

亀裂を有する軟岩中の流れと  
移行現象に関する研究（Ⅱ）  
（概要版）

（核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書）

2004 年 2 月

大成建設株式会社

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。

〒319-1184 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

技術展開部 技術協力課

電話：029-282-1122（代表）

ファックス：029-282-7980

電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184,

Japan

© 核燃料サイクル開発機構

(Japan Nuclear Cycle Development Institute)

2004

2004年2月

## 亀裂を有する軟岩中の流れと移行現象に関する研究（Ⅱ）（概要版）

（核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書）

下茂道人\*、熊本創\*

## 要旨

高レベル放射性廃棄物の地層処分サイトの性能評価にあたっては、天然バリアを構成する岩盤中における物質移行特性を適切に評価することが重要である。

これまでの研究では、軟岩における物質移行現象に関しては、粒子間間隙を主な移行経路として考えてきた。しかし、亀裂が発達した軟岩においては、亀裂が粒子間間隙よりも卓越した水みちを形成する可能性がある。

本研究は、亀裂を有する軟岩中における物質移行特性の解明を目的とし、文献調査等により我が国の軟岩の基本物性について整理するとともに、軟岩試料を対象とした室内試験および解析を行なったものである。

昨年度の研究では、自然亀裂を有する軟岩コア試料を対象とした室内試験および解析を主に行ない、その結果、昨年度対象試料においては、亀裂内の移流分散が支配的であり、かつマトリクス拡散による遅延効果が大きいことが明らかになった。

本年度の研究では、北海道幌延町にある核燃料サイクル開発機構の幌延深地層研究センターの試錐孔（HDB-6号孔、HDB-7号孔）で採取された珪藻質泥岩コア試料を対象とした室内試験（透水試験、トレーサー試験、拡散試験）を実施し、深度、地層の種類や年代、続成作用等が与える影響について、昨年度に取得したデータも含めて検討した。さらに、コア試料よりも比較的スケールの大きいブロック型の岩体試料を用いた透水試験、トレーサー試験を実施し、試験規模の違いによる水理、物質移行パラメータの変化について検討した。また、岩石亀裂部とマトリクス部の物性値の組み合わせに関するパラメータスタディ等を実施し、亀裂を有する軟岩中の流れと物質移行現象の概念モデルに関する数値解析的検討を行い、岩盤のモデル化手法および解析手法に関する考察を行った。

---

本報告書は、大成建設(株)が、核燃料サイクル開発機構の委託研究契約により実施した研究成果である。

機構担当部課室：東海事業所 処分研究部、システム解析グループ

\*：大成建設（株）

February, 2004

Study on flow and mass transport  
through fractured soft sedimentary rocks ( II ) (Summary)

(Document Prepared by Other Organization, Based on the Trust Contract)

Michito Shimo\*、Sou Kumamoto\*

Abstract

The objective of this study is to establish a conceptual model for flow and transport in fractured soft sedimentary rock.

In 2003 study, a series of laboratory hydraulic and tracer tests using sedimentary rock specimens of Koetoi formation obtained from HDB-4 borehole at Horonobe Deep Underground Reserch Center. Both intact cores and cores with a single natural fracture were used for the tests. The results indicated that the matrix diffusion plays an important role for mass transport in the fractured soft sedimentary rocks.

In this fiscal year, the study was carried out under the following three tasks: (1) classification of soft sedimentary rocks by literature survey, (2) laboratory hydraulic and tracer experiments using rock cores of Yuchi formation and Wakkanai formation obtained at HDB-6 and HDB-7 boreholes and a rock block specimen, Koetoi formation, obtained at an outcrop in the Horonobe area, (3) a numerical study on the conceptual model of flow and mass transport through fractured soft sedimentary rocks.

Non-sorbing tracer experiments using naturally fractured cores and rock block specimens with an artificial fracture were conducted. Potassium iodide was used as a tracer. The obtained breakthrough curve was interpreted and fitted by using a numerical simulator called FRAC3DVS (Therrien et al., 1999), and mass transport parameters, such as longitudinal dispersivity, matrix diffusion coefficient, transport aperture, were obtained.

Mass transport simulation using both a fracture network model and a continuum model were performed to study the applicability of continuum model for transport in fractured sedimentary rock. The results suggested that the continuum model may be applicable if the fracture density is larger than a certain value.

---

Work performed by Taisei Corporation under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute

JNC Liaison: Repository System Analysis Group, Japan Nuclear Cycle Development Institute, Tokai Works

\* : Taisei Corporation

目 次

1. はじめに .....	1
2. 研究概要 .....	2
2.1 研究の目的 .....	2
2.2 研究の内容 .....	2
3. 軟岩の分類 .....	4
4. コア試料を対象とした透水試験／トレーサー試験 .....	8
4.1 コア試料の採取、整形 .....	8
4.2 コア試料の基本物性試験および分析 .....	13
4.3 コア試料を対象とした透水試験 .....	24
4.4 コア試料を対象としたトレーサー試験 .....	36
5. ブロック試料を対象とした透水試験／トレーサー試験 .....	62
5.1 ブロック試料の採取、整形 .....	62
5.2 ブロック試料の基本物性試験および分析 .....	64
5.3 ブロック試料を対象とした透水試験 .....	68
5.4 ブロック試料を対象としたトレーサー試験 .....	71
6. 亀裂を有する軟岩中の流れと移行現象の概念モデルに関する数値解析的検討 .....	86
6.1 亀裂部と岩石マトリクス部の物性値の組み合わせに関するパラメータスタディ .....	86
6.2 岩盤のモデル化手法及び数値解析手法に関する考察 .....	96
6.3 概念モデル化の検討 .....	104
7. おわりに .....	107
参考文献 .....	108

目 次

図 2.2- 1	研究のフロー	2
図 3-1	種々の岩石における透水係数と空隙率との関係 (渡辺、1984)	5
図 3-2	水銀圧入式細孔径分布測定による細孔径分布 (辻他、1994)	5
図 3-1	一軸強度とコア観察結果から得られた亀裂密度の関係	6
図 3-4	一軸強度と EMI 検層結果から得られた亀裂密度の関係	6
図 3- 2	一軸強度と亀裂密度の関係 (亀裂の走行による分類)	7
図 3- 3	一軸強度と亀裂密度の関係 (亀裂の傾斜による分類)	7
図 4.2- 1	X 線分析結果 (声問層 : 6-2f)	18
図 4.2- 2	X 線分析結果 (声問層 : 7-1i-001)	19
図 4.2- 3	水銀圧入法による細孔径分布測定結果 (試料名 : 6-2f)	22
図 4.2 -4	水銀圧入法による細孔径分布測定結果 (試料名 : 7-1i-001)	22
図 4.2- 5	水銀圧入法による細孔径分布測定結果 (全コア試料)	23
図 4.2- 6	基本物性試験と水銀圧入試験の有効空隙率測定結果の比較	23
図 4.3- 1	トランジェントパルス透水試験装置概要	24
図 4.3- 2	トランジェントパルス法測定原理	25
図 4.3- 3	トランジェントパルス透水試験手順	25
図 4.3- 4	岩盤内応力と深度の関係 (HDB-1 号孔)	26
図 4.3- 5	トランジェントパルス透水試験結果 (試料名 : 6-2i-h)	28
図 4.3- 6	トランジェントパルス透水試験結果 (試料名 : 7-1i-001)	29
図 4.3- 7	透水試験結果の比較 (昨年度試験結果 (稚内層) との比較)	30
図 4.3- 8	透水試験結果の比較 (声問層と勇知層の比較)	31
図 4.3- 9	定流量透水試験装置概要	32
図 4.3- 10	定流量透水試験手順	32
図 4.3- 11	亀裂試料における封圧と透水量係数の関係	35
図 4.4- 1	拡散実験装置概要	36

図 4.4- 2	拡散実験装置および供試体の概観	36
図 4.4- 3	拡散試験結果（試料名：6-2i-h）	39
図 4.4- 4	拡散試験結果（試料名：7-1i-003）	39
図 4.4- 5	実効拡散係数と有効空隙率の比較（既往データとの比較）	40
図 4.4- 6	トレーサー試験装置概要（昨年度試験時レイアウト）	42
図 4.4- 7	トレーサー試験装置概要（昨年度試験時レイアウト）	42
図 4.4- 8	センサーキャリブレーション検討結果	43
図 4.4- 9	昨年度試験トレーサー試験結果（試料名：2-1f、封圧：2.4MPa）	45
図 4.4- 10	アクリル半割りダミー試料（亀裂開口幅 0.05mm）	45
図 4.4- 11	トレーサー試験結果（アクリル製ダミー：H14 年度試験法）	46
図 4.4- 12	注入圧力と排水側流量の関係	46
図 4.4- 13	改良トレーサー試験装置のレイアウト	47
図 4.4- 14	トレーサー試験解析結果（初期圧力ありの場合）	47
図 4.4- 15	トレーサー試験結果（試料名：6-2f、封圧：0.8MPa）	50
図 4.4- 16	トレーサー試験の解析条件	52
図 4.4- 17	トレーサー試験の解析結果（試料名：6-2f、封圧：0.8Mpa）	54
図 4.4- 18	分散長と試験スケールの関係（既往データとの比較）	55
図 4.4- 19	物質移行開口幅と水理開口幅の関係	56
図 4.4- 20	透水量係数と物質移行開口幅の関係	56
図 4.4- 21	透水量係数と物質移行開口幅の関係（釜石原位置試験データとの比較）	57
図 4.4- 22	測定試料	58
図 4.4- 23	X 線 CT 撮影用拡散試験装置概要	60
図 4.4- 24	拡散試験中の X 線 CT 原画像	61
図 5.1- 1	平行平板試料の作成	63
図 5.2- 1	X 線分析結果（声問層：6-2f）	65
図 5.2- 2	水銀圧入法による細孔径分布測定結果（ブロック試料：B-2）	66
図 5.2- 3	水銀圧入法による細孔径分布測定結果（全コア試料およびブロック試料）	67

図 5.2- 4	基本物性試験と水銀圧入試験の有効空隙率測定結果の比較	67
図 5.3- 1	トランジェントパルス透水試験結果（ブロック試料 B-2）	69
図 5.3- 2	定流量透水試験装置概要	70
図 5.4- 1	拡散試験結果（ブロック試料）	71
図 5.4- 2	実効拡散係数と有効空隙率の比較（既往データとの比較）	72
図 5.4- 3	コア試料用セル型トレーサー試験装置概要	74
図 5.4- 4	コア試料セル式トレーサー試験結果（アクリル製ダミー試料： $e=0.05\text{mm}$ ）	75
図 5.4- 5	ブロック試料用セル型トレーサー試験装置概要	77
図 5.4- 6	供試体作成の模式図	78
図 5.4- 7	アクリル製ブロックダミー概要	80
図 5.4- 8	ブロック試料セル式トレーサー試験結果（アクリル製ダミー試料： $e=0.05\text{mm}$ ）	81
図 5.4- 9	トレーサー試験結果（ブロック試料：B-1）	84
図 5.4- 10	トレーサー試験の解析条件（ブロック試料：B-1）	84
図 5.4- 11	透水量係数と物質移行開口幅の関係（釜石原位置試験データとの比較）	85
図 5.4- 12	分散長と試験スケールの関係（既往データとの比較）	85
図 6.1- 1	解析モデル概要	87
図 6.1- 2	解析結果（観測点 A における破過曲線：基本ケースおよびケース①～⑤）	90
図 6.1- 3	解析結果（観測点 A における破過曲線：基本ケースおよびケース①～⑤）	90
図 6.1- 4	亀裂開口幅とマトリクス拡散によるトレーサーロス率の関係	91
図 6.1- 5	解析結果（観測点 A における破過曲線：基本ケースおよびケース⑥、⑦）	92
図 6.1- 6	解析結果（観測点 A における破過曲線：基本ケースおよびケース⑥、⑦）	92
図 6.1- 7	マトリクス部の透水係数とマトリクス拡散によるトレーサーロス率の関係	93
図 6.1- 8	解析結果（観測点 A における破過曲線：基本ケースおよびケース⑧、⑨）	94
図 6.1- 9	解析結果（観測点 A における破過曲線：基本ケースおよびケース⑧、⑨）	94
図 6.1- 10	マトリクス部の拡散係数とマトリクス拡散によるトレーサーロス率の関係	95
図 6.2- 1	解析モデル概要（亀裂ネットワークモデル）	97



図 6.2- 2	解析モデル概要（多孔質媒体モデル）	97
図 6.2- 3	亀裂ネットワークモデルにおける亀裂分布（亀裂密度：30%）	98
図 6.2- 4	亀裂ネットワークモデルにおける亀裂分布（亀裂密度：40%）	98
図 6.2- 5	亀裂ネットワークモデルにおける亀裂分布（亀裂密度：50%）	98
図 6.2- 6	亀裂ネットワークモデルにおける亀裂分布（亀裂密度：70%）	98
図 6.2- 7	亀裂ネットワークモデルにおける破過曲線（亀裂密度 30%解析結果）	100
図 6.2- 8	亀裂ネットワークモデルにおける破過曲線（亀裂密度 40%解析結果）	100
図 6.2- 9	亀裂ネットワークモデルにおける破過曲線（亀裂密度 50%解析結果）	101
図 6.2- 10	亀裂ネットワークモデルにおける破過曲線（亀裂密度 70%解析結果）	101
図 6.2- 11	フィッティング結果（亀裂密度：30%）	102
図 6.2- 12	フィッティング結果（亀裂密度：40%）	102
図 6.2- 13	フィッティング結果（亀裂密度：50%）	103
図 6.2- 14	フィッティング結果（亀裂密度：70%）	103

## 目 次

表 4.1- 1	HDB-6 孔 試料採取一覧	9
表 4.1- 2	HDB-7 孔 試料採取一覧	9
表 4.1- 3	試料整形結果一覧	11
表 4.1- 4	試験試料一覧（亀裂、インタクト、異方性試料組合せ）	11
表 4.2- 1	試料分析項目一覧	13
表 4.2- 2	コア試料基本物性試験結果一覧	15
表 4.2- 3	コア試料一軸圧縮試験結果一覧	15
表 4.2- 4	X線分析結果一覧	17
表 4.2- 5	水銀圧入試験結果一覧	21
表 4.3- 1	トランジェントパルス透水試験ケース	26
表 4.3- 2	トランジェントパルス透水試験法で用いた既知パラメーター一覧	27
表 4.3- 3	トランジェントパルス透水試験結果一覧（声問層、勇知層）	27
表 4.3- 4	定流量透水試験ケース	33
表 4.3- 5	定流量透水試験結果一覧（今年度試料：声問層、勇知層）	34
表 4.3- 6	定流量透水試験結果一覧（昨年度試料：稚内層）	34
表 4.4- 1	拡散試験ケース	37
表 4.4- 2	試験条件一覧	37
表 4.4- 3	拡散試験結果一覧（今年度試料：声問層、勇知層）	38
表 4.4- 4	拡散試験結果一覧（昨年度試料：稚内層）	38
表 4.4- 5	トレーサー試験ケース	48
表 4.4- 6	トレーサー試験条件一覧	48
表 4.4- 7	解析入力条件一覧	51
表 4.4- 8	トレーサー試験解析結果一覧	55
表 4.4- 9	試験条件一覧	59
表 5.1- 1	ブロック試料採取一覧	62

表 5.2- 1	試料分析項目一覧	64
表 5.2- 2	ブロック試料基本物性試験結果一覧	64
表 5.2- 3	X線分析結果一覧（ブロック試料：B-1）	65
表 5.2- 4	水銀圧入試験結果（ブロック試料：B-2）	66
表 5.3- 1	トランジェントパルス透水試験結果一覧（声問層、勇知層）	68
表 5.3- 2	定流量透水試験結果一覧（今年度試料：声問層、勇知層）	70
表 5.4- 1	拡散試験結果一覧（ブロック試料）	72
表 5.4- 2	セル型トレーサー試験 試験条件	75
表 5.4- 3	ブロックトレーサー試験条件（アクリル製ダミー試料）	79
表 5.4- 4	ブロックトレーサー試験条件（岩石試料）	82
表 5.4- 5	定水頭透水試験結果（ブロック試料：B-1）	84
表 5.4- 6	トレーサー試験解析入力条件一覧	84
表 6.1- 1	解析ケース一覧	87
表 6.2- 1	解析ケースおよび入力パラメーター一覧	96
表 6.2- 2	フィッティング結果一覧	99

## 写真目次

写真 4.1-1	亀裂試料再コアリング方向	12
写真 4.1-2	インタクト異方性試料再コアリング方向	12
写真 4.3-1	トランジェントパルス透水試験装置概観	24
写真 4.4-1	X線 CT 撮影用拡散試験装置	60
写真 4.4-2	X線 CT スキャナ装置セット状況	60
写真 5.1-1	採取試料全景 (試料名 : B-2)	62
写真 5.4-1	コア試料用セル型トレーサー装置概要	74
写真 5.4-2	コア試料用セル型トレーサー装置概要 (アクリル製ダミー試料セット時)	77
写真 5.4-3	アクリル製ブロックダミー外観	80

## 1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分サイトの性能評価にあたっては、天然バリアを構成する岩盤中における物質移行特性を適切に評価することが重要である。

核燃料サイクル開発機構では、岩盤の物質移行特性に関して、硬岩（古い時代の堆積岩や結晶質岩）と軟岩（新しい時代の堆積岩）に分けた研究を行ってきた。その中で、軟岩では粒子間空隙が主な移行経路として考えられてきた。しかしながら、軟岩においても、亀裂が発達している場合においては、亀裂が粒子間空隙よりも卓越した水みちを形成すると考えられる。

本件では、高レベル放射性廃棄物の地層処分サイトの性能評価において必要となる、亀裂を有する軟岩内における物質移行現象の概念モデル検討を目的とし、我が国の堆積軟岩の基本物性について整理するとともに、堆積性軟岩試料を対象とした物質移行特性に関する室内試験（透水試験、トレーサー試験）および解析を実施する。

## 2. 研究概要

### 2.1 研究の目的

本研究は、亀裂を有する堆積性軟岩中における物質移行特性の解明を目的とし、文献調査ならびに軟岩試料を対象とした室内試験を行うものである。

### 2.2 研究の内容

本年度の実施項目は、以下のとおりである。

- (1) 軟岩の分類
- (2) コア試料を対象とした透水試験／トレーサ試験
- (3) ブロック試料を対象とした透水試験／トレーサ試験
- (4) 亀裂を有する軟岩中の流れと移行現象の概念モデルに関する数値解析的検討

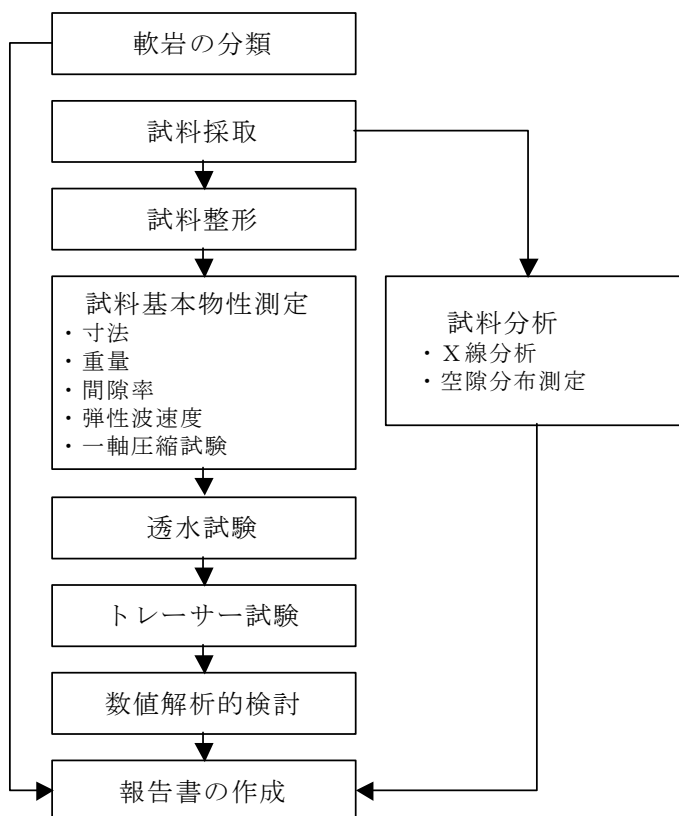


図 2.2- 1 研究のフロー

### (1) 軟岩の分類

文献調査等により、我が国の堆積軟岩の基本物性に関する情報を収集・整理を継続し、特に、水理特性や物質移行特性に関するパラメータに着目して整理・検討する。また、平成14年度に実施した試験で得られた結果との比較を行う。また、堆積性軟岩の亀裂分布特性に関するデータとして、サイクル機構幌延深地層研究センターが幌延地域で実施している試錐調査（HDB-1～5孔）で取得された調査データを用い、一軸圧縮強度（または、変形係数）と亀裂頻度（または、RQDなど）との関係を整理し、分析する。

### (2) コア試料を対象とした透水試験／トレーサ試験

試験に用いる試料は、幌延深地層研究センターの試錐孔で取得された岩芯から、声問層と勇知層を対象に、亀裂試料、インタクト試料を採取する。インタクト試料に関しては、声問層、勇知層のそれぞれについて、岩石の異方性を考慮して採取を実施する。

試験は、原位置地下を模擬した条件下での透水試験および非収着性のトレーサー試験を実施する。試験方法は、インタクト試料については、透水試験をトランジェントパルス法にて行い、トレーサー試験は、移流を考慮しない拡散試験を行う。試験から得られるデータを解析し、透水係数ならびに拡散係数を求める。また、亀裂試料については、透水試験を定流透水試験で、トレーサー試験を昨年度と同様の試験装置を用いて、移流を考慮した非収着性トレーサー試験を行う。それぞれ、透水係数と物質移行開口幅、分散長を求める。

### (3) ブロック試料を対象とした透水試験／トレーサ試験

試験に用いる試料は、幌延地域の露頭を対象に採取を行う。採取した試料を整形し、ブロック形状の平行平板試料を作成する。

試験は、新しく開発したセル型の試験装置を用い、定水頭透水試験ならびに非収着性トレーサー試験を行う。また、採取した試料より別途インタクトコア試料を整形し、トランジェントパルス法による透水試験ならびに拡散試験を行い、岩石インタクト部の透水係数、拡散係数を求める。

### (4) 亀裂を有する軟岩中の流れと移行現象の概念モデルに関する数値解析的検討

亀裂を有する堆積軟岩における物質移行の概念モデルについて、以下の点について数値解析的な検討を行う。

- ① 亀裂部と岩石マトリクス部の物性値の組み合わせに関するパラメータスタディ
- ② 岩盤のモデル化手法及び数値解析手法に関する考察

### 3. 軟岩の分類

文献調査等により、軟岩の透水性や、物質移行特性に寄与すると考えられるパラメータの中から、特に空隙率と透水係数の関係に関して整理し、平成 14 年度に実施した試験で得られた結果の位置づけを確認した。また、堆積性軟岩の亀裂分布特性に関するデータとして、サイクル機構幌延深地層研究センターが幌延地域で実施している試錐調査（HDB-1～5 孔）で取得された調査データを用い、一軸圧縮強度（または、変形係数）と亀裂頻度（または、RQD など）との関係を整理した。その結果、以下のことが分かった。

#### (1) 岩石マトリクス部の有効空隙率と透水係数の関係

- ① 岩石マトリクス部の有効空隙率と透水係数には正の相関があり、空隙率が同じ堆積岩では、粘土分が多いほど透水係数が小さくなる（図 3-1）。
- ② 平成 14 年度で対象とした試料（HDB-4 孔：稚内層）の有効空隙率と透水係数の関係を既往の文献に示される調査結果と比較した結果、H14 年度試料の透水性は、同等の空隙率を有する堆積岩に比べて 2 オーダー程度低いことが分かった（図 3-1）。
- ③ 岩石マトリクス部の透水性は、空隙の大きさ、連続性、粘土含有率に加え、孔口径分布等の岩石の空隙微細構造の影響を大きく受ける（図 3-2）。

#### (2) 一軸強度と亀裂密度の関係

- ① 幌延深地層研究センターが平成 13 年度に実施した試錐調査（HDB-1 孔、HDB-2 孔）および、平成 14 年度に実施した試錐調査（HDB-3 孔、HDB-4 孔、HDB-5 孔）で得られたデータを用いて一軸強度と亀裂密度の関係について整理した。その結果、声問層では、強度が低く亀裂密度も小さい傾向が見られ、その反対に稚内層では、強度が高く亀裂密度も高い傾向が見られるが、全体的には強度と亀裂密度について、明瞭な相関性は見られないことが分かった（図 3-3、図 3-4）。
- ② EMI 検層結果を用いて、亀裂の走向、傾斜について分類を行い、それぞれについて一軸強度と亀裂密度の関係について整理した。その結果、当該調査結果においては、走向、傾斜のどの区分においても一軸強度と亀裂密度の間に明瞭な相関性は見られないことが分かった（図 3-5、図 3-6）。

以上から、岩盤の透水性（特にマトリクス部の透水係数と有効空隙率の関係）は、堆積環境や属性作用の違いを反映しており、その値に基づいた分類の可能性が示されたが、データ数の不足や、地史的な検討が不十分であることから、今後、さらなるデータ蓄積ならびに検討が必要と考える。



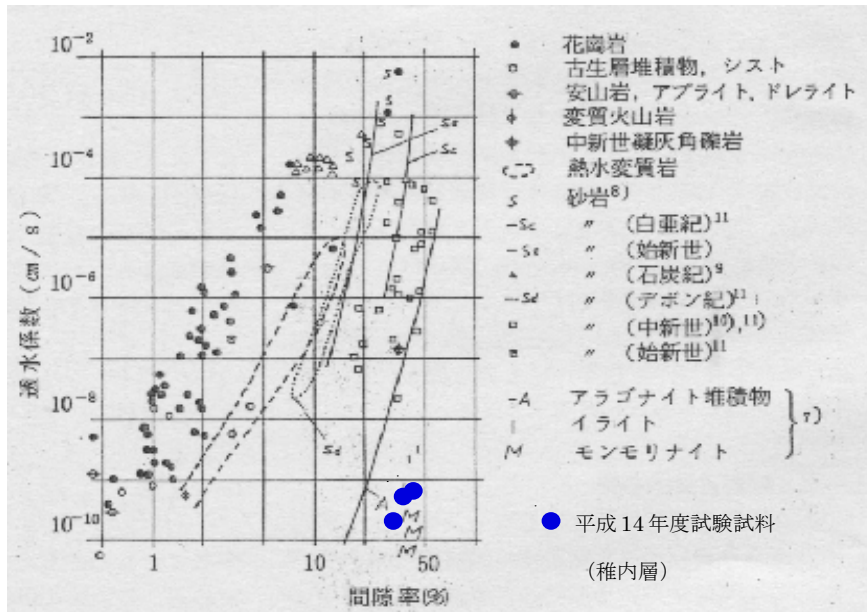


図 3-1 種々の岩石における透水係数と空隙率との関係 (渡辺、1984)

7) Levorson, A.I. (1958) : Geology of petroleum, San Francisco, H.W. Freeman & Co., p.133.

8) Fatt, I., and Davis, D.H. (1952) : Reduction in permeability with overburden pressure, Trans. A.I.M.E., vol.195, p.329

9) Bell, F.G. (1978) : Petrographical factors relating to porosity and permeability in the Fell sandstone, Q.J.Eng.Geol., vol.11, pp.113-126.

10) 石油技術協会 (1973) : 日本の石油鉱業と技術, pp.1-430.

11) 新潟県 (1997) : 新潟県地質図説明書, pp.208-209.

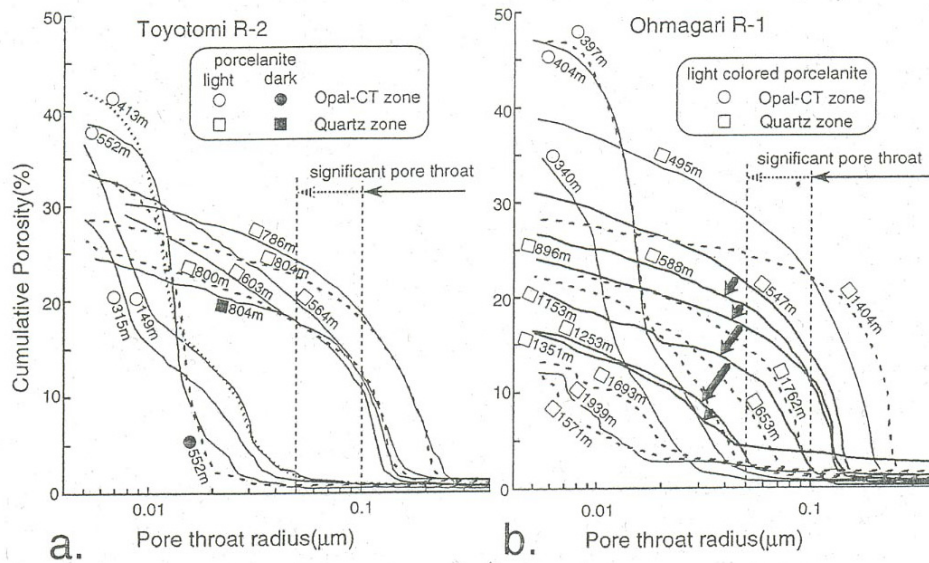


図 3-2 水銀圧入式細孔分布測定による孔口径分布 (辻他、1994)

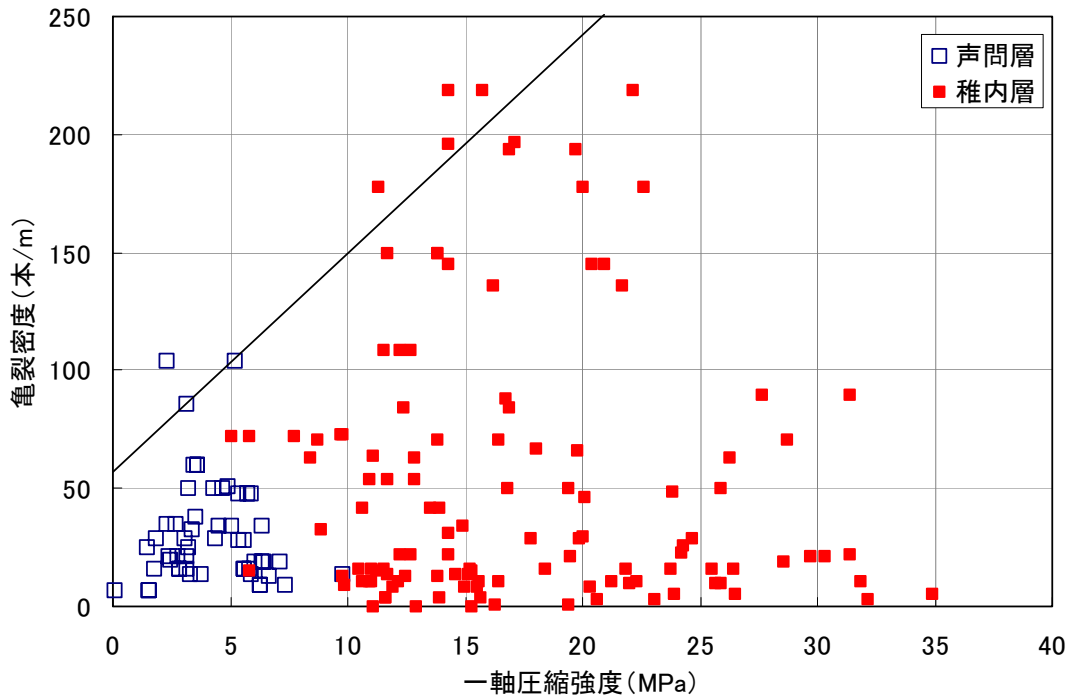


図 3-3 一軸強度とコア観察結果から得られた亀裂密度の関係

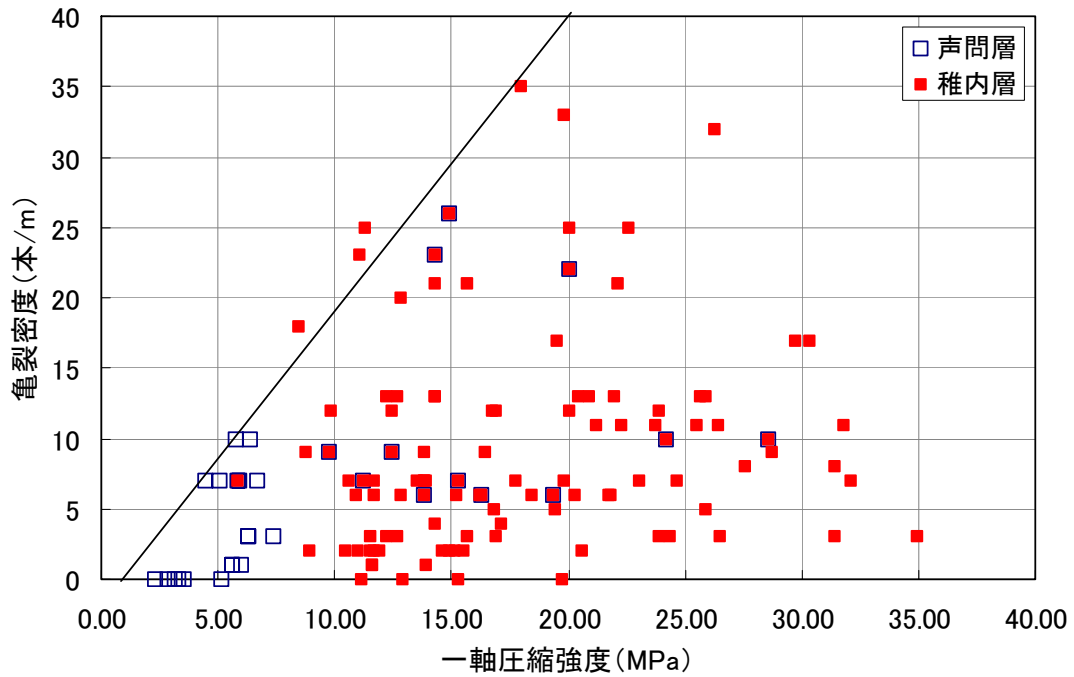


図 3-4 一軸強度と EMI 検層結果から得られた亀裂密度の関係

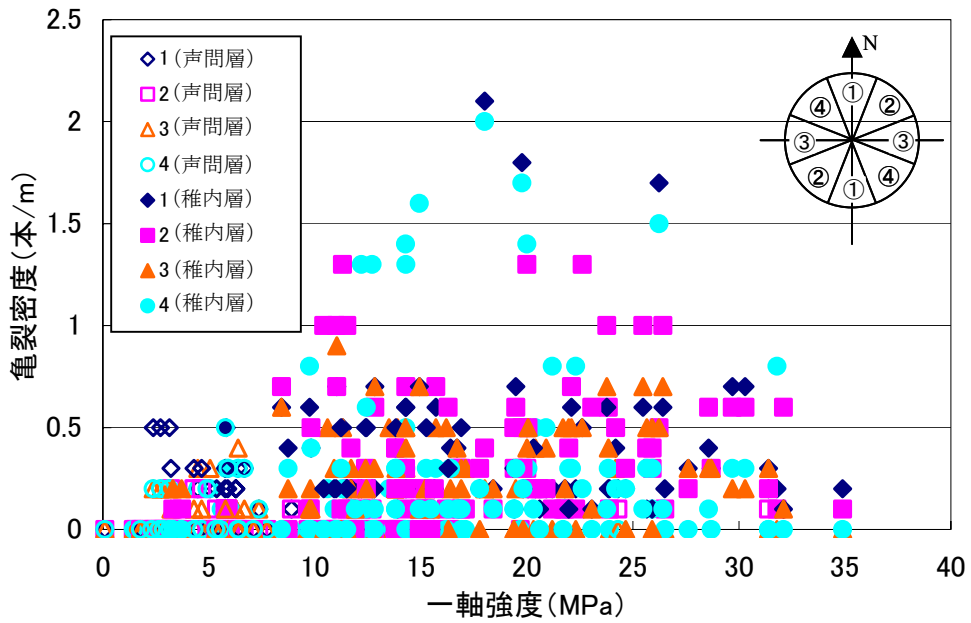


図 3-5 一軸強度と亀裂密度の関係（亀裂の走向による分類）

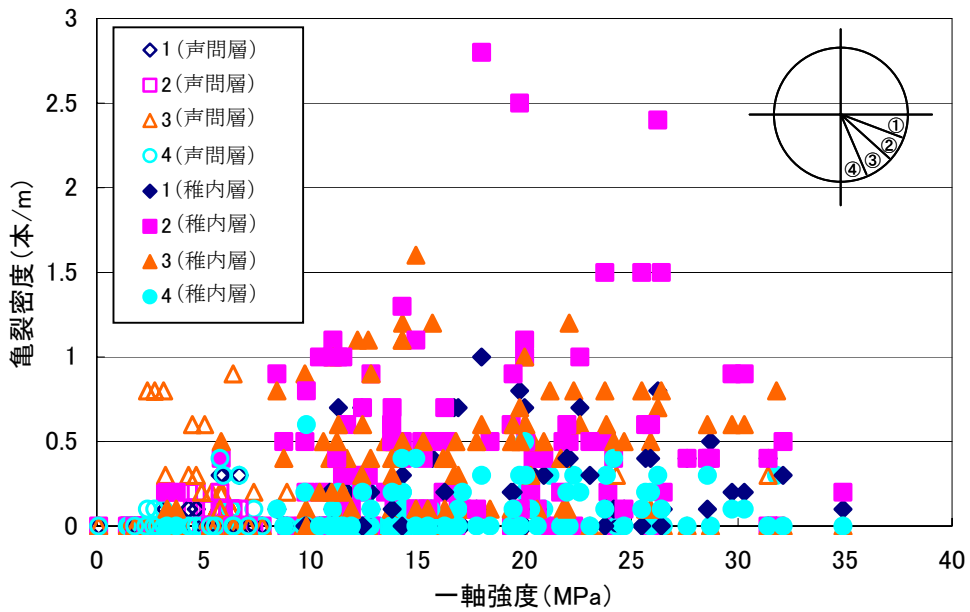


図 3-6 一軸強度と亀裂密度の関係（亀裂の傾斜による分類）

## 4. コア試料を対象とした透水試験／トレーサ試験

### 4.1 コア試料の採取、整形

北海道幌延町にある核燃料サイクル開発機構幌延深地層研究センターが平成15年度に掘削した試錐孔（HDB-6孔、HDB-7孔）において、透水/トレーサ試験用の試料を採取した。採取地点ならびに採取方法を以下に記す。

#### 4.1.1 コア試料の採取

採取位置として、幌延深地層研究センターの試錐孔（HDB-6孔、HDB-7孔）を選定した理由は、以下のとおりである。

- ・ 削孔深度が約500m～600mと深く、深部岩盤内の試料を採取可能なこと。
- ・ 本研究の実施期間内に削孔中であり、新鮮なコアを採取可能なこと。
- ・ 過去の試錐結果から、深度方向における続成作用程度の違い（シリカ鉱物の続成変化）が確認されており、続成作用による違いを比較検討できること。

コア試料の採取は、インタクト部が均質で、変質ができるだけ少なく、密着した亀裂\*を有するものを対象とする方針で行った。なお、当該箇所の軟岩は、珪藻を主体とし、粘土分が非常に少ない珪藻質泥岩であるため、乾燥すると崩れやすい。そのため、コアの輸送および保管に際しては、乾燥や衝撃によるコア試料の破損を防ぐため、パラフィンコーティングを行った。

上記採取方針に従って、採取を行った結果、HDB-6孔では、声問層のコア試料を100m付近、200m付近、245m付近の3深度、HDB-7孔では、勇知層のコア試料を200m付近、230m付近、240m付近の3深度を採取することができた。表4.1-1および表4.1-2に採取試料の一覧を示す。

※明瞭な亀裂（構造的や鉱物充填亀裂など）においては、既に亀裂面でコアが分離しており、自然の開口状態が分からないだけでなく、亀裂面が変形、もしくは削られている可能性がある。また、当区域の泥岩は非常に崩れやすいため、コア整形も困難である。そこで、岩芯観察図ならびに採取時の目視によりコアの亀裂の状態を確認し、密着した亀裂を対象として採取箇所を決定することとした。

表 4.1-1 HDB-6 孔 試料採取一覧

採取深度 (m)			採取長 (m)	地層名	亀裂の有無	亀裂の状態	用途	試料名
92.80	～	93.00	0.2	声間層	有・無	密着	透水 トレーサー	6-1
202.00	～	202.30	0.30		無	-		6-2
202.40	～	202.60	0.20		有	密着		6-3
209.62	～	210.00	0.38		有・無	密着		6-4
245.10	～	245.30	0.2		有	密着		
245.30	～	245.60	0.3		無	-		
88.00	～	88.15	0.15	声間層	無	-	一軸圧縮	6-1'
88.25	～	88.35	0.10					
88.45	～	88.55	0.10					
88.55	～	88.75	0.20					
88.75	～	88.88	0.13					
201.05	～	201.40	0.35					6-2'
201.60	～	202.00	0.40					6-3'
205.75	～	206.00	0.25					6-4'
208.00	～	208.50	0.50					
245.75	～	246.00	0.25					
246.00	～	246.45	0.45					

表 4.1-2 HDB-7 孔 試料採取一覧

採取深度 (m)			採取長 (m)	地層名	亀裂の有無	亀裂の状態	用途	試料名
189.65	～	190.00	0.35	勇知層	有・無	密着	透水 トレーサー	7-1
226.85	～	227.00	0.15		無	-		7-2
228.00	～	228.27	0.27		有	密着		7-3
240.00	～	240.30	0.3		無	-		
240.30	～	240.60	0.3		有	密着		
183.00	～	183.30	0.30	勇知層	無	-	一軸圧縮	7-1'
183.30	～	183.56	0.26					
183.56	～	183.65	0.09					
183.83	～	183.93	0.10					
183.93	～	184.00	0.07					
226.00	～	226.43	0.43					7-2'
226.43	～	226.70	0.27					
227.10	～	227.32	0.22					
227.48	～	227.60	0.12					
237.00	～	237.32	0.32					
237.32	～	237.45	0.13					
237.69	～	237.80	0.11					
238.62	～	238.75	0.13					
239.08	～	239.18	0.10					
239.25	～	239.59	0.34	7-3'				

#### 4.1.2 コア試料の整形

透水・トレーサー試験用に必要となる試料寸法は、直径 50mm×高さ 50mm である。試料は、HDB-6 孔、HDB-7 孔のコア（直径 86mm）から、直径 50mm にて再コアリングし、直径 50mm×高さ 50mm の寸法に整形した。再コアリングは、亀裂試料に関しては亀裂面と平行になるようにコア軸と直交方向に行い（写真 4.1-1）、インタクト試料に関しては、コア軸と直交方向に行った。また、インタクトの試料に関しては、目視にて試料の堆積構造が明確に確認できるものについては、異方性検討用に方向を変えた 2 試料（堆積構造に対して水平方向と垂直方向）を再コアリングした（写真 4.1-2）。また、異方性試料に関して、堆積構造が目視にて確認できないものに関しては、コア軸と直交方向でコアリングの方向を 90° 変えて再コアリングした。表 4.1-3 に試料整形結果の一覧を示す。

整形の結果、複数の亀裂が存在する試料や側面が大きく欠損している試料など、試験に使用不可能な状態のものが多く見られた。これらは、再コアリング前の外観からは確認できなかったコア内部の亀裂が整形後に現れたものと思われる。また、勇知層の試料で、再コアリング後の試料の側面に線状に浅い溝が彫られたようなものが多く見られた。これは、特に勇知層の試料が非常に不均質で、一部の試料内部に 2~3mm 程度の岩片が混入している場合があり、これが、コアリング時にビットと絡まって試料表面に溝状の傷を付けたものと思われる。しかし、この場合は試料側面の凹凸をシリコンシーラント等で埋めることで、試験には使用可能である。

採取した試料から、亀裂の状態や整形具合を考慮して、試験用試料を選定した。選定した試料の一覧を表 4.1-4 に示した。

なお、表 4.1-3 および表 4.1-4 に示す試料名中にある文字「f」および「i」は、それぞれ亀裂試料、インタクト試料の区別を表し、「h」および「v」は、異方性試料の堆積構造に対する水平方向と垂直方向を表している。また、「00」および「90」については、異方性確認用試料で、目視にて堆積構造が確認できなかったものに対して、まず基準となる方向「00」に対して、コアリング方向を 90° 変えた方を「90」と示している。

表 4.1-3 試料整形結果一覧

採取孔名	地層名	採取深度 (m)			亀裂の有無	採取試料名称	亀裂の状態	使用可否	
			～						
HDB-6孔	声問層	92.80	～	93.00	有	6-1	6-1f1	複数亀裂	×
					無		6-1f2	複数亀裂	×
					無		6-1f3	複数亀裂	×
		202.00	～	202.60	有	6-2	6-2f	密着	○
					無		6-2i-h	-	○
					無		6-2i-v	-	○
		209.62	～	210.00	有	6-3	6-3f-1	複数亀裂	×
					有		6-3f-2	複数亀裂	×
					無		6-3i-h	-	○
					無		6-3i-v	-	○
		245.10	～	245.60	有	6-4	6-4f	密着	○
					無		6-4i-h	-	○
無	6-4i-v				-		○		
HDB-7孔	勇知層	189.65	～	190.00	有	7-1	7-1f	斜め亀裂	×
					無		7-1i-001	-	○
					無		7-1i-002	-	○
					無		7-1i-90	-	○
		226.85	～	228.27	無	7-2	7-2i-00 (7-2f)	亀裂有り	○
					無		7-2i-90	亀裂有り	×
					無		7-2i	-	○
		240.00	～	240.60	有	7-3	7-3f	欠損しそう	△
					無		7-3i-001	混合物有り	×
					無		7-3i-002	複数亀裂	×
					無		7-3i-901	側面傷有り	○
					無		7-3i-902	亀裂有り	△
無	7-3i	-	○						

表 4.1-4 試験試料一覧（亀裂、インタクト、異方性試料組合せ）

地層名	試料名	深度			亀裂	インタクト	
			～			水平方向	垂直方向
声問層	6-2	202.00	～	202.60	6-2f	6-2i-h	6-2i-v
	6-4	245.10	～	245.60	6-4f	6-4i-h	6-4i-v
勇知層	7-1	189.65	～	190.00	-	7-1i-001	7-1i-90
	7-2	226.85	～	228.27	7-2f	7-2i	-
	7-3	240.00	～	240.60	7-3f	7-3i	-

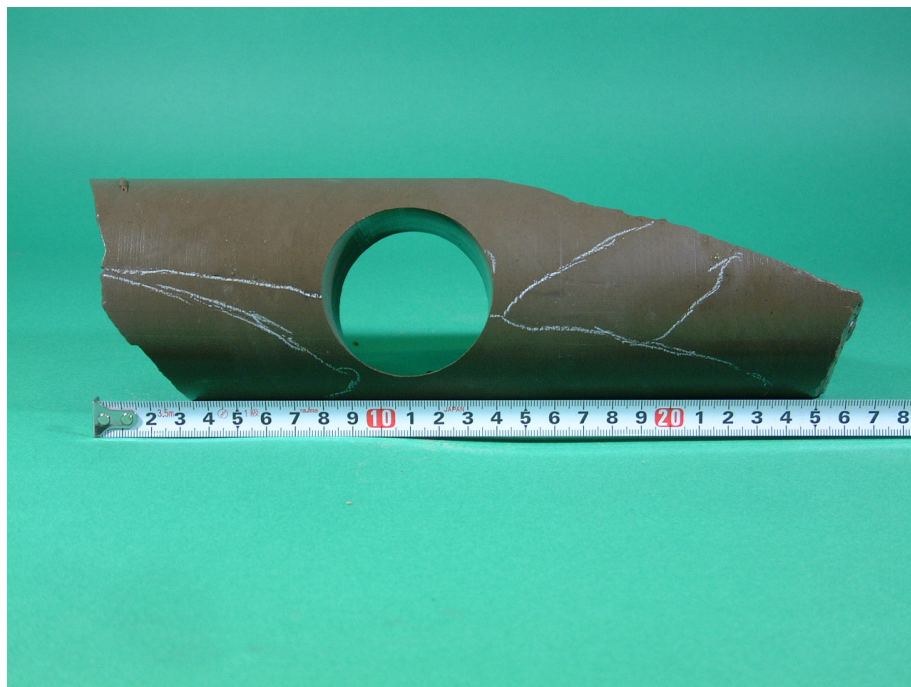


写真 4.1- 1 亀裂試料再コアリング方向

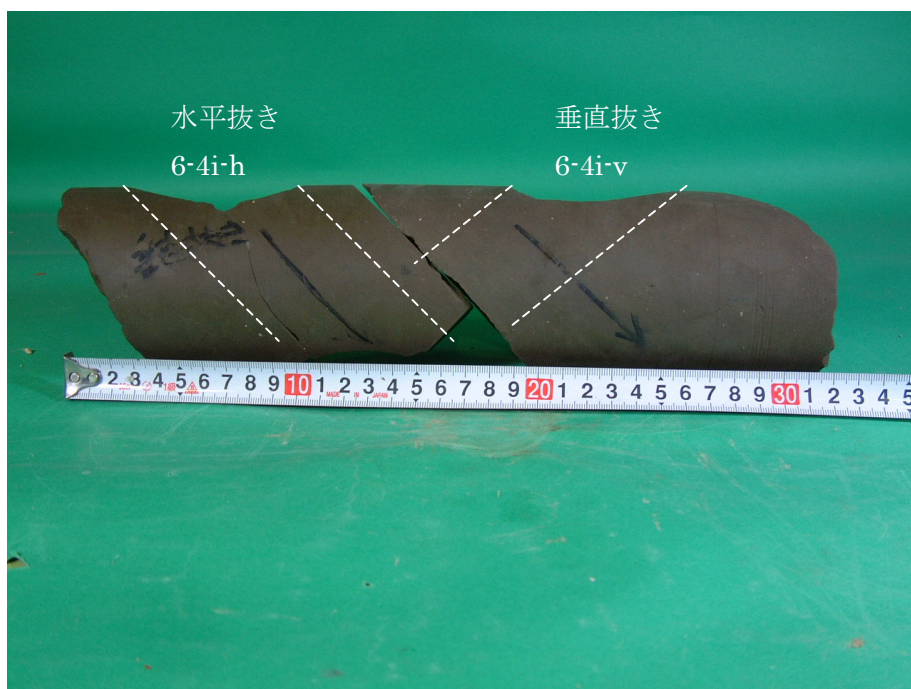


写真 4.1- 2 インタクト異方性試料再コアリング方向



## 4.2 コア試料の基本物性試験および分析

### 4.2.1 分析項目

透水/トレーサー試験に使用する全てのコア試料を対象とし、基本的な物性値（比重、有効空隙率、弾性波速度）の測定および一軸圧縮試験、ならびに以下の2点を目的とした、試料分析を行った。

- ①珪藻質泥岩の続成作用の変化を調べること
- ②岩石の空隙分布を把握すること

①に関しては、幌延地域の珪藻質泥岩に見られる埋没続成作用の特徴を踏まえ、続成作用に伴うシリカ鉱物の変化（珪藻→オパール A→オパール CT→石英）に着目し、粉末式 X 線分析を行った。②に関しては、水銀圧入法による空隙の細孔径分布測定を行った。

なお、一軸圧縮試験については、一軸圧縮強度の異方性の確認のため、表 4.2-2 に示す合計 12 ケースについて試験を行った。

測定ならびに分析の実施項目ならびに数量を表 4.2-1 に示す。

表 4.2-1 試料分析項目一覧

試験項目		数量	備考
基本物性試験	比重試験	12試料	透水/トレーサー試験に使用した全ての試料について実施
	含水比試験		
	飽和度		
	有効空隙率		
	吸水率		
	弾性波速度		
	一軸圧縮強度	12試料	6-1、6-2、6-4、7-1、7-2、7-3について、方向を変えた各2試料を実施
X線分析	粉末X線分析	12試料	透水/トレーサー試験に使用した全ての試料について実施
空隙分布測定	水銀圧入法	12試料	

#### 4.2.2 基本物性試験

基本物性試験および一軸圧縮試験の結果一覧を表 4.2-2、表 4.2-3 に示す。基本物性測定は、透水/トレーサー試験に使用した試料のそれぞれの物性を把握することを目的として、透水/トレーサー試験に使用した全ての試料について行った。ただし、一軸圧縮試験については、試料の深度依存性および異方性を確認することを目的として、HDB-6 孔および HDB-7 孔でそれぞれ深度の異なる 3 試料 (6-1、6-2、6-4、7-1、7-2、7-3) について試験を実施した。なお、基本物性試験用の試料は、透水/トレーサー試験用試料の再コアリング後に残ったごく近傍の岩片から採取し、一軸圧縮試験用の試料については、透水/トレーサー試験用試料の採取深度近傍から、別途、一軸圧縮試験用の試料として採取した。

声問層試料においては、深度が深くなるほど、比重と弾性波速度が増加し、有効空隙率が減少する傾向が見られる。一方、勇知層試料においては、深度方向への物性値の変化は、ほとんど見られない。また、声問層試料については異方性試料の測定を行っているが、どの物性値にも方向による相違は見られない。また、幌延深地層研究センターにて別途実施された測定結果とも整合的である。さらに、表 4.2-2 中に示した昨年度実施試料 (稚内層 200m 付近試料) と比較すると、稚内層と声問層の間には、上位の地層 (声問層) よりも下位の地層 (稚内層) の方が、比重が大きく、有効空隙率が小さくなる傾向が見られるが、声問層のさらに上位にあたる勇知層については、この傾向と一致せず、声問層よりも比重が大きく、有効空隙率が小さい結果が得られた。

一軸圧縮強度については、特に声問層試料に関して堆積構造に対して鉛直方向と水平方向の異方性が見られ、深度が深いほど一軸強度は大きくなる傾向が見られる。一方、勇知層試料に関しては、若干の異方性は見られるが、深度方向への強度の増加傾向は見られない。破壊ひずみ、静弾性係数については、声問層に関しては、若干の異方性と深度依存性が見られるものの、勇知層に関しては、全く見られなかった。また、幌延深地層研究センターにて別途実施された試験結果との関係は、若干のばらつきはあるものの、ほぼ一致している。

表 4.2-2 コア試料基本物性試験結果一覧

試料名称	比重(g/cm <sup>3</sup> )			含水比(-)	飽和度(%)	有効空隙率(%)	吸水率(%)	弾性波速度(km/s)	
	自然状態	強制乾燥状態	強制湿潤状態					P波速度	S波速度
6-2f	1.574	0.978	1.574	0.609	100	59.5	60.9	1.68	0.43
6-2i-h	1.568	0.970	1.568	0.617	100	59.8	61.7	1.70	0.46
6-2i-v	1.570	0.974	1.570	0.613	100	59.6	61.3	1.68	0.48
6-4f	1.699	1.177	1.699	0.443	100	52.2	44.3	1.85	0.46
6-4i-h	1.679	1.145	1.679	0.466	100	53.4	46.6	1.87	0.59
6-4i-v	1.675	1.138	1.675	0.472	100	53.7	47.2	1.93	0.40
7-1i-001	1.917	1.470	1.917	0.304	100	44.7	30.4	1.78	0.44
7-1i-90	1.882	1.413	1.882	0.332	100	46.9	33.2	1.8	0.41
7-2f	1.921	1.475	1.921	0.302	100	44.5	30.2	1.76	0.36
7-2i	1.935	1.495	1.935	0.294	100	44.0	29.4	1.78	0.38
7-3f	1.893	1.429	1.893	0.322	100	46.3	32.4	1.72	0.34
7-3i	1.907	1.451	1.907	0.315	100	45.7	31.7	1.71	0.32
昨年度試料	1.879	1.465	1.879	0.283	100	41.4	28.3	2.70	0.98

※ 強制乾燥状態：供試体を 110℃の乾燥炉内で、24 時間以上乾燥させた状態。

※ 強制湿潤状態：供試体を水中につけ、10 日間以上真空引きした状態。

表 4.2-3 コア試料一軸圧縮試験結果一覧

項目 試料 番号	深度 (m)	コア抜き 方向	供試体No.	単位体積 重量 (kN/m <sup>3</sup> )		一軸圧縮 強度 (MPa)		静弾性 係数 (外部) (MPa)		静弾性 係数 (ゲージ又は I D T) (MPa)		破壊 ひずみ (%)		静ポソソ比	
6-1	96.33 - 96.4	水平①	6-1-1	15.1	2.57	2.63	263	487	1.16	1.07	0.225	0.207			
	99.00 - 99.21	水平②	6-1-2	14.7	3.31	2.88	266	293	447	530	1.25		0.156		
			6-1-3	15.5	2.76	351	657	0.80	0.239						
	96.33 - 96.4	水平①+90°	6-1-4	15.1	2.67	360	604	0.83	0.153						
99.00 - 99.21	水平②+90°	6-1-5	14.8	5.14	3.91	297	302	362	463	1.80	1.29	0.109	0.148		
		6-1-6	14.6	3.07	250	424	1.24	0.183							
6-2	201.05 - 201.40	水平①	6-2-1	15.4	4.25	3.28	328	494	1.35	0.95	0.200	0.195			
	201.60 - 202.00	水平②	6-2-2	15.2	2.33	3.20	353	354	635	589	0.68		0.164		
	205.75 - 206.00	水平③	6-2-3	15.4	3.02	381	638	0.83	0.220						
	201.05 - 201.40	鉛直①	6-2-4	15.3	4.27	341	528	1.28	0.198						
	201.60 - 202.00	鉛直②	6-2-5	15.4	4.68	4.97	273	308	377	439	1.75		1.67	0.132	
205.75 - 206.00	鉛直③	6-2-6	15.0	5.67	309	411	1.99	0.106							
6-4	245.75 - 246.00	水平①	6-3-1	16.4	3.52	4.69	469	802	0.89	0.88	0.260	0.211			
	246.00 - 246.45	水平②	6-3-2	16.5	3.64	3.61	441	463	735	749	0.87		0.176		
			6-1-3	16.6	3.68	479	711	0.87	0.211						
	245.75 - 246.00	鉛直①	6-3-4	16.6	6.06	339	379	1.97	0.134						
246.00 - 246.45	鉛直②	6-3-5	16.5	6.12	6.30	374	374	367	456	1.85	1.90	0.164	0.166		
		6-3-6	16.6	6.71	408	621	1.87	0.201							
7-1	183.00 - 183.30	水平①	7-1-1	18.9	1.05	1.18	77	78	1.46	1.45	0.232	0.253			
	183.30 - 183.56	水平②	7-1-2	19.1	1.63	119	87	129	90	1.46	0.370				
			7-1-3	18.8	0.86	64	63	1.42	0.158						
	183.00 - 183.00	鉛直①	7-1-4	18.9	1.35	88	84	1.59	0.439						
	183.30 - 183.56	鉛直②	7-1-5	19.0	1.86	1.61	104	93	134	106	1.87		1.67	0.486	
183.93 - 184.00	鉛直③	7-1-6	18.9	1.27	86	101	1.56	0.217							
7-2	226.00 - 226.43	水平①	7-2-1	18.9	1.05	1.37	127	162	0.86	1.14	0.311	0.334			
	226.43 - 226.70	水平②	7-2-2	18.8	1.77	153	132	207	167	1.29	0.352				
			7-2-3	19.0	1.30	115	133	1.26	0.340						
	226.00 - 226.43	鉛直①	7-2-4	19.2	1.68	159	188	1.18	0.489						
	226.43 - 226.70	鉛直②	7-2-5	19.0	1.84	1.65	207	181	199	191	1.03		1.07	0.442	
		7-2-6	19.0	1.62	177	187	1.01	0.491							
7-3	237.00 - 237.32	水平①	7-3-1	19.2	1.44	1.21	114	121	1.41	1.30	0.237	0.422			
	239.25 - 239.59	水平②	7-3-2	19.1	0.82	74	100	67	104	1.16	0.476				
			7-3-3	19.1	1.37	113	125	1.32	0.422						
	237.00 - 237.32	鉛直①	7-3-4	19.2	1.80	175	213	1.06	0.369						
	239.25 - 239.59	鉛直②	7-3-5	19.4	1.01	1.28	101	116	88	125	1.06		1.23	0.234	
		7-3-6	19.1	1.03	72	73	1.58	0.238							

### 4.2.3 X線分析

対象試料である珪藻質泥岩の続成作用の変化を調べることを目的として、不定方位法、定方位法によるX線分析を行った。分析は、透水/トレーサー試験用の試料を再コアリングしたごく近傍から岩片を採取して行った。

X線解析チャートの一例を図4.2-1、図4.2-2に示す。以下に各鉱物の同定結果を示す。

#### ① スメクタイトの同定

スメクタイトの同定は無処理とエチレングリコール処理の結果を比較することにより行った。無処理定方位試料の回折実験により得られた  $\text{CuK}\alpha : 2\theta = 5.0\sim 7.5^\circ$  に分布する幅が広い回折線が、エチレングリコール処理後低角度  $\text{CuK}\alpha : 2\theta = 4.5\sim 5.1^\circ$  に明らかに移動したことは、膨潤性粘土鉱物であるスメクタイトの存在を示唆する。したがって、スメクタイトが、微量～少量程度存在すると推定される。

#### ② スメクタイト鉱物種の同定

スメクタイトは代表的な膨潤性粘土鉱物の一族であり、イオン交換性、膨潤性などの化学的活性が顕著である。2八面体型と3八面体型に大別されるが、産出は前者のほう（モンモリロナイト・バイデライト系列）が大部分を占める。スメクタイトは、粒子は微細であることと積層不整が著しいために、幅広い底面反射と2次元反射が現れる。通常  $12\sim 16\text{\AA}$  付近 ( $\text{CuK}\alpha 2\theta = 5.5\sim 7.5^\circ$ ) の底面反射  $d(001)$  が最も強いが、その回折峰の位置は湿度や層間陽イオンによって変わる。通常風乾状態（湿度60%前後）では、層間イオンがNaの場合  $13\text{\AA}$  ( $\text{CuK}\alpha 2\theta = 6.8^\circ$ ) 付近、層間イオンがCa, Mgの場合  $15\text{\AA}$  ( $\text{CuK}\alpha 2\theta = 5.9^\circ$ ) 付近になる。2次元反射の値が種類により異なり、モンモリロナイト・バイデライトは  $1.49\sim 1.50\text{\AA}$  ( $\text{CuK}\alpha 2\theta = 61.8\sim 62.3^\circ$ )、ノントロナイトは  $1.51\sim 1.52\text{\AA}$  ( $\text{CuK}\alpha 2\theta = 60.9\sim 61.3^\circ$ )、3八面体型は  $1.52\sim 1.54\text{\AA}$  ( $\text{CuK}\alpha 2\theta = 60.0\sim 60.9^\circ$ ) である。今回の試料から得られたX線回折は、 $\text{CuK}\alpha 2\theta = 62.0^\circ$  付近の2次元反射が観察されたため、このスメクタイトは2八面体型のモンモリロナイト・バイデライトであると判断される。また、風乾状態では底面反射が  $\text{CuK}\alpha 2\theta < 7.0^\circ$  に観察されたため、このモンモリロナイト・バイデライトの層間イオンがほとんどCa, Mgであると考えられる。

#### ③ 緑泥石とカオリナイトの同定

緑泥石とカオリン鉱物が共存する場合、緑泥石の002, 004の回折線とカオリン鉱物の001, 002の回折線が重なるため、カオリン鉱物と緑泥石の識別に困難が生じる。このような場合には、何らかの処理によってこれらの回折線の変化を観察し、同定を行う。ジアミン処理方法は、カオリナイトの底面間隔を膨脹し、カオリナイトの  $12.3^\circ$  の回折線が  $8.4^\circ$  に広がる。したがって、緑泥石の回折線と分離することによって、カオリナイトと緑泥石の識別が容易になる。分析試料に対してジアミン処理を行った結果、 $12.3^\circ$  付近の回折線の移動が観察できなかったため、カオリンが存在していないことが確認された。

#### ④ シリカ鉱物の同定

シリカ鉱物であるオパールCTとオパールAは以下の定義に基づいて同定を行った。オパールCTは、クリストバライトとトリジマイトの不規則の混じりであり、回折線には  $2\theta (\text{CuK}\alpha) = 21.66$  で明確なピークが現れる。一方、オパールAは非晶質であるため、回折線には明確なピーク

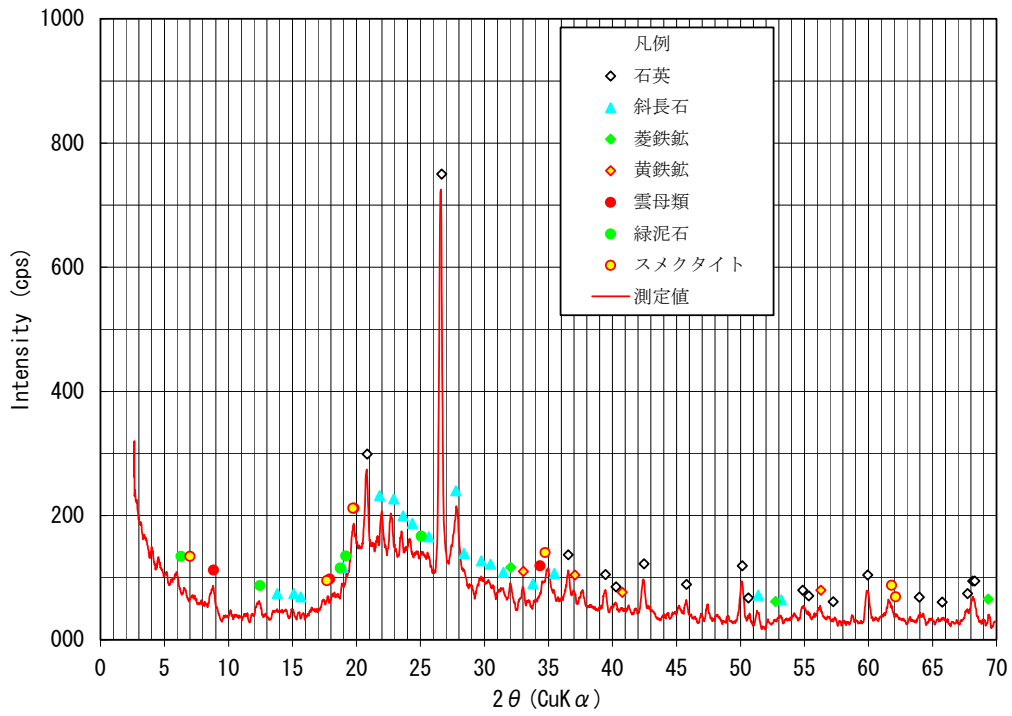
クが現れず、 $2\theta$  (CuK $\alpha$ ) = 21.66 を中心に非常に幅広い弱い散乱 (ブロードピーク) が現れる。

今回の分析では、いずれもオパール A のブロードピークが明瞭に見られることから、幌延地域の珪藻質泥岩に特徴的なシリカ鉱物の変化：珪藻→オパール A→オパール C T→石英、の中で、オパール A のゾーンに区分されることが示される。ただし、勇知層においては、声問層よりもブロードピークは比較的 low、その一方で石英、斜長石のピーク値が大きくなる傾向が見られ、砕屑岩層の特徴を示している。表 4.2-4 に各鉱物のおおよその含有量を推定した結果の一覧を示す。

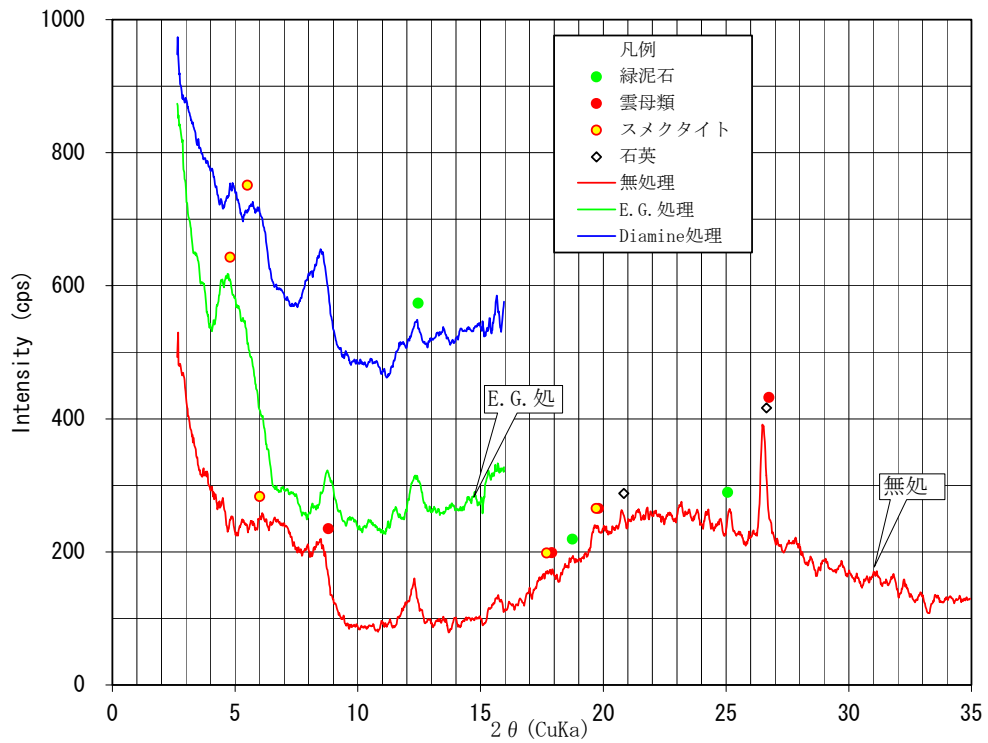
表 4.2-4 X線分析結果一覧

順番	試料名	シリカ鉱物				長石			石膏	沸石		粘土鉱物			備考
		石英	非晶質？ オパール A	オパール C T	トリジマイト	クリストバライト	カリ長石	斜長石		菱鉄鉱？	黄鉄鉱	濁沸石	斜ブチロル沸石	スメクタイト	
1	6-2f	△	○				△	+	+			+	△	△	
2	6-2i-h	△	○				△	+	+			+	△	△	
3	6-2i-v	△	○				△	+	+			+	-	+	
4	6-4f	△	○				△	+	+			+	-	+	
5	6-4i-h	△	○				△	+	+	-		+	△	△	
6	6-4i-v	△	○				△	+	+			+	+	△	
7	7-1i-00	△	▲				△	+	+			△	△	△	
8	7-1i-90	△	▲				△	+	+			△	△	△	
9	7-2f	△	▲				△	+	-			+	△	△	
10	7-2i	△	▲				△	+	-			△	△	△	
11	7-3f	△	▲		?		△	+	-			△	△	△	
12	7-3i	△	▲				▲	+	-			△	△	△	

凡例：● 多量, ○ 中量, ▲ 少量, △ 少量? 微量, + 微量, - 極微量 ? 少量程度存在する可能性があります。

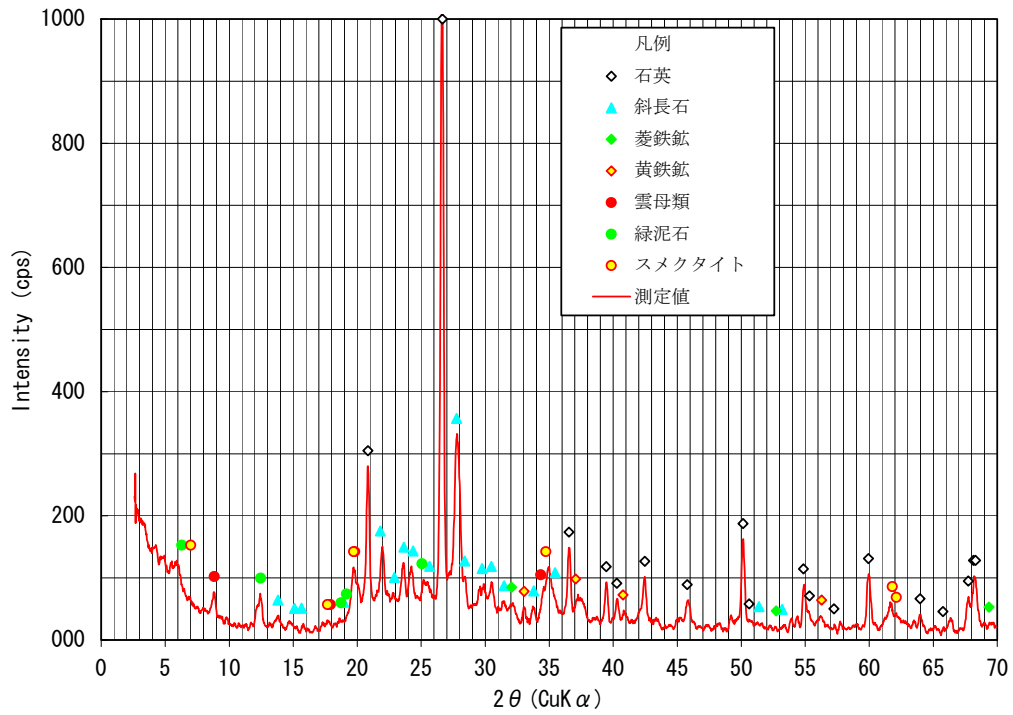


(a) 不定方位法

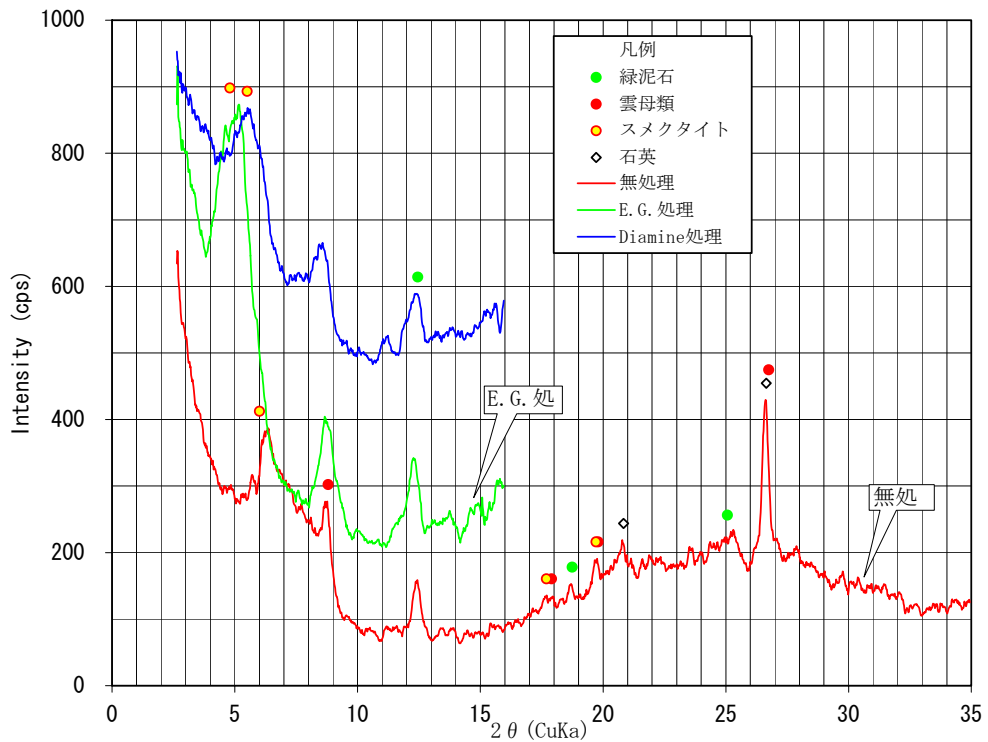


(b) 定方位法

図 4.2-1 X線分析結果 (声問層 : 6-2f)



(a) 不定方位法



(b) 定方位法

図 4.2-2 X線分析結果 (勇知層 : 7-1i-001)

#### 4.2.4 空隙分布測定

試料の空隙分布を測定することを目的として、水銀圧入法による空隙の細孔径分布測定を行った。測定は、透水/トレーサー試験用試料を再コアリングしたごく近傍から岩片を採取して行った。

水銀圧入法は、水銀が土壌や岩石表面に対して接触角大きく、濡れ性が小さいという性質を利用したもので、空隙率や乾燥嵩密度、真密度をはじめ、細孔径分布、細孔内比表面積などを求めることができる。

水銀圧入法による測定は、島津製作所製のポロシメーター（オートポア IV9520：測定細孔径 0.003～500 μm）を用いて行った。試料は、大きさ 2.5～5.0mm 粒に破碎した試料を 105℃の温度で1時間乾燥させたものを用いた。

細孔径分布および細孔内比表面積の計算においては、水銀の土壌に対する一般的な物性値として、表面張力  $\gamma=0.480$  (N/m)、および接触角  $\theta=140^\circ$  を用いた。細孔径と水銀にかかる圧力、表面張力、接触角との関係は、Washburn の法則として関連付けられている。細孔径、細孔内比表面積、乾燥嵩密度、有効空隙率は、以下の関係から決定した。

$$D = -\left(\frac{4}{P_m}\right)\gamma \cdot \cos\theta \quad (4.2-1)$$

$$S_p = -\frac{1}{\gamma \cdot \cos\theta} \int_{V_{\min}}^{V_{\max}} P_m dV \quad (4.2-2)$$

$$\rho_d = \frac{M_d}{V_c - \left(\frac{M_{me}}{\rho_{me}}\right)} \quad (4.2-3)$$

$$n_p = 100V_{SP} \cdot \rho_d \quad (4.2-4)$$

ここに、D：細孔直径 (m)、 $P_m$ ：水銀にかけた圧力 ( $\text{kg}/\text{m}^2$ )、 $\gamma$ ：水銀の試料表面での表面張力 (N/m)、 $\theta$ ：水銀の試料表面での接触角 ( $^\circ$ )、 $S_p$ ：細孔内比表面積 ( $\text{m}^2/\text{kg}$ )、 $V_{\max}$ ：水銀が最大孔径の空隙に注入された時のセル中の水銀体積 ( $\text{m}^3$ )、 $V_{\min}$ ：水銀が最小孔径の空隙に注入された時のセル中の水銀体積 ( $\text{m}^3$ )、 $\rho_d$ ：乾燥嵩密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )、 $M_d$ ：乾燥状態での試料重量 (kg)、 $V_c$ ：密閉セルの体積 ( $\text{m}^3$ )、 $M_{me}$ ：水銀の重量 (kg)、 $\rho_{me}$ ：水銀の密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )、 $N_p$ ：有効空隙率 (%)、 $V_{SP}$ ：比空隙体積 (単位重量当りの空隙体積) ( $\text{m}^3/\text{kg}$ ) である。

図 4.2-3、図 4.2-4 に、各試料の細孔半径と累積有効空隙率の関係の一例を示す。また、図 4.2-5 に全ての測定結果を同一グラフにプロットしたものを示す。これらの図より、声問層試料においては、細孔半径 0.2 ( $\mu\text{m}$ ) 付近以下から、空隙の割合が急激に増加しているのが分かる。一方、



勇知層においては、細孔半径 1.0 ( $\mu\text{m}$ ) 付近以下から、空隙の割合が声問層と比べると比較的緩やかに増加している。また、声問層については、採取深度の深いものほど、より孔径の小さい空隙が増加し、全体の空隙量が減少する傾向が見られる。一方、勇知層については、このような深度依存性は、ほとんど見られない。さらに、前述の 3.1 節で示した図 3-1 を見ると、稚内層試料に相当するオパール CT ゾーンの試料と比較して、声問層、勇知層の試料は、より孔径の大きい空隙の量が多いことが分かる。

表 4.2-5 に水銀圧入試験結果の一覧を、また、図 4.2-6 に基本物性試験で得られた有効空隙率と水銀圧入試験で得られた有効空隙率の関係を示す。図より、基本物性試験結果よりも、水銀圧入試験結果の方が、約 5 (%) 程度低い有効空隙率が得られていることが分かる。これは、空隙構造が微細であるため、全ての空隙に水銀が侵入できなかつたためではないかと考えられる。測定に用いた水銀ポロシメータは、測定機器の性能上 0.003 ( $\mu\text{m}$ ) 以下の細孔径は測定することができない。そのため、測定結果としては、0.003 ( $\mu\text{m}$ ) 以下の細孔径を切り捨てられたデータが得られている。しかし、実際は、より微細な空隙も存在すると考えられる。

表 4.2-5 水銀圧入試験結果一覧

孔番号	呼称深度 (m)	試料深度 (m)	試料名	空隙率 (%)	累積細孔 体積 (mL/g)	累積細孔 比表面積 ( $\text{m}^2/\text{g}$ )	嵩密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	真密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	試料重量 (g)	ﾌｧｲﾙ名
HDB-6孔	200m	202.00m~202.60m	6-2f	52.6	0.523	23.8	1.006	2.121	0.492	09-325
			6-2i-h	54.4	0.544	26	1.001	2.197	0.612	09-310
			6-2i-v	53	0.543	27.3	0.977	2.081	0.552	09-326
	245m	245.10m~245.60m	6-4f	44.7	0.384	27.3	1.163	2.1	0.58	09-327
			6-4i-h	46.5	0.398	27.7	1.17	2.189	0.62	09-311
			6-4i-v	48.2	0.425	28.8	1.133	2.185	0.578	09-328
HDB-7孔	200m	189.65m~190.00m	7-1i-001	40.5	0.301	17.2	1.344	2.258	0.615	09-312
			7-1i90	41.8	0.295	15.7	1.42	2.441	0.587	09-329
	230m	226.85m~228.27m	7-2i-00(7-2f)	38.6	0.279	14.5	1.385	2.255	0.623	09-313
			7-2i	38.9	0.265	16.3	1.471	2.409	0.511	09-332
	240m	240.00m~240.60m	7-3f	38	0.248	15.3	1.532	2.47	0.623	09-314
			7-3i	39.2	0.256	17.4	1.532	2.518	0.589	09-330

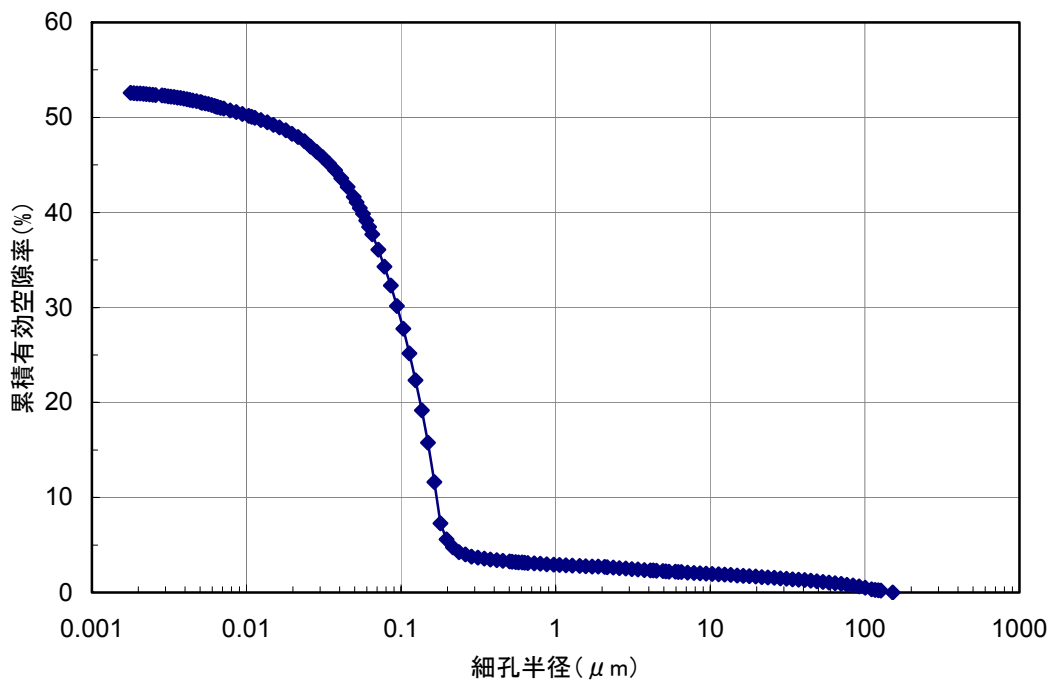


図 4.2-3 水銀圧入法による細孔径分布測定結果 (試料名 : 6-2f)

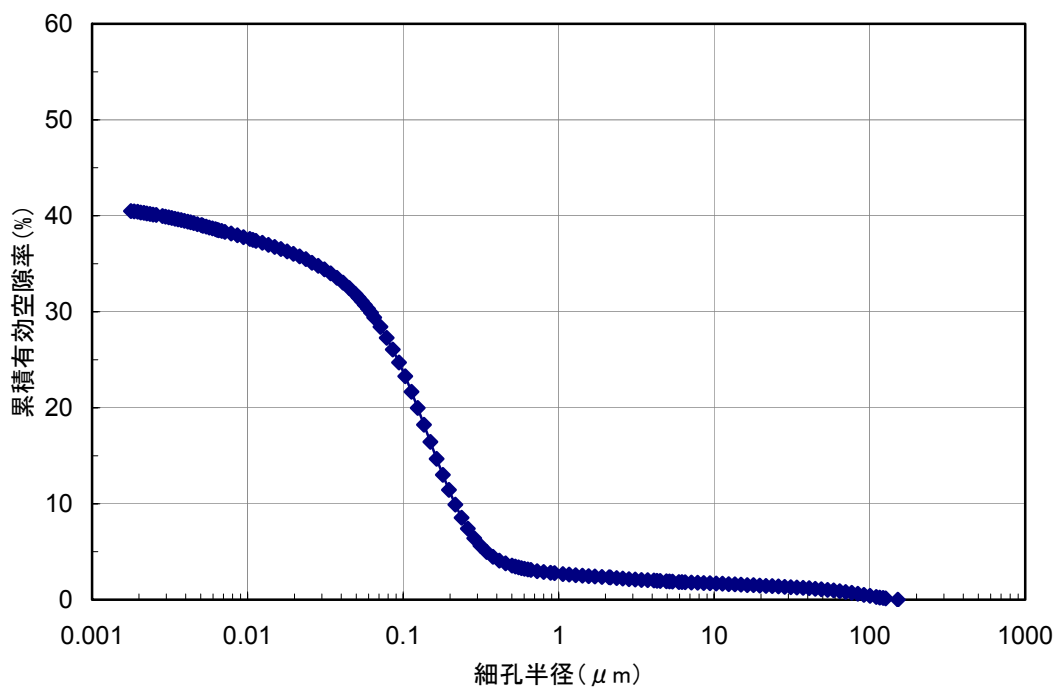


図 4.2- 4 水銀圧入法による細孔径分布測定結果 (試料名 : 7-1i-001)

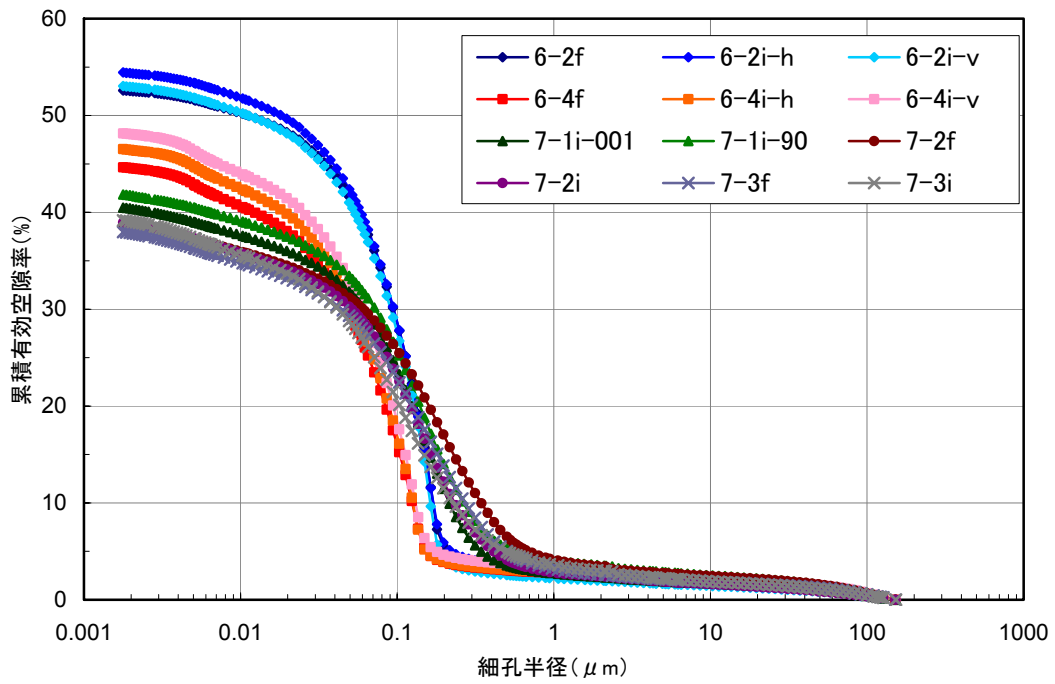


図 4.2- 5 水銀圧入法による細孔径分布測定結果（全コア試料）

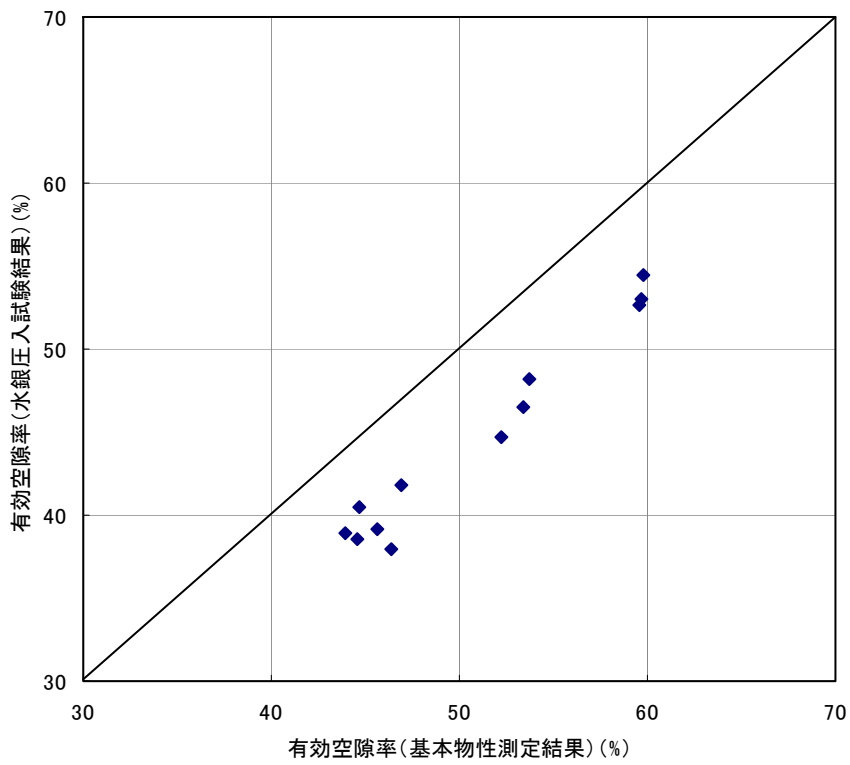


図 4.2- 6 基本物性試験と水銀圧入試験の有効空隙率測定結果の比較

### 4.3 コア試料を対象とした透水試験

コア試料の透水試験は、インタクト試料に対しては、トランジェントパルス透水試験を、また亀裂試料に対しては、定流量透水試験を実施した。以下にそれぞれについて説明する。

#### 4.3.1 トランジェントパルス透水試験

##### (1) 試験方法

試験に用いたトランジェントパルス透水試験装置の概要、概観及び、測定原理をそれぞれ、図 4.3-1、図 4.3-2、写真 4.3-1 に示す。本装置の特徴は、温度変化による水圧への影響を低減するため、装置全体を水槽内に沈める機構を有することである。図 4.3-3 に試験手順を示す。

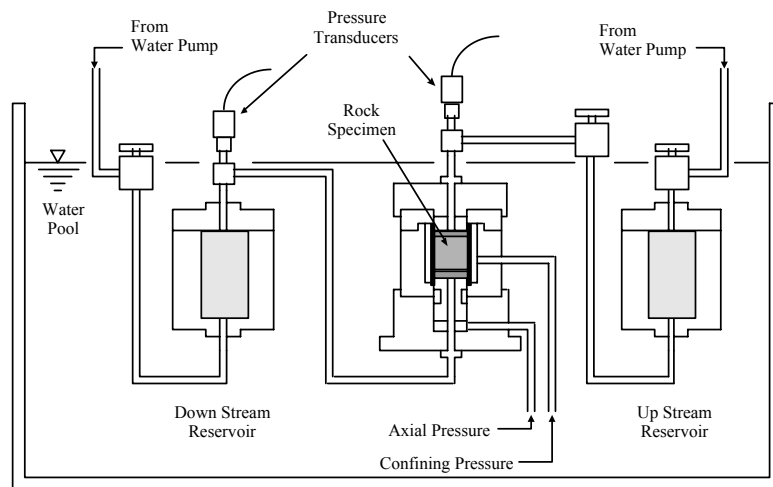


図 4.3-1 トランジェントパルス透水試験装置概要

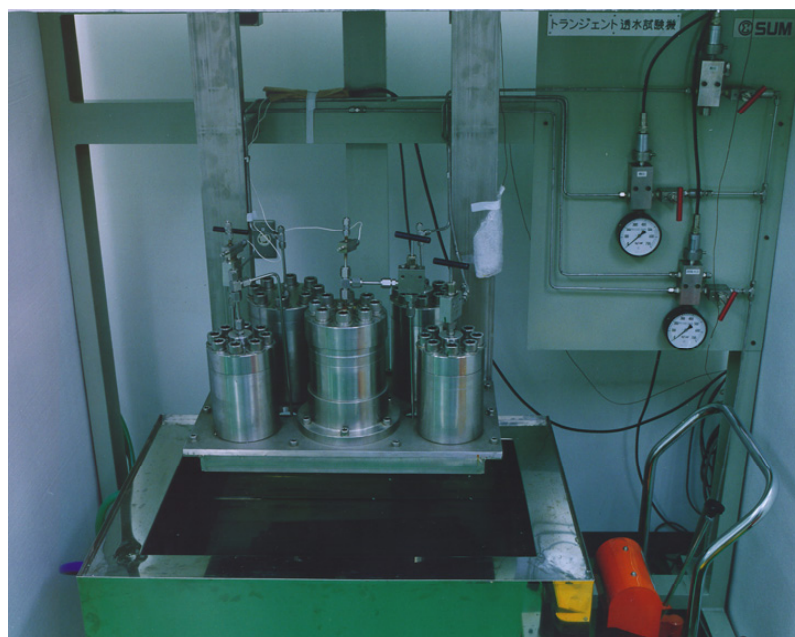


写真 4.3-1 トランジェントパルス透水試験装置概観

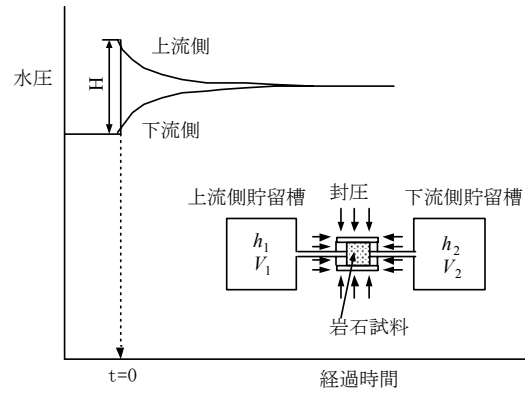


図 4.3-2 トランジェントパルス法測定原理

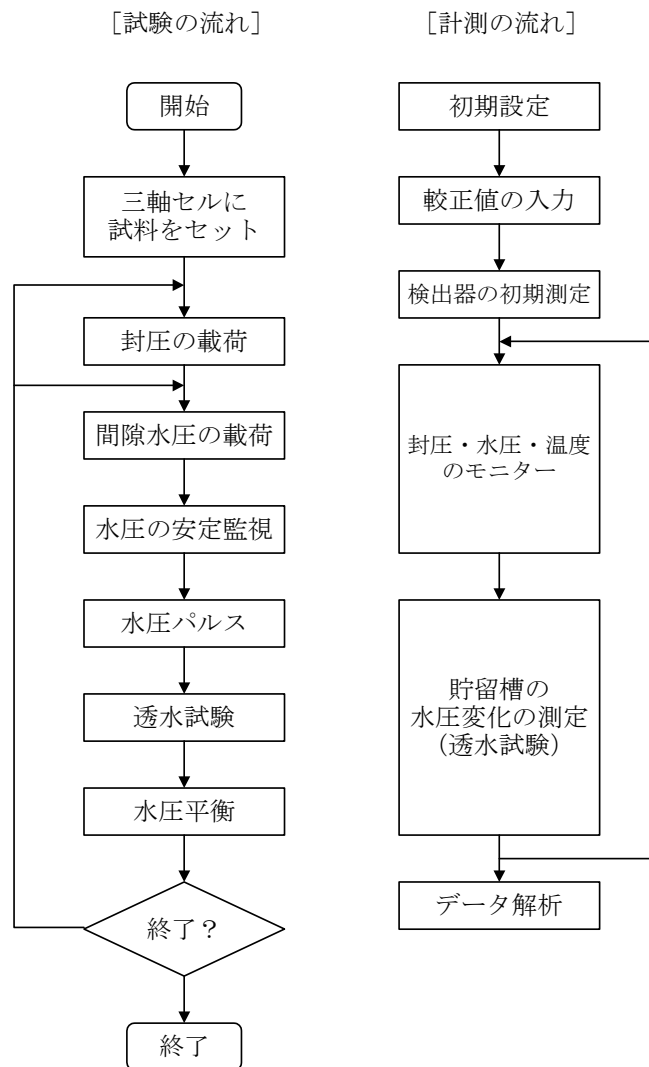


図 4.3-3 トランジェントパルス透水試験手順

(2) 試験ケース

トランジェントパルス透水試験法の試験ケースを表 4.3-1 に示す。封圧は、図 4.3-4 に示す HDB-1 孔の密度検層から求められた鉛直応力を参考に、試料採取深度相当の圧力条件下に設定した。なお、その鉛直応力の値は、水圧破碎試験により求められた最小主応力値とも整合的である。また、間隙水圧については、岩盤内の間隙水圧が深度方向に静水圧分布していると仮定して決定した。

- 温度 : 室温
- 封圧 : 深度 (m) × 0.018 (MPa/m)
- 間隙水圧 : 深度 (m) × 0.010 (MPa/m)

表 4.3-1 トランジェントパルス透水試験ケース

地層名	試料名	深度		封圧 (MPa)	間隙水圧 (MPa)	有効応力 (MPa)
声間層	6-2i-h	202.00	~ 202.60	3.6	2.0	1.6
	6-2i-v					
	6-4i-h	245.10	~ 245.60	4.5	2.5	2.0
	6-4i-v					
勇知層	7-1i-001	189.65	~ 190.00	3.6	2.0	1.6
	7-1i-90					
	7-2i	226.85	~ 228.27	4.1	2.3	1.8
	7-3i	240.00	~ 240.60	4.3	2.4	1.9

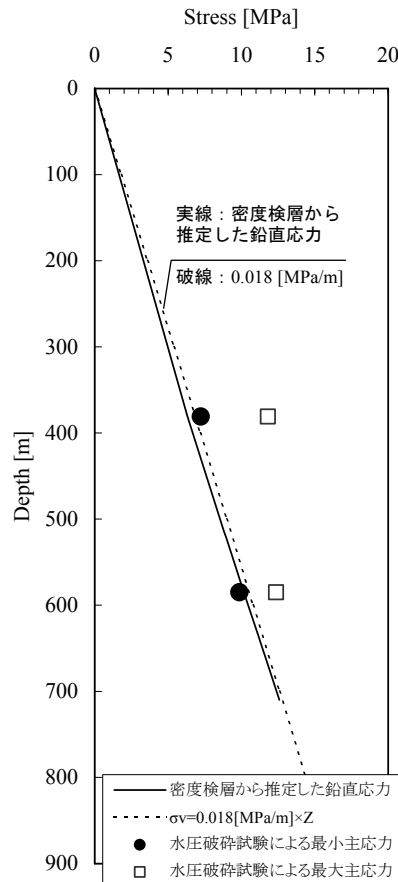


図 4.3-4 岩盤内応力と深度の関係 (HDB-1 号孔)

(3) 試験結果

トランジェントパルス透水試験の結果を、図 4.3-5、図 4.3-6 ならびに表 4.3-2 に示した。トランジェントパルス透水試験の解析には、Brace 法と、差圧を用いた Hsieh 法を用いた。

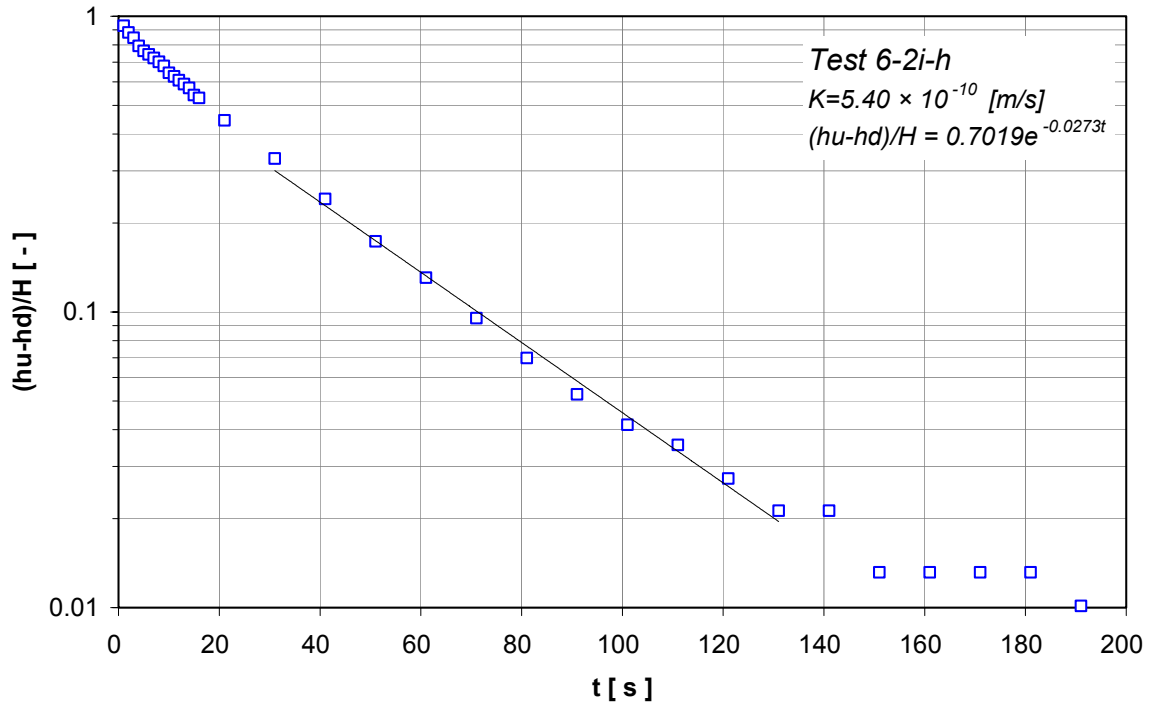
試験結果から、本年度実施した声問層、勇知層のインタクト試料の透水性は、昨年度実施した稚内層の透水性(表 4.3-3)と比較して 2 オーダー程度大きいことが分かった(図 4.3-7)。さらに、前節の基本物性測定結果で得られた有効空隙率は、声問層で 52.2(%)~59.8(%)、勇知層では、44.0(%)~46.9(%)であり、10(%)~15(%)程度の差があるにも関わらず、透水性は  $10^{-10}(\text{m/s})$  で同程度の値を示している。これは、前節の水銀圧入試験結果から分かるように、声問層よりも勇知層の方が、全体の有効空隙率は小さいが、試料を構成する空隙径の分布が勇知層の方が、径の大きい空隙の占める割合が大きいことに起因していると考えられる。また、図 4.3-8 より、深度依存性ならびに異方性は声問層の試験結果において多少見られるが、各試料の採取深度の差が小さいことやデータ数が少ないことから、結論づけることはできない。

表 4.3- 2 トランジェントパルス透水試験結果一覧 (声問層、勇知層)

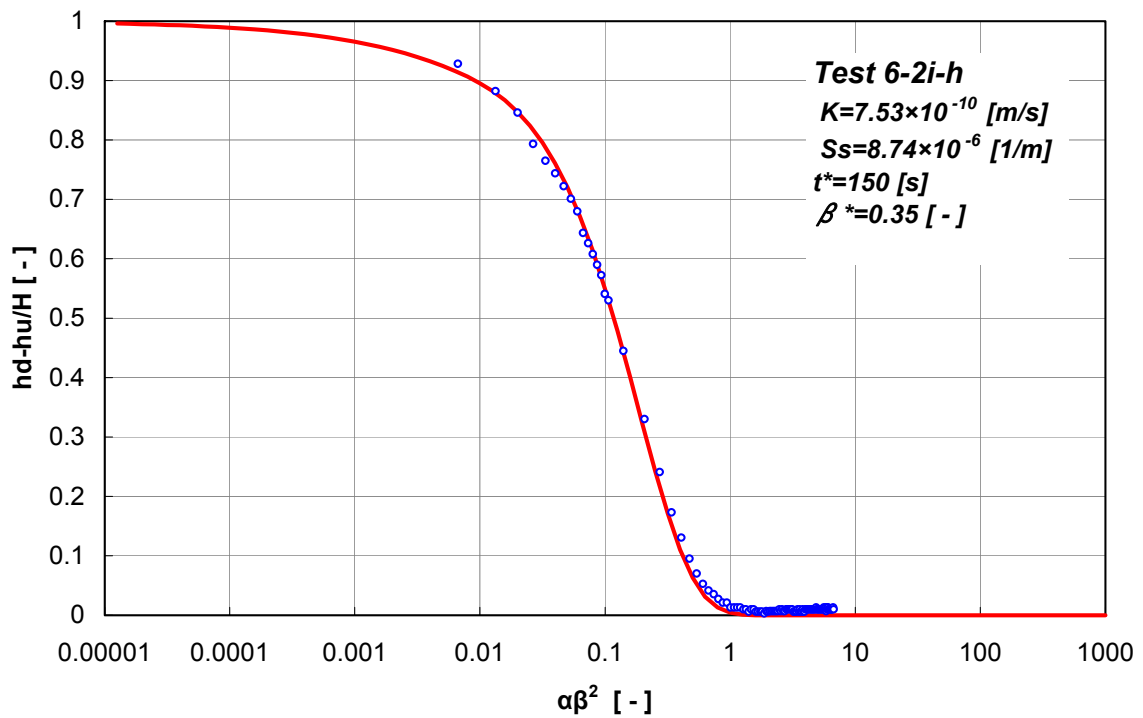
採取孔名	地層名	試料名	採取深度 (m)			封圧 [MPa]		間隙水圧 [MPa]	パルス圧 [MPa]	透水係数 (m/s)		比貯留係数 (l/m)
						軸圧	側圧			brace法	差圧を用いたhsieh法	
HDB-6孔	声問層	6-2i-h	202.00	~	202.60	3.60	3.60	2.00	0.10	5.40E-10	7.53E-10	8.74E-06
		6-2i-v								4.21E-10	4.53E-10	1.11E-05
		6-4i-h	245.10	~	245.60	4.50	4.50	2.50	0.10	1.71E-10	1.93E-10	4.08E-06
		6-4i-v								1.13E-10	1.27E-10	1.18E-05
HDB-7孔	勇知層	7-1i-001	189.65	~	190.00	3.60	3.60	2.00	0.10	2.11E-10	2.54E-10	1.29E-05
		7-1i-90								2.78E-10	2.86E-10	1.10E-05
		7-2i	226.85	~	228.27	4.10	4.10	2.30	0.10	3.31E-10	4.09E-10	1.01E-05
		7-3i	240.00	~	240.60	4.30	4.30	2.40	0.10	1.98E-10	2.22E-10	1.08E-05

表 4.3- 3 昨年度実施トランジェントパルス透水試験結果 (HDB-4 孔 : 稚内層)

試料名	採取孔名	採取深度 [mbgl]	封圧 [MPa]		間隙水圧 [MPa]	パルス圧 [MPa]	透水係数 [m/s]		比貯留係数 [l/m]
			軸圧・	側圧・			Brace法	差圧を用いたHsieh法	
2-li	JNC幌延 HDB-4	195.0~195.7	3.6	3.6	2	0.1	4.83E-12	5.49E-12	1.12E-05
3-2i		314.0~314.4	5.4	5.4	3	0.1	4.83E-12	4.88E-12	6.08E-06
4-li		441.5~442.0	8.1	8.1	4.5	0.1	1.69E-12	1.63E-12	8.11E-06



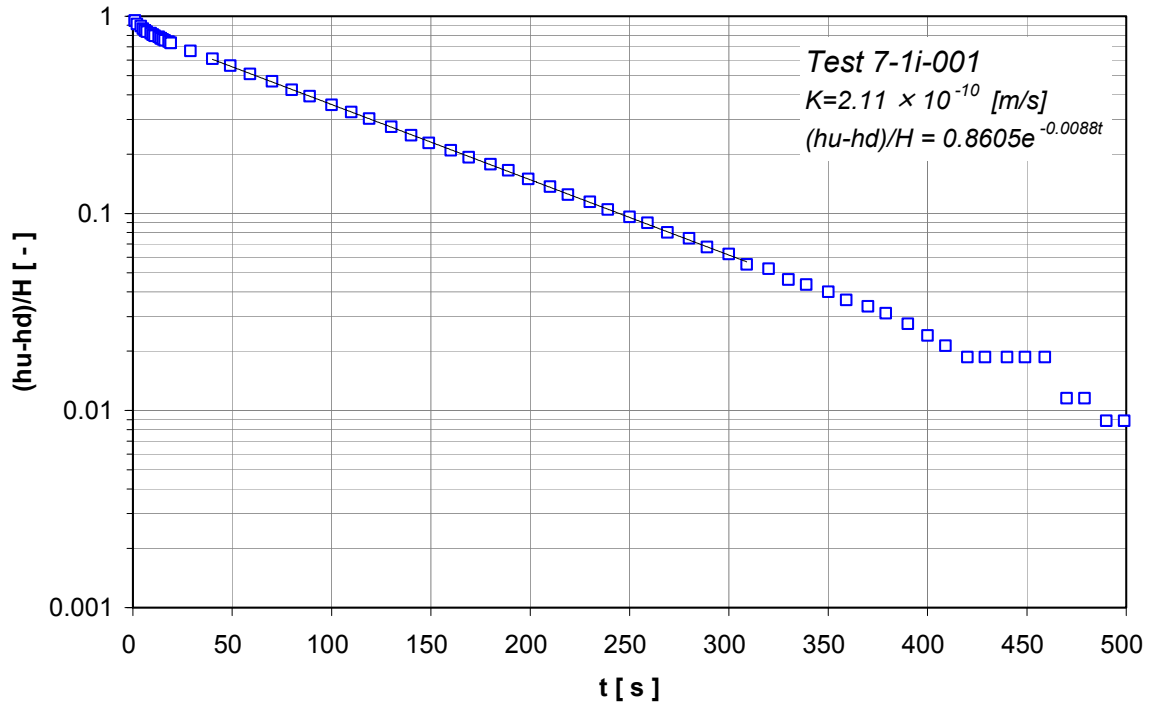
(a) Brace 法



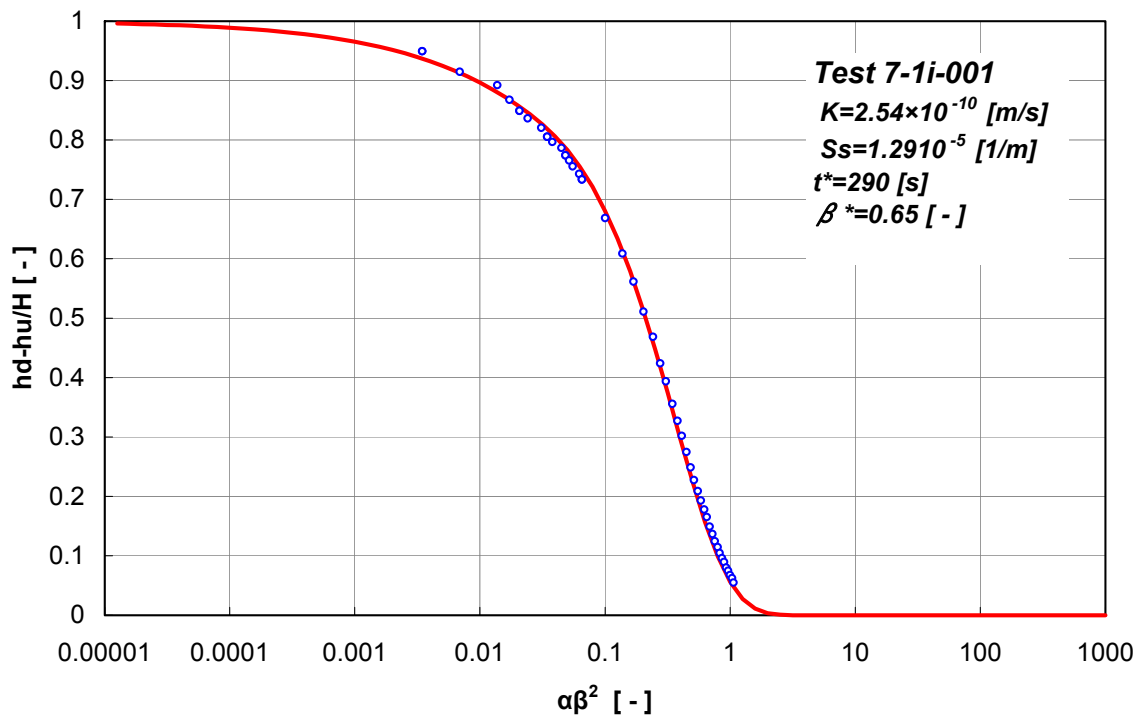
(b) 差圧を用いた Hsieh 法

図 4.3-5 トランジェントパルス透水試験結果 (試料名 : 6-2i-h)





(a) Brace 法



(b) 差圧を用いた Hsieh 法

図 4.3-6 トランジェントパルス透水試験結果 (試料名 : 7-1i-001)

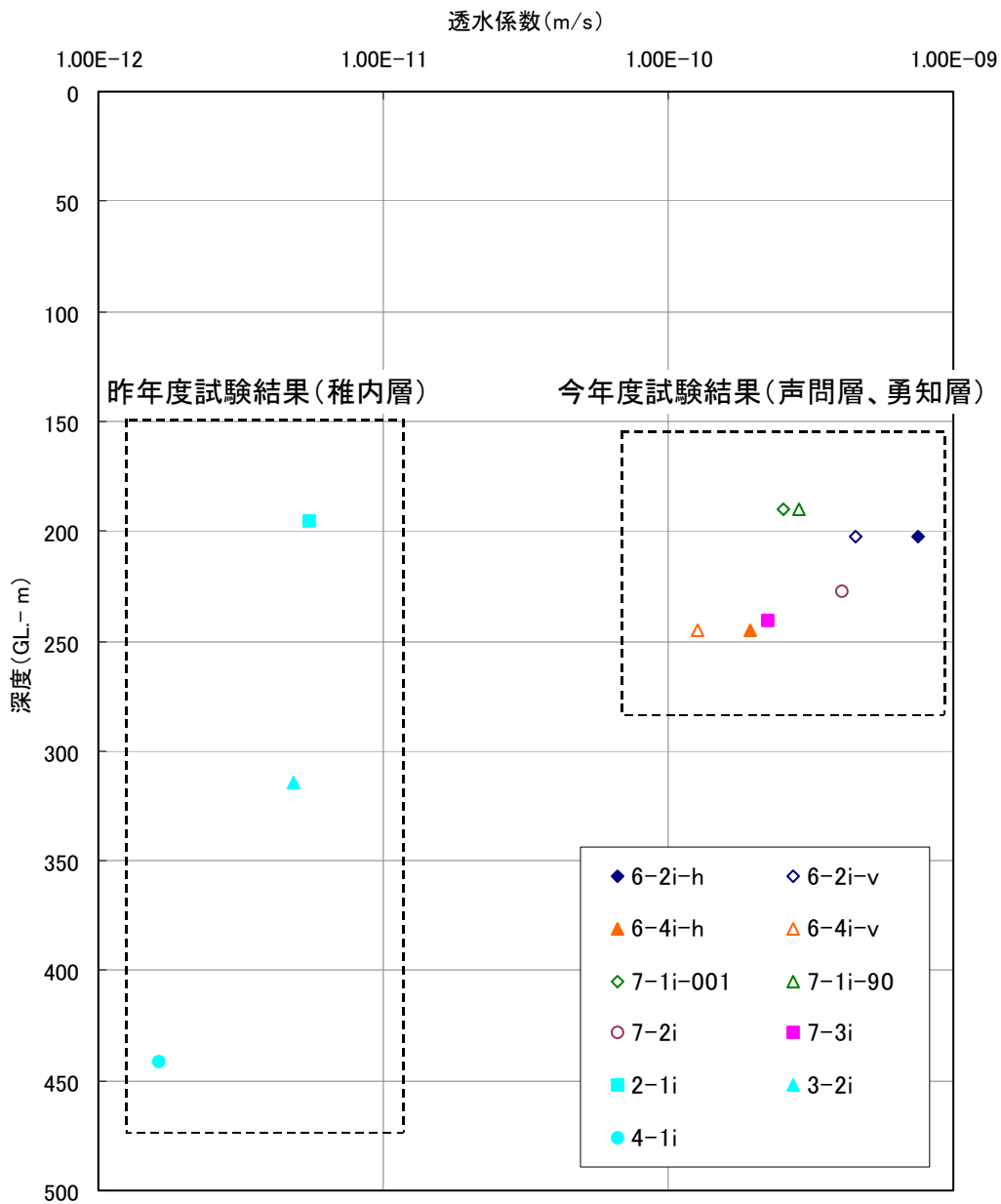


図 4.3- 7 透水試験結果の比較（昨年度試験結果（稚内層）との比較）

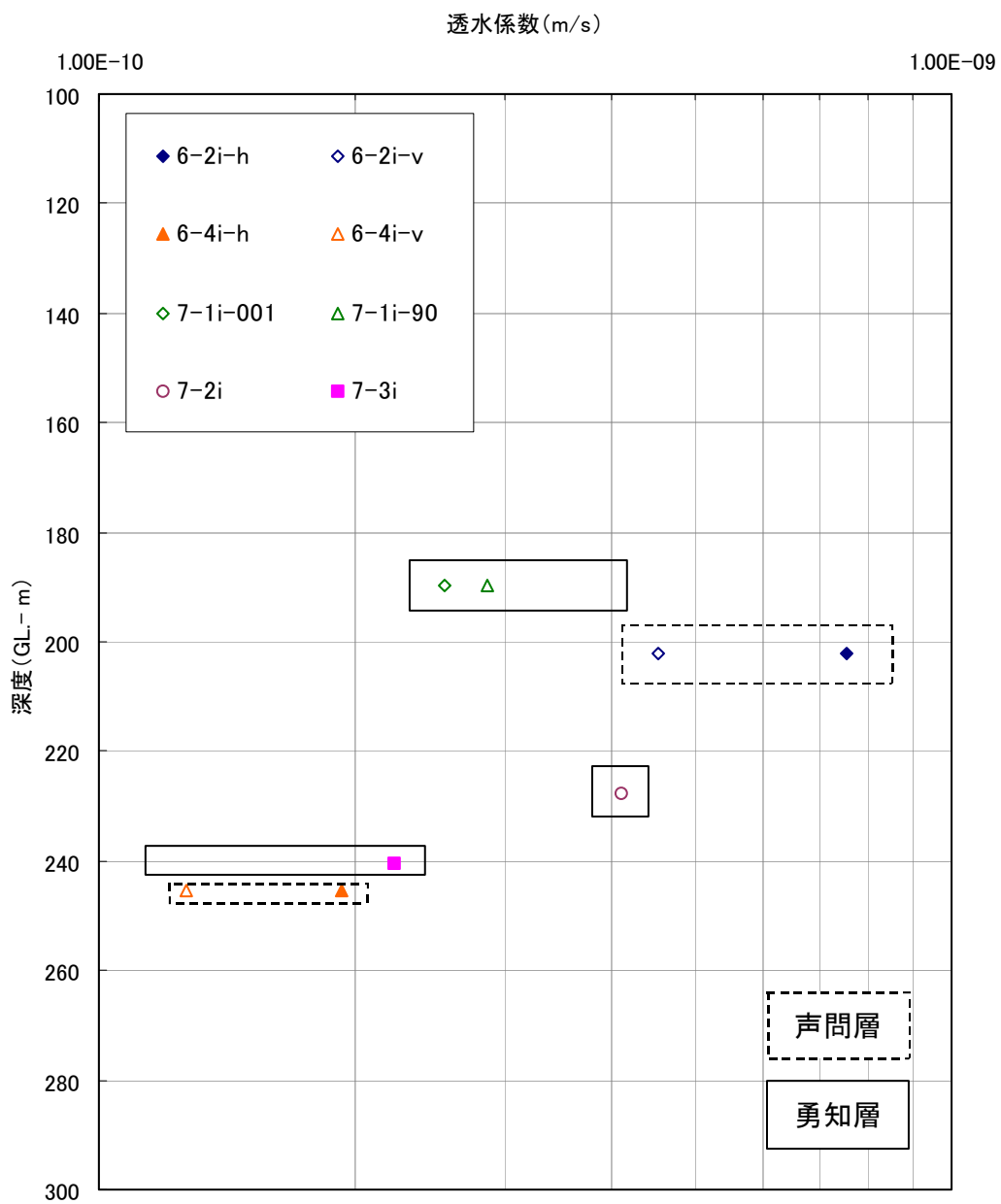


図 4.3- 8 透水試験結果の比較（声問層と勇知層の比較）

### 4.3.2 定流量透水試験

#### (1) 試験方法

定流量透水試験は、昨年度と同様、後出のトレーサー試験装置を用いて実施した。試験装置の概略および試験手順を図 4.3-9、図 4.3-10 に示す。

本試験では、通常の透水試験を行うと同時に、試料そのものの持つヨウ化物イオン量を把握する目的で、装置下流側にてイオンメーターおよび電気伝導度計によるヨウ化物イオン濃度の測定を行っている。そのため、使用する水は、脱イオン水とした。

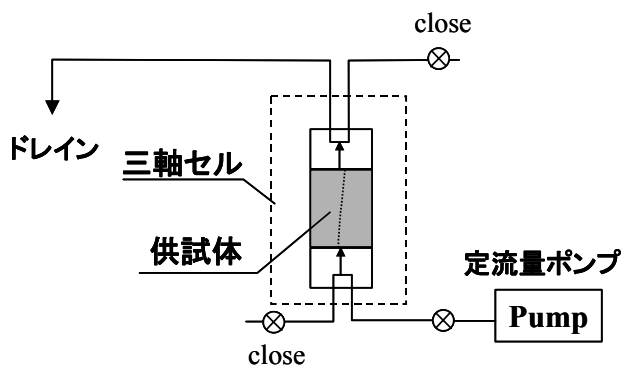


図 4.3- 9 定流量透水試験装置概要

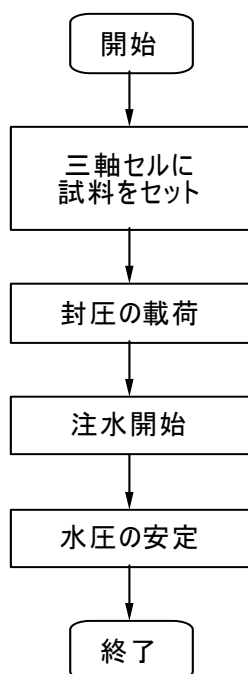


図 4.3- 10 定流量透水試験手順

(2) 試験ケース

当初、定流量透水試験およびトレーサー試験は、声問層 2 試料 (6-2f、6-4f)、勇知層 2 試料 (7-2f、7-3f) について実施する予定であったが、勇知層の 2 試料について試験を実施した結果、所定の封圧を載荷した時点で、インタクト試料と同等の  $10^{-10}$  (m/s) オーダーの透水係数が得られたため、トレーサー試験の実施に膨大な時間を要する可能性が示唆された。そこで、定流量透水試験およびトレーサー試験の試験ケースを表 4.3-4 に示すようなケースに変更した。試験は、6-2f 試料について、封圧依存性を確認することを目的として、表中の封圧を変化させた 3 ケース、6-4f 試料については、採取深度相当の有効応力条件を設定したケースを 1 ケース実施した。なお、有効応力の設定は、トランジェントパルス透水試験と同様に、図 4.3-4 に示す HDB-1 孔の密度検層から求められた鉛直応力を参考に行った。

表 4.3- 4 定流量透水試験ケース

地層名	試料名	深度		封圧 (MPa)	
声問層	6-2f	202.00	~	202.60	0.8
					1.2
					1.6
	6-4f	240.00	~	240.60	1.9

(3) 試験結果

定流量透水試験では、亀裂が試料の中央に位置していると仮定した場合の亀裂の透水量係数  $T_f(m^2/s)$  と、試料の全断面を透水すると仮定した場合の試料の透水係数  $K(m/s)$  を以下の(4.3-8)~(4.3-10)式から求めた。

$$T_f = \frac{Q}{x \cdot I} \dots (4.3-8)$$

$$K = \frac{Q}{A \cdot I} \dots (4.3-9)$$

$$I = \frac{H}{L} \dots (4.3-10)$$

ここに、 $T_f$  : 亀裂の透水量係数 ( $m^2/s$ )、 $Q$  : 流量 ( $m^3/s$ )、 $x$  : 亀裂長さ (m)、 $I$  : 動水勾配(-)、 $K$  : 試料の透水係数 (m/s)、 $A$  : 試料の断面積 ( $m^2$ )、 $H$  : 水頭差 (m)である。

なお、昨年度試料 (稚内層) については、インタクト部の透水係数が  $10^{-12}(m/s)$  オーダー (表 4.3-6) と非常に低かったため、インタクト部を流れる流量を無視し、通水した水の全てが亀裂のみを流れると仮定して亀裂部の透水量係数を求めたが、今年度試料 (声問層) に関しては、昨年度試料と比べるとインタクト部の透水係数が 2 オーダー程度大きいため、亀裂部の透水量係数はインタクト部の流量を無視した場合と考慮した場合の両方について求めた。インタクト部の流量を考慮した場合の亀裂の透水量係数は、インタクト部の透水係数として前節のトランジェントパルス透水試験法による試験結果を用い、後のトレーサー試験結果の解析に用いている 3 次元物質移行解析コード FRAC3DVS (ver.3.49、Therrien 他、1999 : 4.4.2 節を参照) を用いた飽和浸透流

解析を行い、試験条件（通水断面、通水流量、動水勾配）に一致する亀裂の透水量係数を逆解析的に求めた。

表 4.3-5 に定流量透水試験結果の一覧を、表 4.3-6 に昨年度の試験結果を示す。表 4.3-5 より、亀裂の透水量係数は、 $10^{-11}$  (m<sup>2</sup>/s) オーダーであり、試料全体の透水係数は、 $10^{-10}$ ～ $10^{-9}$  (m/s) オーダーの範囲であった。また、同表より、インタクト部の流量を無視した場合と考慮した場合で、亀裂の透水量係数にオーダーの差は無いものの、最大で 2 倍程度の違いが生じていることが分かる。また、深度 200m 付近で採取した試料 6（声問層：6-2f）で実施した封圧依存性の確認に関しては、図 4.3-11 に示した封圧と亀裂の透水量係数の関係から、封圧の増加とともに試料の亀裂の透水性が低下する傾向が確認された。これは、封圧の増加に伴って、試料の亀裂開口幅が減少し、透水性が低下しているためと考えられる。

表 4.3-5 定流量透水試験結果一覧（今年度試料：声問層、勇知層）

試料名	地層名	採取深度 [m]	封圧[MPa]		水圧差 [MPa]	流量 [m <sup>3</sup> /s]	亀裂の透水量係数 [m <sup>2</sup> /s]		試料全体の透水量係数 [m/s]
			軸圧	側圧			マトリクス部の透水性を無視	マトリクス部の透水性を考慮	
6-2 f	声問層	202.0～202.6	0.8	0.8	0.05	5.17E-10	9.45E-11	7.65E-11	1.89E-09
			1.2	1.2	0.08	5.17E-10	6.78E-11	4.87E-11	1.36E-09
			1.6	1.6	0.14	5.33E-10	3.65E-11	1.74E-11	7.31E-10
6-4f		245.1～245.6	1.9	1.9	0.13	5.83E-10	4.34E-11	3.84E-11	8.69E-10

表 4.3-6 定流量透水試験結果一覧（昨年度試料：稚内層）

試料名	採取孔名	採取深度 [mbgl]	封圧[MPa]		水圧差 [MPa]	流量 [m <sup>3</sup> /s]	亀裂の透水量係数 [m <sup>2</sup> /s]	試料全体の透水量係数 [m/s]
			軸圧	側圧				
2-1f	JNC幌延 HDB-4	195.0～195.7	2.4	2.4	0.02	4.92E-10	2.18E-10	5.56E-09
3-2f		315.7～316.0	0.8	0.8	0.04	5.33E-10	1.44E-10	3.67E-09
3-2f		315.7～316.0	1.6	1.6	0.06	5.25E-10	9.35E-11	2.38E-09
3-2f		315.7～316.0	2.4	2.4	0.09	5.33E-10	5.94E-11	1.51E-09
3-2f		315.7～316.0	3.2	3.2	0.12	5.42E-10	4.41E-11	1.12E-09
4-1f		441.5～442.0	2.4	2.4	0.01	5.75E-10	4.00E-10	1.02E-08

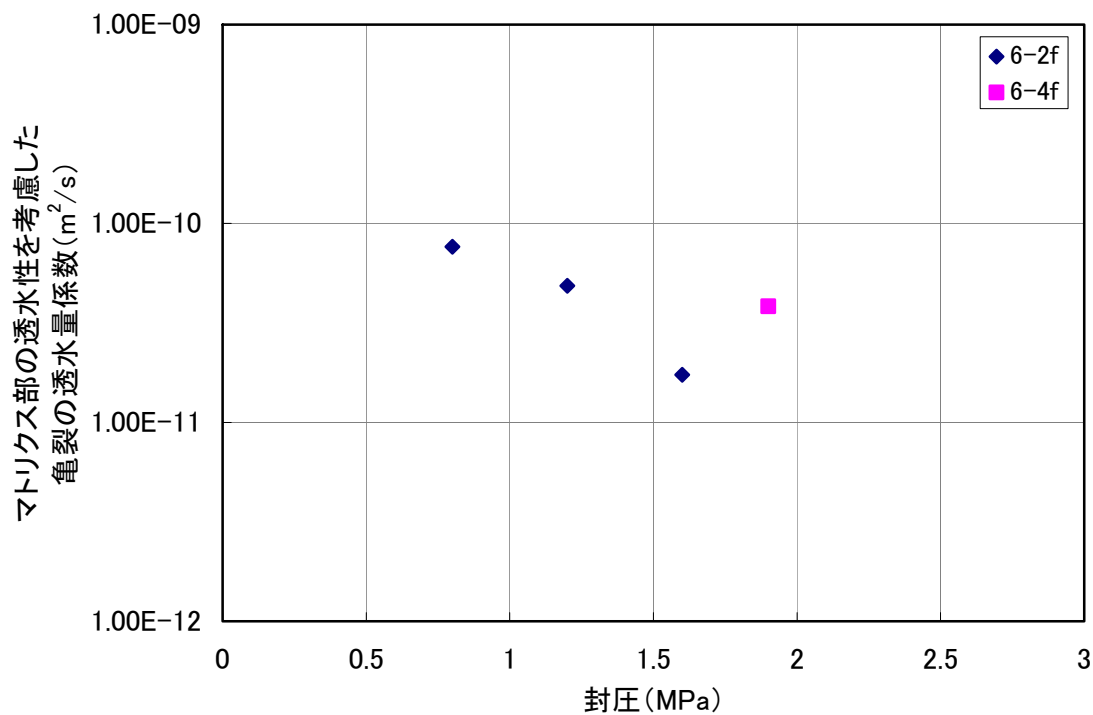


図 4.3- 11 亀裂試料における封圧と透水量係数の関係

4.4 コア試料を対象としたトレーサー試験

コア試料のトレーサー試験は、昨年度と同様に、インタクト試料に対しては透過拡散法による拡散試験を、また亀裂試料に対してはトレーサー試験を実施した。以下にそれぞれについて説明する。

4.4.1 拡散試験

(1) 試験方法

試験装置の概要を図 4.4-1、図 4.4-2 に示す。本試験は、透過拡散法による拡散実験である。透過拡散法とは、岩石試料で仕切られた 2 つのセルにそれぞれトレーサー溶液と水を入れ、2 つのセル内のトレーサー濃度の経時変化から岩石の拡散係数を求める方法である。

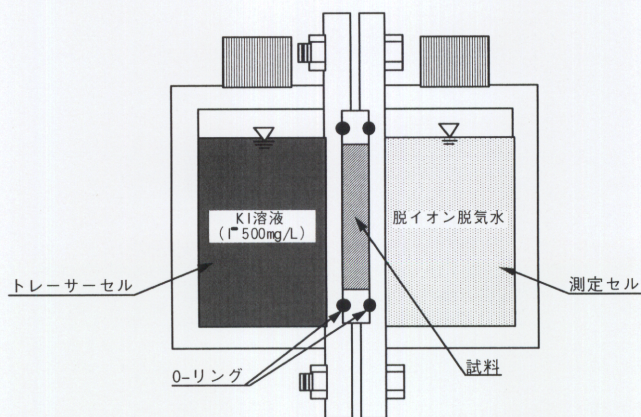


図 4.4-1 拡散実験装置概要

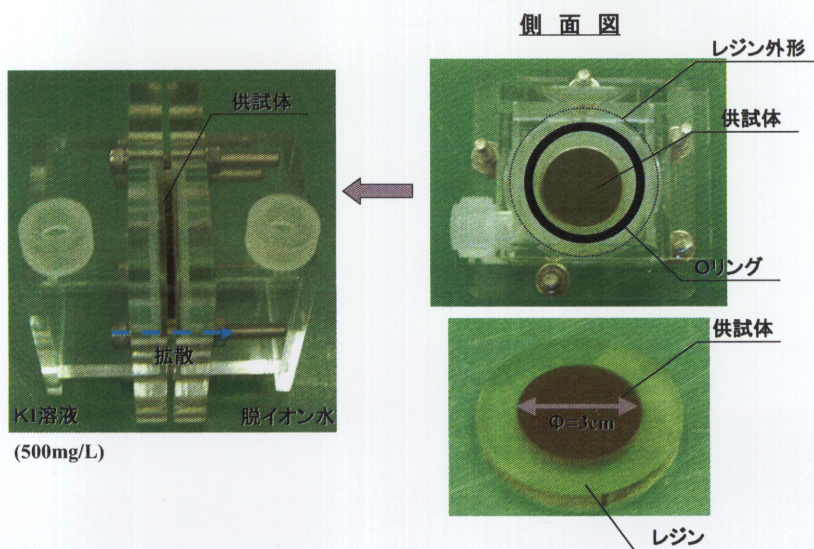


図 4.4-2 拡散実験装置および供試体の概観



## (2) 試験ケース

試験ケースを表 4.4-1 に示す。試験条件は、全試験ケースとも同様とした。

トレーサー溶液にはヨウ化カリウム (KI) 水溶液を用い、トレーサー濃度は、ヨウ化物イオン (I<sup>-</sup>) 濃度を対象に測定した。また、溶液濃度は、ヨウ化物イオンの酸化による測定結果への影響を考慮して、低濃度の I<sup>-</sup> 500 (mg/L) とした。表 4.4-2 に試験条件の一覧を示す。

表 4.4-1 拡散試験ケース

地層名	試料名	深度		
声問層	6-2i-h	202.00	~	202.60
	6-2i-v			
	6-4i-h	245.10	~	245.60
	6-4i-v			
勇知層	7-1i-003	189.65	~	190.00
	7-1i-902			
	7-2i-2	226.85	~	228.27
	7-3i	240.00	~	240.60

表 4.4-2 試験条件一覧

項目	実験条件
トレーサーセル側	ヨウ化カリウム水溶液
	・濃度：I <sup>-</sup> 500 (mg/L)
	・容量：50 (ml)
測定セル側	脱イオン水
	・容量：50 (ml)
温度	室温 (22°C ~ 25°C)

## (3) 試験結果

試験結果の一例を図 4.4-3、図 4.4-4 に示す。拡散試験では、得られた試験結果を用い、以下に述べる方法で拡散係数を求める。

実効拡散係数、見かけの拡散係数および収着容量を表 4.4-3 に示す。また、昨年度の解析結果を表 4.4-4 に示す。実効拡散係数については、声問層と勇知層の間に大きな差はなく、 $9.50 \times 10^{-11} \sim 6.78 \times 10^{-10}$  ( $\text{m}^2/\text{s}$ )の値が得られた。また、これは昨年度試料（稚内層）に比べて1オーダー程度大きな値となっている。また、声問層試料において、若干の異方性が確認されたが、異方性の程度が小さいことや、データ数が少ないことから結論付けることはできない。既往の、新第三紀泥岩・凝灰岩の拡散係数値(核燃料サイクル開発機構、2000)と今回の試験結果の比較を図 4.4-5 に示す。今回得られた値は、同一有効空隙率のサンプルの中では、1 オーダー程度大きな値であることが分かる。また、収着容量から求めた分配係数を求めると、0 に近い値となることから、当試料へのヨウ化物イオンの収着量は非常に小さいものと考えられる。

表 4.4- 3 拡散試験結果一覧（今年度試料：声問層、勇知層）

	実効拡散係数 De ( $\text{m}^2/\text{sec}$ )	見かけの拡散係数 Da ( $\text{m}^2/\text{sec}$ )	収着容量 $\alpha$	分配係数 $\text{m}^3/\text{kg}$	有効空隙率 ne
6-2i-h	6.78E-10	6.01E-10	1.128	0.0005	0.598
6-2i-v	3.30E-10	1.58E-09	0.209	-0.0004	0.596
6-4i-h	2.59E-10	1.56E-09	0.166	-0.0003	0.534
6-4i-v	2.08E-10	1.29E-09	0.161	-0.0003	0.537
7-1i-003	1.44E-10	5.52E-10	0.261	-0.0001	0.447
7-1i-902	9.50E-11	9.41E-09	0.010	-0.0003	0.469
7-2i-2	1.17E-10	1.02E-09	0.115	-0.0002	0.440
7-3i	2.32E-10	1.70E-08	0.014	-0.0003	0.457

表 4.4- 4 拡散試験結果一覧（昨年度試料：稚内層）

	実効拡散係数 De ( $\text{m}^2/\text{s}$ )	見かけの拡散係数 Da ( $\text{m}^2/\text{s}$ )	収着容量 $\alpha$ (-)	分配係数 Kd ( $\text{m}^3/\text{kg}$ )	有効空隙率 ne (-)
2-2i	2.34E-11	6.86E-11	0.342	-0.049	0.414
3-4i	2.55E-11	3.36E-11	0.758	0.244	0.384
4-2i	8.16E-12	3.84E-11	0.212	-0.072	0.332

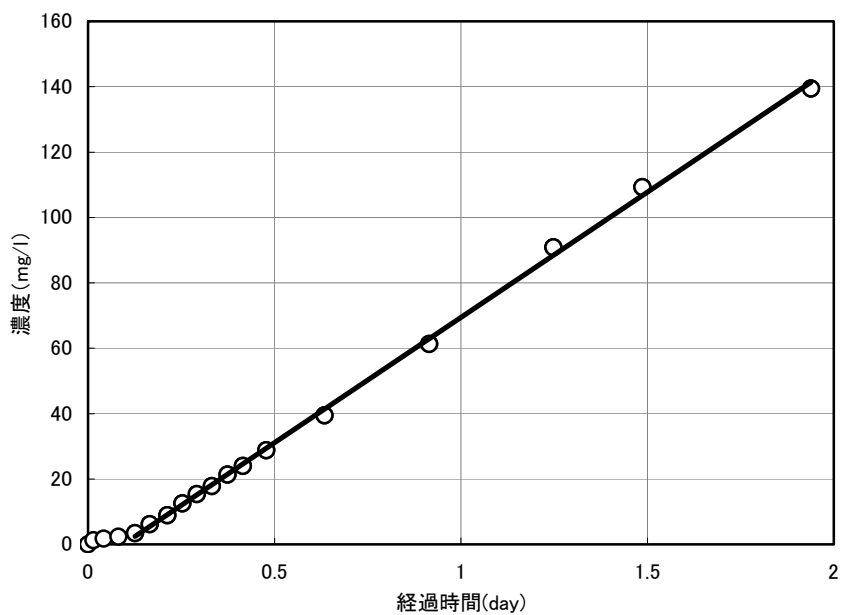


圖 4.4- 3 擴散試驗結果 (試料名 : 6-2i-h)

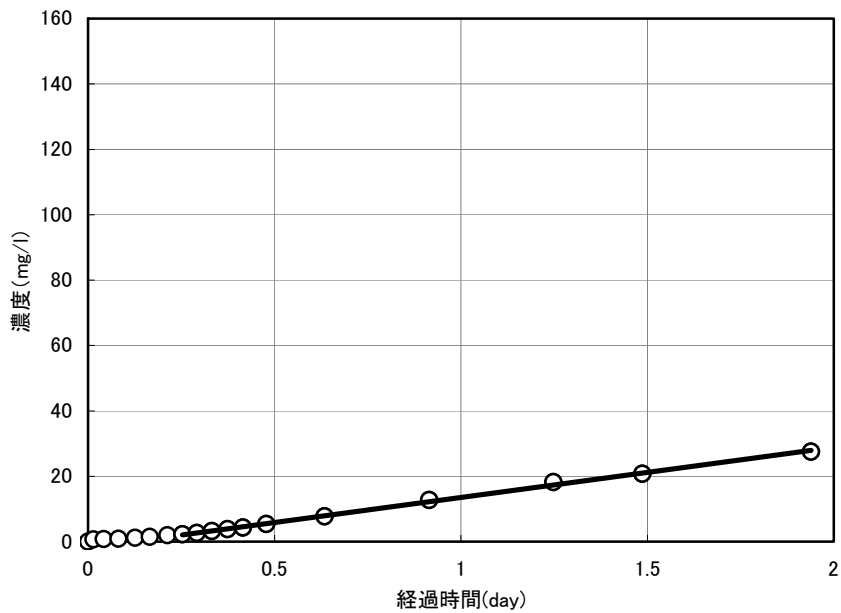


圖 4.4- 4 擴散試驗結果 (試料名 : 7-1i-003)

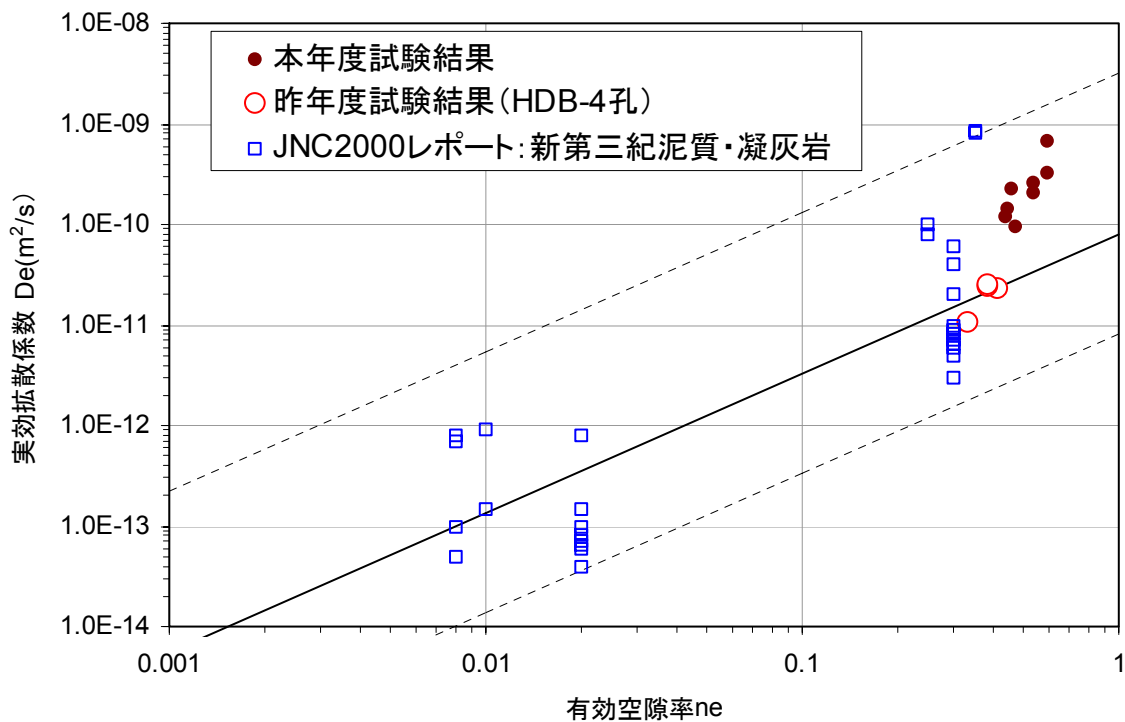


図 4.4- 5 実効拡散係数と有効空隙率の比較 (既往データとの比較)

(核燃料サイクル開発機構、2000)

#### 4.4.2 トレーサー試験

亀裂試料について、昨年度と同様にトレーサー試験を行った。トレーサー試験に用いた装置の概要を図 4.4-6、図 4.4-7 に示す。本試験は、三軸セル内の試料に所定の封圧を載荷した状態で、試料の下側から上側へトレーサー溶液を注入し、排出される溶液の濃度の時間変化を測定するものである。試験装置および試験条件は、基本的には、昨年度と同様の条件で実施するが、試験を実施する前に、昨年度の試験で残された課題について検討を行った。

##### (1) 試験方法

試験装置は、以下から構成される。

- ① 三軸セル
- ② 封圧載荷装置（軸圧載荷装置、側圧載荷用油圧源）
- ③ 注入制御装置：定流量ポンプ、ビーカー（トレーサー溶液、水）、流量測定用秤、水圧計
- ④ 排出制御装置：フラッシング用ポンプ
- ⑤ 分析装置：電気伝導率計、イオンメータ、フラクションコレクター

試料がセットされた三軸セルに対し、載荷板により軸圧を加えると同時に、油圧源により側圧を加えることができる（最大載荷能力：軸圧 10t、側圧 20MPa）。

トレーサー注入に用いる定流量ポンプには、ジーエルサイエンス社製のダブルプランジャーポンプ（HPLC PUMP PU610, 0.001-5.0ml/分）を用いた。分析装置には、トレーサー試験中のトレーサー濃度を連続的に測定するための装置として、電気伝導率計とイオンメータ（東亜電波工業社製、型番：IM-40S、ヨウ化物イオン用選択電極使用）を排出側配管途中に配した。さらに、水質分析用のトレーサー溶液のサンプルを一定時間毎に採取するため、フラクションコレクター

（Advantec 社製、型番：F-160）とタイマーを用いた。作動間隔および採取時間は、タイマーで任意に設定できる。試験管容量は最大で 20cc、最大架数は 160 本である。蒸発等による水質サンプル濃度の変化を極力抑えるため、フラクションコレクターは防湿ケースの中に収められている。

本装置の特徴は、試験中の配管内でのトレーサー滞留時間を短縮し、管内分散を最小限に抑えるために、上下流出口部でのフラッシング機構を配していることである。トレーサー注入開始時には、トレーサー注入ポンプ作動開始後、一時的にドレインバルブを開放することにより、トレーサー注入ポンプから試料面までの管内滞留時間を短縮することができる。また、トレーサー排出側では、フラッシングポンプで水を送ることにより、排出されたトレーサー溶液が電気伝導率計などの測定箇所へ到達するまでの時間を短縮することができる。

水質サンプルの分析に関し、ヨウ化物イオンの定量方法には、ヨウ素滴定法、酸化-溶媒抽出による吸光光度法、イオン電極法などがある。今回は、「融合結合プラズマ（ICP）発光分光分析法」を用いた。同分析法の特徴は、低濃度の天然水や水道水について、試料を特殊な前処理を行うことなく、高感度での測定が可能なことである。

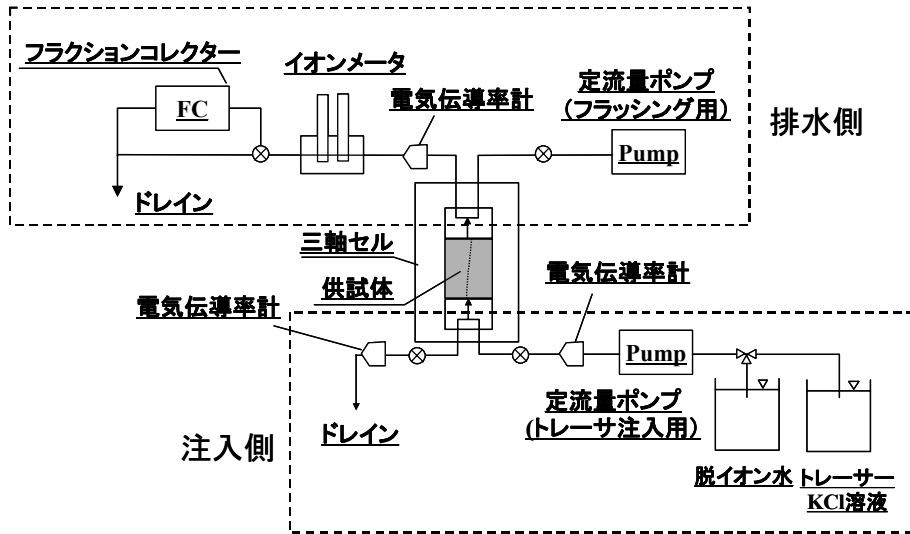


図 4.4- 6 トレーサー試験装置概要 (昨年度試験時レイアウト)

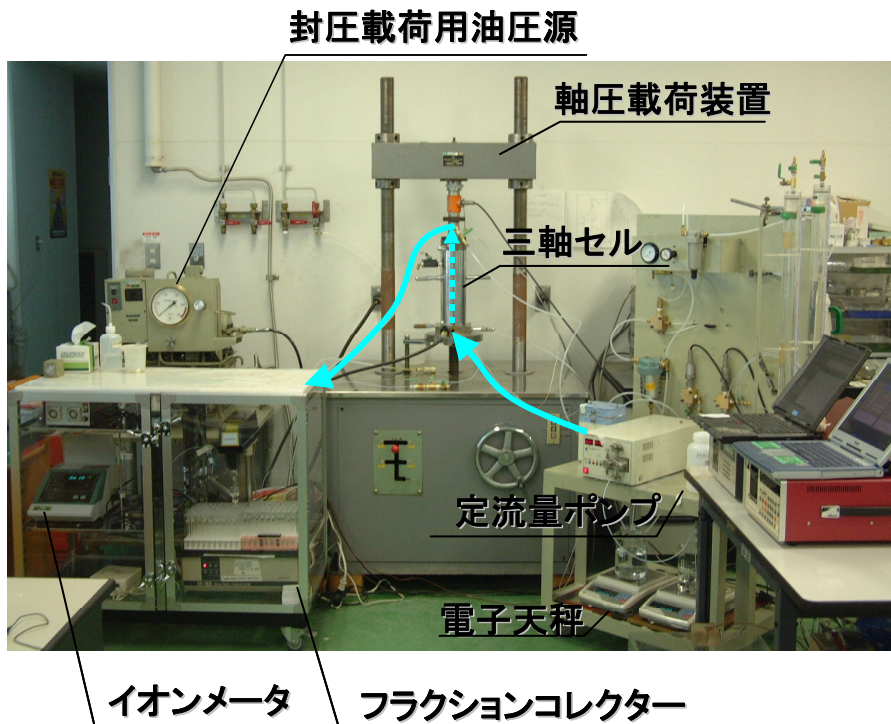


図 4.4- 7 トレーサー試験装置概要 (昨年度試験時レイアウト)

(2) 事前検討

① センサーのキャリブレーション

昨年度の試験は、電気伝導率計と ICP の 2 つの濃度センサーを用いてトレーサー濃度の測定を実施したが、各センサーのキャリブレーションは、それぞれ別々に実施した。このため電気伝導率計と ICP の測定結果が一致しないケースが見られた。

そこで、本年度の試験を実施する前に、以下の 2 点について検討を行った。

a. 各センサーの測定精度の確認

電気伝導率計、イオンメーター、ICP の各測定センサーについて、どのセンサーが最も信頼できるのか確認するために、全てのセンサーで、同じ溶液を測定し、それぞれの測定精度を検討した。検討結果を図 4.4-8 に示す。図 4.4-8 より、50mg/L 以上の範囲において、各センサーの測定結果にややバラツキが見られ、また、各センサーともほぼ同等の精度を有していることが分かる。したがって、トレーサー試験時の濃度測定は、基本的には電気伝導率計にて測定を行い、その確認として ICP による測定を行う方針で実施する。

b. キャリブレーション時と試験実施時の測定条件の変化が測定値に与える影響の検討

試験を実施する際に、試験条件により、キャリブレーション時の通水流量と、試験実施時の通水流量が異なる場合が考えられる。そこで、電気伝導率計についてセンサーを通水する流量を変化させた数ケースの測定を行い、その影響について検討を行った。検討結果を図 4.4-8 中に示す。図 4.4-8 中の通水流量を変化させた 3 ケースに着目すると、全ての濃度領域において、通水流量に依存した各センサーの測定濃度の変化は見られなかった。

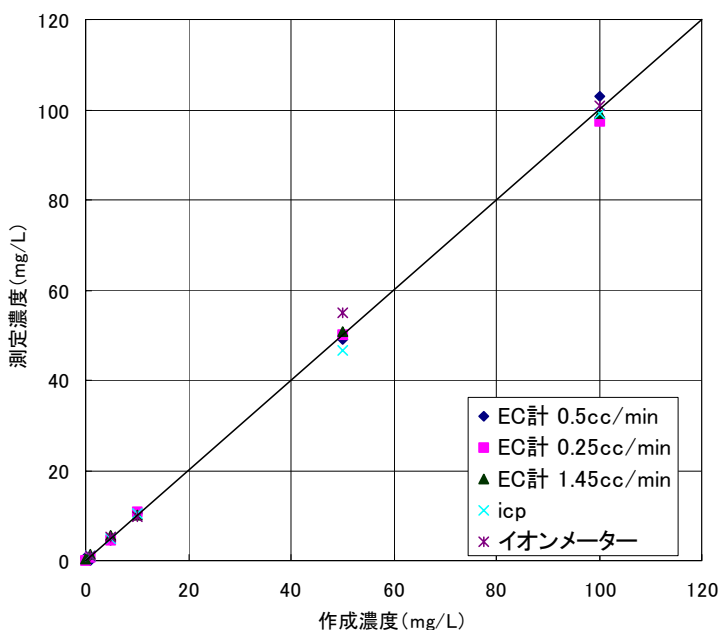


図 4.4-8 センサーキャリブレーション検討結果

## ② 装置や試料の貯留の影響

図 4.4-9 に昨年度のトレーサー試験結果の一例を示す。図 4.4-9 の(c)注入圧力のグラフから分かる様に、昨年度の試験では、試験装置もしくは試料の貯留の影響により、トレーサー注入開始から、流れが定常状態に達するまでに時間的遅れが生じており、これが、試験結果に影響を与えている可能性がある。そこで、本年度の試験を実施する前に、貯留の影響を確認した上で、これらの影響を与えないような試験方法について検討した。

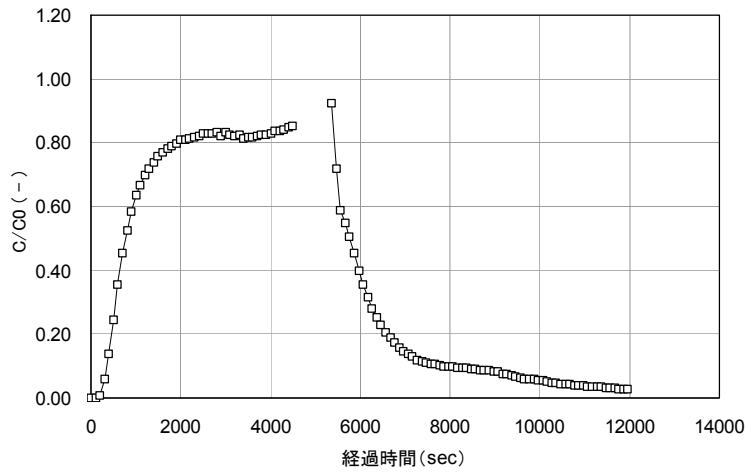
まずはじめに、貯留の影響の確認を行うに際して不確定な要素をできるだけ除くため、マトリクス拡散の生じないアクリル製のダミー試料を対象としたトレーサー試験を実施した。ダミー試料は、5cm×5cm の円柱状で、亀裂開口幅が 0.05mm となるように作成した (図・4.4-10)。まずはじめに、このダミー試料を対象として、これまでと同様の試験法でトレーサー試験を実施した。流量等の試験条件は、通常の試験と同様の条件で行った。図 4.4-11 に試験結果をしめす。図 4.4-11 の解析結果は、入力条件を亀裂開口幅を既知量の 0.05mm、分散長  $\alpha$  を 0.005m に設定した結果である。濃度変化の測定値は解析結果に比較して、数十秒の遅れが生じていることが分かる。そこで、次に溶液を注入した際の注入圧力と、その時の出口側の排水流量の関係を確認した。その結果を図 4.4-12 に示す。図 4.4-12 より、注入圧力が安定するまでの間、排水流量は注入流量である 0.035cc/min に達していないことが分かった。このことから、注入流量の安定、すなわち流量が定常状態になるまでの時間的遅れが、試験結果に影響を与えていることが分かった。そこで今回は、この注入圧力に着目し、試験開始後、注入圧力が瞬時に定常状態になるような試験方法および手順の改良を行った。図 4.4-13 に改良試験装置のレイアウトを示す。改良試験法の具多的な手順は、以下の通りである。

- 1) トレーサー試験前の定流量透水試験時に注入流量 0.035cc/min の時の注入圧力を確認
- 2) 注入側装置内をトレーサー溶液に入替えた後に、注入開始に先立って、予め注入ポンプを作動し、流量 0.035cc/min で注入側ドレイン方向へ排水しておく。
- 3) 試験開始は、注入側ドレイン上の三方弁の切り替えにて行う。この際に、予め確認した注入圧を背圧として空気圧で与える。
- 4) 水の注入時も同様の手順を行う。

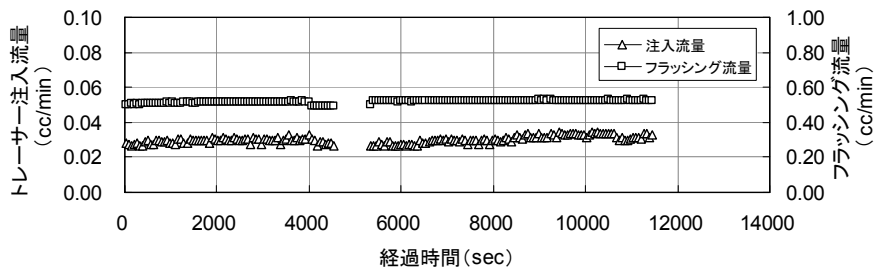
次に、この改良試験法で、再度ダミー試料を対象としたトレーサー試験を実施した。試験結果を図 4.4-14 に示す。この結果から、改良試験法で実施した結果が解析結果と良く一致していることが分かる。したがって、本年度のトレーサー試験には、この改良型の試験方法を採用する。

なお、ここで実施したトレーサー試験の解析は、今回の試験ではマトリクス拡散の生じないアクリル製のダミー試料を使用しているため、マトリクス拡散を考慮した解析を行う必要はない。したがって、Ogata-Banks(1961)によって求められた 1 次元移流分散方程式の理論解を用いてフィッティングを行った。解析では、試験と同じ条件を与えることにより得られた濃度上昇曲線を、試験結果とフィッティングすることで、亀裂部の物質移行開口幅、分散係数 (分散長) を求めた。

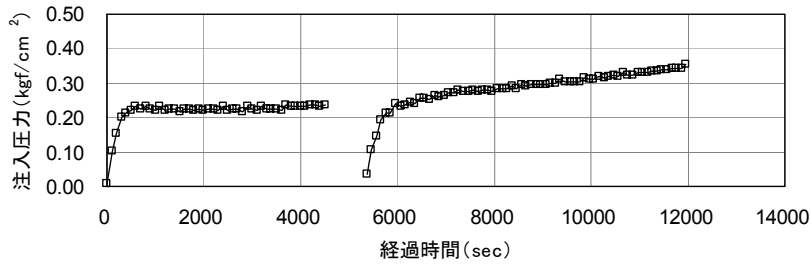




(a) 出口側トレーサー濃度



(b) 注入流量およびフラッシング流量



(c) 注入圧力

図 4.4-9 昨年度試験トレーサー試験結果 (試料名: 2-1f、封圧: 2.4MPa)

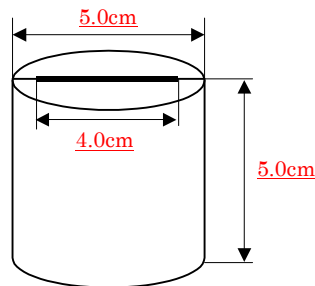


図 4.4-10 アクリル半割リダミー試料 (亀裂開口幅 0.05mm)

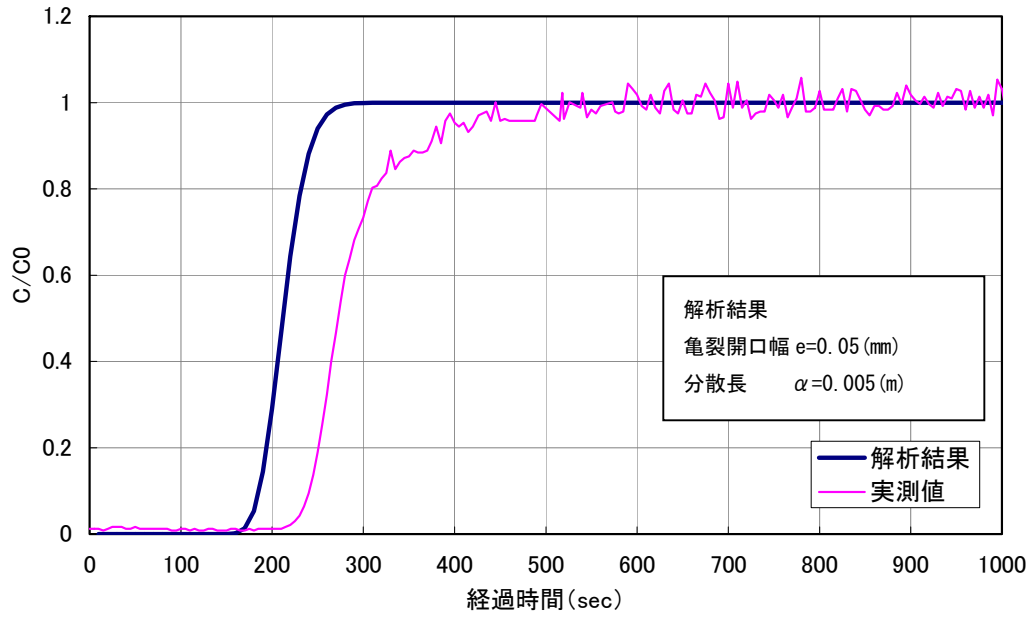


図 4.4- 11 トレーサー試験結果（アクリル製ダム：H14 年度試験法）

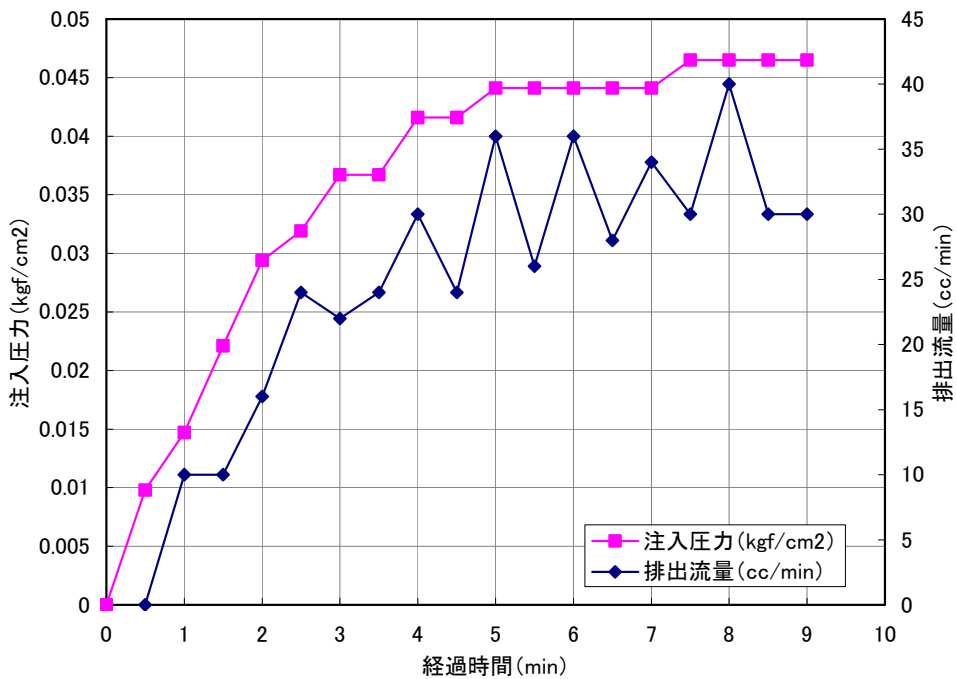


図 4.4- 12 注入圧力と排水側流量の関係

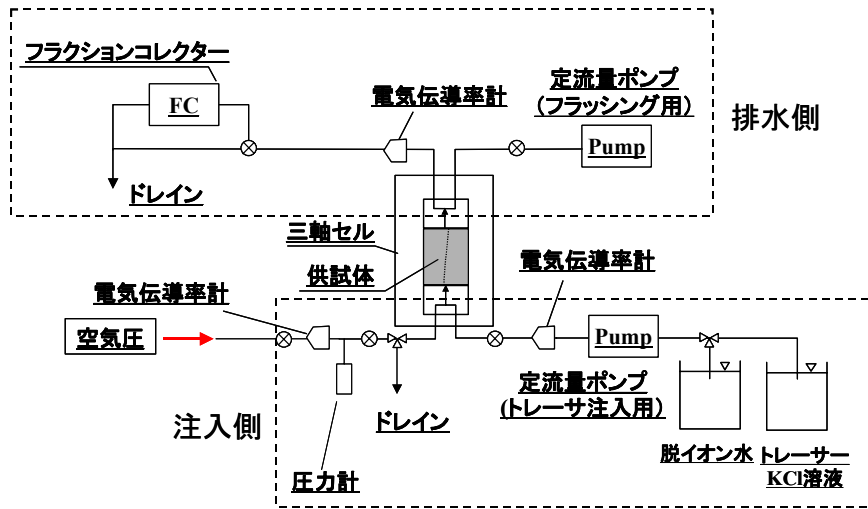


図 4.4- 13 改良トレーサー試験装置のレイアウト

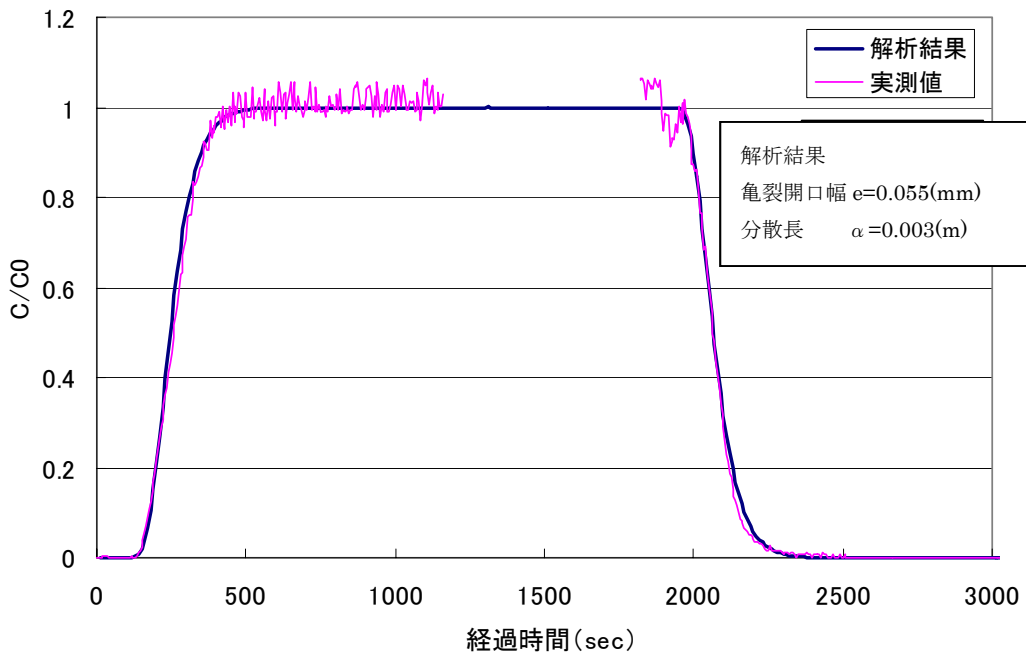


図 4.4- 14 トレーサー試験解析結果（初期圧力ありの場合）

(3) 試験ケース

トレーサー試験の試験ケースを表 4.4-5 に示す。トレーサー試験の試験ケースは、定流量透水試験ケースと同様、当初、声問層 2 試料 (6-2f、6-4f)、勇知層 2 試料 (7-2f、7-3f) について実施する予定であったが、勇知層の 2 試料について透水試験試験を実施した結果、所定の封圧を載荷した時点で、インタクト試料と同等の  $10^{-10}$  (m/s) オーダーの透水係数が得られたため、表 4.4-5 に示すようなケースに変更した。試験は、6-2f 試料について、封圧依存性を確認することを目的として、表中の封圧を変化させた 3 ケース、6-4f 試料については、採取深度相当の有効応力条件を設定したケースを 1 ケース実施した。なお、有効応力の設定は、トランジェントパルス透水試験と同様に、図 4.3-4 に示す HDB-1 孔の密度検層から求められた鉛直応力を参考に行った。また、トレーサー濃度、注入流量、フラッシング流量等の試験条件は、全試験ケースとも同様の条件とした。表 4.4-6 に試験条件の一覧を示す。

なお、本試験では、トレーサー溶液に、ヨウ化カリウム (KI) 水溶液を用い、濃度測定はヨウ化物イオン (I<sup>-</sup>) 濃度について行った。また、注入トレーサー濃度は、水との密度差が生じないように、できる限り小さくすることが望ましいと考えられるので、今回は、フラッシングによる希釈の影響及び測定センサーの精度等を考慮して、1000 (mg/L) に設定した。

表 4.4-5 トレーサー試験ケース

地層名	試料名	深度			封圧(MPa)
声問層	6-2f	202.00	~	202.60	0.8
					1.2
					1.6
	6-4f	240.00	~	240.60	1.9

表 4.4-6 トレーサー試験条件一覧

	トレーサー試験条件
トレーサー溶液	ヨウ化カリウム水溶液
注入水	脱イオン水
フラッシング水	
トレーサー濃度	I <sup>-</sup> 1000 (mg/L)
トレーサー注入流量	0.035 (cc/min)
フラッシング流量	0.500 (cc/min)
温度	室温 (22°C ~ 25°C)

#### (4) 試験状況および試験結果

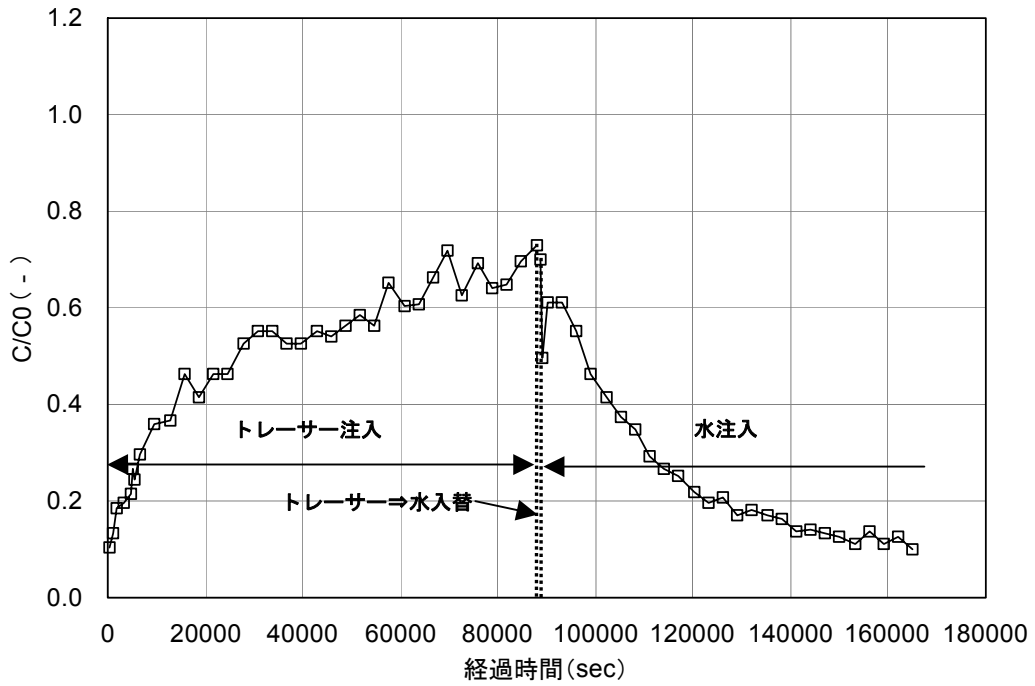
以下、トレーサー試験の状況について説明する。試験結果の一例を図 4.4-15 に示す。ここでは、試験中のトレーサー濃度、流量、注入圧力の経時変化を示す。

流量の経時変化を図中(b)に示す。トレーサー注入は、定流量制御が可能なダブルプランジャーポンプを用いており、0.001(cc/min)単位での流量設定が可能である。図中(b)の流量の経時変化グラフから(設定流量=0.035cc/min)、多少のばらつきはあるが、トレーサーの注入流量、フラッシング流量ともほぼ安定しているのが分かる。

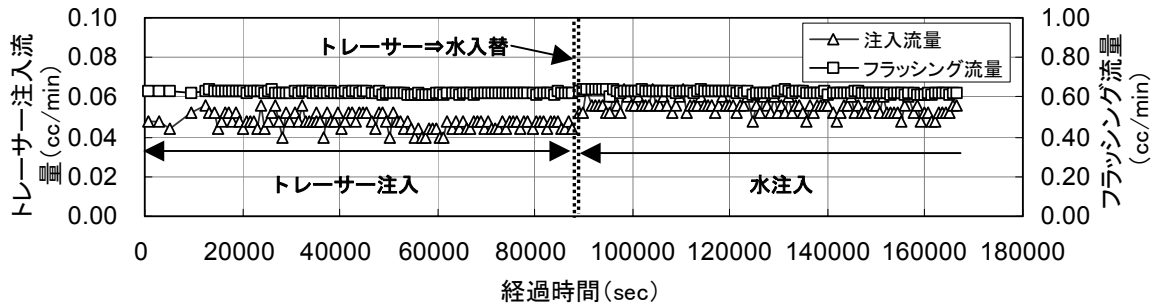
注入圧力の経時変化を図中(c)に示す。この図より、本節冒頭で説明した試験方法の改良により、トレーサー注入および水注入の開始直後から、注入圧力がほぼ一定圧力に達しており、試料および試験装置の貯留の影響が解消されていることが分かる。

トレーサー濃度の経時変化を図中(a)に示す。図より、本年度試料は、昨年度試料(稚内層)と比べてマトリクス部の実効拡散係数が大きいため、マトリクス拡散による遅延の影響を大きく受け、トレーサー濃度の上昇に非常に長時間を要していることが分かる。また、6-2f 試料に比べて、実効拡散係数の小さい6-4f 試料の方がトレーサー濃度の上昇時間が早いことから、マトリクス拡散の程度の違いによる、遅延の影響の違いがうかがえる。

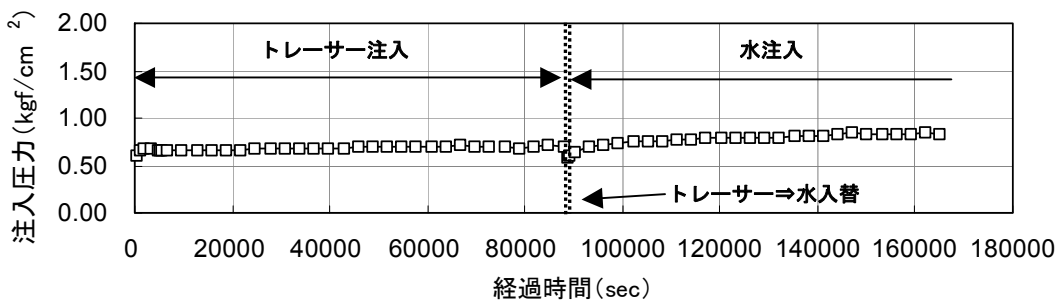
また、封圧依存性については、6-2f 試料の封圧 0.8 (MPa) および 1.2 (MPa) では、破過曲線の変化はあまり見られないが、封圧 1.6 (MPa) からは、トレーサー注入時の濃度上昇および水注入時の濃度低下の傾きが緩やかになり、破過曲線の形状に変化が見られる。



a) 出口側トレーサー濃度



b) 注入流量およびフラッシング流量



c) 注入圧力

図 4.4- 15 トレーサー試験結果 (試料名 : 6-2f、封圧 : 0.8MPa)

(5) 試験結果の解析

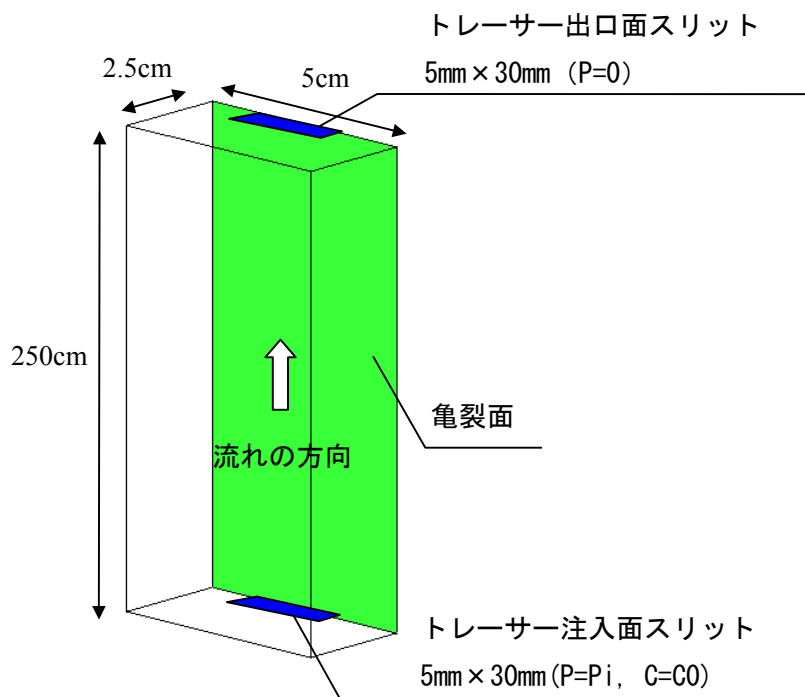
トレーサー試験の解析には、昨年度と同様に、3次元物質移行解析コードFRAC3DVS(ver.3.49、Therrien 他、1999)を用いた。FRAC3DVSは、飽和不飽和の浸透流解析ならびに移流分散、拡散、吸着、放射性崩壊を考慮した物質移行解析が可能な3次元解析コードである。数値解析手法として、差分法と有限要素法の両者から選択が可能になっている。今回は、差分法を用いた。

解析では、トレーサー試験と同じ条件を与えた数値解析により得られた破過曲線を、試験結果とフィッティングすることにより、亀裂部の物質移行開口幅ならびに分散係数（分散長）を求めた。

解析メッシュ（図4.4-16）は、5cm×5cmの正方形断面の中心に、平板亀裂を配置し、亀裂面を挟んで対称としたものである。流れ方向である高さは、分散長よりも十分長くするため、250cmとした。亀裂面は、面要素でモデル化した。境界条件に関しては、今回の試料が、昨年度試料よりもマトリクス部の透水性が2オーダー程度高いことから、昨年度とは異なり、試料上下面のスリット（5mm×30mm）を考慮した条件を与えた。すなわち、昨年度は、試料上下面を水頭固定境界としたが、今回は、試料上下面のスリットのみを水頭固定境界とした。上下面のスリット以外の部分および試料側面は不透水境界とした。ここで、試験条件が定流量条件にも関わらず、上面を水頭固定としたのは、マトリクス部と亀裂部に流れる流量比が未知であるため、解析上、流量を固定できないためである。今回は、試験時の注入圧力の安定値から動水勾配を設定し、下面（上流側）水頭を設定した。

表 4.4-7 解析入力条件一覧

試験ケース	流量 Q [cc/min]	亀裂透水量 係数 T <sub>f</sub> [m <sup>2</sup> /s]	マトリクス部 透水係数 K <sub>m</sub> [m/s]	マトリクス部 実効拡散係数 D <sub>m</sub> [m <sup>2</sup> /s]	マトリクス部 有効空隙率 n [%]	分配係数 K <sub>d</sub>
6-2f 0.8MPa	0.031	7.65 × 10 <sup>-11</sup>	5 × 10 <sup>-10</sup>	5.0 × 10 <sup>-10</sup>	60	0
6-2f 1.2MPa	0.031	4.87 × 10 <sup>-11</sup>	5 × 10 <sup>-10</sup>	5.0 × 10 <sup>-10</sup>	60	0
6-2f 1.6MPa	0.032	1.74 × 10 <sup>-11</sup>	5 × 10 <sup>-10</sup>	5.0 × 10 <sup>-10</sup>	60	0
6-4f 1.9MPa	0.035	3.84 × 10 <sup>-11</sup>	1.5 × 10 <sup>-10</sup>	2.3 × 10 <sup>-10</sup>	54	0
設定根拠	<ul style="list-style-type: none"> <li>試験条件より設定</li> <li>注入期間中の平均値</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>透水試験結果より設定</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>透水試験結果より設定</li> <li>各試料の平均的な値を採用</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>拡散試験結果より設定</li> <li>各試料の平均的な値を採用</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>基本物性試験結果より設定</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>拡散試験結果から0と仮定</li> </ul>



上下面スリット部：水頭固定境界、側面：不透水境界

図 4.4- 16 トレーサー試験の解析条件



## (6) 解析結果の考察

トレーサー試験の解析結果の一例を図 4.4-17 に示す。解析結果により、実験結果に見られるトレーサー破過曲線ならびに回収率曲線が良好に再現されていることが分かる。解析と実験結果のフィッティングから求めた物質移行開口幅と分散長を表 4.4-8 に示す。

## ①分散長

分散長については、6-2f 試料で封圧を変えた全てのケースにおいて  $1.0 \times 10^{-3}$  (m) が得られた。また、6-4f 試料については、 $3.5 \times 10^{-2}$  (m) が得られた。これらの結果を既往の実験結果 (図 4.4-18 : 新藤他、1995) および昨年度試験結果と比較すると、6-4f 試料がやや大きめの値を示しているが、ほぼ同一のトレンド上にあり、従来から指摘されている分散長とスケールとの関係が、当試料においても同様の回帰直線により表せる可能性が示された。

## ②物質移行開口幅

物質移行開口幅として 0.0047~0.0070mm が得られた。図 4.4-19 に物質移行開口幅と透水係数から次式の三乗則により逆算した水理開口幅の関係を示す。

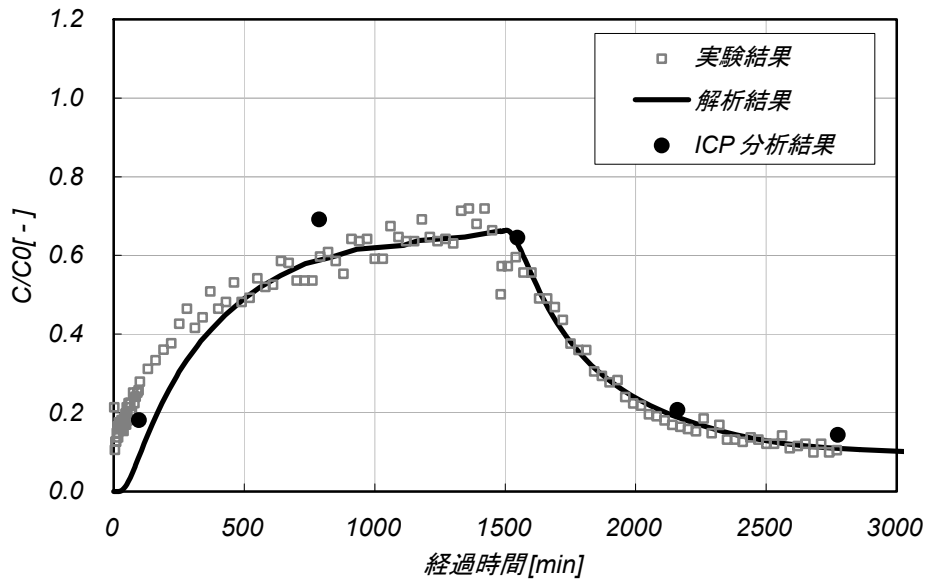
$$T = \frac{\rho g}{12\mu} e_h^3 \quad \dots (4.4-1)$$

ここに、 $T$  : 透水量係数 ( $\text{m}^2/\text{s}$ )、 $\rho$  : 水の密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )、 $\mu$  : 粘性係数 ( $\text{kgf} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ )、 $e_h$  : 水理開口幅 (m) である。

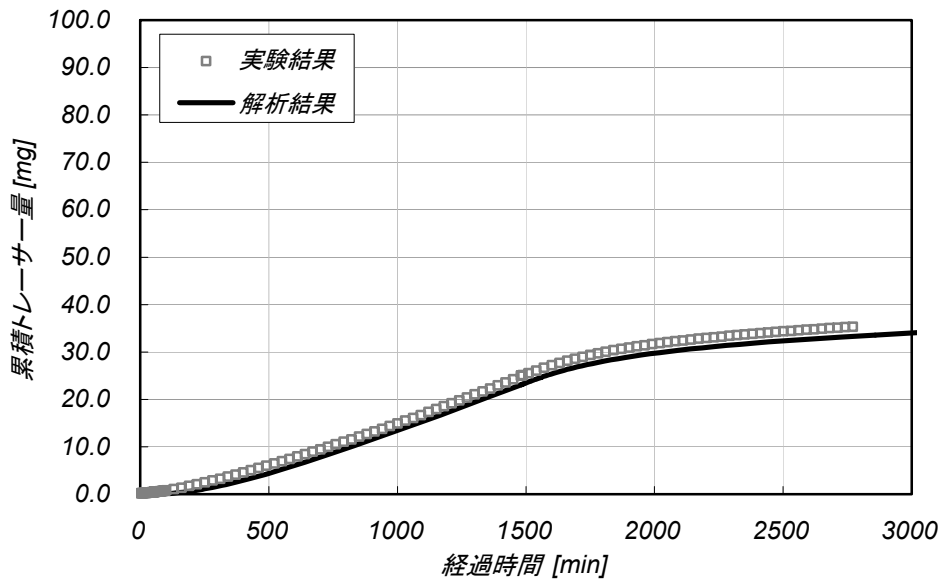
一般に、透水性に寄与する水理開口幅は、亀裂幅の狭いところの効果が卓越するのに対し、物質移行開口幅は、平均的な開口幅の影響を大きく受けるため、物質移行開口幅の方が水理開口幅よりも数倍以上大きくなることが報告されている。今回の結果では物質移行開口幅/水理開口幅比は、最大で 1.9 程度であり、あまり大きな差がない。これは、亀裂が十分に密着しており、開口幅の面内不均一性が低かったためと推察される。

また、図 4.4-20 に示す、透水量係数と物質移行開口幅の関係を見ると、非常に緩やかではあるが、正の相関が見られるのが分かる。

花崗岩サイト (釜石鉱山原位置試験場) において、原位置スケールの亀裂に対して、物質移行開口幅  $e$  と透水量係数  $T$  の間に次の関係 :  $e = 2\sqrt{T}$  が示されている (Shimo 他、1999)。今回の試験結果は、この傾向とも整合的である (図 4.4-21)。



(a) トレーサー濃度



(b) 累積トレーサー量

図 4.4- 17 トレーサー試験の解析結果 (試料名 : 6-2f、封圧 : 0.8Mpa)

表 4.4- 8 トレーサー試験解析結果一覧

試験ケース		マトリクス部 流量 $q_m$ (m <sup>3</sup> /s)	亀裂部 流量 $q_f$ (m <sup>3</sup> /s)	亀裂内 実流速 $v$ (m/s)	水理 開口幅 $e_H$ (m)	物質移行 開口幅 $e_T$ (m)	分散長 $\alpha$ (m)
H15年度	6-2f 0.8MPa	2.66E-10	2.51E-10	1.77E-03	4.72E-06	4.72E-06	0.0010
	6-2f 1.2MPa	2.94E-10	2.23E-10	1.83E-03	4.06E-06	4.06E-06	0.0010
	6-2f 1.6MPa	3.75E-10	1.50E-10	1.73E-03	2.88E-06	2.88E-06	0.0010
	6-4f	2.74E-10	3.09E-10	1.47E-03	3.75E-06	7.00E-06	0.0350
H14年度	2-1f③	-	4.92E-10	9.83E-04	6.69E-06	1.00E-05	0.0015
	3-2f①	-	5.33E-10	1.52E-03	5.83E-06	7.00E-06	0.0015
	3-2f②	-	5.25E-10	1.31E-03	5.05E-06	8.00E-06	0.0015
	3-2f③	-	5.33E-10	1.33E-03	4.34E-06	8.00E-06	0.0015
	3-2f④	-	5.42E-10	1.35E-03	3.93E-06	8.00E-06	0.0015
	4-1f③	-	5.75E-10	8.21E-04	8.19E-06	1.40E-05	0.0015

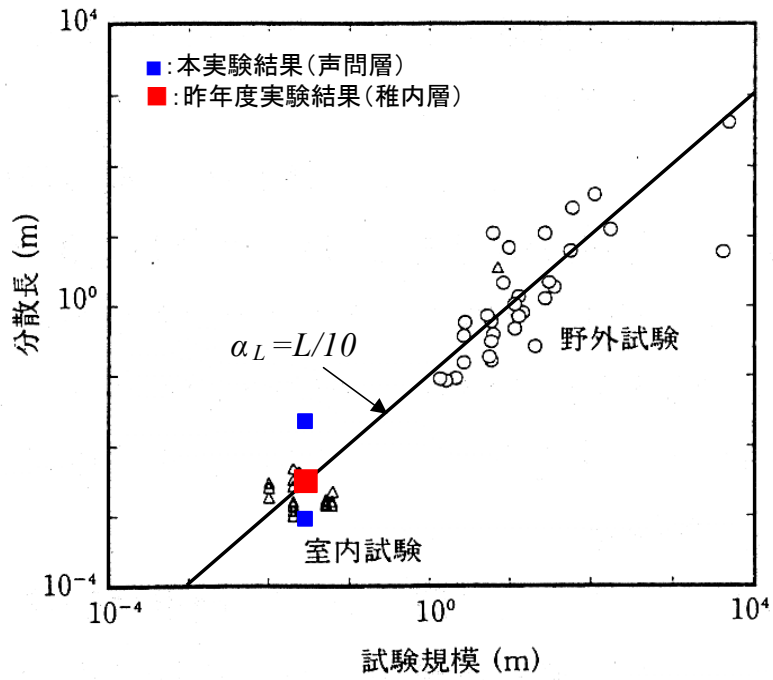


図 4.4- 18 分散長と試験スケールの関係 (既往データとの比較)

(新藤他、1995)

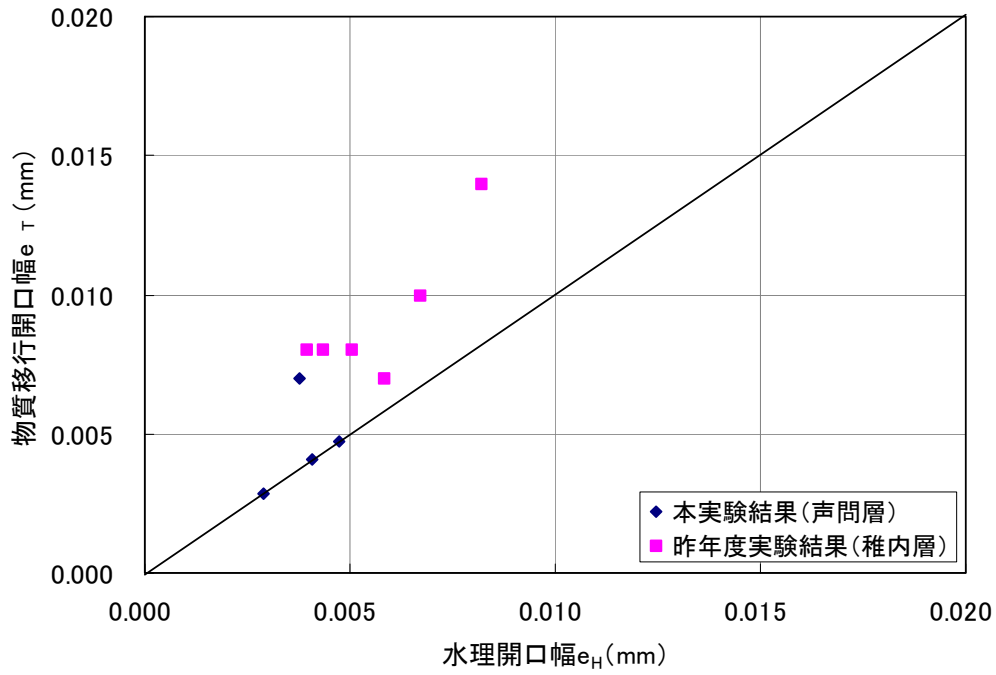


図 4.4- 19 物質移行開口幅と水理開口幅の関係

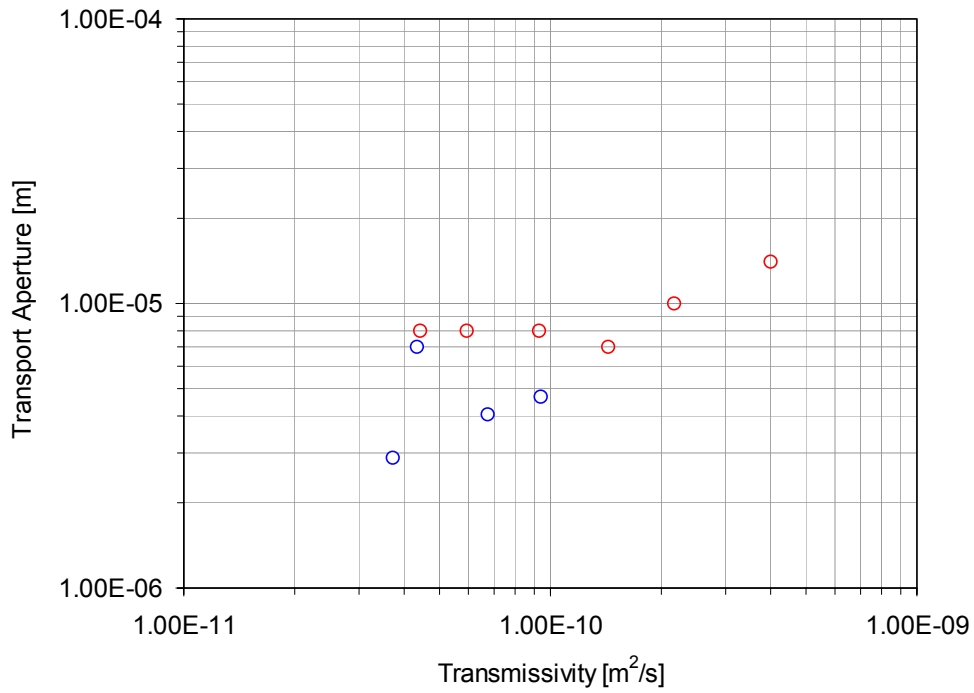


図 4.4- 20 透水量係数と物質移行開口幅の関係

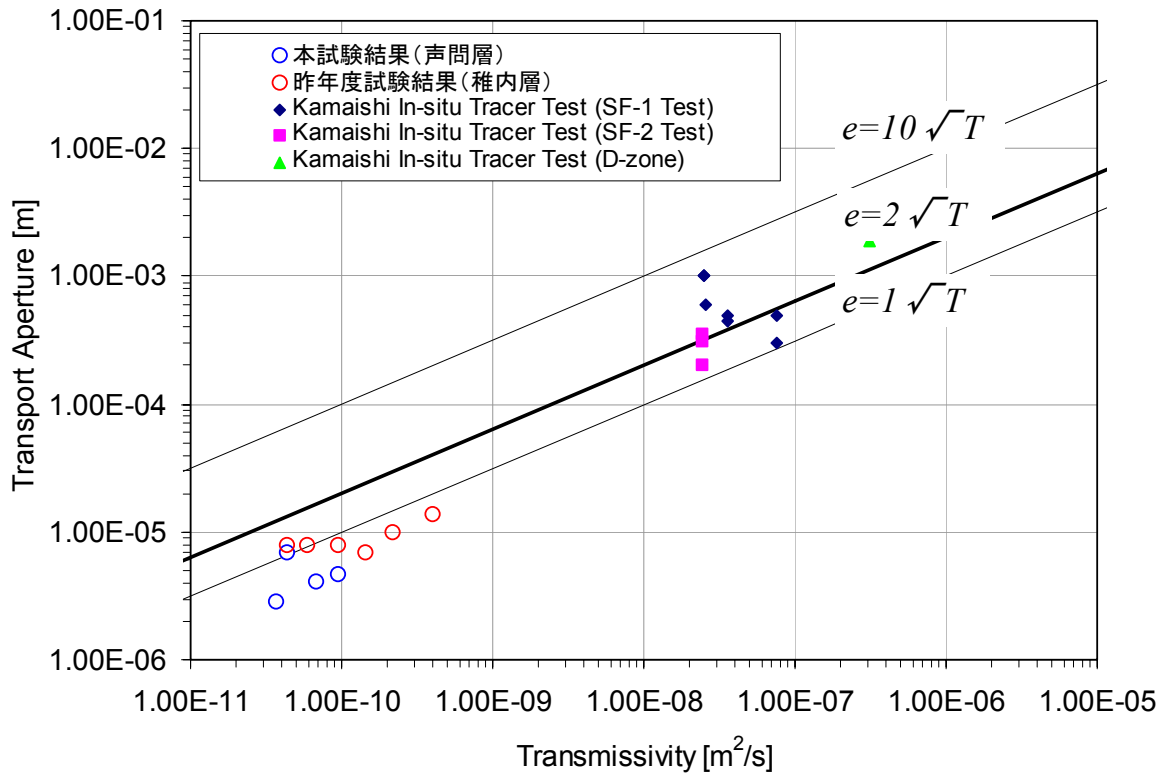


図 4.4- 21 透水量係数と物質移行開口幅の関係 (釜石原位置試験データとの比較)

(Shimo 他、1999)

#### 4.4.3 X線 CT 測定

ここでは、本研究で対象としている堆積岩において、試料内部の拡散現象を視覚的に確認することを目的として、拡散試験中に X 線 CT 撮影を行った。なお撮影は、熊本大学所有の産業用 X 線 CT スキャナを用いて行った。

##### (1) 試料

試料は、H14 年度に採取した稚内層の泥岩試料（試料名：3-1i）を用いた。測定に用いた試料の基本的な物性値を以下に示す。

- (a) 試料名：3-1i（稚内層泥岩、JNC 幌延 HDB-4 孔の深度 GL-300m 付近より採取）
- (b) 透水係数： $5 \times 10^{-12}$  (m/s)（トランジェントパルス透水試験法により別途測定）
- (c) 実効拡散係数： $2.55 \times 10^{-11}$  (m<sup>2</sup>/s)（同深度より採取した試料(3-4i)の H14 年度試験結果）
- (d) 有効空隙率：38.5（%）（同深度より採取した試料(3-3i)の H14 年度試験結果）
- (e) 乾燥密度： $1.526$  (g/cm<sup>3</sup>)（同深度より採取した試料(3-3i)の H14 年度試験結果）

また、X 線 CT スキャナの解像度を考慮して、試料は、通常の透過拡散法による拡散試験で用いられる直径 30mm、厚さ 5mm の円盤状試料よりも、撮影断面がより大きくなるように、厚さ 40mm とした。試験には、試料の周囲をエポキシ系樹脂（レジン）にて被覆し、直径 50mm、厚さ 40mm としたものをを用いた（図 4.4-22）。なお、供試体の作成中は試料をなるべく乾燥させないように注意を払い、供試体作成後は速やかに試料脱気を行った。

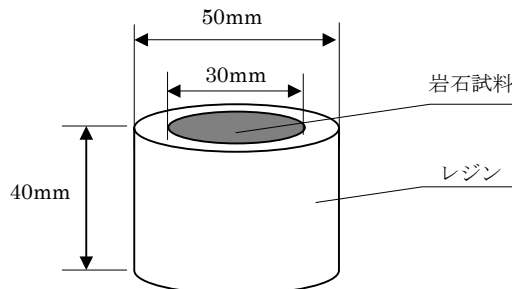


図 4.4-22 測定試料

##### (2) 試験方法

試験に用いた拡散試験装置を図 4.4-23、写真 4.4-1 に示す。拡散試験装置は、基本的には 4.4.1 節の拡散試験で用いた拡散セル装置を用いたが、撮影時の X 線の減衰を防ぐため、ボルトやナットなどの金属製の部材を全てアクリル製のものに取り替えて使用した。以下に測定手順を示す。

##### ① 供試体のセット

作成した供試体をアクリル製の拡散セル装置に、2つのセルで挟み込むようにセットした。

##### ② 供試体の脱気

供試体セット後、両セルに脱イオン水を入れ真空槽にて脱気を行った。

##### ③ X 線 CT スキャナへのセット

供試体の脱気を完了後、拡散試験装置を X 線 CT スキャナにセットした（写真 4.4-2）。X 線 CT

スキャナへのセットは、撮影断面を図 4.4-23 中に示すように、試料中央の水平断面となるように行った。また、試験中に拡散試験装置の位置が変わらないように、ターンテーブル上に厳重に固定した。

#### ④ 拡散試験の開始

拡散試験装置を X 線 CT スキャナにセットした後、トレーサーセル側の脱イオン水をトレーサー溶液（ヨウ化カリウム水溶液）と交換し、拡散試験を開始した。この時、動水勾配による溶液の移流が発生しないよう、トレーサー溶液および脱イオン水の容量はともに 50ml とし、両セルの水位を同じにした。

#### ⑤ X 線 CT 撮影

拡散試験開始後、直ちに試験初期の X 線 CT 撮影を行い、その後、所定の時間間隔で撮影を行った。拡散現象の可視化は、各時間の撮影で得られた CT 値の分布と、試験初期における CT 値の分布の差分をとることにより行った。

#### (3) トレーサー溶液

トレーサー溶液にはヨウ化カリウム (KI) 水溶液を用いた。X 線 CT 測定は、測定で得られる CT 値が、被測定物の密度にほぼ比例することを利用したものであり、今回の拡散試験においては、試験前の試料空隙内に満たされた間隙水の密度 ( $1.0 \text{ g/cm}^3$ ) と、試験開始後から分子拡散により試料の空隙を通して広がったトレーサー溶液の密度の差から、拡散現象を可視化することになる。したがって、現象のより明瞭な可視化を行うためには、使用するトレーサー溶液の密度は、水の密度  $1.0 \text{ (g/cm}^3)$  に対して十分に大きくする必要がある。そこで、今回の試験では、熊本大学の過去の試験実績も考慮して、使用するトレーサー溶液の濃度をヨウ化カリウム (KI) 濃度で 377 (g/L) (密度:  $1.256 \text{ g/L}$ ) とした。表 4.4-9 に試験条件の一覧を示す。

表 4.4-9 試験条件一覧

項 目	実験条件
トレーサーセル側	ヨウ化カリウム水溶液
	・濃度: 377 (g/L) ・容量: 50 (ml)
測定セル側	脱イオン水
	・容量: 50 (ml)
温度	室温 ( $22^{\circ}\text{C} \sim 25^{\circ}\text{C}$ )

#### (4) 試験結果

X 線 CT 撮影で得られた原画像を図 4.4-24 に示す。各画像の上部はトレーサーセル側、下部は測定セル側を示している。また、画像中の比較的白い部分がトレーサー濃度の高い部分を示している。これらの図より、濃度の高い白い領域が、時間の経過とともに、ほぼ平面的に均一に進行しているのを明瞭に読み取ることができる。このことから、X 線 CT スキャナを用いて拡散現象を可視化することで、岩石試料内の拡散現象を定性的に確認することが可能であることが分かった。

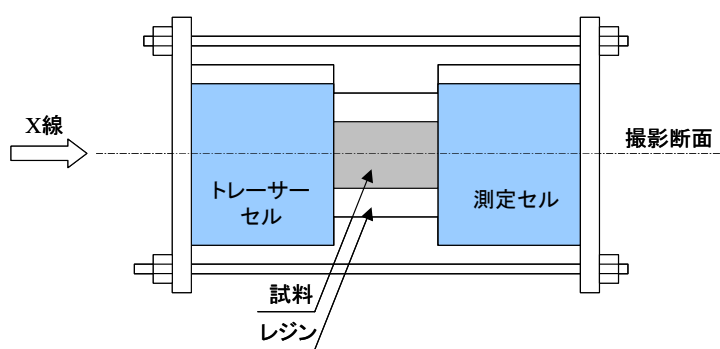


図 4.4- 23 X 線 CT 撮影用拡散試験装置概要



写真 4.4- 1 X 線 CT 撮影用拡散試験装置

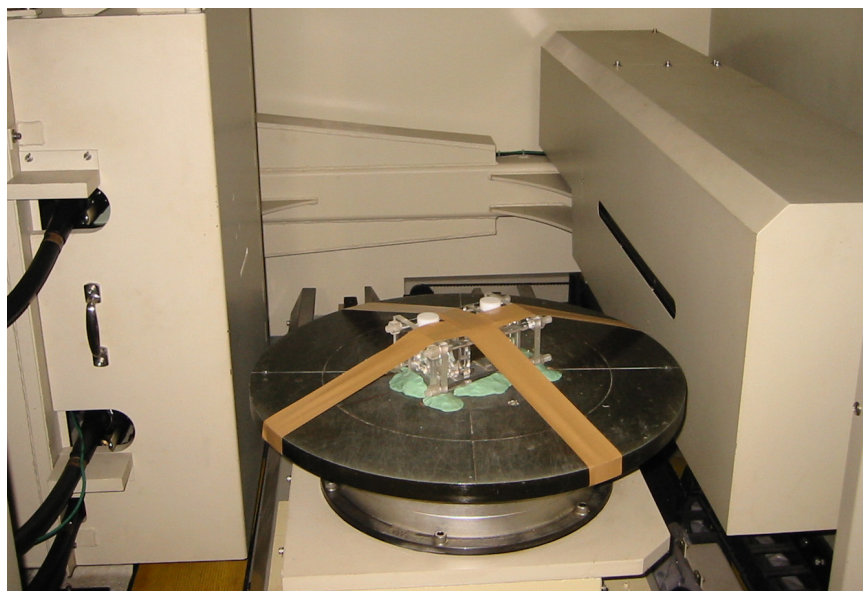


写真 4.4- 2 X 線 CT スキャナ装置セット状況



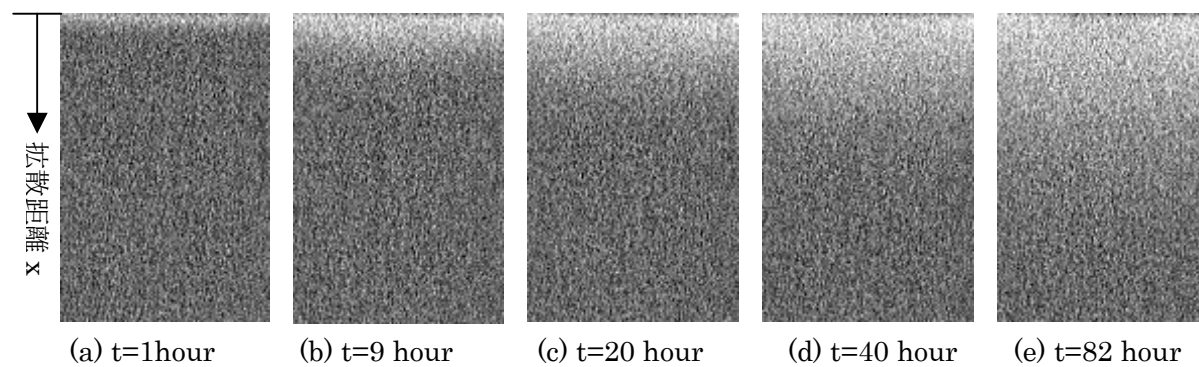


図 4.4- 24 拡散試験中の X 線 CT 原画像

## 5. ブロック試料を対象とした透水試験／トレーサ試験

### 5.1 ブロック試料の採取、整形

#### 5.1.1 ブロック試料の採取

ブロック試料の採取は、幌延地区の露頭において、仕様の15cmスケール以上のブロックに整形可能な大きさで、自然の単一亀裂を含み、風化のあまり進んでいないより新鮮な試料を採取する方針で実施した。その結果、声問層の露頭（諏訪沢林道）において3個の岩塊を採取した。採取試料の一覧および試料の写真の一例を表5.1-1および写真5.1-1に示す。

表 5.1-1 ブロック試料採取一覧

試料名	採取日	採取場所	地質	亀裂の有無
B-1	2003/10/3	諏訪沢林道の露頭	声問層	有
B-2	2003/10/10			無
B-3	2003/10/10			無



写真 5.1-1 採取試料全景（試料名：B-2）

### 5.1.2 ブロック試料の整形

最初に亀裂を有するB-1試料について整形を行った。その結果、試料表面に見えていた亀裂は、岩体の中央部をとおらず、岩体の周囲を薄皮状に覆った風化部分との境目になっていたことが分かった。したがって、亀裂を有するB-1試料が亀裂試料として使用できないため、ブロック試料の整形には、以下の2通りの方法が考えられる。

- (1) 平行平板試料の作成
- (2) 人口亀裂試料の作成

しかし、今回のブロック試料を対象とした透水/トレーサー試験では、既存の試験法とは異なる新しい試験方法を適用するため、用いる試料は試料内部の亀裂の形状や開口幅等の不確定な要素をできるだけ除いておくことが望ましい。そこで、今回の試験では、(1)平行平板のみの試験を行うこととする。

平行平板試料の概要について図5.1-1に示す。ブロック試料の寸法は、流れ方向（亀裂の方向）に15cm以上、断面の寸法を10cm×10cm程度の大きさに整形する。

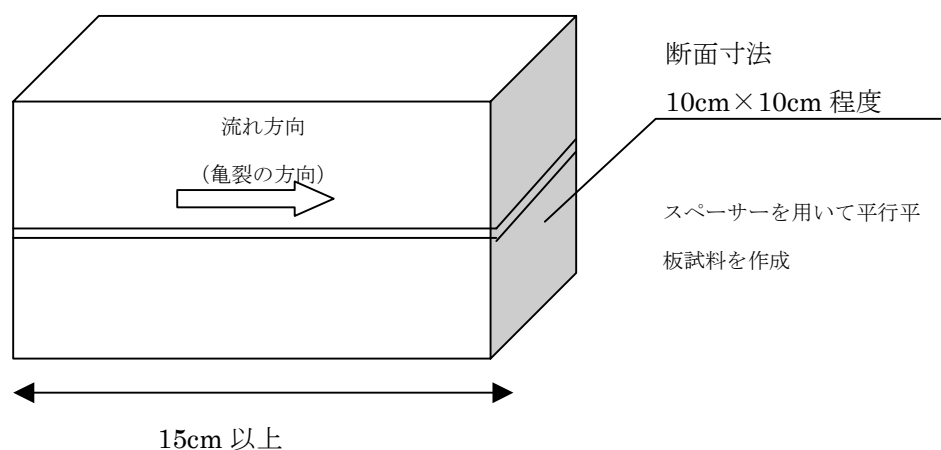


図 5.1-1 平行平板試料の作成

## 5.2 ブロック試料の基本物性試験および分析

### 5.2.1 分析項目

コア試料と同様に、透水/トレーサー試験に使用するブロック試料を対象とし、基本的な物性値（比重、有効空隙率、弾性波速度、一軸圧縮強度）の測定ならびに試料分析を行った。

測定ならびに分析の実施項目、数量を表 5.2-1 に示す。

表 5.2-1 試料分析項目一覧

試験項目		数量	備考
基本物性試験	比重試験	1試料	透水/トレーサー試験に使用した試料について実施
	含水比試験		
	飽和度		
	有効空隙率		
	吸水率		
	弾性波速度		
	一軸圧縮強度		
X線分析	粉末X線分析		
空隙分布測定	水銀圧入法		

### 5.2.2 基本物性試験

基本物性値の測定結果を表 5.2-2 に示す。測定は、透水/トレーサー試験に使用した試料について行った。基本物性試験用の試料は、透水/トレーサー試験用試料の整形後に残ったごく近傍の岩片から採取した。

表 5.2-2 ブロック試料基本物性試験結果一覧

試料名称	比重(g/cm <sup>3</sup> )			含水比(-)	飽和度(%)	有効空隙率(%)	吸水率(%)	弾性波速度(km/s)	
	自然状態	強制乾燥状態	強制湿潤状態					P波速度	S波速度
B-2	1.533	0.962	1.564	0.594	98.09	58.5	59.7	1.15	0.57

※ 強制乾燥状態：供試体を 110℃の乾燥炉内で、24 時間以上乾燥させた状態。

※ 強制湿潤状態：供試体を水中につけ、10 日間以上真空引きした状態。

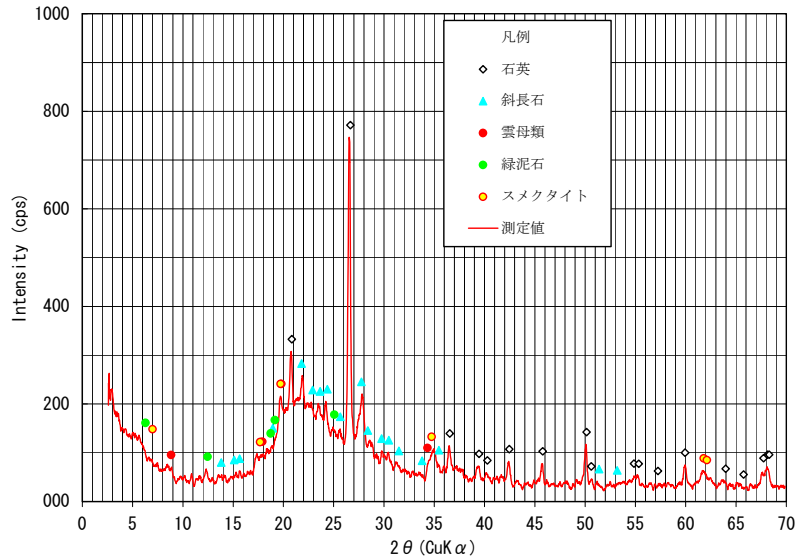
### 5.2.3 X線分析

対象試料である珪藻質泥岩の続成作用の変化を調べることを目的として、不定方位法、定方位法による X 線分析を行った。分析は、透水/トレーサー試験用の試料を整形したごく近傍から岩片を採取して行った。

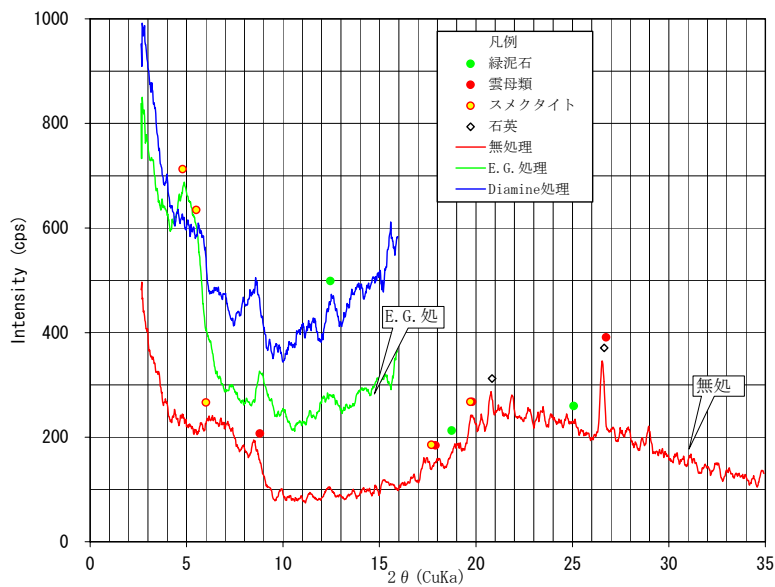
X 線解析チャートを図 5.2-1 に、また、各鉱物のおおよその含有量を推定した結果の一覧を表 5.2-3 示す。図、表より各鉱物の同定結果としては、4.2 節で実施したコア試料における声間層試料とほぼ同等の結果が得られていることが分かる。したがって、今回の試料は、幌延地域の珪藻質泥岩に特徴的なシリカ鉱物の変化：珪藻→オパール A→オパール CT→石英の中で、オパール A のゾーンに区分されることが分かった。

表 5.2-3 X線分析結果一覧（ブロック試料：B-1）

順番	試料名	シリカ鉱物				長石			沸石		粘土鉱物			備考		
		石英	非晶質？オパールA	オパールCT	トリジマイト	クリストバライト	カリ長石	斜長石	菱鉄鉱？	黄鉄鉱	石膏	濁沸石	斜ブチロール沸石		スメクタイト	緑泥石
13	B-2	△	○				△						+	+	+	



(a) 不定方位法



(b) 定方位法

図 5.2-1 X線分析結果（声問層：6-2f）

### 5.2.4 空隙分布測定

試料の空隙分布を測定することを目的として、水銀圧入法による空隙の細孔径分布測定を行った。測定は、透水/トレーサー試験用試料を整形したごく近傍から岩片を採取して行った。

図 5.2-2 に、試料の細孔径と累積有効空隙率の関係を示す。また、図 5.2-3 にコア試料も含めた全測定結果を同一グラフにプロットしたものを示す。これらの図より、今回の試料は、コア試料の声間層試料と同等の細孔径分布を有しており、全体の有効空隙率としては、声間層のコア試料 6-2 と 6-4 のほぼ中間の値を有することが分かった。表 5.2-4 に水銀圧入試験結果の一覧を、また、図に基本物性試験で得られた有効空隙率と水銀圧入試験で得られた有効空隙率の関係を示す。図より、コア試料と同様に、基本物性試験結果よりも、水銀圧入試験結果の方が、約 8 (%) 程度低い有効空隙率が得られていることが分かる。これは、空隙構造が微細であるため、全ての空隙に水銀が侵入できなかったためではないかと考えられる。測定に用いた水銀ポロシメータは、測定機器の性能上 0.003 ( $\mu\text{m}$ ) 以下の細孔径は測定することができない。そのため、測定結果としては、0.003 ( $\mu\text{m}$ ) 以下の細孔径を切り捨てられたデータが得られている。しかし、実際は、より微細な空隙も存在すると考えられる。

表 5.2-4 水銀圧入試験結果 (ブロック試料 : B-2)

試料名	空隙率 (%)	累積細孔体積 (mL/g)	累積細孔比表面積 ( $\text{m}^2/\text{g}$ )	嵩密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	真密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	試料重量 (g)	ファイル名
B-2	50.8	0.495	27.5	1.026	2.084	0.581	09-331

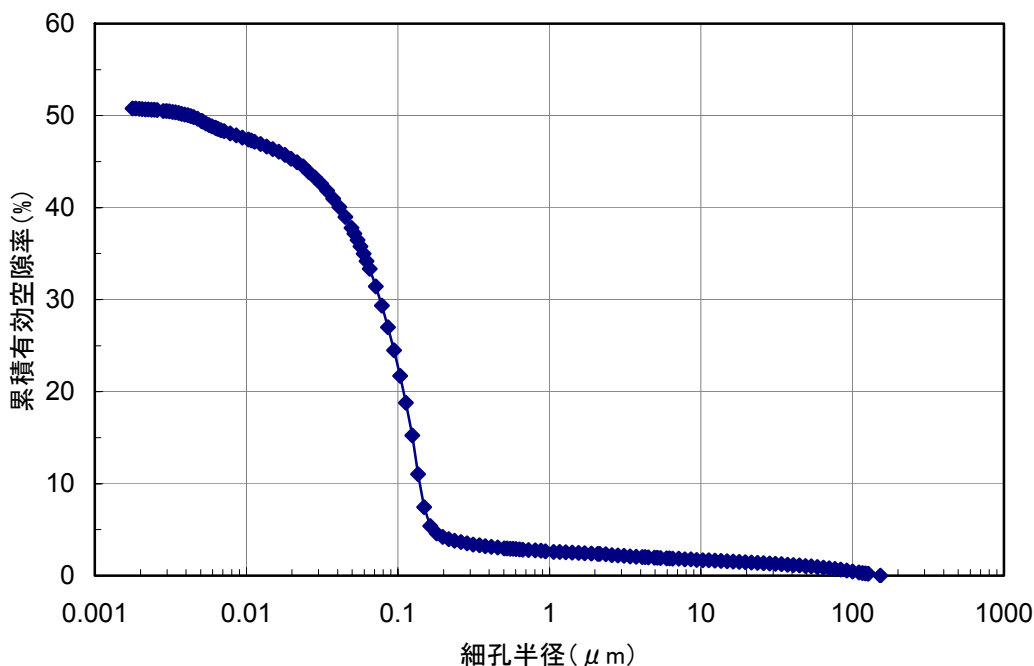


図 5.2-2 水銀圧入法による細孔径分布測定結果 (ブロック試料 : B-2)

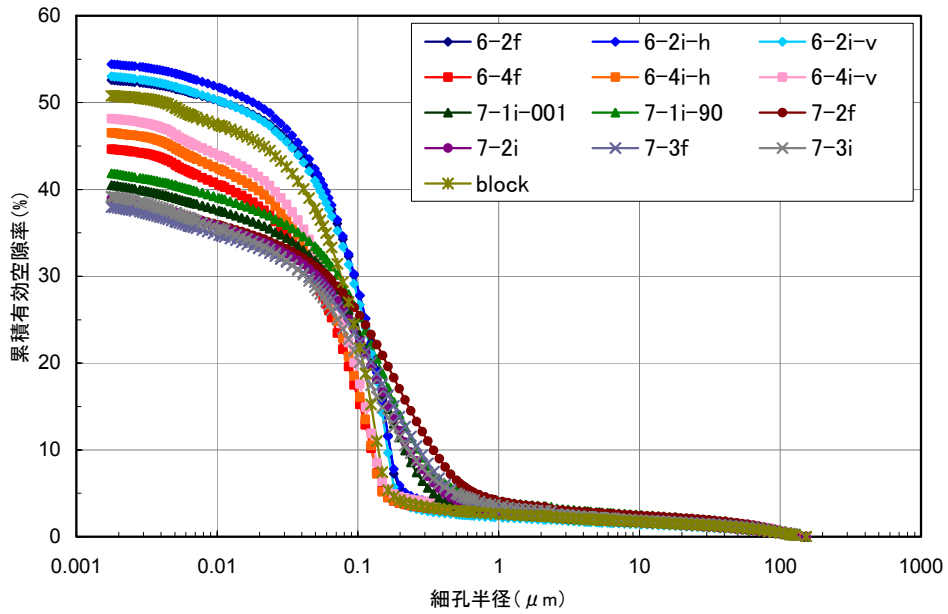


図 5.2-3 水銀圧入法による細孔径分布測定結果（全コア試料およびブロック試料）

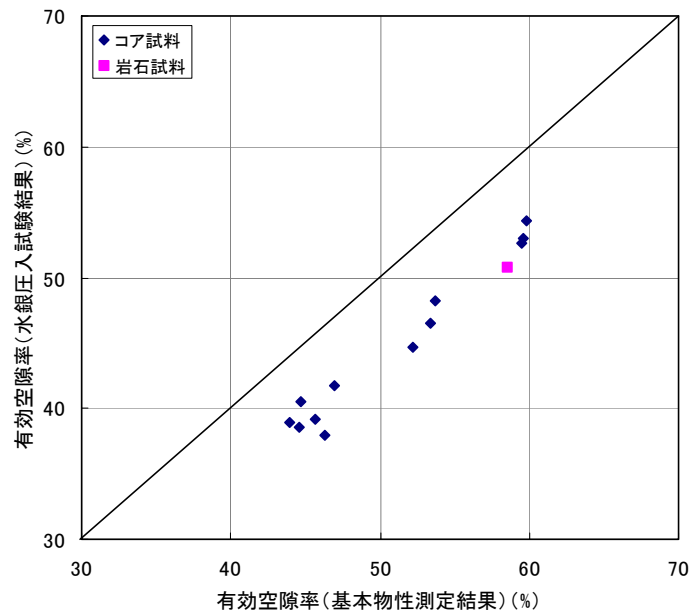


図 5.2-4 基本物性試験と水銀圧入試験の有効空隙率測定結果の比較

（コア試料およびブロック試料）

### 5.3 ブロック試料を対象とした透水試験

ブロック試料については、マトリクス部の透水性の把握を目的とした、インタクトコア試料を用いたトランジェントパルス透水試験と、亀裂部の透水量係数の把握を目的とした、亀裂試料を用いた定流量透水試験を実施した。以下にそれぞれについて説明する。

#### 5.3.1 トランジェントパルス透水試験

##### (1) 試験条件

トランジェントパルス透水試験は、トレーサー試験用に整形したブロック試料の近傍より、直径 50mm×高さ 50mm にコアリングした試料を用いて行った。試験装置、手順等は、先に述べたコア試料を対象とした透水試験のときと同様である。封圧、間隙水圧等の試験条件については、今回対象とする試料が、露頭から得られたものであることより、封圧、間隙水圧については、試験が可能な範囲で、最小の値を設定した。

温度 : 室温  
封圧 : 0.3 (MPa)  
間隙水圧 : 0.1 (MPa)

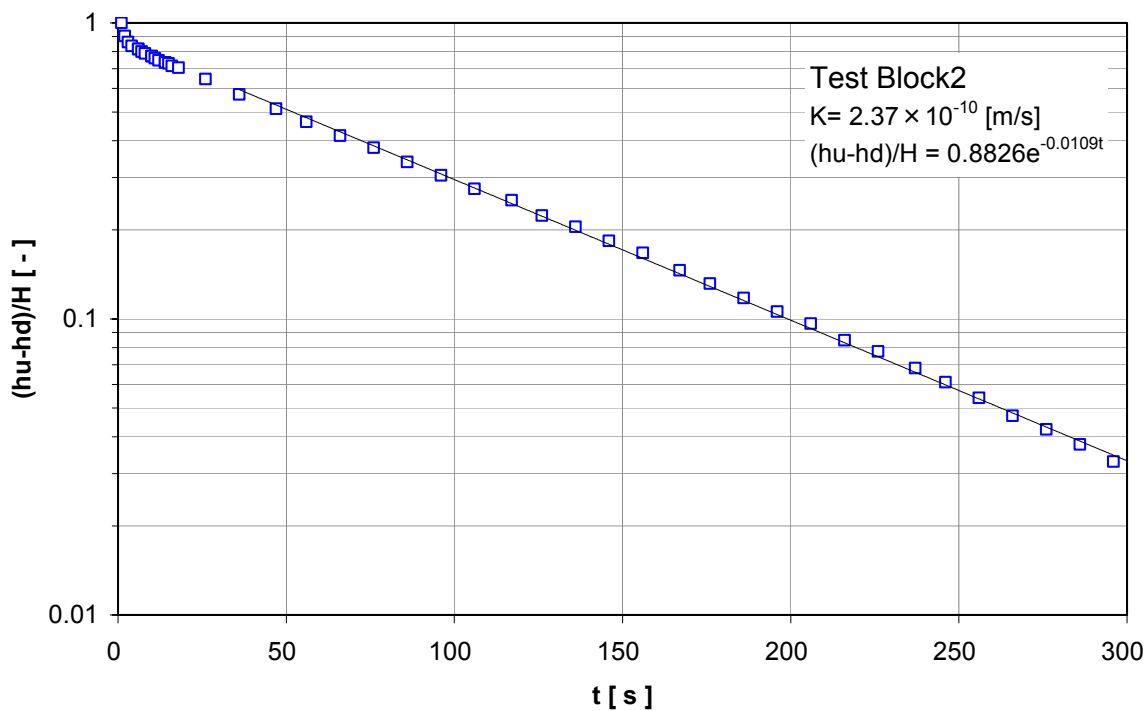
##### (2) 試験結果

トランジェントパルス透水試験の結果を、図 5.3-1 ならびに表 5.3-1 に示す。試験結果から、当該ブロック試料の透水性は、本年度実施した声問層、勇知層のコア試料の結果とほぼ同等の値を示すことが分かった。

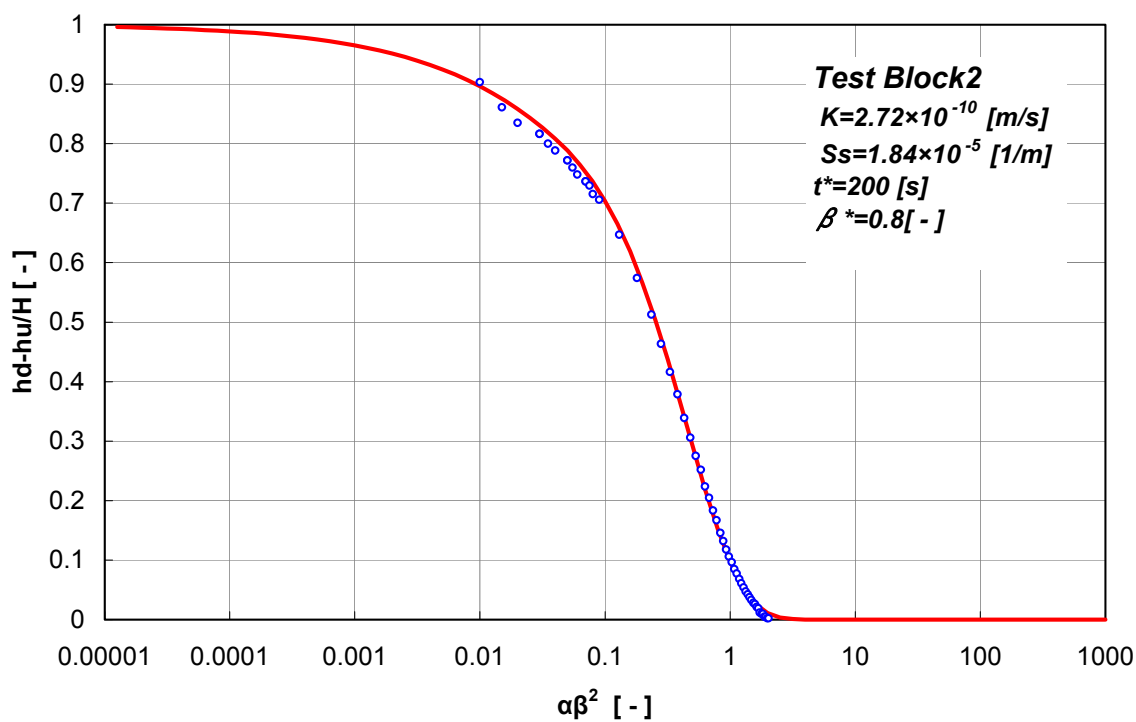
表 5.3- 1 トランジェントパルス透水試験結果一覧（声問層、勇知層）

採取場所	地層名	試料名	採取深度 (m)	封圧 [MPa]		間隙水圧 [MPa]	パルス圧 [MPa]	透水係数 (m/s)		比貯留係数 (1/m)
				軸圧	側圧			brace法	差圧を用いたhsieh法	
宮の沢林道	声問層	B-2	-	0.30	0.30	0.10	0.05	2.37E-10	2.72E-10	1.84E-05





(a) Brace 法



(b) 差圧を用いた Hsieh 法

図 5.3- 1 トランジェントパルス透水試験結果（ブロック試料 B-2）

### 5.3.2 定流量透水試験

#### (1) 試験方法

定流量透水試験は、後出のブロック試料用セル型トレーサー試験装置を用いて実施した。試験装置の概略を図 5.3-2 に示す。本試験では、通常の透水試験を行うと同時に、試料そのものの持つヨウ化物イオン量を把握する目的で、装置下流側にてイオンメーターによるヨウ化物イオン濃度の測定を行っている。そのため、使用する水は、脱イオン水とした。

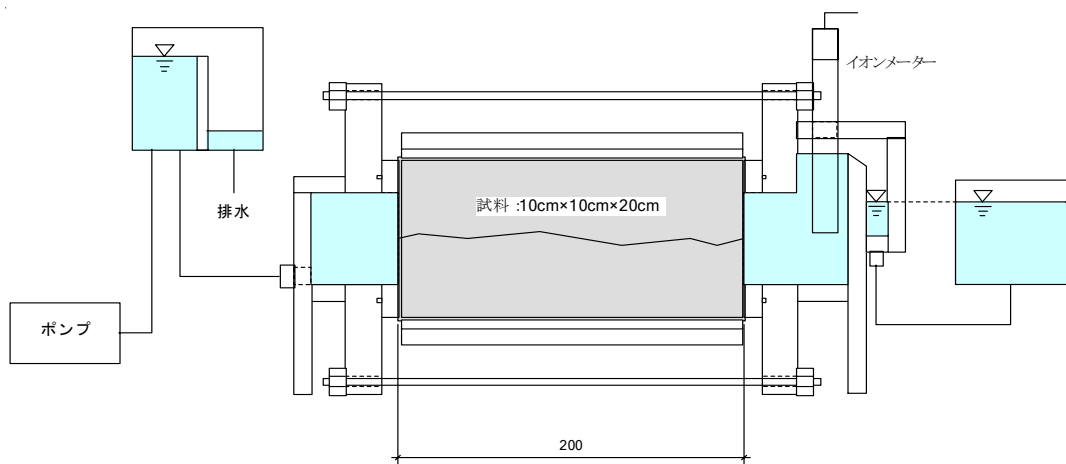


図 5.3-2 定流量透水試験装置概要

#### (2) 試験結果

定流量透水試験では、コア試料を対象とした試験の時と同様、亀裂が試料の中央に位置していると仮定した場合の亀裂の透水量係数  $T(m^2/s)$  と、試料の全断面を透水すると仮定した場合の試料の透水係数  $K(m/s)$  を前述の(4.3-8)~(4.3-10)式から求めた。

表 5.3-2 に定流量透水試験結果の一覧を示す。亀裂の透水量係数は、 $9.36 \times 10^{-8} (m^2/s)$  であり、これから三乗則により求められる水理開口幅は、 $0.0505 (mm)$  であった。これは、試料に挟んだスペーサーの厚さとほぼ一致しており、試料が所定の亀裂開口幅で正確に作成されていることが確認された。また、試料全体の透水係数は、 $1.17 \times 10^{-6} (m/s)$  であった。

表 5.3-2 定流量透水試験結果一覧 (今年度試料：声問層、勇知層)

試料名	地層名	採取場所	水圧差[m]	流量 [m <sup>3</sup> /s]	亀裂の 透水量係数 [m <sup>2</sup> /s]	試料全体の 透水係数 [m/s]
B-2	声問層	宮の沢林道	0.53	1.98E-08	9.36E-08	1.17E-06

#### 5.4 ブロック試料を対象としたトレーサー試験

トレーサー試験は、コア試料と同様に、インタクト試料に対しては透過拡散法による拡散試験を、また亀裂試料に対してはトレーサー試験を実施した。以下にそれぞれについて説明する。

また、トレーサー試験に関しては、今回のブロック試料用に新たに開発した試験装置を用いて行った。試験装置は、コア試料の拡散試験で用いた拡散セル装置を応用したセル型の装置を作成した。まず、予備実験として、コアスケールでの試験装置の検証を行い、その結果をもって、ブロックスケールの試験装置を作成した。

##### 5.4.1 拡散試験

拡散試験は、ブロック試料のマトリクス部の拡散係数を把握することを目的として実施した。試料は、トレーサー試験用に整形した試料の近傍の岩片より採取した。試験方法、試験条件および解析方法等に関しては、コア試料を対象とした拡散試験時と同様である。試験結果を図 5.4-1、表 5.4-1 に示す。

実効拡散係数については、コア試料の結果と大きな差はなく、 $3.17 \times 10^{-10}$  (m<sup>2</sup>/s)の値が得られた。また、これは昨年度試料(稚内層)に比べて1オーダー程度大きな値となっている。既往の、新第三紀泥岩・凝灰岩の拡散係数値(核燃料サイクル開発機構、2000)と今回の試験結果の比較を図 5.4-2 に示す。今回得られた値は、同一有効空隙率のサンプルの中では、1 オーダー程度大きな値であることが分かる。また、吸着容量から求めた分配係数を求めると、0 に近い値となることから、当試料へのヨウ化物イオンの吸着量は非常に小さいものと考えられる。

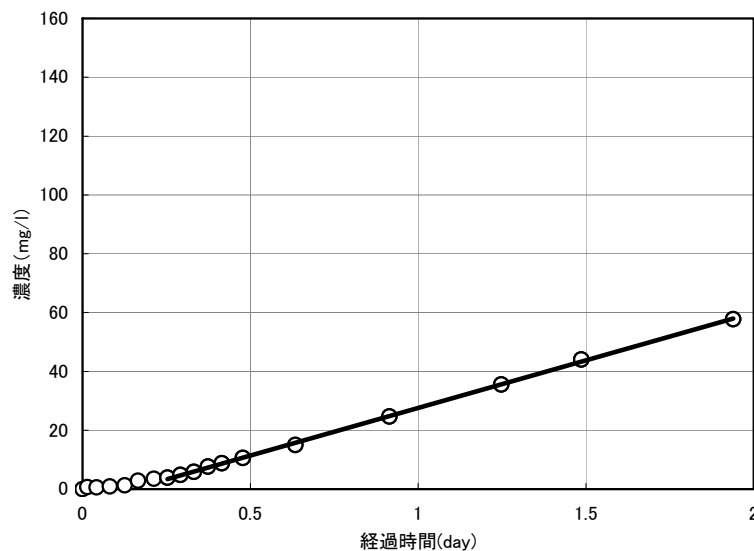


図 5.4-1 拡散試験結果 (ブロック試料)

表 5.4-1 拡散試験結果一覧（ブロック試料）

	実効拡散係数 De (m <sup>2</sup> /sec)	見かけの拡散係数 Da (m <sup>2</sup> /sec)	収着容量 α	分配係数 m <sup>3</sup> /kg	有効空隙率 ne
B-2	3.17E-10	4.91E-10	0.646	0.0001	0.583

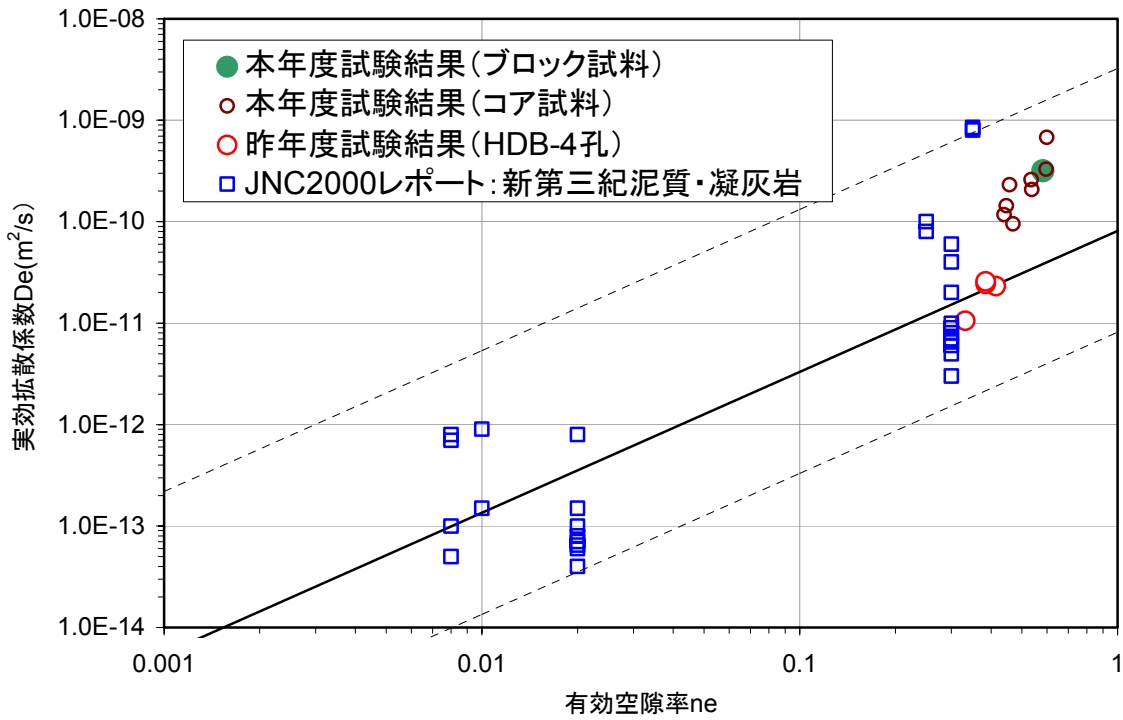


図 5.4-2 実効拡散係数と有効空隙率の比較（既往データとの比較）

(核燃料サイクル開発機構、2000)

#### 5.4.2 コア試料を対象としたセル型透水/トレーサー試験による試験装置の検証

##### (1) 試験装置および方法

試験装置の概要を図 5.4-3、写真 5.4-1 に示す。本装置は円柱状のコア試料をトレーサーセル（注入側）と測定セル（排水側）の 2 つのセルで挟み込み、トレーサーセルより一定流量でトレーサー溶液を注入し、測定セル側の溶液濃度の経時変化を測定するものである。

トレーサー溶液の注入には、超微量流量を高精度で送液することが可能なシリンジポンプを用い、測定セル側の濃度測定には、イオンメーターを用いている。なお、測定セル側溶液濃度の測定は、イオンメーターによる連続測定に加えて、1 日 3 回程度サンプリングを行い、ICP による濃度分析も行っている。

また、透水試験を実施する際には、図 5.4-3 中の注入側部分をシリンジポンプに代わって、定水頭の堰に置き換えて、定水頭透水試験を実施する。

本装置の特徴を以下に示す。

- ① 注入流量が少なくてもフラッシングの必要がない
- ② 配管内分散が生じない
- ③ 蒸発の影響を受けない

これらの特徴から、今回のようなコア試料やブロック試料などの室内試験レベルのスケールにおける試験には、非常に適していると言える。

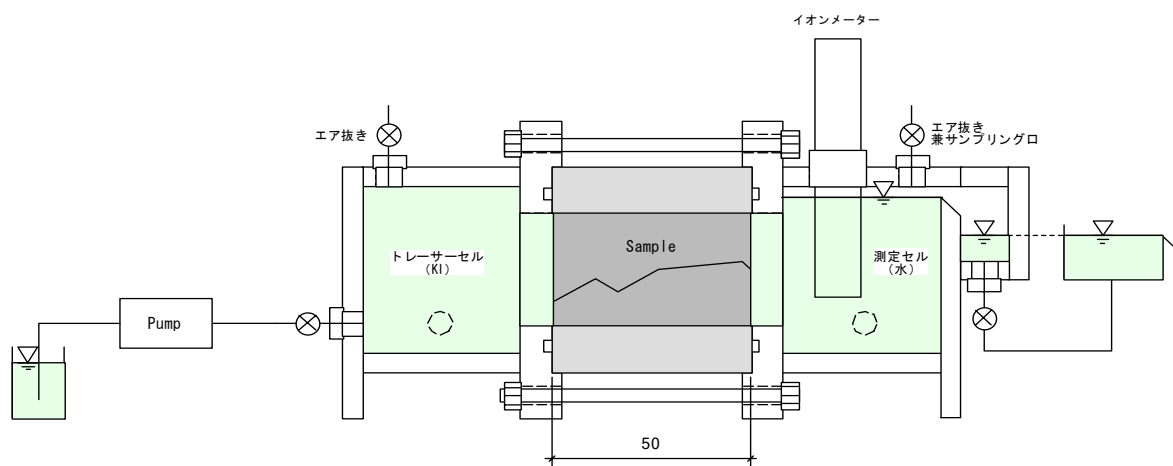


図 5.4- 3 コア試料用セル型トレーサー試験装置概要

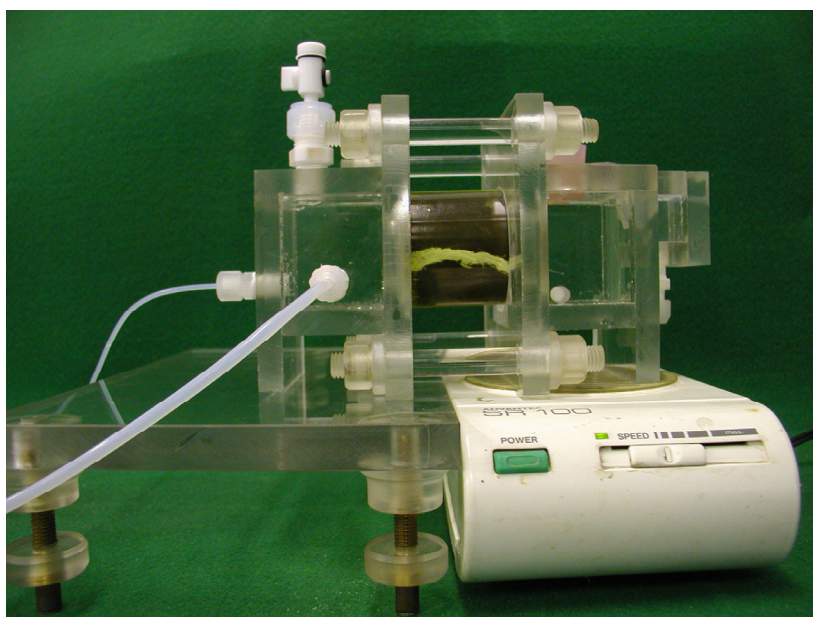


写真 5.4- 1 コア試料用セル型トレーサー装置概要

(2) アクリル製ダミー試料を用いたトレーサー予備試験

本試験装置の適用性の検討として、マトリクス拡散の生じないアクリル製のダミー試料を対象としたトレーサー試験を実施した。ダミー試料は、前節のコア試料を対象とした透水／トレーサー試験で使用したものと同様のものを用いた（Φ5cm、L=5cm、e=0.05mm）。

試験条件を表 5.4-2 に示す。試験条件として、注入するトレーサー溶液の濃度は I:500（mg/L）とし、注入流量は  $q=0.001$ （cc/min）とした。

試験結果を図 5.4-4 に示す。これらの図より、試験結果の測定値と解析結果が良く一致しており、本装置はトレーサー試験装置としての適用性を十分に満たしていることが分かった。

なお、トレーサー試験の解析については、今回の試験ではマトリクス拡散の生じないアクリル製のダミー試料を使用しているため、マトリクス拡散を考慮した解析を行う必要はない。したがって、Ogata-Banks(1961)によって求められた 1 次元移流分散方程式の理論解を用いてフィッティングを行った。解析では、試験と同じ条件を与えることにより得られた濃度上昇曲線を、試験結果とフィッティングすることで、亀裂部の物質移行開口幅、分散係数（分散長）を求めた。

表 5.4-2 セル型トレーサー試験 試験条件

	試験条件
トレーサーセル側	ヨウ化カリウム水溶液
	・濃度: I:500 (mg/L) ・注入流量 $q=0.001$ (cc/min)
測定セル側	脱イオン水
	・イオンメーターにより測定

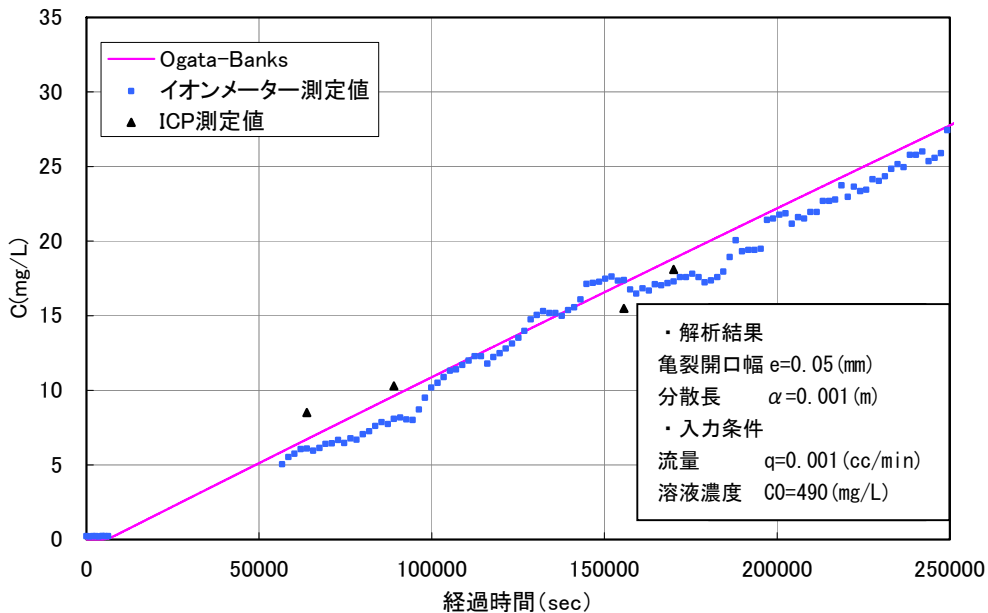


図 5.4-4 コア試料セル式トレーサー試験結果（アクリル製ダミー試料：e=0.05mm）

### 5.4.3 ブロック試料を対象としたセル型透水/トレーサー試験

コアスケールでの検討結果をもとに、ブロック試料用のセル型トレーサー試験装置を作成し、5.1.2 節で整形した平行平板試料について透水/トレーサー試験を実施した。なお、ここでも作成した装置の適用性を検討するため、アクリル製のダミー試料を用いた予備実験を実施した。

#### (1) 試験方法および手順

試験装置の概要を図 5.4-5、写真 5.4-2 に示す。装置の基本的な構成は、前節のコア試料用の装置と同じである。試験は次のような手順で行った。

##### ① 供試体の作成

供試体作成の模式図を図 5.4-6 に示す。まず、平行平板試料にスペーサー ( $t=0.05\text{mm}$ ) を挟み込み、既知量の開口幅を有するブロック試料を作成する。次に試料の両端面を除く周囲に止水のためのシリコンシーラントを塗布し、これを挟み込むようにしてアルミ板を設置する。さらに、これらを固定するために周囲をアングルと全ネジロッドにより締め付けた。試料の両端は、セルのフランジ部に取り付けられた O-リングと密着させるために、 $80\text{mm}\times 80\text{mm}$  の開口を持つ止水板を取り付け、周囲をシリコンシーラントで止水した。この状態で、水中脱気による試料の飽和を行った。

##### ② 供試体のセット

供試体のセットは、試料内部にエアが混入しないよう、装置ごと水中に沈めた状態で行った。

まず、供試体を 2 つのセルで挟み込むようにセットし、装置内を完全に水で満たした状態で、注入側、排水側の両バルブを閉じた。

##### ③ 定水頭透水試験

装置の注入側に堰をセットし、コア試料の予備試験と同様の方法で定水頭透水試験を実施した。

##### ④ トレーサー試験

透水試験終了後、注入側の堰をトレーサー試験用のシリンジポンプに付け替えた。測定セル側のバルブを閉じたまま、注入側装置内の脱イオン水をトレーサー溶液（ヨウ化カリウム水溶液）と交換し、シリンジポンプの始動と同時に出口側のバルブを開いて拡散実験を開始した。

##### ⑤ 測定セル側溶液の濃度測定およびサンプリング

コア試料のトレーサー試験の際と同様に、イオンメーターによる連続測定により、試験開始直後からの測定セル側濃度の経時変化を測定した。また、試験開始当日から 1 日 3 回程度サンプリングを  $5\text{ml}$  ずつ行い、ICP によるヨウ化物イオン濃度測定を行った。サンプリング後は同量の脱イオン水を測定セルに補充した。測定セルの脱イオン水の補充により生じる希釈の影響は、サンプリング毎の量とその濃度から補正を行った。

##### ⑥ サンプルの分析

サンプリングした溶液中に含まれるヨウ化物イオン濃度を ICP 発光分光分析(定量下限値: $0.01\text{mg/L}$ )により求めた。



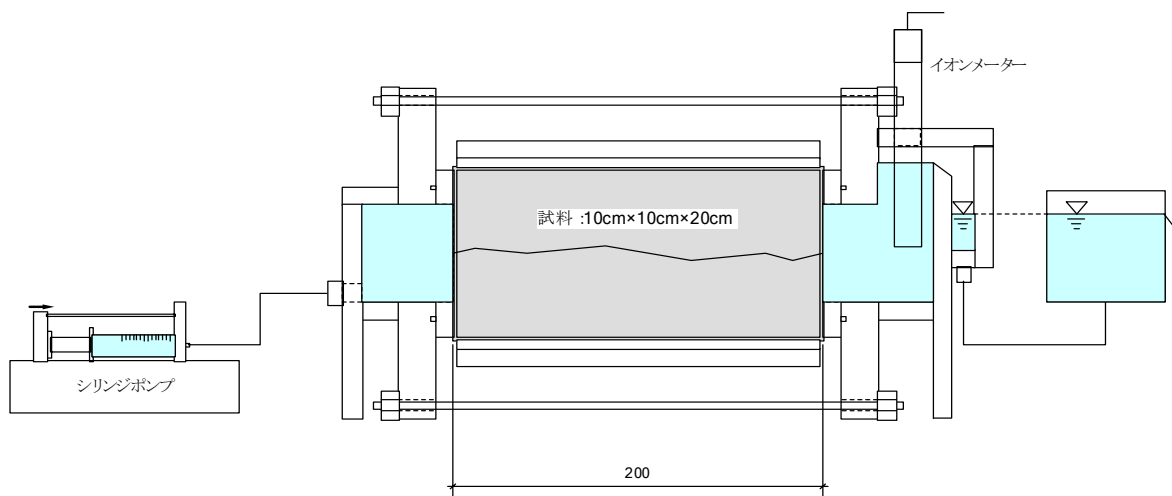


図 5.4- 5 ブロック試料用セル型トレーサー試験装置概要



写真 5.4- 2 コア試料用セル型トレーサー装置概要（アクリル製ダミー試料セット時）

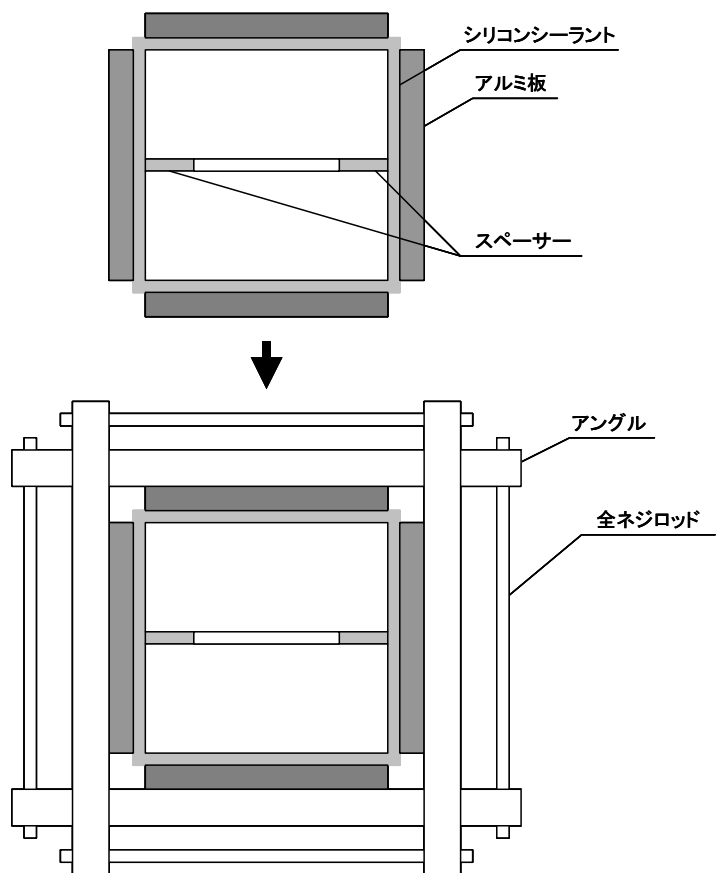


図 5.4-6 供試体作成の模式図

## (2) アクリル製ダミー試料を用いたトレーサー予備試験

作成した試験装置に関して、ブロックスケールでの適用性を検討するため、コアスケールの場合と同じように、マトリクス拡散の生じないアクリル製のダミー試料を対象としたトレーサー試験を実施した。ダミー試料は、図 5.4-7、写真 5.4-3 に示すように、高さ 2cm、幅 10cm、長さ 20cm、の 2 枚のアクリル板の間に厚さ 0.05mm のスペーサーを挟み込み、開口幅 0.05mm の平行平板試料としたものである。なお、側面の開口部分には止水のためにシリコンシーラントを塗布している。

試験条件を表 5.4-3 に示す。ブロック試料用に作成した試験装置は、コアスケールのものに比べて、セル容積がかなり大きくなっている。そのため、測定セル側の濃度はコアスケールの場合に比べて非常に薄くなり、試験中の経時的な濃度変化を正確に捉えることが困難となる。そこで、ブロック試料を対象とした試験に関しては、注入するトレーサー溶液の濃度を  $I^{-1000}$  (mg/L) とした。その他の条件は、コアスケールの場合と同様とした。

また、トレーサー試験の解析については、コア試料セル式トレーサー試験の場合と同じく、アクリル製のダミー試料を使用しているため、Ogata-Banks (1961) によって求められた 1 次元移流分散方程式の理論解を用いてフィッティングを行った。

試験結果を図 5.4-8 に示す。図 5.4-8 より、試験結果の測定値と解析結果が非常に良く合っており、本装置はブロック試料用のトレーサー試験装置としての適用性を十分に満たしていることが分かった。また、解析結果の分散長  $\alpha$  が 0.02(m) となっており、コア試料を用いた試験よりも 1 オーダー程度大きくなっている。これは既往の研究でも報告されている分散長のスケール依存性により生じたものであると考えられる。

表 5.4-3 ブロックトレーサー試験条件 (アクリル製ダミー試料)

	試験条件
トレーサーセル側	ヨウ化カリウム水溶液
	・濃度: $I^{-1000}$ (mg/L)
	・注入流量 $q=0.001$ (cc/min)
測定セル側	脱イオン水
	・イオンメーターにより測定

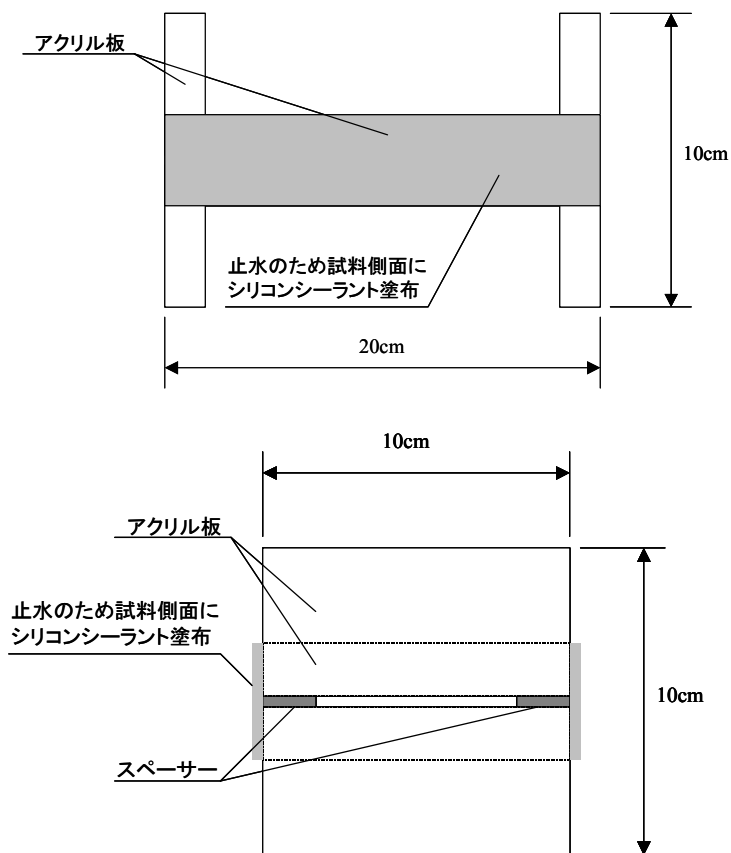


図 5.4-7 アクリル製ブロックダミー概要

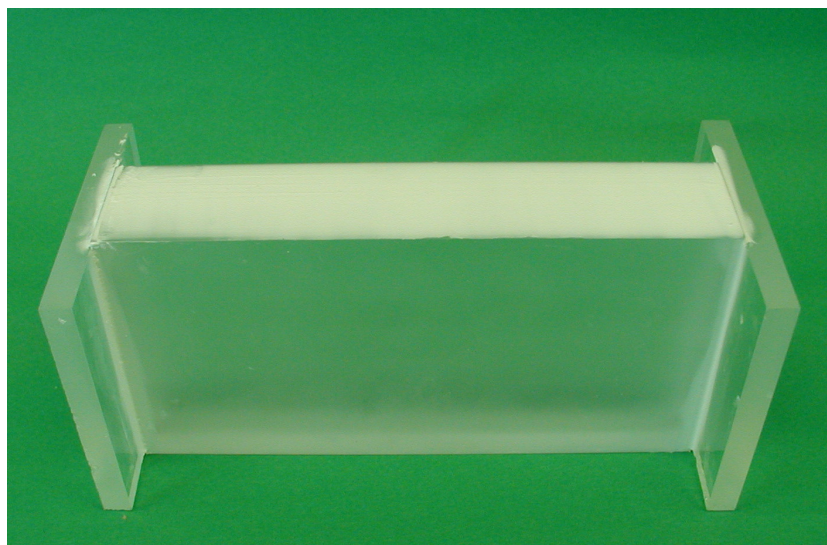


写真 5.4-3 アクリル製ブロックダミー外観

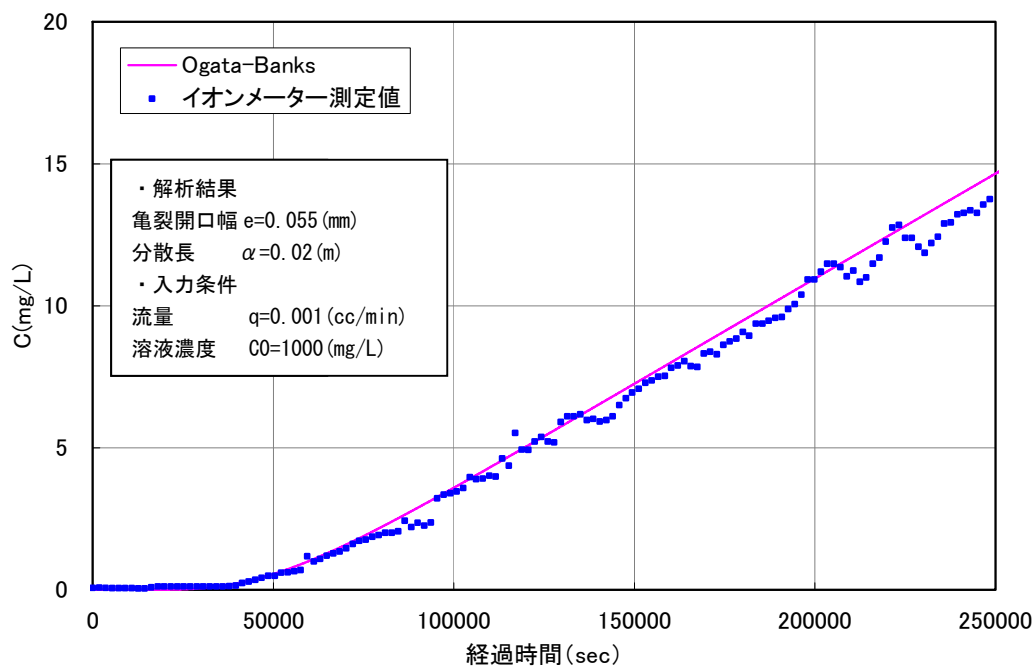


図 5.4- 8 ブロック試料セル式トレーサー試験結果 (アクリル製ダミー試料 :  $e=0.05\text{mm}$ )

## (3) 岩石ブロック平行平板試料を用いた透水/トレーサー試験

上述のブロック試験用セル型トレーサー試験装置を用いて、実際の岩体を用いた透水/トレーサー試験を実施した。試験条件を表 5.4-00 に示す。岩体試料は、アクリル製ダミー試料と異なり、マトリクス拡散による遅延の影響を大きく受けることが、前述の拡散試験結果から分かっている。そこでトレーサー注入流量をアクリル製ダミー試料を対象とした試験の 10 倍 ( $q=0.010$  cc/min) とした。その他の条件は、アクリル製ダミー試料の場合と同様とした。

表 5.4-4 ブロックトレーサー試験条件 (岩石試料)

	試験条件
トレーサーセル側	ヨウ化カリウム水溶液
	・濃度: $1 \times 1000$ (mg/L)
	・注入流量 $q=0.01$ (cc/min)
測定セル側	脱イオン水
	・イオンメーターにより測定

## (4) 試験結果

定水頭透水試験結果を表 5.4-5 に示す。表より、定水頭透水試験により得られた亀裂の透水係数は、 $9.36 \times 10^{-8}$  ( $m^2/s$ ) であり、この値から三乗則により求めた水理開口幅は、0.051 (mm) であった。トレーサー試験結果を図 5.4-9 に示す。図より、イオンメーターによる測定結果と ICP による測定結果はほぼ一致しており、本試験で得られる測定結果の信頼性が高いことがよく分かる。また、図 5.4-9 は、アクリル製ダミー試料の試験結果 (図 5.4-8) と比べて、マトリクス拡散による遅延の影響を受け、測定濃度の経時変化のプロットが、大きく下に湾曲しながら上昇していることが分かる。

## (5) 解析結果および考察

解析は、4.4 節のコア試料を対象としたトレーサー試験と同様に、3次元物質移行解析コード FRAC3DVS (ver.3.49、Therrien 他、1999) を用いて行った。

解析では、トレーサー試験時と同じ条件を与えた数値解析により、得られた濃度上昇曲線を試験結果とフィッティングすることにより、亀裂部の物質移行開口幅ならびに分散係数 (分散長) を求めた。なお、物質移行開口幅は曲線の傾きに、分散長は曲線の立ち上がりの部分に大きく影響するので、両者は独立して決定することができる。

解析条件を表 5.4-6 に示す。既知パラメータとして与えた水理開口幅、マトリクス部の透水係数、マトリクス部の実効拡散係数、空隙率は、前述の透水試験、拡散試験、基本物性測定で得られた値を用いた。

解析メッシュ (図 5.4-10) は、試料両端の止水板の開口に合わせた  $80\text{mm} \times 80\text{mm}$  の正方形断面の中心に、平板亀裂を配置し、亀裂面を挟んで対称としたものである。流れ方向の長さは、分散長よりも十分長くとるため、250cm とした。亀裂面は、面要素でモデル化した。境界条件は、左

右面を水頭固定境界、上下側面を不透水境界とした。ここで、試験条件が定流量条件にも関わらず、左右面を水頭固定としたのは、マトリクス部と亀裂部に流れる流量比が未知であるため、解析上、流量を固定できないためである。ブロック試料は、注入流量が小さく、亀裂の開口幅が大きいため、4章のコア試料のトレーサー試験と比べて、動水勾配が非常に小さい。したがって、今回の試験では、マトリクス部への流入量が亀裂に比べて十分小さいと考えられることから、亀裂の透水量係数とトレーサー流量から動水勾配を求め、左右水頭を設定した。

表 5.4-7 および図 5.4-9 中に解析結果を示す。図 5.4-9 に示すように、解析結果と測定結果の良い一致が見られた。また、表 5.4-7 から、トレーサー試験の解析から得られた物質移行開口幅は 0.067 (mm) であり、事前に実施した定水頭透水試験結果から三乗則により求めた水理開口幅とほぼ同等の値を示していることが分かる。一般に、透水性に寄与する水理開口幅は、亀裂幅の狭いところの効果が卓越するのに対し、物質移行開口幅は、平均的な開口幅の影響を大きく受けるため、物質移行開口幅の方が水理開口幅よりも数倍以上大きくなることが報告されているが、今回の結果は、物質移行開口幅/水理開口幅の比が、約 1.3 となっており、この傾向と一致しない。これは、今回の試験では、平行平板試料を用いており、開口幅の面内不均一性が低かったためと推察される。また、花崗岩サイト（釜石鉦山原位置試験場）において、原位置スケールの亀裂に対して、物質移行開口幅  $e$  と透水量係数  $T$  の間に次の関係： $e = 2\sqrt{T}$  が示されている（shimo 他、1999）。今回の試験結果は、この傾向とも外れており、やや小さめの開口幅が得られている（図 5.4-11）。

分散長については、一般的に移行経路の 1/10~1/100 の値を示すと言われており、今回の結果はこの傾向と一致している。この結果を既往の実験結果（図 5.4-12：新藤他、1995）および昨年度試験結果と比較すると、ほぼ同一のトレンド上にあり、従来から指摘されている分散長とスケールの関係が、当試料においても同様の回帰直線により表せる可能性が示された。

表 5.4- 5 定水頭透水試験結果（ブロック試料：B-1）

試料名	地層名	採取場所	水圧差 [m]	流量 [m <sup>3</sup> /s]	亀裂の透水量係数 [m <sup>2</sup> /s]	試料全体の透水係数 [m/s]
B-2	声問層	宮の沢林道	0.53	1.98E-08	9.36E-08	1.17E-06

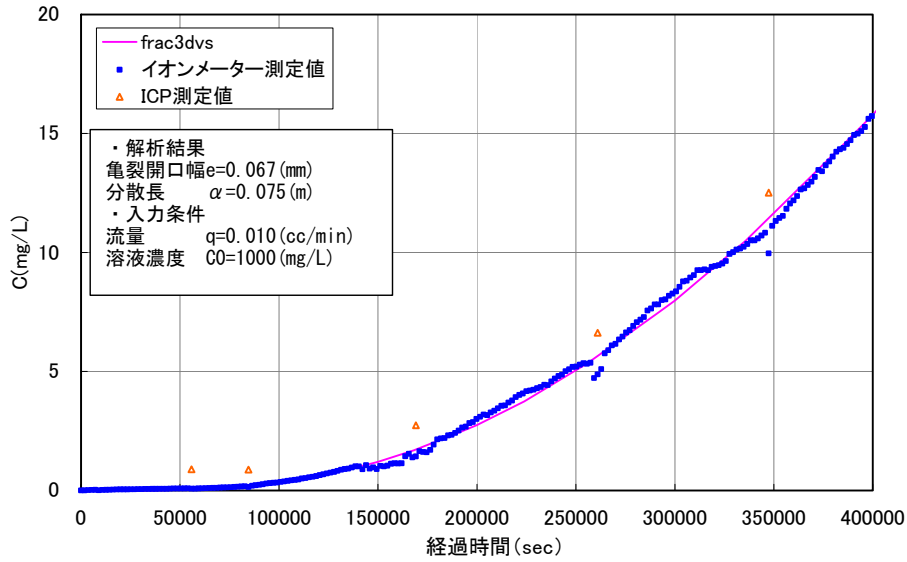


図 5.4- 9 トレーサー試験結果（ブロック試料：B-1）

表 5.4- 6 トレーサー試験解析入力条件一覧

試験ケース	注入流量 (cc/min)	水理開口幅 (mm)	マトリクス部透水係数 (m/s)	マトリクス部実効拡散係数 (m <sup>2</sup> /s)	マトリクス部有効空隙率 (%)
B-2	0.010	0.051	2.70E-10	3.20E-10	58.00
設定根拠	試験条件より設定	透水試験結果より設定	透水試験結果より設定	拡散試験結果より設定	基本物性試験より設定

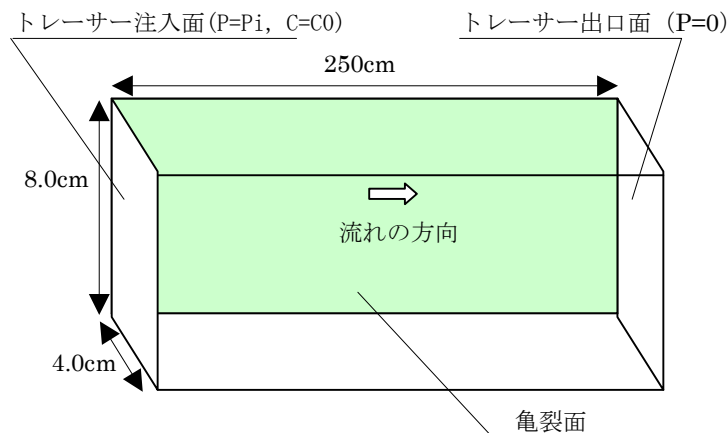


図 5.4- 10 トレーサー試験の解析条件（ブロック試料：B-1）



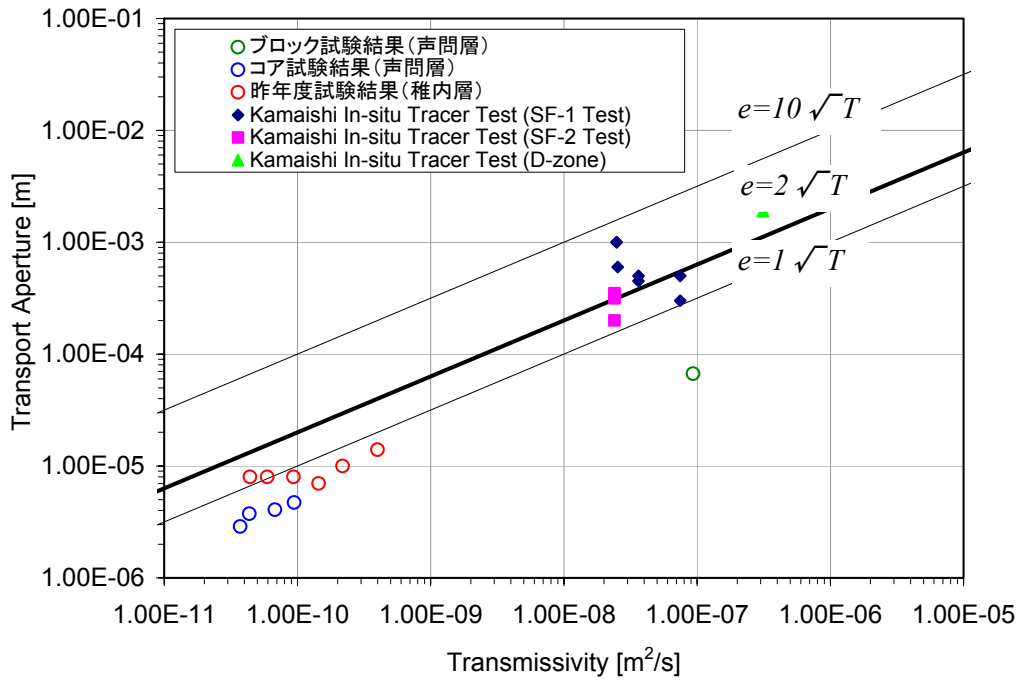


図 5.4- 11 透水量係数と物質移行開口幅の関係（釜石原位置試験データとの比較）

(shimo 他、1999)

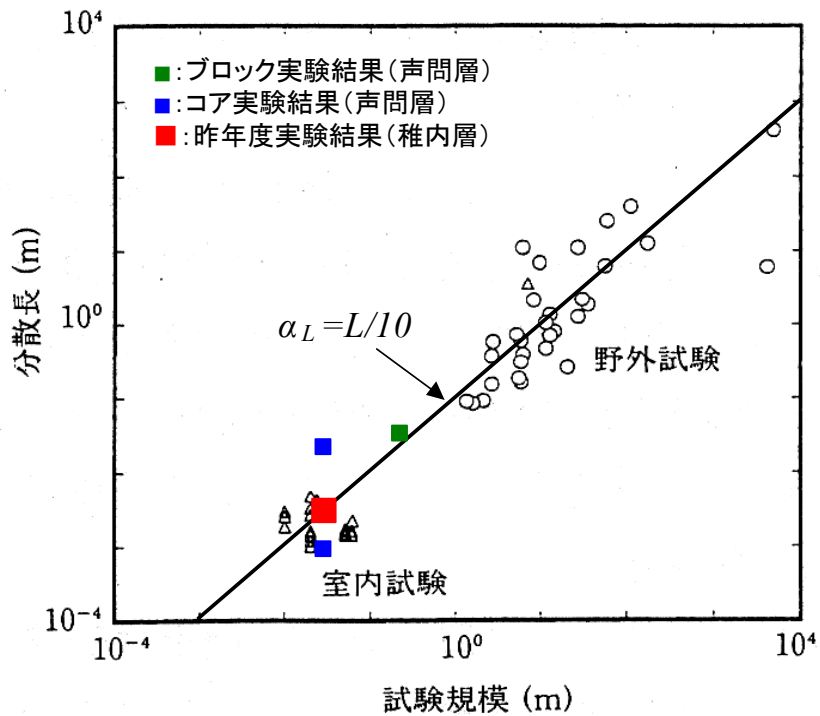


図 5.4- 12 分散長と試験スケールの関係（既往データとの比較）

(新藤他、1995)

## 6. 亀裂を有する軟岩中の流れと移行現象の概念モデルに関する数値解析的検討

亀裂を有する堆積軟岩における物質移行のモデル化について、数値解析的な検討を行った。以下に検討内容を説明する。

### 6.1 亀裂部と岩石マトリクス部の物性値の組み合わせに関するパラメータスタディ

堆積性軟岩においては、結晶質岩盤と比べ、岩石マトリクス部での移流分散および拡散効果の影響が大きいと考えられる。そこで、既往のデータに基づく現実的な範囲において、亀裂部と岩石マトリクス部の物性パラメータを変化させたときに生じる物質移行現象の変化を数値解析により確認した。なお、解析には、トレーサー試験の解析と同様に FRAC3DVS を用いた。

#### 6.1.1 解析モデル

図 6.1-1 にパラメータスタディに用いる解析モデルを示す。解析モデルは、トレーサー試験の解析で用いたものと同様に正方形断面の中心に、平行亀裂を配置し、亀裂面を挟んで対称としたものを用いる。モデル寸法は、1.0m×1.0m×5.0mとした。境界条件は、モデルの上下端面を定水頭境界、側面を不透水境界とした。また、トレーサー物質は、モデル端面の亀裂部（図中の赤線部）のみから、時間  $t=0$  から計算終了時間まで常時供給されるよう設定した。解析では、観測点 A（図中赤点部）でのトレーサー濃度の経時変化（破過曲線）を求め、各解析ケースについて比較検討を行った。

#### 6.1.2 解析ケース

解析ケースの一覧を表 6.1-1 に示す。解析ケースは、入力パラメータの内、亀裂開口幅、マトリクス部の透水係数、マトリクス部の実効拡散係数の 3 つのパラメータをそれぞれ変化させた 10 ケースを設定した。

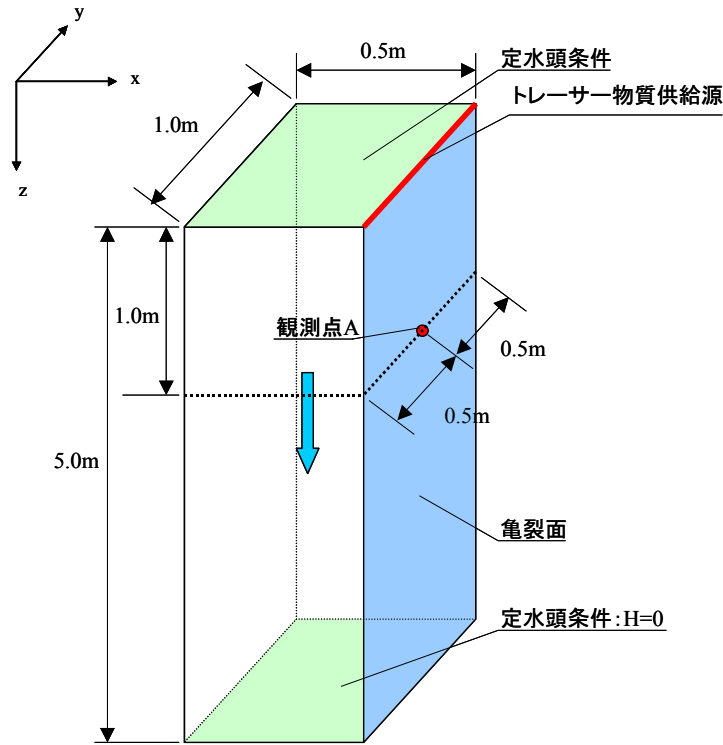


図 6.1-1 解析モデル概要

表 6.1-1 解析ケース一覧

解析ケース	動水勾配 $I$	物質移行 開口幅 $e_T(m)$	水理開口幅 $e_H(m)$	マトリクス部 透水係数 $K_m(m/s)$	縦方向 分散長 $\alpha(m)$	空隙率 $n(\%)$	マトリクス部 拡散係数 $D_e(m^2/s)$
基本ケース	0.01	1.00E-05	1.00E-05	1.00E-10	0.1	40	2.27E-11
①	0.01	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-10	0.1	40	2.27E-11
②	0.01	5.00E-06	5.00E-06	1.00E-10	0.1	40	2.27E-11
③	0.01	2.00E-05	2.00E-05	1.00E-10	0.1	40	2.27E-11
④	0.01	5.00E-05	5.00E-05	1.00E-10	0.1	40	2.27E-11
⑤	0.01	1.00E-04	1.00E-04	1.00E-10	0.1	40	2.27E-11
⑥	0.01	1.00E-05	1.00E-05	1.00E-12	0.1	40	2.27E-11
⑦	0.01	1.00E-05	1.00E-05	1.00E-08	0.1	40	2.27E-11
⑧	0.01	1.00E-05	1.00E-05	1.00E-10	0.1	20	8.68E-12
⑨	0.01	1.00E-05	1.00E-05	1.00E-10	0.1	60	4.00E-11

### 6.1.3 解析結果

以下に各ケースにおける解析結果について説明する。

#### (1) 亀裂開口幅を変化させたケース

図 6.1-2、図 6.1-3 に各ケースの破過曲線を示す。図 6.1-3 は、図 6.1-2 の破過曲線の時間軸を対数表示にしたものである。これらの図より、亀裂開口幅の変化により、各曲線の濃度上昇傾向は異なり、亀裂開口幅が大きくなると濃度上昇速度が速くなる傾向があることが分かる。

次に、亀裂開口幅の変化による、マトリクス拡散による遅延の影響の変化について検討を行った。図 6.1-4 に亀裂開口幅と、マトリクス拡散によるトレーサーロス率（全注入トレーサー量の内、マトリクス拡散により亀裂からマトリクス部へ拡散したトレーサー量の割合）の関係を示す。なお、トレーサーロス率は、それぞれ、亀裂内の流れが濃度観測点 A (Z=1.0m) に達した時間  $t_{Z=1.0}$  での亀裂内の濃度から算定したものである。

$$(\text{トレーサーロス率 (\%)}) = q_m/q_c \times 100$$

$q_c$  :  $t_{Z=1.0}$  までに注入した全トレーサー量

$q_m$  :  $t_{Z=1.0}$  におけるマトリクス部へ拡散したトレーサー量

図 6.1-4 より、ケース⑤～基本ケースでの開口幅では、亀裂開口幅が小さくなると、亀裂内の流速が小さくなり、マトリクス内へのトレーサー拡散量が大きくなり、トレーサーロス率が大きくなる傾向があることが分かる。また、その一方で、基本ケースよりも開口幅の小さいケース①およびケース②については、亀裂内の流速が小さくなるにも関わらず、これとは逆にトレーサーロス率が小さくなっていることが分かる。これは、ケース②の開口幅付近から、マトリクス内の移流および拡散による亀裂近傍での流れ方向のトレーサーの広がり速度と、亀裂内の移流・分散によるトレーサーの広がり速度がバランスし始めており、亀裂からマトリクスへのトレーサー拡散量が減少していることを示している。

以上のことから、亀裂開口幅の変化により破過曲線の濃度上昇傾向は異なり、亀裂開口幅が大きい程、トレーサー濃度の上昇速度は速くなることが分かった。また、その一方で、マトリクス拡散による遅延の影響は、開口幅が大きくなる程小さくなる傾向にあるが、ある開口幅を境に、その傾向は逆転することが分かった。

#### (2) マトリクス部の透水係数を変化させたケース

図 6.1-5、図 6.1-6 に各ケースの破過曲線を示す。図 6.1-6 は、図 6.1-5 の破過曲線の時間軸を対数表示にしたものである。これらの図より、マトリクス部の透水性の変化により、各曲線の濃度上昇傾向は異なり、マトリクス部の透水性が大きくなると濃度上昇速度が速くなる傾向があることが分かる。しかし、マトリクス部の透水性の変化が破過曲線に与える影響は、今回のパラメータの範囲では、前述の亀裂開口幅の変化が破過曲線に与える影響に比べて小さい。

次に、前述と同じように、マトリクス部の透水性の変化による、マトリクス拡散による遅延の影響の変化について検討を行った。図 6.1-7 にマトリクス部の透水係数と、マトリクス拡散によ

るトレーサーロス率の関係を示す。図 6.1-7 より、マトリクス部の透水性の変化によるトレーサーロス率の変化は、ほとんど生じないことが分かった。

以上のことから、マトリクス部の透水性が大きい程、破過曲線の濃度上昇速度は速くなる傾向があるが、この傾向は、亀裂開口幅の変化が与える影響に比べると小さい。また、マトリクス拡散による遅延の影響は、マトリクス部の透水性との関連性は、ほとんどないことが分かった。

### (3) マトリクス部の拡散係数を変化させたケース

図 6.1-8、図 6.1-9 に各ケースの破過曲線を示す。図 6.1-9 は、図 6.1-8 の破過曲線の時間軸を対数表示にしたものである。これらの図より、マトリクス部の拡散係数の変化により、各曲線の濃度上昇傾向は異なり、マトリクス部の拡散係数が大きくなると濃度上昇速度が遅くなる傾向があることが分かる。しかし、マトリクス部の拡散係数の変化が破過曲線に与える影響は、今回のパラメータの範囲では、前述の亀裂開口幅の変化、マトリクス部の透水性の変化が破過曲線に与える影響に比べて小さい。

次に、前述と同じように、マトリクス部の拡散係数の変化による、マトリクス拡散による遅延の影響の変化について検討を行った。図 6.1-10 にマトリクス部の拡散係数と、マトリクス拡散によるトレーサーロス率の関係を示す。図 6.1-10 より、マトリクス部の拡散係数が大きくなると、マトリクス拡散による遅延の影響が大きくなり、トレーサーロス率が大きくなることが分かる。

以上のことから、マトリクス部の拡散係数が大きい程、破過曲線の濃度上昇速度は遅くなる傾向があるが、この傾向は、亀裂開口幅の変化が与える影響、マトリクス部の透水性の変化が与える影響に比べると小さい。また、マトリクス拡散による遅延の影響は、マトリクス部の拡散係数が大きいほど、大きくなることが分かった。

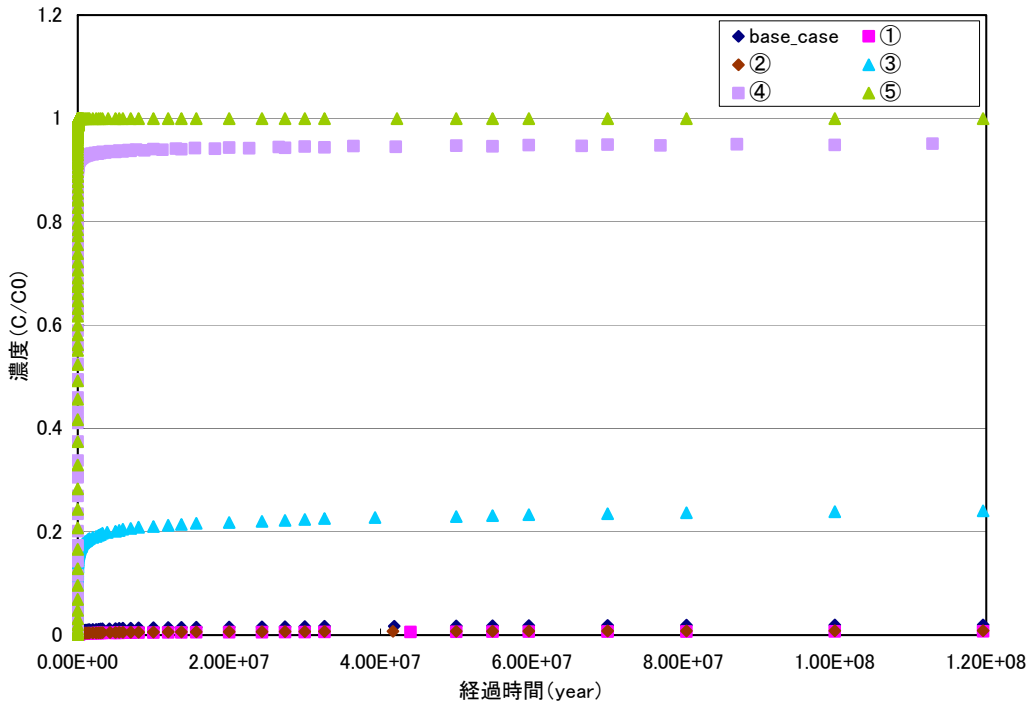


図 6.1-2 解析結果（観測点 A における破過曲線：基本ケースおよびケース①～⑤）

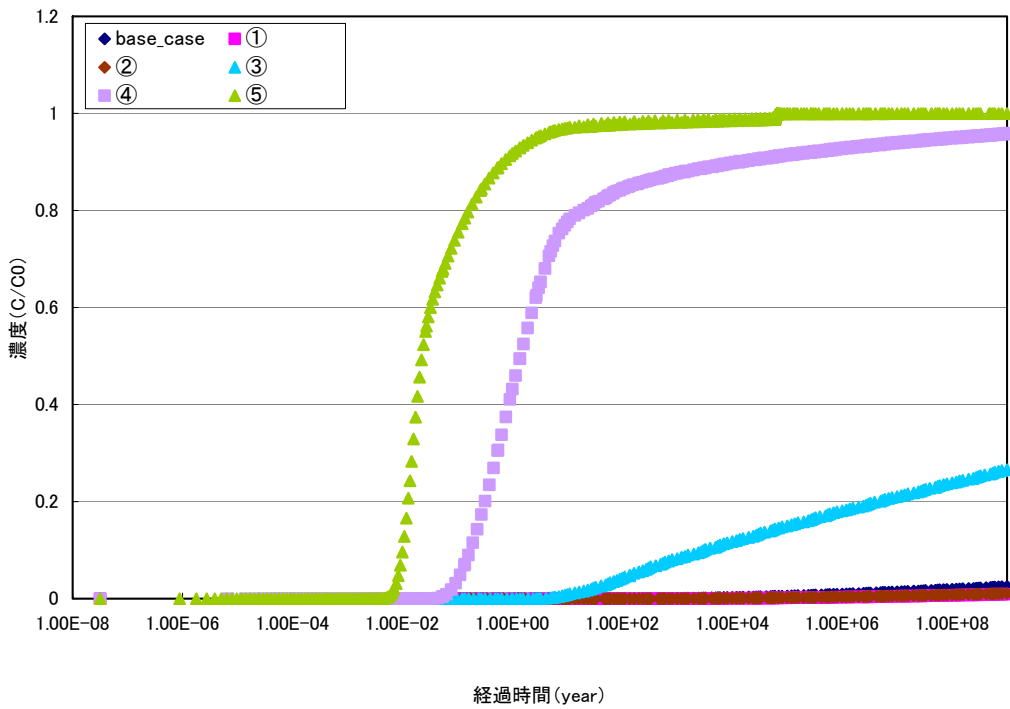


図 6.1-3 解析結果（観測点 A における破過曲線：基本ケースおよびケース①～⑤）

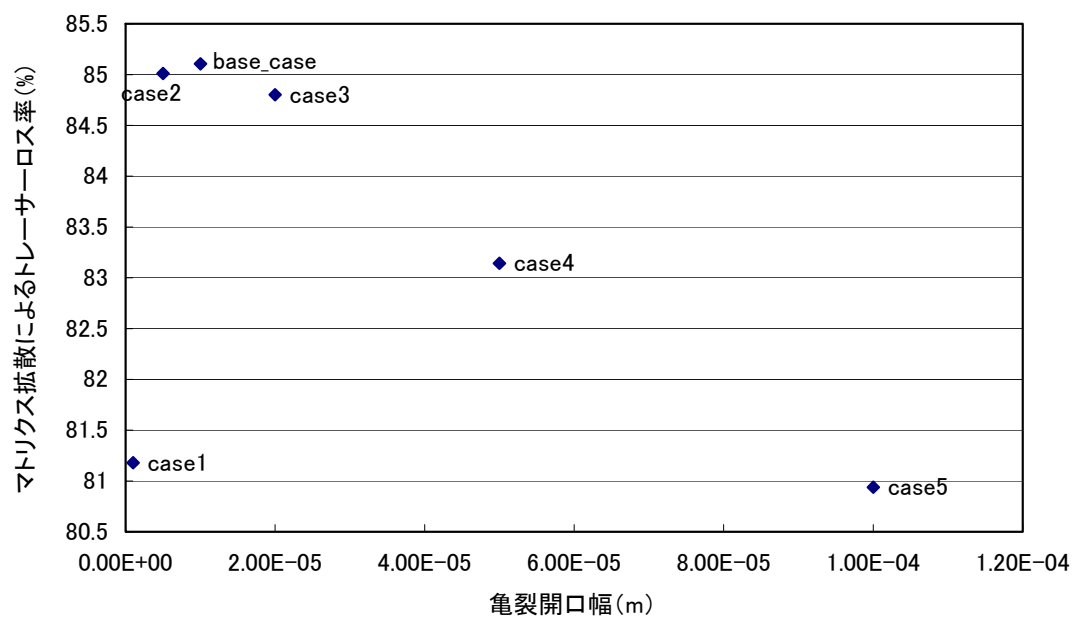


図 6.1- 4 亀裂開口幅とマトリクス拡散によるトレーサーロス率の関係

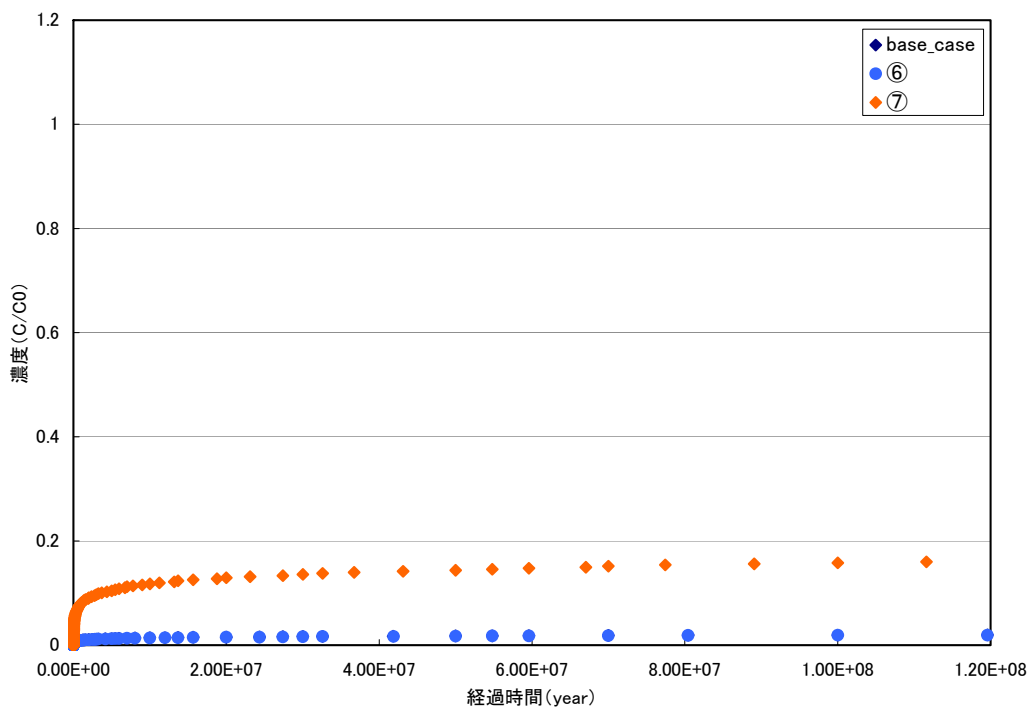


図 6.1- 5 解析結果（観測点 A における破過曲線：基本ケースおよびケース⑥、⑦）

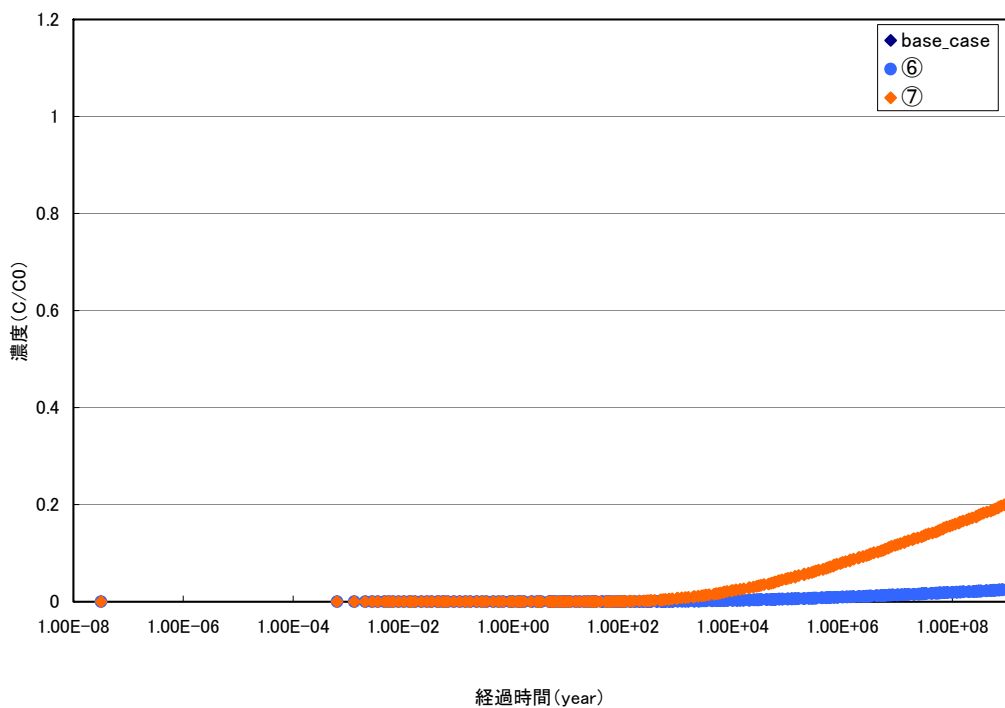


図 6.1- 6 解析結果（観測点 A における破過曲線：基本ケースおよびケース⑥、⑦）



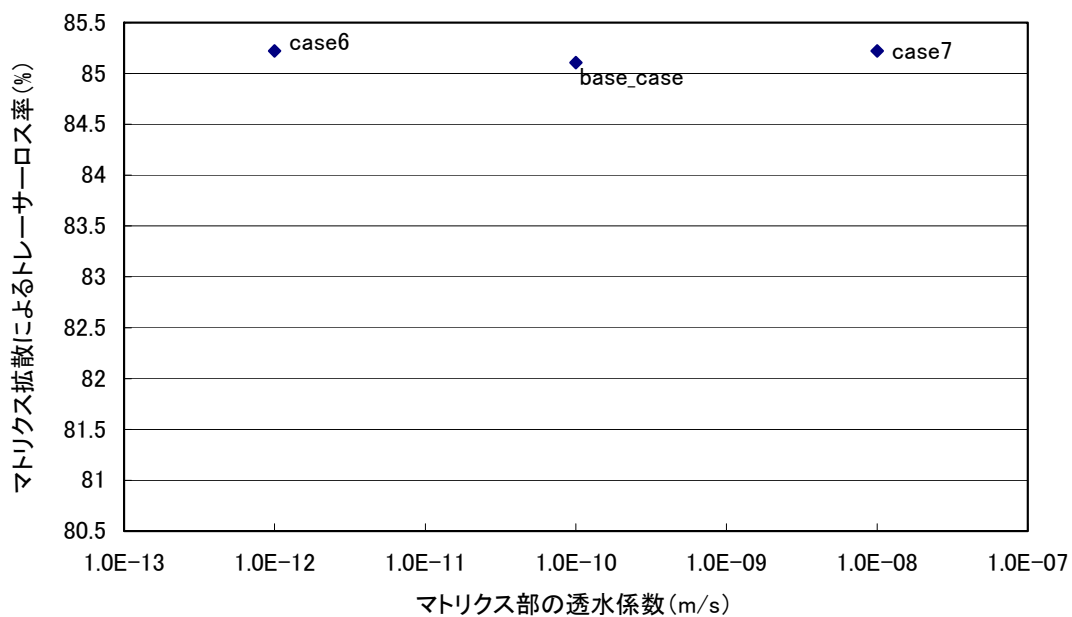


図 6.1-7 マトリクス部の透水係数とマトリクス拡散によるトレーサーロス率の関係

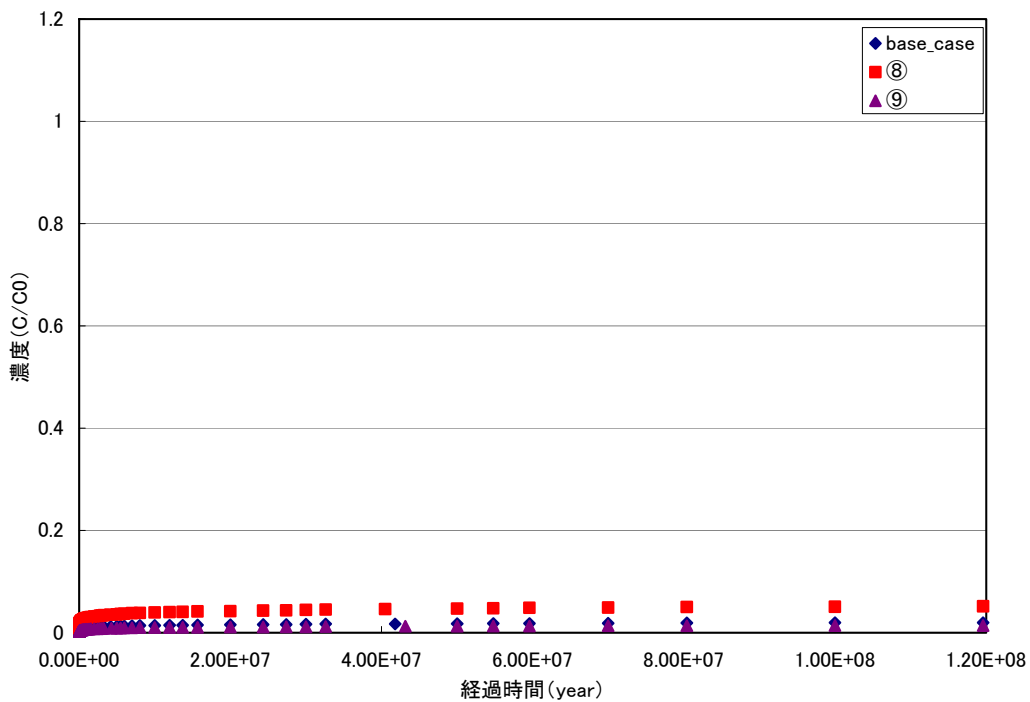


図 6.1- 8 解析結果（観測点 A における破過曲線：基本ケースおよびケース⑧、⑨）

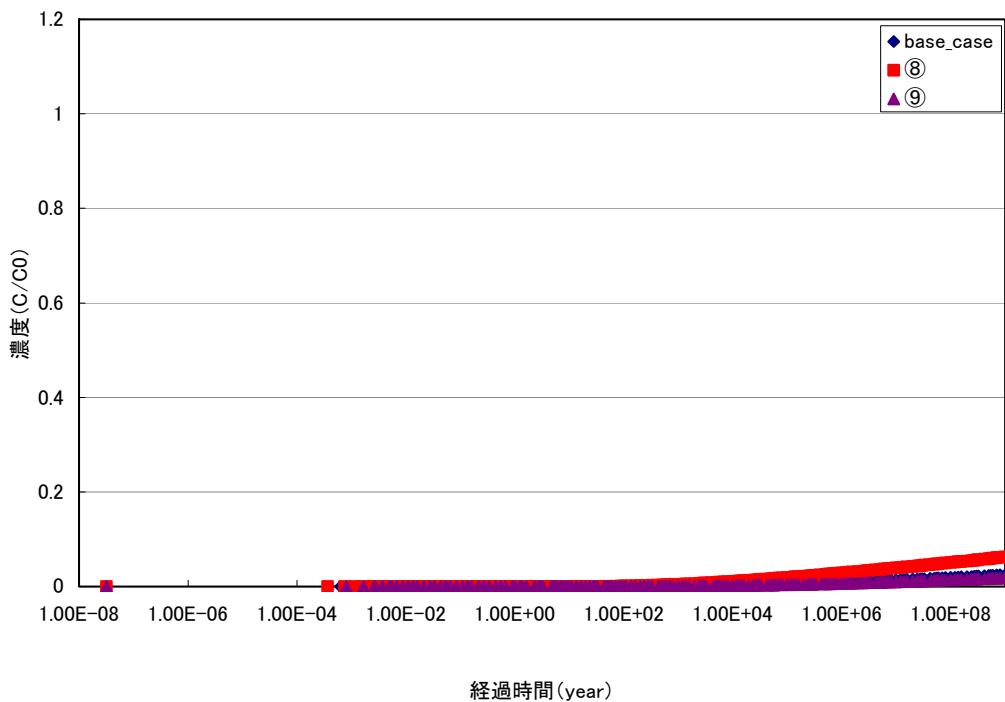


図 6.1- 9 解析結果（観測点 A における破過曲線：基本ケースおよびケース⑧、⑨）

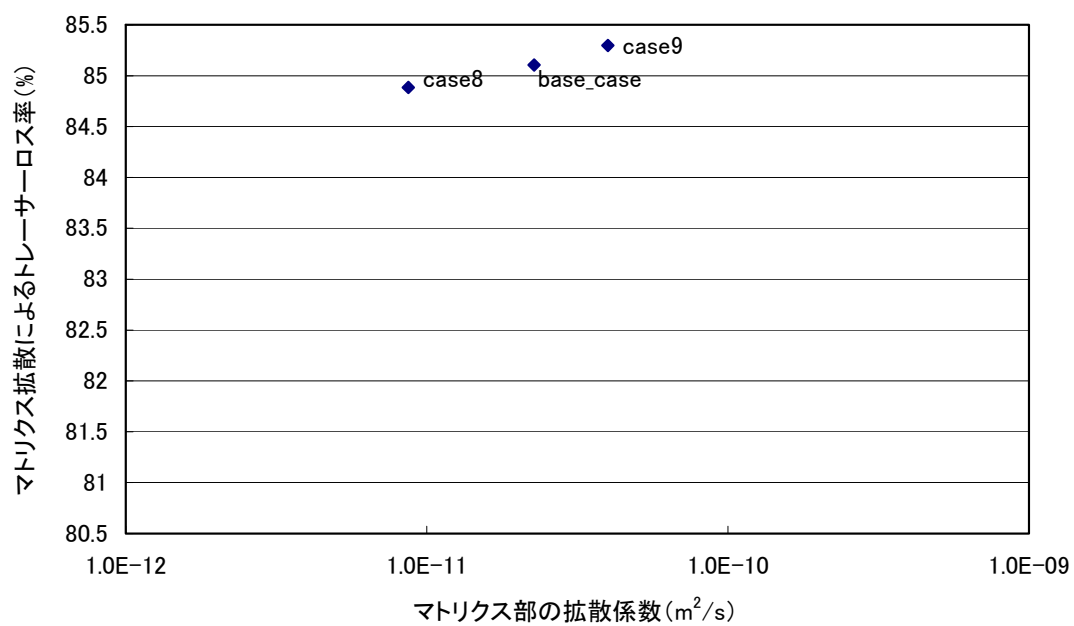


図 6.1- 10 マトリクス部の拡散係数とマトリクス拡散によるトレーサーロス率の関係

## 6.2 岩盤のモデル化手法及び数値解析手法に関する考察

ここでは、実スケールの岩盤における物質移行解析を想定し、岩盤を多孔質媒体でモデル化した場合と、亀裂ネットワークでモデル化した場合の解析結果の違いや問題点について考察を行う。

### 6.2.1 解析モデル

図 6.2-1 に解析モデルの概要を示す。解析モデルは、図 6.2-1 に示すように、250m×10m×100m の x-z 平面上に 10m 格子の任意の亀裂ネットワークを発生させたものを用いた。今回の解析では、モデル内の 10m 格子に占める合計亀裂長さの割合（亀裂密度）を変化させることで、モデル内の亀裂密度の変化による解析結果の変化について考察を行った。境界条件は、モデルの図 6.2-1 の左右両端を定水頭境界、側面を不透水境界とした。また、トレーサー物質は、モデル左端面の全面から、時間  $t=0$  から  $t=1.0 \times 10^5$ （年）まで  $C/C_0=1.0$  で常時供給し、 $t=1.0 \times 10^5$ （年）から計算終了時間までを  $C/C_0=0$  となるよう設定した。

解析では、観測断面での平均トレーサー濃度の経時変化（破過曲線）を求め、各ケースについて、多孔質媒体モデルにてフィッティングを行い、多孔質媒体モデルによるモデル化の可能性について検討した。多孔質媒体モデルの概要を図 6.2-2 に示す。

なお、ここで用いるモデルは、亀裂ネットワークモデルを亀裂内の移流・分散とマトリクス拡散で表現されるモデル、多孔質媒体モデルをマトリクス内の移流・分散のみで表現されるモデルとして取り扱った。

### 6.2.2 パラメータの設定および解析ケース

各解析ケースにおけるパラメータの一覧を表 6.2-1 に示す。解析ケースは、亀裂密度が約 30%、40%、50%、70% の 4 ケースを設定した。図 6.2-3～図 6.2-6 に、各亀裂ネットワークモデルの亀裂分布図を示す。

表 6.2-1 解析ケースおよび入力パラメータ一覧

解析モデル	解析ケース	亀裂密度 (%)	動水勾配 I	物質移行開口幅 $e_T(m)$	水理開口幅 $e_H(m)$	マトリクス部透水係数 $K_m(m/s)$	亀裂部の縦方向分散長 $\alpha(m)$	空隙率 $n(\%)$	マトリクス部拡散係数 $D_g(m^2/s)$
亀裂モデル	ケース①	33.8	0.01	1.00E-05	1.00E-05	1.00E-10	10	40	2.27E-11
	ケース②	41.4							
	ケース③	51.4							
	ケース④	68.4							
多孔質モデル	ケース①	-	0.01	-	-	1.50E-09	-	40	-
	ケース②					1.85E-09			
	ケース③					2.49E-09			
	ケース④					4.43E-09			

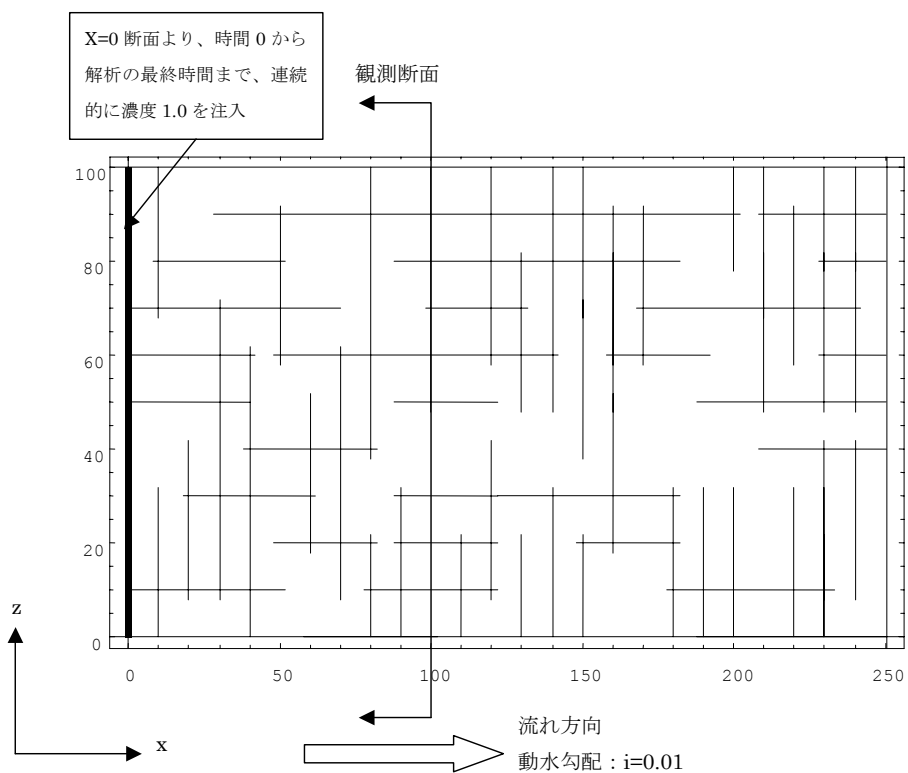


図 6.2- 1 解析モデル概要（亀裂ネットワークモデル）

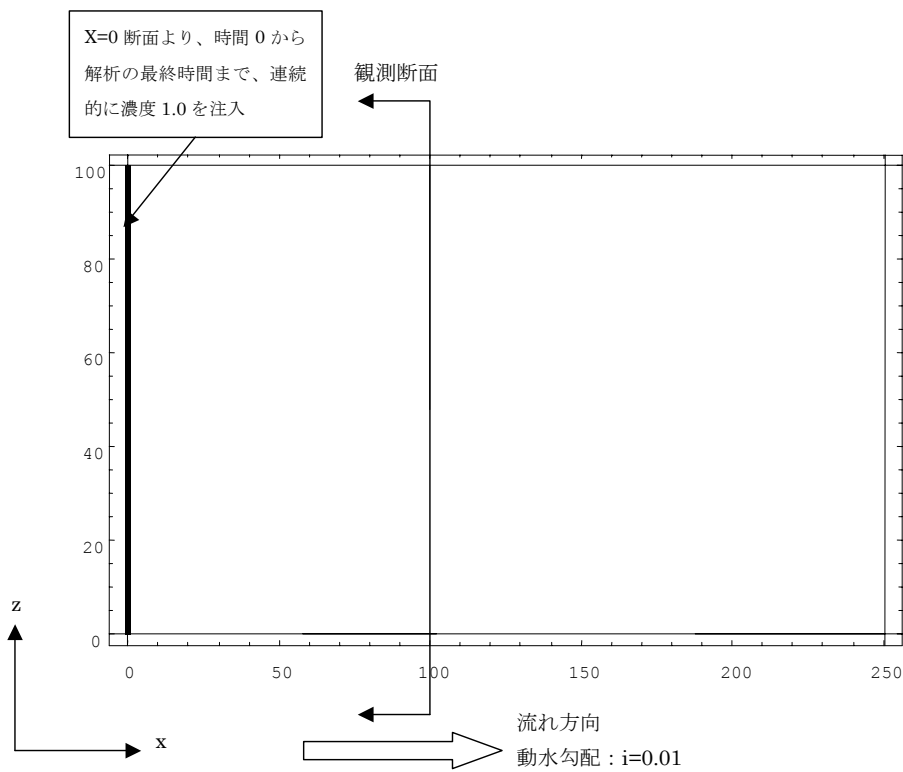


図 6.2- 2 解析モデル概要（多孔質媒体モデル）

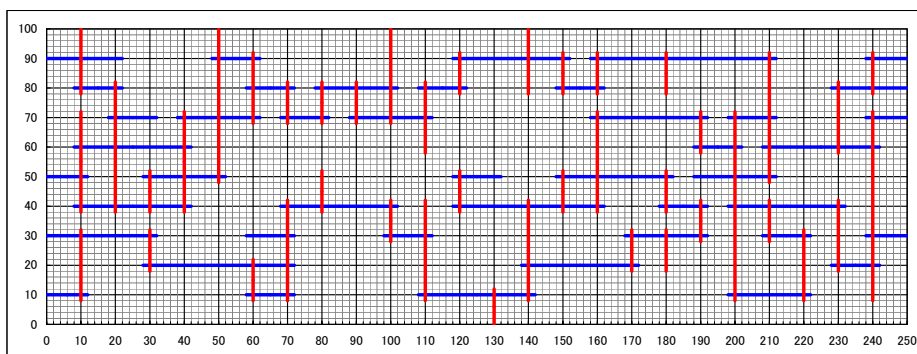


図 6.2-3 亀裂ネットワークモデルにおける亀裂分布（亀裂密度：30%）

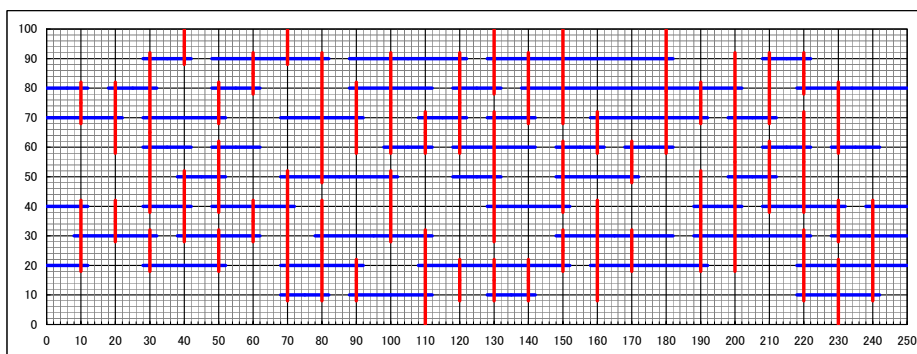


図 6.2-4 亀裂ネットワークモデルにおける亀裂分布（亀裂密度：40%）

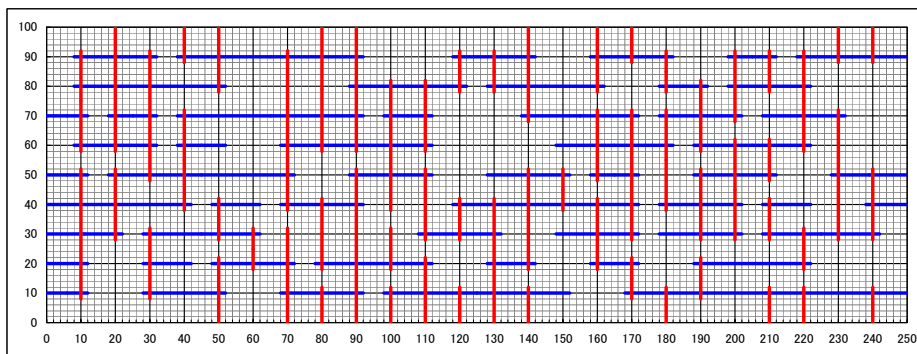


図 6.2-5 亀裂ネットワークモデルにおける亀裂分布（亀裂密度：50%）

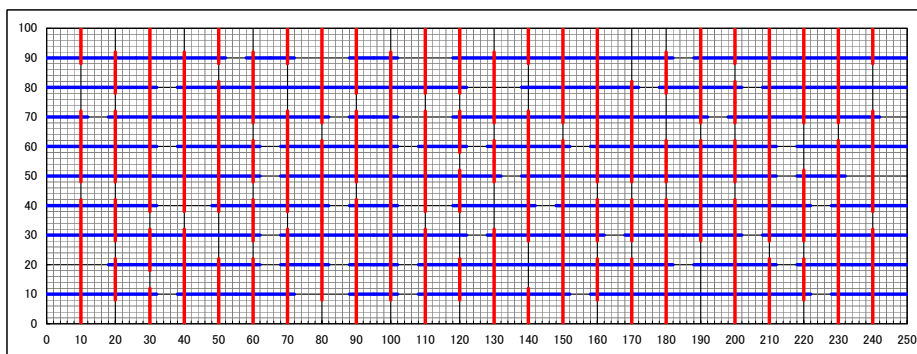


図 6.2-6 亀裂ネットワークモデルにおける亀裂分布（亀裂密度：70%）

### 6.2.3 解析結果

以下に各ケースにおける解析結果について説明する。図 6.2-7～図 6.2-10 に亀裂ネットワークモデルにおける解析結果から得られた破過曲線を示す。これらの図より、亀裂密度が大きくなると、濃度上昇および低下の傾きが大きくなり、最大到達濃度も大きくなること分かる。

次に、図 6.2-11～図 6.2-14 および表 6.2-2 に、多孔質媒体モデルによる破過曲線のフィッティング結果を示す。これらの図、表より、亀裂密度が 40%～70%の 3 ケースについては、多孔質媒体モデルにより、良好なフィッティング結果を得ることができたが、亀裂密度が 30%のケースについては、 $\alpha_m$ をどの値にしても、良好なフィッティング結果を得ることができなかった。これは、亀裂ネットワークモデルにおける亀裂密度が小さくなると、モデル全体としての巨視的な不均質性が大きくなり、等方均質な多孔質媒体モデルでは表現できないことを示している。一方、亀裂密度が 40%以上のケースについては、モデル全体としての不均質性が小さく、巨視的には、多孔質媒体モデルとして表現し得ると言える。

以上より、今回のような非収着性の物質移行現象においては、堆積岩等の軟岩試料を対象とした、亀裂ネットワークを形成する岩盤において、解析領域内の亀裂密度によっては、多孔質媒体モデルで表現できる可能性が示された。

表 6.2-2 フィッティング結果一覧

解析ケース	亀裂密度 (%)	マトリクス部 透水係数	マトリクス部 の縦方向 分散長
		$K_m(m/s)$	$\alpha_m(m)$
ケース①	33.8	1.50E-09	49.9
ケース②	41.4	1.85E-09	40.5
ケース③	51.4	2.49E-09	50.1
ケース④	68.4	4.43E-09	39.5

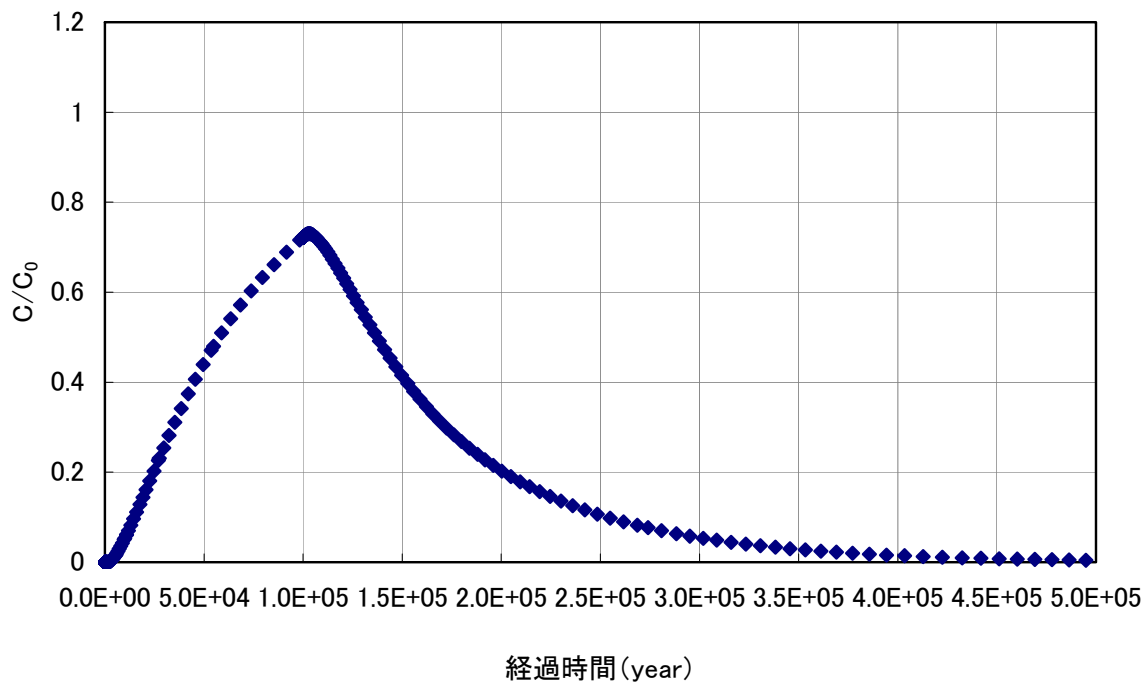


図 6.2- 7 亀裂ネットワークモデルにおける破過曲線（亀裂密度 30%解析結果）

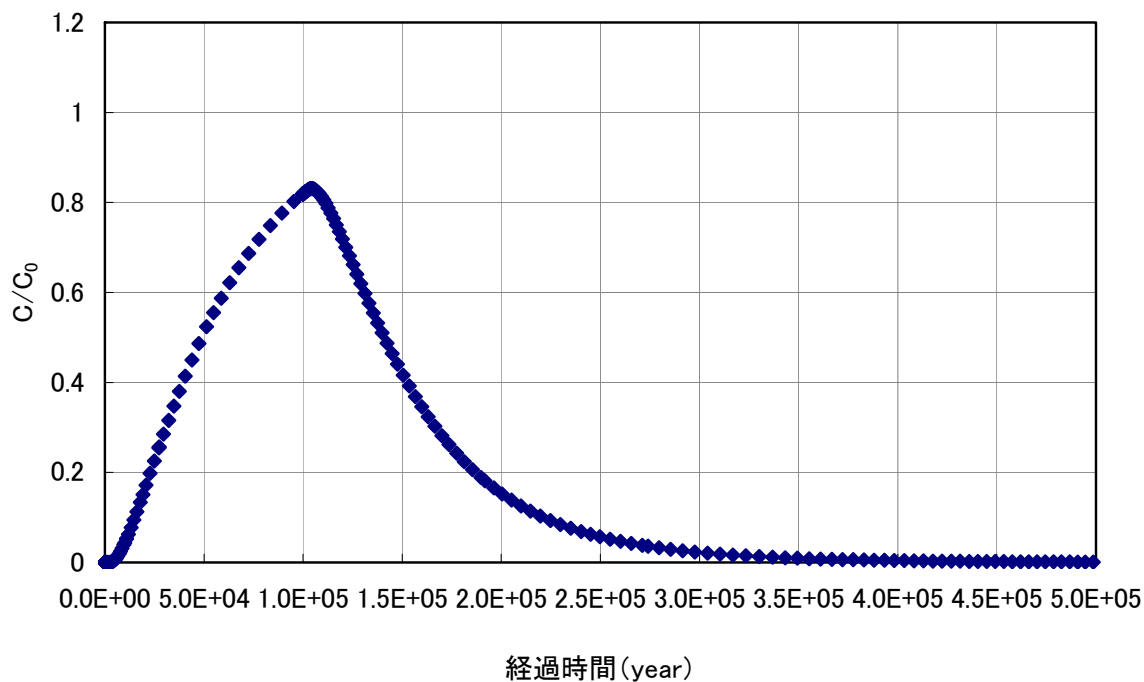


図 6.2- 8 亀裂ネットワークモデルにおける破過曲線（亀裂密度 40%解析結果）



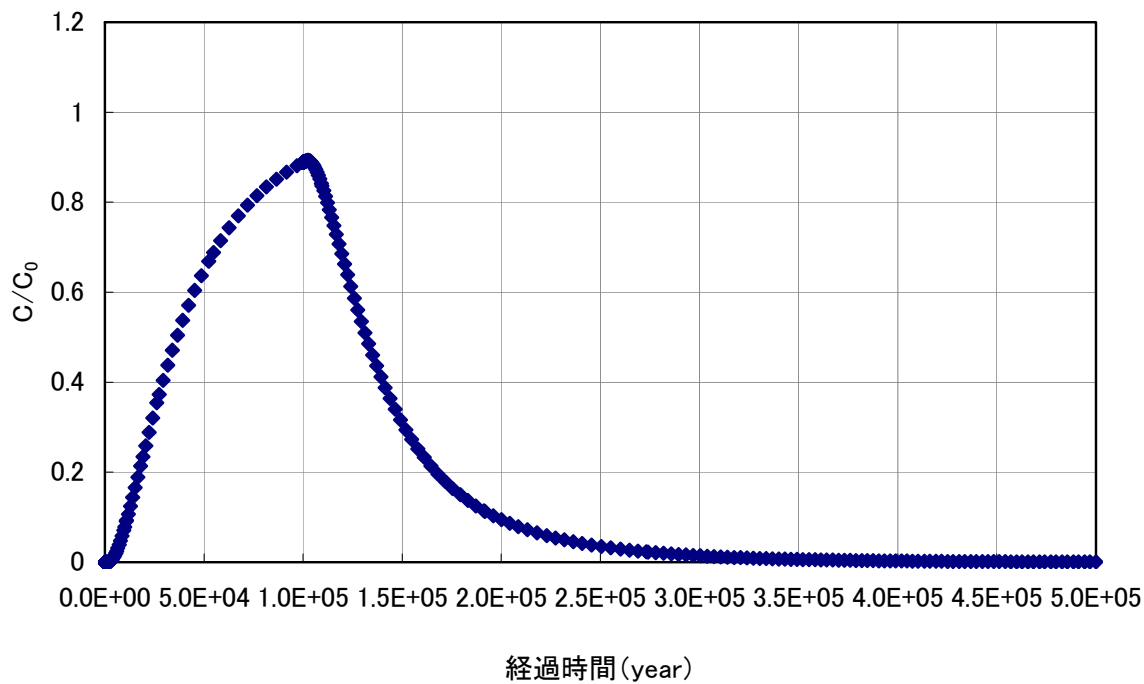


図 6.2- 9 亀裂ネットワークモデルにおける破過曲線（亀裂密度 50%解析結果）

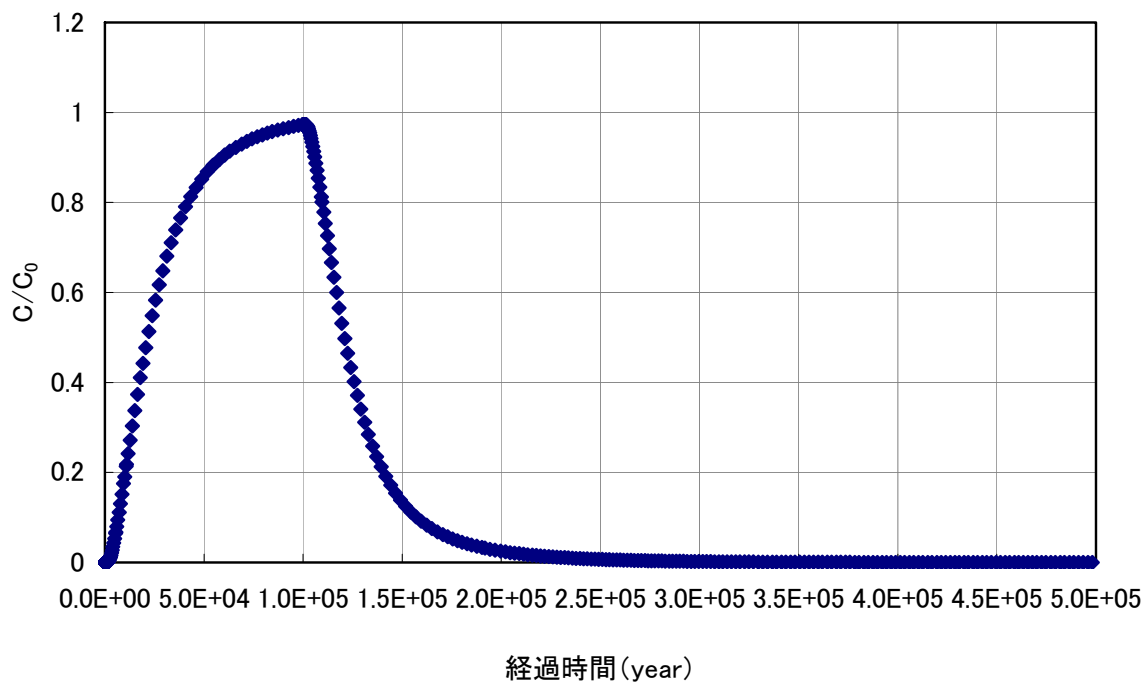


図 6.2- 10 亀裂ネットワークモデルにおける破過曲線（亀裂密度 70%解析結果）

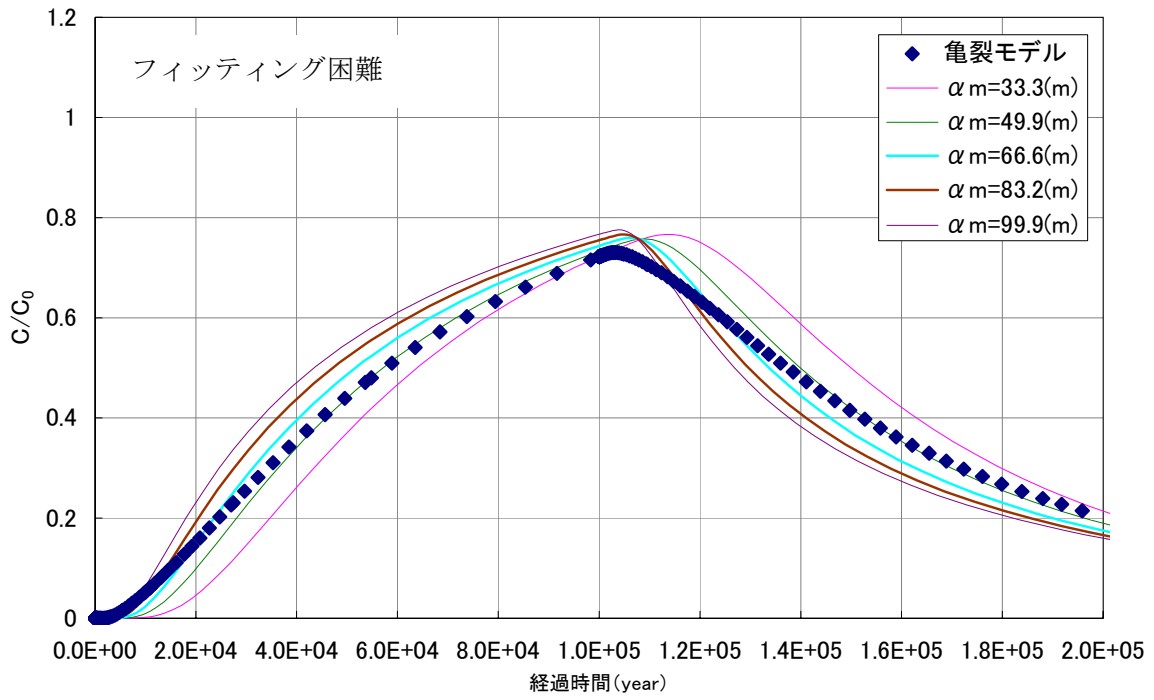


図 6.2- 11 フィッティング結果（亀裂密度：30%）

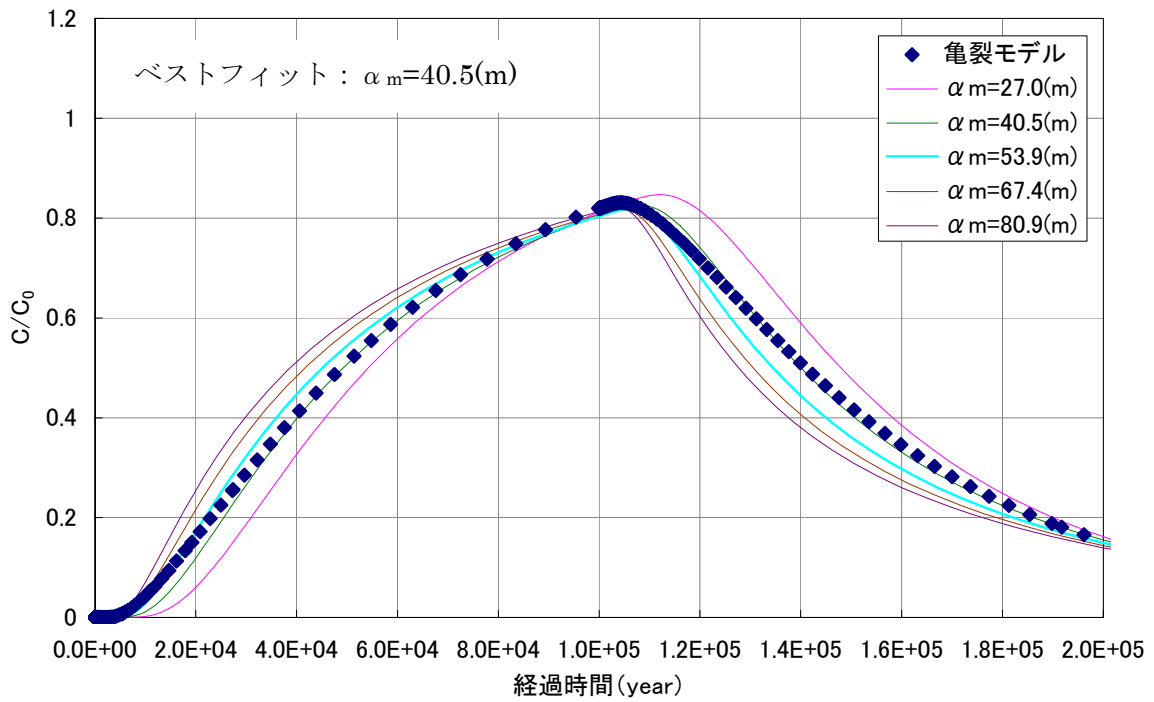


図 6.2- 12 フィッティング結果（亀裂密度：40%）

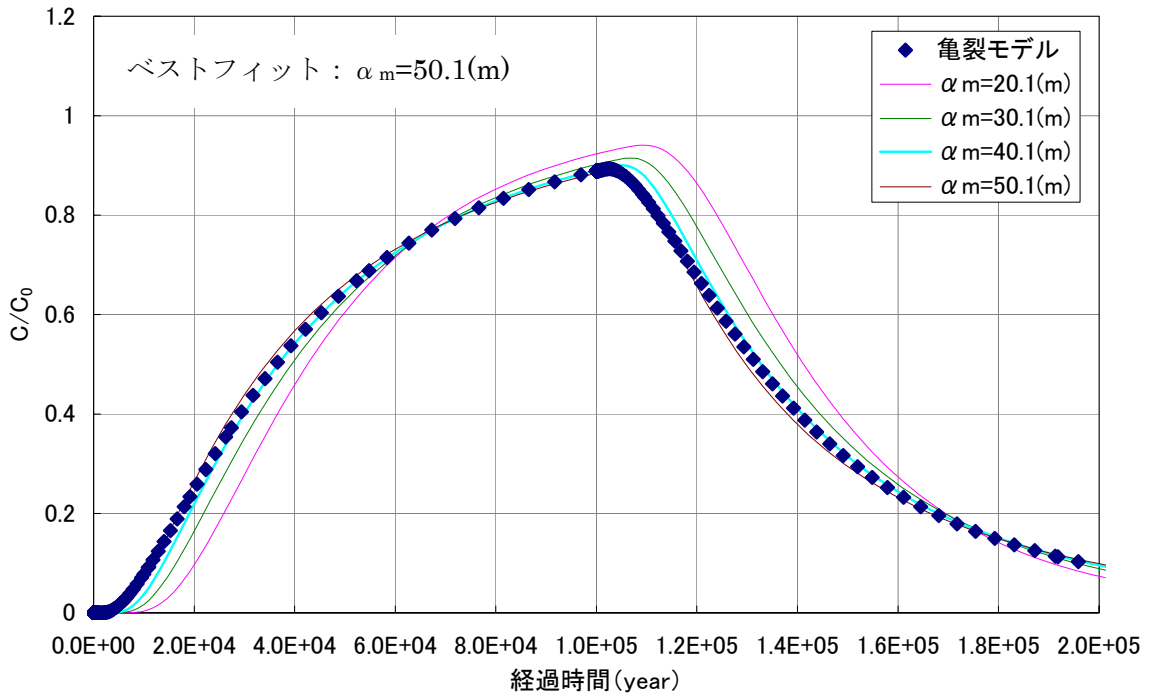


図 6.2- 13 フィッティング結果（亀裂密度：50%）

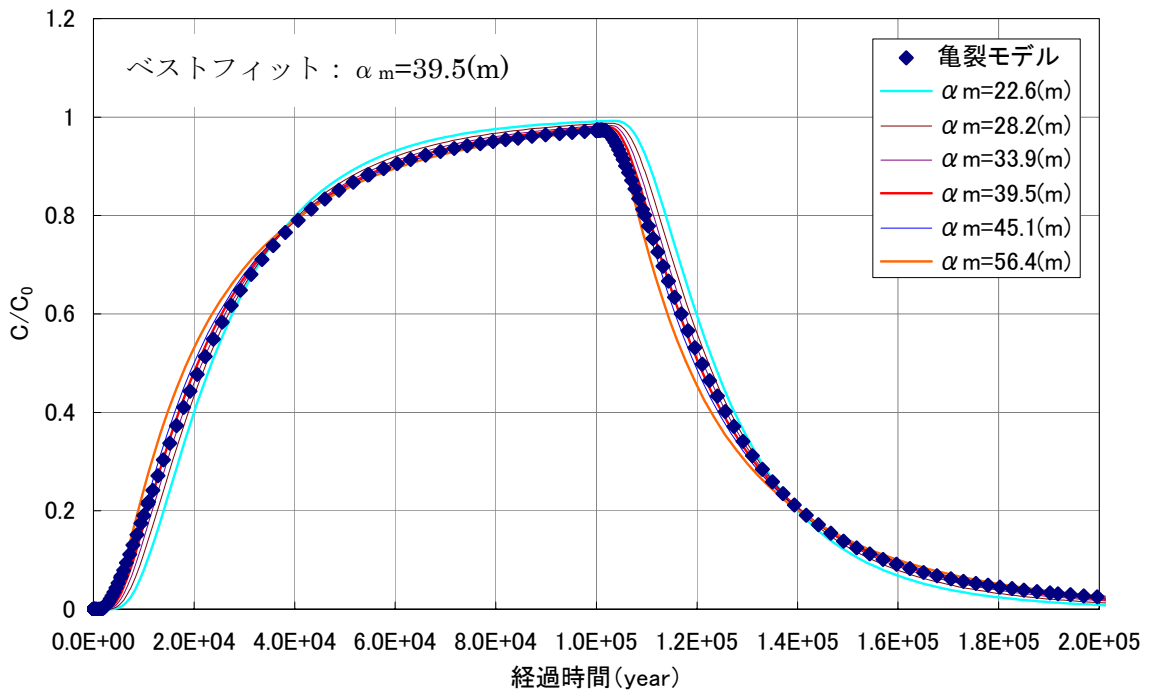


図 6.2- 14 フィッティング結果（亀裂密度：70%）

### 6.3 概念モデル化の検討

以下、本研究から得られた知見を整理し、亀裂を有する堆積性軟岩における物質移行概念モデルに関して検討する。

#### 6.3.1 室内試験結果のまとめ

##### (1) 透水性

- ① 亀裂を有しないインタクト部の透水係数は、声問層試料で  $1.27 \times 10^{-10} \sim 7.53 \times 10^{-10}(\text{m/s})$ 、勇知層試料で  $2.22 \times 10^{-10} \sim 4.09 \times 10^{-10}(\text{m/s})$  であり、昨年度に試験を実施した稚内層試料に比べて 2 オーダー程度大きいことが分かった。
- ② 亀裂を有する試料の透水係数は、声問層で  $1.36 \times 10^{-9} \sim 8.69 \times 10^{-10}(\text{m/s})$  であり、封圧の増加に伴う透水性の現象が確認された。勇知層については、インタクト試料と同等の透水係数であった。

以上より、今回対象とした試料においては、声問層試料については、亀裂試料の透水係数がインタクト試料の数倍程度大きく、亀裂中の流れが卓越すると考えられる。一方、勇知層試料については、亀裂試料とインタクト試料で同等の透水性を示すことから、インタクト部の空隙中の流れが卓越すると考えられる。

##### (2) 物質移行特性

###### ① マトリクス拡散係数

岩石マトリクス部の実効拡散係数を測定した結果、声問層で  $2.8 \times 10^{-10} \sim 6.78 \times 10^{-10}(\text{m}^2/\text{s})$ 、勇知層で  $9.5 \times 10^{-11} \sim 2.32 \times 10^{-10}(\text{m}^2/\text{s})$  の値が得られた。これは、既往データのうち、同一の有効空隙率を有する新第三紀堆積岩に比べて 1 オーダー程度大きな値である。

###### ② 分散長

亀裂を有する試料のトレーサー試験結果（声問層試料）を用いた FRACK3DVS によるフィッティングから、分散長として、 $0.001 \sim 0.035(\text{m})$  が得られた。この結果を既往の試験結果と比較すると、多少のばらつきはあるが、ほぼ同じトレンド上にある。従って、従来から指摘されている分散長とスケールの関係が、声問層試料についても同様の回帰直線により表せる可能性が示された。

###### ③ 物質移行開口幅

亀裂を有する試料のトレーサー試験結果から、物質移行開口幅として  $0.0047 \sim 0.0070\text{mm}$  が得られた。この幅は、透水係数から三乗則により逆算した水理開口幅と同等かもしくは、多少大きな値を示している。一般に、透水性に寄与する水理開口幅は、亀裂幅の狭いところの効果が卓越するのに対し、物質移行開口幅は、平均的な開口幅の影響を大きく受けるため、物質移行開口幅の方が水理開口幅よりも数倍以上大きくなることが報告されている。

今回の結果では物質移行開口幅／水理開口幅比は、最大で 1.9 程度であった。

また、花崗岩サイト（釜石鉾山原位置試験場）において、原位置スケールの亀裂に対して、物質移行開口幅  $e$  と透水量係数  $T$  の間に次の関係:  $e = 2\sqrt{T}$  が示されている (Shimo 他, 1999)。今回の試験結果は、この傾向とも整合的であるが、データ数が十分ではなく、結論付けることはできない。今後のデータの増加が期待される。

### 6.3.2 数値解析的検討のまとめ

#### (1) 亀裂部と岩石マトリクス部の物性値の組み合わせに関するパラメータスタディ

亀裂部と岩石マトリクス部の物性パラメータを変化させたときに生じる物質移行現象の変化を数値解析により確認するために、亀裂開口幅、マトリクス部の透水係数、マトリクス部の拡散係数に着目したパラメータスタディを実施した。その結果、今回採用したパラメータの範囲において、以下の知見が得られた。

- ① 亀裂開口幅の変化による破過曲線への影響は非常に大きく、亀裂開口幅が大きい程、トレーサー濃度の上昇速度は速くなる。
- ② マトリクス拡散による遅延の影響は、開口幅が大きくなる程小さくなる傾向にあるが、ある開口幅を境に、その傾向は逆転する。
- ③ マトリクス部の透水性が大きい程、破過曲線の濃度上昇速度は速くなる傾向があるが、この傾向は、亀裂開口幅の変化が与える影響に比べると小さい。
- ④ マトリクス拡散による遅延の影響は、マトリクス部の透水性との関連性は、ほとんどない。
- ⑤ マトリクス部の拡散係数が大きい程、破過曲線の濃度上昇速度は遅くなる傾向があるが、この傾向は、亀裂開口幅の変化が与える影響、マトリクス部の透水性の変化が与える影響に比べると小さい。
- ⑥ マトリクス拡散による遅延の影響は、マトリクス部の拡散係数が大きいほど、大きくなる。

#### (2) 岩盤のモデル化手法及び数値解析手法に関する考察

岩盤のモデル化手法の検討として、実スケールの岩盤における物質移行解析を想定し、岩盤を多孔質媒体でモデル化した場合と、亀裂ネットワークでモデル化した場合の解析結果の違いや問題点について考察を行った。その結果、以下のような知見が得られた。

- ① 堆積岩等の軟岩試料を対象とした、亀裂ネットワークを形成する岩盤において、解析領域内の亀裂密度により、破過曲線を多孔質媒体モデルでほぼ表現できる。
- ② 亀裂密度が大きい程、モデル全体の巨視的な不均質性は小さくなり、多孔質媒体モデルでもより正確な破過曲線を再現できる。

### 6.3.3 概念モデル化の検討

以上、今回得られた試験、解析結果を基に、亀裂を有する軟岩における物質移行概念モデルを検討する。

本研究で対象とした珪藻質泥岩に関していえば、次のような特性としてまとめられる。

- ・ 地下水流れに関しては、稚内層、声問層に関しては、粒子間隙よりも亀裂が卓越した水みちを形成する可能性が高いと考えられる。従って、流れに関しては、亀裂内の流れを考慮する必要があると考えられる。一方、勇知層に関しては、亀裂内の流れが支配的である可能性は低いと考えられ、亀裂内の流れを考慮する必要性は低いと考えられる。
- ・ 岩石マトリクス内の流れに関しては、稚内層試料では非常に遅い流れであることから、マトリクス内の移流は無視し得ると考えられるが、声問層試料に関しては、稚内層試料よりもマトリクス部の透水性が 2 オーダー程度高く、マトリクス内でもある程度速い流れが生じていると考えられる。したがって、声問層に関しては、今後、マトリクス内の移流分散を考慮する必要性について検討が必要である。
- ・ 物質移行特性に関しては、稚内層、声問層とも、地下水流れが亀裂に支配されるため、亀裂内の移流分散が支配的である。また、マトリクスの拡散係数が大きいため、マトリクス拡散による遅延効果がかかなり大きい。

以上から、幌延地域の亀裂を有する軟岩における物質移行の概念モデルに対して、次のように考えられる。

- ・ 稚内層、声問層については、基本的には「亀裂内移流分散+マトリクス拡散」という、花崗岩のような結晶質岩と同様の概念モデルが適用されるものと考えられる。但し、声問層については、マトリクス内の移流分散を考慮する必要性について検討が必要である。
- ・ マトリクス拡散の効果が非常に大きいため、岩石マトリクスと接し、水みちとなっている亀裂面の表面積を考慮した評価（Flow Wetting Surface）が必要と考えられる。
- ・ 勇知層については、今回の試験結果からは、亀裂が卓越した水みちを形成するような傾向は見られなかったため、マトリクス内の粒子間隙を主な移行経路としたモデルが適用される可能性が考えられる。しかし、データ数が少ないため、今後のデータの蓄積が必要である。
- ・ 亀裂ネットワークを形成するような岩盤においても、亀裂密度が大きく、巨視的スケールにおける不均質性が小さいケースにおいては、多孔質媒体モデルにより、破過曲線の形状を表現することが可能であることから、モデル化を行う際には、亀裂開口幅や分散長、マトリクス部の透水係数、拡散係数等のパラメータに加えて、モデル領域内の亀裂密度等も重要なパラメータとなる。

## 7. おわりに

本報告書では、亀裂を有する堆積性軟岩を対象として実施した室内実験（透水試験、トレーサー試験など）ならびに概念モデル化に関する数値解析的検討について取りまとめた。本試験により、既存データの極めて少ない泥岩における物質移行パラメータを求めることができた。また、モデル化に関する新たな知見を得ることができた。今後は、亀裂を有する堆積岩内の物質移行概念モデルの構築に役立てていきたい。

参考文献

- [1] Therrien,R.,E.A.Sudicky : “Three-dimensional analysis of variably-saturated flow and solute transport in discretely-fractured porous media”, J. Contaminant Hydrology, 23, pp.1-44, (1996).
- [2] Tang, D. H., E.O. Frind, E.A.Sudicky : “Contaminant transport in fractured porous media: analytical solution for a single fracture”, Water Resources Research, Vol.17, No.3, pp.555-564, (1981).
- [3] Mavko,G, T. Mukerji, Dvorkin, J.: “The rock physics handbook ; tools for seismic analysis in porous media”, Cambridge University Press, (1998).
- [4] 井尻裕二、澤田淳、赤堀邦晃 : “我が国の岩盤の水理特性について”、核燃料サイクル開発機構、JNC TN 8400 99-090、(1999).
- [5] 渡辺邦夫 : “山地地下水解析上の諸問題 (その 3) ”、地下水と井戸とポンプ、第 26 巻、第 11 号、pp. 2-8、(1984).
- [6] 辻隆司、横井悟 : “北海道天北地域における新第三系珪質岩中の炭化水素トラップ”、石油技術協会誌、第 59 号、第 4 号、pp. 284-295、(1994).
- [7] 西山勝栄、中嶋悟、多田隆治、内田隆 : “岩石間隙水中のイオンの拡散と間隙の性質”、鉱山地質、40、pp.323-336、(1990).
- [8] 喜多治之、岩井孝幸、中嶋悟 : “花崗岩および凝灰岩間隙水中のイオンの拡散係数の測定”、応用地質、第 30 巻、第 2 号、pp.26-32、(1989).
- [9] 五十嵐敏文、田中靖治、河西基 : “難透水性岩盤の透水および溶質移行特性 (その 2) - 単一割れ目を通しての溶質移行 - ”、電力中央研究所報告、U00011、(2001).
- [10] Brace, W.F., et al : “Permeability of Granite under High Pressure”, J. of Geophysical Research, Vol.73, No.6, pp.2225-2236, (1968)
- [11] Hsieh, P.A., et al : “Transient Laboratory Method for Determining the Hydraulic Properties of ‘Tight’ Rocks – I Theory”, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. , Vol. 18, pp.245-252, (1981)
- [12] 核燃料サイクル開発機構 : “わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性



「地層処分研究開発第2次取りまとめ」、分冊3 地層処分システムの安全評価、核燃料サイクル開発機構、JNC TN1400 99-023、(2000).

- [13] Shimo M., Yamamoto H., Uchida M., Sawada A., Doe T. W., Takahara, Y. : “In-situ test on fluid flow and mass transport properties of fractured rocks”, Proc.9th ISRM Congress, Vol. 2, pp.1401-1404, (1999).