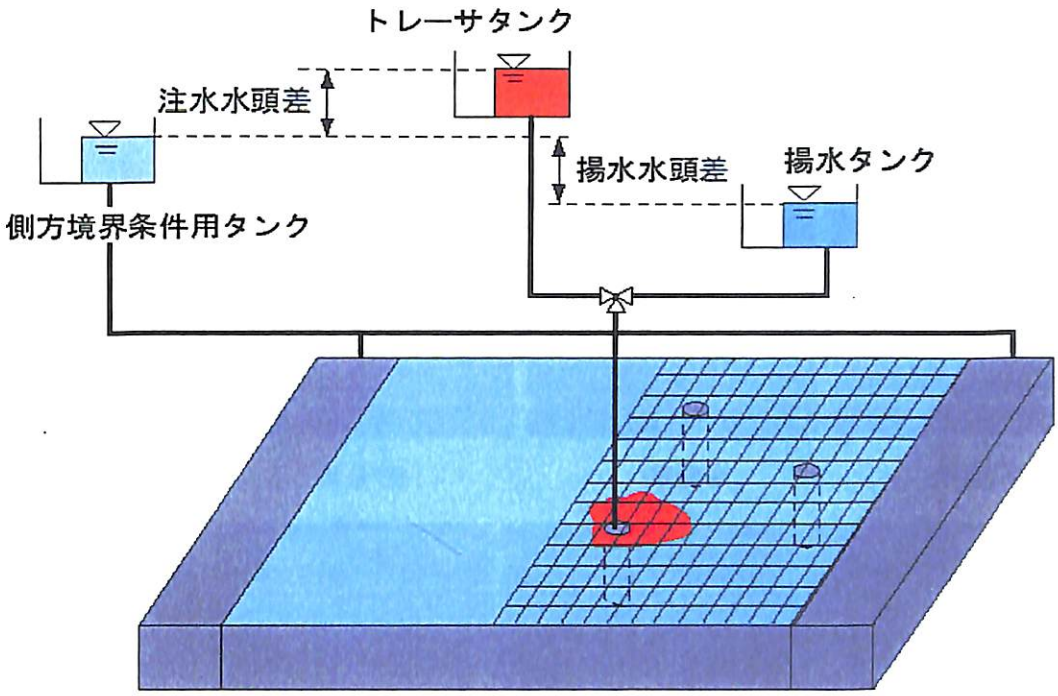


図 2.1　単一孔トレーサー試験の概念図

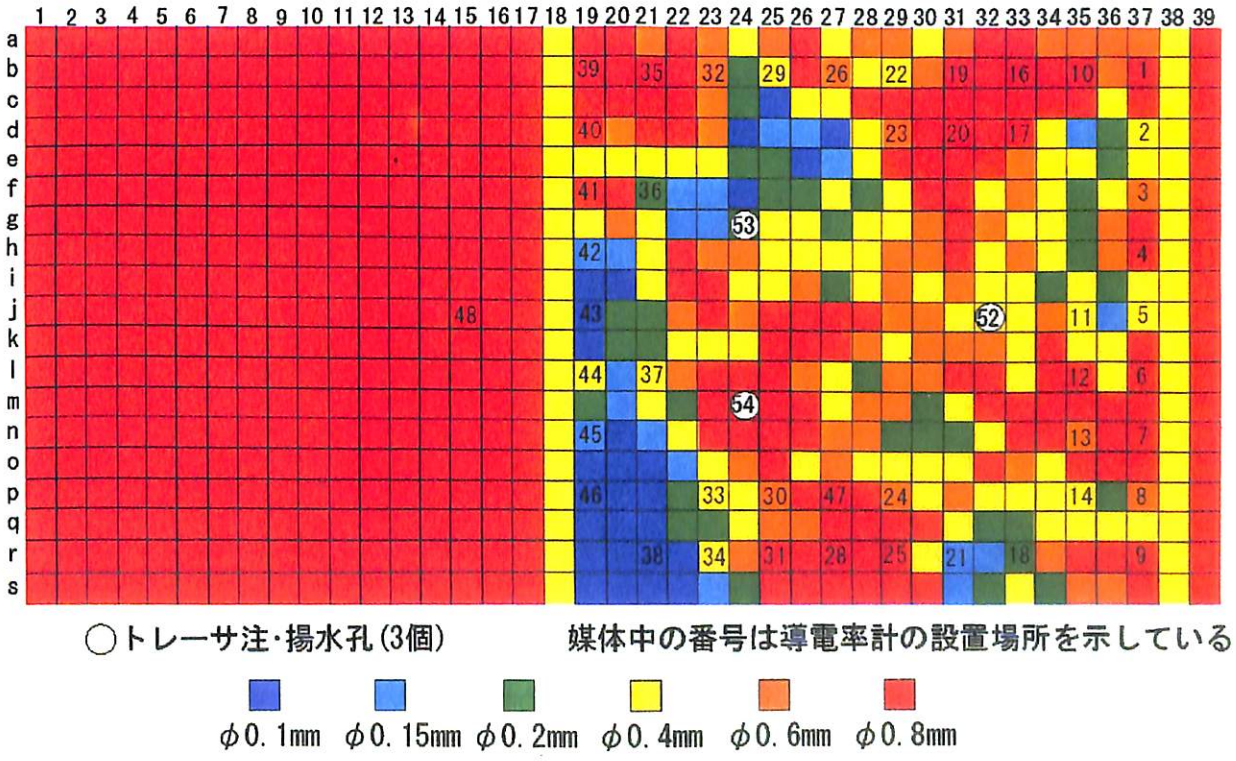


図 2.2　ガラスビーズ・導電率計配置図

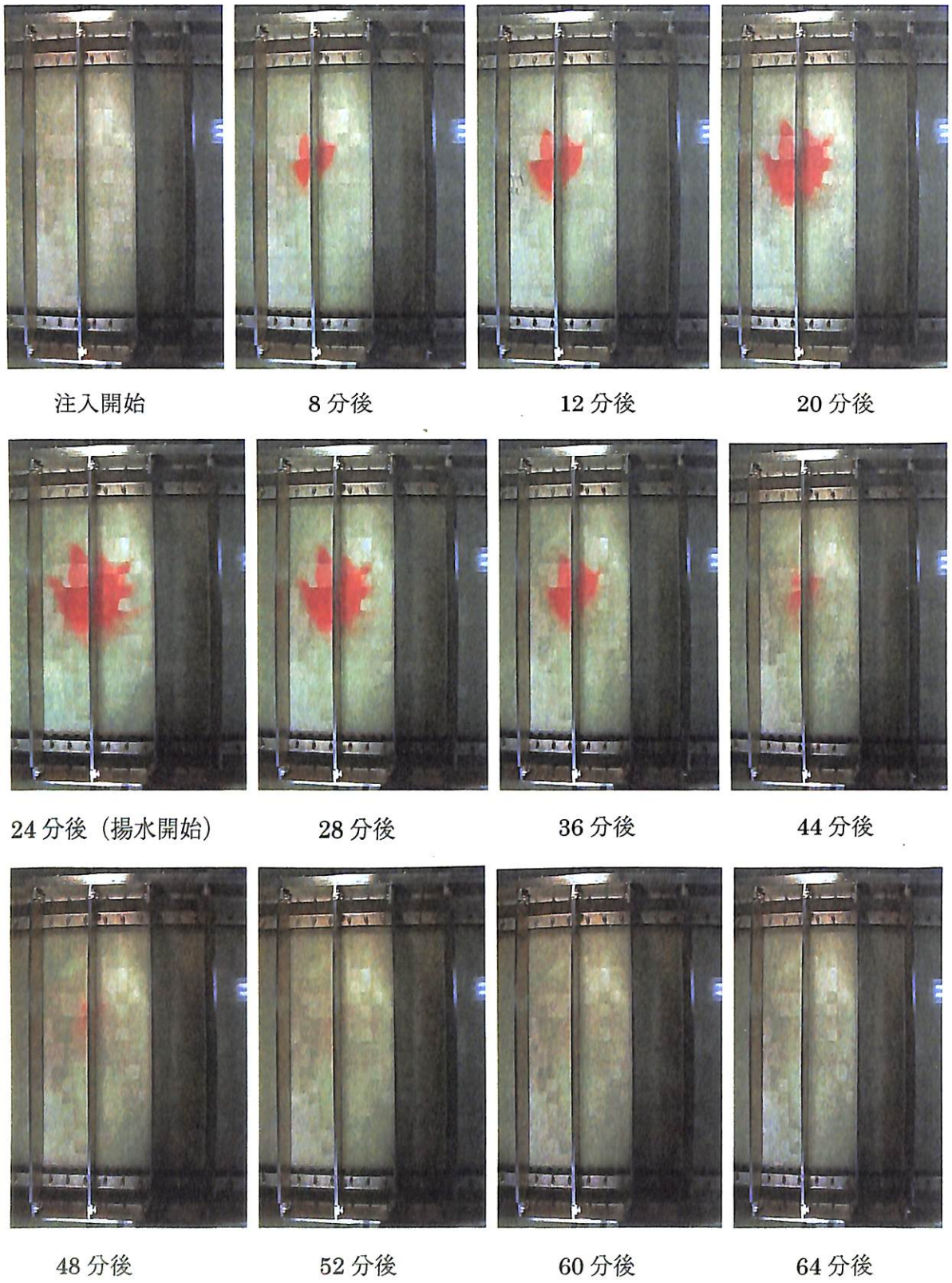


図 2.3　トレーサープルームの時間変化（単一孔試験 htd100.1）

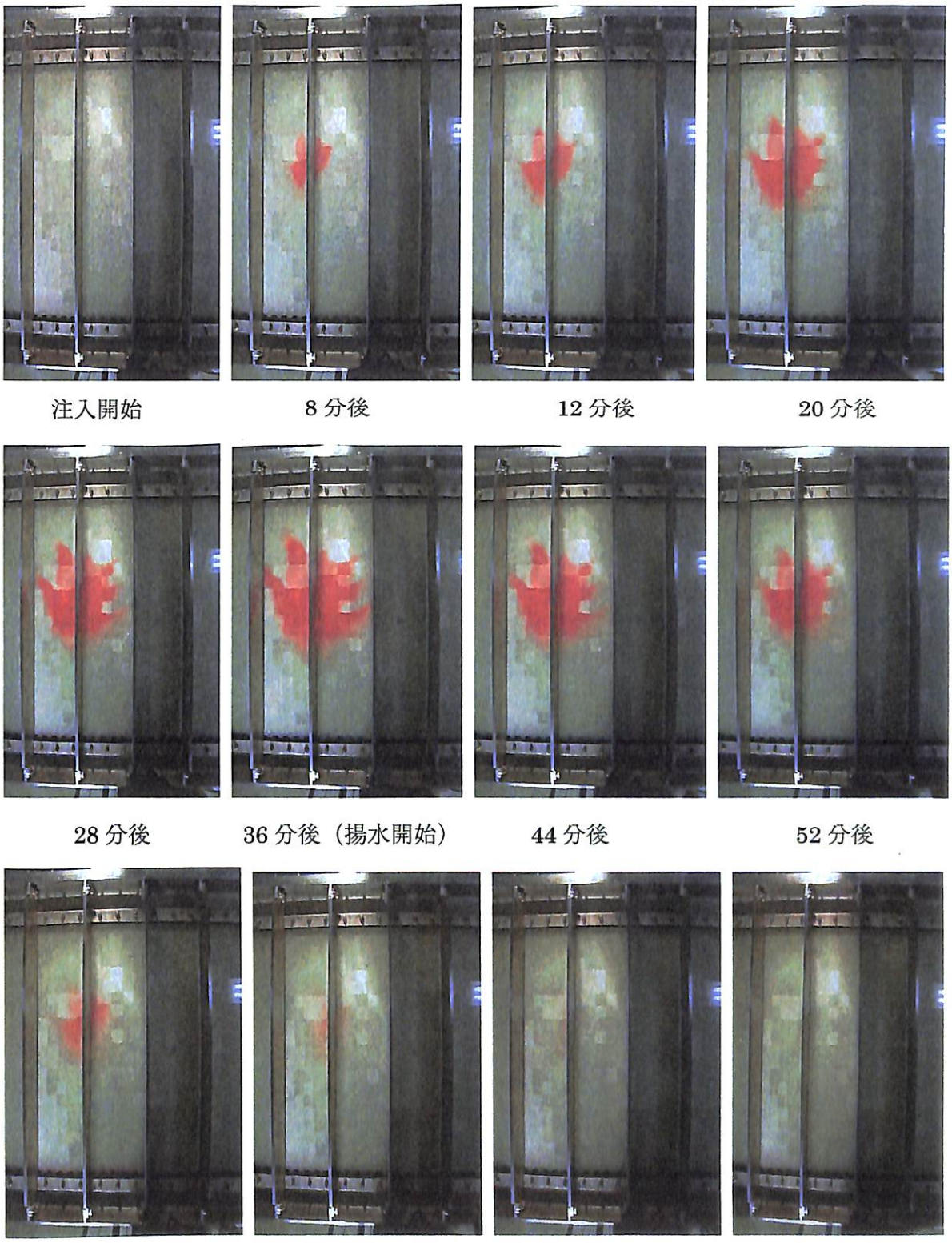


図 2.4　トレーサープルームの時間変化（単一孔試験 htd100.2）

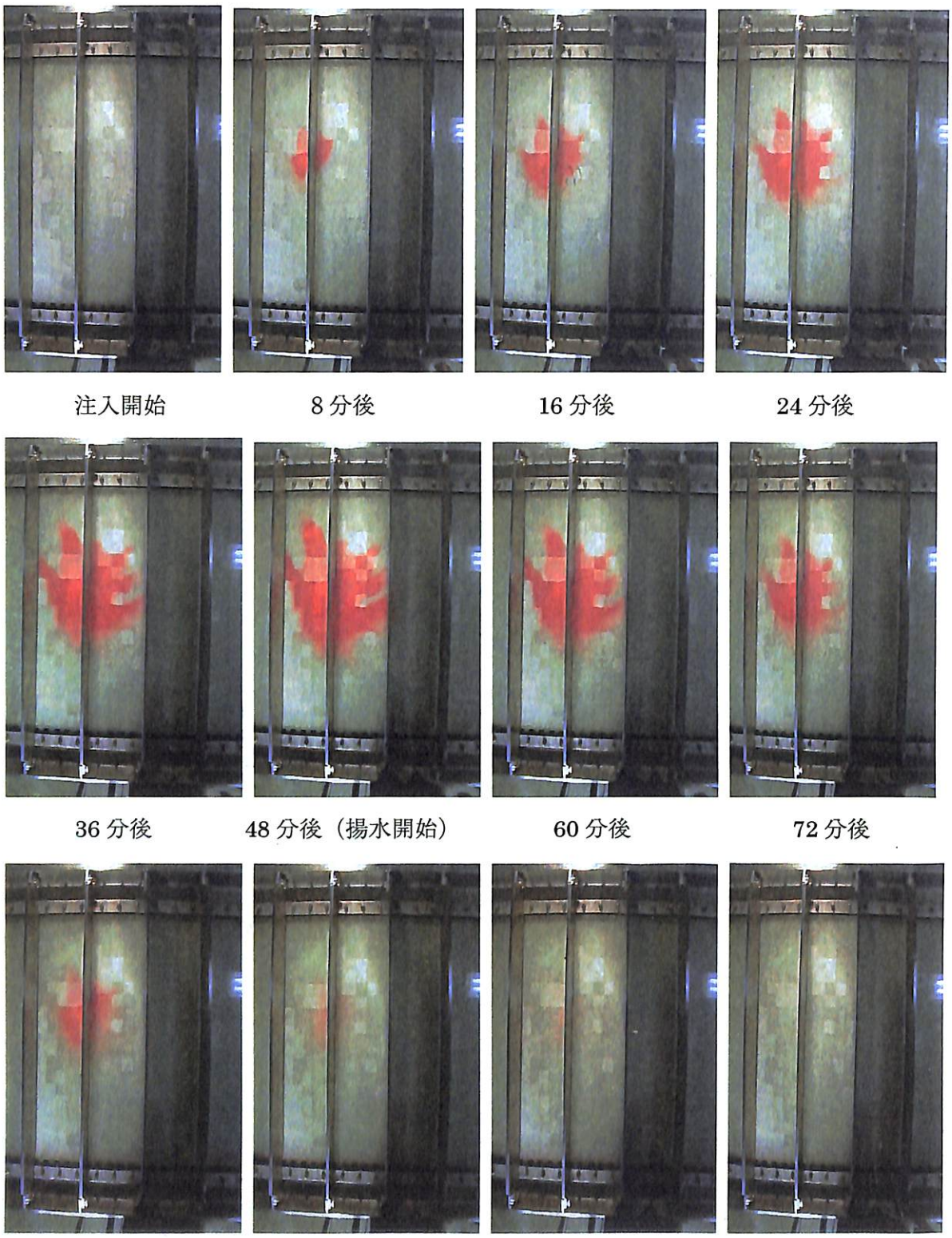


図 2.5　トレーサープルームの時間変化（単一孔試験 htd100.3）

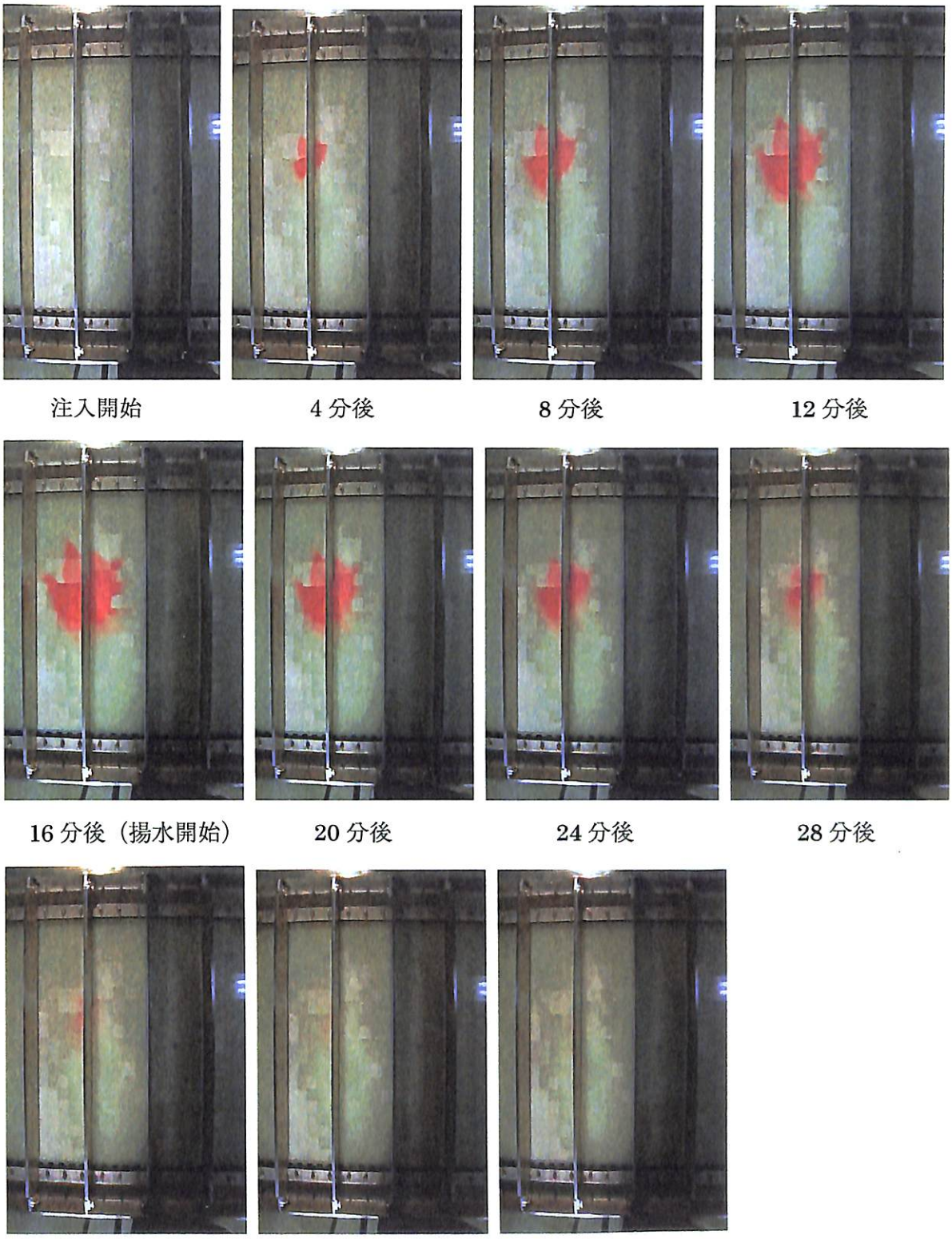


図 2.6　トレーサープルームの時間変化（単一孔試験 htd150.1）

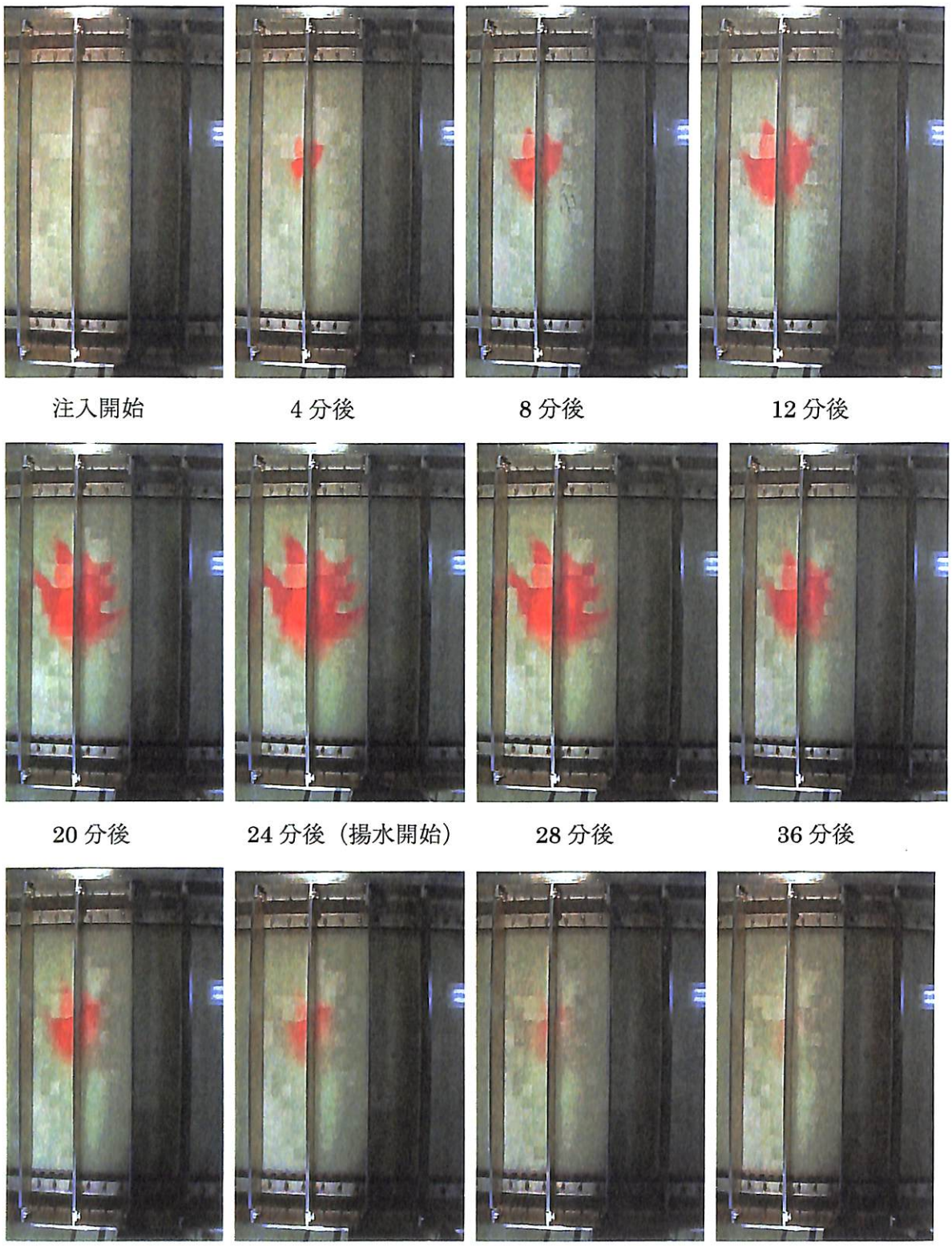


図 2.7　トレーサープルームの時間変化（単一孔試験 htd150.2）

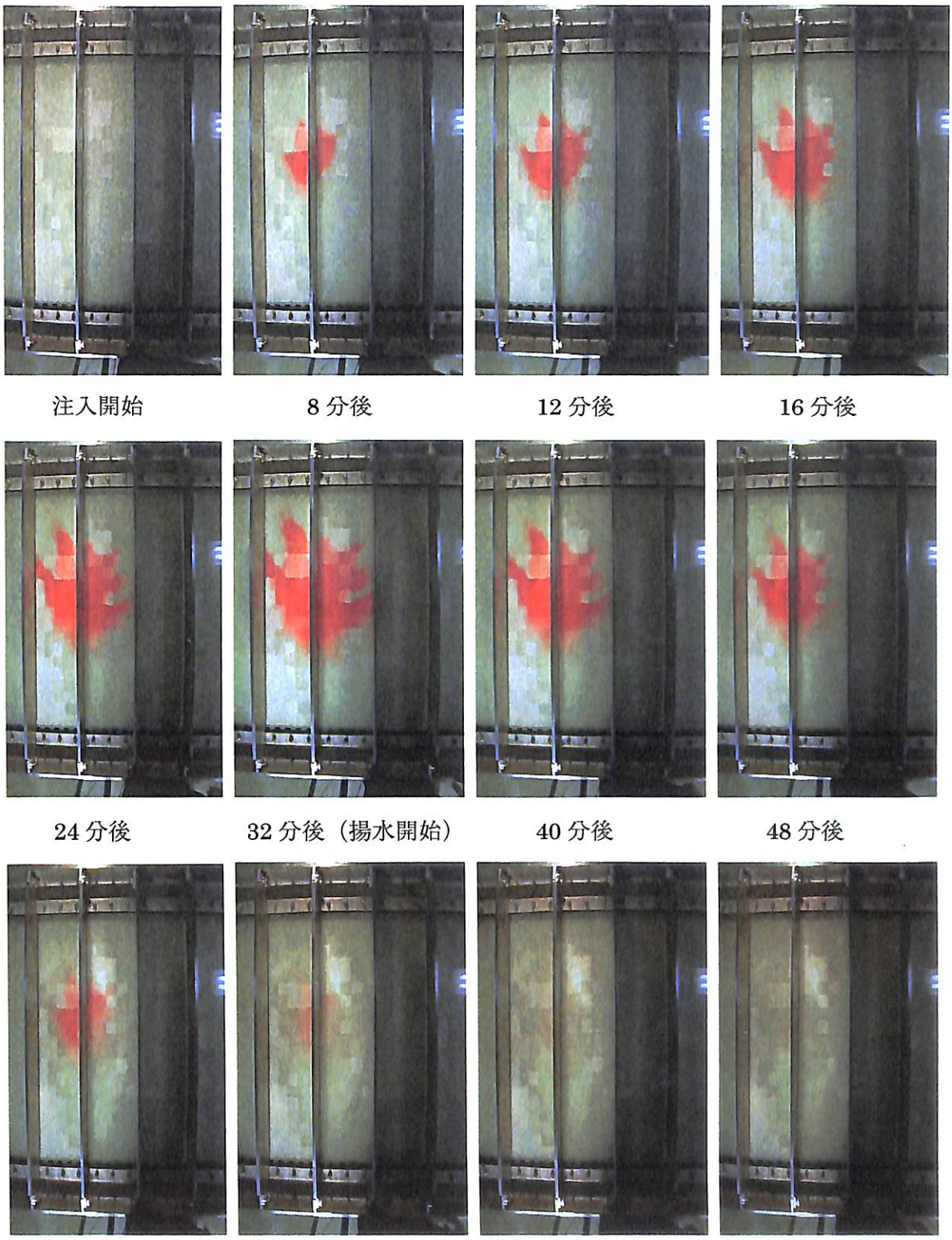


図 2.8　トレーサープルームの時間変化（単一孔試験 htd150.3）

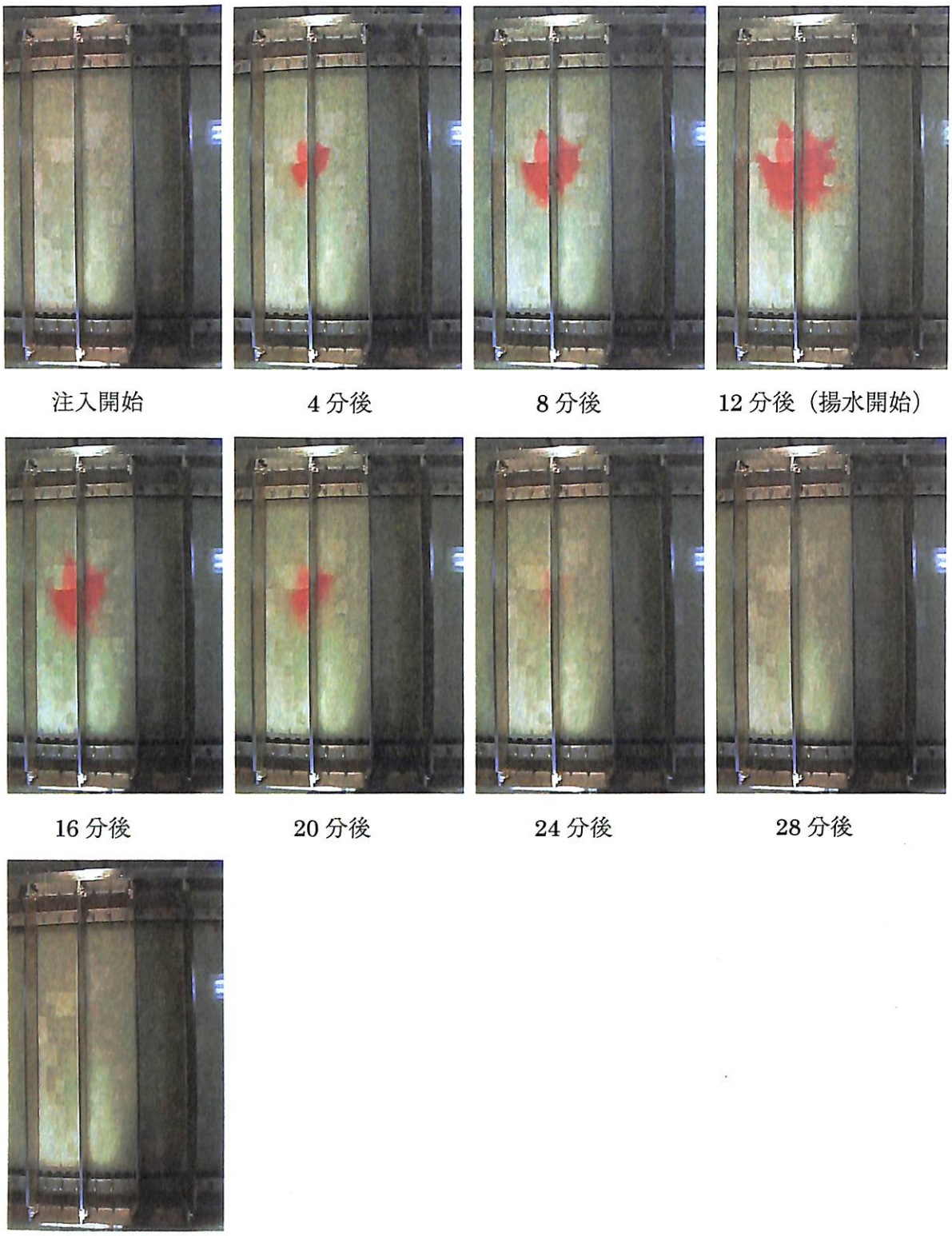


図 2.9　トレーサープルームの時間変化（単一孔試験 htd200.1）

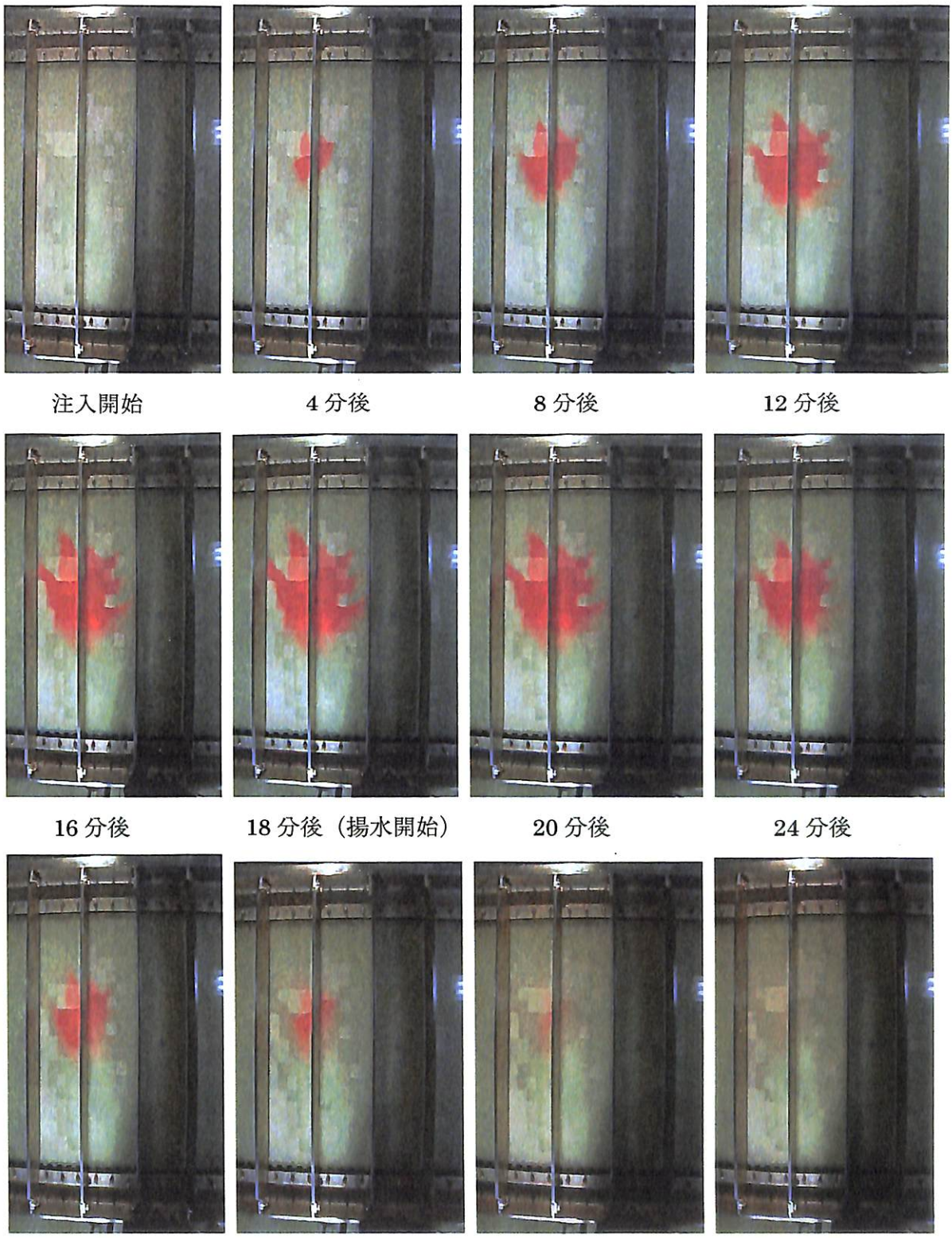


図 2.10　トレーサープルームの時間変化（単一孔試験 htd200.2）

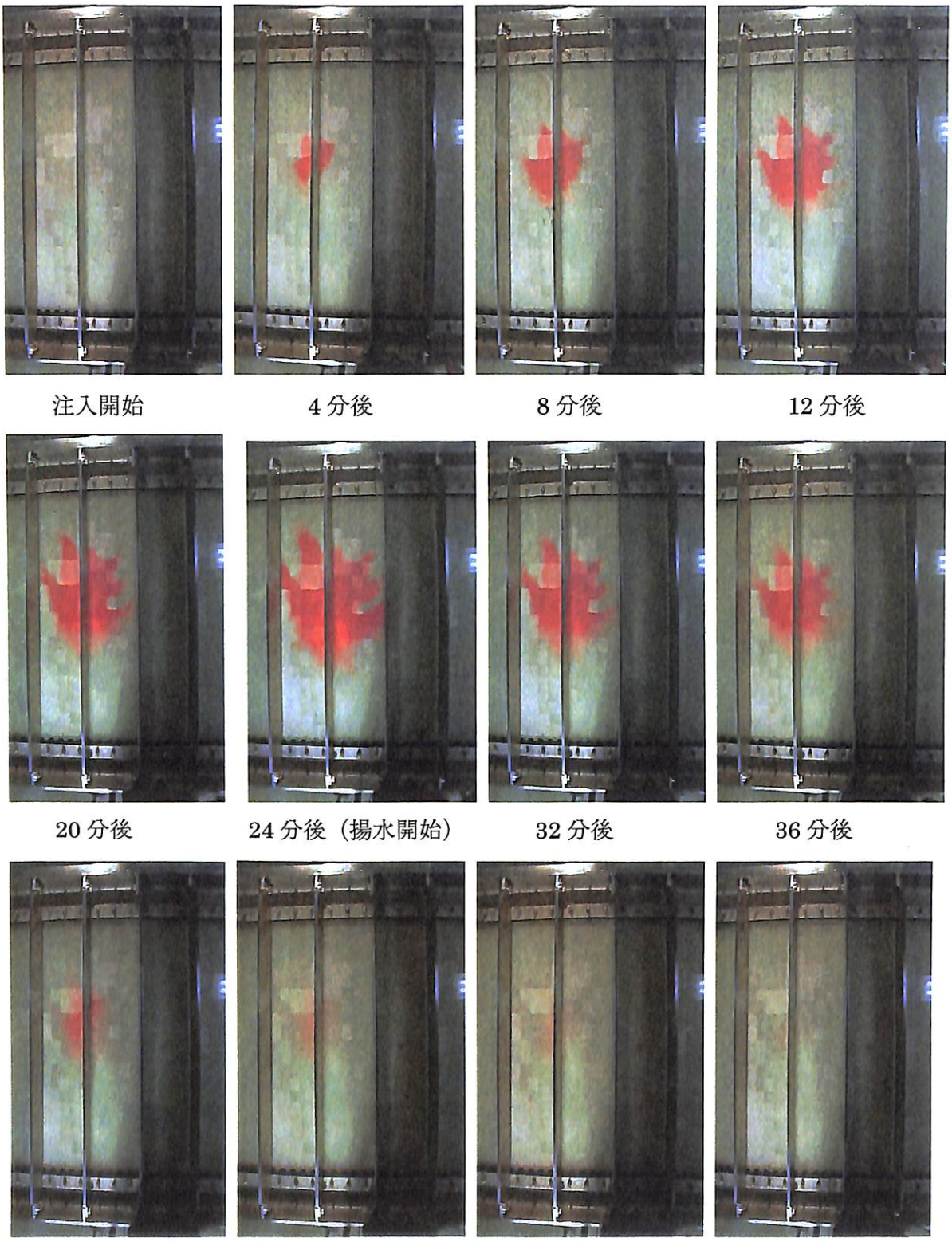


図 2.11　トレーサープルームの時間変化（単一孔試験 htd200.3）

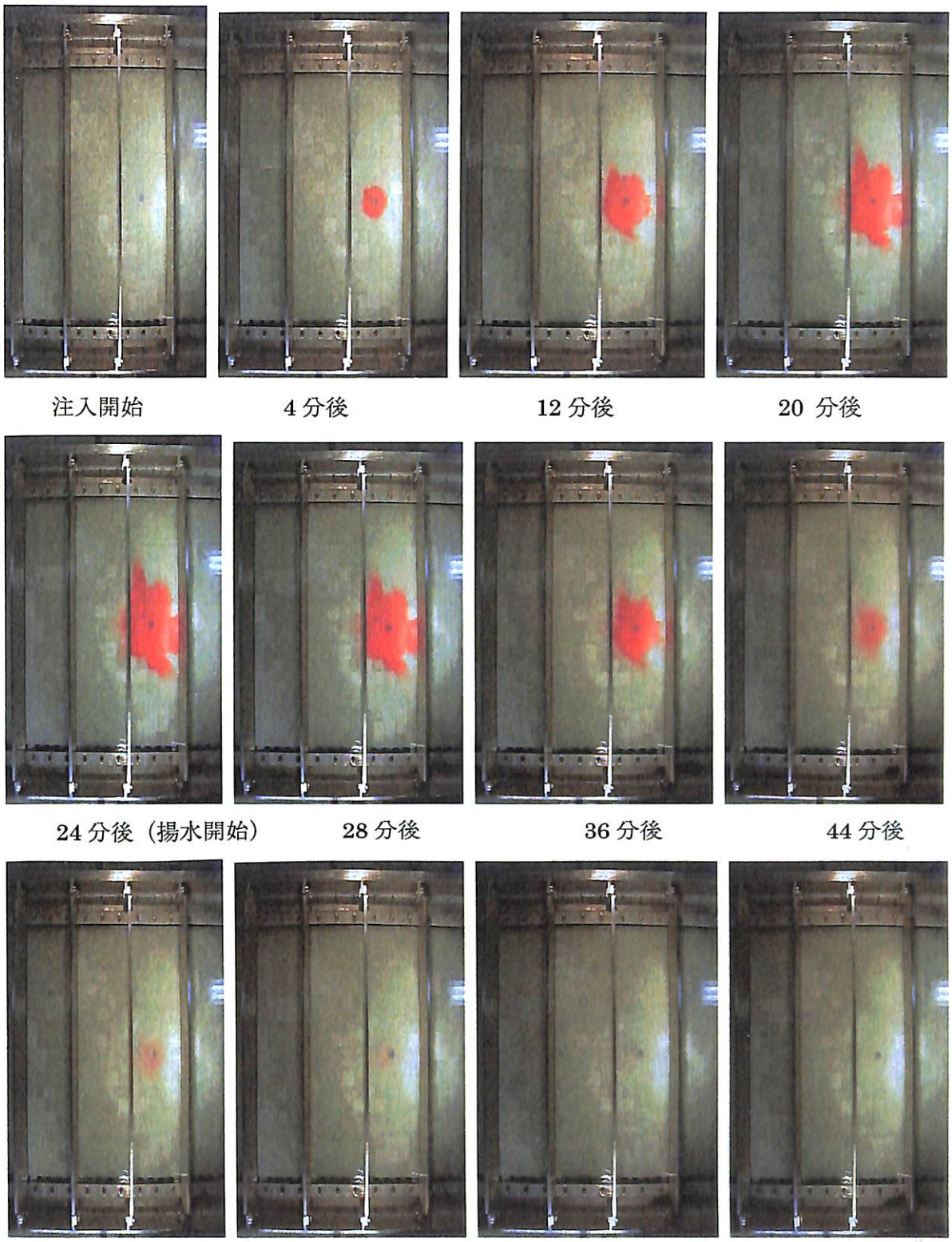


図 2.12　トレーサープルームの時間変化（単一孔試験 hte100.1）

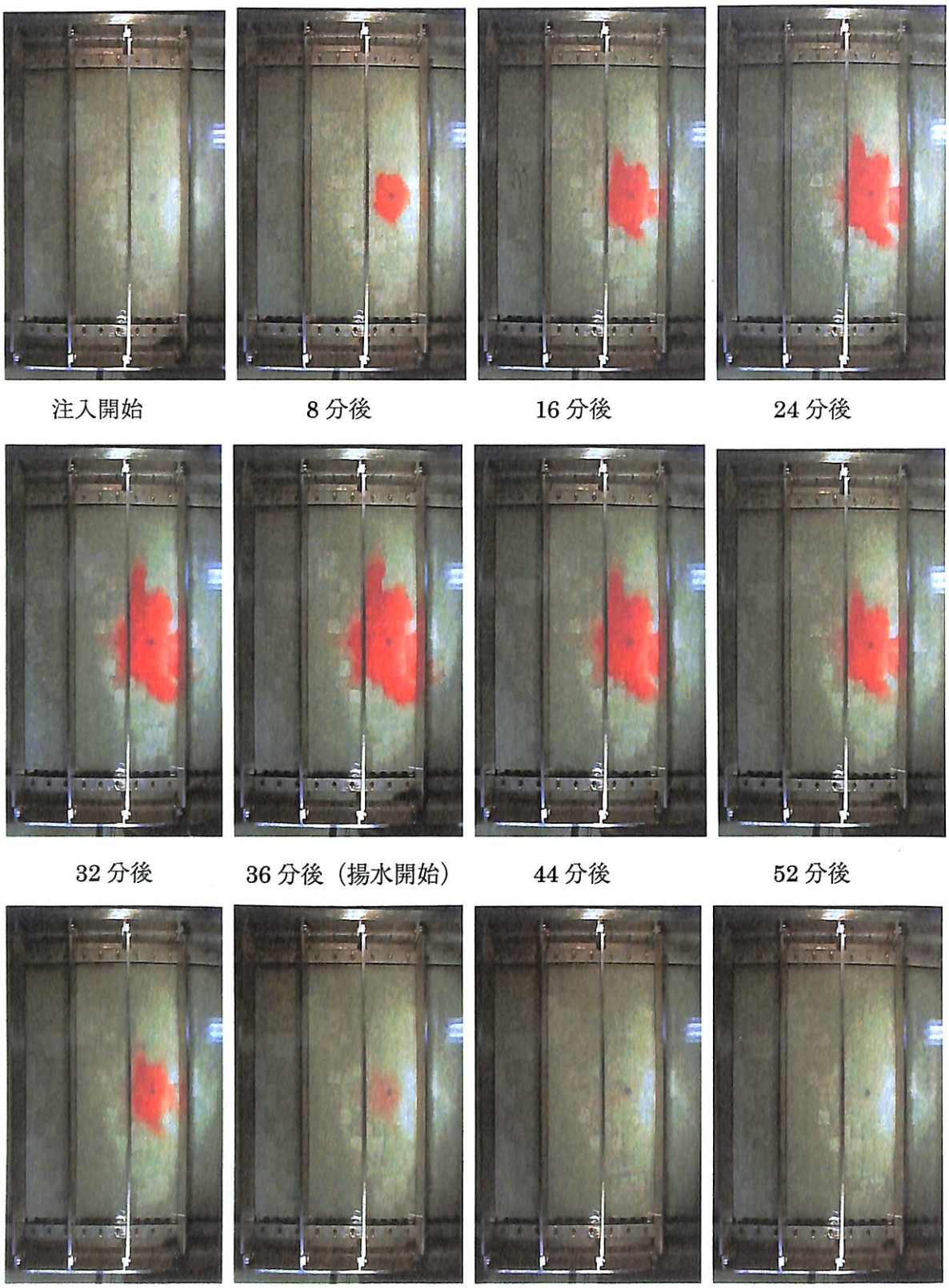


図 2.13　トレーサープルームの時間変化（単一孔試験 hte100.2）

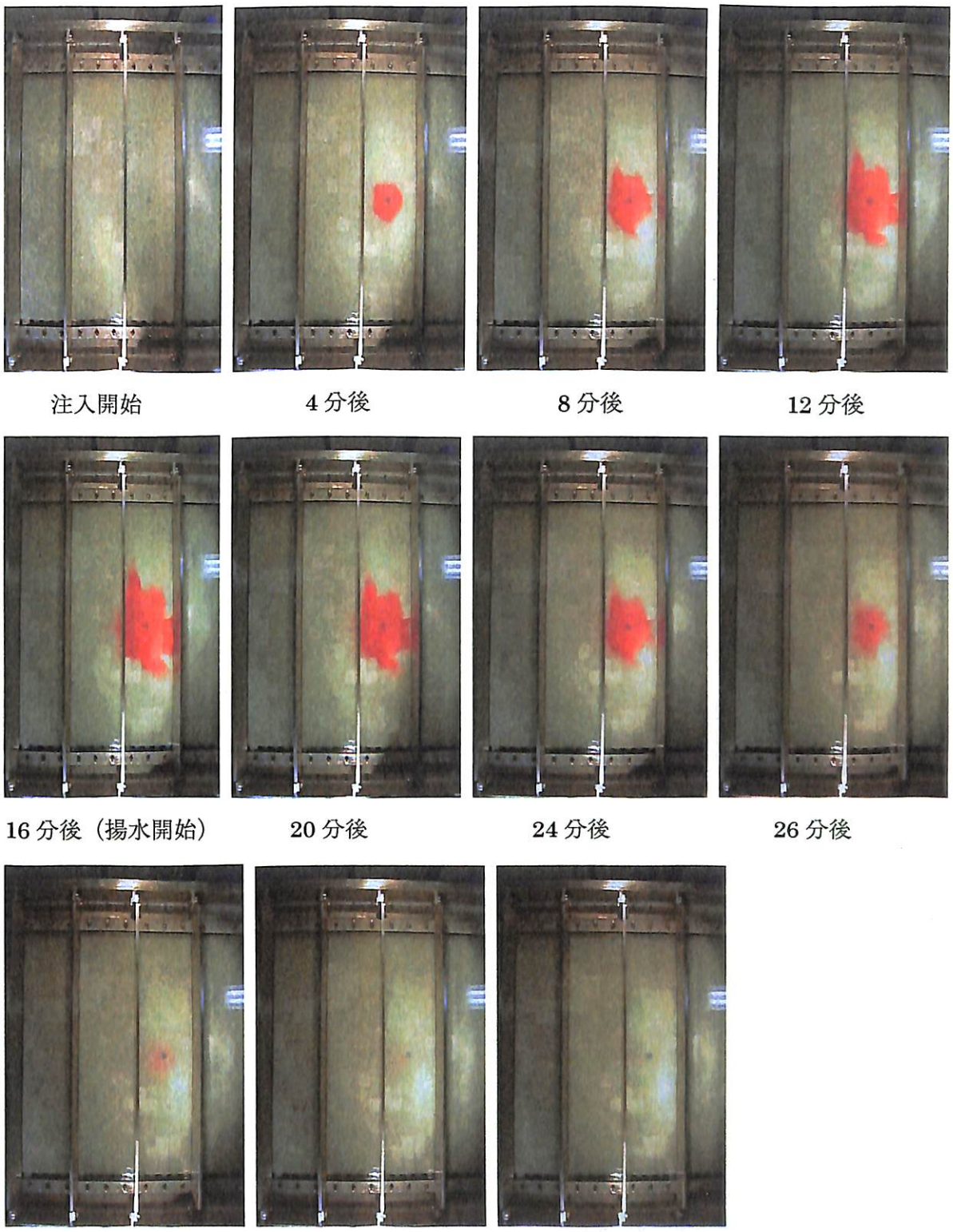


図 2.14　トレーサープルームの時間変化（単一孔試験 hte150.1）

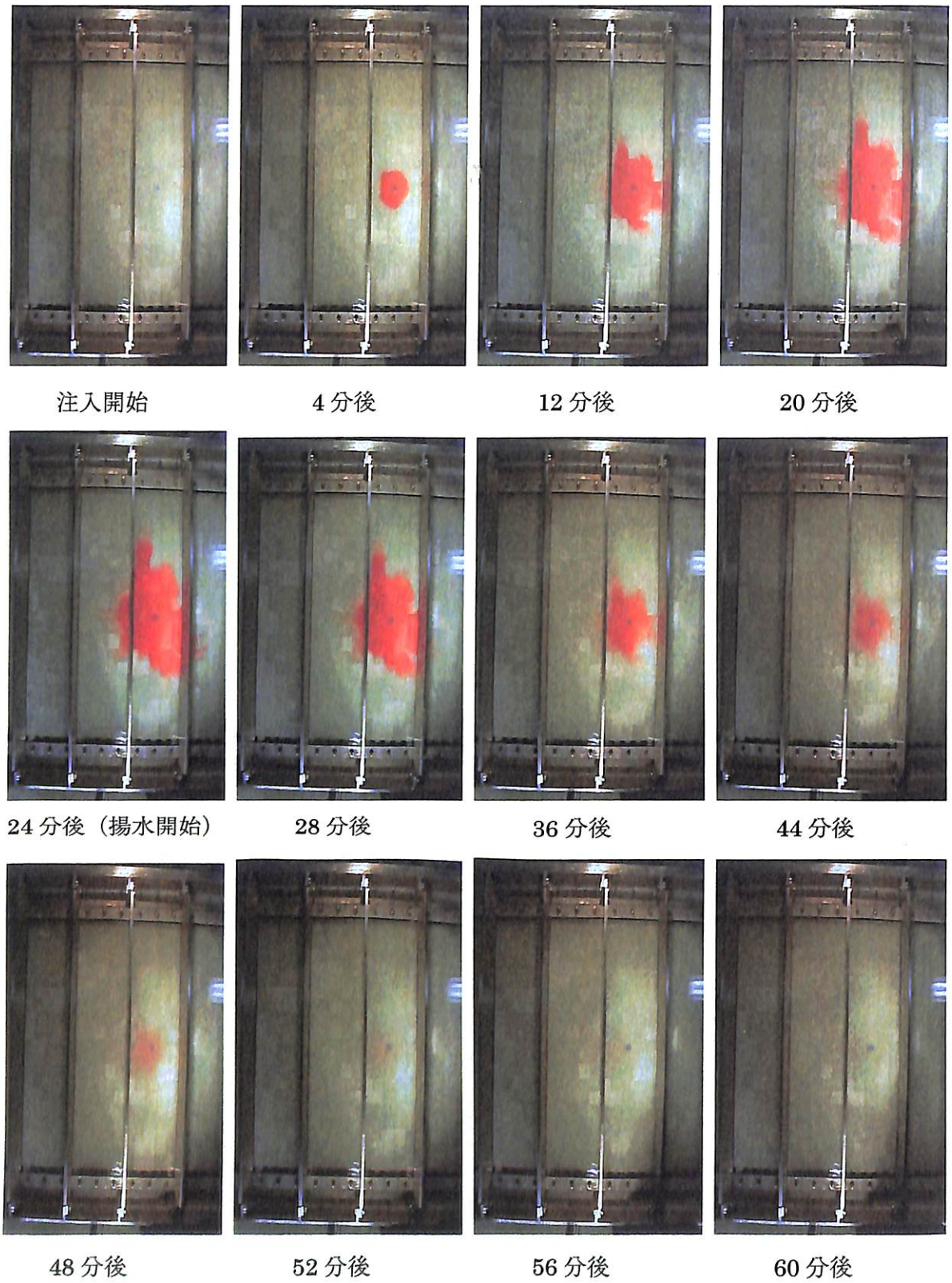


図 2.15　トレーサープルームの時間変化（単一孔試験 hte150.2）

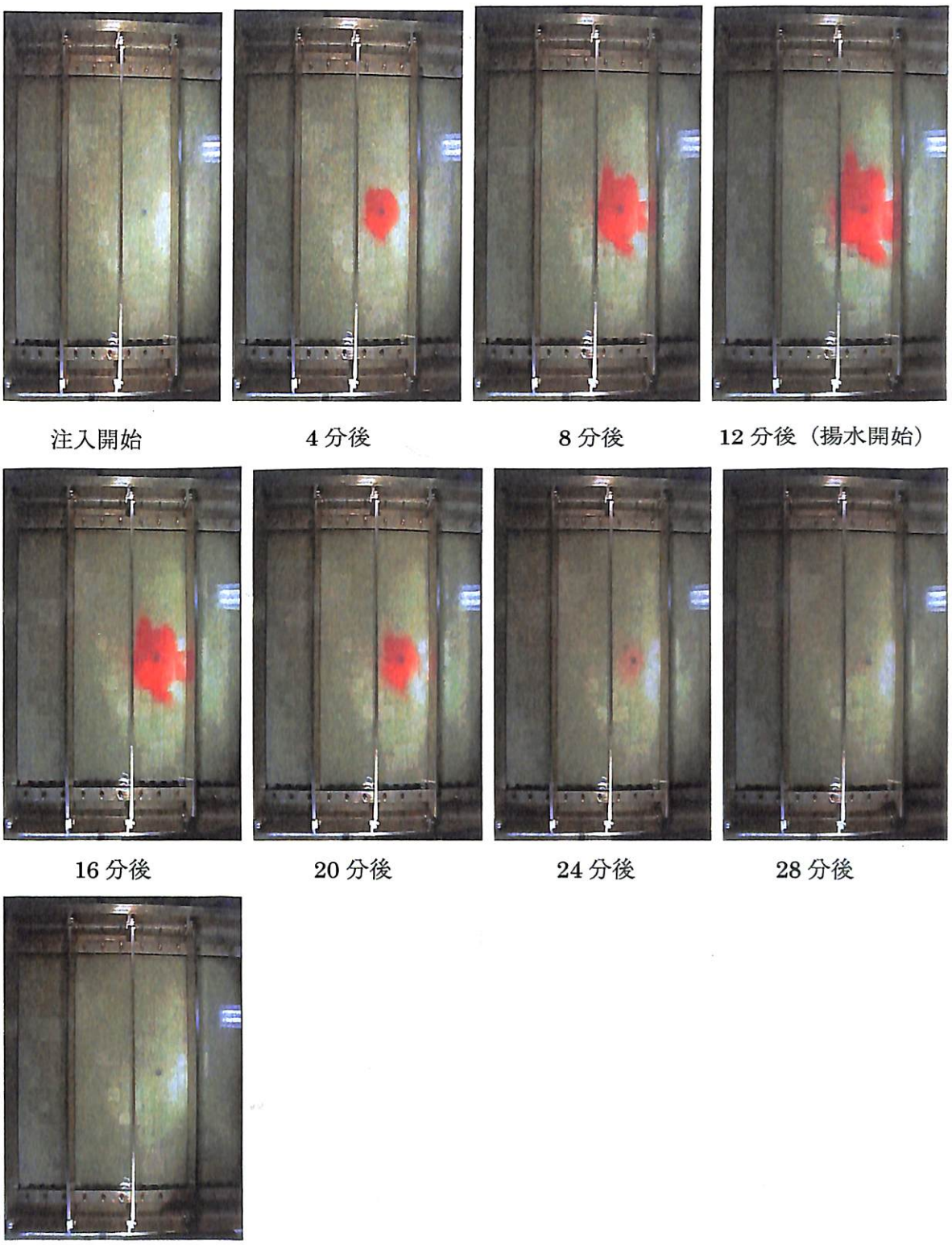


図 2.16　トレーサープルームの時間変化（単一孔試験 hte200.1）

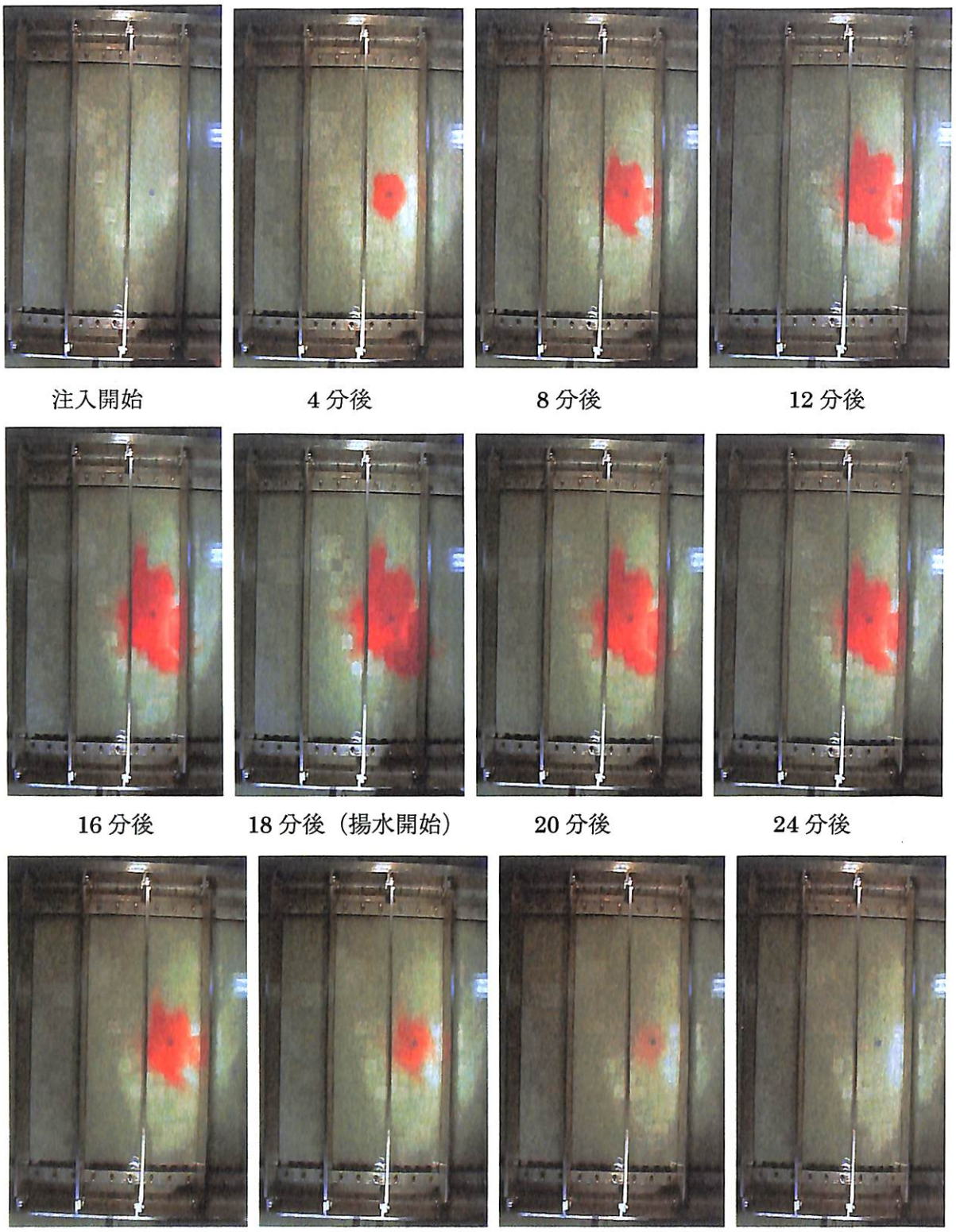


図 2.17　トレーサープルームの時間変化（単一孔試験 hte200.2）

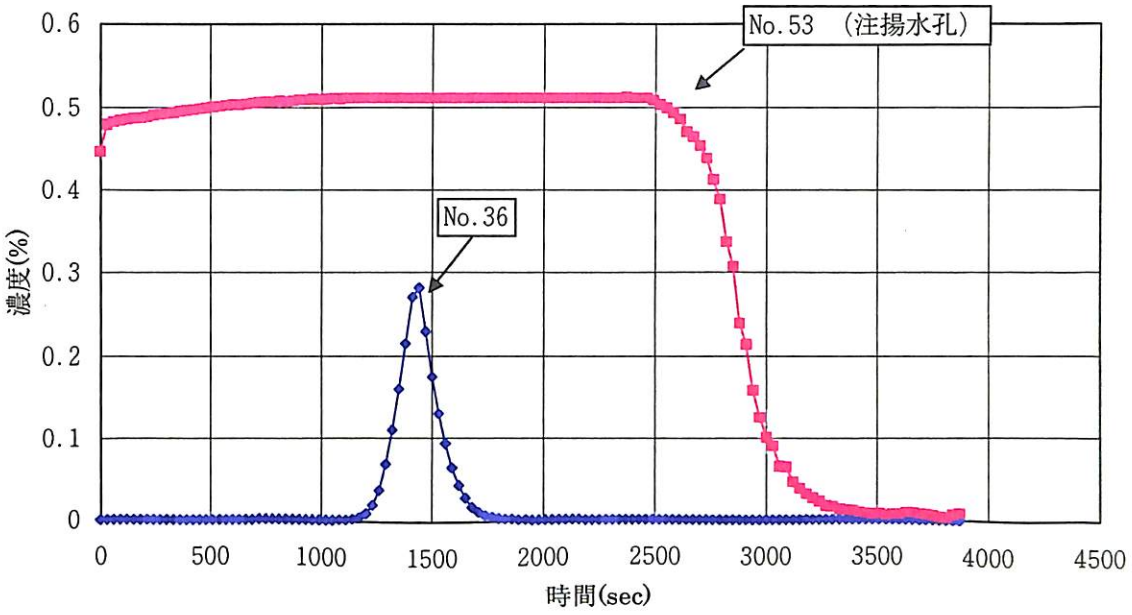


図 2.18 注水・揚水孔及びその周辺でのトレーサー濃度変化(単一孔試験 htd100.1)

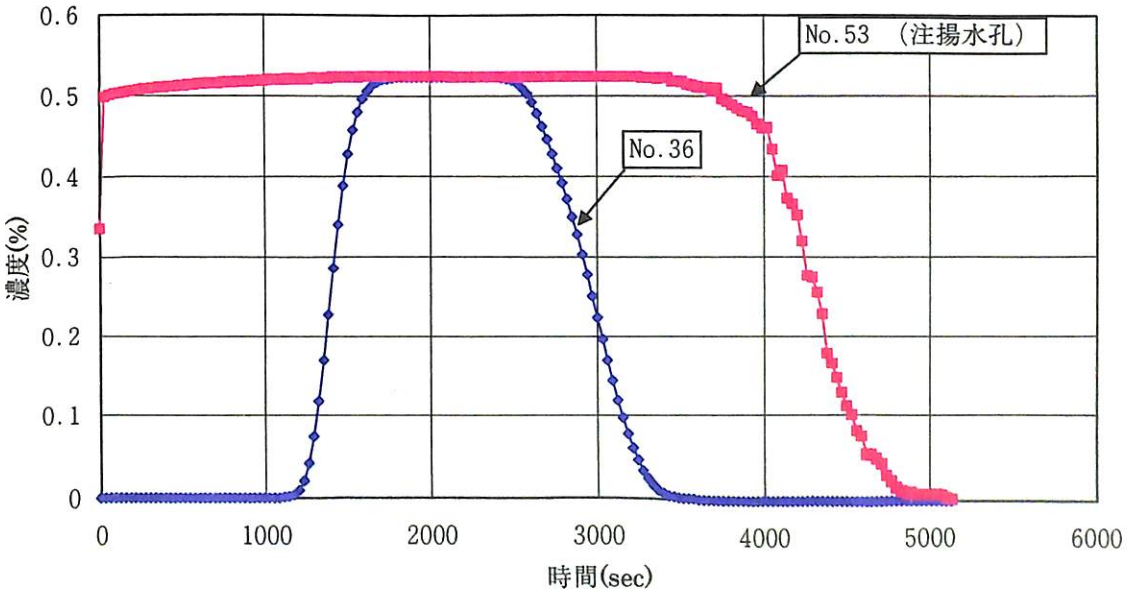


図 2.19 注水・揚水孔及びその周辺でのトレーサー濃度変化(単一孔試験 htd100.2)

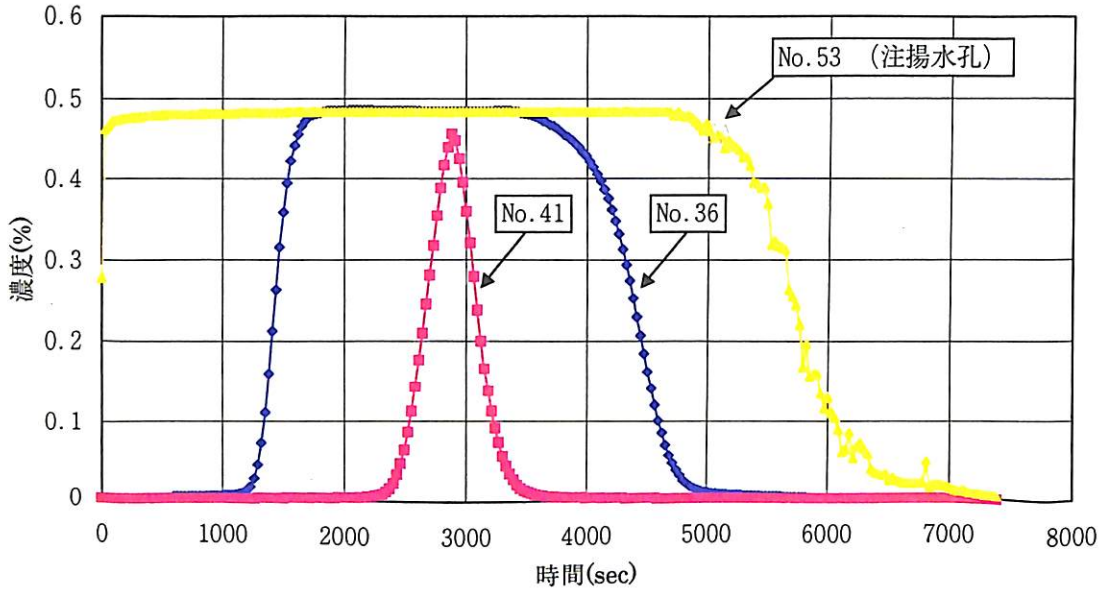


図 2.20 注水・揚水孔及びその周辺でのトレーサー濃度変化(単一孔試験 htd100.3)

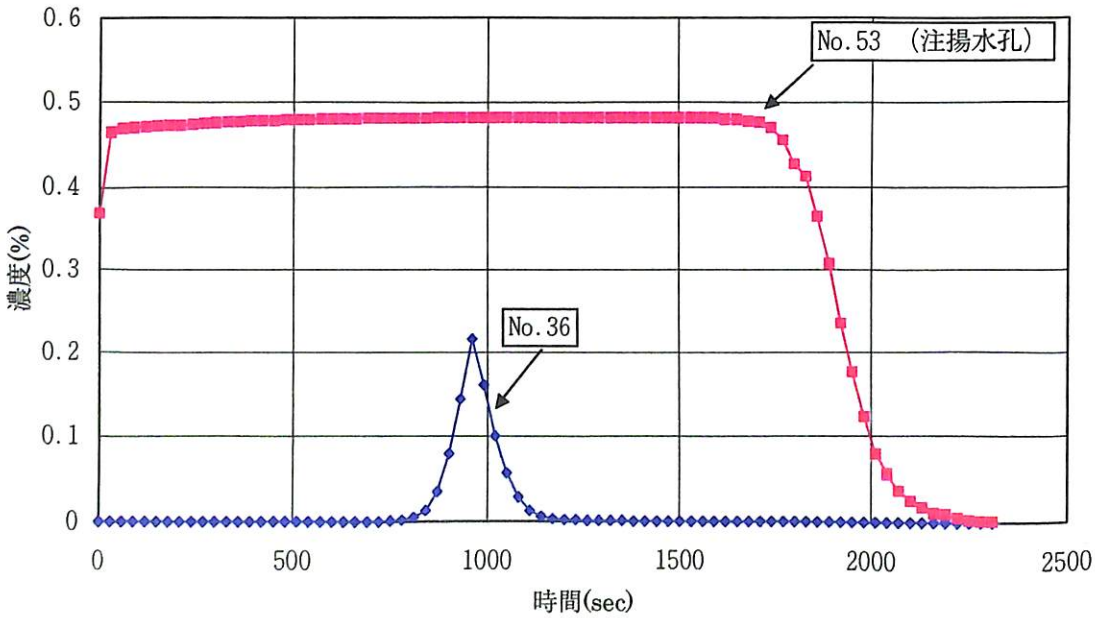


図 2.21 注水・揚水孔及びその周辺でのトレーサー濃度変化(単一孔試験 htd150.1)

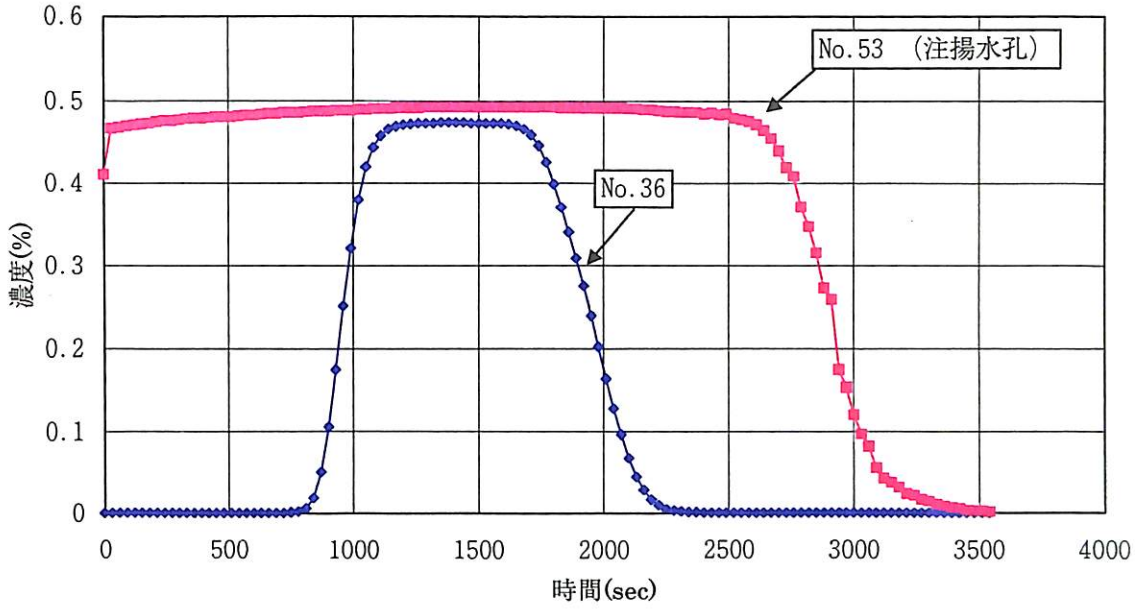


図 2.22 注水・揚水孔及びその周辺でのトレーサー濃度変化(単一孔試験 htd150.2)

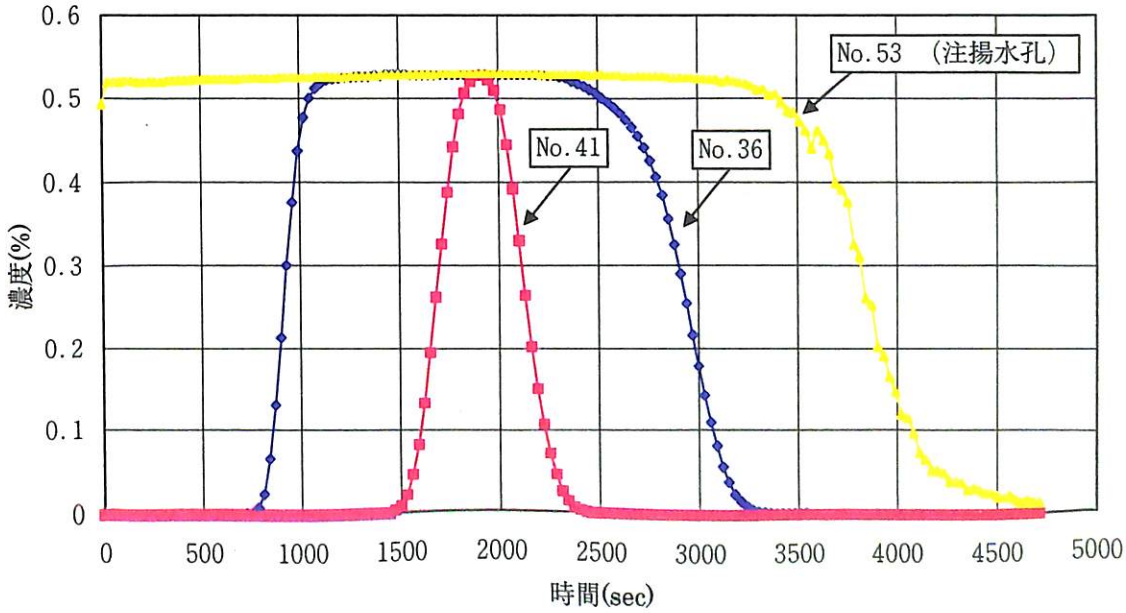


図 2.23 注水・揚水孔及びその周辺でのトレーサー濃度変化(単一孔試験 htd150.3)

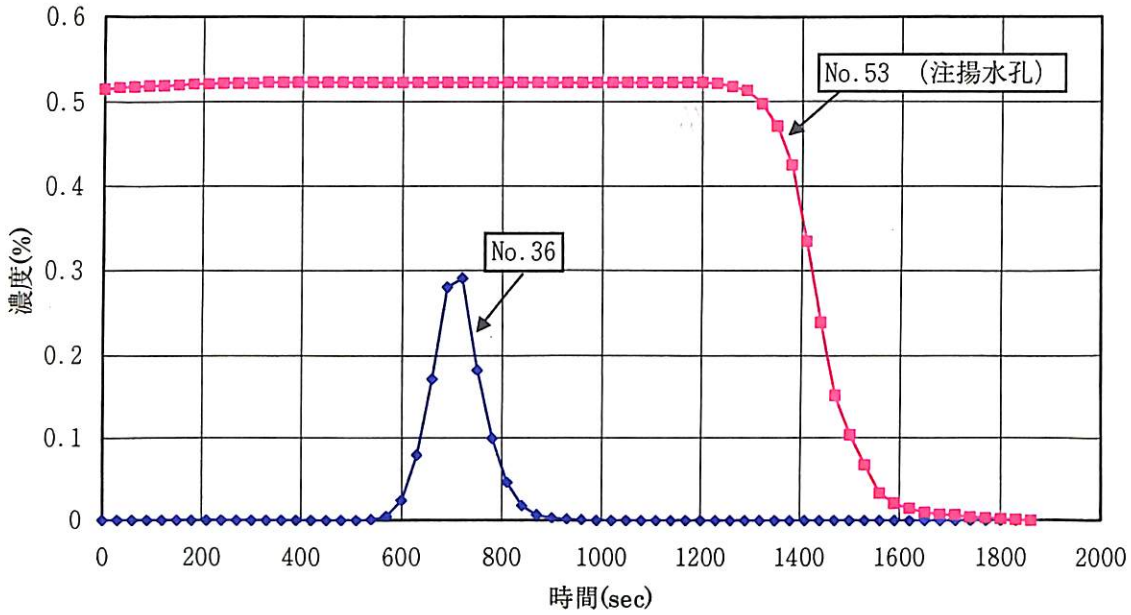


図 2.24 注水・揚水孔及びその周辺でのトレーサー濃度変化(単一孔試験 htd200.1)

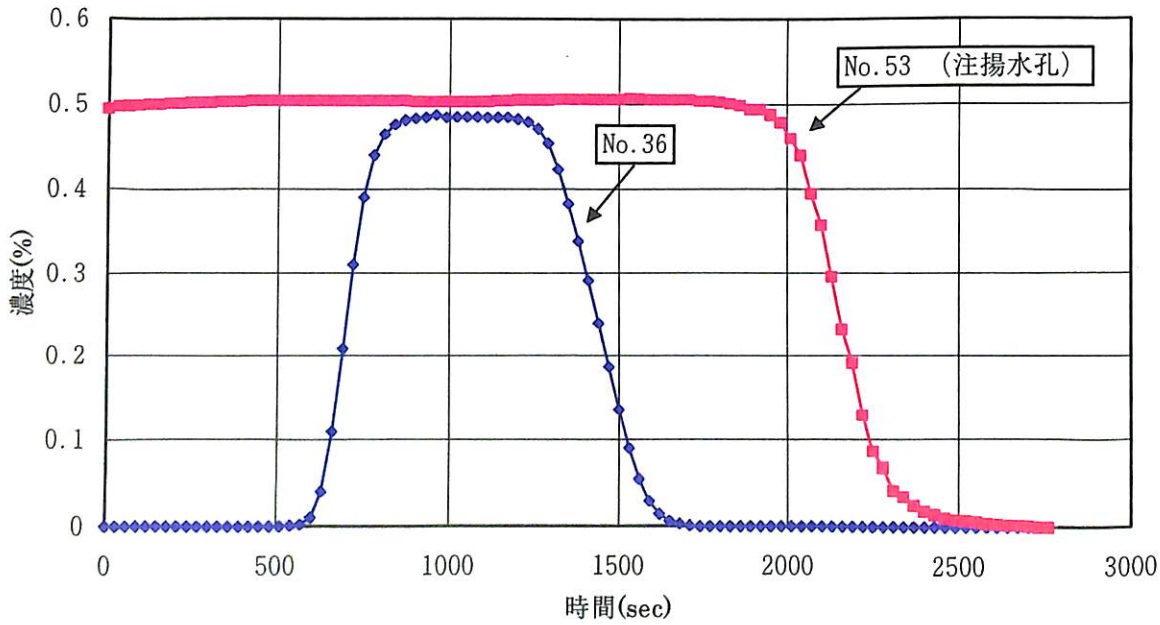


図 2.25 注水・揚水孔及びその周辺でのトレーサー濃度変化(単一孔試験 htd200.2)

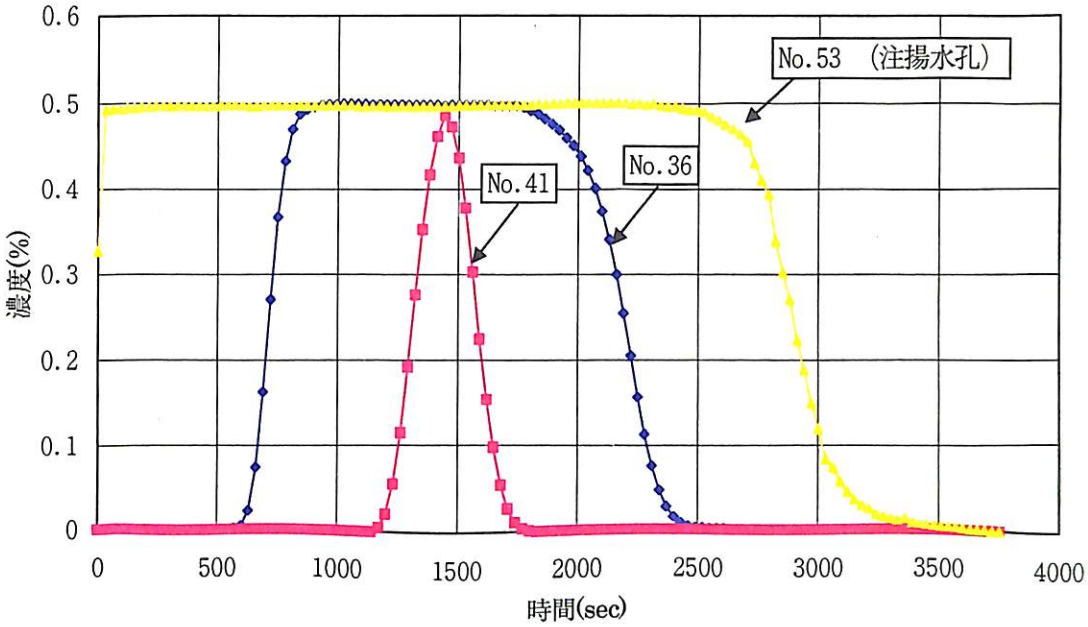


図 2.26 注水・揚水孔及びその周辺でのトレーサー濃度変化(単一孔試験 htd200.3)

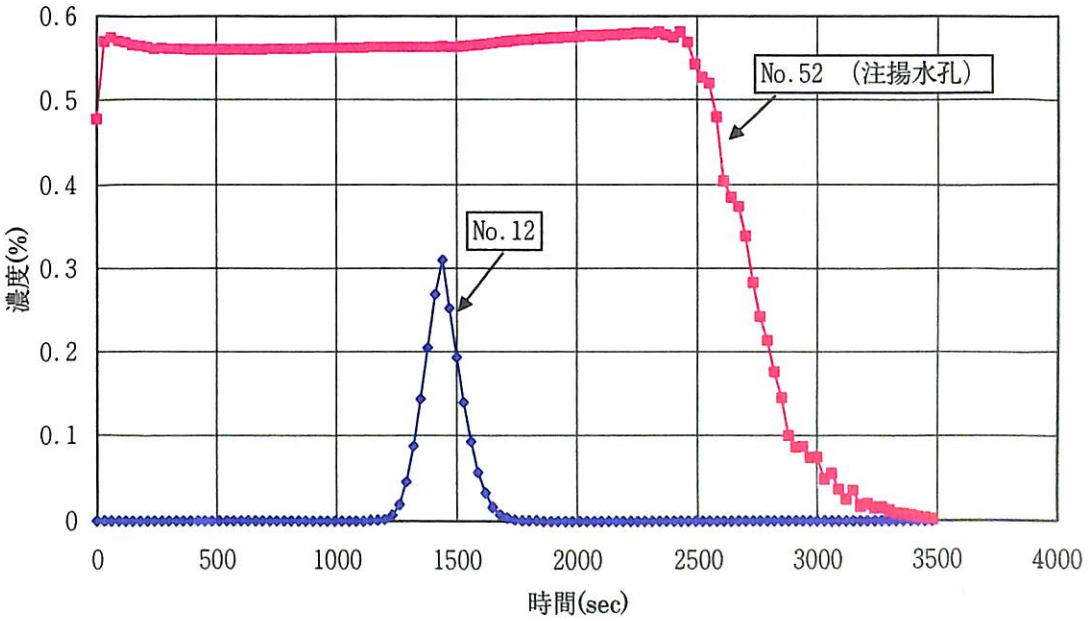


図 2.27 注水・揚水孔及びその周辺でのトレーサー濃度変化(単一孔試験 hte100.1)

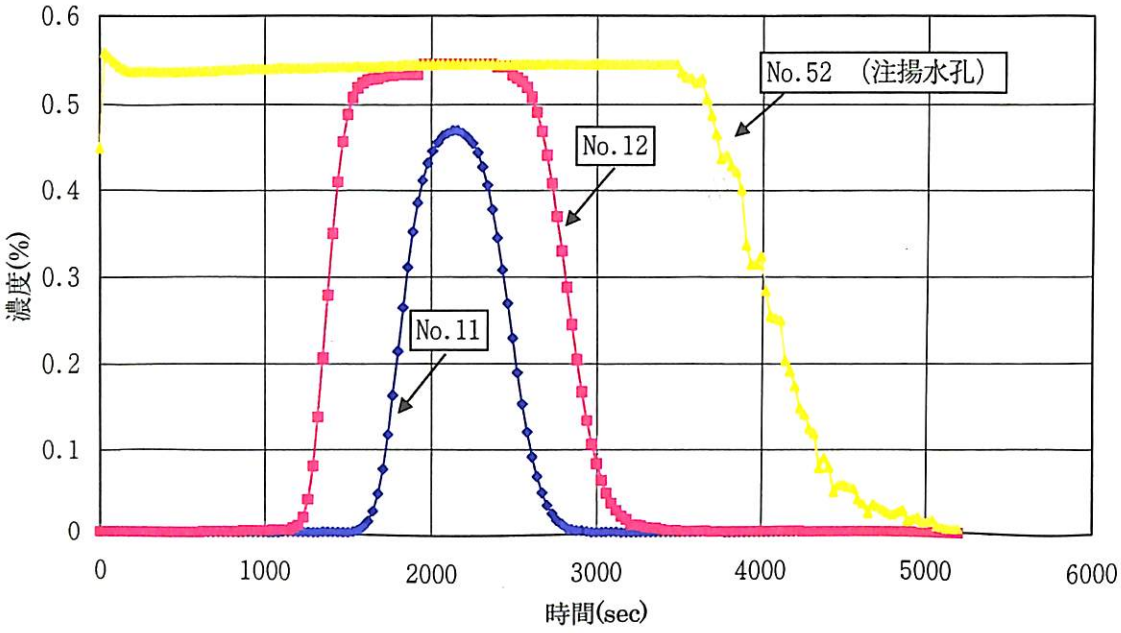


図 2.28 注水・揚水孔及びその周辺でのトレーサー濃度変化(単一孔試験 hte100.2)

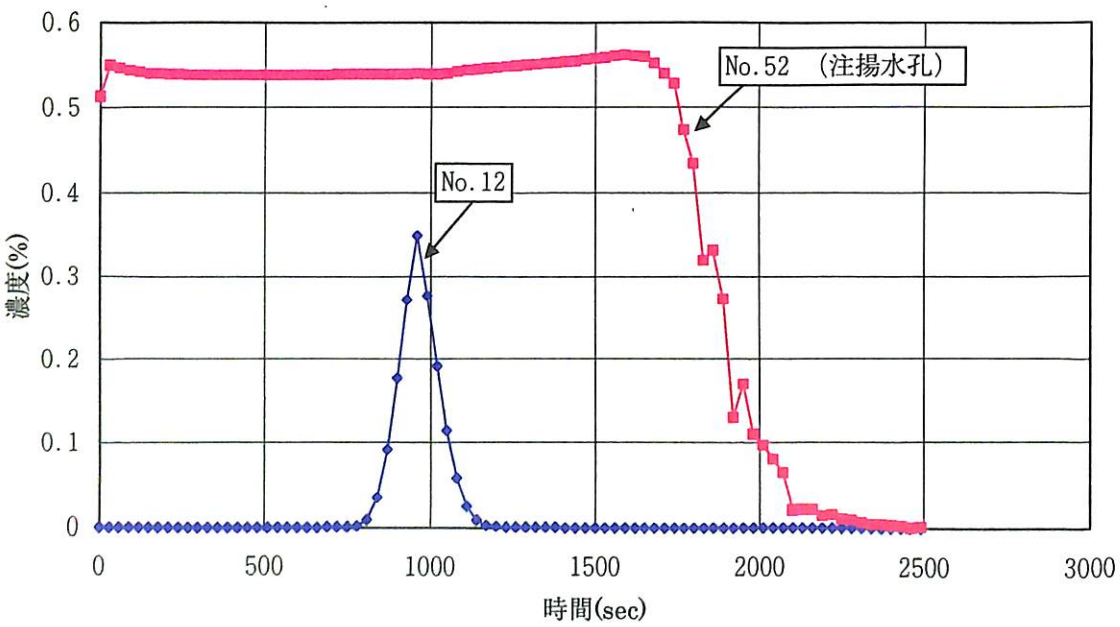


図 2.29 注水・揚水孔及びその周辺でのトレーサー濃度変化(単一孔試験 hte150.1)

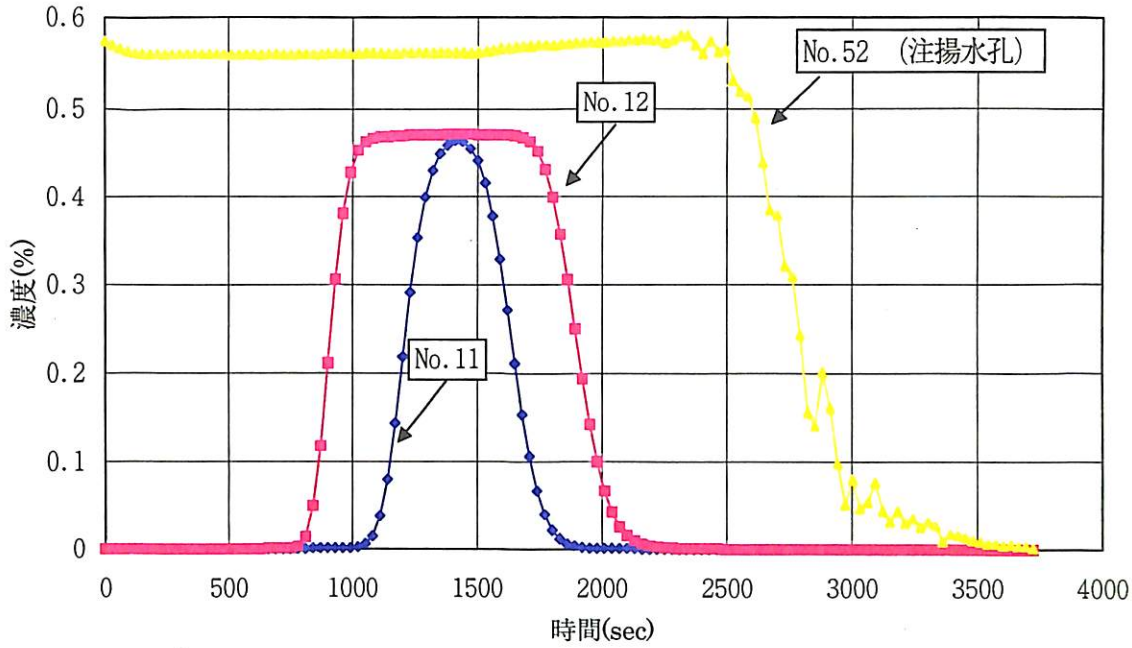


図 2.30 注水・揚水孔及びその周辺でのトレーサー濃度変化(単一孔試験 hte150.2)

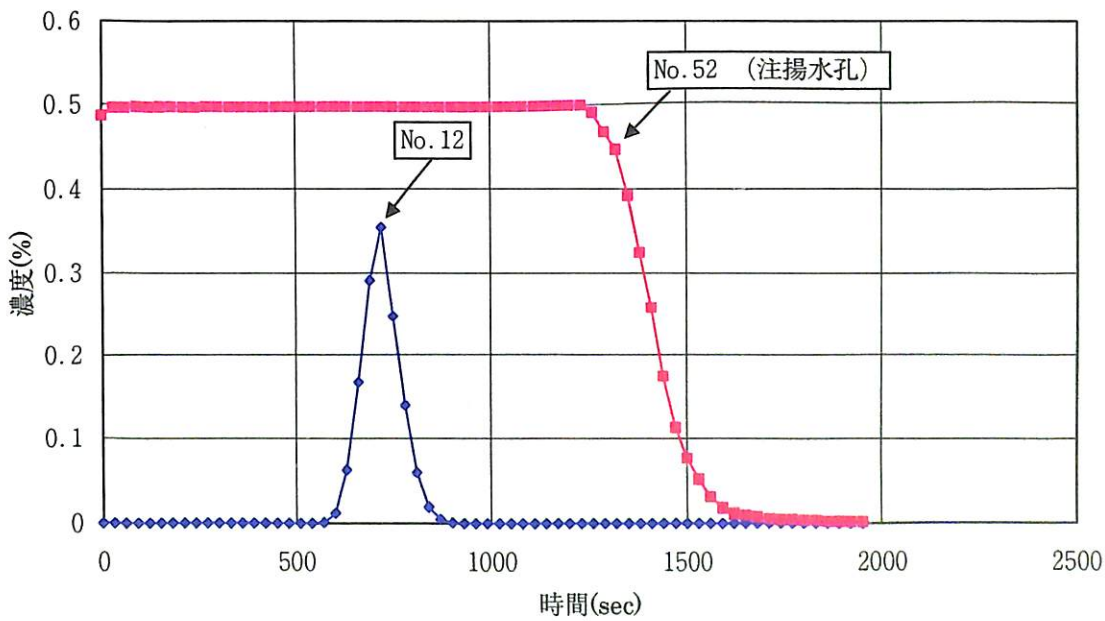


図 2.31 注水・揚水孔及びその周辺でのトレーサー濃度変化(単一孔試験 hte200.1)

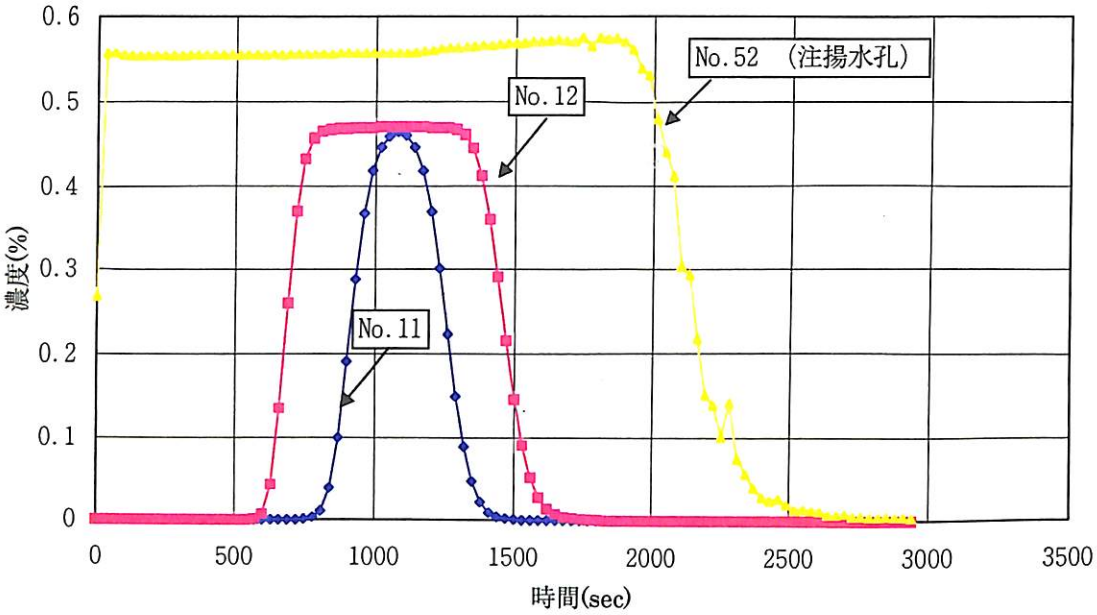


図 2.32 注水・揚水孔及びその周辺でのトレーサー濃度変化(単一孔試験 hte200.2)

3．試験結果の考察

単一孔トレーサーでのトレーサープルームの時間変化を，トレーサー注・揚水孔及びトレーサー総注入量が同じ試験毎に区分して（表 3.1 参照），結果を比較した。

比較の結果，トレーサープルームの大きさは目視では，ほぼ同じ広がりに見える。また，トレーサー注・揚水孔周辺でのトレーサー濃度の変化については，総注入量が同じ場合，注入終了時でのトレーサー濃度はトレーサー注入時間と関係なく等しいと考えられる。しかしながら，トレーサー濃度の実測値をみると，単一孔周辺に設置してある導電率計 No.12 および No.36 について，条件 1 及び条件 4 では，測定値が定常に達しておらず，各試験での注入トレーサー濃度[1]を 1 とした場合のトレーサー濃度が一致しない。（表 3.2 参照）

トレーサー濃度が一致しない原因として，1 つは，設定注水・揚水流量と実際の注入・揚水流量にズレがあることが考えられる。もう 1 つは，流量の変化に伴う不均質場での流速変化がトレーサーの分散長に与える影響が考えられる。

試験条件として設定した流量（表 2.2 参照）と実際測定流量の違いを確認するため，各試験での注入流量及び揚水流量の平均を調査した。調査した結果を表 3.3 に示す。

調査の結果，試験での注入・揚水流量は，ほぼ設定流量と等しい結果が得られた。多少のズレは流量計の誤差範囲（FS±0.5%）と思われる。但し，平均流量は 30 秒毎の測定データの平均であるため，測定間隔内での変動についてはフォローしきれないのが実情である。また，流量の変動については定圧での注・揚水を実施することで極力変動を抑える仕様にしてあるが，わずかな配管への接触や媒体槽の傾きによって大きく変動してしまうことが確認されている。また，MACROII で使用している流量計は測定単位が「l/hr」であり，試験条件の「cc/min」に比べ直接的には比較しにくいため誤差が生じやすいことも原因の 1 つとして考えられる。

さらに，トレーサー注入時間と揚水時間の関係を見ると各試験とも注水時間よりも揚水時間の方が長いことが確認できる。（表 3.4 参照）この原因については，

- 注水時の流速と揚水時の流速が実際には異なる。
- 注・揚水流量が変化することに伴って，分散現象が増減する。

などが考えられる。

一部試験時に見られる，注水・揚水孔でのトレーサー濃度不安定原因として，注水・揚水孔として使用している焼結金属管の内径が太すぎるため，揚水時のトレーサーと脱気水の均一な混合が行われず，混合比率が変化しやすくなっている可能性が考えられる。また，使用した導電率計アンプの規格(最大測定濃度:ビーズ中 NaCl 5%)は，今回の試験条件(最大測定濃度:直液 NaCl 1%)に適合していないため，センサ校正の精度が悪く，誤差が生じやすいことも考えられる。今後，上記の現象を解消するためには，新たな焼結金属管の作成

[1] 注入トレーサー濃度(Co)は各試験の最大トレーサー濃度となる。

や試験条件に合った導電率計アンプの購入を検討する必要がある。

これまでの実施してきた，一連の試験でも問題となってきた流量低下については，長期間タンクに汲みおきした脱気水を使用せず，試験水は前日汲んだ水道水のみを使用することで，ある程度は改善できた。しかし，更なる向上を目指すのであれば，水質の改善や境界を形成する焼結金属の仕様変更（メッシュサイズの変更）等を検討する必要が考えられる。

表 3.1　トレーサー注・揚水位置及び注入量での区分

条件 1	No.53 注・揚水孔で，トレーサーを 2400cc 注入	htd100.1, htd150.1, htd200.1
条件 2	No.53 注・揚水孔で，トレーサーを 3600cc 注入	htd100.2, htd150.2, htd200.2
条件 3	No.53 注・揚水孔で，トレーサーを 4800cc 注入	htd100.3, htd150.3, htd200.3
条件 4	No.52 注・揚水孔で，トレーサーを 2400cc 注入	hte100.1, hte150.1, hte200.1
条件 5	No.52 注・揚水孔で，トレーサーを 3600cc 注入	hte100.2, hte150.2, hte200.2

表 3.2　初期トレーサー濃度と周辺トレーサー濃度の関係

条件 1	対象導電率計	C/Co	条件 4	対象導電率計	C/Co
htd100.1	No.36	0.548	hte100.1	No.12	0.534
htd150.1		0.448	hte150.1		0.621
htd200.1		0.556	hte200.1		0.708

Co:注入トレーサー濃度　C:単一孔周辺に設置してある導電率計での最大トレーサー濃度

表 3.3　各試験での平均注入・揚水流量

試験名称	平均注入流量	平均揚水流量	試験名称	平均注入流量	平均揚水流量
htd100.1	6.00l/hr (100.00cc/min)	6.02l/hr (100.33cc/min)	hte100.1	6.00l/hr (100.00cc/min)	6.00l/hr (100.00cc/min)
htd150.1	8.89l/hr (148.17cc/min)	8.92l/hr (148.67cc/min)	hte150.1	8.96l/hr (149.33cc/min)	9.04l/hr (150.67cc/min)
htd200.1	12.03l/hr (200.50cc/min)	12.06l/hr (201.00cc/min)	hte200.1	12.12l/hr (202.00cc/min)	12.06l/hr (201.00cc/min)
htd100.2	6.00l/hr (100.00cc/min)	5.99l/hr (99.83cc/min)	hte100.2	6.03l/hr (100.50cc/min)	5.97l/hr (99.50cc/min)
htd150.2	8.93l/hr (148.83cc/min)	8.87l/hr (147.83cc/min)	hte150.2	9.01l/hr (150.17cc/min)	9.02l/hr (150.33cc/min)
htd200.2	11.95l/hr (199.167cc/min)	11.98l/hr (199.67cc/min)	hte200.2	12.02l/hr (200.33cc/min)	11.95l/hr (199.17cc/min)
htd100.3	5.96l/hr (99.33cc/min)	6.02l/hr (100.33cc/min)			
htd150.3	9.02l/hr (150.33cc/min)	8.93l/hr (148.83cc/min)			
htd200.3	11.99l/hr (199.83cc/min)	12.00l/hr (200.00cc/min)			

表 3.4　トレーサ注入時間と揚水時間の関係

	試験名称	注入時間 A	揚水時間 B	時間比 A:B	揚水時間の割合
条件 1	htd100.1	1440sec	2370sec	48:80	62.50%
	htd150.1	960sec	1350sec	32:44	57.89%
	htd200.1	720sec	1140sec	24:37	60.66%
条件 2	htd100.2	2160sec	2970sec	72:98	57.65%
	htd150.2	1440sec	2100sec	48:69	58.97%
	htd200.2	1080sec	1680sec	36:55	60.44%
条件 3	htd100.3	2880sec	4500sec	96:149	60.82%
	htd150.3	1920sec	2790sec	64:92	58.97%
	htd200.3	1440sec	2310sec	48:76	61.29%
条件 4	hte100.1	1440sec	2040sec	48:67	58.26%
	hte150.1	960sec	1530sec	32:50	60.98%
	hte200.1	720sec	1230sec	24:40	62.50%
条件 5	hte100.2	2160sec	3030sec	72:100	58.14%
	hte150.2	1440sec	2280sec	48:75	60.98%
	hte200.2	1080sec	1860sec	36:61	62.89%

4．分散長の算定

4.1 フィッティングに使用する解析解の導出

Gelhar and Collins (1971) は，揚水中の井戸内における濃度の破過曲線を以下のように導出した。

（飽和状態にある流体中の）均質で等方的な多孔質媒体中の分散方程式（トレーサー濃度）は，(4.1) 式のように表される。

$$\frac{\partial C}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(D_{ik}\frac{\partial C}{\partial x_k}-u_i C\right)+D_m\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{\partial C}{\partial x_i}\right) \tag{4.1}$$

ここで，

x_i(i=1,2,3)：座標	[m]
D_{ik}：分散係数テンソル	[m²/s]
u_i(i=1,2,3)：浸出速度	[m³/s]
t：時間	[s]
D_m：実効分子拡散係数	[m²/s]

なお，x_1がトレーサーの浸出方向と同一である場合，浸出速度は，

$$u_1 = u$$
$$u_2 = u_3 = 0$$

となり，D_{ik}は，

$$D_{11} = \alpha_1 u$$
$$D_{22} = D_{33} = \alpha_2 u$$
$$D_{ik} = 0 \qquad (i \neq k)$$

となる。ここで，

α_1：縦方向分散長	[m]

α_2：横方向分散長　　[m]

(4.1) 式を曲線座標系で書き換えると，

$$\frac{\partial C}{\partial t}+u\frac{\partial C}{\partial s}=\alpha u\frac{\partial^2 C}{\partial s^2}+D_m\left(\frac{\partial^2 C}{\partial s^2}-\frac{1}{u}\frac{\partial u}{\partial s}\frac{\partial C}{\partial s}\right) \tag{4.2}$$

となる。ここで，s は流れ方向の円弧の長さを表している。また，$\alpha_1=\alpha$ とおいている。

(4.2) 式を一般的に解くことは困難であることから，境界層法（Boundary layer technique）による近似を行う。本近似を行うために，t，s，u を以下のように無次元化する。

$$\begin{aligned} T &= t/T_0 \\ S &= s/S_0 \\ U &= u/U_0 \end{aligned} \tag{4.3}$$

このとき,T_0,S_0,U_0 は t,s,u を規格化するように設定した定数である。

(4.3) で定義した変数を (4.2) 式に導入すると，

$$\frac{\partial C}{\partial T}+U\frac{\partial C}{\partial S}=\varepsilon U\frac{\partial^2 C}{\partial S^2}+\varepsilon D\left(\frac{\partial^2 C}{\partial S^2}-\frac{1}{U}\frac{\partial C}{\partial S}\frac{\partial U}{\partial S}\right) \tag{4.4}$$

となる。ここで，

$$\varepsilon=\alpha/L_0$$

$$D=D_m T_0/(\alpha L_0)$$

である。

(4.4) 式を境界層法近似により解く。このとき，(4.4) 式の左辺に存在する一定でない

係数を取り除くために以下のような変数を導入する。

$$X(S)=\int_{S_0}^{S} U^{-1} ds \tag{4.5}$$

ここで，S_0=S は，T=0 における S の値であり，U は U=U(S)のことを表している。(4.5) 式を利用すると（4.4）式は（4.6）式のように変形できる。

$$\frac{\partial C}{\partial T}+\frac{\partial C}{\partial X}=(\varepsilon/U)\left(\frac{\partial^2 C}{\partial X^2}-\frac{\partial U}{\partial S}\frac{\partial C}{\partial X}\right)+(\varepsilon D/U^2)\left(\frac{\partial^2 C}{\partial X^2}-2\frac{\partial U}{\partial S}\frac{\partial C}{\partial X}\right) \tag{4.6}$$

（4.6）式を解くのを容易にするために，場所と時間を結合した以下の変数 H を導入する。

$$H=X-T\equiv\int_{S_0}^{S}\frac{dS}{U(S)}-\int_{S_0}^{S'}\frac{dS}{U(S)}=\int_{S'}^{S}\frac{dS}{U(S)} \tag{4.7}$$

なお，S と S'は各々時間と場所から独立した変数である。変数 H を導入すると（4.6）式は（4.8）式のように変形できる。

$$\frac{\partial C}{\partial T}=(\varepsilon/U)\left(\frac{\partial^2 C}{\partial H^2}-\frac{\partial U}{\partial S}\frac{\partial C}{\partial H}\right)+(\varepsilon D/U^2)\left(\frac{\partial^2 C}{\partial H^2}-2\frac{\partial U}{\partial S}\frac{\partial C}{\partial H}\right) \tag{4.8}$$

ε が小さくなっても（4.8）式が分散の性質を持つようにするため，以下のような境界層座標 ζ を導入する。

$$H=\zeta\varepsilon^{1/2} \tag{4.9}$$

次に（4.9）式を（4.8）式に代入すると，(4.10) 式のようになる。

$$\frac{\partial C}{\partial T}=\left(U^{-1}+DU^{-2}\right)\frac{\partial^2 C}{\partial \zeta^2}-\varepsilon^{1/2}\left(U^{-1}+2DU^{-2}\right)\frac{\partial U}{\partial S}\frac{\partial C}{\partial \zeta} \tag{4.10}$$

境界層法近似により，(4.10) 式は (4.11) 式のように変形できる。

$$\frac{\partial C}{\partial T}=\frac{U(S')+D}{U^2(S')}\frac{\partial^2 C}{\partial \zeta^2} \tag{4.11}$$

ここで，Ω＝Ω(T)を (4.12) 式のように定義する。

$$\Omega=\int_0^T \frac{U(S')+D}{U^2(S')}dT' \tag{4.12}$$

dS/dT=U(S)より (4.11) 式は，結局 (4.13) 式のようになる。

$$\frac{\partial C}{\partial \Omega}=\frac{\partial^2 C}{\partial \zeta^2} \tag{4.13}$$

さらに (4.13) 式を次元化して表すと (4.14) 式のようになる。

$$\frac{\partial C}{\partial \omega}=\alpha\frac{\partial^2 C}{\partial \eta^2} \tag{4.14}$$

ここで，η =x−t である。また，x ，ω は，s= s ’における値であり，

$$x=\int_{s_0}^{s} u(s)^{-1}ds \tag{4.15}$$

$$\omega=\int_{s_0}^{s'} \frac{u(s')+D_m/\alpha}{u^3(s')}ds' \tag{4.16}$$

のように定義される。(4.14) 式の解は，時間 t=0 における表面 $s=s_0$ における単位面積への

質量 m の注入を表し，

$$C = \frac{m}{\rho u(s_0)}(4\pi\alpha\omega)^{-1/2} exp\left(-\eta^2/4\alpha\omega\right) \tag{4.17}$$

と表される。また，原点における濃度の変化（質量注入量の変化）が，ステップ状に変化すると，(4.14) 式の解は，

$$C(x,t) = \frac{1}{2}C_0 erfc\left\{(x-t)/[4\alpha\omega(t)]^{-1/2}\right\} \tag{4.18}$$

となる。このことから，

$$u(s) = A/s^k \tag{4.19}$$

で表される流れ場における分散の問題に上の議論を適用すると，(4.15) 式と (4.16) 式の積分は s=0 とすることで計算することが可能となり，

$$x = \frac{s^{k+1}}{A(k+1)}$$
$$t = \frac{s'^{k+1}}{A(k+1)}$$
$$\omega = \frac{s'^{2k+1}}{(2k+1)A^2}$$

のようになり，(4.18) 式は以下のように表される。

$$C = \frac{1}{2}C_0 erfc(\theta) \tag{4.20}$$

ここで θ は 1，2，3 の各次元での変数を表している。

上記の議論を閉じ込められた水槽中の井戸へ溶液を注入ー揚水している場合における分

散現象に適用する。

最初に，溶液を半径 r_w の井戸に注入している場合に適用すると，流れ場は，

$$u = A_1 / r$$
$$A_1 = Q_1 / (2\pi nb)$$

と表される。なお，

r：動径座標　[m]
n：空隙率　[−]
b：水槽の厚さ　[m]
Q_1：注入速度　[m^3/s]

である。上式の流れ場の場合，(4.15) 式と (4.16) 式の積分は $s=r-r_w$ とおくと，

$$x_1 = \frac{r^2 - r_w^2}{2A_1} \tag{4.21}$$

$$t_1 = \frac{r^{*2} - r_w^2}{2A_1} \tag{4.22}$$

$$\omega_1 = \frac{r^{*3} - r_w^3}{3A_1^2} + \frac{D_m}{\alpha}\frac{r^{*4} - r_w^4}{4A_1^3} \tag{4.23}$$

が得られる。なお，t_1 は注入時間，r^*は濃度フロントの場所を表している。よって，(4.18) 式は，濃度 C=0 の溶液が，注入されることにより濃度 $C=C_0$ に変化することから，

$$\frac{C}{C_0}=\frac{1}{2}erfc\left(\frac{x_1-t_1}{(4\alpha\omega_1)^{1/2}}\right)$$
$$=\frac{1}{2}erfc\left\{\frac{r^2-r^{*2}}{\left[16\alpha\left(\frac{r^{*3}-r_w^3}{3}+\frac{D_m}{\alpha A_1}\frac{r^{*4}-r_w^4}{4}\right)\right]^{1/2}}\right\} \tag{4.24}$$

と表される。一方，溶液を揚水している場合に（4.20）式を導出する議論に適用すると，流れ場は，

$$u=A_2/r$$
$$A_2=Q_2/(2\pi nb)$$

と表される。なお，

Q_2：揚水速度　[m³/s]

であり，揚水開始時刻は，$t_1=T_1$，この時の濃度フロントは，$r=R_1$となる。上式の流れ場の場合，（4.11）式と（4.12）式の積分は$s=R_1-r$とおくと，

$$x_2=\frac{(R_1^2-r^2)}{2A_2} \tag{4.25}$$

$$t_2=\frac{(R_1^2-r^{*2})}{2A_2} \tag{4.26}$$

$$\omega_2=\frac{2R_1^3-r^{*3}-r_w^3}{3A_2^2}+\frac{D_m}{4\alpha A_2^3}\cdot\left(R_1^4+\frac{A_2}{A_1}(R_1^4-r_w^4)-r^{*4}\right) \tag{4.27}$$

が得られる。なお，t_2は揚水時間であり，$t_2=0$は$t_1=T_1$である。よって，（4.18）式は，

$$\frac{C}{C_0}=\frac{1}{2}erfc\frac{r^2-r^{*2}}{\left\{16\alpha\left[\frac{2R_1^3-r^{*3}-r_w^3}{3}+\frac{D_m}{4\alpha A_2}\left(R_1^4+\frac{A_2}{A_1}\left(R_1^4-r_w^4\right)-r^{*4}\right)\right]\right\}^{1/2}}$$

(4.28)

と表される。(4.28)式を注入体積 U_1，揚水体積 U_2 ($=Q_2t_2$) を用いて簡略化すると，井戸の中における濃度は以下のようになる。

$$\frac{C}{C_0}=\frac{1}{2}erfc\left\{\left(\frac{U_2}{U_1}-1\right)\Bigg/\left[\frac{16}{3}\frac{\alpha}{R_1}\cdot\left(2-\left|1-\frac{U_2}{U_1}\right|^{1/2}\left(1-\frac{U_2}{U_1}\right)\right)\right]^{1/2}\right\} \quad (4.29)$$

なお，上式において井戸の半径および分子拡散の影響は無視しており，絶対値は濃度変化の速度が，$U_2/U_1=0$ となる時点をはさんで連続的になるように導入した。

したがって，(4.29) 式が，揚水中の井戸内における濃度の破過曲線を表し，マクロ試験で得られたトレーサー濃度の破過曲線へのフィッティングに用いる。

4.2 分散長の算定手法

MACROⅡ試験で得られたトレーサー濃度の破過曲線（揚水時の部分）と揚水中の井戸内における濃度の破過曲線を表す理論解を最小二乗法によりフィッティングを行い，分散長を算定する。

4.2.1 フィッティングに使用する数式

フィッティングには以下の (4.29) 式を用いる。

$$\frac{C}{C_0}=\frac{1}{2}erfc\left\{\left(\frac{U_2}{U_1}-1\right)\Bigg/\left[\frac{16}{3}\frac{\alpha}{R_1}\cdot\left(2-\left|1-\frac{U_2}{U_1}\right|^{1/2}\left(1-\frac{U_2}{U_1}\right)\right)\right]^{1/2}\right\} \quad (4.29)$$

ここで，あらためて (4.29) 式中のパラメータの説明を記載すると，

C：揚水孔のトレーサー濃度　[−]
C_0：トレーサーの初期濃度　[−]
U_1：注入体積　[m^3]
U_2：揚水体積　[m^3]
α：分散長　[m]
R_1：濃度フロントの平均半径　[m]

なお，濃度フロントの平均半径 R は以下の式より算定した。

$$R_1 = \left(\frac{U_1}{\pi b \theta} \right)^{1/2} \tag{4.30}$$

ここで，

b：水槽の厚さ　[m]
θ：間隙率　[−]

である。

4.2.2　フィッティング方法

フィティング方法は，(4.29) 式において未知量は分散長 α のみであることから，任意の α を (4.29) 式に代入して破過曲線を算出する。算出した破過曲線と MACRO II 試験で得られた破過曲線との間で二乗平均誤差を計算する。二乗平均誤差を微分して最も 0 に近い値をとる場合の α を分散長として決定する。

具体的には以下の手順を実行する。

① 表 4.1 に記載したようなフォームの MACRO II 試験データを用意する。
② (4.29) 式に入力するデータ（分散長 α 以外）を表 4.2 に記載したようなフォームで用意する。
③ (4.29) 式をコーディングしたプログラムを実行してフィッティングを行う
④ 分散長を算定する

ここで，解析に使用する MACRO II 試験データは，揚水開始時間以降のものを使用する。なお，表 4.3 に記載した入力データファイル中のパラメータを表 4.4 に記載した。

表 4.1 分散長算出に使用する MACRO II 試験データの例

```
131  1)
1440 2)  0.512 3)
1470     0.512
1500     0.512
1530     0.512
1560     0.512
1590     0.512
1620     0.512
1650     0.512
1680     0.512
1710     0.512
1740     0.512
1770     0.512
```

表 4.2 MACRO II 試験データ中のパラメータ

No.	単位	名称
1	−	行数（必要な濃度データの数）
2	sec	時間
3	%	トレーサー濃度

表 4.3　分散長算出に使用する入力データファイルの例

```
0.02            radius of well [m]  1)
1.667E-06               Qp:withdrawal flow rate  2)
1.667E-06               Ui:injection flow rate  3)
1440            [s]  4)
0.1             b[m]:thickness of flow layer  5)
0.375           theta[-]:porosity  6)
1.000E-09               D[m^2/s]:mol.diffusion  7)
1440            [s]  8)
1.000E-06               DELT_ALPHA [m]  9)
1.000E-06               EPS:minimum slope  10)
100             ITERATION LIMIT  11)
```

表 4.4　入力データファイル中のパラメータ

No.	単位	名称
1	m	井戸の半径
2	m^3/s	揚水流量
3	m^3/s	注入流量
4	s	注入終了時刻
5	m	媒体槽厚（水槽の厚さ）
6	—	空隙率
7	m^2/s	（水中の分子拡散係数）／2
8	s	揚水終了時刻
9	m	最小分散長
10	—	フィッティングデータの最小傾き
11	—	（フィッティングの）最大反復数

4.2.3 解析条件

MACROⅡ揚水試験は，図 2.1 に示した概念で実施された。トレーサーを注入する水槽に図 2.2 に示したようにガラスビーズを配置して不均質場を作成した。本試験装置において実施した MACROⅡ揚水試験の全 15 ケースの試験条件を表 4.5 に記載した。本試験条件に基づいて設定した各ケースの解析条件を表 4.6 に示す。注入終了時間と揚水開始時間および注水流量と揚水流量は，表 4.5 の時間の単位[min]を[s]の単位に変換して使用する。さらに，水槽の厚さ及び空隙率は，試験条件として既知の値を使用する。最後に，トレーサーの拡散係数は，トレーサーが NaCl 溶液であることから，理科年表に記載されている値を使用した。

表 4.5　MACRO Ⅱ揚水トレーサー試験条件

試験名称	使用井戸	注・揚水流量	注入時間	総注入量
htd100.1	No.53	100cc/min	24min	2400cc
htd100.2			36min	3600cc
htd100.3			48min	4800cc
htd150.1		150cc/min	16min	2400cc
htd150.2			24min	3600cc
htd150.3			32min	4800cc
htd200.1		200cc/min	12min	2400cc
htd200.2			18min	3600cc
htd200.3			24min	4800cc
hte100.1	No.52	100cc/min	24min	2400cc
hte100.2			36min	3600cc
hte150.1		150cc/min	16min	2400cc
hte150.2			24min	3600cc
hte200.1		200cc/min	12min	2400cc
hte200.2			18min	3600cc

表 4.6　MACROⅡ揚水トレーサー試験解析条件

入力パラメータ	単位	htd100.1	htd100.2	htd100.3	htd150.1	htd150.2	htd150.3	htd200.1	htd200.2	htd200.3	hte100.1	hte100.2	hte150.1	hte150.2	hte200.1	hte200.2
井戸の半径	m	0.02														
揚水流量	m^3/s	1.667E-06			2.500E-06		3.333E-06			1.667E-06		2.500E-06			3.333E-06	
注入流量	m^3/s	1.667E-06			2.500E-06		3.333E-06			1.667E-06		2.500E-06			3.333E-06	
注入終了時間	s	1440	2160	2880	960	1440	1920	720	1080	1440	1440	2160	960	1440	720	1080
媒体槽厚	m	0.1														
空隙率	—	0.375														
(水中の分子拡散係数)／2	m^2/s	1.000E-09														
揚水開始時間	s	1440	2160	2880	960	1440	1920	720	1080	1440	1440	2160	960	1440	720	1080
最小分散長	m	1.000E-06														
フィッティングの最小傾き	—	1.000E-06														
最大反復数	—	100														

4.2.4 解析結果

試験により得られた 15 ケースの破過曲線の結果に対して，3.2 節で記載した方法で分散長を算出した。

フィッティングした結果を図 4.3～図 4.17 に示した。ケース htd100.1，htd150.1，htd150.2，htd150.3，htd200.1，htd200.2，htd200.3，hte100.1，hte100.2，hte150.2 についてはフィッティングの精度が良くなかったことから，得られた分散長の結果についても精度が良くない可能性が考えられる。このことから，次章においてフィッティング精度が悪い原因について検討した。

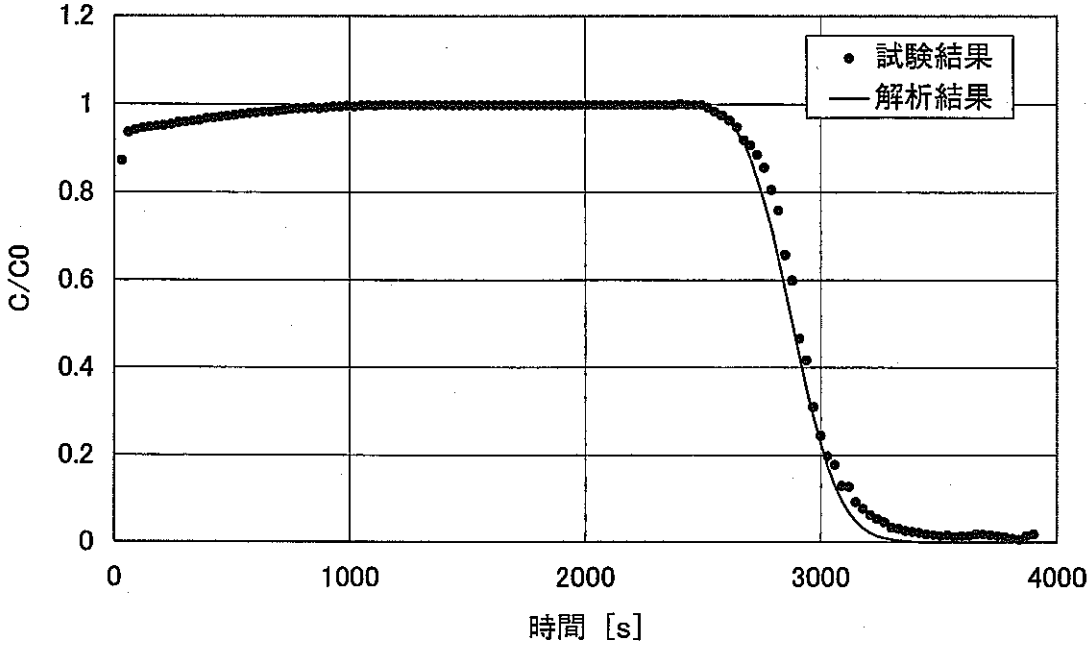


図 4.1　フィッティングの結果（ケース htd100.1）

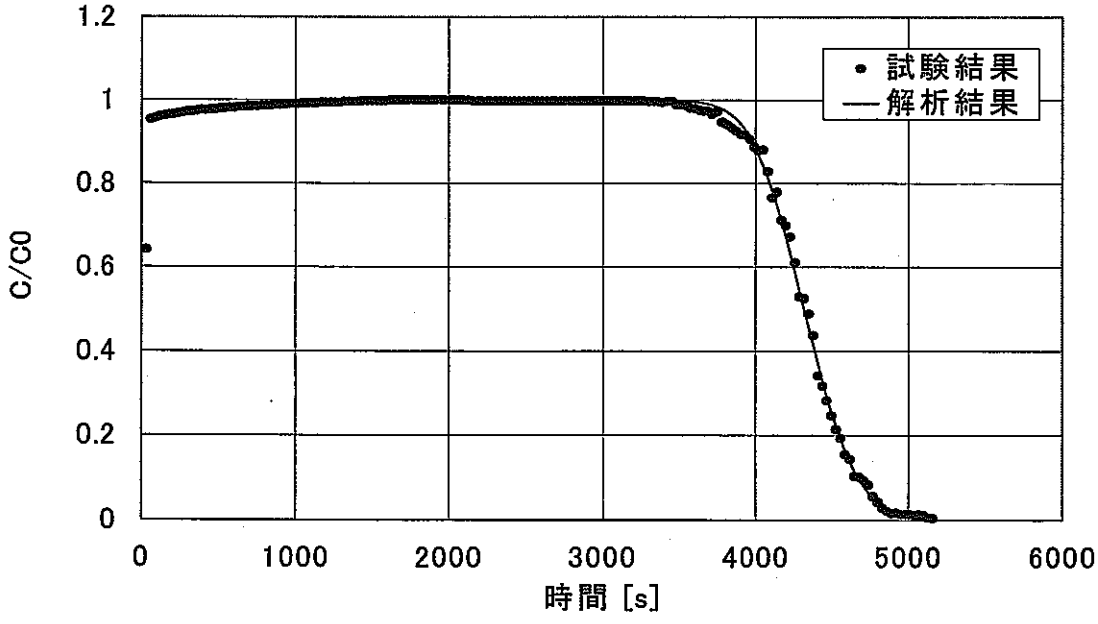


図 4.2　フィッティングの結果（ケース htd100.2）

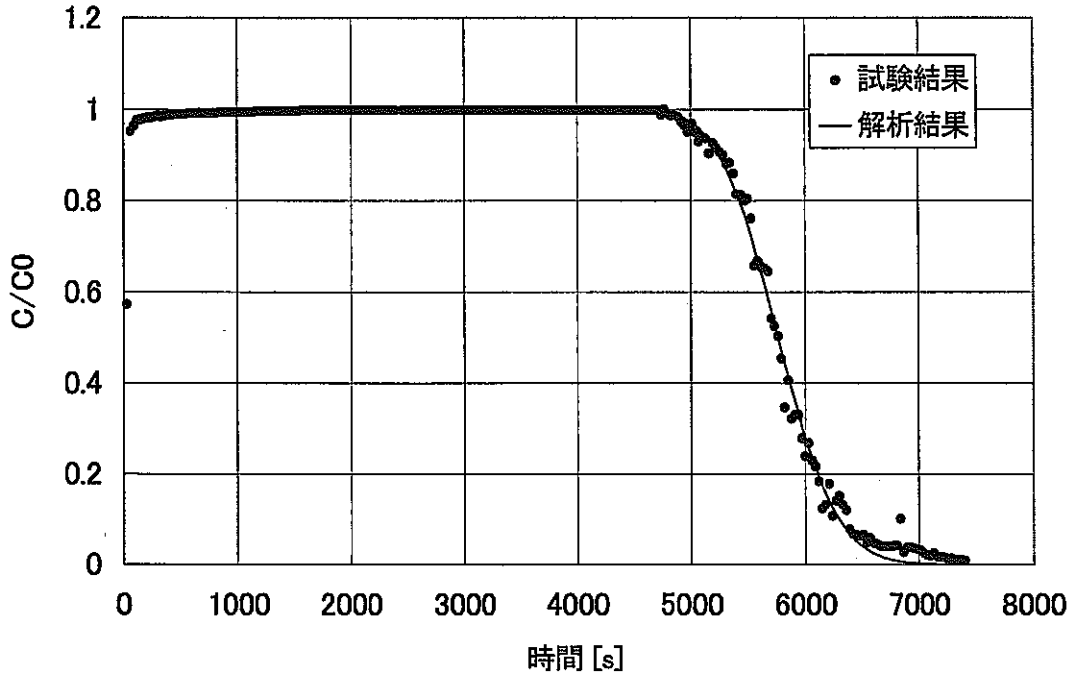


図 4.3　フィッティングの結果（ケース htd100.3）

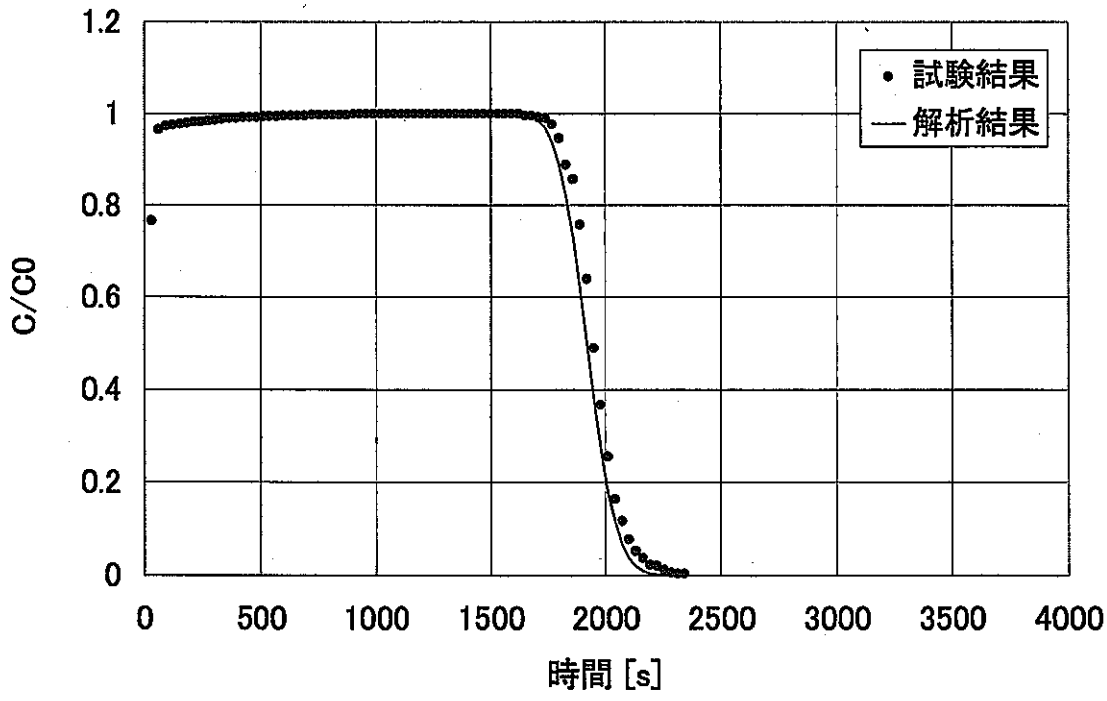


図 4.4　フィッティングの結果（ケース htd150.1）

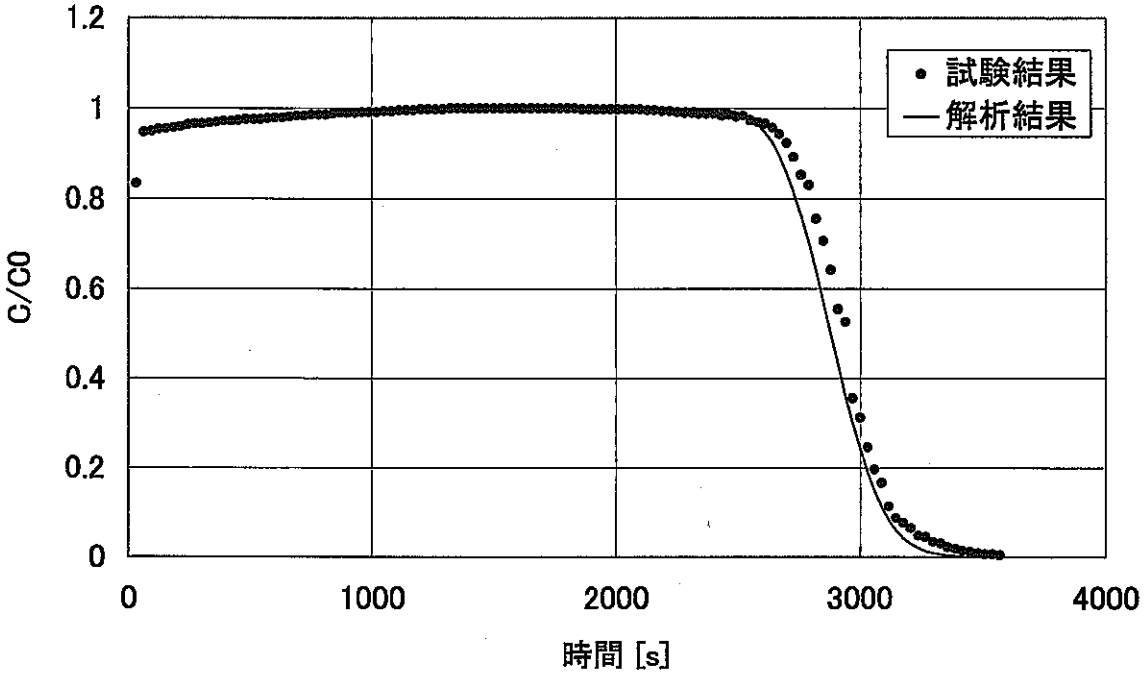


図 4.5　フィッティングの結果（ケース htd150.2）

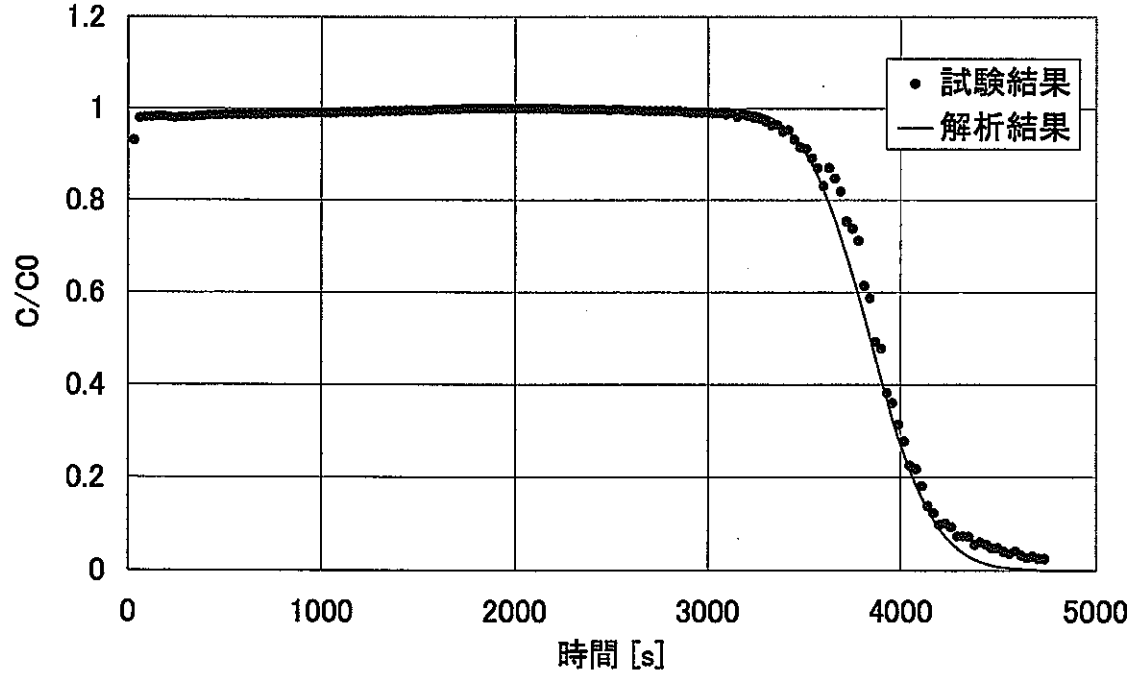


図 4.6　フィッティングの結果（ケース htd150.3）

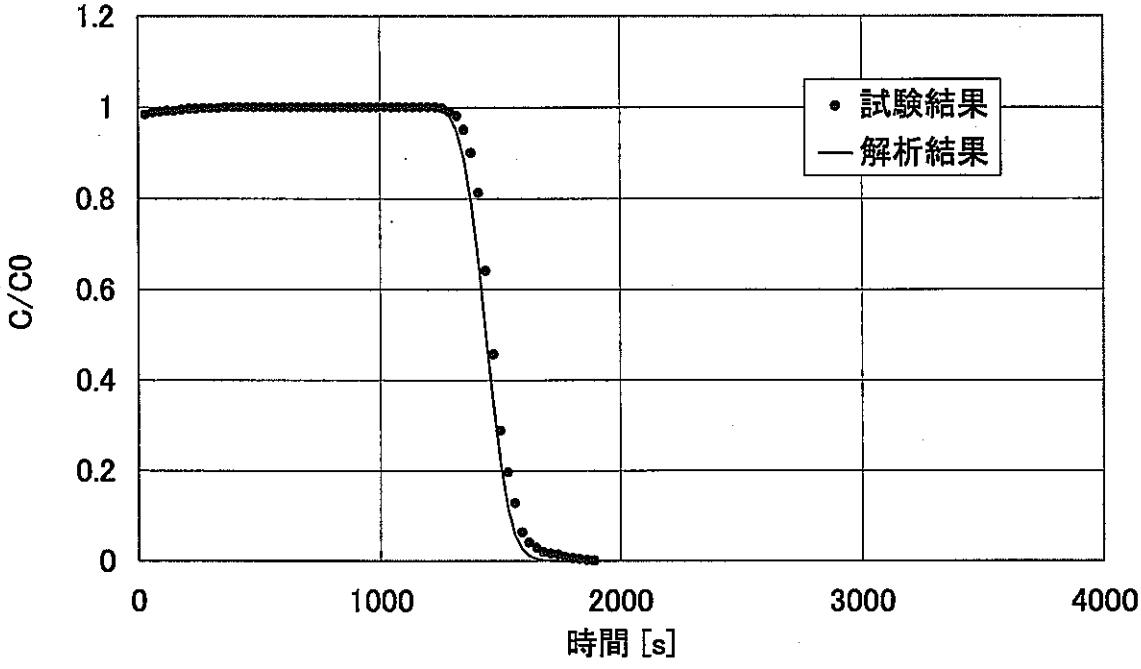


図 4.7　フィッティングの結果（ケース htd200.1）

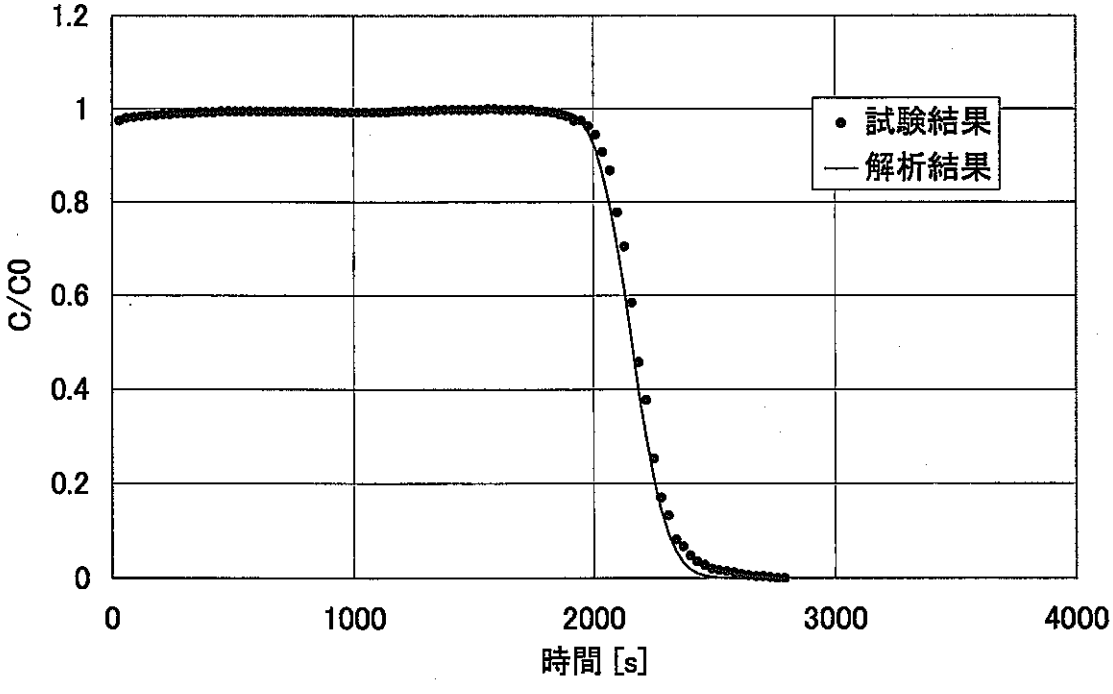


図 4.8　フィッティングの結果（ケース htd200.2）

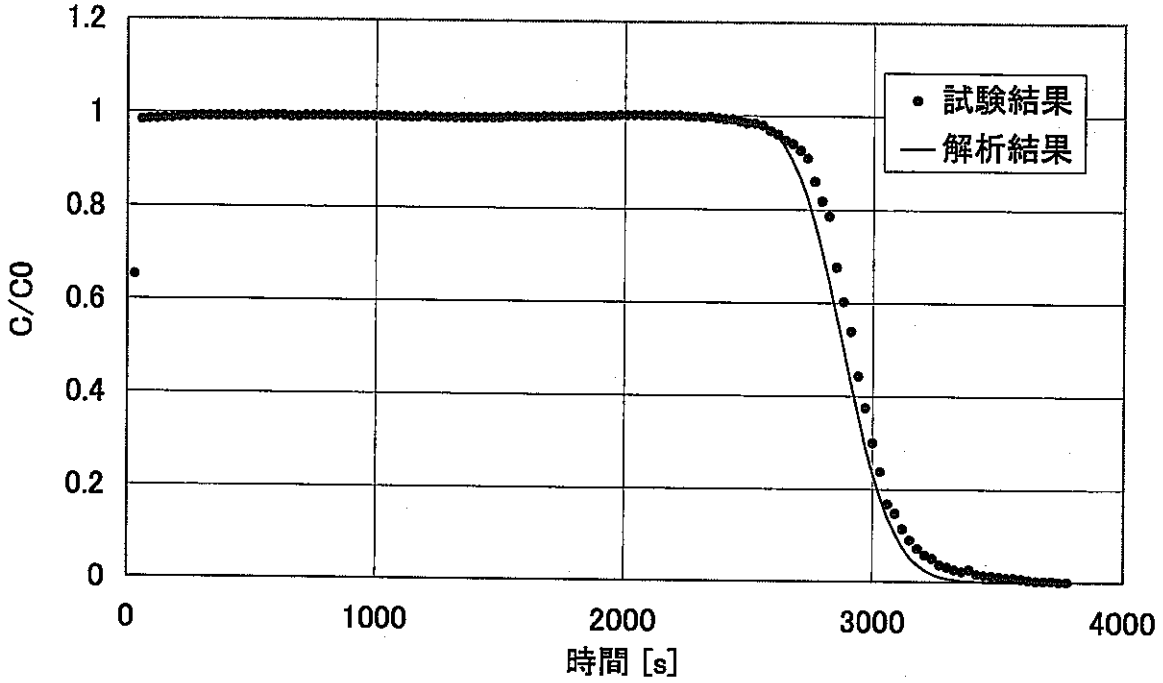


図 4.9　フィッティングの結果（ケース htd200.3）

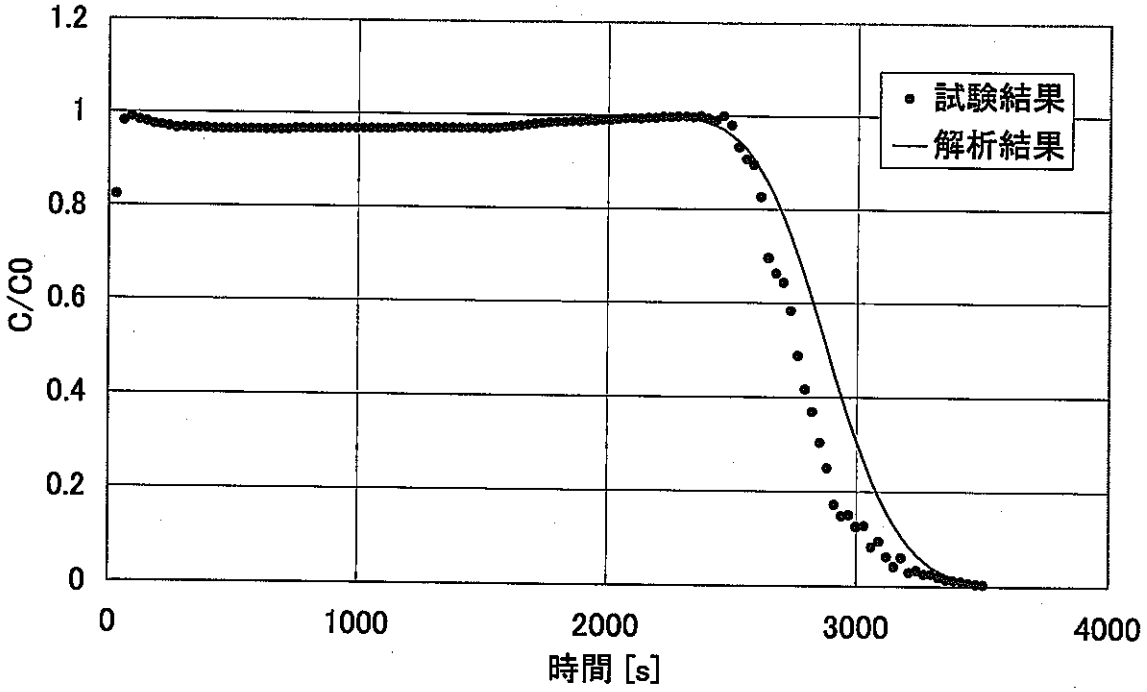


図 4.10　フィッティングの結果（ケース hte100.1）

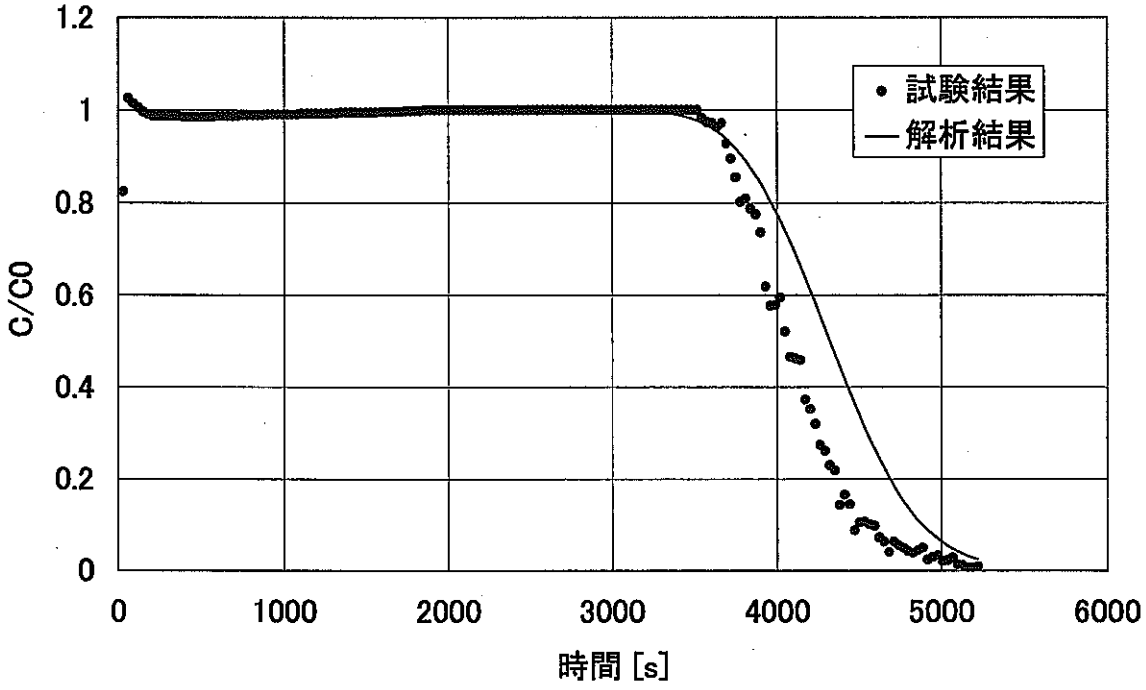


図 4.11　フィッティングの結果（ケース hte100.2）

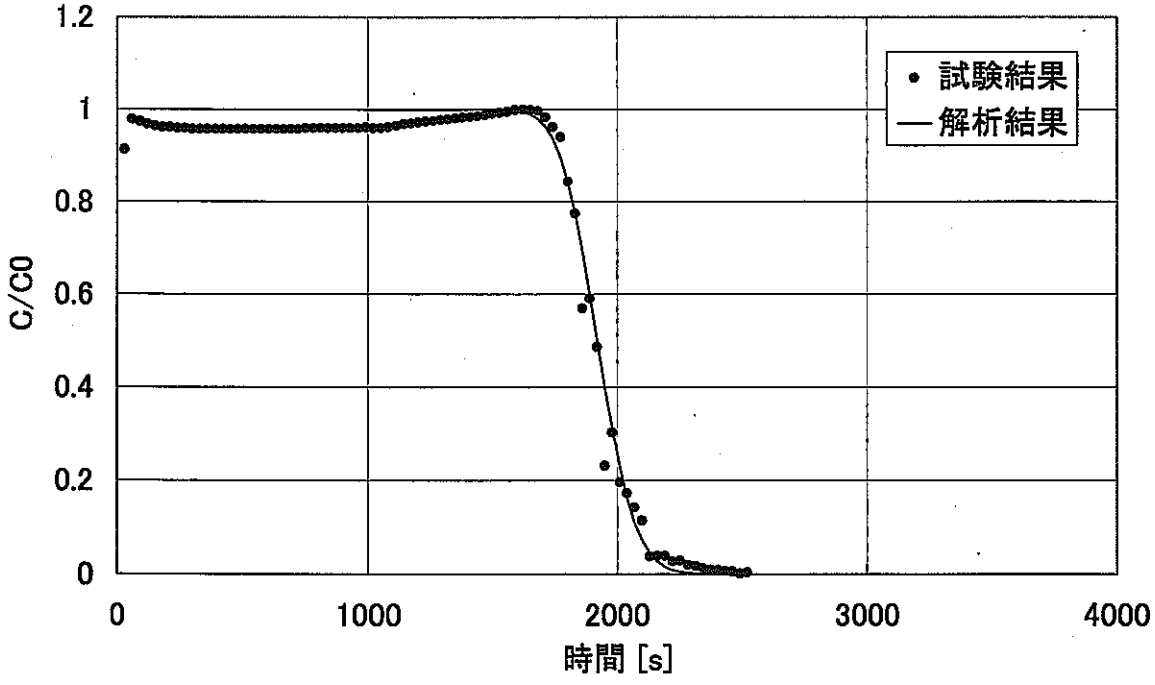


図 4.12　フィッティングの結果（ケース hte150.1）

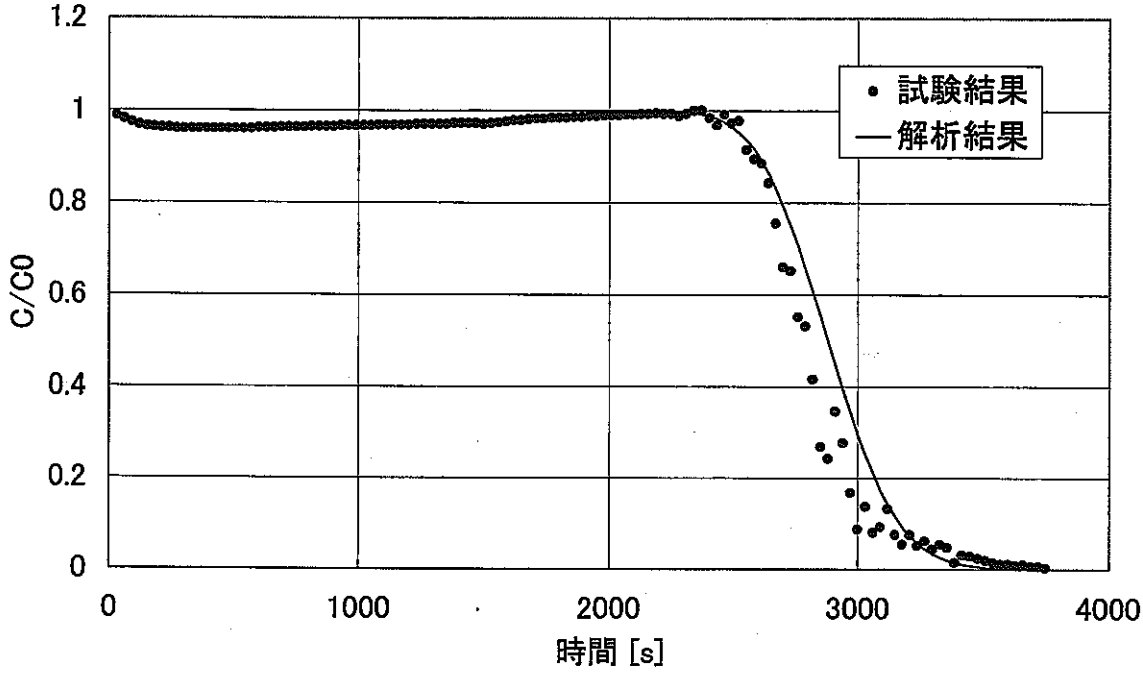


図 4.13　フィッティングの結果（ケース hte150.2）

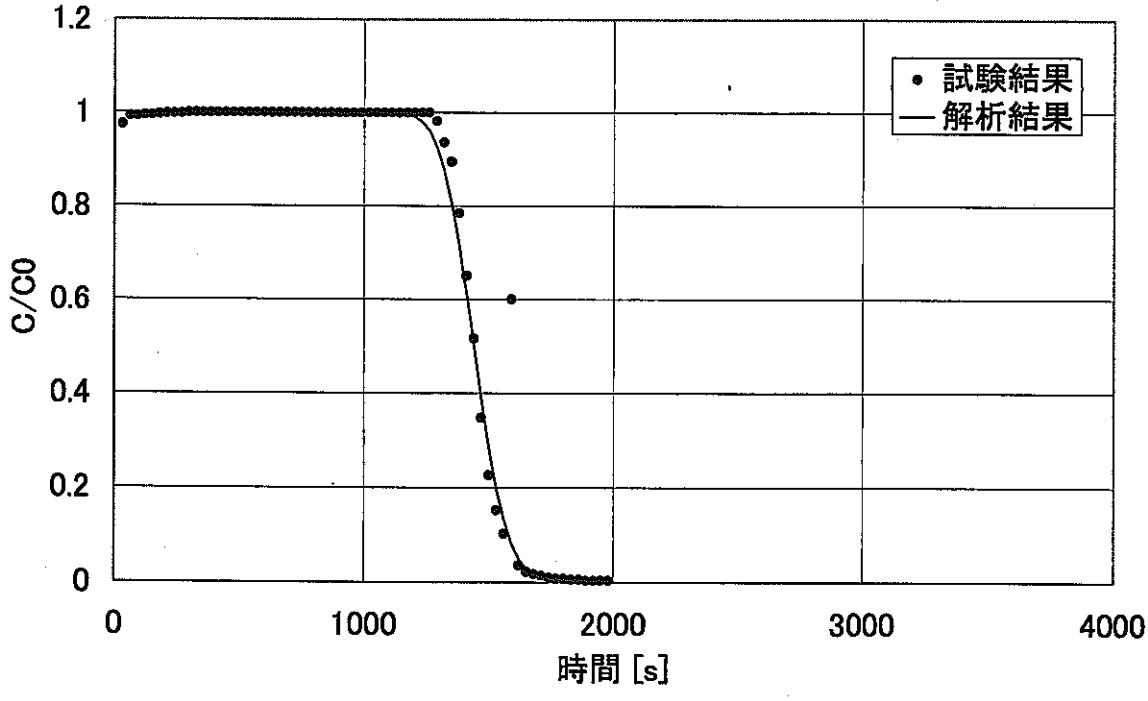


図 4.14　フィッティングの結果（ケース hte200.1）

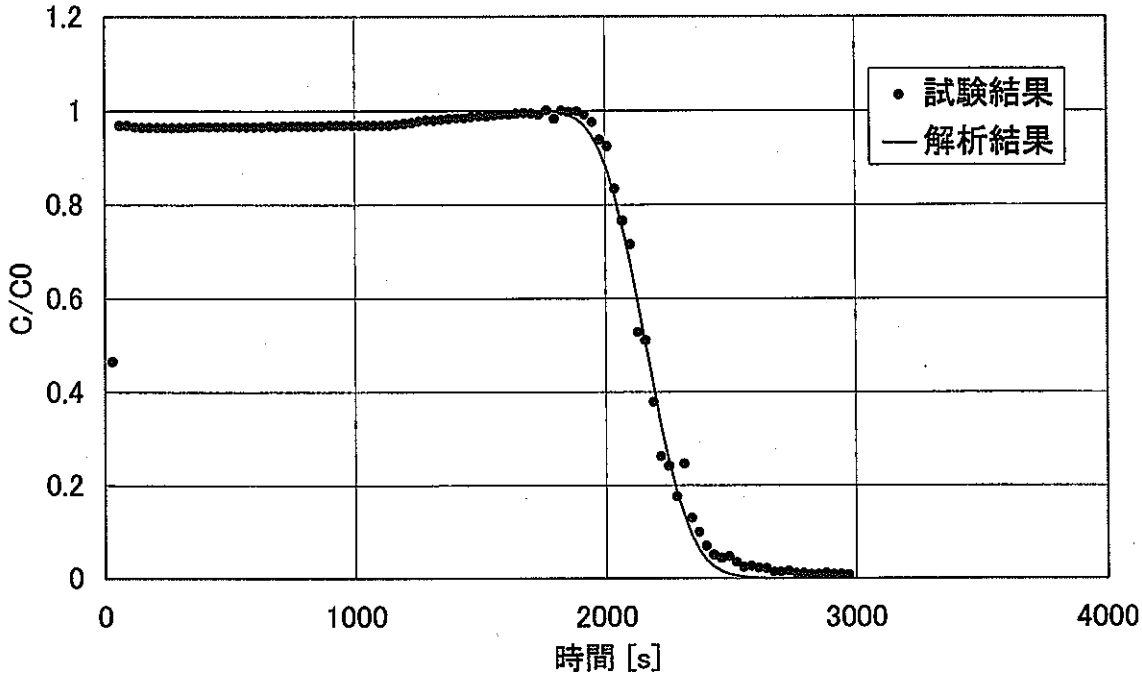


図 4.15　フィッティングの結果（ケース hte200.2）

5．解析結果の考察

5.1 フィッティング結果の考察

ケース htd100.1, htd150.1, htd150.2, htd150.3, htd200.1, htd200.2, htd200.3, hte100.1, hte100.2, hte150.2の10ケースに関してフィッティング精度が悪い原因について検討する。

図4.1, 図4.4～図4.9より，ケース htd100.1, htd150.1, htd150.2, htd150.3, htd200.1, htd200.2, htd200.3の7ケースにおいて，理論解は $C/C_0=0.5$ となる時間を試験結果に比べて小さな値を見積もっている。これは理論解における濃度減少開始時間が試験結果より早いことから生じていると推察される。実験データを見ると，図5.1～図5.7において，ケース htd150.2, htd200.2を除いて濃度フロント付近のトレーサー濃度が最大値に達する時間は，トレーサー注入終了後30秒後になっている。すなわち，揚水開始後30秒後においても，トレーサーの濃度フロントにおける濃度は増加している。これは，揚水開始後30秒間は濃度フロントに向かってトレーサーが分散していることを意味している。このことから，揚水開始後30秒後に実質的な揚水が始まっていると解釈できる。一方，フィッティングにおいて，解析解に実質的な揚水開始時間を代入していない。このことが，ケース htd*においてフィッティングの精度が良くない原因であると推察される。ただし，試験において，揚水時における側方境界の水頭は井戸の水頭より高い。このことは，揚水開始後30秒間の濃度フロント付近の濃度増加は，動水勾配に逆らって分散していたことを意味している。考慮している体系が(5.1)式のような定常状態では上記のような現象は考えられないことから，考慮している体系は(5.2)式のような非定常状態である解釈できる。

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 h}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 h}{\partial z^2}=0 \tag{5.1}$$

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 h}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 h}{\partial z^2}=\frac{S_s}{K}\frac{\partial h}{\partial t} \tag{5.2}$$

ここで，

h　　：全水頭　[m]

Ss　　：比貯留係数　[1/m]

K　　：透水係数　[m²/s]

したがって，試験における揚水開始後30秒間の現象は，(5.2)式のような非定常現象である

と考えられる。また，試験体系におけるビーズ間隔は，トレーサーの貯留を無視できない程度のものであることが考えられる。以上のことから，ケース htd*の7ケースは，揚水開始時間を設定時間より30秒遅く設定することでフィッティング精度が向上することが予想される。

一方，図 4.10，図 4.11，図 4.13 より，hte100.1，hte100.2，hte150.2 の3ケースにおいて，理論解は C/C_0=0.5 となる時間を試験結果に比べて過大な評価を行っている。

ケース hte*のフィッティング精度が悪い原因としては次の2点が考えられる。

(a)　理論解に与えた総注入体積が所期の量よりも大きかった。

(b)　理論解に与えた揚水流量が所期の値よりも小さかった。

上記のうち，(b) が原因であると仮定して揚水流量を5％程度大きく設定して計算するとフィッティング精度は向上する。しかし，試験において正確な総注入体積と揚水流量がわかっており，その値は設定値から 1%以上の誤差はない。このことから(a)，(b)が原因であることは考えにくい。一方，理論解による計算においてケース hte*とケース htd*の解析条件は同一である。これより，理論解による計算において分散長はケース hte*とケース htd*の間で大きく異なることはない。一方，破過曲線を比較すると，ケース hte150.1, hte200.1, hte200.2 は破過曲線における濃度減少の開始時間が htd*のケースとほぼ同じで，濃度減少速度も同様であるため理論解とのフィッティング精度が高い。しかし，hte100.1, hte100.2, hte150.2 において htd*のケースよりも濃度減少開始時における減少が急激であり，この点がケース htd*の破過曲線と大きく異なる。このことが，理論解による計算においてフィッティング精度が低い原因であると推察される。また，hte100.1，hte100.2，hte150.2 において htd*のケースよりも濃度減少開始時における減少が急激であることは，分散の効果が htd*のケースよりも小さいことが推測される。つまり，hte*ケースの濃度フロントに分散が著しく小さい箇所が存在する可能性が考えられる。

上記の考察から，ケース htd*の7ケースに関して，揚水開始時間を表 4.3 における値に30秒加えた値に設定して再解析を実施した。フィッティングした結果を図 5.8～図 5.14 に示した。これらの図よりケース htd*の7ケースに関しては，揚水開始時間を 30 秒遅く設定することによってフィッティング精度が予想通り向上した。

5.2 巨視的分散長に関する考察

フィッティングの精度がよくない hte100.1，hte100.2，hte150.2 の3ケースは，算出した分散長の値の精度が低いことから，他ケースの分散長と同列に扱うことができない。これより，最初の解析でフィッティング精度がよかった htd100.2，htd100.3，hte100.3，hte150.1，hte200.1，hte200.2 とケース htd*の7ケースの分散長を対象として，分散長と濃度フロントの平均半径の関係を表 5.1 と図 5.15 に示した。図 5.15 において，ケース htd*における不均質場を A，ケース hte*における不均質場を B とした。図 5.15 より，注入・揚

水流量 200[cc/min]のケース以外は，濃度フロントの平均半径が大きくなるにしたがって分散長がほぼ単調増加する傾向が確認できた。これは，(4.30)式より濃度フロントの平均半径 R_1 は総注入体積（量）に比例することから，同一の注入・揚水流量のケースにおいては，注入時間が長いほど分散現象が大きいことを意味していると考えられる。一方，トレーサー総注入量が等しい場合，単位時間あたりの注入流量（注入流速）の大きさと分散長の関係については，不均質場 A の場合に注入流速が大きくなると分散長が減少する傾向が一部に見られるが，注入流速と分散長の関係を結論づけるには，サンプルが少ないと考えられる。最後に，注入・揚水流量 200[cc/min]のケースにおいて，濃度フロントの平均半径が増加しても分散長が減少する原因は，試験やデータ評価の精度が限界に近く，わずかな誤差でプロットの結果が，分散長の減少という結果につながったと考えられる。また，注入・揚水流量 200[cc/min]のケース以外は，破過曲線の傾きがなだらかになると，分散長が増加する傾向が見られた。一方，注入・揚水流量 200[cc/min]のケースでは，破過曲線の傾きがなだらかになっても，分散長は減少した。注入・揚水流量 200[cc/min]のケース以外の結果から，破過曲線の傾きと分散長は関連あると予測される。しかし，破過曲線の傾きは，(4.29)式の補誤差関数の変数である(5.3)式に依存するのであり，分散長のみに依存するものではない。

$$\left(\frac{U_2}{U_1}-1\right)\Bigg/\left[\frac{16}{3}\frac{\alpha}{R_1}\cdot\left(2-\left|1-\frac{U_2}{U_1}\right|^{1/2}\left(1-\frac{U_2}{U_1}\right)\right)\right]^{1/2} \qquad (5.3)$$

これより，注入・揚水流量 200[cc/min]のケースのみ破過曲線の傾きがなだらかになっても，分散長は減少するという結果も他ケースの破過曲線の傾きと分散長の関係とは矛盾しないと考えられる。

分散長と不均質特性の関連については，透水係数の分布が，単一孔周辺では透水性が小さくなっている不均質場 B を用いたケースの方が，単一孔周辺では透水性が大きななっている不均質場 A を用いたケースよりも，分散長が大きくなる傾向が確認されたことから，分散に対する場の不均質性の影響が存在することが考えられる。

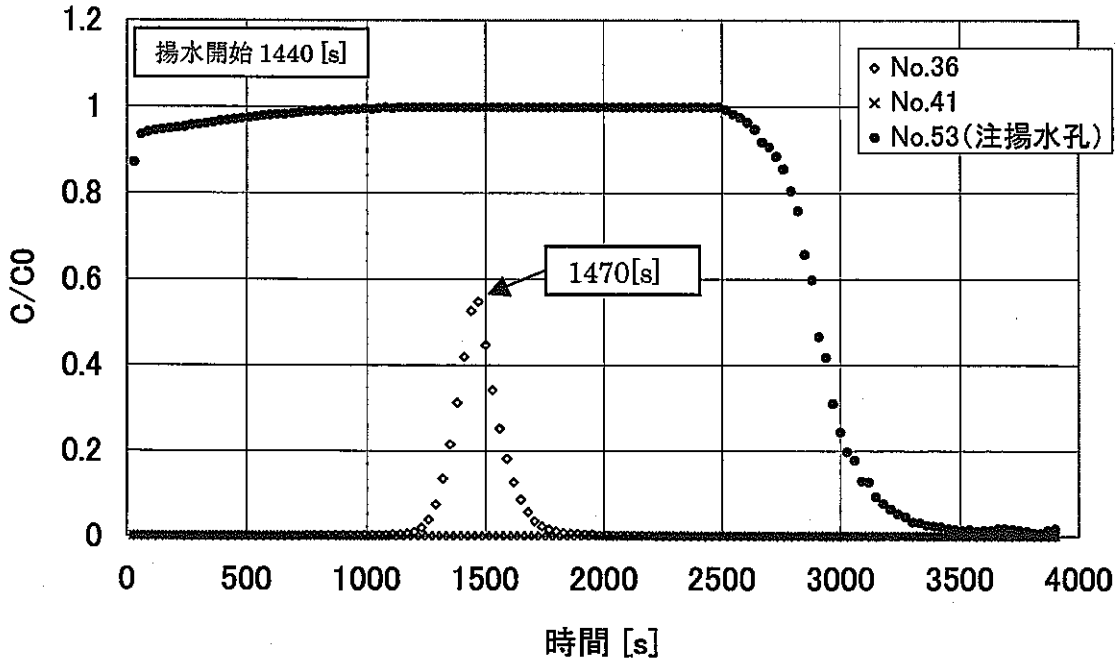


図 5.1　注水・揚水孔及びその周辺でのトレーサー濃度変化（ケース htd100.1）

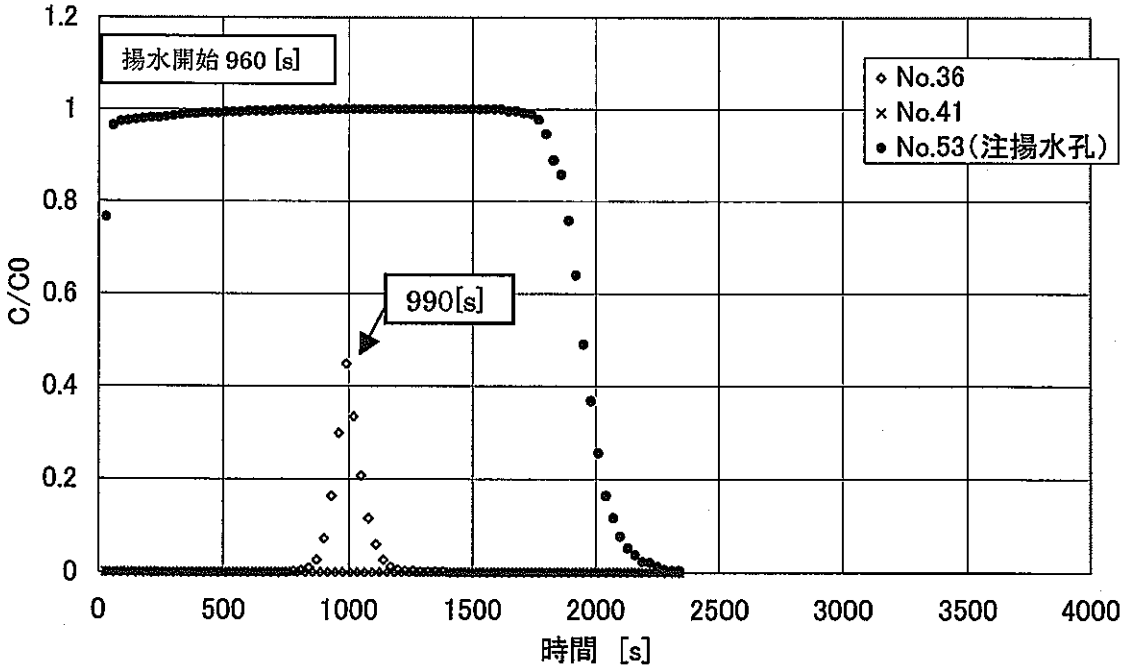


図 5.2　注水・揚水孔及びその周辺でのトレーサー濃度変化（ケース htd150.1）

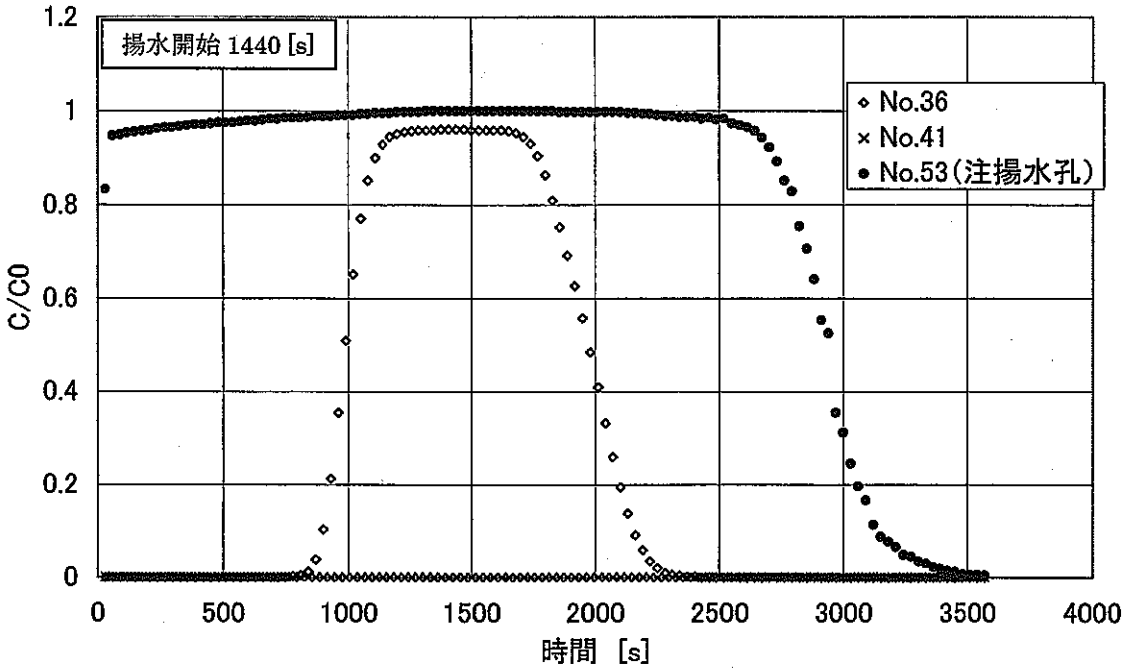


図 5.3　注水・揚水孔及びその周辺でのトレーサー濃度変化（ケース htd150.2）

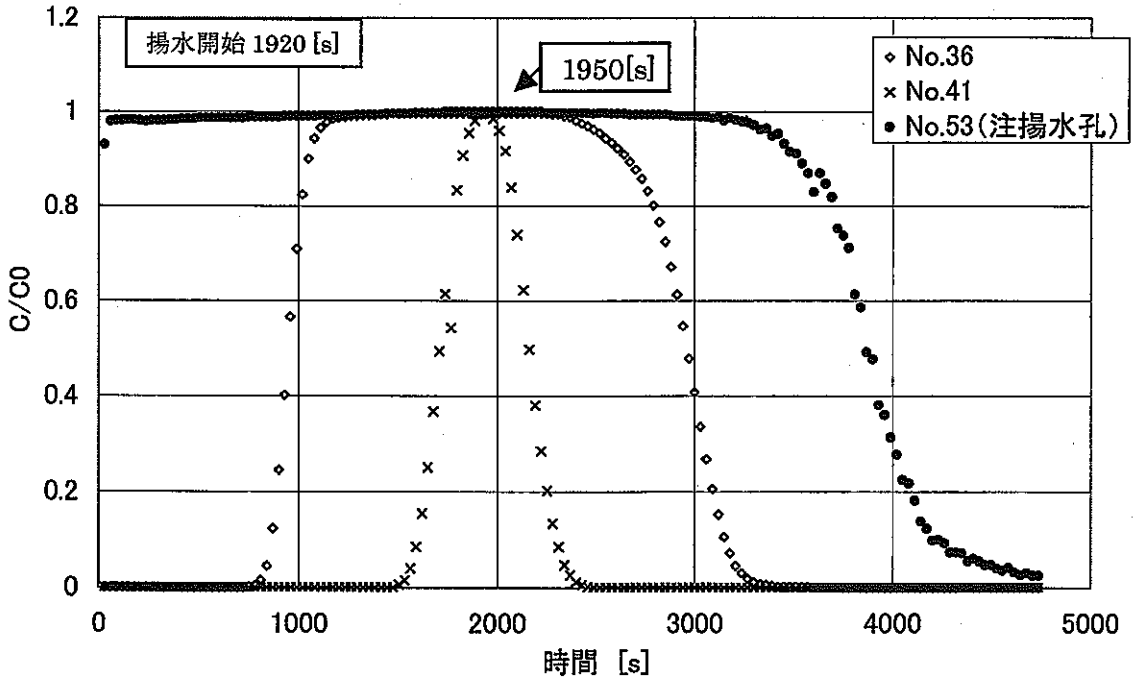


図 5.4　注水・揚水孔及びその周辺でのトレーサー濃度変化（ケース htd150.3）

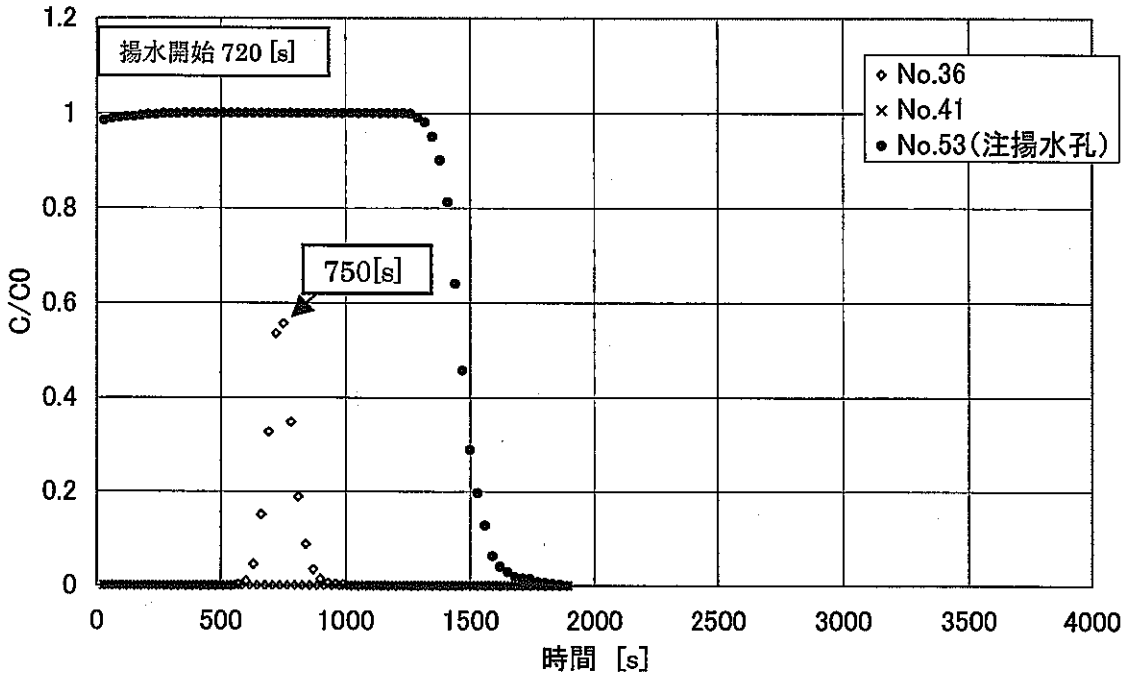


図 5.5　注水・揚水孔及びその周辺でのトレーサー濃度変化（ケース htd200.1）

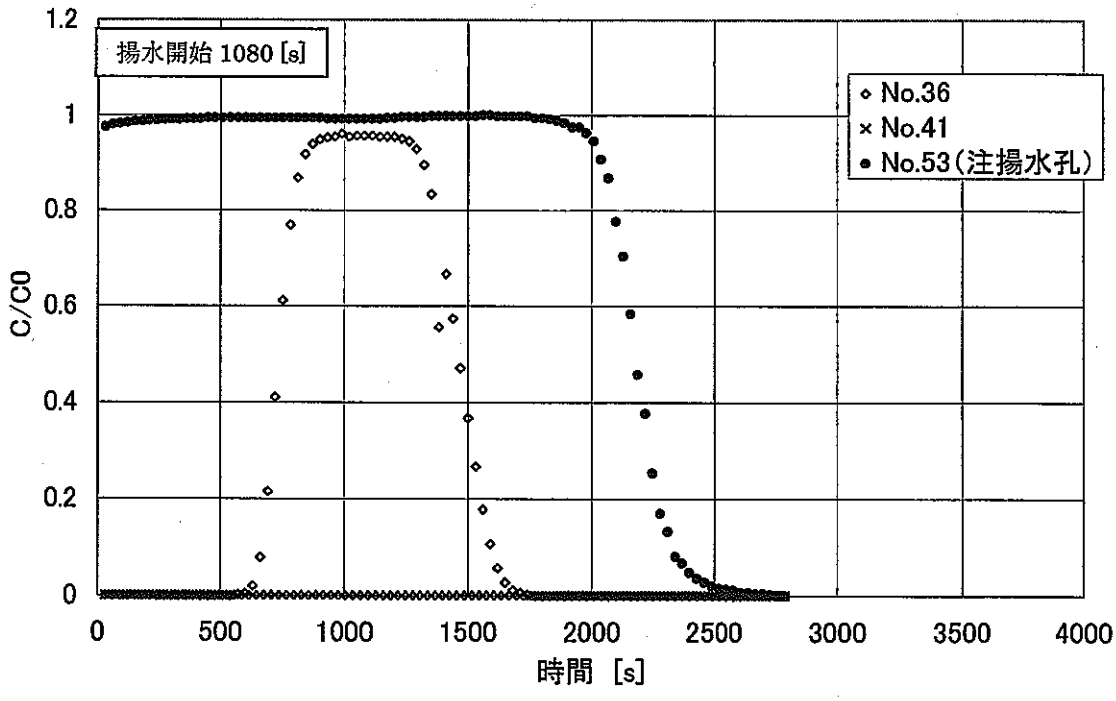


図 5.6　注水・揚水孔及びその周辺でのトレーサー濃度変化（ケース htd200.2）

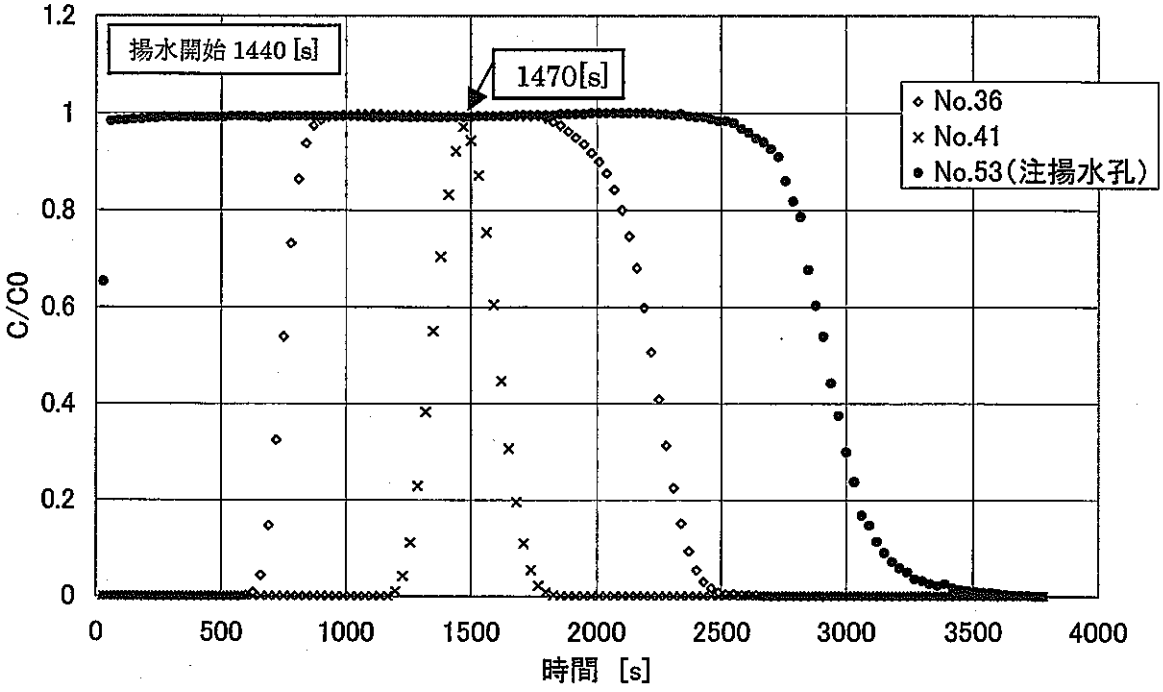


図 5.7　注水・揚水孔及びその周辺でのトレーサー濃度変化（ケース htd200.3）

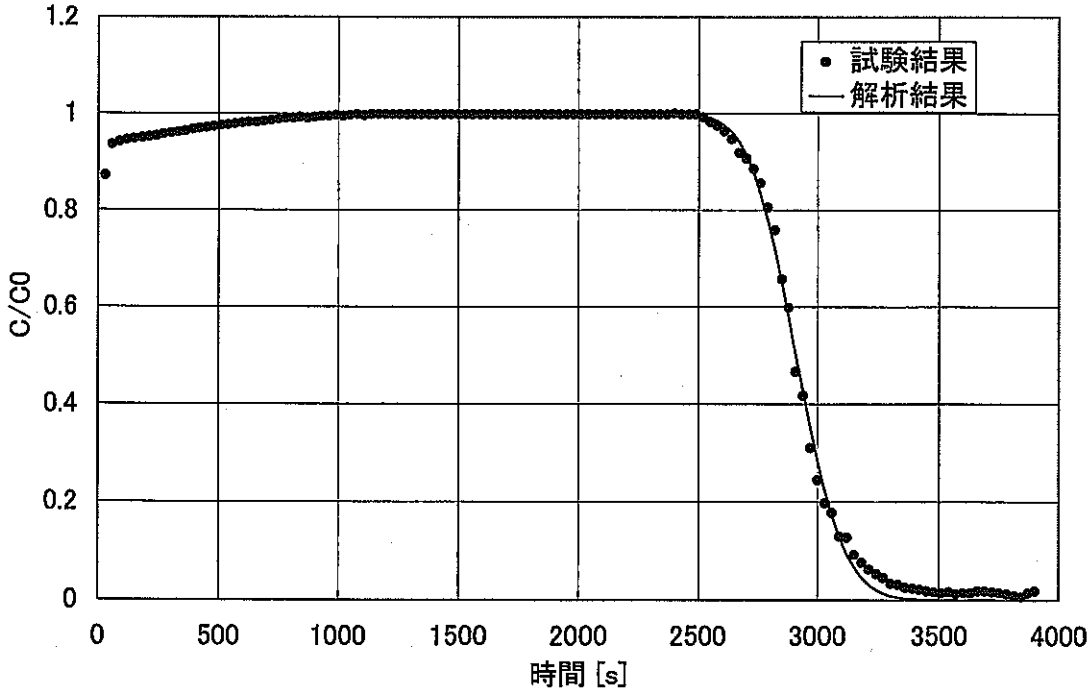


図 5.8 再フィッティングの結果（ケース htd100.1）

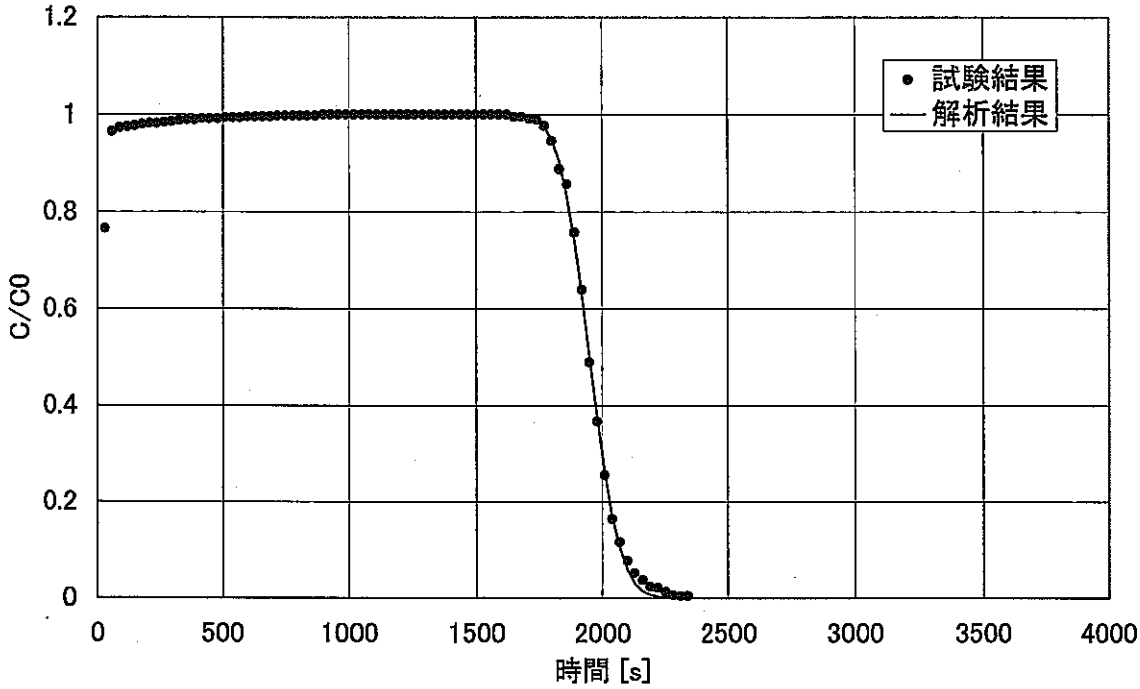


図 5.9　再フィッティングの結果（ケース htd150.1）

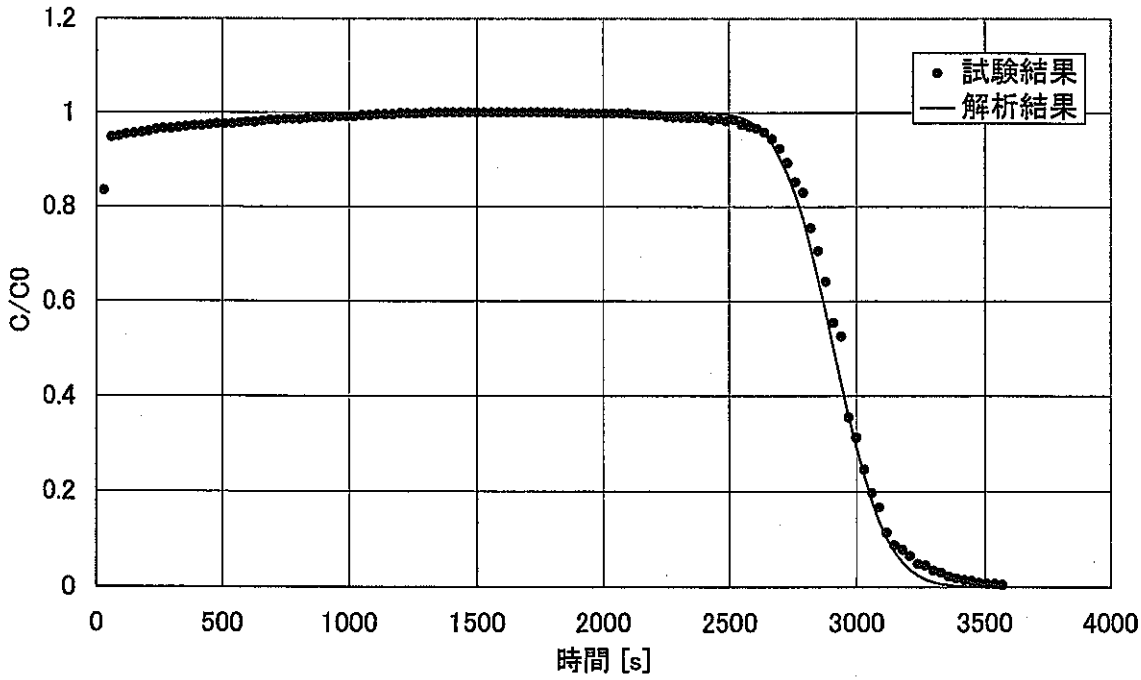


図 5.10　再フィッティングの結果（ケース htd150.2）

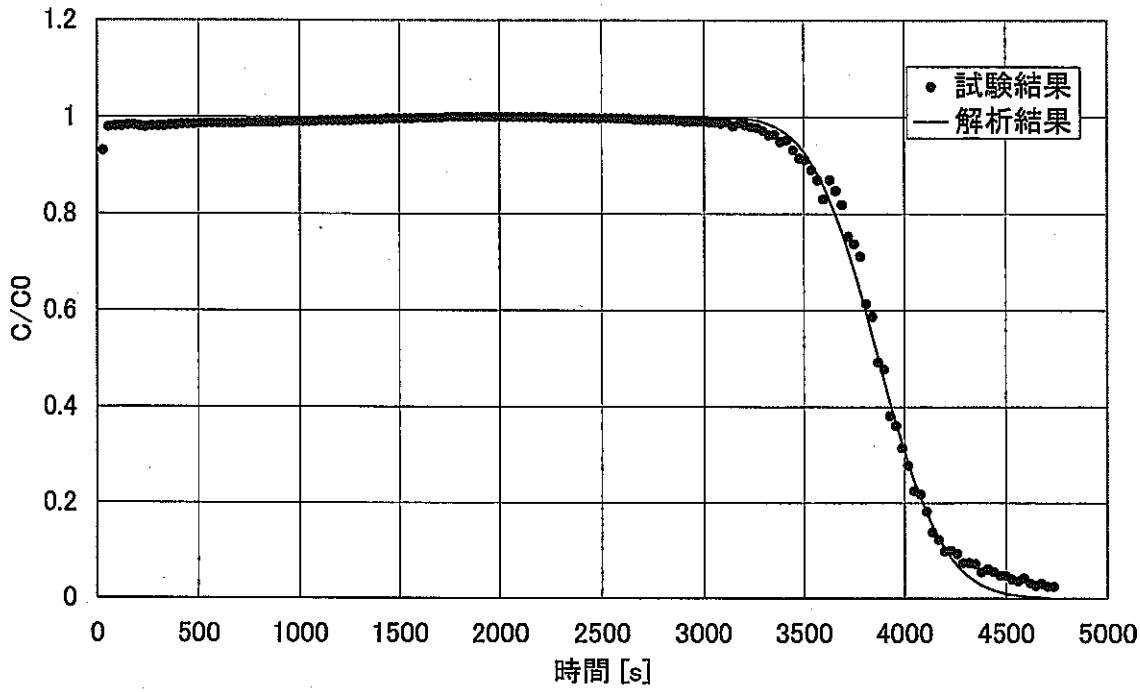


図 5.11　再フィッティングの結果（ケース htd150.3）

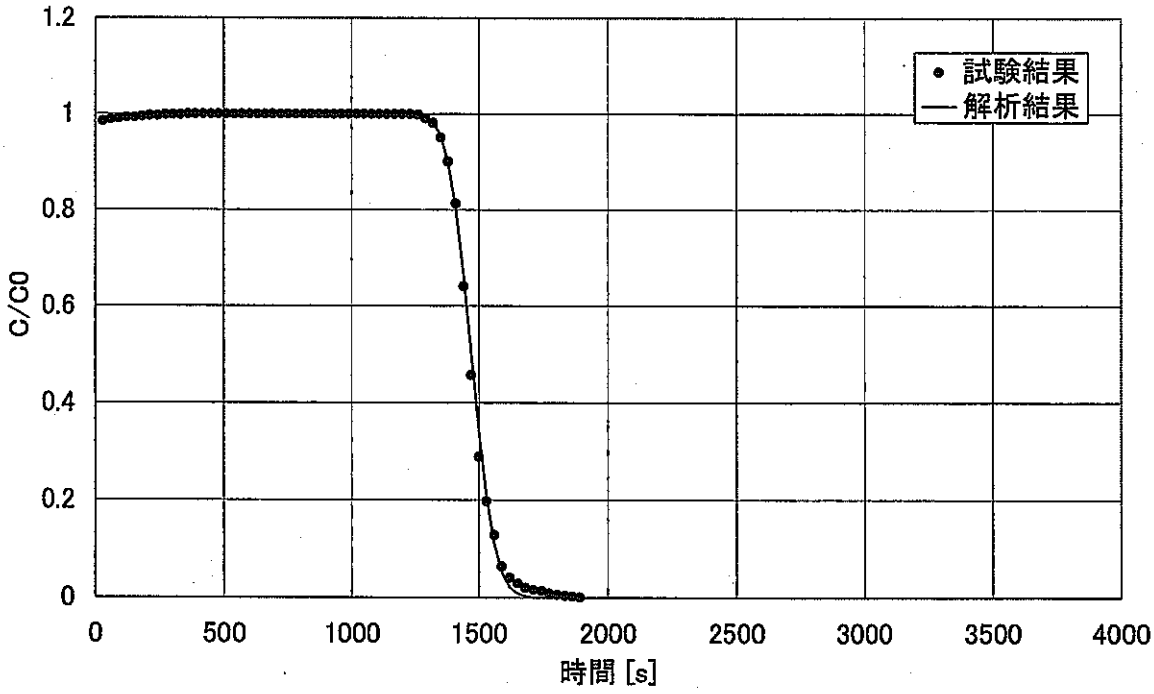


図 5.12　再フィッティングの結果（ケース htd200.1）

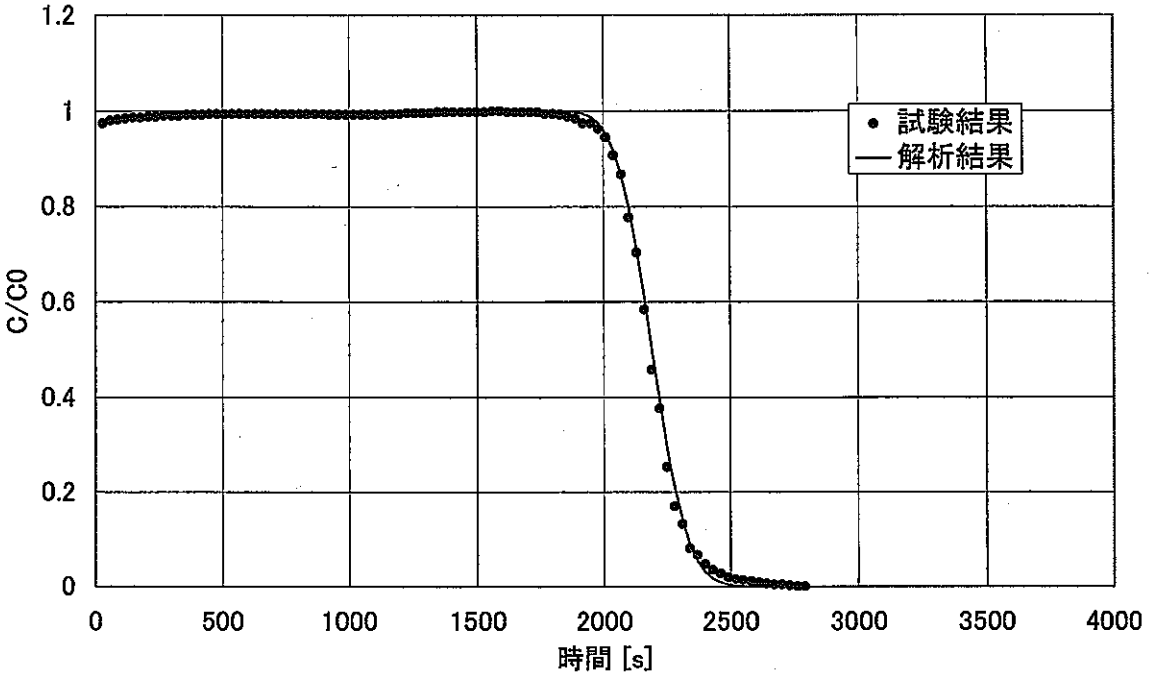


図 5.13　再フィッティングの結果（ケース htd200.2）

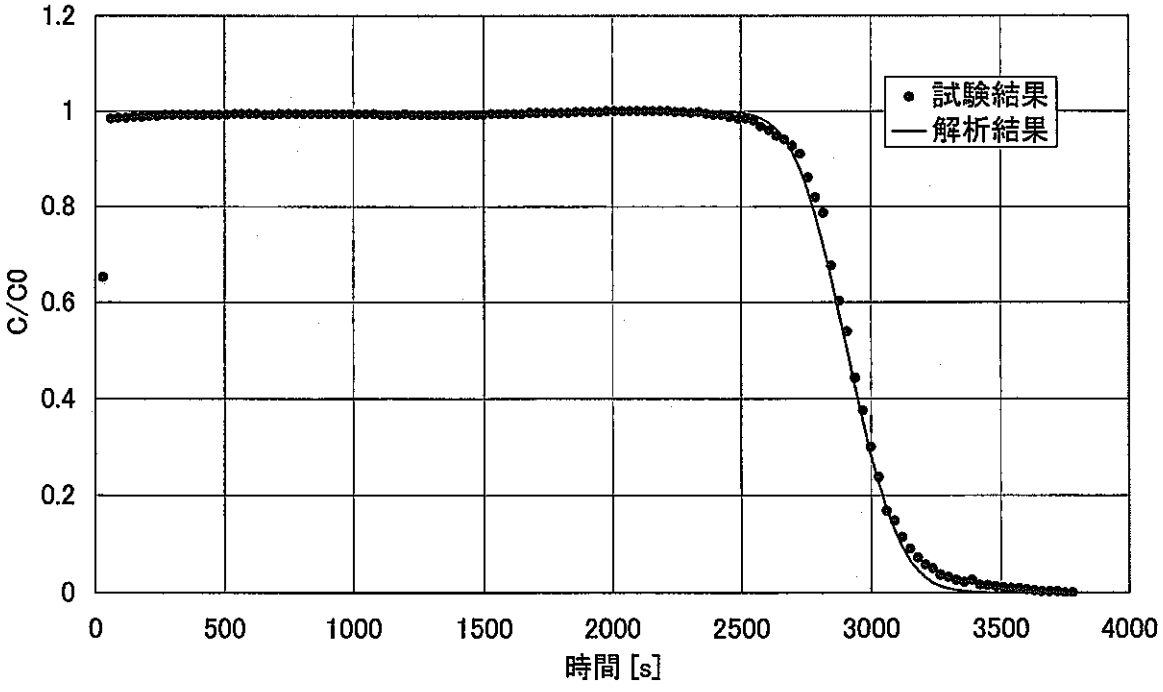


図 5.14　再フィッティングの結果（ケース htd200.3）

表 5.1　分散長の計算結果

試験名称	分散長 (m)	濃度フロントの平均半径 (m)
htd100.1	3.187E-04	1.427E-01
htd100.2	5.172E-04	1.748E-01
htd100.3	7.734E-04	2.019E-01
htd150.1	2.591E-04	1.427E-01
htd150.2	4.195E-04	1.748E-01
htd150.3	6.847E-04	2.019E-01
htd200.1	2.728E-04	1.427E-01
htd200.2	3.416E-04	1.748E-01
htd200.3	4.518E-04	2.019E-01
hte150.1	4.272E-04	1.427E-01
hte200.1	5.854E-04	1.427E-01
hte200.2	5.093E-04	1.748E-01

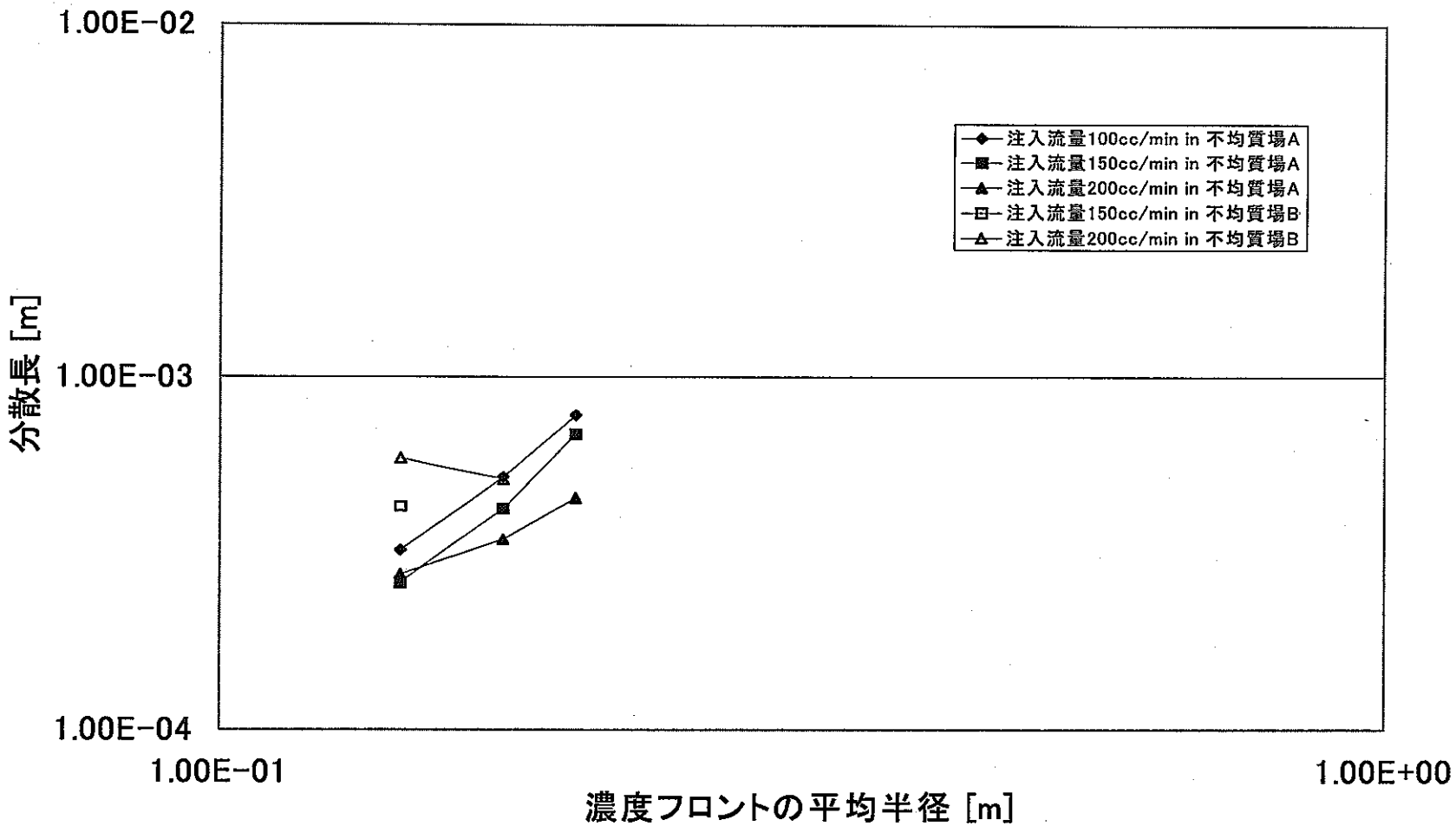


図 5.15　濃度フロントと分散長の関係

6．おわりに

媒体槽を水平状態に固定し，任意の位置に設置したトレーサー孔を使用して，単一孔での注水・揚水型トレーサー試験を実施した。

試験は，不均質場内に設置した単一孔の位置及び注入流量・注入時間を変えることによって，2地点において各々9ケース，6ケースの全15ケースを実施した。

本試験で測定された揚水時の破過曲線を解析解でフィッティングし，巨視的分散長を算定した結果，15ケースのうち12ケースについて不均質場を代表する分散長を得ることができた。

算定した分散長と注入・揚水流量の関連について検討した結果，算定された分散長と単一孔周辺に広がった濃度フロントの平均半径の関係は，濃度フロントの平均半径が大きくなるにしたがって分散長がほぼ単調増加する傾向が確認できた。これは，同一注入・揚水流量のケースにおいては，注入時間が長いほど分散現象が大きいことを意味していると考えられる。ただし，注入・揚水流量200[cc/min]のケースは，試験やデータ評価の精度の限界から上述の傾向とは異なった結果が得られた。一方，トレーサー総注入量が等しい場合，注入流速の大きさと分散長の関係については，注入流速が大きくなると分散長が減少する傾向が一部に見られるが，注入流速と分散長の関係を結論づけるにはサンプルが少ないと考えられる。

トレーサーを注入・揚水する単一孔を2地点選び試験を実施し，算定した分散長と不均質特性の関連について検討した。この結果，単一孔周辺の透水性が小さくなっている場合には分散長は大きくなり，単一孔周辺の透水性が大きくなっている場合には分散長は小さくなる傾向が確認された。これより，分散に対する場の不均質性の影響が存在することが考えられる。

なお，フィッティングの精度が悪く分散長が算出できなかった3ケースについては，濃度フロントに分散が著しく小さい箇所が存在する可能性があることがわかった。

今後の課題として，巨視的分散長と不均質特性の関連について，より詳細に検討することが考えられる。

7．参考文献

・ Gelhar, L.W. and Collins, M.A. : "General Analysis of Longitudinal Dispersion in Nonuniform Flow", Water Resources Research, vol.7, No.6, pp.1511-1521 (1971)