



JAEA-Research

2007-016



JP0750180

亀裂を有する軟岩の水理・物質移行特性データの
取得・解析
(委託研究)

Study on Flow and Mass Transport through Fractured Soft Sedimentary Rocks
(Contract Research)

下茂 道人* 熊本 創* 前川 恵輔

Michito SHIMO*, Sou KUMAMOTO* and Keisuke MAEKAWA

地層処分研究開発部門
システム性能研究グループ

Performance Assessment Research Group
Geological Isolation Research and Development Directorate

March 2007

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA
Research

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp/index.shtml>)
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター*では実費による複写頒布を行つております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

* 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4 日本原子力研究開発機構内

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920

亀裂を有する軟岩の水理・物質移行特性データの取得・解析
(委託研究)

日本原子力研究開発機構
地層処分研究開発部門 地層処分基盤研究開発ユニット
下茂 道人*, 熊本 創*, 前川 恵輔

(2007年 1月 19日受理)

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水理・物質移行特性を適切に評価することが重要である。

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

本研究は、亀裂を有する軟岩中における水理・物質移行特性の解明、概念モデルの検討を目的とし、軟岩試料を対象とした室内試験および解析を行なったものである。

これまでの研究では、自然亀裂を有する軟岩コア試料およびコア試料よりも数倍の大きさを有するブロック型の平行平板試料を対象とした室内試験および解析を行ない、その結果、声問層、稚内層からサンプリングした試料においては、亀裂内の移流分散が支配的であり、かつマトリクス拡散による遅延効果が大きいことが明らかになった。

本研究では、北海道幌延町にある幌延深地層研究センターのボーリング孔（HDB-9孔、HDB-10孔、HDB-11孔）で採取された珪藻質泥岩コア試料を対象とした室内試験（透水試験、トレーサー試験、拡散試験）を実施し、深度、地層の種類や年代、続成作用等が与える影響について、これまでに取得したデータも含めて検討した。さらに、ブロック型の自然亀裂試料を用いた透水試験、トレーサー試験を実施し、試験規模の違いによる水理、物質移行パラメータの変化について検討した。また、実スケールの岩盤を想定した解析を実施し、亀裂を有する軟岩中の流れと物質移行現象の概念モデルに関する数値解析的検討を行い、岩盤のモデル化手法に関する考察を行った。

本報告書は、大成建設株式会社が、旧・核燃料サイクル開発機構（現・独立行政法人 日本原子力研究開発機構）との契約により平成16年度に実施した業務成果に関するものである。

核燃料サイクル工学研究所（駐在）：〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松4-33

* 大成建設株式会社 技術センター土木技術研究所

Study on Flow and Mass Transport through Fractured Soft Sedimentary Rocks
(Contract Research)

Michito SHIMO*, Sou KUMAMOTO* and Keisuke MAEKAWA
Geological Isolation Research Unit
Geological Isolation Research and Development Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 19, 2007)

It is important for safety assessment of HLW geological disposal to evaluate groundwater flow and mass transport in deep underground accurately.

Though it is considered that the mass transport in sedimentary rock occurs in pores between grains mainly, fractures of sedimentary rock can be main paths.

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

In previous study, a series of laboratory hydraulic and tracer tests and numerical analyses were carried out using sedimentary rock specimens obtained from Koetoi and Wakkai formation. Single natural fractured cores and rock block specimen were used for the tests and analyses. The results indicated that the matrix diffusion played an important role for mass transport in the fractured soft sedimentary rocks.

In this study, the following two tasks were carried out: (1) laboratory hydraulic and tracer experiments of rock cores of Koetoi and Wakkai formation obtained at HDB-9, HDB-10 and HDB-11 boreholes and a rock block specimen, Wakkai formation, obtained at an outcrop in the Horonobe area, (2) a numerical study on the conceptual model of flow and mass transport through fractured soft sedimentary rocks.

Non-sorbing tracer experiments using naturally fractured cores and rock block specimens were carried out. Potassium iodide was used as a tracer. The obtained breakthrough curves were interpreted and fitted by using a numerical simulator, and mass transport parameters, such as longitudinal dispersivity, matrix diffusion coefficient, transport aperture, were obtained.

Mass transport simulations using a fracture network model, a continuum model and a double porosity model were performed to study the applicability of continuum model and double porosity model for transport in fractured sedimentary rock.

Keywords: Geological Disposal, Mass Transport, Fractured Soft Sedimentary Rocks, Fracture Network Model, Continuum Model

This work was performed by Taisei Corporation under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute (Japan Atomic Energy Agency)

* Civil Engineering Research Institute, Technology Center, Taisei Corporation

目 次

1.はじめに.....	1
2.研究概要.....	1
2.1 研究の目的.....	1
2.2 研究の内容.....	1
3.コア試料を対象とした透水試験／トレーサー試験.....	2
3.1 コア試料の採取、整形.....	2
3.2 コア試料の分析.....	3
3.3 コア試料を対象とした透水試験.....	7
3.4 コア試料を対象としたトレーサー試験.....	10
4.ブロック試料を対象とした透水試験／トレーサー試験.....	21
4.1 ブロック試料の採取、整形.....	21
4.2 ブロック試料の基本物性試験および分析.....	22
4.3 ブロック試料を対象とした透水試験.....	23
4.4 ブロック試料を対象としたトレーサー試験.....	24
5.亀裂を有する軟岩中の流れと移行現象の概念モデルに関する数値解析的検討.....	27
5.1 モデル化手法に関する数値解析的検討.....	27
5.2 概念モデル化の検討.....	32
6.おわりに.....	34
参考文献	35

Contents

1. Preface	1
2. Introduction	1
2.1 Objectives	1
2.2 Outlines of the report	1
3. Laboratory hydraulic and tracer experiments of rock core specimens	2
3.1 Specimen	2
3.2 Physical and chemical property	3
3.3 Permeability test	7
3.4 Tracer experiment	10
4. Laboratory hydraulic and tracer experiments of block sized rock specimen	21
4.1 Specimen	21
4.2 Physical and chemical property	22
4.3 Permeability test	23
4.4 Tracer experiment	24
5. Modeling for groundwater flow and mass transport in fractured soft sedimentary rock	27
5.1 Numerical consideration of the modeling methodology	27
5.2 Conceptual model description	32
6. Conclusion	34
References	35

図 目 次

Fig. 2.2-1 研究のフロー	37
Fig. 3.2-1 X線分析結果 (HDB-9孔:稚内層150m付近)	68
Fig. 3.2-2 水銀圧入法による細孔径分布測定結果 (稚内層150m付近)	69
Fig. 3.2-3 水銀圧入法による細孔径分布測定結果 (稚内層200m付近)	69
Fig. 3.2-4 水銀圧入法による細孔径分布測定結果 (稚内層250m付近)	70
Fig. 3.2-5 水銀圧入法による細孔径分布測定結果 (勇知層, 声問層との比較)	70
Fig. 3.3-1 トランジエントパルス透水試験装置概要	71
Fig. 3.3-2 トランジエントパルス法測定原理	72
Fig. 3.3-3 トランジエントパルス透水試験手順	72
Fig. 3.3-4 岩盤内応力と深度の関係 (HDB-1号孔)	73
Fig. 3.3-5 Hsieh法による解析手順の概念図	74
Fig. 3.3-6 トランジエントパルス透水試験結果 (試料名: 9-1i-h)	76
Fig. 3.3-7 トランジエントパルス透水試験結果 (試料名: 9-1i-v)	77
Fig. 3.3-8 トランジエントパルス透水試験結果 (試料名: 10-1i-h)	78
Fig. 3.3-9 トランジエントパルス透水試験結果 (試料名: 10-1i-v1)	79
Fig. 3.3-10 透水係数と採取深度の関係	80
Fig. 3.3-11 透水係数と有効空隙率の関係	80
Fig. 3.3-12 透水係数と ϕ_{10}^2 との関係	81
Fig. 3.4-1 拡散実験装置概要	82
Fig. 3.4-2 拡散実験装置および供試体の概観	82
Fig. 3.4-3 拡散試験結果 (試料名: 9-2i1)	84
Fig. 3.4-4 拡散試験結果 (試料名: 9-1i-h)	84
Fig. 3.4-5 拡散試験結果 (試料名: 9-1i-v)	85
Fig. 3.4-6 拡散試験結果 (試料名: 10-1i-h)	85
Fig. 3.4-7 拡散試験結果 (試料名: 10-1i-v1)	86

Fig. 3.4-8 拡散試験結果（試料名：11-2i-h3）	86
Fig. 3.4-9 拡散試験結果（試料名：11-4i-h1）	87
Fig. 3.4-10 実効拡散係数と有効空隙率の比較（既往データとの比較）	87
Fig. 3.4-11 トレーサー試験装置概要	88
Fig. 3.4-12 トレーサー注入出部のフラッシング構造概念図	89
Fig. 3.4-13 トレーサー注入出部のフラッシング構造	89
Fig. 3.4-14 トレーサー試験フロー	90
Fig. 3.4-15 トレーサー試験結果（試料名：10-1f1, 封圧：0.8MPa）	93
Fig. 3.4-16 トレーサー試験結果（試料名：11-2f1, 封圧：2.4MPa）	94
Fig. 3.4-17 トレーサー試験結果（試料名：11-4f1, 封圧：3.6MPa）	95
Fig. 3.4-18 トレーサー試験結果（試料名：9-2f3, 封圧：1.2MPa）	96
Fig. 3.4-19 トレーサー試験の解析条件	97
Fig. 3.4-20 トレーサー試験の解析結果（試料名：10-1f1, 封圧：0.8Mpa）	98
Fig. 3.4-21 トレーサー試験の解析結果（試料名：11-2f1, 封圧：2.4Mpa）	99
Fig. 3.4-22 トレーサー試験の解析結果（試料名：11-4f1, 封圧：3.6Mpa）	100
Fig. 3.4-23 トレーサー試験の解析結果（試料名：9-2f3, 封圧：1.2Mpa）	101
Fig. 3.4-24 分散長と試験スケールの関係（既往データとの比較）	103
Fig. 3.4-25 物質移行開口幅と水理開口幅の関係	103
Fig. 3.4-26 透水量係数と物質移行開口幅の関係（釜石原位置試験データとの比較）	104
Fig. 3.4-27 開口幅と5分間の亀裂内の浸潤距離の関係	104
Fig. 3.4-28 測定試料	104
Fig. 3.4-29 X線CT測定に用いたトレーサー試験装置の概念図	105
Fig. 3.4-30 データ整理方法の概要	107
Fig. 3.4-31 X線CT差画像（t=24h）	108
Fig. 3.4-32 A-A断面のCT値分布（t=24h）	108
Fig. 3.4-33 試料内部のCT値分布（補間データ）	109
Fig. 4.2-1 X線分析結果（ブロック試料：B-3）	115

Fig. 4.2-2 水銀圧入法による細孔径分布測定結果（ブロック試料：B-3）	116
Fig. 4.2-3 水銀圧入法による細孔径分布測定結果(コア試料とブロック試料の比較)	116
Fig. 4.3-1 トランジエントパルス透水試験結果（ブロック試料 B-3）	117
Fig. 4.3-2 定水頭透水試験装置概要	118
Fig. 4.4-1 拡散試験結果（ブロック試料：B-3）	119
Fig. 4.4-2 実効拡散係数と有効空隙率の比較（既往データとの比較）	119
Fig. 4.4-3 ブロック試料用セル型トレーサー試験装置概要	120
Fig. 4.4-4 供試体作製の模式図	120
Fig. 4.4-5 トレーサー試験結果（ブロック試料：B-3）	121
Fig. 4.4-6 トレーサー試験の解析条件（ブロック試料：B-3）	121
Fig. 4.4-7 透水量係数と物質移行開口幅の関係（釜石原位置試験データとの比較）	122
Fig. 4.4-8 分散長と試験スケールの関係（既往データとの比較）	122
Fig. 5.1-1 解析モデル概要（亀裂ネットワークモデル）	123
Fig. 5.1-2 解析モデル概要（多孔質媒体モデル）	124
Fig. 5.1-3 解析モデル概要（二重空隙モデル）	124
Fig. 5.1-4 亀裂ネットワークモデルにおける亀裂分布（亀裂密度：30%）	125
Fig. 5.1-5 亀裂ネットワークモデルにおける亀裂分布（亀裂密度：40%）	125
Fig. 5.1-6 亀裂ネットワークモデルにおける亀裂分布（亀裂密度：50%）	125
Fig. 5.1-7 亀裂ネットワークモデルにおける亀裂分布（亀裂密度：70%）	125
Fig. 5.1-8 亀裂ネットワークモデルにおける破過曲線（亀裂開口幅 0.01mm）	127
Fig. 5.1-9 亀裂ネットワークモデルにおける破過曲線（亀裂開口幅 0.05mm）	127
Fig. 5.1-10 亀裂ネットワークモデルにおける破過曲線（亀裂開口幅 0.1mm）	128
Fig. 5.1-11 多孔質媒体モデルによるフィッティング結果 (亀裂開口幅：0.01mm, 亀裂密度：30%)	129
Fig. 5.1-12 多孔質媒体モデルによるフィッティング結果 (亀裂開口幅：0.01mm, 亀裂密度：40%)	129

Fig. 5.1-13 多孔質媒体モデルによるフィッティング結果 (亀裂開口幅 : 0.01mm, 亀裂密度 : 50%)	130
Fig. 5.1-14 多孔質媒体モデルによるフィッティング結果 (亀裂開口幅 : 0.01mm, 亀裂密度 : 70%)	130
Fig. 5.1-15 多孔質媒体モデルによるフィッティング結果 (亀裂開口幅 : 0.05mm, 亀裂密度 : 30%)	131
Fig. 5.1-16 多孔質媒体モデルによるフィッティング結果 (亀裂開口幅 : 0.05mm, 亀裂密度 : 40%)	131
Fig. 5.1-17 多孔質媒体モデルによるフィッティング結果 (亀裂開口幅 : 0.05mm, 亀裂密度 : 50%)	132
Fig. 5.1-18 多孔質媒体モデルによるフィッティング結果 (亀裂開口幅 : 0.05mm, 亀裂密度 : 70%)	132
Fig. 5.1-19 多孔質媒体モデルによるフィッティング結果 (亀裂開口幅 : 0.1mm, 亀裂密度 : 30%)	133
Fig. 5.1-20 多孔質媒体モデルによるフィッティング結果 (亀裂開口幅 : 0.1mm, 亀裂密度 : 40%)	133
Fig. 5.1-21 多孔質媒体モデルによるフィッティング結果 (亀裂開口幅 : 0.1mm, 亀裂密度 : 50%)	134
Fig. 5.1-22 多孔質媒体モデルによるフィッティング結果 (亀裂開口幅 : 0.1mm, 亀裂密度 : 70%)	134
Fig. 5.1-23 二重空隙モデルによるフィッティング結果 (亀裂開口幅 : 0.01mm, 亀裂密度 : 30%)	135
Fig. 5.1-24 二重空隙モデルによるフィッティング結果 (亀裂開口幅 : 0.01mm, 亀裂密度 : 40%)	136
Fig. 5.1-25 二重空隙モデルによるフィッティング結果 (亀裂開口幅 : 0.01mm, 亀裂密度 : 50%)	136

- Fig. 5.1-26 二重空隙モデルによるフィッティング結果
(亀裂開口幅 : 0.01mm, 亀裂密度 : 70%) 137
- Fig. 5.1-27 二重空隙モデルによるフィッティング結果
(亀裂開口幅 : 0.05mm, 亀裂密度 : 30%) 137
- Fig. 5.1-28 二重空隙モデルによるフィッティング結果
(亀裂開口幅 : 0.05mm, 亀裂密度 : 40%) 138
- Fig. 5.1-29 二重空隙モデルによるフィッティング結果
(亀裂開口幅 : 0.05mm, 亀裂密度 : 50%) 138
- Fig. 5.1-30 二重空隙モデルによるフィッティング結果
(亀裂開口幅 : 0.05mm, 亀裂密度 : 70%) 139
- Fig. 5.1-31 二重空隙モデルによるフィッティング結果
(亀裂開口幅 : 0.1mm, 亀裂密度 : 30%) 139
- Fig. 5.1-32 二重空隙モデルによるフィッティング結果
(亀裂開口幅 : 0.1mm, 亀裂密度 : 40%) 140
- Fig. 5.1-33 二重空隙モデルによるフィッティング結果
(亀裂開口幅 : 0.1mm, 亀裂密度 : 50%) 140
- Fig. 5.1-34 二重空隙モデルによるフィッティング結果
(亀裂開口幅 : 0.1mm, 亀裂密度 : 70%) 141
- Fig. 5.1-35 二重空隙モデルにおけるマトリクス部の拡散係数と亀裂密度の関係 141

表 目 次

Table 3.1-1 HDB-9 孔 採取試料一覧	38
Table 3.1-2 HDB-10 孔 採取試料一覧	38
Table 3.1-3 HDB-11 孔 採取試料一覧	38
Table 3.1-4 試料整形結果一覧 (HDB-9 孔)	38
Table 3.1-5 試料整形結果一覧 (HDB-10 孔)	39
Table 3.1-6 試料整形結果一覧 (HDB-11 孔)	39
Table 3.1-7 試験試料一覧 (亀裂, インタクト, 異方性試料組合せ)	40
Table 3.2-1 試料分析項目一覧	40
Table 3.2-2 コア試料一軸圧縮試験結果一覧	40
Table 3.2-3 X 線分析結果一覧 (稚内層試料 : 150m 付近)	41
Table 3.2-4 水銀圧入試験結果一覧	41
Table 3.3-1 トランジエントパルス透水試験ケース	73
Table 3.3-2 トランジエントパルス透水試験法で用いた既知パラメータ一覧	75
Table 3.3-3 トランジエントパルス透水試験結果一覧 (今回実施した試料)	75
Table 3.3-4 トランジエントパルス透水試験結果一覧 (これまでに実施した試料)	75
Table 3.4-1 拡散試験ケース	83
Table 3.4-2 試験条件一覧	83
Table 3.4-3 拡散試験結果一覧 (今回実施した試料)	83
Table 3.4-4 拡散試験結果一覧 (これまでに実施した試料)	83
Table 3.4-5 試験装置および計測機器一覧	91
Table 3.4-6 トレーサー試験ケース	92
Table 3.4-7 トレーサー試験条件一覧	92
Table 3.4-8 解析入力条件一覧	97
Table 3.4-9 トレーサー試験解析結果一覧 (今回実施した試料)	102
Table 3.4-10 トレーサー試験解析結果一覧 (これまでに実施した試料)	102

Table 3.4-11 X線CT測定に用いたトレーサー試験条件	106
Table 4.1-1 ブロック試料採取一覧	110
Table 4.2-1 ブロック試料分析項目一覧	114
Table 4.2-2 ブロック試料基本物性試験結果一覧	114
Table 4.2-3 ブロック試料一軸圧縮試験結果一覧	114
Table 4.2-4 X線分析結果一覧（ブロック試料：B-3）	114
Table 4.2-5 水銀圧入試験結果（ブロック試料：B-2）	116
Table 4.3-1 トランジエントパルス透水試験結果一覧（ブロック試料：B-3）	117
Table 4.3-2 定水頭透水試験結果一覧（ブロック試料：B-3）	118
Table 4.4-1 拡散試験結果一覧（ブロック試料：B-3）	119
Table 4.4-2 ブロック試料トレーサー試験条件（ブロック試料：B-3）	121
Table 4.4-3 ブロック試料トレーサー試験解析入力条件一覧	121
Table 5.1-1 多孔質媒体モデルによる破過曲線のフィッティング結果一覧	126
Table 5.1-2 二重空隙モデルによる破過曲線のフィッティング結果一覧	135

写 真 目 次

Photo 3.1-1	亀裂試料再コアリング方向	42
Photo 3.1-2	インタクト異方性試料再コアリング方向	42
Photo 3.1-3	整形後の試験用試料（試料 9-1：HDB-9 孔 250m 付近）	43
Photo 3.1-4	整形後の試験用試料（試料 9-1：HDB-9 孔 250m 付近 続き）	44
Photo 3.1-5	整形後の試験用試料（試料 9-2：HDB-9 孔 150m 付近）	45
Photo 3.1-6	整形後の試験用試料（試料 9-2：HDB-9 孔 150m 付近 続き）	46
Photo 3.1-7	整形後の試験用試料（試料 10-1：HDB-10 孔 100m 付近）	47
Photo 3.1-8	整形後の試験用試料（試料 10-1：HDB-10 孔 100m 付近 続き）	48
Photo 3.1-9	整形後の試験用試料（試料 10-1：HDB-10 孔 100m 付近 続き）	49
Photo 3.1-10	整形後の試験用試料（試料 10-1：HDB-10 孔 100m 付近 続き）	50
Photo 3.1-11	整形後の試験用試料（試料 10-2：HDB-10 孔 150m 付近）	51
Photo 3.1-12	整形後の試験用試料（試料 10-2：HDB-10 孔 150m 付近 続き）	52
Photo 3.1-13	整形後の試験用試料（試料 10-2：HDB-10 孔 150m 付近 続き）	53
Photo 3.1-14	整形後の試験用試料（試料 10-2：HDB-10 孔 150m 付近 続き）	54
Photo 3.1-15	整形後の試験用試料（試料 11-1：HDB-11 孔 100m 付近）	55
Photo 3.1-16	整形後の試験用試料（試料 11-1：HDB-11 孔 100m 付近 続き）	56
Photo 3.1-17	整形後の試験用試料（試料 11-1：HDB-11 孔 100m 付近 続き）	57
Photo 3.1-18	整形後の試験用試料（試料 11-1：HDB-11 孔 100m 付近 続き）	58
Photo 3.1-19	整形後の試験用試料（試料 11-2：HDB-11 孔 300m 付近）	59
Photo 3.1-20	整形後の試験用試料（試料 11-2：HDB-11 孔 300m 付近 続き）	60
Photo 3.1-21	整形後の試験用試料（試料 11-2：HDB-11 孔 300m 付近 続き）	61
Photo 3.1-22	整形後の試験用試料（試料 11-2：HDB-11 孔 300m 付近 続き）	62
Photo 3.1-23	整形後の試験用試料（試料 11-2：HDB-11 孔 300m 付近 続き）	63
Photo 3.1-24	整形後の試験用試料（試料 11-3：HDB-11 孔 400m 付近）	64
Photo 3.1-25	整形後の試験用試料（試料 11-3：HDB-11 孔 400m 付近 続き）	65

Photo 3.1-26 整形後の試験用試料（試料 11-4 : HDB-11 孔 450m 付近）	66
Photo 3.1-27 整形後の試験用試料（試料 11-4 : HDB-11 孔 450m 付近 続き）	67
Photo 3.3-1 トランジエントパルス透水試験装置概観	71
Photo 3.4-1 トレーサー試験装置全景	88
Photo 3.4-2 X線 CT 測定に用いたトレーサー試験装置の概要	105
Photo 3.4-3 X線 CT 測定に用いたトレーサー試験装置の概要	106
Photo 4.1-1 採取試料全景（試料名：B-1）	110
Photo 4.1-2 採取試料全景（試料名：B-2）	111
Photo 4.1-3 採取試料全景（試料名：B-3）	112
Photo 4.1-4 ブロック試料整形結果（稚内層：自然亀裂試料）	113

This is a blank page.

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水理・物質移行特性を適切に評価することが重要である。

日本原子力研究開発機構およびその前身のひとつ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。これまでの研究では、自然亀裂を有する軟岩コア試料およびコア試料よりも数倍の大きさを有するブロック型の平行平板試料を対象とした室内試験および解析を行ない、その結果、声問層、稚内層からサンプリングした試料においては、亀裂内の移流分散が支配的であり、かつマトリクス拡散による遅延効果が大きいことが明らかになってきている^{1), 2)}。

こうした岩石の特性に関する知見を拡充することを通じて、亀裂を有する軟岩中の水理・物質移行現象の解明、概念モデルの検討に資することは、安全評価手法の開発において重要である。

2. 研究概要

2.1 研究の目的

本研究は、亀裂を有する軟岩中における水理・物質移行現象の解明、概念モデルの検討を目的とし、軟岩試料を対象とした室内試験（透水試験、トレーサー試験）および解析を実施する。

2.2 研究の内容

本研究の実施項目は以下のとおりである。Fig. 2.2-1 に研究のフローを示す。

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

(1) コア試料を対象とした透水試験／トレーサー試験

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

試験は、原位置地下を模擬した条件下での透水試験および非吸着性のトレーサー試験を実施する。試験方法は、インタクト試料については、透水試験をトランジエントパルス法にて行い、トレーサー試験は、移流を考慮しない拡散試験を行う。試験から得られるデータを解析し、透水係数および拡散係数を求める。また、亀裂試料については、移流を考慮した非吸着性トレーサー試験を行う。それぞれ、透水係数と物質移行開口幅、分散長を求める。

(2) ブロック試料を対象とした透水試験／トレーサー試験

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

試験は、セル型試験装置を用い、定水頭透水試験および非吸着性トレーサー試験を行う。また、採取した試料より別途インタクトコア試料を整形し、トランジエントパルス法による透水試験ならびに拡散試験を行い、岩石インタクト部の透水係数、拡散係数を求める。

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

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

- ① 室内試験結果と数値解析結果の比較に基づくモデル化手法の適用性検討
- ② 岩盤のモデル化手法及び数値解析手法に関する考察

3. コア試料を対象とした透水試験／トレーサー試験

3.1 コア試料の採取、整形

北海道幌延町にある幌延深地層研究センターが平成16年度に掘削したボーリング孔(HDB-9孔、HDB-10孔、HDB-11孔)において、透水/トレーサー試験用の試料を採取した。採取地点および採取方法を以下に記す。

3.1.1 コア試料の採取

採取位置として、幌延深地層研究センターのボーリング孔(HDB-9孔、HDB-10孔、HDB-11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～1000mと深く、深部岩盤内の試料を採取可能のこと。
- ・ 新鮮なコアを採取可能のこと。
- ・ 過去のボーリング調査の結果から、深度方向における続成作用の程度の違い(シリカ鉱物の続成変化)が確認されており、続成作用による違いを比較検討できること。

コア試料の採取は、これまでに試験、測定等を実施していない地層、深度を前提条件とし、インタクト部が均質で、変質ができるだけ少なく、密着した亀裂※を有するものを対象とする方針で行った。採取は、その時点で掘削を終えた深度までの全てのコアを並べて行った。なお、当該箇

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

所の軟岩は、珪藻等の微化石を含み、粘土分が非常に少ない珪藻質泥岩あるいは硬質頁岩であるため、乾燥すると崩れやすい。そのため、コアの輸送および保管に際しては、乾燥や衝撃によるコア試料の破損を防ぐため、パラフィンコーティングを行った。

上記採取方針に従って採取を行った結果、HDB-9 孔では、稚内層のコア試料を 150m 付近、250m 付近の 2 深度、HDB-10 孔では、声問層のコア試料を 100m 付近、150m 付近の 2 深度、HDB-11 孔では、100m 付近、300m 付近、400m 付近、450m 付近の 4 深度を採取することができた。Table 3.1-1～3 に採取試料の一覧を示す。

3.1.2 コア試料の整形

透水・トレーサー試験用に必要となる試料寸法は、直径 50mm × 高さ 50mm である。試料は、HDB-9 孔、HDB-10 孔、HDB-11 孔のコア（直径 86mm）から、直径 50mm にて再コアリングし、直径 50mm × 高さ 50mm の寸法に整形した。再コアリングは、亀裂試料に関しては亀裂面と平行になるようにコア軸と直交方向に行い（Photo 3.1-1）、インタクト試料に関しては、コア軸と直交方向に行つた。また、インタクトの試料に関しては、目視にて試料の堆積構造が明確に確認できるものについては、異方性検討用に方向を変えた 2 試料（堆積構造に対して水平方向と垂直方向）を再コアリングした（Photo 3.1-2）。

Table 3.1-4～6 に試料整形結果の一覧を示す。また、Photo 3.1-3～27 には、整形後の試験用試料の寸法、重量ならびに外観を示す。

整形の結果、外観写真からも分かるように、複数の亀裂が存在する試料や側面が大きく欠損している試料など、試験に使用不可能な状態のものが多く見られた。これらは、再コアリング前の外観からは確認できなかったコア内部の亀裂が整形後に現れたものと思われる。

採取した試料から、亀裂の状態や整形具合を考慮して、試験用試料を選定した。選定した試料の一覧を Table 3.1-7 に示した。

なお、Table 3.1-4～7 に示す試料名中にある文字「f」および「i」は、それぞれ亀裂試料、インタクト試料の区別を表し、「h」および「v」は、異方性試料の堆積構造に対する水平方向と垂直方向を表している。

3.2 コア試料の分析

3.2.1 分析項目

Table 3.2-1 に示すコア試料を対象とし、一軸圧縮試験、および以下の 2 点を目的とした試料分析を行った。

①珪藻質泥岩の続成作用の変化を調べること

②岩石の空隙分布を把握すること

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

3.2.2 一軸圧縮試験

一軸圧縮試験の結果一覧を Table 3.2-2 に示す。一軸圧縮試験は、試料の深度依存性を確認することを目的として、HDB-9 孔の 150m 付近、250m 付近の 2 深度について試験を実施し、特に深度 150m 付近については、試料の異方性を確認するために、試料（椎内層試料）で堆積構造に水平な方向と垂直な方向について試験を実施した。なお、一軸圧縮試験用の試料は、透水/トレーサー試験用試料の採取深度近傍から、別途、一軸圧縮試験用の試料として採取した。一軸圧縮強度の異方性に関しては、通常の異方性とは逆の傾向が見られるが、これは、強度のバラツキによるものと考えられる。また、深度依存性については、深度が深いほど一軸強度は大きくなる傾向が見られる。

3.2.3 X 線分析

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

(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 線を当てるとき、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、…の回折線と呼ぶ。波長 λ が一定の単色 X 線を照射して θ (2θ) 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) 不定位法

不定位法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。試料をめのう乳鉢を用い、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)粉碎する。粉末にした試料は、穴のあいた(20×14×1.5mm)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、さらに定位法で検討する必要がある。

(3) 定方位法

定位法は、水ひ法により特定範囲粒径の粘土を採取して定位のマウントを行った試料に対してエチレングリコール処理、ジアミン処理、塩酸処理、高温処理を行った試料と無処理の試料についてX線回折を行い、それぞれの結果を比較することで、含有される鉱物の種類とおおよその含有量を決定する方法である。

(4) 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はなく鉱物の種類(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、完全な不定位あるいは定位試料をつくることが難しいので、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) 分析結果 (Table 3.2-3)

X線解析チャートをFig. 3.2-1に示す。以下に各鉱物の同定結果を示す。

① スメクタイトの同定

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

度存在すると推定される。

② 緑泥石とカオリナイトの同定

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

④ シリカ鉱物の同定

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

今回の分析では、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。

3.2.4 空隙分布測定

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

(1) 測定方法

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

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

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

$$D = -\left(\frac{4}{P_m}\right)\gamma \cdot \cos\theta \quad (3.2-1)$$

$$S_p = -\frac{1}{\gamma \cdot \cos \theta} \int_{V_{\min}}^{V_{\max}} P_m dV \quad (3.2-2)$$

$$\rho_d = \frac{M_d}{V_c \left(\frac{M_{me}}{\rho_{me}} \right)} \quad (3.2-3)$$

$$n_p = 100 V_{sp} \cdot \rho_d \quad (3.2-4)$$

ここに, D: 細孔直径 (m), P_m : 水銀にかけた圧力 (kg/m²), γ : 水銀の試料表面での表面張力 (N/m), θ : 水銀の試料表面での接触角 (°), S_p : 細孔内比表面積 (m²/kg), V_{\max} : 水銀が最大孔径の空隙に注入された時のセル中の水銀体積 (m³), V_{\min} : 水銀が最小孔径の空隙に注入された時のセル中の水銀体積 (m³), ρ_d : 乾燥嵩密度 (kg/m³), M_d : 乾燥状態での試料重量 (kg), V_c : 密閉セルの体積 (m³), M_{me} : 水銀の重量 (kg), ρ_{me} : 水銀の密度 (kg/m³), n_p : 有効空隙率 (%), V_{sp} : 比空隙体積 (単位重量当たりの空隙体積) (m³/kg) である。

Fig. 3.2-2~4 に各試料の細孔半径と累積有効空隙率の関係を, Table 3.2-4 に水銀圧入試験結果の一覧を示す。図より, 今回の試料では, 細孔半径 0.05~0.07 付近以下から, 空隙の割合が急激に増加しているのが分かる。また, Fig. 3.2-2~4 を比べると, 採取深度が深くなるにつれて, より孔径の小さい空隙が増加している傾向が見られる。Fig. 3.2-5 にこれまでに実施した勇知層, 声問層試料の試験結果との比較を示す。この図より, 試料の細孔半径は, 勇知層, 声問層, 稚内層の順でより小さい孔径の空隙の占める割合が大きくなる傾向が見られることが分かる。これらの傾向は, 既往の研究 (例えば, 原, 2006³⁾) とも整合的である。

3.3 コア試料を対象とした透水試験

コア試料の透水試験は, インタクト試料に対してトランジエントパルス透水試験を実施した。以下に試験方法と結果について説明する。

(1) 試験方法

試験に用いたトランジエ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, Fig. 3.3-1~2, Photo 3.3-1 に示す。本装置の特徴は, 温度変化による水圧への影響を低減するため, 装置全体を水槽内に沈める機構を有することである。試験手順を Fig. 3.3-3 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。

(2) 試験ケース

トランジエントパルス透水試験法の試験ケースを Table 3.3-1 に示す。封圧は、Fig. 3.3-4 に示す HDB-1 孔⁴⁾の密度検層から求められた鉛直応力を参考に、試料採取深度相当の圧力条件下に設定した。なお、その鉛直応力の値は、水圧破碎試験により求められた最小主応力値とも整合的である。また、間隙水圧については、岩盤内の間隙水圧が深度方向に静水圧分布していると仮定して決定した。

温度 : 室温

封圧 : 深度 (m) × 0.018 (MPa/m)

間隙水圧 : 深度 (m) × 0.010 (MPa/m)

(3) 試験結果

トランジエントパルス透水試験の結果を、Fig. 3.3-6~9 および Table 3.3-3 に示す。トランジエ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。解析に用いたパラメータを Table 3.3-2 に示す。両手法の概要を以下に述べる。

(a) Brace 法

Brace 法は、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⁵⁾。

$$\frac{h_u - h_d}{H} = \exp \left[- \frac{V_u + V_d}{V_u V_d} \frac{KAt}{\ell C_w \gamma_w g} \right] \quad (3.3-1)$$

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 (m³), V_d : 上流側貯留槽の容積 (m³), K : 岩石試料の透水係数 (m/s), A : 岩石試料の断面積 (m²), t : 経過時間 (s), ℓ : 岩石試料の長さ (m), C_w : 水の圧縮率 (m²/kN), γ_w : 水の密度 (kg/m³), g : 重力加速度 (m/s²)

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う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。

(b) 差圧を用いた Hsieh 法

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⁶⁾。

$$\frac{h_u}{H} = \frac{1}{1+\beta+\gamma} + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\exp(-\alpha\phi_m^2)(\beta + \gamma^2\phi_m^2/\beta)}{\gamma^2\phi_m^4/\beta^2 + (\gamma^2\beta + \gamma^2 + \gamma + \beta)\phi_m^2/\beta + (\beta^2 + \gamma\beta + \beta)} \quad (3.3-2)$$

$$\frac{h_d}{H} = \frac{1}{1+\beta+\gamma} + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\exp(-\alpha\phi_m^2)(\beta - \gamma\phi_m^2/\beta)}{\gamma^2\phi_m^4/\beta^2 + (\gamma^2\beta + \gamma^2 + \gamma + \beta)\phi_m^2/\beta + (\beta^2 + \gamma\beta + \beta)} \cos\phi_m \quad (3.3-3)$$

ここで、 ϕ_m は次式の根である。

$$\tan\phi = \frac{(1+\gamma)\phi}{\gamma\phi^2/\beta - \beta} \quad (3.3-4)$$

上式中の α 、 β 、 γ は無次元数で、以下のように表される。

$$\alpha = \frac{Kt}{\ell^2 S_s}, \quad \beta = \frac{S_s A \ell}{S_u}, \quad \gamma = \frac{S_d}{S_u} \quad (3.3-5)$$

$$S_u = C_w \gamma_w V_u g \quad (3.3-6)$$

$$S_d = C_w \gamma_w V_d g \quad (3.3-7)$$

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、(3.3-2)式と(3.3-3)式の差を取ることにより、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 Fig. 3.3-6~9 のグラフ中に示す。いずれも理論解(図中の赤線)との良好な一致が見られる。

Fig. 3.3-5 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。

- ① 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 $\beta (= \beta^*)$ と、 $\alpha \beta^2 = 1$ のときの $t (= t^*)$ を求める。
- ② ①で求めた β および t を用いて (3.3-5) 式より、比貯留係数 S_s を求める。
- ③ ②で求めた S_s と①で求めた t を用いて (3.3-5) 式より、 K を求める。

Fig. 3.3-10 に透水係数と深度の関係を示す。図より、透水係数の深度依存性は確認されなかった。これは、各試料を採取した孔が異なることに起因すると考えられる。試みに透水係数と有

効空隙率の関係について整理した結果、声問層、稚内層において、明瞭な正の相関が見られることが分かる (Fig. 3.3-11)。

また、勇知層が他の層のトレンドと異なる要因として、前述の空隙径分布の相違に着目し考察を行った。空隙径と透水性の関係については、既往の研究において、いくつかの関係式が提案されている（例えば、内田の経験式⁷⁾など）。また、地盤を構成する粒子の粒度分布と透水係数の関係について以下に示す Hazen の式などが挙げられる。

$$k = C_H D_{10}^2 \quad (3.3-8)$$

ここに、 k : 透水係数(cm/s), D_{10} : 有効径(cm)で、粒度試験において、通過重量百分率が 10%を占める粒径, C_H : 比例定数である。式(1)は粒子径に着目したものであるが、空隙の大きさが粒子径に依存することから、空隙径と透水係数の関係に置き換えられると考えられる。今回は、この Hazen の式を参照し、透水性に影響を与える空隙径の代表的な値として、全体の空隙体積に占める割合が径の小さい方から 10%を示す空隙径 ϕ_{10} を用い、透水係数との関係について整理した。Fig. 3.3-12 に空隙径 ϕ_{10} の二乗と透水係数の関係を示す。この図より、勇知層、声問層、稚内層の全ての透水係数が ϕ_{10} の二乗と概ね正の相関を示していることが分かる。このことから、今回対象とした 3 つの地層の透水性の相違は、空隙径分布の違いにより説明できることが明らかとなった。さらに、Hazen の式において、有効径 D_{10} (cm)を空隙径 ϕ_{10} (cm)に置き換えた次式を用いて、透水係数 k (cm/s)の算定を行った。

$$k = a \phi_{10}^2 \quad (3.3-9)$$

a は、Hazen の式における C_H と同様、比例定数である。Fig. 3.3-12 中に、空隙径 ϕ_{10} の二乗と透水係数の関係について、比例定数 $a=2,500$ とした場合の計算結果を示す。図より、試験結果と計算結果のよい一致が見られ、今回対象とした 3 つの地層について、空隙径分布から、式(3.3-9)を用いて透水係数を推定できる可能性があることが明らかとなった。

3.4 コア試料を対象としたトレーサー試験

コア試料のトレーサー試験は、インタクト試料に対しては透過拡散法による拡散試験を、また亀裂試料に対してはトレーサー試験を実施した。

以下にそれぞれについて説明する。

3.4.1 拡散試験

(1) 試験方法

試験装置の概要を Fig. 3.4-1～2 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、Fig. 3.4-2 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 試体のセット

作成した供試体は、Fig. 3.4-1～2 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、両セルの水位と同じにした。

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、トレーサーを加えないブランクテストも拡散実験と同時に行ったが、試験結果に影響を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。

(2) 試験ケース

試験ケースを Table 3.4-1 に示す。試験条件は、全試験ケースとも同様とした。

トレーサー溶液にはヨウ化カリウム (KI) 水溶液を用い、トレーサー濃度は、ヨウ化物イオン (I^-) 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。Table 3.4-2 に試験条件の一覧を示す。

(3) 試験結果

試験結果を Fig. 3.4-3～9 に示す。得られた試験結果を用い、以下に述べる方法で拡散係数を求める。

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。

$$Cd = \frac{Sr \cdot H \cdot C_0}{Vm} \left[\frac{De \cdot t}{H^2} - \frac{\alpha}{6} - \frac{2\alpha}{\pi^2} \times \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{(-1)^n}{n^2} \cdot \exp \left(-\frac{De \cdot n^2 \cdot \pi^2 \cdot t}{H^2 \cdot \alpha} \right) \right\} \right] \quad (3.4-1)$$

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）、 Cd ：測定セル中のトレーサー濃度（mg/L）、 Sr ：試料の断面積（m²）、 De ：実効拡散係数（m²/s）、 Vm ：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、 $\alpha=n+\rho \cdot Kd$ (n ：試料の有効空隙率、 ρ ：試料の乾燥密度（kg/m³）、 Kd ：分配係数（m³/kg）) で与えられる。

ここで、上式(3.4-1)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 Cd 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(3.4-1)は、近似的に次式(3.3-2)のように表せる。

$$Cd = \frac{Sr \cdot H \cdot C_0}{Vm} \left(\frac{De \cdot t}{H^2} - \frac{\alpha}{6} \right) \quad (3.4-2)$$

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、(3.4-2)式により求められる。さらに、見かけの拡散係数を次式で与えられるタイムラグ法によって求めた。

$$Da = \frac{H^2}{6T_{int}} = \frac{De}{\alpha} \quad (3.4-3)$$

ここに、 Da ：見かけの拡散係数（m²/s）、 T_{int} ：(3.4-2)式を時間軸まで外挿した時の時間（s）である。

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Table 3.4-3に示す。また、これまでの解析結果をTable 3.4-4に示す。実効拡散係数については、声門層では、 $9.22 \times 10^{-11} \sim 3.22 \times 10^{-10}$ (m²/s) であり、これまでと同様、勇知層とほぼ同等の値が得られた。一方、稚内層では、 $8.16 \times 10^{-12} \sim 2.55 \times 10^{-11}$ (m²/s) であり、勇知層、声門層よりも1オーダー程度小さな値となっている。また、異方性については、声門層、稚内層とも確認されなかった。また、既往の、新第三紀泥岩・凝灰岩の拡散係数値⁸⁾と今回の試験結果の比較をFig. 3.4-10に示す。図より、勇知層、声門層については、同一有効空隙率のサンプルの中では、1オーダー程度大きな値であることが分かる。また、収着容量から求めた分配係数を求めると、0に近い値となることから、当試料へのヨウ化物イオンの収着量は非常に小さいものと考えられる。

3.4.2 トレーサー試験

亀裂試料についてトレーサー試験を行った。トレーサー試験に用いた装置の概要をFig. 3.4-11, Photo 3.4-1に示す。本試験は、三軸セル内の試料に所定の封圧を載荷した状態で、試料の下側

から上側へトレーサー溶液を注入し、排出される溶液の濃度の時間変化を測定するものである。試験装置および試験条件は、基本的には、これまでと同様の条件²⁾で実施するが、試験を実施する前に、これまでの試験で残された課題について検討を行った。

(1) 試験方法

Table 3.4-5 に試験装置および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、イオンメーター、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ャーポンプ（HPLC PUMP PU610、0.001～5.0ml/分）を用いた。

分析装置には、トレーサー試験中のトレーサー濃度を連続的に測定するための装置として、電気伝導率計とイオンメーター（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。Fig. 3.4-12～13 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、酸化一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。

Fig. 3.4-14 に試験手順を示す。以下、各手順の詳細を述べる。

① 注入圧力の確認

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、背圧載荷のために、準定常状

態での圧力を確認する。

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

試料の変形による貯留の影響を除くために、トレーサーの注入前に、試料に①で確認した圧力を背圧として載荷した。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瓶に移し変え、ICPにより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、十分に上昇し、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。

(2) 試験ケース

トレーサー試験の試験ケースを Table 3.4-6 に示す。トレーザー試験の試験ケースは、声問層で深度の異なる 3 試料と稚内層で 1 試料について実施した。なお、有効応力の設定は、トランジェントパルス透水試験と同様に、Fig. 3.3-4 に示す HDB-1 孔⁴⁾の密度検層から求められた鉛直応

力を参考に行った。また、トレーサー濃度、注入流量、フラッシング流量等の試験条件は、全試験ケースとも同様の条件とした。Table 3.4-7 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釀の影響及び測定センサーの精度等を考慮して、1,000 (mg/L) に設定した。

(3) 試験状況および試験結果

以下、トレーサー試験の状況について説明する。試験結果を Fig. 3.4-15~18 に示す。ここでは、試験中のトレーサー濃度、流量、注入圧力の経時変化を示す。

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

注入圧力の経時変化を図中(c)に示す。この図より、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が分かる。これは、岩石マトリクス部へ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掛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、図からも分かるように、定常状態に達するまでには非常に長時間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。トレーサー濃度の経時変化を図中(a)に示す。図より、声間層試料 (10-1f1, 11-2f1, 11-4f1) は、稚内層試料 (9-2f3) と比べてマトリクス部の実効拡散係数が大きいため、マトリクス拡散による遅延の影響を大きく受け、トレーサー濃度の上昇に非常に長時間を要していることが分かる。

また、トレーサーから水の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釀のバランスが、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。

(4) 試験結果の解析

トレーサー試験の解析には、3次元物質移行解析コード FRAC3DVS⁹⁾を用いた。FRAC3DVS は、飽和不飽和の浸透流解析および移流分散、拡散、吸着、放射性崩壊を考慮した物質移行解析が可能な3次元解析コードである。数値解析手法として、差分法と有限要素法の両者から選択が可能になっている。今回は、差分法を用いた。

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

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

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(K_{ij} k_{rw} \frac{\partial(\psi + z)}{\partial x_j} \right) \pm Q = \frac{\partial}{\partial t} (\theta_s S_w) \quad (3.4-4)$$

- ・物質移行の基礎方程式：移流分散、拡散、吸着、放射性崩壊

$$\theta_s S_w R \frac{\partial c}{\partial t} + q_i \frac{\partial c}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\theta_s S_w D_{ij} \frac{\partial c}{\partial x_j} \right) + \theta_s S_w R \lambda c = 0 \quad (3.4-5)$$

$$R = 1 + \frac{\rho_b}{\theta_s S_w} K_d \quad (3.4-6)$$

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(-)， $\phi + Z$ ：全水頭(m)， Q ：流量(m^3/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)， q_i ：流束(m/s)， D_{ij} ：水理学的分散係数(m^2/s)， λ ：崩壊係数， ρ_b ：試料の乾燥密度(kg/m^3)， K_d ：分配係数(m^3/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、 λ 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、(3.4-5)式は、次の(3.4-7)式で表すことができる。

$$D \frac{\partial^2 c}{\partial x_i^2} - v_i \frac{\partial c}{\partial x_i} = \frac{\partial c}{\partial t} \quad (3.4-7)$$

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。

$$D = D' + D_d = \alpha v + D_d \quad (3.4-8)$$

透水試験結果から、岩石マトリクス部の透水係数は亀裂部の透水性に比べて非常に小さい($5 \times 10^{-12} m/s$)ことが分かっており、今回の試験条件では、亀裂部に比べて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を無視し、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。

$$D_m = D_d \quad (3.4-9)$$

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 (m^2/s)と水中で

の分子拡散係数 $D^*(\text{m}^2/\text{s})$ との和であらわされる。すなわち、

$$\begin{aligned} D_f &= D'_f + D^* \\ &= \alpha v + D^* \end{aligned} \quad (3.4-10)$$

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。

$$v = \frac{Q}{ew} \quad (3.4-11)$$

ここに、 Q : トレーサー注入流量 (m^3/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 (3.4-4) 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 (3.4-7) 式～(3.4-11) 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_e 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。Table 3.4-8 に、解析入力条件の一覧を示す。

解析モデル (Fig. 3.4-19) 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、試料上下面のスリット部のみを水頭固定境界とし、上下面のスリット以外の部分および試料側面は不透水境界とした。ここで、試験条件が定流量条件にも関わらず、上面を水頭固定としたのは、マトリクス部と亀裂部に流れる流量比が未知であるため、解析上、流量を固定できないためである。今回は、試験時の注入圧力の安定値から動水勾配を設定し、下面（上流側）水頭を設定した。

(5) 解析結果の考察

トレーサー試験の解析結果を Fig. 3.4-20～23 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 Table 3.4-9 に示す。

① 分散長

分散長については、声間層において $2.0 \times 10^{-2} \sim 5.0 \times 10^{-2}$ (m), 稚内層において 5.0×10^{-3} (m) が得られた。これらの結果を、既往の実験結果¹⁰⁾ およびこれまでの試験結果 (Fig. 3.4-24) と比較すると、声間層試料がやや大きめの値を示しているが、ほぼ同一のトレンド上にあり、従来から指摘されている分散長とスケールの関係が、当試料においても同様の回帰直線により表せることが示された。

② 物質移行開口幅

物質移行開口幅は、声間層において 0.006~0.01mm、稚内層において 0.004mm が得られた。Fig. 3.4-25 に物質移行開口幅と透水係数から次式の三乗則により逆算した水理開口幅の関係を示す。

$$T = \frac{\rho g}{12\mu} e_h \quad (3.4-12)$$

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($\text{kgf} \cdot \text{s}/\text{m}^2$)、 e_h : 水理開口幅(m)である。

一般に、透水性に寄与する水理開口幅は、亀裂幅の狭いところの効果が卓越するのに対し、物質移行開口幅は、平均的な開口幅の影響を大きく受けるため、物質移行開口幅の方が水理開口幅よりも数倍以上大きくなることが報告されている。今回の結果では物質移行開口幅／水理開口幅比は、最大で 3.1 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、物質移行開口幅 e と透水量係数 T の関係 (Fig. 3.4-26) を見ると、非常に緩やかではあるが正の相関が見られ、 $e = \sqrt{T}$ と直線的な関係にあることが分かる。花崗岩サイト（釜石鉱山原位置試験場）において、原位置スケールの亀裂に対し、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¹¹⁾。今回の試験結果は、この傾向と比較するとやや小さい値であった。

3.4.3 X 線 CT 測定

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

(1) 試料

試料は、今年度採取した稚内層の泥岩試料を用いた。測定に用いた試料の基本的な物性値を以下に示す。なお、以下の諸物性は、X 線 CT 撮影に用いる試料のごく近傍からサンプリングした試料を用いて事前に測定したものである。また、拡散係数については、これまでの試験結果²⁾より濃度によって拡散係数が異なる値を示す可能性があることが確認されたため、ここでは、X 線 CT 撮影に用いる同濃度の溶液を用いた拡散試験により求めた。

試料の亀裂開口幅については、X 線 CT の撮影時間が 1 回につき 5 分程度を要することから、後述の試験条件一覧に示す試験時のトレーサー注入流量 0.001(cc/min)において、5 分間の亀裂内の浸潤距離が 1(mm)以内におさまるような開口幅を設定した。Fig. 3.4-27 に開口幅と 5 分間の亀裂内の浸潤距離の関係を示す。Fig. 3.4-27 より、開口幅は 0.2(mm)程度とした。

- (a) 試料名 : HDB-9 孔 200m 付近試料 (稚内層泥岩)
- (b) マトリクス部の透水係数 : $3.0 \times 10^{-11} (\text{m}/\text{s})$ (9-2i1 : HDB-9 孔 150m 試料の結果)
- (c) 拡散係数 : $1.5 \times 10^{-10} (\text{m}^2/\text{s})$

- (d) 有効空隙率 : 42 (%)
- (e) 乾燥密度 : 1.469 (g/cm³)
- (f) 亀裂開口幅 : 0.176 (mm) (別途実施した定水頭透水試験結果から三乗則により算定)

試験には、Fig. 3.4-28 に示すような、人工の平行平板亀裂を有する試料を用いた。寸法等は、直径 30mm、高さ 40mm の円柱状試料の周囲をエポキシ系樹脂（レジン）にて被覆し、直径 50mm、高さ 40mm としたものを用いた。

(2) 試験方法

試験装置全体の概要を Fig. 3.4-29 および Photo 3.4-2 に示す。本装置は円柱状のコア試料を注入側セルと排水側セルの 2 つのセルで挟み込み、注入側セル（試料下部）より一定流量でトレーサー溶液を注入し、試験中の試料内部の移流および拡散現象を X 線 CT により可視化するものである。トレーサー溶液の注入には、極微少流量を高精度で送液することが可能なシンジポンプを用いた。また、撮影時の X 線の減衰を防ぐため、シンジポンプや電源等をアクリル製の架台上に配置するとともに、撮影断面の近傍にあるボルトやナットなどの金属製の部材を全てアクリル製のものに取り替えて使用した。

セル型トレーサー試験装置の詳細について Photo 3.4-3 に示す。装置のセル部分は、ブロック試料のトレーサー試験で用いている試験装置に比べて容積を小さくしており、試験開始時の注入側セル内のトレーサー溶液への入替え作業をより短時間に行うことができるようになっている。また、トレーサー溶液の注入に関しては、試料の亀裂部のみから行えるよう注入側セルと試料の間に亀裂に沿った位置に切り込みを入れたゴム板を配置した。さらに、試験開始時のトレーサー溶液への入替え時に、亀裂内へトレーサー溶液が浸入するのを防ぐため、ゴム板と試料の間にはろ紙を挟んだ。なお、ろ紙への溶質の吸着による試験結果への影響については、別途検証実験を実施しており、影響がないことを確認した。

試験は、以下のような手順で行った。

① 供試体のセット

(1) で作成した供試体を注入側セルと排出側セルで挟み込むようにしてセットした。

② 供試体の脱気

供試体のセット後、両セルに脱イオン水を入れ、真空槽にて脱気を行った。

③ X 線 CT スキャナへのトレーサー試験装置のセット

供試体の脱気を完了後、アクリル製架台ならびにトレーサー試験装置を X 線 CT スキャナのターンテーブル上にセットした。また、試験中にトレーサー試験装置の位置が変わらないように、ターンテーブル、アクリル製架台、トレーサー試験装置は、ボルト等により厳重に固定した。

④ 初期状態の X 線 CT 撮影

トレーサー試験装置のセットを完了後、試験開始前の初期状態の X 線 CT 撮影を行った。

⑤ トレーサー試験の開始

排出側（試料上部）のバルブを閉じたまま、トレーサー注入用、およびトレーサー入替え用配管を繋ぎ、セル下部のドレインバルブを開いた状態で、セルの下側よりトレーサー溶液を注入し

た。この際、トレーサー溶液の注入は、時間短縮のため、試験用のシリンジポンプの配管から分岐したトレーサー入替え用シリンジにて行った。注入側セル内の溶液が入れ替わったことを確認した上で、入替え用シリンジによるトレーサー溶液の注入を停止し、それと同時にドレインバルブを閉じた。また、これらの一連の作業を完了した後、試験用のシリンジポンプの流量が安定したことを確認するため、シリンジポンプを作動し、三方弁にてトレーサー入替え用配管へ排出し、そこで流量確認を行った。流量が安定したことを確認後、三方弁を切り替え、所定の流量にて注入を開始し、これと同時に排出側のバルブを開いてトレーサー試験を開始した。

⑥ X 線 CT 撮影

トレーサー試験開始後、所定の時間間隔で X 線 CT 撮影を行う。試料内の移流、拡散現象の可視化は、各時間の撮影で得られた CT 値の分布と、初期状態における CT 値の分布の差分をとることにより行った。

(3) 試験条件

試験条件の一覧を Table 3.4-11 に示す。トレーサー溶液には、ヨウ化カリウム (KI) 水溶液を用いた。X 線 CT 測定は、測定で得られる CT 値が、被測定物の密度にほぼ比例することを利用したものであり、今回のトレーサー試験においては、試験前の試料内部の空隙内に満たされた間隙水の密度 ($1.0\text{g}/\text{cm}^3$) と、試験開始後から、移流および拡散現象により、亀裂やマトリクス内の空隙を通して広がったトレーサー溶液の密度差から、移流、拡散現象を可視化することになる。したがって、現象のより明瞭な可視化を行うためには、使用するトレーサー溶液の密度は、水の密度に対して充分に大きくする必要がある。そこで、今回の試験では、熊本大学での過去の実績も考慮して、使用するトレーサー溶液の濃度をヨウ化カリウム (KI) 濃度で 377 (g/L) (密度 : 1.256 g/L) とした。

トレーサー注入流量に関しては、前述にもあるように、X 線 CT の撮影時間が 1 回につき 5 分程度を要することから、可能な限り小さくする必要がある。そこで、今回は $0.001(\text{ml}/\text{min})$ とした。なお、試験期間については、シリンジの容量と注入流量の関係から 3 日間とした。

(4) データの整理方法

Fig. 3.4-30 に測定からデータ整理までの作業の概要を示す。

X 線 CT 撮影は、Fig. 3.4-30(a) に示すように、任意の撮影断面を設定して実施する。ある時間における、ある 1 断面での差画像が Fig. 3.4-30(b) のように得られた場合、Fig. 3.4-30(c) の A-A 断面（試料の中央部の亀裂と直交する断面）での濃度 (CT 値) の分布を求める。次に同一時間における各断面での分布を求め、このデータを補間して Fig. 3.4-30(d) のような試料の通水方向断面の CT 値のコンターを求める。

(5) 試験結果

Fig. 3.4-31 に、時間 $t=24\text{h}$ における各撮影断面の原画像を示す。各画像中の比較的白い部分

がトレーサー濃度の高い部分を示している。また、Fig. 3.4-32 に各撮影断面における A-A 断面の CT 値の分布を示す。これらの図より、トレーサーの注入側 ($Z=0\text{mm}$) で最もトレーサー濃度が高く、下流側（試料上部）に向かうに連れて全体的に濃度が低くなっていることが分かる。また、各撮影断面の濃度分布は、亀裂部で最も高い濃度を示しており、マトリクス部に向かうに連れて濃度が低くなっていることが分かる。Fig. 3.4-33 に、時間 $t=24\text{h}, 48\text{h}, 72\text{h}$ における、各撮影断面の CT 値を補間して得られたコンター図を示す。この図より、試料下部の上流側から注入されたトレーサー溶液が、時間の経過とともに下流側（試料上部）へ移行していることが分かる。また、亀裂部の移流効果が大きいことから、亀裂部でのトレーサーの移行が速く、これに遅れて拡散によるマトリクス部への移行が生じていることが明瞭に表現されていることが分かる。このことから、X 線 CT スキャナを用いて亀裂部の移流および亀裂からマトリクス部への拡散現象を可視化することで、亀裂を有する岩石試料内の移流、拡散現象を定性的に確認することが可能であることが分かった。

4. ブロック試料を対象とした透水試験／トレーサー試験

4.1 ブロック試料の採取、整形

4.1.1 ブロック試料の採取

ブロック試料の採取は、幌延地区の露頭において、仕様の15cmスケール以上のブロックに整形可能な大きさで、自然の単一亀裂を含み、風化のあまり進んでいないより新鮮な試料を採取する方針で実施した。その結果、声問層の露頭（諏訪の沢林道）および稚内層の露頭（牧野山林採石場）において3個の岩塊を採取した。採取試料の一覧および試料の写真をTable 4.1-1およびPhoto 4.1-1～3に示す。

以下に、それぞれの試料について、採取時の状態について述べる。

a. B-1

ブロック試料B-1は、斜面から落下した岩塊であり、約 $60\text{cm} \times 60\text{cm} \times 50\text{cm}$ 程度の亀裂のない声問層の岩塊で、亀裂試料の整形が困難な場合の平行平板試料の作製用に採取した。岩塊の表面は風化が進んでいるが、表面を少し削ると、岩塊内部の状況は比較的新鮮であった。

b. B-2

ブロック試料B-2は、約 $65\text{cm} \times 40\text{cm} \times 45\text{cm}$ 程度の亀裂のない稚内層の岩塊で、亀裂試料の整形が困難な場合の平行平板試料の作製用に採取した。岩塊の表面は風化が進んでいるが、表面を少し削ると、岩塊内部の状況は比較的新鮮であった。

c. B-3

ブロック試料B-3は、約 $50\text{cm} \times 35\text{cm} \times 35\text{cm}$ 程度の稚内層の岩塊で、試料表面において、中央付近に亀裂が見られる。岩塊の表面は風化が進んでいるが、表面を少し削ると、岩塊内部の状況は比較的新鮮であった。

4.1.2 ブロック試料の整形

整形は、亀裂を有するB-3試料について行った。その結果、試料中央付近に自然亀裂を有する10cm×10cm×16cmのブロック試料の整形に成功した。Photo 4.1-4に整形後の試料の状況を示す。

4.2 ブロック試料の基本物性試験および分析

4.2.1 分析項目

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

測定ならびに分析の実施項目、数量をTable 4.2-1に示す。

4.2.2 基本物性試験

基本物性値および一軸圧縮試験の測定結果をTable 4.2-2～3に示す。測定は、透水/トレーサー試験に使用した試料について行った。基本物性試験および一軸圧縮試験用の試料は、透水/トレーサー試験用試料の整形後に残ったごく近傍の岩片から採取した。

4.2.3 X線分析

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

X線解析チャートをFig. 4.2-1に、また、各鉱物のおおよその含有量を推定した結果の一覧をTable 4.2-4示す。図、表より各鉱物の同定結果としては、3.2節で実施したコア試料における稚内層試料とほぼ同等の結果が得られていることが分かる。したがって、今回の試料は、幌延地域の珪藻質泥岩に特徴的なシリカ鉱物の変化：珪藻→オパールA→オパールCT→石英の中で、オパールCTのゾーンに区分されることが分かった。

4.2.4 空隙分布測定

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

Fig. 4.2-2に、試料の細孔半径と累積有効空隙率の関係を示す。また、Fig. 4.2-3にコア試料も含めた測定結果を同一グラフにプロットしたものを示す。これらの図より、今回の試料は、コア試料の稚内層試料と同等の細孔径分布を有しており、全体の有効空隙率としては、稚内層としては、やや大きい値を有することが分かった。Table 4.2-5に水銀圧入試験結果の一覧を示す。表より、基本物性試験結果よりも、水銀圧入試験結果の方が、約5(%)程度低い有効空隙率が得られていることが分かる。これは、空隙構造が微細であるため、全ての空隙に水銀が侵入できなかつたためではないかと考えられる。測定に用いた水銀ポロシメーターは、測定機器の性能上0.003

(μm) 以下の細孔径は測定することができない。そのため、測定結果としては、0.003 (μm) 以下の細孔径を切り捨てられたデータが得られている。しかし、実際は、より微細な空隙も存在すると考えられる。

4.3 ブロック試料を対象とした透水試験

ブロック試料を対象とした透水試験は、マトリクス部の透水性の把握を目的としたインタクトコア試料によるトランジエントパルス透水試験と、亀裂部の透水量係数の把握を目的とした、亀裂を有するブロック試料を用いた定水頭透水試験を実施した。以下にそれについて説明する。

4.3.1 トランジエントパルス透水試験

(1) 試験条件

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

温度 : 室温

封圧 : 0.3 (MPa)

間隙水圧 : 0.1 (MPa)

(2) 試験結果

トランジエントパルス透水試験の結果を Fig. 4.3-1 および Table 4.3-1 に示す。試験結果から、当該ブロック試料の透水性は、これまでに実施したコア試料の試験結果と比べると、稚内層としては大きな値を示すことが分かった。

4.3.2 定水頭透水試験

(1) 試験方法

定水頭透水試験は、後出のブロック試料用セル型トレーサー試験装置を用いて実施した。試験装置の概略を Fig. 4.3-2 に示す。本試験では、通常の透水試験を行うと同時に、試料そのものの持つヨウ化物イオン量を把握する目的で、装置下流側にてイオンメーターによるヨウ化物イオン濃度の測定を行っている。そのため、使用する水は、脱イオン水とした。

試験は以下の手順で行った。

① 試料のセット

試料を 2 つのセルで挟み込むようにセットし、亀裂内にエアが残留しないよう、注入側のセルから試料内部を通水して装置全体に脱イオン脱気水を満たし、注入側、排水側の両バルブを閉じた。

② 定水頭透水試験の開始

水の注入を開始し、定水頭透水試験を実施する。

③ 定常状態の確認

下流側より排出される流量を測定し、流量が定常状態に達したことを確認する。このときの水頭差と、流量の関係から亀裂の透水量係数を算定する。

④ 排出水のヨウ化物イオン濃度低下の確認

イオンメーターによる連続測定により、試験開始直後からの測定セル側濃度の経時変化を測定し、ヨウ化物イオン濃度が高い場合は、これが低下するまで通水を続ける。測定セル側のヨウ化物イオン濃度低下を確認した時点で試験を終了し、その後、トレーサー試験を実施する。

(2) 試験結果

定水頭透水試験では、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 $T_f(\text{m}^2/\text{s})$ 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 $K(\text{m}/\text{s})$ を以下の(4.3-1)～(4.3-3)式から求めた。

$$T_f = \frac{Q}{x \cdot I} \quad (4.3-1)$$

$$K = \frac{Q}{A \cdot I} \quad (4.3-2)$$

$$I = \frac{H}{L} \quad (4.3-3)$$

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。

Table 4.3-2 に定水頭透水試験の結果を示す。亀裂の透水量係数は、 $5.97 \times 10^{-8}(\text{m}^2/\text{s})$ であり、この値から三乗則により求められる水理開口幅は、0.043(mm)であった。また、試料全体の透水係数は $1.09 \times 10^{-6}(\text{m}/\text{s})$ であった。

4.4 ブロック試料を対象としたトレーサー試験

ブロック試料を対象としたトレーサー試験は、マトリクス部についてはインタクトコア試料を用いた透過拡散法による拡散試験を、また亀裂を含んだ試料については亀裂を有するブロック試料を用いたトレーサー試験を実施した。以下にそれぞれについて説明する。

4.4.1 拡散試験

拡散試験は、ブロック試料のマトリクス部の拡散係数を把握することを目的として実施した。試料は、トレーサー試験用に整形した試料の近傍の岩片より採取した。試験方法、試験条件および解析方法等に関しては、コア試料を対象とした拡散試験時と同様である。試験結果を Fig. 4.4-1, Table 4.4-1 に示す。

実効拡散係数については、稚内層コア試料の結果よりもやや大きい $7.54 \times 10^{-11} (\text{m}^2/\text{s})$ が得られた。また、既往の、新第三紀泥岩・凝灰岩の拡散係数値⁸⁾と今回の試験結果の比較を Fig. 4.4-2 に示す。今回得られた値は、同一有効空隙率のサンプルの中では、やや大きな値であることが分かる。また、収着容量から求めた分配係数を求めると、0 に近い値となることから、当試料へのヨウ化物イオンの収着量は非常に小さいものと考えられる。

4.4.2 トレーサー試験

(1) 試験装置および方法

トレーサー試験は、コア試料の拡散試験で用いた拡散セル装置を応用したセル型のトレーサー試験装置を用いて行った。試験装置の概要を Fig. 4.4-3 に示す。本装置はブロック試料をトレーサーセル（注入側）と測定セル（排水側）の 2 つのセルで挟み込み、トレーサーセルより一定流量でトレーサー溶液を注入し、測定セル側の溶液濃度の経時変化を測定するものである。

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

また、透水試験を実施する際には、Fig. 4.4-3 中の注入側部分のシリジポンプを定水頭の堰に置き換えて、定水頭透水試験を実施する。

本装置の特徴を以下に示す。

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

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

① 供試体の作製

供試体作製の模式図を Fig. 4.4-4 に示す。まず、ブロック状に整形された試料の両端面を除く周囲に止水のためのシリコンシーラントを塗布し、これを挟み込むようにしてアルミ板を設置する。さらに、これらを固定するために周囲をアングルと全ネジロッドにより締め付けた。試料の両端は、セルのフランジ部に取り付けられた O-リングと密着させるために、80mm × 80mm の開口を持つ止水板を取り付け、周囲をシリコンシーラントで止水した。この状態で、水中脱気による試料の飽和を行った。

② 供試体のセット

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

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

③ 定水頭透水試験

装置の注入側に堰をセットし、定水頭透水試験を実施した。

④ トレーサー試験

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

⑤ 測定セル側溶液の濃度測定およびサンプリング

イオンメーターによる連続測定により、試験開始直後からの測定セル側の溶液濃度の経時変化を測定した。また、試験開始当日から1日3回程度5mlずつサンプリングを行い、ICPによるヨウ化物イオン濃度測定を行った。サンプリング後は同量の脱イオン水を測定セルに補充した。測定セルの脱イオン水の補充により生じる希釈の影響は、サンプリングした溶液の量とその濃度から補正を行った。

⑥ サンプルの分析

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

（2）試験条件

試験条件をTable 4.4-2に示す。トレーサー溶液には、コア試料を対象としたトレーサー試験と同様に、ヨウ化カリウム水溶液を用いた。また、測定セルの容量、シリジンポンプのシリジン容量、イオンメーターの測定精度等を考慮し、注入するトレーサー溶液の濃度は1,000 (mg/L)、注入流量は $q=0.01$ (ml/min)とした。

（3）試験結果および解析結果

トレーサー試験結果をFig. 4.4-5に示す。図より、イオンメーターによる測定結果とICPによる測定結果はほぼ一致しており、本試験で得られる測定結果の信頼性が高いことがよく分かる。また、Fig. 4.4-5より、マトリクス拡散による遅延の影響を受け、測定濃度の経時変化のプロットが、下に湾曲しながら上昇していることが分かる。

解析は、3.4節のコア試料を対象としたトレーサー試験と同様に、3次元物質移行解析コードFRAC3DVS⁹⁾を用いて行った。

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

解析条件をTable 4.4-3に示す。既知パラメータとして与えた水理開口幅、マトリクス部の透水係数、マトリクス部の実効拡散係数、空隙率は、前述の透水試験、拡散試験、基本物性測定で得られた値を用いた。

解析モデル (Fig. 4.4-6) は、試料両端の止水板の開口に合わせた 80mm×80mm の正方形断面の中心に平板亀裂を配置し、亀裂面を挟んで対称としたものである。流れ方向の長さは、分散長よりも十分長くとるため、250cm とした。亀裂面は、面要素でモデル化した。境界条件は、左右面を水頭固定境界、上下側面を不透水境界とした。ここで、試験条件が定流量条件にも関わらず、左右面を水頭固定としたのは、マトリクス部と亀裂部に流れる流量比が未知であるため、解析上、流量を固定できないためである。

Fig. 4.4-5 中に解析結果を示す。Fig. 4.4-5 に示すように、解析結果と測定結果の良い一致が見られた。また、トレーサー試験の解析から得られた物質移行開口幅は 0.043 (mm) であり、事前に実施した定水頭透水試験結果から三乗則により求めた水理開口幅と同等の値を示していることが分かる。一般に、透水性に寄与する水理開口幅は、亀裂幅の狭いところの効果が卓越するのに対し、物質移行開口幅は、平均的な開口幅の影響を大きく受けるため、物質移行開口幅の方が水理開口幅よりも数倍以上大きくなることが報告されているが、今回の結果は、物質移行開口幅／水理開口幅の比が、約 1.3 となっており、この傾向と一致しない。これは、今回の試験では、密着した自然亀裂を有する試料を用いており、開口幅の面内不均一性が低かったためと推察される。

また、Fig. 4.4-7 より、物質移行開口幅 e と透水量係数 T の関係において、物質移行開口幅 e と透水量係数 T の平方根 \sqrt{T} の間に直線的な相関があることが分かる。さらに、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¹¹⁾が、今回の試験結果は、この傾向よりも、やや小さめの開口幅が得られている。

分散長については、一般的に移行経路の 1/10～1/100 の値を示すと言われており、今回の結果はこの傾向と一致している。この結果を、既往の実験結果¹⁰⁾およびこれまでの試験結果 (Fig. 4.4-8) と比較すると、ほぼ同一のトレンド上にあり、従来から指摘されている分散長とスケールの関係が、当試料においても同様の回帰直線により表せる可能性が示された。

5. 亀裂を有する軟岩中の流れと移行現象の概念モデルに関する数値解析的検討

5.1 モデル化手法に関する数値解析的検討

亀裂を有する堆積軟岩における物質移行のモデル化についての数値解析的な検討として、実スケールの岩盤における物質移行解析を想定し、岩盤を多孔質媒体モデルでモデル化した場合と、二重空隙モデルでモデル化した場合の解析結果の違いや問題点について考察を行った。解析は、3.4 節のコア試料を対象としたトレーサー試験と同様に、3 次元物質移行解析コード FRAC3DVS⁹⁾ を用いて行った。以下に検討内容を説明する。

5.1.1 解析モデル

Fig. 5.1-1 に実際の岩盤を想定したモデルの概要を示す。実際の岩盤を想定したモデルとしては、亀裂内の移流・分散と亀裂からマトリクスへの拡散を考慮した亀裂ネットワークモデルを仮定した。解析モデルは、Fig. 5.1-1 に示すように、 $250\text{m} \times 10\text{m} \times 100\text{m}$ の $x-z$ 平面上に 10m 格子の任意の亀裂ネットワークを発生させたものを用いた。今回の解析では、モデル内の 10m 格子に占める亀裂長さの割合（亀裂密度）と、亀裂開口幅を変化させることで、モデル内の亀裂密度、開口幅の変化による解析結果の変化について考察を行った。境界条件は、モデルの Fig. 5.1-1 の左右両端を定水頭境界、側面を不透水境界とした。また、トレーサー物質は、モデル左端面の全面から、時間 $t=0 \sim 1.0 \times 10^5$ (年) まで $C/C_0=1.0$ で常時供給し、 $t=1.0 \times 10^5$ (年) から計算終了時間までを $C/C_0=0$ となるよう設定した。但し、亀裂開口幅 $e=0.1$ (mm) のケースについては、注入流量が大きく、濃度上昇が極端に早いため、時間 $t=0 \sim 1.0 \times 10^4$ (年) まで $C/C_0=1.0$ で常時供給し、 $t=1.0 \times 10^4$ (年) から計算終了時間までを $C/C_0=0$ となるよう設定した。

解析では、観測断面での平均トレーサー濃度の経時変化（破過曲線）を求め、各ケースについて、多孔質媒体モデルおよび二重空隙モデルにてフィッティングを行い、各モデルによるモデル化の可能性について検討した。Fig. 5.1-2～3 に各モデルの概要を示す。

なお、ここで用いるモデルは、二重空隙モデルを亀裂内の移流・分散とマトリクス拡散で表現されるモデル、多孔質媒体モデルをマトリクス内の移流・分散のみで表現されるモデルとして取り扱った。

5.1.2 パラメータの設定および解析ケース

解析ケースは、亀裂密度が約 30(%)、40(%)、50(%)、70(%) の 4 ケースに対して、それぞれ亀裂開口幅を 0.1 (mm)、 0.05 (mm)、 0.01 (mm) に設定した合計 12 ケースとした。各パラメータおよび設定条件について以下に説明する。なお、パラメータの設定は、これまでに実施したパラメータスタディで用いた値^{1),2)}を参考に行った。

(1) 亀裂ネットワークモデルのパラメータ設定

① 動水勾配

動水勾配は固定条件とし、 $i=0.01$ を用いた。

② 亀裂開口幅

亀裂開口幅については、本研究で実施した室内試験結果から三乗則により平均的に $e=0.001$ (mm) オーダーの値が得られているが、試験で用いた試料が全て密着亀裂であったことも考慮してこれよりも大きい開口幅である $e=0.01 \sim 0.1$ (mm) まで変化させたケースを設定した。また、一般的に、水理開口幅は物質移行開口幅と必ずしも一致しないとされているが、ここでは、簡単のために水理開口幅と物質移行開口幅同じ値とした。

③ マトリクス部の透水係数 k_m

マトリクス部の透水係数は、本研究で実施した室内試験において $10^{-12} \sim 10^{-10}$ (m/s) オーダーの値が得られている。また、既往の研究において新第三紀堆積岩では $10^{-13} \sim 10^{-8}$ (m/s) オーダーの範囲で示されており¹²⁾、本研究で実施した室内試験結果もこの範囲内にある。したがって、ここではこれらの値を考慮して、マトリクス部の透水係数を 1.0×10^{-10} (m/s) に設定した。なお、マトリクス部の物性は、全て等方均質とした。

④ 亀裂部の縦方向分散長 α

縦方向分散長は、既往の研究において物質の移行距離により値が増大することが分かっており、本研究で実施した試験結果もこの傾向と整合的である。そこで、ここでは、縦方向分散長を移行距離（トレーサー供給源から観測断面までの距離：100 m）の $1/10$ ($\alpha=10$ m) で固定条件とした。

⑤ マトリクス部の実効拡散係数 D_e

マトリクス部の実効拡散係数は、既往の研究において、有効空隙率との間に正の相関が認められ、新第三紀泥質・凝灰岩において、次式のような関係が求められている⁸⁾。

$$D_e = 10^{-12.87} \times n^{1.39} \quad (5.1-1)$$

したがって、実効拡散係数は以下に説明する空隙率の現実的な範囲において、この式に従って設定した。

有効空隙率については、本研究における室内試験において、30～60(%)程度の範囲の値が得られている。また、既往の研究により、新第三紀泥質・凝灰岩においては、数～60(%)程度の範囲の値が得られており⁸⁾、本研究で得られたデータもこの範囲に含まれる。ここでは、本研究における室内試験結果に従って、その平均的な値である40%に設定した。

(2) 多孔質媒体モデルのパラメータ設定

多孔質媒体モデルのパラメータ設定は、以下の式(5.1-2)により、マトリクス部の透水係数 k_m を亀裂ネットワークモデルのモデル全体の透水係数と等価の値に設定し、マトリクス部の縦方向分散長 α_m をフィッティングパラメータとした。

$$Q = k_m \cdot A \cdot I \quad (5.1-2)$$

ここに、Q：流量(m³/s)、A：モデルの断面積(m²)である。

① 動水勾配

動水勾配は固定条件とし、i=0.01を用いた。

② マトリクス部の透水係数 k_m

マトリクス部の透水係数は、上述のように、マトリクス部の透水係数 k_m を亀裂ネットワークモデルのモデル全体の透水係数と等価な値に設定した。なお、マトリクス部の物性は、全て等方均質とした。

③ 空隙率 n

空隙率については、マトリクス部の透水係数と同様に、亀裂ネットワークモデルの亀裂部を含む全体の空隙率と同等の値に設定した。しかし、亀裂ネットワークモデルにおける亀裂部は、解析モデル全体に占める割合が、非常に小さい割合を占めるため、空隙率の値は、亀裂ネットワークモデルにおけるマトリクス部の空隙率と同一の値 ($n=40\%$) とした。

(3) 二重空隙モデルのパラメータ設定

二重空隙モデルのパラメータ設定は、マトリクス部の透水係数 k_m を亀裂ネットワークモデルと同様の値に、また水理開口幅 e_h を亀裂ネットワークモデルと等価な値に設定し、物質移行開口幅 e_t と亀裂部の縦方向分散長 α 、マトリクス部の実効拡散係数 D_e をフィッティングパラメータとした。

① 動水勾配

動水勾配は固定条件とし、 $i=0.01$ を用いた。

② 亀裂開口幅

亀裂開口幅については、上述のように、水理開口幅 e_h を亀裂ネットワークモデルと等価な値に設定し、物質移行開口幅 e_t をフィッティングパラメータとした。

③ マトリクス部の透水係数 k_m

マトリクス部の透水係数は、上述のように、亀裂ネットワークモデルの透水係数と同様の値に設定した。なお、マトリクス部の物性は、全て等方均質とした。

④ 空隙率 n

空隙率については、マトリクス部の透水係数と同様に、亀裂ネットワークモデルと同様の値に設定した。Fig. 5.1-4~7 に、各亀裂ネットワークモデルの亀裂分布図を示す。

5.1.3 解析結果

Fig. 5.1-8~10 に亀裂ネットワークモデルにおける解析結果から得られた破過曲線を示す。本検討では、これらの図に示す破過曲線に対して、多孔質媒体モデルおよび二重空隙モデルによるフィッティングを行った。以下に各ケースのフィッティング結果について説明する。

(1) 多孔質媒体モデルによるフィッティング結果

Fig. 5.1-11~22 および Table 5.1-1 に、多孔質媒体モデルによる破過曲線のフィッティング結果を示す。Table 5.1-1 中の k_m は、式 (5.1-2) から算定したもので、既知の入力条件であり、 α_m はフィッティングパラメータである。フィッティングは、 α_m を変化させた解析を順次実施して、亀裂ネットワークモデルの破過曲線との比較を行い、最も一致するケースをフィッティング

結果とする手順で行った。Fig. 5.1-11～22, Table 5.1-1 より、亀裂ネットワークモデルにおける破過曲線と多孔質モデルにおける破過曲線はほぼ一致しており、全般的に多孔質モデルによるフィッティングが可能であることが分かる。但し、亀裂開口幅が小さい $e=0.01\text{ (mm)}$, $e=0.05\text{ (mm)}$ の 2 ケースに比べて、亀裂開口幅が大きい $e=0.1\text{ (mm)}$ のケースについては、フィッティングの精度の低い結果が得られた。

また、 α_m のフィッティング結果については、亀裂ネットワークモデルの亀裂開口幅が大きくなり、かつ亀裂密度が小さくなると、得られる α_m の値が大きくなる傾向が見られることが分かる。これは、亀裂ネットワークモデルにおける亀裂開口幅が大きくなることにより、亀裂内の流れが支配的になると、亀裂ネットワークによる移行経路長のばらつきの影響が大きくなり、モデル全体の巨視的な分散効果が大きくなることを示している。

以上より、今回の検討におけるパラメータの範囲では、堆積岩等の軟岩試料を対象とした亀裂ネットワークを形成する岩盤内の非収着性の物質移行現象は、多孔質媒体モデルで近似的に表現できる可能性が示された。しかし、亀裂開口幅が今回の設定値よりも大きく、より亀裂内の流れが卓越するような場合においては、多孔質媒体モデルによる近似が困難になる可能性があることも明らかとなつた。

(2) 二重空隙モデルによるフィッティング結果

Fig. 5.1-23～34 および Table 5.1-2 に、二重空隙モデルによる破過曲線のフィッティング結果を示す。Table 5.1-2 中の k_m は亀裂ネットワークモデルと同様の値、 e_h は亀裂ネットワークモデルの亀裂と等価な値を設定しており、いずれも既知の入力条件である。一方、 D_e および e_t , α はフィッティングパラメータである。

Fig. 5.1-23～34, Table 5.1-2 より、亀裂ネットワークモデルの破過曲線と二重空隙モデルの破過曲線は、どのケースもほぼ一致しており、全般的に二重空隙モデルによるフィッティングが可能であることが分かった。但し、亀裂開口幅が大きい $e=0.1\text{ (mm)}$ のケースに比べて、亀裂開口幅が小さい $e=0.01\text{ (mm)}$, $e=0.05\text{ (mm)}$ のケースについては、フィッティング精度の低い結果が得られた。

また、 D_e , e_t , α のフィッティング結果については、 $e=0.05\text{ (mm)}$ 以上のケースにおいて、亀裂密度が大きくなると、得られる D_e の値が大きくなる傾向が見られることが分かる (Fig. 5.1-35)。これは、亀裂ネットワークモデルにおける亀裂開口幅が大きくなることにより亀裂内の流れが卓越してくると、亀裂密度の増大によりモデル全体の亀裂の比表面積が増大し、モデル全体の見掛けの拡散係数が大きくなることを示している。

以上より、今回の検討におけるパラメータの範囲では、堆積岩等の軟岩試料を対象とした亀裂ネットワークを形成する岩盤内の非収着性の物質移行現象は、二重空隙モデルで近似的に表現できる可能性が示された。しかし、亀裂開口幅が今回の設定値よりも小さく、よりマトリクス内の流れが卓越するような場合においては、二重空隙モデルによる近似が困難になる可能性があることも明らかとなつた。

5.2 概念モデル化の検討

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

5.2.1 室内試験結果のまとめ

(1) 透水性

① 亀裂を有しないインタクト部の透水係数は、声問層試料で $8.28 \times 10^{-11} \sim 8.38 \times 10^{-11}$ (m/s), 稚内層試料で $1.50 \times 10^{-11} \sim 2.80 \times 10^{-11}$ (m/s) であった。

② 有効空隙率とインタクト部の透水係数の関係についてこれまでに実施した試験結果^{1), 2)}とあわせてまとめた結果、声問層、稚内層において、有効空隙率と透水係数の間に正の相関が見られた。一方、勇知層は、この相関から外れており、これが空隙径分布の違いに起因することが明らかとなった。

(2) 物質移行特性

① マトリクス拡散係数

岩石マトリクス部の実効拡散係数を測定した結果、声問層で $9.22 \times 10^{-11} \sim 3.22 \times 10^{-10}$ (m²/s), 稚内層で $2.94 \times 10^{-11} \sim 4.19 \times 10^{-11}$ (m²/s) の値が得られた。これは、既往データのうち、同一の有効空隙率を有する新第三紀堆積岩に比べて声問層では 1 オーダー程度大きな値、稚内層では、ほぼ同等の値である。

② 分散長

亀裂を有する試料のトレーサー試験結果を用いた FRACK3DVS によるフィッティングから、分散長として、声問層では 0.02~0.05 (m), 稚内層では 0.005 (m) が得られた。また、稚内層のブロック試料では、0.028 (m) が得られた。この結果をこれまでの試験結果および既往の試験結果と比較すると、多少のばらつきはあるものの、ほぼ同一のトレンド上にある。従って、従来から指摘されている分散長とスケールの関係が、声問層試料、稚内層試料についてもほぼ同様の回帰直線により表せる可能性が示された。

③ 物質移行開口幅

亀裂を有する試料のトレーサー試験結果から、物質移行開口幅として 0.004~0.01 (mm) が得られた。この幅は、透水係数から三乗則により逆算した水理開口幅と同等かもしくは、多少大きな値を示している。一般に、透水性に寄与する水理開口幅は、亀裂幅の狭いところの効果が卓越するのに対し、物質移行開口幅は、平均的な開口幅の影響を大きく受けるため、物質移行開口幅の方が水理開口幅よりも数倍以上大きくなることが報告されている。

今回の結果では物質移行開口幅／水理開口幅比は、最大で3.6程度であった。

また、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、物質移行開口幅 e と透水量係数 T の平方根 \sqrt{T} が直線的な関係にある。また、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¹¹⁾。今回の試験結果は、この関係式で得られる値よりもやや小さい。

5.2.2 数値解析的検討のまとめ

亀裂を有する堆積軟岩における物質移行のモデル化手法についての数値解析的な検討として、実スケールの岩盤における物質移行解析を想定し、岩盤を多孔質媒体モデルでモデル化した場合と、二重空隙モデルでモデル化した場合の解析結果の違いや問題点について考察を行った。その結果、以下のような知見が得られた。

(1) 多孔質媒体モデルによるモデル化

- ・今回の検討におけるパラメータの範囲では、堆積岩等の軟岩試料を対象とした亀裂ネットワークを形成する岩盤内の非収着性の物質移行現象は、多孔質媒体モデルでほぼ近似的に表現できる。
- ・亀裂開口幅が大きく、より亀裂内の流れが卓越するような場合においては、多孔質媒体モデルによる近似の精度は下がる。

(2) 二重空隙モデルによるモデル化

- ・今回の検討におけるパラメータの範囲では、堆積岩等の軟岩試料を対象とした亀裂ネットワークを形成する岩盤内の非収着性の物質移行現象は、二重空隙モデルでほぼ近似的に表現できる。
- ・亀裂開口幅が小さく、より亀裂内の流れが支配的でないような場合においては、二重空隙モデルによる近似の精度は下がる。

5.2.3 概念モデル化の検討

以上、今回およびこれまで^{1), 2)}に得られた試験、解析結果を基に、亀裂を有する軟岩における物質移行概念モデルを検討する。

- 本研究で対象とした珪藻質泥岩についていえば、次のような特性としてまとめられる。
- ・地下水流れに関しては、稚内層、声間層は、粒子間隙よりも亀裂が卓越した水みちを形成する可能性が高いと考えられる。従って、流れに関しては、亀裂内の流れを考慮する必要があると考えられる。一方、勇知層は、亀裂内の流れが支配的である可能性は低いと考えられ、亀裂内の流れを考慮する必要性は低いと考えられる。
 - ・岩石マトリクス内の流れに関しては、稚内層試料では非常に遅い流れであることから、マトリクス内の移流は無視し得ると考えられるが、声間層試料は、稚内層試料よりもマトリクス

部の透水性が 2 オーダー程度高く、マトリクス内でもある程度速い流れが生じていると考えられる。したがって、声間層に関しては、今後、マトリクス内の移流分散を考慮する必要性について検討が必要である。

- ・ 物質移行特性に関しては、稚内層、声間層とも、地下水流れが亀裂に支配されるため、亀裂内の移流分散が支配的である。また、マトリクスの拡散係数が大きいため、マトリクス拡散による遅延効果が大きい。

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

- ・ 稚内層、声間層については、基本的には「亀裂内移流分散+マトリクス拡散」という、花崗岩のような結晶質岩と同様の概念モデルの適用が適当であると考えられる。但し、声間層については、マトリクス内の移流分散を考慮する必要性について検討が必要である。
- ・ 勇知層に関しては、これまでの試験結果から、亀裂が卓越した水みちを形成するような傾向は見られなかったため、マトリクス内の粒子間隙を主な移行経路としたモデルが適用される可能性が考えられる。しかし、データ数が少ないため、今後のデータの蓄積が必要である。

6. おわりに

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

参考文献

- 1) 下茂道人, 山本肇, 熊本創：“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, 大成建設株式会社）, JNC TJ8400 2003-028 (2003).
- 2) 下茂道人, 熊本創：“亀裂を有する軟岩中の流れと移行現象に関する研究(II)”, 核燃料サイクル開発機構（業務委託報告書, 大成建設株式会社）, JNC TJ8400 2004-011 (2004).
- 3) 原彰男：“堆積岩の水理・物質移行特性に関するデータ取得Ⅱ—幌延地域に産する泥岩の孔径分布・化学組成・空気浸透率と物質移行特性の検討ー”, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Research 2006-020 (2006).
- 4) 山本卓也, 下茂道人, 藤原靖, 服部弘通, 田所照夫, 岩間彦衛, 名合牧人, 熊本創：“幌延深地層研究センターにおける試錐調査(HDB-1孔)”, 核燃料サイクル開発機構（委託研究成果報告書, 大成建設株式会社）, JNC TJ1400 2002-010 (2002).
- 5) W.F. Brace, J.B. Walsh, and W.T. Frangos : “Permeability of Granite under High Pressure”, J. of Geophysical Research, Vol. 73, No. 6, pp. 2225-2236 (1968).
- 6) P.A. Hsieh, J.V. Tracy, C.E. Neuzil, J.D. Bredehoeft and S.E. Silliman : “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).
- 7) 内田隆：“貯留岩の浸透率と孔径分布について—孔隙の岩石学的特性を考慮した浸透率の経験式の提唱ー”, 石油技術協会誌, Vol. 52, No. 1, pp. 1-11 (1987).
- 8) 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).
- 9) R. Therrien, E.A. Sudicky : “Three-dimensional analysis of variably-saturated flow and solute transport in discretely-fractured porous media”, J. Contaminant Hydrology, Vol. 23, pp. 1-44 (1996).
- 10) 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.

- 11) M. Shimo, H. Yamamoto, M. Uchida, A. Sawada, T. W. Doe, Y. Takahara : "In-situ test on fluid flow and mass transport properties of fractured rocks" , Proc. 9th ISRM Congress, Vol. 2, pp. 1401-1404, 1999.
- 12) 井尻裕二, 澤田淳, 赤堀邦晃：“我が国の岩盤の水理特性について”, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN8400 99-090 (1999).

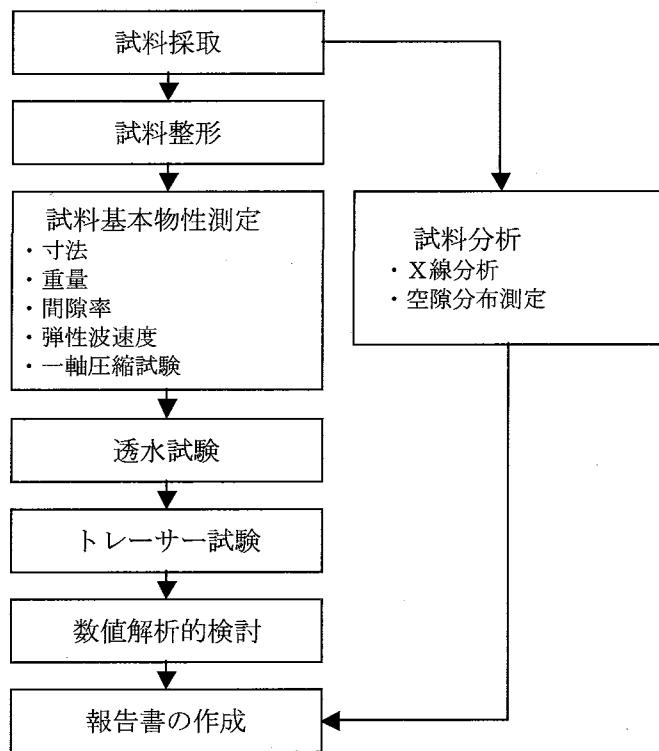


Fig. 2.2-1 研究のフロー

Table 3.1-1 HDB-9 孔 採取試料一覧

採取深度(m)	採取長(m)	地層名	亀裂の有無	亀裂の状態	コアの状況	用 途	試料名(仮)
230.65	~ 230.75	0.1	稚内層	有	密着	透水・トレーサー	9-1
230.75	~ 231.00	0.3	稚内層	無	-	透水・トレーサー	9-1'
167.00	~ 167.70	0.7	稚内層	有・無	密着	透水・トレーサー	9-2
166.00	~ 166.80	0.80	稚内層	無	-	一軸圧縮試験	9-3
203.00	~ 203.80	0.80	稚内層	無	-	一軸圧縮試験	9-4
253.50	~ 254.00	0.50	稚内層	無	-	一軸圧縮試験	9-5
252.10	~ 252.30	0.20	稚内層	無	-	一軸圧縮試験	9-6

Table 3.1-2 HDB-10 孔 採取試料一覧

採取深度(m)	採取長(m)	地層名	亀裂の有無	亀裂の状態	コアの状況	用 途	試料名(仮)
82.00	~ 82.40	0.4	声問層	有	密着	透水・トレーサー	10-1
83.30	~ 83.60	0.3	声問層	無	-	透水・トレーサー	10-1'
91.50	~ 92.00	0.5	声問層	有・無	密着	透水・トレーサー	10-2
153.50	~ 154.00	0.5	声問層	有・無	密着	透水・トレーサー	10-3
151.60	~ 151.90	0.3	声問層	有・無	密着	透水・トレーサー	10-4
146.30	~ 146.65	0.35	声問層	有・無	密着	透水・トレーサー	10-5

Table 3.1-3 HDB-11 孔 採取試料一覧

採取深度(m)	採取長(m)	地層名	亀裂の有無	亀裂の状態	コアの状況	用 途	試料名(仮)
85.30	~ 85.80	0.50	声問層	有・無	密着	透水・トレーサー	11-1
87.00	~ 87.35	0.35	声問層	有・無	密着	透水・トレーサー	11-2
129.40	~ 129.70	0.30	声問層	有・無	密着	透水・トレーサー	11-3
283.00	~ 283.45	0.45	声問層	無	-	透水・トレーサー	11-4
284.60	~ 284.90	0.30	声問層	有	密着	透水・トレーサー	11-5
292.10	~ 292.30	0.20	声問層	有	密着	透水・トレーサー	11-6
293.60	~ 293.80	0.20	声問層	無	-	透水・トレーサー	11-7
309.30	~ 309.70	0.40	声問層	有	密着	透水・トレーサー	11-8
309.80	~ 310.00	0.20	声問層	無	-	透水・トレーサー	11-9
416.05	~ 416.50	0.45	声問層	有	密着	透水・トレーサー	11-10
416.50	~ 417.00	0.50	声問層	無	-	透水・トレーサー	11-11
417.00	~ 417.50	0.50	声問層	有	密着	透水・トレーサー	11-12
446.10	~ 446.90	0.80	声問層	有・無	密着	透水・トレーサー	11-13

Table 3.1-4 試料整形結果一覧 (HDB-9 孔)

採取深度(m)	採取長(m)	地層名	試料名	亀裂/インタクト	状態	備考
230.65	~ 230.75	0.1	稚内層	9-1f	亀裂	×
230.75	~ 231.00	0.3	稚内層	9-1i-h	インタクトH	○
				9-1i	インタクト	○
				9-1i-v	インタクトV	○
167.00	~ 167.70	0.7	稚内層	9-2f1	亀裂	×
				9-2f2	亀裂	×
				9-2i1	インタクト	○
				9-2i2	インタクト	×
				9-2f3	亀裂	○
						やや短い、欠損部あり

(状態: ○ 良好, × 不良)

Table 3.1-5 試料整形結果一覧 (HDB-10 孔)

採取深度(m)	採取長(m)	地層名	試料名	亀裂/インタクト	状態	備考
82.00	~ 82.40	0.4	10-1f1	亀裂	○	
			10-1f2	亀裂	○	
			10-1f3	亀裂	×	短い
			10-1f4	亀裂	×	亀裂側面
83.30	~ 83.60	0.3	10-1f5	亀裂	×	複数亀裂
			10-1f6	亀裂	×	複数亀裂、径が歪んでいる
			10-1f7	亀裂	×	亀裂側面
			10-1f8	亀裂	×	複数亀裂
91.50	~ 92.00	0.5	10-1i-h	インタクトH	○	
			10-1i-v1	インタクトV	○	
			10-1i	インタクト	○	
			10-1i-v2	インタクト	○	
153.50	~ 154.00	0.5	10-2i-h1	インタクトH	○	
			10-2-f1	亀裂	×	短い
			10-2-f2	亀裂	×	亀裂側面
			10-2i-v1	インタクトV	○	
151.60	~ 151.90	0.3	10-2i-h2	インタクトH	○	
			10-2f3	亀裂	○	
			10-2f4	亀裂	×	亀裂なし、短い
146.30	~ 146.65	0.35	10-2i-h3	インタクトH	×	短い、欠損部あり
			10-2i-h4	インタクトH	×	複数亀裂
			10-2i-v2	インタクトV	×	短い、欠損部あり

(状態 : ○ 良好, × 不良)

Table 3.1-6 試料整形結果一覧 (HDB-11 孔)

採取深度(m)	採取長(m)	地層名	試料名	亀裂/インタクト	状態	備考
85.30	~ 85.80	0.50	11-1f1	亀裂	×	亀裂側面
			11-1f2	亀裂	×	複数亀裂
			11-1f3	亀裂	×	亀裂途中、複数亀裂
			11-1f4	亀裂	×	複数亀裂
87.00	~ 87.35	0.35	11-1f5	亀裂	×	亀裂側面
			11-1i1	インタクト	○	欠損部あり
			11-1i2	インタクト	○	欠損部あり
129.40	~ 129.70	0.30	11-1i3	インタクト	○	
			11-1i-v1	インタクトV	○	
			11-1i-h	インタクトH	○	
			11-1i-v2	インタクトV	○	
283.00	~ 283.45	0.45	11-2i-h1	インタクトH	○	
			11-2i-v1	インタクトV	×	欠損部あり(大)
			11-2i-h2	インタクトH	×	欠損部あり(大)
			11-2f1	亀裂	○	
284.60	~ 284.90	0.30	11-2f2	亀裂	×	欠損部あり(大)
			11-2f3	亀裂	○	径が歪んでいる、短い
292.10	~ 292.30	0.20	11-2i-v2	インタクトV	○	
			11-2f4	亀裂	×	複数亀裂、短い
293.60	~ 293.80	0.20	11-2i-h3	インタクトH	○	短い
			11-2f5	亀裂	×	亀裂側面、欠損部あり
309.30	~ 309.70	0.40	11-2f6	亀裂	×	亀裂側面、欠損部あり
			11-2f7	亀裂	×	径が歪んでいる、短い、複数亀裂
309.80	~ 310.00	0.20	11-2f8	亀裂	×	複数亀裂
			11-2i-v3	インタクトV	○	亀裂側面、欠損部あり
416.05	~ 416.50	0.45	11-3i1	インタクト	○	
			11-3i2	インタクト	○	短い
416.50	~ 417.00	0.50	11-3i-v	インタクトV	×	欠損部あり、複数亀裂
			11-3i-h1	インタクトH	○	
			11-3i-h2	インタクトH	○	
			11-3i3	インタクト	○	側面に欠損部あり
417.00	~ 417.50	0.50	-	-	-	元コア亀裂開口、コア抜き不能
			11-4i-v	インタクトV	○	
446.10	~ 446.90	0.80	11-4i-h1	インタクトH	○	
			11-4i	インタクト	○	
			11-4i-h2	インタクトH	○	
			-	-	-	整形時に崩壊
			11-4f1	亀裂	○	短い
			11-4f2	亀裂	×	亀裂側面

(状態 : ○ 良好, × 不良)

Table 3.1-7 試験試料一覧（亀裂、インタクト、異方性試料組合せ）

地層名	深度	トレーサー試験			透水試験	
		亀裂	インタクト		インタクト	
			水平	垂直	水平	垂直
稚内層	150m付近	9-2f3	9-2i1	-	-	-
	250m付近	-	9-1i-h	9-1i-v	9-1i-h	9-1i-v
声問層	100m付近	10-1f1	10-1i-h	10-1i-v1	10-1i-h	10-1i-v1
	300m付近	11-2f1	11-2i-h3	-	-	-
	450m付近	11-4f1	11-4i-h1	-	-	-

Table 3.2-1 試料分析項目一覧

地層名	深度	水銀圧入	一軸圧縮		X線回折
			水平	垂直	
稚内層	150m	○	○	○	○
	200m	○	-	-	-
	250m	○	○	-	-

Table 3.2-2 コア試料一軸圧縮試験結果一覧

深度 (m)			単位体積 重量 (kN/m ³)	一軸圧縮試験											
				一軸圧縮 強度 (MPa)		静弾性 係数 (外部) (MPa)		静弾性 係数 (ケージ) (MPa)		破壊 ひずみ (%)		静弾性比			
HDB-9 (150)	166.00 - 166.80	水平	18.1	10.77	10.81	1125	1108	1560	1516	0.97	1.04	0.107	0.147		
			18.2	18.1		841		1378		1.05		0.165			
			18.1	15.15		1357		1611		1.11		0.169			
			18.2	7.21		1312		2421		0.69		0.238			
			18.5	18.3		5.29	6.25	932	1094	1224	1971	0.61	0.60	0.255	0.227
			18.2	4.84		1038		2269		0.50		0.187			
		垂直	18.8	18.18		1084		1520		1.90		0.237			
			18.7	17.50		1088		1493		1.79		0.216			
			18.6	16.67		1106		1690		1.62		0.243			
HDB-9 (250)	253.50 - 254.00	コア 軸方 向	18.8	17.84		1093		1568		1.77					
			18.7	17.50		1088		1493		1.79					
			18.6	16.67		1106		1690		1.62					

Table 3.2-3 X線分析結果一覧（稚内層試料：150m付近）

試料名	シリカ鉱物				長石				沸石		粘土鉱物			備考	
	石英	非晶質 オパール オパール A	オパール C T	トリジマイト ストバライト	カリ長石	斜長石	菱鉄鉱	黃鉄鉱	石膏	濁沸石	斜 ブチロル 沸石	スメクタイト	緑泥石	雲母類	カオリソ
稚内層150m	△		○			△	△	△			△	△	△		

凡例：△ 少量，○ 中量

Table 3.2-4 水銀圧入試験結果一覧

孔名	深度 (m)	空隙率 (%)	累積細孔 体積 (mL/g)	累積細孔 比表面積 (m ² /g)	嵩密度 (g/cm ³)	真密度 (g/cm ³)	試料重量 (g)
HDB-9孔	150	52.6	0.523	23.8	1.006	2.121	0.492
	200	54.4	0.544	26	1.001	2.197	0.612
	250	53	0.543	27.3	0.977	2.081	0.552

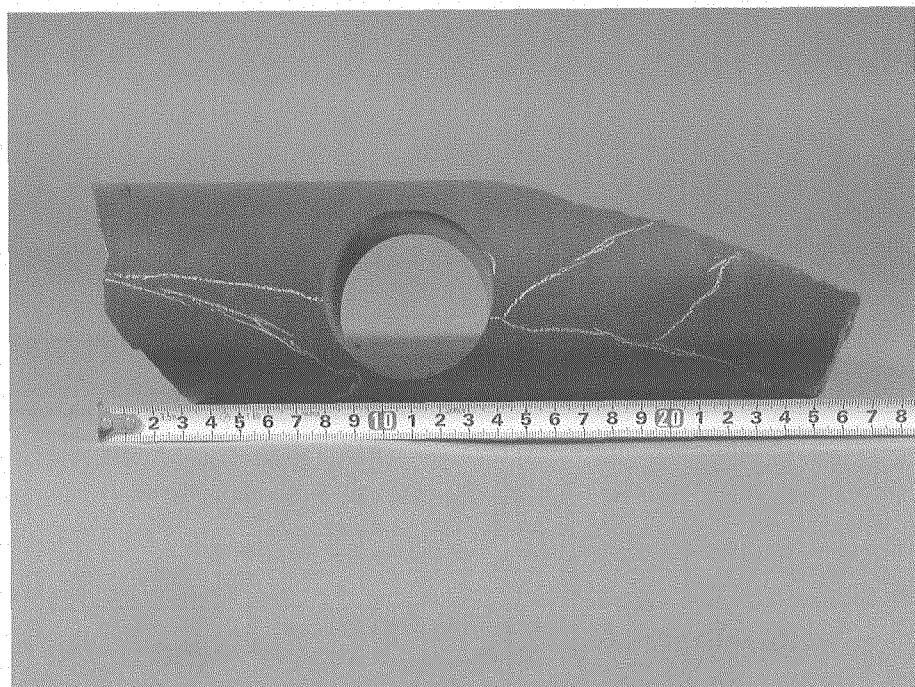


Photo 3.1- 1 龜裂試料再コアリング方向

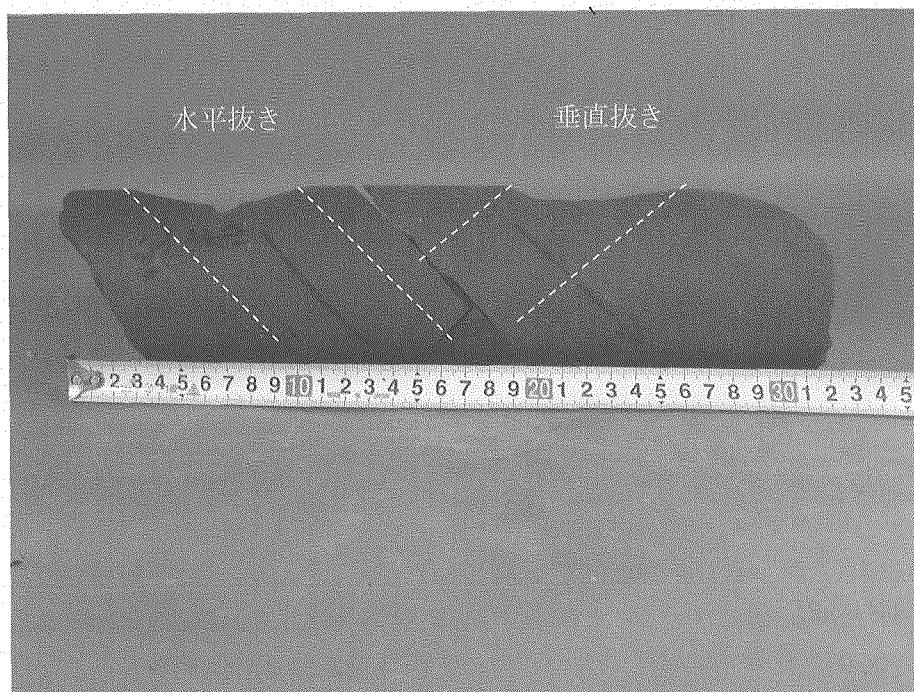


Photo 3.1- 2 インタクト異方性試料再コアリング方向

9-1f
深度 230.65~230.75m

9-1i-h
深度 230.75~231.00m

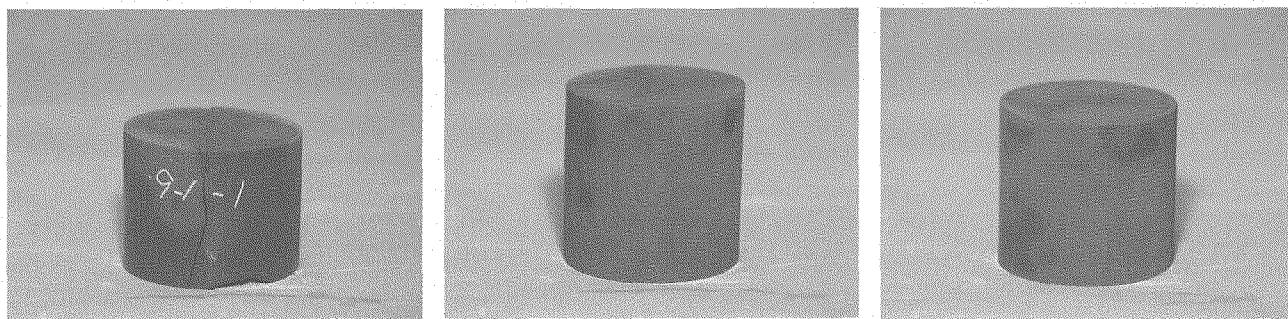
9-1i
深度 230.75~231.00m

試料寸法	$\phi = 49.03\text{mm}$ $L=38.85\text{mm}$
試料重量	131.22g
亀裂の状況	複数亀裂

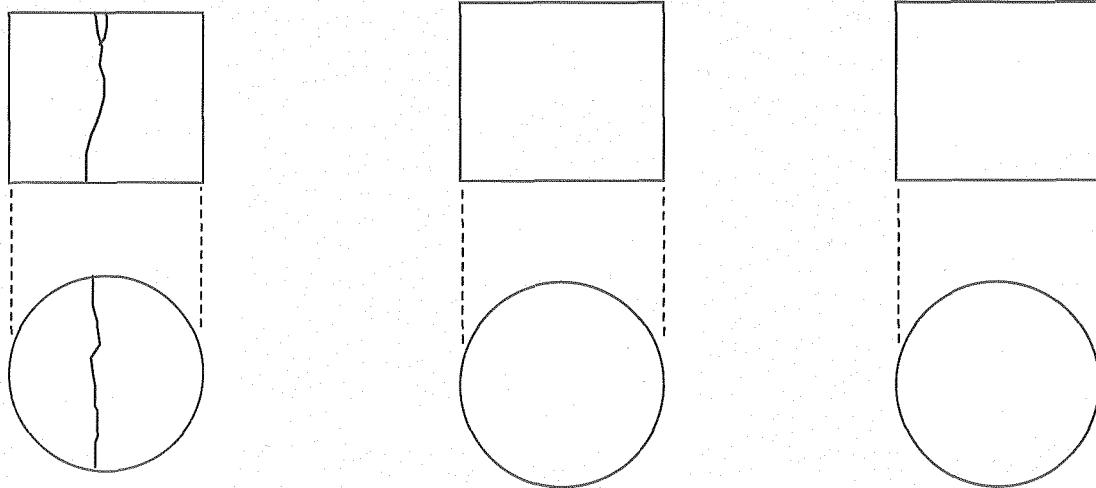
試料寸法	$\phi = 49.04\text{mm}$ $L=49.18\text{mm}$
試料重量	168.85g
亀裂の状況	亀裂なし

試料寸法	$\phi = 49.06\text{mm}$ $L=45.14\text{mm}$
試料重量	153.82
亀裂の状況	亀裂なし

(a) 試料諸元



(b) 写真



(c) スケッチ

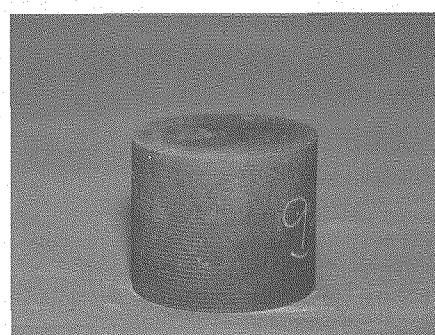
Photo 3.1-3 整形後の試験用試料（試料 9-1 : HDB-9 孔 250m 付近）

9-1i-v

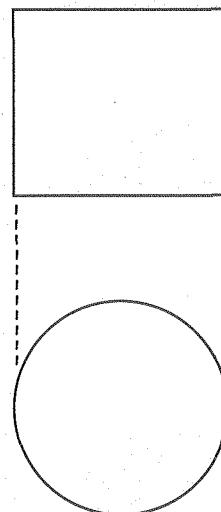
深度 230.75~231.00m

試料寸法	$\phi = 49.03\text{mm}$ $L = 41.18\text{mm}$
試料重量	140.67g
亀裂の状況	亀裂なし

(a) 試料諸元



(b) 写 真



(c) スケッチ

Photo 3.1-4 整形後の試験用試料（試料 9-1 : HDB-9 孔 250m 付近 続き）

9-2f1

深度 167.00～167.70m

9-2i1

深度 167.00～167.70m

9-2i2

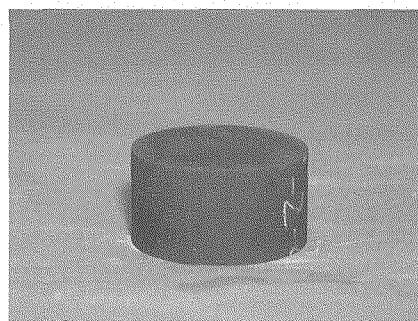
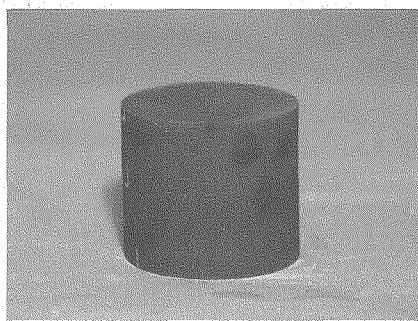
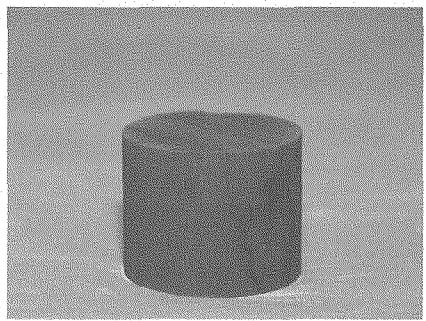
深度 167.00～167.70m

試料寸法	$\phi = 49.04\text{mm}$ $L = 39.70\text{mm}$
試料重量	138.22g
亀裂の状況	複数亀裂

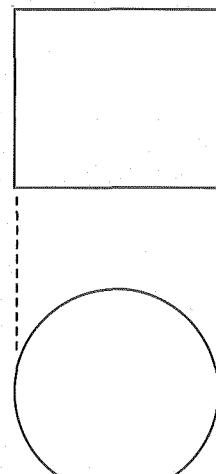
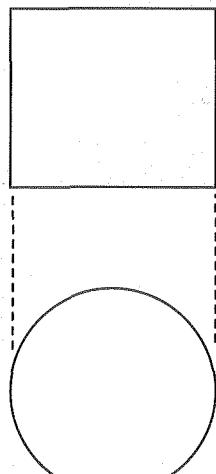
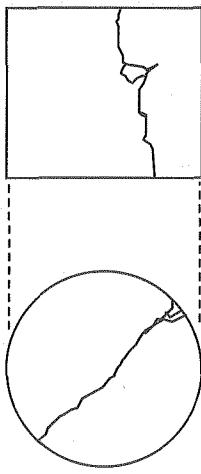
試料寸法	$\phi = 49.04\text{mm}$ $L = 43.50\text{mm}$
試料重量	152.35g
亀裂の状況	亀裂なし

試料寸法	$\phi = 49.06\text{mm}$ $L = 26.51\text{mm}$
試料重量	92.96g
亀裂の状況	亀裂なし

(a) 試料諸元



(b) 写 真



(c) スケッチ

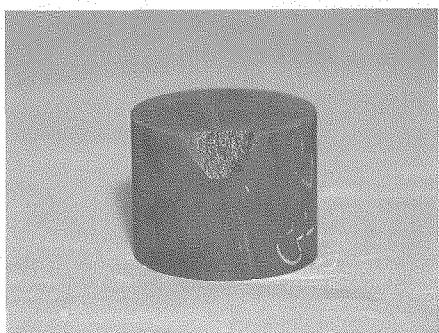
Photo 3.1-5 整形後の試験用試料（試料 9-2 : HDB-9 孔 150m 付近）

9-2f3

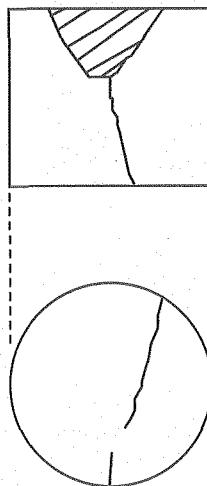
深度 167.00～167.70m

試料寸法	$\phi = 49.05\text{mm}$ $L = 38.72\text{mm}$
試料重量	136.30g
亀裂の状況	複数亀裂

(a) 試料諸元



(b) 写真



(c) スケッチ

Photo 3.1-6 整形後の試験用試料（試料 9-2 : HDB-9 孔 150m 付近 続き）

10-1f1
深度 82.00~82.40m

試料寸法	$\phi=48.92\text{mm}$ $L=51.68\text{mm}$
試料重量	172.51g
亀裂の状況	密着・充填物なし

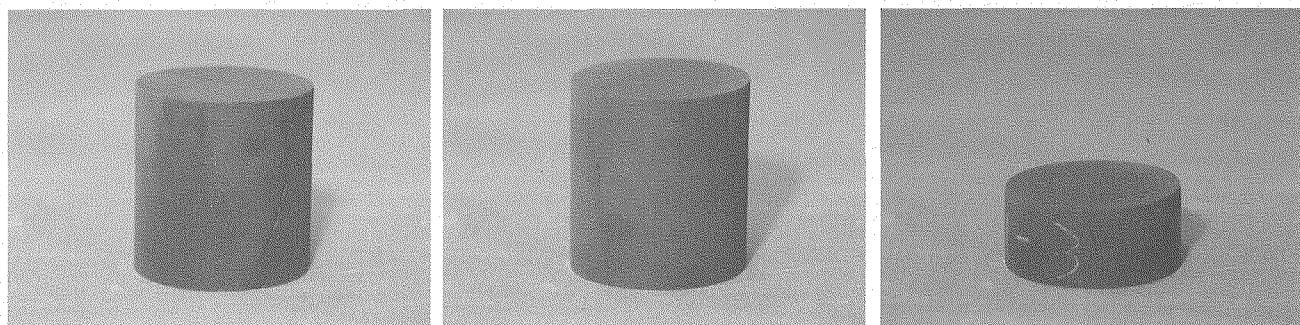
10-1f2
深度 82.00~82.40m

試料寸法	$\phi=48.91\text{mm}$ $L=52.77\text{mm}$
試料重量	176.97g
亀裂の状況	密着・充填物なし

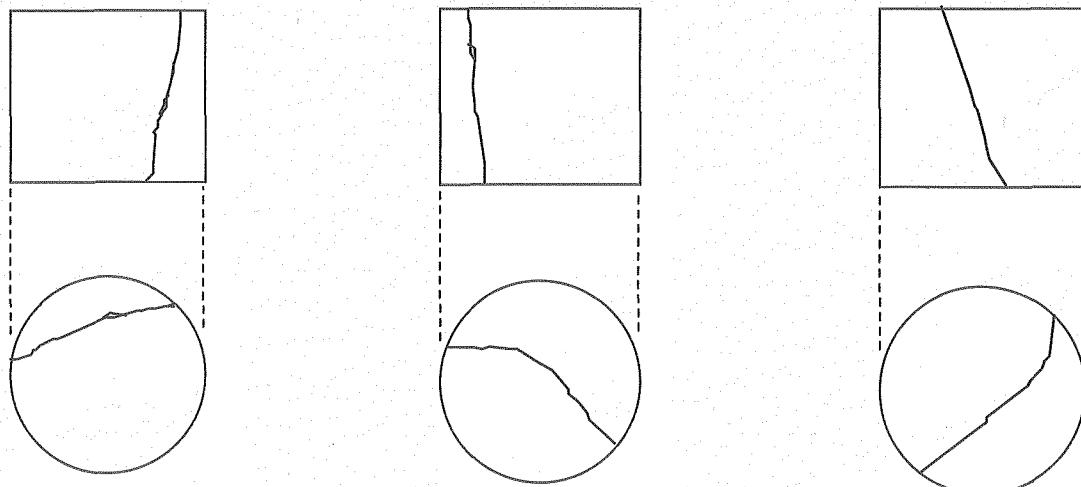
10-1f3
深度 82.00~82.40m

試料寸法	$\phi=49.00\text{mm}$ $L=22.48\text{mm}$
試料重量	74.91g
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

Photo 3.1-7 整形後の試験用試料（試料 10-1 : HDB-10 孔 100m 付近）

10-1f4
深度 82.00～82.40m

試料寸法	$\phi = 48.99\text{mm}$ $L = 44.18\text{mm}$
試料重量	147.99g
亀裂の状況	亀裂側面

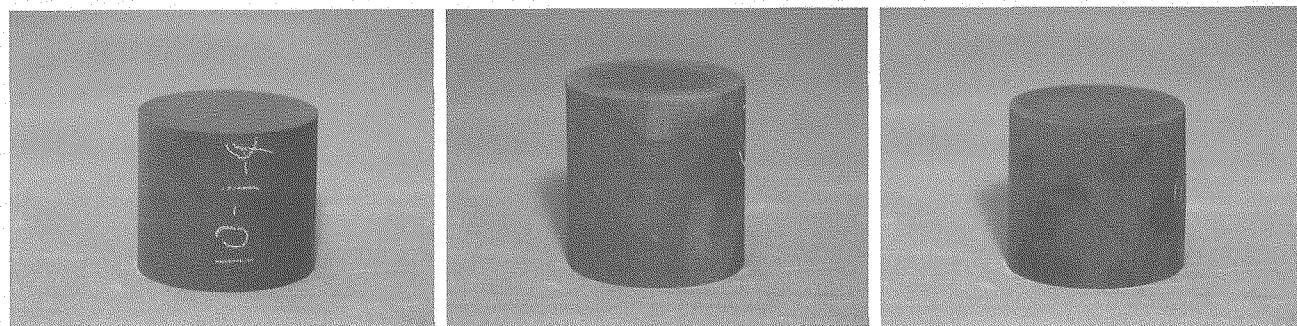
10-1f5
深度 83.30～83.60m

試料寸法	$\phi = 48.91\text{mm}$ $L = 52.04\text{mm}$
試料重量	180.23g
亀裂の状況	複数亀裂

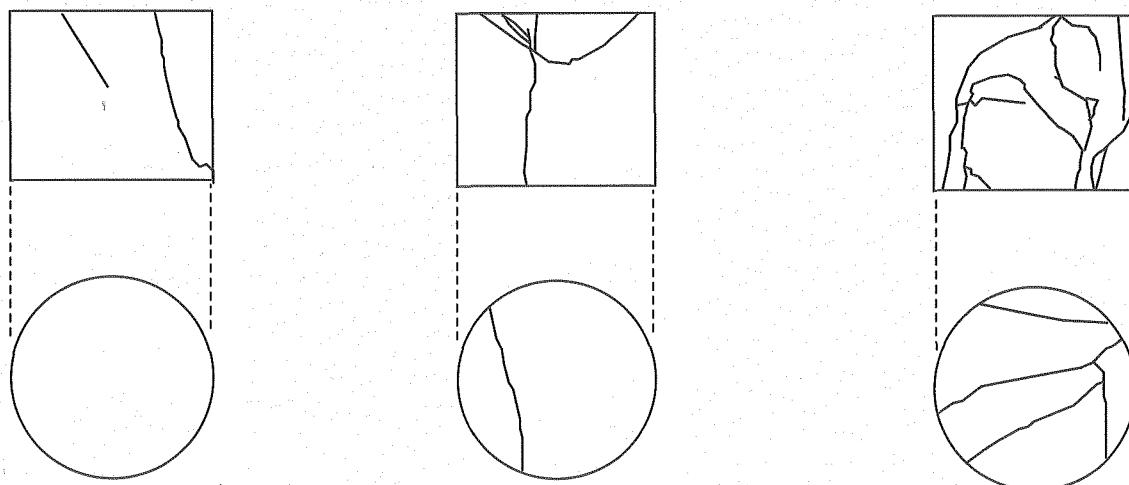
10-1f6
深度 83.30～83.60m

試料寸法	$\phi = 48.63\text{mm}$ $L = 44.74\text{mm}$
試料重量	155.48g
亀裂の状況	複数亀裂

(a) 試料諸元



(b) 写 真



(c) スケッチ

Photo 3.1-8 整形後の試験用試料（試料 10-1 : HDB-10 孔 100m 付近 続き）

10-1f7
深度 83.30～83.60m

10-1f8
深度 83.30～83.60m

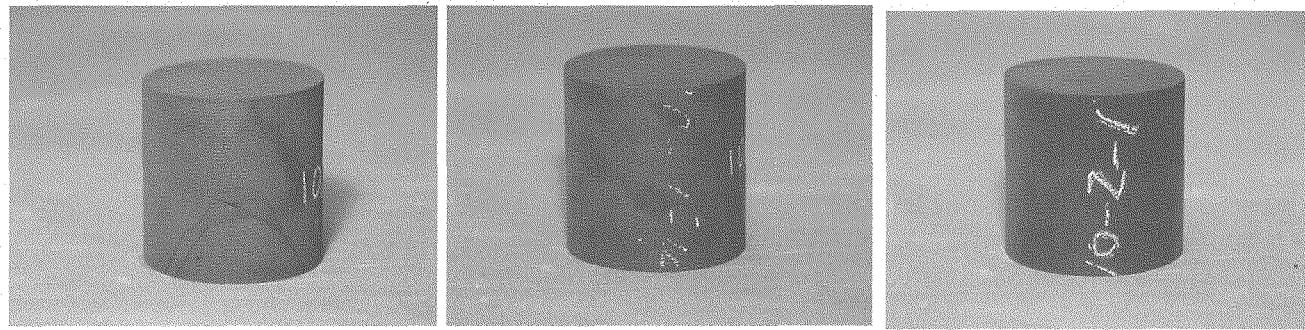
10-1i-h
深度 91.50～92.00m

試料寸法	$\phi = 48.96\text{mm}$ $L=50.80\text{mm}$
試料重量	175.69g
亀裂の状況	亀裂側面

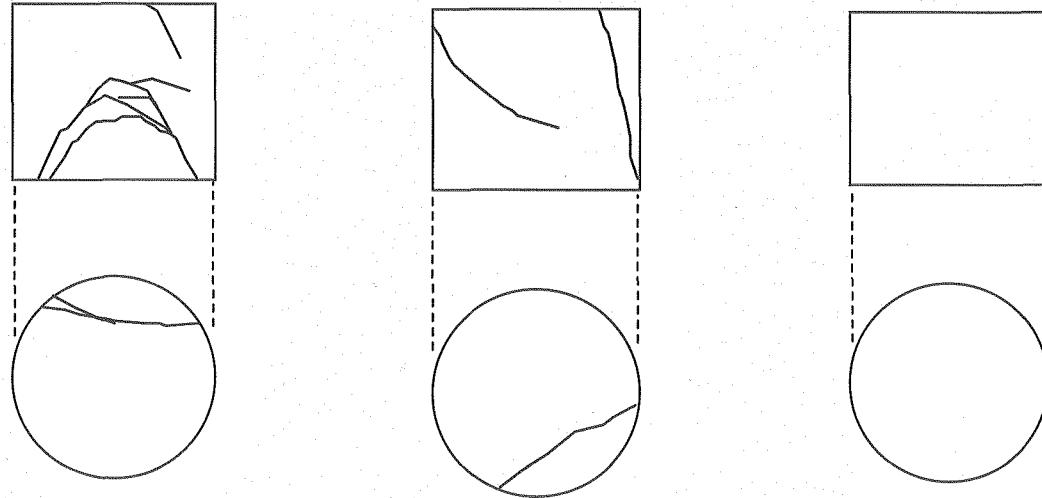
試料寸法	$\phi = 48.95\text{mm}$ $L=50.39\text{mm}$
試料重量	173.52g
亀裂の状況	複数亀裂

試料寸法	$\phi = 48.99\text{mm}$ $L=49.16\text{mm}$
試料重量	164.00g
亀裂の状況	亀裂なし

(a) 試料諸元



(b) 写 真



(c) スケッチ

Photo 3.1-9 整形後の試験用試料（試料 10-1 : HDB-10 孔 100m 付近 続き）

10-1i-hv1
深度 91.50~92.00m

試料寸法	$\phi = 48.92\text{mm}$ $L=49.63\text{mm}$
試料重量	164.73g
亀裂の状況	亀裂なし

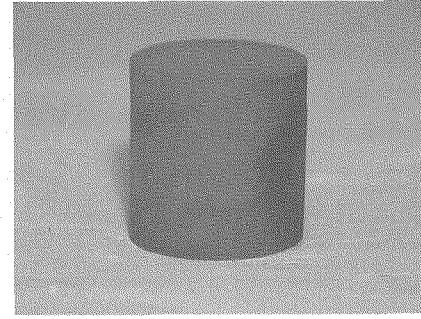
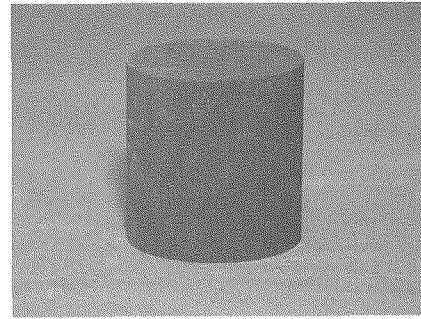
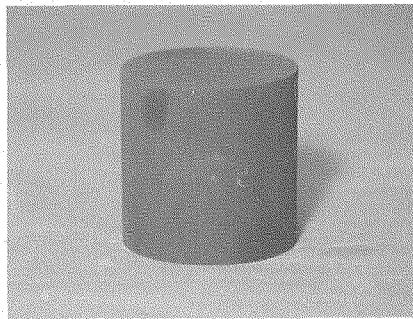
10-1i
深度 91.50~92.00m

試料寸法	$\phi = 48.93\text{mm}$ $L=51.18\text{mm}$
試料重量	169.17g
亀裂の状況	亀裂なし

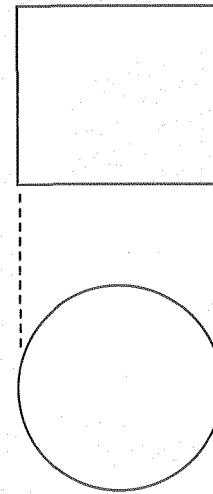
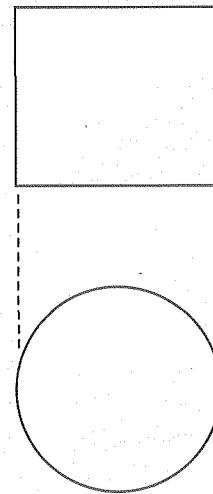
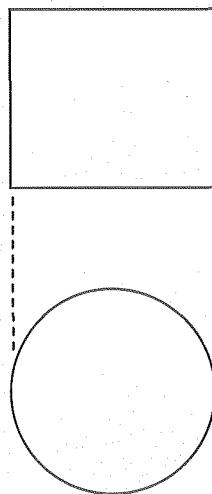
10-1i-v2
深度 91.50~92.00m

試料寸法	$\phi = 48.96\text{mm}$ $L=50.28\text{mm}$
試料重量	167.00g
亀裂の状況	亀裂なし

(a) 試料諸元



(b) 写 真



(c) スケッチ

Photo 3.1-10 整形後の試験用試料（試料 10-1 : HDB-10 孔 100m 付近 続き）

10-2i-h1
深度 153.50～154.00m

10-2-f1
深度 153.50～154.00m

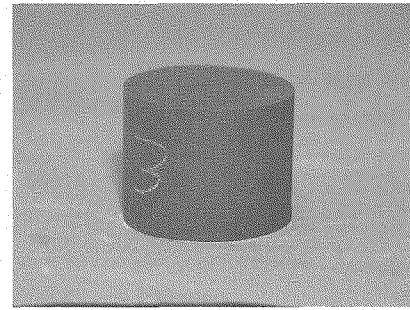
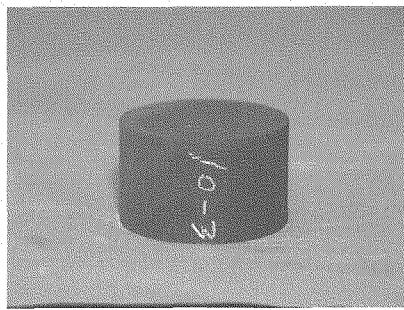
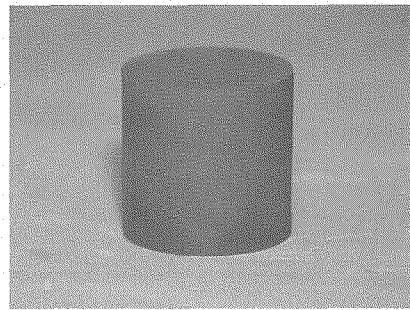
10-2-f2
深度 153.50～154.00m

試料寸法	$\phi = 48.97\text{mm}$ $L=48.43\text{mm}$
試料重量	148.38g
亀裂の状況	亀裂なし

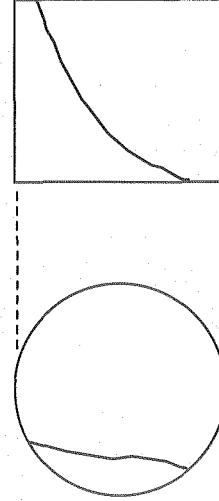
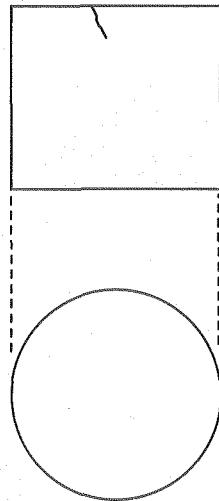
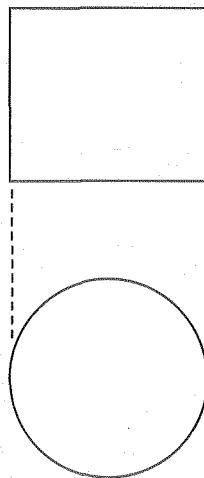
試料寸法	$\phi = 49.00\text{mm}$ $L=29.89\text{mm}$
試料重量	91.57g
亀裂の状況	密着・充填物なし

試料寸法	$\phi = 48.96\text{mm}$ $L=38.64\text{mm}$
試料重量	118.31g
亀裂の状況	亀裂側面

(a) 試料諸元



(b) 写 真



(c) スケッチ

Photo 3.1-11 整形後の試験用試料（試料 10-2 : HDB-10 孔 150m 付近）

10-2i-v1
深度 153.50～154.00m

試料寸法	$\phi=48.97\text{mm}$ $L=49.88\text{mm}$
試料重量	153.64g
亀裂の状況	亀裂なし

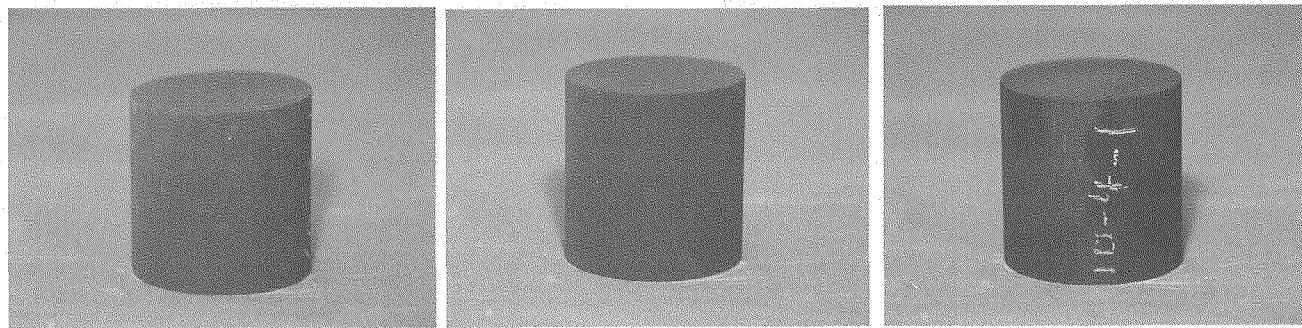
10-2i-h2
深度 153.50～154.00m

試料寸法	$\phi=48.99\text{mm}$ $L=50.83\text{mm}$
試料重量	156.49g
亀裂の状況	亀裂なし

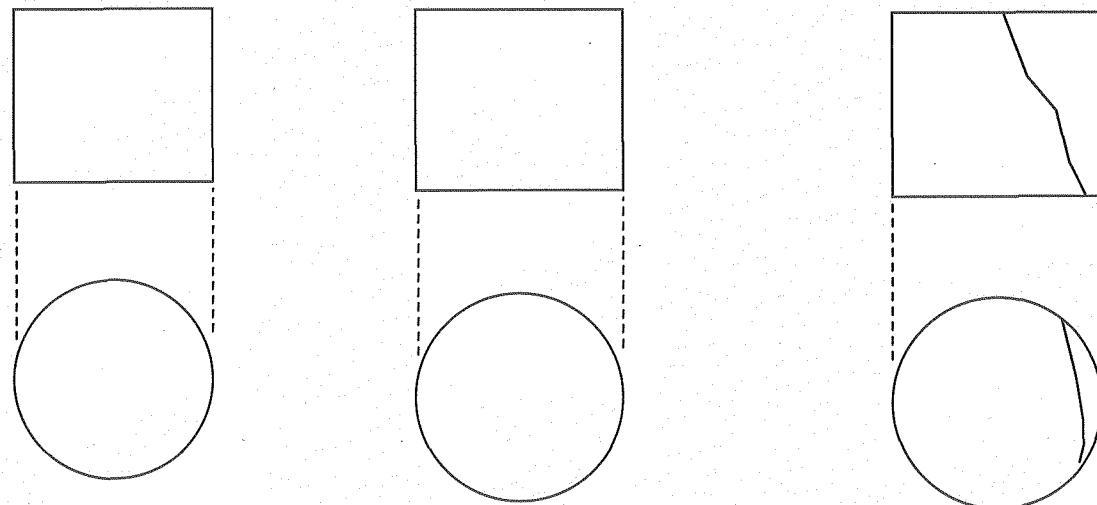
10-2f3
深度 151.60～151.90m

試料寸法	$\phi=48.95\text{mm}$ $L=50.68\text{mm}$
試料重量	154.76g
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

Photo 3.1-12 整形後の試験用試料（試料 10-2 : HDB-10 孔 150m 付近 続き）

10-2f4
深度 151.60～151.90m

10-2i-h3
深度 146.30～146.65m

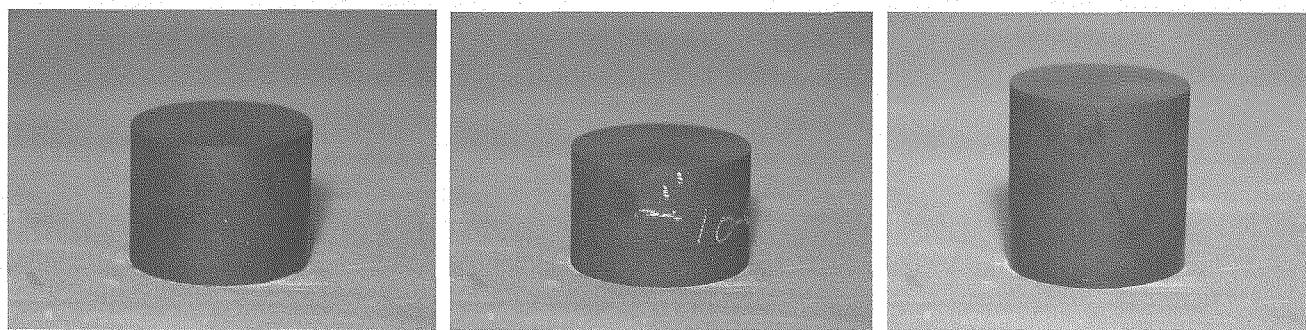
10-2i-h4
深度 146.30～146.65m

試料寸法	$\phi = 48.97\text{mm}$ $L=37.68\text{mm}$
試料重量	117.08g
亀裂の状況	亀裂なし

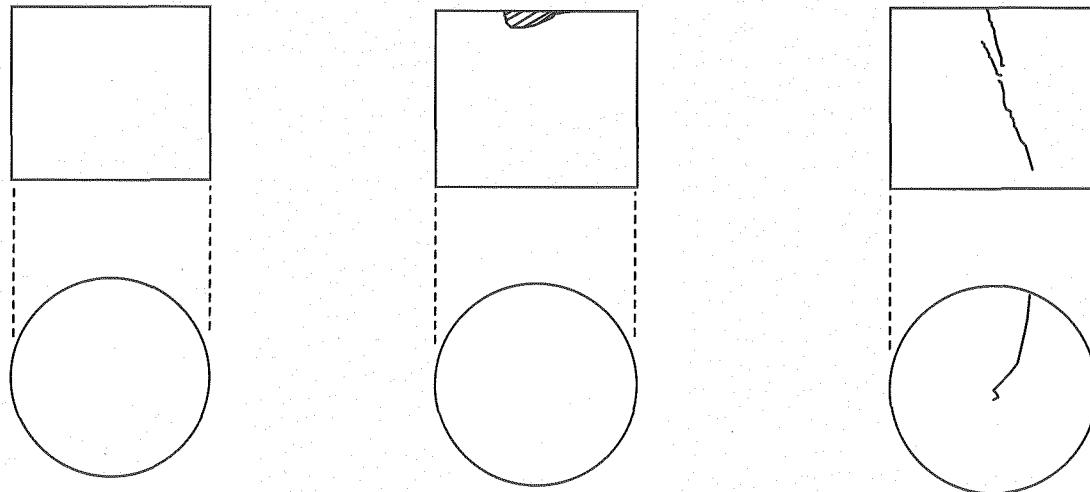
試料寸法	$\phi = 48.98\text{mm}$ $L=32.71\text{mm}$
試料重量	100.89g
亀裂の状況	亀裂なし

試料寸法	$\phi = 48.93\text{mm}$ $L=50.53\text{mm}$
試料重量	155.95g
亀裂の状況	複数亀裂

(a) 試料諸元



(b) 写 真



(c) スケッチ

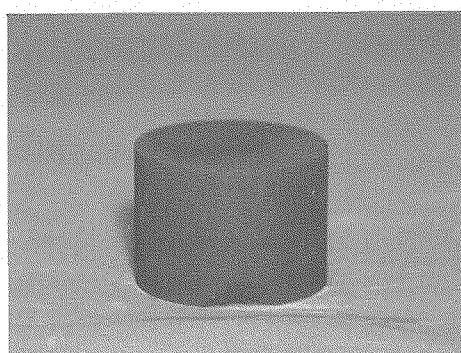
Photo 3.1-13 整形後の試験用試料（試料 10-2 : HDB-10 孔 150m 付近 続き）

10-2i-v2

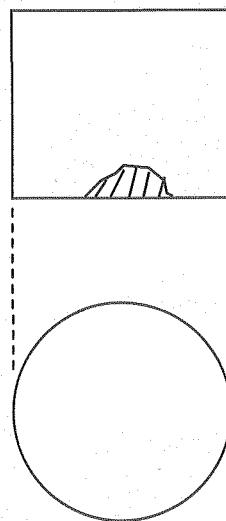
深度 146.30～146.65m

試料寸法	$\phi = 48.06\text{mm}$ $L=35.72\text{mm}$
試料重量	111.02g
亀裂の状況	亀裂なし

(a) 試料諸元



(b) 写真



(c) スケッチ

Photo 3.1-14 整形後の試験用試料（試料 10-2 : HDB-10 孔 150m 付近 続き）

11-1f1

深度 85.30～85.80m

11-1f2

深度 85.30～85.80m

11-1f3

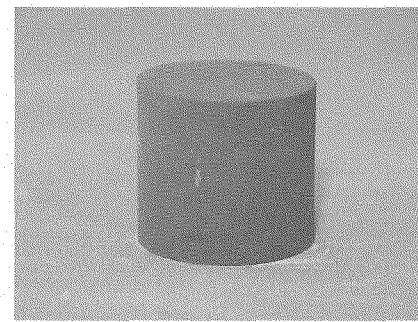
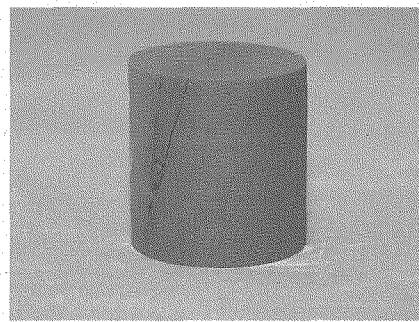
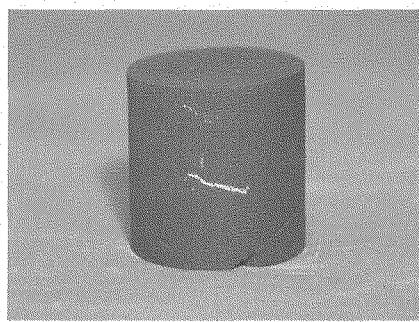
深度 85.30～85.80m

試料寸法	$\phi = 48.92\text{mm}$ $L=50.59\text{mm}$
試料重量	144.80g
亀裂の状況	亀裂側面

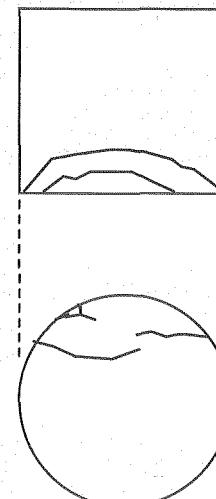
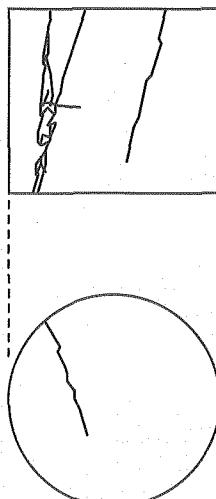
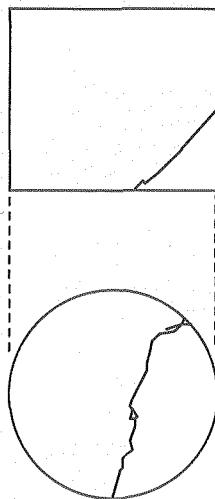
試料寸法	$\phi = 48.83\text{mm}$ $L=51.45\text{mm}$
試料重量	146.95g
亀裂の状況	複数亀裂

試料寸法	$\phi = 48.90\text{mm}$ $L=45.21\text{mm}$
試料重量	129.72g
亀裂の状況	複数亀裂

(a) 試料諸元



(b) 写 真



(c) スケッチ

Photo 3.1-15 整形後の試験用試料（試料 11-1 : HDB-11 孔 100m 付近）

11-1f4

深度 85.30~85.80m

11-1f5

深度 87.00~87.35m

11-1i1

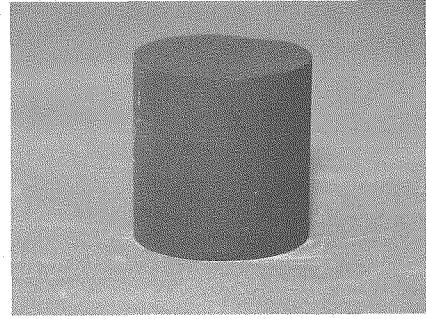
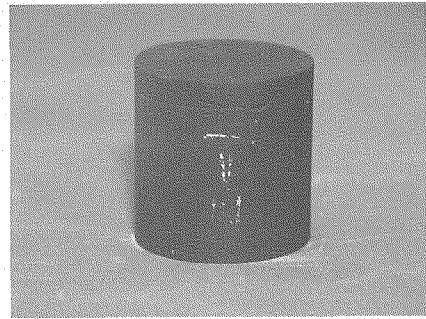
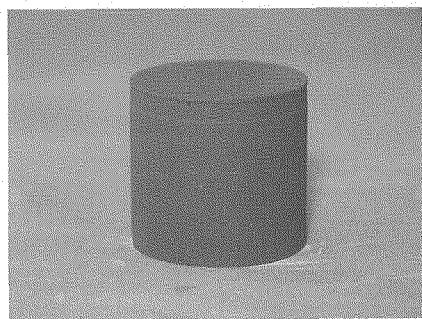
深度 87.00~87.35m

試料寸法	$\phi = 48.97\text{mm}$ $L=46.30\text{mm}$
試料重量	131.37g
亀裂の状況	複数亀裂

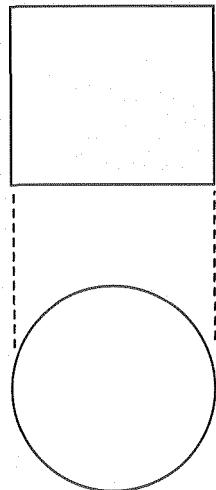
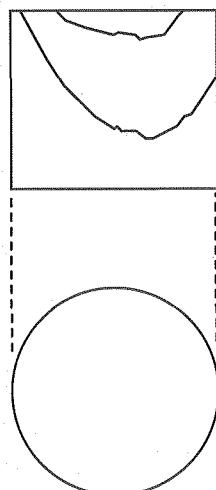
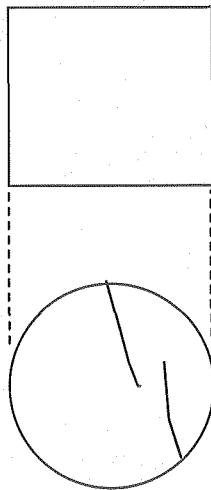
試料寸法	$\phi = 48.89\text{mm}$ $L=50.54\text{mm}$
試料重量	143.02g
亀裂の状況	亀裂側面

試料寸法	$\phi = 48.88\text{mm}$ $L=50.97\text{mm}$
試料重量	144.30g
亀裂の状況	亀裂なし

(a) 試料諸元



(b) 写 真



(c) スケッチ

Photo 3.1-16 整形後の試験用試料（試料 11-1 : HDB-11 孔 100m 付近 続き）

11-1i2

深度 85.30~85.80m

11-1i3

深度 129.40~129.70m

11-1i-v1

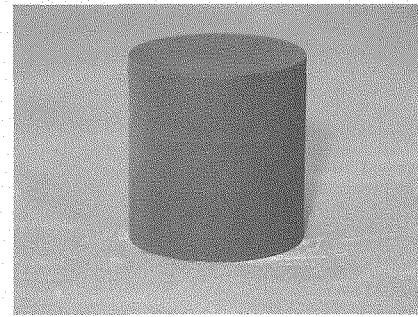
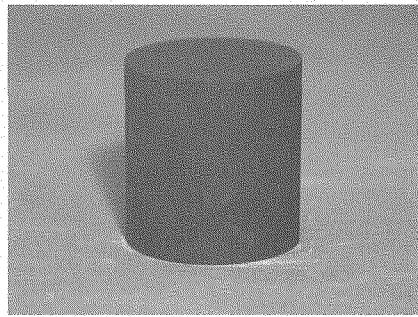
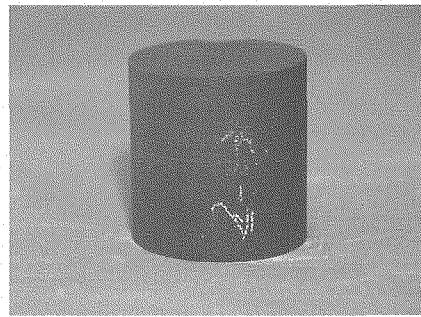
深度 129.40~129.70m

試料寸法	$\phi = 48.89\text{mm}$ $L = 51.39\text{mm}$
試料重量	145.56g
亀裂の状況	亀裂なし

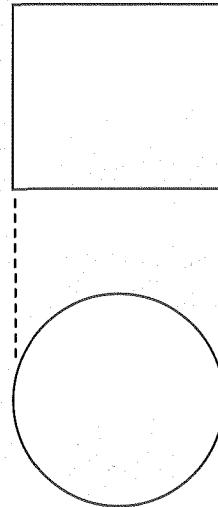
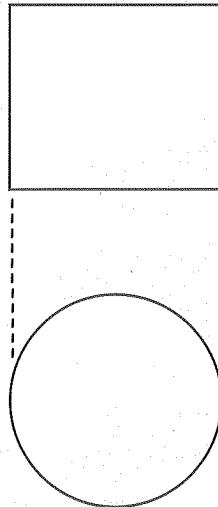
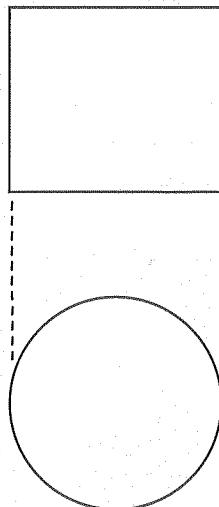
試料寸法	$\phi = 48.83\text{mm}$ $L = 51.67\text{mm}$
試料重量	148.58g
亀裂の状況	亀裂なし

試料寸法	$\phi = 52.08\text{mm}$ $L = 48.92\text{mm}$
試料重量	149.92g
亀裂の状況	亀裂なし

(a) 試料諸元



(b) 写 真



(c) スケッチ

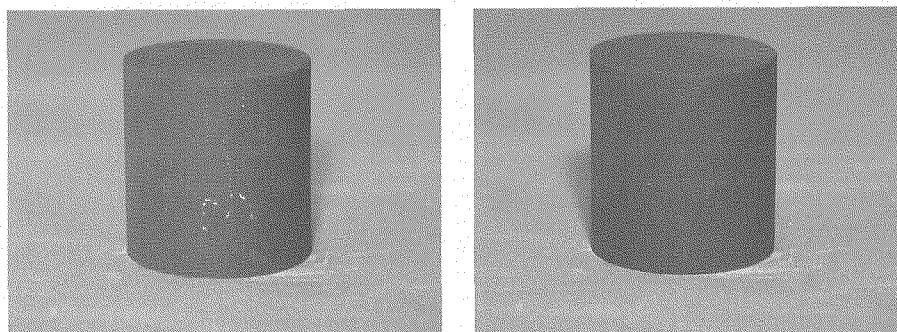
Photo 3.1-17 整形後の試験用試料（試料 11-1 : HDB-11 孔 100m 付近 続き）

11-1i-h 深度 129.40~129.70m 11-1i-v2 深度 129.40~129.70m

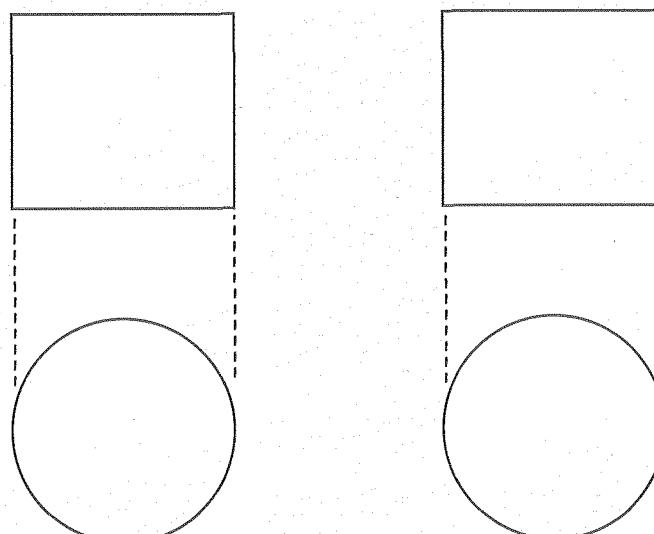
試料寸法	$\phi = 48.93\text{mm}$ $L=51.90\text{mm}$
試料重量	151.66g
亀裂の状況	亀裂なし

試料寸法	$\phi = 48.94\text{mm}$ $L=52.49\text{mm}$
試料重量	152.28g
亀裂の状況	亀裂なし

(a) 試料諸元



(b) 写 真



(c) スケッチ

Photo 3.1-18 整形後の試験用試料（試料 11-1 : HDB-11 孔 100m 付近 続き）

11-2i-h1

深度 283.00～283.45m

11-2i-v1

深度 283.00～283.45m

11-2i-h2

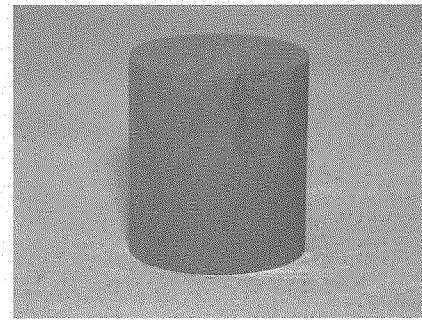
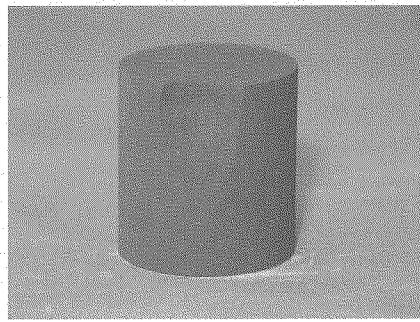
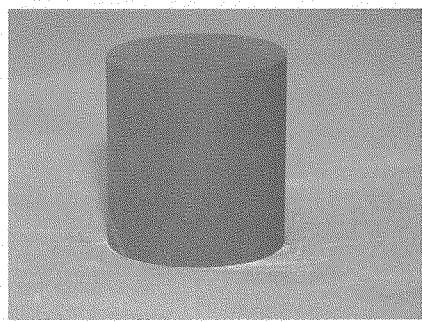
深度 283.00～283.45m

試料寸法	$\phi=48.85\text{mm}$ $L=53.22\text{mm}$
試料重量	149.03g
亀裂の状況	亀裂なし

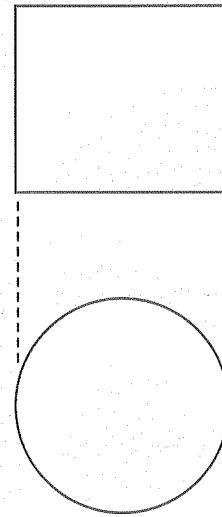
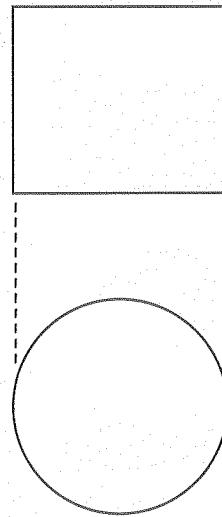
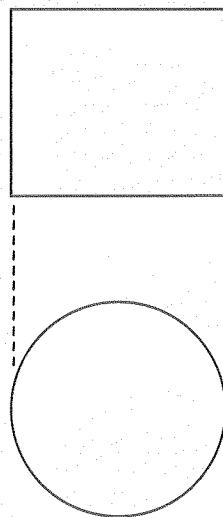
試料寸法	$\phi=48.92\text{mm}$ $L=52.77\text{mm}$
試料重量	146.09g
亀裂の状況	亀裂なし

試料寸法	$\phi=48.83\text{mm}$ $L=54.85\text{mm}$
試料重量	153.12g
亀裂の状況	亀裂なし

(a) 試料諸元



(b) 写真



(c) スケッチ

Photo 3.1-19 整形後の試験用試料（試料 11-2 : HDB-11 孔 300m 付近）

11-2f1

深度 283.00~283.45m

11-2f2

深度 284.60~284.90m

11-2f3

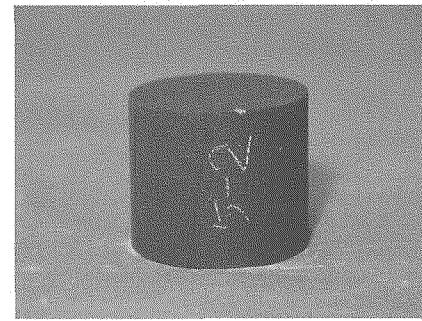
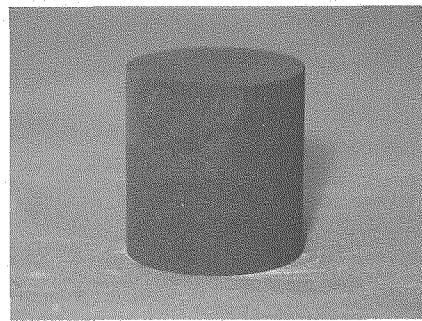
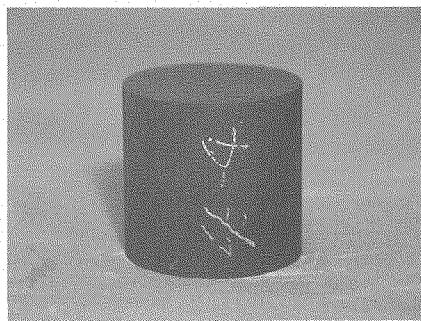
深度 284.60~284.90m

試料寸法	$\phi = 48.91\text{mm}$ $L=48.10\text{mm}$
試料重量	136.12g
亀裂の状況	密着・充填物なし

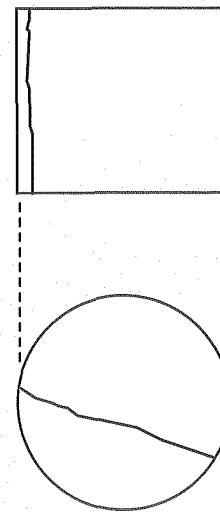
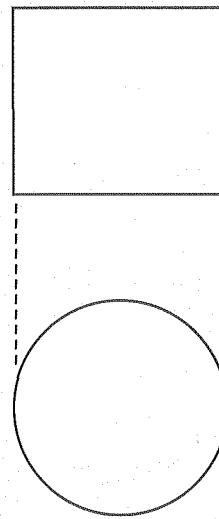
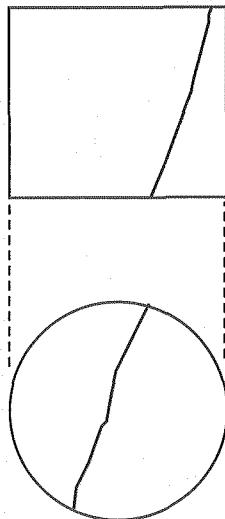
試料寸法	$\phi = 48.84\text{mm}$ $L=51.68\text{mm}$
試料重量	142.62g
亀裂の状況	密着・充填物なし

試料寸法	$\phi = 48.55\text{mm}$ $L=42.29\text{mm}$
試料重量	117.56g
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

Photo 3.1-20 整形後の試験用試料（試料 11-2 : HDB-11 孔 300m 付近 続き）

11-2i-v2

深度 292.10~292.30m

11-2f4

深度 292.10~292.30m

11-2i-h3

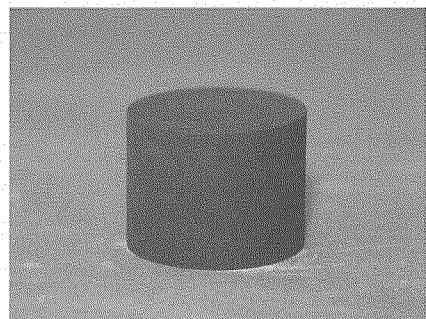
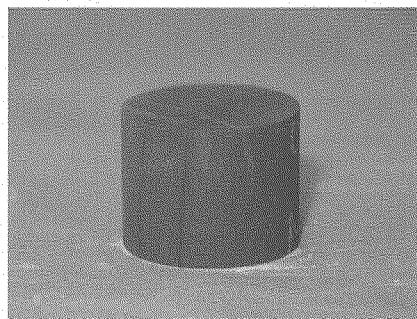
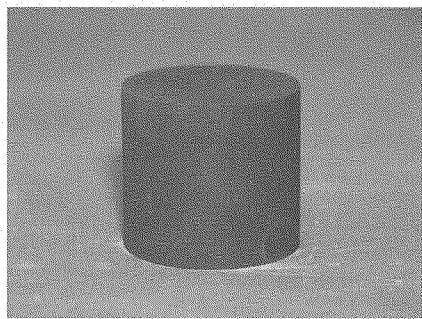
深度 293.60~293.80m

試料寸法	$\phi = 48.94\text{mm}$ $L = 44.88\text{mm}$
試料重量	134.53g
亀裂の状況	亀裂なし

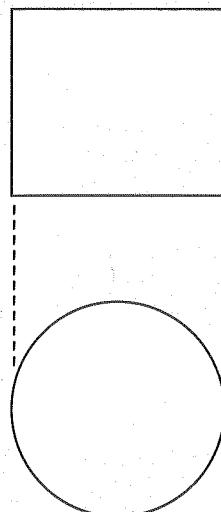
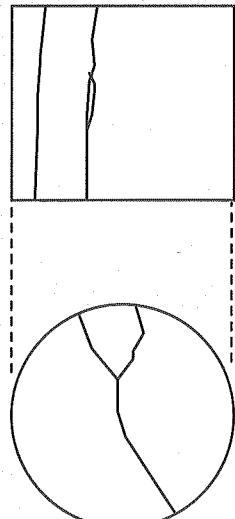
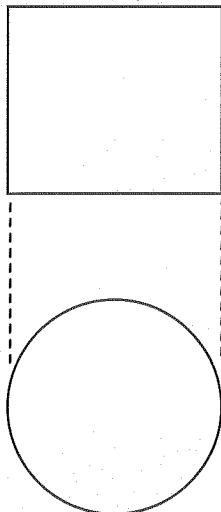
試料寸法	$\phi = 48.98\text{mm}$ $L = 38.54\text{mm}$
試料重量	115.61g
亀裂の状況	複数亀裂

試料寸法	$\phi = 49.01\text{mm}$ $L = 37.88\text{mm}$
試料重量	112.45g
亀裂の状況	亀裂なし

(a) 試料諸元



(b) 写 真



(c) スケッチ

Photo 3.1-21 整形後の試験用試料（試料 11-2 : HDB-11 孔 300m 付近 続き）

11-2f5
深度 309.30~309.70m

11-2f6
深度 309.30~309.70m

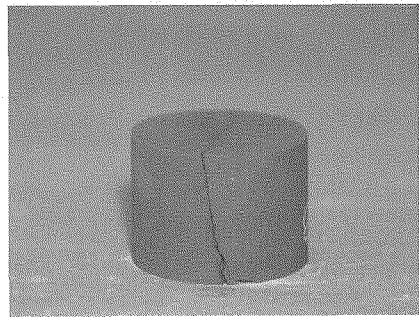
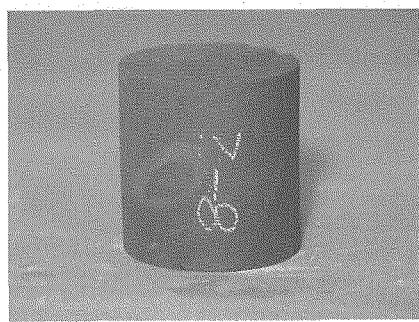
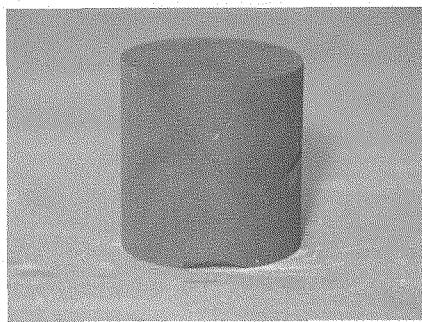
11-2f7
深度 309.30~309.70m

試料寸法	$\phi = 48.96\text{mm}$ $L=51.98\text{mm}$
試料重量	153.71g
亀裂の状況	亀裂側面

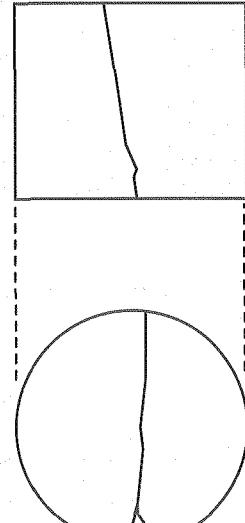
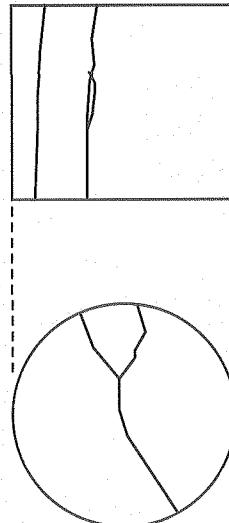
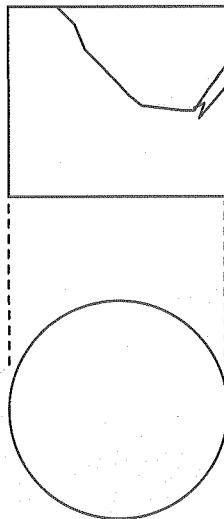
試料寸法	$\phi = 48.89\text{mm}$ $L=51.53\text{mm}$
試料重量	151.12g
亀裂の状況	亀裂側面

試料寸法	$\phi = 48.89\text{mm}$ $L=35.93\text{mm}$
試料重量	105.47g
亀裂の状況	複数亀裂

(a) 試料諸元



(b) 写 真



(c) スケッチ

Photo 3.1-22 整形後の試験用試料（試料 11-2 : HDB-11 孔 300m 付近 続き）

11-2f8

深度 309.8~310.00m

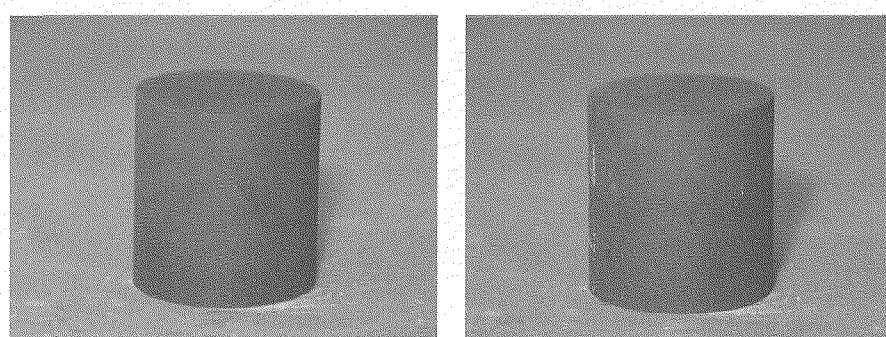
11-2i-v3

深度 309.8~310.00m

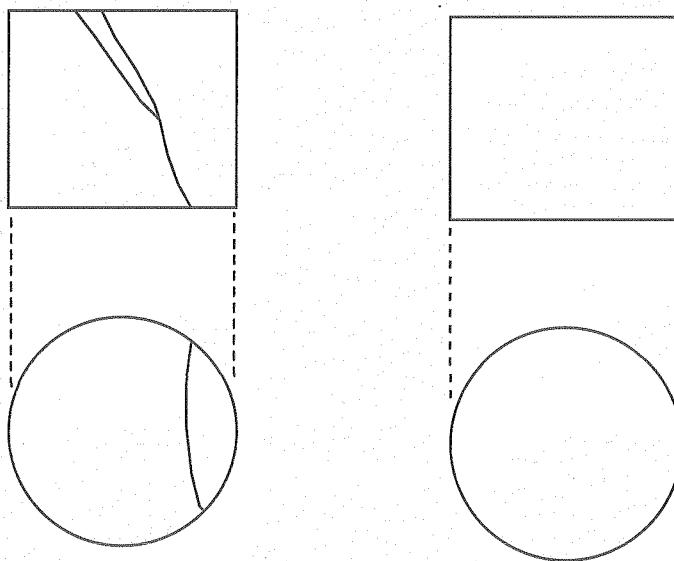
試料寸法	$\phi = 48.85\text{mm}$ $L = 51.84\text{mm}$
試料重量	154.13g
亀裂の状況	亀裂側面

試料寸法	$\phi = 48.86\text{mm}$ $L = 52.31\text{mm}$
試料重量	158.39g
亀裂の状況	亀裂なし

(a) 試料諸元



(b) 写 真



(c) スケッチ

Photo 3.1-23 整形後の試験用試料（試料 11-2 : HDB-11 孔 300m 付近 続き）

11-3i1
深度 416.05~416.50m

11-3i2
深度 416.05~416.50m

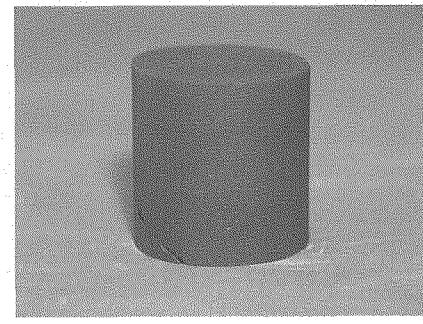
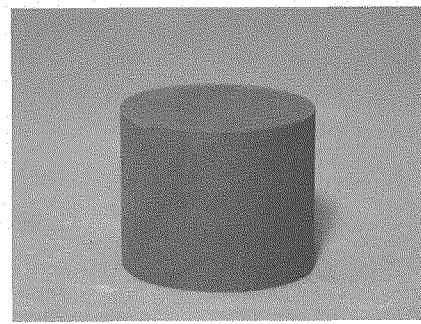
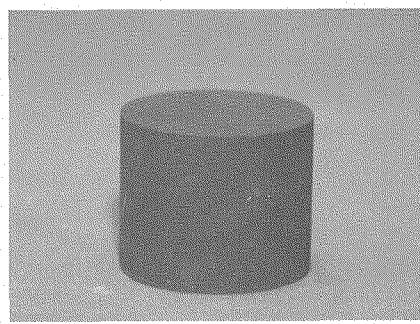
11-3i-v
深度 416.50~417.00m

試料寸法	$\phi = 49.00\text{mm}$ $L=40.09\text{mm}$
試料重量	122.18g
亀裂の状況	亀裂なし

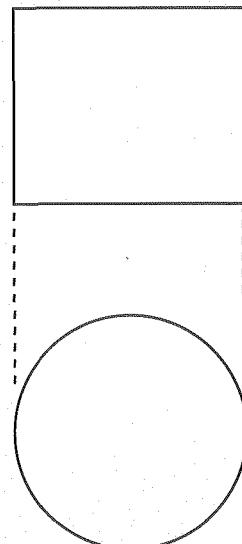
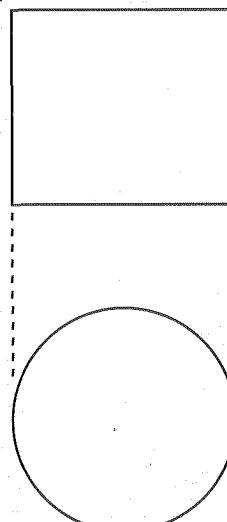
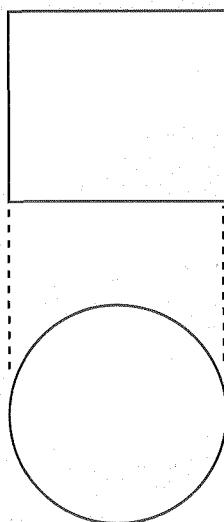
試料寸法	$\phi = 49.07\text{mm}$ $L=40.69\text{mm}$
試料重量	124.15g
亀裂の状況	亀裂なし

試料寸法	$\phi = 49.08\text{mm}$ $L=47.65\text{mm}$
試料重量	143.54g
亀裂の状況	亀裂なし

(a) 試料諸元



(b) 写 真



(c) スケッチ

Photo 3.1-24 整形後の試験用試料（試料 11-3 : HDB-11 孔 400m 付近）

11-3i-h1
深度 416.50～417.00m

11-3i-h2
深度 416.50～417.00m

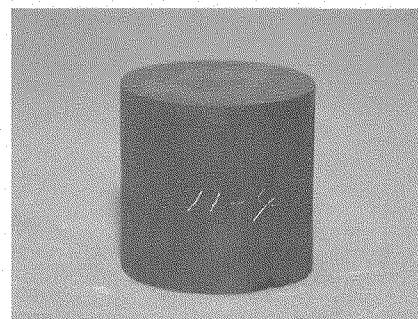
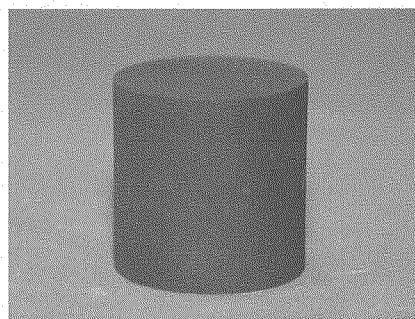
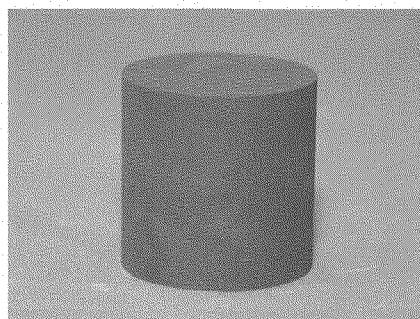
11-3i3
深度 416.50～417.00m

試料寸法	$\phi = 48.97\text{mm}$ $L = 49.59\text{mm}$
試料重量	150.76g
亀裂の状況	亀裂なし

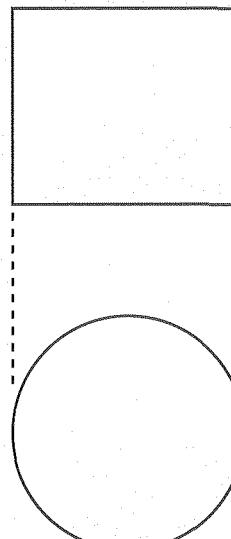
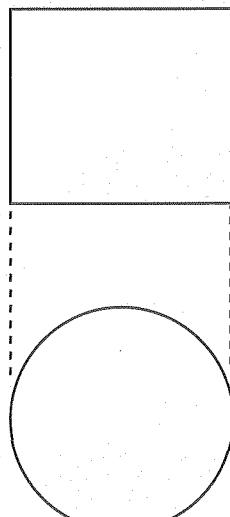
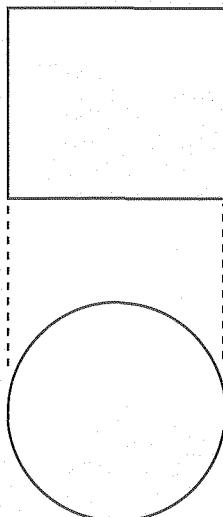
試料寸法	$\phi = 48.98\text{mm}$ $L = 49.55\text{mm}$
試料重量	152.49g
亀裂の状況	亀裂なし

試料寸法	$\phi = 48.97\text{mm}$ $L = 48.10\text{mm}$
試料重量	146.80g
亀裂の状況	亀裂なし

(a) 試料諸元



(b) 写 真



(c) スケッチ

Photo 3.1-25 整形後の試験用試料（試料 11-3 : HDB-11 孔 400m 付近 続き）

11-4i-v
深度 446.10~446.90m

11-4i-h1
深度 446.10~446.90m

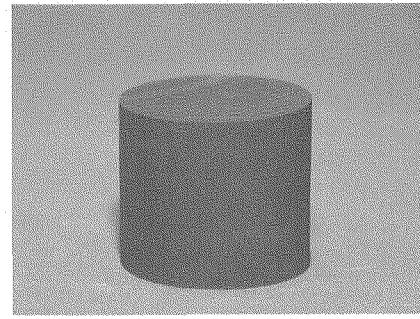
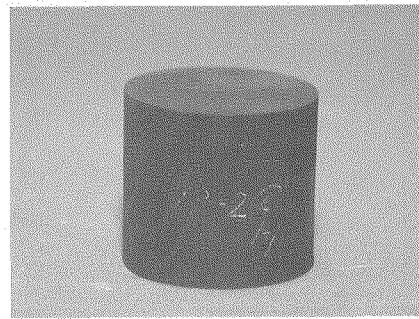
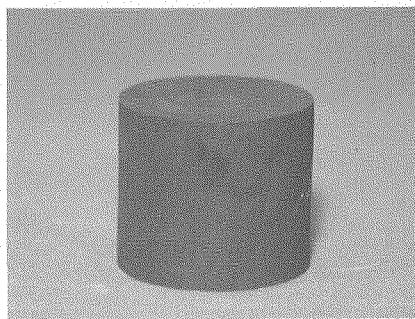
11-4i
深度 446.10~446.90m

試料寸法	$\phi = 49.00\text{mm}$ $L=43.25\text{mm}$
試料重量	136.36g
亀裂の状況	亀裂なし

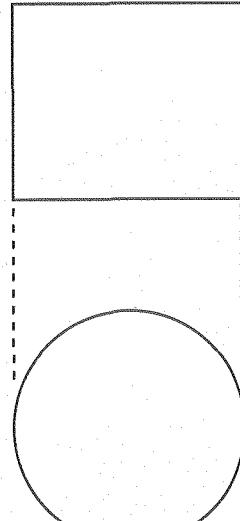
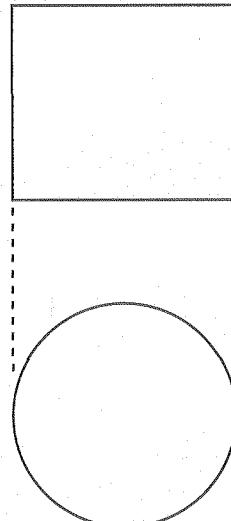
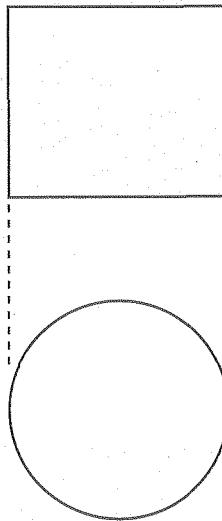
試料寸法	$\phi = 48.98\text{mm}$ $L=45.00\text{mm}$
試料重量	140.40g
亀裂の状況	亀裂なし

試料寸法	$\phi = 48.93\text{mm}$ $L=43.06\text{mm}$
試料重量	134.90g
亀裂の状況	亀裂なし

(a) 試料諸元



(b) 写 真



(c) スケッチ

Photo 3.1-26 整形後の試験用試料（試料 11-4 : HDB-11 孔 450m 付近）

11-4i-h2
深度 446.10～446.90m

11-4f1
深度 446.10～446.90m

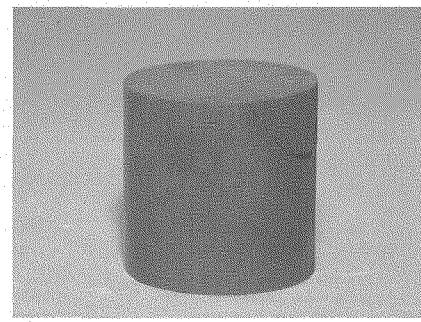
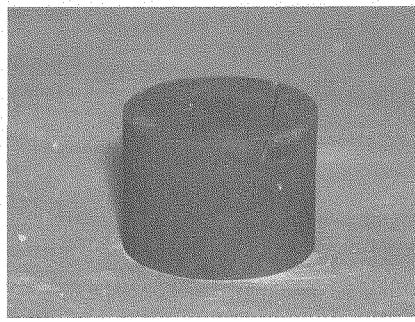
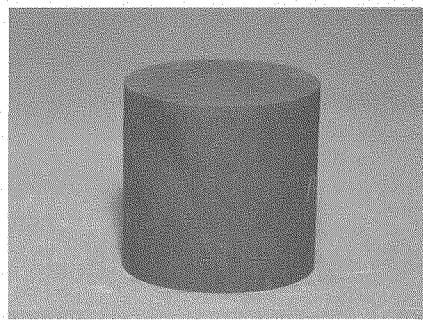
11-4f2
深度 446.10～446.90m

試料寸法	$\phi = 49.03\text{mm}$ $L = 47.84\text{mm}$
試料重量	152.60g
亀裂の状況	亀裂なし

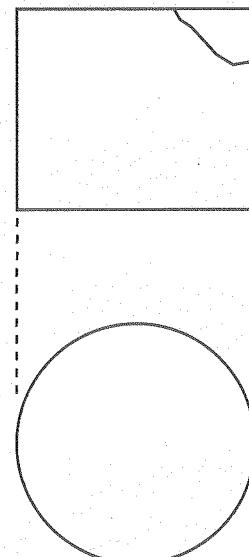
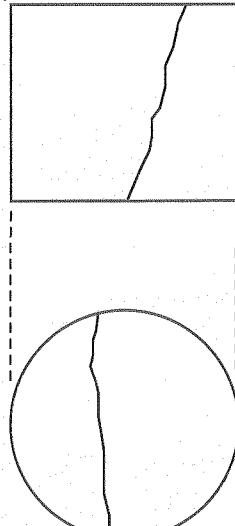
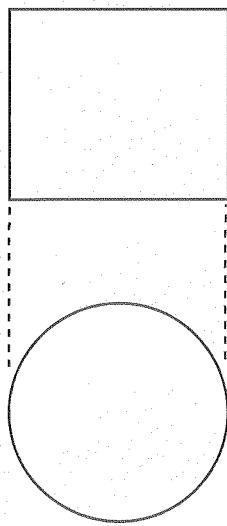
試料寸法	$\phi = 49.02\text{mm}$ $L = 36.38\text{mm}$
試料重量	114.64g
亀裂の状況	密着・充填物なし

試料寸法	$\phi = 49.00\text{mm}$ $L = 48.86\text{mm}$
試料重量	153.40g
亀裂の状況	亀裂側面

(a) 試料諸元



(b) 写 真



(c) スケッチ

Photo 3.1-27 整形後の試験用試料（試料 11-4 : HDB-11 孔 450m 付近 続き）

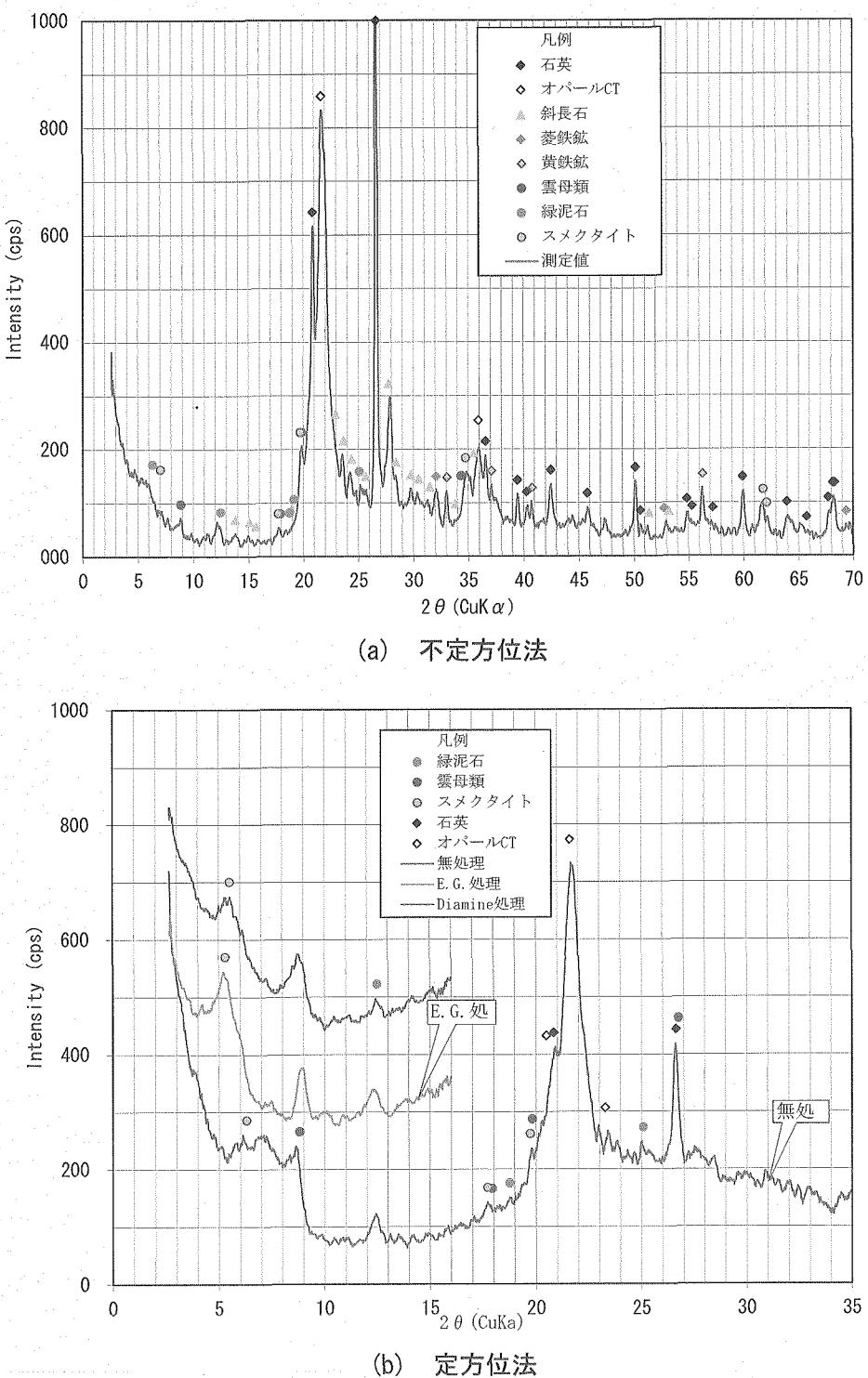


Fig. 3.2-1 X 線分析結果 (HDB-9 孔 : 稚内層 150m 附近)

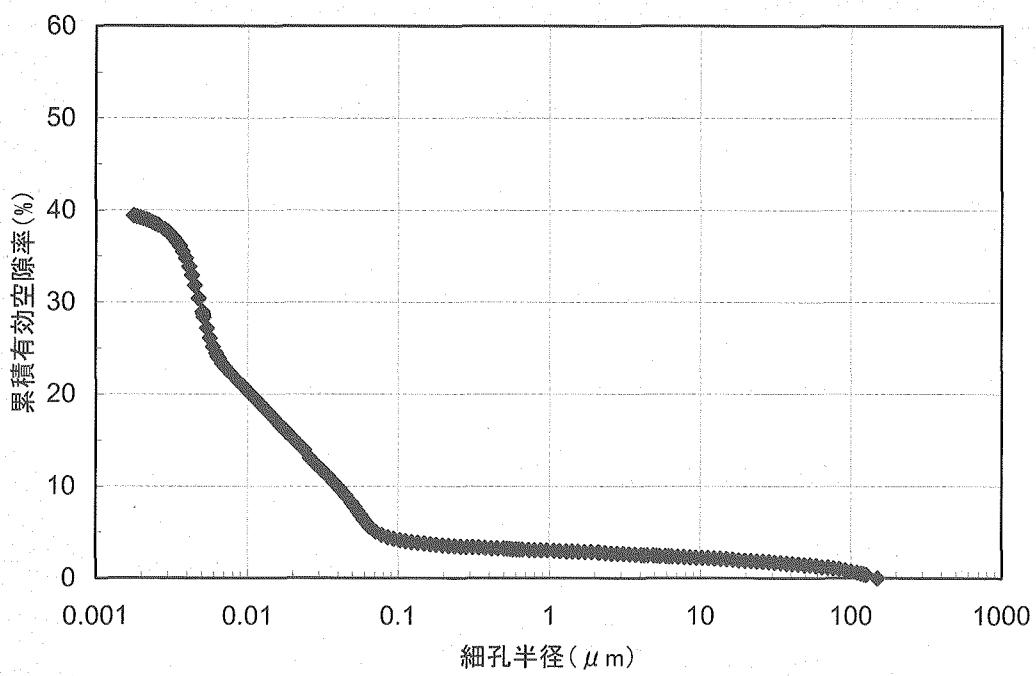


Fig. 3.2-2 水銀圧入法による細孔径分布測定結果（稚内層 150m 付近）

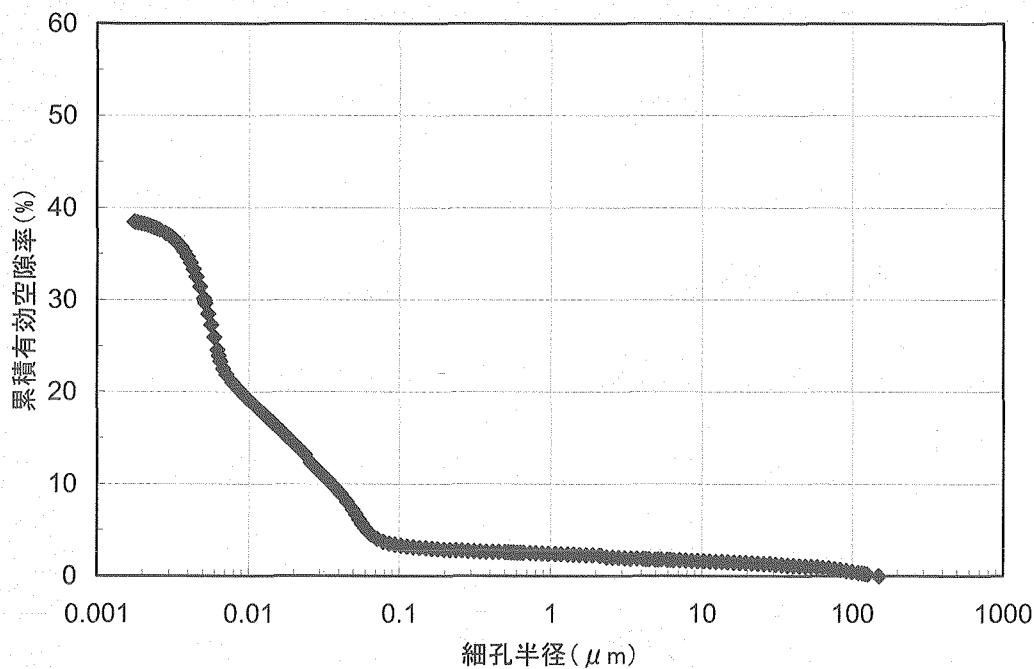


Fig. 3.2-3 水銀圧入法による細孔径分布測定結果（稚内層 200m 付近）

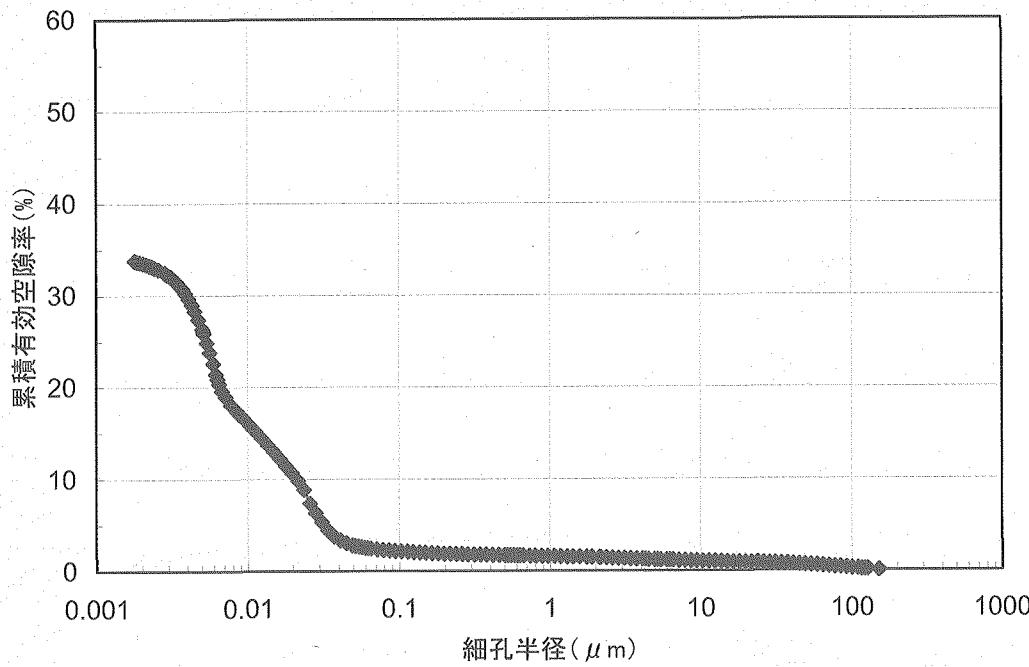


Fig. 3.2-4 水銀圧入法による細孔径分布測定結果（稚内層 250m 付近）

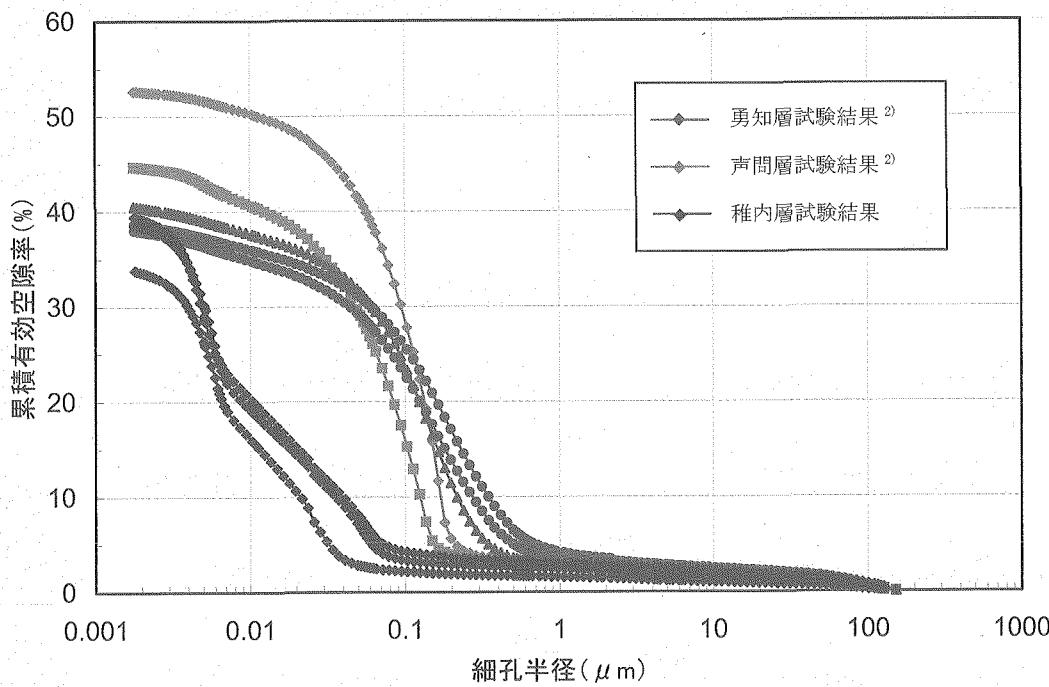


Fig. 3.2-5 水銀圧入法による細孔径分布測定結果（勇知層、声間層との比較）

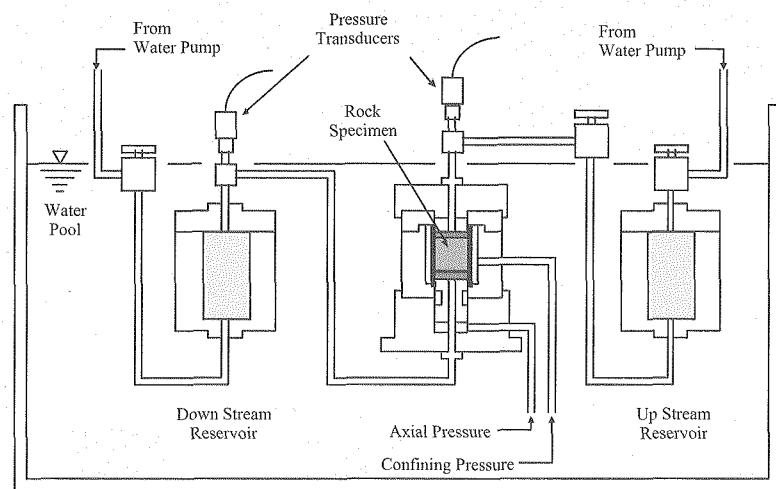


Fig. 3.3-1 トランジェントパルス透水試験装置概要

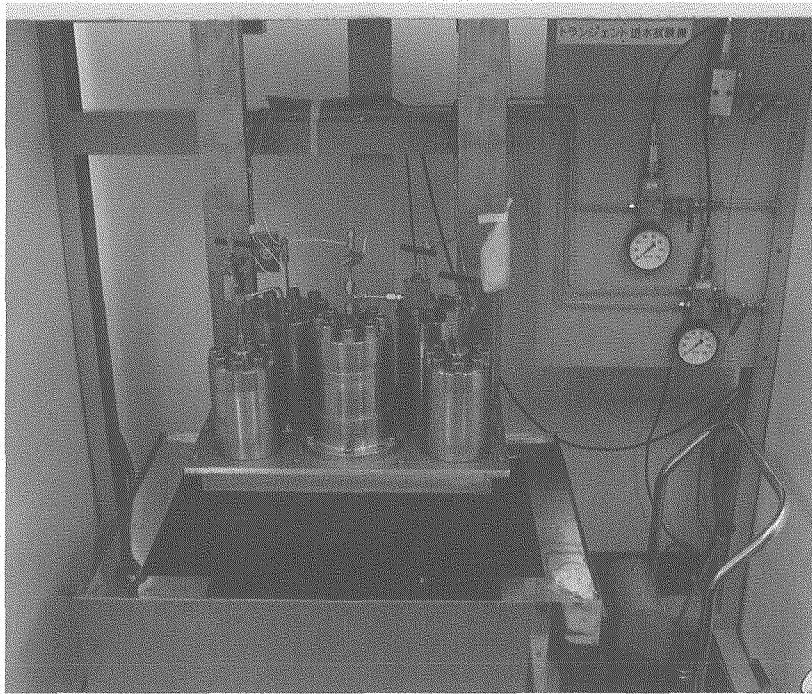


Photo 3.3-1 トランジェントパルス透水試験装置概観

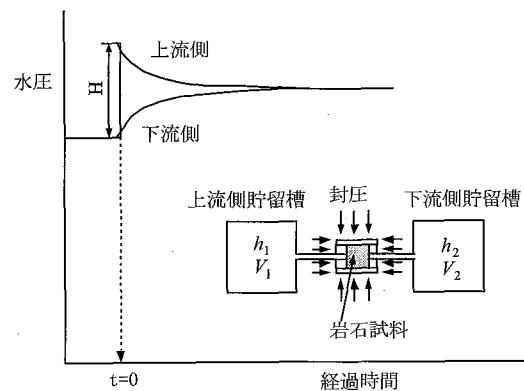


Fig. 3.3-2 トランジェントパルス法測定原理

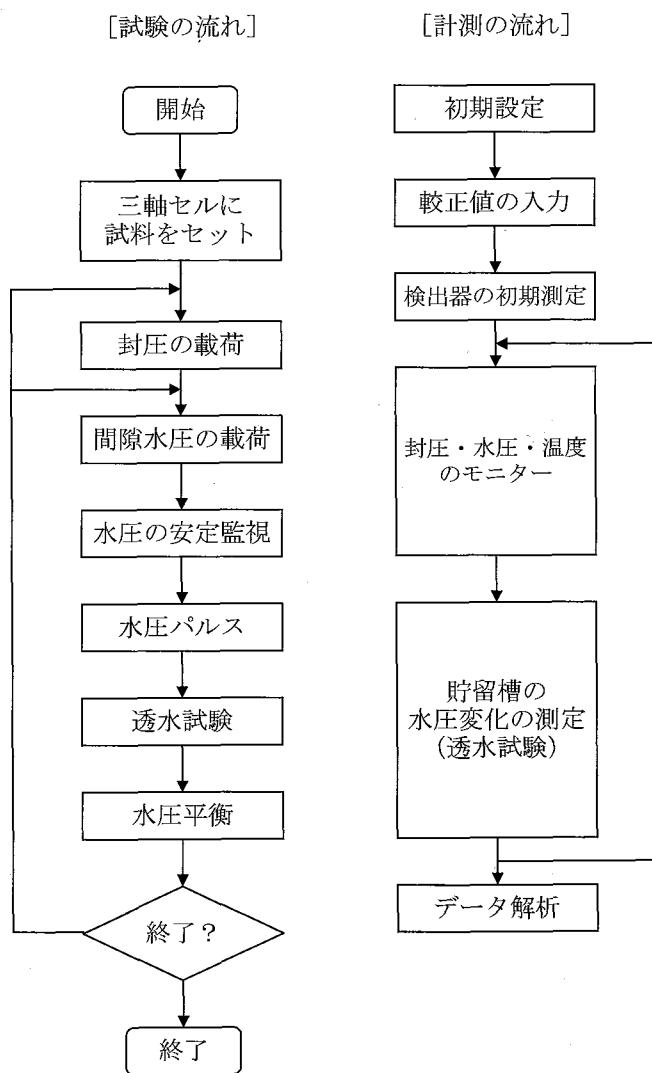
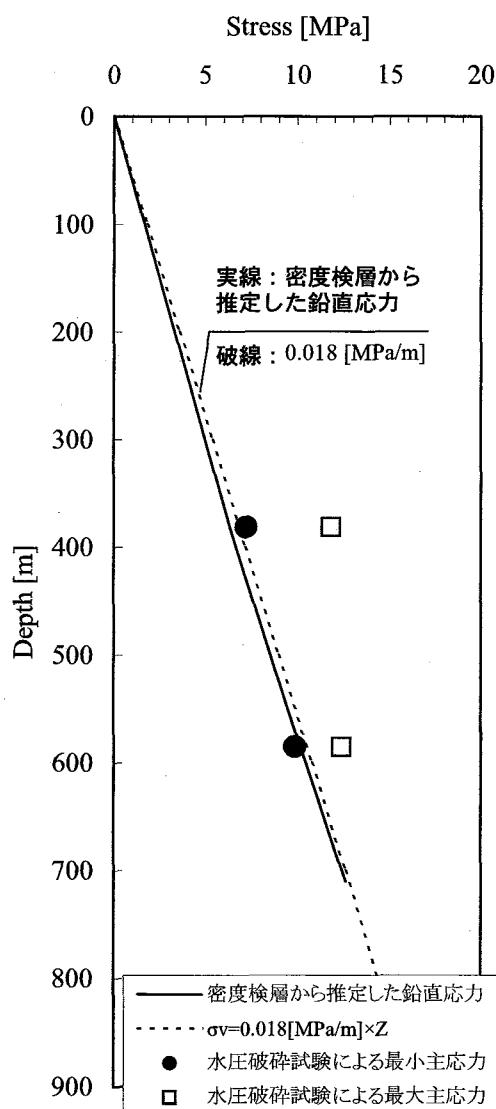


Fig. 3.3-3 トランジェントパルス透水試験手順

Table 3.3-1 トランジエントパルス透水試験ケース

地層名	試料名	深度	封圧(MPa)	間隙水圧(MPa)	有効応力(MPa)
稚内層	9-1i-h	250m付近	4.5	2.5	2.0
	9-1i-v				
声問層	10-1i-h	100m付近	1.8	1.0	0.8
	10-1i-v1				

Fig. 3.3-4 岩盤内応力と深度の関係 (HDB-1 号孔)³⁾

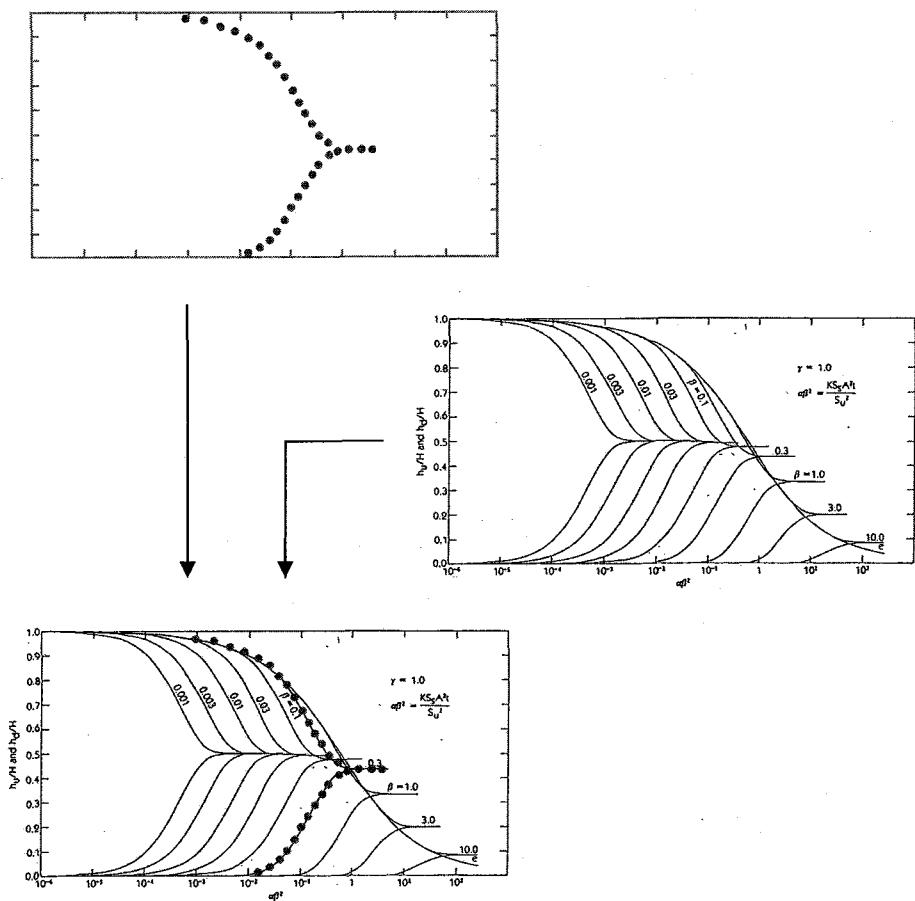


Fig. 3.3-5 Hsieh 法による解析手順の概念図

Table 3.3-2 トランジエントパルス透水試験法で用いた既知パラメータ一覧

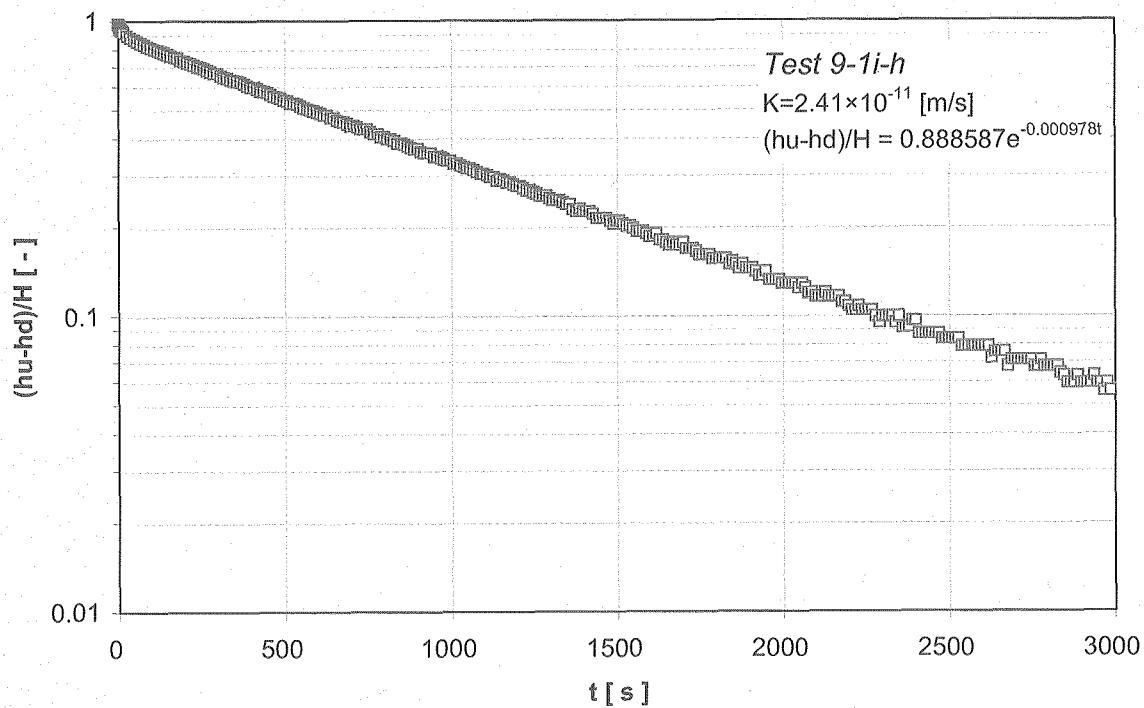
	単位	既知パラメータ値
V_u	(m ³)	4.15×10^{-4}
V_d	(m ³)	4.15×10^{-4}
A	(m ²)	1.96×10^{-3}
I	(m)	5.00×10^{-2}
C_w	(m ² /kN)	4.65×10^{-7}
γ_w	(kN/m ³)	9.7890

Table 3.3-3 トランジエントパルス透水試験結果一覧（今回実施した試料）

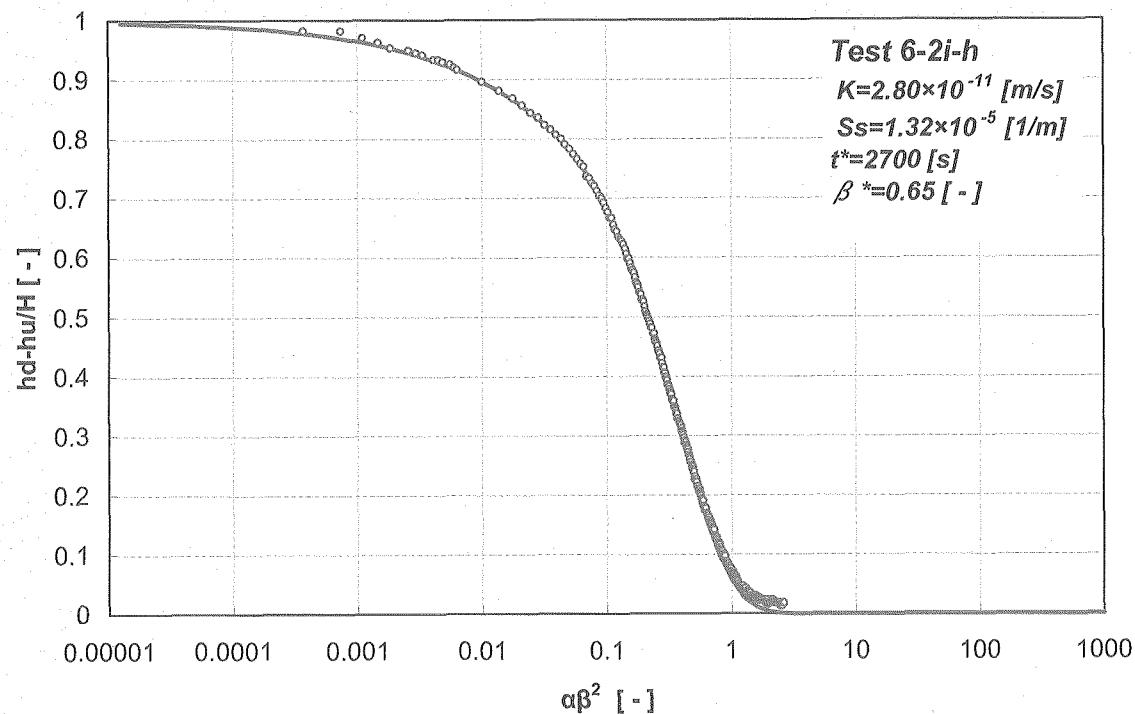
採取孔名	地層名	試料名	深度(m)	封圧(Mpa)		間隙水圧(Mpa)	パルス圧(Mpa)	透水係数(m/s)		比貯留係数(1/m)
				軸圧	側圧			Brace法	差圧を用いたHsieh法	
HDB-10孔	声問層	10-1i-h	100m付近	1.80	1.80	1.00	0.10	6.90×10^{-11}	8.28×10^{-11}	1.43×10^{-5}
		10-1i-v1						6.98×10^{-11}	8.38×10^{-11}	1.42×10^{-5}
HDB-9孔	稚内層	9-1i-h	250m付近	4.50	4.50	2.50	0.10	2.41×10^{-11}	2.80×10^{-11}	1.32×10^{-5}
		9-1i-v						1.25×10^{-11}	1.50×10^{-11}	1.34×10^{-5}

Table 3.3-4 トランジエントパルス透水試験結果一覧（これまでに実施した試料）^{1), 2)}

採取孔名	実施年度	地層名	試料名	深度(m)	封圧(Mpa)		間隙水圧(Mpa)	パルス圧(Mpa)	透水係数(m/s)		比貯留係数(1/m)
					軸圧	側圧			Brace法	差圧を用いたHsieh法	
HDB-7孔	H15年度	勇知層	7-1i-001	190m付近	3.60	3.60	2.00	0.10	2.11×10^{-10}	2.54×10^{-10}	1.29×10^{-5}
			7-1i-90						2.78×10^{-10}	2.86×10^{-10}	1.10×10^{-5}
		声問層	7-2i	230m付近	4.10	4.10	2.30	0.10	3.31×10^{-10}	4.09×10^{-10}	1.01×10^{-5}
			7-3i	240m付近	4.30	4.30	2.40	0.10	1.98×10^{-10}	2.22×10^{-10}	1.08×10^{-5}
HDB-6孔	H14年度	声問層	6-2i-h	200m付近	3.60	3.60	2.00	0.10	5.40×10^{-10}	7.53×10^{-10}	8.74×10^{-6}
			6-2i-v						4.21×10^{-10}	4.53×10^{-10}	1.11×10^{-5}
			6-4i-h	250m付近	4.50	4.50	2.50	0.10	1.71×10^{-10}	1.93×10^{-10}	4.08×10^{-6}
			6-4i-v						1.13×10^{-10}	1.27×10^{-10}	1.18×10^{-5}
		稚内層	2-1i	200m付近	3.60	3.60	2.00	0.10	4.83×10^{-12}	5.49×10^{-12}	1.12×10^{-5}
			3-2i	300m付近	5.40	5.40	3.00	0.10	4.83×10^{-12}	4.88×10^{-12}	6.08×10^{-6}
			4-1i	450m付近	8.10	8.10	4.50	0.10	1.69×10^{-12}	1.63×10^{-12}	8.11×10^{-6}

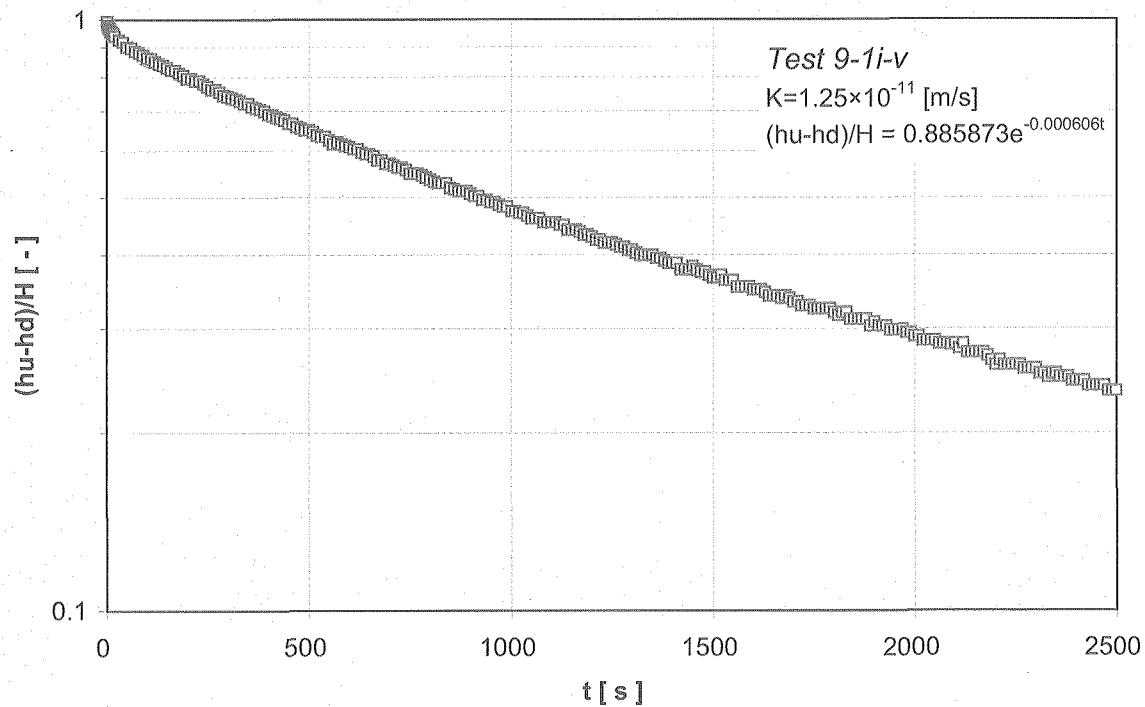


T(a) Brace 法

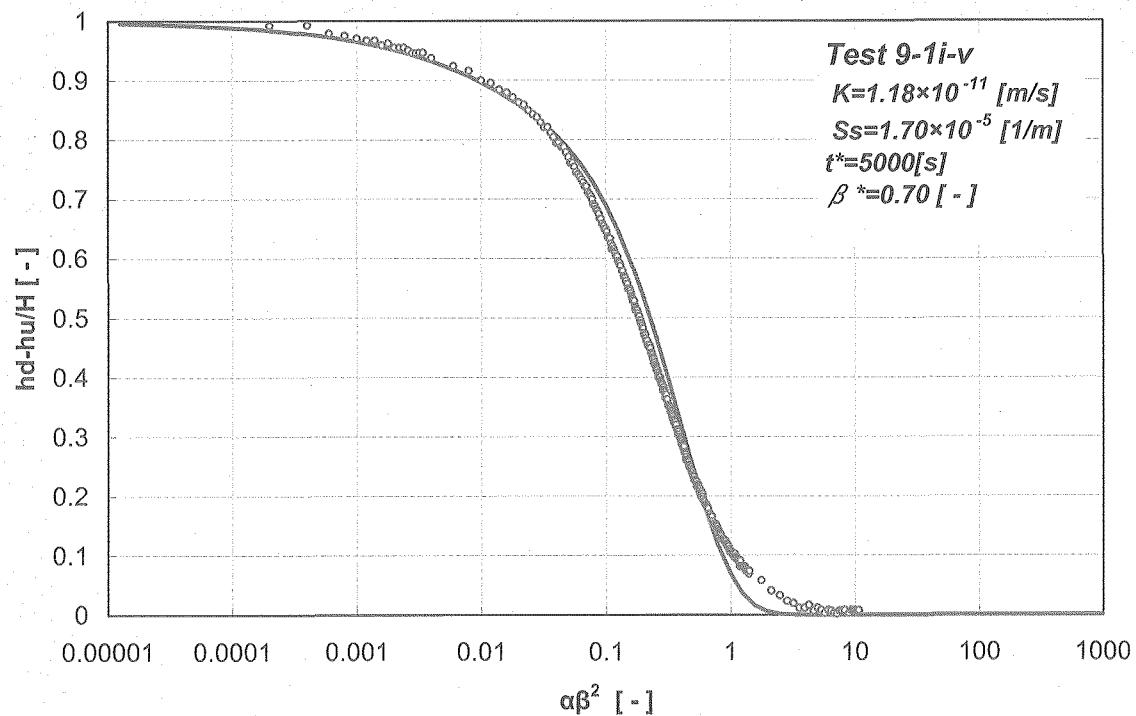


(b) 差圧を用いた Hsieh 法

Fig. 3.3-6 トランジェントパルス透水試験結果 (試料名 : 9-1*i-h*)



(a) Brace 法



(b) 差圧を用いた Hsieh 法

Fig. 3.3-7 トランジェントパルス透水試験結果（試料名：9-1i-v）

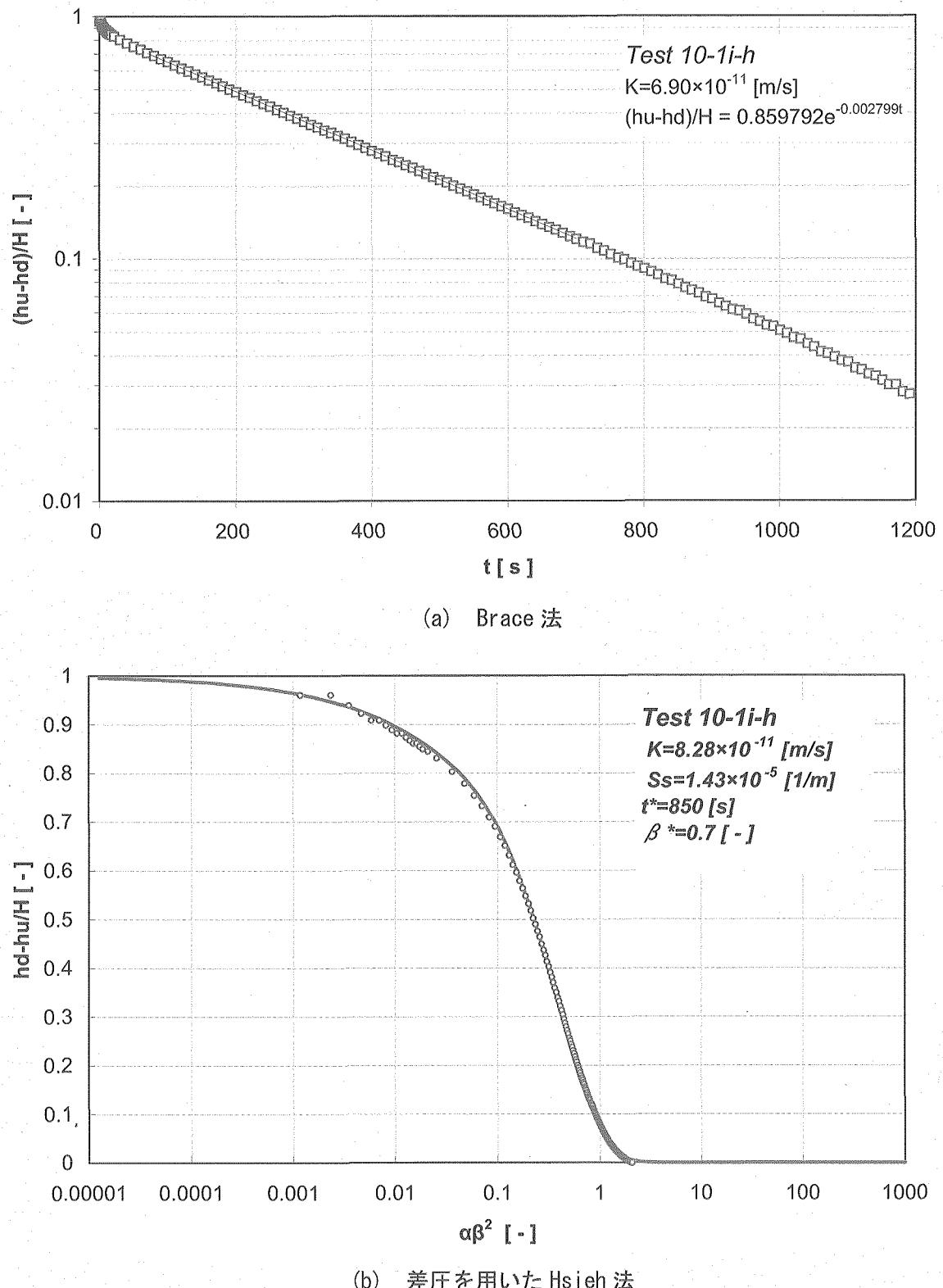


Fig. 3.3-8 トランジェントパルス透水試験結果（試料名：10-1i-h）

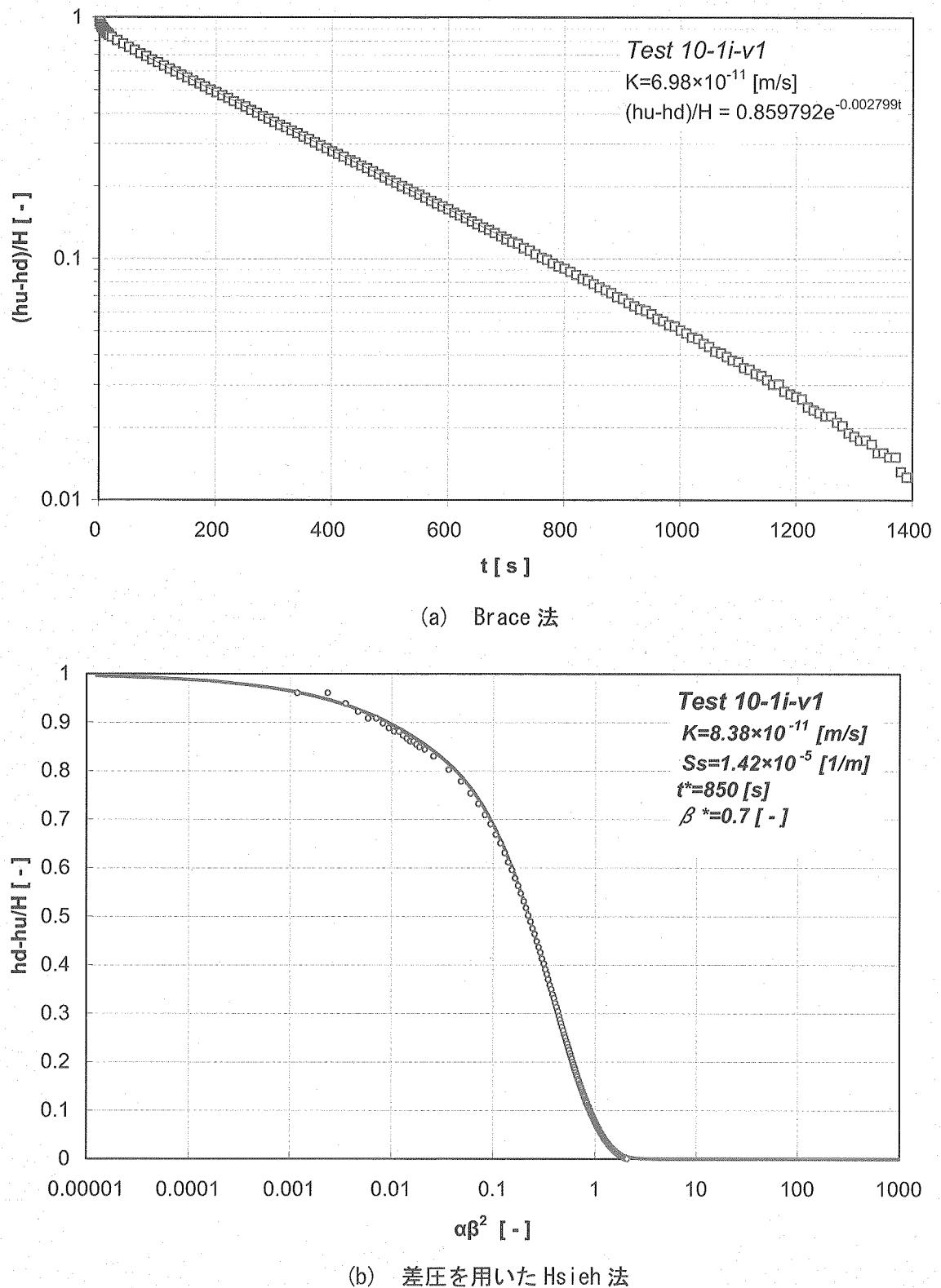


Fig. 3.3-9 トランジェントパルス透水試験結果（試料名：10-1i-v1）

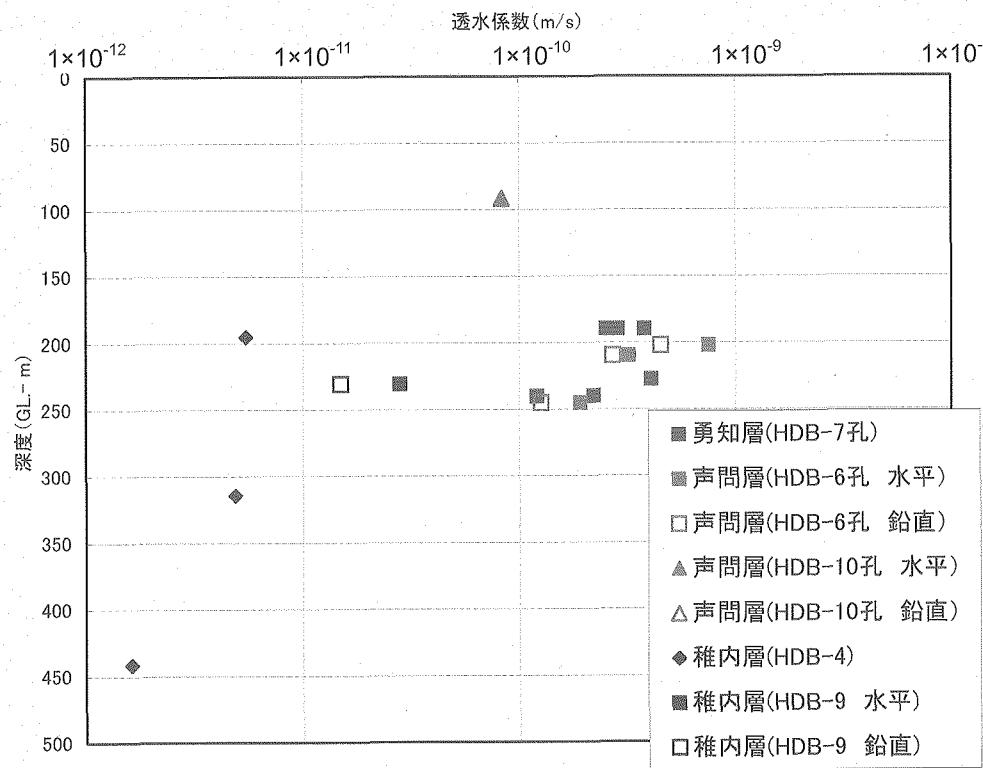


Fig. 3.3-10 透水係数と採取深度の関係

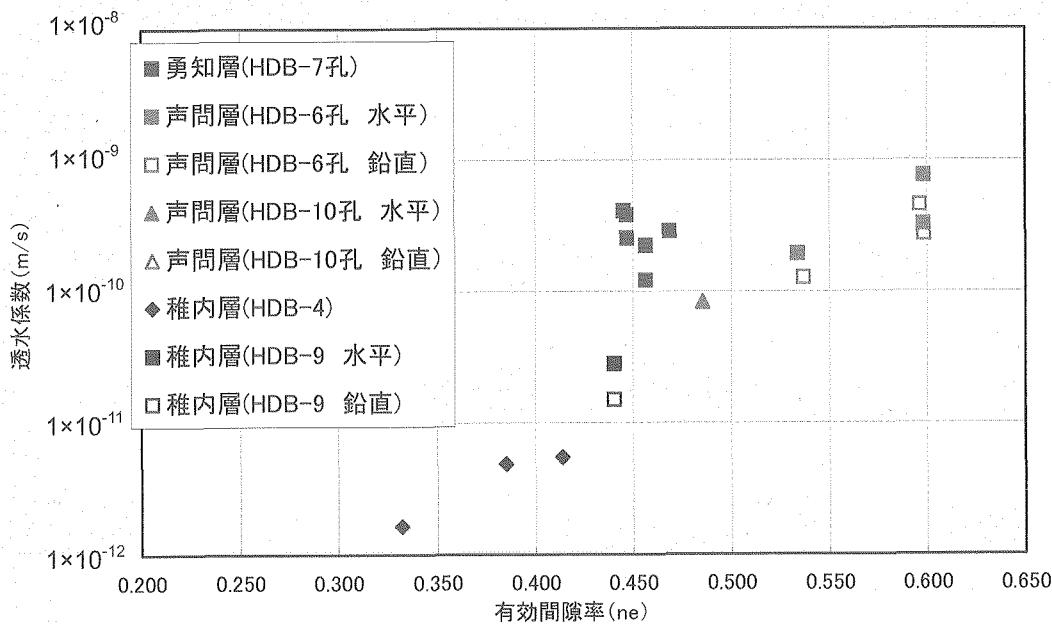
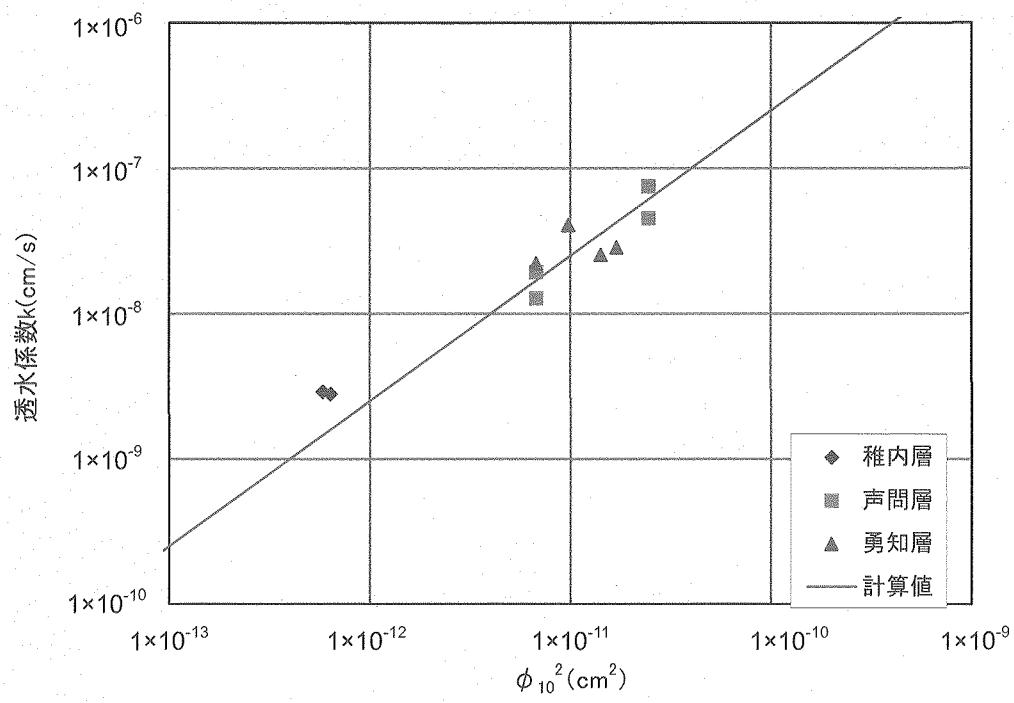


Fig. 3.3-11 透水係数と有効空隙率の関係

Fig. 3.3-12 透水係数と ϕ_{10}^2 との関係

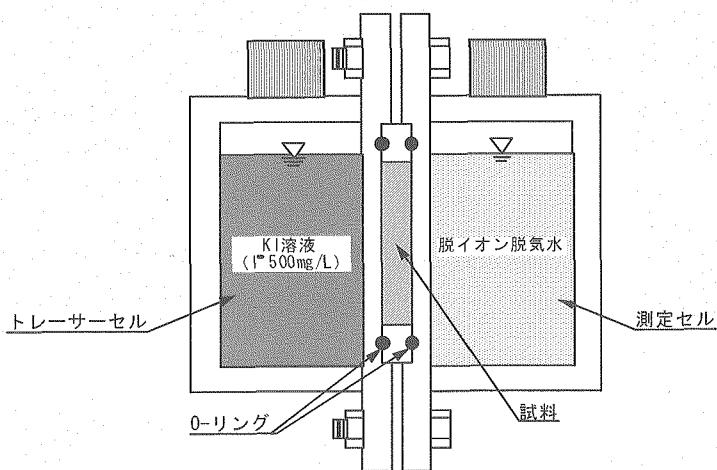


Fig. 3.4-1 拡散実験装置概要

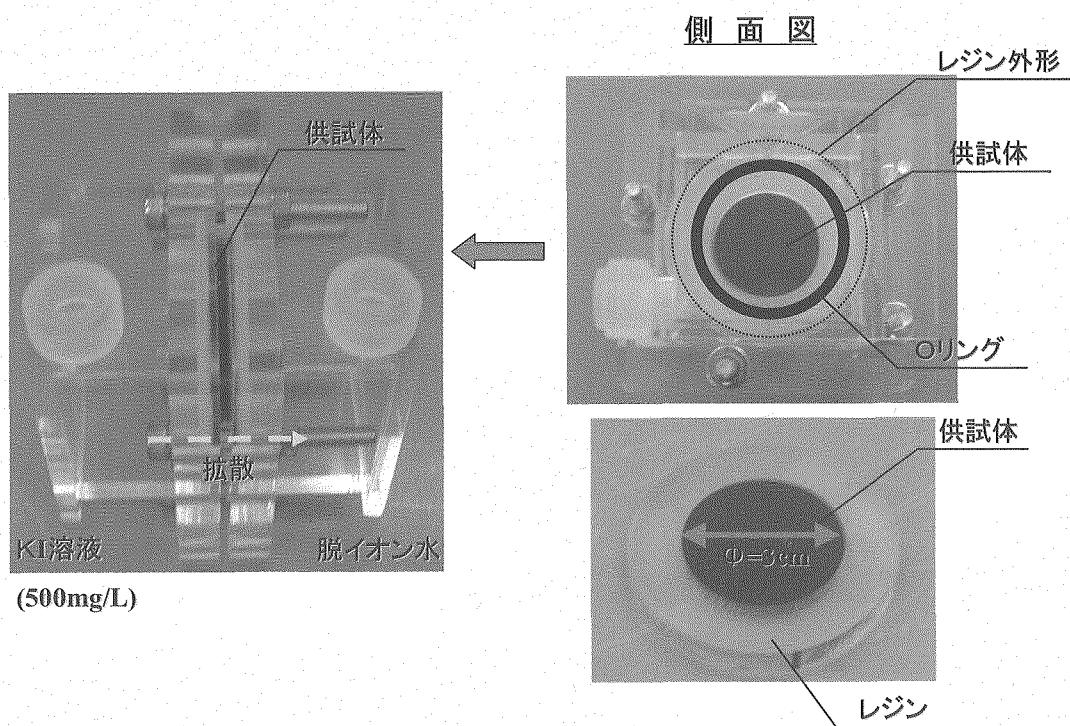


Fig. 3.4-2 拡散実験装置および供試体の概観

Table 3.4-1 拡散試験ケース

地層名	深度	試料名	
		水平	垂直
稚内層	150m付近	9-2i1	-
	250m付近	9-1i-h	9-1i-v
声問層	100m付近	10-1i-h	10-1i-v1
	300m付近	11-2i-h3	-
	450m付近	11-4i-h1	-

Table 3.4-2 試験条件一覧

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

Table 3.4-3 拡散試験結果一覧 (今回実施した試料)

地層名	試料名	実効拡散係数 De(m ² /sec)	見かけの拡散係数 Da(m ² /sec)	収着容量 α	分配係数 Kd(m ³ /kg)	有効空隙率 ne
声問層	10-1i-h	9.22×10^{-11}	1.76×10^{-9}	0.052	0.000	0.486
	10-1i-v1	9.60×10^{-11}	2.97×10^{-10}	0.323	0.000	0.486
	11-2i-h3	3.22×10^{-10}	4.63×10^{-10}	0.694	0.000	0.639
	11-4i-h1	1.46×10^{-10}	2.93×10^{-10}	0.497	0.000	0.546
稚内層	9-2i1	4.19×10^{-11}	2.50×10^{-8}	0.002	0.000	0.426
	9-1i-h	2.94×10^{-11}	3.38×10^{-10}	0.087	0.000	0.426
	9-1i-v	3.52×10^{-11}	4.26×10^{-10}	0.083	0.000	0.440

Table 3.4-4 拡散試験結果一覧 (これまでに実施した試料)^{1), 2)}

地層名	実施年度	試料名	実効拡散係数 De(m ² /sec)	見かけの拡散係数 Da(m ² /sec)	収着容量 α	分配係数 Kd(m ³ /kg)	有効空隙率 ne
勇知層	H15年度	7-1i-003	1.44×10^{-10}	5.52×10^{-10}	0.261	0.000	0.447
		7-1i-902	9.50×10^{-11}	9.41×10^{-9}	0.010	0.000	0.469
		7-2i-2	1.17×10^{-10}	1.02×10^{-9}	0.115	0.000	0.440
		7-3i	2.32×10^{-10}	1.70×10^{-8}	0.014	0.000	0.457
声問層	H14年度	6-2i-h	6.78×10^{-10}	6.01×10^{-10}	1.128	0.001	0.598
		6-2i-v	3.30×10^{-10}	1.58×10^{-9}	0.209	0.000	0.596
		6-4i-h	2.59×10^{-10}	1.56×10^{-9}	0.166	0.000	0.534
		6-4i-v	2.08×10^{-10}	1.29×10^{-9}	0.161	0.000	0.537
稚内層	H14年度	2-2i	2.34×10^{-11}	6.86×10^{-11}	0.342	0.000	0.414
		3-4i	2.55×10^{-11}	3.36×10^{-11}	0.758	0.000	0.384
		4-2i	8.16×10^{-12}	3.84×10^{-11}	0.212	0.000	0.332

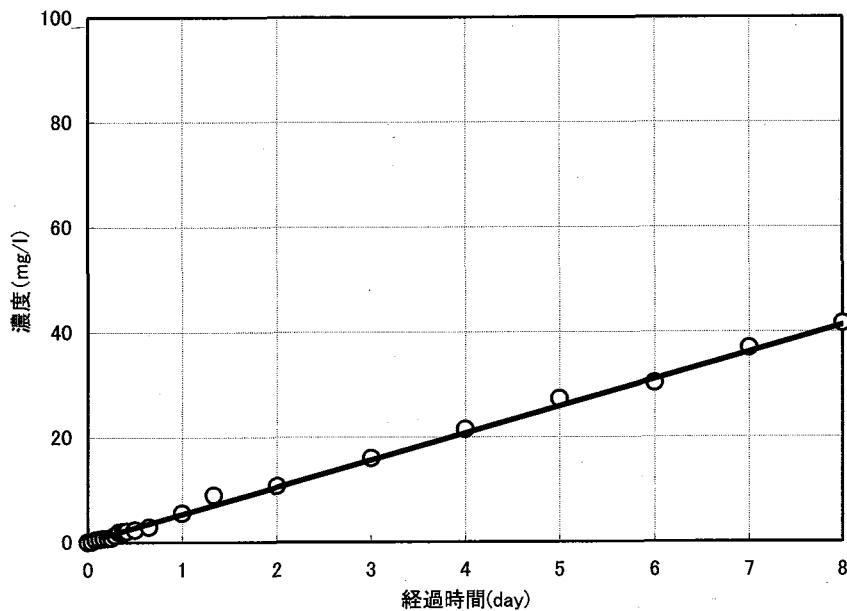


Fig. 3.4-3 拡散試験結果（試料名：9-2i1）

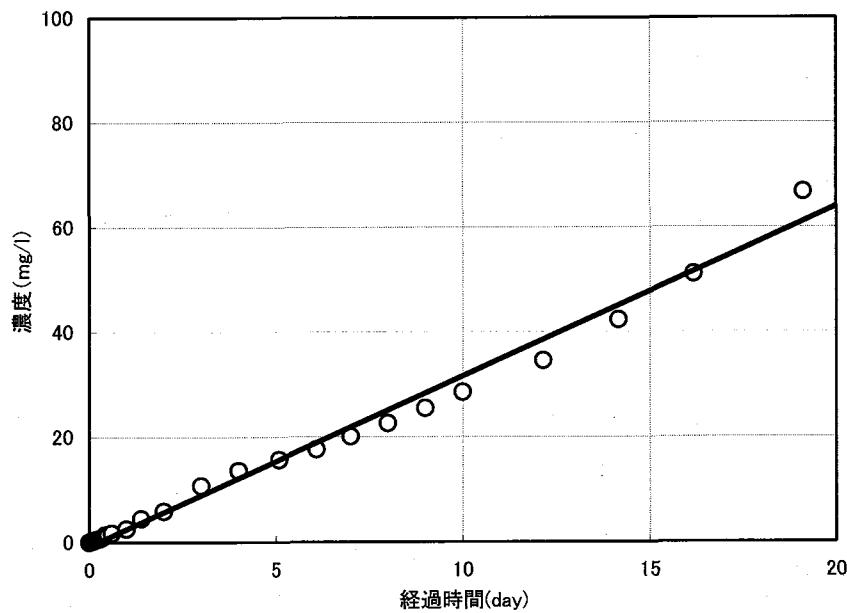


Fig. 3.4-4 拡散試験結果（試料名：9-1i-h）

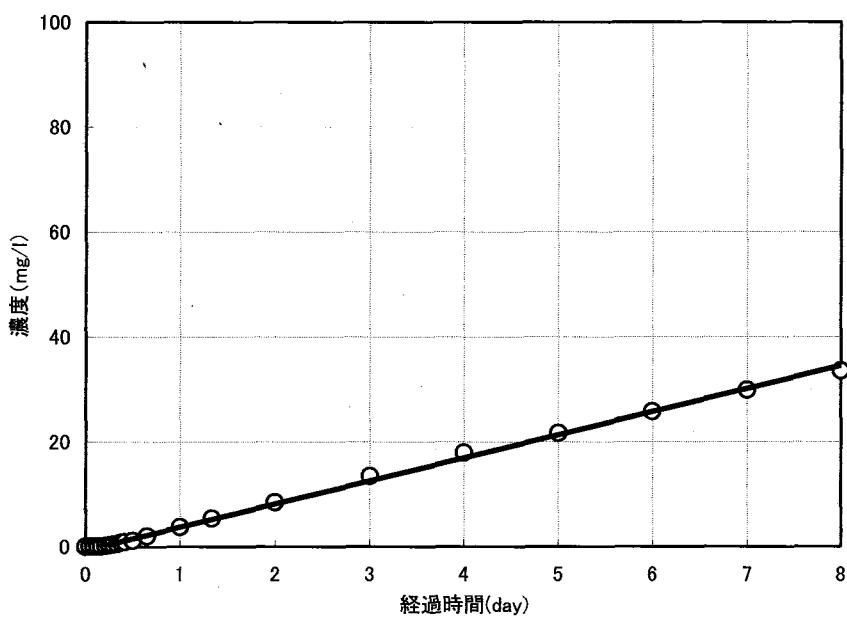


Fig. 3.4-5 拡散試験結果 (試料名 : 9-1i-v)

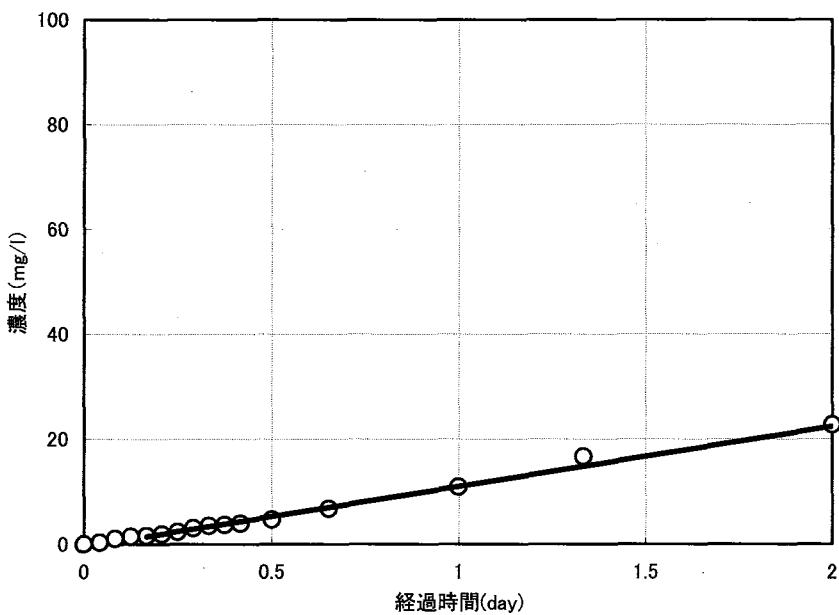


Fig. 3.4-6 拡散試験結果 (試料名 : 10-1i-h)

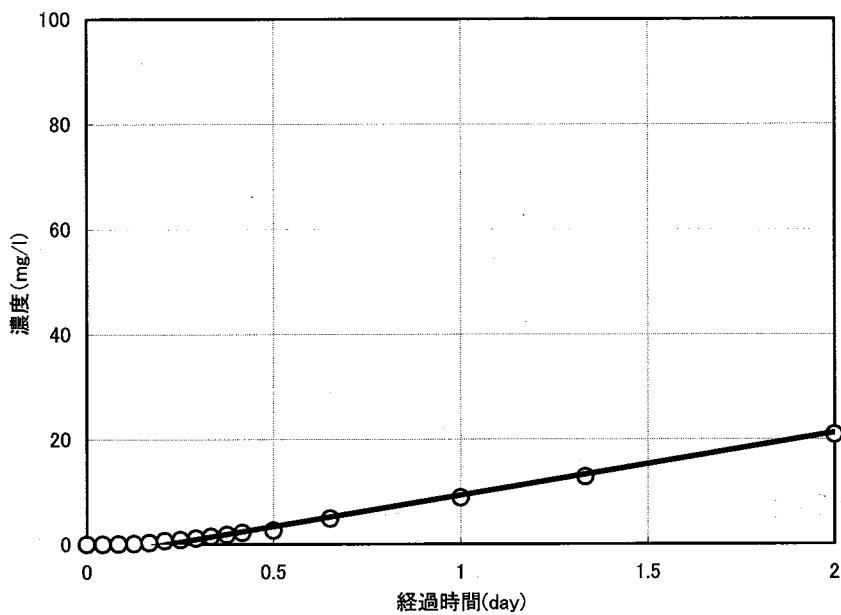


Fig. 3.4-7 拡散試験結果（試料名：10-1i-v1）

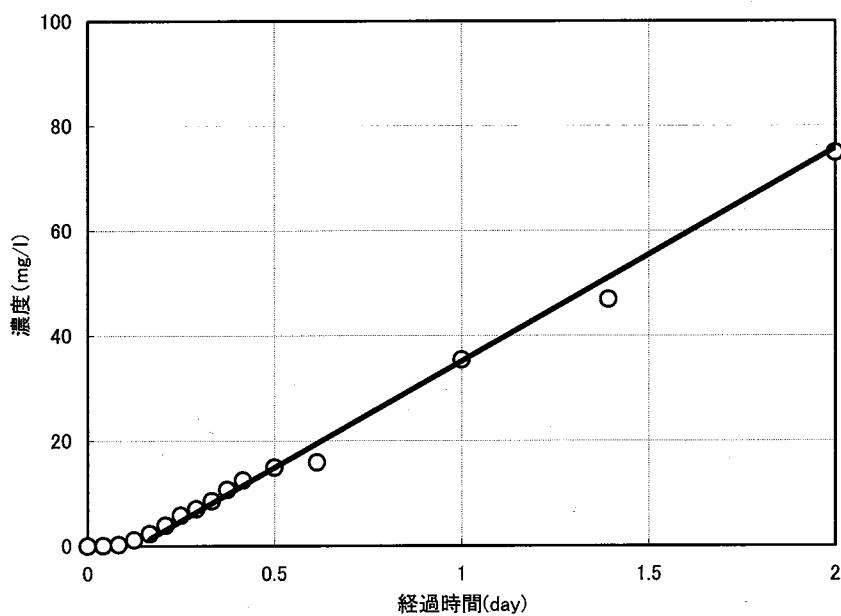


Fig. 3.4-8 拡散試験結果（試料名：11-2i-h3）

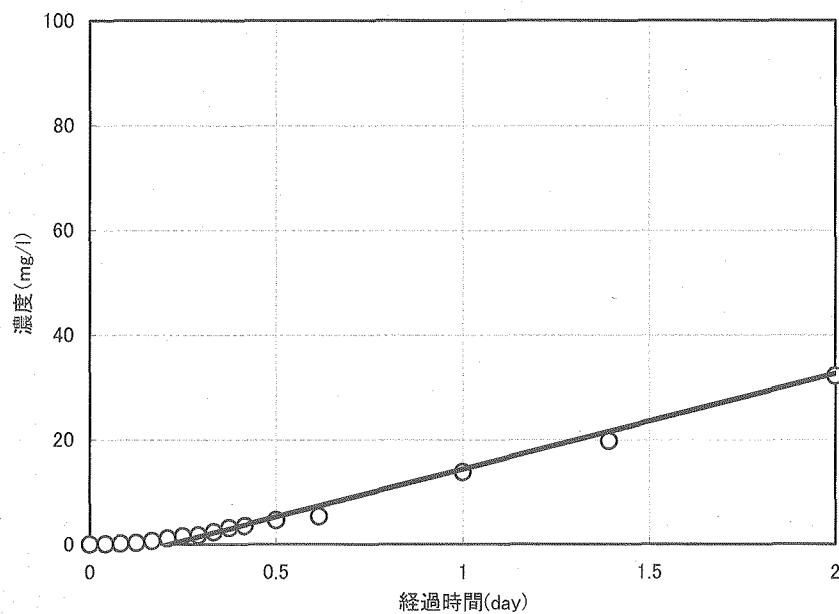
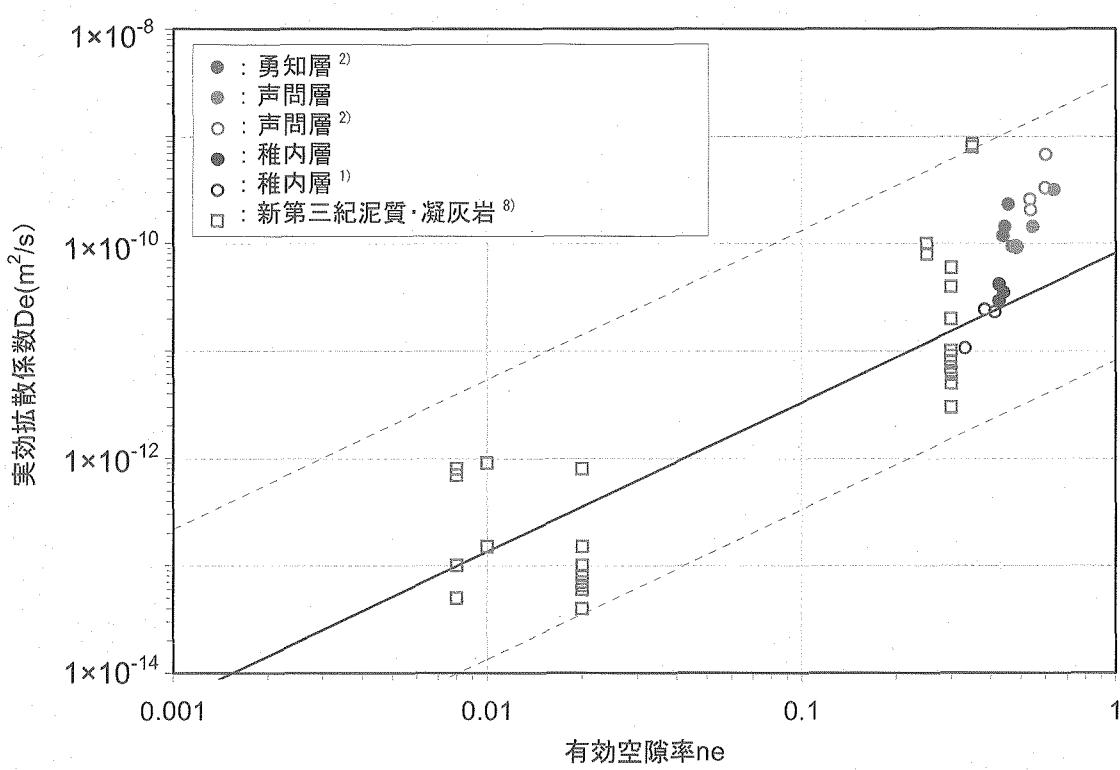


Fig. 3.4-9 扩散試験結果 (試料名 : 11-4i-h1)

Fig. 3.4-10 実効拡散係数と有効空隙率の比較 (既往データとの比較)⁸⁾

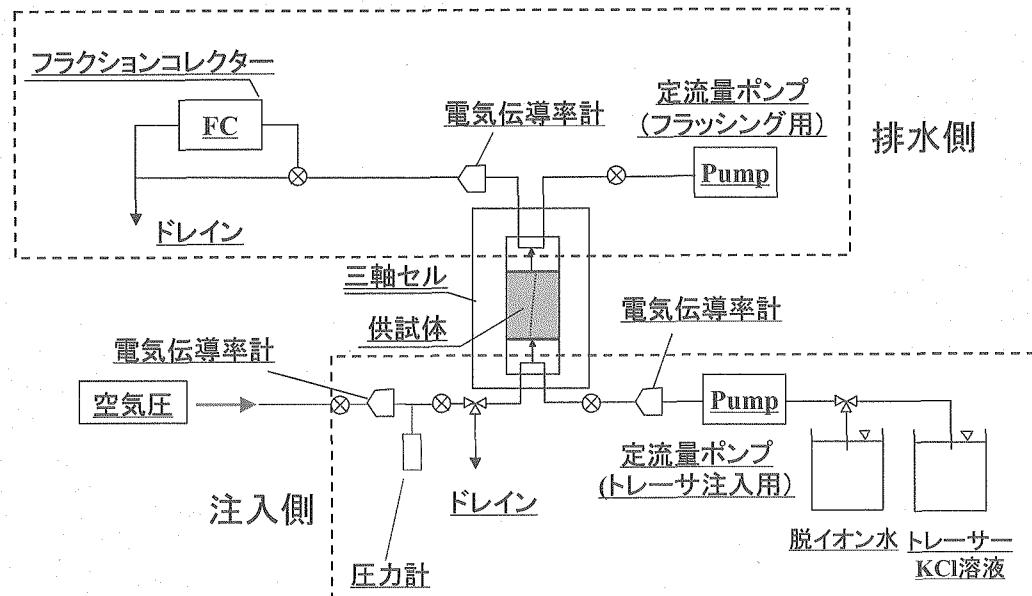


Fig. 3.4-11 トレーーサー試験装置概要

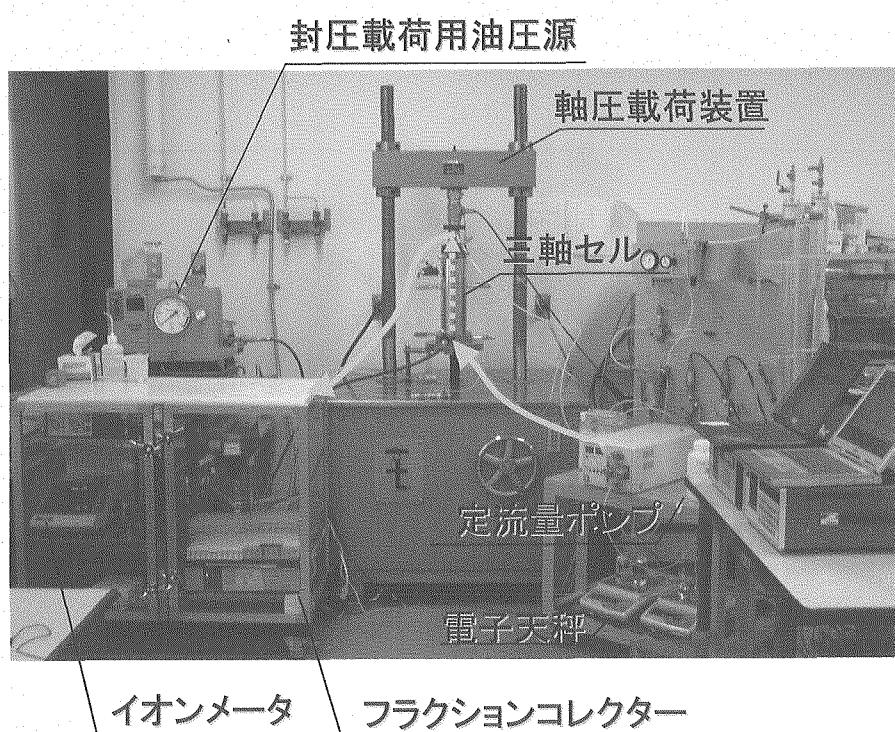


Photo 3.4-1 トレーーサー試験装置全景

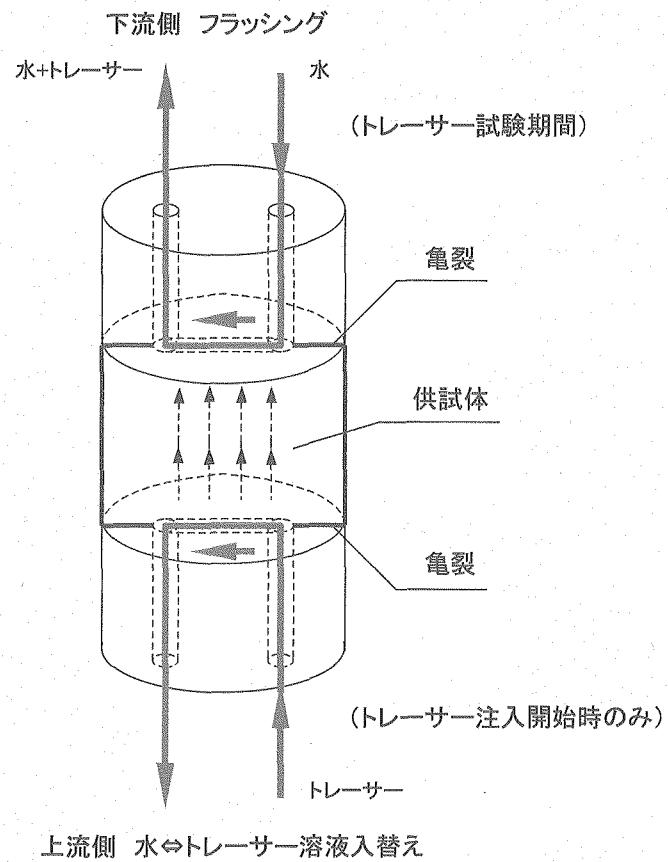


Fig. 3.4-12 トレーサー注入出部のフラッシング構造概念図

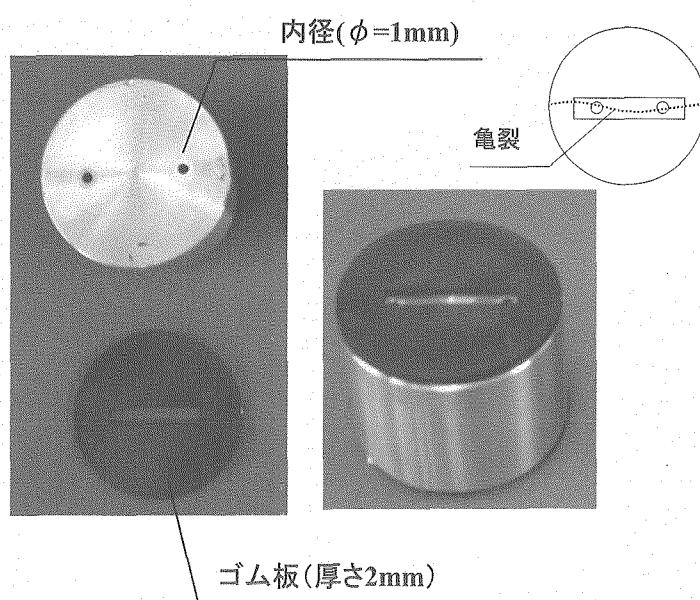


Fig. 3.4-13 トレーサー注入出部のフラッシング構造

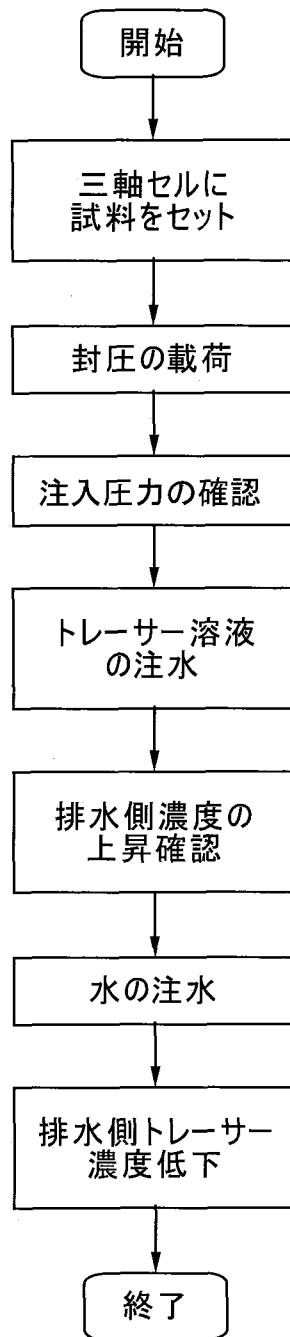


Fig. 3.4-14 トレーサー試験フロー

Table 3.4-5 試験装置および計測機器一覧

名 称	型 式	製 造	仕 様
軸圧載荷装置	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
側圧載荷装置	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	ジークルサイエンス (株)	方式 : ミクロ制御ダブルランジヤーポンプ 設定流量 : 0.001~5.00mL/min 定流量送液 : $\pm 2\%$ または $\pm 2\mu\text{L}/\text{min}$ 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 : $\pm 10\%$, $\pm 1.0\text{MPa}$ 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)
フランクション 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 : $0.0001 \sim 1999 \times 10^3 \text{mg/l}$
ヨウ素イオン電極	I-125	東亜電波工業 (株)	測定範囲 : $10^{-7} \sim 10^0 \text{mol/l} \cdot \text{I}^-$ 応答速度 : 3~20 秒 実用 pH 範囲 : pH3~12 仕様温度範囲 : 0~50°C
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)	

Table 3.4-6 トレーサー試験ケース

地層名	試料名	深度	封圧(MPa)
声問層	10-1f1	100m	0.8
	11-2f1	300m	2.4
	11-4f1	450m	3.6
稚内層	9-2f3	150m	1.2

Table 3.4-7 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 (ml/min)
フラッシング流量	0.500 (ml/min)
温度	室温 (22°C~25°C)

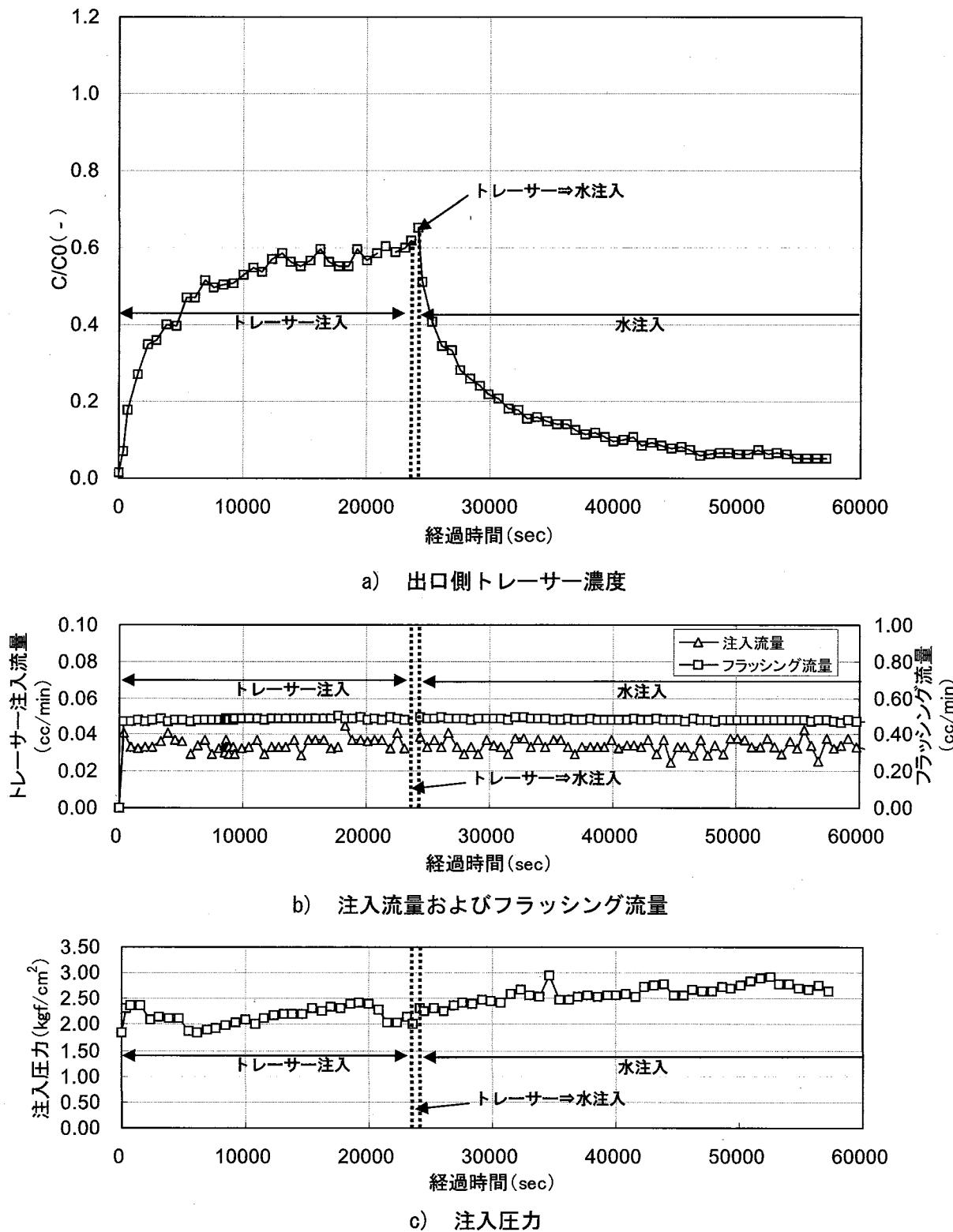


Fig. 3.4-15 トレーサー試験結果 (試料名 : 10-1f1, 封圧 : 0.8MPa)

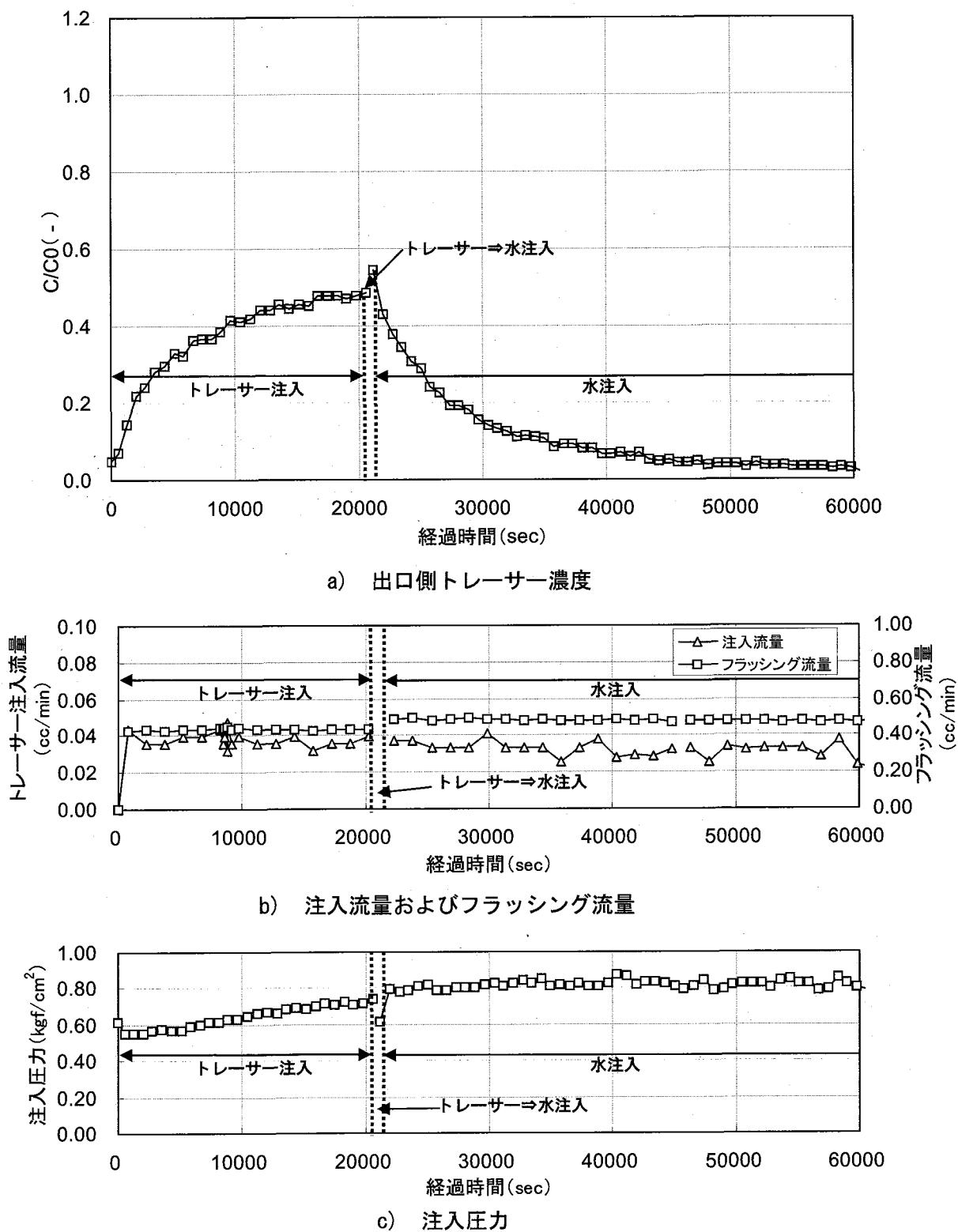


Fig. 3.4-16 トレーサー試験結果 (試料名 : 11-2f1, 封圧 : 2.4MPa)

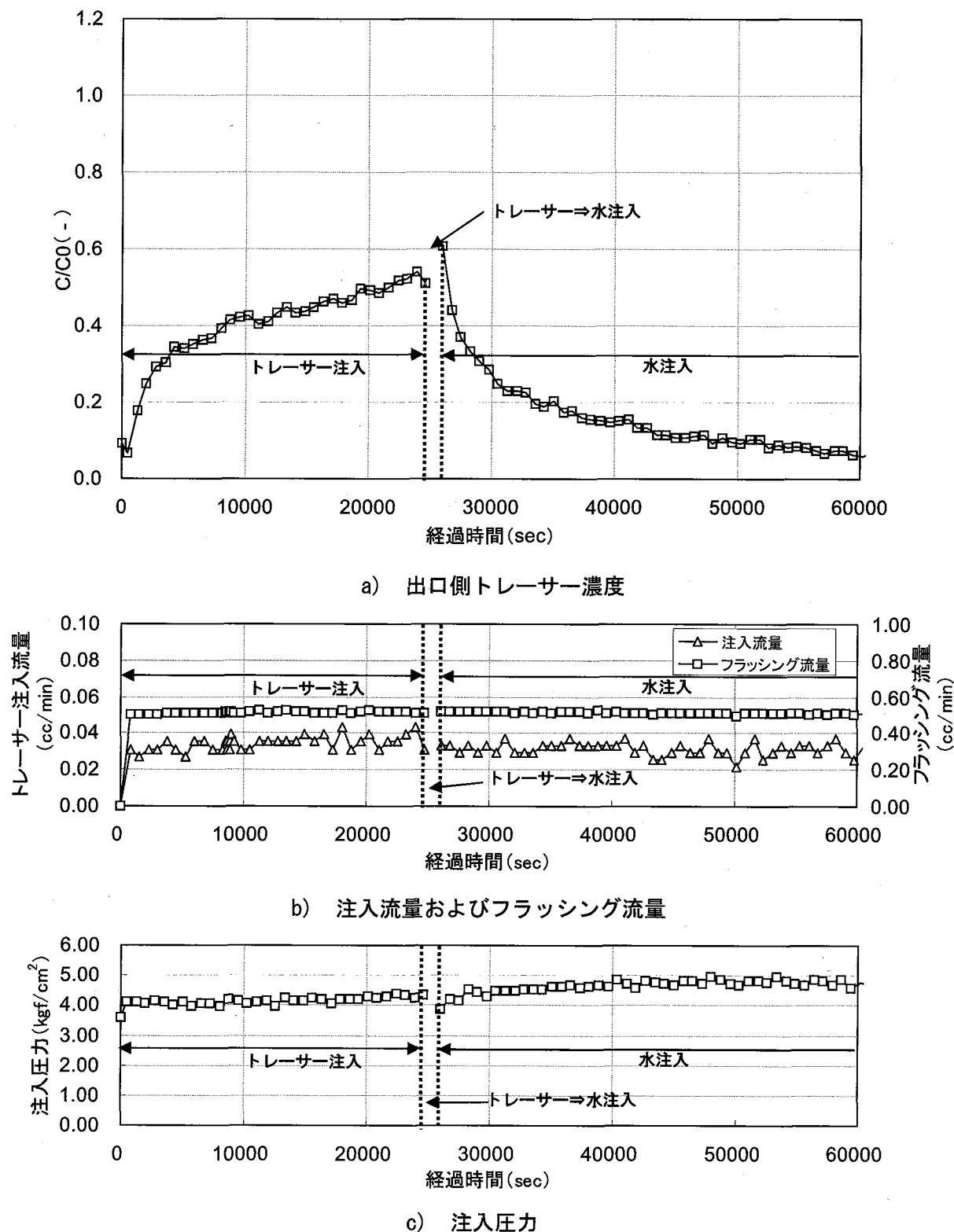


Fig. 3.4-17 トレーサー試験結果 (試料名 : 11-4f1, 封圧 : 3.6 MPa)

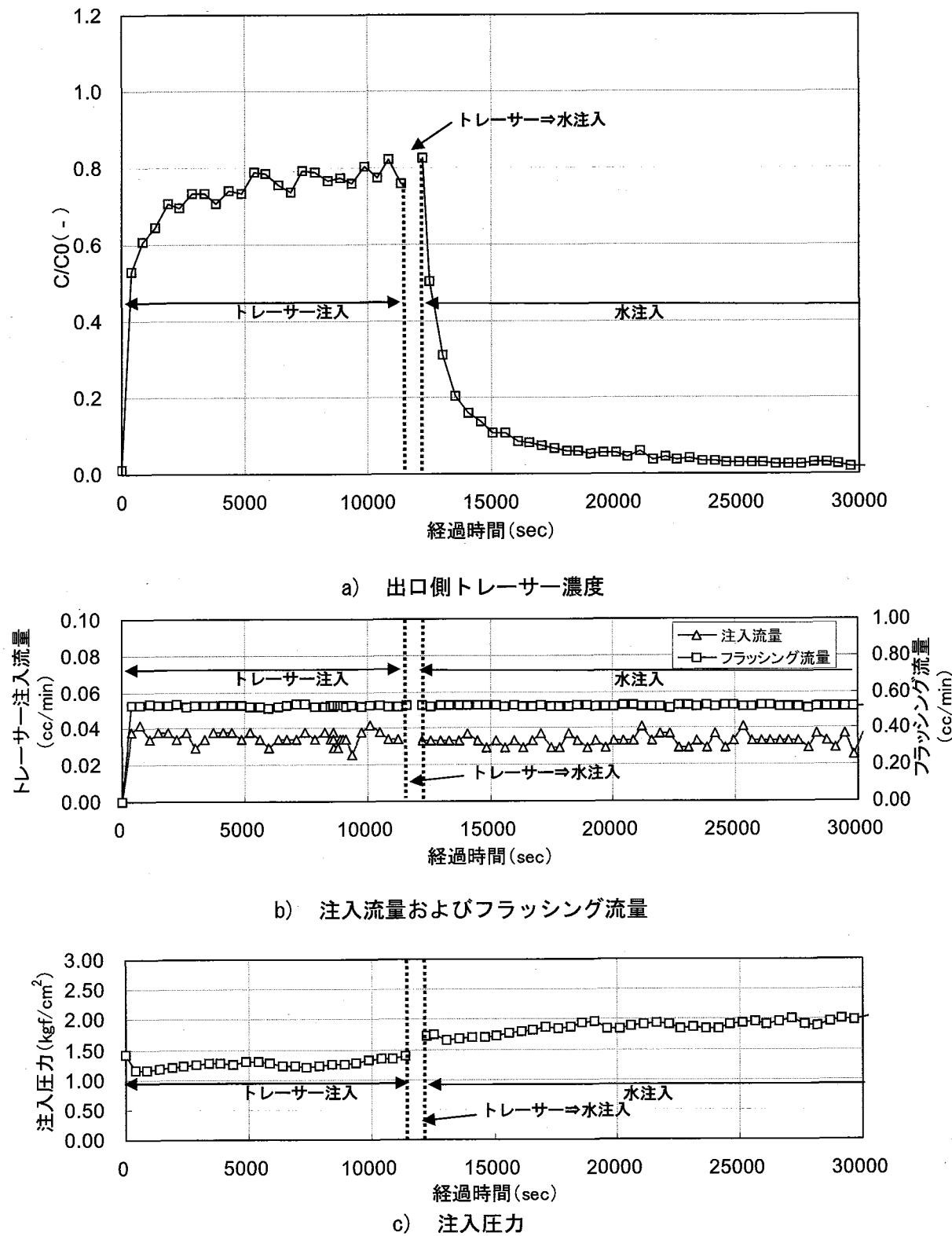
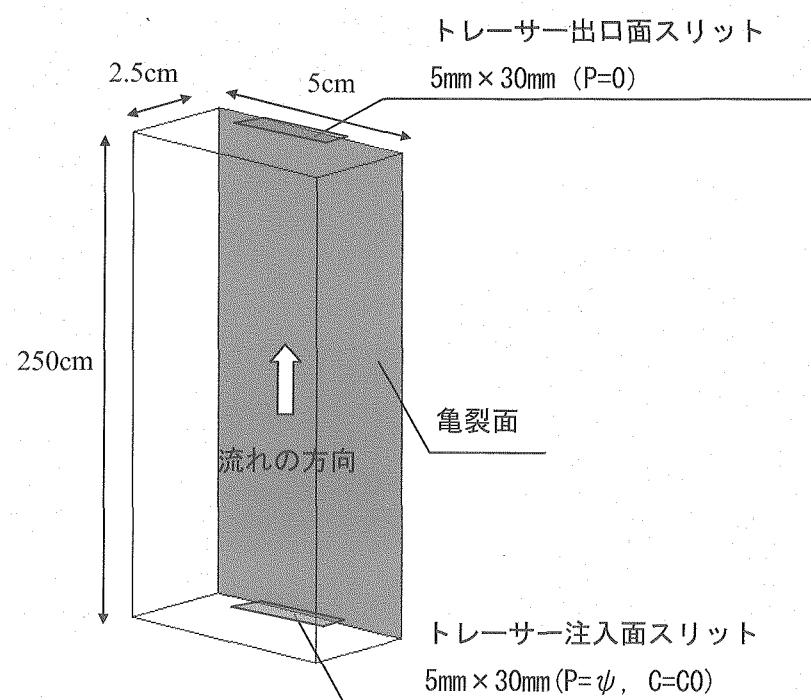


Fig. 3.4-18 トレーサー試験結果 (試料名 : 9-2f3, 封圧 : 1.2MPa)

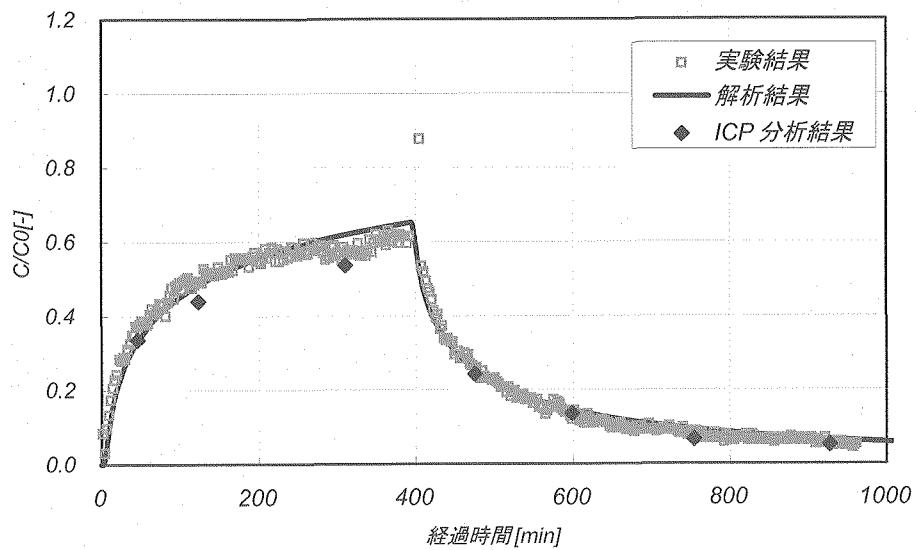
Table 3.4-8 解析入力条件一覧

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
10-1f1	0.034	2.34×10^{-11}	8.33×10^{-11}	9.41×10^{-10}	49	0
11-2f1	0.034	9.62×10^{-11}	3.23×10^{-10}	3.32×10^{-10}	64	0
11-4f1	0.032	5.43×10^{-12}	1.03×10^{-10}	1.33×10^{-10}	55	0
9-2f3	0.035	3.55×10^{-11}	2.90×10^{-11}	3.86×10^{-11}	43	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	・拡散試験結果より 設定	・基本物性試 験結果より設 定	・拡散試験 結果から0と 仮定

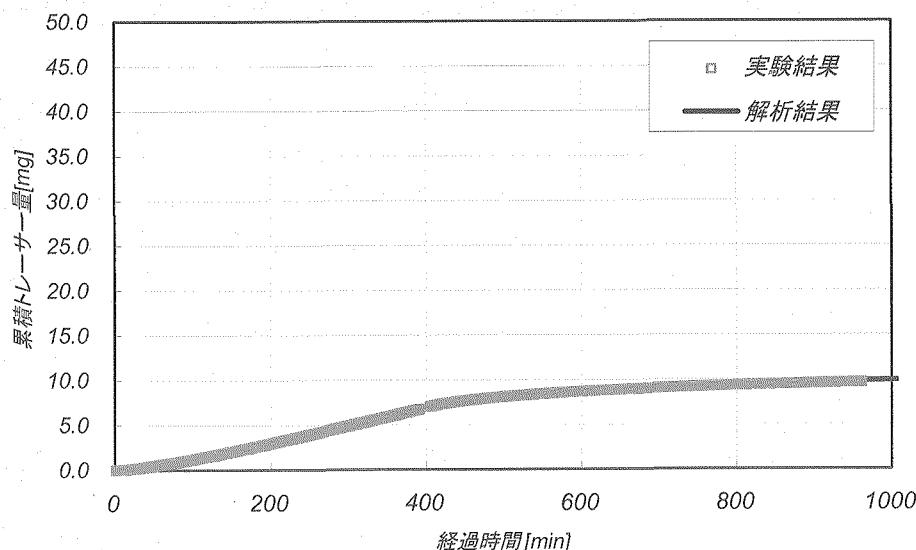


上下面スリット部：水頭固定境界、側面：不透水境界

Fig. 3.4-19 トレーサー試験の解析条件



(a) トレーサー濃度



(b) 累積トレーサー量

Fig. 3.4-20 トレーサー試験の解析結果 (試料名 : 10-1f1, 封圧 : 0.8Mpa)

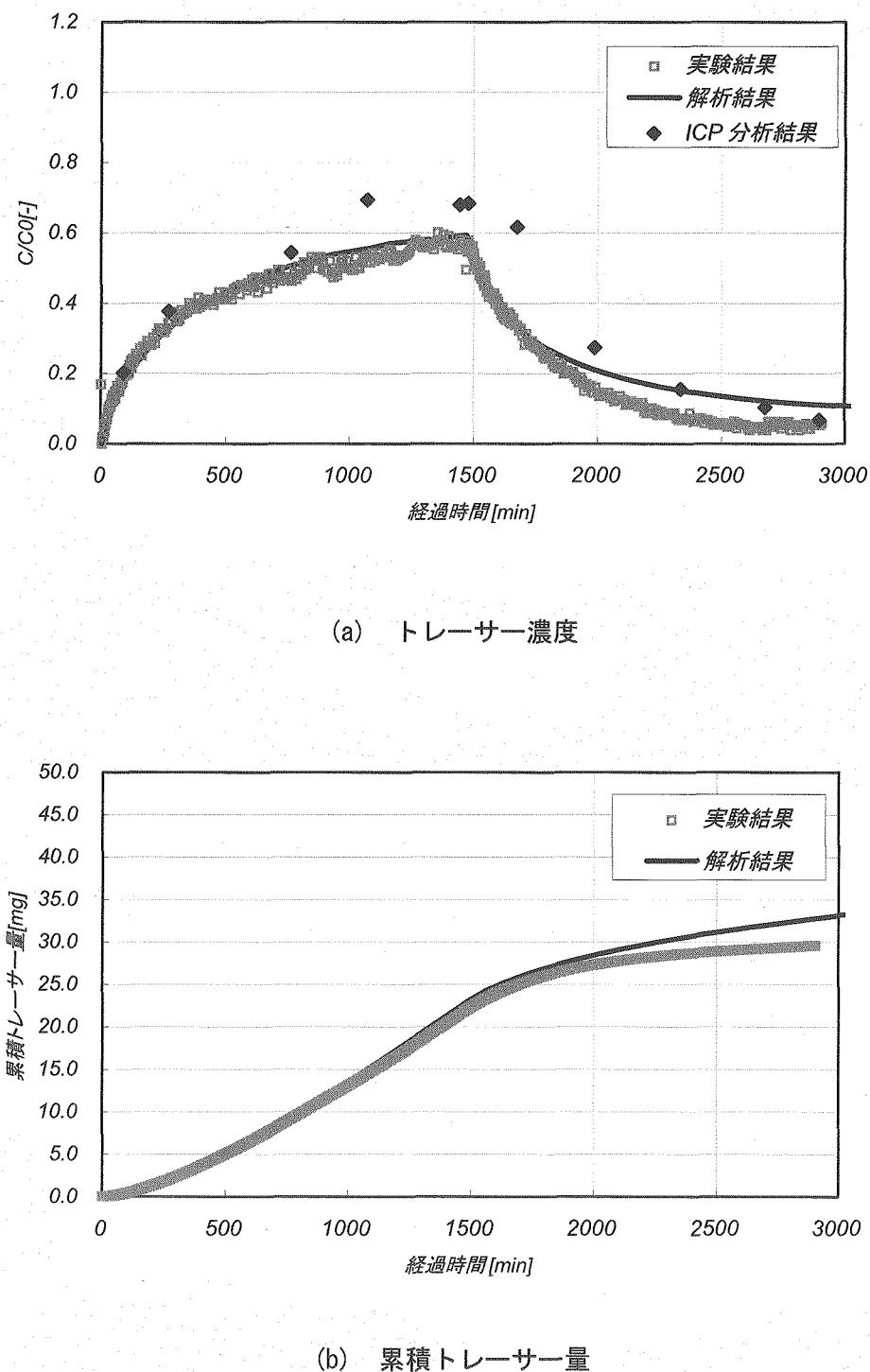
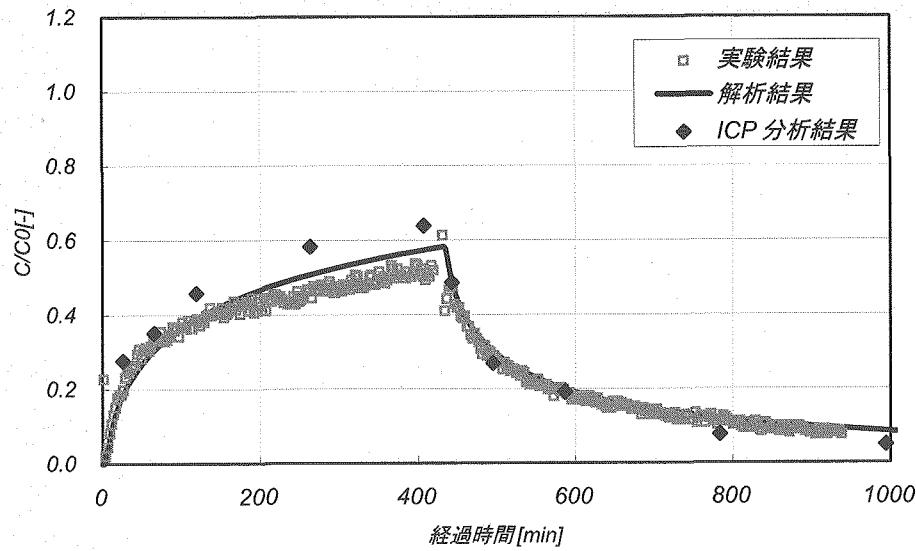
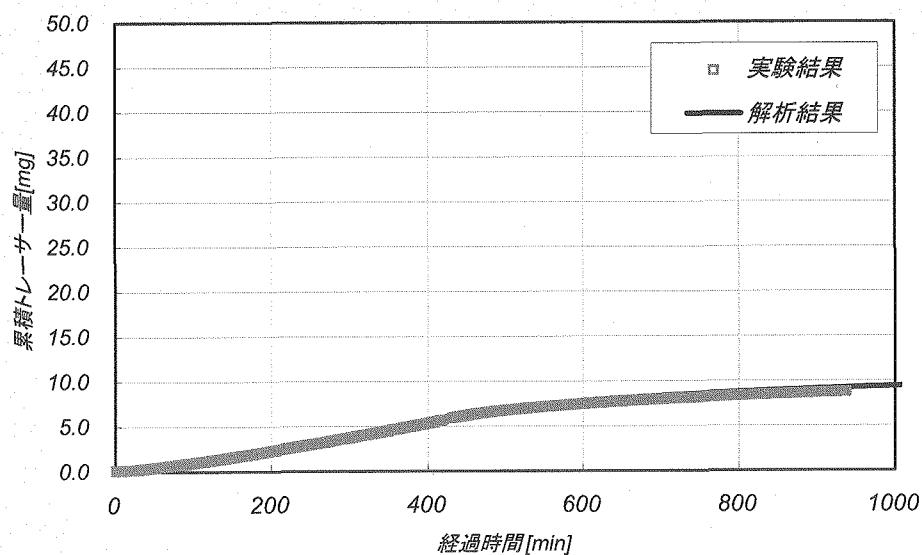


Fig. 3.4-21 トレーサー試験の解析結果（試料名：11-2f1, 封圧：2.4Mpa）

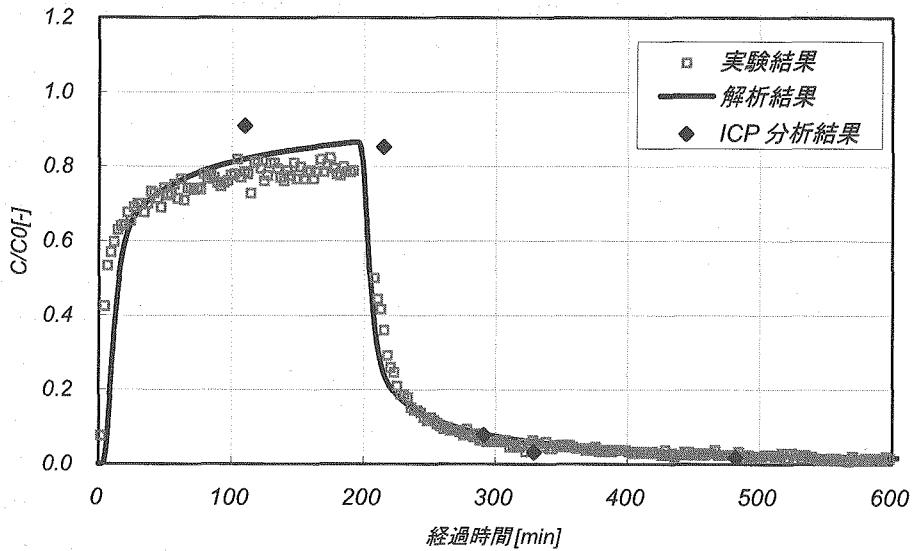


(a) トレーサー濃度

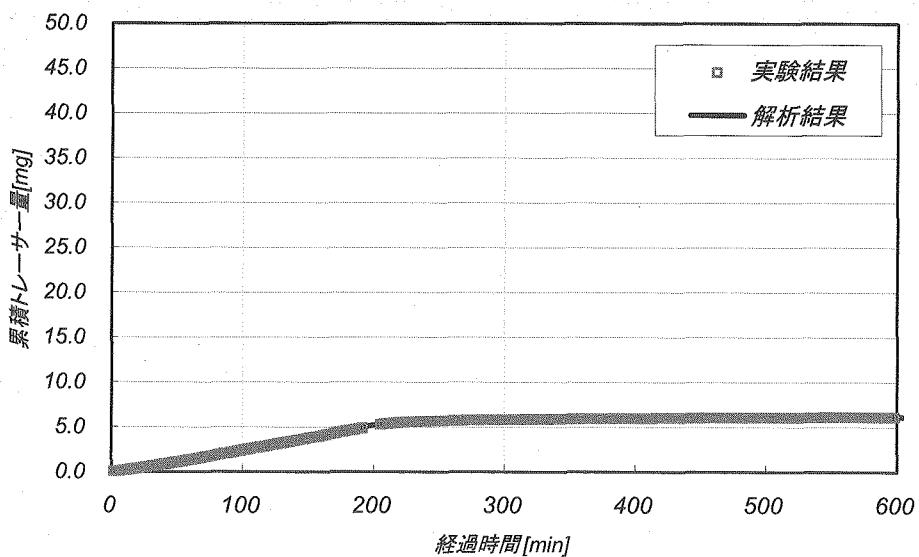


(b) 累積トレーサー量

Fig. 3.4-22 トレーサー試験の解析結果 (試料名 : 11-4f1, 封圧 : 3.6Mpa)



(a) トレーサー濃度



(b) 累積トレーサー量

Fig. 3.4-23 トレーサー試験の解析結果（試料名：9-2f3, 封圧：1.2Mpa）

Table 3.4- 9 トレーサー試験解析結果一覧（今回実施した試料）

試験ケース	マトリクス部 流量 q_m (m^3/s)	亀裂部 流量 q_f (m^3/s)	亀裂内 実流速 v (m/s)	水理 開口幅 e_H (m)	物質移行 開口幅 e_T (m)	分散長 α (m)
9-2f3	2.02×10^{-11}	5.55×10^{-10}	2.77×10^{-3}	3.66×10^{-6}	4.00×10^{-6}	0.0050
10-1f1	7.62×10^{-11}	4.90×10^{-10}	1.63×10^{-3}	3.18×10^{-6}	6.00×10^{-6}	0.0400
11-2f1	7.13×10^{-11}	4.89×10^{-10}	9.79×10^{-3}	5.10×10^{-6}	1.00×10^{-5}	0.0200
11-4f1	2.42×10^{-10}	2.99×10^{-10}	9.97×10^{-4}	1.96×10^{-6}	6.00×10^{-6}	0.0500

Table 3.4- 10 トレーサー試験解析結果一覧（これまでに実施した試料）^{1), 2)}

試験ケース	マトリクス部 流量 q_m (m^3/s)	亀裂部 流量 q_f (m^3/s)	亀裂内 実流速 v (m/s)	水理 開口幅 e_H (m)	物質移行 開口幅 e_T (m)	分散長 α (m)
H15年度	6-2f 0.8MPa	2.66×10^{-10}	2.51×10^{-10}	1.77×10^{-3}	4.72×10^{-6}	4.72×10^{-6}
	6-2f 1.2MPa	2.94×10^{-10}	2.23×10^{-10}	1.83×10^{-3}	4.06×10^{-6}	4.06×10^{-6}
	6-2f 1.6MPa	3.75×10^{-10}	1.50×10^{-10}	1.73×10^{-3}	2.88×10^{-6}	2.88×10^{-6}
	6-4f	2.74×10^{-10}	3.09×10^{-10}	1.47×10^{-3}	3.75×10^{-6}	0.0350
H14年度	2-1f③	—	4.92×10^{-10}	9.83×10^{-4}	6.69×10^{-6}	1.00×10^{-5}
	3-2f①	—	5.33×10^{-10}	1.52×10^{-3}	5.83×10^{-6}	7.00×10^{-6}
	3-2f②	—	5.25×10^{-10}	1.31×10^{-3}	5.05×10^{-6}	8.00×10^{-6}
	3-2f③	—	5.33×10^{-10}	1.33×10^{-3}	4.34×10^{-6}	8.00×10^{-6}
	3-2f④	—	5.42×10^{-10}	1.35×10^{-3}	3.93×10^{-6}	8.00×10^{-6}
	4-1f③	—	5.75×10^{-10}	8.21×10^{-4}	8.19×10^{-6}	1.40×10^{-5}

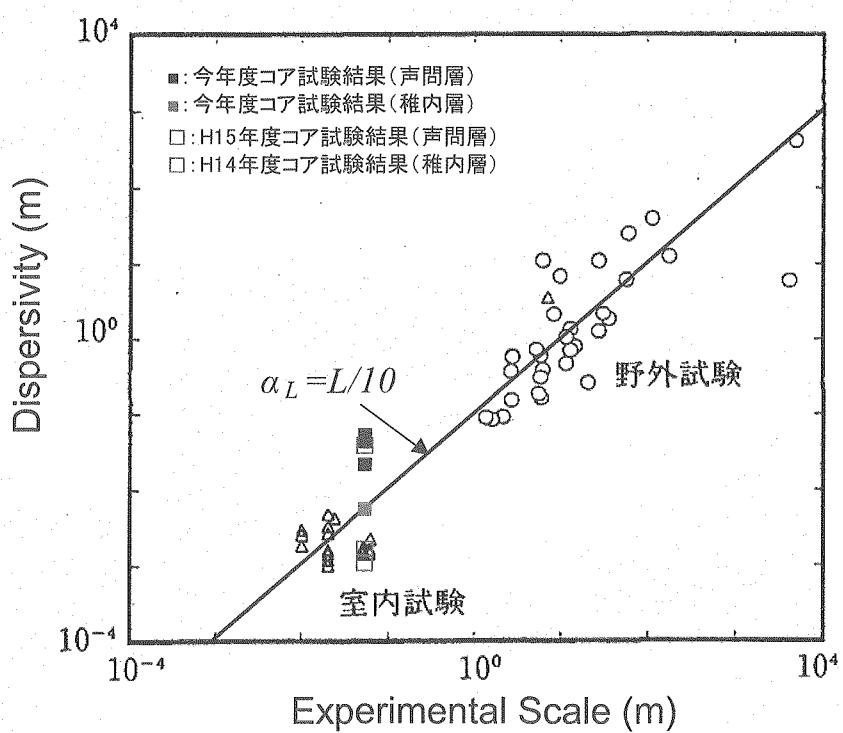


Fig. 3.4-24 分散長と試験スケールの関係（既往データとの比較）

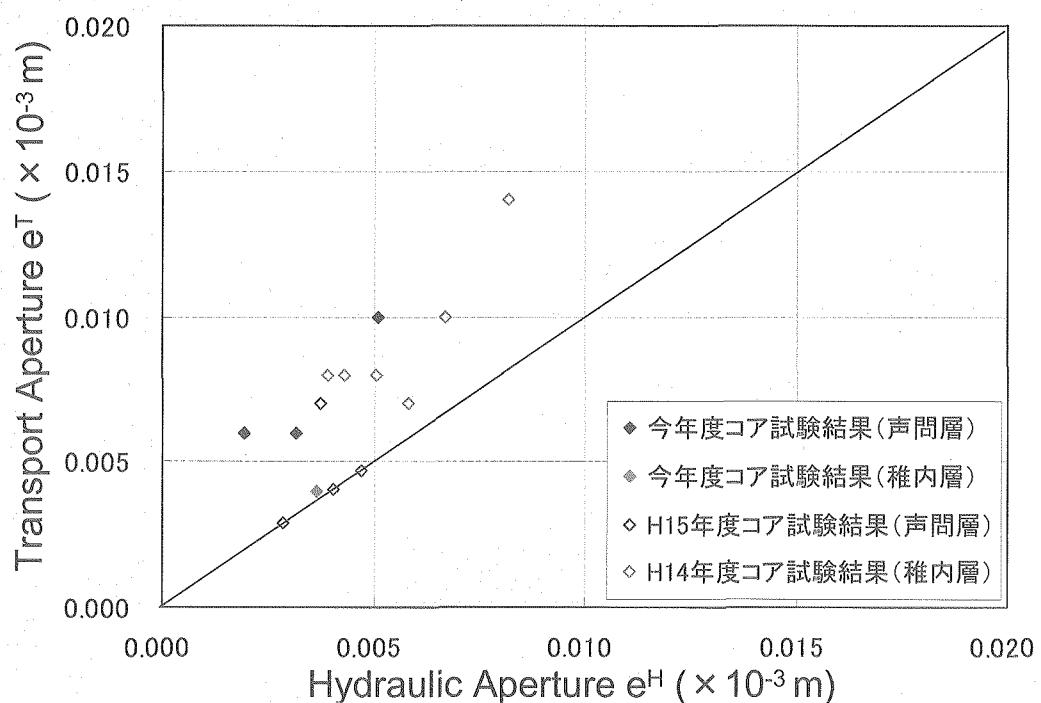
(文献⁹⁾に一部加筆)

Fig. 3.4-25 物質移行開口幅と水理開口幅の関係

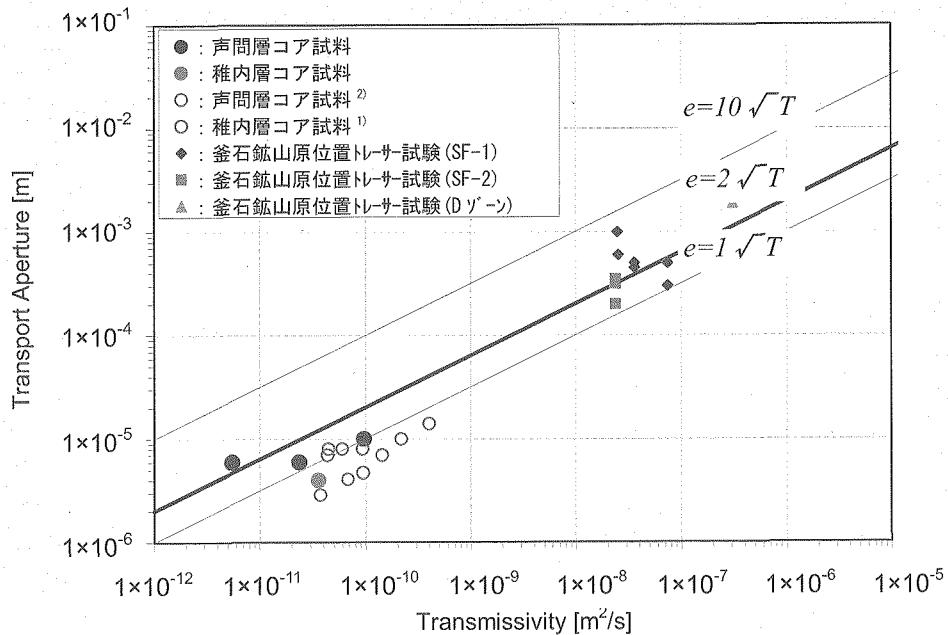
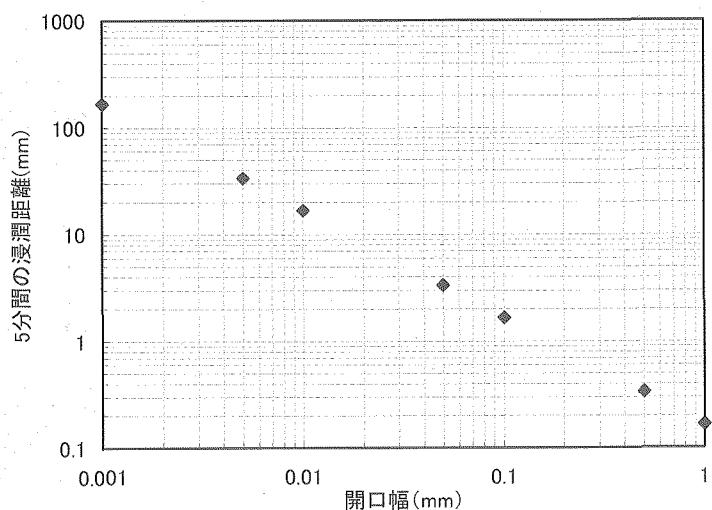
Fig. 3.4-26 透水量係数と物質移行開口幅の関係（釜石原位置試験データとの比較）¹¹⁾

Fig. 3.4-27 開口幅と5分間の亀裂内の浸潤距離の関係

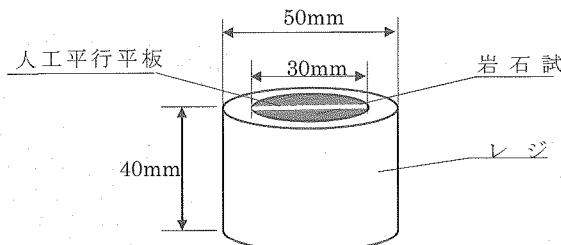


Fig. 3.4-28 測定試料

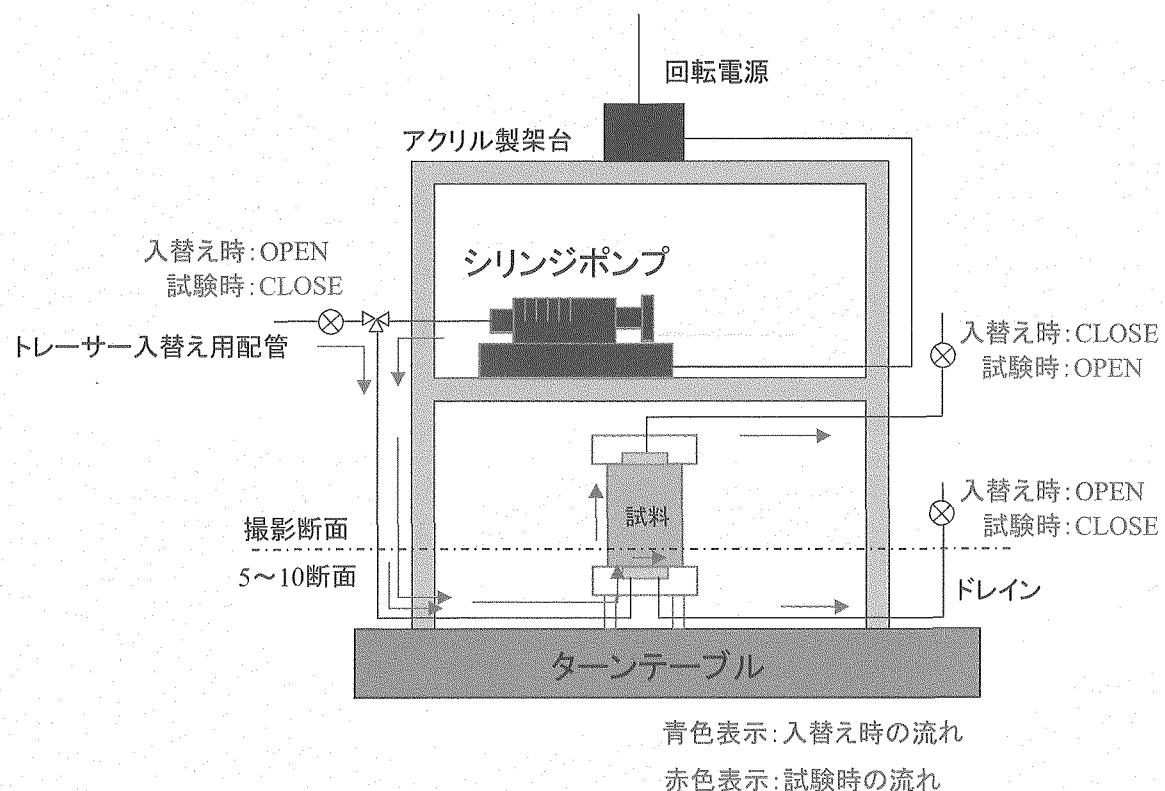


Fig. 3.4-29 X 線 CT 測定に用いたトレーサー試験装置の概念図

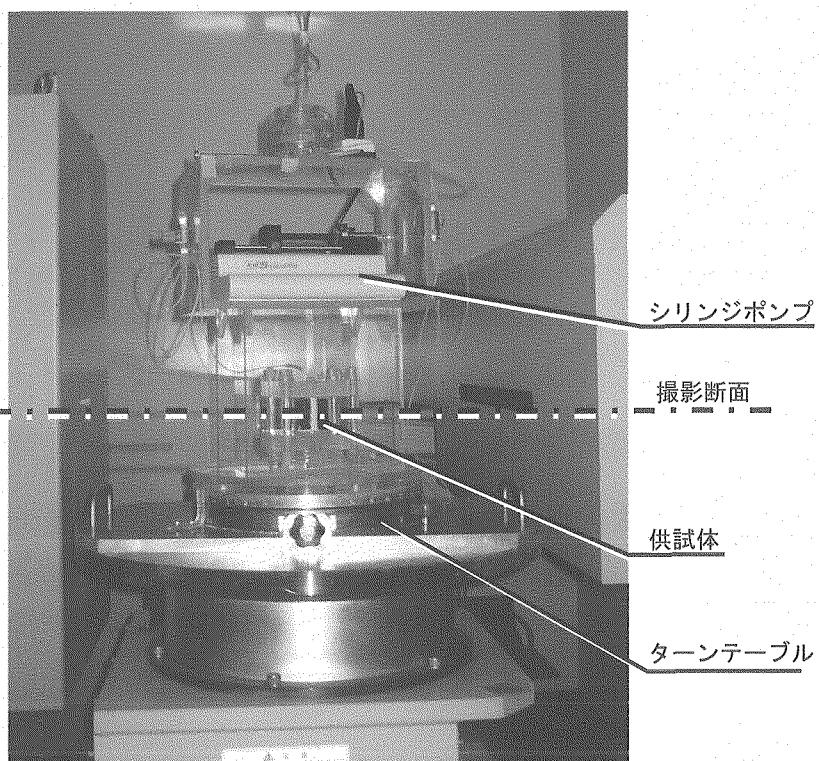


Photo 3.4-2 X 線 CT 測定に用いたトレーサー試験装置全景

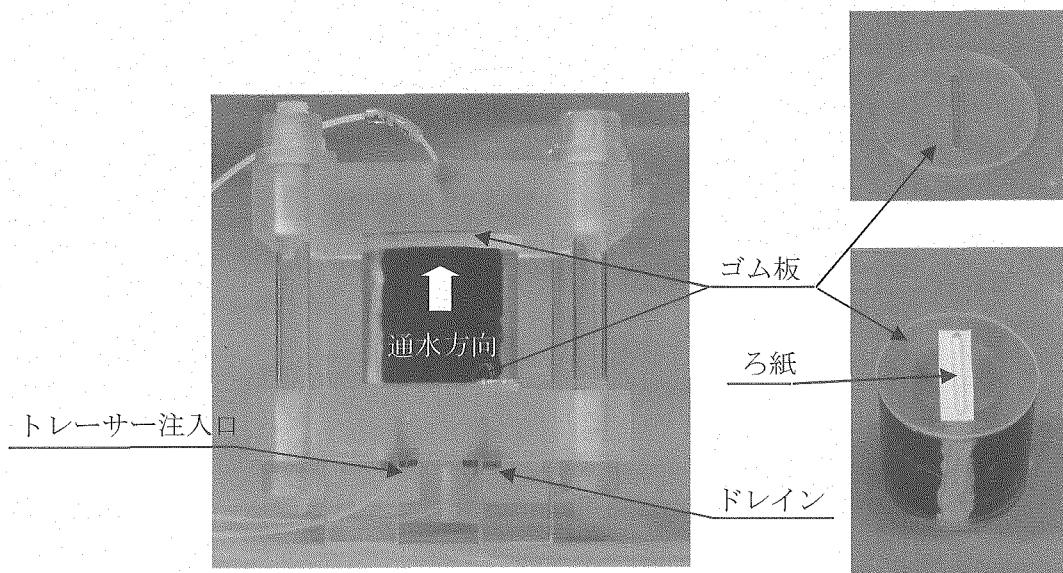
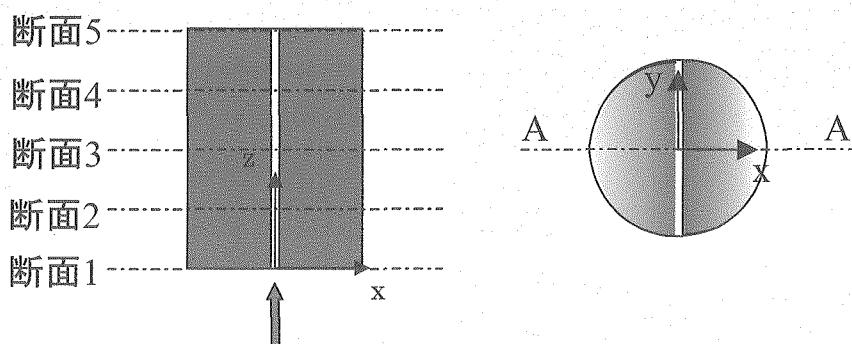


Photo 3.4-3 X 線 CT 測定に用いたトレーサー試験装置の概要

Table 3.4-11 X 線 CT 測定に用いたトレーサー試験条件

項目	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
トレーサー濃度	377(g/L)→密度 : 1.256(g/L)
注入流量	0.001 (ml/min) 定流量
温度	室温 (22°C~25°C)



(a) 測定断面位置

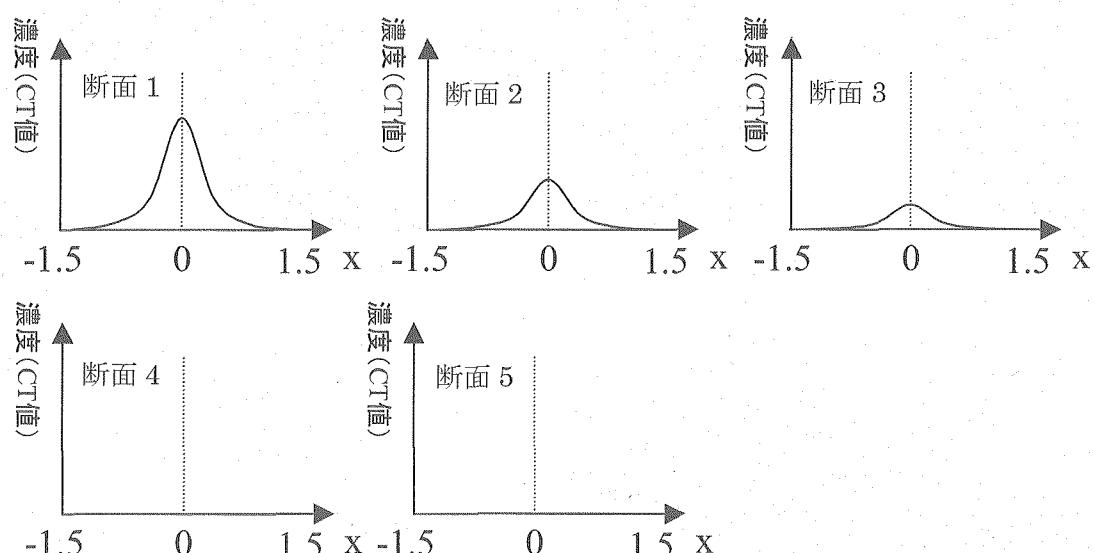
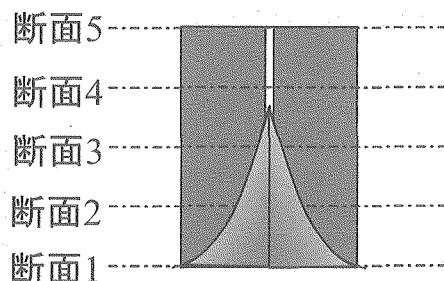
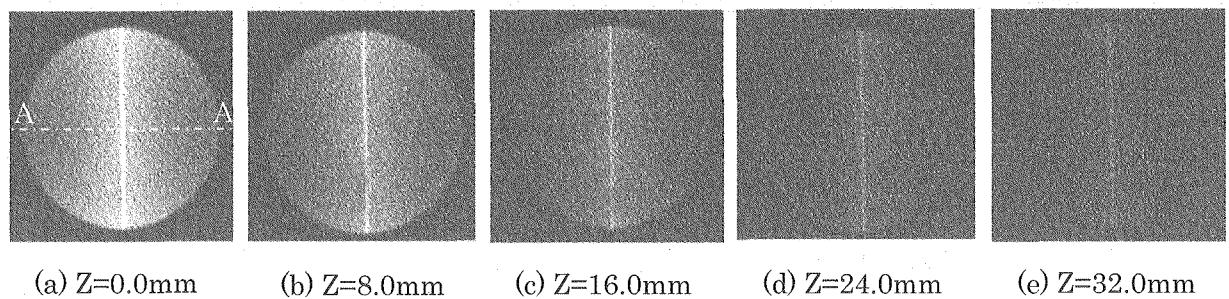
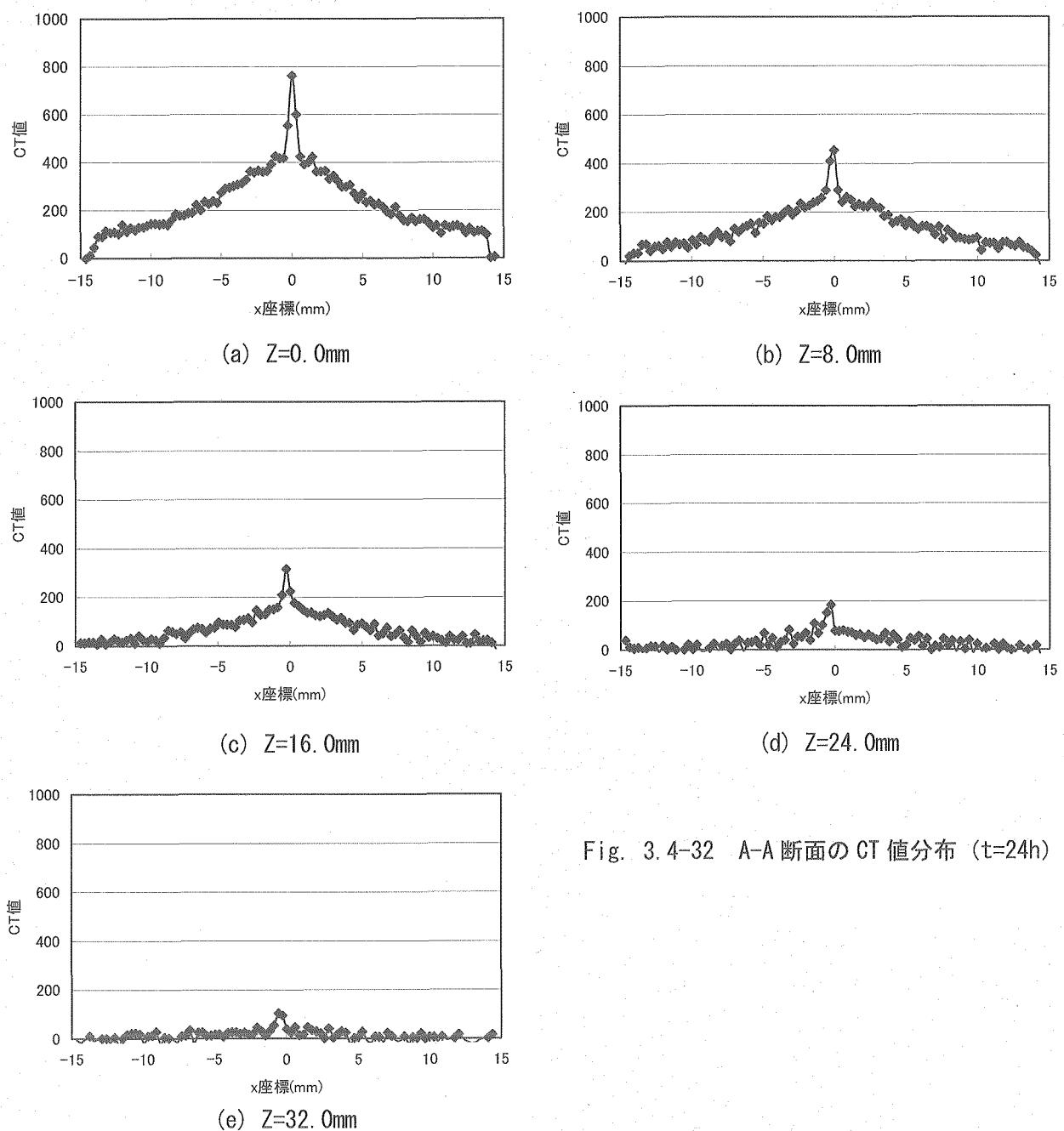
(b) 断面での差画像 ($t=t_1$)(c) 各撮影断面での A-A 断面の濃度 (CT 値) 分布 ($t=t_1$)(d) 試料内部の濃度 (CT 値) 分布 ($t=t_1$, 補間データ)

Fig. 3.4-30 データ整理方法の概要

Fig. 3.4-31 X 線 CT 差画像 ($t=24\text{h}$)Fig. 3.4-32 A-A 断面の CT 値分布 ($t=24\text{h}$)

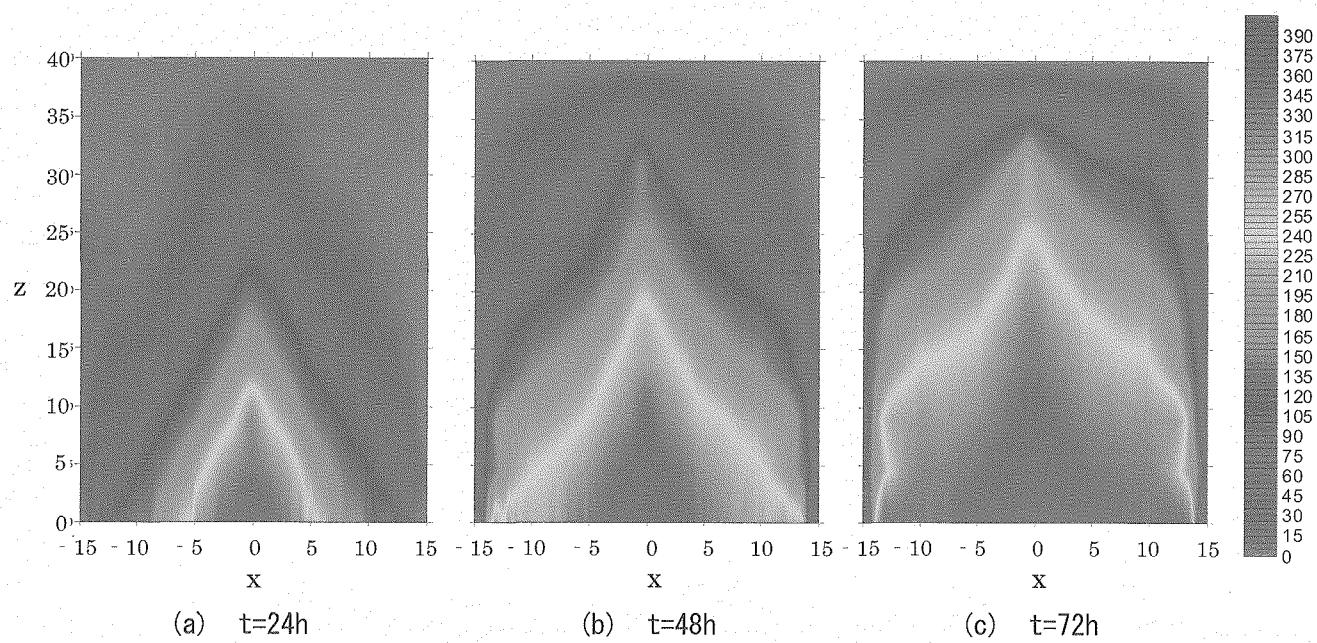


Fig. 3.4-33 試料内部の CT 値分布（補間データ）

Table 4.1-1 ブロック試料採取一覧

試料名	採取日	採取場所	地質	亀裂の有無
B-1	2004/12/1	諏訪沢林道の露頭	声問層	無
B-2	2004/12/1	牧野山林採石場	稚内層	無
B-3	2004/12/1			有

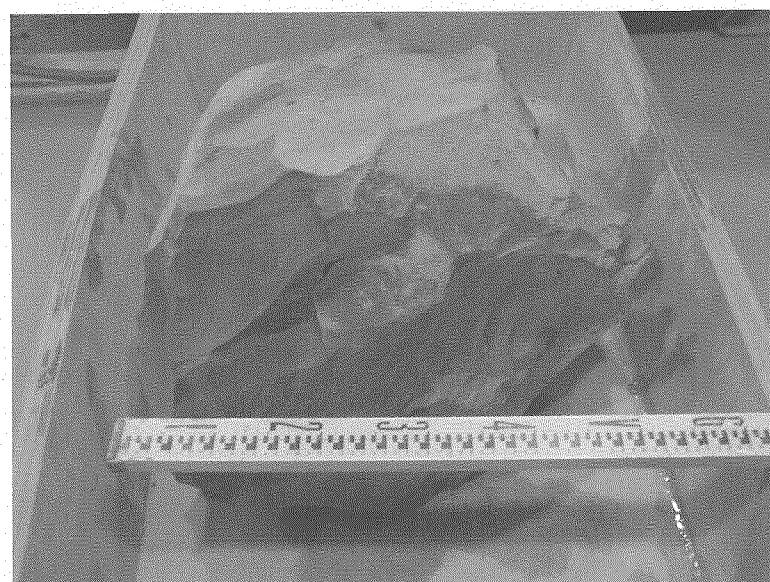
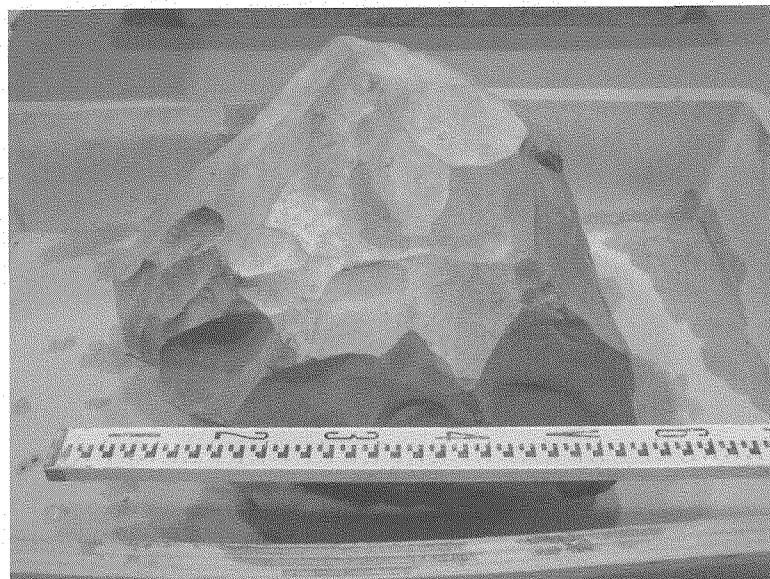


Photo 4.1-1 採取試料全景（試料名：B-1）

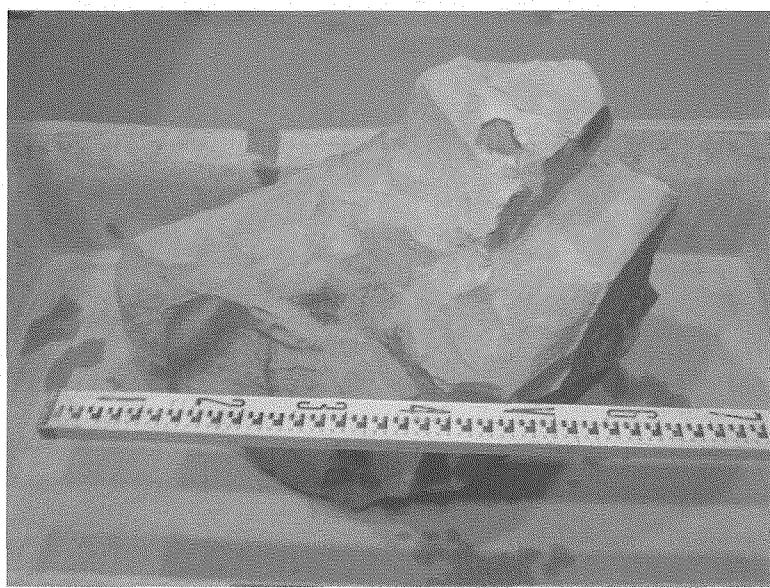


Photo 4.1-2 採取試料全景（試料名：B-2）

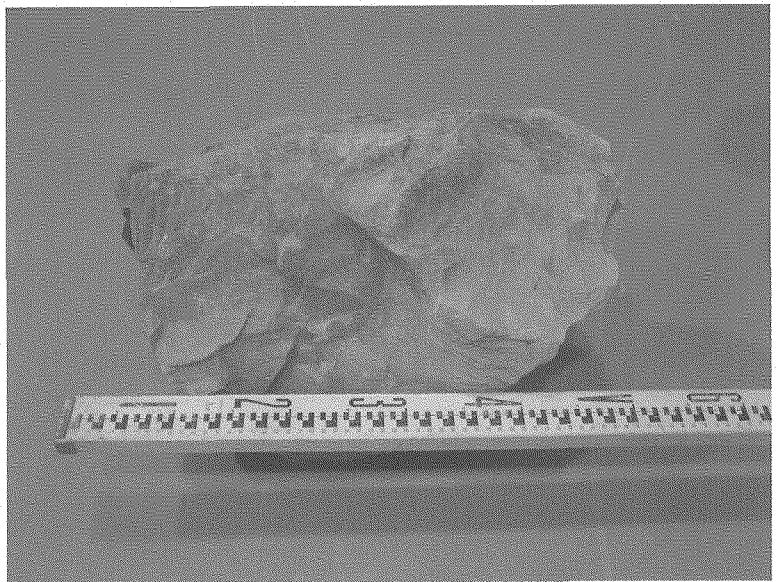


Photo 4.1-3 採取試料全景（試料名：B-3）

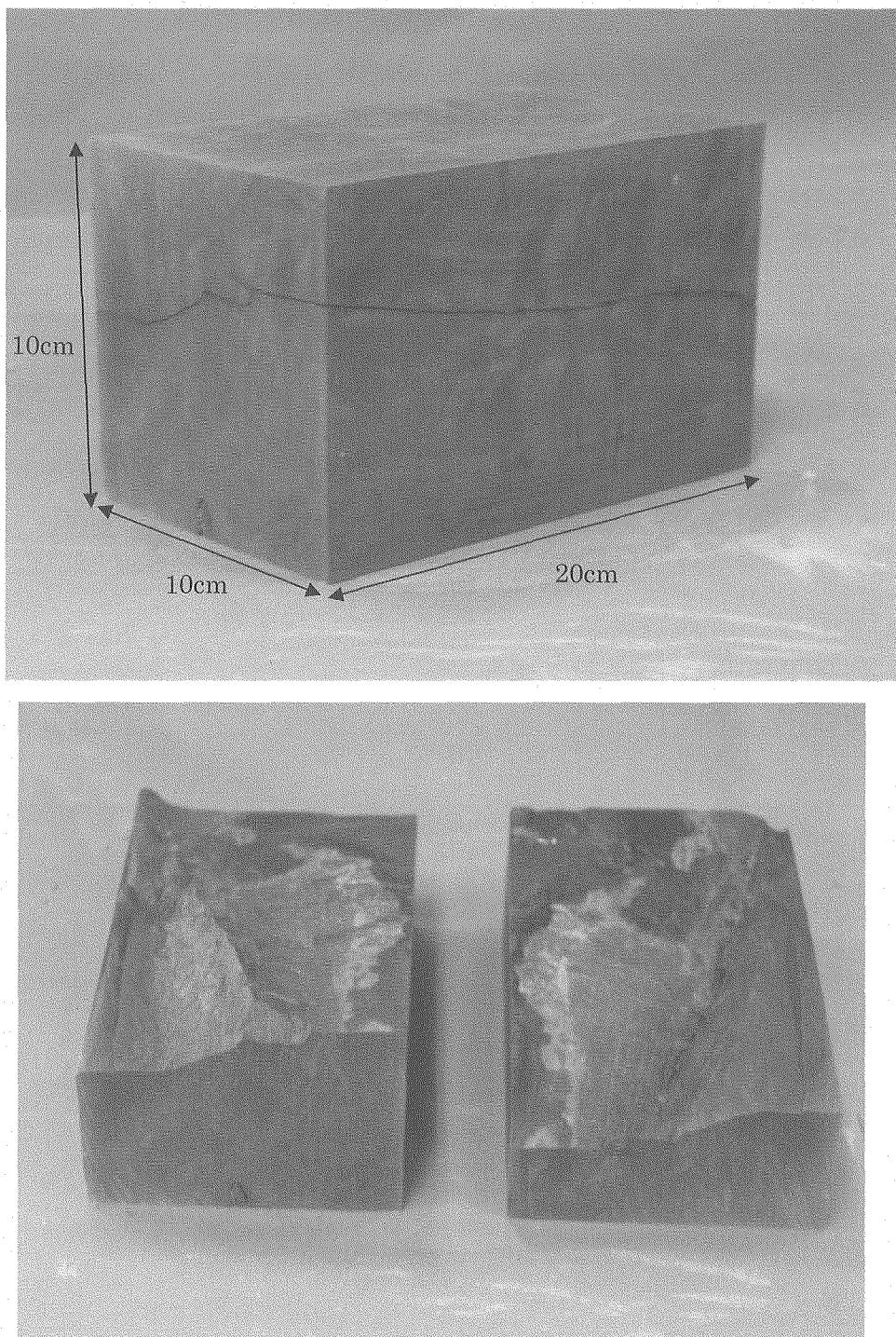


Photo 4.1-4 ブロック試料整形結果（稚内層：自然亀裂試料）

Table 4.2-1 ブロック試料分析項目一覧

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

Table 4.2-2 ブロック試料基本物性試験結果一覧

試料名称	比重(g/cm ³)			含水比(-)	飽和度(%)	有効空隙率(%)	吸水率(%)	弾性波速度(km/s)	
	自然状態	強制乾燥状態	強制湿潤状態					P波速度	S波速度
B-3	1.821	1.379	1.824	0.32	99.20	44.6	32.3	2.86	0.98

※ 強制乾燥状態：供試体を 110°C 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。

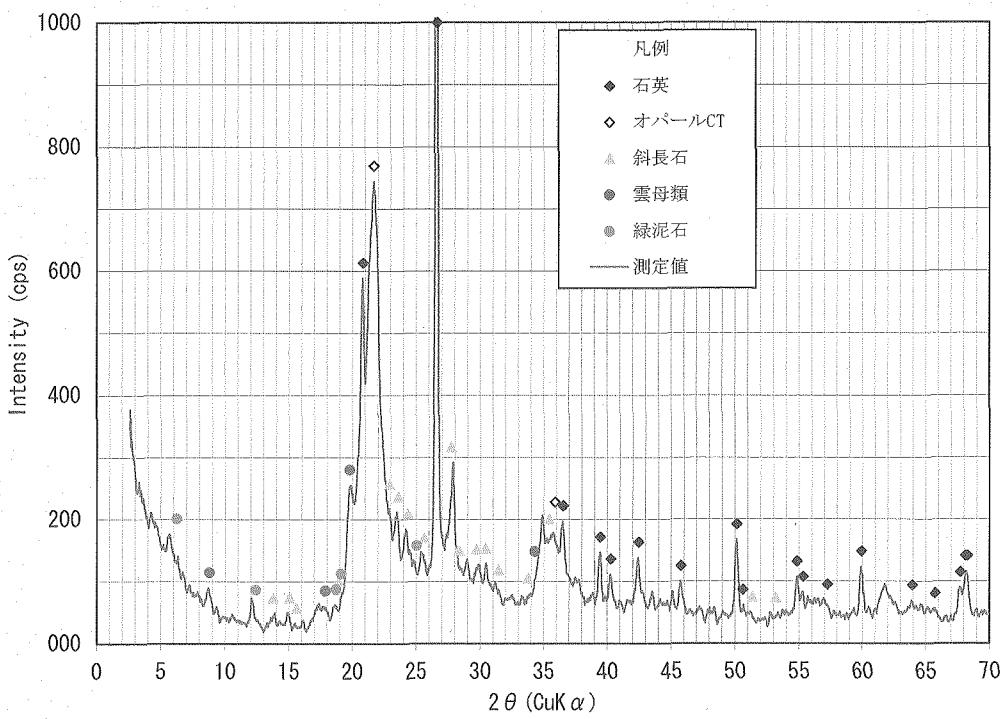
Table 4.2-3 ブロック試料一軸圧縮試験結果一覧

試料名	単位体積重量 (kN/m ³)	一軸圧縮試験								
		一軸圧縮強度 (MPa)		静弾性係数 (外部) (MPa)		静弾性係数 (内部) (MPa)		破壊ひずみ (%)		静弾性比
		17.4	24.14	22.40	2280	3088	1.09	0.129	17.4	20.66
B-3	17.4	17.4	20.66	22.40	2188	3430	3630	1.00	1.01	0.130
	17.4		16.60		1945	4371			0.89	0.130

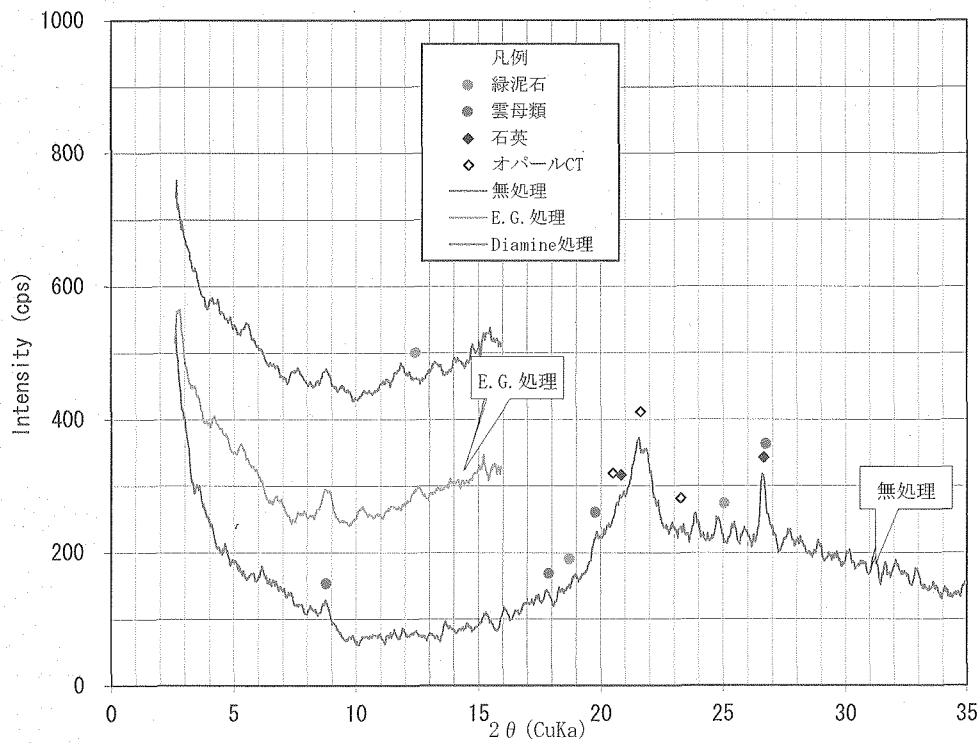
Table 4.2-4 X 線分析結果一覧 (ブロック試料 : B-3)

試料名	シリカ鉱物				長石				沸石		粘土鉱物			備考		
	非晶質 石英	オパール C	オパール T	トリジマイト	クリストバライト	カリ長石	斜長石	菱鉄鉱	黄鉄鉱	石膏	濁沸石	斜碧玉	スメクタイト	緑泥石	雲母類	カオリין
B-3	△	○			△							△	△			

凡例: ○ 中量, △ 少量～微量



(a) 不定方位法



(b) 定方位法

Fig. 4.2-1 X線分析結果（ブロック試料：B-3）

Table 4.2-5 水銀圧入試験結果（ブロック試料：B-2）

試料名	空隙率 (%)	累積細孔体積 (mL/g)	累積細孔比表面積 (m ² /g)	嵩密度 (g/cm ³)	真密度 (g/cm ³)	試料重量 (g)
B-3	42.6	0.323	112.2	1.317	2.293	0.606

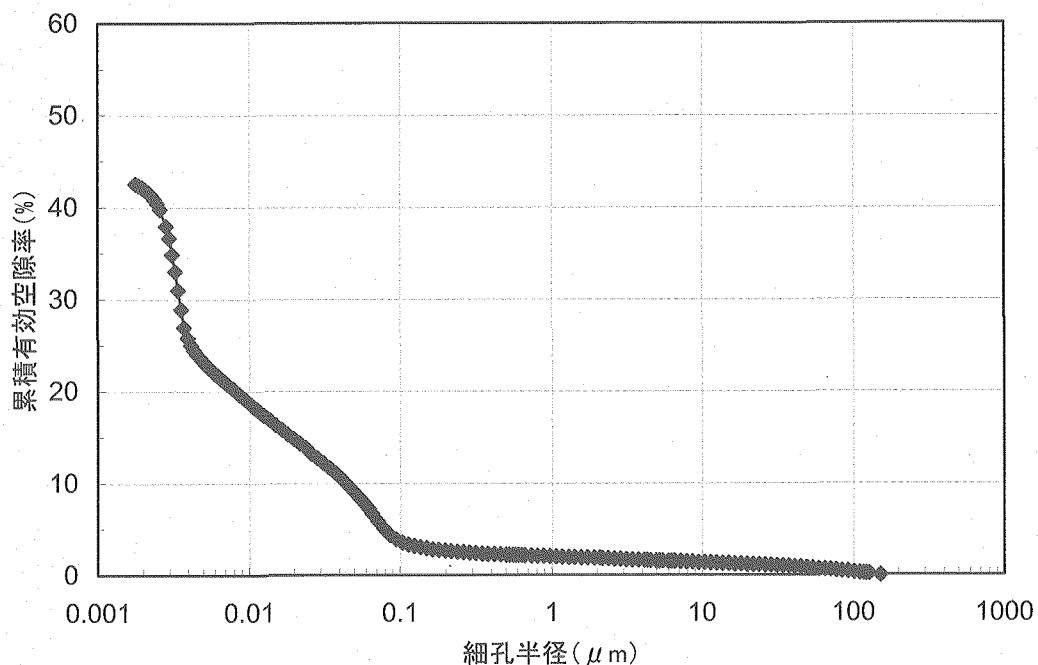


Fig. 4.2-2 水銀圧入法による細孔径分布測定結果（ブロック試料：B-3）

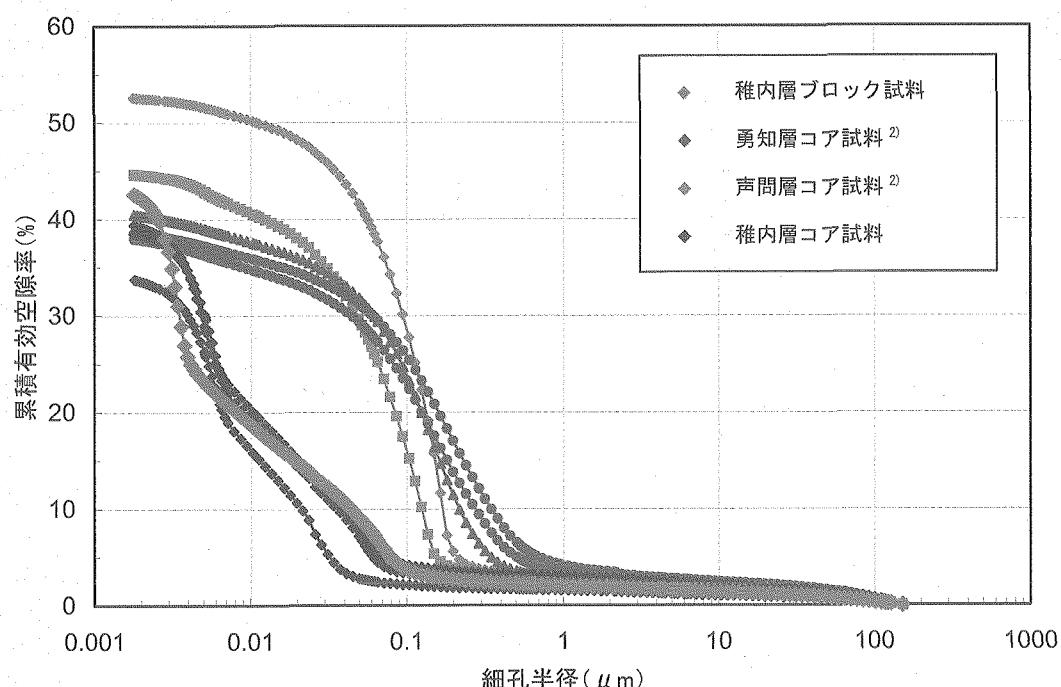
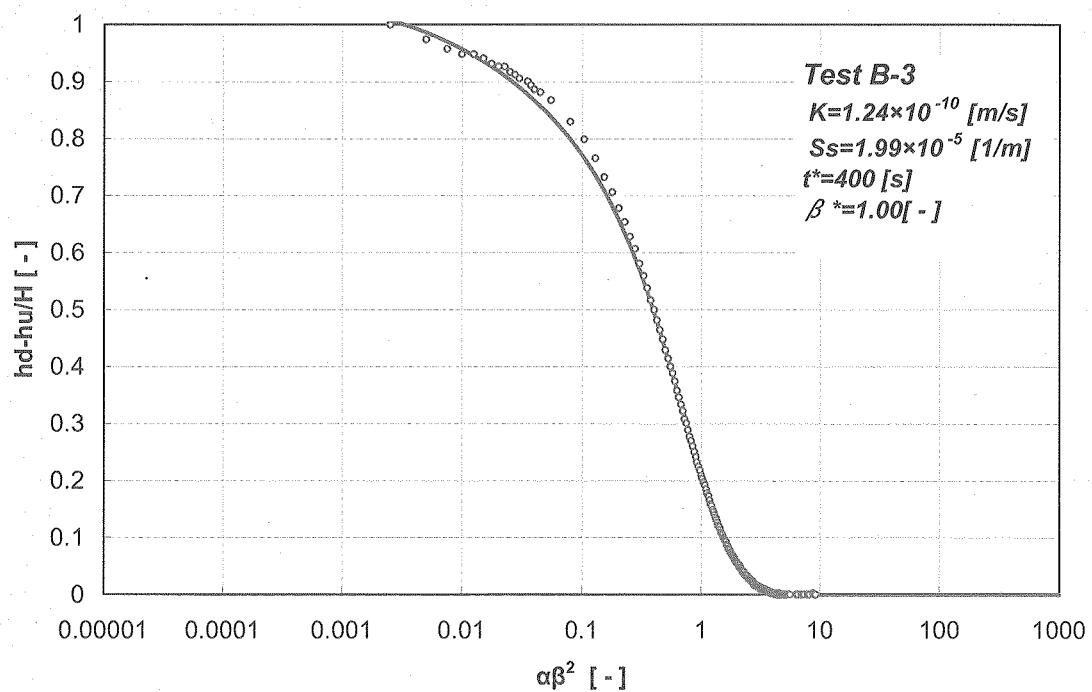
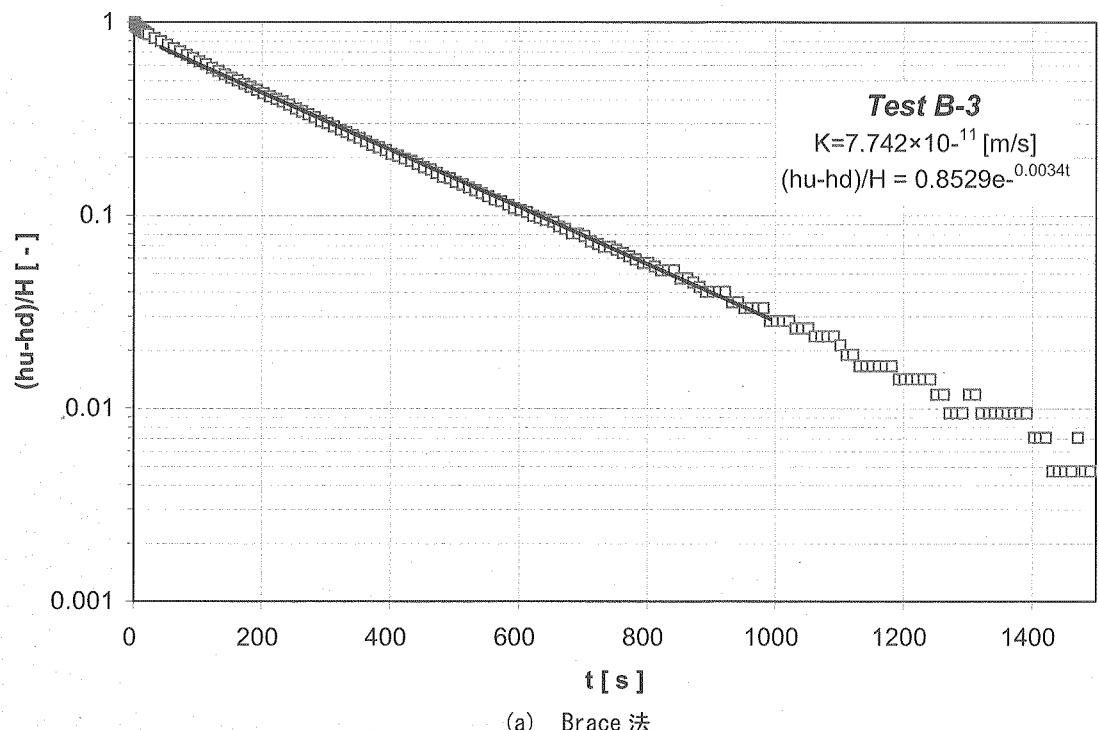


Fig. 4.2-3 水銀圧入法による細孔径分布測定結果（コア試料とブロック試料の比較）

Table 4.3-1 トランジエントパルス透水試験結果一覧 (ブロック試料 : B-3)

採取場所	地層名	試料名	採取深度 (m)	封圧 [MPa]		間隙水圧 [MPa]	パルス圧 [MPa]	透水係数 (m/s)		比貯留係数 (1/m)
				軸圧	側圧			Brace 法	差圧を用いた Hsieh 法	
牧野山林採石場	稚内層	B-3	-	0.30	0.30	0.10	0.05	7.74×10^{-11}	1.24×10^{-10}	1.99×10^{-5}



(b) 差圧を用いた Hsieh 法

Fig. 4.3-1 トランジエントパルス透水試験結果 (ブロック試料 B-3)

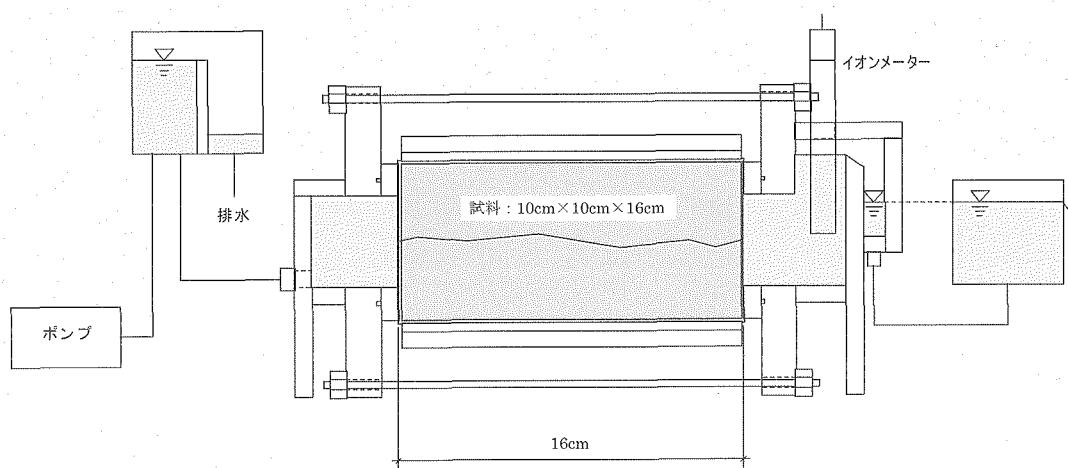


Fig. 4.3-2 定水頭透水試験装置概要

Table 4.3-2 定水頭透水試験結果一覧 (ブロック試料: B-3)

試料名	地層名	採取場所	水圧差 [m]	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]
B-3	稚内層	牧野山林 採石場	0.50	0.61	5.97×10^{-8}	1.09×10^{-6}

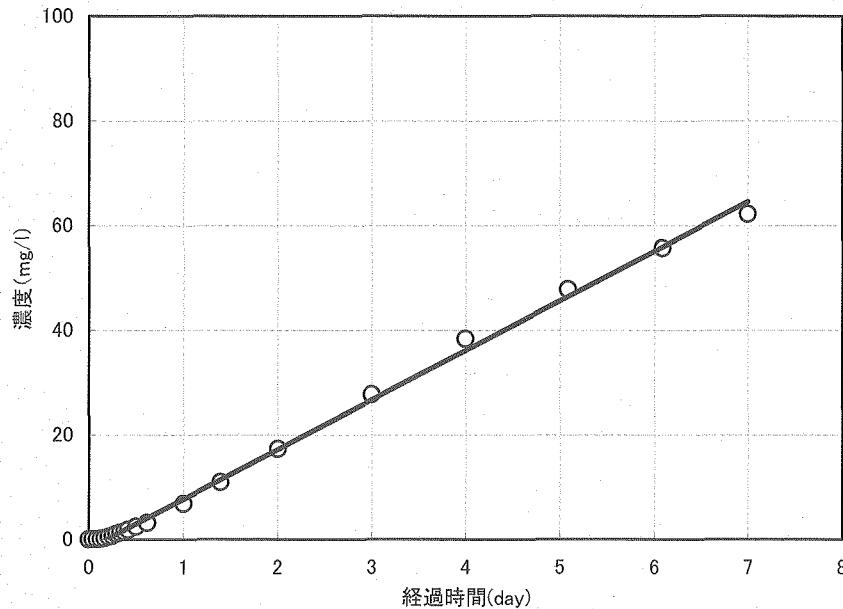
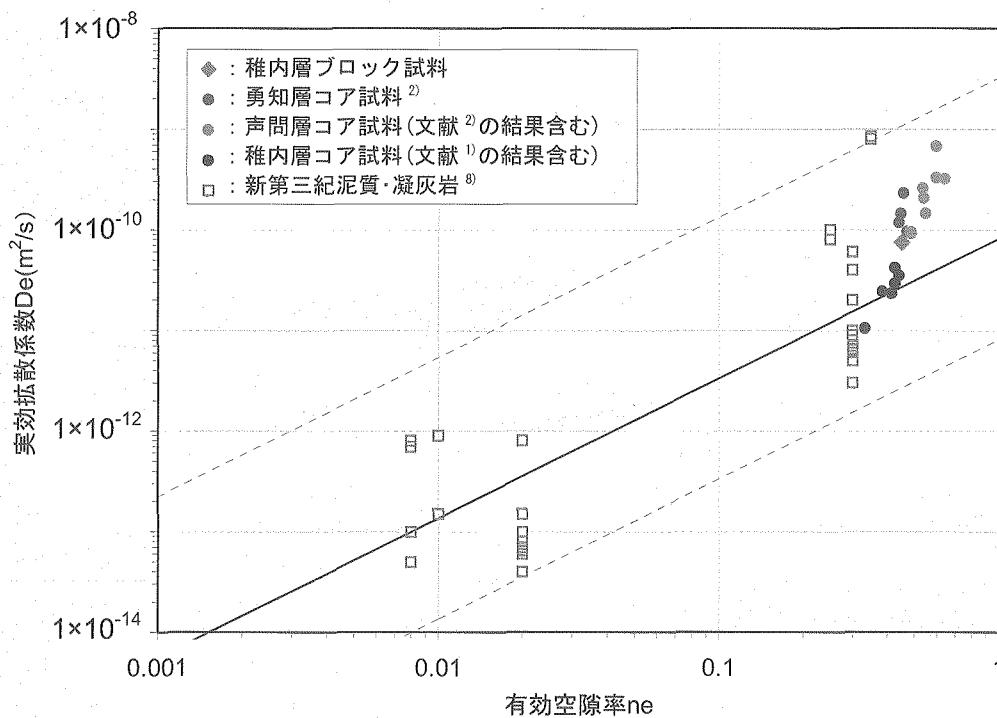


Fig. 4.4-1 拡散試験結果（ブロック試料：B-3）

Table 4.4-1 拡散試験結果一覧（ブロック試料：B-3）

試料名	実効拡散係数 De (m^2/sec)	見かけの拡散係数 Da (m^2/sec)	収着容量 α	分配係数 m^3/kg	有効間隙率 ne
B-3	7.54×10^{-11}	3.84×10^{-10}	0.196	-0.0002	0.450

Fig. 4.4-2 実効拡散係数と有効空隙率の比較（既往データとの比較）⁸⁾

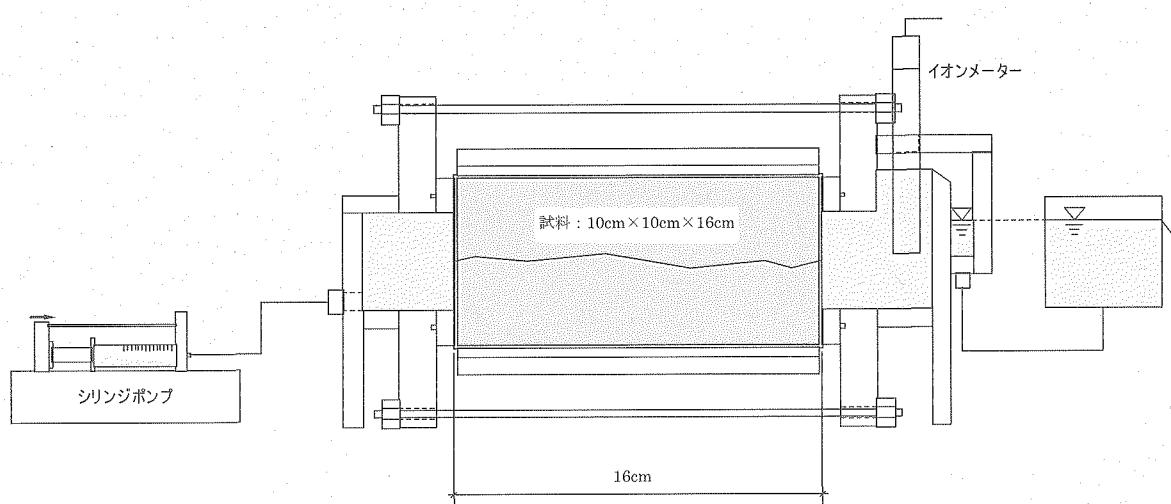


Fig. 4.4-3 ブロック試料用セル型トレーサー試験装置概要

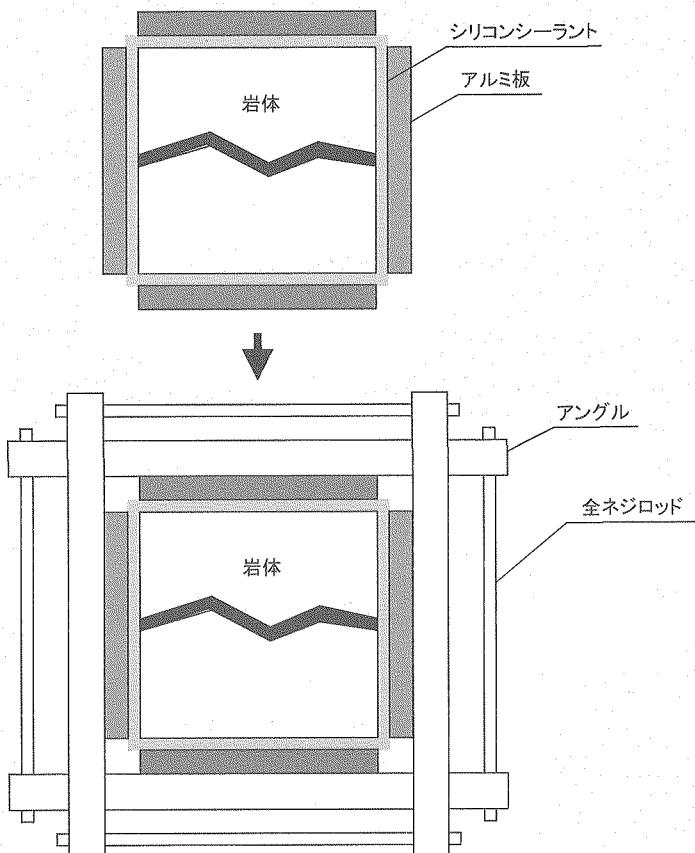


Fig. 4.4-4 供試体作製の模式図

Table 4.4-2 ブロック試料トレーサー試験条件（ブロック試料：B-3）

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

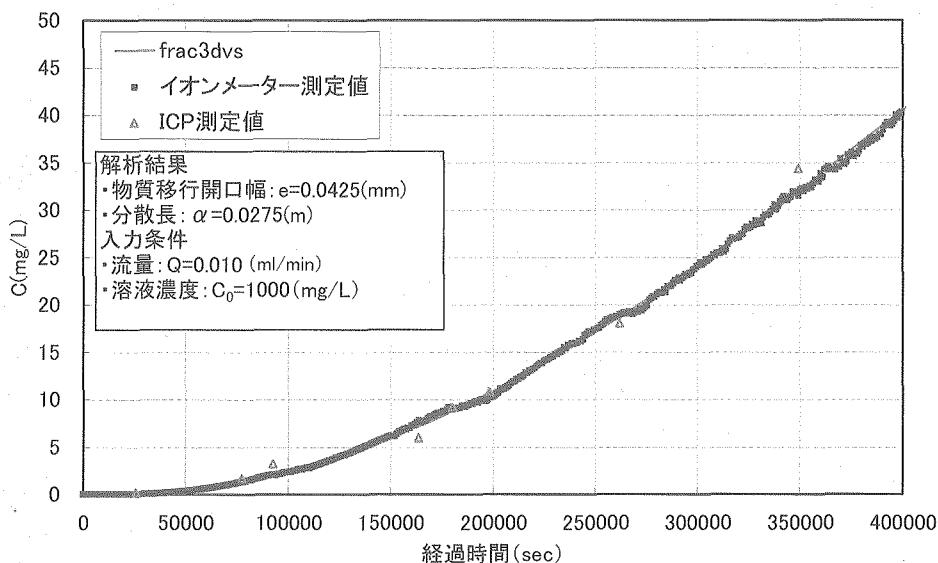


Fig. 4.4-5 トレーサー試験結果（ブロック試料：B-3）

Table 4.4-3 ブロック試料トレーサー試験解析入力条件一覧

試料名	注入流量 (ml/min)	水理開口幅 (mm)	マトリクス部 透水係数 (m/s)	マトリクス部 実効拡散係数 (m ² /s)	マトリクス部 有効空隙率 (%)
B-3	0.010	0.043	1.24×10^{-10}	7.54×10^{-11}	45
設定根拠	試験条件より設定	透水試験結果より設定	透水試験結果より設定	拡散試験結果より設定	基本物性試験より設定

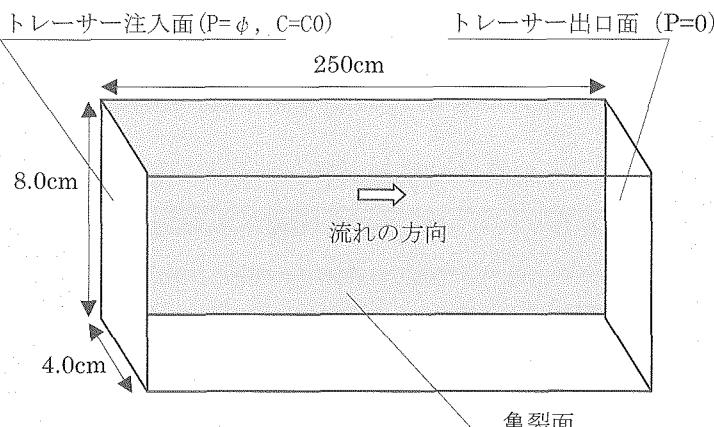


Fig. 4.4-6 トレーサー試験の解析条件（ブロック試料：B-3）

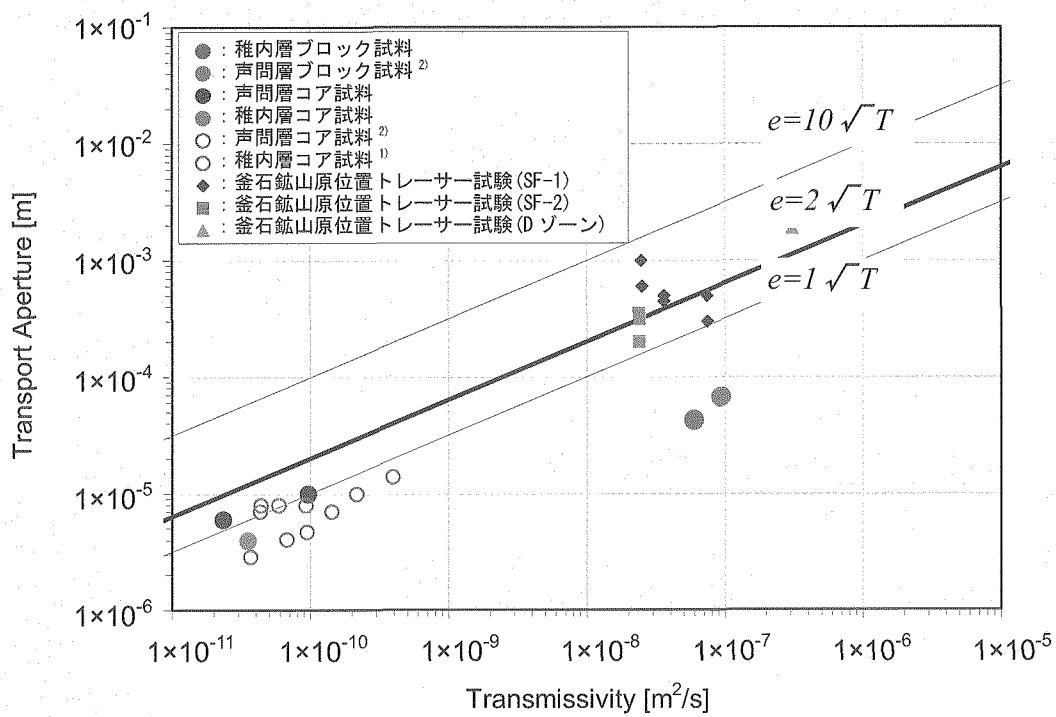
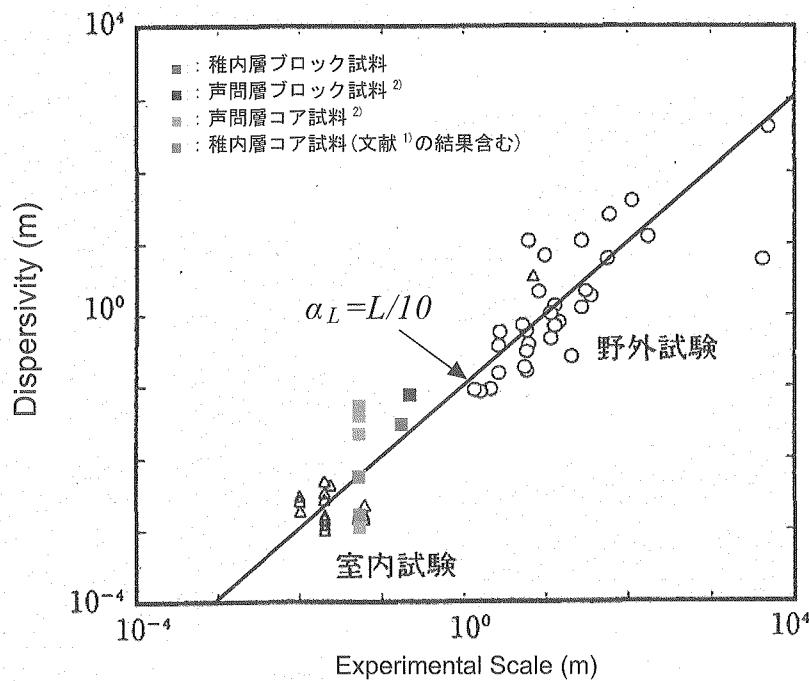
Fig. 4.4-7 透水量係数と物質移行開口幅の関係（釜石原位置試験データとの比較）¹¹⁾

Fig. 4.4-8 分散長と試験スケールの関係（既往データとの比較）

(文献¹⁰⁾に一部加筆)

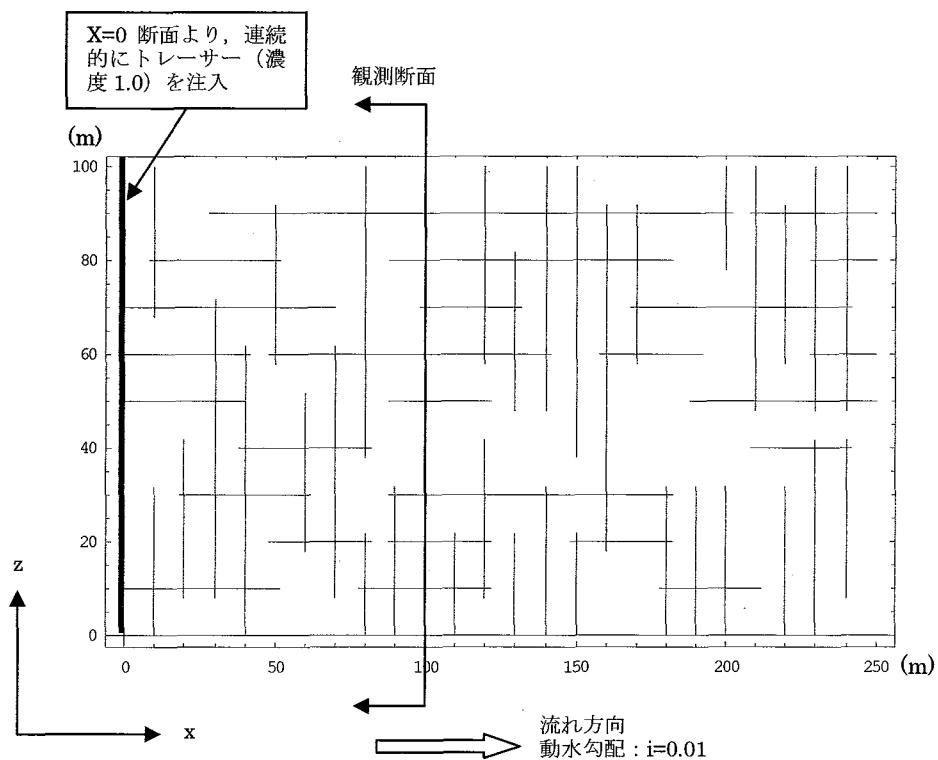


Fig. 5.1-1 解析モデル概要 (亀裂ネットワークモデル)

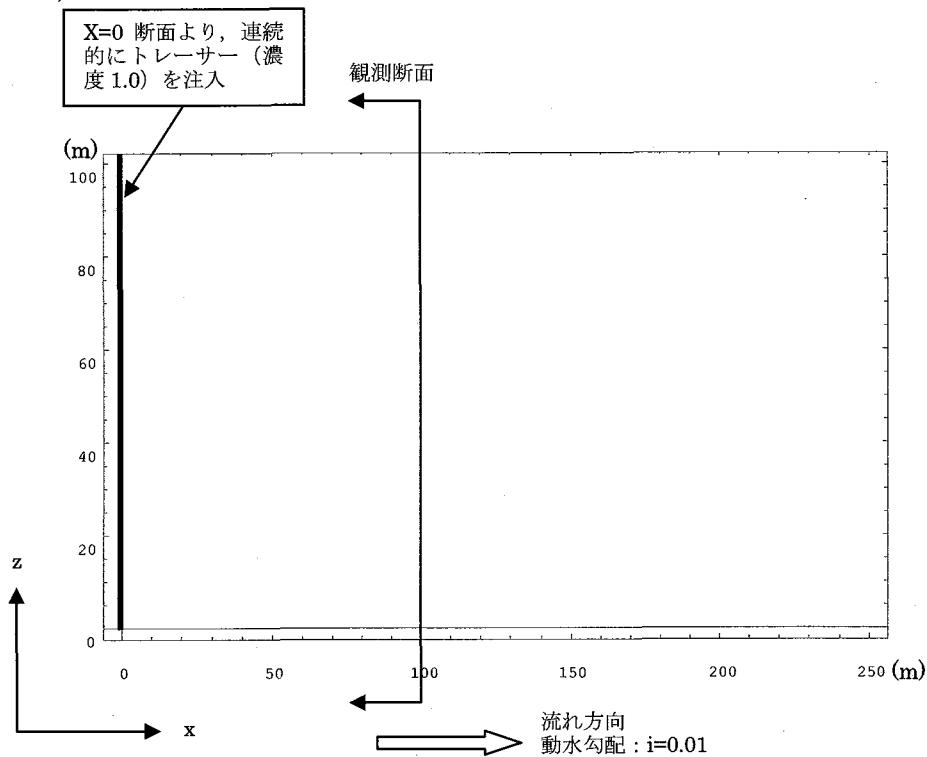


Fig. 5.1-2 解析モデル概要（多孔質媒体モデル）

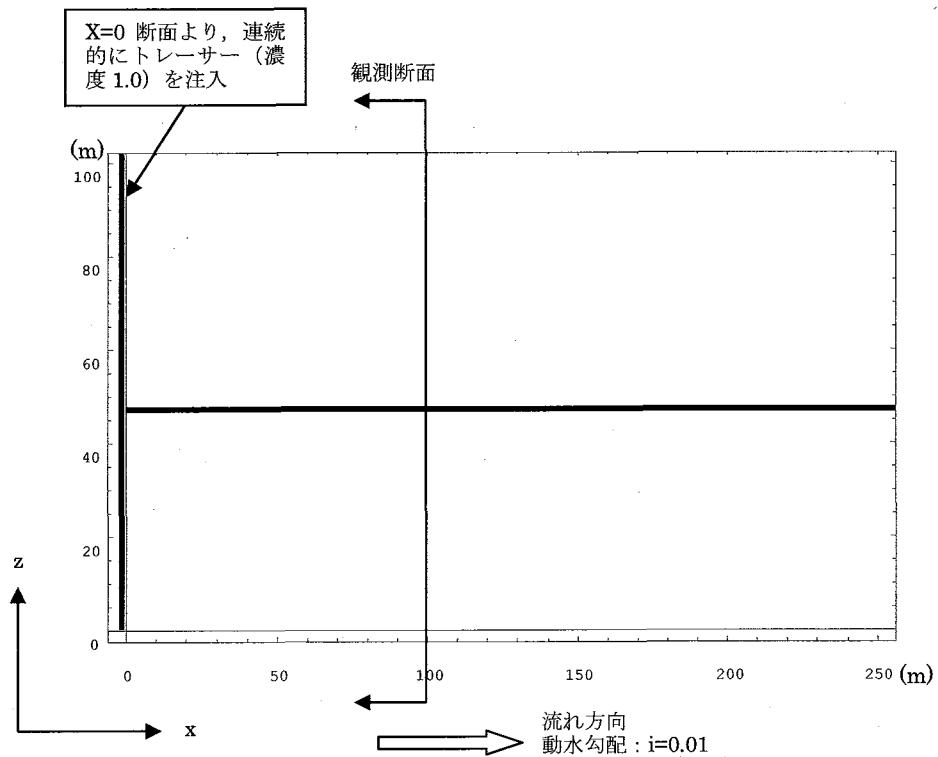


Fig. 5.1-3 解析モデル概要（二重空隙モデル）

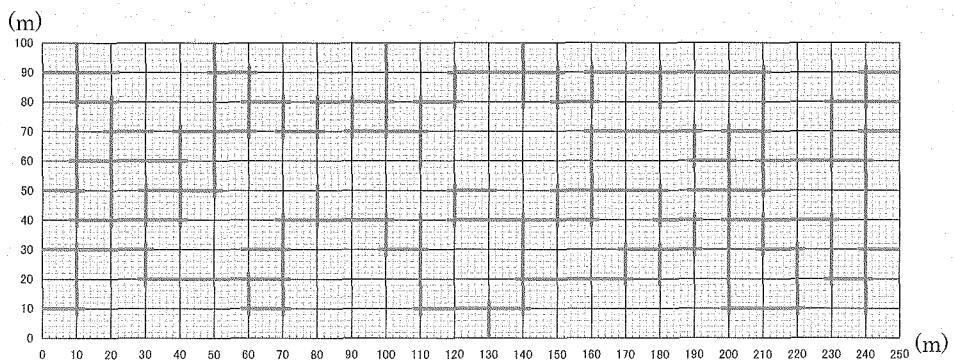


Fig. 5.1-4 龜裂ネットワークモデルにおける亀裂分布（亀裂密度：30%）

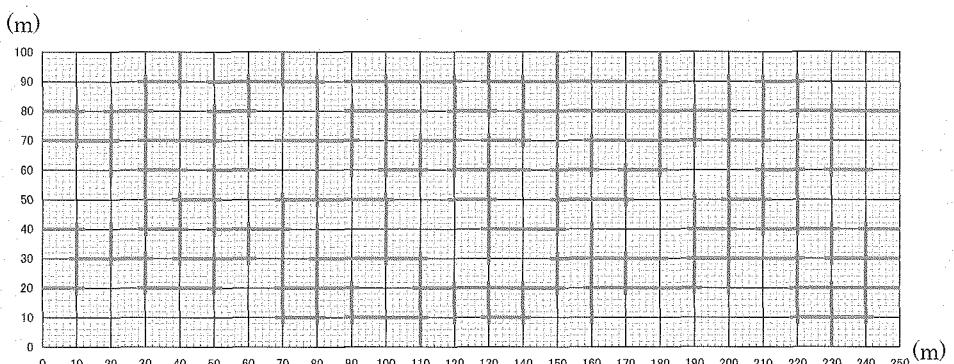


Fig. 5.1-5 龜裂ネットワークモデルにおける亀裂分布（亀裂密度：40%）

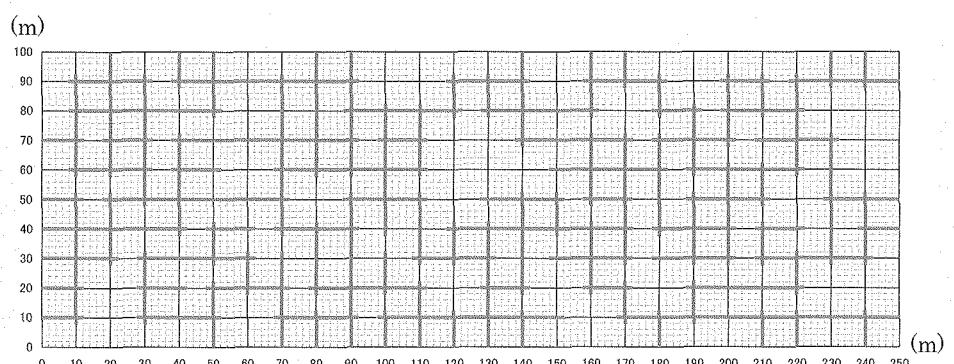


Fig. 5.1-6 龜裂ネットワークモデルにおける亀裂分布（亀裂密度：50%）

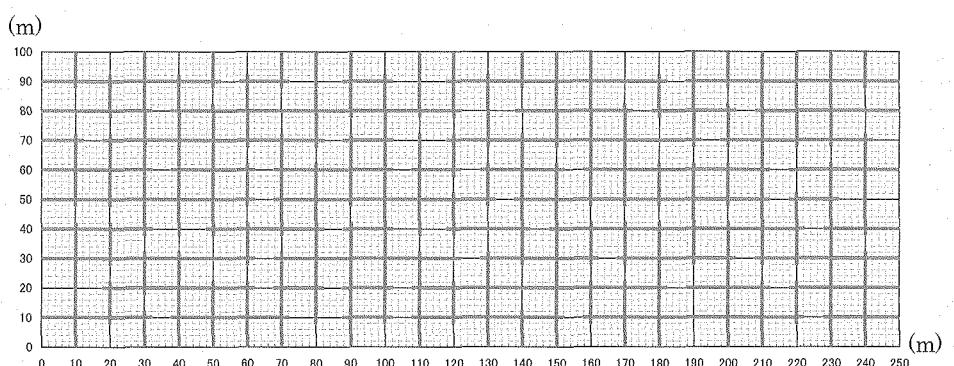


Fig. 5.1-7 龜裂ネットワークモデルにおける亀裂分布（亀裂密度：70%）

Table 5.1-1 多孔質媒体モデルによる破過曲線のフィッティング結果一覧

開口幅(mm)	亀裂密度(%)	入力パラメータ	フィッティングパラメータ
		km(m/s)	α m(m)
1.0×10^{-2}	30	1.24×10^{-10}	20.2
	40	1.29×10^{-10}	19.3
	50	1.37×10^{-10}	18.2
	70	1.50×10^{-10}	20.0
5.0×10^{-2}	30	1.50×10^{-9}	49.9
	40	1.85×10^{-9}	40.5
	50	2.49×10^{-9}	40.1
	70	4.43×10^{-9}	39.5
1.0×10^{-1}	30	1.05×10^{-8}	333
	40	1.34×10^{-8}	298
	50	1.81×10^{-8}	221
	70	3.41×10^{-8}	117

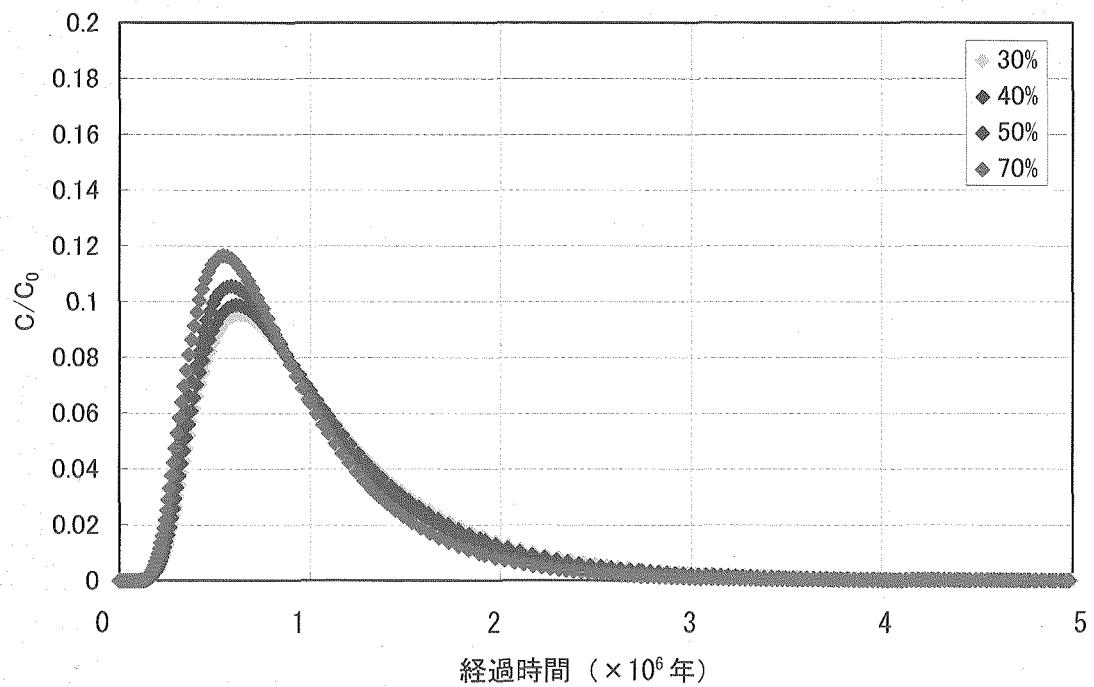


Fig. 5.1-8 亀裂ネットワークモデルにおける破過曲線（亀裂開口幅 0.01mm）

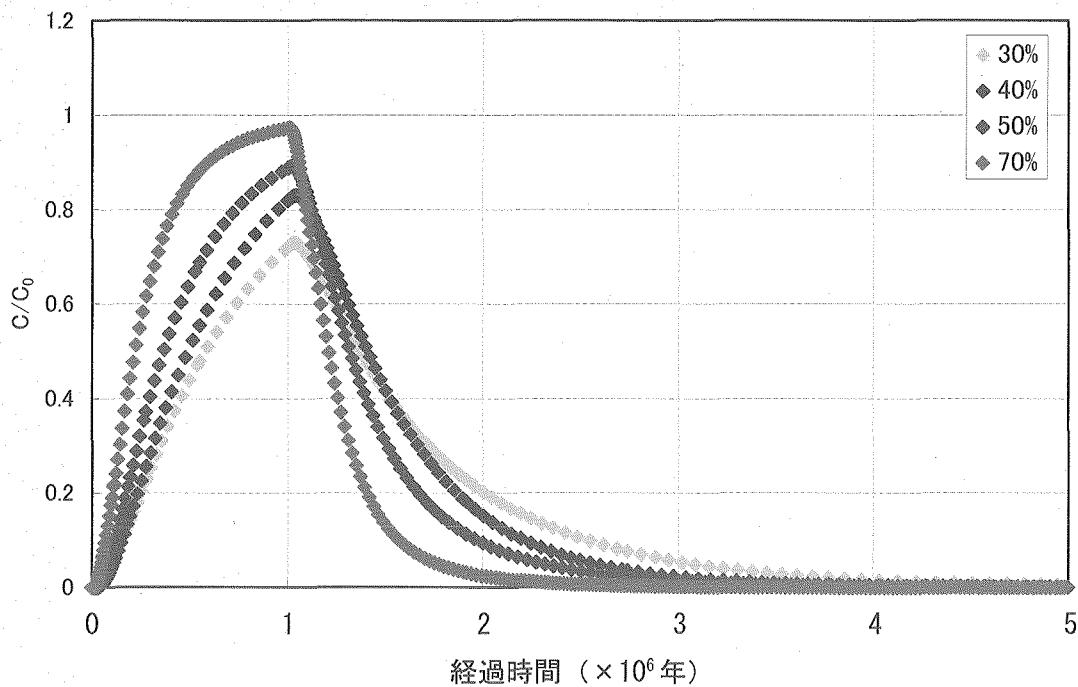


Fig. 5.1-9 亀裂ネットワークモデルにおける破過曲線（亀裂開口幅 0.05mm）

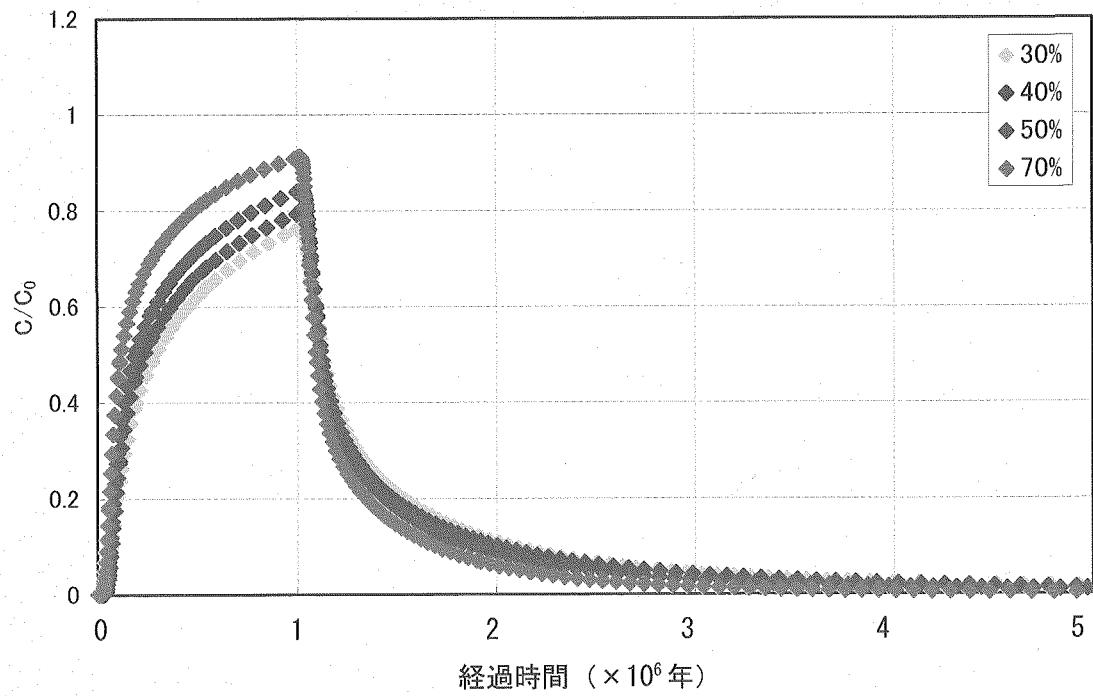


Fig. 5.1-10 亀裂ネットワークモデルにおける破過曲線（亀裂開口幅 0.1mm）

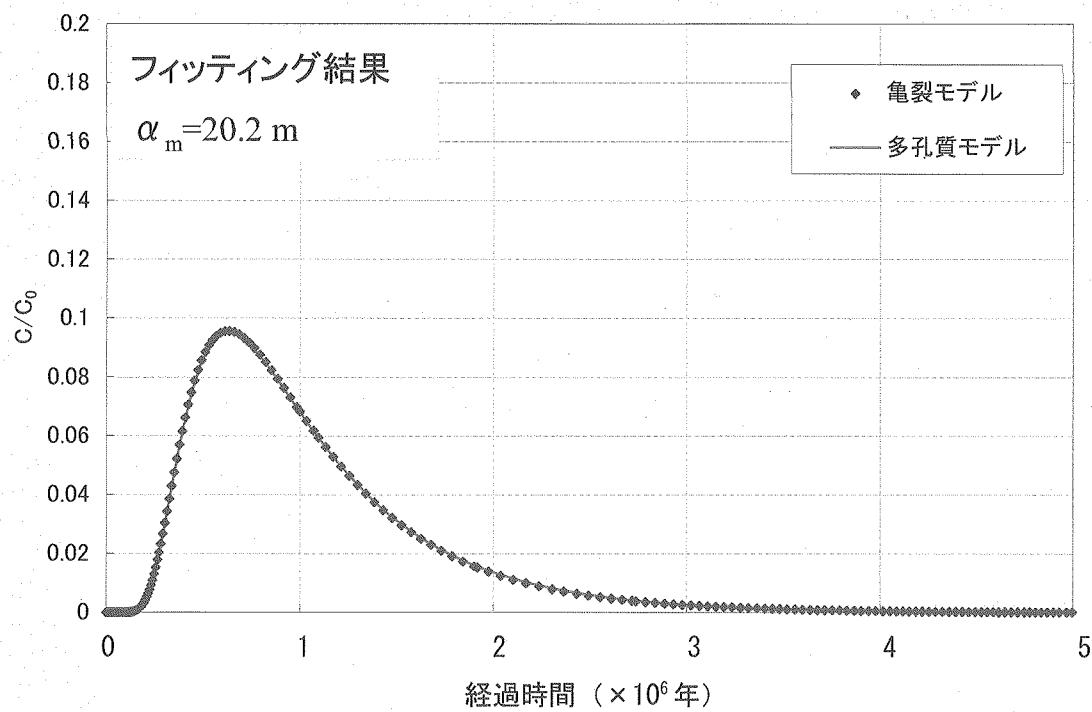


Fig. 5.1-11 多孔質媒体モデルによるフィッティング結果(亀裂開口幅 : 0.01mm, 亀裂密度 : 30%)

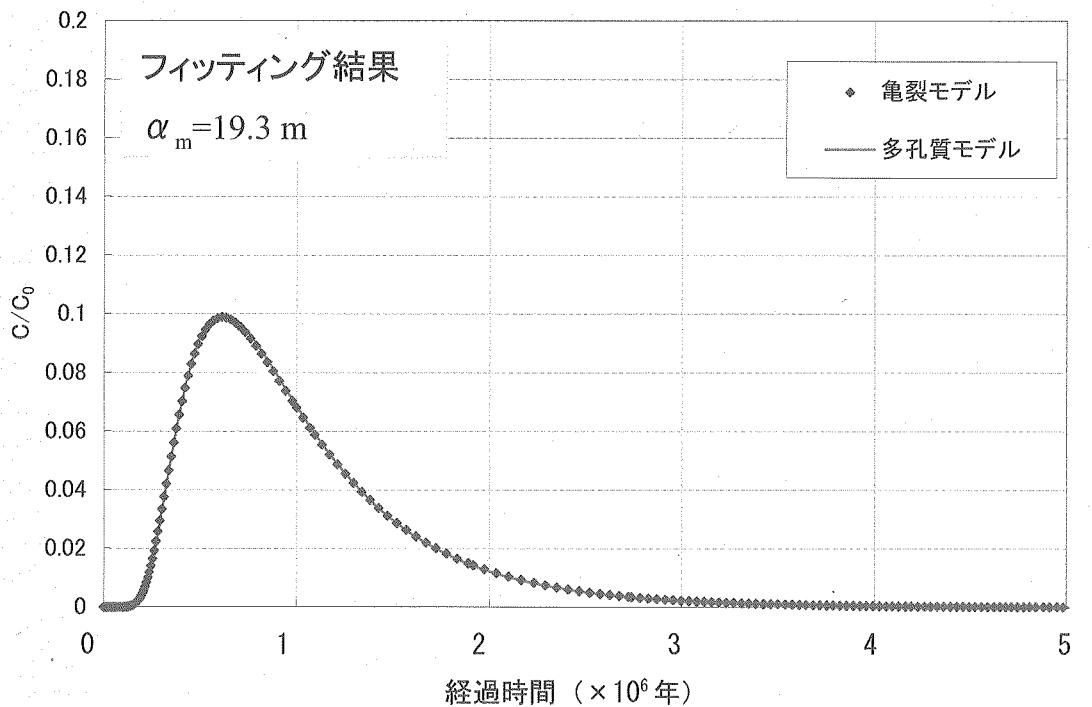


Fig. 5.1-12 多孔質媒体モデルによるフィッティング結果(亀裂開口幅 : 0.01mm, 亀裂密度 : 40%)

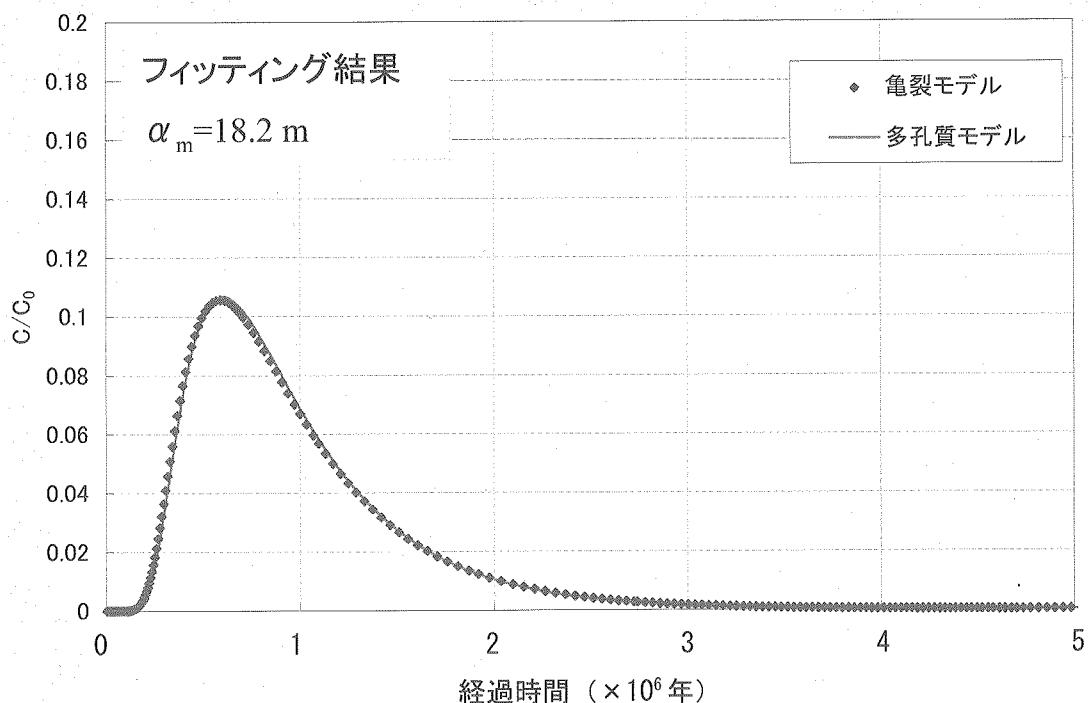


Fig. 5.1-13 多孔質媒体モデルによるフィッティング結果(亀裂開口幅 : 0.01mm, 亀裂密度 : 50%)

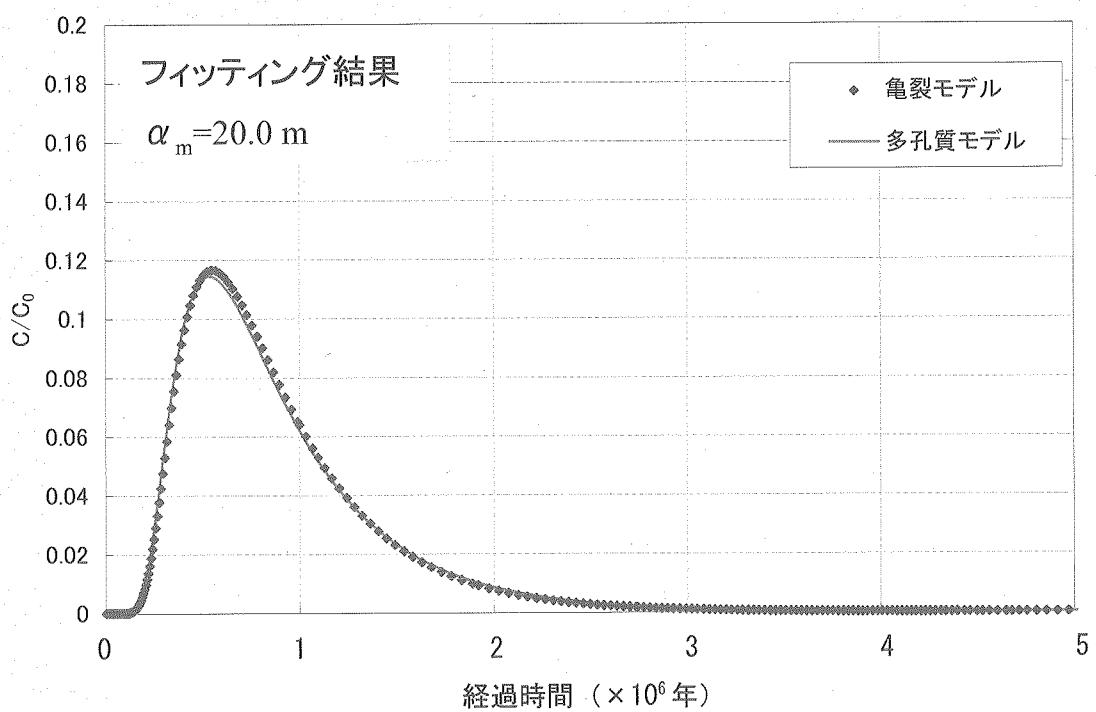


Fig. 5.1-14 多孔質媒体モデルによるフィッティング結果(亀裂開口幅 : 0.01mm, 亀裂密度 : 70%)

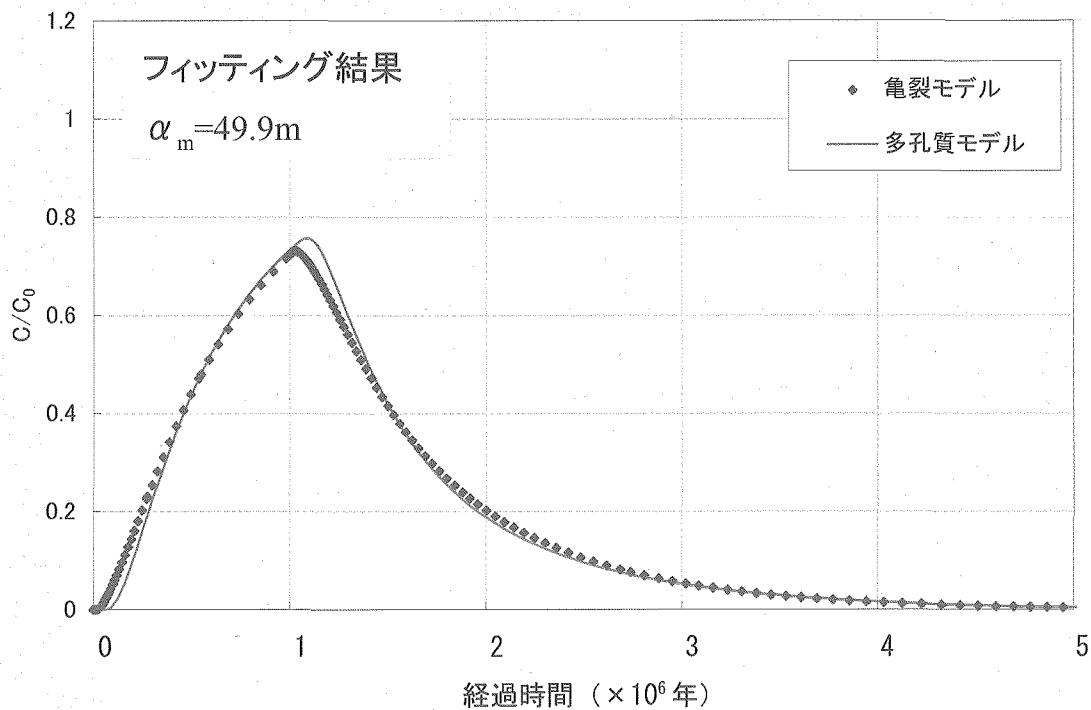


Fig. 5.1-15 多孔質媒体モデルによるフィッティング結果(亀裂開口幅: 0.05mm, 亀裂密度: 30%)

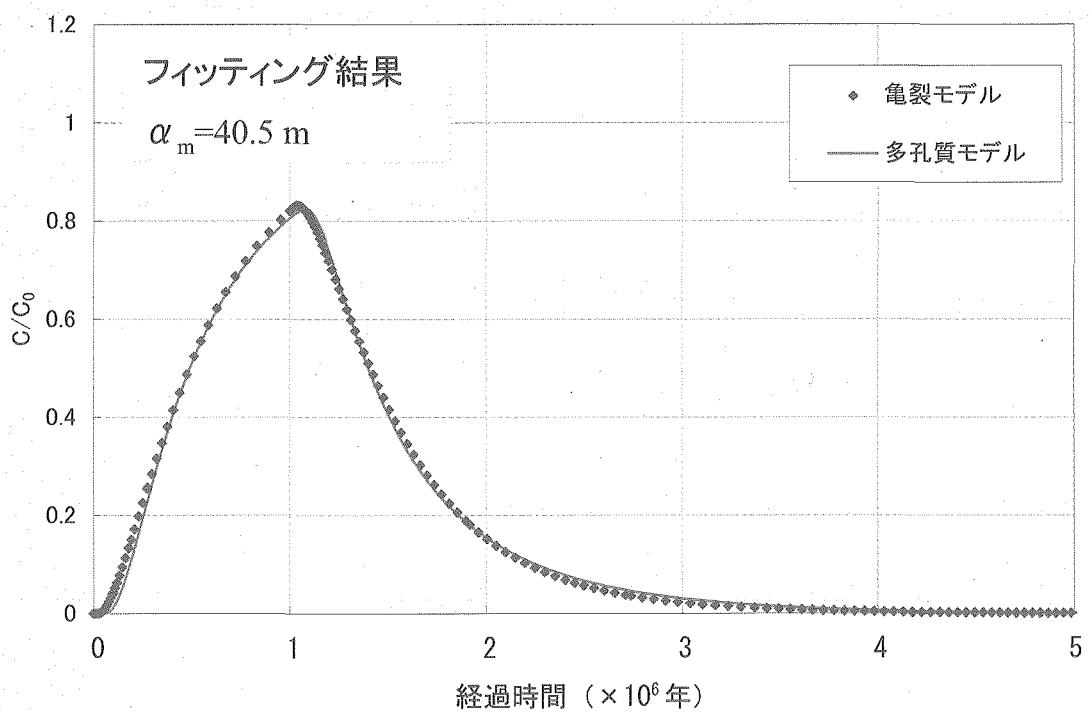


Fig. 5.1-16 多孔質媒体モデルによるフィッティング結果(亀裂開口幅: 0.05mm, 亀裂密度: 40%)

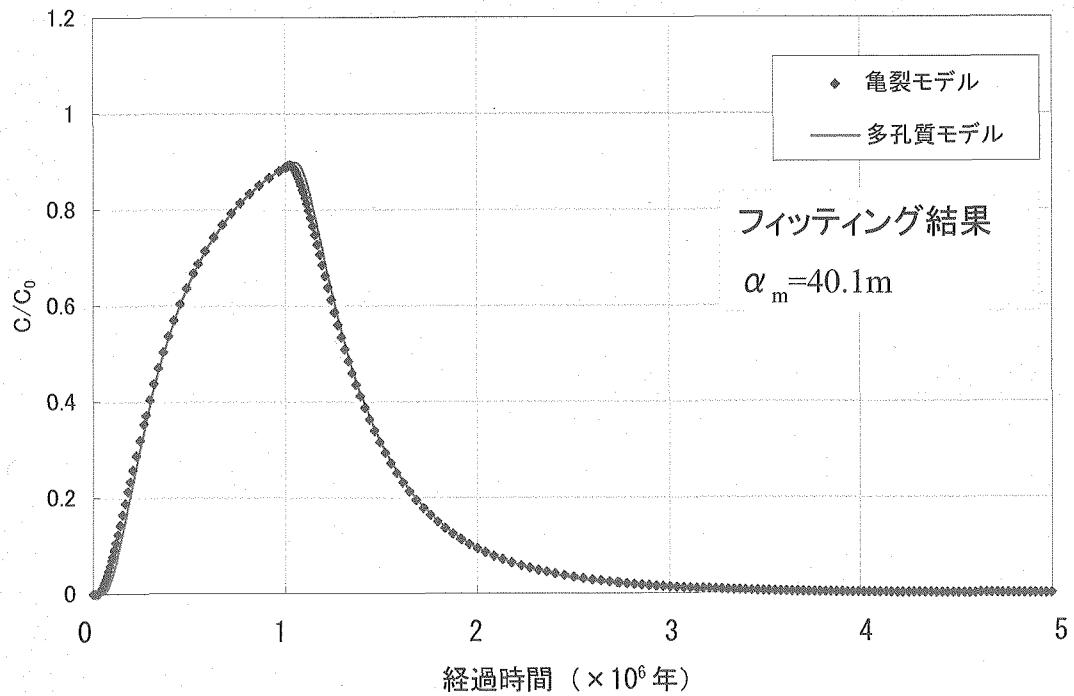


Fig. 5.1-17 多孔質媒体モデルによるフィッティング結果(亀裂開口幅 : 0.05mm, 亀裂密度 : 50%)

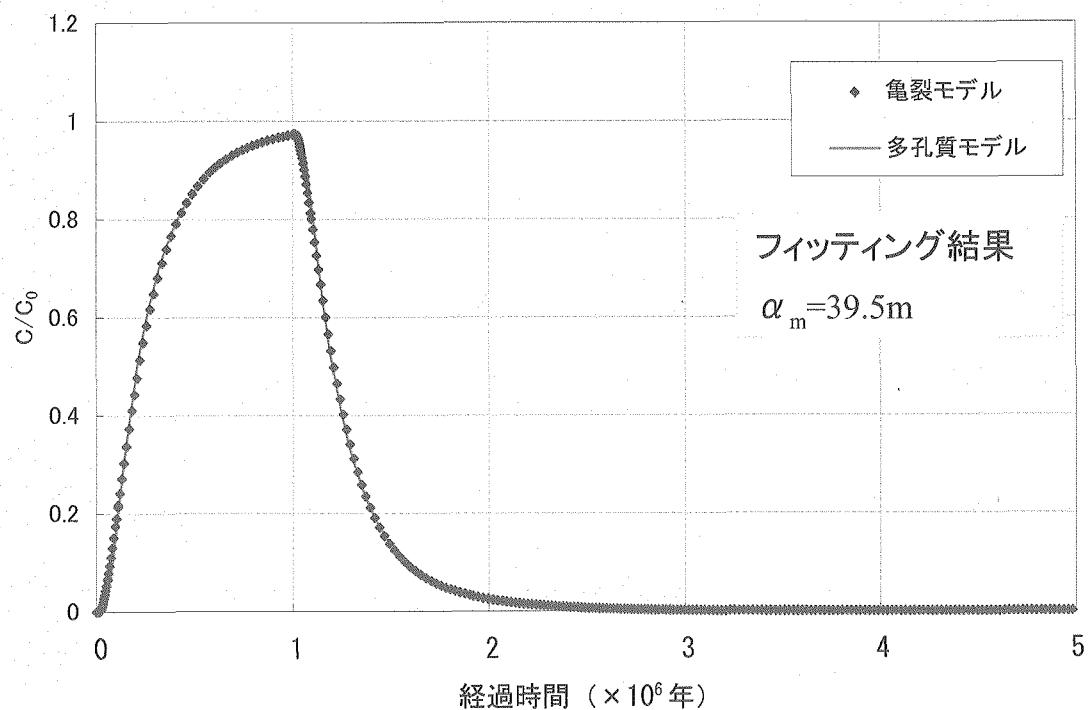


Fig. 5.1-18 多孔質媒体モデルによるフィッティング結果(亀裂開口幅 : 0.05mm, 亀裂密度 : 70%)

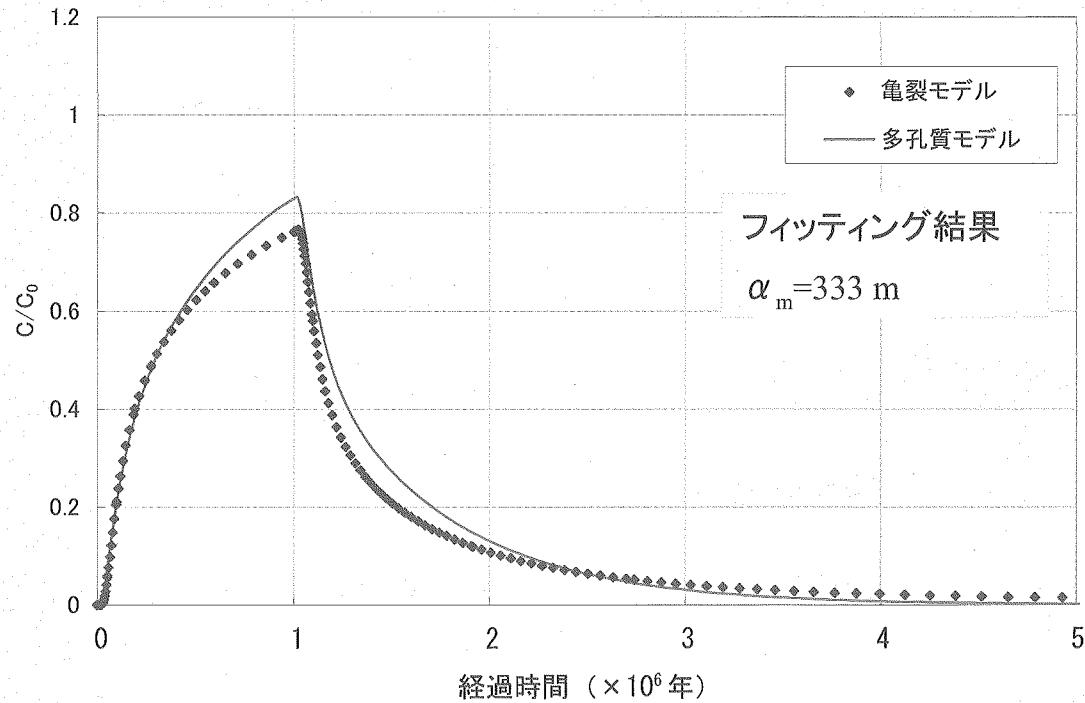


Fig. 5.1-19 多孔質媒体モデルによるフィッティング結果（亀裂開口幅 : 0.1mm, 亀裂密度 : 30%）

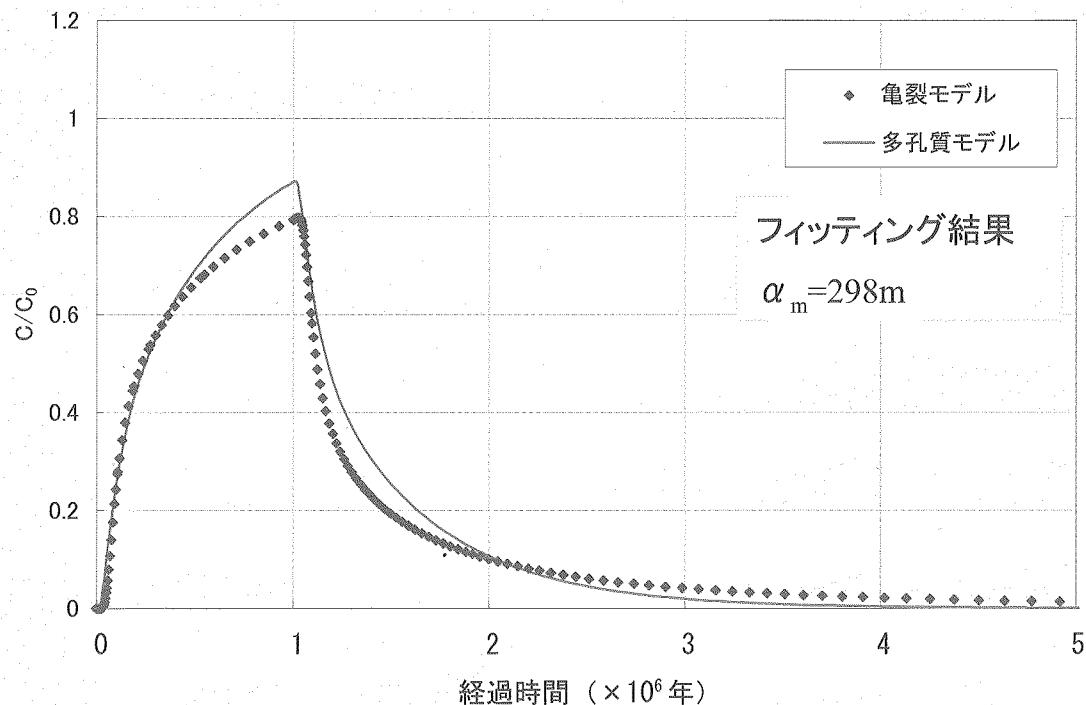


Fig. 5.1-20 多孔質媒体モデルによるフィッティング結果（亀裂開口幅 : 0.1mm, 亀裂密度 : 40%）

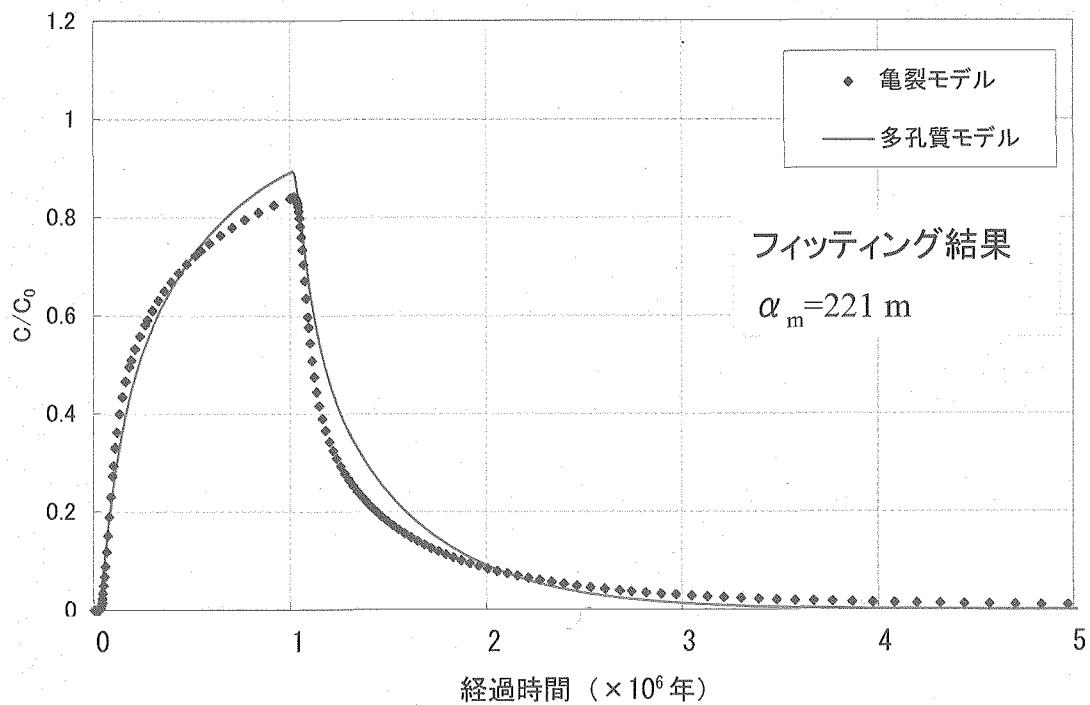


Fig. 5.1-21 多孔質媒体モデルによるフィッティング結果（亀裂開口幅：0.1mm, 亀裂密度：50%）

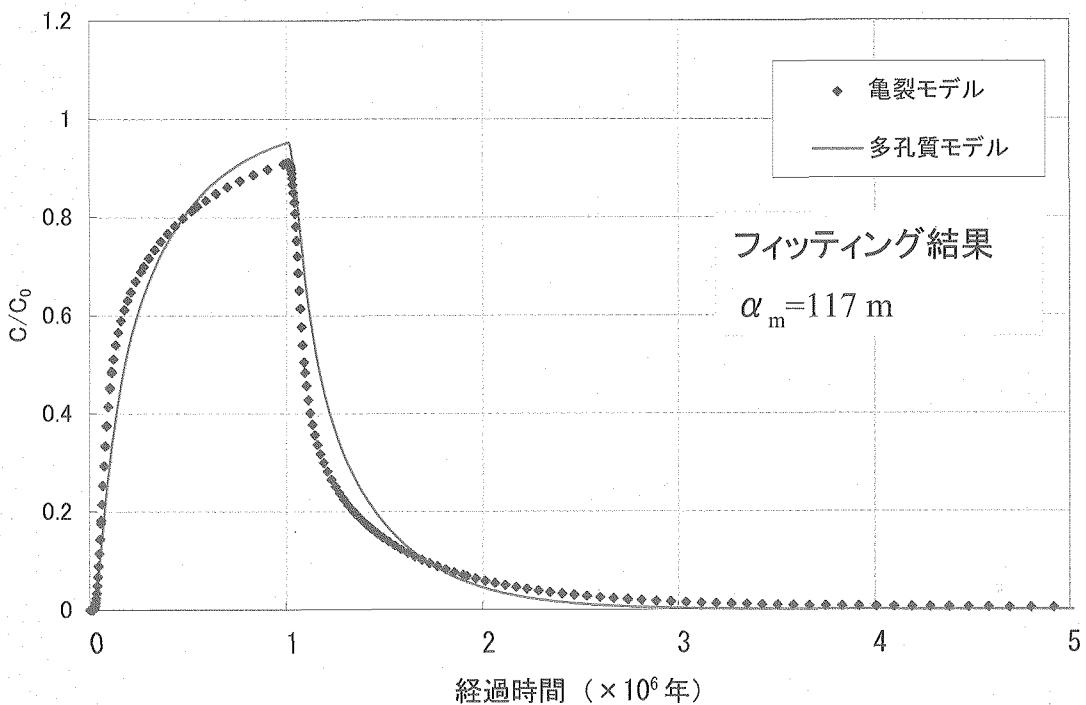


Fig. 5.1-22 多孔質媒体モデルによるフィッティング結果（亀裂開口幅：0.1mm, 亀裂密度：70%）

Table 5.1-2 二重空隙モデルによる破過曲線のフィッティング結果一覧

開口幅(mm)	亀裂密度(%)	入力パラメータ		フィッティングパラメータ		
		km(m/s)	eh(mm)	De(m ² /s)	et(mm)	α(m)
1.0×10^{-2}	30	1.0×10^{-10}	1.49×10^{-2}	2.27×10^{-11}	1.49×10^{-2}	1
	40	1.0×10^{-10}	1.59×10^{-2}	2.27×10^{-11}	1.59×10^{-2}	1
	50	1.0×10^{-10}	1.72×10^{-2}	2.27×10^{-11}	1.72×10^{-2}	1
	70	1.0×10^{-10}	1.90×10^{-2}	2.27×10^{-11}	1.90×10^{-2}	1
5.0×10^{-2}	30	1.0×10^{-10}	5.78×10^{-2}	4.55×10^{-10}	7.00×10^{-2}	1
	40	1.0×10^{-10}	6.22×10^{-2}	4.55×10^{-10}	7.53×10^{-2}	1
	50	1.0×10^{-10}	6.90×10^{-2}	6.82×10^{-10}	7.95×10^{-2}	1
	70	1.0×10^{-10}	8.41×10^{-2}	1.02×10^{-9}	1.02×10^{-1}	1
1.0×10^{-1}	30	1.0×10^{-10}	1.13×10^{-1}	6.82×10^{-10}	1.13×10^{-1}	1
	40	1.0×10^{-10}	1.22×10^{-1}	1.14×10^{-9}	1.10×10^{-1}	1
	50	1.0×10^{-10}	1.35×10^{-1}	1.36×10^{-9}	1.35×10^{-1}	1
	70	1.0×10^{-10}	1.67×10^{-1}	2.50×10^{-9}	1.75×10^{-1}	1

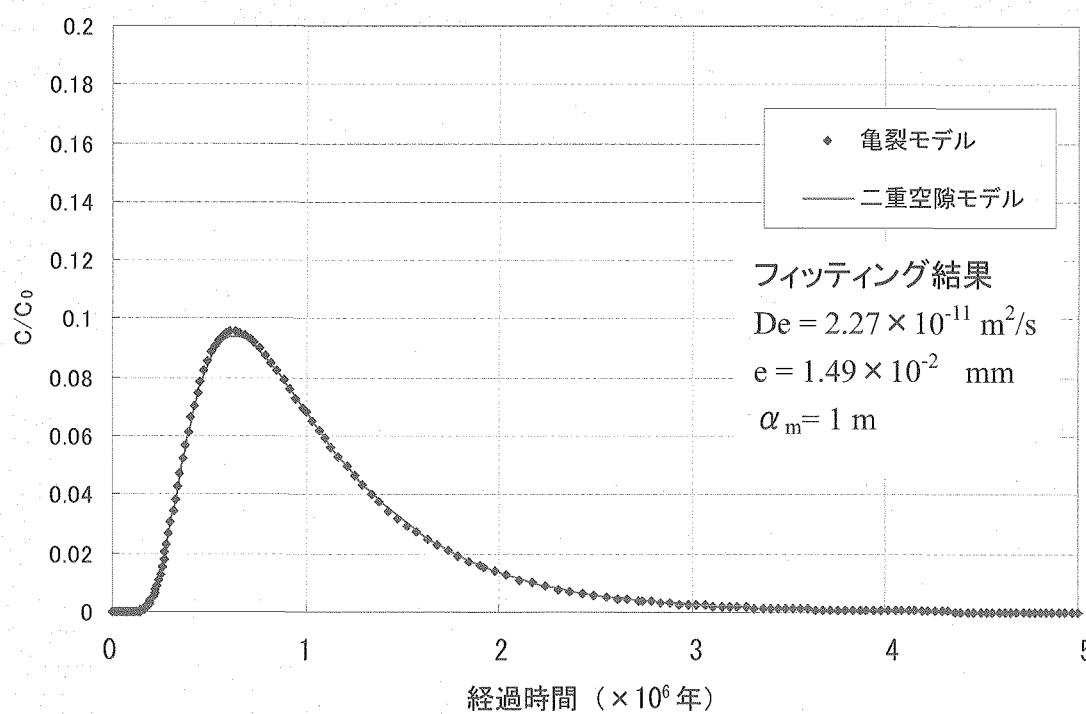


Fig. 5.1-23 二重空隙モデルによるフィッティング結果 (亀裂開口幅 : 0.01mm, 亀裂密度 : 30%)

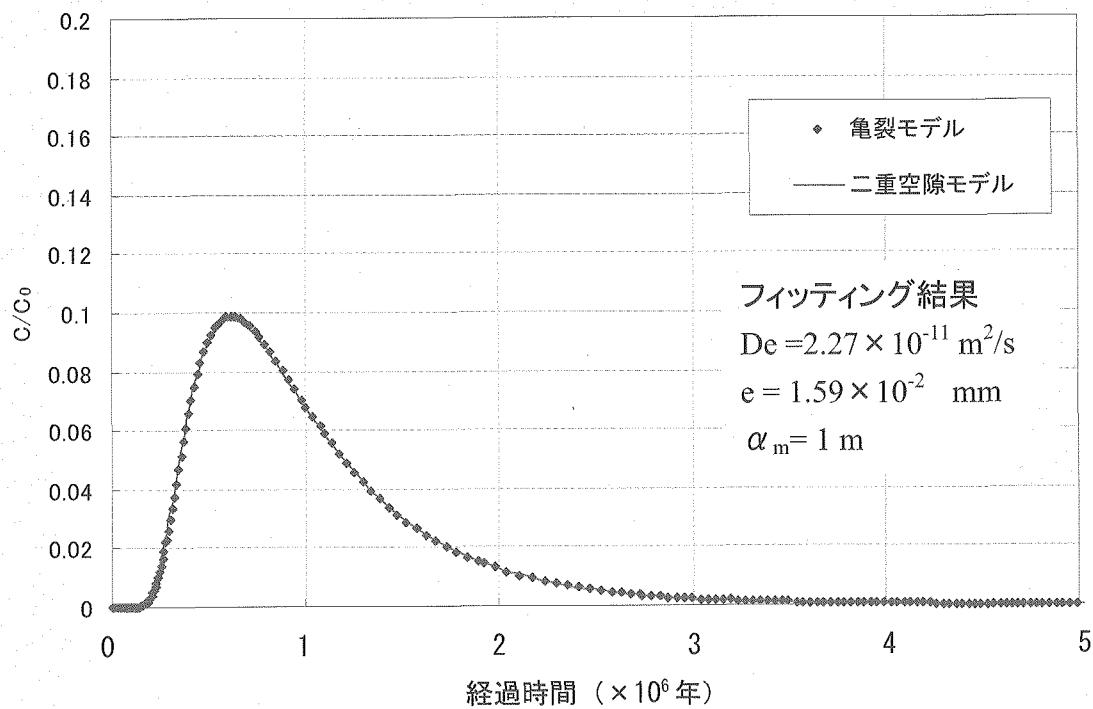


Fig. 5.1-24 二重空隙モデルによるフィッティング結果（亀裂開口幅：0.01mm, 亀裂密度：40%）

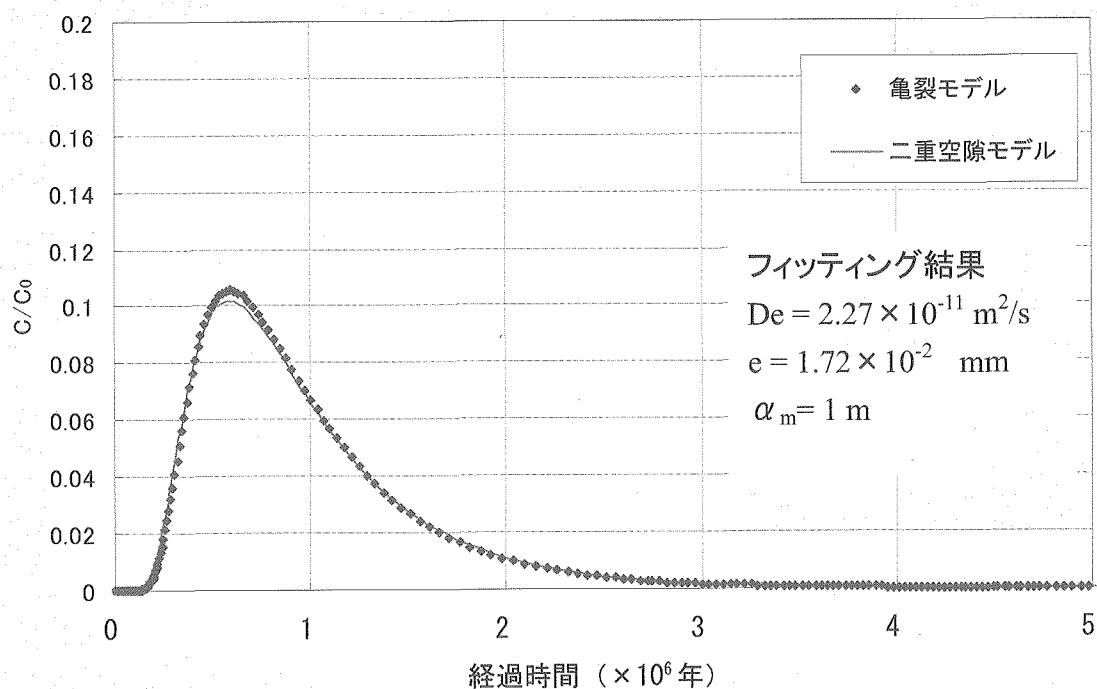


Fig. 5.1-25 二重空隙モデルによるフィッティング結果（亀裂開口幅：0.01mm, 亀裂密度：50%）

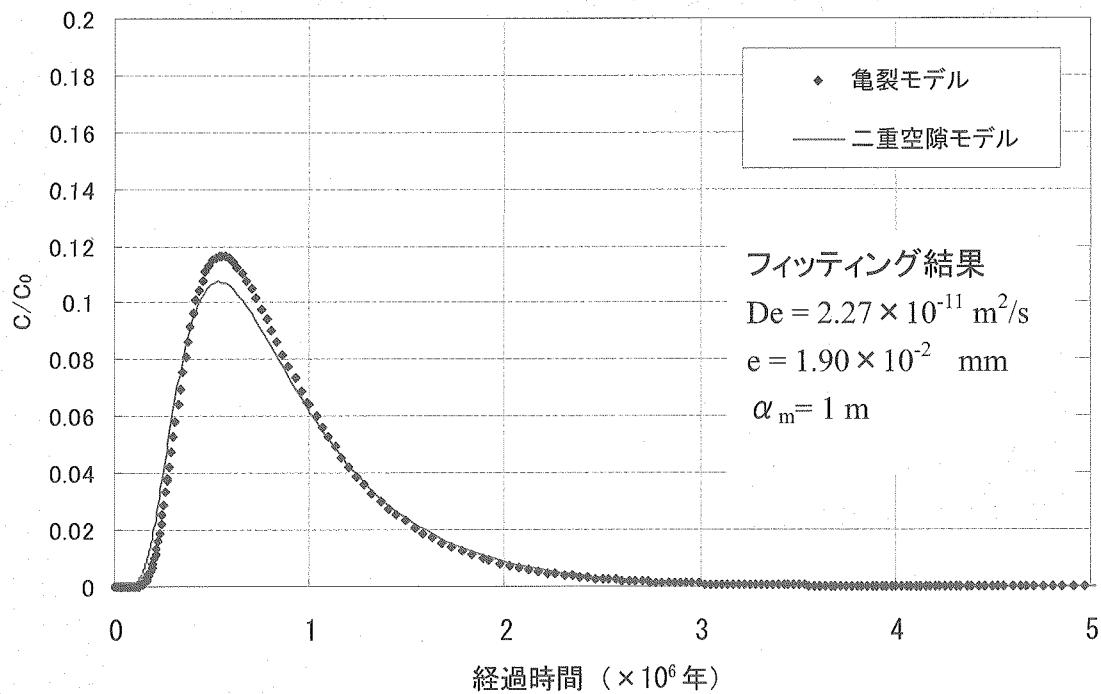


Fig. 5.1-26 二重空隙モデルによるフィッティング結果（亀裂開口幅：0.01mm, 亀裂密度：70%）

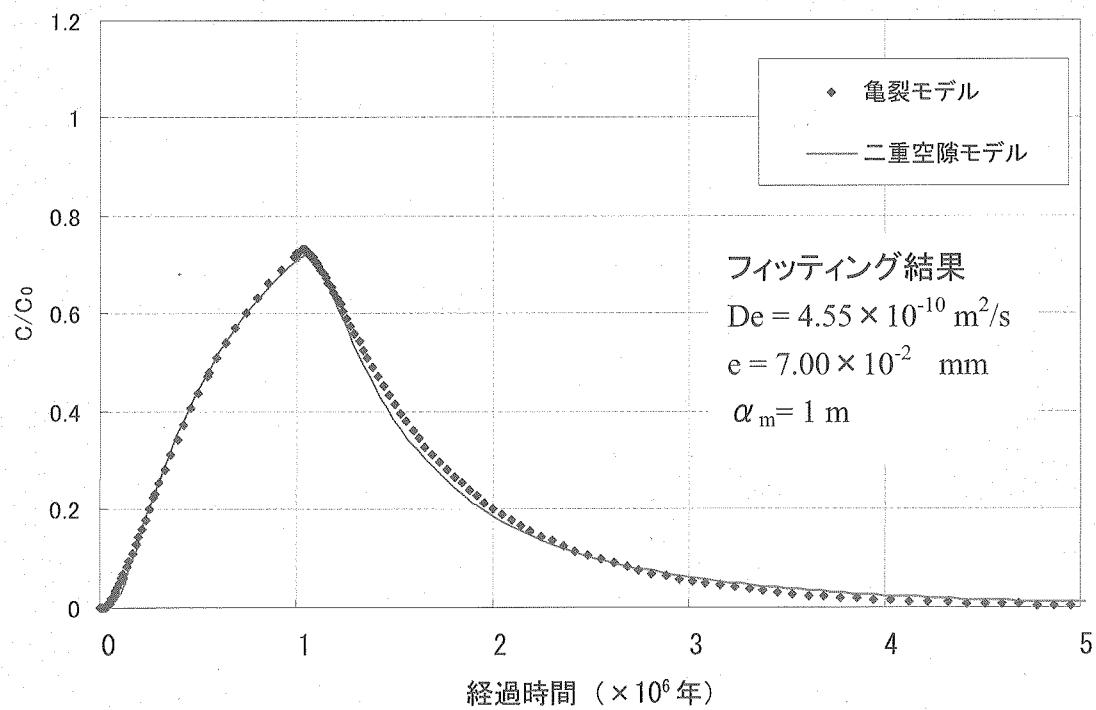


Fig. 5.1-27 二重空隙モデルによるフィッティング結果（亀裂開口幅：0.05mm, 亀裂密度：30%）

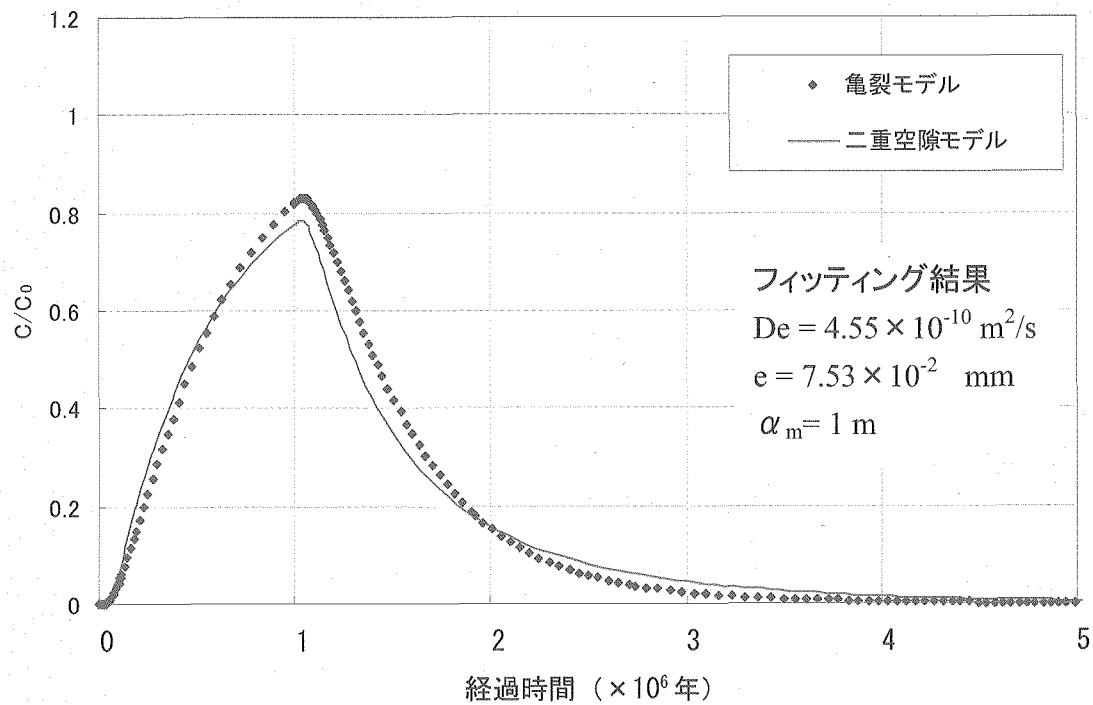


Fig. 5.1-28 二重空隙モデルによるフィッティング結果（亀裂開口幅：0.05mm, 亀裂密度：40%）

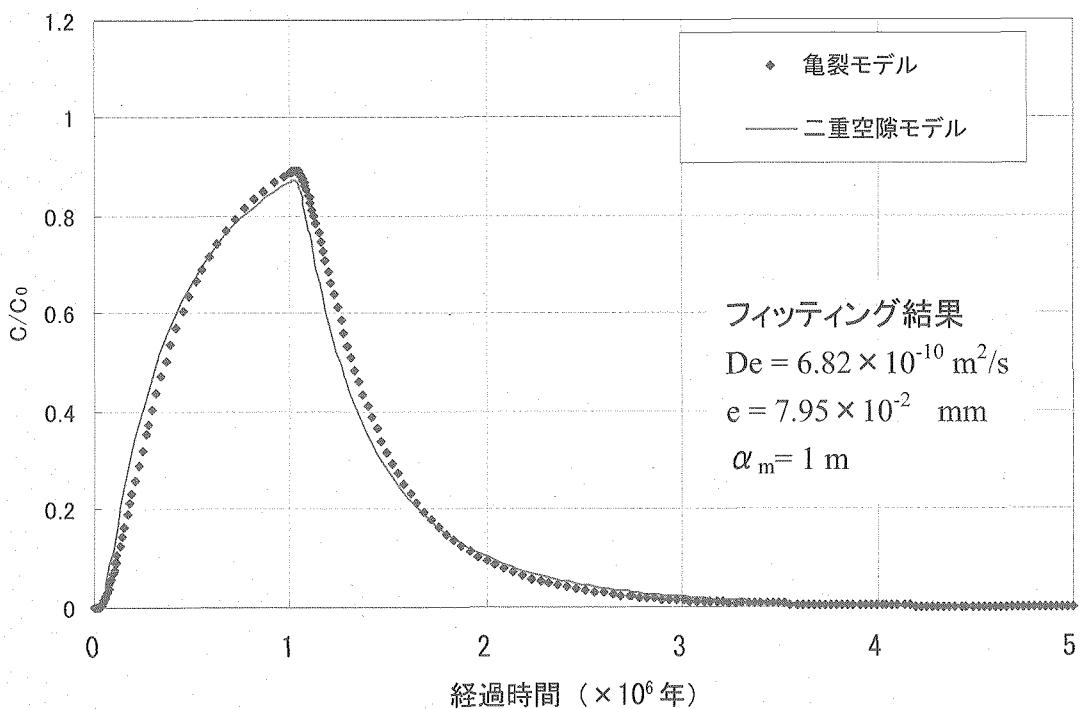


Fig. 5.1-29 二重空隙モデルによるフィッティング結果（亀裂開口幅：0.05mm, 亀裂密度：50%）

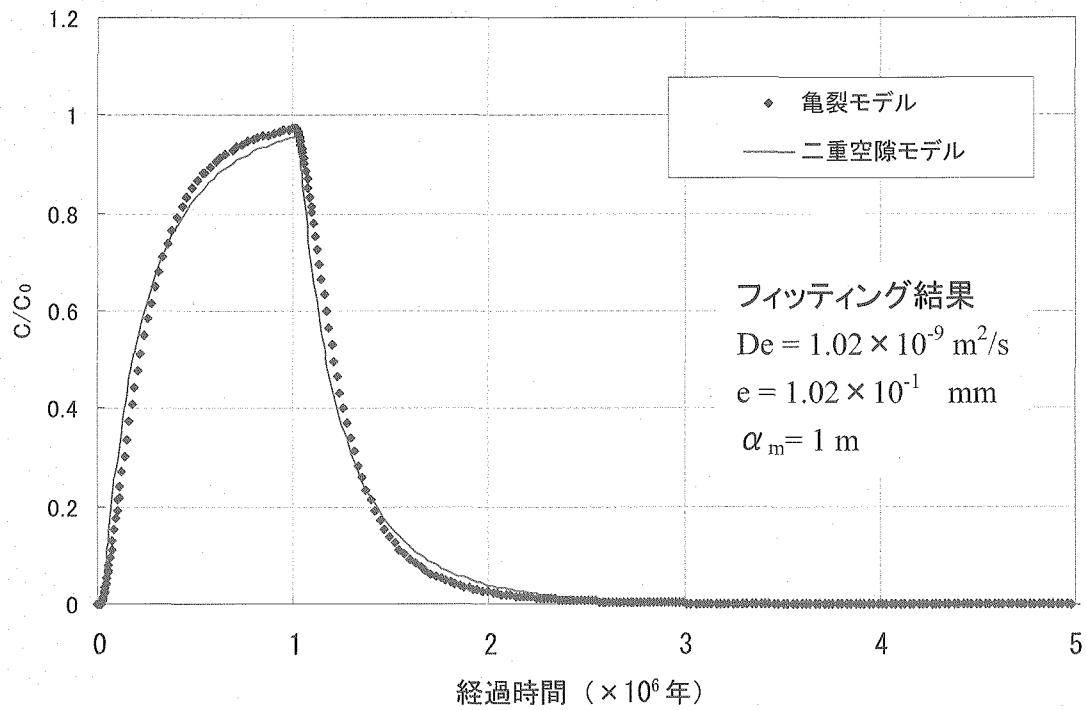


Fig. 5.1-30 二重空隙モデルによるフィッティング結果（亀裂開口幅：0.05mm, 亀裂密度：70%）

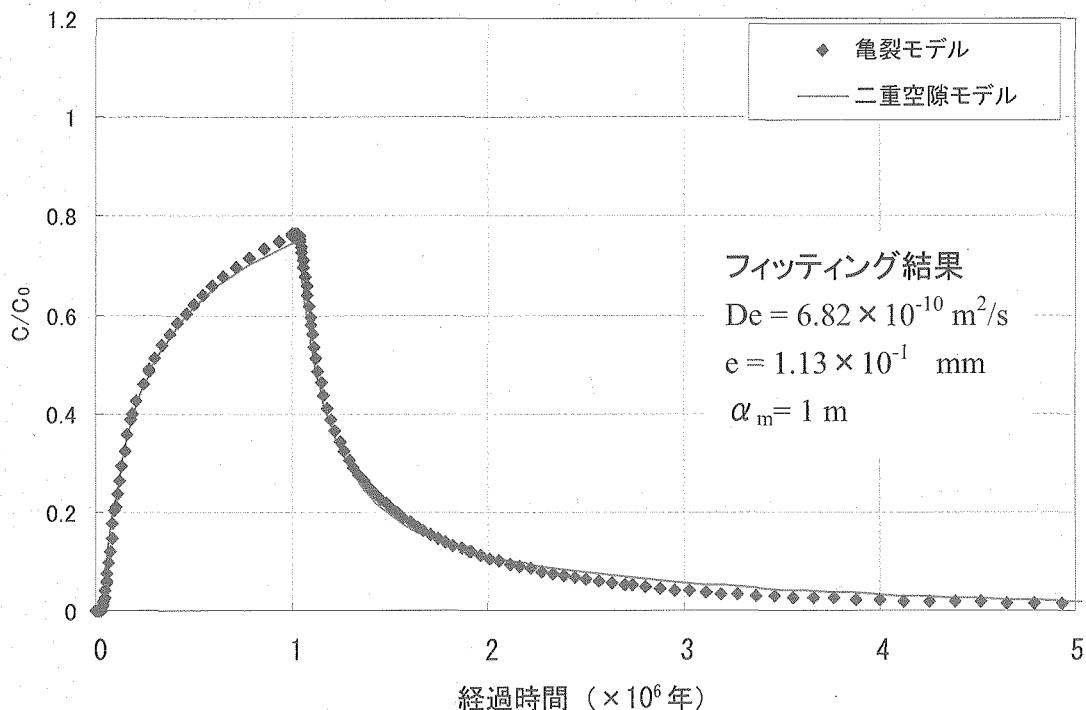


Fig. 5.1-31 二重空隙モデルによるフィッティング結果（亀裂開口幅：0.1mm, 亀裂密度：30%）

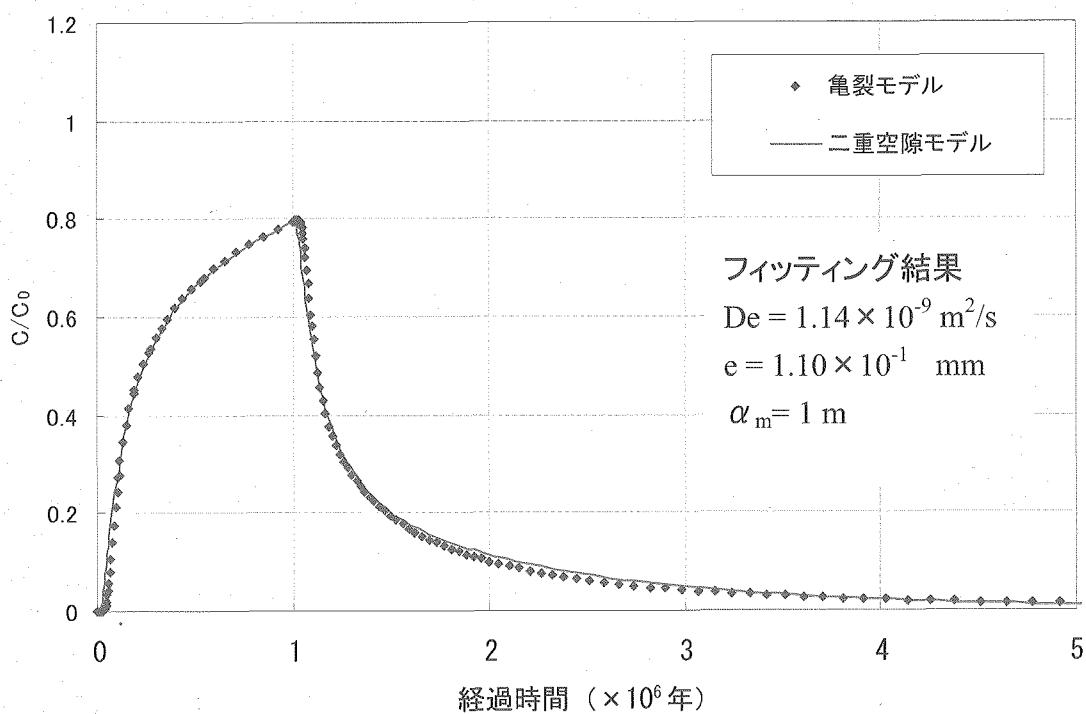


Fig. 5.1-32 二重空隙モデルによるフィッティング結果（亀裂開口幅：0.1mm, 亀裂密度：40%）

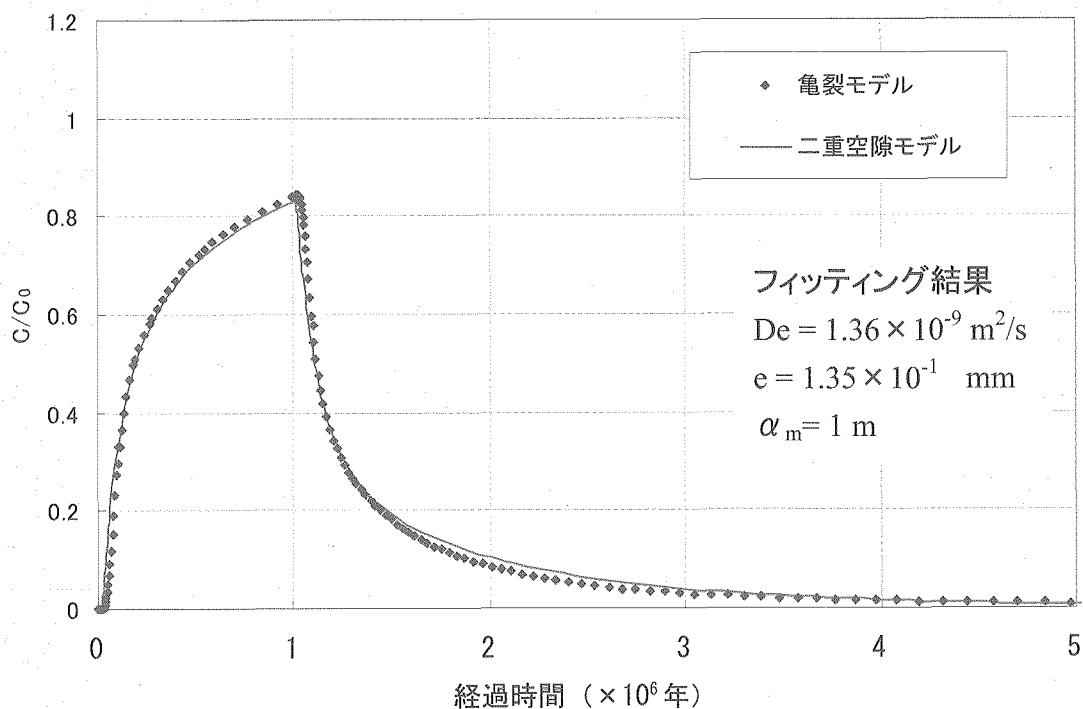


Fig. 5.1-33 二重空隙モデルによるフィッティング結果（亀裂開口幅：0.1mm, 亀裂密度：50%）

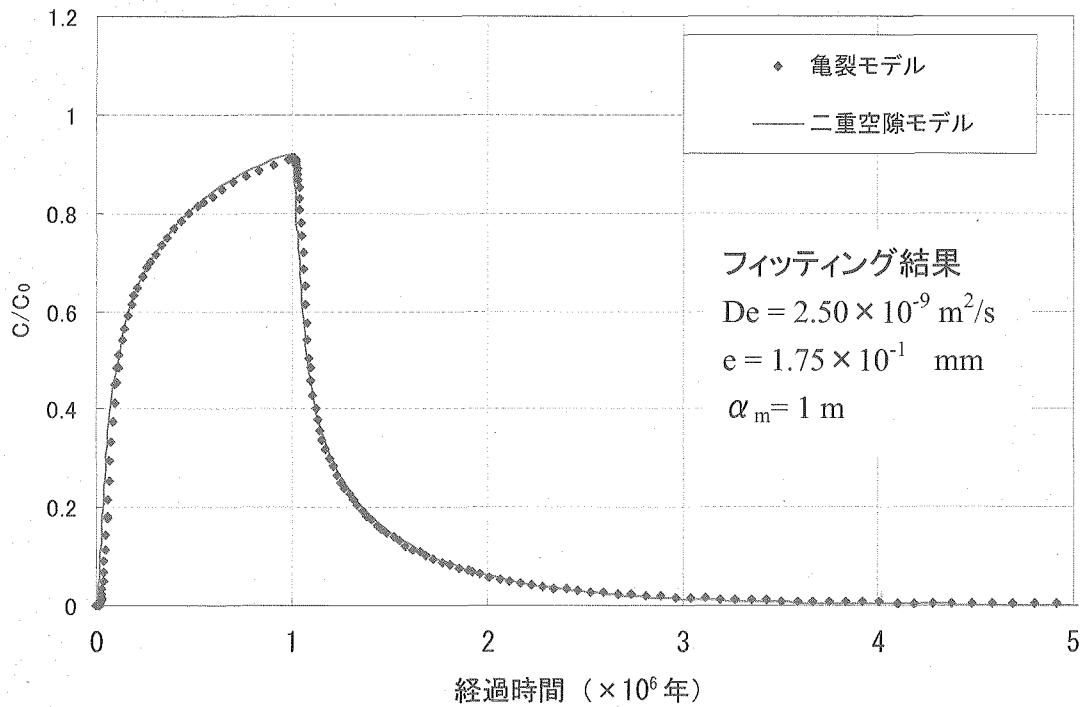


Fig. 5.1-34 二重空隙モデルによるフィッティング結果（亀裂開口幅：0.1mm, 亀裂密度：70%）

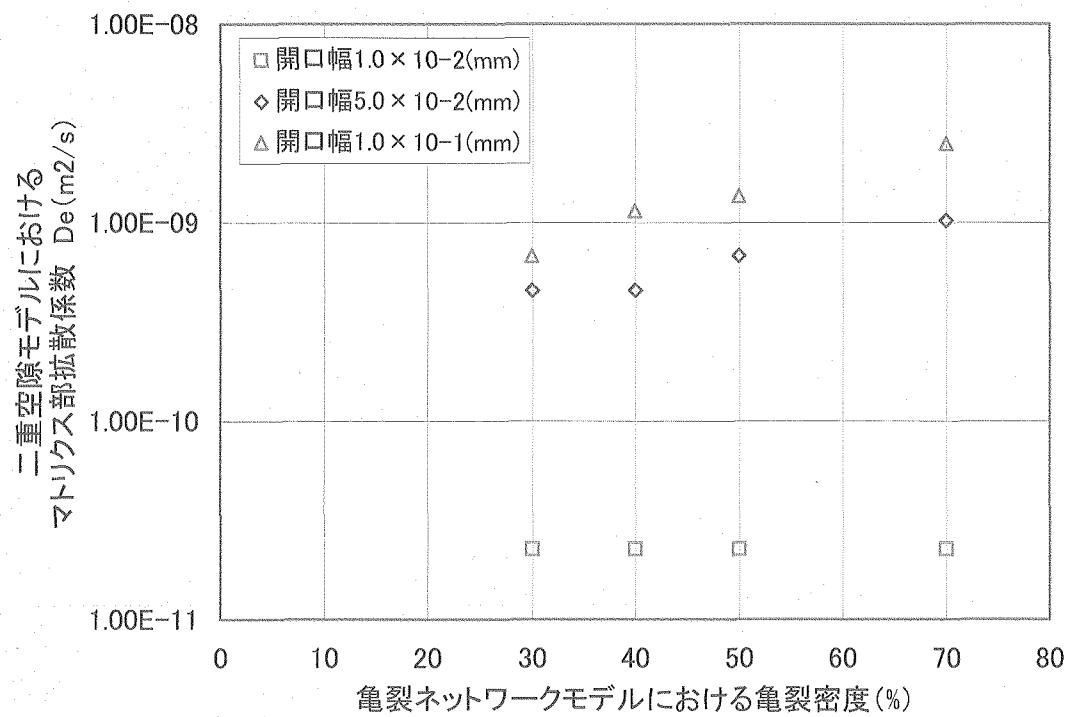


Fig. 5.1-35 二重空隙モデルにおけるマトリクス部の拡散係数と亀裂密度の関係

This is a blank page.

國際單位系 (SI)

表 1. SI 基本单位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
力学量度	モル	mol
光度	ランク	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平 立 周 力	面 体 波 力	角 角 数 ラジアン ステラジアン ヘルツ	(a) (a) rad sr Hz	
圧 力 エネルギー, 仕事, 熱量	応 力 ジ ュ ー ル	N Pa J	$m \cdot N$ $m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$ $m \cdot N \cdot m$	
工 率 ,	放 射 束	W J/s	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$	
電 荷 ,	電 気 量	C	$s \cdot A$	
電位差(電圧), 起電力	V	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$		
静 電 容 量	F	C/V		
電 氣 抵 抗	Ω	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$		
コ ン ダ ク タ ン ス	S	A/V		
磁 磁 束 度	Wb	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$		
度	T	$V \cdot s$		
イ ン ダ ク タ ン ス	Wb/m^2	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$		
光 照 度	Wb/A	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$		
(放射性核種の) 放射能 吸収線量, 質量エネルギー ギー分与, カーマ 線量当量, 周辺線量当量 量, 方向性線量当量, 個 人線量当量, 組織線量当量	cd cd · sr ^(c) lm/m^2 lx Bq Gy Sv	K $m^2 \cdot m^{-2} \cdot cd = cd$ $m^2 \cdot m^{-4} \cdot cd = m^{-2} \cdot cd$ s^{-1} J/kg $m^2 \cdot s^{-2}$ J/kg $m^2 \cdot s^{-2}$		

(a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なった性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときのいくつかの用例は表 4 に示されている。

(b) 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“1”は明示されない。

(c) 测光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。
 (d) この単位は、例としてミリセルシウス度 $m^{\circ}\text{C}$ のようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4：単位の下に固有の名称とその強調の記号を含むSI組立単位の例

組立量		名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘力のモーメント	度	パスカル秒	Pa・s	$\text{N}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
表面面積	度	ニュートンメートル	N・m	$\text{N}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^2$
角速度	度	ニュートンメートル	N/m	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
角加速度	度	ラジアン毎秒	rad/s	$\text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
熱流密度、放射照度	度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	$\text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$
熱容量、エントロピー	度	ワット毎平方メートル	W/m ²	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$
質量熱容量(比熱容量)	度	ジュール毎ケルビン	J/K	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
質量エントロピー	度	ジュール毎キログラム	J/(kg・K)	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
(比エネルギー)	度	ジュール毎ケルビン	J/kg	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
熱伝導率	度	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m・K)	$\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$
体積エネルギー	度	ジュール毎立方メートル	J/m ³	$\text{m}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
電界の強さ	度	ボルト毎メートル	V/m	$\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-1}$
体積電荷	度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	$\text{m}^{-3} \cdot \text{s} \cdot \text{A}$
電気変位	度	クーロン毎平方メートル	C/m ²	$\text{m}^{-2} \cdot \text{s} \cdot \text{A}$
誘透電磁モル	度	ファラード毎メートル	F/m	$\text{m}^{-3} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^4 \cdot \text{A}^2$
エネルギー	度	ヘンリー毎メートル	H/m	$\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-2}$
モル熱容量	度	ジュール毎モル	J/mol	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{mol}^{-1}$
照射線量(X線及びγ線)	度	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol・K)	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$
吸収線量	度	クーロン毎キログラム	C/kg	$\text{kg}^{-1} \cdot \text{s} \cdot \text{A}$
放射強度	度	グレイ毎秒	Gy/s	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$
放射度	度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$\text{m}^4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} = \text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$
放射輝度	度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² ・sr)	$\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} = \text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$

表 5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10^{24}	ヨ	タ	10^{-1}	デ	シ
10^{21}	ゼ	タ	10^{-2}	セ	チ
10^{18}	エ	ク	10^{-3}	ミ	リ
10^{15}	ペ	サ	10^{-6}	マイ	クロ
10^{12}	テ	タ	10^{-9}	ナ	クノ
10^9	ギ	ラ	10^{-12}	ピ	コ
10^6	メ	ガ	10^{-15}	フェム	ト
10^3	キ	ロ	10^{-18}	ア	ト
10^2	ヘ	ク	10^{-21}	ゼ	タ
10^1	デ	力	10^{-24}	ヨ	ト

表6. 國際単位系と併用されるが國際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60 s
時	h	1h = 60 min = 3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	1° = $(\pi/180)$ rad
分	,	1' = $(1/60)^\circ$ = $(\pi/10800)$ rad
秒	"	1" = $(1/60)'$ = $(\pi/648000)$ rad
リットル	L	$1L = 1 \text{ dm}^3 = 10^{-3} \text{ m}^3$
トン	t	$1t = 10^3 \text{ kg}$
ネーベ	Np	$1Np = 1$
ペル	B	$1B = (1/2) \ln 10 (Np)$

表7. 國際単位系と併用されこれに属さない単位で
SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	$1\text{eV}=1.60217733(49) \times 10^{-19}\text{J}$
統一原子質量単位	u	$1\text{u}=1.6605402(10) \times 10^{-27}\text{kg}$
天文単位	ua	$1\text{ua}=1.49597870691(30) \times 10^{11}\text{m}$

表 8. 國際単位系に属さないが國際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里		1 海里=1852m
ノット	ノット	1 ノット=1 海里 每時=(1852/3600)m/s
アール	a	1 a=1 dam ² =10 ⁴ m ²
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
バルル	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 ⁵ Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=10 ⁻¹⁰ m
バン	b	1 b=100fm ² =10 ⁻²⁸ m ²

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エ ル グ	erg	$1 \text{ erg} = 10^{-7} \text{ J}$
ダ イ ン	dyn	$1 \text{ dyn} = 10^{-5} \text{ N}$
ボ ア ズ	P	$1 \text{ P} = 1 \text{ dyn} \cdot \text{s/cm}^2 = 0.1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$
ス ト 一 ク ス	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2/\text{s} = 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$
ガ ウ ス	G	$1 \text{ G} = 10^{-4} \text{ T}$
エ ル ス テ ッ ド	Oe	$1 \text{ Oe} = (1000/4\pi) \text{ A/m}$
マ ク ス ウ ル	Mx	$1 \text{ Mx} = 10^{-8} \text{ Wb}$
ス チ ル ブ	sb	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd/cm}^2 = 10^4 \text{ cd/m}^2$
ホ ル ト	ph	$1 \text{ ph} = 10^4 \text{ lux}$
ガ ル	G ₁	$1 \text{ G}_1 = 1 \text{ cm}^{-1} \text{ s}^{-2} \text{ A}^{-2} \text{ m}^{-2} \text{ J}^{-2}$

表10. 國際単位に屬さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリ	Ci	$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$
レントゲン	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$
ラド	rad	$1 \text{ rad} = 1 \text{ cGy} = 10^{-2} \text{ Gy}$
レム	rem	$1 \text{ rem} = 1 \text{ cSv} = 10^{-2} \text{ Sv}$
X線単位		$1 \text{ X unit} = 1.002 \times 10^{-4} \text{ nm}$
ガンマ	γ	$1 \gamma = 1 \text{ nT} = 10^{-9} \text{ T}$
ジャニスキー	Jy	$1 \text{ Jy} = 10^{-26} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$
フルミ		$1 \text{ fulmi} = 1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$
メートル系カラット		$1 \text{ metric carat} = 200 \text{ mg} = 2 \times 10^{-4} \text{ kg}$
トル	Torr	$1 \text{ Torr} = (101.325 / 760) \text{ Pa}$
標準大気圧	atm	$1 \text{ atm} = 101.325 \text{ Pa}$
カロリ	cal	
ミクロン	μ	$1 \mu = 1 \text{ micrometer} = 10^{-6} \text{ m}$