

亀裂を有する軟岩中の流れと 移行現象に関する研究

(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

(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
3.1	軟岩の地質学的分類	4
3.2	軟岩物性による分類	17
4	試料採取	36
4.1	採取地点	36
4.2	採取方法	36
4.3	採取深度及び数量	38
4.4	採取状況	44
5	試料分析	54
5.1	分析項目	54
5.2	基本物性測定	54
5.3	X線分析	58
5.4	顕微鏡観察	62
5.5	空隙観察	62
6	透水試験	68
6.1	試験方法	68
6.2	試験ケース	73
6.3	試験結果	75
7	拡散実験	83
7.1	試験方法	83
7.2	試験ケース	85
7.3	試験結果	86
7.4	解析結果	86
8	トレーサー試験	90
8.1	試験概要	90
8.2	試験方法	90
8.3	試験ケース	96

8.4	試験結果	97
8.5	解析結果	105
9	モデル化の検討	119
9.1	室内実験結果のまとめ	119
9.2	数値解析的検討	120
9.3	概念モデル化の検討	120
10	おわりに	122
	参考文献	120

目 次

図 2-1	研究のフロー	2
図 3-1	新第三紀堆積岩類の分布 (小島, 1980)	4
図 3-2	堆積岩の分類 (Pettijohn, 1957)	6
図 3-3	砂質堆積物の粒度組成による分類	7
図 3-4	砂岩の鉱物組成に基づく分類 (Okada, 1971)	8
図 3-5	続成作用による粘土鉱物、ゼオライト、シリカ鉱物変化と温度・圧力条件	9
図 3-6	日本列島の新第三系における続成作用の各型の分布 (Utada, 1970)	10
図 3-7	わが国の新第三系中にみられる続成変質による累帯分布の四型 (Utada, 1970)	10
図 3-8	変質区の分布 (歌田, 1995)	12
図 3-9	空隙率と実効拡散係数の関係 (中嶋, 1994)	14
図 3-10	各岩種に対する有効空隙率と実効拡散係数の関係	15
図 3-11	縦方向分散長と移行距離の関係 (Gelhar他, 1992)	16
図 3-12	第三紀堆積岩におけるトレーサー試験結果 (新藤他, 1995)	16
図 3-13	弾性波速度と空隙率の関係 (Han他., 1986)	23
図 3-14	空隙率とP波速度の関係 (J.Dvorkin 他)	23
図 3-15	弾性波速度と有効空隙率の関係 (JNCデータベース)	24
図 3-16	弾性波速度と空隙率の関係 (深部岩石データベース)	25
図 3-17	弾性波速度と有効空隙率 (空隙率) の関係 (JNC + 深部岩石データベース、片対数軸)	26
図 3-18	弾性波速度と有効空隙率 (空隙率) の関係 (JNC + 深部岩石データベース、片対数軸)	26
図 3-19	空隙率と強度の関係 (星野他, 1975)	27
図 3-20	一軸圧縮強度と有効空隙率の関係 (JNCデータベース)	29
図 3-21	一軸圧縮強度と空隙率の関係 (深部岩石データベース)	30
図 3-22	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)	31
図 3-23	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、両対数軸)	32
図 3-24	一軸圧縮強度と空隙率の関係 (深部岩石データベース、新第三紀堆積岩、地層毎)	33
図 3-25	一軸圧縮強度と有効空隙率の関係 (幌延HDB-1号孔、HDB-2号孔)	34
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)	37
図 4-2	地質柱状図 (HDB-4号孔、全区間)	39
図 4-3	地質柱状図 (HDB-4号孔、100~200m区間)	40
図 4-4	地質柱状図 (HDB-4号孔、200~300m区間)	41

図 4-5	地質柱状図 (HDB-4 号孔、300 ~ 400m 区間)	42
図 4-6	地質柱状図 (HDB-4 号孔、400 ~ 500m 区間)	43
図 5-1	基本物性値測定結果 (幌延HDB-4 号孔)	56
図 5-2	粉末式X線分析結果 (HDB-4 号孔、深度 200m 付近)	60
図 5-3	粉末式X線分析結果 (HDB-4 号孔、深度 315m 付近)	60
図 5-4	粉末式X線分析結果 (HDB-4 号孔、深度 450m 付近)	61
図 5-5	水銀圧入式細孔分布測定による孔口径分布 (辻他、1994)	63
図 6-1	トランジェントパルス透水試験装置概要	69
図 6-2	トランジェントパルス法測定原理	70
図 6-3	トランジェントパルス透水試験手順	70
図 6-4	定流量透水試験装置	72
図 6-5	定流量透水試験手順	72
図 6-6	岩盤内応力と深度の関係 (HDB-1 号孔)	74
図 6-7	Hsieh法による解析手順の概念図	77
図 6-8	トランジェントパルス透水試験結果 (試料名: 2-1i)	79
図 6-9	トランジェントパルス透水試験結果 (試料名: 3-2i)	80
図 6-10	トランジェントパルス透水試験結果 (試料名: 4-1i)	81
図 6-11	亀裂試料における封圧と透水量係数の関係	82
図 7-1	拡散実験装置概要	84
図 7-2	拡散実験装置および供試体の概観	84
図 7-3	拡散実験結果 (試料名: 2-2i)	87
図 7-4	拡散実験結果 (試料名: 3-4i)	87
図 7-5	拡散実験結果 (試料名: 4-2i)	88
図 7-6	実効拡散係数と有効空隙率の関係 (既往データとの比較)	89
図 8-1	トレーサー試験装置の概要	92
図 8-2	トレーサー注入出部のフラッシング構造	93
図 8-3	トレーサー注入出部のフラッシング構造	93
図 8-4	トレーサー試験手順	95
図 8-5	電気伝導率計の校正結果	97
図 8-6	トレーサー試験結果 (試料名: 2-1f、封圧: 2.4MPa)	99
図 8-7	トレーサー試験結果 (試料名: 3-2f、封圧: 0.8MPa)	100
図 8-8	トレーサー試験結果 (試料名: 3-2f、封圧: 1.6MPa)	101
図 8-9	トレーサー試験結果 (試料名: 3-2f、封圧: 2.4MPa)	102
図 8-10	トレーサー試験結果 (試料名: 3-2f、封圧: 3.2MPa)	103
図 8-11	トレーサー試験結果 (試料名: 4-1f、封圧: 2.4MPa)	104
図 8-12	トレーサー試験の解析条件	108
図 8-13	トレーサー試験の解析結果 (試料名: 2-1f、封圧: 2.4MPa)	110
図 8-14	トレーサー試験の解析結果 (試料名: 3-2f、封圧: 0.8MPa)	111

図 8-15	トレーサー試験の解析結果（試料名：3-2f、封圧：1.6MPa）	112
図 8-16	トレーサー試験の解析結果（試料名：3-2f、封圧：2.4MPa）	113
図 8-17	トレーサー試験の解析結果（試料名：3-2f、封圧：3.2MPa）	114
図 8-18	トレーサー試験の解析結果（試料名：4-1f、封圧：2.4MPa）	115
図 8-19	物質移行開口幅と水理開口幅の関係	116
図 8-20	透水量係数と物質移行開口幅の関係	117
図 8-21	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）	117
図 8-22	分散長と試験スケールの関係（既往データとの比較）	118
図 9-1	数値解析によるマトリクス拡散の遅延効果	120

表 目 次

表 3.1-1	固結に伴う地盤・岩盤の地質要素の変化（岡本他、1984）	5
表 3.1-2	碎屑粒子の粒径区分	7
表 3.1-3	粒度による火山碎屑物及び火山性堆積岩の分類（Shmid, 1981）	8
表 3.1-4	碎屑性礫岩の分類（Pettijohn, 1975）	8
表 3.1-5	熱水変質帯の温度と溶液の化学的条件による分類	11
表 3.1-6	熱水変質作用による累帯分布の型（歌田、1995）	11
表 3.2-1	使用した岩石物性データベース	18
表 3.2-2	岩石・岩盤物性データベース（佐藤ほか、1999）	19
表 3.2-3	本邦産岩石の深部物性データ集（星野ほか、2001）	20
表 4.3-1	採取深度一覧	38
表 4.3-2	試験用試料一覧	38
表 5.1-1	試料分析項目一覧	54
表 5.2-1	基本物性測定結果一覧表	55
表 5.3-1	X線分析結果（不定方位、粉末法）	59
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	62
表 6.2-1	透水試験ケース（亀裂無し試料）	73
表 6.2-2	透水試験ケース（亀裂有り試料）	73
表 6.3-1	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	77
表 6.3-2	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）	82
表 6.3-3	透水試験結果一覧（定流量透水試験、亀裂有り試料）	82
表 7.2-1	拡散試験ケース	85
表 7.2-2	試験条件一覧	85
表 7.4-1	拡散実験結果一覧	89
表 8.2-1	試験装置ならびに計測機器一覧表	94
表 8.3-1	トレーサー試験ケース	96
表 8.3-2	トレーサー試験条件一覧	96
表 8.5-1	解析入力条件一覧	107
表 8.5-2	トレーサー試験解析結果一覧表	116

写 真 目 次

写真 4.4-1	コア抜き位置（200m付近試料）	44
写真 4.4-2	コア抜き位置（300m付近 亀裂有り試料）	44
写真 4.4-3	コア抜き位置（300m付近 亀裂無し試料）	45
写真 4.4-4	コア抜き位置（450m付近試料）	45
写真 4.4-5	整形後の試験用試料（200m付近 亀裂有り）	46
写真 4.4-6	整形後の試験用試料（200m付近 亀裂無し）	47
写真 4.4-7	整形後の試験用試料（300m付近 亀裂有り）	48
写真 4.4-8	整形後の試験用試料（300m付近 亀裂無し）	50
写真 4.4-9	整形後の試験用試料（450m付近 亀裂有り）	52
写真 4.4-10	整形後の試験用試料（450m付近 亀裂無し）	53
写真 5.5-1	空隙観察結果（微少な割れ目中の空隙）	65
写真 5.5-2	空隙観察結果（化石片）	66
写真 5.5-3	空隙観察結果（不透明鉱物付近の空隙）	67
写真 6.1-1	トランジェントパルス透水試験装置概観	69
写真 8.2-1	トレーサー試験装置の概観	92

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

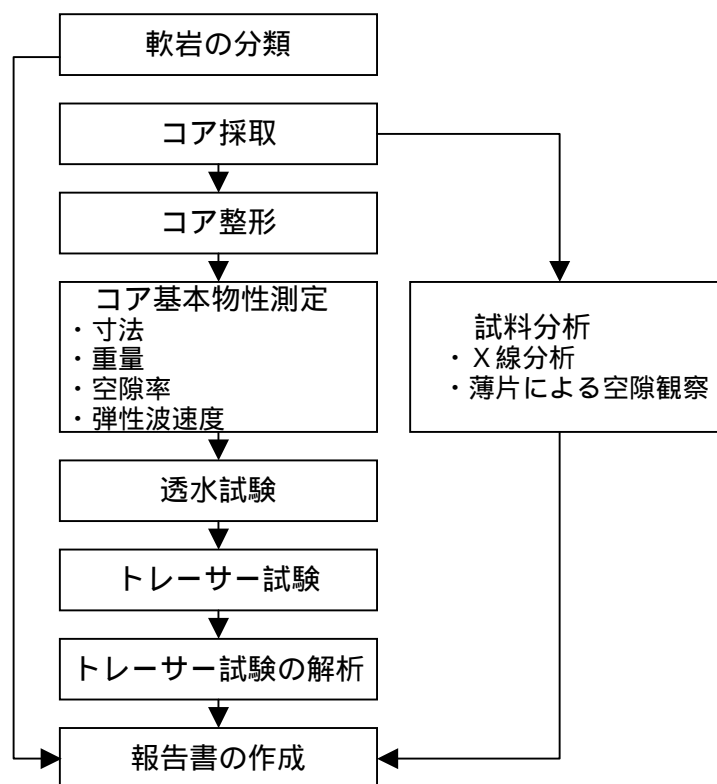


図 2-1 研究のフロー

(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

3.1 軟岩の地質学的分類

軟岩は、一般に一軸圧縮強度 200kgf/cm^2 以下の岩盤を言い、地質学的には堆積性軟岩、風化軟岩、火山性軟岩に大別される。軟岩に共通した特徴は、比較的割れ目が少なく、存在しても岩体の力学的性状にそれほど影響を与えないことである。また、含水状態の変化に対して敏感であることから、掘削等により岩石物性が急速に変化する。日本における軟岩の分布は、東北日本ではグリーンタフに代表される堆積性軟岩が、西南日本では風化軟岩が顕著である。そして、火山性軟岩は、東日本、西日本火山帯に沿って分布する（岡本他, 1984）。

本研究では、軟岩のうち、最も出現頻度の高い堆積性軟岩を対象とする。我が国における新第三紀堆積岩類の分布を図 3-1に示す。堆積性軟岩と呼ばれる岩石の形成年代は、一般に洪積世後期～新第三紀であり、堆積物の固結度の異なる土や硬岩とは、表 3.1-1のような違いがある。堆積岩は、地下深部で形成される結晶質岩などと比べ、形成過程（堆積環境や変質作用など）における地域的な違いが大きく、それに起因した物理化学的な多様性を有している。したがって、一般的な観点から堆積岩の物質移行特性を議論するには、試験対象とする堆積岩の位置付けを明確にすることが重要である。ここでは、一般的に用いられている堆積岩分類を整理する。



図 3-1 新第三紀堆積岩類の分布（小島，1980）

表 3.1-1 固結に伴う地盤・岩盤の地質要素の変化（岡本他、1984）

比較事項	土	軟岩	硬岩	
地質時代と岩相	沖積世～洪積世の砂泥堆積物	洪積世後期～新第三紀の堆積岩	古第三紀・中生代・古生代の堆積岩（および火成岩・変成岩）	
地質の連続性	水平成層構造。浅海～陸水成堆積物が多く岩相変化が激しいが、比較的の水平方向に連続。氷期にできた埋没地形面が不連続面を形成。現在の上載荷重と工学的性質が対応する。	成層構造（一般に傾斜層）、海成堆積物で水平によく連続するものが多い。一般に地層が褶曲しているため、工学的性質は現在の上載荷重でなく埋没履歴に支配される	成層構造をなすが、工学的性質は成層状態よりむしろ断層・割れ目などの地盤の劣化要素に支配される	
地質の不連続面の性質	層理面	あまり問題にならない。土粒子のセメンテーションも含めた骨格構造は強くないから、不攪乱試料の突固め整形による試験値で代用できる	異方性を示すが軟質になるにつれて弱くなる。層理面は岩質の異なる地層の境界であり、細互層、急傾斜の場合に不均一性が問題になる	強度および変形特性に異方性、不均一性を生じ、割れ目に準じて扱える場合が多い
	断層（破砕帯）	断層破砕による地盤の劣化はない	層位的に下位層では問題となるが破砕規模は小さい。ずれによる岩相変化の方が強度、変形性に及ぼす影響大	調査の重点は、位置、破砕による劣化、粘土化、透水性の増加などにおかれる
	割れ目	割れ目はなく、もっぱら岩質（土質）に支配される	一般に割れ目は少ない。多少存在してもあまり影響なく、岩質そのものの性質が強く現れる	岩盤の強度および変形特性は、岩質のほか割れ目の性状、多寡に大きく支配される
風化・変質の影響	強度を左右する劣化はほとんどない	地すべりあるいは温泉変質による劣化のほかはあまり目立たないが、劣化を伴う。掘削後に急速な風化が進行する	著しい劣化を伴う	

3.1.1 堆積岩の分類要因

堆積岩の地質学的分類の要因として以下のものがある。これらの分類は、堆積性軟岩に限らず、堆積岩全般について用いられる。

- ・ 堆積年代（第四紀、新第三紀など）
- ・ 形成過程（碎屑性堆積物、火砕性堆積物、沈殿堆積物、残留堆積物、有機物残留堆積物など）
- ・ 粒子径、粒度組成（礫岩、砂岩、シルト岩、泥岩など）
- ・ 鉱物組成（例えば、砂岩における長石質アレナイトと石英アレナイト）
- ・ 粒子／基質比（例えば、砂岩におけるアレナイトとワッケ）
- ・ 変質作用の種類と程度（風化作用、埋没続成作用、熱変成作用、熱水変質作用等に伴う鉱物変質）

：基質の少ない（通常 15%未満）砂岩をアレナイトと呼び、基質の多い（15%以上）の砂岩をワッケと称する（水谷他、1987）。

(1) 形成過程

Pettijohn(1957)による堆積岩分類を図 3-2に示す。この分類は、主として、形成過程に着目したものである。これらのうち、我が国の深部地質を構成する堆積岩としては、碎屑性堆積岩、火砕性堆積岩、沈殿堆積物（石灰岩、珪質堆積物）が主である。

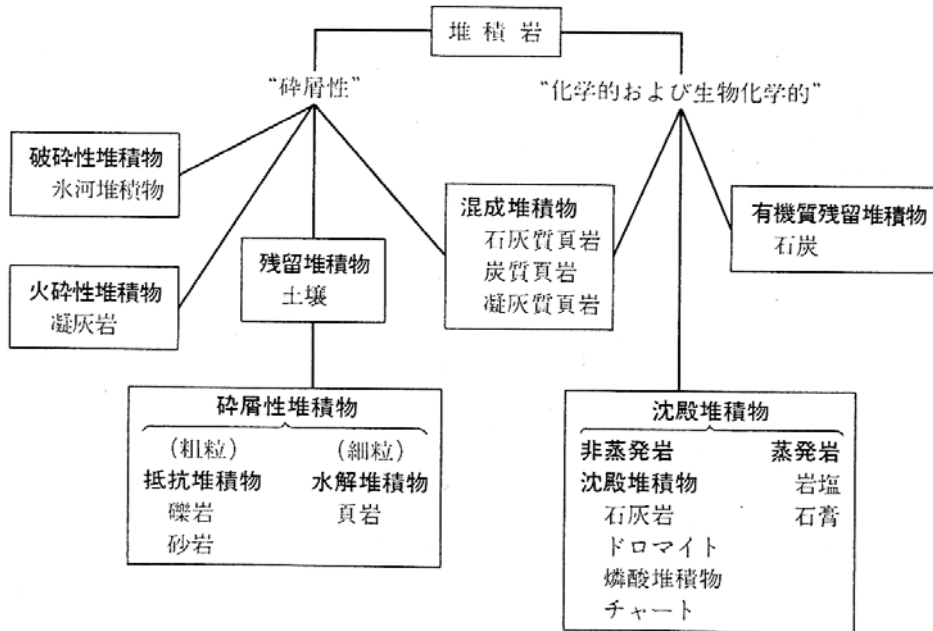


図 3-2 堆積岩の分類 (Pettijohn, 1957)

(2) 粒子径、粒度組成

砕屑性堆積物では、表 3.1-2に示すように、粒子径によって、礫岩、砂岩、シルト岩、泥岩などと分類される。

表 3.1-2 砕屑粒子の粒径区分

φ	粒径 (mm)	円磨した粒子		角ばった粒子	
		砕屑物	集合体		
-8	256	巨礫 (boulder)	巨礫岩 (boulder conglomerate)	角礫岩 (breccia)	
		大礫 (cobble)	大礫岩 (cobble conglomerate)		
		中礫 (pebble)	中礫岩 (pebble conglomerate)		
		細礫 (granule)	細礫岩 (granule conglomerate)		
-1	2	極粗粒砂 (very coarse sand)	砂岩 (sandstone)	1 mm あら砂 (grit) 1/2 mm	
0	1	粗粒砂 (coarse sand)			
1	1/2	中粒砂 (medium sand)			
2	1/4	細粒砂 (fine sand)			
3	1/8	極細粒砂 (very fine sand)			
4	1/16	シルト (silt)			シルト岩 (siltstone)
8	1/256	粘土 (clay)	粘土岩 (claystone)		

特に、砂質堆積岩では、図 3-3のように、粒度組成に基づいて分類・命名する方法が古くから用いられている。

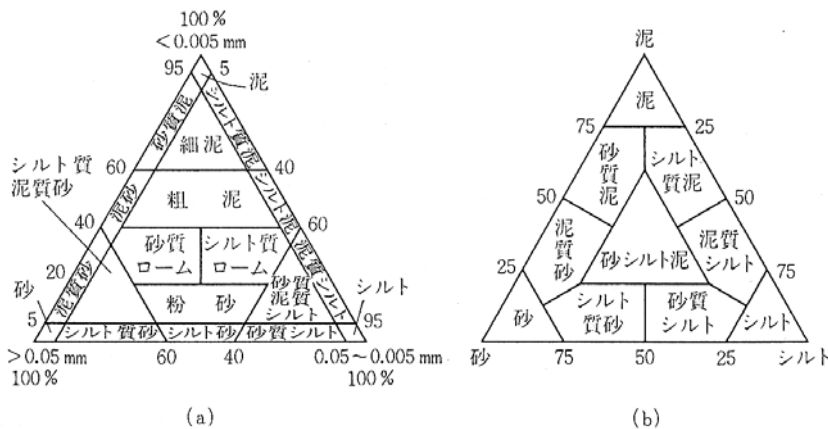


図 3-3 砂質堆積物の粒度組成による分類

((a)pyxnh , 1953 および(b)Shepard , 1954)

火砕性堆積岩では、下表のような、粒度による分類がある。

表 3.1-3 粒度による火山碎屑物及び火山性堆積岩の分類 (Shmid, 1981)

粒度	火山碎屑物 pyroclast	火砕性堆積岩 pyroclastic rock
64 mm	岩石片 block 火山弾 bomb	火山角礫岩 volcanic breccia 凝灰角礫岩 tuff breccia 集塊岩 agglomerate
	ラピリ lapillus	火山礫凝灰岩 lapillistone, lapilli tuff
2 mm	粗粒火山灰 coarse ash grain	粗粒凝灰岩 coarse (ash) tuff
$\frac{1}{16}$ mm	細粒火山灰 fine ash grain	細粒凝灰岩 fine (ash) tuff

(3) 鉱物組成、粒子 / 基質比

砂岩

砂岩では、鉱物組成と粒子 / 基質比に基づく分類が用いられることが多い (図 3-4)。

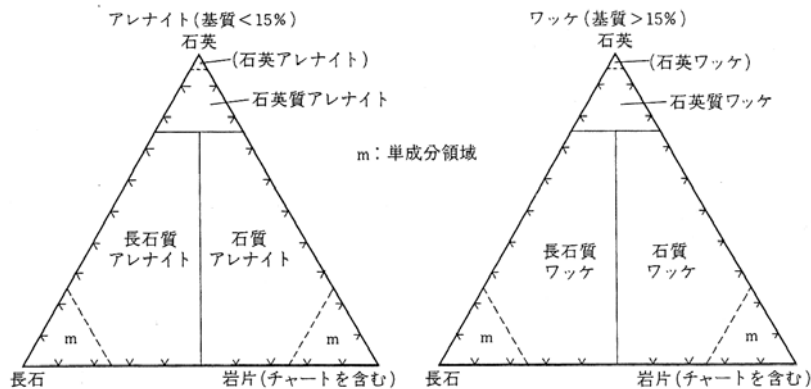


図 3-4 砂岩の鉱物組成に基づく分類 (Okada, 1971)

礫岩

礫岩では、礫 / 基質により、オーソ礫岩とパラ礫岩に分類されることがある (表 3.1-4)。

表 3.1-4 碎屑性礫岩の分類 (Pettijohn, 1975)

オーソ礫岩 (orthoconglomerate)	
礫 : 基質	
85 ≥ 15	礫種としてオーソコーツァイト, 石英片岩など風化に対して抵抗性のある安定なものも多く, その他の堆積岩, 火山岩, 深成岩などの量が 10% 以下, orthoquartzitic (または oligomictic) conglomerate
	礫種として安定なものが比較的少なく, 不安定なものが 10% 以上, petromict (または polymictic) conglomerate
パラ礫岩 (paraconglomerate)	
礫 : 基質	
85 < 15	

(4) 変質作用と変質鉱物

堆積岩は、その地史的に各種の変質作用を受け、様々な変質鉱物に変化する。変質作用と変質鉱物の特徴については、歌田(1995)によりまとめられている。地下深部の変質作業は、埋没続成作用、熱変成作用、熱水変質作用などに大別される。以下、歌田(1995)から、その要点をまとめる。

1) 埋没続成作用

歌田(1995)によると、「堆積物が堆積後、化学的・物理的变化をして固結した堆積岩に移り変わる現象」を続成作用という。続成作用の地域性を生む要因としては、原物質、堆積速度、地下増温率などがあげられる。続成作用は、原物質によって次の ~ のように区分される。

- 粘土続成変質：スメクタイト イライト/スメクタイト イライト
- ゼオライト続成変質：火山ガラス ゼオライト 曹長石
- シリカ続成変質：珪藻遺骸 オパールA オパールCT 石英(新第三系珪質堆積物)
- 炭酸塩続成変質：アラゴナイト 方解石、石灰岩のドロマイト化作用
- 有機続成変質：石油・天然ガスの生成など

~ の3つの続成変質は、同じ埋没条件下ではほぼ整合的に進行する(図 3-5)。

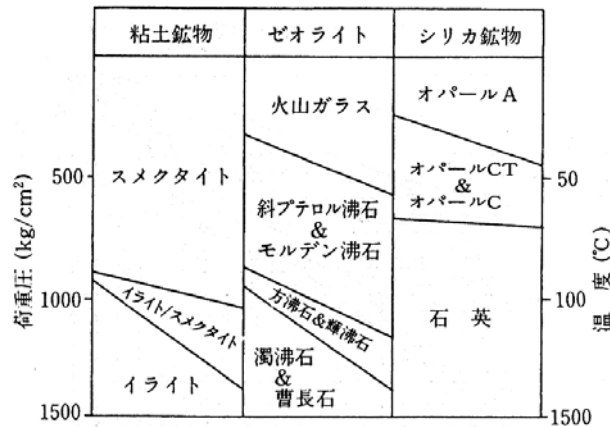


図 3-5 続成作用による粘土鉱物、ゼオライト、シリカ鉱物変化と温度・圧力条件

(Aoyagi and Kazama, 1980)

Utada(1970)は、地下増温率の違いによる続成作用の地域性に関し、新第三系を火砕岩類の続成変質帯の組み合わせ(図 3-5)と埋没深度により、VH、H、M、L型に分けた(図 3-6、図 3-7)。この4型は、地下増温率の非常に高いもの、高いもの、中位のもの、低いものに対応すると考察されている。

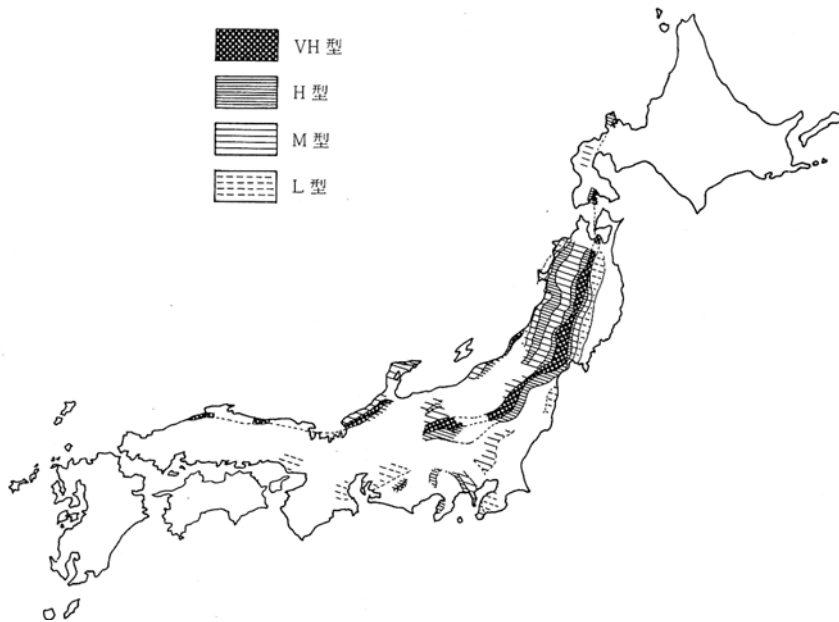


図 3-6 日本列島の新第三系における続成作用の各型の分布 (Utada, 1970)

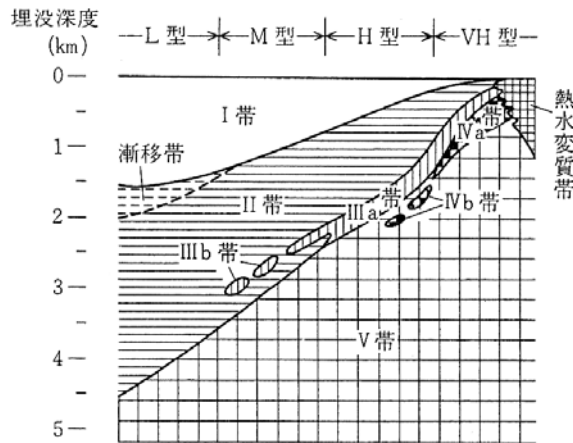


図 3-7 わが国の新第三系中にみられる続成変質による累帯分布の四型 (Utada, 1970)

帯：未変質ガラス帯 型：斜プチロル沸石・モルデン沸石帯 帯：方沸石・輝沸石帯 (a.広域的、b.ノジュール) 帯：濁沸石帯 (a.広域的、b.ノジュール) 帯：曹長石帯

2) 熱変成作用

「マグマが地層・岩石中に貫入した場合に、その熱の影響によって起こる変質作用」が熱変成作用である。続成作用と同様に、生成する変質鉱物は、被貫入岩の岩種によって差異が生じる。貫入岩体と被貫入岩体との境界付近では、熱水対流系が形成され、熱水変質岩を形成することが多い(釜石鉱山のスカルン鉱床など)。

3) 熱水変質作用

「広域的な地下増温率によって与えられる温度より高温の局所的な溶液が関与する変質作用」が熱水変質作用である。温度・圧力条件および溶液の化学的性質の範囲はともにきわめて広い領域にわたり、生成する変質岩もきわめて多様である。表 3.1-5は、白亜紀以後の日本列島に現われた熱水変質作用を整理し、温度と熱水溶液の化学条件によって変質帯を分類したものである。

表 3.1-5 熱水変質帯の温度と溶液の化学的条件による分類

酸性帯		中性帯		アルカリ性帯		高 ↑ 温度 ↓ 低
硫酸塩系	珪酸塩系	K-系	Ca-Mg系	Ca-系	Na-系	
明礬石-石英帯	パイロフィライト帯	カリ長石帯	プロピライト帯 (緑泥石・絹雲母- 緑レン石帯)	ワイラケ沸石帯	曹長石帯	
	デイクイト- ナクライト帯	絹雲母帯	プロピライト帯 (緑泥石・絹雲母帯)	濁沸石帯		
明礬石- オパール帯	カオリナイト帯	混合層粘土鉱物帯 (絹雲母/スメクタイト-緑泥石/ スメクタイト帯)		輝沸石帯	方沸石帯	
	ハロイサイト帯	スメクタイト帯		東沸石帯	モルデン沸石帯	

小 ← アルカリ・アルカリ土類イオン活動度 ⇒ 大
水素イオン活動度

表 3.1-6 熱水変質作用による累帯分布の型 (歌田、1995)

型	I								
	Ia			Ib					
	Ia ₁	Ia ₂	Ia ₃	Ib ₁	Ib ₂	Ib ₃	Ib ₄	Ib ₅	
中 累 心 帯 分 周 布 線	明礬石-石英帯	明礬石-石英帯 カオリナイト帯	明礬石-石英帯 カオリナイト帯 (ハロイサイト帯)	パイロフィライト帯 デイクイト-ナクライト帯 カオリナイト帯 (ハロイサイト帯)	パイロフィライト帯 デイクイト-ナクライト帯 カオリナイト帯 カオリナイト帯	パイロフィライト帯 デイクイト-ナクライト帯 カオリナイト帯 (ハロイサイト帯)	パイロフィライト帯 絹雲母帯 プロピライト帯 混合層粘土鉱物帯 スメクタイト帯	パイロフィライト帯 絹雲母帯 プロピライト帯 (スメクタイト帯)	モルデン沸石帯
形 態	平じょうご形	平じょうご形 層状	網状	じょうご形 カップ形	カップ形 層状	網状 層状	層状 レンズ状 脈状	きのこ形	

型	II							III	
	IIa				IIb			IIIa	IIIb
	IIa ₁	IIa ₂	IIa ₃	IIa ₄	IIb ₁	IIb ₂	IIb ₃		
中 累 心 帯 分 周 布 線	カリ長石帯 絹雲母帯 カオリナイト帯	カリ長石帯 絹雲母帯 混合層粘土鉱物帯	カリ長石帯 プロピライト帯 混合層粘土鉱物帯	カリ長石帯 プロピライト帯 混合層粘土鉱物帯 (スメクタイト帯) 方沸石帯 モルデン沸石帯	プロピライト帯 混合層粘土鉱物帯 スメクタイト帯	プロピライト帯 濁沸石帯 輝沸石帯 東沸石帯	プロピライト帯 混合層粘土鉱物帯 方沸石帯 モルデン沸石帯	ワイラケ沸石帯 濁沸石帯 輝沸石帯 東沸石帯	曹長石帯 方沸石帯 モルデン沸石帯
形 態	層状 網状	脈状 網状	脈状 網状	きのこ形	脈状 網状 層状	きのこ形	きのこ形	脈状	層状

4) 変質区の分布

歌田(1995)は、日本列島内帯の白亜紀以後の地層・岩体を、海成岩堆積岩および火山岩の4変質区(A1~A4)、3変成岩区(B1~B3)、非海成岩堆積岩および火山岩の熱水変質区(C1)、花崗岩類の熱水変質区(C2)の6変質区および3変成区に区分している。

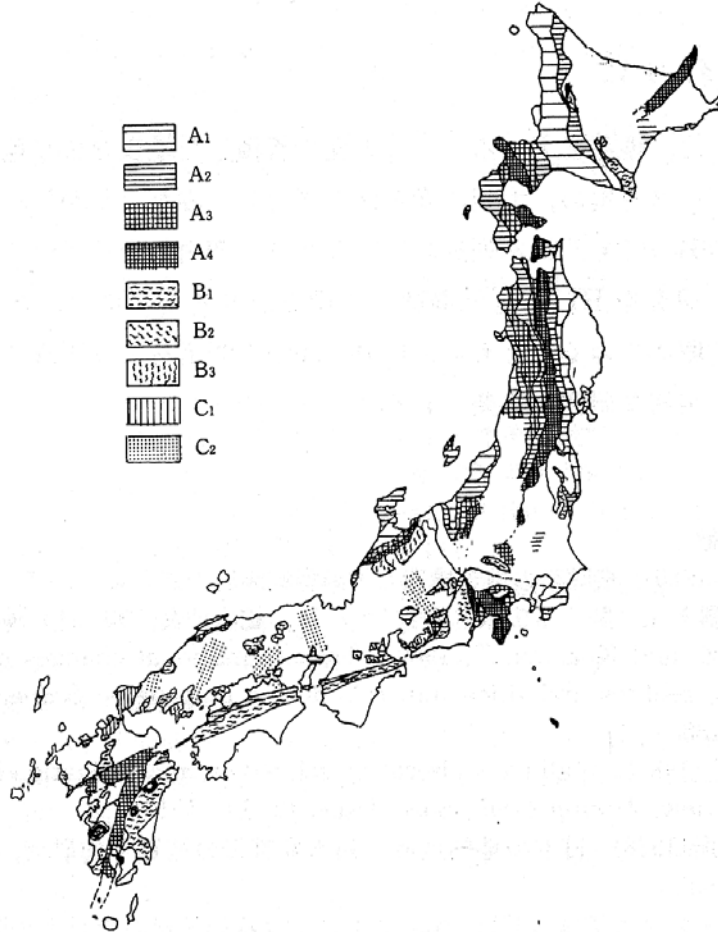


図 3-8 変質区の分布 (歌田、1995)

A1 区：海成堆積岩の続成作用はVH型に属し、カルデラ型沸石変質域を含む。酸性～アルカリ性熱水変質が集中し、活地熱帯も多く含まれる。貫入岩も多く、その周囲に小規模な熱変成が見られる。全体として、きわめて複雑な変質帯分布を示す。

A2 区：海成堆積岩の続成作用はV型に属し、カルデラ型沸石変質も一部に見られる。貫入岩も多く、その周囲に熱変成と熱水変質を伴っている。活地熱地帯は稀であるが、種々の金属・非金属鉱床を伴う熱水変質域は小規模であるが多数分布している。

A3 区：海成堆積岩の続成作用はM型に属し、カルデラ型沸石変質は見られない。貫入岩体も少なく、熱水変質は大規模なものは見られない。

A4 区：海成堆積岩の続成作用はM型に属し、カルデラ型沸石変質は見られない。貫入岩体も少なく、熱水変質は大規模なものは見られない。

B1～B3 区：各々、高圧、中圧、低圧変成岩の分布域

C1 区：主として白亜系海成層の変質区で、続成作用の指標鉱物であるゼオライトなどが出現しないため、A1～A4 区のいずれにも区分できない。プロピライト化が広域的に見られるが、成因は明らかではない。

C2 区：花崗岩類の変質区であり、変質作用は局所的な熱水変質と熱変成のみである。熱水変質の現われ方により細分が可能であるが、調査が不十分のため現時点では一括した。

(5) 堆積岩の物質移行特性

堆積岩の物質移行パラメータに関し、従来から多数の研究がなされているが、ここでは、そのうちの主な知見をまとめる。

1) 拡散係数

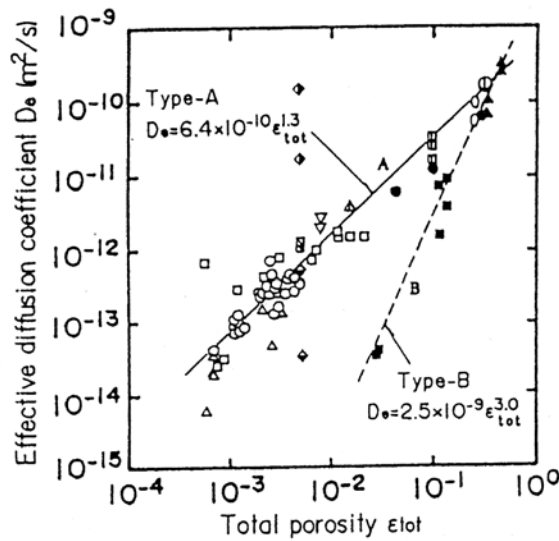
堆積岩中の実効拡散係数と有効空隙率の間に、以下の線形な相関が実験的に示されている(図 3-9)。

$$\log D_e \sim \log \phi_e \quad (3.1-1)$$

実効拡散係数は、概念的に次式により表される。

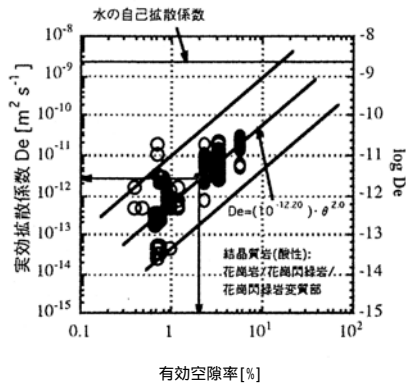
$$D_e = \phi_e \tau D \quad (3.1-2)$$

ここに、 D_e :実効拡散係数 [m^2/s]、 ϕ_e :有効空隙率 [-]、 τ :屈曲度 [-]、 D :水中での拡散係数 [m^2/s]、である。この式によれば、実効拡散係数は空隙率と空隙の屈曲度により線形的に変化する。この関係は「第2次とりまとめ」中で、図 3-10のように、岩種ごとにとりまとめられている。これらの図から、概ね ± 1 オーダーの範囲で、(3.1-1)式の相関が確認される。

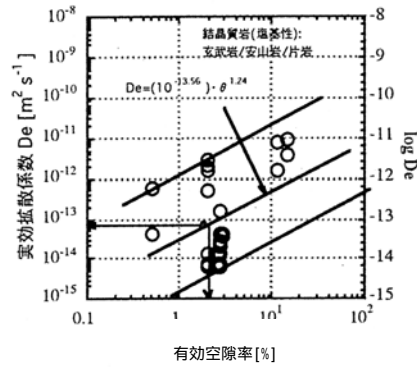


- , ○: siliceous sedimentary rock from Onnagawa
- ▲: siliceous sedimentary rock from Kamanosawa
- : andesite from Kushikino
- ◇: schist from Iwaki whose schistosity is parallel to the diffusion direction.
- ◇: schist from Iwaki whose schistosity is perpendicular to the diffusion direction.
- △: limestone from Kitaibaraki
- ▽: granite from Inada, O: tuff from Izu (KITA et al., 1989)
- , △: granite and gneiss from Sweden (SKAGIUS and NERETNIEKS, 1986)
- , □: sandstone and anhydrite from United Kingdom

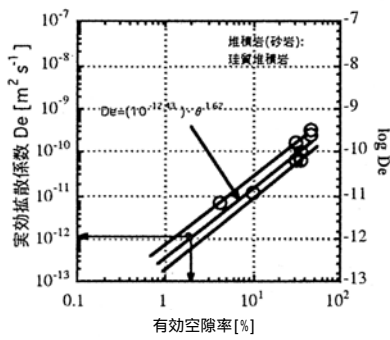
図 3-9 空隙率と実効拡散係数の関係（中嶋，1994）



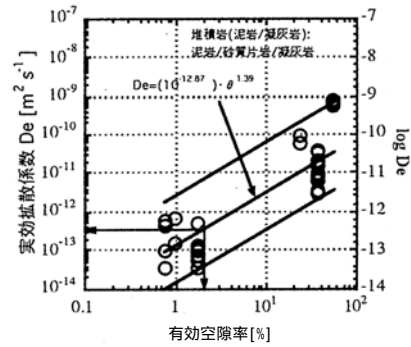
(a) 酸性結晶質岩



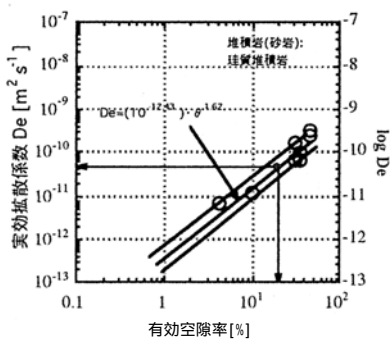
(b) 塩基性結晶質岩



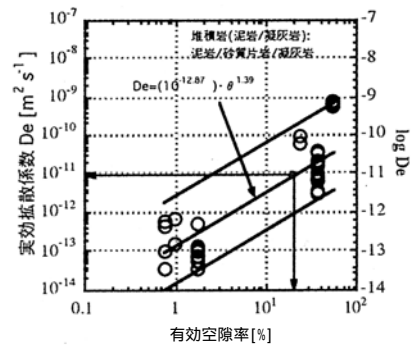
(c) 先新第三紀砂質岩



(d) 先新第三紀泥質・凝灰質岩



(e) 新第三紀砂質岩



(f) 新第三紀泥質・凝灰岩

図 3-10 各岩種に対する有効空隙率と実効拡散係数の関係

(核燃料サイクル開発機構、2000)

2) 分散係数 (分散長)

分散係数は主に亀裂内流れに対して測定例が多く、堆積岩マトリクス内の分散係数の測定事例は少ない。

Gelhar 他(1992)は図 3-11に示すような縦方向分散長と移行距離の関係を示している。縦方向分散長は、移行距離の 1/10 倍を中心に、1/100 ~ 1/1 倍に分布している。Neuman(1995)は、室内および原位置での測定結果を取りまとめ、亀裂性媒体および多孔質媒体にかかわらず、縦方向分散長は移行距離が 10cm ~ 3.5km の範囲で以下の回帰直線により表されるとしている。

$$\alpha_L = 0.017L^{1.5} \quad \alpha_L : \text{縦方向分散長 [m]、} L : \text{移行距離 [m]}$$

同様の傾向は、新藤他 (1995) によっても示されている (図 3-12)。

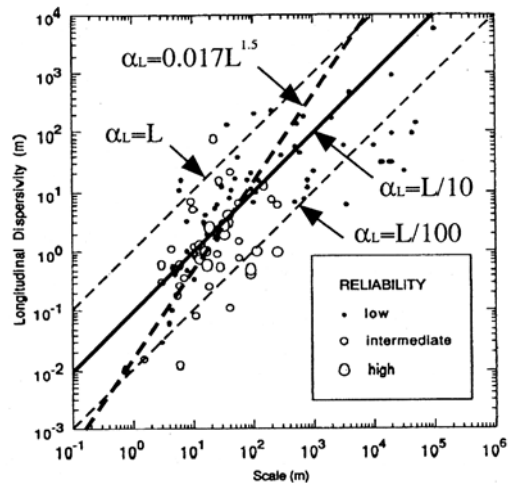


図 3-11 縦方向分散長と移行距離の関係 (Gelhar 他、1992)

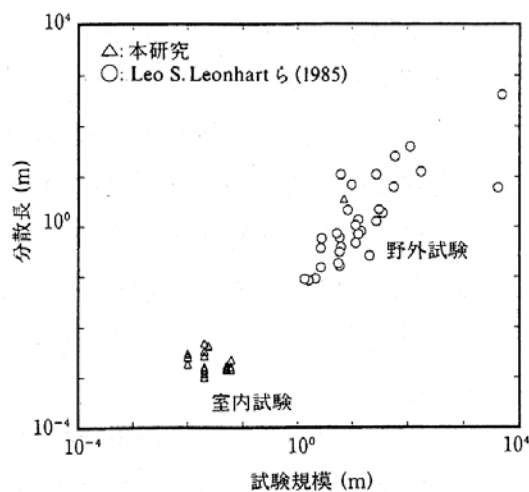


図 3-12 第三紀堆積岩におけるトレーサー試験結果 (新藤他、1995)

3.2 軟岩物性による分類

堆積性軟岩（新第三紀以降の堆積岩）を対象として、岩石マトリクス部の基本物性データ（一軸圧縮強度や弾性波速度など）を、既往のデータベースをもとに収集した。収集のデータを用い、弾性波速度、一軸圧縮強度と有効空隙率の関係に注目して、我が国においてとりうる値の範囲を把握するとともに、地域的あるいは年代的な傾向の違いについても検討した。

3.2.1 使用データ

使用した既往データベースは次の2つである（表 3.2-1）。

- ・ 核燃料サイクル開発機構 岩石・岩盤物性データベース（佐藤ほか, 1999）
- ・ 産総研地質調査総合センター - 「本邦産岩石の深部物性データ集」（星野ほか, 2001）

（1）JNC 岩石・岩盤物性データベース

岩石・岩盤物性データベース（佐藤ほか, 1999）は、我が国における地下深部の岩盤が有する一般的な熱的および力学的性質の理解を目的としてデータ収集されたものである（表 3.2-2）。データソースは、文献調査および釜石鉱山や東濃鉱山における調査・試験結果であり、我が国の新生代第四紀を除く全地質種（岩種）を対象としている。収集結果は 1992 年と 1999 年 2 回にわたって取りまとめられている（佐藤ほか 1992, 佐藤ほか 1999）。以下、このデータベースを「JNC データベース」と呼ぶ。

（2）本邦産岩石の深部物性データ集

本邦産岩石の深部物性データ集（星野ほか, 2001）は、下記の2つのソースの高圧実験データを基に編集された力学物性データベースである。1つめのソースは、地質調査所の地質力学研究室において、1966 年から 1986 年頃までの約 20 年間にわたって行われた多数の高圧実験データ（日本全国の 500 種の深成岩、火山岩、堆積岩など）である。対象試料には、我が国で産出する代表的な岩石種のほぼ全てが包含されている。2つめのソースは、石油公団によって実施された石油基礎試験について行われた実験データ（1963 年以降の 46 坑余）である。データが収録されている試料数は、地表試料が 230 試料、坑井試料が 288 試料の合計 518 試料である。それらのうち、堆積岩試料は、429 試料（地表 198 試料、坑井 231 試料）と、全体の 82% を占めている。

データの内容としては、高圧三軸圧縮試験による力学強度データの他、有効空隙率（孔隙率）、密度、弾性波速度などの基本物性値や、採取箇所の座標、地層名、参考文献などが詳細に記載されている。以下、このデータベースを「深部岩石データベース」と呼ぶ。

表 3.2-1 使用した岩石物性データベース

名称 (作成者)	データソース	収集データ	データ数
岩石・岩盤物性データベース (佐藤他, 1992)	(1)文献調査 (2)東濃、釜石における 調査研究データ	熱特性:熱伝導率等 水理特性:有効空隙率等 力学特性 :一軸圧縮強度、 弾性波速度等) など	合計 5378 試料 (新第三紀堆積岩 1363)
本邦産岩石の深部物性データ集 (星野他, 2001)	(1)室内高圧実験データ (地質調査所) (2)石油基礎試験データ (石油公団)	地質年代、採取地点(緯度・ 経度) 深度、有効空隙率(孔 隙率) 弾性波速度、密度、 弾性係数、3 軸強度試験結果 など	合計 518 試料 (新第三紀堆積岩 266) 地表試料:230 試料 坑井試料:288 試料

表 3.2-2 岩石・岩盤物性データベース (佐藤ほか, 1999)

岩類	空隙・水				弾性波速度				密度			強度						
	深度 (m)	吸水率 (%)	含水率 (%)	有効間隙率 (%)	P波: Vp (km/sec)	S波: Vs (km/sec)	動ポアソン比	動弾性係数 (%)	地山の弾性波速度 (km/sec)	飽和密度 (g/cm ³)	自然密度 (g/cm ³)	乾燥密度 (g/cm ³)	一軸圧縮強度 (MPa)	静ポアソン比	静弾性係数 (GPa)	圧裂引張強度 (MPa)	せん断強度 (MPa)	内部摩擦角 (deg)
新第三紀堆積岩			16.7								2.1		2.94	0.34	0.47688			
新第三紀堆積岩			10.8								2.09		1.47		0.186314			
新第三紀堆積岩			4.3								2.14			0.33	3.373264			
新第三紀堆積岩				5.1	3.79	2.25				2.64	2.61	2.59						
新第三紀堆積岩									3.2						68.6			
新第三紀堆積岩									2.5						3.43			
新第三紀堆積岩			15.5	0.4							2.7			11.956				
新第三紀堆積岩			118.4	71.9						1.35		0.62		2.156				
新第三紀堆積岩			18													1.568	21	
新第三紀堆積岩			18					12.2575			2.18				0.323598			
新第三紀堆積岩			19.8			3					2.19				0.392434			
新第三紀堆積岩						2.07									5.684			
新第三紀堆積岩							17.55274									1.17672		
新第三紀堆積岩							16.57214									0.986		
新第三紀堆積岩							17.35662									1.431676		
新第三紀堆積岩							16.96438									1.42187		
新第三紀堆積岩							18.6314									1.7658		
新第三紀堆積岩							17.94498									1.37284		
新第三紀堆積岩							18.1411									1.6672		
新第三紀堆積岩							17.84692									1.6672		
新第三紀堆積岩							33.73264						1.47					
新第三紀堆積岩													0.784					
新第三紀堆積岩													0.294					
新第三紀堆積岩						3.05							31.36					
新第三紀堆積岩		15	9	31							2.28				0.882			
新第三紀堆積岩				20	2	0.4					2.1				0.49			
新第三紀堆積岩			10															
新第三紀堆積岩			6.7															
新第三紀堆積岩			10															
新第三紀堆積岩			25							2.06								
新第三紀堆積岩			18.3							2.16								
新第三紀堆積岩			21.7							2.08								
新第三紀堆積岩		9.2		19							2.26							
新第三紀堆積岩		10.3		21							2.26							
新第三紀堆積岩		25.4		35.9							1.78							
新第三紀堆積岩											2.38				46.6			29
新第三紀堆積岩			28.4	0.8						1.98	1.94	1.51			0.588			
新第三紀堆積岩			25.4	0.7						2.02	1.97	1.57			0.49			
新第三紀堆積岩			17.2		2.74						2.18				2.156			
新第三紀堆積岩				3.6	4.49	1.27				2.62	2.6	2.58			0.215732			
新第三紀堆積岩				4.1	3.75	2.36				2.62	2.6	2.58						
新第三紀堆積岩				3.2	4.24	2.76				2.63	2.61	2.6						
新第三紀堆積岩				4.1	3.95	2.56				2.64	2.62	2.6						
新第三紀堆積岩				4.5	3.97	2.42				2.64	2.61	2.59						
新第三紀堆積岩				10.9	2.78	1.76				2.49	2.41	2.38						
新第三紀堆積岩					4.49							2.6						
新第三紀堆積岩					3.75						2.6							
新第三紀堆積岩					4.24						2.61							
新第三紀堆積岩					3.95						2.62							
新第三紀堆積岩					3.97						2.61							
新第三紀堆積岩					3.79						2.61							
新第三紀堆積岩					2.69						2.41							
新第三紀堆積岩					2.76						2.41							
新第三紀堆積岩					4.87						2.51							
新第三紀堆積岩											2.03		0.588		0.986			
新第三紀堆積岩											2.03		0.392					
新第三紀堆積岩											2.02		0.294					
新第三紀堆積岩			2.2										74.48					
新第三紀堆積岩			0.5		5.7								17.8					
新第三紀堆積岩			0.9		5						2.6							

3.2.2 物性データの整理

堆積岩に普遍的に見られる地質学的現象として続成作用が挙げられる。続成作用は、堆積物が堆積後に、化学的・物理的变化をして固結する過程で生じるものであり、その主要な作用として、圧密作用とセメンテーションが挙げられる。いずれの作用も、間隙の縮小あるいはセメント物質による充填を生じ、岩石の空隙率を減少させ、岩石の密度を増加させると考えられる。

一般に、空隙率の減少に伴い、一軸圧縮強度や弾性波速度が増加することが言われている。今回は、一軸圧縮強度ならびに弾性波速度と有効空隙率との関係に着目し、我が国の軟岩の物性データを整理した。その結果を以下に示す。

なお、ここで用いるデータベースで用いられている空隙率について、JNC 岩石・岩盤物性データベース内では、有効空隙率との表記で統一されているが、本邦産岩石の深部物性データ集内では、全て孔隙率と表記されている。通常、岩石試料内部の空隙には、空気や水が流通し得ない部分があるため、測定される空隙率は有効空隙率である場合がほとんどである。ここで用いられているデータに関しても、試験方法等を見ると、有効空隙率を測定していると考えられる。しかし、ここでは、使用したデータベース内のオリジナルの表記を尊重し、それぞれのデータベースで用いられている表記をそのまま用いることとする。

(1) 弾性波速度と空隙率の関係

石油の岩石物理学の分野においては、弾性波速度 V_p と空隙率 n の関係に関する経験式、

$$V_p = \alpha - \beta n - \gamma C$$

が知られている (Han 他, 1986)。ここに、 α 、 β 、 γ は定数、 C は粘土含有率であり、空隙率と粘土含有率が増加すると、弾性波速度が減少することを示す (図 3-13)。Phillips(1989)は、この式に、封圧の効果を加えた経験式を提案している。また、圧密やセメンテーションの進行によっても、弾性波速度が増加することが示されている(図 3-14)。2つのデータベースから求めた、第三紀堆積岩の弾性波速度(P波速度)と有効空隙率(孔隙率)の関係を図 3-15~図 3-18に示す。これらの図から、P波速度は有効空隙率(孔隙率)の減少とともに増加する傾向が見られ、そのばらつきは概ね $\pm 1\text{km/s}$ 程度であることが分かる。先述の通り、弾性波速度は、空隙率だけでなく、粘土含有率や続成作用程度(セメンテーションの影響など)といった地質的な要因も反映していると考えられる。しかしながら、今回のデータセットには、粘土含有率やセメンテーションに関するデータは含まれていない。試みに、堆積環境や埋没履歴がある程度類似すると考えられる同一地層について、比較的データの多い10箇所の地層を選び、地層別にプロットした結果を図 3-18に示す。しかし、同一地層のプロットを同じ色で示したが、データ数が十分でないこともあり、地層による明瞭な傾向の違いは見られない。

図 3-17と図 3-18には、本研究の室内実験試料の採取地点である幌延深地層研究センターのHDB-1号孔及びHDB-2号孔で得られた値を合わせて示した。幌延HDB-1号孔及び

HDB-2号孔のデータに関しては、以下のことが言える。

- ・ 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。
- ・ 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。

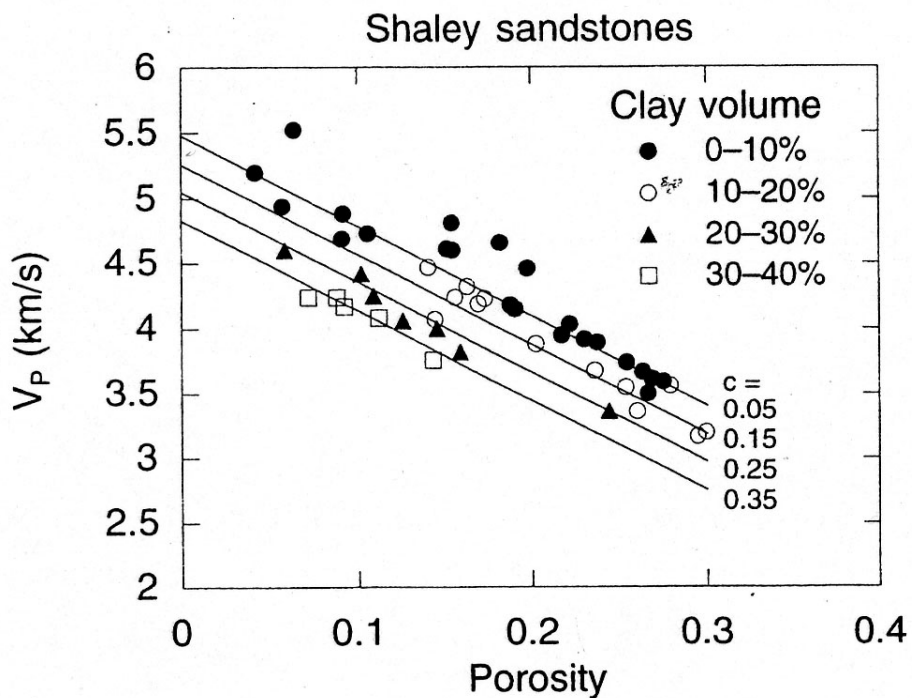


図 3-13 弾性波速度と空隙率の関係 (Han 他., 1986)

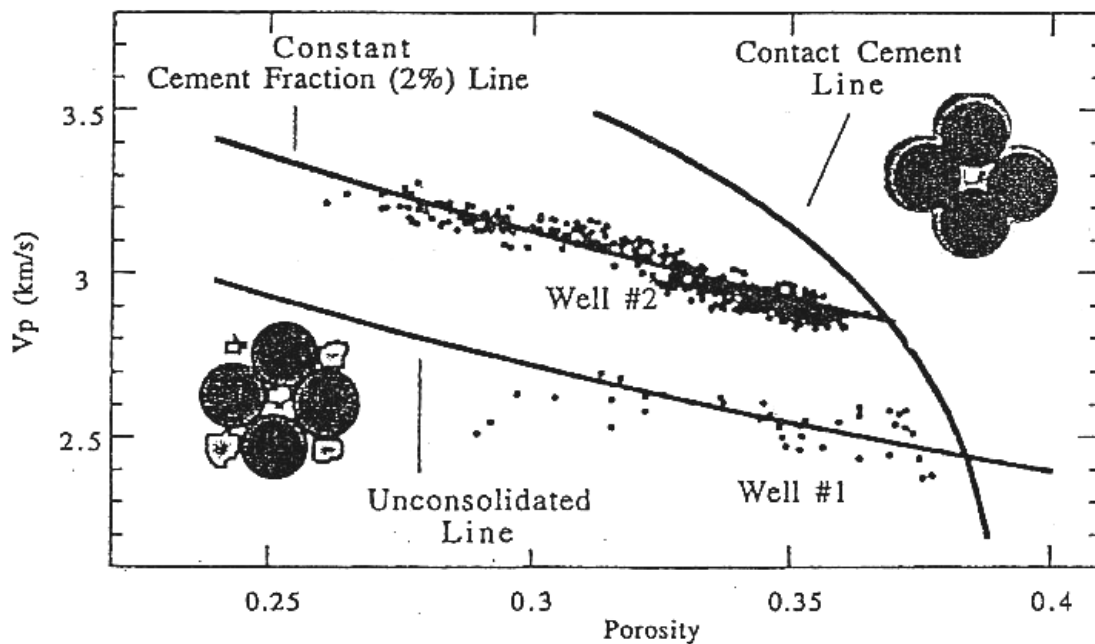
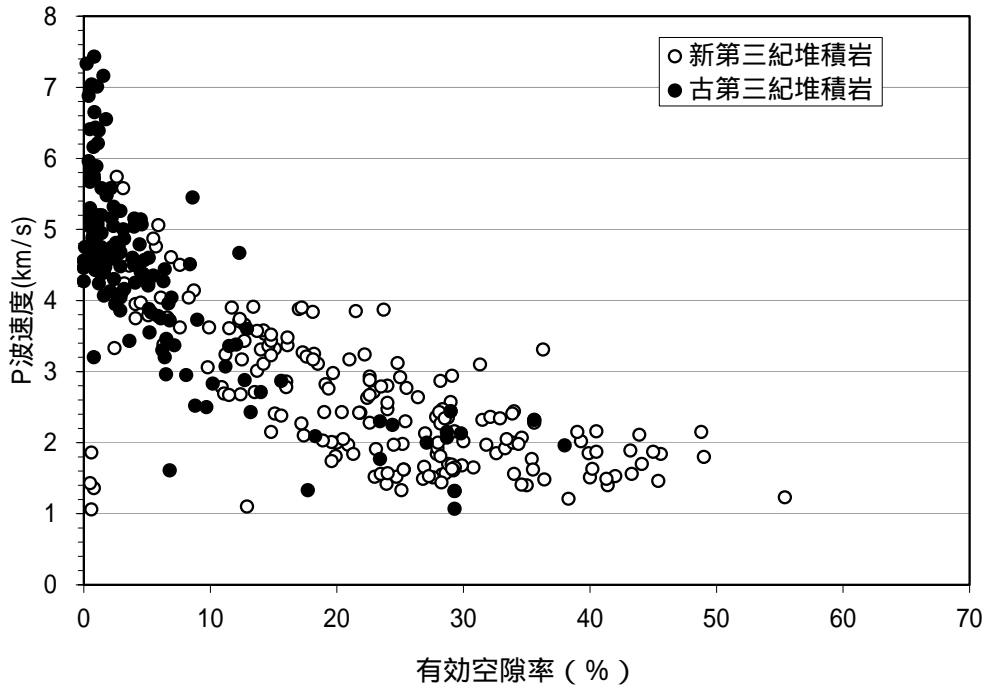
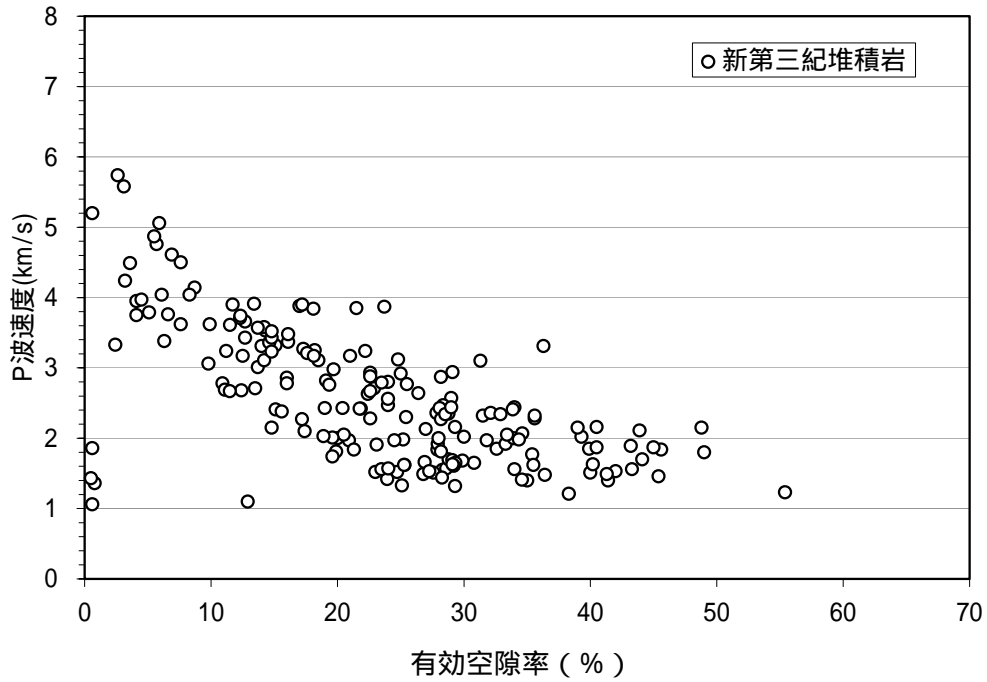


図 3-14 空隙率とP波速度の関係 (J.Dvorkin 他)

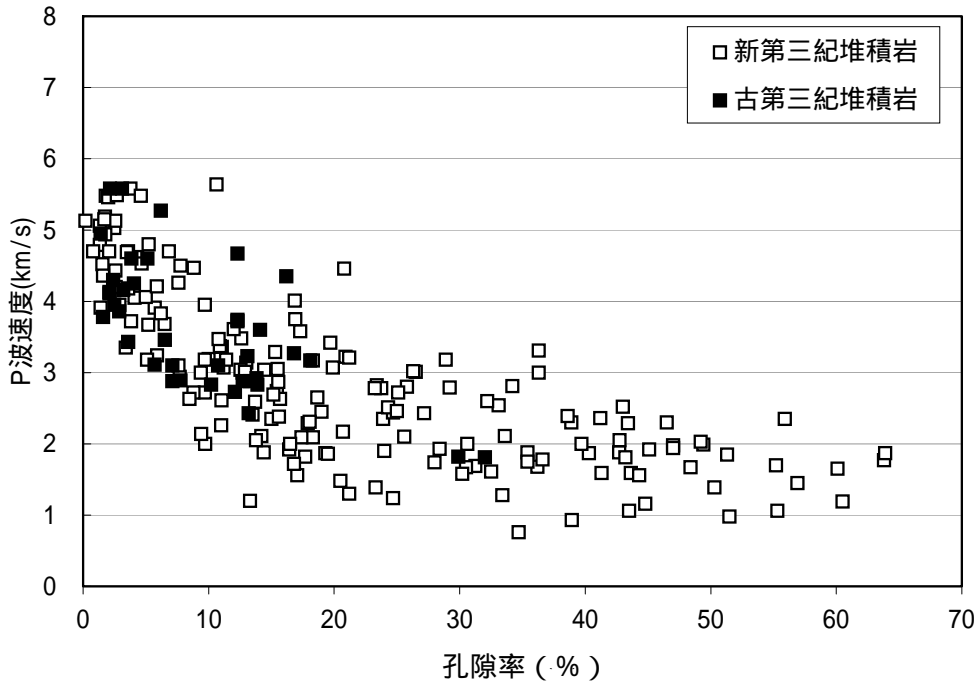


(a) 古第三紀及び新第三紀堆積岩

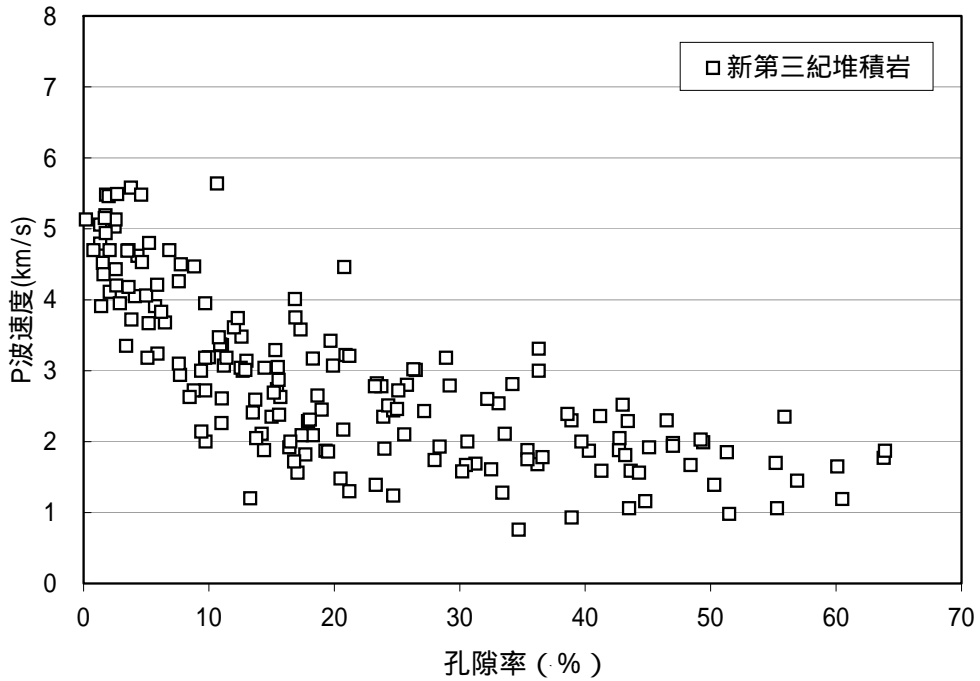


(b) 新第三紀堆積岩

図 3-15 弾性波速度と有効空隙率の関係 (JNC データベース)



(a) 古第三紀及び新第三紀堆積岩



(b) 新第三紀堆積岩

図 3-16 弾性波速度と孔隙率の関係 (深部岩石データベース)

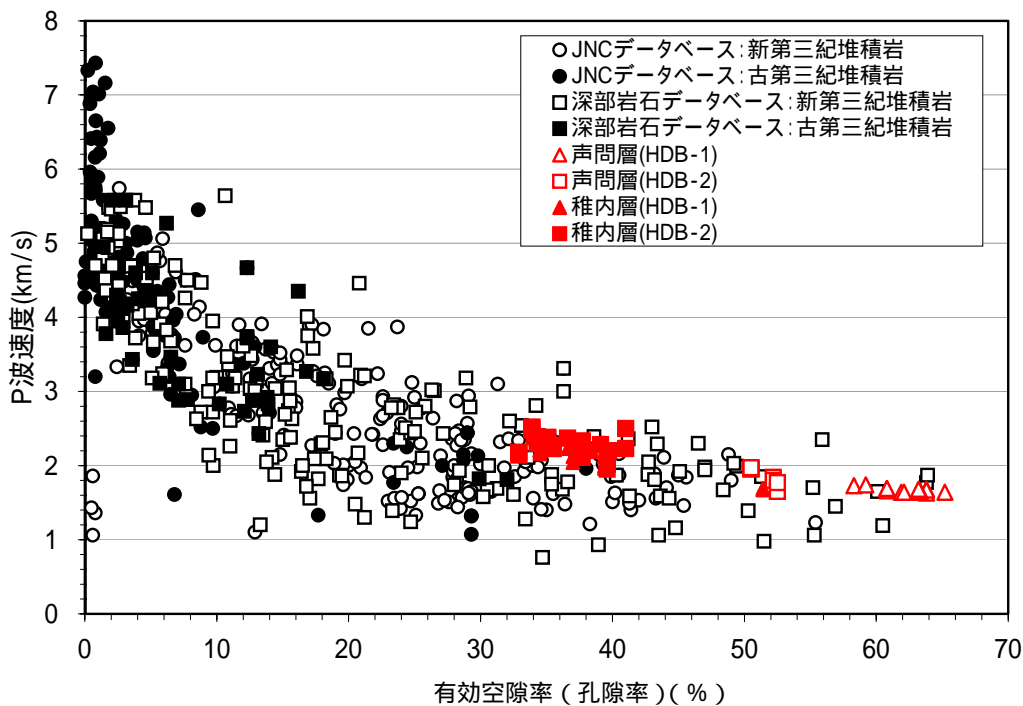


図 3-17 弾性波速度と有効空隙率（孔隙率）の関係
（JNC + 深部岩石データベース、片対数軸）

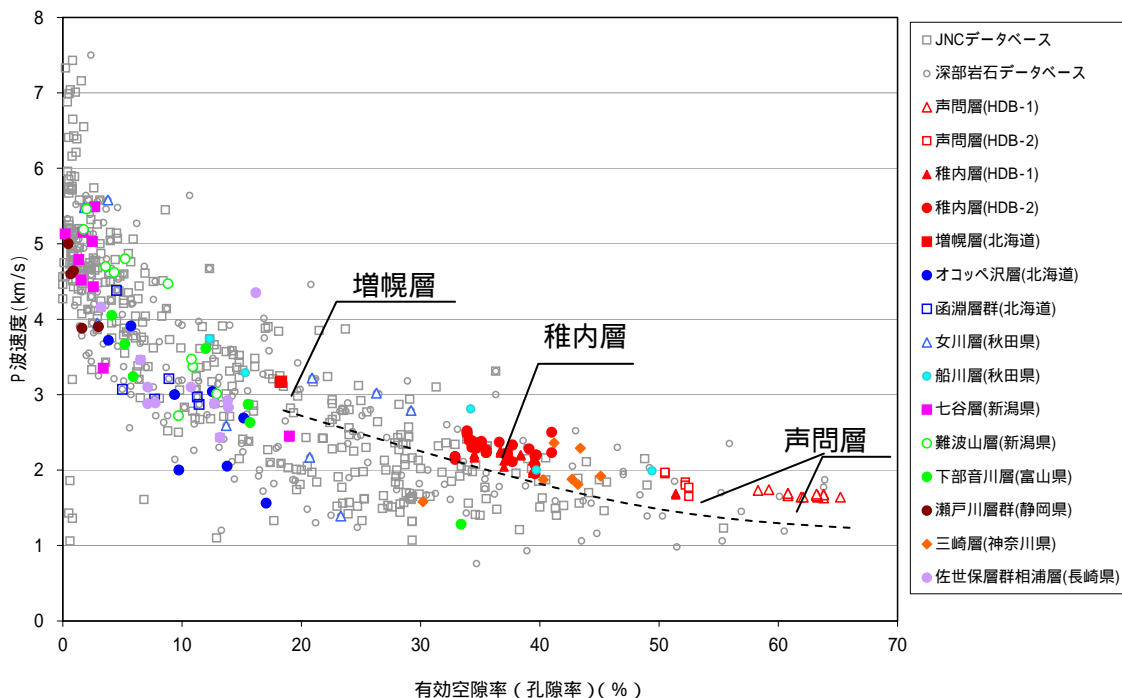


図 3-18 弾性波速度と有効空隙率（孔隙率）の関係
（JNC + 深部岩石データベース、片対数軸）

(2) 空隙率と一軸圧縮強度との関係

星野(1975)は、天草および北西九州地域の白亜紀～始新世の堆積岩について、空隙率と岩石強度の関係を調べ、その間に次式で表される強い相関が認められることを示した。

$$n = A_0 e^{-b\sigma}$$

ここに、 n ：空隙率、 σ ：岩石強度、 b ：強度定数、 A_0 ：定数である(図 3-19)。ここで、 b は、 n と σ を片対数グラフ上にプロットしたときの傾きであり、造構運動があまり激しくない条件のもとで、地域や年代の異なる堆積岩が同程度の b 値をとること、すなわち、圧密の最終段階においては、通常の堆積盆地環境下での一般的な b 値が存在する可能性を示唆している。

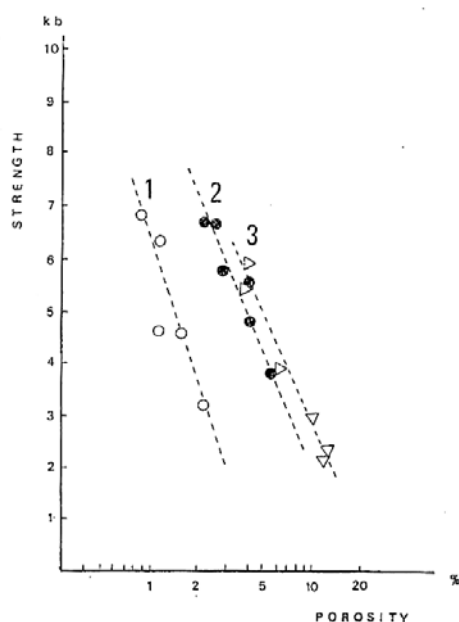


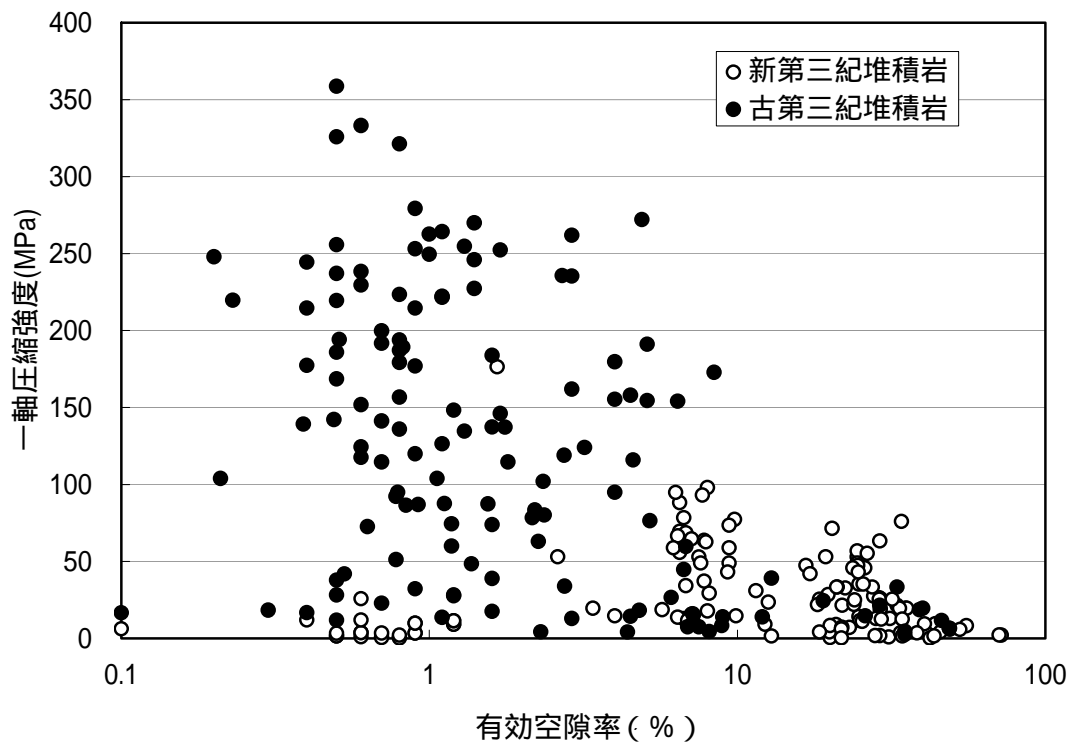
図 3-19 空隙率と強度の関係 (星野他、1975)

JNC データベースならびに深部岩石データベースにより求めた、第三紀の堆積岩の一軸圧縮強度と有効空隙率(孔隙率)の関係を図 3-20～図 3-23に示す。ただし、深部岩石データベースの一軸圧縮強度 q_u は、同データベースの強度データが三軸圧縮試験結果であることから、せん断強度 S_i と内部摩擦角 ϕ から、 $q_u = 2S_i \times \tan(45^\circ + \phi/2)$ により換算して求めたものである。これらの図から、一軸圧縮強度は有効空隙率(孔隙率)の対数で増加する傾向が見られるが、弾性波速度の場合と比較してばらつきが大きく、地域的あるいは年代的な違いを判別することは、より困難と考えられる。各地層毎の一軸圧縮強度と有効空隙率(孔隙率)の関係を図 3-24に示した。大局的には図 3-19と同様の相関が見られるが、データ数が少なく、ばらつきも大きい。

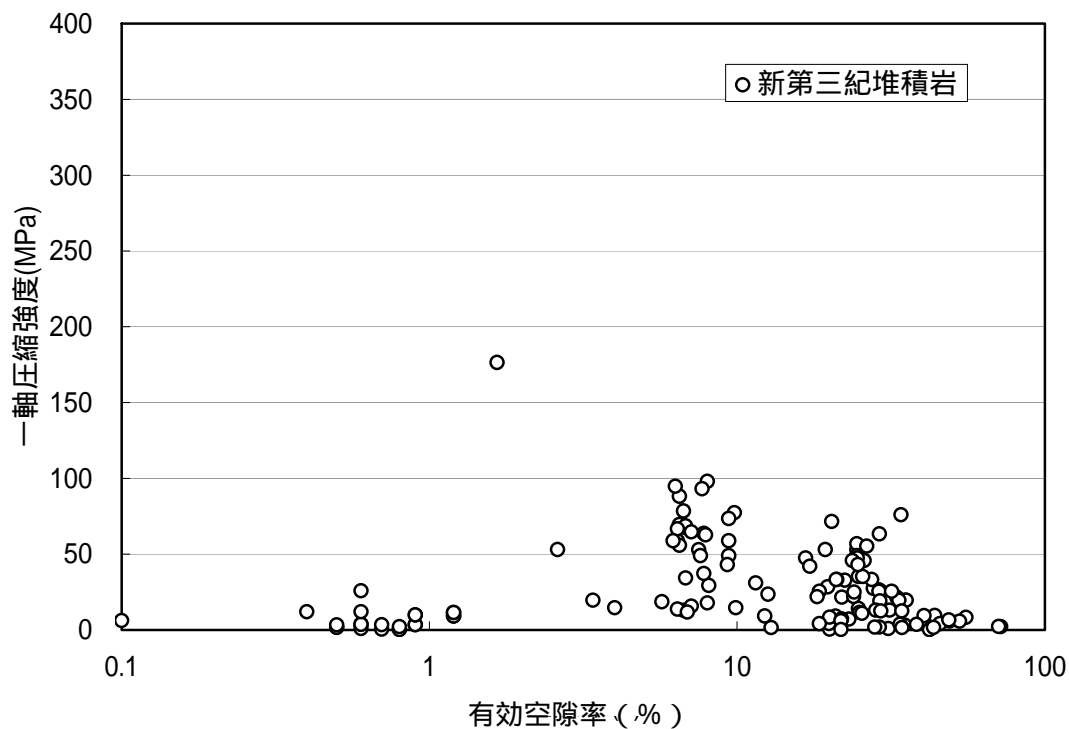
図 3-25中に、本研究で使用した室内実験試料を採取した試錐孔であり、幌延地域に平成 13 年度に掘削された HDB-1 号孔及び HDB-2 号孔の試錐調査で実施されたコアサンプルの試験結果を示した。この図から、各地層(声問層と稚内層)に分けてみると、声問層と

JNC TJ8400 2003-028

稚内層を合わせた全体としては、弱い相関が見られる。

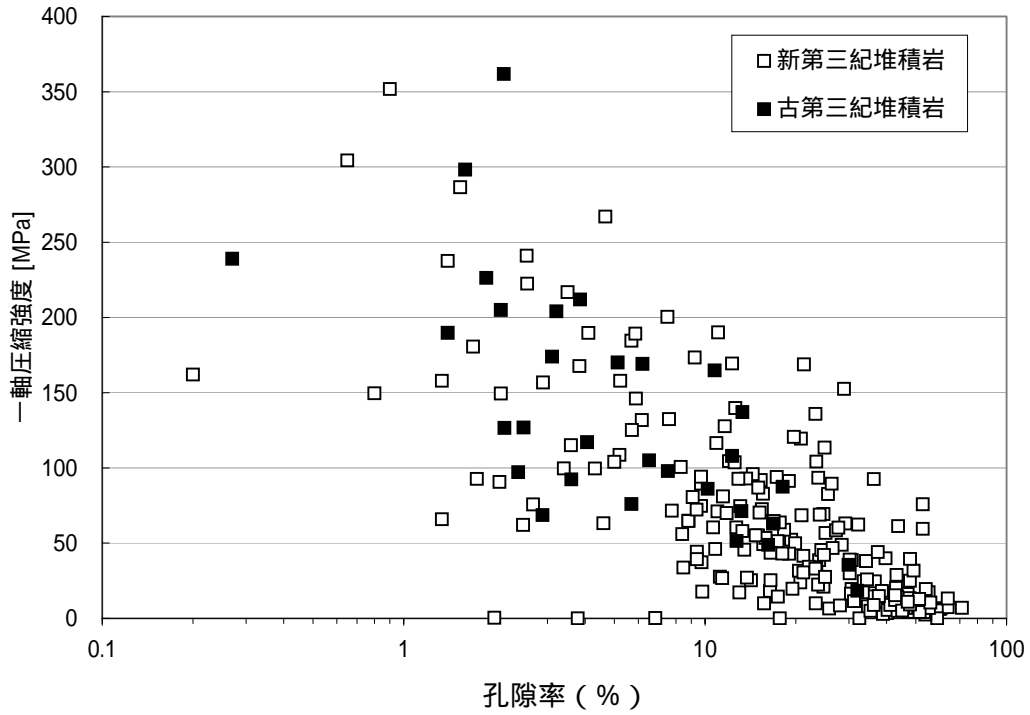


(a) 古第三紀及び新第三紀堆積岩

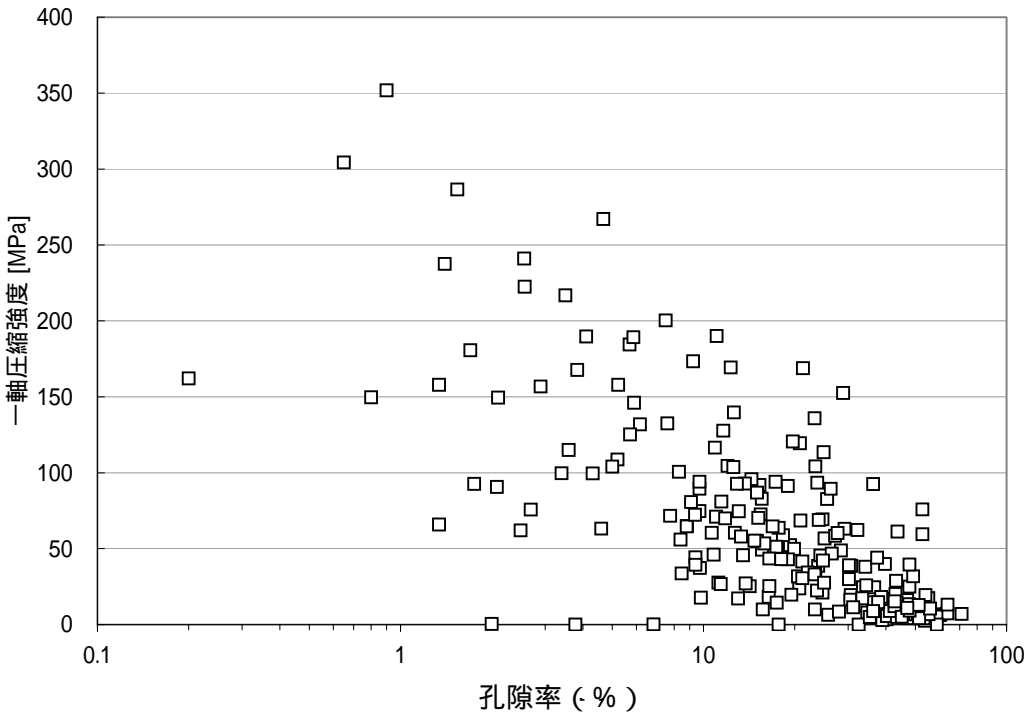


(b)新第三紀堆積岩

図 3-20 一軸圧縮強度と有効空隙率の関係 (JNC データベース)

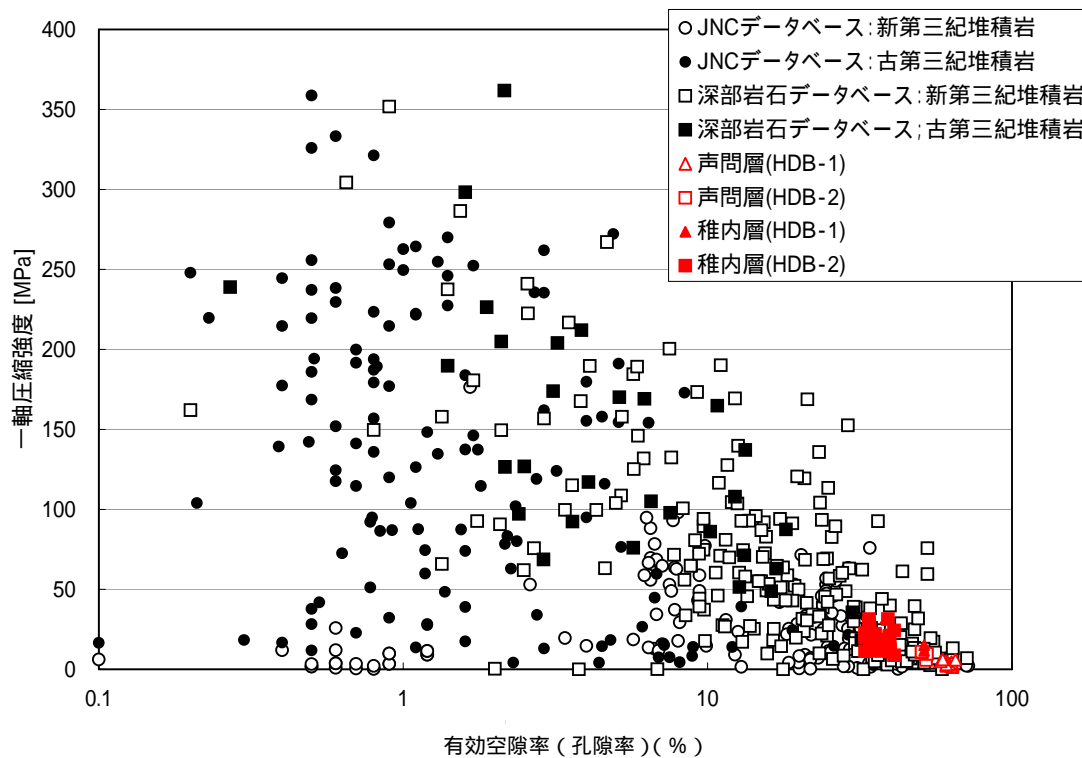


(a) 古第三紀及び新第三紀堆積岩

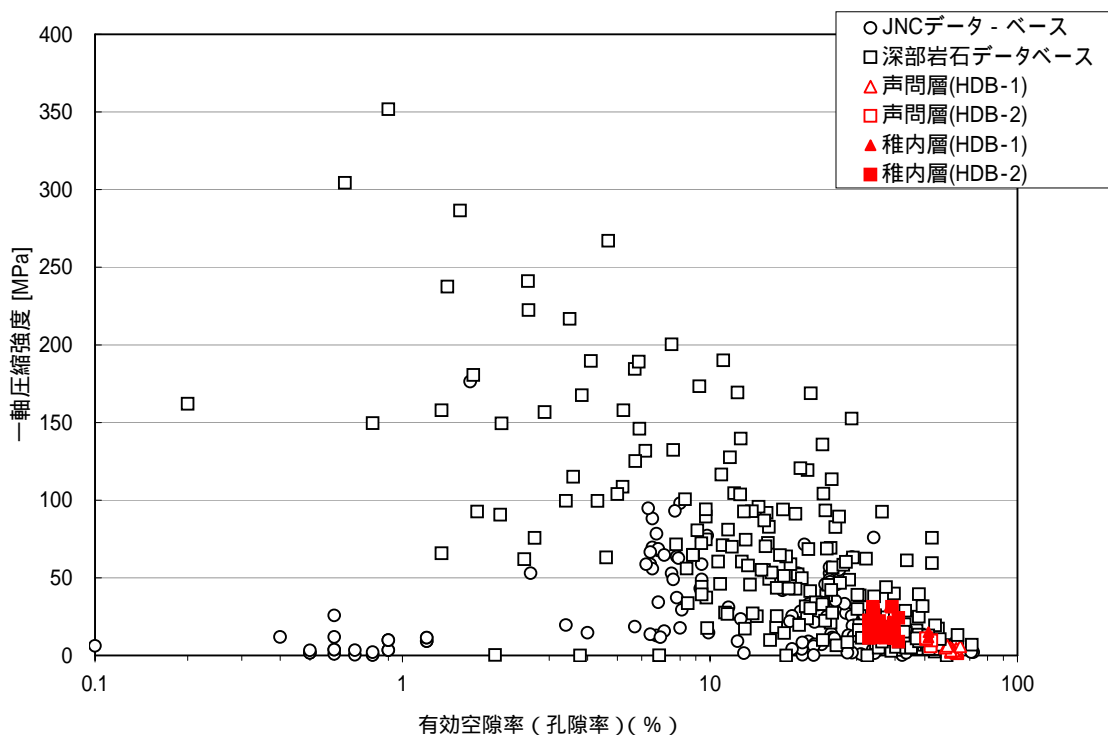


(b) 新第三紀堆積岩

図 3-21 一軸圧縮強度と孔隙率の関係 (深部岩石データベース)

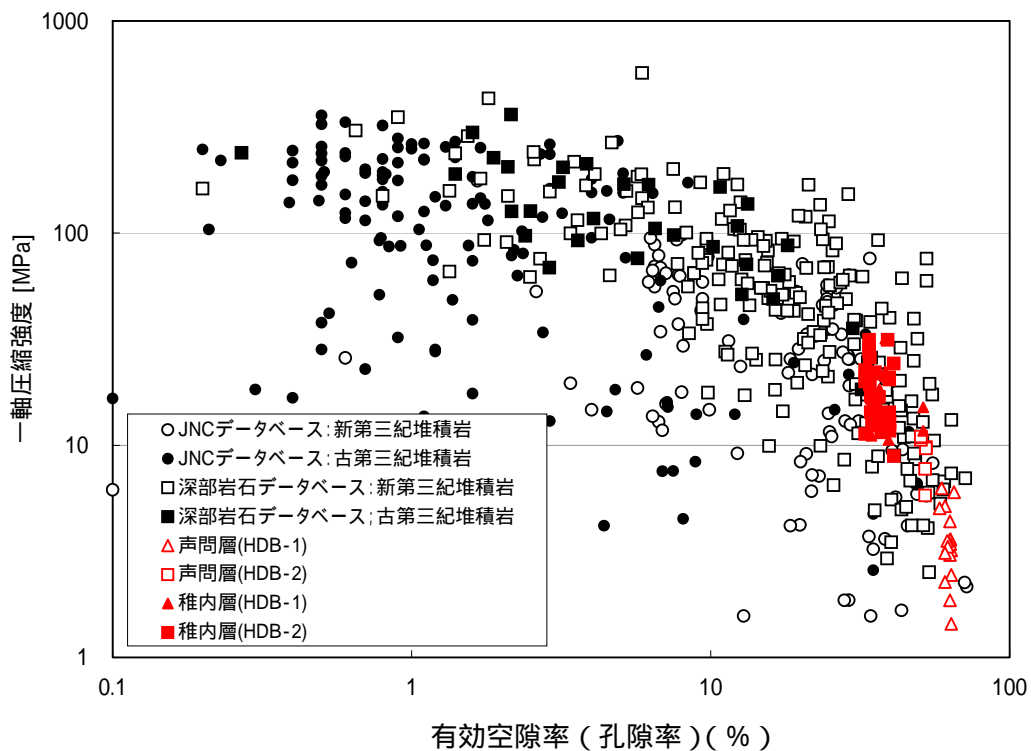


(a) 古第三紀及び新第三紀堆積岩

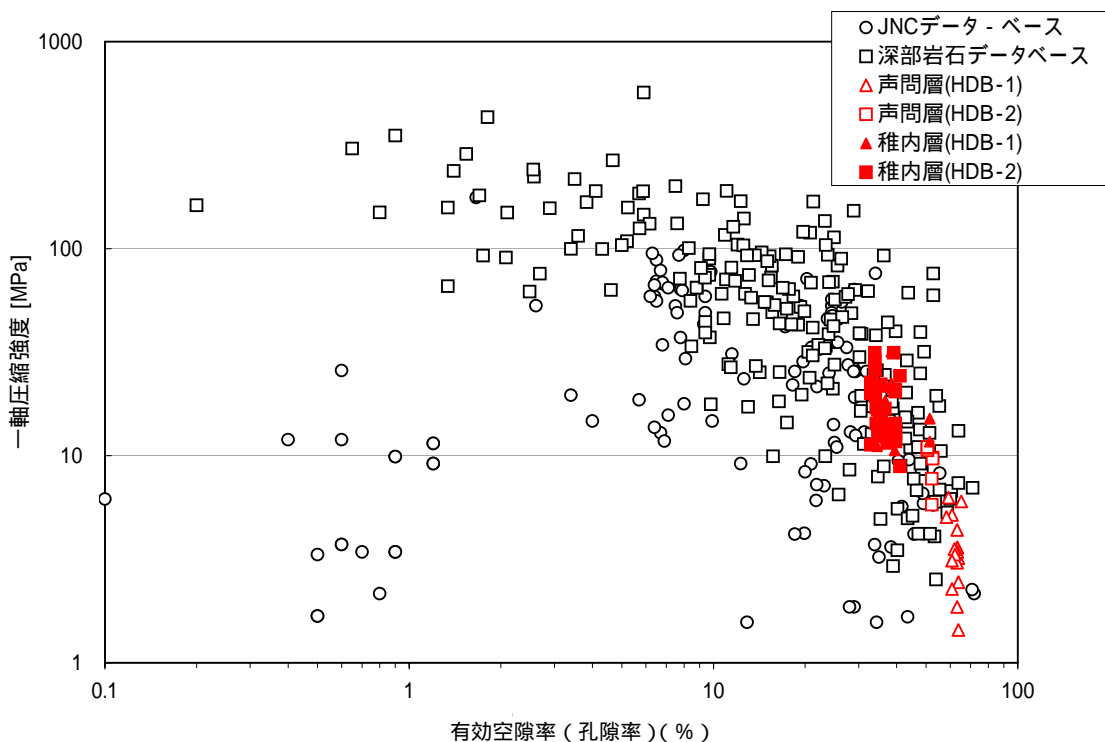


(b) 新第三紀堆積岩

図 3-22 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）



(a) 古第三紀及び新第三紀堆積岩



(b) 新第三紀堆積岩

図 3-23 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、両対数軸）

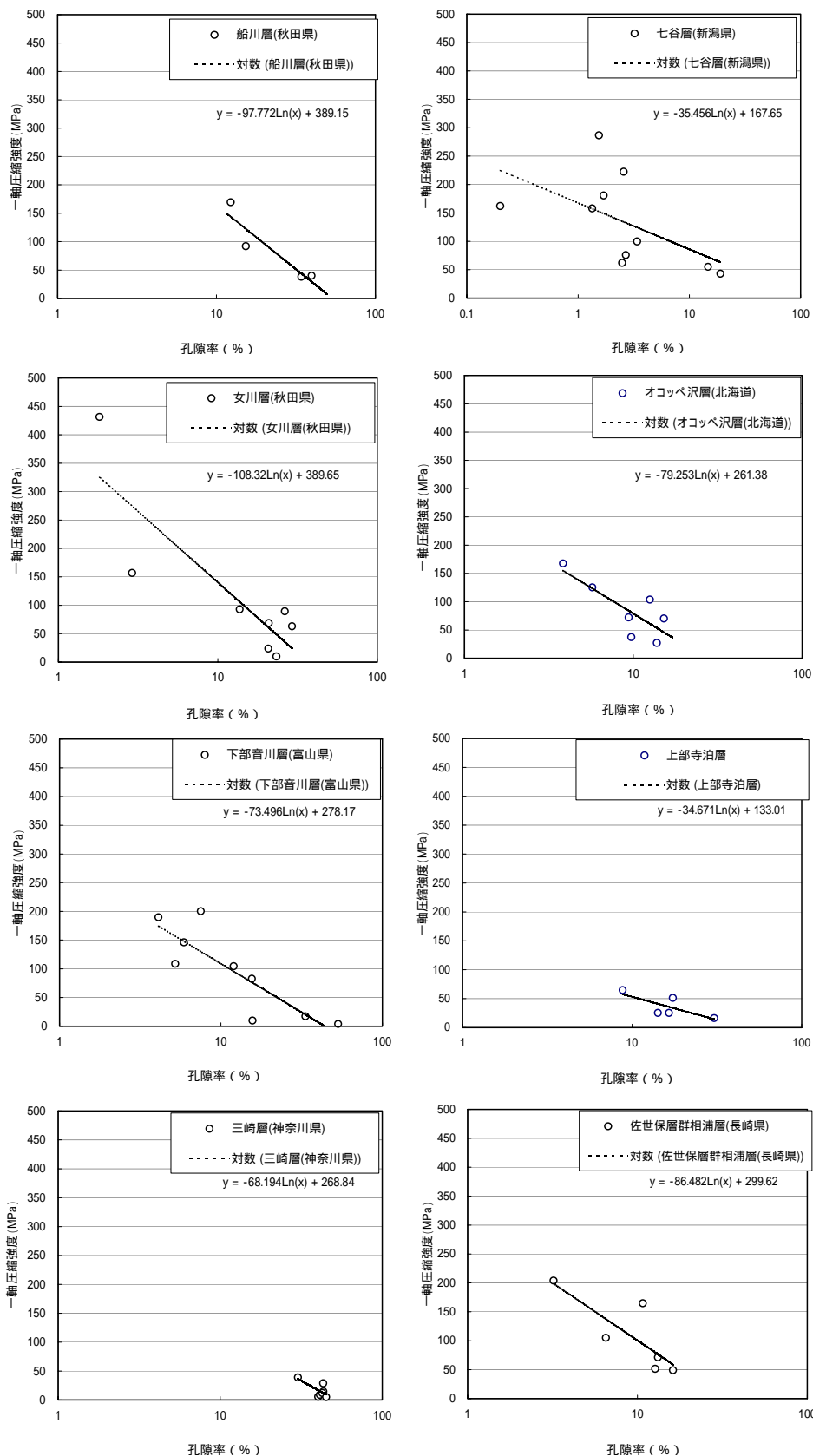


図 3-24 一軸圧縮強度と孔隙率の関係(深部岩石データベース、新第三紀堆積岩、地層毎)

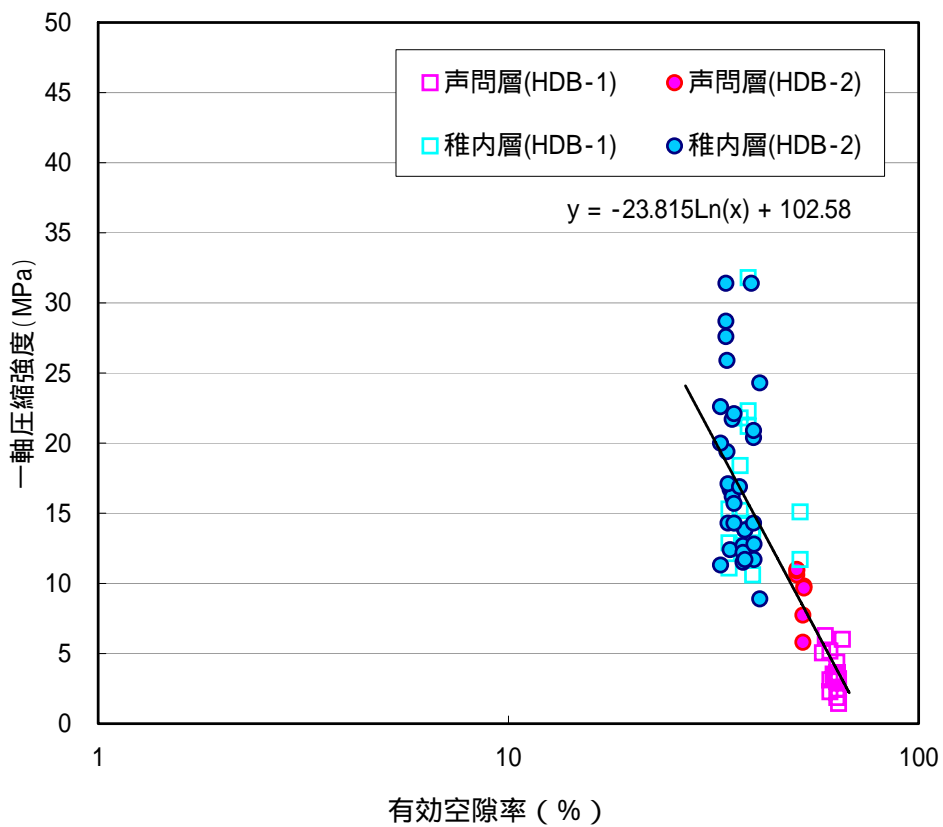


図 3-25 一軸圧縮強度と有効空隙率の関係 (幌延 HDB-1 号孔、HDB-2 号孔)

3.2.3 まとめ

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。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。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。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。
- ・ 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。

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。

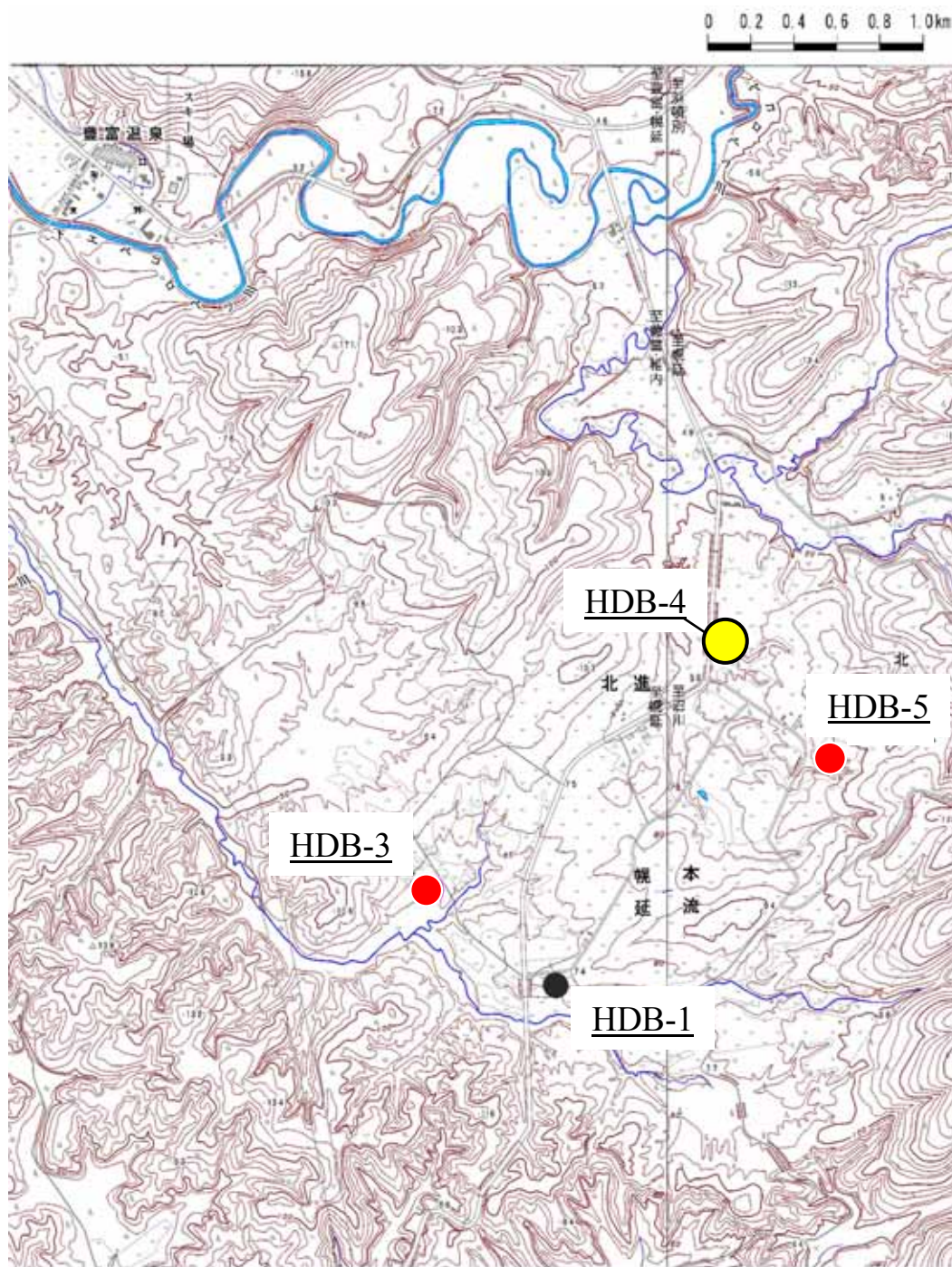


図 4-1 試錐位置図 (核燃料サイクル開発機構幌延深地層研究センター)

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。図 4-4 ~ 図 4-6 の地質柱状図中に採取箇所を記した。

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	

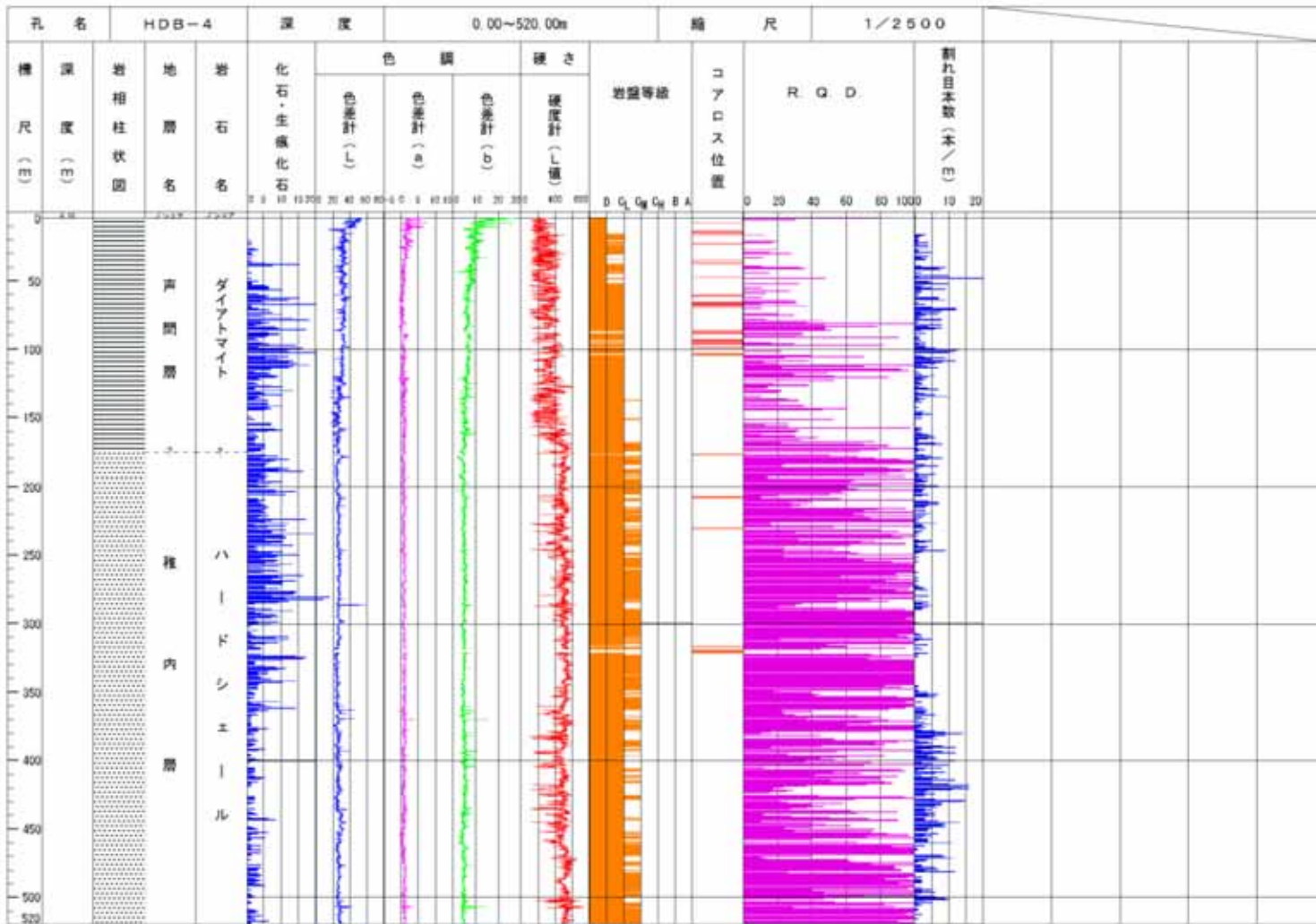


图 4-2 地質柱状図 (HDB-4 号孔、全区間)

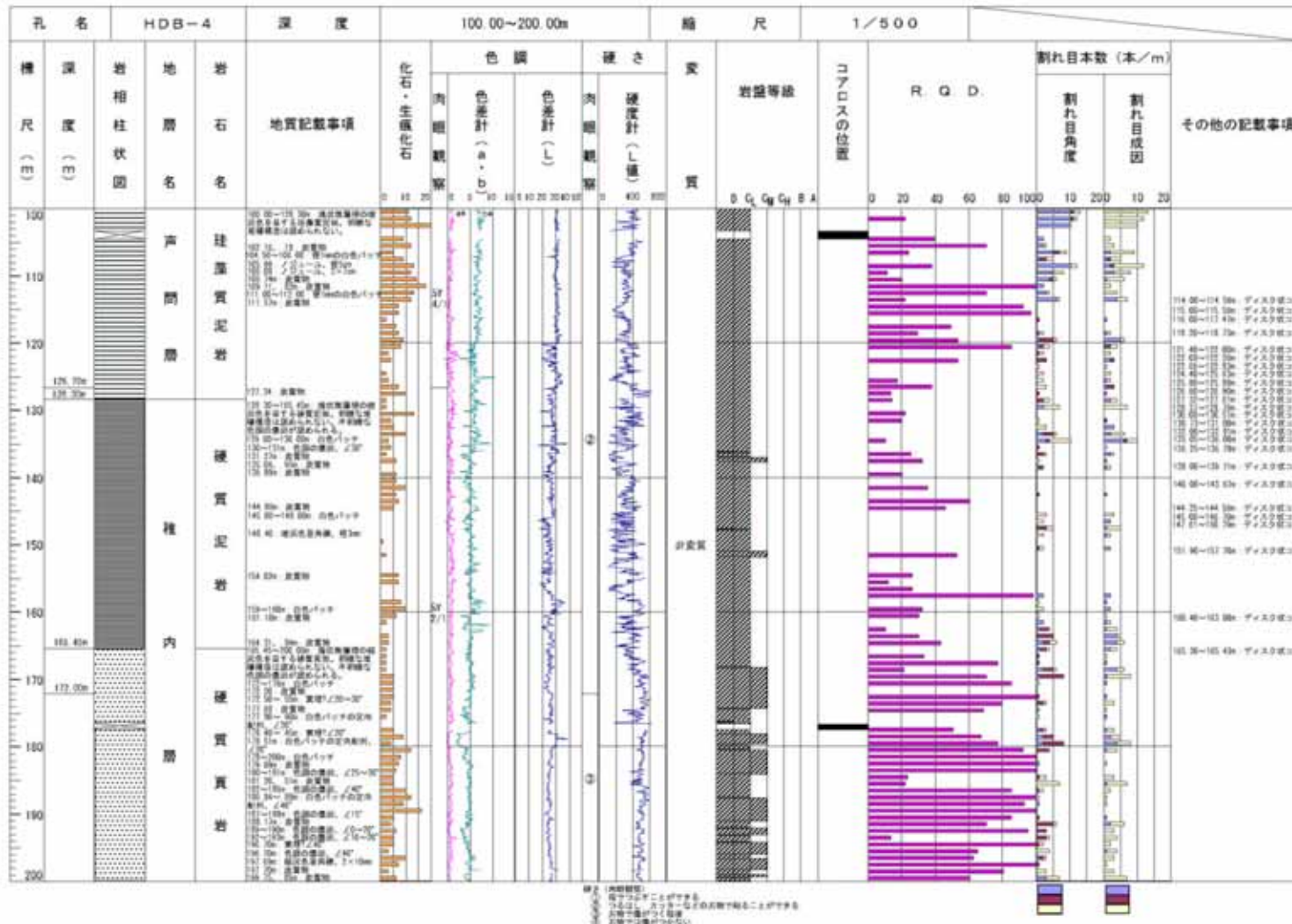


図 4-3 地質柱状図 (HDB-4 号孔、100 ~ 200m 区間)

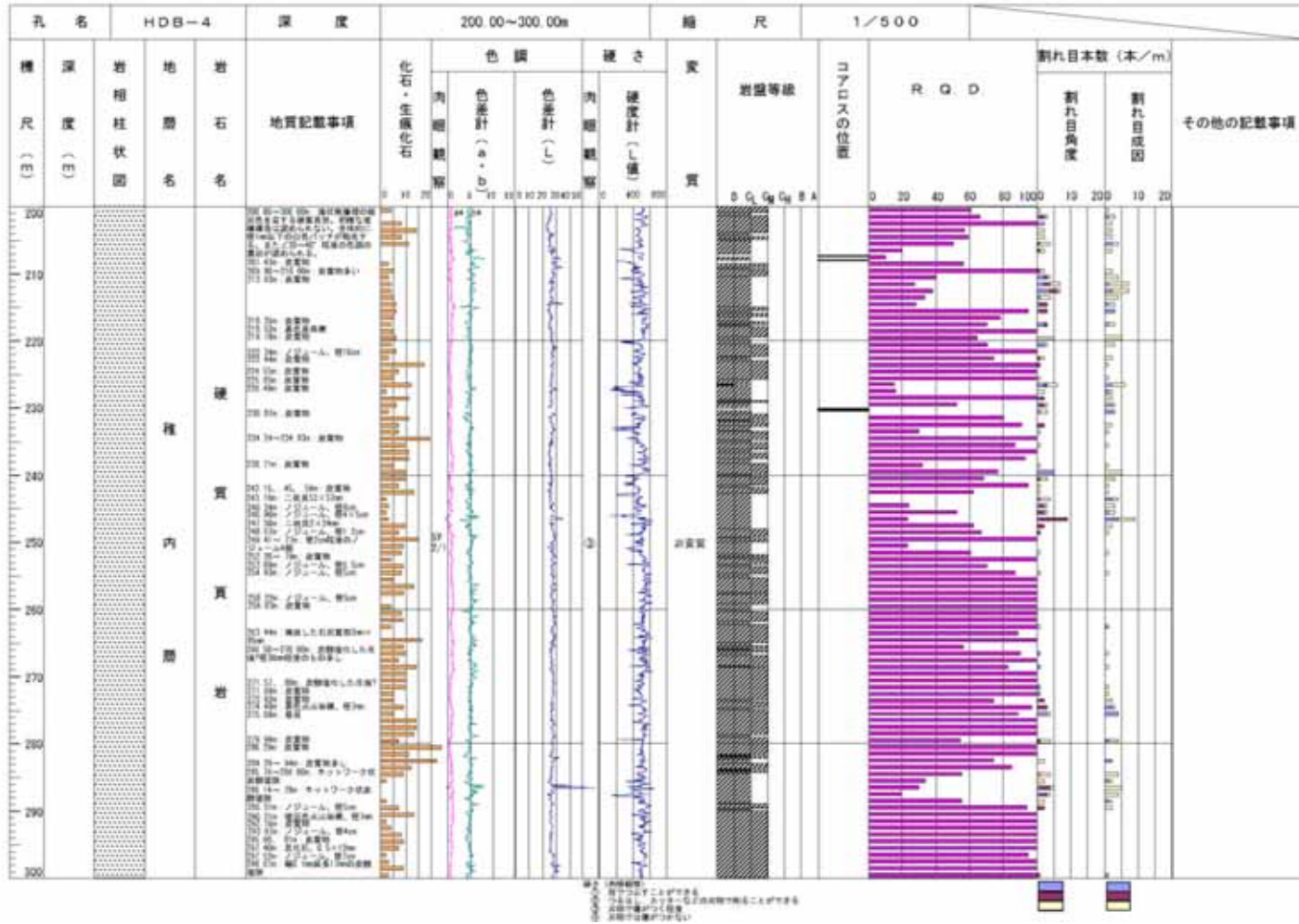


図 4-4 地質柱状図 (HDB-4 号孔、200 ~ 300m 区間)

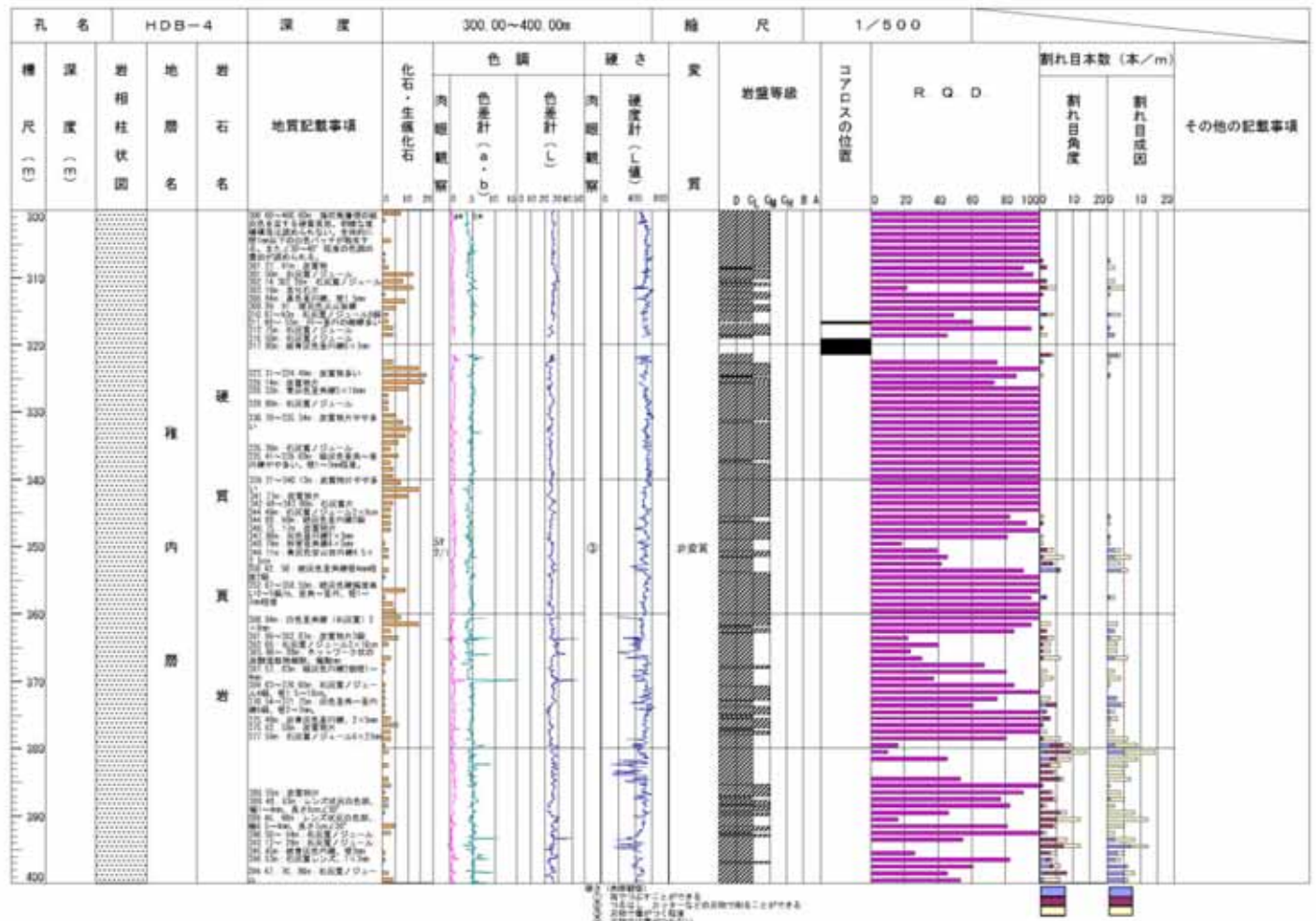


図 4-5 地質柱状図 (HDB-4号孔、300~400m 区間)

4.4 採取状況

試錐コアから試験用試料を再コアリングした後の状況を写真 4.4-1～写真 4.4-4に示す。再コアリングは、試錐孔の削孔方向とほぼ直交した方向に行うことを基本とした。また、整形後の試験用試料の寸法、重量ならびに外観を写真 4.4-5～写真 4.4-10に示す。

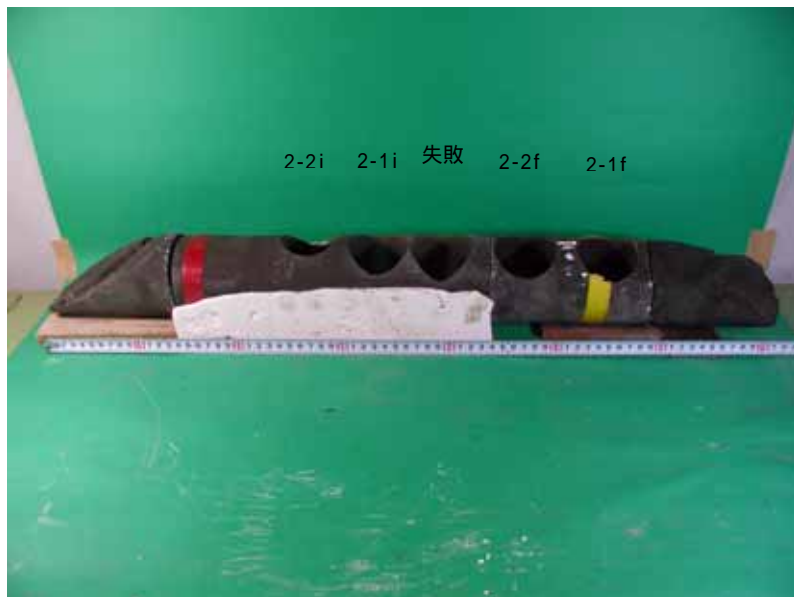


写真 4.4-1 コア抜き位置 (200m 付近試料)

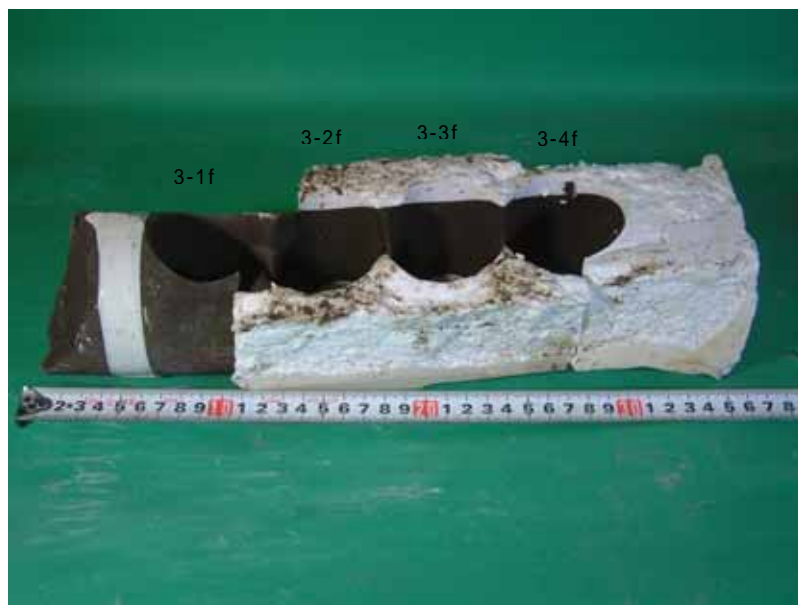


写真 4.4-2 コア抜き位置 (300m 付近 亀裂有り試料)

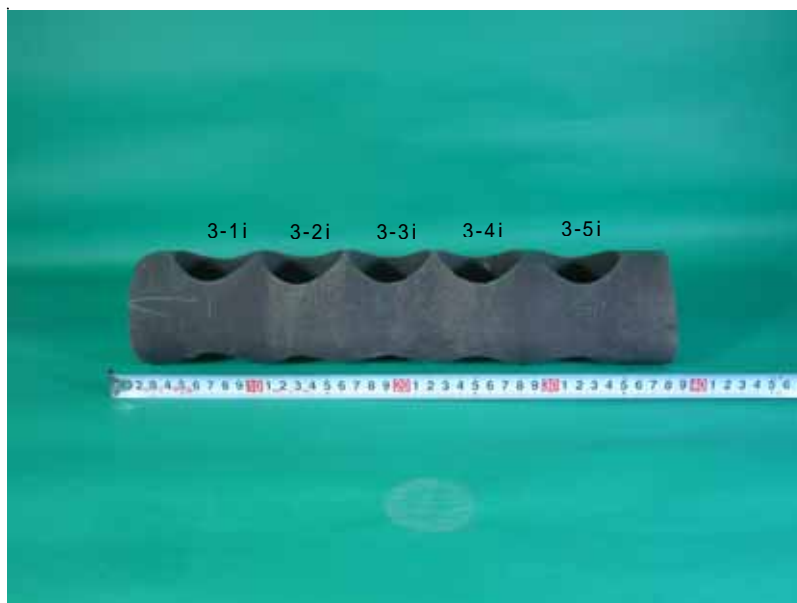


写真 4.4-3 コア抜き位置 (300m 付近 亀裂無し試料)

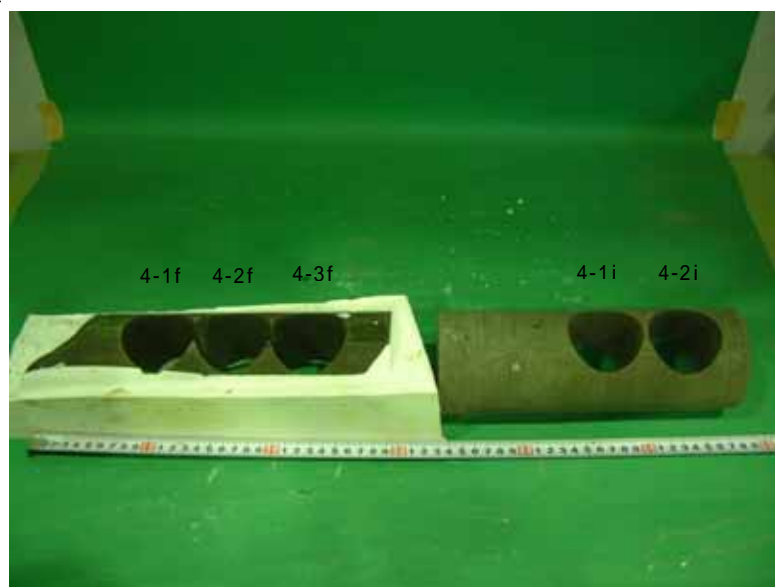


写真 4.4-4 コア抜き位置 (450m 付近試料)

2-1f
 深度 195.0 ~ 195.7m

試料寸法	φ=49.30mm L=48.78mm
試料重量	175.09g
亀裂の状況	密着、充填物なし

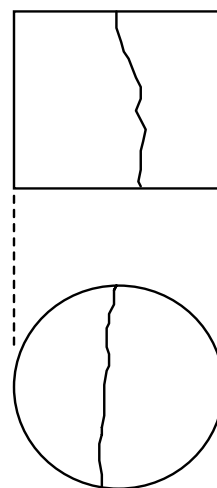
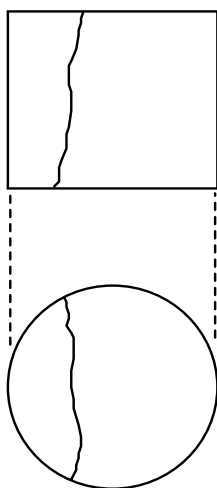
2-2f
 深度 195.0 ~ 195.7m

試料寸法	φ=49.22mm L=47.26mm
試料重量	169.20g
亀裂の状況	密着、充填物なし

(a) 試料諸元



(b) 写 真



(c) スケッチ

写真 4.4-5 整形後の試験用試料 (200m 付近 亀裂有り)

2-1i
 深度 195.0 ~ 195.7m

試料寸法	=49.47mm L=49.11mm
試料重量	177.10g
亀裂の状況	亀裂なし

2-2i
 深度 195.0 ~ 195.7m

試料寸法	=49.45mm L=49.14mm
試料重量	176.68g
亀裂の状況	亀裂なし

(a) 試料諸元



(b) コア写真

写真 4.4-6 整形後の試験用試料 (200m 付近 亀裂無し)

3-1f
 深度 315.65 ~ 315.99m

試料寸法	φ=48.75mm L=49.11mm
試料重量	181.16g
亀裂の状況	密着、充填物なし

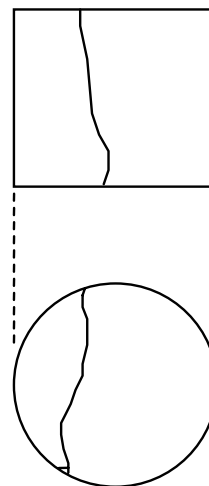
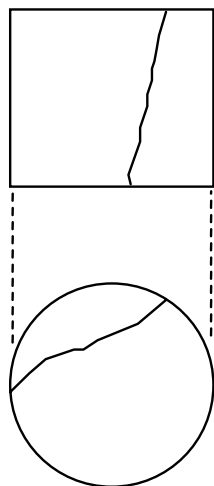
3-2f
 深度 315.65 ~ 315.99m

試料寸法	φ=49.40mm L=49.25mm
試料重量	183.22g
亀裂の状況	密着、充填物なし

(a) 試料諸元



(b) 写 真



(c) スケッチ

写真 4.4-7 整形後の試験用試料 (300m 付近 亀裂有り)

3-3f
 深度 315.65 ~ 315.99m

試料寸法	φ=49.70mm L=46.65mm
試料重量	174.97g
亀裂の状況	密着、充填物なし

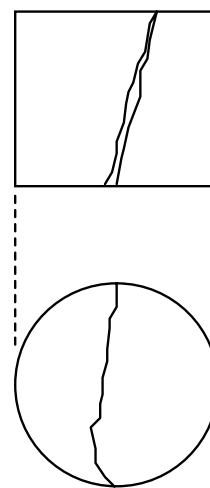
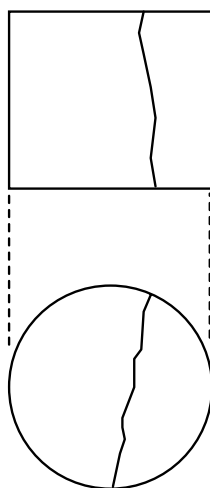
3-4f
 深度 315.65 ~ 315.99m

試料寸法	φ=49.70mm L=47.40mm
試料重量	178.00g
亀裂の状況	密着、充填物なし

(a) 試料諸元



(b) 写 真



(c) スケッチ

写真 4.4-7(続き) 整形後の試験用試料 (300m 付近 亀裂有り)

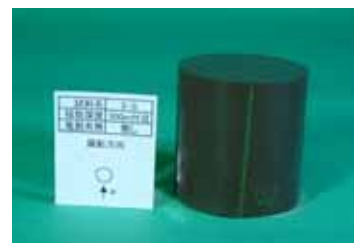
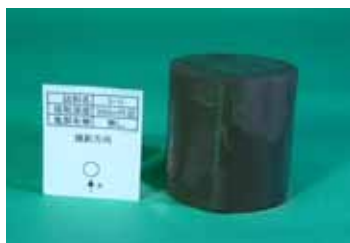
3-1i
深度 314.00 ~ 314.40m

3-2i
深度 314.00 ~ 314.40m

3-3i
深度 314.00 ~ 314.40m

試料寸法	φ=49.43mm L=50.90mm	試料寸法	φ=49.60mm L=50.13mm	試料寸法	φ=49.37mm L=50.40mm
試料重量	185.85g	試料重量	182.80g	試料重量	185.25g
亀裂の状況	亀裂なし	亀裂の状況	亀裂なし	亀裂の状況	亀裂なし

(a) 試料諸元



(b) コア写真

写真 4.4-8 整形後の試験用試料 (300m 付近 亀裂無し)

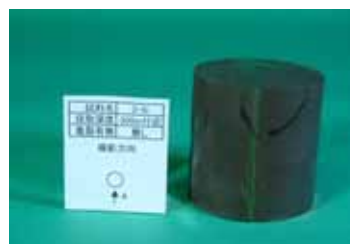
3-4i
 深度 314.00 ~ 314.40m

試料寸法	φ=49.40mm L=50.78mm
試料重量	185.60g
亀裂の状況	亀裂なし

3-5i
 深度 314.00 ~ 314.40m

試料寸法	φ=49.43mm L=50.63mm
試料重量	184.84g
亀裂の状況	亀裂なし

(a) 試料諸元



(b) コア写真

写真-4.4-8 (続き) 整形後の試験用試料 (300m 付近 亀裂無し)

4-1f
深度 441.50 ~ 442.00m

4-2f
深度 441.50 ~ 442.00m

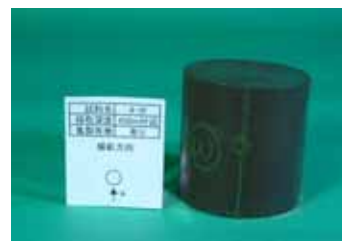
4-3f
深度 441.50 ~ 442.00m

試料寸法	=49.67mm L=50.61mm
試料重量	193.24g
亀裂の状況	密着、充填物なし

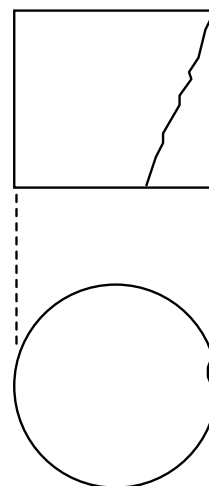
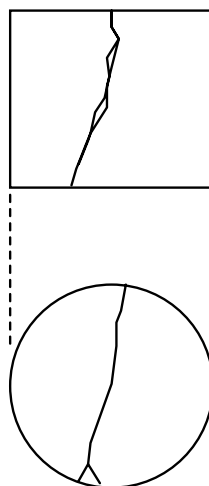
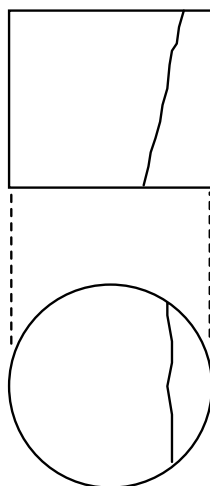
試料寸法	=49.60mm L=51.33mm
試料重量	196.82g
亀裂の状況	密着、充填物なし

試料寸法	=49.60mm L=50.85mm
試料重量	195.53g
亀裂の状況	密着、充填物なし

(a) 試料諸元



(b) コア写真



(c) スケッチ

写真 4.4-9 整形後の試験用試料 (450m 付近 亀裂有り)

4-1i

深度 441.50 ~ 442.00m

試料寸法	φ=49.63mm L=50.40mm
試料重量	194.57g
亀裂の状況	亀裂なし

4-2i

深度 441.50 ~ 442.00m

試料寸法	φ=49.70mm L=49.93mm
試料重量	194.33g
亀裂の状況	亀裂なし

(a) 試料諸元



(b) コア写真

写真 4.4-10 整形後の試験用試料 (450m 付近 亀裂無し)

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。

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

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、顕微鏡観察ならびに粉末式 X 線分析を行った。 に関しては、試料にブルーレジンを注入し、ブルーレジんで充填された空隙部の観察を行うとともに、ポイントカウント法による空隙率測定を行った。

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。

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。より具体的には、透水試験用試料 (亀裂無し) の採取箇所付近から採取した。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: ρ_n (g/cm ³)	1.879	1.910	1.911	2.005
	強制乾燥状態の比重: ρ_d (g/cm ³)	1.465	1.526	1.527	1.673
	強制湿潤状態の比重: ρ_t (g/cm ³)	1.879	1.910	1.911	2.005
含水比	自然状態の含水比: ω (-)	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: a_b (%)	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。

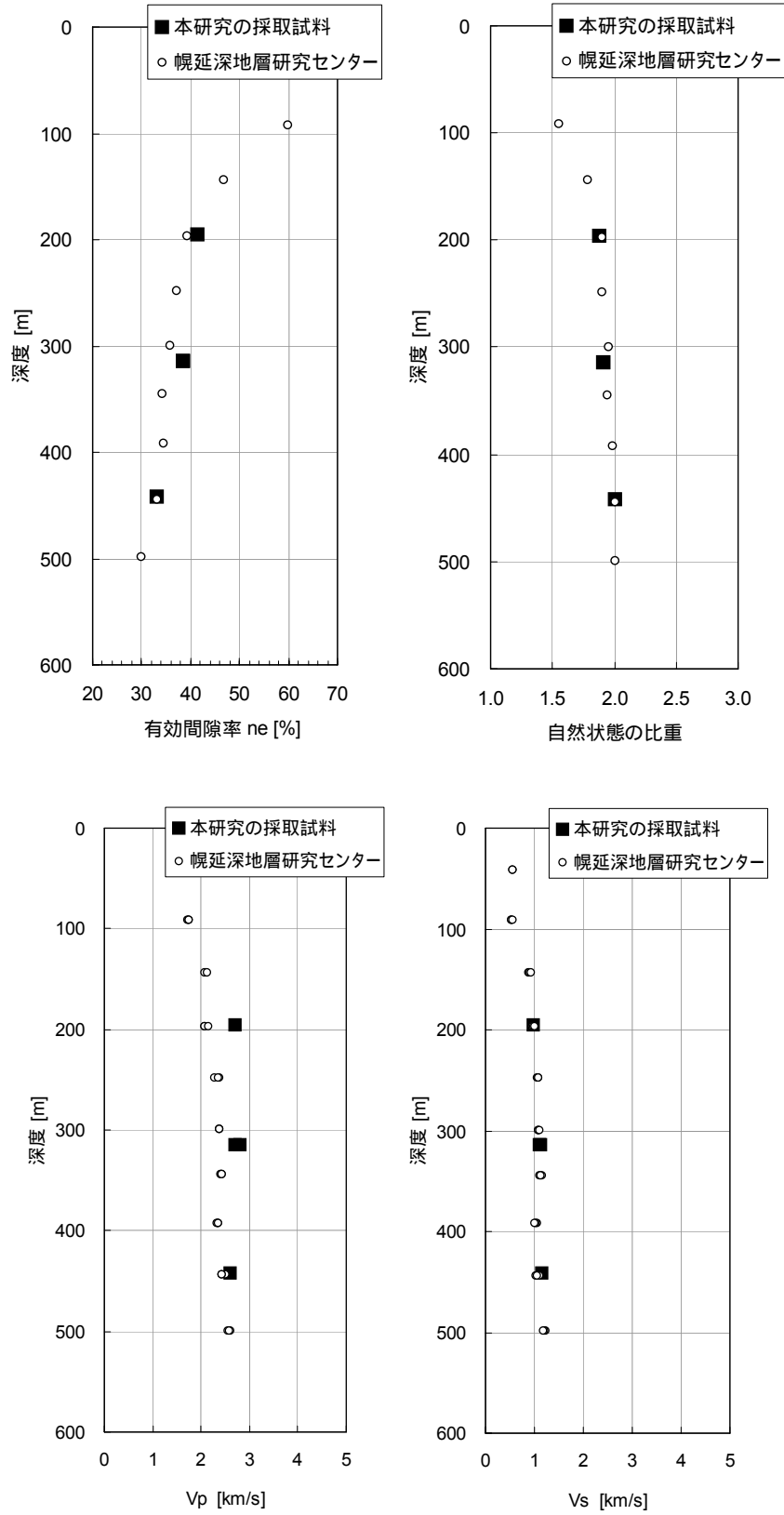


図 5-1 基本物性値測定結果（幌延 HDB-4 号孔）

5.3 X線分析

5.3.1 分析方法

(1) 原理

X線回折 (X-ray diffraction, XRD) は、鉱物の結晶構造に関する情報を得るための分析方法であり、試料に含まれている元素の種類や量を知るための方法ではない。この分析法は試料中の原子の配列の規則性、すなわち結晶相であることを前提にしている。

結晶体に単色のX線を当てると、X線が結晶格子面で反射し、お互いに干渉しあうので、次の条件を満たす方向の回折線のみ強度が増大し、他は打ち消しあって観察されない。

$$2d \sin\theta = n\lambda$$

d は面間隔、 λ は波長、 n は干渉しあう波の位相の差である。 $n=0, 1, 2, \dots$ の場合をそれぞれ0次、1次、2次 \dots の回折線と呼ぶ。波長 λ が一定の単色X線を照射して (2) を観測し、上の式から面間隔が求められる。この面間隔は一般に物質の固有の値で、一つの物質の数個の d とそれに対応する回折X線の相対強度が観察できれば、その物質を同定することができる。

X線回折には多くの方法があり、粉末回折法 (powder diffraction method) が通常適用される。鉱物はそれぞれに特有の回折線を示し、回折線の位置と強度から各鉱物の鑑定がなされる。つまり、X線回折により鉱物の同定が可能である。具体的には、粉末試料の回折実験によって得られたX線回折結果を既知物質のそれと比較し、未知物質を同定する。通常の粉末法では不定方位法を用い、あらゆる方向に配列した結晶粉末からのX線回折を測定する。不定方位法により試料に含まれる鉱物種の同定が可能であり、そしてそのおよその量も知ることができる。

(2) 不定方位法

不定方位法 (random orientation method) は通常の粉末法であり、あらゆる方向を示す配向性のない粉末試料からのX線回折を行う。試料をめもの乳鉢を用い、指でさわったときに“粒子の感じ”がなくなるまで ($4\mu\text{m}$ 以下) 粉砕する。粉末にした試料は、穴のあいた ($20 \times 14 \times 1.5\text{mm}$) アルミニウム板製試料ホルダーにつめこみ、測定に供する。得られたデータを既知のX線回折データと比較し、含有される鉱物の種類を決定する。ただし、複雑な混合物の場合には同定が困難である。そのような場合や粘土鉱物については、さらに定方位法で検討する必要がある。

(3) 鉱物含有量の推定

結晶相の混合物からのX線の強度は結晶相の含有量と相関関係があるので、結晶相同定後、適当な回折線を選んで結晶相の定量を行うことができる。しかし、回折X線の強度は、結晶相物質の含有量だけでなく鉱物の種類 (化学組成・結晶構造)、結晶度、粉末粒子の形状、大きさ、方位、測定条件、および混合物全体のX線吸収係数などの要素により決定される。その主要なもののみについてみても鉱物の種類によって異なり、同族の鉱物であっても変異があり、同じ結晶面の回折線強度が一定の強度を示すとは限らない。例えば、

緑泥石のように大幅に化学組成が変わるために強度も大きく変わるものもある。このような試料では、定量しようとする鉱物の純粋状態での強度が必要であるのに、これを知る(あるいは基準試料を選ぶ)ことが困難である。また、完全な不定方位あるいは定方位試料をつくるのが難しいので、試料間の方向性の相違による誤差も避けられない。これらの限界によりX線回折による鉱物の定量は一般にかなり大きな誤差を含むことになり、厳密に定量的な評価を行うことは困難である。

今回の測定では、不定方位測定により得られたX線回折デジタルデータを既知含有量の標準鉱物のそれと比較することによって経験的に各鉱物のおおよその含有量を推定した。

5.3.2 分析結果

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線解析チャートを図 5-2~図 5-4に示す。各図中に、オパールCTのピークを下向き矢印で示した。これらの図から、いずれもオパール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。さらに良く見ると、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。

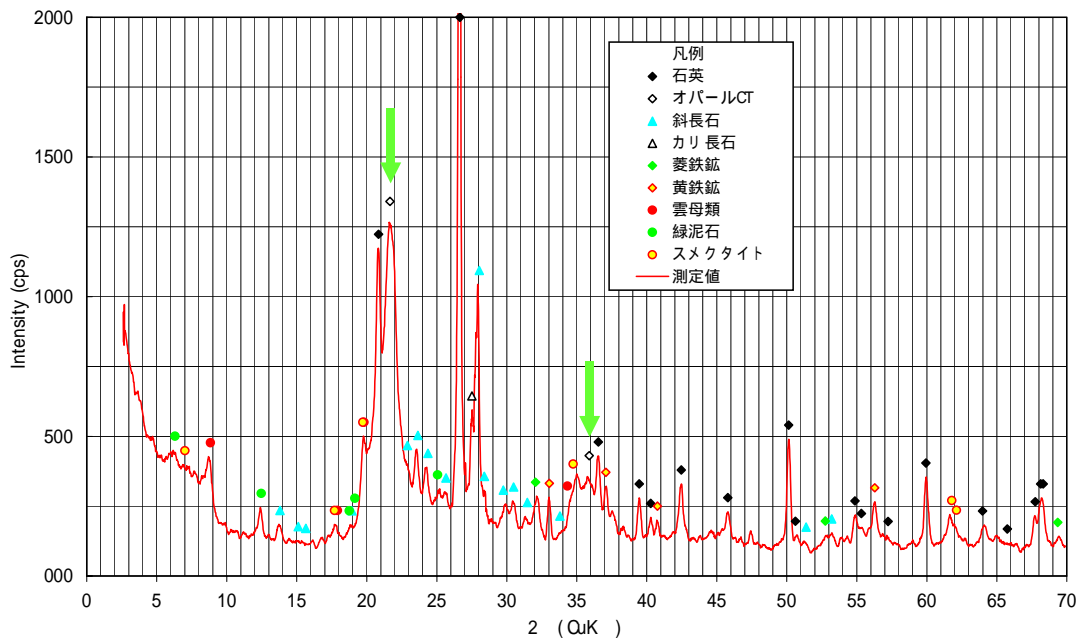


図 5-2 粉末式 X 線分析結果 (HDB-4 号孔、深度 200m 付近)

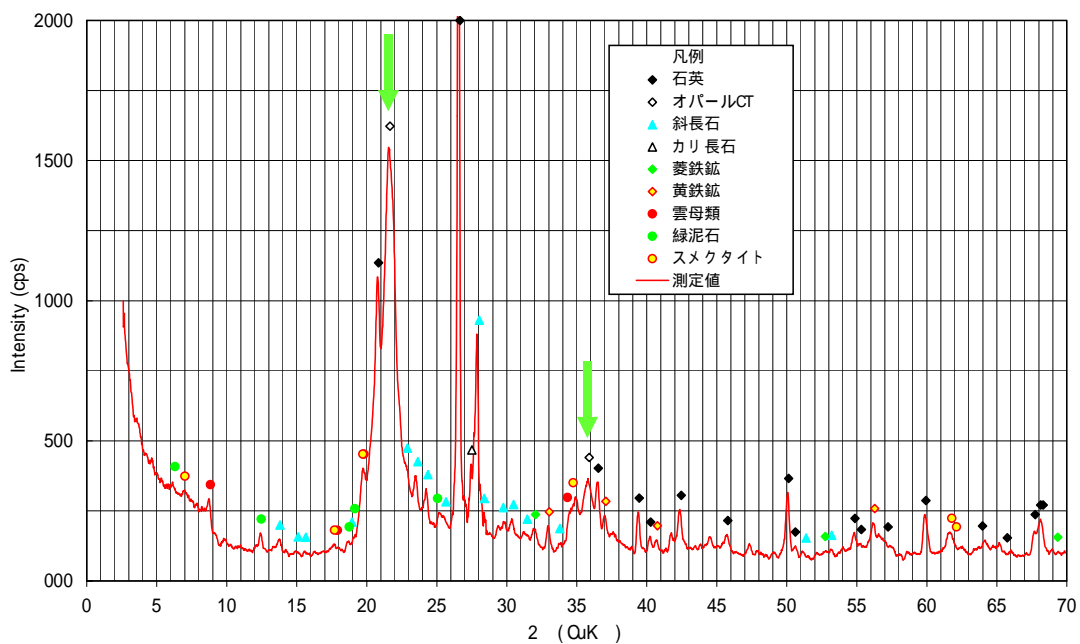


図 5-3 粉末式 X 線分析結果 (HDB-4 号孔、深度 315m 付近)

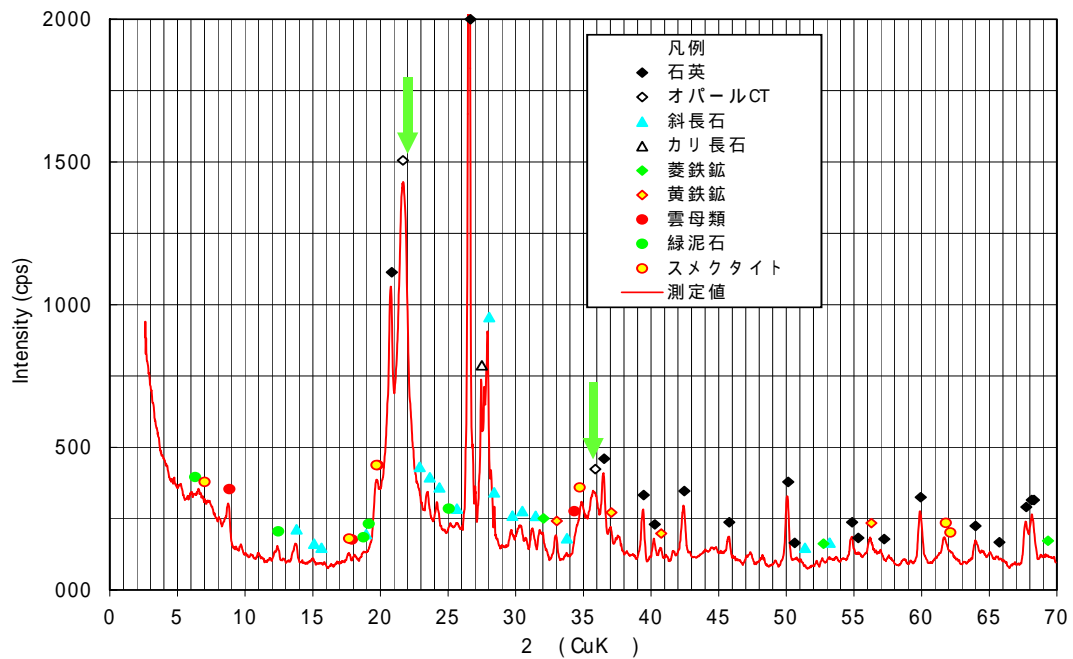


図 5-4 粉末式 X 線分析結果 (HDB-4 号孔、深度 450m 付近)

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。顕微鏡観察結果を巻末に示す。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。岩石薄片は一定の厚さを持っているので、薄片状に見られる鉱物および空隙の面積比は、薄片中のそれらの体積量比にほぼ等しい。

面積比はロシワル法に基づくポイントカウント式により測定した。ロシワル法とは岩石薄片上に仮想的な適当な間隔のメッシュ（方眼）をかけ、その方眼の交点総数のうち、どれだけの点数がどの鉱物の上にあるかを数え、その点数の割合で鉱物の面積比を求める方法である。交点のカウントでは、メカニカルステージで、一定間隔において薄片をずらせながら、偏光顕微鏡下の十字線の交点直下にある鉱物または空隙を数えあげる。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

表 5.5-1 ブルーレジン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

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（写真 5.5-1）。化石片として珪藻と有孔虫が存在する（写真 5.5-2）。直径 0.05mm 以下の球状・棒状を呈する珪藻の可能性のあるものは、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のあるものは、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（写真 5.5-3）。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（5.2 節参照）。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 5-5 に示す。

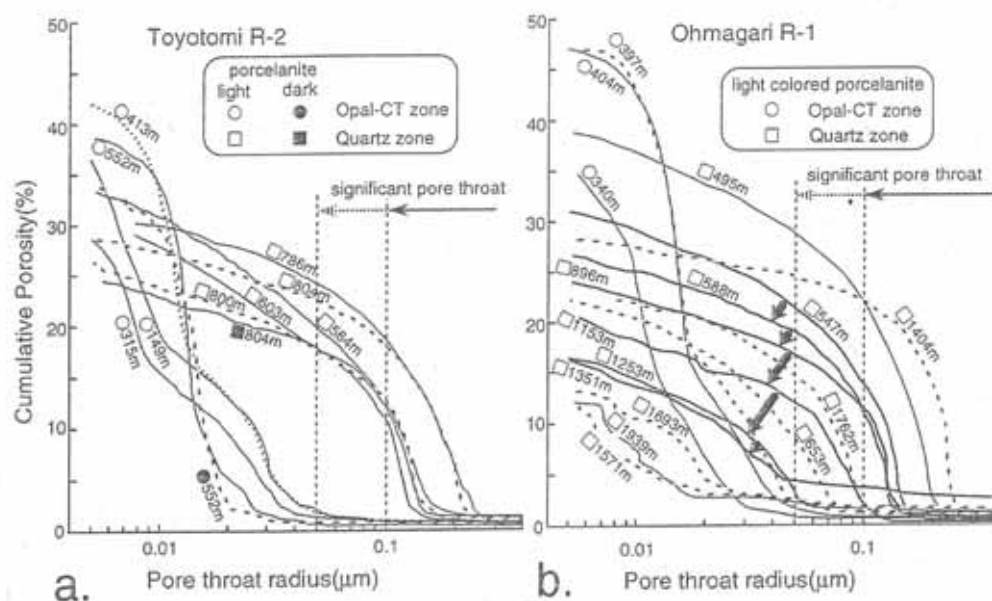


図 5-5 水銀圧入式細孔分布測定による孔口径分布（辻他、1994）

同図中には、オパールC T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C T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C T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0.1 μ m以下の微小空隙によって占めているのが分かる。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、0.1 μ m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。

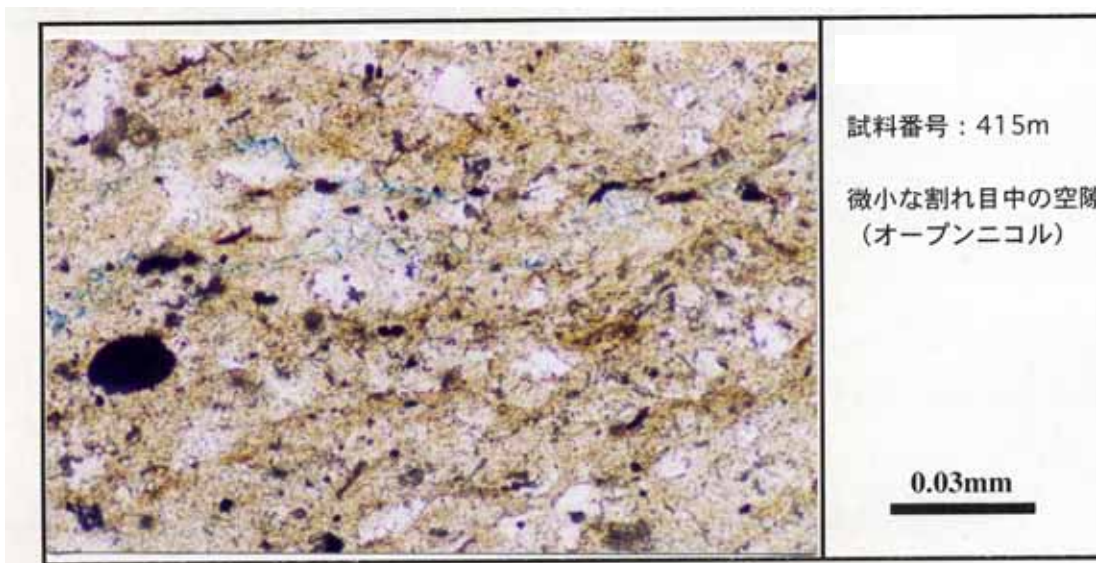
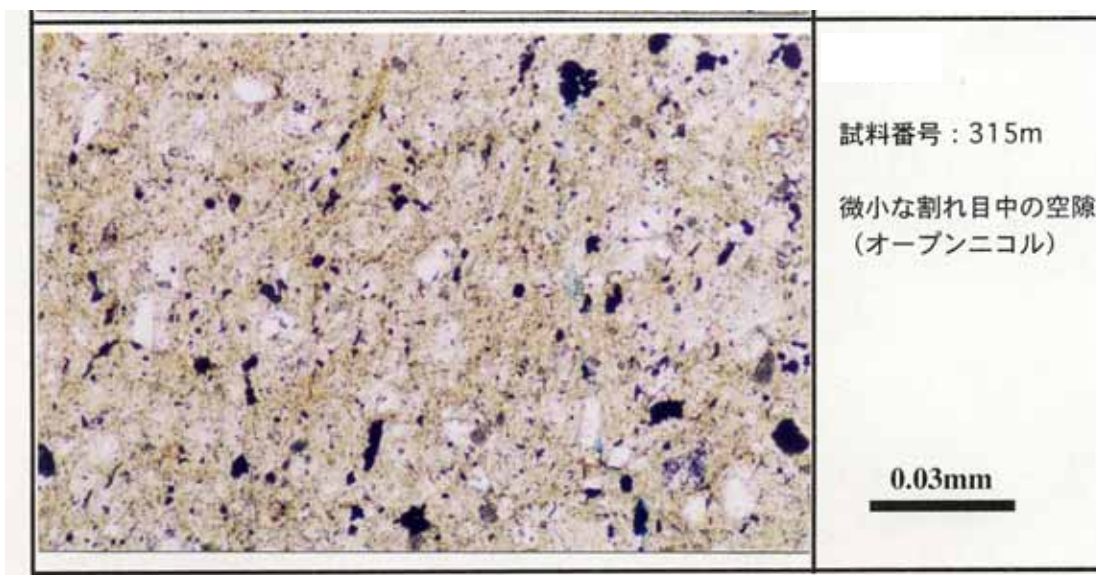


写真 5.5-1 空隙観察結果（微小な割れ目中の空隙）

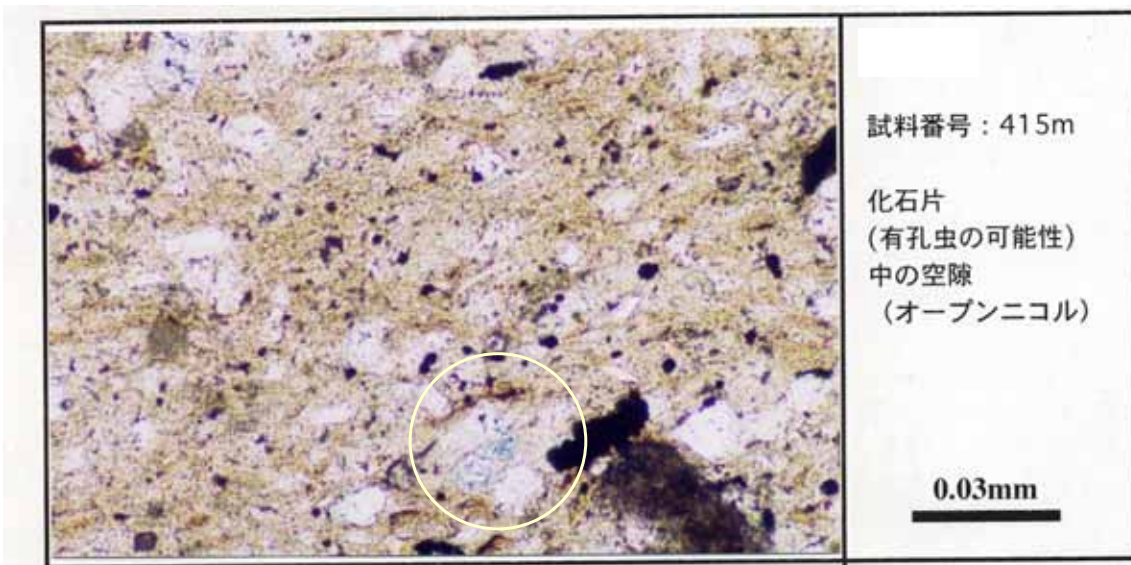
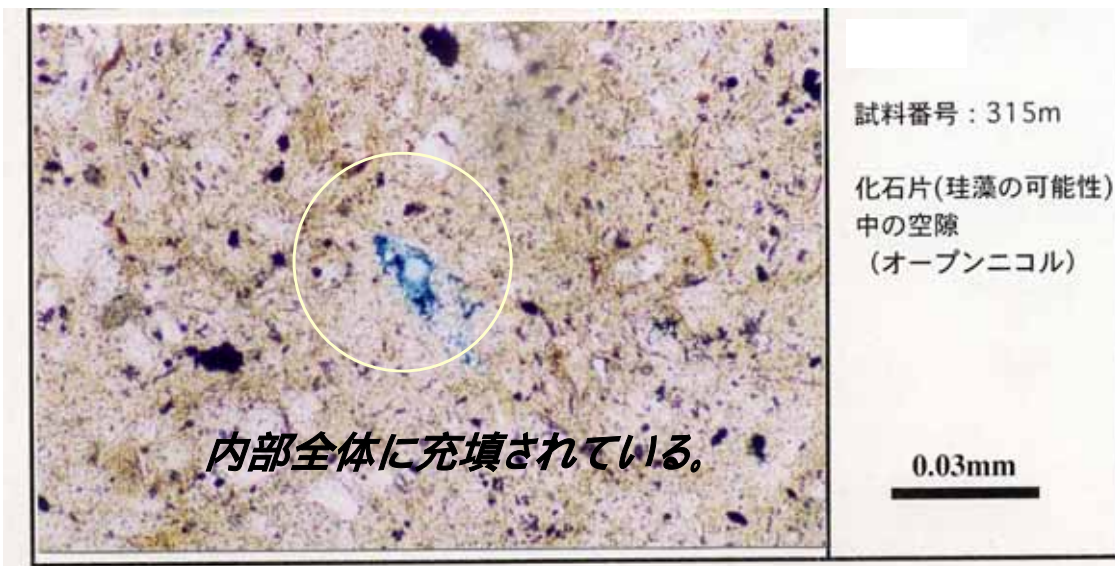


写真 5.5-2 空隙観察結果(化石片)

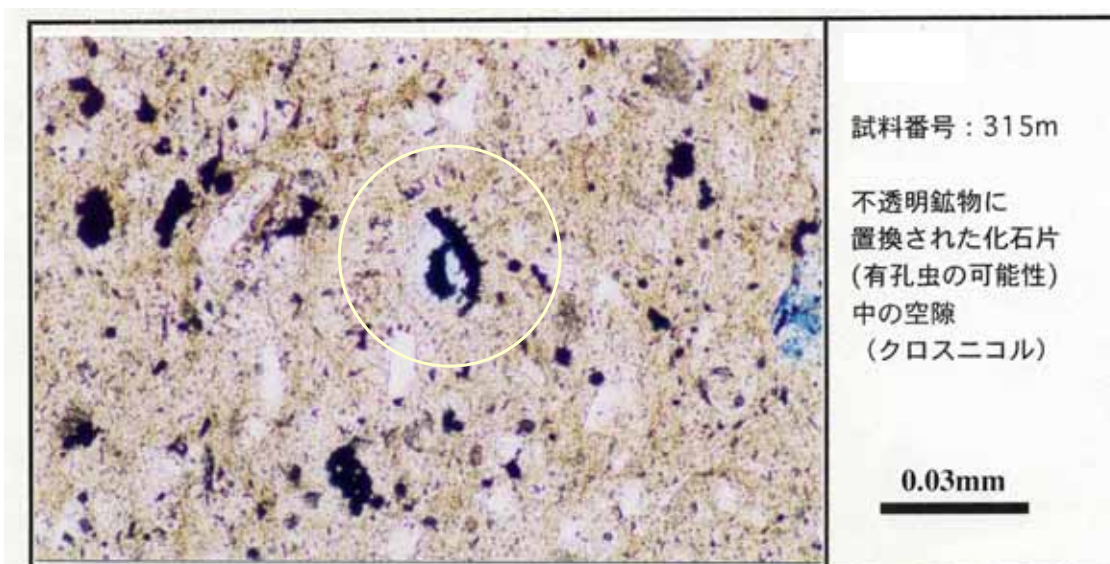
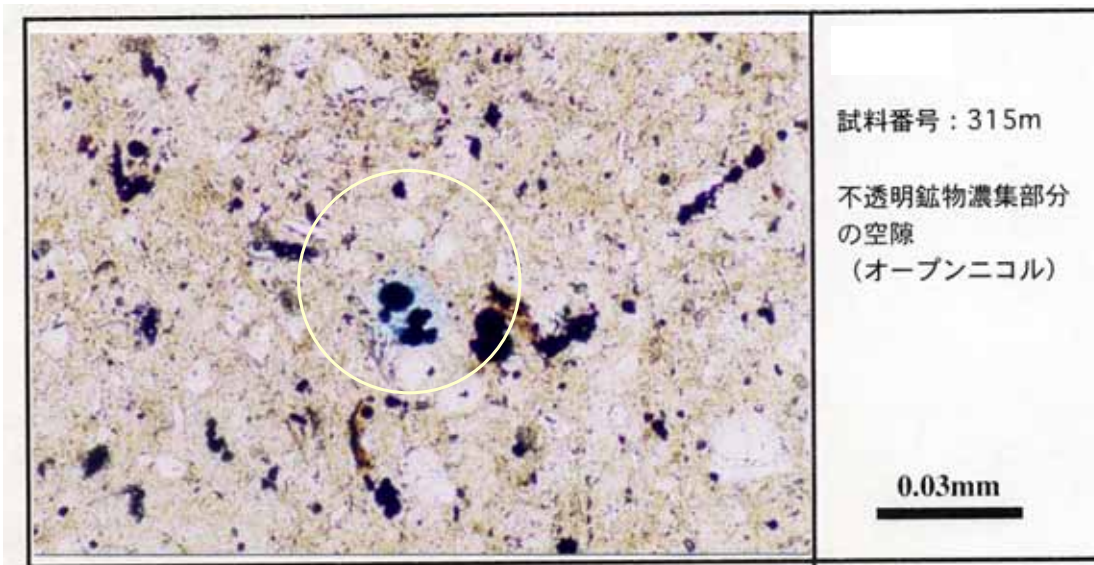


写真 5.5-3 空隙観察結果（不透明鉍物付近の空隙）

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、概観及び、測定原理をそれぞれ図 6-1、図 6-2、写真 6.1-1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。試験手順を図 6-3に示し、試験手順の詳細を以下に述べる。

(1) 試料セット

三軸セルに試料をセットし、装置内、配管内のエア抜きを行う。

(2) 封圧の載荷

試料に側圧、軸圧を載荷する。試料採取深度に相応の側圧、軸圧を載荷し、圧力が安定するまで監視する。

(3) 間隙水圧の載荷

試料及び上下貯留槽内に一様な水圧を加え、水圧が一定になるまで監視する。

(4) 水圧パルスを作用

上流側貯留槽内の水圧をパルス幅Hだけ上昇させ、水圧の安定を確認した後、バルブの開閉により試料に水圧パルスを作用させる。

(5) 水圧変化の測定、記録

上下流の水圧の経時変化を測定、記録する。

(6) 水圧平衡

水圧が平衡に達した時点で、計測を終了する。

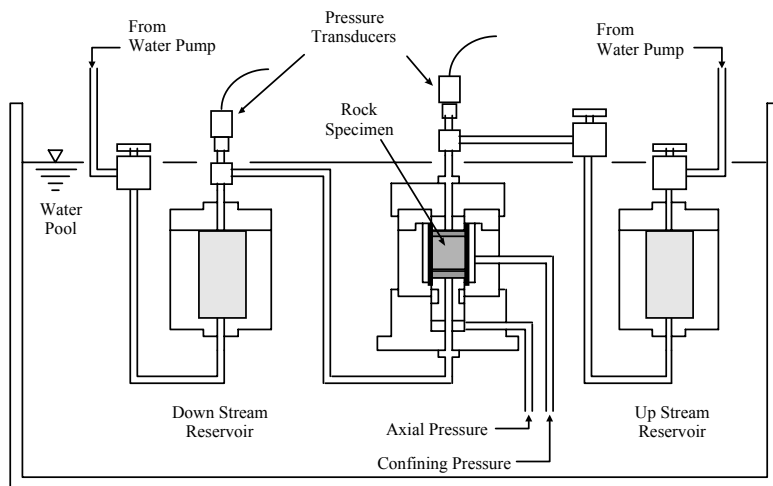


図 6-1 トランジェントパルス透水試験装置概要



写真 6.1-1 トランジェントパルス透水試験装置概観

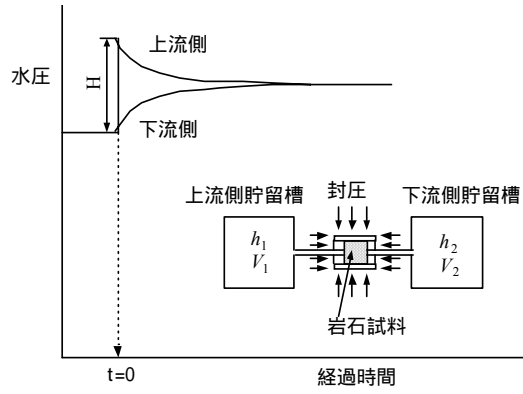


図 6-2 トランジェントパルス法測定原理

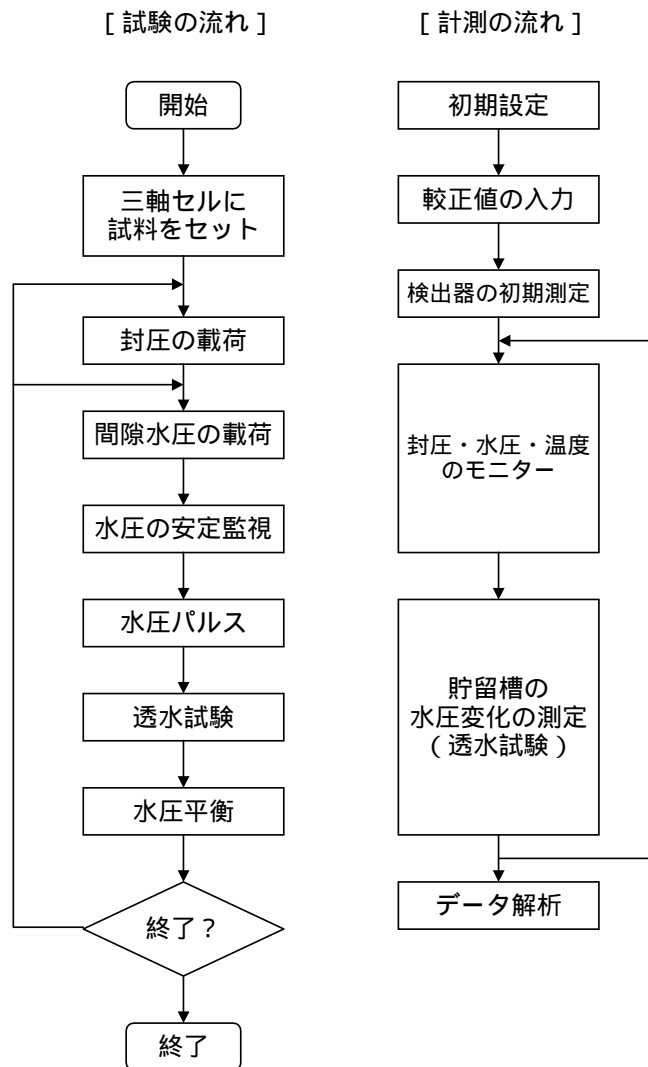


図 6-3 トランジェントパルス透水試験手順

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。試験装置及び試験手順を図 6-4、図 6-5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。試験は以下のような手順で行った。

(1) 試料セット

三軸セルに試料をセットし、装置内、配管内のエア抜きを行う。

(2) 封圧の載荷

試料に側圧、軸圧を載荷する。試料採取深度の有効応力に相応の側圧、軸圧を載荷し、圧力が安定するまで監視する。

(3) 定流量透水試験

コンプレッサーの注入圧力を所定の圧力に設定する。その後、上流側のバルブと下流側のバルブを開き、定流量透水試験を開始する。流量は排水重量を測定し求めた。また試験中は、イオンメーターおよび電気伝導度計により、試料を通水した水のヨウ化物イオン濃度を測定した。

(4) イオン濃度低下の確認

試料そのものにヨウ化物イオンを多量に含む場合は、装置下流側で測定しているヨウ化物イオン濃度が、十分に低下したことを確認して試験を終了する。

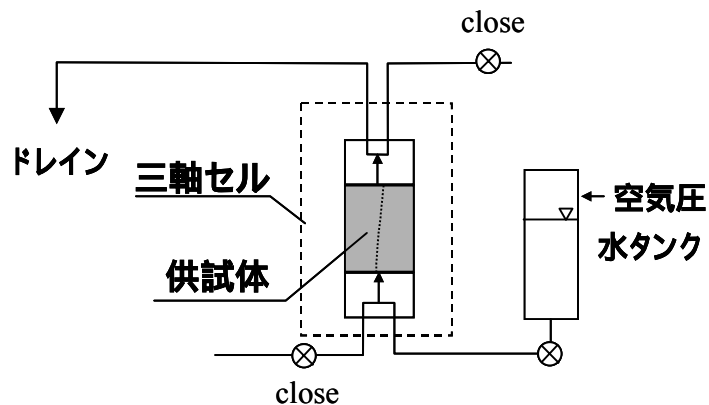


図 6-4 定流量透水試験装置

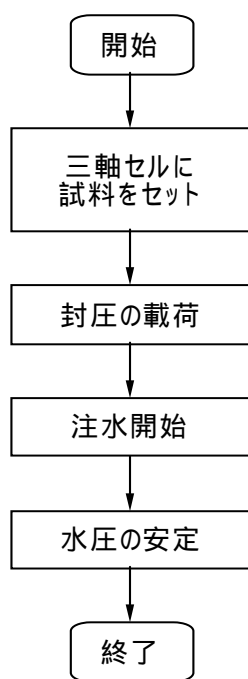


図 6-5 定流量透水試験手順

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。

封圧は、図 6-6 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決定した。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 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。300m の試料を用いて封圧を 0.8~3.2[MPa]まで 4 段階変化させ、封圧に対する透水係数の変化を調べた。次に、200m と 450m の試料を用いて、同一封圧下 (2.4[MPa]) での試料の採取深度による透水係数の違いを調べた。なお、4 段階の封圧は、(1) と同様の考え方で 100~400m の 4 深度の有効応力 (~) で設定した。

表 6.2-2 透水試験ケース (亀裂有り試料)

深度 [m]	封圧[MPa]			
	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	-

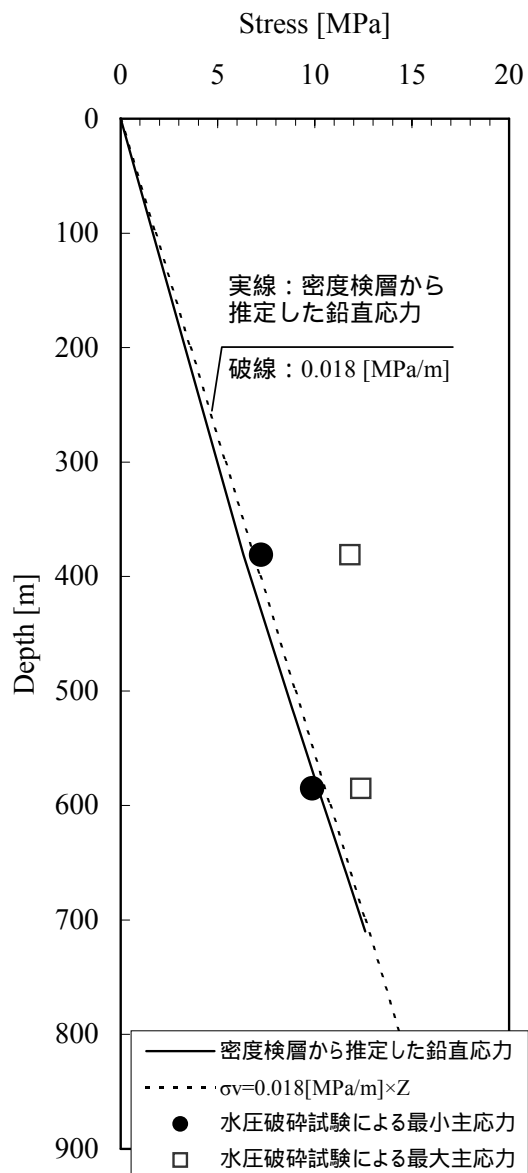


図 6-6 岩盤内応力と深度の関係 (HDB-1 号孔)

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を、図 6-8～図 6-10ならびに表 6.3-2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。それらの方法を以下に述べる。

(1) Brace 法 (Brace, W.F.他、1968)

Brace 法では、上下流水槽内の水圧差の測定結果を次式にフィットさせることにより、透水係数を求める方法である (Brace, W.F.他、1968)。

$$\frac{h_u - h_d}{H} = \exp\left[-\frac{V_u + V_d}{V_u V_d} \frac{KA t}{\ell C_w \gamma_w g}\right] \quad (6.4-1)$$

ここに、H：パルス圧幅 (MPa)、 h_u ：上流側水圧 (MPa)、 h_d ：下流側水圧 (MPa)、 V_u ：上流側貯留槽の容積 (m^3)、 V_d ：下流側貯留槽の容積 (m^3)、K：岩石試料の透水係数 (m/s)、A：岩石試料の断面積(m^2)、t：経過時間 (s)、 ℓ ：岩石試料の長さ (m)、 C_w ：水の圧縮率 (m^2/kN)、 γ_w ：水の密度 (kg/m^3)、g：重力加速度 (m/s^2)

Brace 法は、上下流水槽内の水圧差を用いるため、温度影響による水圧変化分がキャンセルアウトされる利点を有する。しかし、岩石内貯留が上下流水槽の貯留量に比べて無視しうるといふ仮定に基づいており、比貯留係数を算出することはできない。

(2) 差圧を用いた Hsieh 法 (Hsieh, P.A.他、1981)

岩石内貯留を考慮した水圧変化の厳密解として、次式で示される Hsieh の解がある (Hsieh, P.A.他、1981)。

$$\frac{h_u}{H} = \frac{1}{1 + \beta + \gamma} + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\exp(-\alpha \phi_m^2)(\beta + \gamma \phi_m^2 / \beta)}{[\gamma^2 \phi_m^4 / \beta^2 + (\gamma^2 \beta + \gamma^2 + \gamma + \beta) \phi_m^2 / \beta + (\beta^2 + \gamma \beta + \beta)]} \quad \dots (6.4-2)$$

$$\frac{h_d}{H} = \frac{1}{1 + \beta + \gamma} + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\exp(-\alpha \phi_m^2)(\beta - \gamma \phi_m^2 / \beta)}{[\gamma^2 \phi_m^4 / \beta^2 + (\gamma^2 \beta + \gamma^2 + \gamma + \beta) \phi_m^2 / \beta + (\beta^2 + \gamma \beta + \beta)] \cos \phi_m} \quad \dots (6.4-3)$$

ここで、 ϕ_m は次式の根である。

$$\tan \phi = \frac{(1 + \gamma)\phi}{\gamma \phi^2 / \beta - \beta} \quad \dots (6.4-4)$$

上式中の α 、 β 、 γ は無次元数で、以下のように表される。

$$\alpha = \frac{Kt}{\ell^2 S_s}, \quad \beta = \frac{S_s A \ell}{S_u}, \quad \gamma = \frac{S_d}{S_u} \quad \dots (6.4-5)$$

$$S_u = C_w \gamma_w V_u g \quad \dots (6.4-6)$$

$$S_d = C_w \gamma_w V_d g \dots (6.4-7)$$

ここに、H：パルス圧幅 (MPa)、 h_u ：上流側水圧 (MPa)、 h_d ：下流側水圧 (MPa)、 S_u ：上流側貯留槽の貯留量 (m^2)、 S_d ：下流側貯留槽の貯留量 (m^2)、K：岩石試料の透水係数 (m/s)、A：岩石試料の断面積 (m^2)、t：経過時間 (s)、 l ：岩石試料の長さ (m)、 C_w ：水の圧縮率 (m^2/kN)、 γ_w ：水の密度 (kg/m^3)、g：重力加速度 (m/s^2)、である。

Hsieh の解では、上・下流側の水圧を個々にフィットするため、温度による水圧変化の影響によって解析誤差が生じやすい。そこで、(6.4-2)式と(6.4-3)式の差を取ることで、温度による水圧変化分をキャンセルアウトする方法が考えられる。この方法を、ここでは「差圧を用いた Hsieh 法」と呼ぶこととする。

Brace 法と差圧を用いた Hsieh 法による解析結果を図 6-8～図 6-10のグラフ中に示した。いずれも理論解との良好な一致が見られる。

図 6-7に Hsieh 法による解析手順の概念図を示し、以下に具体的な解析手順を示す。

測定された上下流側貯留槽の水圧変化を理論曲線とマッチングし、そのときの $(= t^*)$ と、 $\beta^2=1$ のときの $t (=t^*)$ を求める。

で求めた t^* および t を用いて (6.4-5) 式より、比貯留係数 S_s を求める。

で求めた S_s と t^* を用いて (6.4-5) 式より、K を求める。

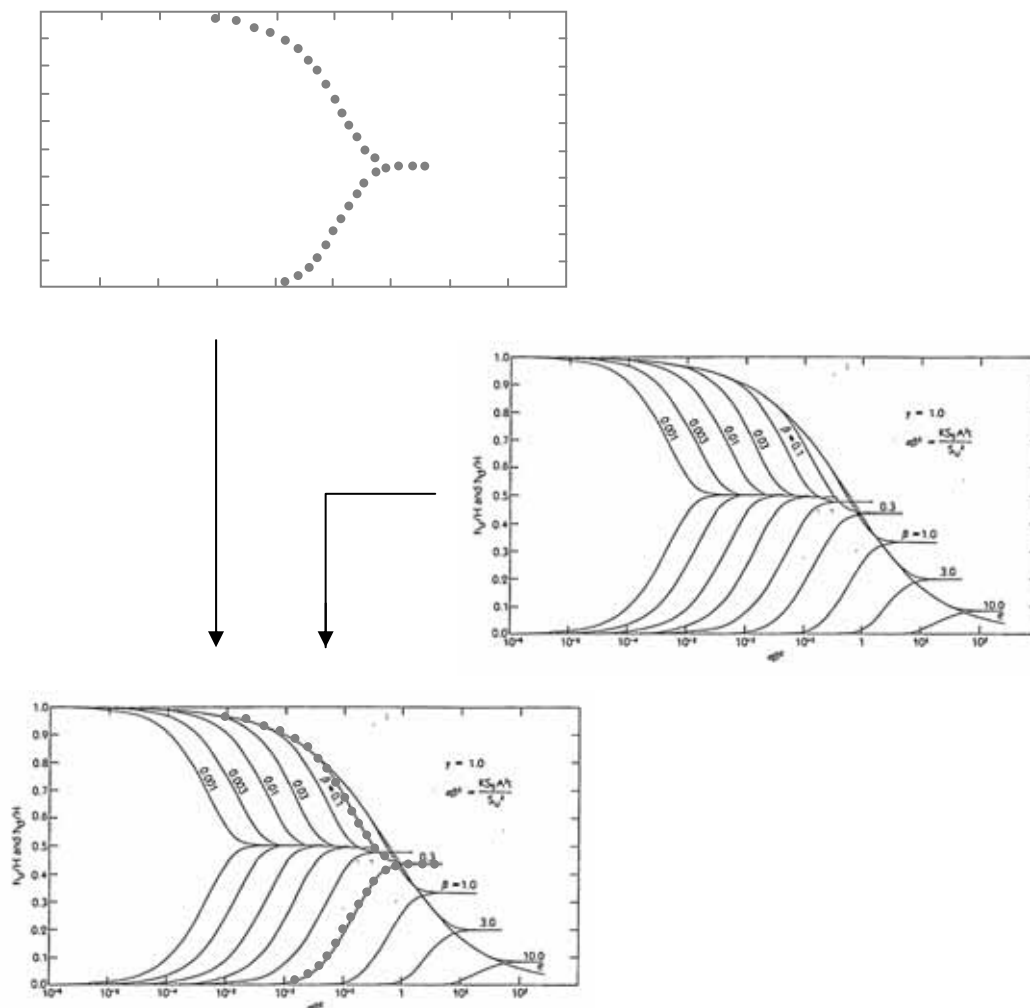


図 6-7 Hsieh 法による解析手順の概念図

表 6.3-1 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

	単位	既知パラメータ値
V_u	(m^3)	4.15E-04
V_d	(m^3)	4.15E-04
A	(m^2)	1.96E-03
l	(m)	5.00E-02
C_w	(m^2/kN)	4.65E-07
γ_w	(kN/m^3)	9.7890

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 6.3-3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)を以下の(6.4-8)～(6.4-10)式から求めた。

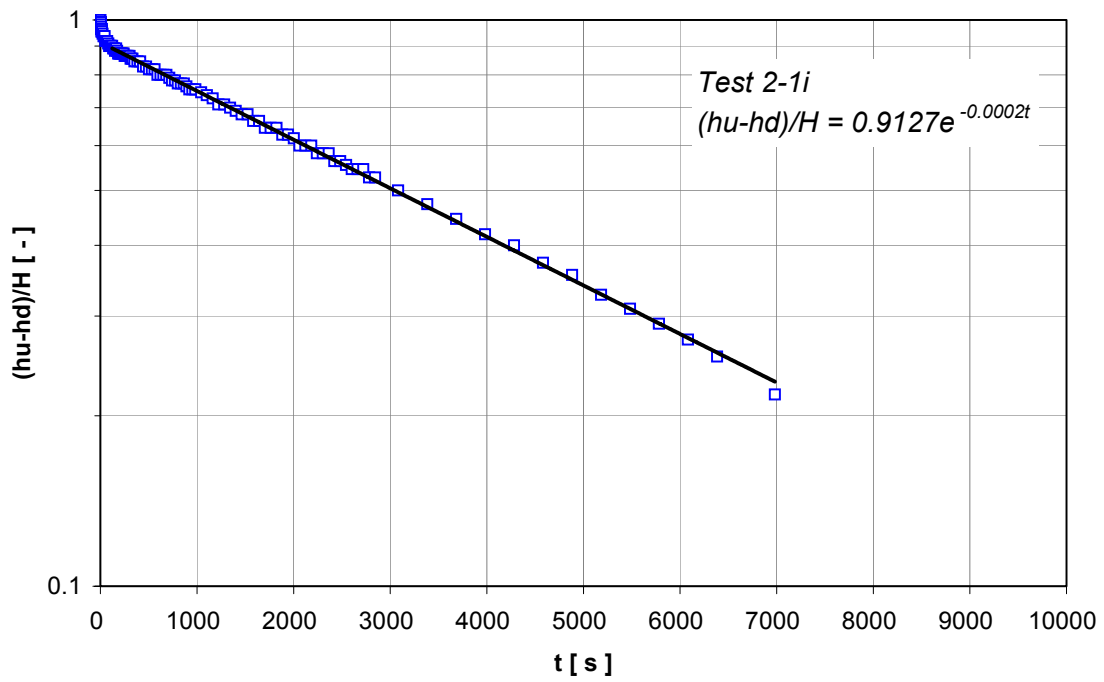
$$T_f = \frac{Q}{x \cdot I} \cdots (6.4-8)$$

$$K = \frac{Q}{A \cdot I} \cdots (6.4-9)$$

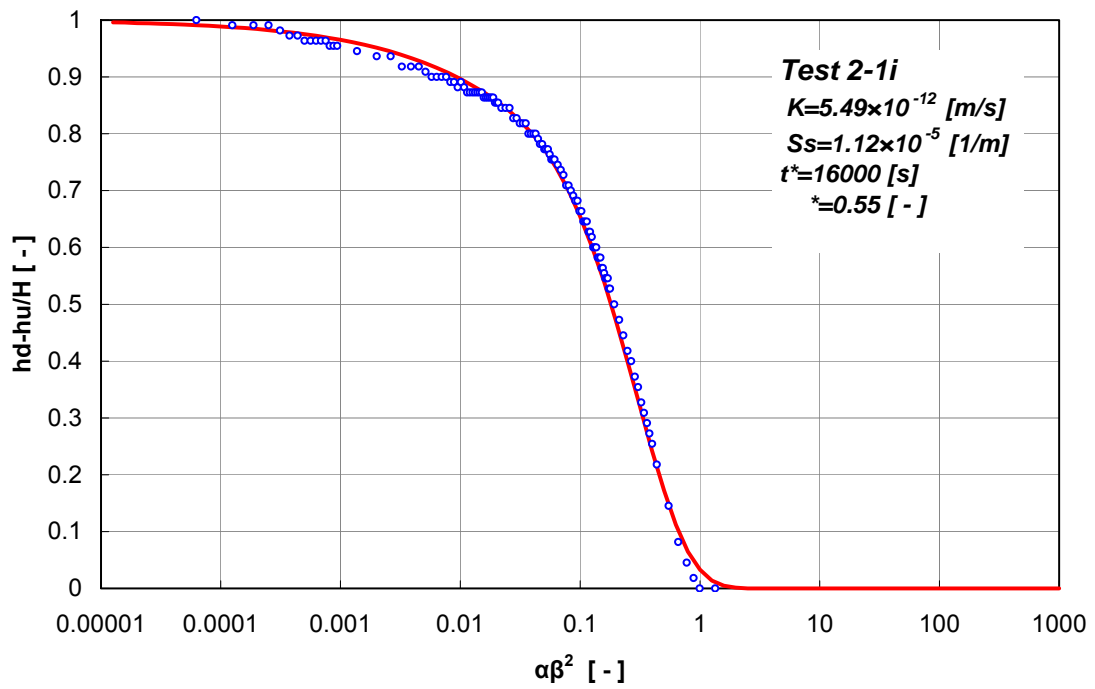
$$I = \frac{H}{L} \cdots (6.4-10)$$

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。

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 6-11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。

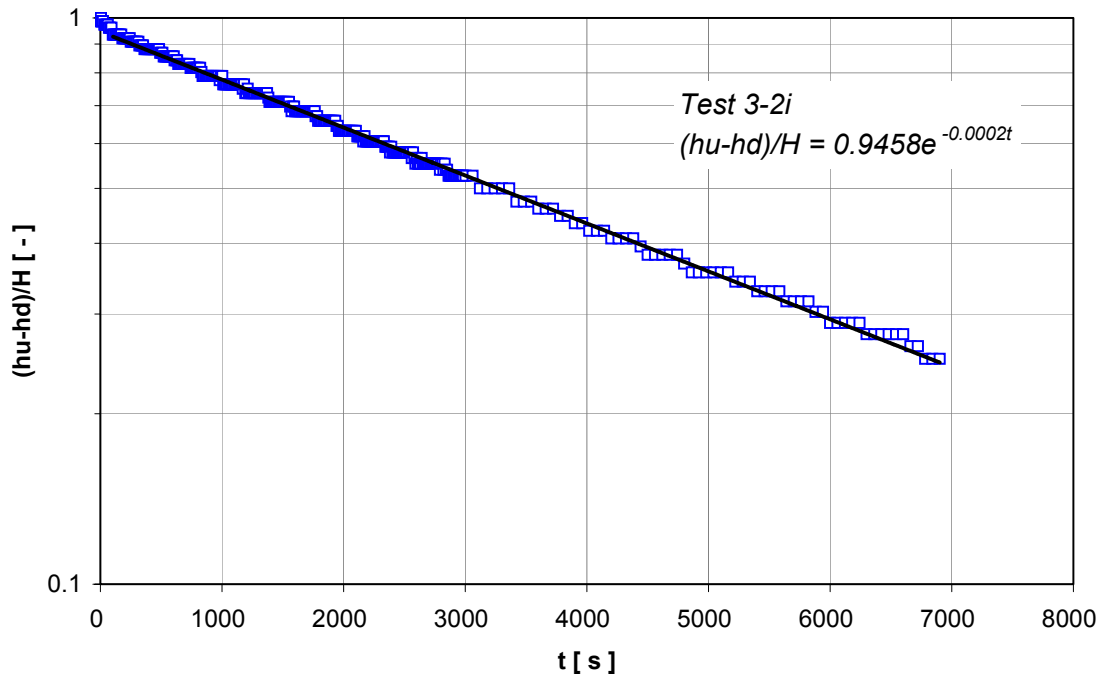


(a) Brace 法

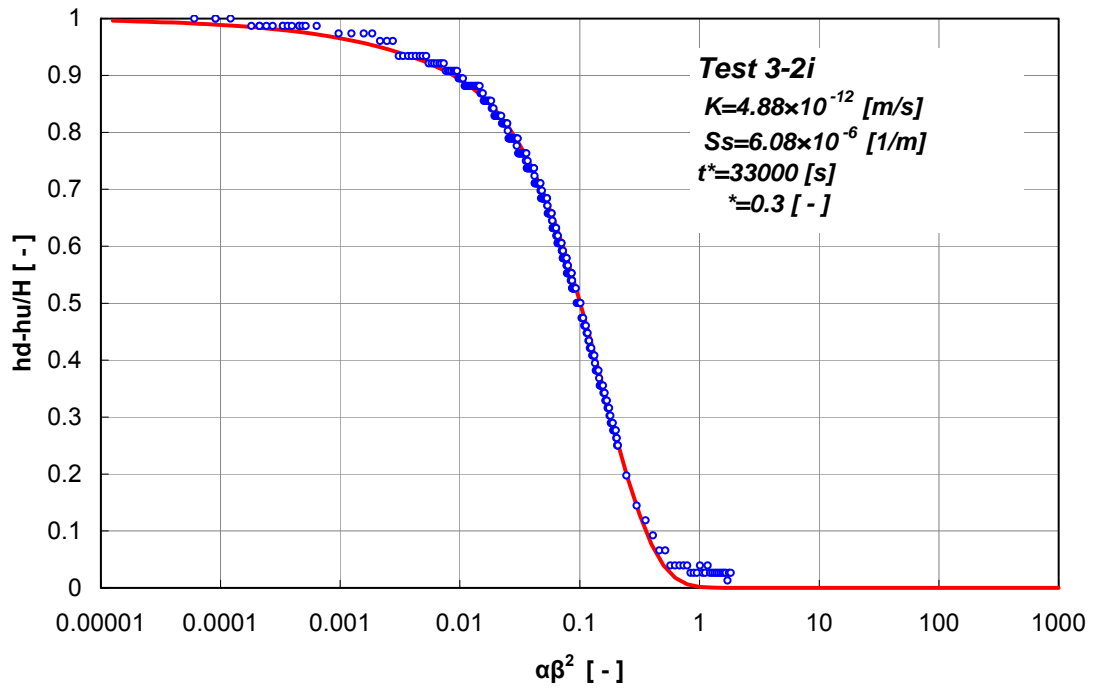


(b) 差圧を用いた Hsieh 法

図 6-8 トランジェントパルス透水試験結果（試料名：2.1i）

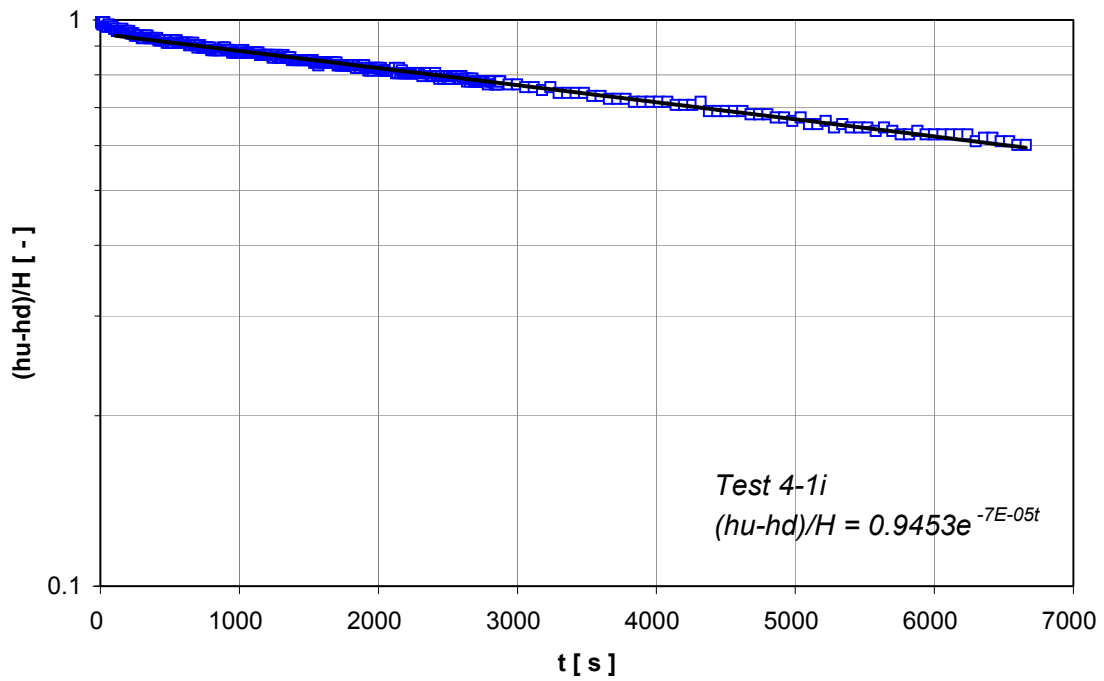


(a) Brace 法

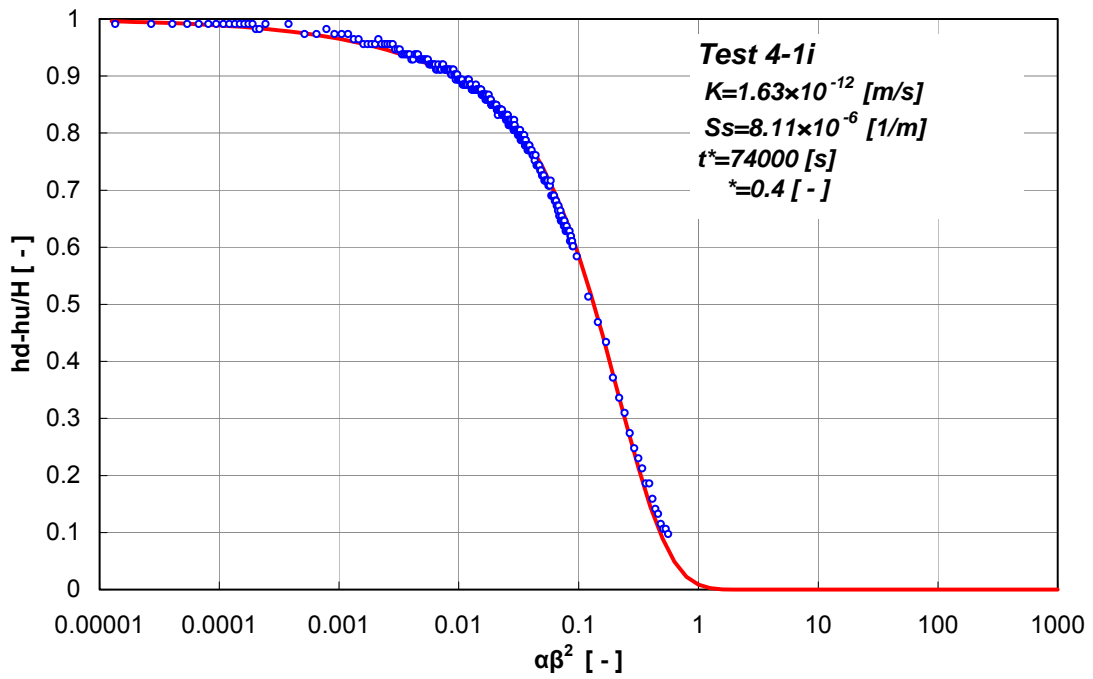


(b) 差圧を用いた Hsieh 法

図 6-9 トランジェントパルス透水試験結果 (試料名: 3-2i)



(a) Brace 法



(b) 差圧を用いた Hsieh 法

図 6-10 トランジェントパルス透水試験結果 (試料名: 4-1i)

表 6.3-2 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]		
			軸圧	側圧			Brace法	差圧を用いた Hsieh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 6.3-3 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

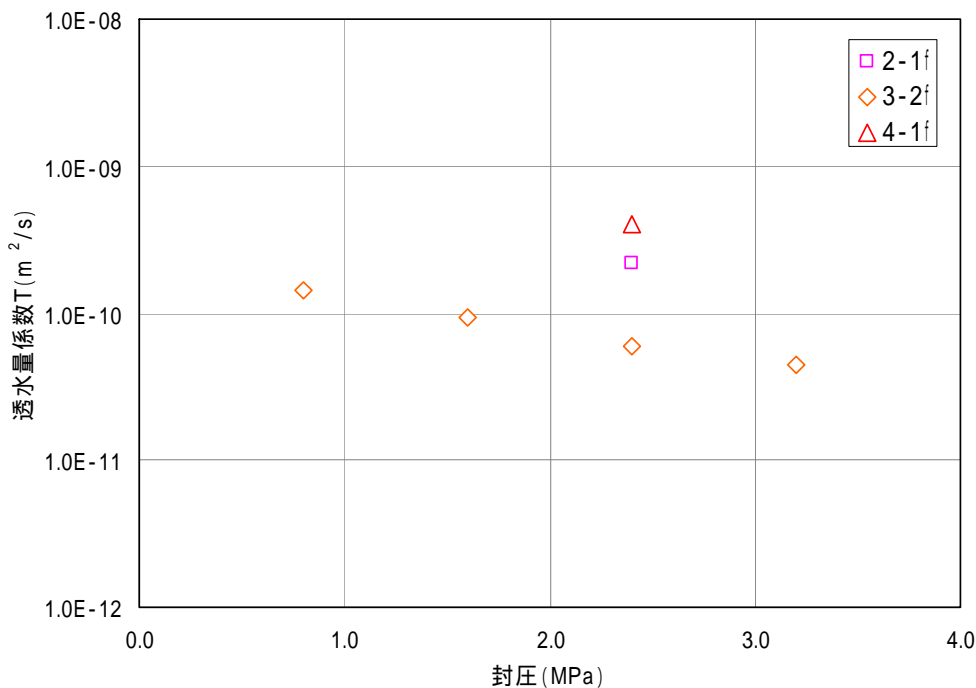


図 6-11 亀裂試料における封圧と透水量係数の関係

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($10^{-11} \sim 10^{-12}$ (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。

以下に、試験手順に沿って、試験方法を述べる。

(1) 供試体作成

供試体は、図7-2に示すように、採取試料を直径30mm、厚さ5mmの円盤状に整形し、周囲をエポキシ系樹脂により固めたものである。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注意を払い、供試体作成後は速やかに試料脱気を行った。

(2) 供試体のセット

作成した供試体は、図7-1、図7-2に示すアクリル製の拡散セルに、2つのセルで挟み込むようにセットした。

(3) 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。

(4) 拡散実験の開始

供試体の脱気を完了後、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、拡散実験を開始した。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) 測定セル側溶液のサンプリングおよび脱イオン水の補充

試験開始の翌日から、1日おきに測定セルから20mlずつサンプリングし、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。また、トレーサーセル内のトレーサー濃度の変化が無いことを確認するため、1週間に1回の割合で10mlずつサンプリングした。

また、試料採取地の地下水等により、トレーサー溶液と同等の物質が、岩石そのものに含まれている可能性があるため、トレーサー加えないブランクテストも拡散実験と同時に行ったが、結果は試験結果に影響与える程の濃度は確認されなかった。

(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 mg/L)により求めた。

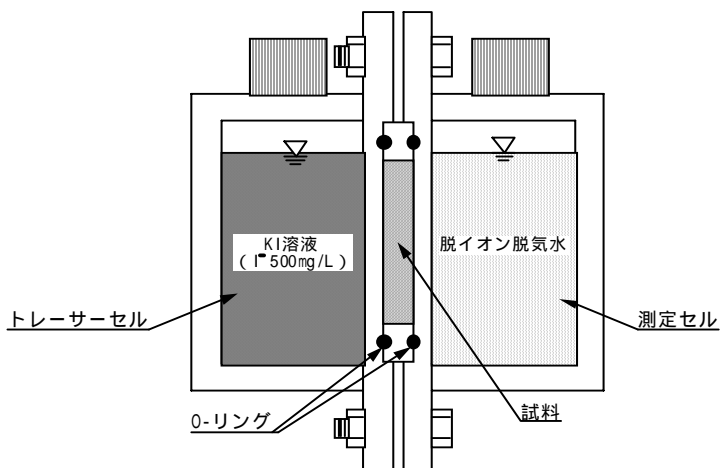


図 7-1 拡散実験装置概要

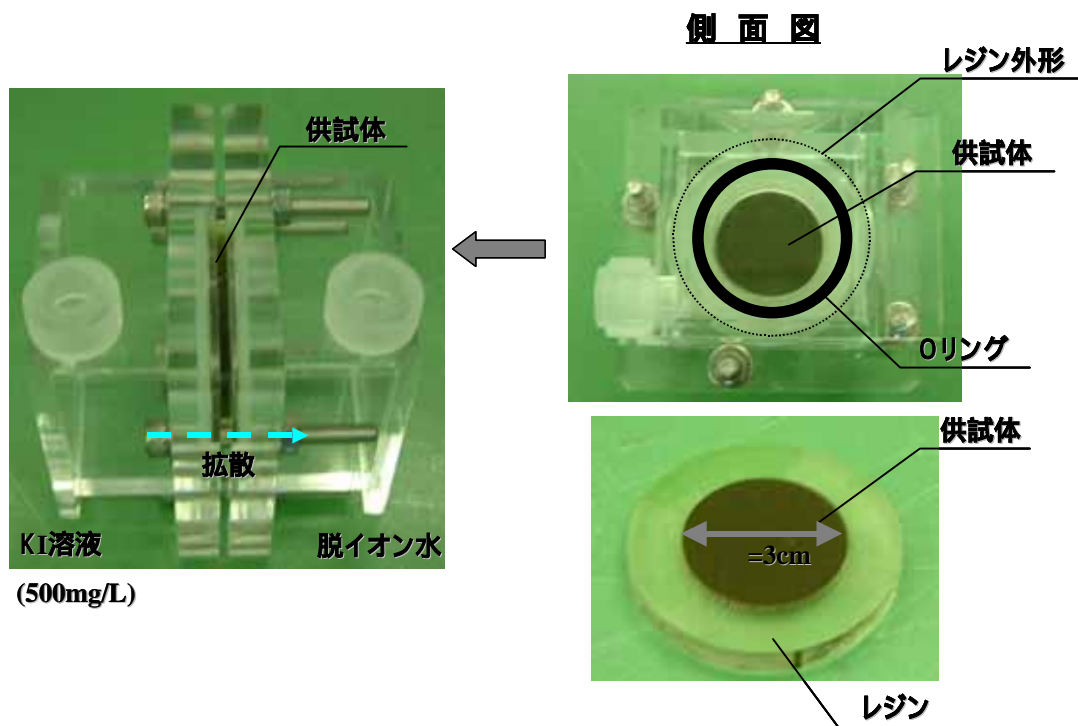


図 7-2 拡散実験装置および供試体の概観

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

試験結果を図 7-3～図 7-5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、次節で述べる方法で拡散係数を求めた。

7.4 解析結果

7.4.1 解析方法

一次元の拡散方程式を、初期条件 $C_p(t,x)=0$ 、 $t=0$ 、 $0 \leq x \leq H$ 、境界条件 $C_p(t,x)=C_0$ 、 $t > 0$ 、 $x=0$ 、 $C_p(t,x)=0$ 、 $t > 0$ 、 $x=H$ のもとで解くことにより、次式を得る。

$$C_d = \frac{S_r \cdot H \cdot C_0}{V_m} \left[\frac{De \cdot t}{H^2} - \frac{\alpha}{6} - \frac{2\alpha}{\pi^2} \times \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{(-1)^n}{n^2} \cdot \exp\left(-\frac{De \cdot n^2 \cdot \pi^2 \cdot t}{H^2 \cdot \alpha}\right) \right\} \right] \quad (7.3-1)$$

ここに、 C_p ：間隙水中のトレーサー濃度、 t ：時間、 x ：拡散源からの距離、 H ：試料の厚さ (m)、 C_0 ：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、 α は収着容量であり、 $\alpha = n + \rho \cdot K_d$ (n ：試料の有効空隙率、 ρ ：試料の乾燥密度 (kg/m³)、 K_d ：分配係数 (m³/kg)) で与えられる。

ここで、上式(7.3-1)の指数項部は、試験時間のあまり経過していない初期の非定常状態における C_d の経時変化を表しており、ある程度の時間が経過した後は、これを無視できる。従って、上式 (7.3-1) は、近似的に次式 (7.3-2) のように表せる。

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

つまり、実効拡散係数は、時間に対する濃度増加の傾きから、(7.3-2) 式から求められる。さらに、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。

$$Da = \frac{H^2}{6T_{int}} = \frac{De}{\alpha} \quad (7.3-3)$$

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。

7.4.2 解析結果

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収着容量を表 7.4-1に示す。実効拡散係数については、 $0.8 \sim 2.5 \times 10^{-11}$ [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 7-6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。

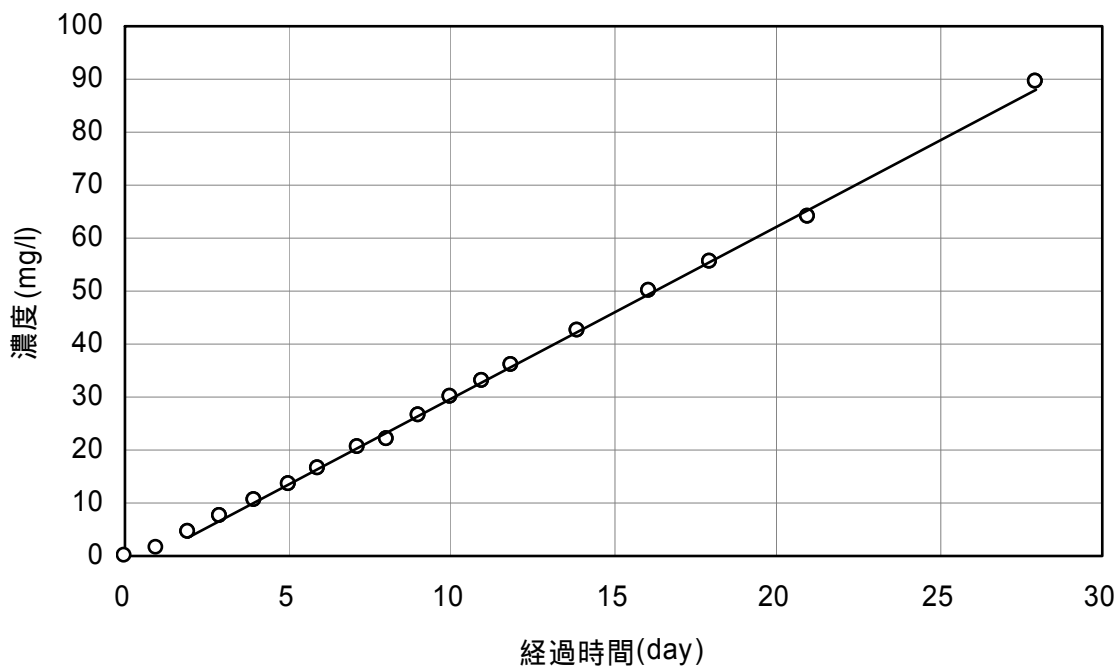


図 7-3 拡散実験結果 (試料名: 2-2i)

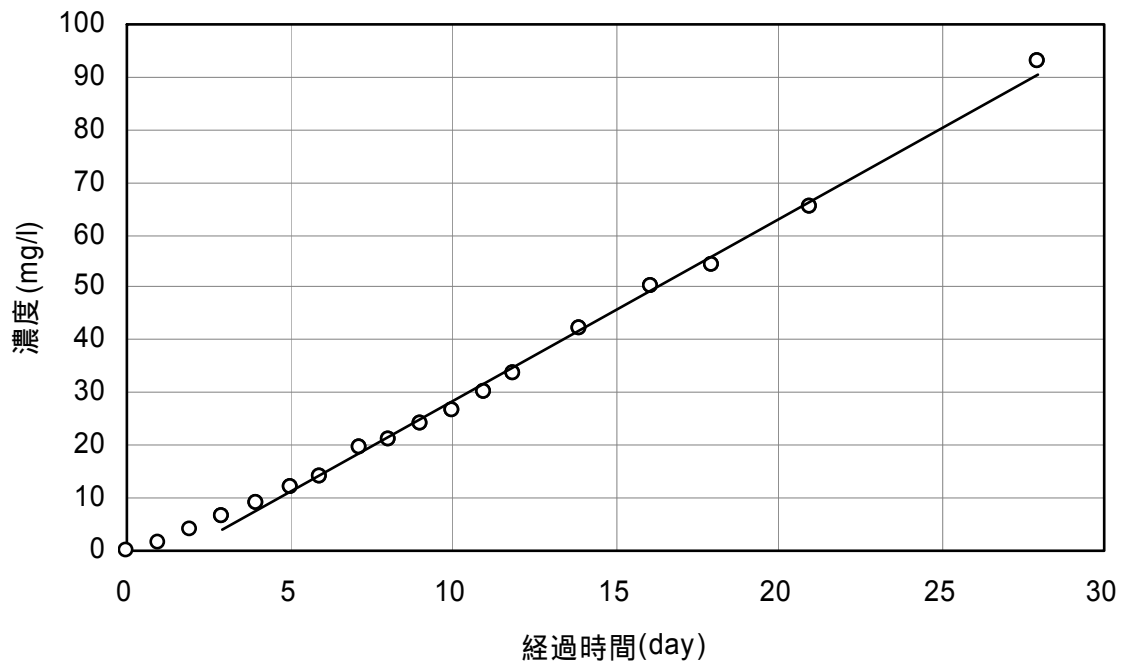


図 7-4 拡散実験結果 (試料名: 3-4i)

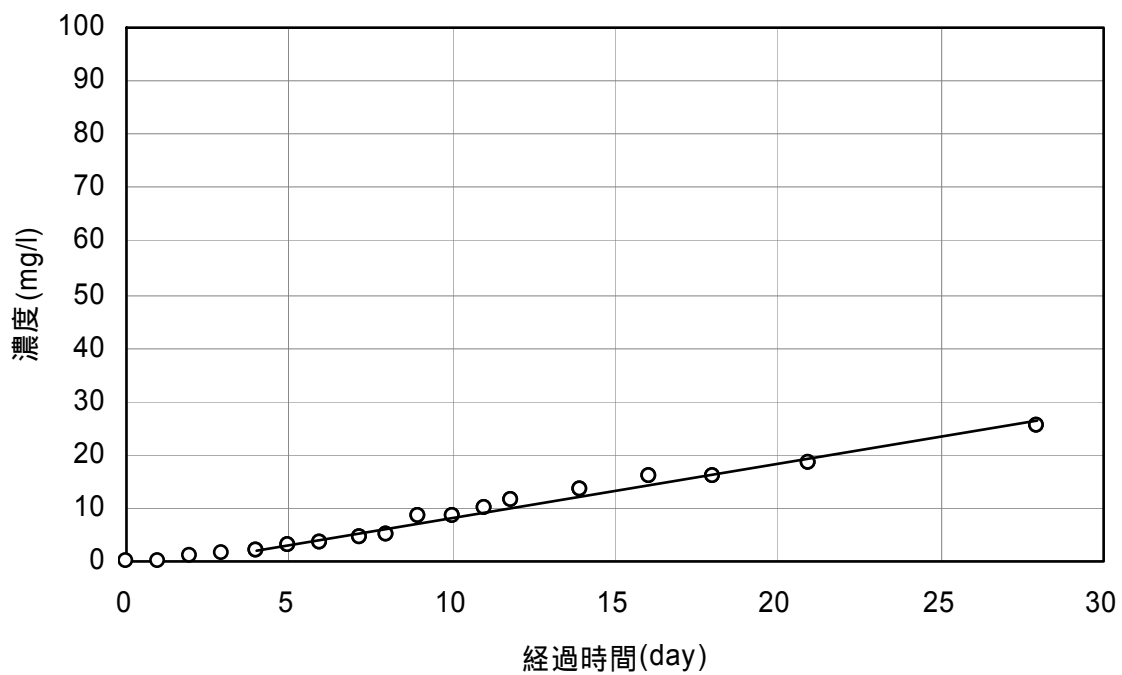


圖 7-5 擴散實驗結果 (試料名 : 4-2i)

表 7.4-1 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

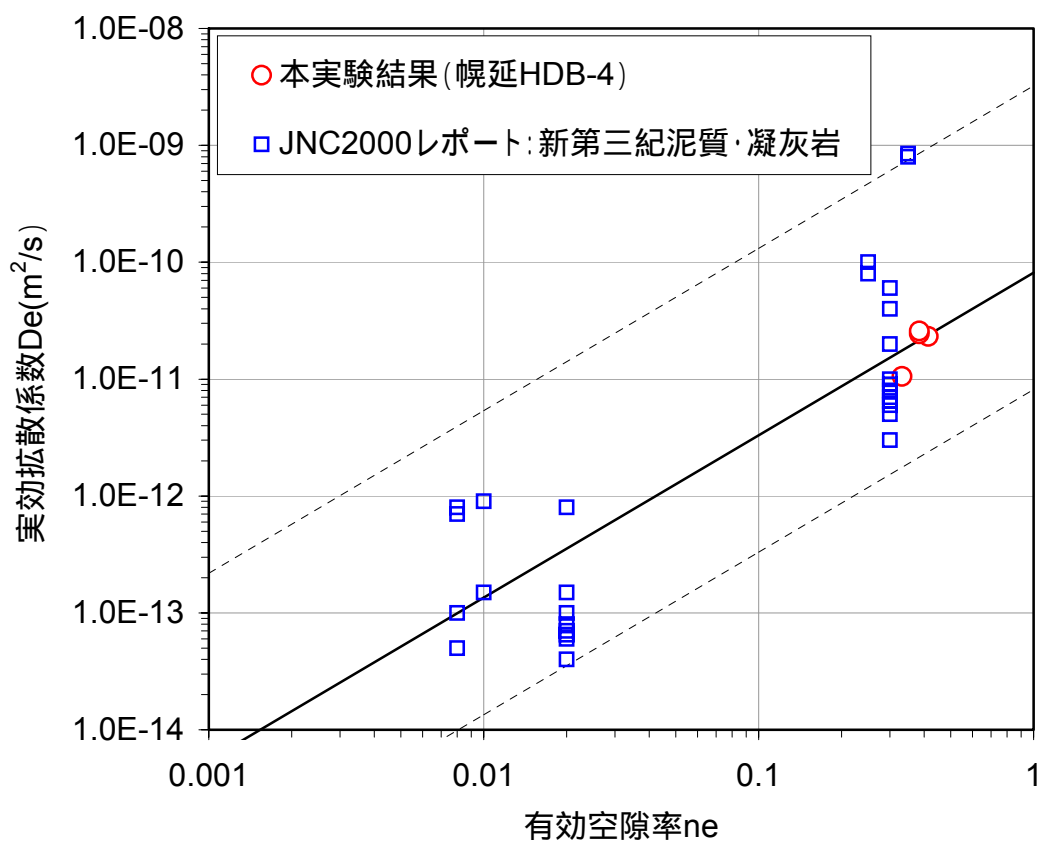


図 7-6 実効拡散係数と有効空隙率の関係 (既往データとの比較)

(核燃料サイクル開発機構、2000)

8 トレーサー試験

8.1 試験概要

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、写真 8.2-1に示す。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。

8.2 試験方法

8.2.1 試験装置

表 8.2-1に試験装置ならびに計測機器の一覧を示す。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ともに、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ヤーポンプ（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。図 8-2、図 8-3にフラッシング部の詳細を示す。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。

8.2.2 試験手順

図 8-4に試験手順を示す。以下、各手順の詳細を述べる。

(1) 定流量透水試験

トレーサー試験に先立ち、注入ポンプにより一定流量で注水し、準定常状態での圧力と流量の関係から、透水係数を求める(6.1.2参照)。

(2) 注入側装置内のトレーサー溶液入替え

トレーサー注入の前に、注入側の装置内を完全にトレーサー溶液に入れ替える。これは、注入側のトレーサー濃度をシャープに上昇させるために行う。

入替えは、装置出口側のバルブを全て閉じた状態で、上流側定流量ポンプから上流側ドレインへトレーサー溶液を通水して行う。入替え完了の確認は、ドレイン部に配置した電気伝導度計による溶液濃度の値に基づいて行った。

(3) トレーサー注入

トレーサー注入は、定流量ポンプにより所定の一定流量で行った。また、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、出口側に配置した定流量ポンプによりフラッシングを行った。フラッシングポンプにより濃度が希釈される効果については、完全混合を仮定して、流量比により補正する。

(4) トレーサー濃度測定開始

トレーサー注水開始とともに、電気伝導度計およびイオンメータによるトレーサー濃度の連続測定を開始する。また、フラクションコレクターによる水質サンプルの取得も開始する。採取した水質サンプルは、試験終了後に試験管からサンプルビンに移し替え、分析業者に送付してヨウ化物イオン濃度を測定した。

(5) 注入側装置内のトレーサー溶液から水への入替え

出口側のトレーサー濃度が、十分に上昇、安定したことを確認した時点で、注入をトレーサー溶液から水に切り替える。水の注入に先立って、トレーサー注入を一時停止し、ポンプ内及び注入側配管内を水で置き換えた後、(2)と同様に、注入側装置内をトレーサー溶液から水へ完全に入替える。

入替えおよび、入替え完了の確認は、トレーサー溶液入替えと同じ方法で行った。

(6) 水注入

水注入は、トレーサー溶液注入と同じ方法で行った。

(7) トレーサー濃度の低下傾向確認

トレーサー濃度測定を継続し、濃度が設定値まで低下した時点で、注水を終了する。

(8) 総注入量、トレーサー回収率の確認

フラクションコレクターに排出した溶液の総重量を測定し、フラッシング流量を差し引くことにより、試験の総注入量を算定する。また、電気伝導度計およびイオンメータによる測定結果と分析結果から、試験終了時のトレーサーの回収率を確認する。

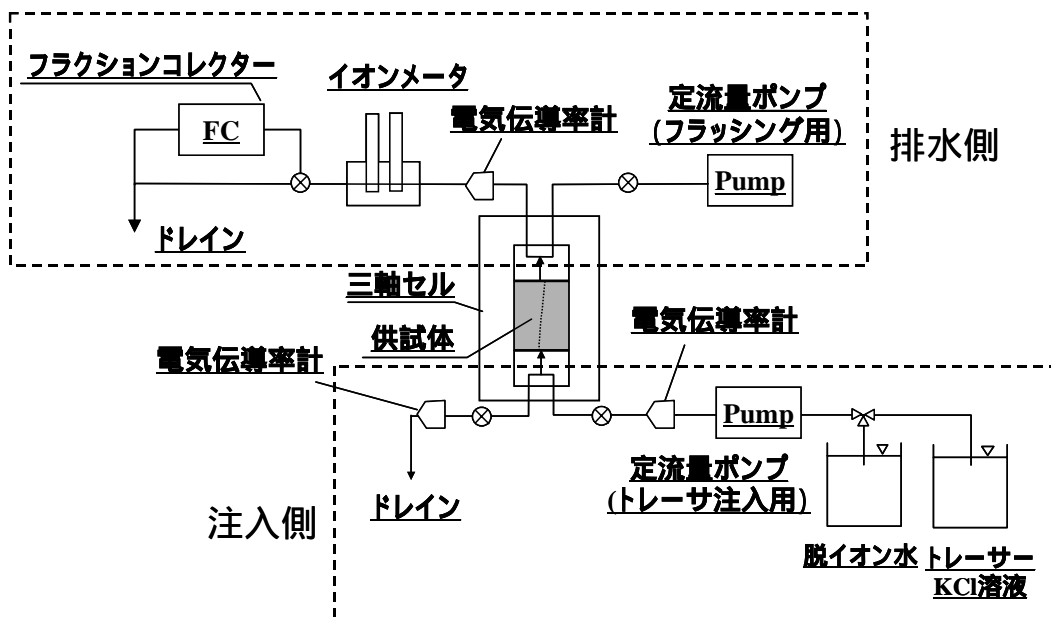


図 8-1 トレーサー試験装置の概要

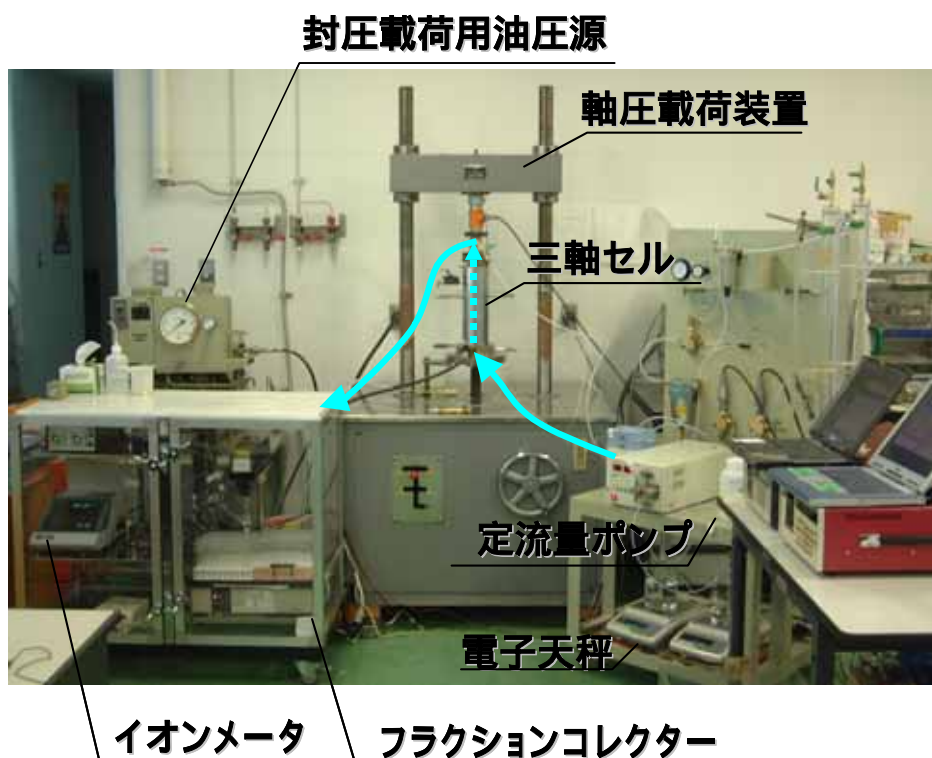


写真 8.2-1 トレーサー試験装置の概観

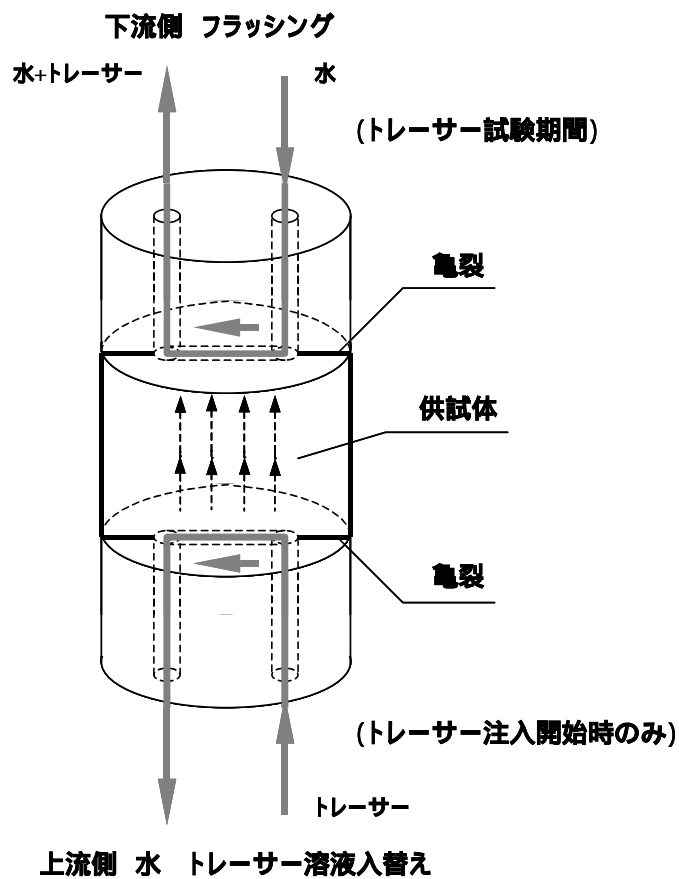


図 8-2 トレーサー注入出部のフラッシング構造

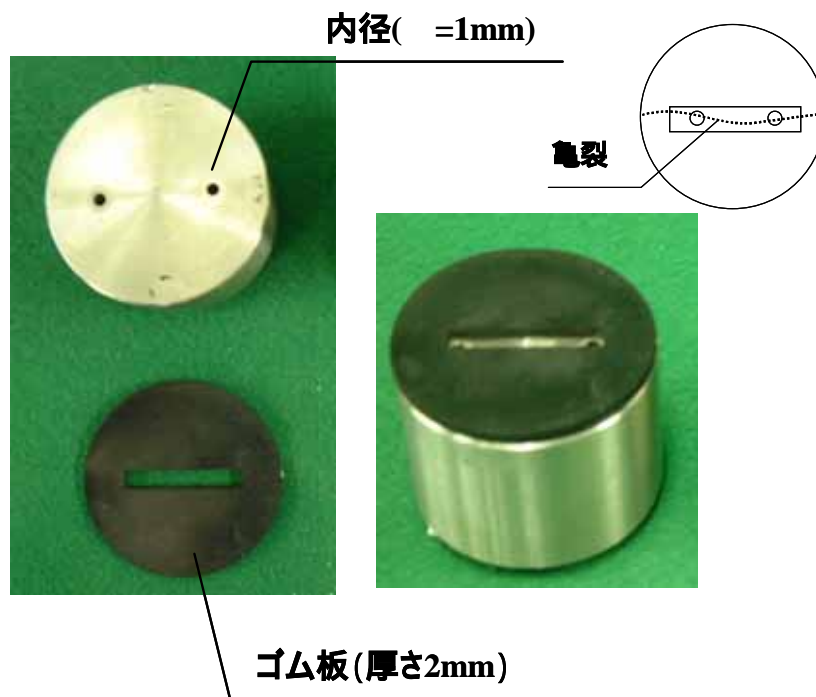


図 8-3 トレーサー注入出部のフラッシング構造

表 8.2-1 試験装置ならびに計測機器一覧表

名 称	型 式	製 造	仕 様
軸圧载荷装置	一軸圧縮試験機	MARUI & CO.LTD.	最大荷重 10t
引張・圧縮型荷重計	TCLP-3B	(株)東京測器	ひずみゲージ式変換機
側圧载荷装置	油圧源	SUM 電子	最大圧 20 MPa
間隙水圧計	PG-20KU	(株)共和電業	ひずみゲージ式変換機、フルスケール：2 MPa
トレーサー注入用 注水ポンプ	LC 送液ポンプ PU610	ジーエルサイエンス(株)	方式： マイクロ制御ダブルプランジャーポンプ 設定流量： 0.001 ~ 5.00mL/min 定流量送液： ±2%または±2μL/min のいずれか大きい値以下 定圧力送液： 設定範囲 1.0 ~ 34.0MPa 圧力正確さ： ±10%、±1.0MPa のいずれか小さい値以下 圧力リミット： 上限(0 ~ 34MPa)、下限(0 ~ 34MPa)
フラクション コレクター	F-160	Advantec	試験管容量：最大 20mL、最大架数：160 本
イオン濃度計(本体)	IM-40S	東亜電波工業(株)	イオン濃度測定範囲：0.0001 ~ 1999×10 ³ mg/l
ヨウ素イオン電極	I-125	東亜電波工業(株)	測定範囲： 10 ⁻⁷ ~ 10 ⁰ mol/l・I ⁻ 応答速度： 3 ~ 20 秒 実用 pH 範囲： pH3 ~ 12 仕様温度範囲： 0 ~ 50
比較電極	HS-305DS	東亜電波工業(株)	外筒液： 飽和塩化カリウム溶液(Sat.KCL)
電気伝導率計	Model72	Engineered Systems & Designs	
ヨウ化カリウム	Potassium Iodide	和光純薬工業(株)	

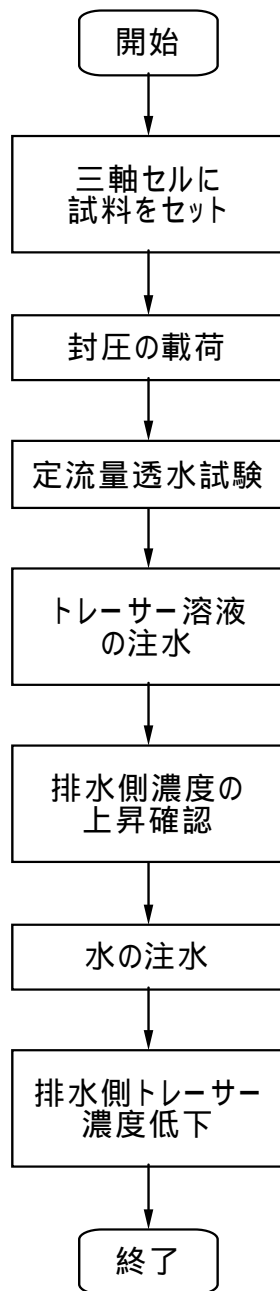


図 8-4 トレーサー試験手順

8.3 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 8.3-1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 8.3-2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、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 8.3-1 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 8.3-2 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)

8.4 試験結果

8.4.1 電気伝導率計の較正

電気伝導率測定は、ヨウ化物イオンの濃度を直接的に測定するものではないが、イオン濃度との相関が認められ、配管途中での連続測定が可能な利点を有する。試験に先立って行った電気伝導率の較正結果を図 8-5に示す。

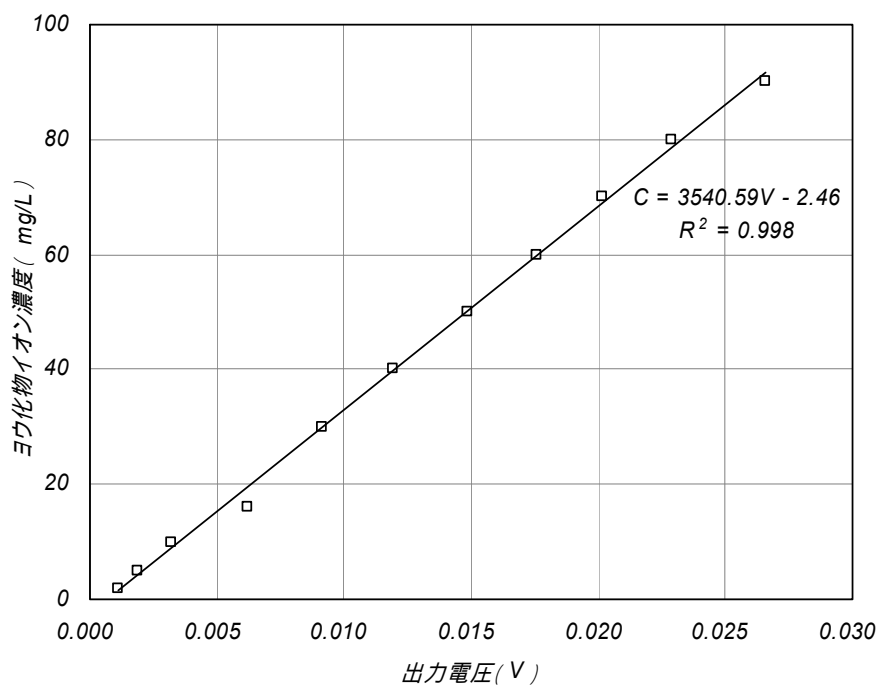


図 8-5 電気伝導率計の校正結果

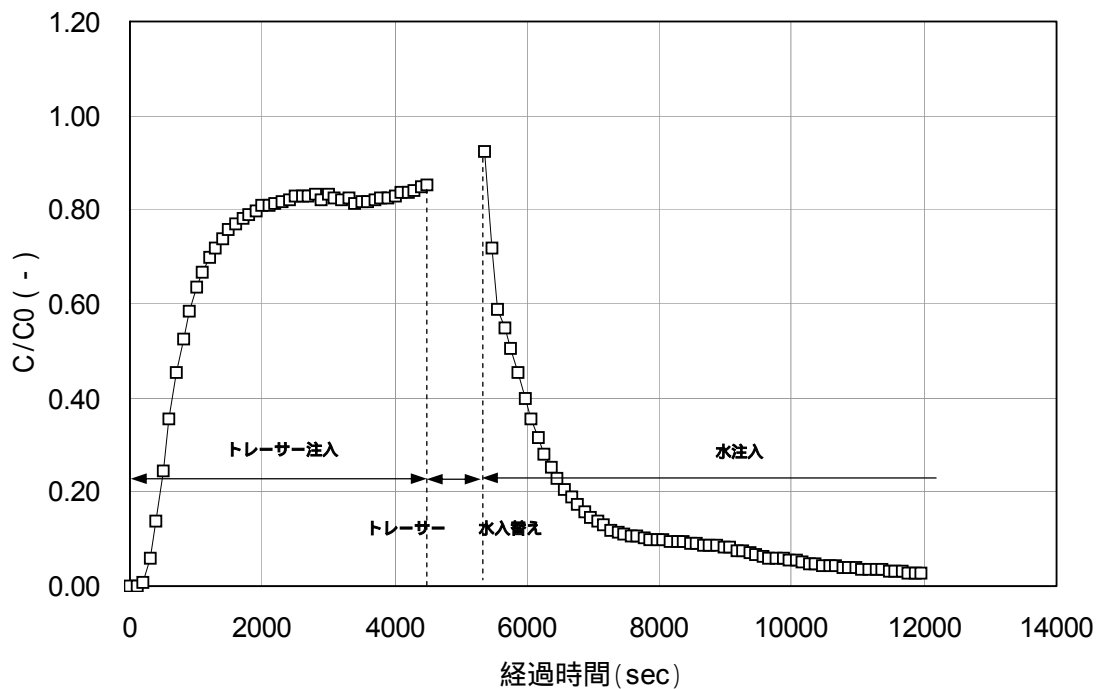
8.4.2 試験状況

以下、トレーサー試験の状況について簡単に説明する。試験結果を図 8-6～図 8-11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。

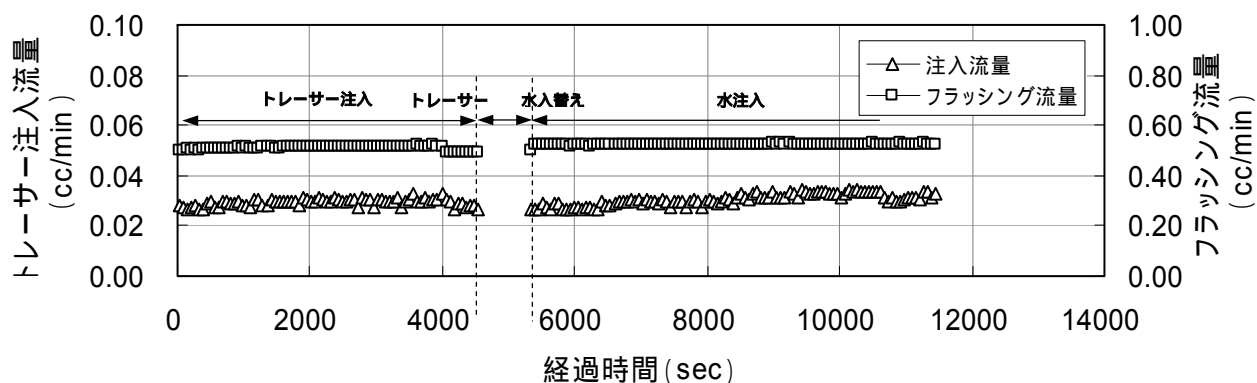
流量の経時変化を図 8-6～図 8-11の(b)に示す。トレーサー注入は、定流量制御が可能なダブルプランジャーポンプを用いており、0.001cc/分単位での流量設定が可能である。図 8-6～図 8-11の(b)の流量の経時変化グラフから（設定流量=0.035cc/分）、流量の安定性が確認される。

注入圧力の経時変化を図 8-6～図 8-11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 8-6～図 8-11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。

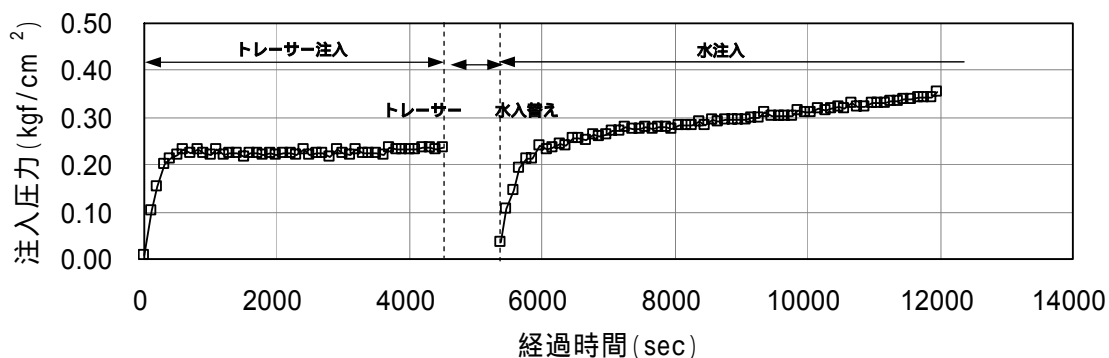
トレーサー濃度の経時変化を図 8-6～図 8-11の(a)に示した。トレーサー注入開始（ $t=0$ ）の後、トレーサー濃度が上昇し、やがて緩やかに安定に向かう。その後、トレーサーから水注入に切り替えたときに、濃度の一時的な上昇が見られるが、これは、水注入開始直後のフラッシングポンプと水注入ポンプの始動時間の微妙なずれにより、フラッシングによるトレーサー溶液の希釈のバランスが、一時的に崩れるために生じると考えられる。そこで、水注入開始直後のトレーサー濃度値は、試験結果の評価では除外して考えることとした。



(a) 出口側トレーサー濃度 (試料名 : 2-1f、 封圧 : 2.4MPa)

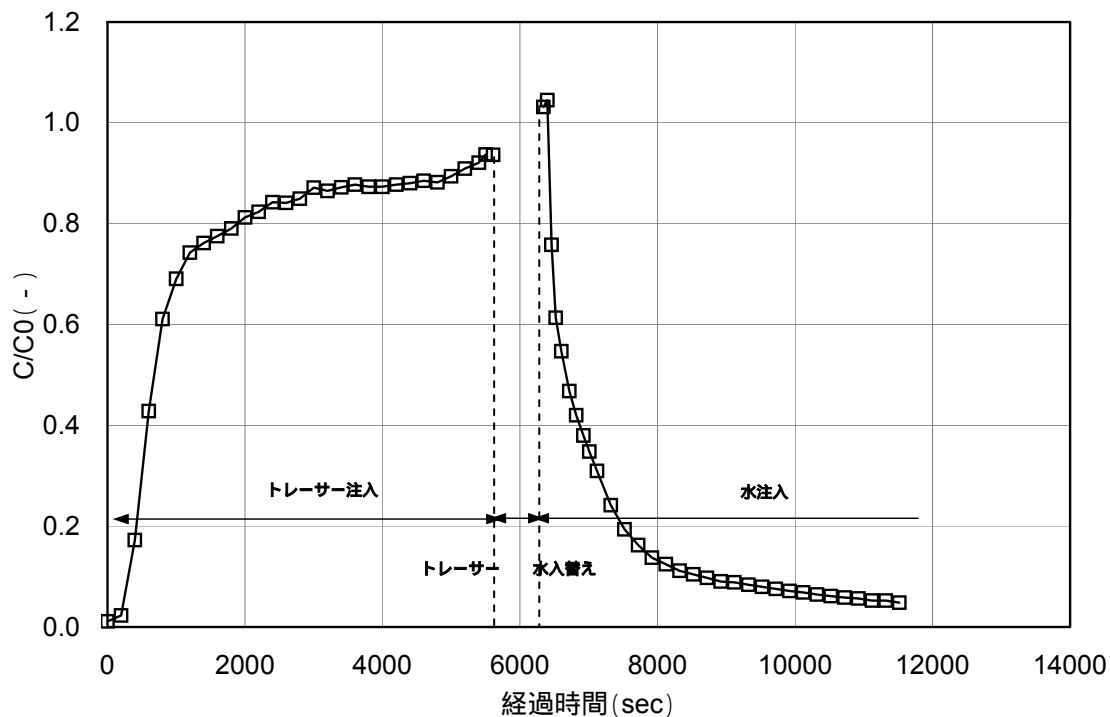


(b) 注入流量およびフラッシング流量

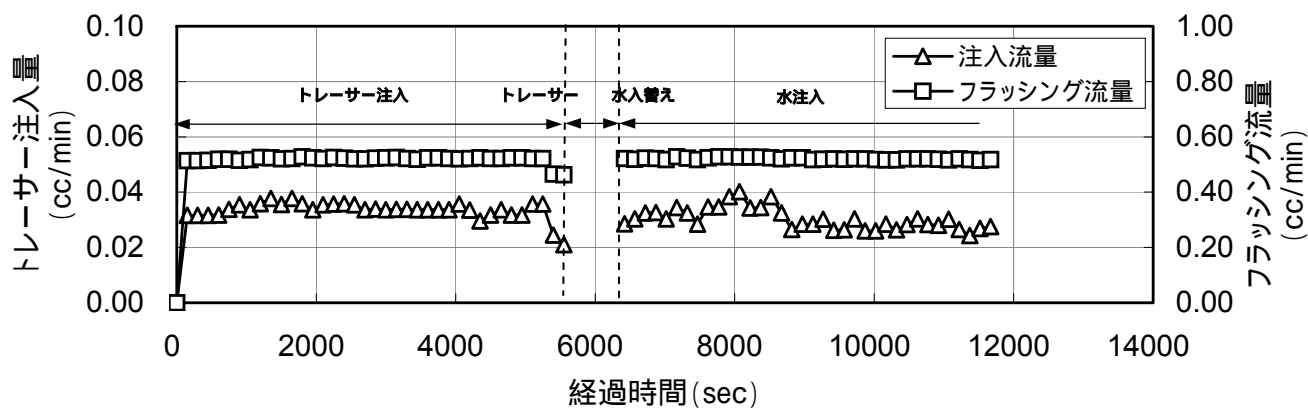


(c) 注入圧力

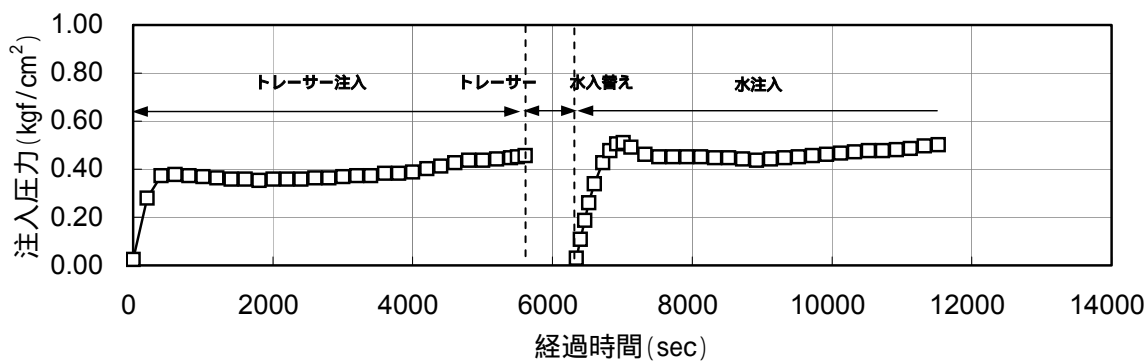
図 8-6 トレーサー試験結果 (試料名 : 2-1f、 封圧 : 2.4MPa)



(a) 出口側トレーサー濃度 (試料名: 3-2f、封圧: 0.8MPa)

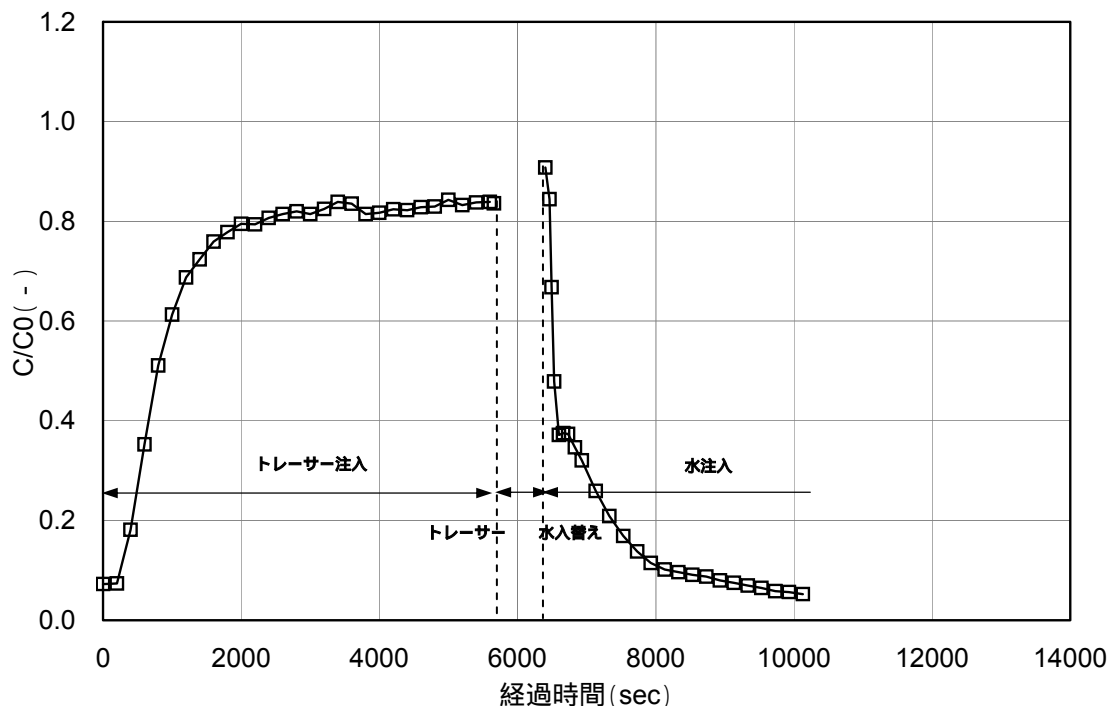


(b) 注入流量およびフラッシング流量

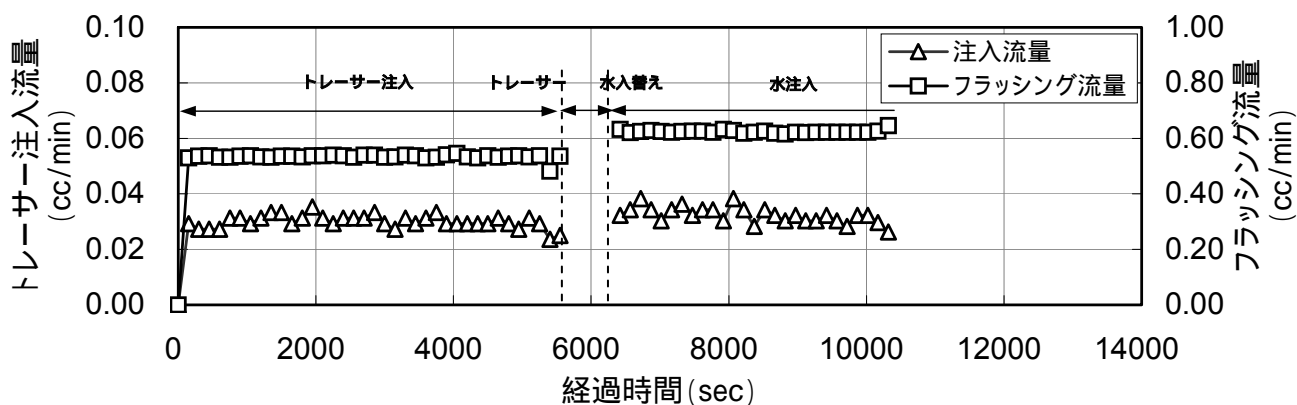


(c) 注入圧力

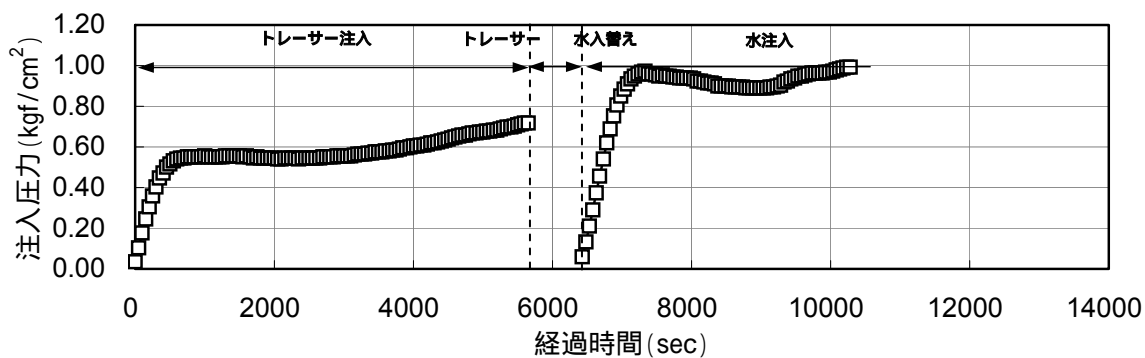
図 8-7 トレーサー試験結果 (試料名: 3-2f、封圧: 0.8MPa)



(a) 出口側トレーサー濃度 (試料名: 3-2f、封圧: 1.6MPa)

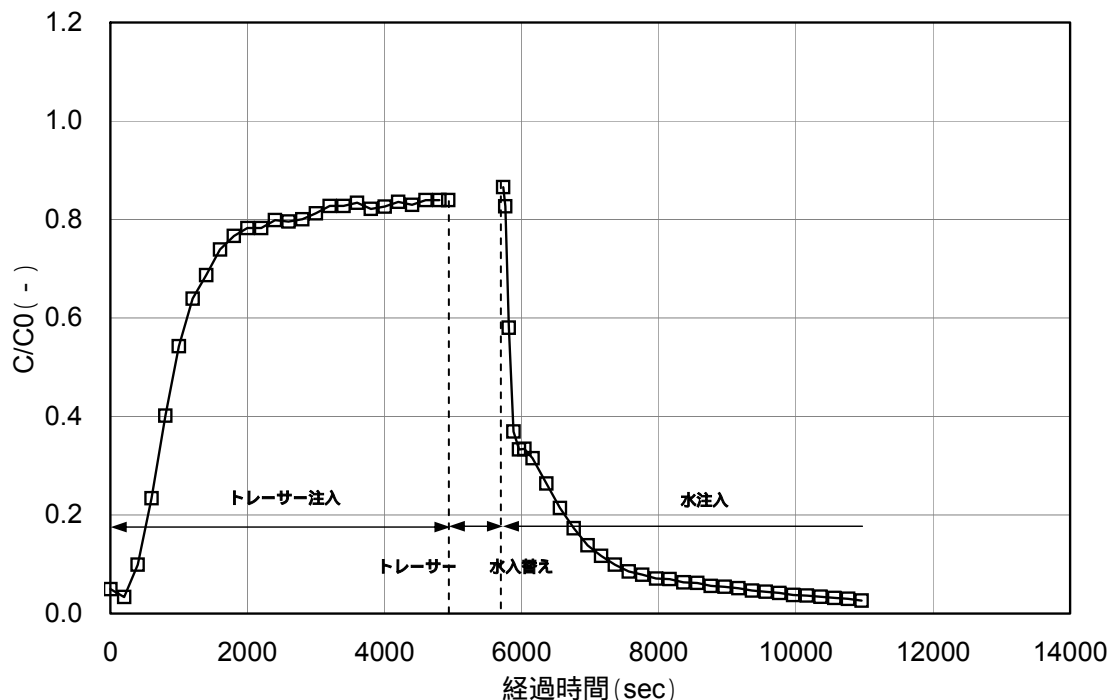


(b) 注入流量およびフラッシング流量

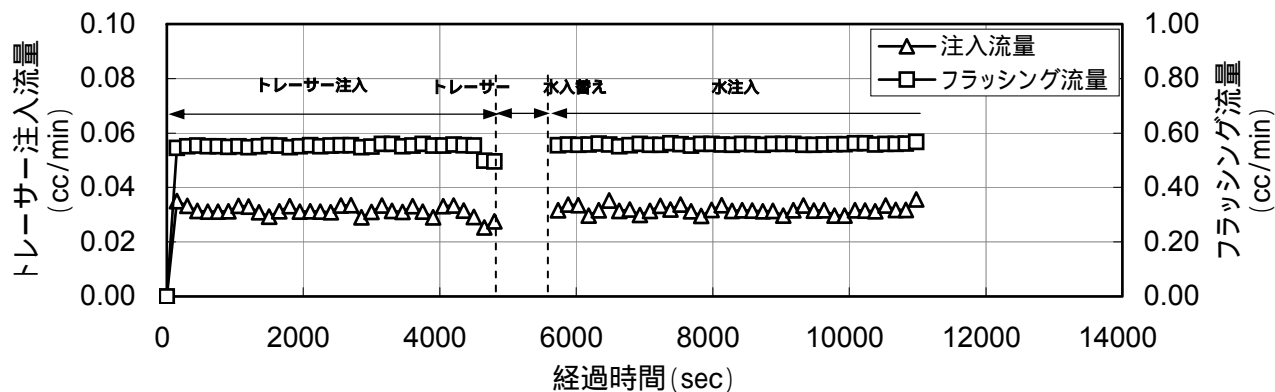


(c) 注入圧力

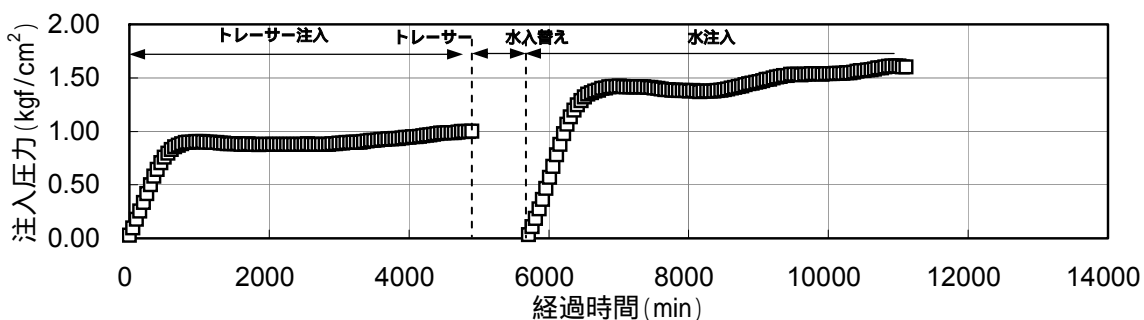
図 8-8 トレーサー試験結果 (試料名: 3-2f、封圧: 1.6MPa)



(a) 出口側トレーサー濃度 (試料名: 3-2f、封圧: 2.4MPa)

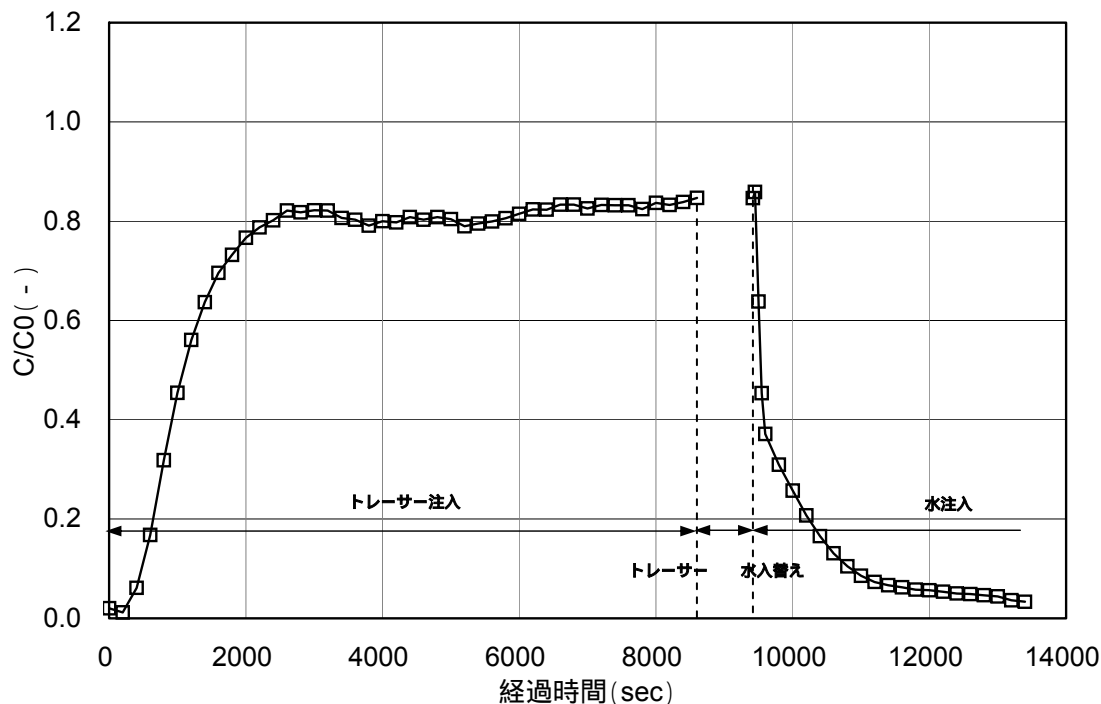


(b) 注入流量およびフラッシング流量

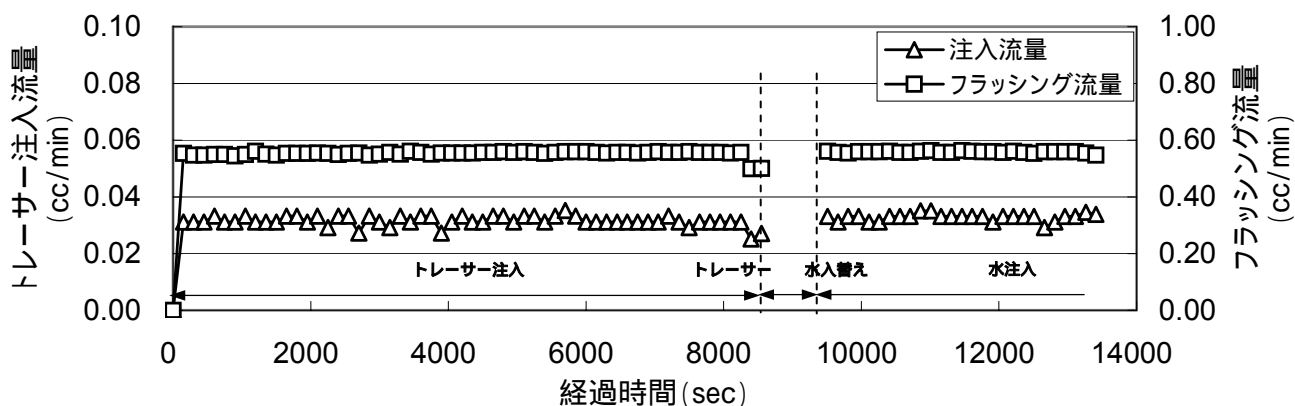


(c) 注入圧力

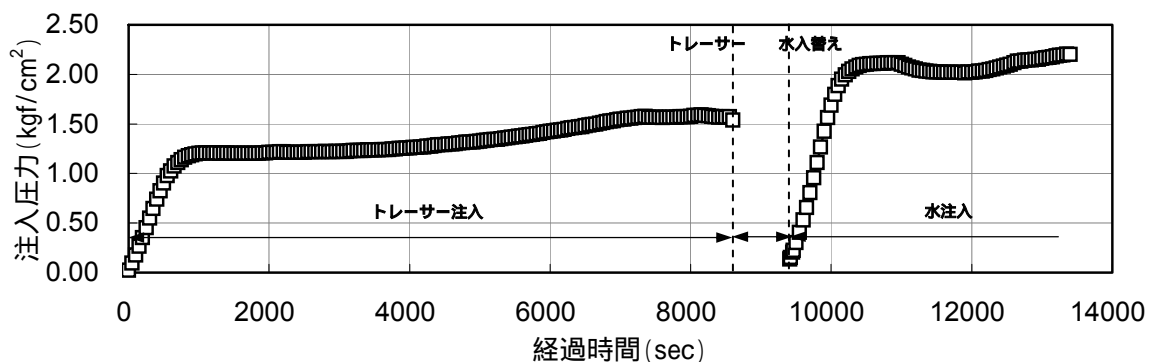
図 8-9 トレーサー試験結果 (試料名: 3-2f、封圧: 2.4MPa)



(a) 出口側トレーサー濃度 (試料名: 3-2f、封圧: 3.2MPa)

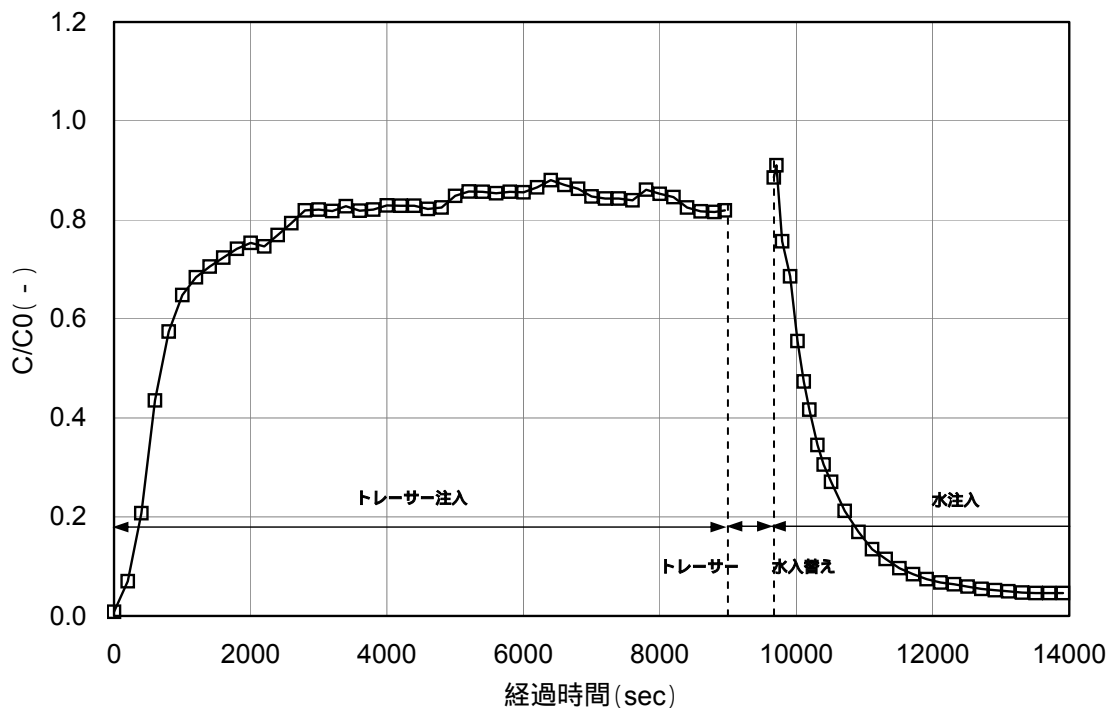


(b) 注入流量およびフラッシング流量

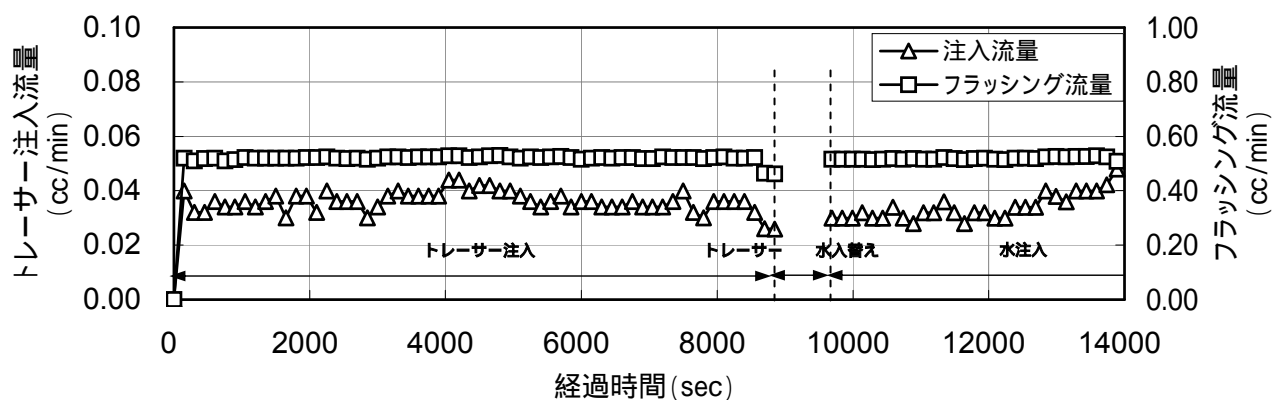


(c) 注入圧力

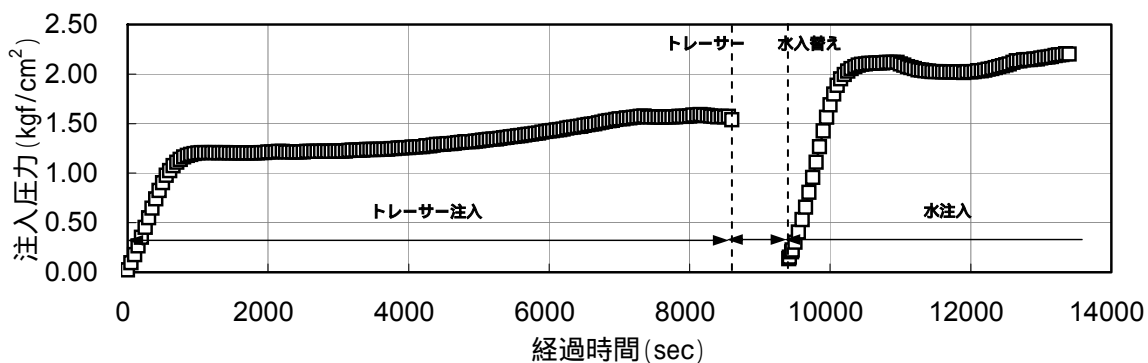
図 8-10 トレーサー試験結果 (試料名: 3-2f、封圧: 3.2MPa)



(a) 出口側トレーサー濃度 (試料名: 4-1f、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 8-11 トレーサー試験結果 (試料名: 4-1f、封圧: 2.4MPa)

8.5 解析結果

8.5.1 解析方法

亀裂と岩石マトリクスの両者を考慮したトレーサー試験の解析方法に関し、マトリクス内の移流が無視でき、マトリクス拡散が亀裂と直交する方向にのみ生じる場合には、例えば、Tang 他 (1981) により解析解が導かれている。今回の実験では、基本的に亀裂のみからのトレーサー注入を行っており、解析解からのパラメータの算定が可能であるが、封圧が小さいケースなど、試験条件によっては、試料面全体にトレーサーが回り込み、亀裂とマトリクスの両者を含む試料面の全体からトレーサーを注入している状況も考えられる。すなわち、注入側では、亀裂内だけでなく、マトリクス面からトレーサー流入が生じている可能性がある。

そこで、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、より実際に即した条件下での解析を行うこととした。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で 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。

8.5.2 解析条件

FRAC3DVS の基礎方程式は、以下の通りである。

- ・ 流れの基礎方程式：飽和・不飽和浸透流

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(K_{ij} k_{rw} \frac{\partial(\psi + z)}{\partial x_j} \right) \pm Q = \frac{\partial}{\partial t} (\theta_s S_w) \quad \dots (8.5-1)$$

- ・ 物質移行の基礎方程式：移流分散、拡散、吸着、放射性崩壊

$$\theta_s S_w R \frac{\partial c}{\partial t} + q_i \frac{\partial c}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\theta_s S_w D_{ij} \frac{\partial c}{\partial x_j} \right) + \theta_s S_w R \lambda c = 0 \quad \dots (8.5-2)$$

$$R = 1 + \frac{\rho_b}{\theta_s S_w} K_d \quad \dots (8.5-3)$$

ここに、 K_{ij} ：飽和状態での透水係数(m/s)、 k_{rw} ：不飽和状態での比透水係数(-)、 $+Z$ ：全水頭(m)、 Q ：流量(m³/s)、 θ_s ：飽和状態の含水率(-)、 S_w ：飽和度(-)、 R ：遅延係数(-)、 c ：トレーサー濃度(mg/l)、 t ：経過時間(s)、 D_{ij} ：水理学的分散係数(m²/s)、 λ ：崩壊係数、 ρ_b ：試料の乾燥密度(kg/m³)、 K_d ：分配係数(m³/kg)である。

今回の解析では、試験条件により、次のように簡単化される。まず、拡散試験結果から、岩石への吸着効果は小さいと考えられるので、分配係数 K_d を0に設定した。また、放射性

崩壊は無視できるため、 を 0 に設定した。

これらの条件の下で、完全飽和状態ならびに水理学的分散係数の等方性を仮定すると、(8.5-2) 式は、次の (8.5-4) 式で表すことができる。

$$D \frac{\partial^2 c}{\partial x_i^2} - v_i \frac{\partial c}{\partial x_i} = \frac{\partial c}{\partial t} \quad \dots (8.5-4)$$

ここに、 v は流速(m/s)である。

一般に、水理学的分散係数 D は、力学的分散係数 D' とバルク拡散係数 D_d の和としてあらわされる。

$$D = D' + D_d = \alpha v + D_d \quad \dots (8.5-5)$$

透水試験結果から、岩石マトリクス部の透水係数は非常に小さい (5×10^{-12} m/s) ことが分かっており、今回の試験条件では、岩石マトリクス内の流速は非常に小さいと考えられる。そこで、岩石マトリクス内の移流に伴う力学的分散の効果は無視し、岩石マトリクス部の水理学的分散係数 D_m については、拡散係数 D_d のみを考慮した。

$$D_m = D_d \quad \dots (8.5-6)$$

一方、亀裂部の水理学的分散係数 D_f については、亀裂部の力学的分散係数 D'_f (m²/s) と水中での分子拡散係数 D^* (m²/s) との和であらわされる。すなわち、

$$\begin{aligned} D_f &= D'_f + D^* \\ &= \alpha v + D^* \end{aligned} \quad \dots (8.5-7)$$

ここに、 α : 亀裂の分散長(m)、 v : 実流速(m/s)である。

今回の解析では、岩石マトリクスの拡散係数を室内試験で求めた実効拡散係数 D_e により設定した。また、亀裂内の流速は、次式で評価した。

$$v = \frac{Q}{ew} \quad \dots (8.5-8)$$

ここに、 Q : トレーサー注入流量(m³/s)、 e : 亀裂開口幅(m)、 w : 試料断面における亀裂長さ(m)である。

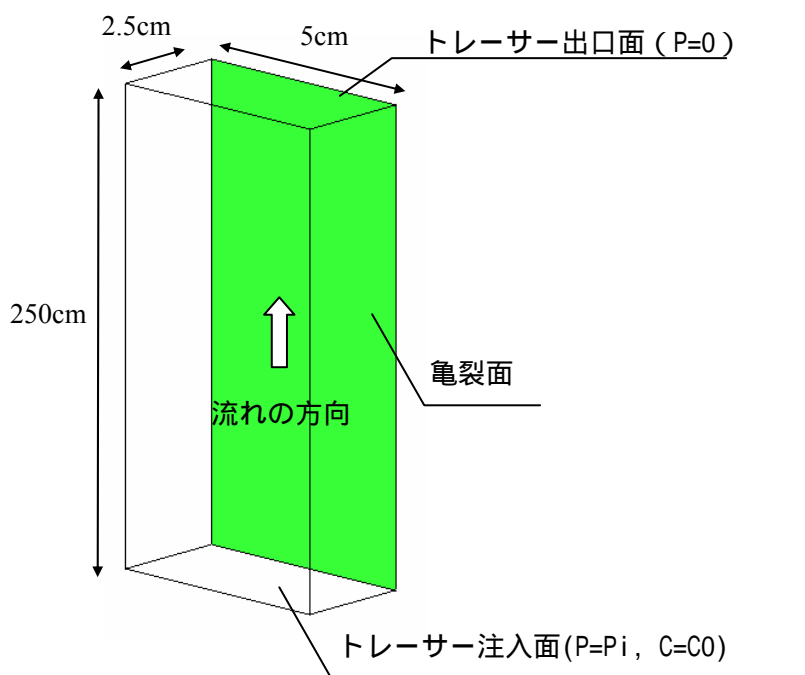
本解析では、まず、流れの方程式 (8.5-1) 式を完全飽和条件で解き、流速場を求める。その際、試料の透水係数 K 、流量 Q 、圧力水頭 ψ 、位置水頭 z は、実際の実験条件に基づき設定した。また、上記の物質移行の方程式(8.5-4)式 ~ (8.5-8)式において、流量 Q 、試料断面における亀裂長さ w 、マトリクス部の実効拡散係数 D_m を既知パラメータとして、物質移行開口幅 e および分散長 α をフィッティングにより求めた。表 8.5-1に、解析入力条件の一覧

を示す。

表 8.5-1 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 8-12）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、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 8-12 トレーサー試験の解析条件

8.5.3 解析結果

トレーサー試験の解析結果を図 8-13～図 8-18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 8.5-2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 8-22: 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 8.5-2)よりやや大きい(図 8-19)。

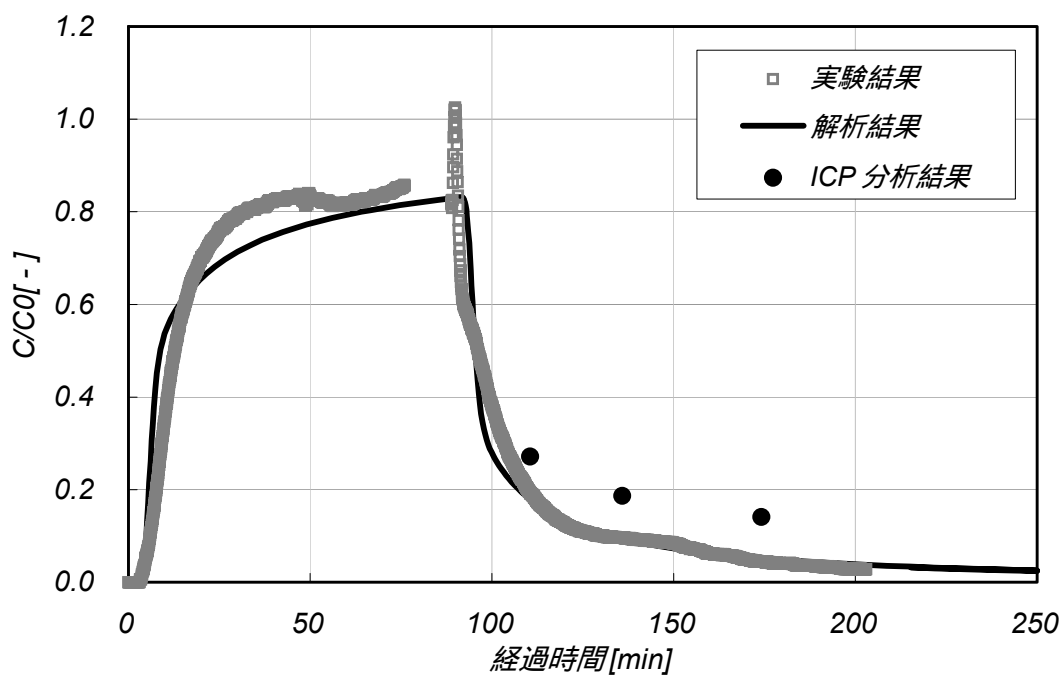
$$T = \frac{\rho g}{12\mu} e_h^3 \quad \dots (8.5-9)$$

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)。

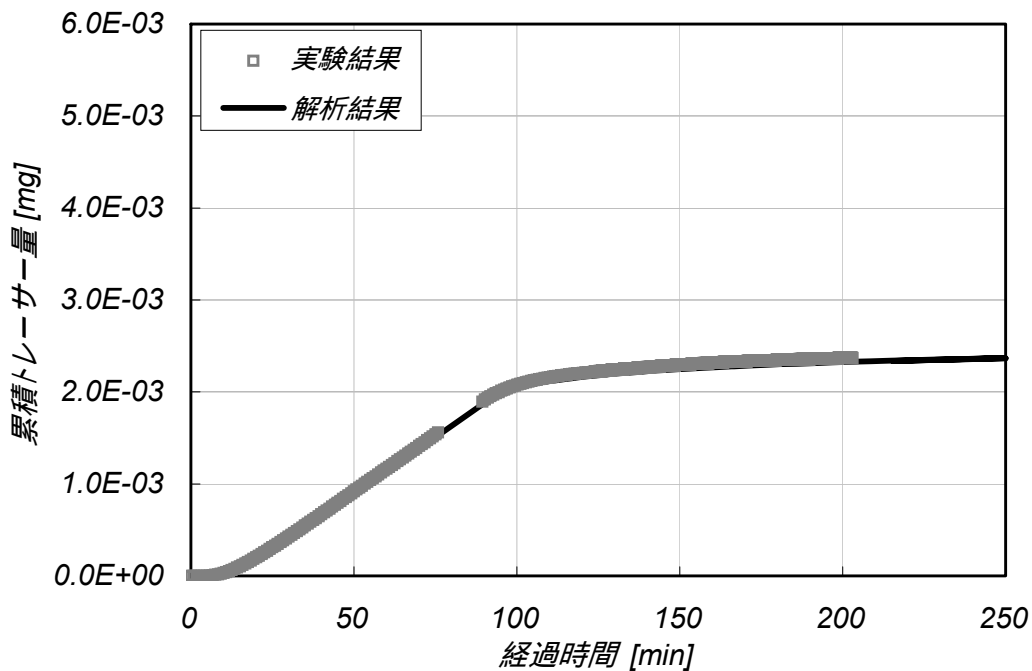
一般に、透水性に寄与する水理開口幅は、亀裂幅の狭いところの効果が卓越するのに対し、物質移行開口幅は、平均的な開口幅の影響を大きく受けるため、物質移行開口幅の方が水理開口幅よりも数倍以上大きくなることが報告されている。今回結果では物質移行開口幅/水理開口幅比は、最大で 1.7 程度であり、あまり大きな差がない。これは、亀裂が十分に密着しており、開口幅の面内不均一性が低かったためと推察される。

また、図 8-20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 8-21)。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。

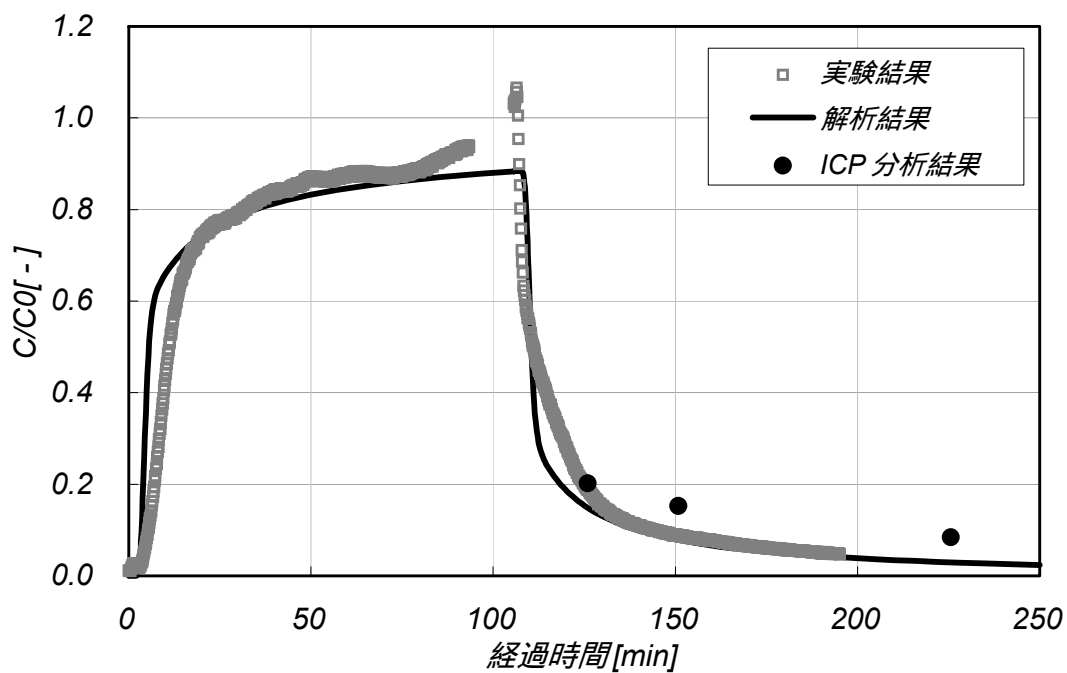


(a) トレーサー濃度

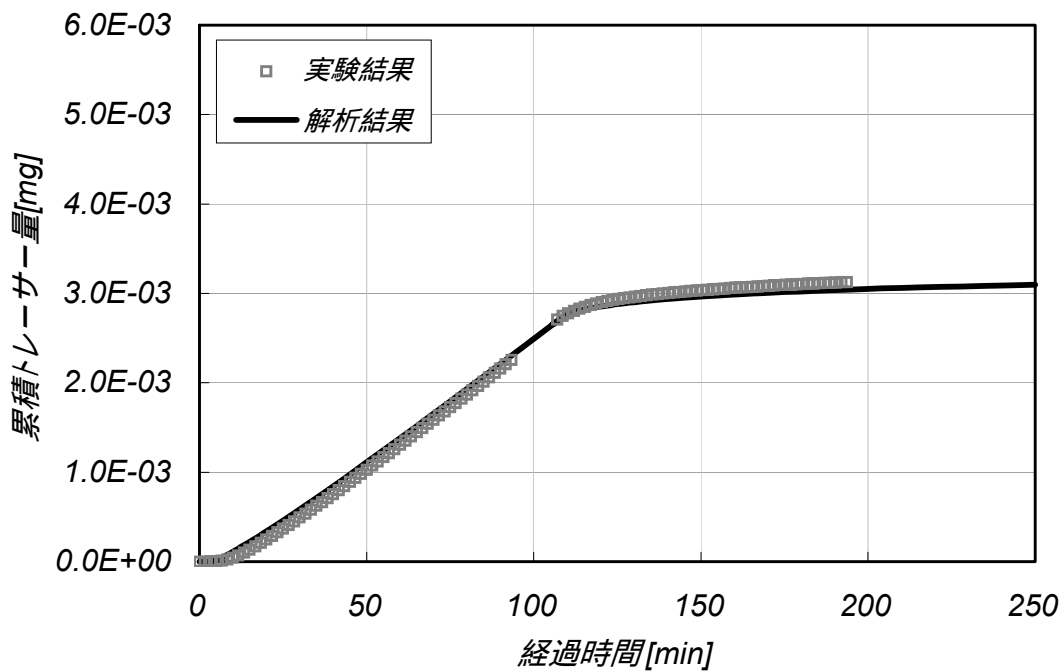


(b) 累積トレーサー量

図 8-13 トレーサー試験の解析結果 (試料名: 2-1f、封圧: 2.4MPa)

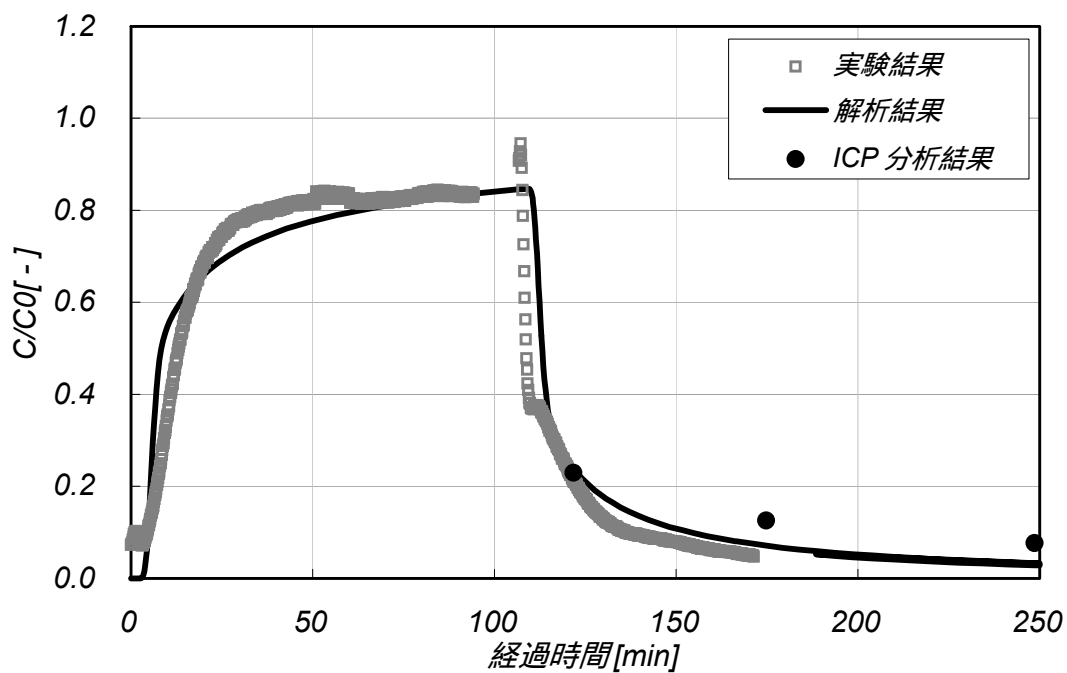


(a) トレーサー濃度

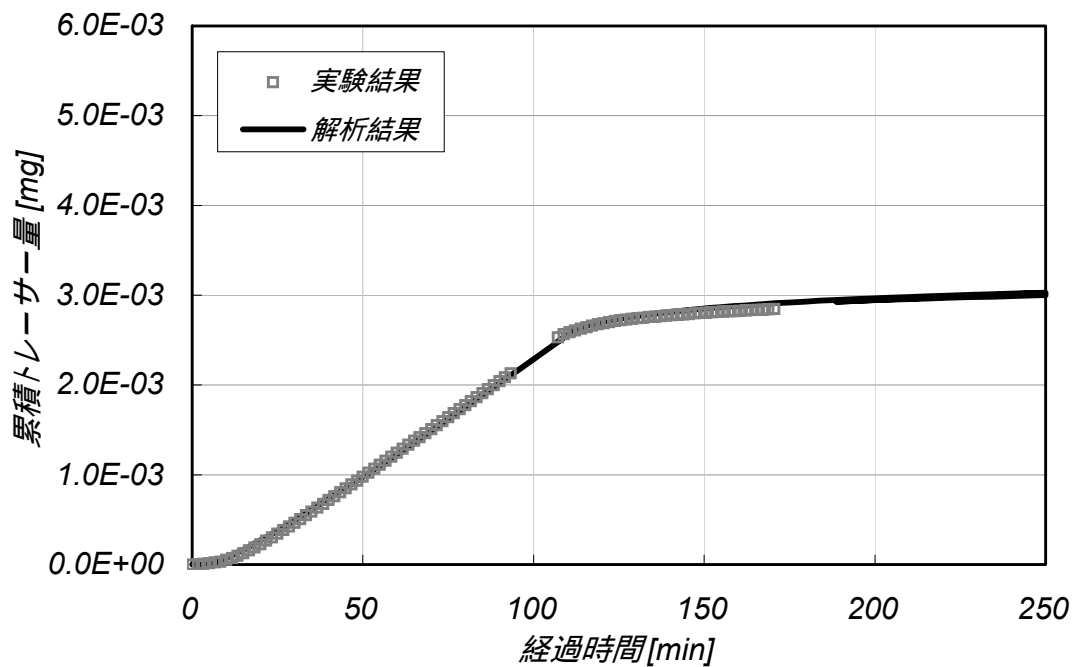


(b) 累積トレーサー量

図 8-14 トレーサー試験の解析結果 (試料名: 3-2f、封圧: 0.8MPa)

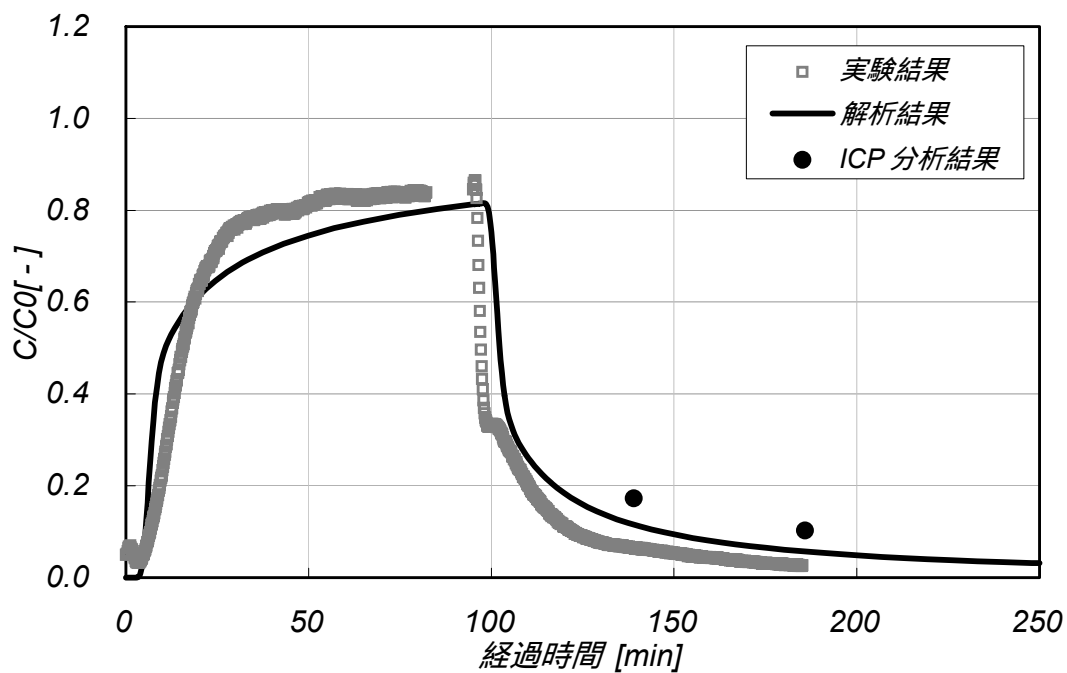


(a) トレーサー濃度

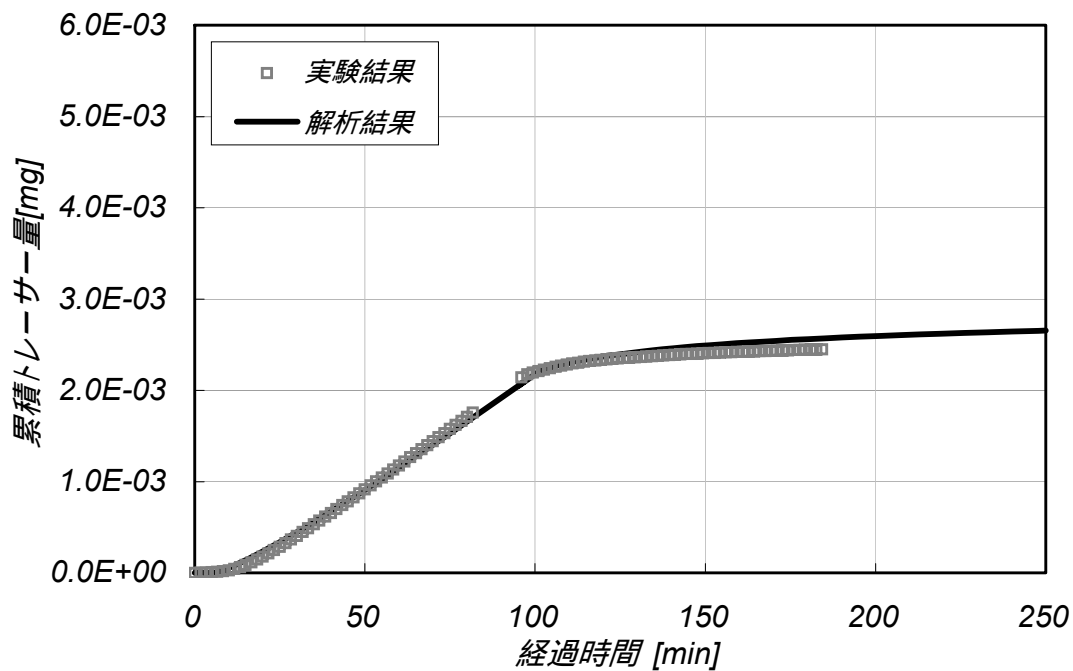


(b) 累積トレーサー量

図 8-15 トレーサー試験の解析結果 (試料名: 3-2f、封圧: 1.6MPa)

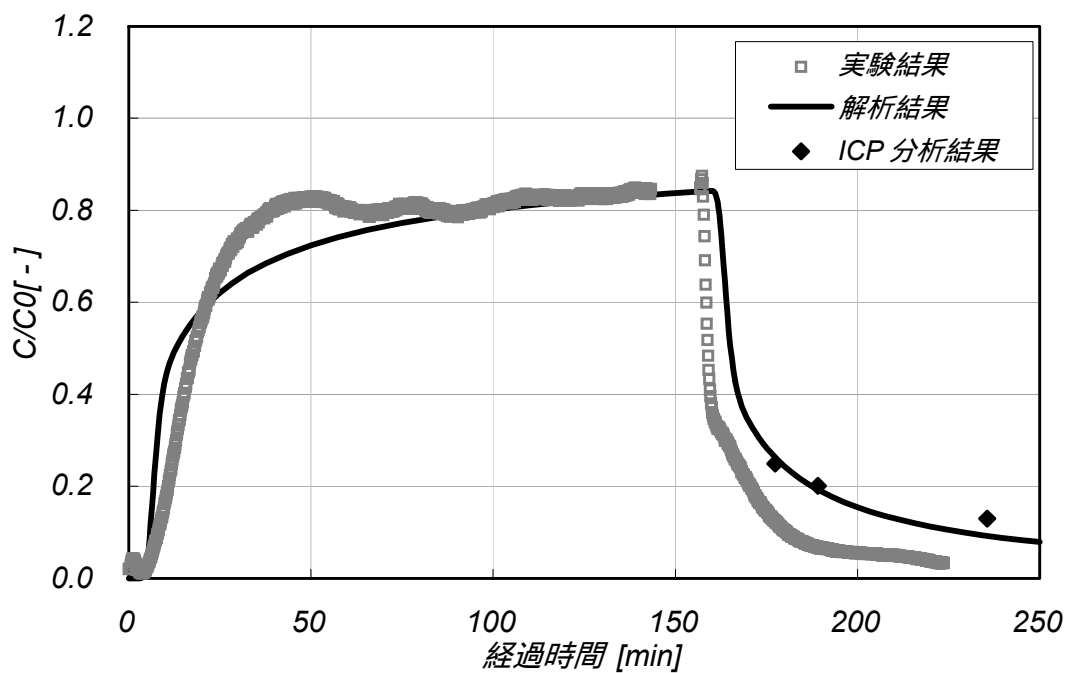


(a) トレーサー濃度

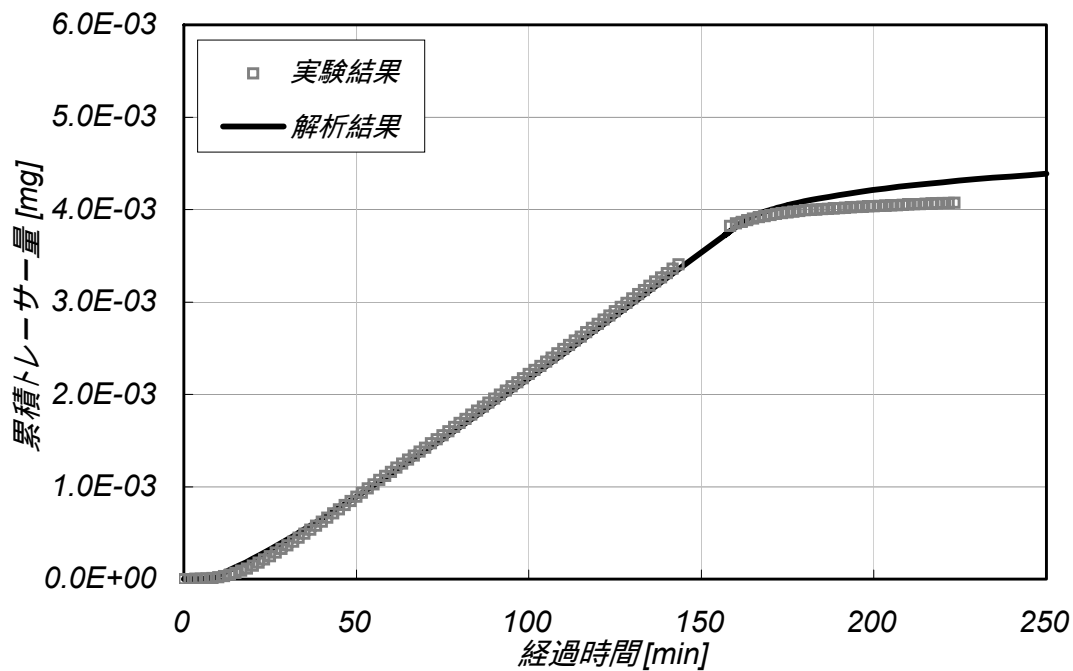


(b) 累積トレーサー量

図 8-16 トレーサー試験の解析結果 (試料名: 3-2f、封圧: 2.4MPa)

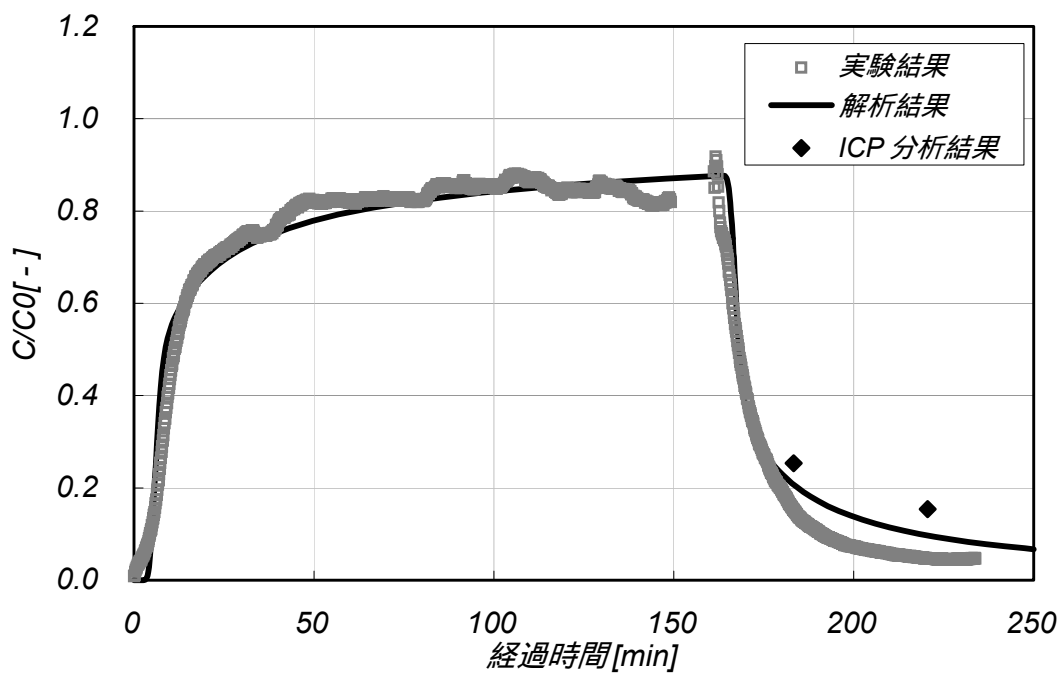


(a) トレーサー濃度

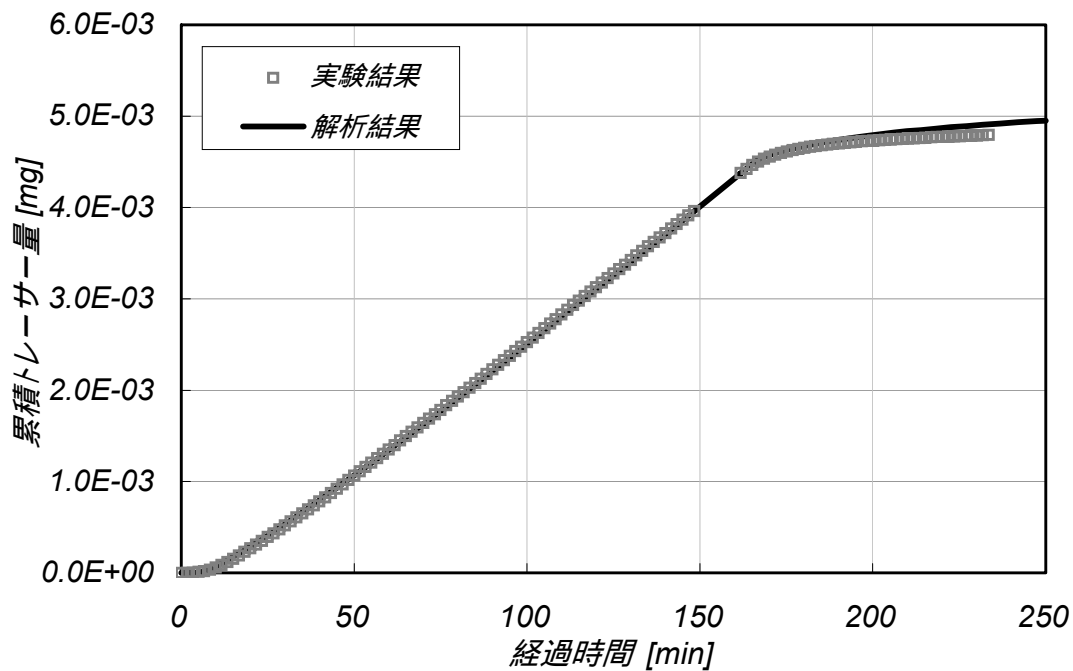


(b) 累積トレーサー量

図 8-17 トレーサー試験の解析結果 (試料名: 3-2f、封圧: 3.2MPa)



(a) トレーサー濃度



(b) 累積トレーサー量

図 8-18 トレーサー試験の解析結果 (試料名: 4-1f、封圧: 2.4MPa)

表 8.5-2 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

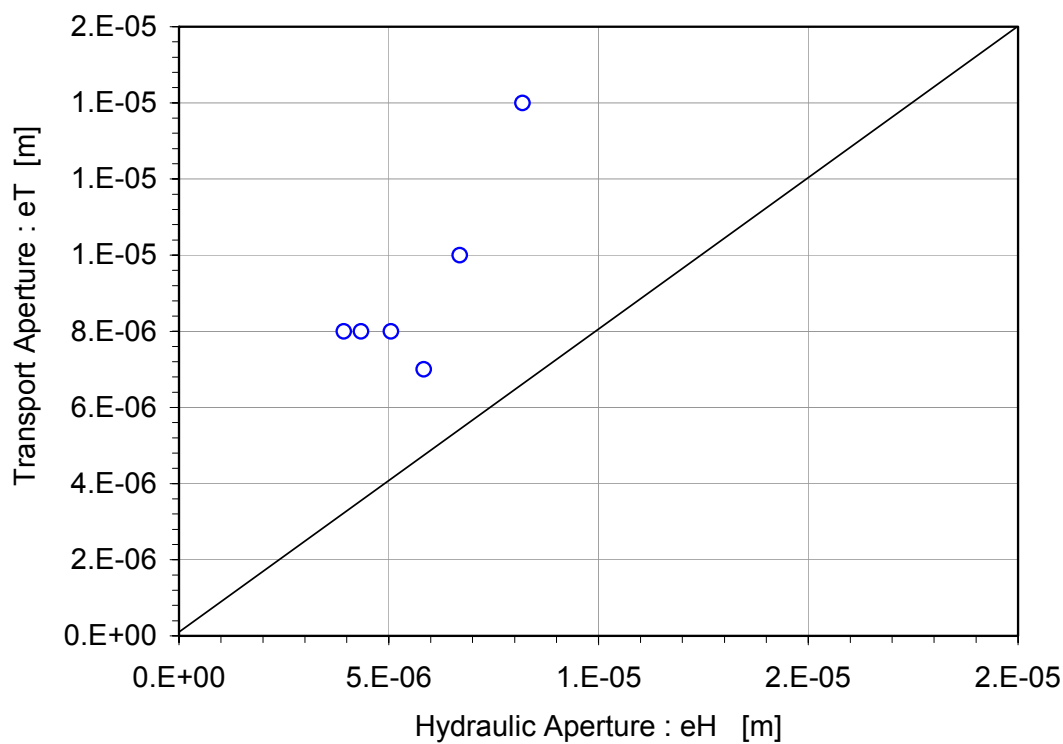


図 8-19 物質移行開口幅と水理開口幅の関係

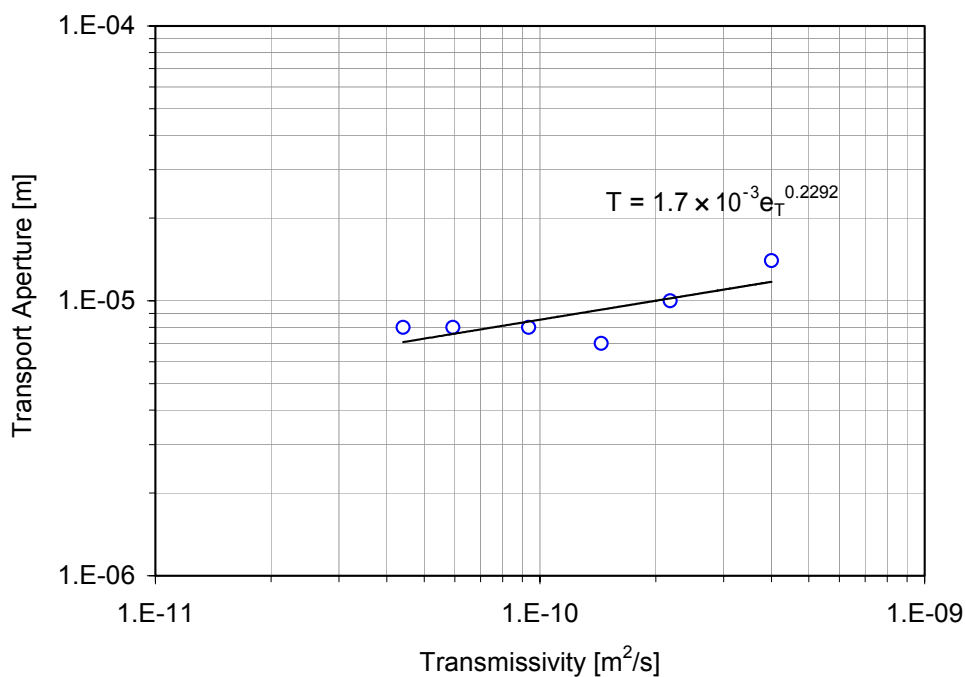


図 8-20 透水量係数と物質移行開口幅の関係

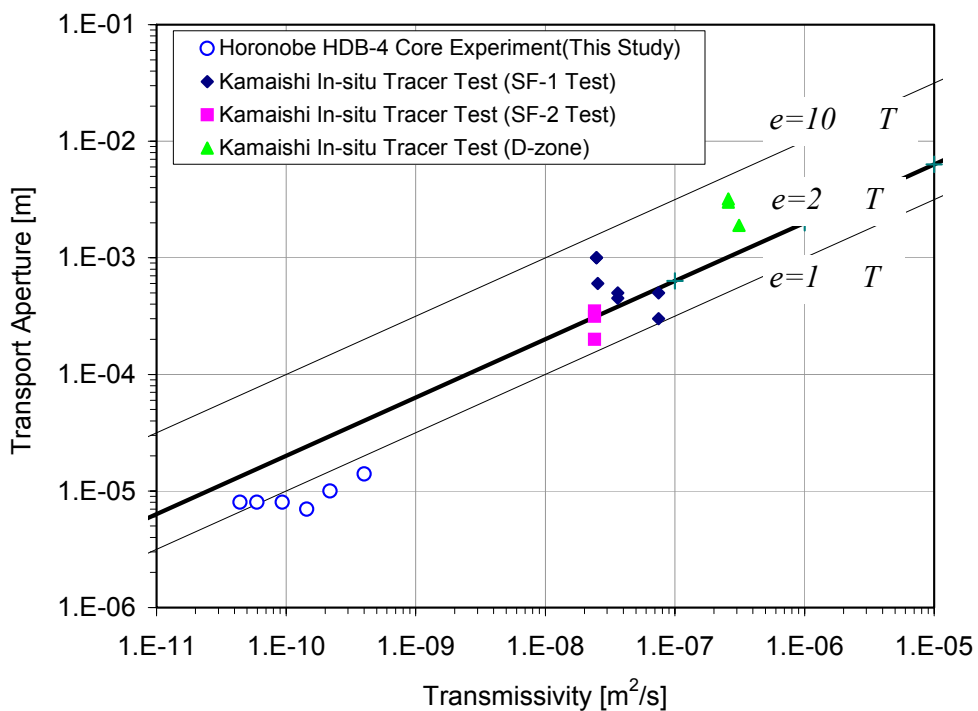


図 8-21 透水量係数と物質移行開口幅の関係 (釜石原試験データとの比較)

(shimo 他、1999)

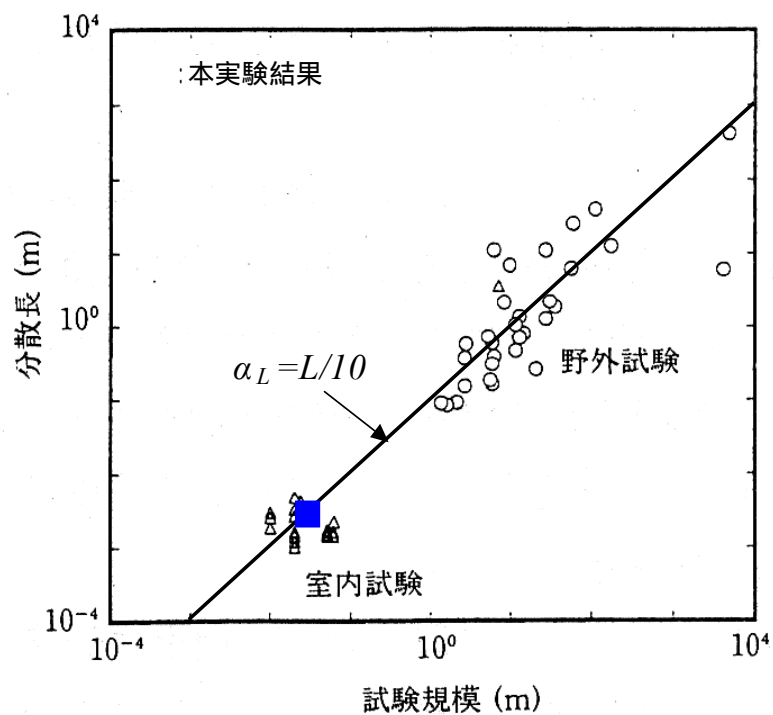


図 8-22 分散長と試験スケールの関係 (既往データとの比較)

(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 8-22: 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 8.5-2) 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（FRAC3DVS による。解析手法は 8 で述べた方法と同じ）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。

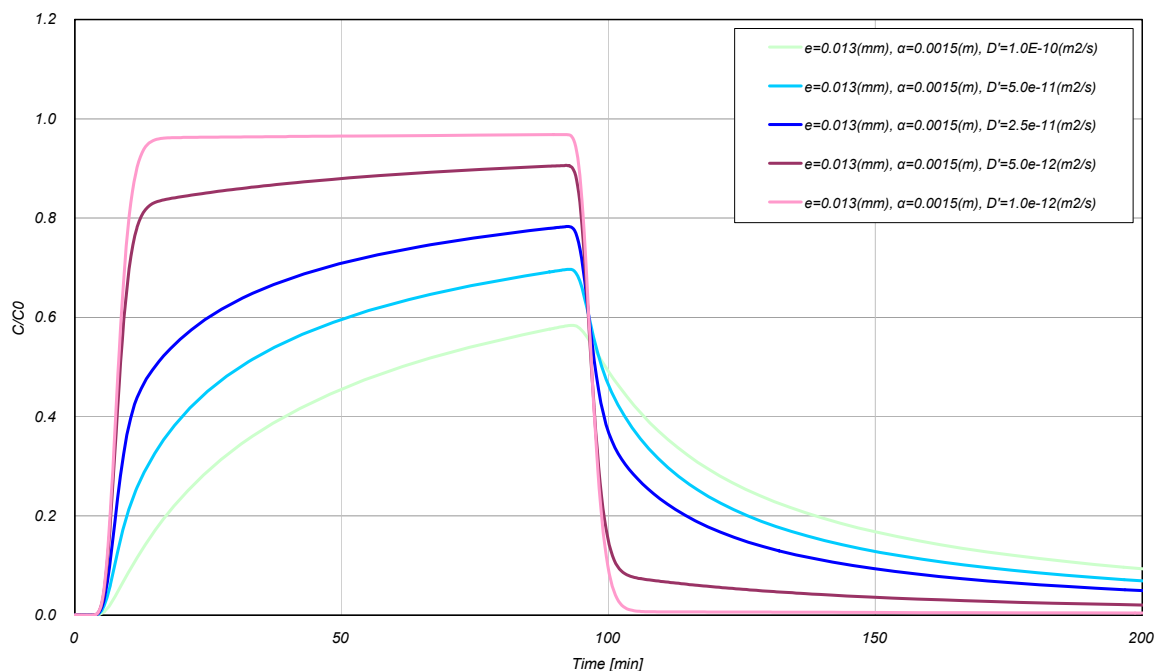


図 9-1 数値解析によるマトリクス拡散の遅延効果

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、勘米良亀齡：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).