

亀裂を有する軟岩中の流れと 移行現象に関する研究 (概要版)

(核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書)

2003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)

2003

2003 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（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*、山本肇*、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。

核燃料サイクル開発機構では、岩盤中の物質移行特性に関し、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）に分けて研究を行ってきた。その中で、軟岩では粒子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、軟岩コア試料を対象とした室内試験を行なったものである。

室内試験では、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-4 号孔）で採取された珪藻質泥岩コアを試験対象とし、鉱物種 / 空隙形状に関する観察 / 分析を行うとともに、埋没深度に伴う岩石構造の変化や深度に伴う封圧の増加の 2 点に着目して、透水試験及びトレーサー試験を実施し、透水係数ならびに物質移行パラメータ（物質移行開口幅ならびに分散長）の変化を調べた。また、岩石マトリクス部の拡散係数を実測した。

本試験結果により、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。これは、亀裂を有する堆積岩内の物質移行概念モデルを構築する上で貴重なデータとなる。

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, 2003

Study on flow and mass transport through fractured soft sedimentary rocks

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

Michito Shimo^{*}, Hajime Yamamoto^{*}, Sou Kumamoto^{*}

Abstract

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

In this fiscal year, this study was carried out for two tasks: (1) classification of soft sedimentary rocks by literature survey, (2) laboratory experiments on the flow and mass transport using rock specimens obtained at HDB-4 borehole in Horonobe Deep Underground Research Center.

Classification of soft sedimentary rocks is carried out using two databases of rock properties collected by JNC and Geological Survey of Japan.

In laboratory experiments, core samples of the Tertiary siliceous mud rock obtained from the HDB-4 borehole, which was excavated in the Horonobe area in this year, were studied. The matrix porosity of intact cores measured by wet and dry weight was ranging from 33% to 41%. The hydraulic conductivities of rock matrix determined by the transient pulse test were in an order of 10^{-11} m/s. The effective diffusion coefficients obtained from the “through diffusion test” were 0.8 to 2.5×10^{-11} m²/s. This suggested that, in these cores, the flow in the rock matrix is not significant comparing with the flow in fractures, and the matrix diffusion from fractures into rock matrix should cause a significant effect to the mass transport phenomenon.

Non-sorbing tracer experiment was conducted in fractured cores. As a tracer, potassium iodide solution was injected at a constant rate and the tracer concentration change during injection was observed at the outlet. The obtained breakthrough curve was interpreted and fitted by using a numerical simulator for flow and mass transport called FRAC3DVS (Therrien et al., 1999), and finally, mass transport parameters are obtained. The result indicates that the matrix diffusion plays an important role for mass transport in the fractured soft sedimentary rocks.

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	試料採取	7
4.1	採取地点	7
4.2	採取方法	7
4.3	採取深度及び数量	9
5	試料分析	10
5.1	分析項目	10
5.2	基本物性測定	10
5.3	X線分析	12
5.4	顕微鏡観察	13
5.5	空隙観察	13
6	透水試験	15
6.1	試験方法	15
6.2	試験ケース	16
6.3	試験結果	16
7	拡散実験	19
7.1	試験方法	19
7.2	試験ケース	20
7.3	試験結果	20
8	トレーサー試験	22
8.1	試験方法	22
8.2	試験ケース	23
8.3	試験結果	24
8.4	解析結果	26
9	モデル化の検討	33
9.1	室内実験結果のまとめ	33

9.2	数値解析的検討	34
9.3	概念モデル化の検討	35
10	おわりに	36
	参考文献	37

目 次

図 2-1	研究のフロー	2
図 3-1	弾性波速度と有効空隙率（孔隙率）の関係 （JNC + 深部岩石データベース、片対数軸）	5
図 3-2	弾性波速度と空隙率の関係（Han 他., 1986）	5
図 3-3	空隙率と P 波速度の関係（J.Dvorkin 他）	6
図 3-4	一軸圧縮強度と有効空隙率（孔隙率）の関係 （JNC データベース + 深部岩石データベース、片対数軸）	6
図 4-1	試錐位置図（核燃料サイクル開発機構幌延深地層研究センター）	8
図 5-1	基本物性値測定結果（幌延 HDB-4 号孔）	11
図 5-2	粉末式 X 線分析結果（HDB-4 号孔、深度 200m 付近）	12
図 5-3	水銀圧入式細孔分布測定による孔口径分布（辻他、1994）	14
図 6-1	トランジェントパルス透水試験装置概要	15
図 6-2	定流量透水試験装置	15
図 6-3	トランジェントパルス透水試験結果（試料名：2.1i）	17
図 6-4	亀裂試料における封圧と透水量係数の関係	18
図 7-1	拡散実験装置概要	19
図 7-2	拡散実験装置および供試体の概観	19
図 7-3	拡散実験結果（試料名：2-2i）	21
図 7-4	実効拡散係数と有効空隙率の関係（既往データとの比較）	21
図 8-1	トレーサー試験装置の概要	22
図 8-2	トレーサー試験結果（試料名：2-1f、封圧：2.4MPa）	25
図 8-3	トレーサー試験の解析条件	27
図 8-4	トレーサー試験の解析結果（試料名：2-1f、封圧：2.4MPa）	29
図 8-5	物質移行開口幅と水理開口幅の関係	30
図 8-6	透水量係数と物質移行開口幅の関係	31
図 8-7	透水量係数と物質移行開口幅の関係（釜石原試験データとの比較）	31
図 8-8	分散長と試験スケールとの関係（既往データとの比較）	32
図 9-1	数値解析によるマトリクス拡散の遅延効果	34

表 目 次

表 4.3-1	採取深度一覧	9
表 4.3-2	試験用試料一覧	9
表 5.1-1	試料分析項目一覧	10
表 5.2-1	基本物性測定結果一覧表	10
表 5.3-1	X線分析結果（不定方位、粉末法）	12
表 5.5-1	ブルーレジンを注入による空隙率測定結果一覧表	14
表 6.2-1	透水試験ケース（亀裂無し試料）	16
表 6.2-2	透水試験ケース（亀裂有り試料）	16
表 6.3-1	透水試験結果一覧（トランジェントパルス透水試験、亀裂無し試料）	18
表 6.3-2	透水試験結果一覧（定流量透水試験、亀裂有り試料）	18
表 7.2-1	拡散試験ケース	20
表 7.2-2	試験条件一覧	20
表 7.3-1	拡散実験結果一覧	21
表 8.2-1	トレーサー試験ケース	23
表 8.2-2	トレーサー試験条件一覧	23
表 8.4-1	解析入力条件一覧	26
表 8.4-2	トレーサー試験解析結果一覧表	30

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、堆積性軟岩のコア試料を対象とした物質移行特性に関する室内実験（透水試験、トレーサー試験）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コア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) 軟岩コア試料の採取
- (3) 軟岩コア試料のX線分析
- (4) 軟岩コア試料を対象とした透水試験
- (5) 軟岩コア試料を対象としたトレーサー試験
- (6) モデル化に関する検討

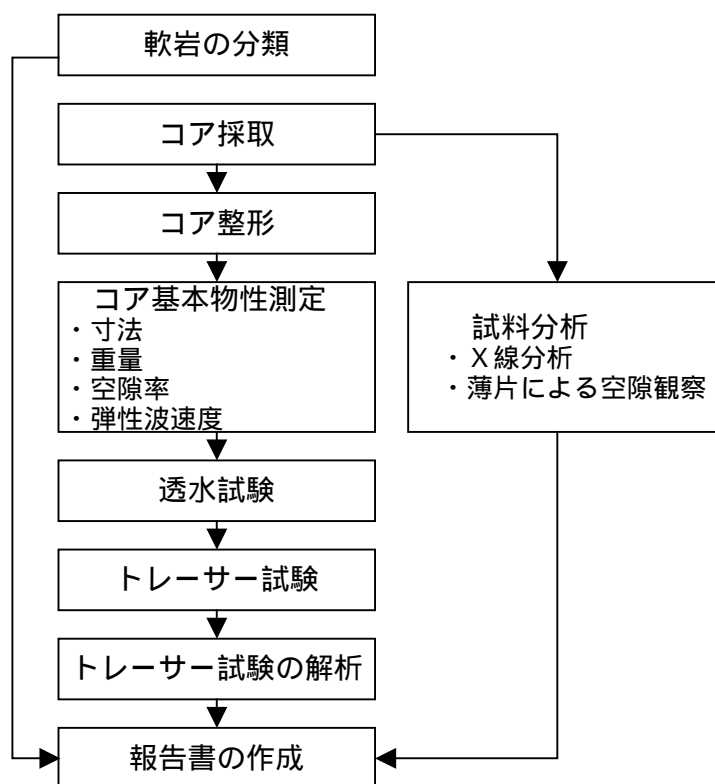


図 2-1 研究のフロー

(1) 軟岩の分類

文献調査等により、我が国の軟岩の基本物性（一軸圧縮強度、弾性波速度など）を整理し、地質学的要因（例えば、続成作用の程度）と対比する。さらに、物質移行特性と関連の深い要因（空隙構造や亀裂の発達度合い（空隙率、RQD））との比較も行う。

(2) 軟岩コア試料の採取・整形

室内実験に供する軟岩試料を採取する。基本物性である一軸圧縮強度、弾性波速度をインデックスとし、これらのインデックスの異なる3箇所を選定して軟岩コアを採取する。また、各箇所の軟岩について、亀裂を有する試料と有しない試料を取得する。亀裂は自然亀裂を基本とするが、採取箇所の条件により採取が困難な場合には、委託者と協議の上で割裂により人工亀裂を作成する。

(3) 軟岩コア試料の分析

採取した軟岩試料について、X線分析および薄片観察による鉱物分析を行う。また、内部空隙構造を把握するため、試料を染色液（ブルーレジン等）を用いて空隙内を染色した後、空隙構造の観察を行う。

(4) 軟岩コア試料を対象とした透水試験

(2)で採取した全ての軟岩コア試料を対象として、原位置地下を模擬した条件下での透水試験を実施し、各々の試料の透水係数を求める。試験方法には、低透水性岩石の透水試験手法として実績のあるトランジェントパルス法を用いる。ただし、透水性が高い場合には、定流量透水試験を行う。

(5) 軟岩コア試料を対象としたトレーサー試験

(4)で透水試験を実施した亀裂を有する軟岩試料を対象とし、原位置地下を模擬した条件下での非吸着性トレーサー試験を実施する。試験から得られる破過曲線を解析し、分散係数ならびに物質移行開口幅を求める。亀裂を有しない岩石試料については、拡散セル試験により、拡散係数を求める。

(6) モデル化に関する検討

(3)～(5)の試験結果をもとに、以下の点について検討・考察を行う。

- ・軟岩試料による透水係数、分散係数、有効空隙率の違い
- ・亀裂を有する軟岩における物質移行現象の概念モデル

3 軟岩の分類

我が国における堆積軟岩（岩石マトリクス部）の力学特性値（弾性波速度や一軸圧縮強度）を、既往データベースを利用して収集・整理した。各データベースの収録データ数は以下の通りである。

JNC 岩石・岩盤物性データベース：5381（新第三紀堆積岩 1363）

本邦産岩石の深部物性データ集：518（新第三紀堆積岩 266）

上記のデータのうち、新第三紀堆積岩を対象とし、弾性波速度、一軸圧縮強度と有効空隙率（孔隙率）の関係を整理した。ただし、整理では、比較のため、古第三紀堆積岩もあわせてその対象とした。その結果分かったことは次の通りである。

（1）弾性波速度

- ・ 弾性波速度（P波速度）は、有効空隙率（孔隙率）と良い相関が見られた（図 3-1）。そのばらつき範囲は、概ね $\pm 1\text{km/s}$ の範囲に収まる。
- ・ 弾性波速度は、空隙率だけでなく、粘土含有率やセメンテーションの程度と関連が指摘されている（図 3-2、図 3-3）。今後のデータ蓄積により、対象とする軟岩の堆積環境や続成作用の違いの簡易判別に利用できる可能性がある。
- ・ 平成 13 年度に取得された幌延深地層研究センターの HDB-1 号および HDB-2 号孔のデータを、今回収集したデータと比較した（図 3-1）。その結果、有効空隙率が同程度であれば、今回の国内データ中での上限付近の弾性波速度を有している。これは、岩種が珪藻質泥岩であり、粘土含有率が非常に少ないためと考えられる。また、地層上位より、声問層 稚内層 増幌層の順に、有効空隙率の減少ならびに弾性波速度の増加が見られる。

（2）一軸圧縮強度

- ・ 一軸圧縮強度は、片対数グラフ上において、有効空隙率（孔隙率）と弱い相関が見られた（図 3-4）。
- ・ 有効空隙率（孔隙率）に対する一軸圧縮強度のばらつきが大きく、弾性波速度と比べ、有効空隙率（孔隙率）以外の要因（例えば、造岩鉱物の強度など）の影響を強く受けているものと考えられる。

以上から、力学特性値（特に弾性波速度と有効空隙率（孔隙率）の関係）は、堆積環境や続成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。

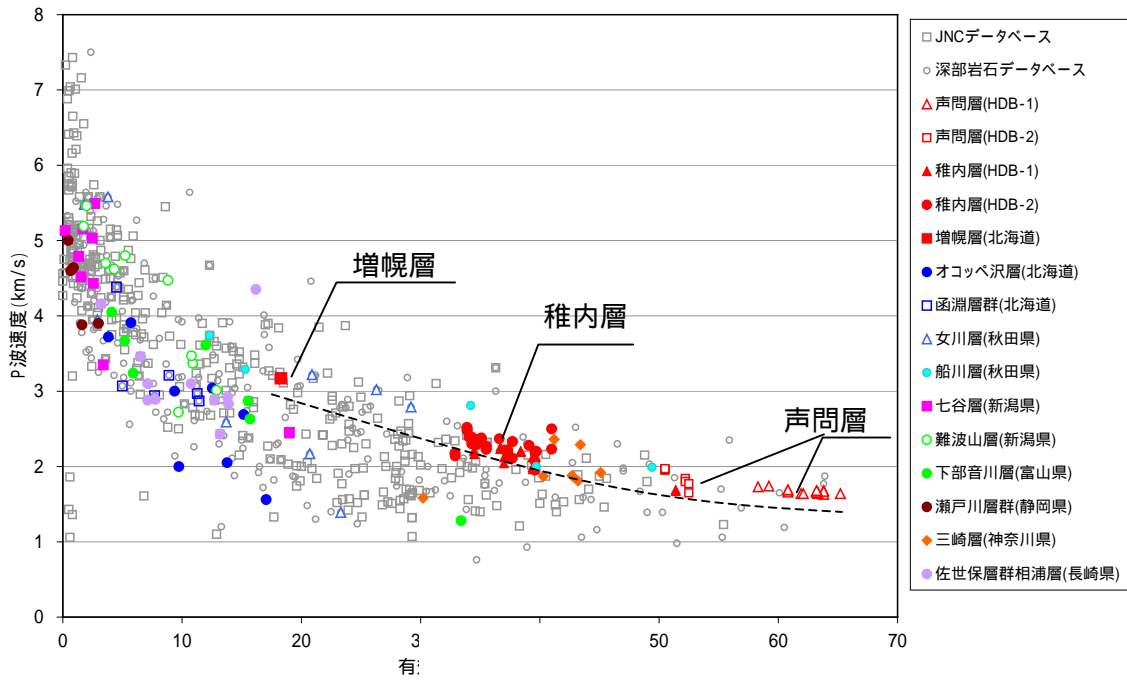


図 3-1 弾性波速度と有効空隙率（孔隙率）の関係
（JNC + 深部岩石データベース、片対数軸）

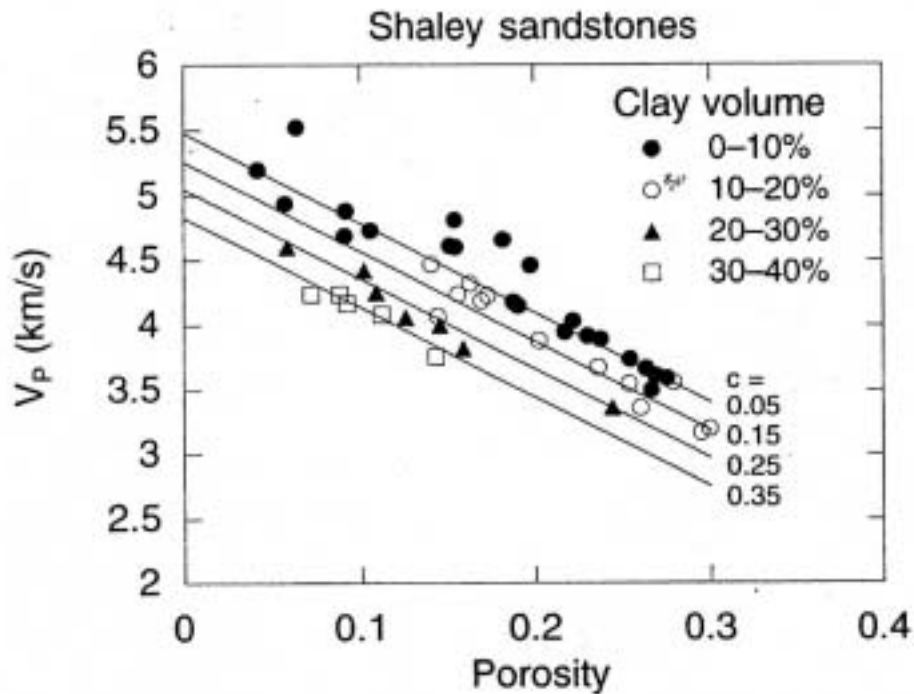


図 3-2 弾性波速度と空隙率の関係（Han 他., 1986）

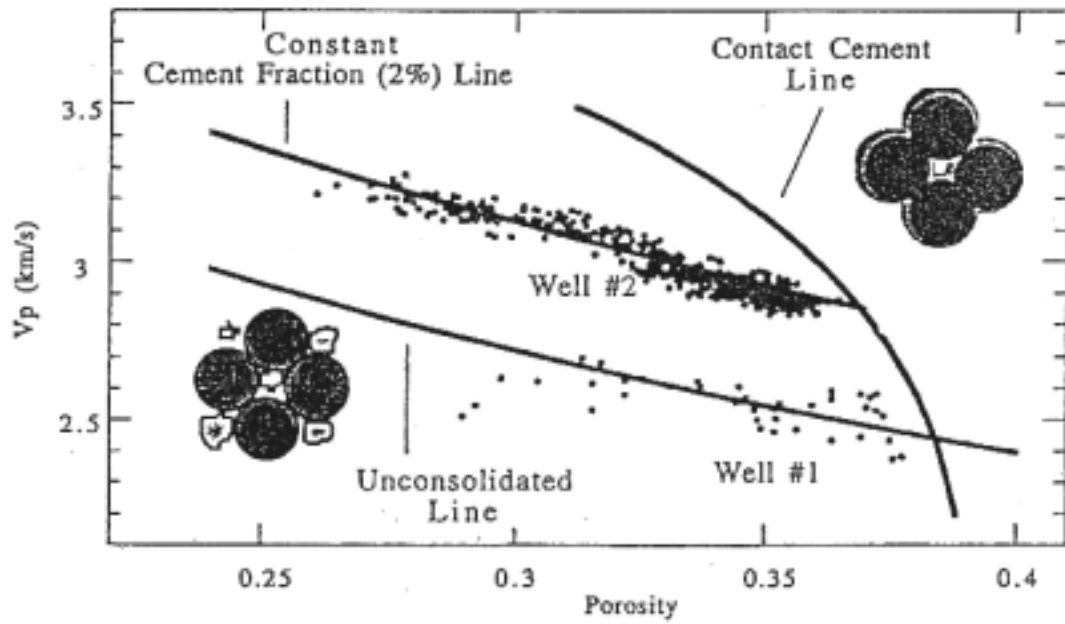


図 3-3 空隙率と P 波速度の関係 (J.Dvorkin 他)

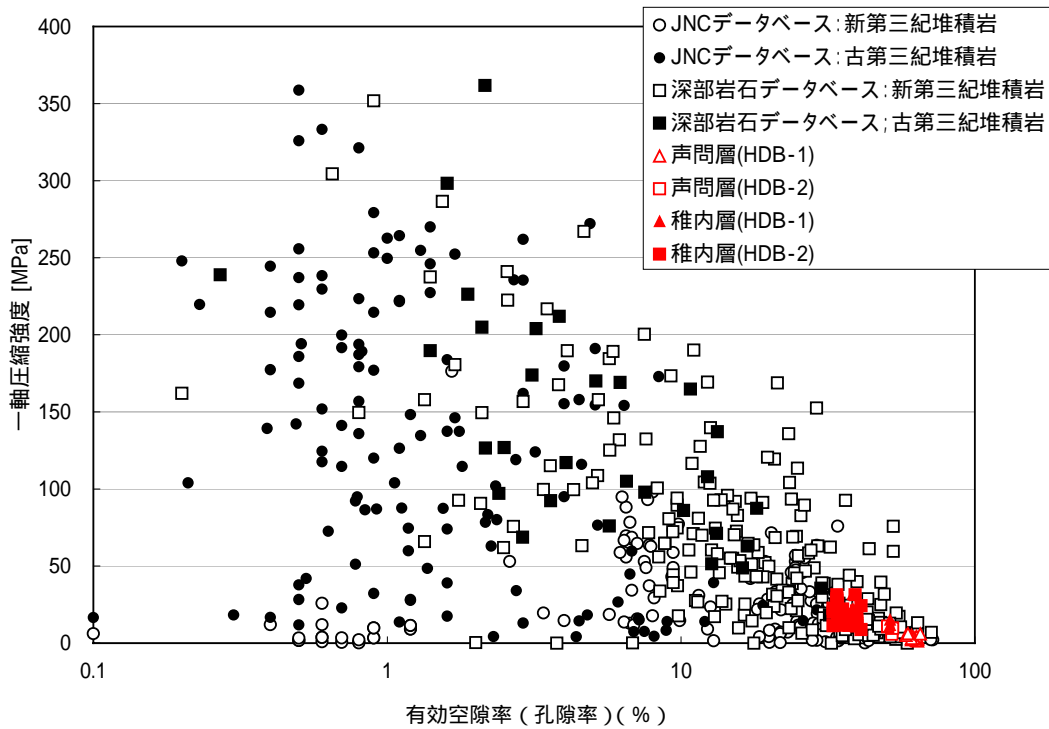


図 3-4 一軸圧縮強度と有効空隙率 (空隙率) の関係
(JNC データベース + 深部岩石データベース、片対数軸)

4 試料採取

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14年度に掘削した試錐孔（HDB-4孔）において、透水・トレーサー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 採取地点

幌延深地層研究センターの試錐孔（HDB-4孔）の位置を図4-1に示す。同試錐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。

4.2 採取方法

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。HDB-4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。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。特に、再コアリング時にビットの摩擦による試料の崩壊が懸念された。そこで、コアの乾燥を防ぐため、コアの包装には十分留意した。

再コアリング時の方向は、亀裂無しの試料の場合はコア軸と直交方向、亀裂有り試料の場合は、亀裂面と平行な方向とした。亀裂面がコア側面に対して斜めに入っていると、再コアリングが困難となるため、亀裂面とコア軸が平行あるいは直交するコアを採取対象とした。試験用試料の選定にあたっては、以下の点に留意した。

- ・ 岩石インタクト部ができるだけ均質で、変質の少ないこと（目視による）。
- ・ 亀裂面の分離が認められないこと（密着亀裂）。

明瞭な亀裂（構造的な亀裂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、岩芯観察図上に破線で示される密着亀裂を対象として採取箇所を決定することとした。

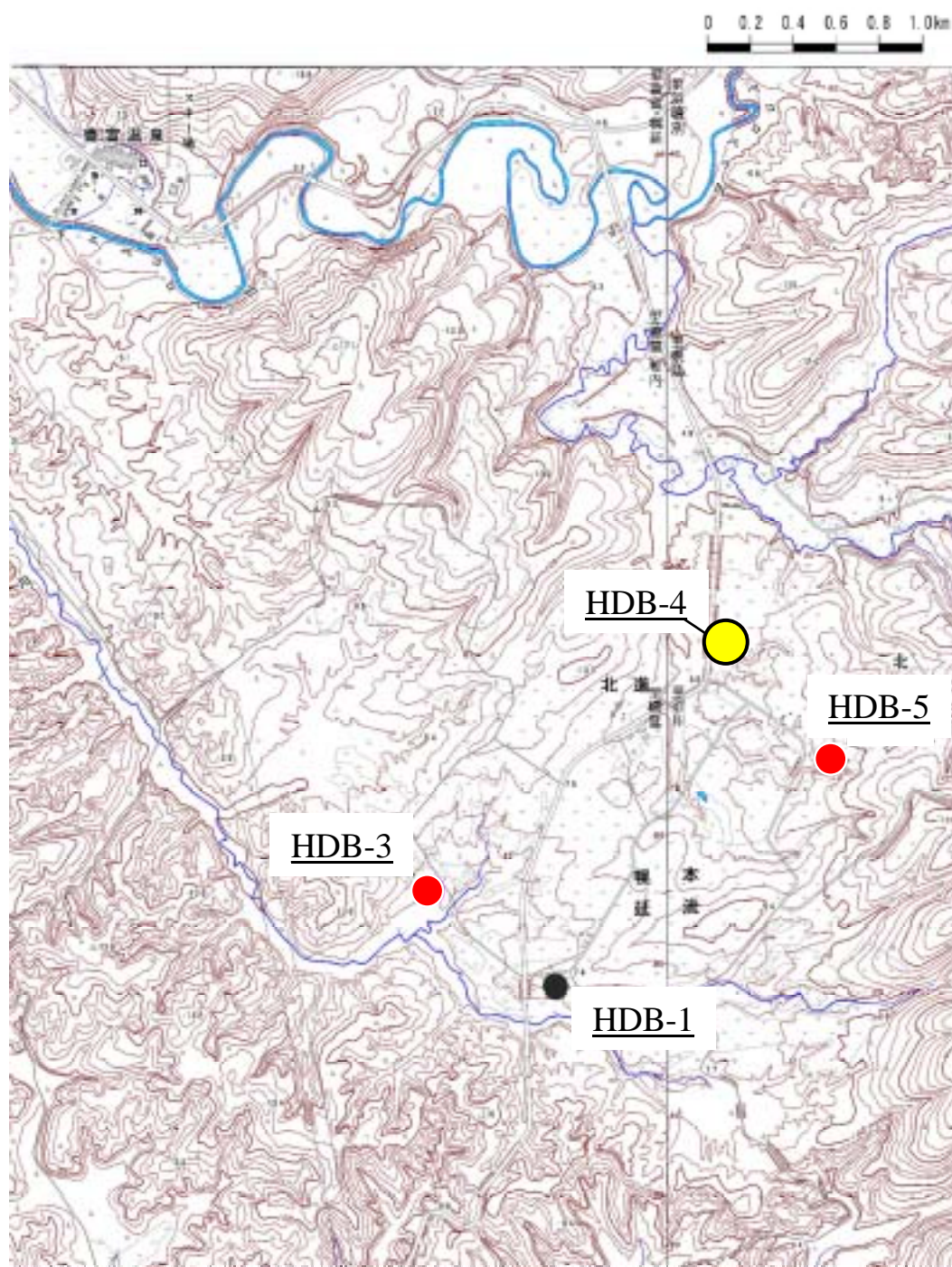


図 4-1 試錐位置図 (核燃料サイクル開発機構幌延深地層研究センター)

4.3 採取深度及び数量

HDB-4 孔の 3 深度 (200m 付近、300m 付近、450m 付近) において、表 4.3-1 に示す 4 本のコアを採取した。

表 4.3-1 採取深度一覧

コア No	採取深度		採取長 (m)	地質	変質	亀裂の有無	亀裂の状態	亀裂面とコア軸角度	コアの状況	採取日
1	200m	195.0 ~ 195.7	0.7	稚内層	非変質	有	密着	70° (岩芯記載)	棒状	2002年 11月20日
2	300m	315.7 ~ 316.0	0.3			有	密着	コア軸に平行		2002年 12月16日
3		314.0 ~ 314.4	0.4			無	-	-		2002年 12月29日
4	450m	441.5 ~ 442.0	0.5			有	密着	コア軸に平行		2002年 12月29日

次に、上記の試錐孔のコアから再コアリングを行い、試験用試料を、表 4.3-2 の通り採取した。採取した試料から、さらに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。選定した試料番号を表 4.3-2 中の下線で示した。

表 4.3-2 試験用試料一覧

コアNo	採取深度 (m)		地質	採取条件	採取数量	試験用試料数量	採取試料名称 下線：試験用試料
1	200m 試料	195.0 ~ 195.7	稚内層	亀裂有り	2	1	<u>2-1f</u> , 2-2f
				亀裂無し	2	1	<u>2-1i</u> , 2-2i
2 3	300m 試料	315.7 ~ 316.0 314.0 ~ 314.4		亀裂有り	4	1	3-1f, <u>3-2f</u> , 3-3f, 3-4f
				亀裂無し	5	1	3-1i, <u>3-2i</u> , 3-3i, 3-4i, 3-5i
4	450m 試料	441.5 ~ 442.0		亀裂有り	3	1	<u>4-1f</u> , 4-2f, 4-3f
				亀裂無し	2	1	<u>4-1i</u> , 4-2i
計					18	6	

5 試料分析

5.1 分析項目

HDB-4 孔の 3 深度 (200m 付近、300m 付近、450m 付近) の採取コアを対象とし、基本的な物性値 (比重、有効空隙率、弾性波速度等) を測定した後、以下の 2 点を目的として、試料分析を行った。測定ならびに分析の実施項目ならびに数量を表 5.1-1 に示す。

珪藻質泥岩の続成作用の変化を調べること

岩石の空隙率および空隙構造の特徴を把握すること

表 5.1-1 試料分析項目一覧

項目	仕様	数量	備考
基本物性値測定	比重、有効空隙率、弾性波速度 含水比、飽和度、吸水率	3 試料	3 深度(200m、315m、450m)につ き、各 1 試料
X 線分析	粉末 X 線分析	3 試料	"
顕微鏡観察	ポイントカウント法	3 試料	"
空隙観察	ブルーレジンを注入 + ポイントカウント法	3 試料	"

5.2 基本物性測定

基本物性値の測定結果を表 5.2-1 に示す。測定は、3 深度から各 1 試料について行った。各測定値と深度との関係を示したグラフを図 5-1 に示す。この図から、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。また、同図中に合わせて示した、幌延新地層研究センターにて別途実施された測定結果と整合的である。平均的な岩石と比較すると、比重は、自然状態で 1.9 ~ 2.0 と軽く、有効空隙率は 33% ~ 41% と大きい。

表 5.2-1 基本物性測定結果一覧表

試料名称		2-2i	3-3i	3-4i	4-2i
採取深度	始点深度 (m)	195.0	314.0	314.0	441.5
	終点深度 (m)	195.7	314.4	314.4	442.0
	中間深度 (m)	195.4	314.2	314.2	441.8
比重	自然状態の比重 : n (g/cm^3)	1.879	1.910	1.911	2.005
	強制乾燥状態の比重 : d (g/cm^3)	1.465	1.526	1.527	1.673
	強制湿潤状態の比重 : t (g/cm^3)	1.879	1.910	1.911	2.005
含水比	自然状態の含水比 : (-)	0.283	0.252	0.252	0.199
飽和度	自然状態の飽和度 : S_r (%)	100	100	100	100
有効空隙率	有効空隙率 : n_e (%)	41.4	38.5	38.4	33.2
吸水率	吸水率 : ab (%)	28.3	25.2	25.2	19.9
弾性波速度	P 波速度 (km/s)	2.70	2.80	2.70	2.60
	S 波速度 (km/s)	0.98	1.12	1.10	1.15

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。

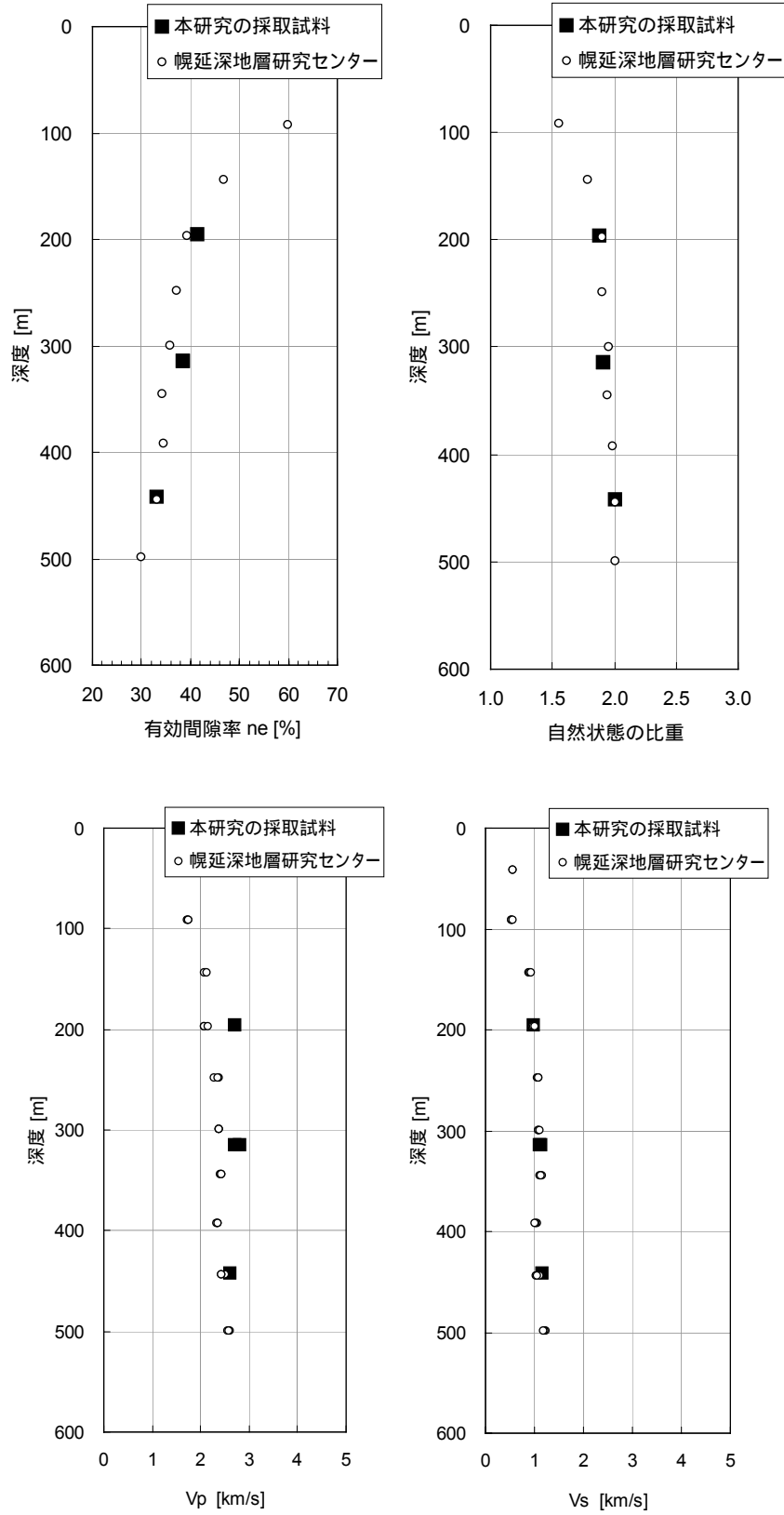


図 5-1 基本物性値測定結果 (幌延 HDB-4 号孔)

5.3 X線分析

表 5.1-1に示した3試料に対して、不定方位（粉末法）で測定を行った。X線解析チャートの一例を図 5-2に示す。図中に、オパールCTのピークを下向き矢印で示した。この図から、オパールCTの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CT 石英の中で、オパールCTのゾーンに区分されることが示される。その他の深度の試料についても基本的に同様の結果であるが、特に 200m 試料では、他の試料と比べてピークが弱くなっていることから、深度の浅い 200m 試料は、その上位に存在すると想定されるオパールAゾーンと下位のオパールCTゾーンとの遷移部にあたるものと考えられる。

他の鉱物も含め、各鉱物のおおよその含有量を推定した結果を、表 5.3-1に示す。本試料は、オパールCTが相対的に多い岩石であると推定される。

表 5.3-1 X線分析結果（不定方位、粉末法）

順番	試料深度 m	地質	シリカ 鉱物			長石		粘土 鉱物				備考		
			石英	オパールCT	オパールA	カリ長石	斜長石	菱鉄鉱	黄鉄鉱	スメクタイト	緑泥石		雲母類	カオリン
1	200	珪藻質泥岩			?	+				?				
2	315	珪藻質泥岩			?	-		+		?	+			
5	400	珪藻質泥岩			?	+		+		?	+			

凡例： 多量， 中量， 少量， 少量？ 微量， + 微量， - 極微量， ? 存在する可能性がある。

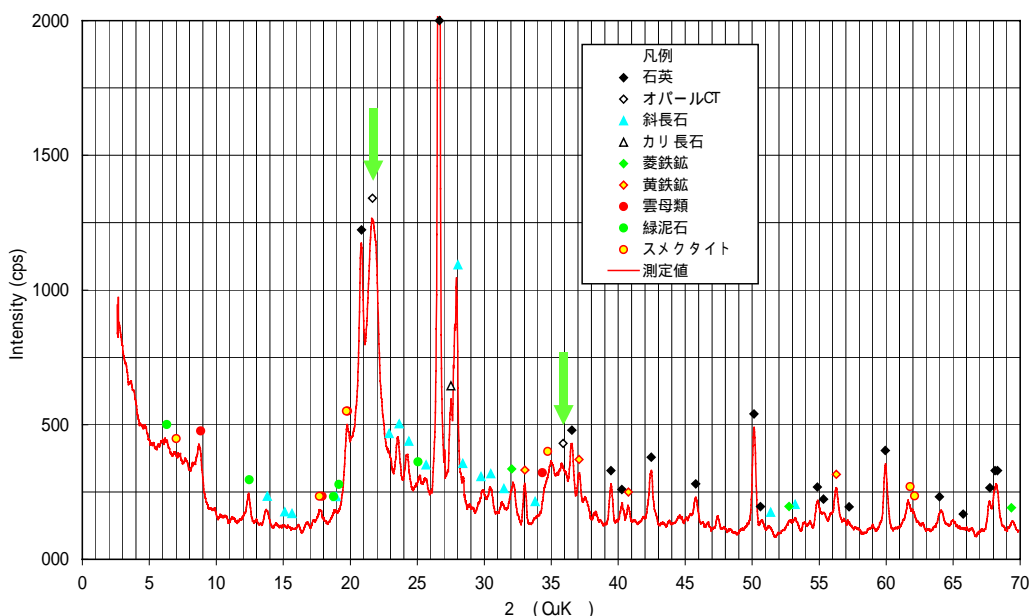


図 5-2 粉末式 X線分析結果（HDB-4 号孔、深度 200m 付近）

5.4 顕微鏡観察

偏光顕微鏡観察は、試料鉱物組成や珪藻化石の有無を同定することを目的として実施した。薄片製作では、試料全体の代表的な部分を選択し、縦 20～23mm、横 27～29mm のチップを切断し、試料の状況により樹脂充填した後、厚み 30 μ m 程度の薄片に研磨した。最終的には、カバーガラスと同サイズの縦 22mm、横 26mm に仕上げた。なお、薄片の面は、試錐コアの削孔方向と平行な方向とした。

5.5 空隙観察

空隙率測定は、岩石試料にブルーレジンを注入した後、薄片を作成して、偏光顕微鏡下で岩石全体に対する空隙部の面積比を求めた。本測定では空隙を種類別に分けて計測した。

測定条件は、測定器械の性能および試料（薄片）の大きさを考慮し設定する。本試料の測定条件は以下の通りに設定した。

- ・測定面積 14mm × 24mm=336mm²
- ・測定点の間隔 長軸方向 1mm、短軸方向に 0.3mm
- ・測定点数 1000 ポイント

今回の測定で見られた空隙の種類について、以下に述べる。

脈（割れ目）は幅 0.01～0.005mm の極微細なものが主であった。化石片として珪藻と有孔虫が存在する。直径 0.05mm 以下の球状・棒状を呈する珪藻の可能性があるものは、内部全体にブルーレジンを充填されている場合が多かった。球状～半球状の有孔虫の可能性があるものは、内部全体の場合と、殻部分に炭酸塩鉱物が残存し殻内部が空隙になっておりブルーレジンを充填されている場合とがあった。どちらの化石片も岩石試料中に含まれる全ての遺骸にブルーレジンを注入されているのではなく、殻物質が残存し注入されなかったものや内部が空隙のままのものも存在した。

不透明鉱物の集合体は、極微小な球状の不透明鉱物（黄鉄鉱の可能性）が集合するもので、その近傍を含めてブルーレジンを充填されていた。これらは化石片の形状は認められないが、不透明鉱物によって置換された化石片片に僅かに空隙が存在していて、その部分にブルーレジンを充填された可能性が考えられる。

石英・長石片の集合体は長径 0.05mm 以下の石英・長石の碎屑片が集合し長径 0.1～0.05mm の不定形な集合体を作るもので、ブルーレジンはその近傍も含めて充填されていた。これらの碎屑片間に基質が存在せず空隙になっていた可能性がある。

碎屑片の抜け落ち跡は、碎屑片形状の空隙にブルーレジンを充填されているものである。

空隙観察結果を表 5.5-1 に示す。得られた空隙率は、200m 試料：0.9%、315m 試料：0.4%、400m 試料：1.3% となった。これは、乾燥・湿潤重量から求められた有効空隙率：33%～41% に比べて非常に小さい。この点に関して以下に考察する。辻他(1994)は、北海道天北地域の稚内層と増幌層からなる坑井試料を用い、水銀圧入式細孔分布測定装置（水銀ポロシメータ）により、孔口径分布を求めている。その結果を図 5-3 に示す。

同図中には、オパールCTゾーンと石英ゾーンの最小孔口径と空隙率の関係が示されている。今回の試料は、前述のX線分析結果により、オパールCTゾーンに属することが分かっている。そこで、同図中からオパールCTゾーンの孔口径分布（、）を見ると、全体の空隙（空隙率：35%～50%）の殆どが、孔径0.1μm以下の微小空隙によって占められているのが分かる。この結果によれば、今回の顕微鏡観察で得られた空隙率が0.1%程度と非常に小さいのは、顕微鏡により観察しうる空隙径が大きく、0.1μm以下の微細空隙がカウントされなかったためと考えられる。

表 5.5-1 ブルーレジンを注入による空隙率測定結果一覧表

空隙の種類	200m		315m		400m	
	カウント数	%	カウント数	%	カウント数	%
化石片(球状・珪藻の可能性)	1	0.1	1	0.1	2	0.2
化石片(棒状・珪藻の可能性)	1	0.1		0.0	1	0.1
化石片(有孔虫の可能性)		0.0	1	0.1		0.0
脈(割れ目)	5	0.5		0.0	6	0.6
不透明鉱物の集合体(化石片?)		0.0	1	0.1		0.0
石英・長石片の集合体		0.0		0.0	3	0.3
碎屑片の抜け落ち跡	2	0.2	1	0.1	1	0.1
合計	9	0.9	4	0.4	13	1.3

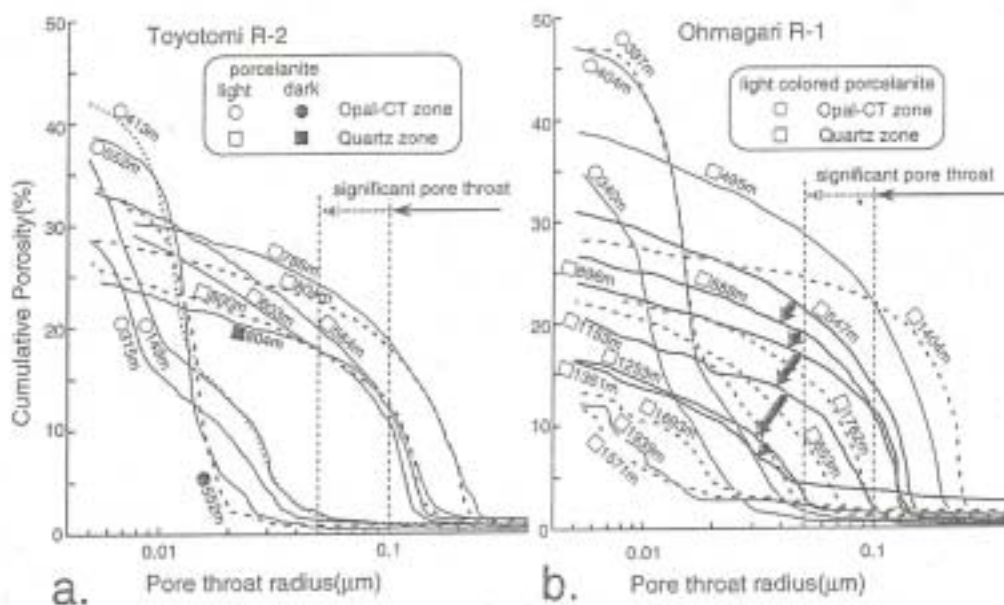


図 5-3 水銀圧入式細孔分布測定による孔口径分布（辻他、1994）

6 透水試験

透水試験は、試料の透水性に応じて試験方法を変えて実施した。亀裂の無い試料に関しては、透水係数が非常に低いことが想定されたため低透水性岩石に対して実績のあるトランジェントパルス法を用いた。亀裂有りの試料については、定流量透水試験を実施した。

6.1 試験方法

6.1.1 トランジェントパルス透水試験

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を図 6-1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。

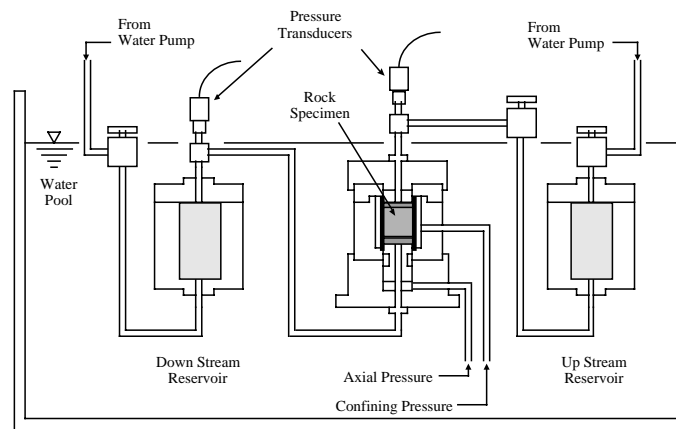


図 6-1 トランジェントパルス透水試験装置概要

6.1.2 定流量透水試験

定流量透水試験は、後出のトレーサー試験装置を用いて実施した。試験装置の概要を図 6-2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。

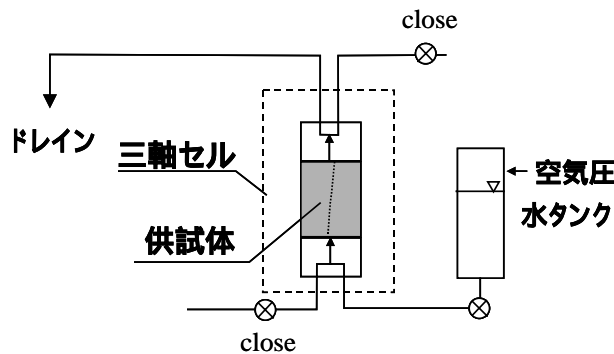


図 6-2 定流量透水試験装置

6.2 試験ケース

(1) 亀裂無し試料

亀裂無しの試料については、トランジェントパルス透水試験法を用いた。試験ケースとして、同一試料における封圧の依存性、ならびに、同一の封圧条件下における試料の深度依存性、を確認するという目的で、表 6.2-1 に示す 3 ケースを設定した。

表 6.2-1 透水試験ケース (亀裂無し試料)

深度 [m]	封圧 [MPa]	間隙水圧 [MPa]	有効応力 [MPa]
200	3.6	2.0	1.6
300	5.4	3.0	2.4
450	8.1	4.5	3.6

(2) 亀裂有り試料

亀裂有りの試料については、定流量透水試験法を用いた。同一の封圧条件下における、試料毎の深度依存性及び、同一試料における封圧の依存性を確認するために、表 6.2-2 に示すような 6 ケースを行った。

表 6.2-2 透水試験ケース (亀裂有り試料)

封圧 [MPa] \ 深度 [m]	100m 相当	200m 相当	300m 相当	400m 相当
200	-	-	2.4	-
300	0.8	1.6	2.4	3.2
450	-	-	2.4	-

6.3 試験結果

6.3.1 亀裂なし試料 (トランジェントパルス透水試験)

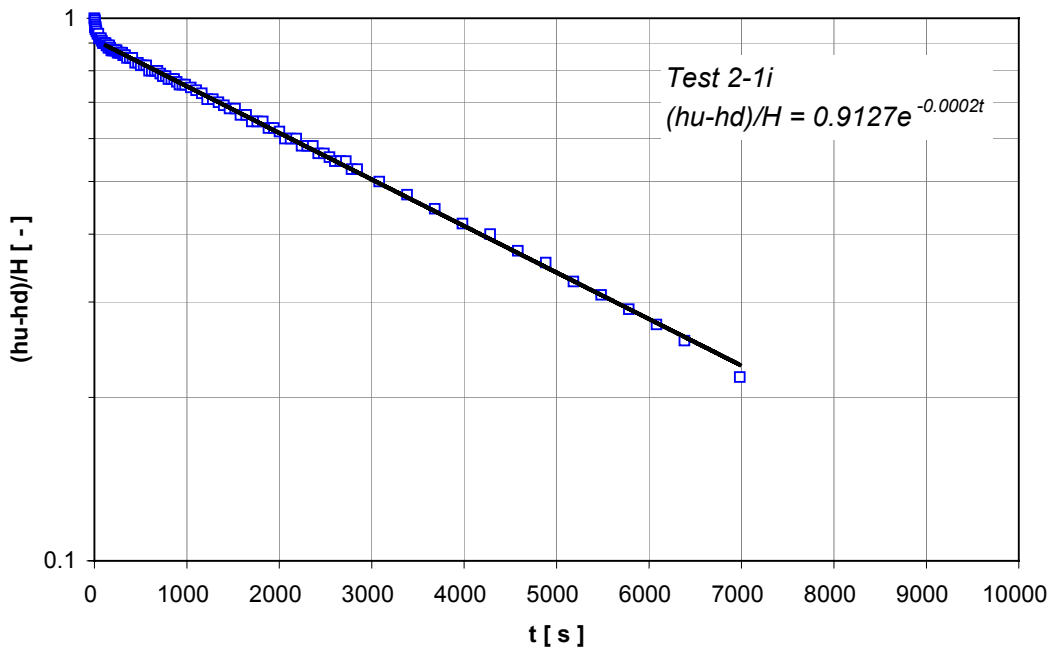
トランジェントパルス透水試験の結果の一例を、図 6-3 に、また、結果の一覧を表 6.3-1 に示した。トランジェントパルス透水試験の解析には、Brace 法と、差圧を用いた Hsieh 法を用いた。Brace 法と差圧を用いた Hsieh 法による解析結果の一例を図 6-3 のグラフ中に示した。図より理論解との良好な一致が見られる。

6.3.2 亀裂あり試料 (定流量透水試験)

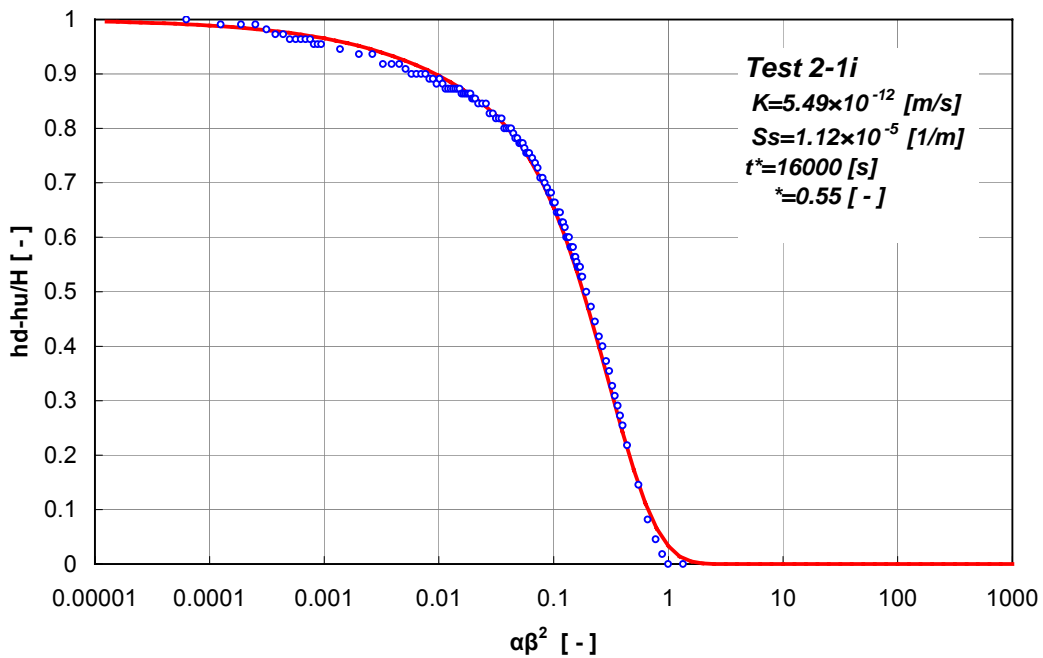
定流量透水試験の結果を、表 6.3-2 に示した。定流量透水試験では、亀裂が試料の中央に位置していると仮定した場合の亀裂の透水量係数 T_f (m^2/s) と、試料の全断面を透水すると仮定した場合の試料の透水係数 K (m/s) を求めた。

表 6.3-2 より、亀裂の透水量係数 T_f は、試験の全般に渡って、 $10^{-11} \sim 10^{-10}$ (m^2/s) のオーダーであり、試料全体の透水係数 K は $10^{-9} \sim 10^{-8}$ (m/s) のオーダーであった。また、深度 300m で採取した試料 (3-2f) で実施した、封圧依存性の確認に関しては、図 6-4 に示した封圧と亀裂の透水量係数の関係から、封圧の増加と共に試料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と考えられる。



(a) Brace 法



(b) 差圧を用いた Hsieh 法

図 6-3 トランジェントパルス透水試験結果 (試料名: 2.1i)

表 6.3-1 透水試験結果一覧（トランジェントパルス透水試験、亀裂無し試料）

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 [1/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

表 6.3-2 透水試験結果一覧（定流量透水試験、亀裂有り試料）

試料名	採取孔名	採取深度 [mbgl]	封圧[MPa]		水圧差 [MPa]	流量 [m ³ /s]	亀裂の 透水量係数 [m ² /s]	試料全体の 透水係数 [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

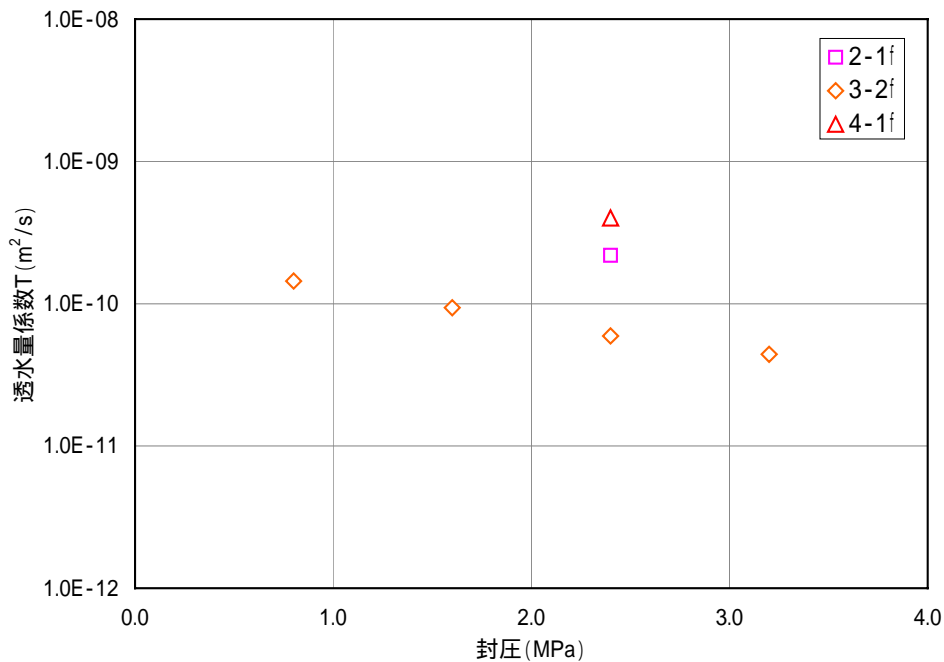


図 6-4 亀裂試料における封圧と透水量係数の関係

7 拡散実験

本試験は、岩石マトリックス部の拡散係数を求めることを目的として行った。6の透水試験結果より、対象岩石の透水係数は非常に低い ($10^{-11} \sim 10^{-12}(\text{m/s})$) ことから、通常の地下水流動条件下では移流を無視しうると考えられる。試験は、亀裂の無いインタクト試料を対象に、3深度につき各1試料の計3試料について行った。

7.1 試験方法

試験装置の概要を図7-1、図7-2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。

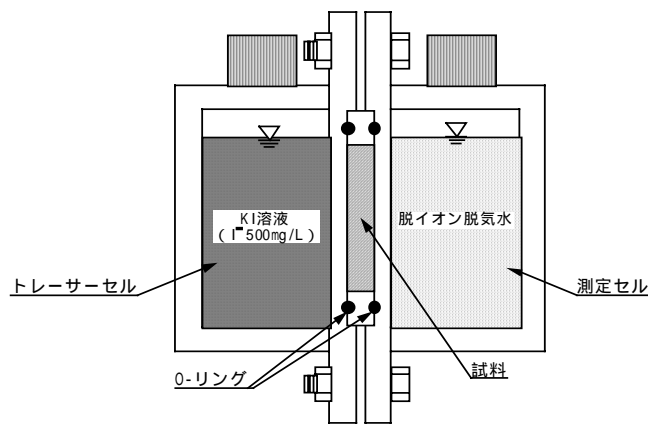


図 7-1 拡散実験装置概要

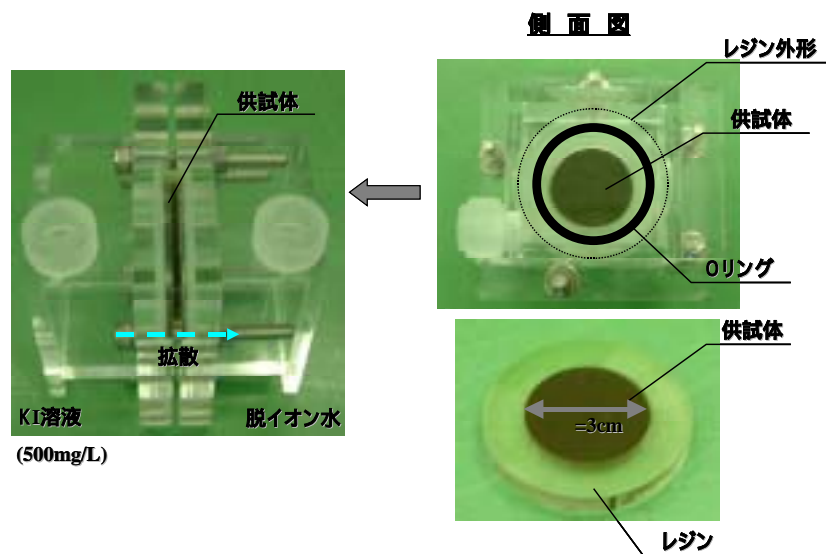


図 7-2 拡散実験装置および供試体の概観

7.2 試験ケース

試験ケースを表 7.2-1に示す。試料毎の深度依存性を確認するために、3 深度の試料を試験対象とした。また、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⁻) 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⁻ 500 (mg/L) とした。

表 7.2-1 拡散試験ケース

深度(m)	試料名
200	2-2i
300	3-4i
450	4-2i

表 7.2-2 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 ⁻ 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 ~ 25)

7.3 試験結果

試験結果の一例を図 7-3に示す。結果から、経過日数とともに濃度が直線的に増加していることが分かる。この試験データを用い、次元の拡散方程式から定常状態において近似的に求められた次式によって拡散係数等を求めた。

$$C_d = \frac{S_r \cdot H \cdot C_0}{V_m} \left(\frac{De \cdot t}{H^2} - \frac{\alpha}{6} \right) \quad (7.3-1)$$

ここに、t：時間、H：試料の厚さ (m)、C₀：トレーサーセル中のトレーサー濃度 (mg/L)、C_d：測定セル中のトレーサー濃度 (mg/L)、S_r：試料の断面積 (m²)、De：実効拡散係数 (m²/s)、V_m：測定セル中の溶液体積 (m³) である。また、 $\alpha = n + \frac{K_d}{\rho_s}$ (n：試料の有効空隙率、 ρ_s ：試料の乾燥密度 (kg/m³)、K_d：分配係数 (m³/kg)) で与えられる。また、見かけの拡散係数を次式に与えられるタイムラグ法によって求めた。

$$Da = \frac{H^2}{6T_{int}} = \frac{De}{\alpha} \quad (7.3-2)$$

ここに、Da：見かけの拡散係数 (m²/s)、T_{int}：(7.3-2) 式を時間軸まで外挿した時の時間 (s) である。

解析により求めた実効拡散係数、見かけの拡散係数および吸着容量を表 7.3-1に示す。実効拡散係数については、0.8~2.5×10⁻¹¹ [m²/s]の値が得られた。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 7-4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平均的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。

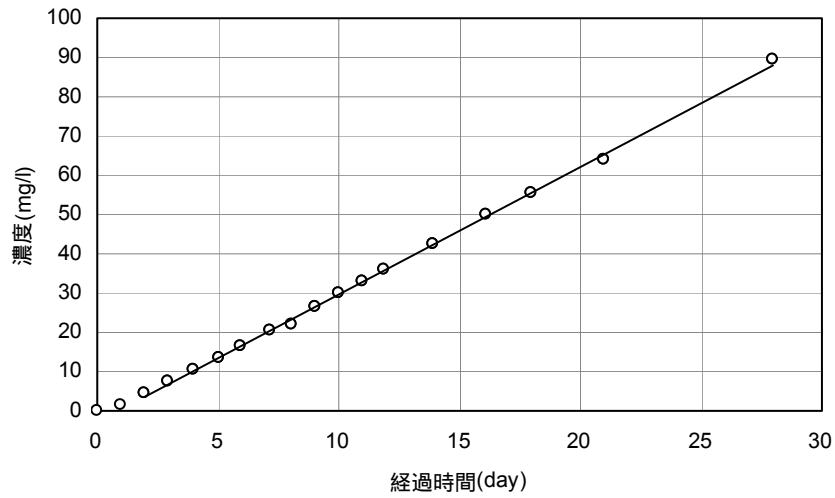


図 7-3 拡散実験結果 (試料名: 2-2i)

表 7.3-1 拡散実験結果一覧

	実効拡散係数 De (m ² /s)	見かけの拡散係数 Da(m ² /s)	収着容量 α(-)	分配係数 Kd(m ³ /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

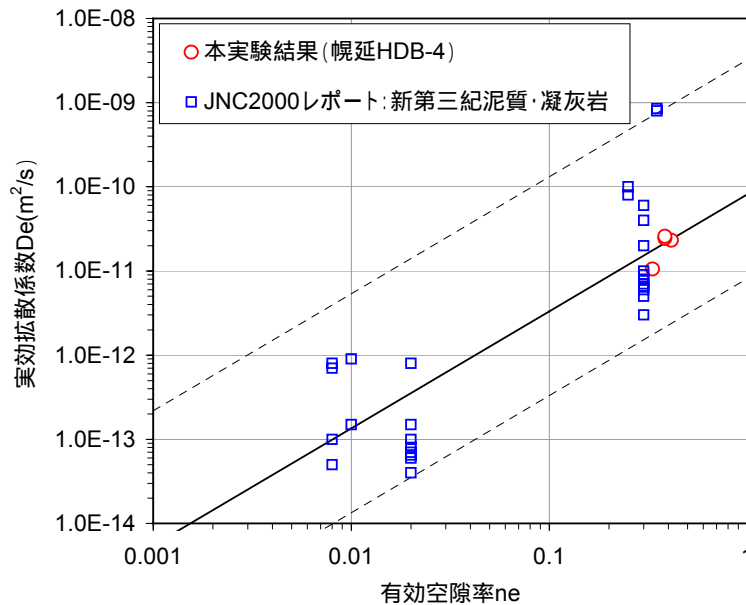


図 7-4 実効拡散係数と有効空隙率の関係 (既往データとの比較)

(核燃料サイクル開発機構、2000)

8 トレーサー試験

8.1 試験方法

本試験は、亀裂を有する試料の物質移行特性パラメータ（物質移行開口幅ならびに分散長）を求めることを目的として行った。トレーサー試験に用いた装置の概要を図 8-1 に示す。試験装置は、以下から構成される。

- (1) 三軸セル
- (2) 封圧装置（軸圧装置、側圧装置用油圧源）
- (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

試験は、三軸セル内の試料に所定の封圧を载荷した状態で、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。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。

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。

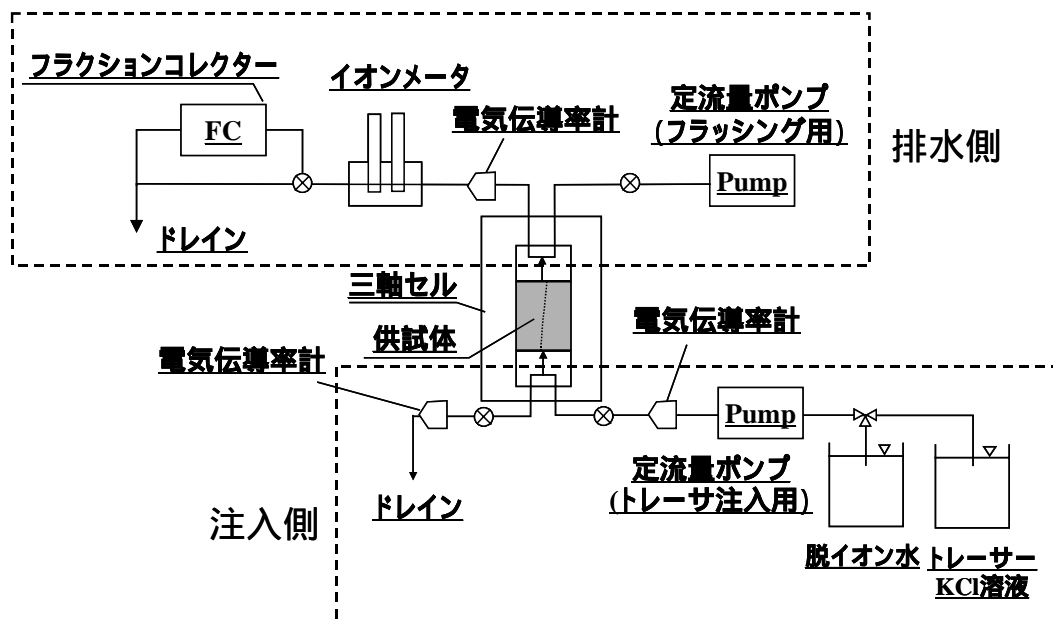


図 8-1 トレーサー試験装置の概要

8.2 試験ケース

試験ケースは、同一試料における封圧の依存性、ならびに、同一の封圧条件下における試料の深度依存性、を確認するという目的で、表 8.2-1に示す 6 ケースを設定した。

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 8.2-2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^-) 濃度について行った。また、注入トレーサー濃度は、フラッシングによる希釈の影響およ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 8.2-1 トレーサー試験ケース

封圧[MPa] 深度 [m]	100m 相当	200m 相当	300m 相当	400m 相当
200	-	-	2.4	-
300	0.8	1.6	2.4	3.2
450	-	-	2.4	-

表 8.2-2 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^- 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 ~ 25)

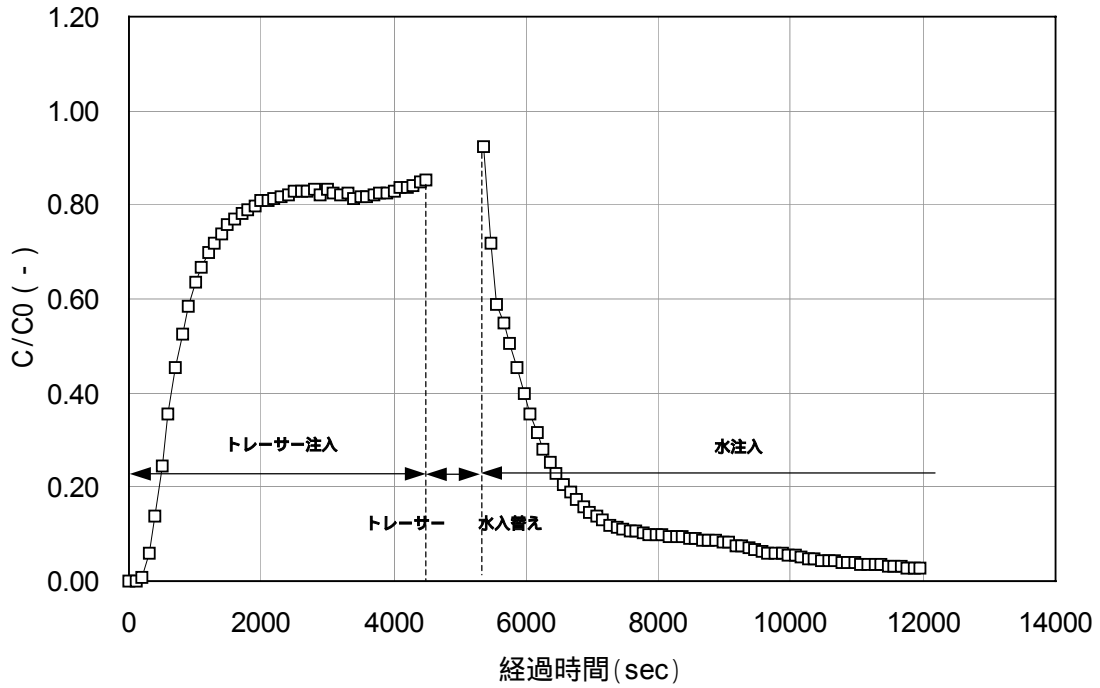
8.3 試験結果

以下、トレーサー試験の状況について簡単に説明する。試験結果の一例を図 8-2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。

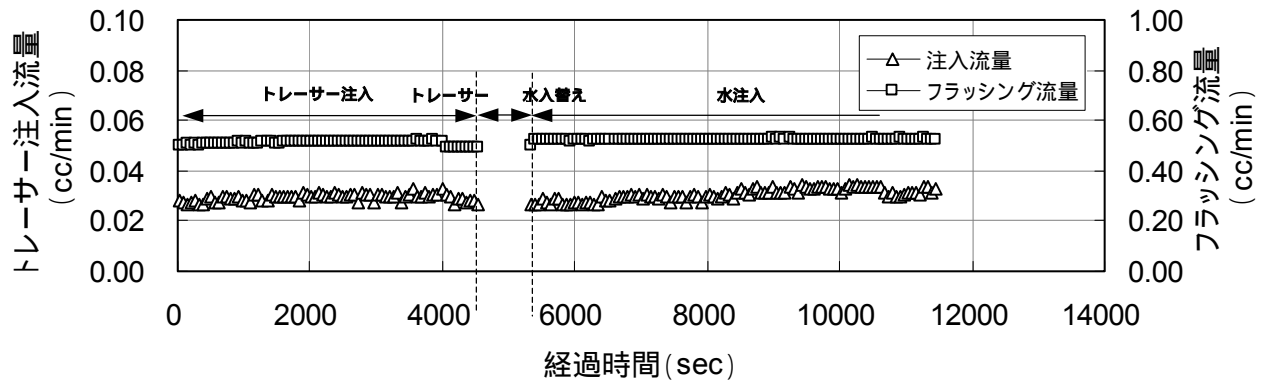
流量の経時変化を図 8-2の(b)に示す。トレーサー注入は、定流量制御が可能なダブルプランジャーポンプを用いており、0.001cc/分単位での流量設定が可能である。図 8-2の(b)の流量の経時変化グラフから(設定流量=0.035cc/分)、流量の安定性が確認される。

注入圧力の経時変化を図 8-2の(c)に示す。この図から、トレーサー注入および水注入の初期の段階で、注入圧力が一定圧力に達するまでに数分間を要すること、試験の全体を通して、注入圧力が緩やかな上昇傾向を示していること、その注入圧力の上昇が、水の注入に切り替えた後により顕著に現れることが分かる。これは、割れ目内と配管内の弾性変形による貯留の影響が大きいものと考えられる。また、これは、岩石マトリクス部の水頭拡散率が低い(透水係数が低く、比貯留係数が大きい)ことから、岩石マトリクス部への水頭拡散に非常に時間がかかっていると考えられる。本来、この緩やかな圧力上昇が収束し、流れの定常状態に達した時点で試験を実施することが望ましいが、図 8-2の(c)からも分かる様に、定常状態に達するまでには、非常に長時間(半日以上)を要すると予想されるため、本試験では、これを定常状態であると仮定して試験を実施した。また、これに関しては、主な原因として、トレーサーから水の注入に切り替える際に、一時的に、試料内の流れが止まり、その間に亀裂内で目詰まりが生じている可能性が考えられる。水の注入に切り替えてからの注入圧力の増加は、トレーサー注入時に比べて、1.1倍~1.6倍程度であり、これにより、本試験から求められる水理開口幅の誤差は、3乗則により、最大でも17% ($1.6^{1/3}=1.17$)程度であると言える。

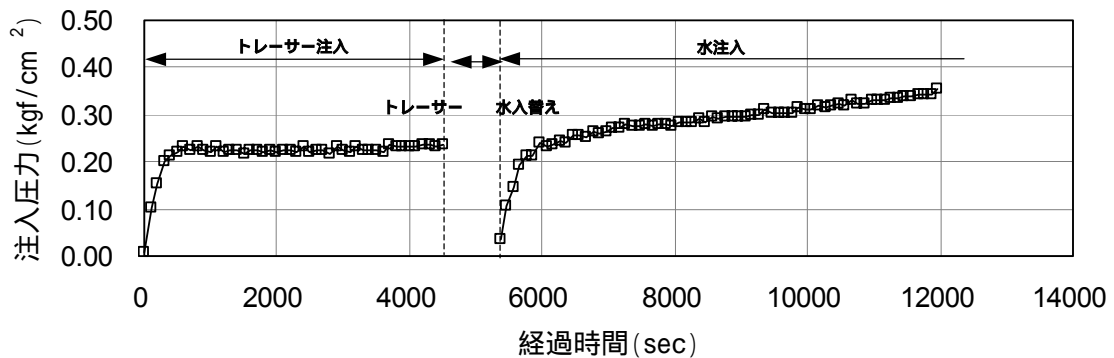
トレーサー濃度の経時変化を図 8-2の(a)に示した。トレーサー注入開始($t = 0$)の後、トレーサー濃度が上昇し、やがて緩やかに安定に向かう。その後、トレーサーから水注入に切り替えたときに、濃度の一時的な上昇が見られるが、これは、水注入開始直後のフラッシングポンプと水注入ポンプの始動時間の微妙なずれにより、フラッシングによるトレーサー溶液の希釈のバランスが、一時的に崩れるために生じると考えられる。そこで、水注入開始直後のトレーサー濃度値は、試験結果の評価では除外して考えることとした。



(a) 出口側トレーサー濃度 (試料名: 2-1f、封圧: 2.4MPa)



(b) 注入流量およびフラッシング流量



(c) 注入圧力

図 8-2 トレーサー試験結果 (試料名: 2-1f、封圧: 2.4MPa)

8.4 解析結果

8.4.1 解析方法

トレーサー試験の解析は、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、試験結果との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。

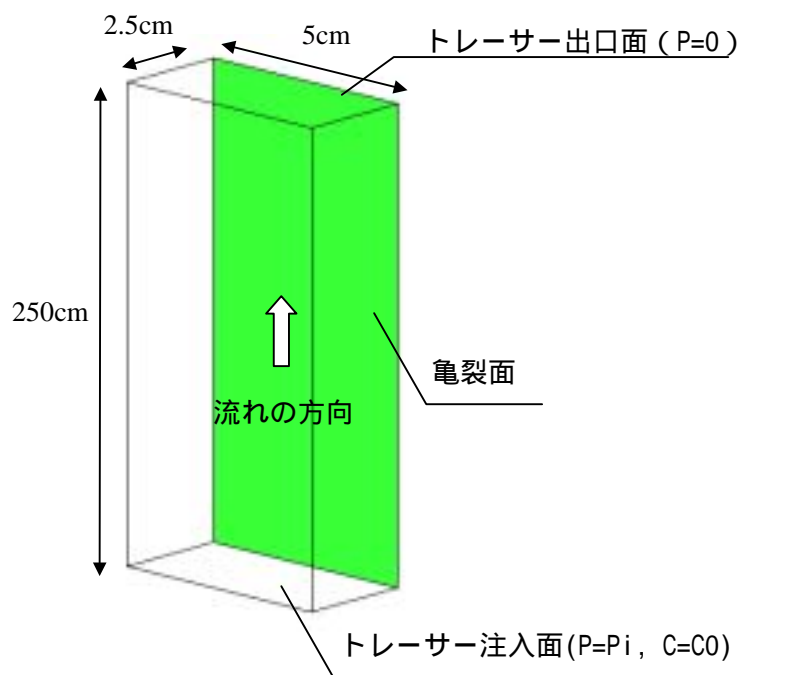
8.4.2 解析条件

今回の解析入力条件の一覧を表 8.4-1 に示す。

表 8.4-1 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 _f [m ² /s]	マトリクス部 透水係数 K _m [m/s]	マトリクス部 実効拡散係数 D _m [m ² /s]	マトリクス部 有効空隙率 n [%]	分配係数 K _d
2-1f	0.030	2.18E-10	5 × 10 ⁻¹²	2.5 × 10 ⁻¹¹	35	0
3-2f0	0.032	1.44E-10	5 × 10 ⁻¹²	2.5 × 10 ⁻¹¹	35	0
3-2f	0.032	9.35E-11	5 × 10 ⁻¹²	2.5 × 10 ⁻¹¹	35	0
3-2f	0.032	5.94E-11	5 × 10 ⁻¹²	2.5 × 10 ⁻¹¹	35	0
3-2f	0.033	4.41E-11	5 × 10 ⁻¹²	2.5 × 10 ⁻¹¹	35	0
4-1f	0.035	4.00E-10	5 × 10 ⁻¹²	2.5 × 10 ⁻¹¹	35	0
設定根拠	・試験条件より設定 ・注入期間中の平均値	・透水試験結果より設定	・透水試験結果より設定 ・全試料の平均的な値を採用	・拡散試験結果より設定 ・全試料の平均的な値を採用	・基本物性試験結果より設定 ・全試料の平均的な値を採用	・拡散試験結果から0と仮定

解析メッシュ（図 8-3）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。境界条件は、上下面を水頭固定境界、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、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、透水係数から、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、上面水頭を設定した。



上下面：水頭固定境界、側面：不透水境界

図 8-3 トレーサー試験の解析条件

8.4.3 解析結果

トレーサー試験の解析結果の一例を図 8-4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 8.4-2に示す。

(1) 分散長

いずれの試料においても、分散長として 1.5×10^{-3} [m] が得られた。この結果を既往の実験結果 (図 8-8 : 新藤他、1995) と比較すると、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との関係が、亀裂を有する軟岩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 0.007~0.014mm が得られた。この幅は、透水係数から次式の三乗則により逆算した水理開口幅 (表 8.4-2) よりやや大きい (図 8-5)。

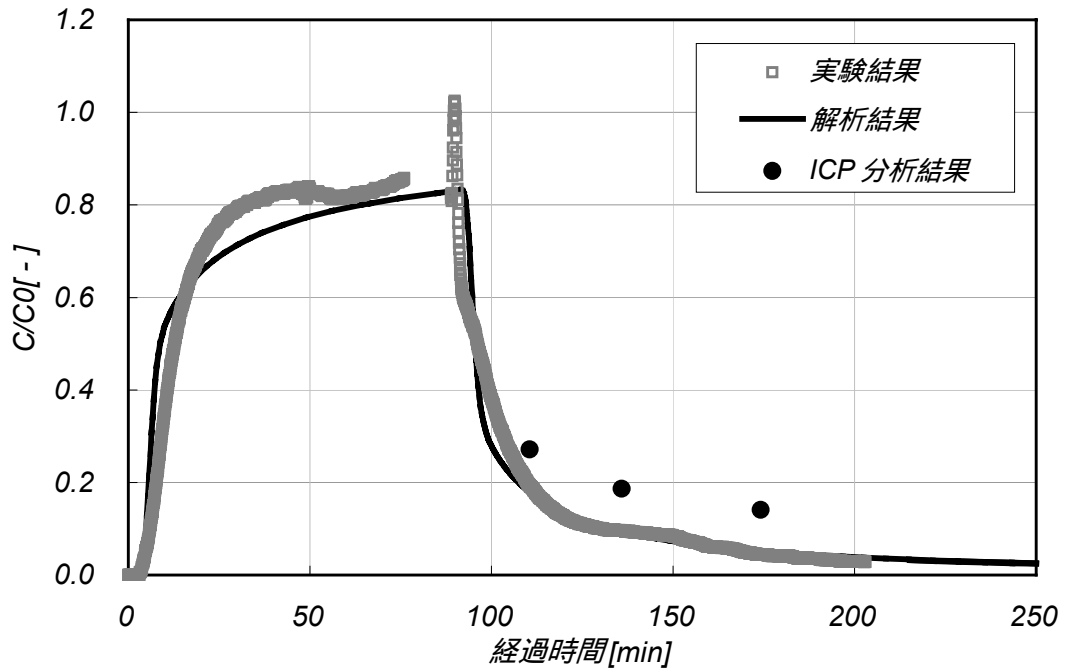
$$T = \frac{\rho g}{12\mu} e_h^3 \quad \dots (8.5-9)$$

ここに、 T : 透水量係数 (m^2/s)、 ρ : 水の密度 (kg/m^3)、 μ : 粘性係数 ($kgf \cdot s/m^2$)、 e_h : 水理開口幅 (m)。

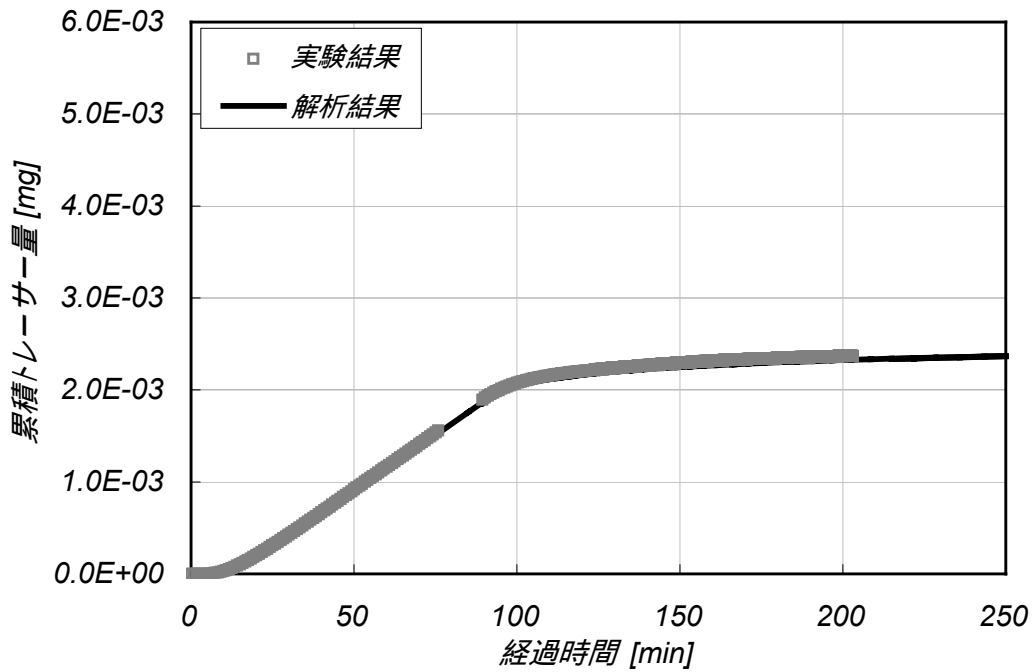
一般に、透水性に寄与する水理開口幅は、亀裂幅の狭いところの効果が卓越するのに対し、物質移行開口幅は、平均的な開口幅の影響を大きく受けるため、物質移行開口幅の方が水理開口幅よりも数倍以上大きくなることが報告されている。今回結果では物質移行開口幅 / 水理開口幅比は、最大で 1.7 程度であり、あまり大きな差がない。これは、亀裂が十分に密着しており、開口幅の面内不均一性が低かったためと推察される。

また、図 8-6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 (図 8-7)。しかし、データが十分ではなく、今回の結果だけで、この関係との整合性を検討することが難しい。今後のデータの増加が期待される。



(a) トレーサー濃度



(b) 累積トレーサー量

図 8-4 トレーサー試験の解析結果 (試料名: 2-1f、封圧: 2.4MPa)

表 8.4-2 トレーサー試験解析結果一覧表

試験 ケース	実流速 v [m/s]	水理 開口幅 eH [m]	物質移行 開口幅 eT [m]	分散長 [m]
2-1f	8.94E-04	6.69E-06	1.00E-05	0.0015
3-2f	1.19E-03	5.83E-06	7.00E-06	0.0015
3-2f	1.31E-03	5.05E-06	8.00E-06	0.0015
3-2f	1.52E-03	4.34E-06	8.00E-06	0.0015
3-2f	1.81E-03	3.93E-06	8.00E-06	0.0015
4-1f	1.15E-03	8.19E-06	1.40E-05	0.0015

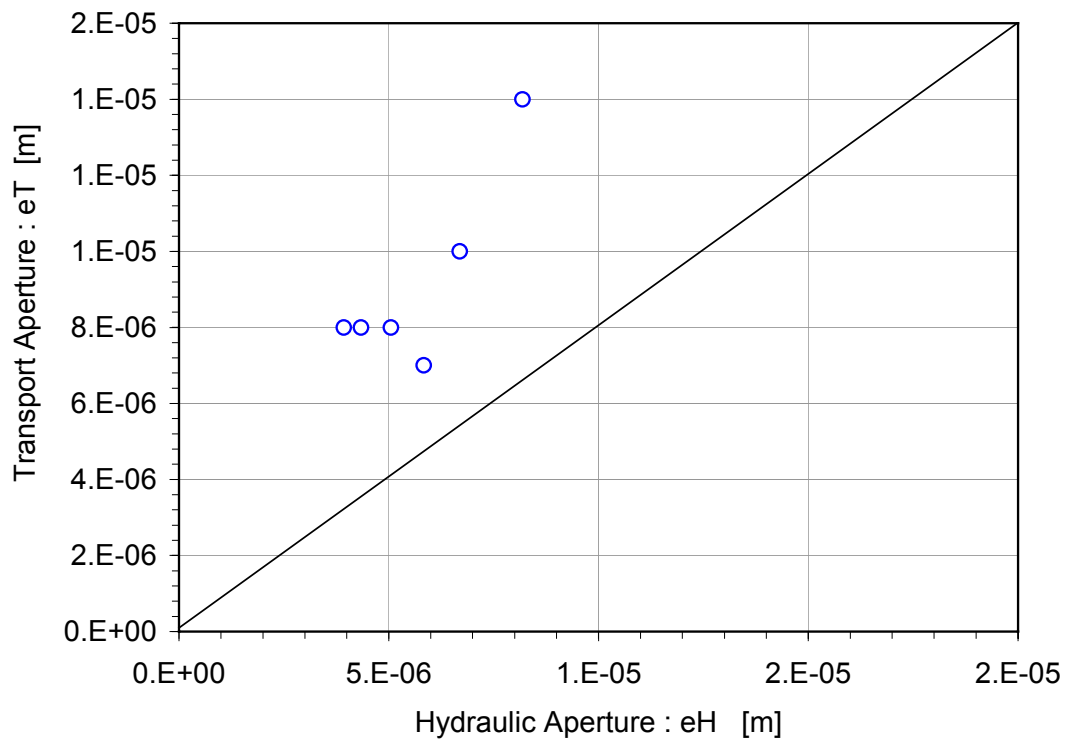


図 8-5 物質移行開口幅と水理開口幅の関係

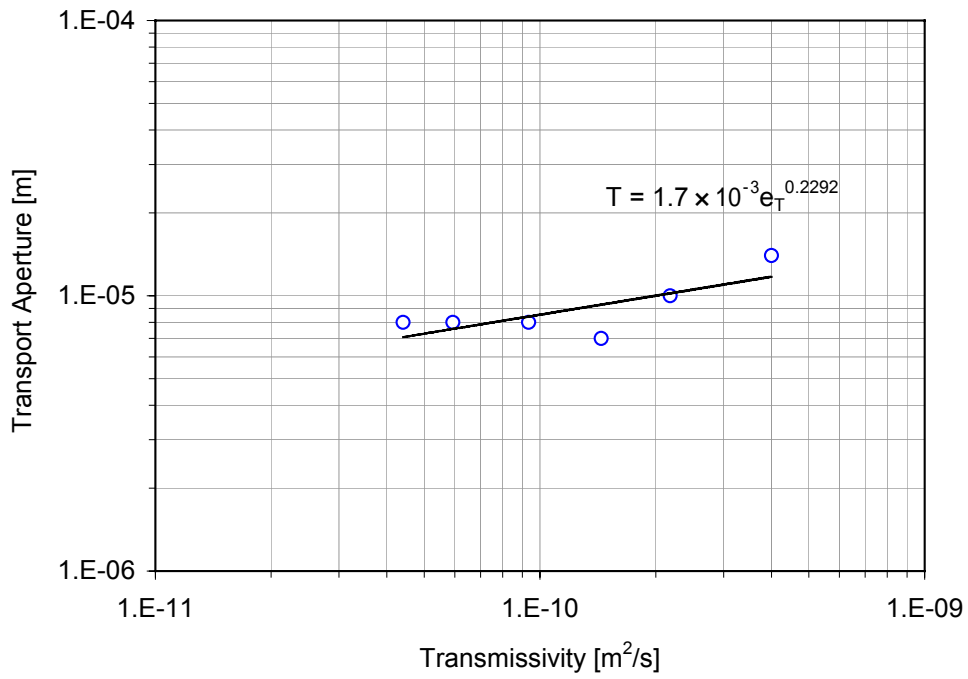


図 8-6 透水量係数と物質移行開口幅の関係

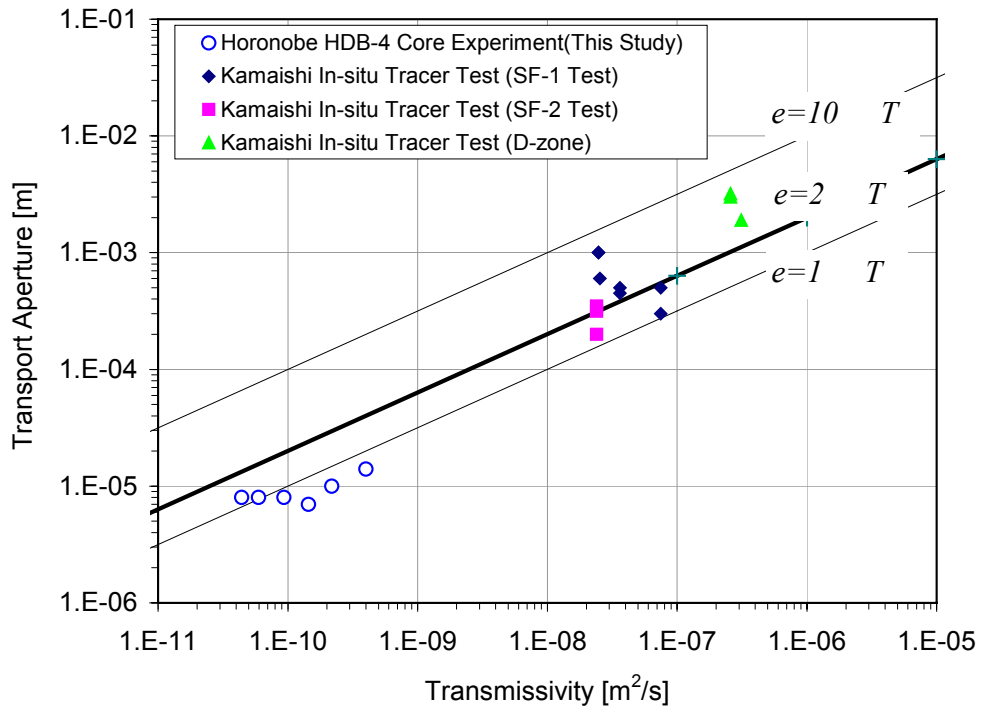


図 8-7 透水量係数と物質移行開口幅の関係 (釜石原試験データとの比較)

(shimo 他、1999)

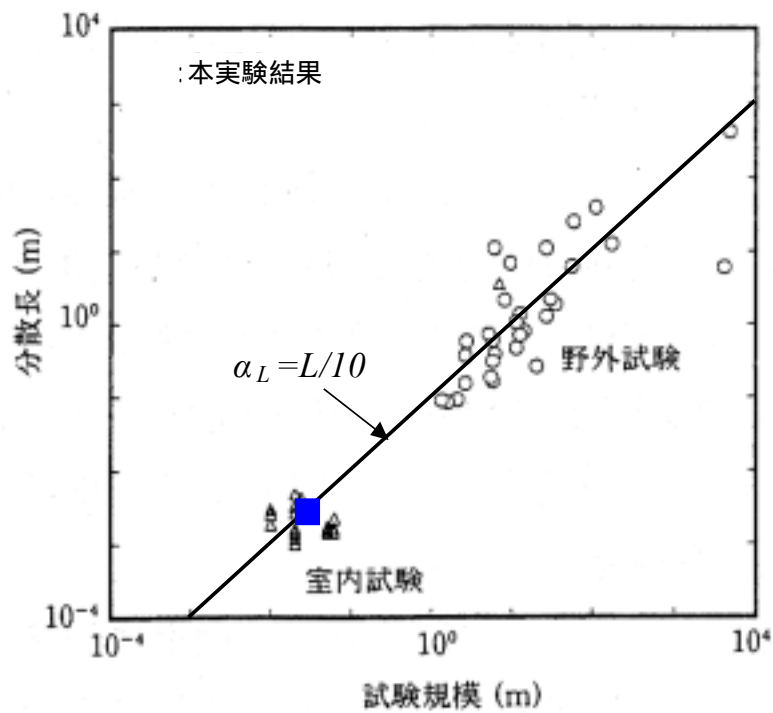


図 8-8 分散長と試験スケールの関係 (既往データとの比較)

(新藤他、1995)

9 モデル化の検討

以下、本実験結果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。

9.1 室内実験結果のまとめ

まず、幌延 HDB-4 号孔の珪藻質泥岩を対象として実施した室内実験結果をまとめると以下の通りである。

(1) 透水性

亀裂を有しない岩石インタクト部の透水係数は、解析手法により若干の相違があるものの、 $4.9 \sim 5.5 \times 10^{-12}$ [m/s]であった。

亀裂を有する岩石の透水係数は、 $1.09 \times 10^{-10} \sim 1.07 \times 10^{-9}$ [m/s] (亀裂の透水量係数では、 $4.3 \times 10^{-11} \sim 4.2 \times 10^{-10}$ [m²/s]) であった。特に、封圧の増加による透水係数の減少が認められた。

以上から、亀裂を有する試料の透水係数は、亀裂を有しない試料の約 20 倍～200 倍であり、今回対象とした堆積岩中の地下水流れは、基本的に、亀裂中の流れが卓越すると考えられる。

(2) 物質移行特性

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 $0.8 \sim 2.5 \times 10^{-11}$ [m²/s] が得られた。これは、既往データのうち、同一の大きな有効空隙率 (30%程度) を有する新第三紀堆積岩の平均的な値である。

分散長

亀裂を有する試料のトレーサー試験結果を用いた FRAC3DVS によるフィッティングから、分散長として 1.5×10^{-3} [m] が得られた。この結果を既往の実験結果 (図 8-8: 新藤他, 1995) と比較すると、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、亀裂を有する軟岩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。

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 0.007～0.014mm 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 (表 8.4-2) よりやや大きい。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。今回結果では物質移行開口幅 / 水理開口幅比は、最大で 1.7 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。

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が、データが十分ではなく、結論づけることはできない。今後のデータの増加が期待される。

9.2 数値解析的検討

今回のトレーサー試験から得られた破過曲線は、マトリクス拡散を考慮した単一割れ目内移流分散モデルにより、よく説明されることがわかった。すなわち、マトリクス部の透水係数が低いため、マトリクス部の移流は無視できるが、マトリクス拡散による遅延効果が大きいことが分かった。

図 9-1に、今回の室内実験の条件において、マトリクスの拡散係数を 2 オーダー変化させたときに得られる破過曲線の数値解析例を示した。この図から、マトリクスの拡散係数によって、遅延効果が大きく異なることが分かる。

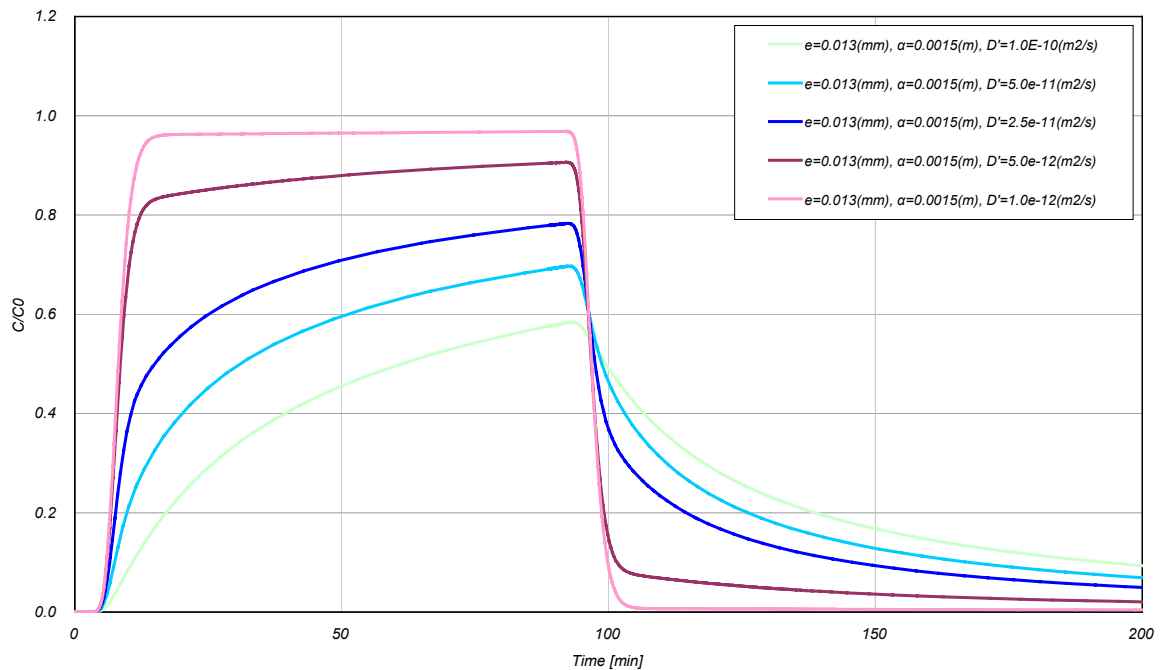


図 9-1 数値解析によるマトリクス拡散の遅延効果

9.3 概念モデル化の検討

以上、データ数は少ないが、今回得られた試験結果を元に、亀裂を有する軟岩における物質移行の概念モデルを検討する。

今回対象とした珪藻質泥岩に関して言えば、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、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。岩石マトリクス内の流れは非常にゆっくりであるため、移流効果は無視しうる。
- ・ 物質移行特性に関しては、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なり大きい。

以上から、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。

- ・ 「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。
- ・ 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。

10 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）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。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] Utada, M.: “ Occurrence and distribution of authigenic zeolites in the Neogene pyroclastic rocks in Japan ” , Sci. paper, Coll. Gen. Educ., Univ. Tokyo, 17, pp.191-262, (1970).
- [5] 岡本隆一、緒方正虔、小島圭二 : - 新体系土木工学 14 - 土木地質、技報堂出版、(1984).
- [6] 水谷伸治郎、斉藤靖二、勘米良龜齡 : 日本の堆積岩、岩波書店、(1987).
- [7] 佐藤稔紀、石丸恒存、杉原弘造、清水和彦 : “ 文献調査による我が国の岩石の物理的特性に関するデータの収集 ”、動力炉・核燃料開発事業団、PNC TN7410 92-018、(1992).
- [8] 佐藤稔紀、谷口航、藤田朝雄、長谷川宏 : “ 文献調査による我が国の岩石の物理的特性に関するデータの収集 (その 2) ”、核燃料サイクル開発機構、JNC TN7400 99-011、(1999).
- [9] 星野一男、加藤碩一、深部物性データ編集委員会 : “ 本邦産岩石の深部物性データ集 ”、地質調査総合センター速報 No.23、産業技術総合研究所、(2001).
- [10] 星野一男、井波和夫 : “ 天草および北九州における岩石の高圧物理とその石油地質学的意義 ”、石油技術協会誌、第 40 巻、第 5 号、pp.16-25、(1975).
- [11] 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).
- [12] 島崎英彦、新藤静夫、吉田鎮男 : 放射性廃棄物と地質科学、東京大学出版会、(1995).

- [13] 歌田實：地下深部における岩石の変質、放射性廃棄物と地質科学（島崎英彦、新藤静夫、吉田鎮男編）東京大学出版会、(1995).
- [14] 新藤静夫、井伊博行：表層における地下水流動、放射性廃棄物と地質科学（島崎英彦、新藤静夫、吉田鎮男編）東京大学出版会、(1995).
- [15] 中嶋悟：“岩石間隙水中の拡散と間隙の構造”、構造地質、第39号、pp.165-168、(1994).
- [16] 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).
- [17] 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).
- [18] 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).
- [19] Brace, W.F., et al : “ Permeability of Granite under High Pressure ” , J. of Geophysical Research, Vol.73, No.6, pp.2225-2236, (1968)
- [20] 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)
- [21] 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).
- [22] 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).