

## 花崗岩試料を用いた拡散試験環境の整備と 間隙率測定および鉱物試験

Improvement of the Environment for the Diffusion Experiment Using Granite Samples  
and Results of Pore physicality Measurement and Mineralogical Test

山下 理代 濱 克宏 竹内 竜史 森川 佳太  
細谷 真一 中村 敏明 田中 由美子

Riyo YAMASHITA, Katsuhiko HAMA, Ryuji TAKEUCHI, Keita MORIKAWA  
Shinichi HOSOYA, Toshiaki NAKAMURA and Yumiko TANAKA

バックエンド研究開発部門  
東濃地科学センター

Tono Geoscience Center  
Sector of Decommissioning and Radioactive Waste Management

September 2014

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは独立行政法人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>)  
より発信されています。

独立行政法人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  
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4  
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

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, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

## 花崗岩試料を用いた拡散試験環境の整備と間隙率測定および鉱物試験

日本原子力研究開発機構

バックエンド研究開発部門 東濃地科学センター

山下 理代\*1, 濱 克宏, 竹内 竜史, 森川 佳太\*1, 細谷 真一\*2, 中村 敏明\*2, 田中 由美子\*2

(2014年5月29日受理)

独立行政法人日本原子力研究開発機構では、「地層処分技術に関する研究開発」のうち深地層の科学的研究（地層科学研究）の一環として、結晶質岩（花崗岩）を対象とした超深地層研究所計画を岐阜県瑞浪市において進めている。本計画は、「深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備」および「深地層における工学技術の基盤の整備」を第1段階から第3段階までを通した全体目標として定め、「第1段階：地表からの調査予測研究段階」、「第2段階：研究坑道の掘削を伴う研究段階」、「第3段階：研究坑道を利用した研究段階」の3段階からなる約20年の計画である。現在は、第2段階および第3段階における調査研究を進めている。

物質移動に関する調査研究は、主に第3段階の調査研究として実施する計画であり、研究坑道周辺の数m～100m程度のブロックスケールを対象にして、岩盤中の物質移動に関わる現象の理解を進めつつ、物質移動に関わるパラメータ値の測定技術および物質移動に関わるモデル化・解析・評価技術を体系的に整備することを目標として実施している。

物質移動に関する調査研究の一環として、割れ目の地質学的特徴と物質移動に関するパラメータ値の関係の把握ならびに、試験に用いた試料のサイズによる試験結果への影響の把握、さらに数値解析によって取得される拡散係数などのパラメータの妥当性の検証を行うことを目的とした試験を計画した。本報告書は、これらの試験に先立ち実施した、透過拡散試験に用いる試料の作成、岩石ブロックを用いた拡散試験環境の設備、間隙率測定とX線回析分析について取りまとめたものである。

---

東濃地科学センター：〒509-6132 岐阜県瑞浪市明世町山野内 1-64

\*1 技術開発協力員

\*1 株式会社ダイヤコンサルタント（2013年9月30日まで技術開発協力員）

\*2 株式会社ダイヤコンサルタント

**Improvement of the Environment for the Diffusion Experiment Using Granite Samples and Results of Pore physicality Measurement and Mineralogical Test**

Riyo YAMASHITA<sup>\*1</sup> , Katsuhiko HAMA, Ryuji TAKEUCHI, Keita MORIKAWA<sup>\*1</sup>,  
Shinichi HOSOYA<sup>\*2</sup>, Toshiaki NAKAMURA<sup>\*2</sup>and Yumiko TANAKA<sup>\*3</sup>

Tono Geoscience Center  
Sector of Decommissioning and Radioactive Waste Management  
Japan Atomic Energy Agency  
Akiyo-cho, Mizunami-shi, Gifu-ken

(Received May 29 , 2014)

Tono Geoscience Center Research Unit of Japan Atomic Energy Agency (JAEA) is carrying out the Mizunami Underground Research Laboratory (MIU) Project, which is a scientific study understanding the deep geological environment as a basis of research and development for geological disposal of high level radioactive wastes. The aim of the MIU project is to establish comprehensive techniques for the investigation, analysis and assessment of the deep geological environment in fractured crystalline rock, and to develop a range of engineering techniques for deep underground application. This project has three overlapping phases: The Surface-based investigation phase (Phase I), The Construction phase (Phase II), and The Operation phase (Phase III), with a total duration of about 20 years. Currently, the project is being carried out under the Phase II and Phase III.

Solute transport study is mainly to be performed as a Phase III project. In Phase III, the goal of this study is to gain a better understanding of mass transfer phenomena in the geological environment as well as to develop technologies for measurement of the solute transport parameters, model construction, numerical analysis and validation of all those technologies based on the existing information.

As part of solute transport study, laboratory experiments were planned to understand the influence of the geological characteristics of fracture on the solute transport parameters, also understand the differences in test results by the different sizes of the samples used for an experiment, and moreover to validate the parameters obtained by numerical analysis.

**Keywords:** Mizunami Underground Research Laboratory Project, Diffusion Experiments, Sorption Experiments, Pore physicality Measurement

---

<sup>\*1</sup> Collaborating Engineer

<sup>\*1</sup> Collaborating Engineer (Collaborating Engineer until September 30, 2013)

<sup>\*2</sup> DIA CONSULTANTS Corporation

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. 実施概要 .....	2
3. 拡散試験環境の整備 .....	4
3.1 透過拡散試験 .....	4
3.1.1 岩石試料の選定 .....	4
3.1.2 試料の作製 .....	14
3.1.3 試料ホルダーへの固定 .....	36
3.2 岩石ブロックを用いた拡散試験 .....	42
3.2.1 予測解析 .....	42
3.2.2 岩石試料の採取 .....	48
3.2.3 試料の作製 .....	51
3.2.4 試験環境の整備 .....	57
4. 間隙率測定 .....	61
4.1 試料の選定 .....	61
4.2 試料の作製 .....	61
4.3 試験方法 .....	69
4.3.1 水飽和法 .....	69
4.3.2 水銀圧入法 .....	71
4.4 試験結果 .....	78
4.4.1 水飽和法に基づく間隙率 .....	78
4.4.2 水銀圧入法に基づく間隙率 .....	82
5. X線回折分析 .....	91
5.1 試料の選定 .....	91
5.2 試料の作製 .....	91
5.3 X線回折分析方法 .....	95
5.4 X線回折分析結果 .....	100
6. まとめ .....	116
謝辞 .....	117
参考文献 .....	118

CONTENT

1. Introduction.....	1
2. Overview.....	2
3. Improvement of the environment for the diffusion experiment .....	4
3.1 Through diffusion experiment .....	4
3.1.1 Sample selection.....	4
3.1.2 Sample preparation.....	14
3.1.3 Fixation to the holder.....	36
3.2 Diffusion experiment using rock mass .....	42
3.2.1 Predictive analysis .....	42
3.2.2 Sampling of rock.....	48
3.2.3 Preparation of sample.....	51
3.2.4 Preparation of experiment environment.....	57
4. Measurement of pore physicality .....	61
4.1 Sample selection.....	61
4.2 Sample preparation .....	61
4.3 Method .....	69
4.3.1 Water saturation method.....	69
4.3.2 Mercury intrusion method.....	71
4.4 Results .....	78
4.4.1 Pore physicality by water saturation method.....	78
4.4.2 Pore physicality by the mercury intrsuion method.....	82
5. X-ray diffraction.....	91
5.1 Sample selection.....	91
5.2 Sample preparation .....	91
5.3 X-ray diffraction method .....	95
5.4 Results .....	100
6. Summary .....	116
Acknowledgment.....	117
References.....	118

## 図 リスト

図 3.1-1	透過拡散試験装置の構造	4
図 3.1.1-1	割れ目のタイプ区分	5
図 3.1.1-2	採取対象とした研究坑道におけるボーリング調査位置	6
図 3.1.1-3	採取した岩石試料	7
図 3.1.2-1	岩石試料の切断前, 切断作業および切断後の状況	16
図 3.1.2-2	リボーリング状況	16
図 3.1.2-3	リボーリング後の試料	17
図 3.1.2-4	試料の切断位置	24
図 3.1.2-5	成形後の岩石試料	24
図 3.1.3-1	アクリル製円筒型の試料ホルダー	36
図 3.1.3-2	2液性樹脂による試料の固定	36
図 3.1.3-3	試料ホルダーに固定後の試料	36
図 3.2.1-1	予測解析のモデルと境界条件	43
図 3.2.1-2	予測解析結果 (実効拡散係数 $1.0 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ )	45
図 3.2.1-3	予測解析結果 (実効拡散係数 $1.0 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ )	46
図 3.2.1-4	予測解析結果 (実効拡散係数 $1.0 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ )	47
図 3.2.2-1	岩石試料の採取箇所	48
図 3.2.2-2	採取した岩石試料の外観	49
図 3.2.3-1	トレーサー添加孔とサンプリング孔のレイアウト	51
図 3.2.3-2	岩石試料の成形状況	52
図 3.2.3-3	直方体成形後の岩石試料	55
図 3.2.3-4	完成した岩石試料	56
図 3.2.4-1	岩石ブロックの乾燥防止策の概念図	57
図 3.2.4-2	岩石ブロックを浸水させるための容器の製作図面	57
図 3.2.4-3	岩石ブロックを浸水させるための容器	58
図 3.2.4-4	岩石ブロックを用いた拡散試験装置	59
図 3.2.4-5	3次元解析メッシュ	59
図 4.2-1	12MI31_7.830m 試料の作製位置	62
図 4.2-2	Block_B 試料の作製位置	63
図 4.2-3	monopole2_13.950m 試料の作製位置	63
図 4.2-4	切断後試料	64
図 4.2-5	平面研削盤による研磨状況例	65
図 4.2-6	作製後の試料	65
図 4.2-7	12MI31_7.830m 試料の作製位置	66
図 4.2-8	切断状況例	66
図 4.2-9	リボーリング状況	67
図 4.2-10	リボーリング後の試料	67
図 4.2-11	作製後の試料	68
図 4.3.1-1	真空脱気による飽和处理	69
図 4.3.1-2	湿潤質量の測定	70
図 4.3.1-3	水中質量の測定	70

図 4.3.1-4	60℃炉乾燥.....	71
図 4.3.1-5	乾燥質量の測定.....	71
図 4.3.2-1	水銀圧入法による細孔分布測定のご概念図 .....	72
図 4.3.2-2	水銀圧入法による間隙率測定装置（オートポア IV9520） .....	72
図 4.3.2-3	セルの写真.....	74
図 4.3.2-4	セルに試料をセットした状態.....	74
図 4.3.2-5	低圧測定用の容器.....	74
図 4.3.2-6	高圧測定用の耐圧容器.....	74
図 4.3.2-7	測定前の試料 .....	74
図 4.3.2-8	測定後の試料 .....	74
図 4.3.2-9	参照試料：シリカーアルミナ.....	75
図 4.4.1-1	湿潤に伴う重量の変化.....	79
図 4.4.1-2	乾燥に伴う重量の変化.....	80
図 4.4.2-1	間隙直径と累積細孔体積および細孔体積との関係(12MI31_7.830m_A) .....	82
図 4.4.2-2	間隙直径と累積細孔体積および細孔体積との関係(12MI31_7.830m_B) .....	83
図 4.4.2-3	間隙直径と累積細孔体積および細孔体積との関係(12MI31_7.830m_C) .....	84
図 4.4.2-4	間隙直径と累積細孔体積および細孔体積との関係(Block_B) .....	85
図 4.4.2-5	間隙直径と累積細孔体積および細孔体積との関係(monopole2_13.950m) .....	86
図 4.4.2-6	間隙直径と累積細孔体積との関係(ブランク測定).....	87
図 4.4.2-7	間隙直径と細孔体積との関係(ブランク測定) .....	88
図 4.4.2-8	12MI31_7.830m の間隙率測定試料の作製位置と間隙率.....	89
図 4.4.2-9	間隙直径と細孔体積との関係(12MI31_7.830m).....	90
図 5.2-1	粗粉碎後の試料.....	92
図 5.2-2	細粉碎後の試料.....	92
図 5.2-3	メノウ自動播潰機による粉碎.....	92
図 5.2-4	粉碎後およびホルダーに充填した粉末試料.....	93
図 5.2-5	水ひシリンダー.....	94
図 5.2-6	遠心分離機.....	94
図 5.2-7	試料の塩酸処理（煮沸中） .....	95
図 5.3-1	X線回折分析装置（株式会社島津製作所製 XRD-6100） .....	95
図 5.3-2	福島県産石英標準試料.....	98
図 5.3-3	福島県産石英標準試料測定結果.....	99
図 5.4-1	X線チャート[無定方位無処理](試料名:10MI23_87.576m).....	101
図 5.4-2	X線チャート[エチレングリコール処理] (試料名:10MI23_87.576m).....	102
図 5.4-3	X線チャート[塩酸処理] (試料名:10MI23_87.576m).....	103
図 5.4-4	X線チャート[無定方位無処理](試料名:10MI25_20.782m).....	104
図 5.4-5	X線チャート[エチレングリコール処理] (試料名:10MI25_20.782m).....	105
図 5.4-6	X線チャート[塩酸処理] (試料名:10MI25_20.782m).....	106
図 5.4-7	X線チャート[無定方位無処理](試料名:12MI31_7.830m).....	107
図 5.4-8	X線チャート[エチレングリコール処理] (試料名:12MI31_7.830m).....	108
図 5.4-9	X線チャート[塩酸処理] (試料名:12MI31_7.830m).....	109
図 5.4-10	X線チャート[無定方位無処理](試料名:Block_B).....	110
図 5.4-11	X線チャート[エチレングリコール処理] (試料名:Block_B).....	111

図 5.4-12	X線チャート[塩酸処理] (試料名:Block_B).....	112
図 5.4-13	X線チャート[無定方位無処理](試料名:monopole2).....	113
図 5.4-14	X線チャート[エチレングリコール処理] (試料名:monopole2).....	114
図 5.4-15	X線チャート[塩酸処理] (試料名:monopole2).....	115

## 表 リスト

表 3.1.1-1	透過拡散試験に用いる岩石試料一覧	5
表 3.1.2-1	作製に使用した主な機器	14
表 3.1.2-2	透過拡散試験試料一覧	15
表 3.1.2-3	試料寸法一覧	35
表 3.2.1-1	理論解に与えるべきパラメータ	42
表 3.2.1-2	サンプリング孔における濃度を計算するために与えるべきパラメータ	44
表 3.2.1-3	実効拡散係数の一覧	45
表 3.2.2-1	岩石試料の採取箇所	48
表 3.2.4-1	3次元解析メッシュの仕様	60
表 4.1-1	間隙率測定に用いる岩石試料一覧	61
表 4.2-1	作製に使用した主な機器	62
表 4.3.1-1	測定に使用した主な機器	69
表 4.3.2-1	オートポア IV9520 の基本仕様一覧	73
表 4.3.2-2	参照試料の測定条件	75
表 4.3.2-3	参照試料の測定結果	75
表 4.4.1-1	湿潤重量の測定結果	78
表 4.4.1-2	乾燥重量の測定結果	80
表 4.4.1-3	水飽和法から得られた間隙物性一覧	80
表 4.4.2-1	算出した間隙物性値一覧	87
表 4.4.2-2	算出した間隙物性値一覧 (間隙直径 0.02~2 $\mu$ m)	88
表 4.4.2-3	間隙率一覧	89
表 5.1-1	岩石試料一覧	91
表 5.3-1	X線回折分析条件	96
表 5.3-2	X線回折分析装置の仕様	97
表 5.3-3	比較結果一覧	99
表 5.4-1	含有鉱物一覧表	100
表 5.4-2	X線回折強度ピークの一覧表[無定方位無処理] (試料名:10MI23_87.576m)	101
表 5.4-3	X線回折強度ピークの一覧表[エチレングリコール処理] (試料名:10MI23_87.576m)	102
表 5.4-4	X線回折強度ピークの一覧表[塩酸処理] (試料名:10MI23_87.576m)	103
表 5.4-5	X線回折強度ピークの一覧表[無定方位無処理] (試料名:10MI25_20.782m)	104
表 5.4-6	X線回折強度ピークの一覧表[エチレングリコール処理] (試料名:10MI25_20.782m)	105
表 5.4-7	X線回折強度ピークの一覧表[塩酸処理] (試料名:10MI25_20.782m)	106
表 5.4-8	X線回折強度ピークの一覧表[無定方位無処理] (試料名:12MI31_7.830m)	107
表 5.4-9	X線回折強度ピークの一覧表[エチレングリコール処理] (試料名:12MI31_7.830m)	108
表 5.4-10	X線回折強度ピークの一覧表[塩酸処理] (試料名:12MI31_7.830m)	109
表 5.4-11	X線回折強度ピークの一覧表[無定方位無処理] (試料名:Block_B)	110
表 5.4-12	X線回折強度ピークの一覧表[エチレングリコール処理] (試料名:Block_B)	111
表 5.4-13	X線回折強度ピークの一覧表[塩酸処理] (試料名:Block_B)	112
表 5.4-14	X線回折強度ピークの一覧表[無定方位無処理] (試料名:monopole2)	113
表 5.4-15	X線回折強度ピークの一覧表[エチレングリコール処理] (試料名:monopole2)	114
表 5.4-16	X線回折強度ピークの一覧表[塩酸処理] (試料名:monopole2)	115

## 1. はじめに

独立行政法人日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構）東濃地科学センターは、原子力政策大綱<sup>1)</sup>に示される「深地層の研究施設などを活用して、深地層の科学的研究、地層処分技術の信頼性の向上や安全評価手法の高度化などに向けた基盤的な研究開発、安全規制のための研究開発を引き続き着実に進めるべきである」との方針に基づき、「地層処分技術に関する研究開発」の内、深地層の科学的研究を進めている。超深地層研究所計画<sup>2)</sup>は、岐阜県瑞浪市において進められている結晶質岩（花崗岩）を対象とした深地層の研究施設計画である。瑞浪超深地層研究所は研究坑道と地上施設からなり、研究坑道は、2本の立坑と深度100m毎に設置される水平坑道などからなる。

超深地層研究所計画は、「深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備」および「深地層における工学技術の基盤の整備」を全体目標として定め、研究坑道の建設工程やこれに伴う調査研究の課題、対象、空間スケールなどの違いを考慮して、「第1段階；地表からの調査予測研究段階」、「第2段階；研究坑道の掘削を伴う研究段階」、および「第3段階；研究坑道を利用した研究段階」の3段階に区分して調査研究を進めている。現在は、第2段階および第3段階における調査研究を進めている<sup>3)</sup>。

超深地層研究所計画における物質移動に関する調査研究の目標は、研究坑道周辺の数m～100m程度のブロックスケールを対象にして、岩盤中の物質移動に関わる現象の理解を進めつつ、物質移動に関わるパラメータ値の測定技術および物質移動に関わるモデル化・解析・評価技術を体系的に整備することである<sup>3)</sup>。これまでの調査研究により、研究坑道周辺に認められる割れ目は、割れ目の走向・傾斜、その周辺の変質の程度、充填鉱物の有無などの観点に基づき分類（タイプ分け）が行われている<sup>4)</sup>。結晶質岩中における物質移動現象は、移動場として機能する透水性割れ目や、割れ目周辺のマトリクス部における拡散や収着によって支配される<sup>5)</sup>。このため、物質移動に関する調査研究において、このタイプ分けした割れ目の地質学的特徴と物質移動に関するパラメータ値の関係を把握することを目的とした透過拡散試験を2010年度に実施した<sup>6)</sup>。

2012年度から、物質移動に関する調査研究の一環として、2つの試験を計画した。1つ目は割れ目表面形状を残した試料を用いた透過拡散試験であり、これは2010年度に実施した透過拡散試験において割れ目の地質学的特徴と物質移動に関するパラメータ値の関係を十分に把握できないという課題<sup>7)</sup>に取り組むものである。2つ目は30cm四方の岩石ブロックを用いた拡散試験であり、これは室内試験によって取得される拡散係数を原位置条件への適用に向け、拡散係数のサイズ依存性を確認することを目的としている。

本報告書は、上記の2つの試験の開始に先立ち実施した、透過拡散試験に用いる試料の作製、岩石ブロックを用いた拡散試験環境の整備作業、試験に用いる岩石試料の物性を把握することを目的に実施した間隙率測定結果およびX線回折分析結果を取りまとめたものである。

## 2. 実施概要

透過拡散試験に用いる試料の作製、岩石ブロックを用いた拡散試験環境の整備、間隙率測定とX線回折分析を実施した。それぞれの概要について以下に示す。

### (1) 透過拡散試験に用いる試料の作製

透過拡散試験は、 $\phi 25\text{mm}$ 、厚さ  $5\text{mm}$  の試料を用いる。3.1 節で述べるように一方のリザーバーにトレーサーを添加し、もう一方のリザーバー中のトレーサー濃度の変化を測定し、岩石試料中を破過するトレーサーの量から拡散係数を算出するものである。

2010 年度に、割れ目の地質学的特徴と物質移動に関わるパラメータ値との関係の把握を目的として透過拡散試験を実施した。その結果、透過拡散試験の手法の有効性を確認したものの<sup>8), 9)</sup>、割れ目の地質学的特徴と物質移動に関するパラメータ値の関係を十分に把握できないという課題が示された<sup>7)</sup>。これは、割れ目近傍の岩石を供試体としたが、既存の透過拡散試験の手法に基づき、供試体に凹凸がないように研磨したため<sup>6)</sup>、割れ目の特徴が反映できなかったことが原因と考えられる。その課題の解決に向け、割れ目面の特徴を残した試料を作製し、それらの試料を用いた透過拡散試験を実施することとした。

岩石試料には、2010 年度に実施した透過拡散試験と同一のコア(10MI22 号孔)を用いるとともに、割れ目の地質学的特徴と物質移動特性の関係を把握するための拡散係数データの充実を目的として、研究坑道内のボーリング調査により取得されたコアからも透過拡散試験用の試料を作製した。さらに、岩相の違いによる拡散係数の違いを把握するため、研究事例が多いスイスのグリムゼル原位置試験場<sup>10)</sup>の monopole2 孔のコア(花崗閃緑岩)からも透過拡散試験用の試料を作製した。

また、後述の岩石ブロックを用いた拡散試験において、拡散係数のサイズ依存性を把握することを目的に、岩石ブロックを作製した際の残試料からも透過拡散試験の試料を作製した。

### (2) 岩石ブロックを用いた拡散試験環境の整備

岩石ブロックを用いた拡散試験は、 $30\text{cm}$  四方の直方体の岩石ブロックの中心にトレーサー添加孔を、その周囲に複数のサンプリング孔を設け、サンプリング孔でのトレーサー濃度の変化を測定する方法で、トレーサー添加孔とサンプリング孔の 2 孔間の拡散係数を算出する。

本試験は、室内試験によって取得される拡散係数の原位置条件への適用に向け、拡散係数のサイズ依存性を確認すること、および本試験により取得されるデータの評価・解析手法の構築を目的としている。

透過拡散試験は厚さ  $5\text{mm}$  程度の物質移動現象を評価するのに対し、岩石ブロックを用いた拡散試験はブロック内数  $\text{cm}$  の孔間での物質移動現象を評価するものであり、両者の試験結果から試料サイズによる依存性を確認する。

本作業では、深度  $500\text{m}$  研究アクセス北坑道掘削時に採取した岩石試料を用いて、試験に使用する岩石ブロックを作製するとともに、試験環境の整備を行った。

### (3) 間隙率測定

割れ目面を残した試料を用いる透過拡散試験や岩石ブロックを用いた拡散試験では、均質な試料での試験と異なり、試験結果の評価において数値解析を実施する必要がある。そこで、数値解析で用いる間隙率を取得することを目的として、透過拡散試験に用いる岩石試料を作製した際の残試料と岩石ブロックを作製した際の残試料を用いて、水銀圧入法<sup>11)</sup>および水飽和法<sup>12)</sup>による間

隙率測定を行った。また間隙率測定では、数値解析に用いるためのパラメータ取得のみでなく、試験に供する試料の大きさ、および試料形状の違いが間隙率測定に与える影響の確認や、割れ目面からの距離に応じた間隙率の変化を把握することも目的として実施した。

#### (4) X線回折分析

物質移動解析で用いるパラメータを設定するために、物質移動に関する地質環境の特性（地下水の地球化学、岩石の物理化学特性など）の把握が必要となる<sup>12)</sup>。そこで、透過拡散試験に用いる岩石試料を作製した際の残試料と岩石ブロックを作製した際の残試料を用いて、鉱物組成の把握を目的に、X線回折による鉱物同定を行った。

### 3. 拡散試験環境の整備

#### 3.1 透過拡散試験

透過拡散試験は、図 3.1-1（左図）に示すように一方のリザーバー（高濃度リザーバー）にトレーサーを添加し、もう一方のリザーバー（低濃度リザーバー）中のトレーサー濃度の変化を測定し、岩石試料中を破過するトレーサーの量から拡散係数を算出するものである。本作業では、研究坑道において実施されたボーリング調査から採取されたコア、2010 年度に実施した透過拡散試験と同一のコア、そしてグリムゼル原位置試験場<sup>10)</sup>の monopole2 孔のコアを用いて、透過拡散試験に用いる試料を作製した。さらに、岩石ブロックを作製した際の残試料からも透過拡散試験の試料を作製した。

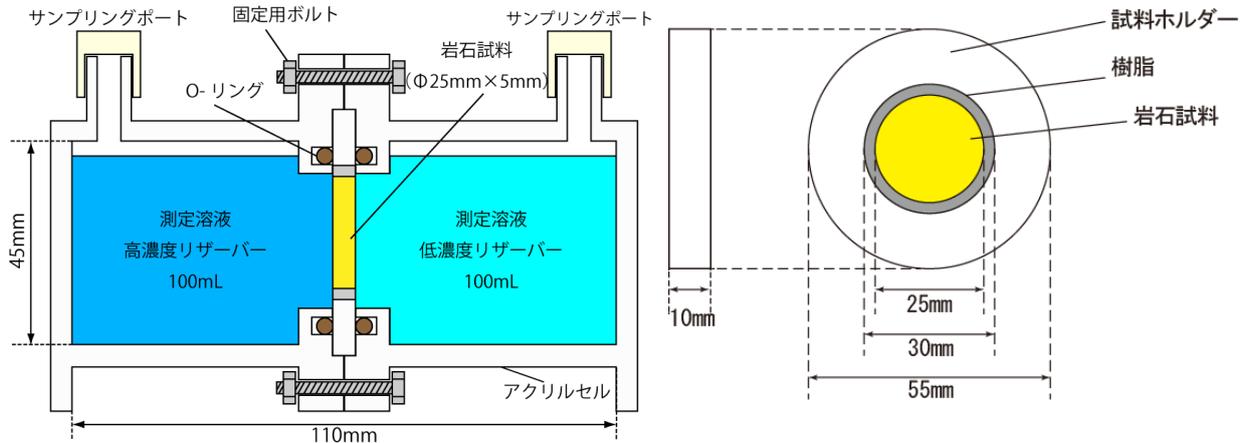


図 3.1-1 透過拡散試験装置の構造

#### 3.1.1 岩石試料の選定

透過拡散試験に用いる試料は、研究坑道において実施されたボーリング調査で採取したコア、後述の 3.2.3 の岩石ブロックの成形時の残試料（Block\_B, Block\_C）、およびグリムゼル原位置試験場<sup>10)</sup>の monopole2 孔のコアから採取した。採取した岩石試料一覧を表 3.1.1-1 に示す(表中の試料名は、採取したボーリング孔の名称と孔口からの距離を示す)。岩石試料のうち、コアから採取した試料は「孔名\_採取深度」を試料名とした。また、割れ目タイプは石橋ほか(2012)<sup>13)</sup>（図 3.1.1-1）に基づき区分し、充填鉱物の無い割れ目についても対象とした。採取対象とした研究坑道におけるボーリング調査位置を図 3.1.1-2 に示す。図 3.1.1-3 に採取した岩石試料を示し、割れ目面を対象とする岩石試料には割れ目面を赤破線で示す。

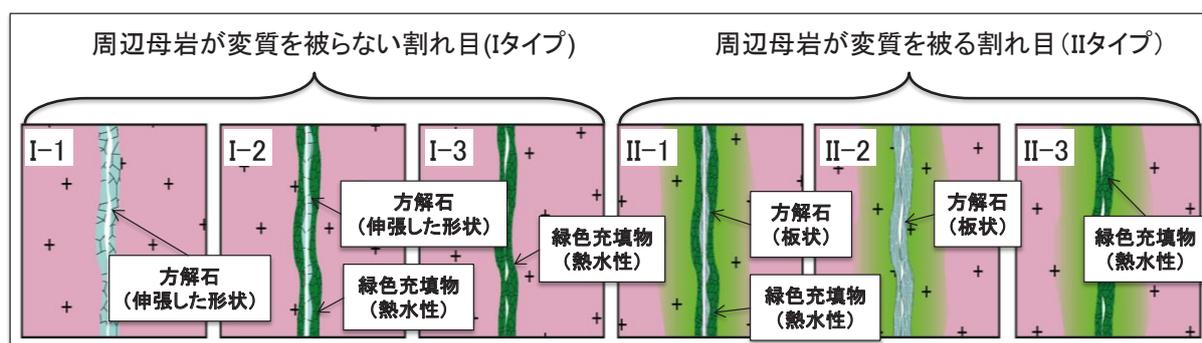


図 3.1.1-1 割れ目のタイプ区分<sup>13)</sup>

表 3.1.1-1 透過拡散試験に用いる岩石試料一覧

岩石試料名	割れ目タイプ
09MI20_76.870m	II-3
10MI22_13.180m	II-未 <sup>※2</sup>
10MI22_15.640m	I-未 <sup>※1</sup>
10MI22_33.000m	-
10MI22_33.600m	I-1
10MI22_37.440m	I-3
10MI22_39.995m	I-3
10MI22_76.137m	II-2
10MI23_32.941m	I-1
10MI23_87.576m	I-2
10MI23_96.671m	II-1
10MI24_13.221m	II-3
10MI25_20.782m	II-2
10MI25_22.268m	II-1
12MI30_5.250m	I-3
12MI30_15.840m	I-1
12MI31_4.985m	I-1
12MI31_7.830m	I-2
Block_B	-
Block_C	-
monopole2_13.950m	-

※1 図 3.1.1-1 に示す周辺母岩が変質を被らない割れ目で充填鉱物を含まない割れ目を「I-未」とした。

※2 図 3.1.1-1 に示す周辺母岩が変質を被る割れ目で充填鉱物を含まない割れ目を「II-未」とした。

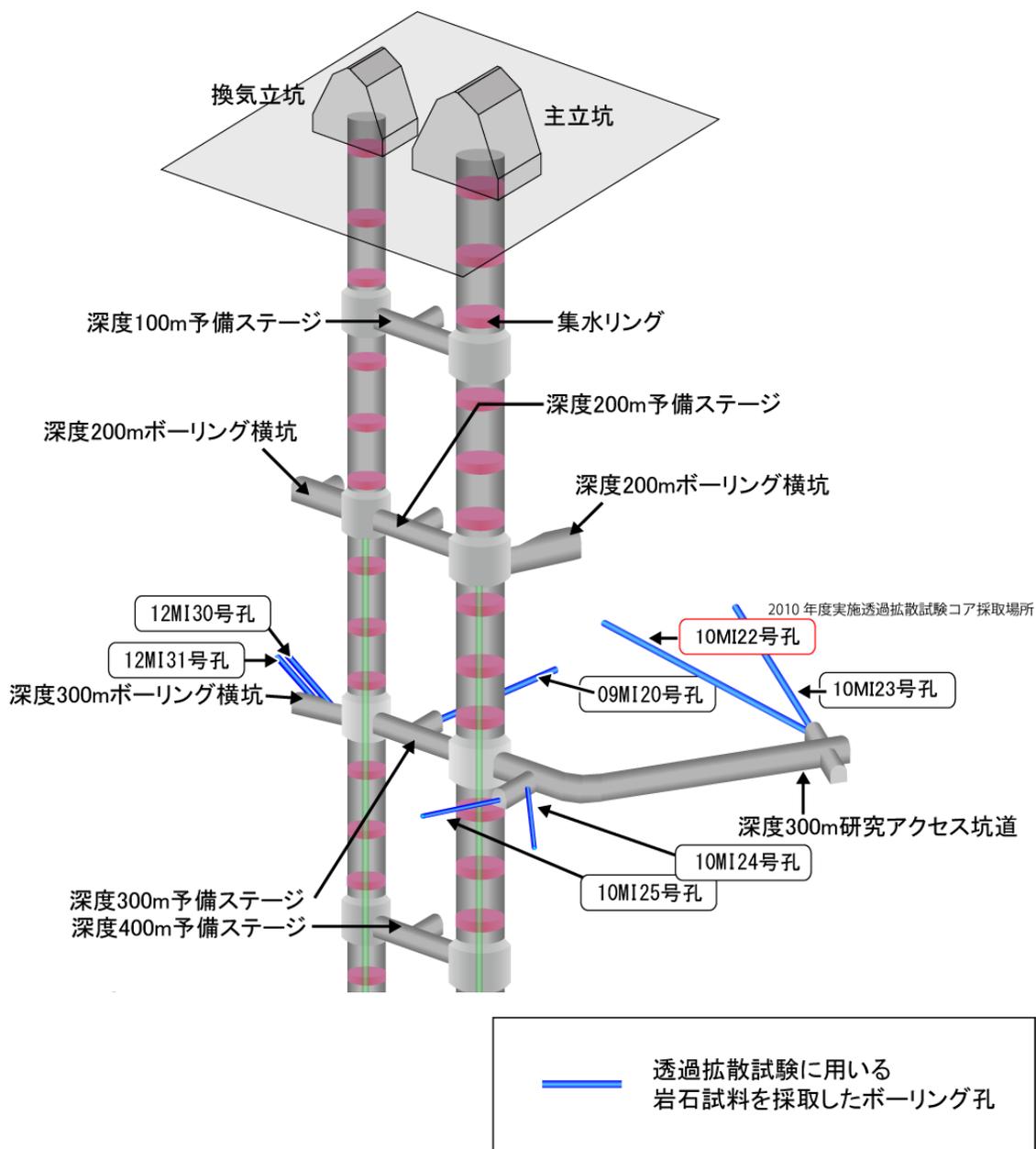
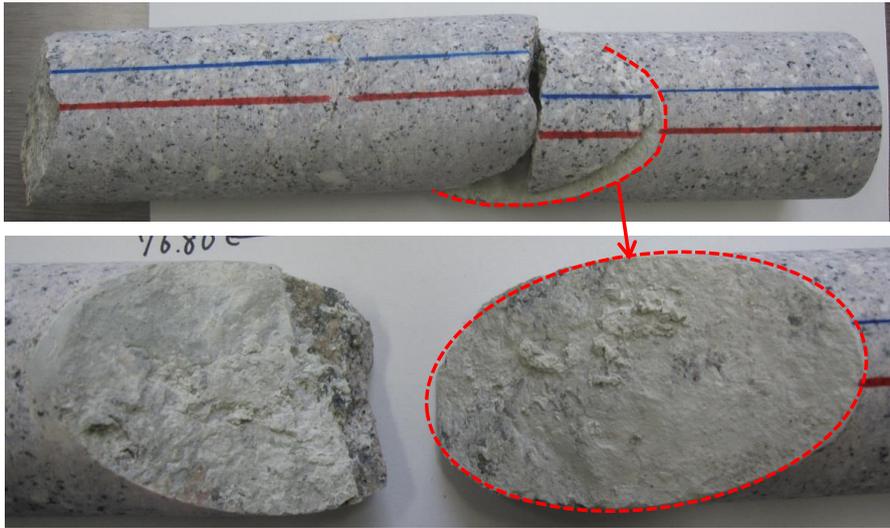


図 3.1.1-2 採取対象とした研究坑道におけるボーリング調査位置



(a) 試料名 : 09MI20\_76.870m



(b) 試料名 : 10MI22\_13.180m



(c) 試料名 : 10MI22\_15.640m

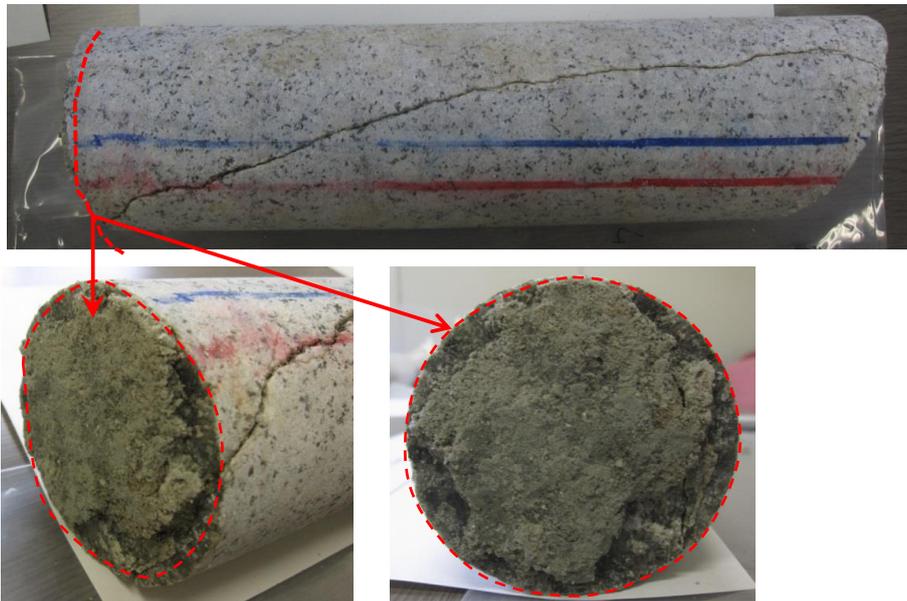
図 3.1.1-3 採取した岩石試料



(d) 試料名 : 10MI22\_33.000m

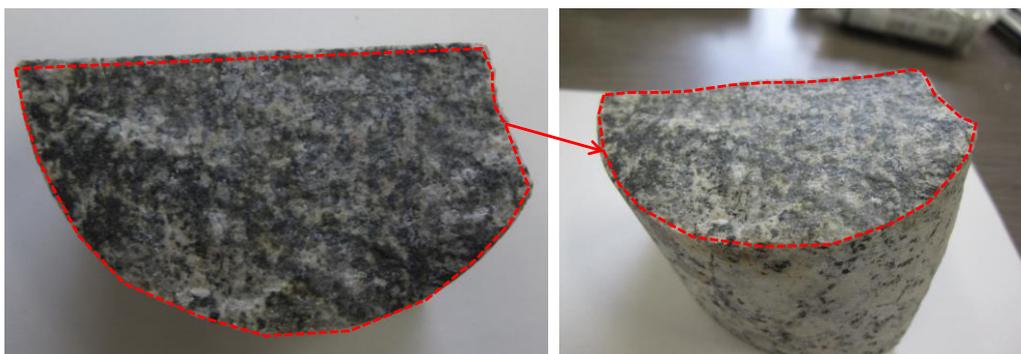


(e) 試料名 : 10MI22\_33.600m

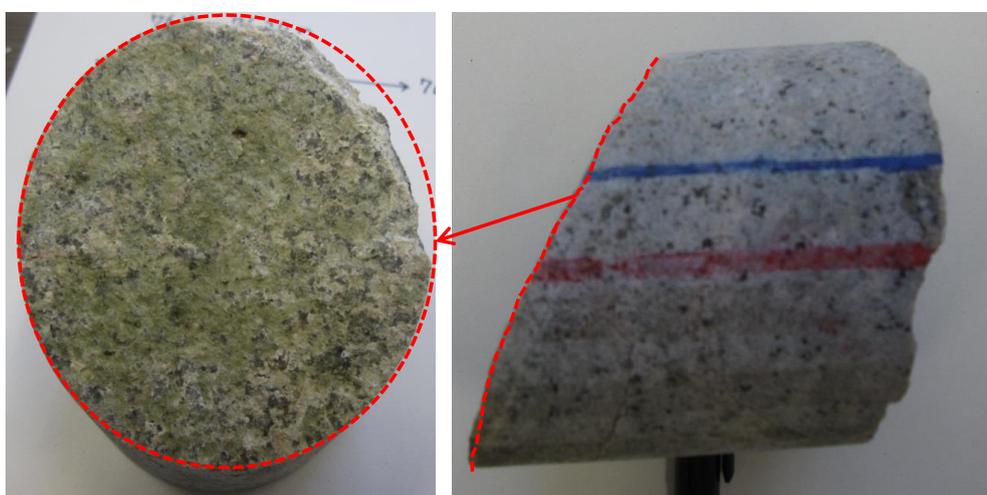


(f) 試料名 : 10MI22\_37.440m

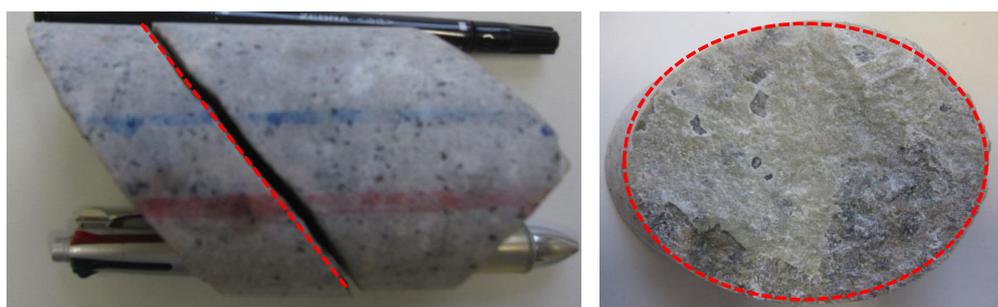
図 3.1.1-3 採取した岩石試料 (続き)



(g) 試料名 : 10MI22\_39.995m



(h) 試料名 : 10MI22\_76.137m

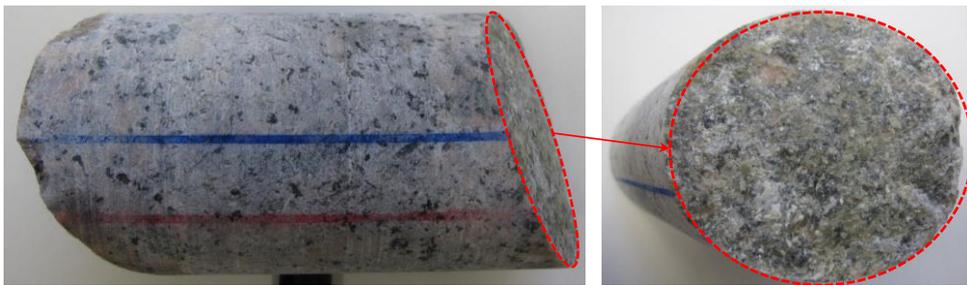


(i) 試料名 : 10MI23\_32.941m

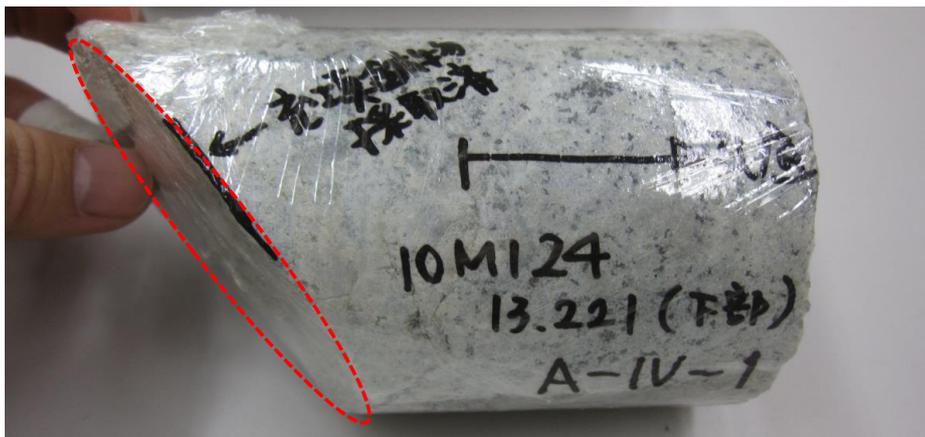
図 3.1.1-3 採取した岩石試料 (続き)



(j) 試料名 : 10MI23\_87.56m

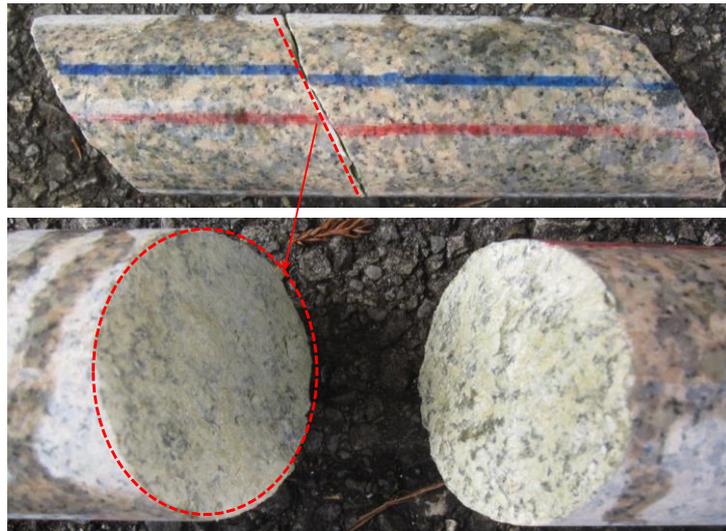


(k) 試料名 : 10MI23\_96.671m

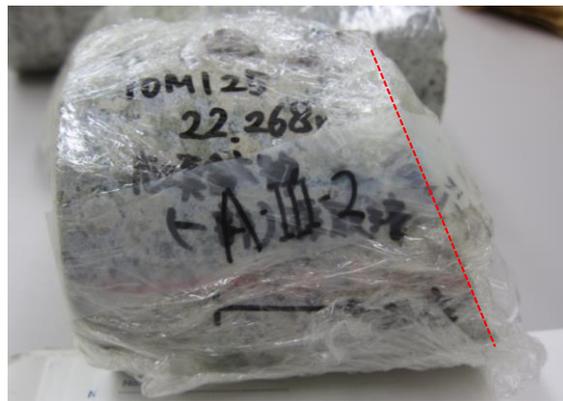


(l) 試料名 : 12MI24\_13.221m

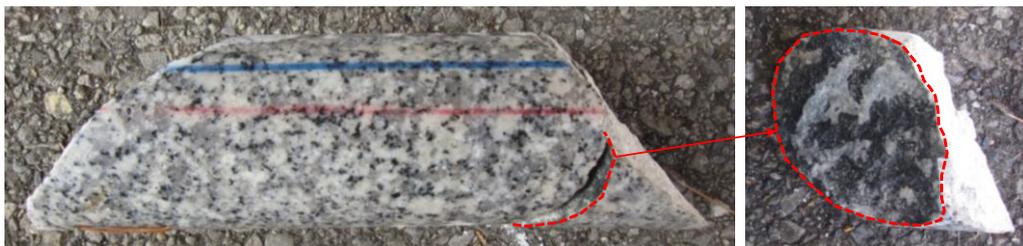
図 3.1.1-3 採取した岩石試料 (続き)



(m) 試料名 : 12MI25\_20.782m



(n) 試料名 : 12MI25\_22.268m



(o) 試料名 : 12MI30\_5.250m

図 3.1.1-3 採取した岩石試料 (続き)

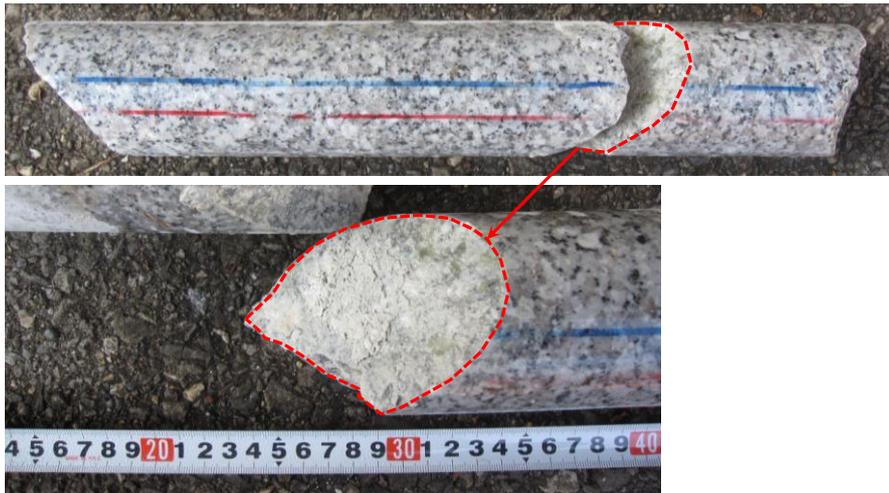


(p) 試料名 : 12MI30\_15.840m



(q) 試料名 : 12MI31\_4.985m

図 3.1.1-3 採取した岩石試料（続き）



(r) 試料名 : 12MI31\_7.830m



(s) 試料名 : Block\_B



(t) 試料名 : Block\_C



(u) 試料名 : monopole2\_13.950m

図 3.1.1-3 採取した岩石試料 (続き)

### 3.1.2 試料の作製

3.1.1 で示したコアと形成前岩石試料を対象に、透過拡散試験用にφ25mmの円盤状の試料を以下に示す手順で作製した。作製に用いた主な機器の一覧を表3.1.2-1に示し、作製した試料の形状などを表3.1.2-2に示す。なお、1つのコアまたは形成前岩石試料から2つの試料を作製した場合は、試料名の後ろに番号を追記している。

- ① 割れ目面の充填鉱物の付着状況などから試料の採取位置を決め、試料長が長い場合には、100mm程度の厚さで割れ目面と平行となるように切断した。切断時は、割れ目面の充填鉱物が剥がれ落ちないように留意した。切断前のコアまたは岩石試料、切断状況および切断後の試料の状況を図3.1.2-1に示す。
- ② 試料形成はφ25mmのダイヤモンドビットを用いたリボーリングによって行った。試料は、割れ目面とダイヤモンドビットが概ね垂直となるよう固定後、直接冷却水があたり、水流で充填鉱物が剥がれ落ちないように割れ目面をゴムシートで保護した。リボーリングの状況を図3.1.2-2に示し、リボーリング後の試料を図3.1.2-3に示す。
- ③ 岩石切断機で、5mmもしくは10mm程度の厚みに切断した後に、割れ目面以外の面を研磨した。切断位置の模式図は、図3.1.2-4に示す。成形後の試料を、図3.1.2-5に示す。試料寸法は、高さを円外周部の90度ずれに4か所（0時、3時、6時、9時の位置）と直径を1か所（3時～9時の位置）をノギスで測定した（表3.1.2-3）。

表 3.1.2-1 作製に使用した主な機器

品名	メーカー	型式	仕様
岩石切断機	日特機械工業	NCO-11SDX	ブレード径φ550mm
	(株)マルトー	MC-435	ブレード径φ300mm
コア抜き機	精研ダイヤモンド工業	SB4816RHH0	水道水強制冷却式
平面研削盤	岡本工作機械製作所	PFG-450DXA	φ100mmまで
研削機	株式会社ニチカ	RP-5	φ300mm
ノギス	(株)ミットヨ	530-108	最大測定幅200mm 最小単位0.05mm

表 3.1.2-2 透過拡散試験試料一覧

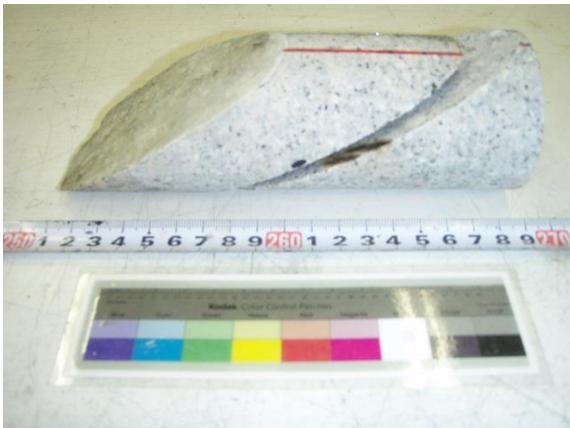
試料名	割れ目タイプ	透過拡散試験	
		試料作製位置	試料形状
09MI20_76.870m	II-3	割れ目面	φ25mm×5mm
10MI22_13.180m	II-未	割れ目面	φ25mm×5mm
10MI22_15.640m	I-未	割れ目面	φ25mm×5mm
10MI22_33.000m	-	マトリクス	φ25mm×10mm
10MI22_33.600m	I-1	割れ目面	φ25mm×5mm
10MI22_37.440m	I-3	割れ目面	φ25mm×5mm
10MI22_39.995m	I-3	割れ目面	φ25mm×5mm
10MI22_76.137m	II-2	割れ目面	φ25mm×5mm
10MI23_32.941m	I-1	割れ目面	φ25mm×5mm
10MI23_87.576m	I-2	割れ目面	φ25mm×5mm
10MI23_96.671m	II-1	割れ目面	φ25mm×5mm
10MI24_13.221m_1	II-3	割れ目面	φ25mm×5mm
10MI24_13.221m_2		割れ目面	φ25mm×5mm
10MI25_20.782m_1	II-2	割れ目面	φ25mm×5mm
10MI25_20.782m_2		割れ目面	φ25mm×5mm
10MI25_22.268m_1	II-1	割れ目面	φ25mm×5mm
10MI25_22.268m_2		割れ目面	φ25mm×5mm
12MI30_5.250m_1	I-3	割れ目面	φ25mm×5mm
12MI30_5.250m_2		割れ目面	φ25mm×5mm
12MI30_15.840m_1	I-1	割れ目面	φ25mm×5mm
12MI30_15.840m_2		割れ目面	φ25mm×5mm
12MI31_4.985m	I-1	割れ目面	φ25mm×5mm
12MI31_7.830m_1	I-2	割れ目面	φ25mm×5mm
12MI31_7.830m_2		割れ目面	φ25mm×5mm
Block_B_1	-	マトリクス	φ25mm×5mm
Block_B_2	-	マトリクス	φ25mm×5mm
Block_C_1	-	マトリクス	φ25mm×5mm
Block_C_2	-	マトリクス	φ25mm×5mm
monopole2_13.950m_1	-	マトリクス (片麻状組織に垂直)	φ25mm×5mm
monopole2_13.950m_2	-	マトリクス (片麻状組織に平行)	φ25mm×5mm



切断前コア



切断状況



切断後試料

図 3.1.2-1 岩石試料の切断前，切断作業および切断後の状況



図 3.1.2-2 リポーリング状況



(a) 試料名 : 09MI20\_76.870m



(b) 試料名 : 10MI22\_13.180m



(c) 試料名 : 10MI22\_15.640m

図 3.1.2-3 リボーリング後の試料



(d) 試料名 : 10MI22\_33.000m (マトリクス)



(e) 試料名 : 10MI22\_33.600m



(f) 試料名 : 10MI22\_37.440m



図 3.1.2-3 リポーリング後の試料 (続き)



(g) 試料名 : 10MI22\_39.995m



(h) 試料名 : 10MI22\_76.137m



(i) 試料名 : 10MI23\_32.941m

図 3.1.2-3 リポーリング後の試料 (続き)



(j) 試料名 : 10MI23\_87.576m



(k) 試料名 : 10MI23\_96.671m



(l) 試料名 : 10MI24\_13.221m\_1, 2

図 3.1.2-3 リポーリング後の試料 (続き)



(m) 試料名 : 10MI25\_20.782m\_1, 2

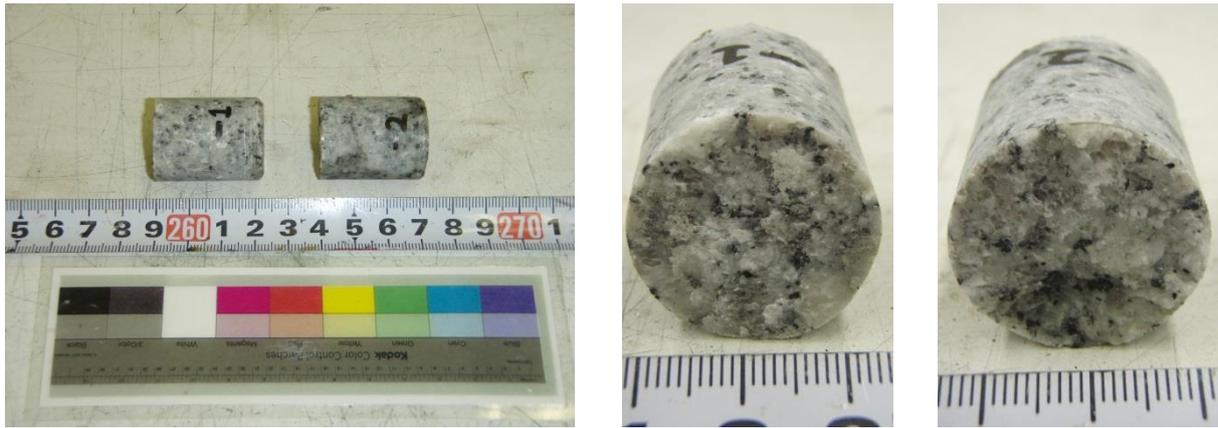


(n) 試料名 : 10MI25\_22.268m\_1, 2

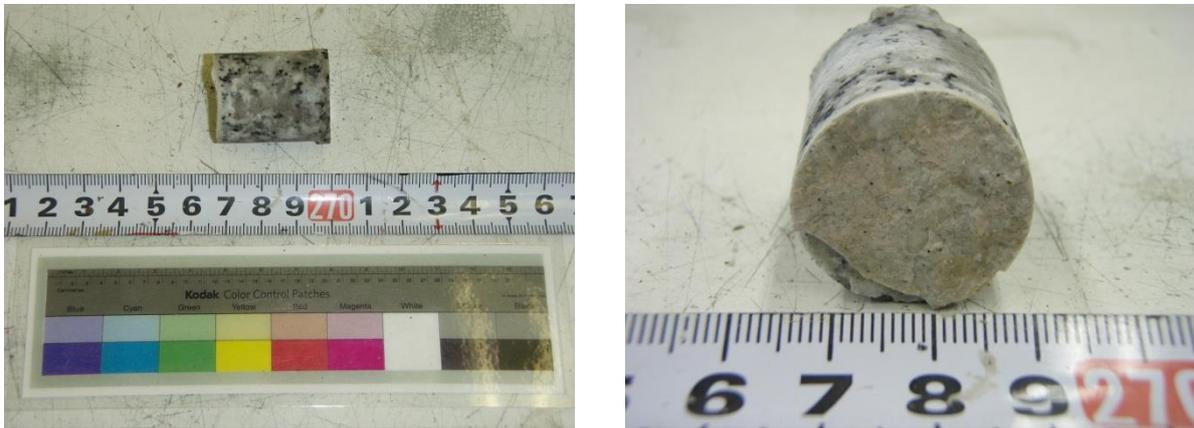


(o) 試料名 : 12MI30\_5.250m\_1, 2

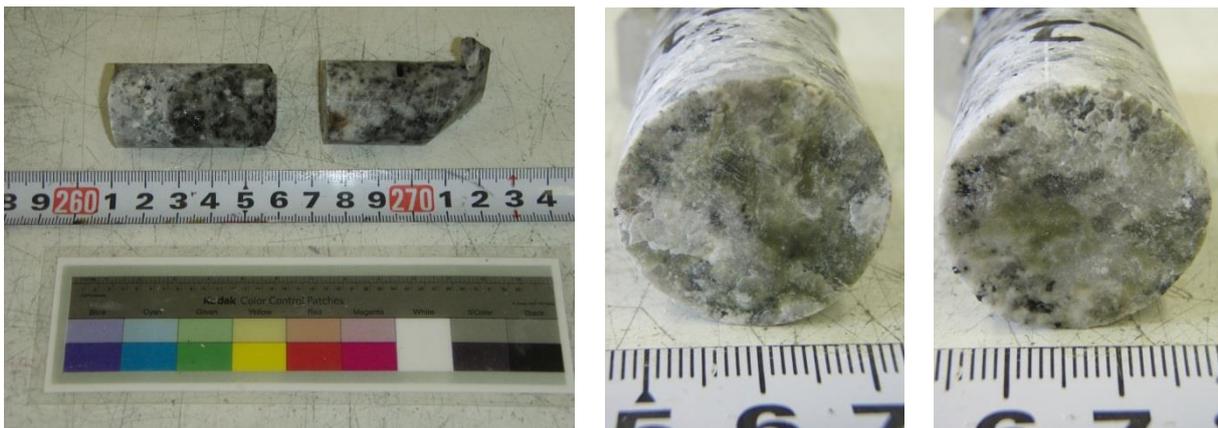
図 3.1.2-3 リポーリング後の試料 (続き)



(p) 試料名 : 12MI130\_15.840m\_1, 2



(q) 試料名 : 12MI31\_4.985m



(r) 試料名 : 12MI31\_7.830m\_1, 2

図 3.1.2-3 リポーリング後の試料 (続き)



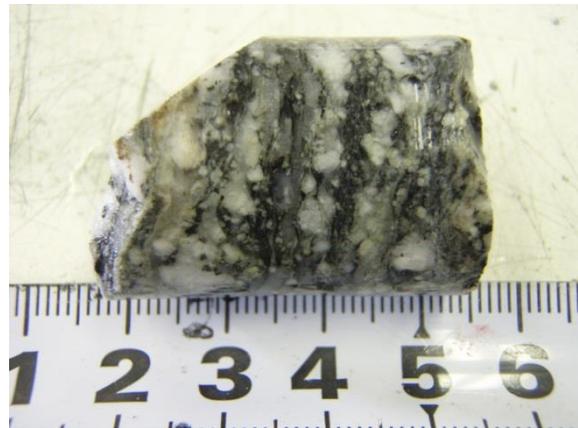
(s) 試料名 : Block\_B\_1, 2 (マトリクス)



(t) 試料名 : Block\_C\_1, 2 (マトリクス)



(u) 試料名 : monople2\_13.950m\_1



(v) 試料名 : monople2\_13.950m\_2



図 3.1.2-3 リポーリング後の試料 (続き)

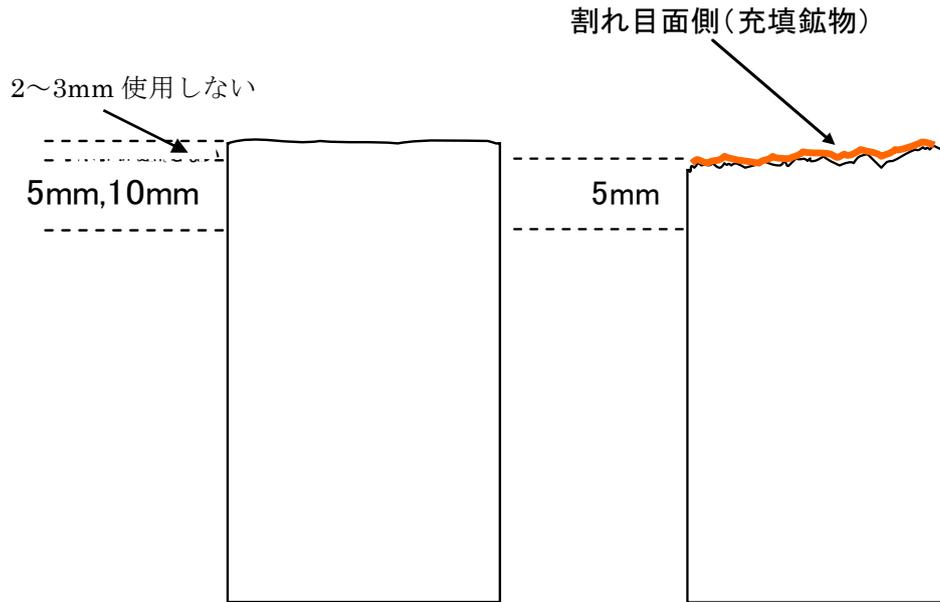
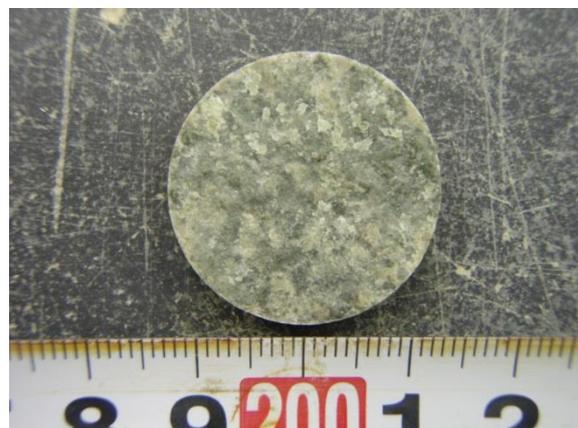


図 3.1.2-4 試料の切断位置 (左 : マトリクス, 右 : 割れ目面)



(a) 試料名 : 09MI20\_76.870m

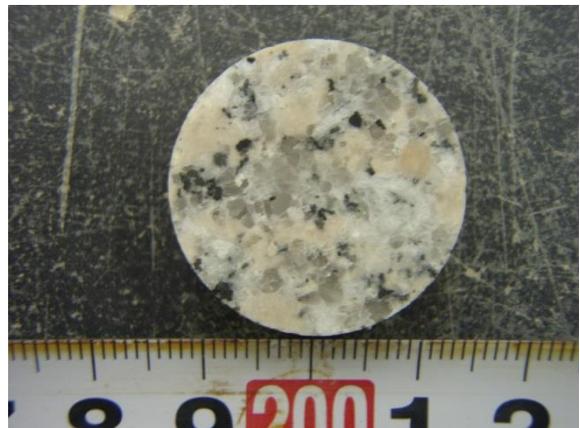


(b) 試料名 : 10MI22\_13.180m

図 3.1.2-5 成形後の岩石試料



(c) 試料名 : 10MI22\_15.640m

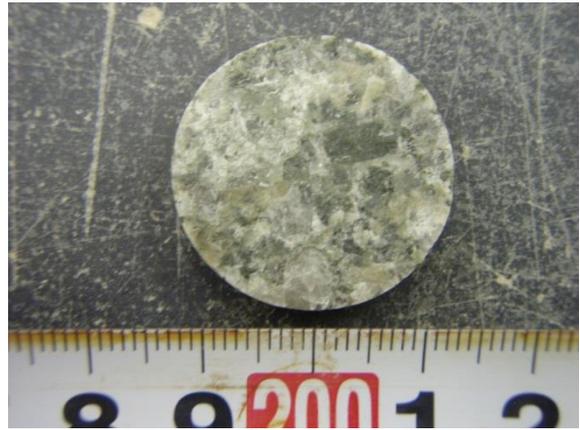


(d) 試料名 : 10MI22\_33.000m

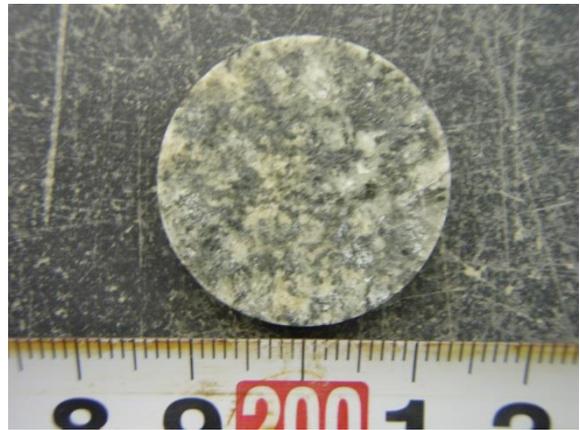


(e) 試料名 : 10MI22\_33.600m

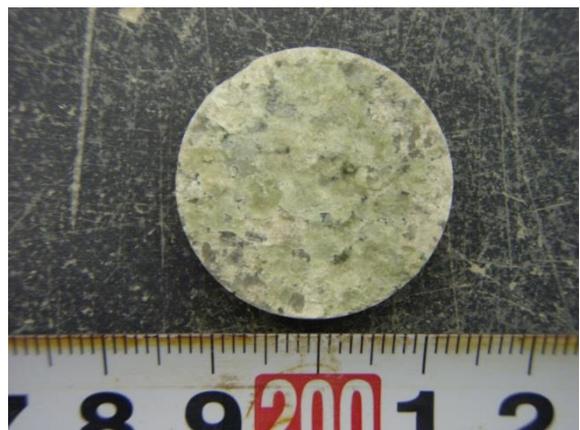
図 3.1.2-5 成形後の岩石試料 (続き)



(f) 試料名 : 10MI22\_37.440m



(g) 試料名 : 10MI22\_39.995m



(h) 試料名 : 10MI22\_76.137m

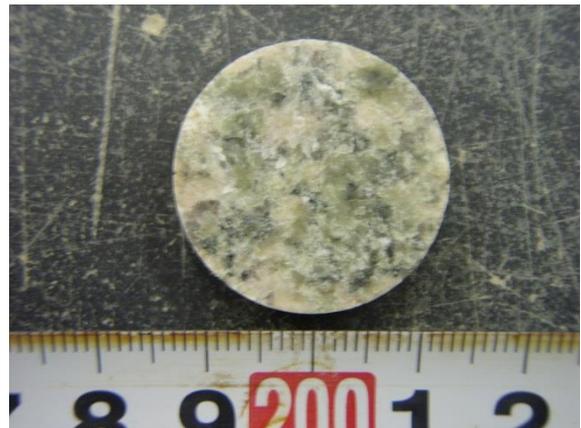
図 3.1.2-5 成形後の岩石試料 (続き)



(i) 試料名 : 10MI23\_32.941m

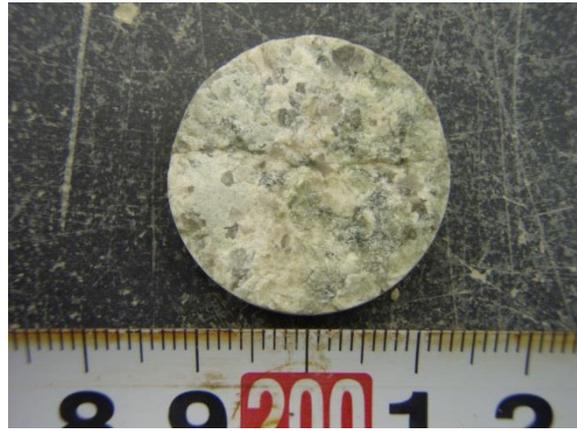


(j) 試料名 : 10MI23\_87.576m



(k) 試料名 : 10MI23\_96.671m

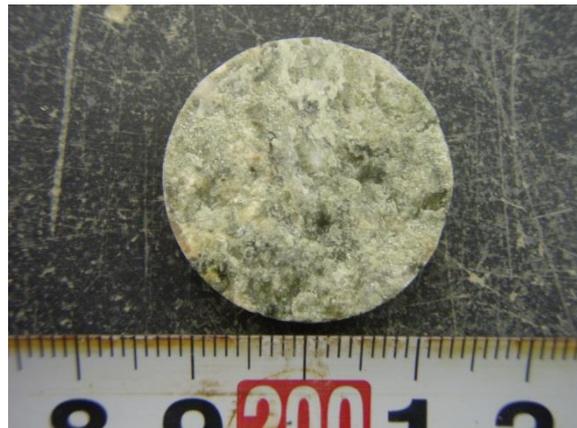
図 3.1.2-5 成形後の岩石試料 (続き)



(l) 試料名 : 10MI24\_13.221m\_1

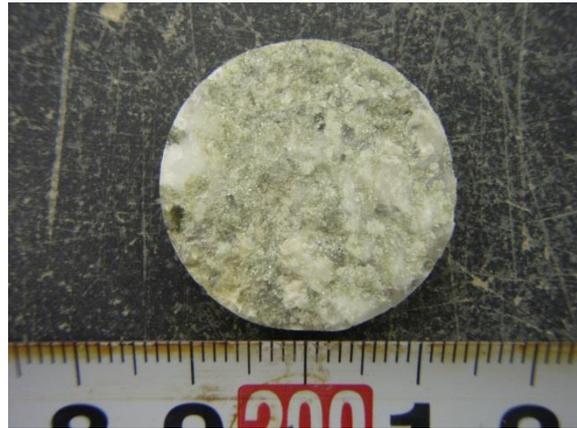


(m) 試料名 : 10MI24\_13.221m\_2



(n) 試料名 10MI25\_20.782m\_1

図 3.1.2-5 成形後の岩石試料 (続き)



(o) 試料名 : 10MI25\_20.782m\_2

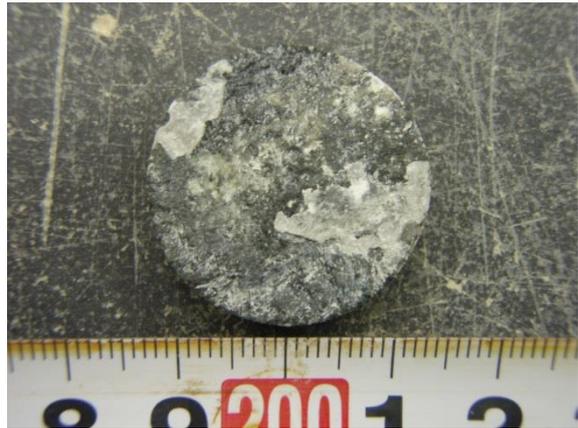


(p) 試料名 : 10MI25\_22.268m\_1



(q) 試料名 : 10MI25\_22.268m\_2

図 3.1.2-5 成形後の岩石試料 (続き)



(r) 試料名 : 12MI30\_5.250m\_1

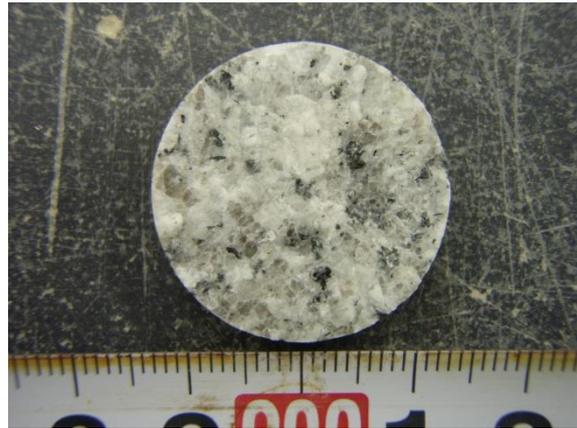


(s) 試料名 : 12MI30\_5.250m\_2



(t) 試料名 : 12MI30\_15.840m\_1

図 3.1.2-5 成形後の岩石試料 (続き)



(u) 試料名 : 12MI130\_15.840m\_2

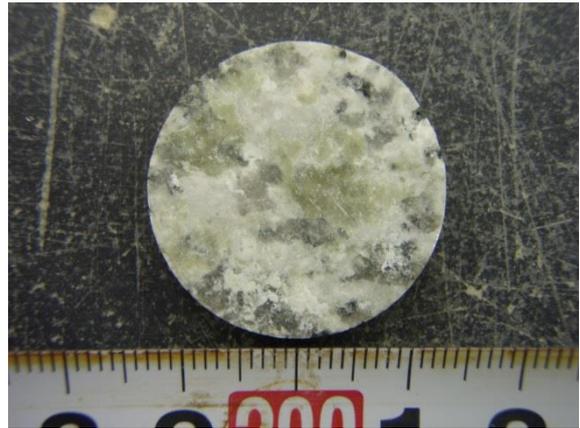


(v) 試料名 : 12MI31\_4.985m

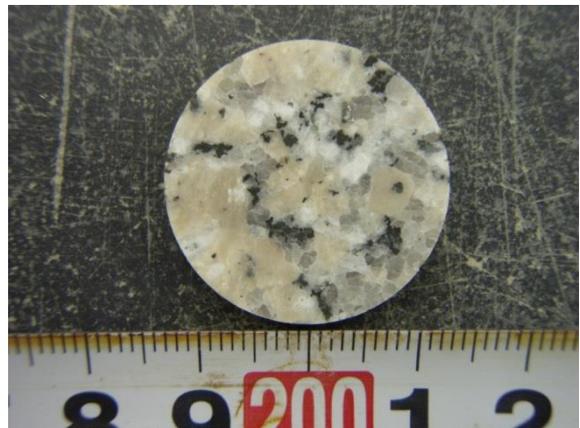


(w) 試料名 : 12MI31\_7.830m\_1

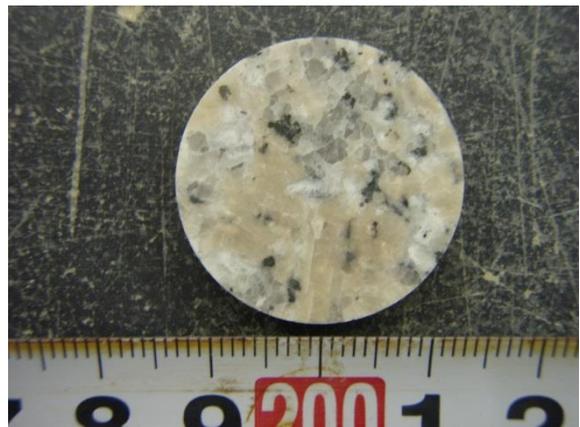
図 3.1.2-5 成形後の岩石試料 (続き)



(x) 作製後の試料 (12MI31\_7.830m\_2)



(y) 作製後の試料 (Block\_B\_1)



(z) 作製後の試料 (Block\_B\_2)

図 3.1.2-5 成形後の岩石試料 (続き)



(aa) 作製後の試料 (Block\_C\_1)



(ab) 作製後の試料 (Block\_C\_2)



(ac) 作製後の試料 (monople2\_13.950m\_1)

図 3.1.2-5 成形後の岩石試料 (続き)



(ad) 試料名 : monople2\_13.950m\_2

図 3.1.2-5 成形後の岩石試料 (続き)

表 3.1.2-3 試料寸法一覧

試料名	試料寸法(mm)					
	直径	高さ	高さ1	高さ2	高さ3	高さ4
	(3時-9時位置)	平均	(0時位置)	(3時位置)	(6時位置)	(9時位置)
09MI20_76.870m	25.25	4.50	4.55	4.50	4.50	4.45
10MI22_13.180m	25	4.73	4.95	4.50	4.70	4.75
10MI22_15.640m	25	7.09	7.40	7.70	5.95	7.30
10MI22_33.000m	25	9.60	9.60	9.45	9.55	9.80
10MI22_33.600m	24.95	6.31	6.05	5.60	7.25	6.35
10MI22_37.440m	25.25	4.45	3.95	3.95	4.75	5.15
10MI22_39.995m	25.3	5.05	4.75	5.70	4.90	4.85
10MI22_76.137m	25.3	4.74	4.45	5.20	4.90	4.40
10MI23_32.941m	25.3	5.68	5.70	6.00	5.25	5.75
10MI23_87.576m	25.25	6.49	6.95	6.05	6.40	6.55
10MI23_96.671m	25.25	5.54	5.30	5.40	5.30	6.15
10MI24_13.221m_1	25.4	5.45	6.85	5.25	5.10	4.60
10MI24_13.221m_2	25.45	6.75	7.05	6.25	5.55	8.15
10MI25_20.782m_1	25.35	5.35	5.40	5.20	5.70	5.10
10MI25_20.782m_2	25.35	5.54	4.90	5.75	5.60	5.90
10MI25_22.268m_1	25.3	5.46	7.00	5.00	4.60	5.25
10MI25_22.268m_2	25.3	4.83	4.70	4.75	5.15	4.70
12MI30_5.250m_1	25.35	6.19	6.35	6.65	5.70	6.05
12MI30_5.250m_2	25.35	4.94	4.80	4.90	4.90	5.15
12MI30_15.840m_1	25.3	5.56	5.50	5.80	5.45	5.50
12MI30_15.840m_2	25.3	6.41	6.60	5.00	6.50	7.55
12MI31_4.985m	25.3	4.61	4.35	5.05	4.15	4.90
12MI31_7.830m_1	25.35	6.28	5.40	6.50	6.35	6.85
12MI31_7.830m_2	25.35	5.46	5.30	5.75	5.40	5.40
Block_B_1	25.25	4.45	4.40	4.40	4.50	4.50
Block_B_2	25.3	4.61	4.50	4.60	4.75	4.60
Block_C_1	25.25	4.94	5.05	5.00	4.80	4.90
Block_C_2	25.25	4.90	4.90	4.80	4.90	5.00
monopole2_13.950m_1	25.3	3.74	3.70	3.60	3.75	3.90
monopole2_13.950m_2	25.3	4.86	4.80	4.80	4.90	4.95

### 3.1.3 試料ホルダーへの固定

透過拡散試験では、図 3.1-1 に示すように透過拡散試験セルの中央に試料を組込む必要がある。本作業は、透過拡散試験セルに組込むアクリル製円筒型試料ホルダーに試料を固定する作業である。成形したφ25mmの円盤状の試料は、図 3.1.3-1 に示す外径55mm、内径30mmのアクリル製円筒型試料ホルダーに、図 3.1.3-2 に示すように2液性樹脂（コニシボンド E206S）で隙間を充填して固定した。アクリル製円筒型試料ホルダーに固定後の試料を図 3.1.3-3 に示す。



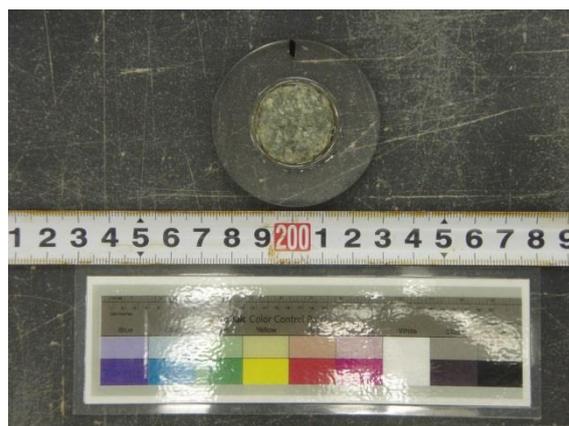
図 3.1.3-1 アクリル製円筒型の試料ホルダー



図 3.1.3-2 2液性樹脂による試料の固定

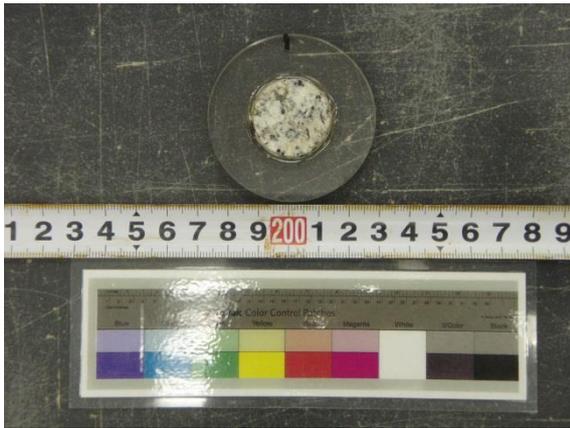


試料名：09MI20\_76.870m



試料名：10MI22\_13.180m

図 3.1.3-3 試料ホルダーに固定後の試料



試料名 : 10MI22\_15.640m



試料名 : 10MI22\_33.000m



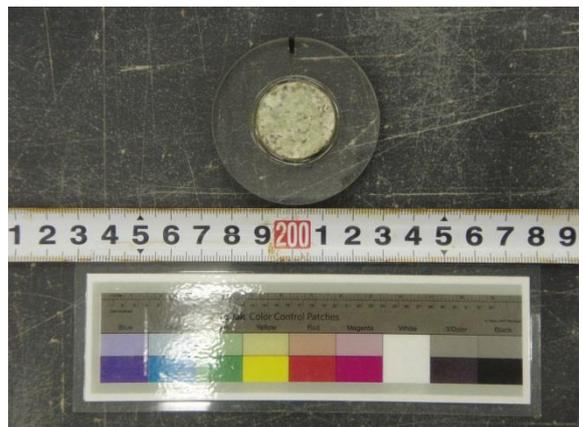
試料名 : 10MI22\_33.600m



試料名 : 10MI22\_37.440m



試料名 : 10MI22\_39.995m



試料名 : 10MI22\_76.137m

図 3.1.3-3 試料ホルダーに固定後の試料 (続き)



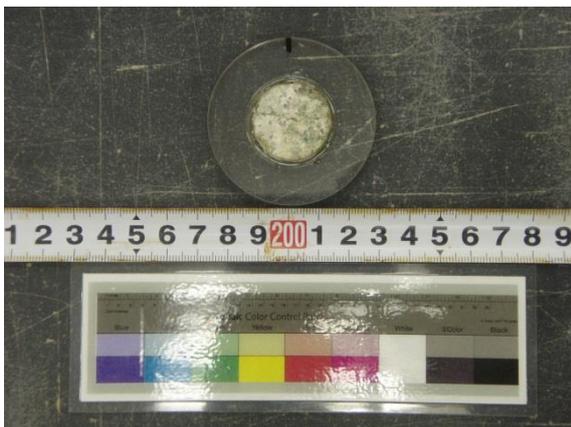
試料名 : 10MI23\_32.941m



試料名 : 10MI23\_87.576m



試料名 : 10MI23\_96.761m



試料名 : 10MI24\_13.221m\_1

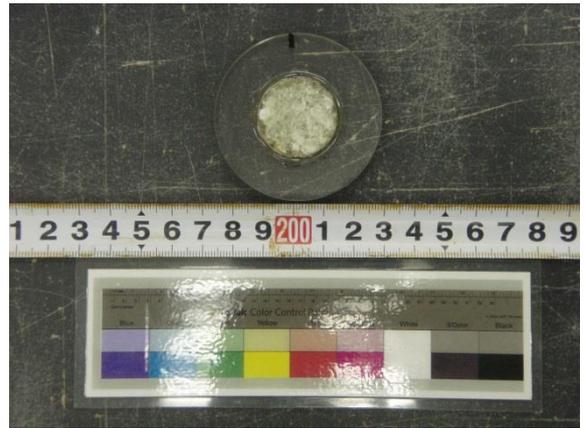


試料名 : 10MI24\_13.221m\_2

図 3.1.3-3 試料ホルダーに固定後の試料 (続き)



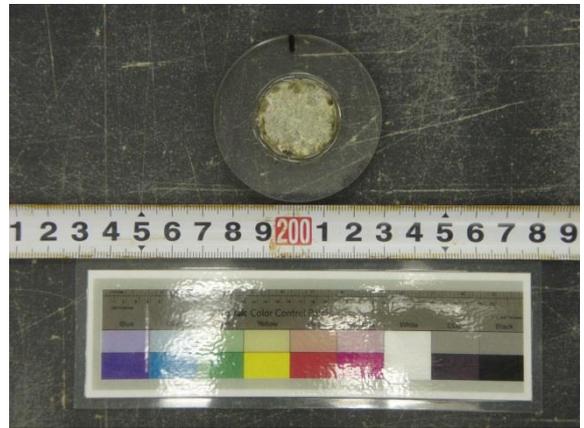
試料名 : 10MI25\_20.782m\_1



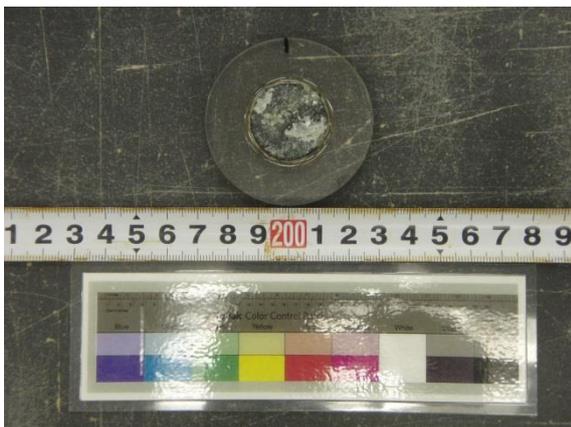
試料名 : 10MI25\_20.782m\_2



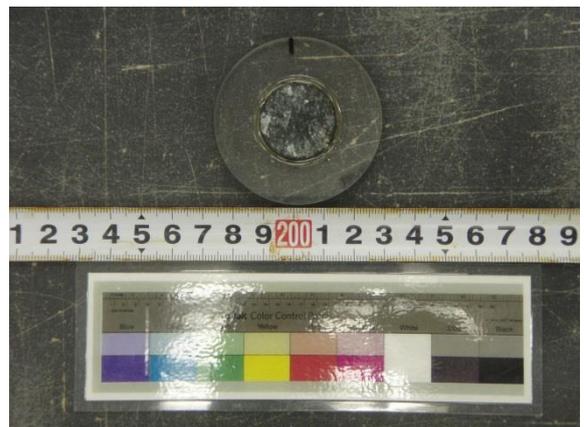
試料名 : 10MI25\_22.268m\_1



試料名 : 10MI25\_22.268m\_2



試料名 : 12MI30\_5.250m\_1



試料名 : 12MI30\_5.250m\_2

図 3.1.3-3 試料ホルダーに固定後の試料 (続き)



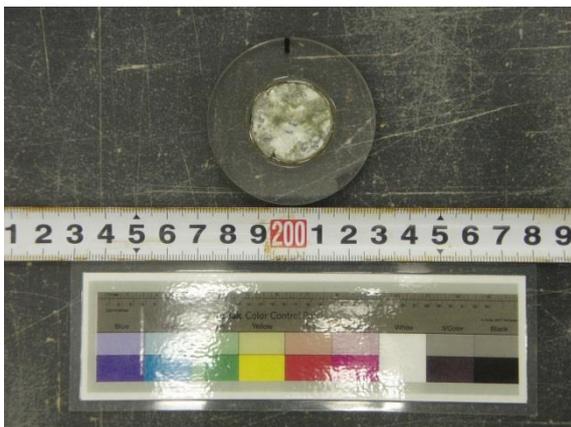
試料名 : 12MI130\_15.840m\_1



試料名 : 12MI130\_15.840m\_2



試料名 : 12MI31\_4.985m



試料名 : 12MI31\_7.830m\_1



試料名 : 12MI31\_7.830m\_2

図 3.1.3-3 試料ホルダーに固定後の試料 (続き)



試料名 : Block\_B\_1



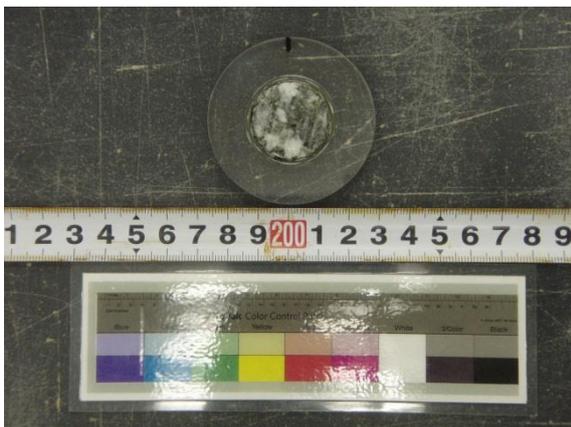
試料名 : Block\_B\_2



試料名 : Block\_C\_1



試料名 : Block\_C\_2



試料名 : monople2\_13.950m\_1



試料名 : monople2\_13.950m\_2

図 3.1.3-3 試料ホルダーに固定後の試料 (続き)

### 3.2 岩石ブロックを用いた拡散試験

岩石ブロックを用いた拡散試験は、拡散係数のサイズ依存性の確認と、試験により取得されるデータの評価・解析手法の構築を目的としている。

本試験は、30cm 四方の直方体の岩石ブロックの中心にトレーサー添加孔を、その周囲に複数のサンプリング孔を設け、サンプリング孔でのトレーサー濃度の変化を測定することで、トレーサー添加孔とサンプリング孔の2孔間の拡散係数を算出する。本作業では、岩石ブロックのサイズなどの決定に資することを目的とした予測解析、岩石試料の採取、岩石ブロックの作製を行うとともに、試験環境の整備を行った。以下にそれぞれの実施内容を記述する。

#### 3.2.1 予測解析

岩石ブロックを用いた拡散試験環境の整備に先立ち、30cm 四方の岩石試料を用いること、および3年の試験期間を前提として、トレーサー添加孔およびサンプリング孔の配列の決定に資することを目的に、予測解析を実施した。

##### (1) 検討方法

円柱座標系における拡散方程式の理論解を用いて、トレーサー濃度の拡散をシミュレートした。理論解に与えるべきパラメータを表 3.2.1-1 に示し、図 3.2.1-1 に予測解析のモデルと境界条件を示す。

表 3.2.1-1 理論解に与えるべきパラメータ

記号	記号の説明	設定値
$a$	トレーサー添加孔半径	0.038 m
$r$	(トレーサー添加孔中心からの) 観測位置	感度検討パラメータ (0.038~0.150m)
$C_0$	初期トレーサー濃度	0.000
$C_1$	トレーサー添加孔のトレーサー濃度	1.000
$t$	試験期間	最長 3 年まで変化
$D$	非収着性物質：実効拡散係数 収着性物質：見かけの拡散係数	感度検討パラメータ (表 3.2.1-2 参照)

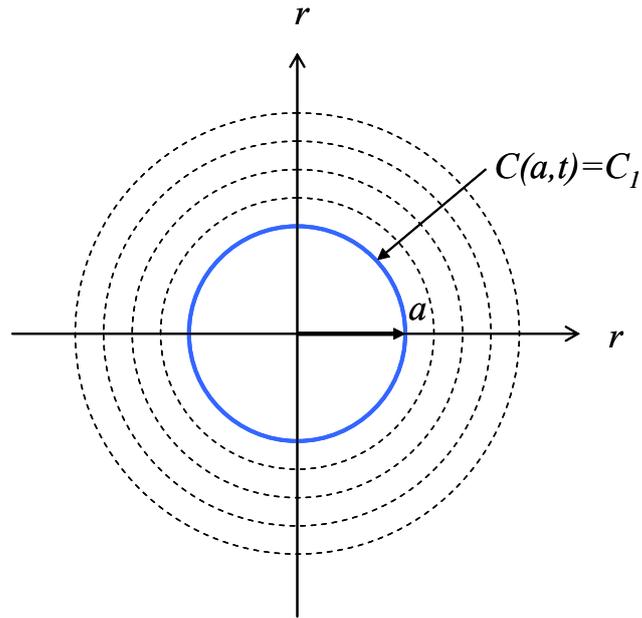


図 3.2.1-1 予測解析のモデルと境界条件

理論解の支配方程式，境界条件，初期条件，および解を以下に示す。

(i) 支配方程式

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( rD \frac{\partial C}{\partial r} \right) \quad (\text{式 3.2.1-1})$$

(ii) 境界条件

$$C(a,t) = C_1 \quad (\text{式 3.2.1-2})$$

(iii) 初期条件

$$C(r,0) = C_0 \quad r > a \quad (\text{式 3.2.1-3})$$

(iv) 解

$$\frac{C - C_0}{C_1 - C_0} = \left( \frac{a}{r} \right)^{\frac{1}{2}} \operatorname{erfc} \frac{r-a}{2\sqrt{Dt}} + \frac{(r-a)(Dt)^{\frac{1}{2}}}{4a^{\frac{1}{2}}r^{\frac{3}{2}}} \operatorname{ierfc} \frac{r-a}{2\sqrt{Dt}} + \frac{Dt(9a^2 - 2ar - 7r^2)}{32a^{\frac{3}{2}}r^{\frac{5}{2}}} i^2 \operatorname{erfc} \frac{r-a}{2\sqrt{Dt}} + \dots \quad (\text{式 3.2.1-4})$$

$$\operatorname{ierfc}(x) = \frac{1}{\pi^{\frac{1}{2}}} e^{-x^2} - x \operatorname{erfc}(x)$$

$$i^2 \operatorname{erfc}(x) = \frac{1}{4} (\operatorname{erfc}(x) - 2x \operatorname{ierfc}(x))$$

前述の式 3.2.1-4 で計算される濃度はサンプリング孔が存在しない条件下での濃度である。これに対して、実際にサンプリング孔で計算できる濃度はサンプリング孔内に注入してある溶液（純水）に希釈された濃度  $C_{obs}$  である。このサンプリング孔濃度  $C_{obs}$  は式 3.2.1-5 に基づいて計算した（観測孔での完全混合を仮定、サンプリング孔からの再拡散は考慮していない）。サンプリング孔における濃度を計算するために与えるべきパラメータを表 3.2.1-2 に示す。

$$C_{obs}(r,t) = \frac{\int_0^t -2a_{obs}hD \left( \frac{\partial C(r,\tau)}{\partial r} \right) d\tau}{\pi a_{obs}^2 h} \quad (\text{式 3.2.1-5})$$

ここに、 $-D \left( \frac{\partial C(r,\tau)}{\partial r} \right)$  は距離  $r$  の位置における濃度フラックスであり、 $2a_{obs}h$  はサンプリング孔の通過面積（矩形での近似）、 $\pi a_{obs}^2 h$  はサンプリング孔の体積である（ここではサンプリングを考慮していない）。なお、実際には微分と積分計算は離散化して行った。

また、サンプリング孔からは定期的にトレーサー濃度の分析のために溶液を  $5\text{cm}^3$  サンプリングし、サンプリングした溶液分の量の純水を添加する。そのためサンプリングの効果を各サンプリング時間ごとに（式 3.2.1-6）により考慮した。

$$C_s(r,t) = \frac{C_{obs}(r,t)V - C_{obs}(r,t)V_s}{V} = \frac{\pi a_{obs}^2 h - V_s}{\pi a_{obs}^2 h} C_{obs}(r,t) \quad (\text{式 3.2.1-6})$$

表 3.2.1-2 サンプリング孔における濃度を計算するために与えるべきパラメータ

記号	記号の説明	設定値
$a_{obs}$	サンプリング孔半径	0.038 m
$h$	サンプリング孔高さ	0.100 m
$r$	(トレーサー添加孔中心からの)サンプリング孔までの距離	感度検討パラメータ (0.038~0.148 m)
$V_s$	サンプリング体積	5 cm <sup>3</sup>

非吸着性物質の実効拡散係数に関しては、表 3.2.1-3 のようなデータが公表されている。以下の検討では、実効拡散係数として、 $1.0 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ （土岐花崗岩におけるウラン、ヨウ素の実効拡散係数を想定）、 $1.0 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ （グリムゼル花崗閃緑岩および稲田花崗岩のヨウ素の実効拡散係数を想定）、および  $1.0 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ （最大を想定）の 3 ケースを設定して、予測解析を行った。

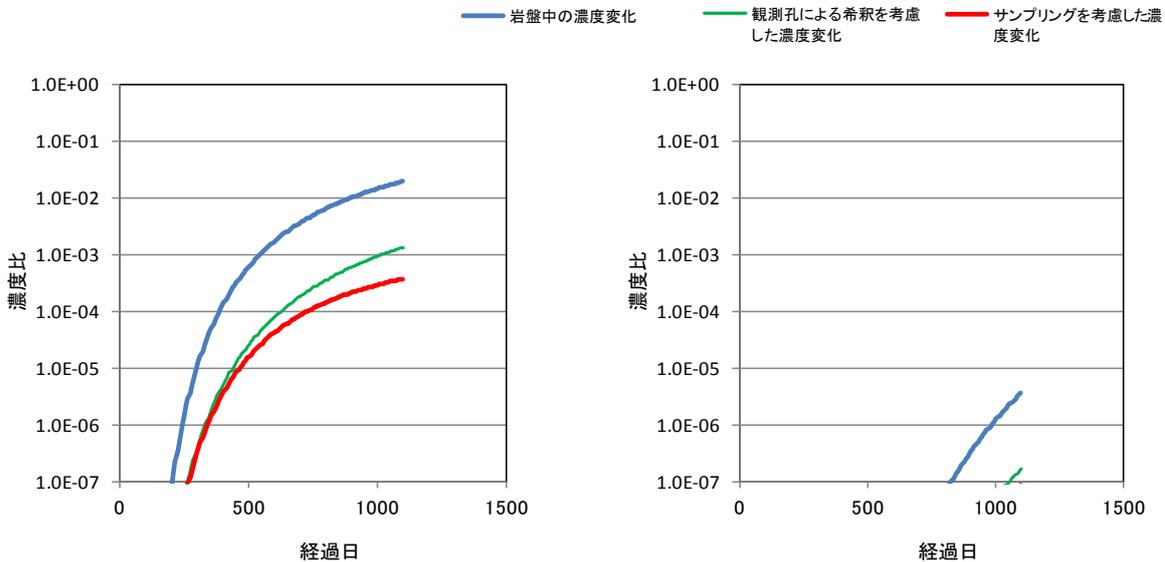
表 3.2.1-3 実効拡散係数の一覧

岩石試料	土岐花崗岩	グリムゼル花崗閃緑岩	稲田花崗岩
ウラン	$1.03 \times 10^{-13}$ ~ $9.89 \times 10^{-15}$	$3.02 \times 10^{-13}$ ~ $3.23 \times 10^{-13}$	—
ヨウ素	$6.69 \times 10^{-13}$ ~ $7.62 \times 10^{-14}$	$2.83 \times 10^{-12}$ ~ $2.91 \times 10^{-12}$	$2.6 \times 10^{-12}$ ~ $1.9 \times 10^{-12}$
出典	國丸ほか (2012) <sup>6)</sup>	國丸ほか (2012) <sup>6)</sup>	喜多ほか (1989) <sup>9)</sup>

(2) 結果

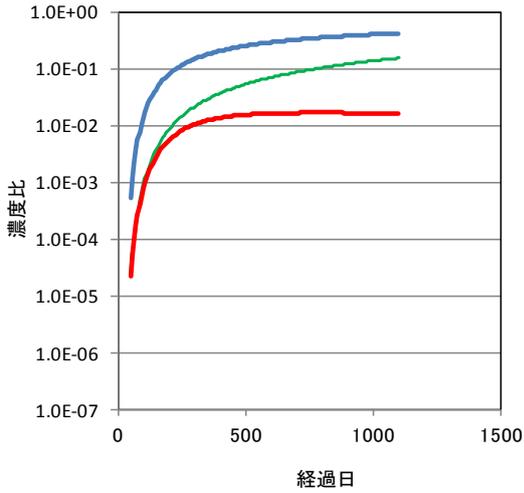
予測解析の結果を図 3.2.1-2~図 3.2.1-4 に示すとともに、結果を以下に整理した。

- ・ 実効拡散係数が  $1.0 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$  未満のトレーサーであれば、3年間の試験期間でトレーサーが中心から 15 cm 離れた試料の境界へ達する可能性は低い。
- ・ 3年間の試験期間において数 cm の孔間距離での実効拡散係数を得るためには、実効拡散係数の大きな ( $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  オーダー) トレーサーを投入することが必要である。
- ・ サンプルング孔から再度拡散したトレーサーを観測することは困難と考えられる。
- ・ サンプルング孔の体積は  $70 \sim 105 \text{ cm}^3$  程度であるため、希釈の影響を極力小さくするためにサンプルング量を減らすことが望ましい。
- ・ サンプルングした試料の分析について、濃度比 0.01 を下回ると精度を確保することが難しい。そのため、サンプルング孔の孔間距離は、3年間の試験期間でトレーサー濃度変化の把握が可能な、10mm, 15mm, 20mm とすることとした。

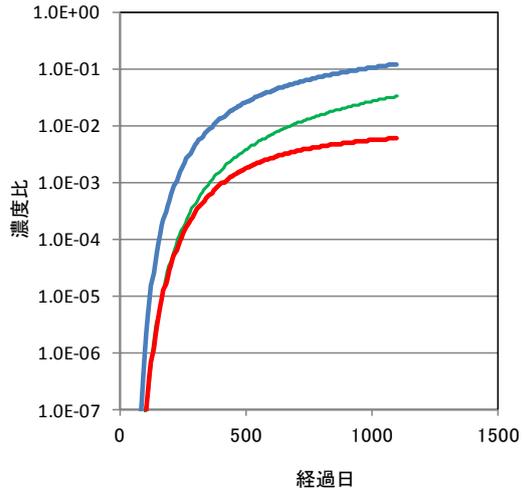


(1) トレーサー添加孔から 10mm の位置における濃度変化  
 (2) トレーサー添加孔から 20mm の位置における濃度変化

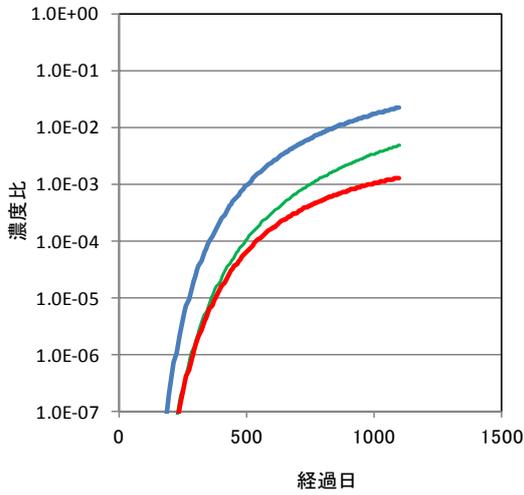
図 3.2.1-2 予測解析結果 (実効拡散係数  $1.0 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ )



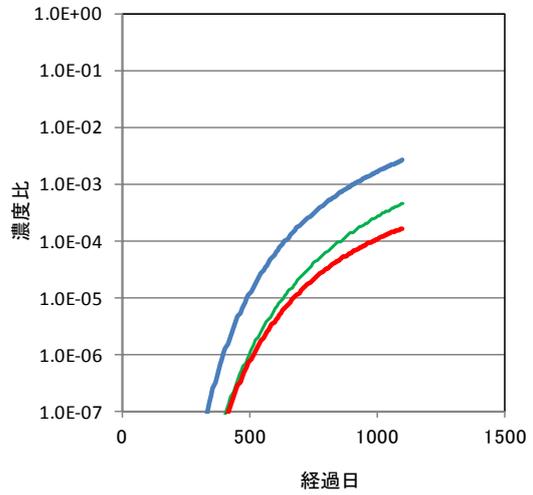
(1) トレーサー添加孔から  
10mm の位置における濃度変化



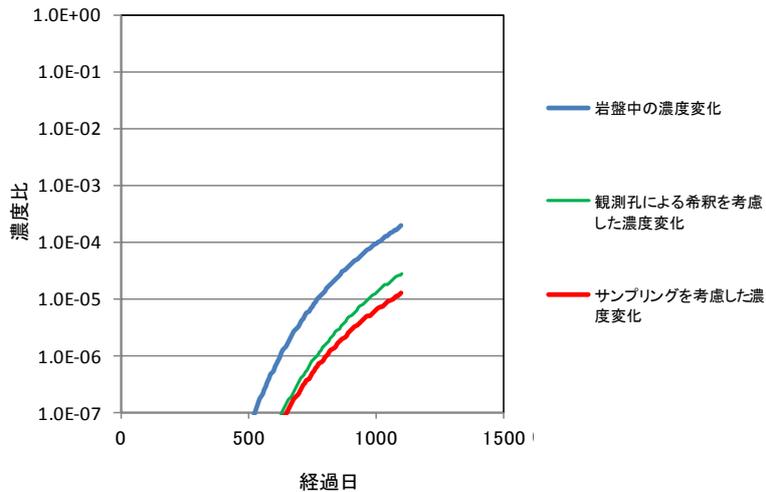
(2) トレーサー添加孔から  
20mm の位置における濃度変化



(3) トレーサー添加孔から  
30mm の位置における濃度変化



(4) トレーサー添加孔から  
40mm の位置における濃度変化



(1) トレーサー添加孔から 50mm の位置における濃度変化  
図 3.2.1-3 予測解析結果 (実効拡散係数  $1.0 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ )

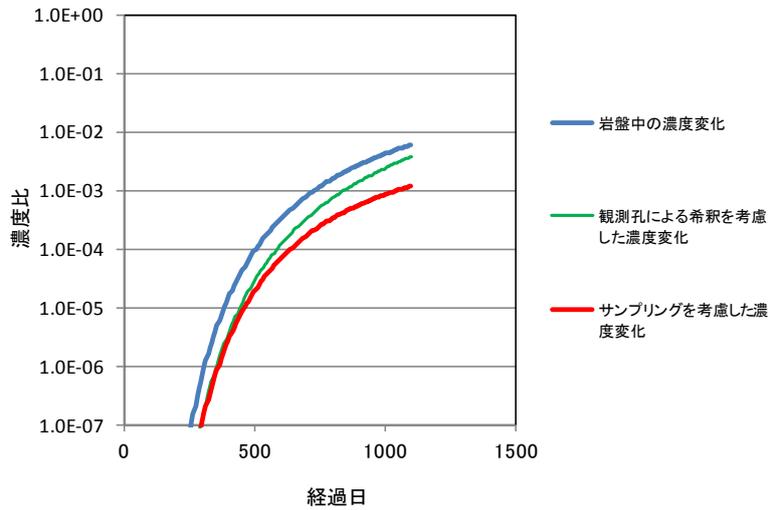
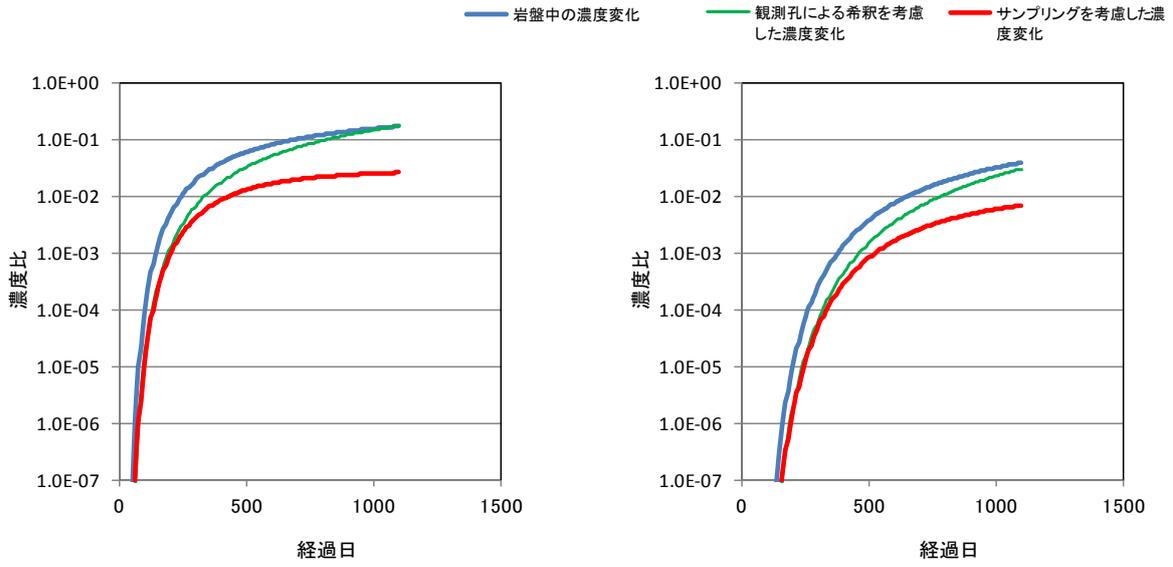


図 3.2.1-4 予測解析結果 (実効拡散係数  $1.0 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ )

### 3.2.2 岩石試料の採取

岩石試料は、研究所の深度 500m 研究アクセス北坑道掘削時に、30~100cm 大の岩石試料を 4 試料採取した。表 3.2.2-1 および図 3.2.2-1 に岩石試料の採取箇所を示す。採取したそれぞれの岩石試料を図 3.2.2-2 に示す。

表 3.2.2-1 岩石試料の採取箇所

岩石試料名称	採取箇所
Block_A および Block_B	TD11.85~14.35m
Block_C	TD26.95~28.95m
Block_D	TD30.95~32.95m

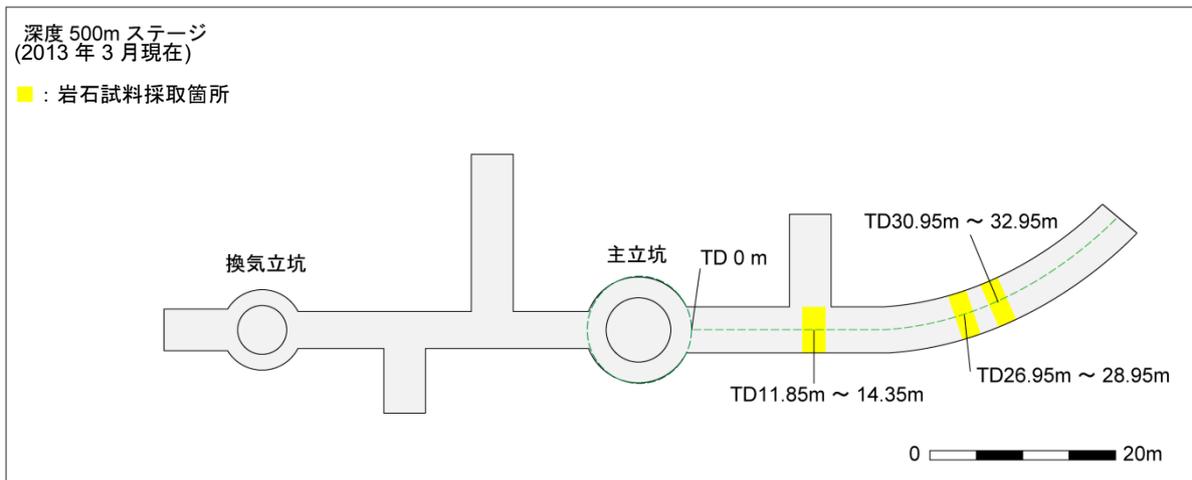


図 3.2.2-1 岩石試料の採取箇所



(a) 試料名 : Block\_A

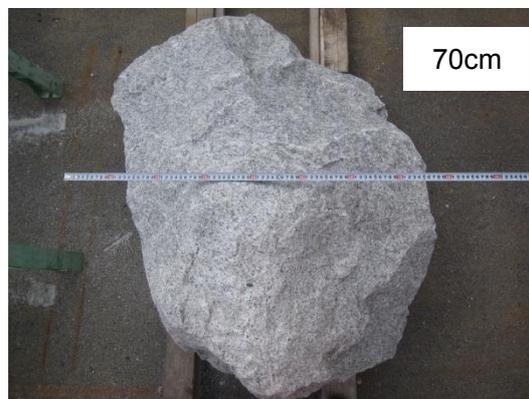


(b) 試料名 : Block\_B

図 3.2.2-2 採取した岩石試料の外観



(c) 試料名 : Block\_C



(d) 試料名 : Block\_D

図 3.2.2-2 採取した岩石試料の外観 (続き)

### 3.2.3 試料の作製

採取した岩石試料 4 試料から、拡散試験に用いる岩石ブロックを 2 試料作製した。試料の作製手順を以下に示す。なお、削孔レイアウトは 3.2.2 での予測解析の結果を踏まえて図 3.2.3-1 に示す通りとした。

- ① 採取した不定形の岩石試料から 30cm 四方程度の立方体に成形した。成形状況を図 3.2.3-2 に示す。この作業において、4 試料のうち Block\_A の試料は、切断時に亀裂に沿って碎け、成形が不能になった。残る 3 試料については、亀裂の位置、方向から、立方体に成形することが困難であったため、30cm×30cm×20cm の直方体に成形した。加工後の写真を図 3.2.3-3 に示す。
- ② 直方体に加工した 3 つの岩石ブロック (Block\_B, C, D) のうち、亀裂の少ない Block\_B と Block\_C を試験に用いることとした。
- ③ 図 3.2.3-1 に示したレイアウトに従って、岩石ブロックが崩壊しないように注意しながらコアドリルでトレーサー添加孔とサンプリング孔を掘削した。作製後の試料の写真を図 3.2.3-4 に示す。

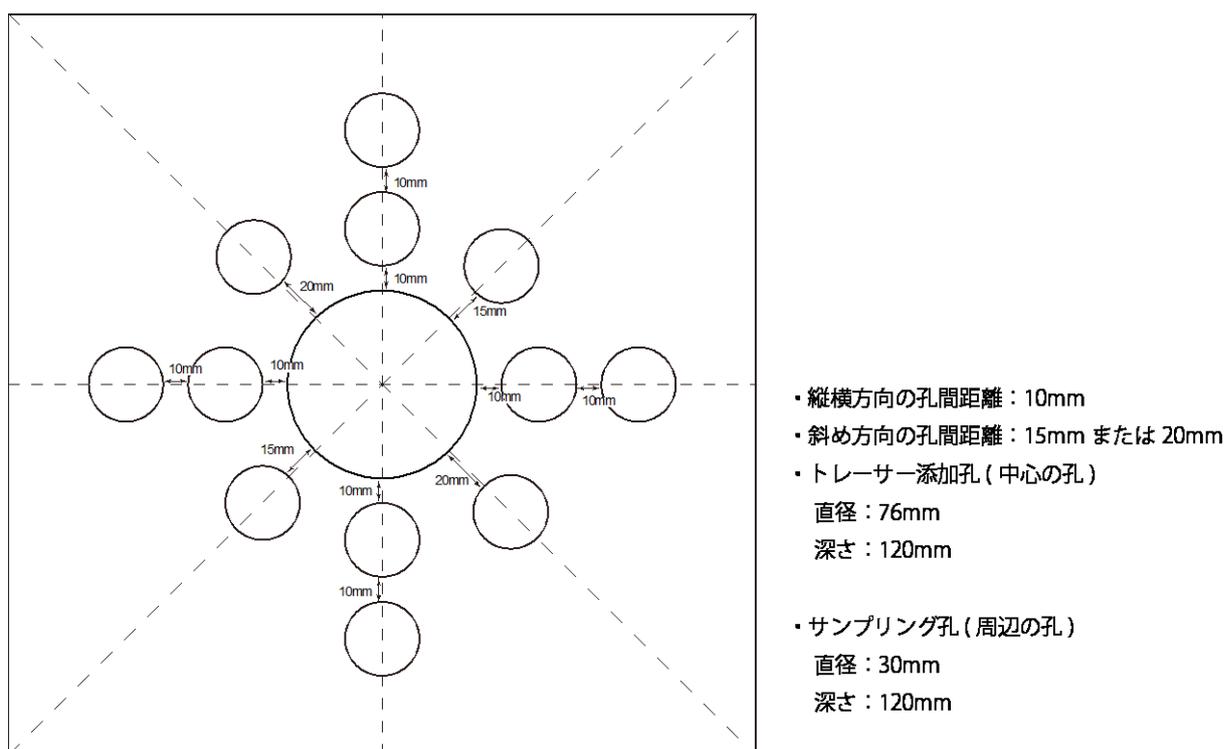
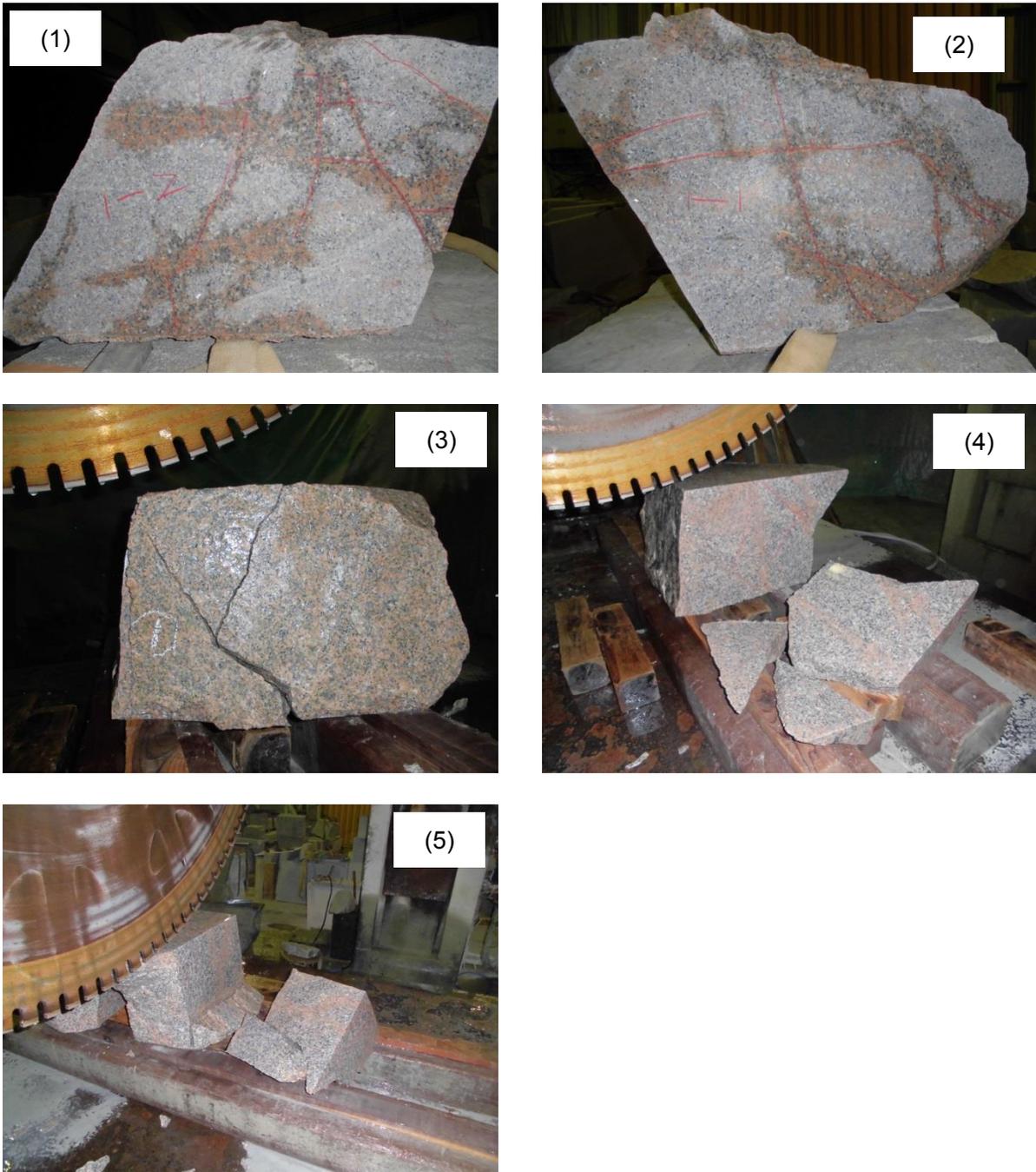


図 3.2.3-1 トレーサー添加孔とサンプリング孔のレイアウト

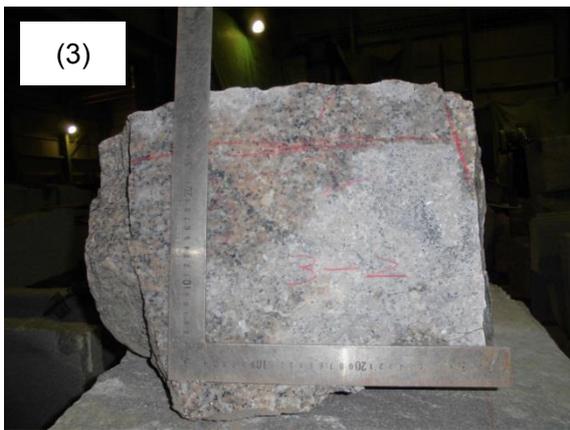


(a) 試料名 : Block\_A

図 3.2.3-2 岩石試料の成形状況

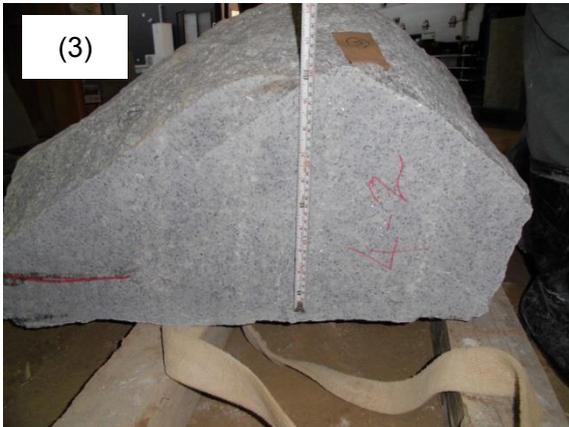
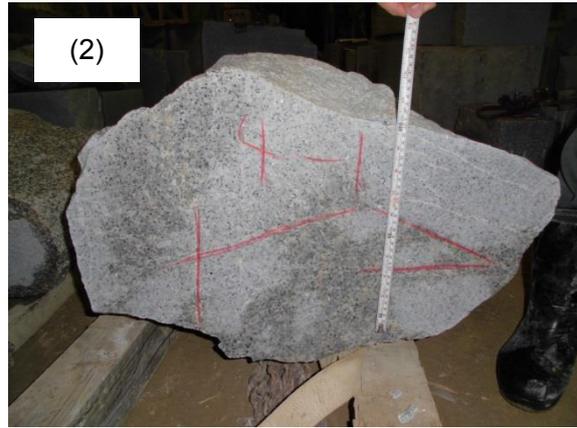


(b) 試料名 : Block\_B



(c) 試料名 : Block\_C

図 3.2.3-2 岩石試料の成形状況 (続き)



(d) 試料名 : Block\_D

図 3. 2. 3-2 岩石試料の成形状況 (続き)



(a) 試料名 : Block\_B



(b) 試料名 : Block\_C



(c) 試料名 : Block\_D

図 3.2.3-3 直方体成形後の岩石試料



(a) 試料名 : Block\_B



(b) 試料名 : Block\_C

図 3.2.3-4 完成した岩石試料

### 3.2.4 試験環境の整備

3.2.3 において作製した岩石ブロックを用いて、以下の拡散試験環境を整備した。

#### (1) 岩石ブロックを浸水させるための容器の製作

岩石ブロックを用いた拡散試験中は、動水勾配を与えず、岩石を湿潤に保つ必要がある。そこで、図 3.2.4-1 に示す水位を一定に保つ機能を有する容器を作製した。容器の設計図面を図 3.2.4-2 に、製作後の容器の写真を図 3.2.4-3 に示す。

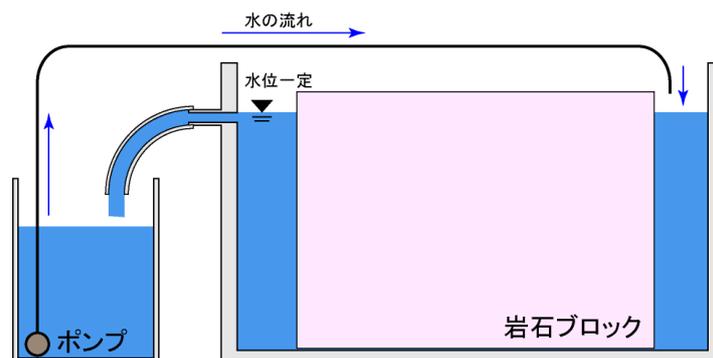
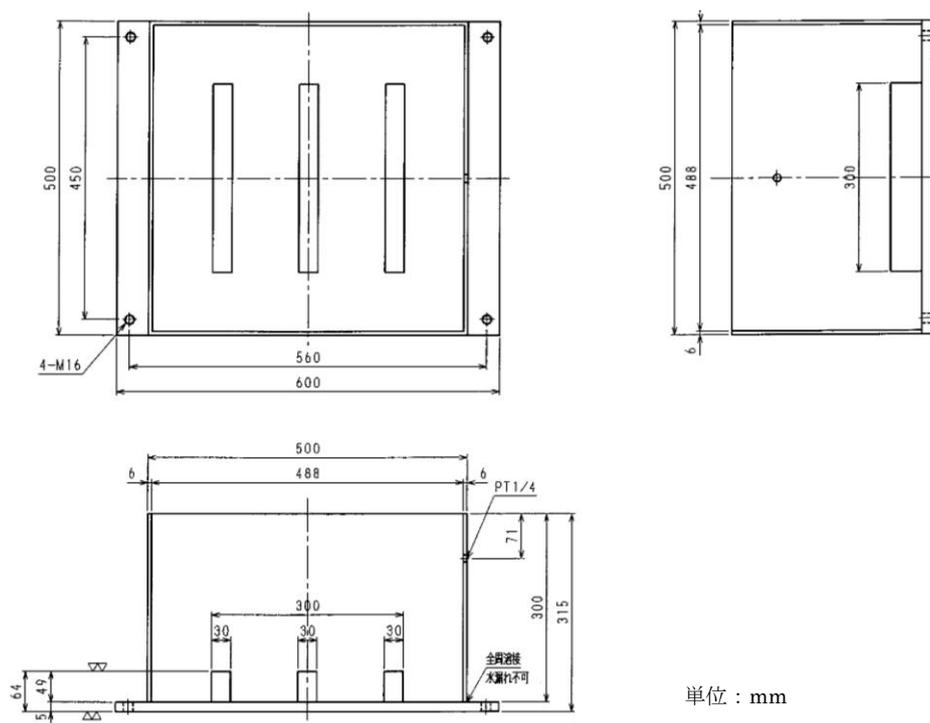


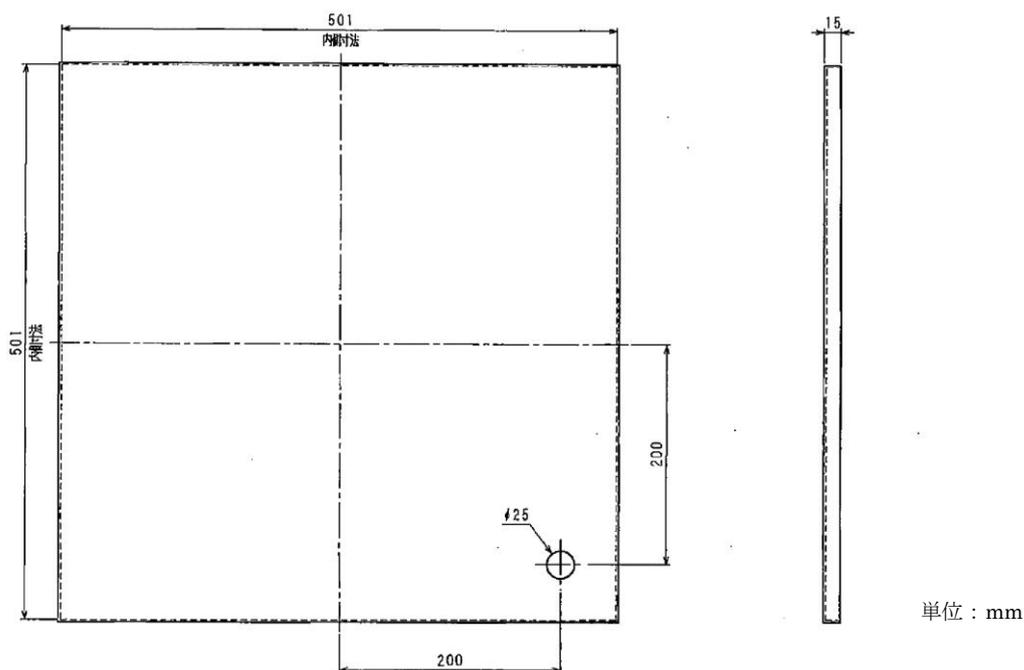
図 3.2.4-1 岩石ブロックの乾燥防止策の概念図



単位：mm

(a) 本体

図 3.2.4-2 岩石ブロックを浸水させるための容器の製作図面



(b) 蓋

図 3.2.4-2 岩石ブロックを浸水させるための容器の製作図面 (続き)



図 3.2.4-3 岩石ブロックを浸水させるための容器

## (2) 試験装置の組立

試験環境整備の一環で製作した岩石ブロックを浸水させるための容器に入れ、試験装置を組立てた。さらに、容器内に蒸留水を注入し、試験開始に先立ち、岩石ブロックの湿潤作業を開始した。組み立てた拡散試験環境を図 3.2.4-4 に示す。

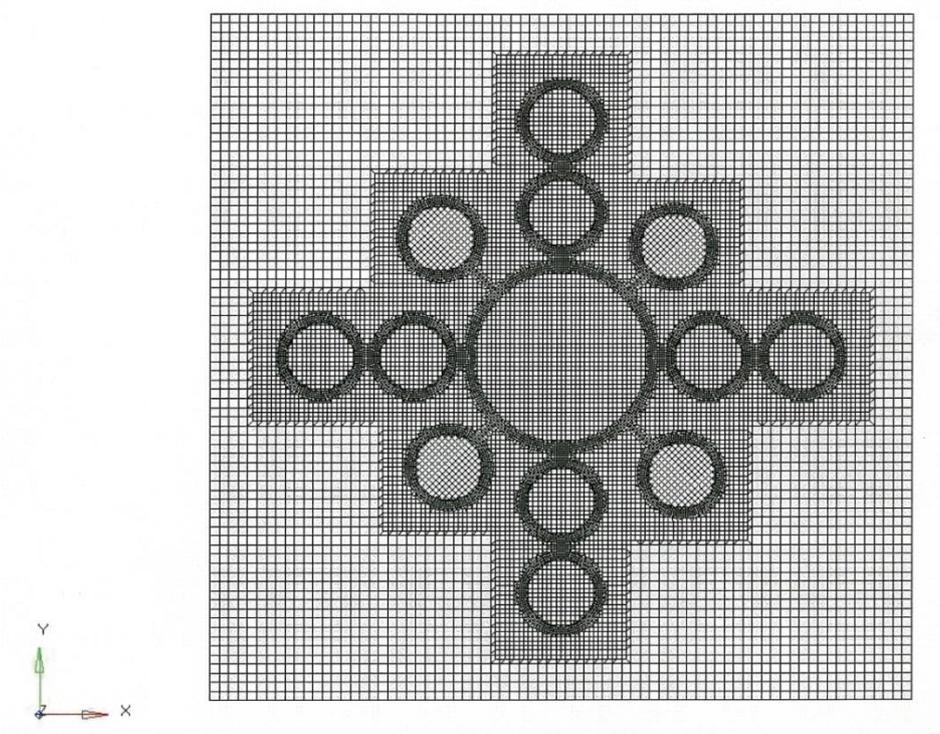


図 3.2.4-4 岩石ブロックを用いた拡散試験装置

### (3) 解析メッシュの作製

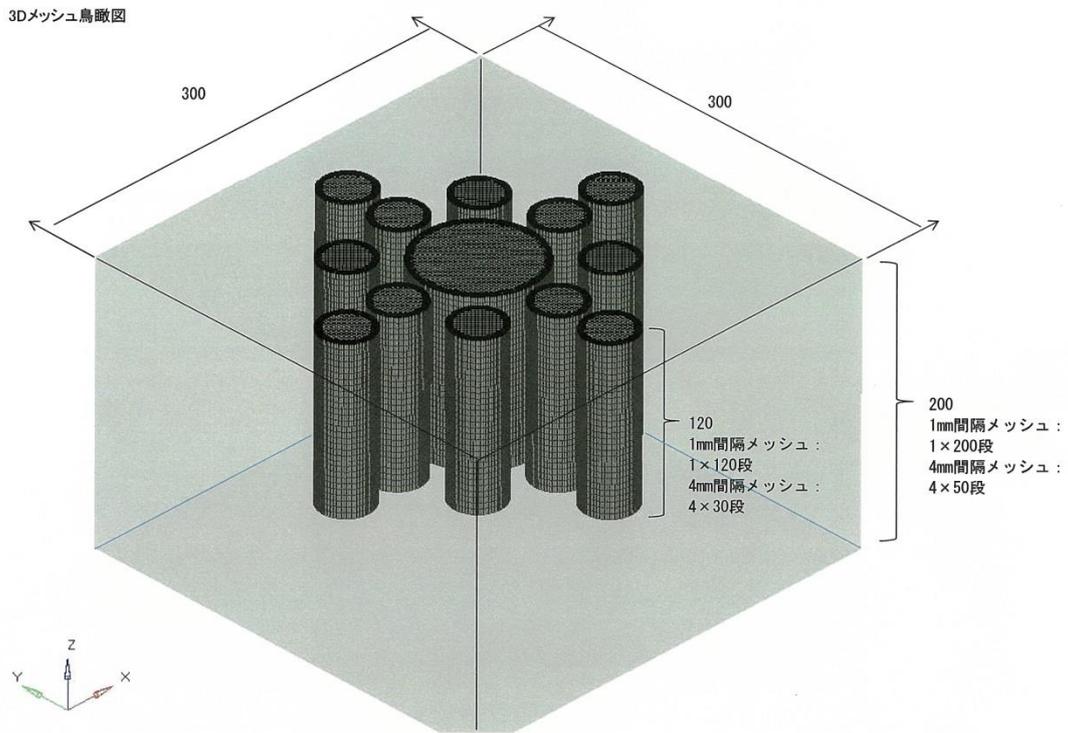
3.2.3において作製した岩石ブロックのレイアウトに基づいて、図 3.2.4-5 に示すように三次元解析メッシュを作製した。トレーサー添加孔およびサンプリング孔の外周部のメッシュ間隔は 1mm，それぞれの孔間およびその周辺のメッシュ間隔は 2mm，さらにその外側のメッシュ間隔は 4mm である。鉛直方向のメッシュ間隔は 4mm と 1mm の 2 通りで構築した。表 3.2.4-1 に 3 次元解析メッシュの仕様を示す。今後、岩石ブロックを用いた拡散試験の予測解析や結果の評価において、構築した 3 次元解析メッシュを利用する予定である。

3Dメッシュ上面図



(a) 上面図

図 3.2.4-5 3次元解析メッシュ



(b) 鳥瞰図

図 3.2.4-5 3次元解析メッシュ (続き)

表 3.2.4-1 3次元解析メッシュの仕様

メッシュモデル	節点数	要素数
鉛直 4mm メッシュモデル	99,6285	1,040,800
鉛直 1mm メッシュモデル	3,926,535	4,163,200

#### 4. 間隙率測定

岩石ブロックや透過拡散試験に用いる試料を作成した際の残試料を用いて、水銀圧入法<sup>10)</sup>および水飽和法<sup>11)</sup>による間隙率測定を行った。

##### 4.1 試料の選定

12MI31\_7.830m の試料を作製した際の残試料、岩石ブロックの成形時の残試料 (Block\_B, Block\_C), およびグリムゼル原位置試験場<sup>10)</sup>の monopole2 孔のコアを間隙率の実施対象とした。表 4.1-1 に間隙率測定に用いる岩石試料一覧を示す。

12MI31\_7.830m の試料を用いた間隙率測定は、形状および割れ目面からの距離による間隙率の違いの把握を目的に、Block\_B と Block\_C の試料を用いた間隙率測定は、岩石ブロックを用いた拡散試験の予測解析に用いる間隙率を把握することを目的としている。また Block\_B の試料については、試料のサイズの違いによる間隙率の違いを把握すること目的として、10mm 立方体と100mm 立方体の2通りで間隙率測定を実施することとした。monopole2\_13.950m の試料は岩相の違いによる間隙率の差を把握することを目的としている。

表 4.1-1 間隙率測定に用いる岩石試料一覧

岩石試料	試料名	試料成形位置	試料形状	測定方法
12MI31_7.830m	12MI31_7.830m_A	割れ目面近傍	10mm 立方体	水飽和法＋ 水銀圧入法
	12MI31_7.830m_B	割れ目面より 10mm の位置	10mm 立方体	水飽和法＋ 水銀圧入法
	12MI31_7.830m_C	割れ目面より 20mm の位置	10mm 立方体	水飽和法＋ 水銀圧入法
	12MI31_7.830m_a	割れ目面近傍	φ 25mm × 5mm	水飽和法
	12MI31_7.830m_b	割れ目面より 5mm の位置	φ 25mm × 5mm	水飽和法
	12MI31_7.830m_c	割れ目面より 10mm の位置	φ 25mm × 5mm	水飽和法
Block_B	Block_B	マトリクス	10mm 立方体	水飽和法＋ 水銀圧入法
	Block_B_Large	マトリクス	100mm 立方体	水飽和法
Block_C	Block_C_Large	マトリクス	100mm 立方体	水飽和法
monopole2_13.950m	monopole2_13.950m	マトリクス	10mm 立方体	水飽和法＋ 水銀圧入法

##### 4.2 試料の作製

間隙率測定を実施する試料の形状は、測定方法によって異なる。試料形状は表 4.1-1 に示した通りである。作製に使用した主な機器を表 4.2-1 に示す。

表 4.2-1 作製に使用した主な機器

品名	メーカー	型式	仕様
岩石切断機	日特機械工業	NCO-11SDX	ブレード径φ550mm
	(株) マルトー	MC-435	ブレード径φ300mm
コア抜き機	精研ダイヤモンド工業	SB4816RHH0	水道水強制冷却式
平研研削盤	岡本工作機械製作所	PFG-450DXA	φ100mm まで
研削機	株式会社ニチカ	RP-5	φ300mm

## 1) 水飽和法および水銀圧入法の 2 通りの間隙率測定を実施する試料

水飽和法および水銀圧入法の 2 通りの間隙率測定を実施する試料は、以下に示す手順で作製した。水銀圧入法では、測定時にφ16mm×20mmの円柱形サンプルホルダーに収めるため、試料寸法をおよそ10mmの立方体形状とした。各試料の作製位置の模式図を図4.2-1～図4.2-3に示す。

- ① 各試料の切断位置を決め、岩石切断機で試料を大まかに切断した。割れ目面近傍の12MI31\_7.830m 試料は、切断時に割れ目面の充填鉱物が剥がれ落ちないように留意した。
- ② 大まかに切断した試料は、10mm 程度の立方体となるように岩石切断機で切断した。12MI31\_7.830m 試料は、割れ目面とおおよそ直交方向となる向きとした。切断後の試料を図4.2-4に示す。
- ③ 平面研削盤で、10mm 程度の立方体形状となるように研磨した。研磨状況例を図4.2-5に示し、作製後の試料を図4.2-6に示す。



図 4.2-1 12MI31\_7.830m 試料の作製位置

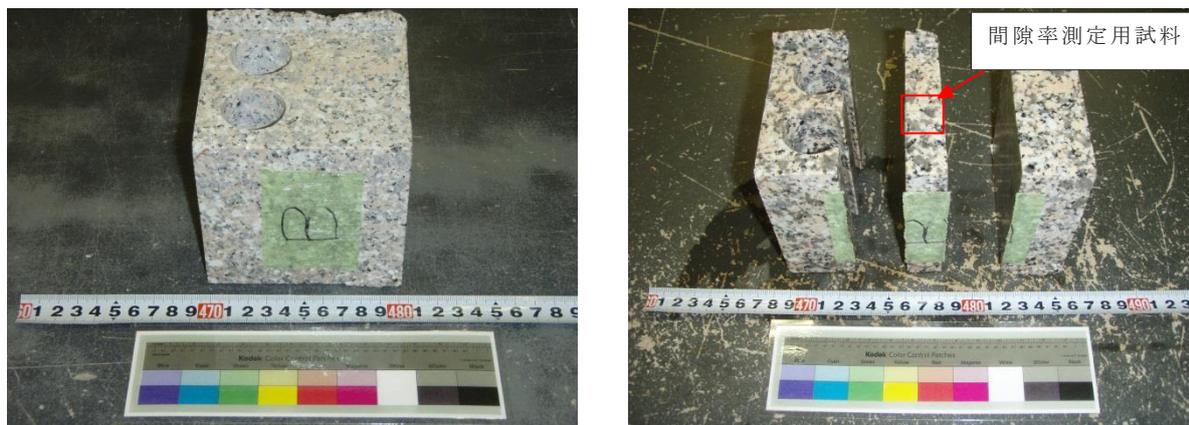


図 4.2-2 Block\_B 試料の作製位置（左：切断前，右：切断後）

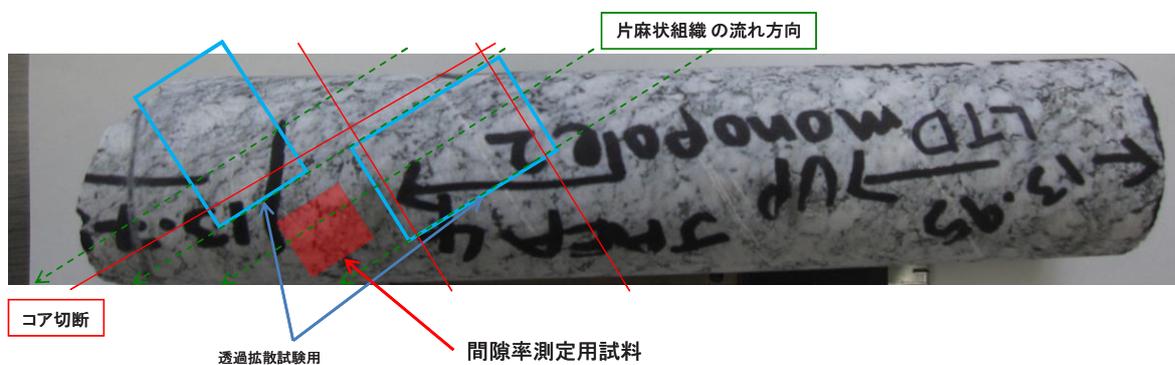


図 4.2-3 monopole2\_13.950m 試料の作製位置



(a) 試料名 : monopole2\_13.950m



(b) 試料名 : Block\_B



(c) 試料名 : 12MI31\_7.830m

図 4.2-4 切断後試料



図 4.2-5 平面研削盤による研磨状況例



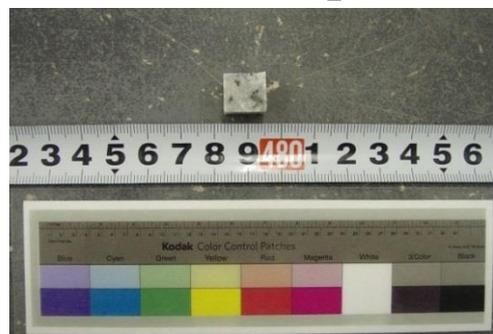
試料名 : monopole2\_13.950m



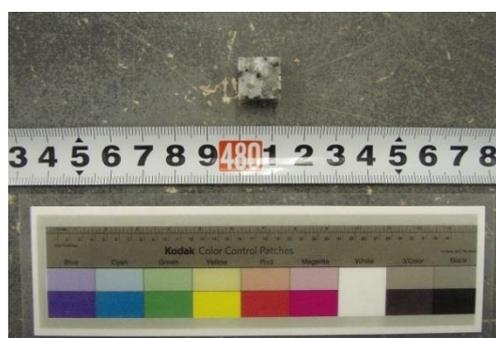
試料名 : Block\_B



試料名 : 12MI31\_7.830m\_A (割れ目面)



試料名 : 12MI31\_7.830m\_B  
(割れ目面から 10mm 奥)



試料名 : 12MI31\_7.830m\_C  
(割れ目面から 20mm 奥)

図 4.2-6 作製後の試料

## 2) 水飽和法のみの間隙率測定を実施する試料

水飽和法のみの間隙率測定を実施する試料は、以下に示す手順で作製した。Block\_B と Block\_C の残試料から一辺 100mm の立方体形状にした。12M31\_7.830m 試料は、 $\phi 25\text{mm} \times 5\text{mm}$  の円盤状の形状とし、作製位置の模式図を図 4.2-7 に示した。

- ① Block\_B および Block\_C の試料は、岩石切断機で 1 辺 100mm 程度となるように切断した。12M31\_7.830m の試料は、リボーリングのために 100mm 程度の厚さで割れ目面と平行となるように切断した。切断状況例を図 4.2-8 に示す。
- ② リボーリングは、割れ目面側から  $\phi 25\text{mm}$  のダイヤモンドビットで行った。試料は、割れ目面とダイヤモンドビットが概ね垂直となるように固定し、充填鉱物が剥がれ落ちないように十分留意した。リボーリングの状況を図 4.2-9 に示し、リボーリング後の試料を図 4.2-10 に示す。
- ③ 岩石切断機で、5mm 程度の厚みに切断した後に、割れ目面を除き、切断面を研磨した。作製後の試料を図 4.2-11 に示す。

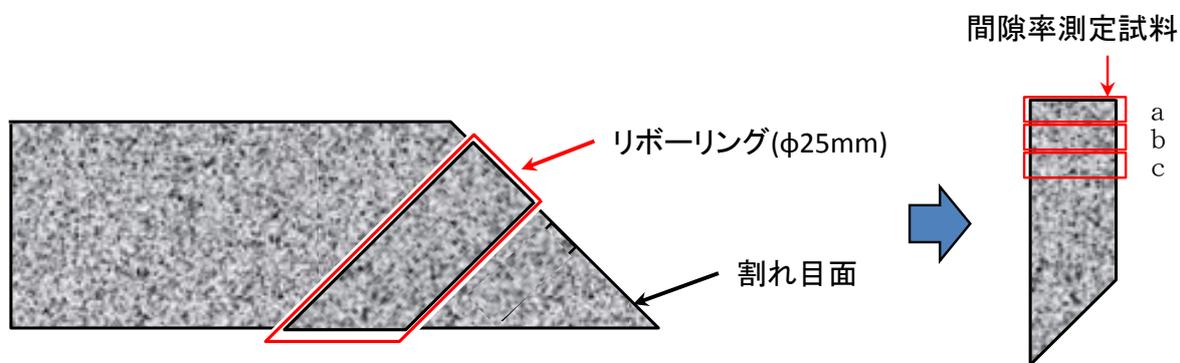


図 4.2-7 12M31\_7.830m 試料の作製位置

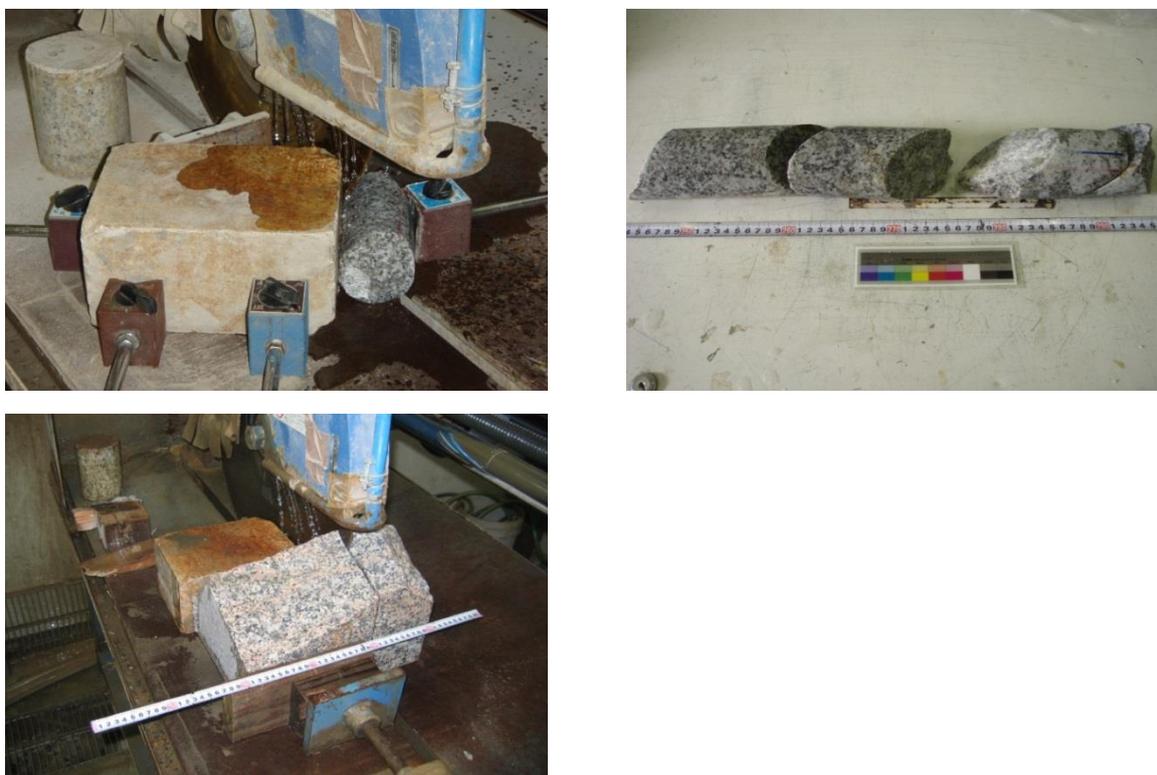


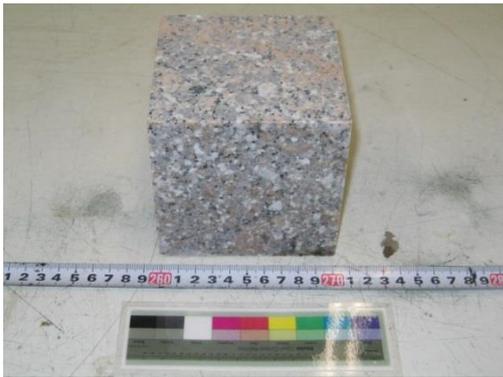
図 4.2-8 切断状況例



図 4.2-9 リボーリング状況



図 4.2-10 リボーリング後の試料



試料名 : Block\_B\_Large



試料名 : Block\_C\_Large



試料名 : 12M31\_7.830m\_a (割れ目面)



試料名 : 12M31\_7.830m\_b (割れ目面から 5mm 奥)



試料名 : 12M31\_7.830m\_c (割れ目面から 10mm 奥)



図 4.2-11 作製後の試料

### 4.3 試験方法

#### 4.3.1 水飽和法

##### (1) 水飽和法による間隙率測定の方法

水飽和法による間隙率の測定は、試料の水飽和重量、乾燥重量および水中重量から間隙率を算出する方法である<sup>11)</sup>。4.2 に記述した作製を実施した試料について、以下に示す手順で湿潤重量  $W_{sat}$ 、水中重量  $W_{water}$ 、乾燥重量  $W_{dry}$  を測定した。測定で使用した主な機器を表 4.3.1-1 に示す。Block\_B\_Large、および Block\_C\_Large の質量は、最小単位 0.01g、その他の試料は、最小単位 0.001g まで測定可能な電子天秤を使用して測定した。

- ① 試料は、図 4.3.1-1 に示すように水を張った容器に水浸させ、デシケーター内に静置した後に、真空ポンプで内部の空気を抜き脱気した。湿潤重量  $W_{sat}$  は、重量の変化がほぼ無くなるまで、図 4.3.1-2 に示すように定期的に測定した。
- ② 水中重量  $W_{water}$  は、図 4.3.1-3 に示すように測定した。
- ③ 強制的に脱気させて飽和した試料は、図 4.3.1-4 に示すように 60°C に設定した乾燥炉で乾燥させた。乾燥重量  $W_{dry}$  は、重量の変化がほぼ無くなるまで、図 4.3.1-5 に示すように定期的に測定した。

表 4.3.1-1 測定に使用した主な機器

品名	メーカー	型式	仕様
電子天秤	島津製作所	AW320	測定容量 320g 最小単位 0.001g
	エー・アンド・デイ	FX-3000i	測定容量 3000g 最小単位 0.01g
比重測定キット	島津製作所	SMK-301	
真空ポンプ	佐藤真空機械工業	SW-20	
真空デシケーター	Iuchi	VM	
定温恒温器	いすゞ製作所	E9	最大 260°C まで



図 4.3.1-1 真空脱気による飽和处理

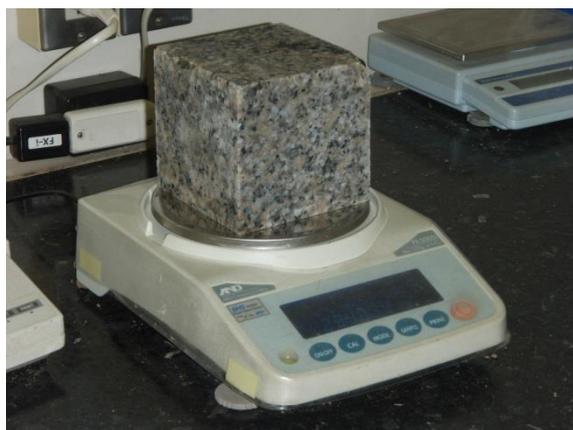


図 4.3.1-2 湿潤重量の測定



図 4.3.1-3 水中重量の測定



図 4.3.1-4 60°C炉乾燥



図 4.3.1-5 乾燥重量の測定

## (2) 水飽和法による間隙率・密度の算出方法

重量測定で得られる湿潤重量 $W_{sat}$ 、水中重量 $W_{water}$ 、および乾燥重量 $W_{dry}$  から次式に従って、間隙率 $\phi$ 、かさ密度 $\rho_{bulk}$ 、真密度 $\rho_{sketal}$ を算出した。

$$\text{間隙率} \quad \phi = \frac{V_{pore} W_{sat} - W_{dry}}{V_{bulk} W_{sat} - W_{water}} \quad (\text{式 4.3.1-1})$$

$$\text{かさ密度} \quad \rho_{bulk} = \frac{W_{dry}}{V_{bulk}} = \frac{W_{dry}}{W_{sat} - W_{water}} \rho_{water} \quad (\text{式 4.3.1-2})$$

$$\text{真密度} \quad \rho_{sketal} = \frac{W_{dry}}{V_{bulk} - V_{pore}} = \frac{\rho_{bulk}}{1 - \phi} \quad (\text{式 4.3.1-3})$$

## 4.3.2 水銀圧入法

### (1) 水銀圧入法による間隙率測定の方法

水銀圧入法による間隙率の測定<sup>14)</sup>は、図 4.3.2-1 に概念を示すように、水銀に圧力を付加することによって供試体内に水銀を侵入させ、水銀に与える圧力と供試体内への水銀の浸入量を測定するものである。測定後の処理によって、細孔分布など様々な間隙物性を算出することができる。

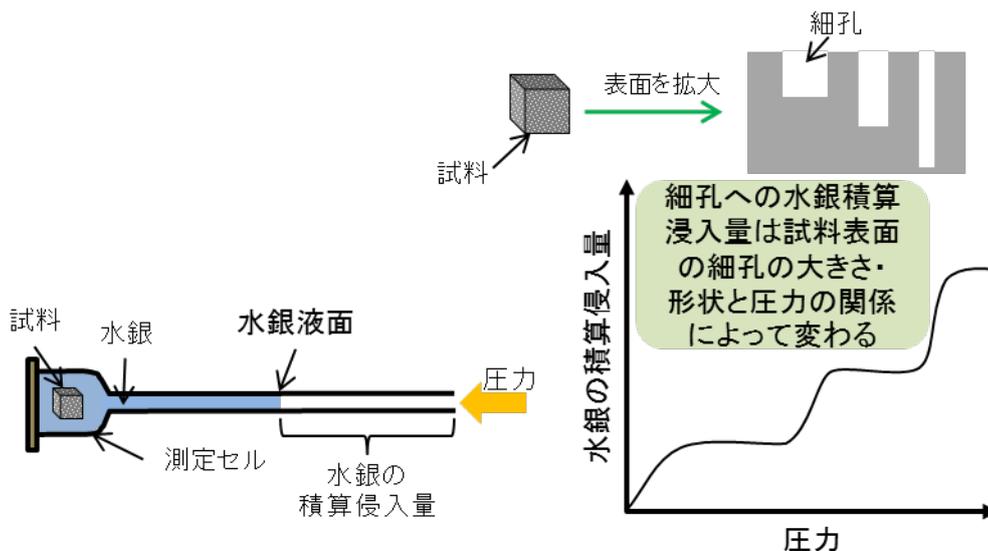


図 4.3.2-1 水銀圧入法による細孔分布測定概念図

(a) 水銀圧入法による間隙率測定装置

水銀圧入法による間隙率測定は、アメリカの micromeritics 社製の「オートポア IV9520 (以下ポロシメーター)」により実施した (図 4.3.2-2)。測定装置の基本仕様一覧を表 4.3.2-1 に示す。



図 4.3.2-2 水銀圧入法による間隙率測定装置 (オートポア IV9520)

表 4.3.2-1 オートポア IV9520 の基本仕様 (株式会社島津製作所 HP<sup>15)</sup> から引用)

項目	仕様
測定方式	水銀圧入方式
細孔直径 測定範囲	約 500~0.003 $\mu\text{m}$ (30Å)
圧力 測定範囲	0~345 kPa (50psia) 大気圧~414 MPa (60,000psia)
圧力測定 分解能	低圧部 69 Pa (0.01psia) 高圧部 大気圧~34MPa (5,000psia) 689 Pa (0.1 psi) 34 ~ 414MPa (5,000~60,000psia) 2,070 Pa (0.3psi)
圧力測定 精度	低圧部 $\pm 1.0\%$ FS 高圧部 $\pm 1.0\%$ FS
測定 ステージ数	低圧部 4 高圧部 2
圧入量分解能	0.1mm <sup>3</sup> 以下
圧入量 測定精度	試料セルの圧入体積の $\pm 1\%$
測定データ数	最大 2,500 点
高圧示差測定	可
圧入平衡判定条件	時間判定 0 ~ 10,000sec 圧入速度判定 0 ~ 1,000.000m <sup>3</sup> / g / sec 連続スキャンモード
演算物性	全細孔容積, 全細孔比表面積, 平均細孔直径, メディアン細孔直径, 密度, 気孔率, 粒度分布, 細孔屈曲度, 圧縮率, 浸透率, フラクタル次元他多数
大きさ・重さ	幅 543×奥行 780×高さ 1430mm, 250kg (コンピュータ関係を除く)
所要電源	本体: 100/120/220/240VAC $\pm 10\%$ , 50/60Hz, 500VA (真空ポンプを除く) コンピュータ: 100VAC $\pm 10\%$ , 50/60Hz, 500VA

## (b) 測定方法

ポロシメータの測定は以下の手順で行った。

- ① 図 4.3.2-3 に示すセルの容積と試料の重量を測定する。
- ② 試料を図 4.3.2-4 のようにセル内にセットし、セル内を脱気した後、設定した初期圧 (34kPa, 間隙直径約 40  $\mu\text{m}$  相当) まで水銀を注入する。このとき、試料の細孔までには、水銀が入らない状態で、試料の周りを水銀により満たされている状態である。
- ③ 図 4.3.2-5 に示す低圧測定用の容器にセルを組込み、ガス圧力をさらに約 3 気圧まで上昇させ、相対的に大きな細孔から水銀を圧入し、加圧に伴う水銀の圧入量を測定する。
- ④ 低圧測定後のセルを図 4.3.2-6 に示す高圧測定用の耐圧容器に移して、414MPa まで圧力を上昇させ、加圧に伴う水銀の圧入量を測定する。
- ⑤ 測定前後の試料の状況の一例を図 4.3.2-7 および図 4.3.2-8 に示す。



図 4.3.2-3 セルの写真



図 4.3.2-4 セルに試料をセットした状態



図 4.3.2-5 低圧測定用の容器

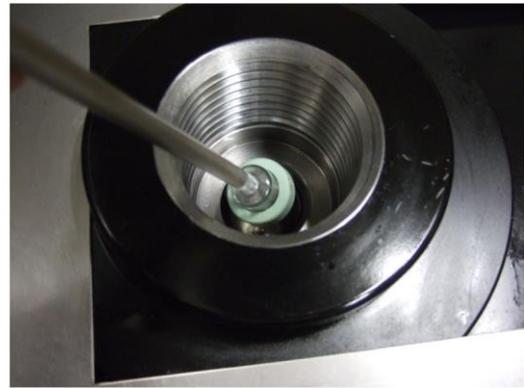


図 4.3.2-6 高圧測定用の耐圧容器



図 4.3.2-7 測定前の試料



図 4.3.2-8 測定後の試料

(c) 品質確認

測定結果の品質確認として、株式会社島津製作所提供の参照試料を用いて、ポロシメータによる測定を行った。参照試料は、図 4.3.2-9 に示すシリカーアルミナを用いた。測定条件を表 4.3.2-2 に、測定結果を表 4.3.2-3 に示す。装置の品質保証として示されている3圧力(30,000psia, 33,000psia, 60,000psia)において、参照試料の測定値が基準値内であることを確認した。

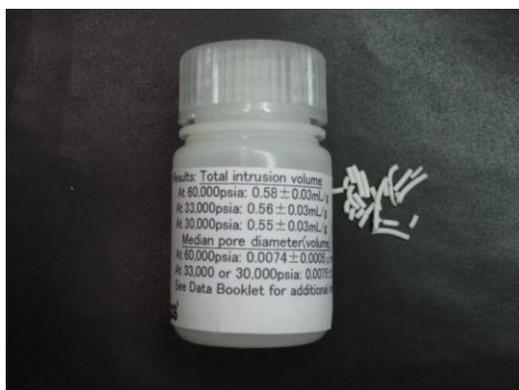


図 4.3.2-9 参照試料：シリカーアルミナ

表 4.3.2-2 参照試料の測定条件

項目	条件
前処理	温度 300°C で 1 時間以上の脱ガス処理
使用セル	5 cm <sup>3</sup> , ステム容積約 0.4 cm <sup>3</sup>
試料ロット	シリカーアルミナ ロット番号 (A-501-45)
試料重量	0.4158 g
測定範囲	0.5-60,000psi (約 500-0.0030 µm)

表 4.3.2-3 参照試料の測定結果

	圧力	30,000psia	33,000psia	60,000psia
基準データ	Total intrusion volume (mL / g)	0.55±0.03	0.56±0.03	0.58±0.03
	Median pore diameter (volume) (µm)	0.0075±0.0005	0.0075±0.0005	0.0074±0.0005
測定データ	Total intrusion volume (mL / g)	0.548	0.563	0.575
	Median pore diameter (volume) (µm)	0.0075	0.0075	0.0075

(2) 水銀圧入法による間隙率の算出方法

水銀圧入法による測定では、生データとして圧力と水銀の圧入量が得られる。細孔半径は、次式 (Washburn の式) を用いて圧力から求められる。

$$r = \frac{2\sigma \cos \theta}{P} \quad (\text{式 4.3.2-1})$$

ここに,

$\gamma$  : 細孔半径

$\sigma$  : 水銀の表面張力 (0.480 Nm<sup>-1</sup>)

$\theta$  : 水銀の接触角 (140°)

$P$ : 圧力

である。

ポロシメータによって得られる間隙体積  $D_i$  に対する累積細孔体積 ( $V/W_{dry}$ ) から, 以下の式に基づいて間隙率を算出した。下付きの  $i$  は, 各圧力段階を示し,  $1 \leq i \leq N$  とする。

(i) 全細孔容積 (total intrusion volume)

$$\frac{V_{pore}}{W_{dry}} = \left( \frac{V}{W_{dry}} \right)_N = \sum_{i=1}^N \left( \frac{\Delta V}{W_{dry}} \right)_i \quad (\text{式 4.3.2-2})$$

ただし,  $\left( \frac{\Delta V}{W_{dry}} \right)_1 = \left( \frac{V}{W_{dry}} \right)_1$  ( $i=1$ ),  $\left( \frac{\Delta V}{W_{dry}} \right)_i = \left( \frac{V}{W_{dry}} \right)_i - \left( \frac{V}{W_{dry}} \right)_{i-1}$  ( $2 \leq i \leq N$ ) である。

(ii) 全細孔比表面積 (total pore area)

$$\frac{S}{W_{dry}} = \sum_{i=1}^N \frac{4 \left( \frac{\Delta V}{W_{dry}} \right)_i}{\left( \frac{D_i + D_{i-1}}{2} \right)} \quad (\text{式 4.3.2-3})$$

ただし,  $\left( \frac{\Delta V}{W_{dry}} \right)_1 = \left( \frac{V}{W_{dry}} \right)_1$  ( $i=1$ ),  $\left( \frac{\Delta V}{W_{dry}} \right)_i = \left( \frac{V}{W_{dry}} \right)_i - \left( \frac{V}{W_{dry}} \right)_{i-1}$  ( $2 \leq i \leq N$ ) である。

(iii) メディアン細孔直径 (median pore diameter)

メディアン細孔直径とは, 累積細孔体積が全細孔容積の 50%, すなわち 0.5 ( $V_{pore}/W_{dry}$ ) に相当するときの細孔直径の値  $D_{median}$  である。

(iv) 平均細孔径 (average pore diameter)

$$D_{ave} = \frac{4V_{pore}}{S} = \frac{4 \frac{V_{pore}}{W_{dry}}}{\frac{S}{W_{dry}}} \quad (\text{式 4.3.2-4})$$

(v) カサ密度 (bulk density)

$$\rho_{bulk} = \frac{W_{dry}}{V_{bulk}} \quad \text{(式 4.3.2-5)}$$

ここに、 $W_{dry}$  はポロシメーター測定の前直前に測定した乾燥重量である。また、 $V_{bulk}$  は試料の体積であり、以下のように求めた。

$$\begin{aligned} V_{bulk} &= V_{sample+mercury} - V_{mercury} = V_{sample+mercury} - \frac{W_{mercury}}{\rho_{mercury}} \\ &= V_{sample+mercury} - \frac{W_{cell+sample+mercury} - W_{cell} - W_{dry}}{\rho_{mercury}} \end{aligned} \quad \text{(式 4.3.2-6)}$$

ここに、 $V_{sample+mercury}$  は試料と水銀の体積（これは、セル全体の体積として測定）、 $V_{mercury}$  は水銀の体積である。水銀の体積は、セル＋試料＋水銀の重量  $W_{cell+sample+mercury}$  を測定し、これからセルの重量  $W_{cell}$  と試料の乾燥重量  $W_{dry}$  を引いた値を水銀の密度  $\rho_{mercury}$ （本分析では、13.534 g/cm とした）で除して求める。

(vi) 真密度 (skeletal density)

$$\rho_{skeletal} = \frac{W_{dry}}{V_{bulk} - V_{pore}} = \frac{W_{dry}}{V_{bulk} - \frac{V_{pore}}{W_{dry}} \times W_{dry}} \quad \text{(式 4.3.2-7)}$$

このうち、 $V_{bulk}$  は (式 4.3.2-6)、 $\frac{V_{pore}}{W_{dry}}$  は (式 4.3.2-2) に従って算出した。

(vii) 間隙率 (porosity)

$$\phi = \frac{V_{pore}}{V_{bulk}} = \frac{\frac{V_{pore}}{W_{dry}} \times W_{dry}}{V_{bulk}} \quad \text{(式 4.3.2-8)}$$

このうち、 $V_{bulk}$  は (式 4.3.2-6)、 $\frac{V_{pore}}{W_{dry}}$  は (式 4.3.2-2) に従って算出した。

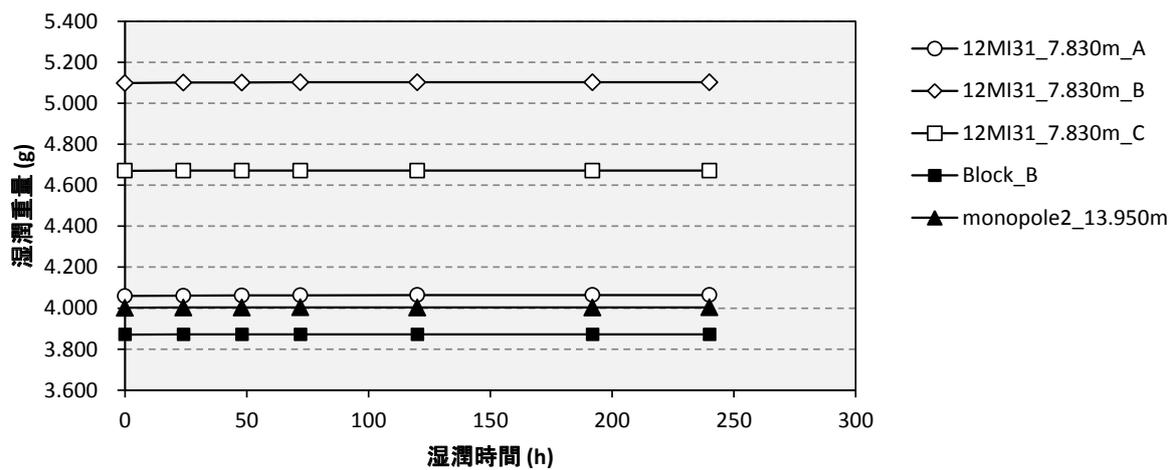
#### 4.4 試験結果

##### 4.4.1 水飽和法に基づく間隙率

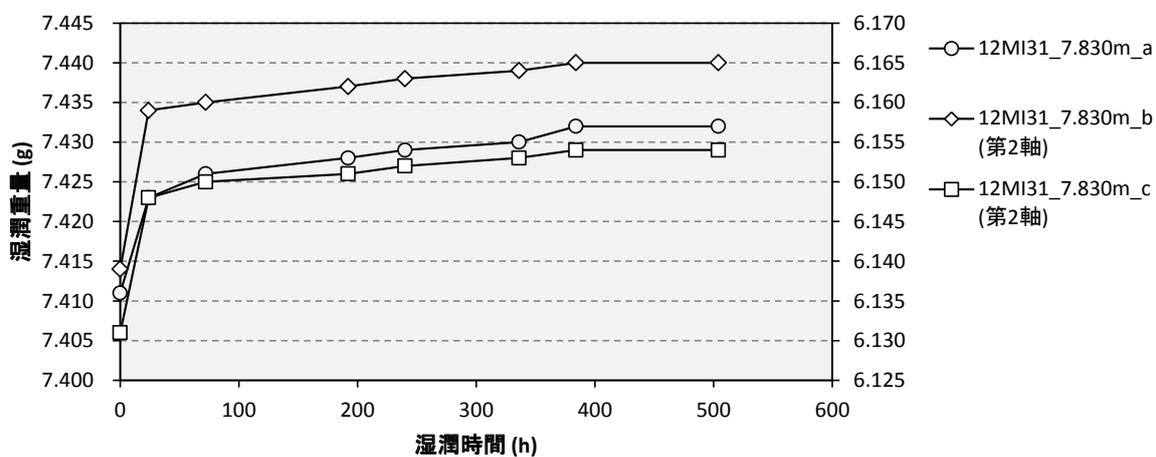
湿潤重量の測定記録を表 4.4.1-1 に、図 4.4.1-1 に重量変化のグラフを示す。乾燥重量の測定記録を表 4.4.1-2 に、図 4.4.1-2 に重量変化のグラフを示す。そして、試料毎の湿潤重量、水中重量、乾燥重量の測定結果を表 4.4.1-3 に示す。

表 4.4.1-1 湿潤重量の測定結果

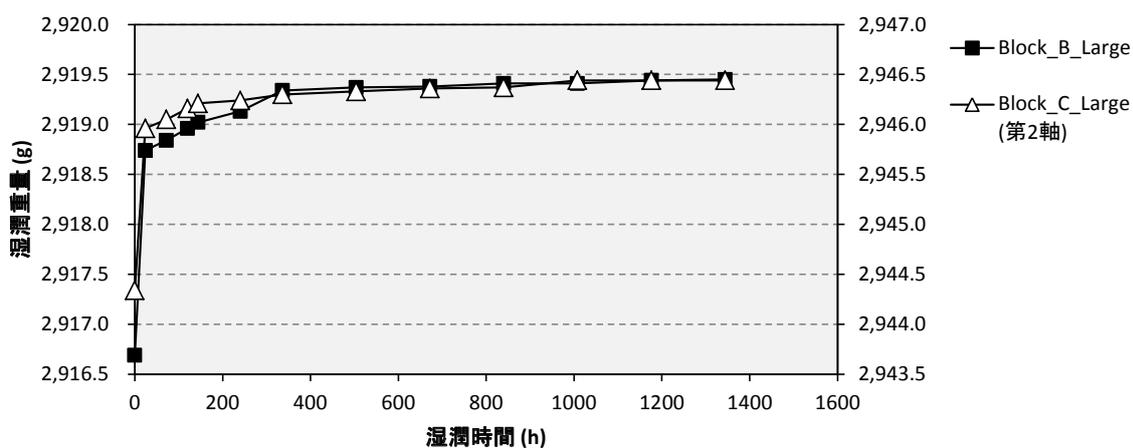
区分	強制湿潤過程の湿潤質量 (g)									
	水飽和法のみ					水飽和法+水銀圧入法				
試料名 経過時間	12MI31_7.830m_a	12MI31_7.830m_b	12MI31_7.830m_c	Block_B_Large	Block_C_Large	12MI31_7.830m_A	12MI31_7.830m_B	12MI31_7.830m_C	Block_B	monopole2_13.950m
測定開始時	7.411	6.139	6.131	2916.69	2944.34	4.059	5.098	4.670	3.871	4.002
24時間後	7.423	6.159	6.148	2918.74	2945.96	4.061	5.101	4.671	3.872	4.003
48時間後	-	-	-	-	-	4.062	5.101	4.671	3.872	4.003
72時間後	7.426	6.160	6.150	2918.84	2946.05	4.063	5.102	4.671	3.872	4.004
120時間後	-	-	-	2918.96	2946.16	4.064	5.102	4.671	3.872	4.003
144時間後	-	-	-	2919.02	2946.21	-	-	-	-	-
192時間後	7.428	6.162	6.151	-	-	4.064	5.102	4.671	3.872	4.003
240時間後	7.429	6.163	6.152	2919.13	2946.24	4.064 (測定終了)	5.102 (測定終了)	4.671 (測定終了)	3.872 (測定終了)	4.004 (測定終了)
336時間後	7.430	6.164	6.153	2919.34	2946.30	-	-	-	-	-
384時間後	7.432	6.165	6.154	-	-	-	-	-	-	-
504時間後	7.432 (測定終了)	6.165 (測定終了)	6.154 (測定終了)	2919.37	2946.33	-	-	-	-	-
672時間後	-	-	-	2919.38	2946.36	-	-	-	-	-
840時間後	-	-	-	2919.41	2946.37	-	-	-	-	-
1008時間後	-	-	-	2919.41	2946.44	-	-	-	-	-
1176時間後	-	-	-	2919.44	2946.44	-	-	-	-	-
1344時間後	-	-	-	2919.45 (測定終了)	2946.44 (測定終了)	-	-	-	-	-



(a) 水飽和法+水銀圧入法



(b) 試料名 : 12MI31\_7.830m



(c) 試料名 : Block\_B, Block\_C

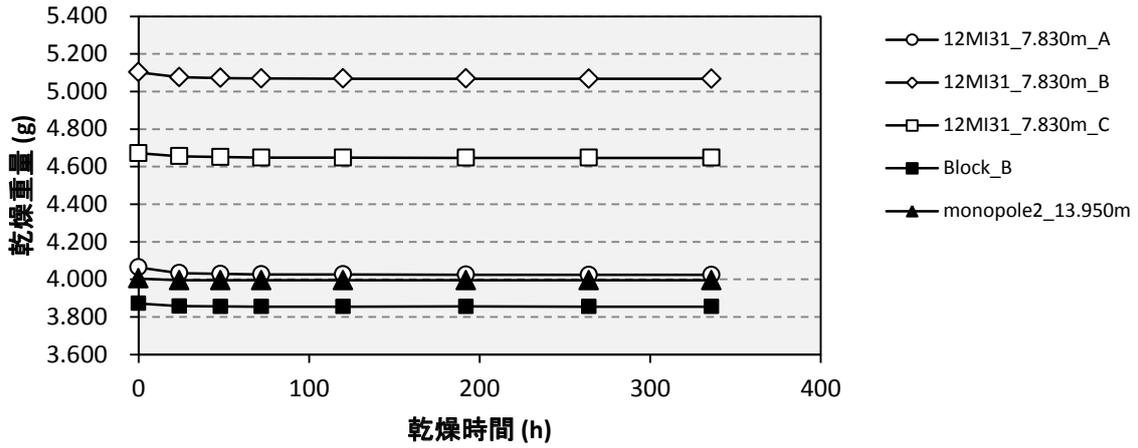
図 4.4.1-1 湿潤に伴う重量の変化

表 4.4.1-2 乾燥重量の測定結果

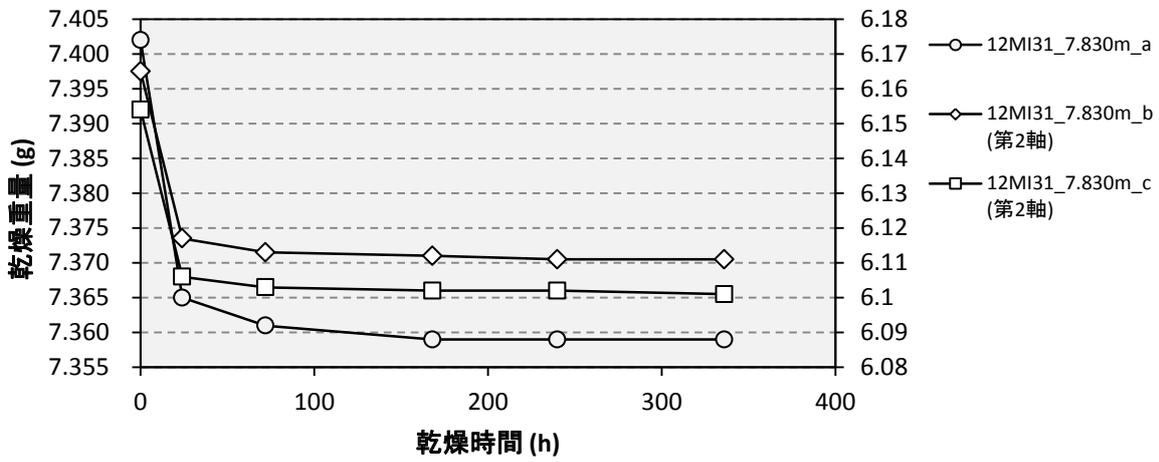
区分	乾燥過程の乾燥質量 (g)										
	水飽和法+水銀圧入法					水飽和法のみ					
	試料名	12MI31_7.830m_A	12MI31_7.830m_B	12MI31_7.830m_C	Block_B	monopole2_13.950m	12MI31_7.830m_a	12MI31_7.830m_b	12MI31_7.830m_c	Block_B_Large	Block_C_Large
経過時間											
試験開始時	4.064	5.102	4.671	3.872	4.004	7.402	6.165	6.154	2919.45	2946.44	
24時間後	4.033	5.076	4.655	3.857	3.995	7.365	6.117	6.106	-	-	
48時間後	4.029	5.072	4.651	3.856	3.995				-	-	
72時間後	4.026	5.069	4.648	3.855	3.995	7.361	6.113	6.103	-	-	
120時間後	4.026	5.068	4.648	3.855	3.995	-	-	-	-	-	
144時間後	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
168時間後	-	-	-	-	-	7.359	6.112	6.102	-	-	
192時間後	4.025	5.068	4.647	3.856	3.995	-	-	-	-	-	
240時間後	-	-	-	-	-	7.359	6.111	6.102	-	-	
264時間後	4.024	5.067	4.647	3.855	3.995	-	-	-	-	-	
336時間後	4.024 (測定終了)	5.067 (測定終了)	4.647 (測定終了)	3.855 (測定終了)	3.995 (測定終了)	7.359 (測定終了)	6.111 (測定終了)	6.101 (測定終了)	-	-	
433 時間後	-	-	-	-	-	-	-	-	2912.91	2940.66	
601 時間後	-	-	-	-	-	-	-	-	2911.67	2939.54	
739 時間後	-	-	-	-	-	-	-	-	2910.51	2938.50	
1105 時間後	-	-	-	-	-	-	-	-	2909.57	2937.88	
1249 時間後	-	-	-	-	-	-	-	-	2908.98	2937.37	
1411 時間後	-	-	-	-	-	-	-	-	2908.36	2936.84	
2017 時間後	-	-	-	-	-	-	-	-	2907.51	2936.23	
2353 時間後	-	-	-	-	-	-	-	-	2906.83	2935.55	
2689 時間後	-	-	-	-	-	-	-	-	2905.94	2934.94	
2833 時間後	-	-	-	-	-	-	-	-	2905.73	2934.77	
3025 時間後	-	-	-	-	-	-	-	-	2905.55	2934.61	
3193 時間後	-	-	-	-	-	-	-	-	2905.45	2934.53	
3433 時間後	-	-	-	-	-	-	-	-	2905.37 (測定終了)	2934.47 (測定終了)	

表 4.4.1-3 水飽和法から得られた間隙物性一覧

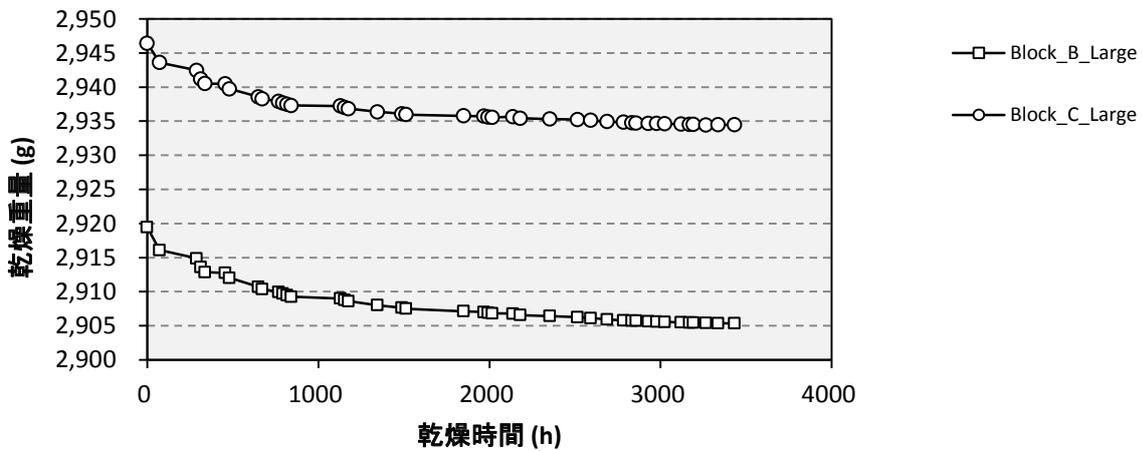
区分	試料名	湿潤質量 $W_{sat}$ g	水中質量 $W_{water}$ g	乾燥質量 $W_{dry}$ g	バルク体積 $V_{bulk}$ $cm^3$	間隙体積 $V_{pore}$ $cm^3$	間隙率 $\phi$	かさ密度 $\rho_{bulk}$ $g/cm^3$	真密度 $\rho_{skelton}$ $g/cm^3$
水飽和法 + 水銀圧入	12MI31_7.830m_A	4.064	2.493	4.024	1.571	0.040	0.025	2.561	2.628
	12MI31_7.830m_B	5.102	3.157	5.067	1.945	0.035	0.018	2.605	2.653
	12MI31_7.830m_C	4.671	2.892	4.647	1.779	0.024	0.013	2.612	2.648
	Block_B	3.872	2.411	3.855	1.461	0.017	0.012	2.639	2.670
	monopole2_13.950m	4.004	2.519	3.995	1.485	0.009	0.006	2.690	2.707
水飽和法 のみ	12MI31_7.830m_a	7.432	4.565	7.359	2.867	0.073	0.025	2.567	2.634
	12MI31_7.830m_b	6.165	3.799	6.111	2.366	0.054	0.023	2.583	2.643
	12MI31_7.830m_c	6.154	3.794	6.101	2.360	0.053	0.022	2.585	2.645
	Block_B_Large	2919.45	1806.93	2905.35	1112.52	14.100	0.013	2.612	2.645
	Block_C_Large	2946.44	1823.53	2934.47	1122.91	11.970	0.011	2.613	2.641



(a) 試料名 : 12MI31\_7.830m



(b) 試料名 : 12MI31\_7.830m

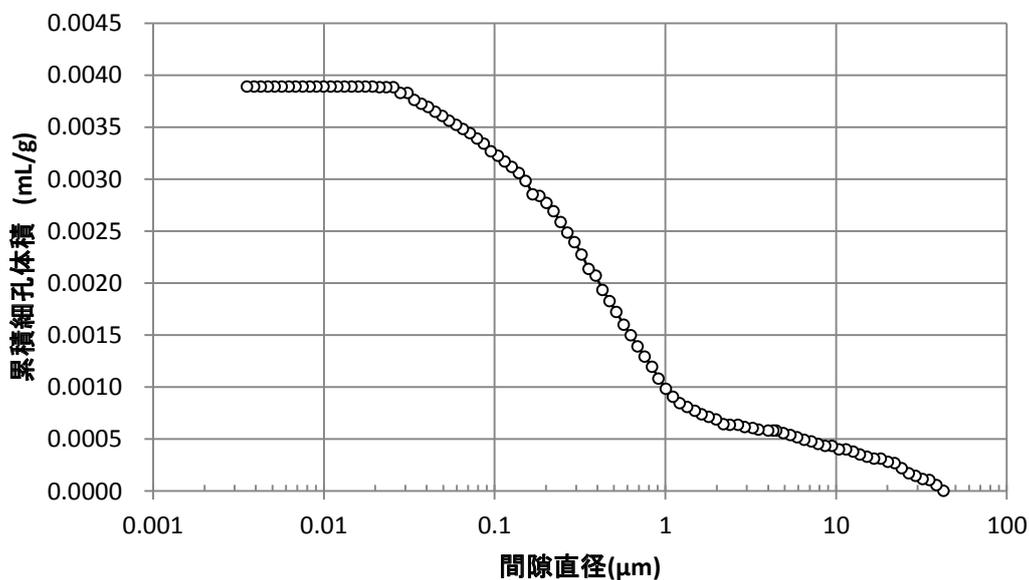


(c) 試料名 : Block\_B, Block\_C

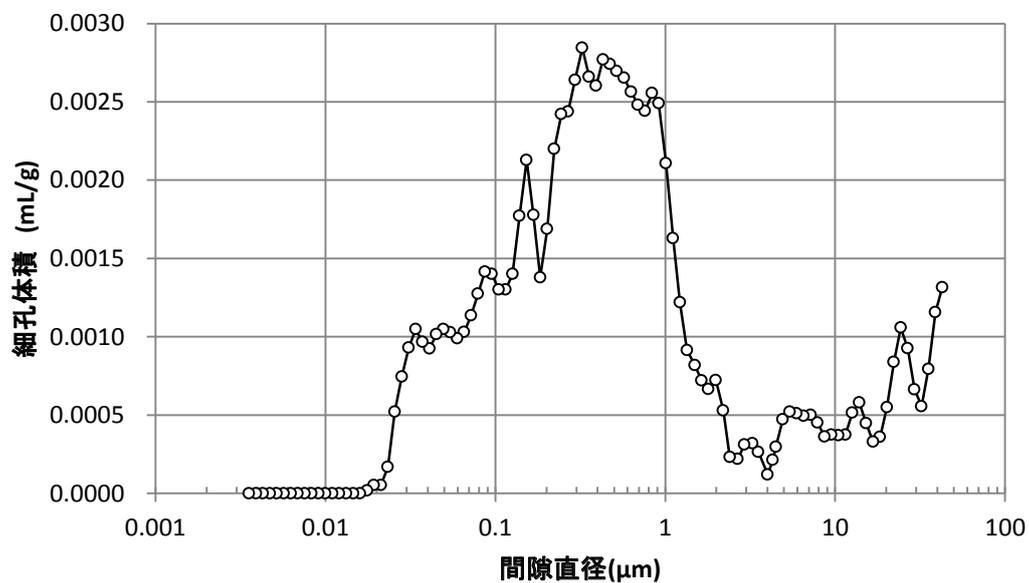
図 4.4.1-2 乾燥に伴う重量の変化

#### 4.4.2 水銀圧入法による間隙率

水銀圧入法による測定で得られた生データと式 4.3.2-1 から求めた間隙直径と累積細孔体積(水銀の浸入量) および間隙直径と細孔体積の関係を図 4.4.2-1～図 4.4.2-5 に示す。

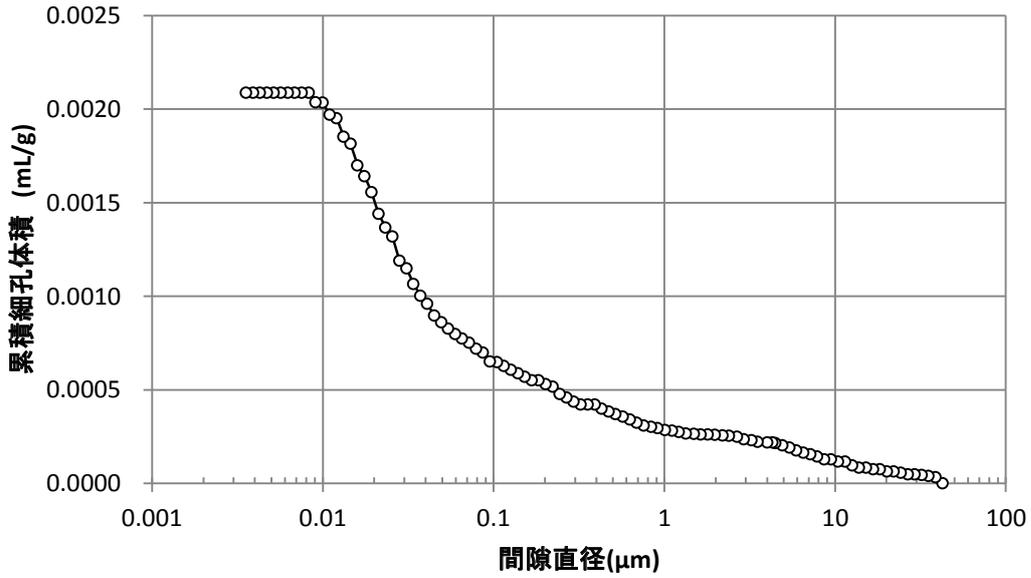


(a) 間隙直径と累積細孔体積の関係

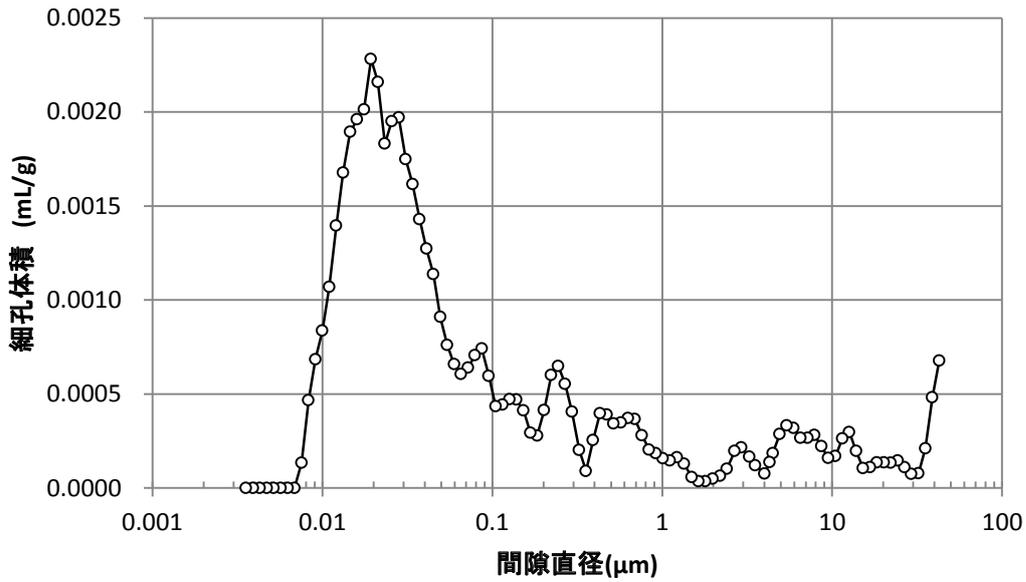


(b) 間隙直径と細孔体積の関係

図 4.4.2-1 間隙直径と累積細孔体積および細孔体積との関係 (12MI31\_7.830m\_A)

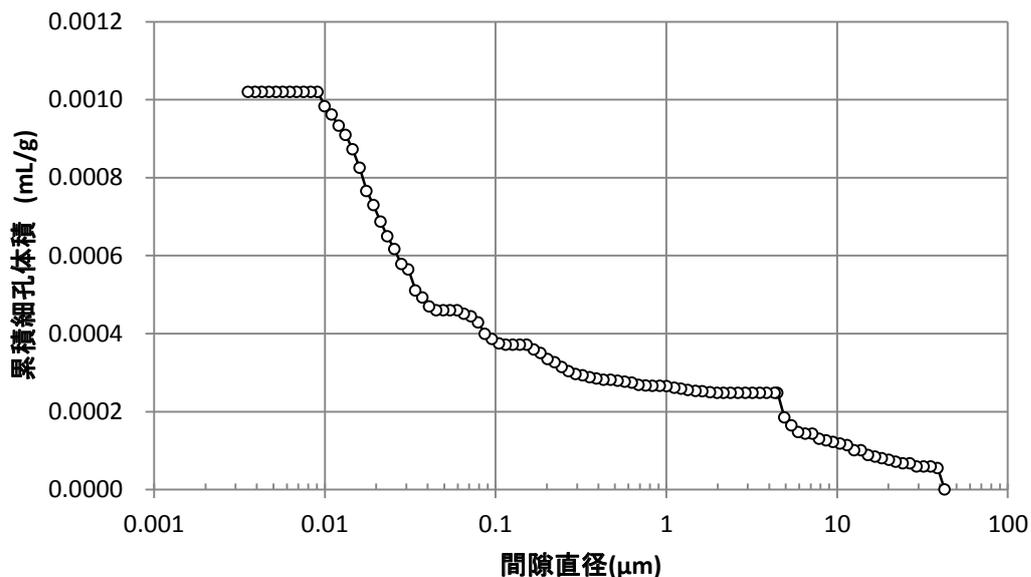


(a) 間隙直径と累積細孔体積の関係

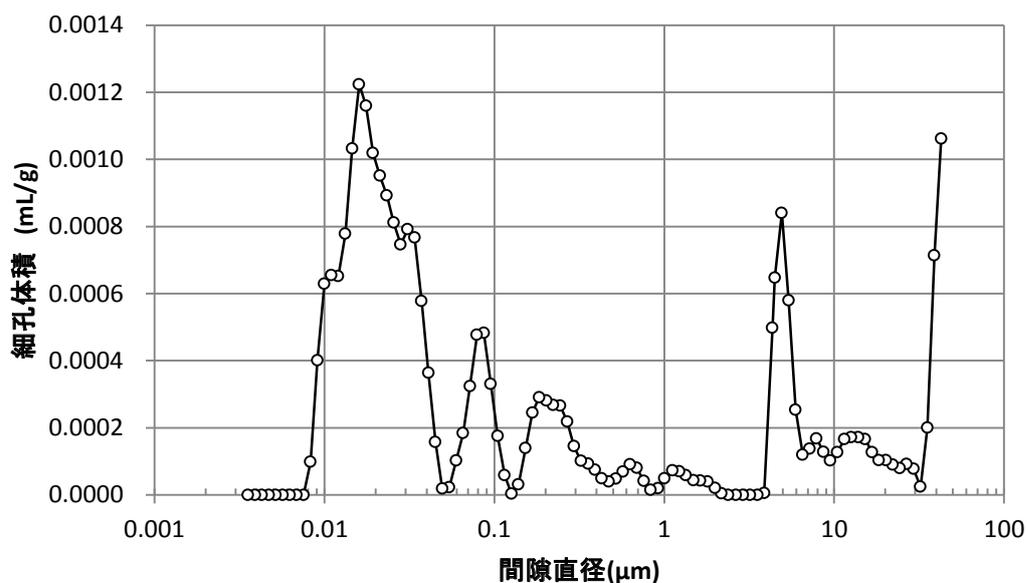


(b) 間隙直径と細孔体積の関係

図 4.4.2-2 間隙直径と累積細孔体積および細孔体積との関係 (12MI31\_7.830m\_B)

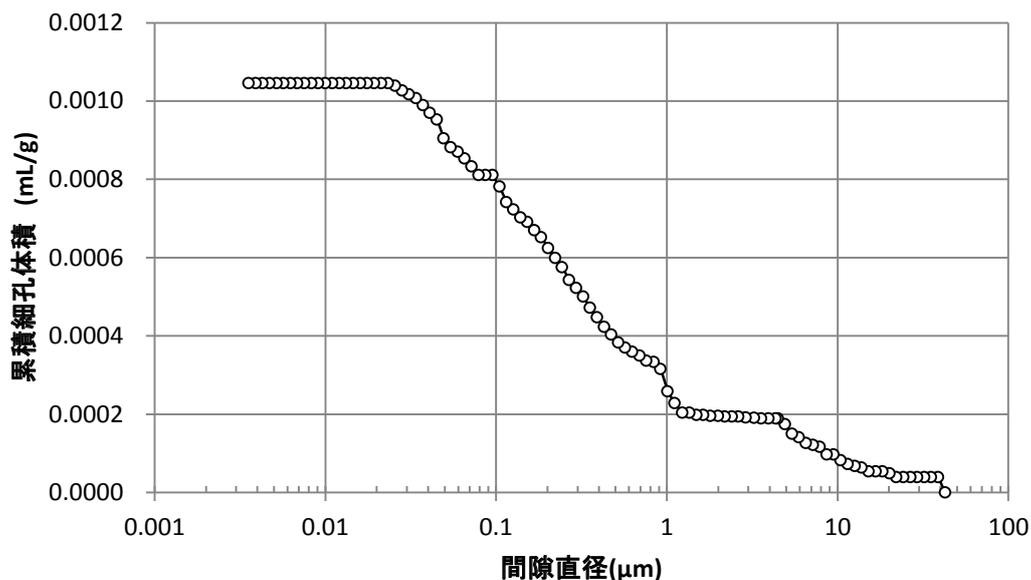


(a) 間隙直径と累積細孔体積の関係

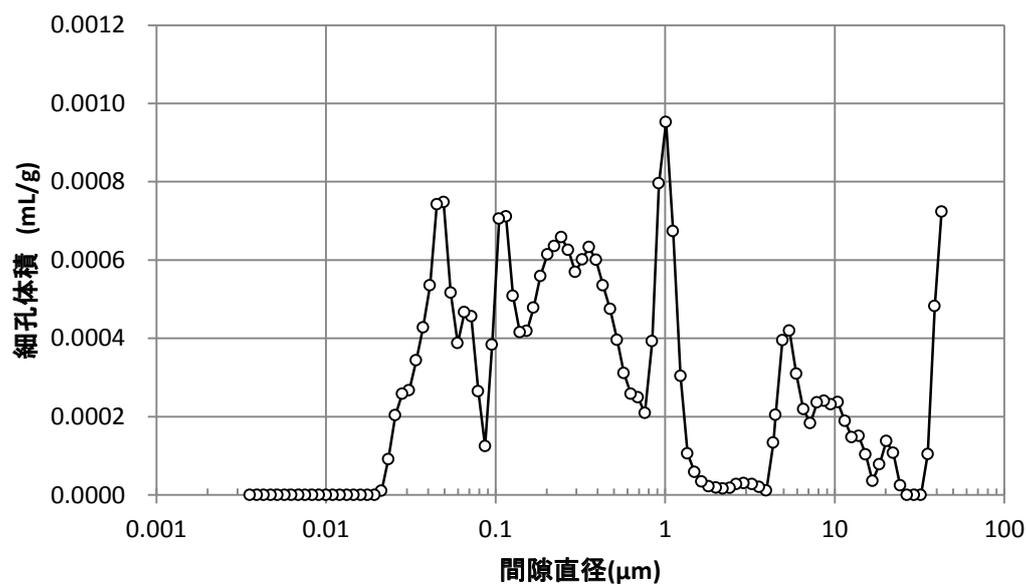


(a) 間隙直径と細孔体積の関係

図 4.4.2-3 間隙直径と累積細孔体積および細孔体積との関係 (12MI31\_7.830m\_C)

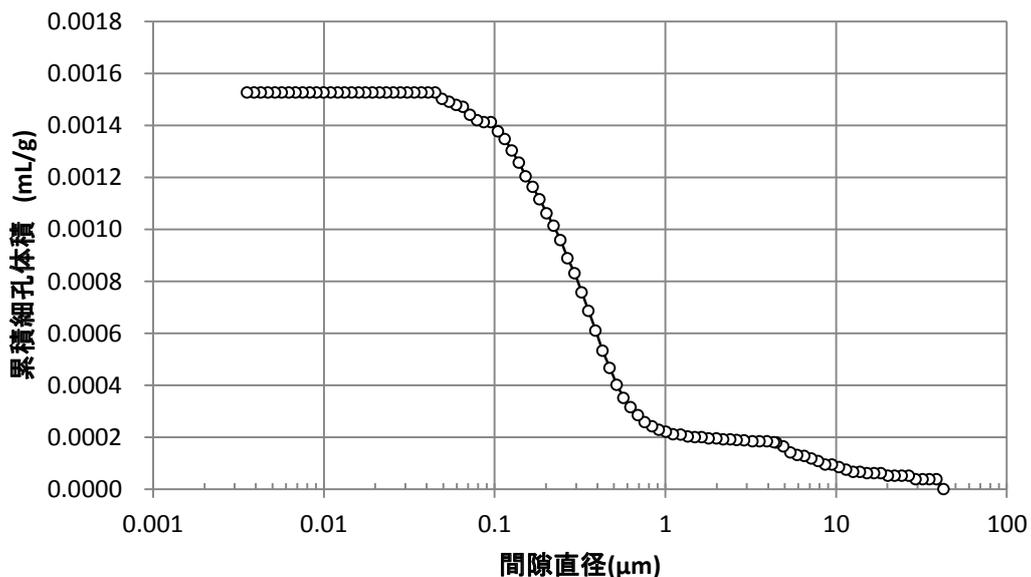


(a) 間隙直径と累積細孔体積の関係

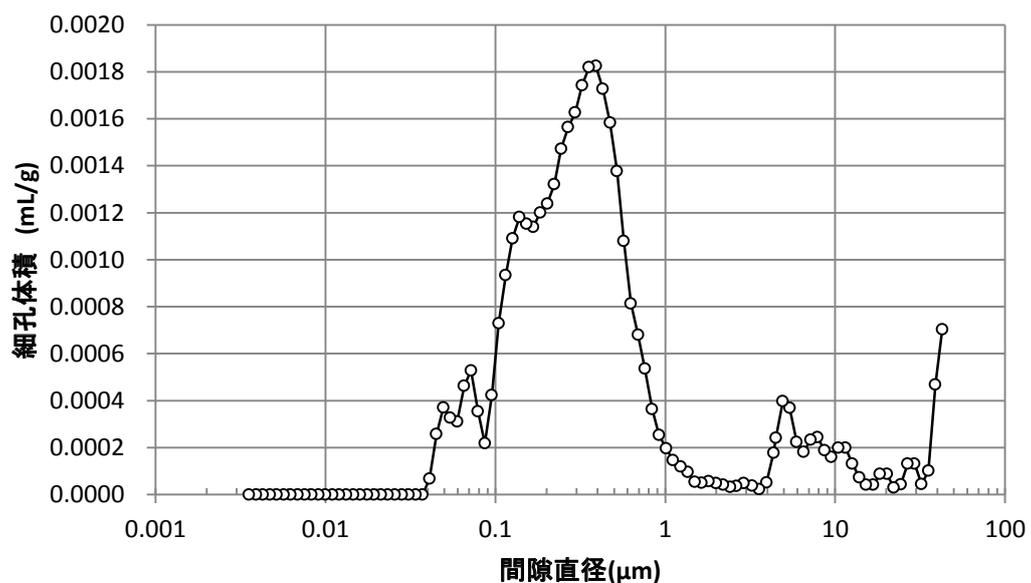


(b) 間隙直径と細孔体積の関係

図 4.4.2-4 間隙直径と累積細孔体積および細孔体積との関係 (Block\_B)



(a) 間隙直径と累積細孔体積の関係



(b) 間隙直径と細孔体積の関係

図 4.4.2-5 間隙直径と累積細孔体積および細孔体積との関係 (monopole2\_13.950m)

図 4.4.2-1～図 4.4.2-5 に示した各細孔分布と式 4.3.2-2～式 4.3.2-8 に基づいて、全細孔容積、全細孔比表面積、メディアン細孔直径、平均細孔径、かさ密度、真密度、および間隙率を算出した。表 4.4.2-1 にこれらの結果と試料重量を示す。

表 4.4.2-1 算出した間隙物性値一覧

供試体名	全細孔容積 mL/g	全細孔表面積 m <sup>2</sup> /g	メディアン細孔直径 μm	平均細孔径 μm	かさ密度 g/cm <sup>3</sup>	真密度 g/cm <sup>3</sup>	間隙率 %	供試体重量 g
12MI31_7.830m_A	0.0039	0.09	0.43	0.18	2.56	2.59	1.0	3.959
12MI31_7.830m_B	0.0021	0.28	0.04	0.03	2.60	2.61	0.5	4.910
12MI31_7.830m_C	0.0010	0.13	0.03	0.03	2.66	2.66	0.3	4.625
Block_B	0.0010	0.03	0.29	0.14	2.63	2.64	0.3	3.861
monopole2_13.950m	0.0015	0.03	0.32	0.23	2.68	2.69	0.4	3.995

國丸ほか(2012)<sup>6)</sup>では、間隙率測定に用いた試料の細孔体積が非常に小さいため、別途ブランク（セル内に試料を入れない状態）の測定を行い、ブランクの影響を取り除いた間隙直径 2.0 μm 以下の範囲で間隙物性を算出している。そこで、本試験においてもブランク測定を実施した。その結果を図 4.4.2-6 および図 4.4.2-7 に示す。同図からわかるように、間隙直径が 3.0 μm より大きい領域で水銀が圧入されている。國丸ほか(2012)<sup>6)</sup>と今回のブランク測定の結果から、2.0 μm より大きい領域はブランクの影響によるものと考え、本試験においても 2.0 μm 以下の範囲の細孔が本来の供試体の間隙であるものと考えて、この範囲に限定して間隙物性を再計算した。その結果を表 4.4.2-2 に示す。

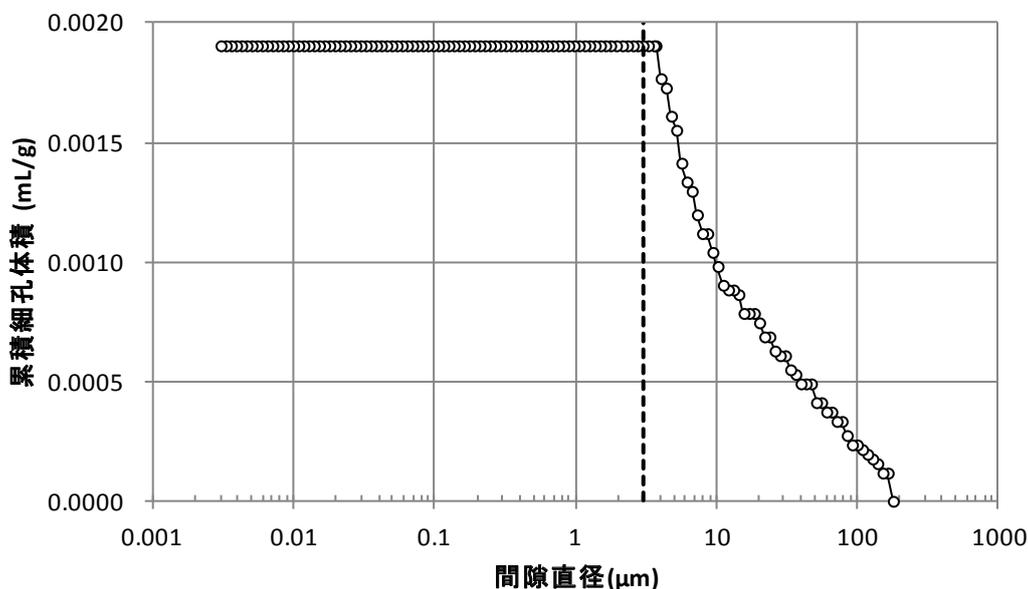


図 4.4.2-6 間隙直径と累積細孔体積との関係(ブランク測定)

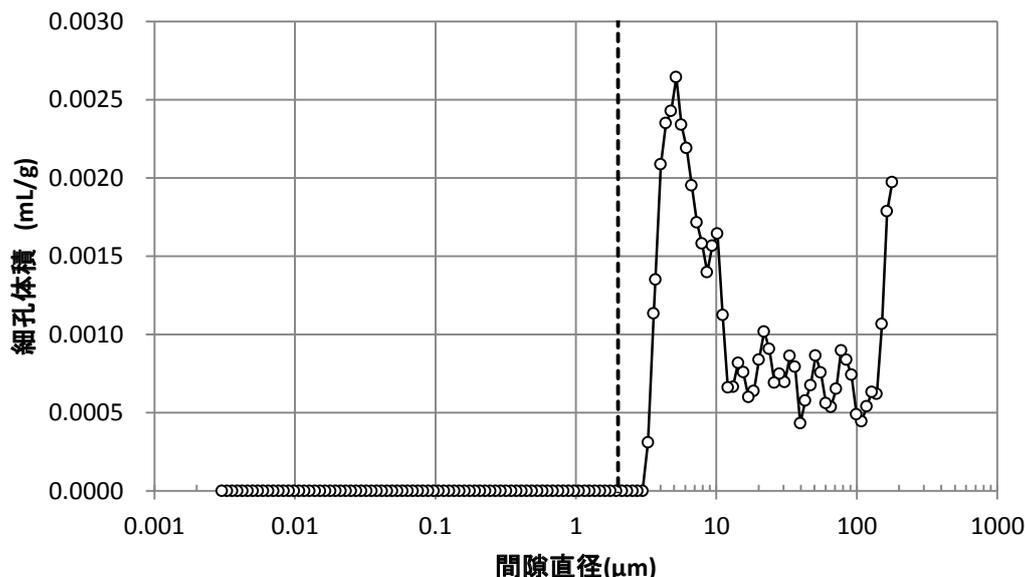


図 4.4.2-7 間隙直径と細孔体積との関係(ブランク測定)

表 4.4.2-2 算出した間隙物性値一覧 (間隙直径 0.02~2 μm)

供試体名	全細孔容積 mL/g	全細孔表面積 m <sup>2</sup> /g	メディアン細孔直径 μm	平均細孔径 μm	かさ密度 g/cm <sup>3</sup>	真密度 g/cm <sup>3</sup>	間隙率 %	供試体重量 g
12MI31_7.830m_A	0.0032	0.09	0.32	0.15	2.56	2.59	0.8	3.959
12MI31_7.830m_B	0.0018	0.28	0.03	0.03	2.60	2.61	0.5	4.910
12MI31_7.830m_C	0.0008	0.13	0.02	0.02	2.66	2.66	0.2	4.625
Block_B	0.0008	0.03	0.21	0.11	2.63	2.64	0.2	3.861
monopole2_13.950m	0.0013	0.03	0.28	0.20	2.68	2.69	0.4	3.995

水飽和法および水銀圧入法による間隙率測定の結果を表 4.4.2-3 に示す。12MI31\_7.830m 試料では、試料の形状および割れ目面からの距離による間隙率の違いを把握することを目的として間隙率測定を行った。12MI31\_7.830m の間隙率測定試料の作製位置と測定結果を図 4.4.2-8 に示す。図中の数字は水飽和法の間隙率を、括弧内の数字は水銀圧入法の間隙率を示す。この図に示すように、割れ目面からの距離によって、間隙率が低下していることがわかる。また、12MI31\_7.830m\_A~C の間隙直径と細孔体積の関係を比較すると、割れ目面近傍の 12MI31\_7.830m\_A は他の 2 試料と比べ、間隙直径 0.1~1 μm の間隙が多いことが分かる (図 4.4.2-9)。12MI31\_7.830m\_C は 12MI31\_7.830m\_B に比べ、0.01~0.1 μm の間隙が少ないことが分かり、割れ目面から離れるに従って間隙が減少していることが確認できる。また 12MI31\_7.830m\_A の 0.01~0.1 μm の間隙が他の 2 試料より少ないのは、割れ目の形成により、0.01~0.1 μm の間隙が連結したことによって相対的に減少し、0.1~1 μm の間隙が増加したものと考えられる。

次に、試料の形状の違いについて、12MI31\_7.830m\_A~C と 12MI31\_7.830m\_a~c の水飽和法の間隙率測定結果から検証する。図 4.4.2-8 に示したように 12MI31\_7.830m\_A と 12MI31\_7.830m\_a, b がほぼ同じ位置で作製した試料になる。この両者を比較した場合、ほぼ同じ値を示していることから、試料形状による違いは、ほぼないことが考えられる。Block\_B の試料について

は、試料サイズの違いによる間隙率の違いを把握すること目的として、一辺 10mm の立方体と一辺 100mm の立方体の 2 通りで間隙率測定を実施したが、両試料ともほぼ同じ値を示した。

水飽和法と水銀圧入法による間隙率の値では、水飽和法で得られた値が水銀圧入法で得られた値より高いことを示す傾向があり、この傾向は國丸ほか(2012)<sup>6)</sup>の結果と同じであった。

表 4.4.2-3 間隙率一覧

岩石試料	試料名	試料成形位置	成形形状	間隙率 (%)	
				水飽和法	水銀圧入法
12MI31_7.830m	12MI31_7.830m_A	割れ目面近傍	10mm立方体	2.5	0.8
	12MI31_7.830m_B	割れ目面より 10mmの位置	10mm立方体	1.8	0.5
	12MI31_7.830m_C	割れ目面より 20mmの位置	10mm立方体	1.3	0.2
	12MI31_7.830m_a	割れ目面近傍	φ25mm × 5mm	2.5	—
	12MI31_7.830m_b	割れ目面より 5mmの位置	φ25mm × 5mm	2.3	—
	12MI31_7.830m_c	割れ目面より 10mmの位置	φ25mm × 5mm	2.2	—
Block_B	Block_B	マトリクス	10mm立方体	1.2	0.2
	Block_B_Large	マトリクス	100mm立方体	1.3	—
Block_C	Block_C	マトリクス	100mm立方体	1.1	—
monopole2_13.950m	monopole2_13.950m	マトリクス	10mm立方体	0.6	0.4

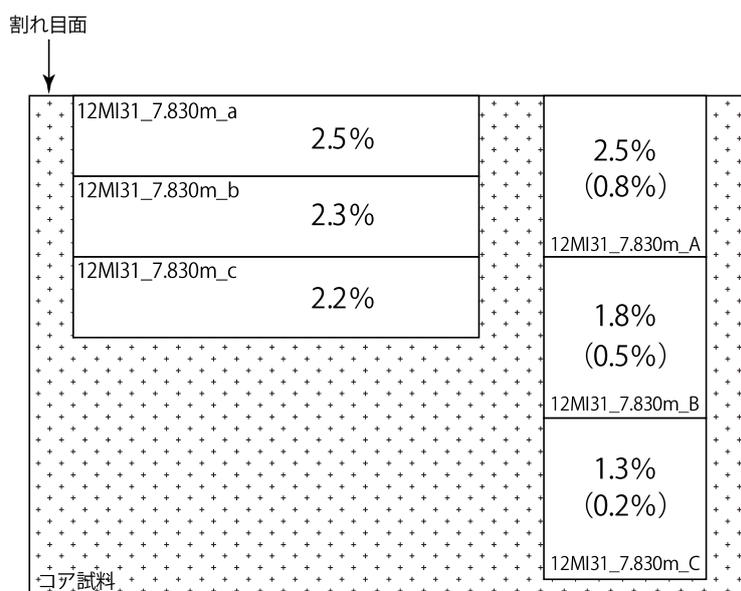


図 4.4.2-8 12MI31\_7.830m の間隙率測定試料の作製位置と間隙率  
(図中の数値は水飽和法の間隙率を、括弧内の数値は水銀圧入法の間隙率を示す。)

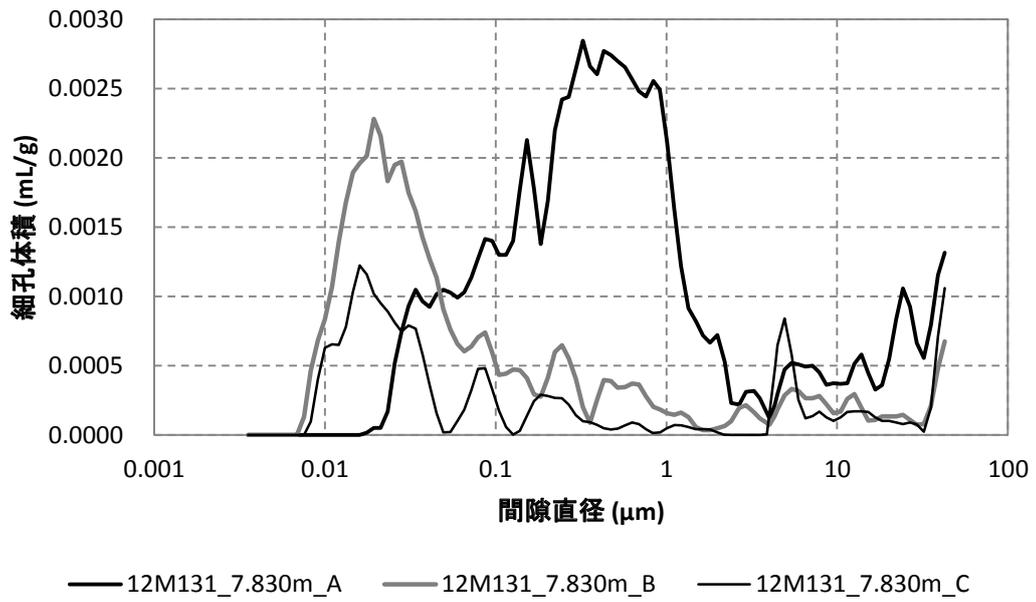


図 4.4.2-9 間隙直径と細孔体積との関係(12MI31\_7.830m)

## 5. X線回折分析

物質移動解析で用いるパラメータを設定するために、物質移動に関係する地質環境の特性（地下水の地球化学、岩石の物理化学特性など）の把握が必要となる<sup>13)</sup>。そこで、岩石ブロックを用いた拡散試験や透過拡散試験に用いる岩石試料のうち、数試料を用いてX線回折による鉱物同定を行った。

### 5.1 試料の選定

透過拡散試験に用いる岩石試料のうち表5.1-1に示す試料をX線回折分析の対象とした。選定した試料のうち、10MI23号孔、10MI25号孔、12MI31号孔の試料は、主立坑を北北西走向で通過する変質を伴う断層帯（以下、主立坑断層）の近傍、主立坑断層の北東側、そして主立坑断層の南西側の領域ごとの鉱物組成の特徴を把握することを目的として選定している。

表 5.1-1 岩石試料一覧

試料名	試料作製位置	試料形状	X線回折分析
			試料作製数
10MI23_87.576m	マトリクス	紛体	1
10MI25_20.752m	マトリクス	紛体	1
12MI31_7.830m	マトリクス	紛体	1
Block_B	マトリクス	紛体	1
monopole2_13.950m	マトリクス	紛体	1
数量			5 試料

### 5.2 試料の作製

X線回折分析による鉱物同定を行うために、以下に示す手順で粉末試料を作製した。

- ① 粉碎前の岩石試料（岩石ブロックの残試料およびコア）を、図 5.2-1 に示すように鉄板上で鉄ハンマーを使用して粗粉碎した。粗粉碎時は、試料を厚手のビニール袋に入れ、鉄板、ハンマーの鉄粉が混入しない様に留意した。
- ② 粗粉碎した試料は、図 5.2-2 に示す程度の粒径になるまで、細粉碎した。
- ③ 細粉碎した試料は、図 5.2-3 に示すように、メノウ自動播潰機で微粉末になるまで粉碎し、250  $\mu$  m のフルイに通過することを確認した。
- ④ ③の粉末試料を、さらに乳鉢および播潰機を使用し、全試料が 75  $\mu$  m のフルイを通過する（指頭にざらつきを感じない程度）まで繰り返し粉碎した。
- ⑤ ④の粉末試料を、X線回折分析用の試料ホルダー（ $\phi$  25mm、深さ 1mm のくぼみを付けたアルミニウム製板）に丁寧に充填し、無定方位無処理試料とした。X線回折分析用の試料ホルダーに充填した粉末を図 5.2-4 に示す。



図 5.2-1 粗粉碎後の試料



図 5.2-2 細粉碎後の試料



図 5.2-3 メノウ自動擂潰機による粉碎

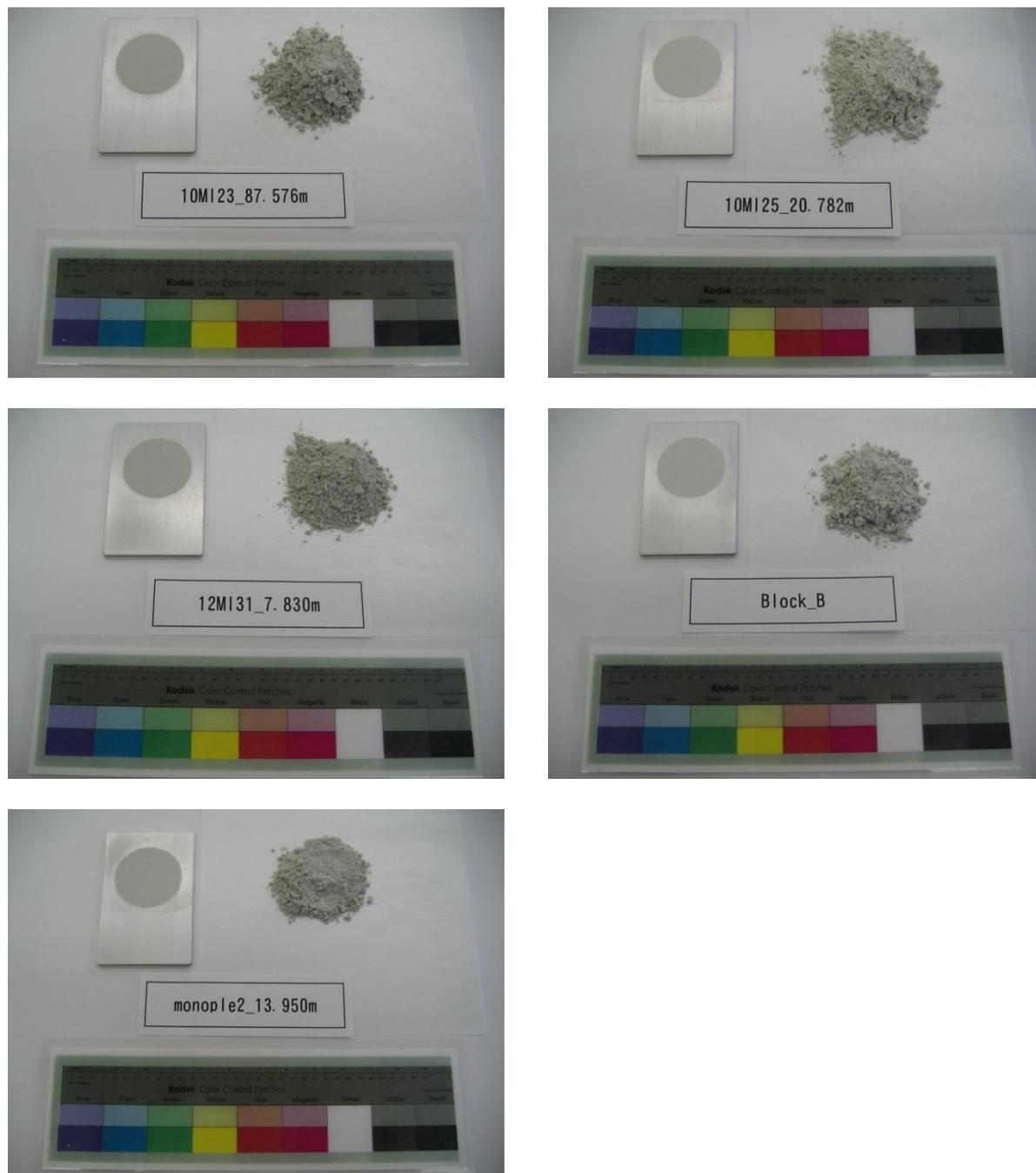


図 5.2-4 粉砕後およびホルダーに充填した粉末試料

作成した粉末試料は無定方位無処理試料のほか、粘土鉱物の同定のため、エチレングリコール処理、および塩酸処理を施した。これらの処理は以下の手順で実施した。

**1) 定方位無処理および定方位エチレングリコール処理試料の作製**

無定方位無処理試料の分析において 14 Å 付近にピークが検出される試料に関しては、次の手順で、定方位無処理および定方位エチレングリコール処理試料を作製した。

- ① 無定方位試料調整で作製した粉末試料を蒸留水と共に水ひシリンダー（容量：1ℓ）に分散させ、8時間放置した後、上澄液 10cm（ $2\mu\text{m}$  以下の粘土分が懸濁）を採取し遠心分離機にかけ、得られた沈殿物をスライドガラス上に塗り、風乾して定方位試料とした。
- ② 作製した定方位試料 2 試料のうち、1 枚は定方位無処理試料，もう 1 枚はエチレングリコールを全体に行き渡る程度滴下し，5 分程度静置し定方位エチレングリコール処理試料とした。水ひシリンダーを図 5.2-5 に，遠心分離機を図 5.2-6 に示す。



図 5.2-5 水ひシリンダー



図 5.2-6 遠心分離機

## 2) 定方位塩酸処理試料の作製

無定方位無処理分析において  $7\text{ \AA}$  付近にピークが検出された試料については，次の手順で定方位塩酸処理試料を作製した。

- ①  $75\mu\text{m}$  まで粉碎した粉末試料に 6 規定の塩酸を添加し，120 分間煮沸し，その後，遠心分離機にかけ，塩酸を除き，蒸留水での洗浄と遠心分離を繰り返し，沈殿物をスライドガラスに塗り風乾して定方位塩酸処理試料とした。塩酸処理の作業状況（煮沸中）を図 5.2-7 に示す。



図 5.2-7 試料の塩酸処理（煮沸中）

### 5.3 X線回折分析方法

粉末試料を充填したホルダーを図 5.3-1 の X 線回折分析装置に取り付け、表 5.3-1 に示す分析条件で X 線回折分析を行った。X 線回折装置の仕様を表 5.3-2 に示す。



図 5.3-1 X線回折分析装置（株式会社島津製作所製 XRD-6100）

表 5.3-1 X線回折分析条件

	各条件	無定方位処理分析
走査モード	モード	連続スキャン
	駆動軸	$2\theta / \theta$
走査条件	走査範囲 (度)	2.00 ~ 60.00
	走査ステップ (度)	0.0200
	走査速度 (度/分)	2.000
	計数時間 (秒)	0.60
XG 条件	管電圧 (kV)	30.0
	管電流 (mA)	20.0
スリット条件	ダイバージェンス (度)	1.00
	スキャタリング (度)	1.00
	スレービング (mm)	0.30
表示スケール	単位	Counts

表 5.3-2 X線回折分析装置の仕様

項目		XRD-6100		
		2kW(NF)タイプ	3kW(BF)タイプ	2.2kW(LFF)タイプ
X線管球	種類 焦点 最大出力	Cu, NFタイプ 1.0 × 10mm 2.0 kW	Cu, BFタイプ 2.0 × 12mm 2.7 kW	Cu, LFFタイプ 0.4 × 12mm 2.2 kW
X線発生部	最大出力 管電圧・管電流安定度 最大管電圧 管最大電流 管電圧ステップ幅 管電流ステップ幅 過負荷リミット値設定  管球保護 安全機構	3 kW ±0.01 % (電源変動 10%に対して) 60 kV 80 mA 1 kV 1 mA 管球の種類に対応して設定変更 過負荷, 過電圧, 過電流, 冷却以上 ドアインタロック機構(扉の開閉を確認後, X線を発生します) 緊急停止		
ゴニオメータ部	型式 ゴニオメータ半径 最小ステップ角度 角度再現性 走査角度範囲 早送り速度 走査速度 走査方式 動作モード  ダイバージェンススリット スキャッタースリット レシビングスリット	縦形 185 mm 0.002° (2θ), 0.001° (θ) ± 0.001° (2θ) - 6° ~ 163° (2θ), - 180° ~ 180° (θ) 1000° / min (2θ) 0.1° ~ 50° / min (2θ), 0.05° ~ 25° / min (θ) θ / 2θ連動, θ, 2θ単独 連続スキャン測定, ステップスキャン測定, キャリブレーション, ポジショニング, θ軸揺動 (2θ連続スキャン, またはステップスキャンの時) 0.5°, 1°, 2°, 0.05mm 0.5°, 1°, 2° 0.15mm, 0.3mm		
検出・計数部	検出器 シンチレータ スケーラ HV/PHA	シンチレーションカウンタ NaI 桁数 7桁 高圧電源500 ~ 1200V, ベースラインおよびウィンドウの自動制御		
ケース	ケース寸法	W900 × D700 × H1600		
データ処理部	コンピュータ OS CPU メインメモリー 記憶装置 CD-ROM ディスプレイ プリンタ 制御対象  基本データ処理  定性分析  定量分析	パーソナルコンピュータ Windows 7 Professional Pentium または互換品 2 GB以上 HDD 40GB以上 DVD/CD-RWドライブ 17インチカラー カラープリンタ(A4) X線発生, 管電圧, 管電流, ゴニオメータ, 検出器高圧, PHA, スケーラ スムージング, BG除去, Ka1-Ka2分離, ピークサーチ, 半値幅, 積分強度 統計誤差補正, 内/外部標準補正, データ間演算 グラフィック表示 データベース作成, 自動検索 (ICDD PDF2またはPDF4はオプション) 検量線作成, 定量計算		

## 1) 鉱物の同定

試料の回折 X 線について、下記の手順で面間隔  $d$  (単位:  $\text{\AA}$ ) と X 線回折強度を整理した。

- ① 回折 X 線の  $2\theta$  値を求めた。
- ②  $2\theta$  の値から、ブラッグの式 (式 5.3-1) を用いて  $d$  値を求めた。

$$2d\sin\theta = n\lambda \quad (\text{式 5.3-1})$$

$d$  : 面間隔 ( $\text{\AA}$ )

$\theta$  : ブラッグ角 ( $^\circ$ )

$\lambda$  : 使用した X 線の波長 ( $\text{\AA}$ )

$n$  : 整数

- ③ バックグラウンド補正を行った後、回折 X 線のピーク高さから X 線回折強度を求める。
- ④ 回折 X 線について、 $2\theta$  値、 $d$  値、および X 線強度から鉱物名を同定した。

## 2) 標準試料による測定 (品質確認)

測定結果の品質確認は、参照試料として図 5.3-2 に示す福島県産石英標準試料の測定を行い、X 線装置内にある標準試料データベースの  $2\theta$  値、 $d$  値を比較した。石英標準試料の測定結果を図 5.3-3 に示し、 $2\theta$  値、 $d$  値の比較を表 5.3-3 に示す。比較の結果、データベースと標準試料の測定結果が同等であることを確認した。



図 5.3-2 福島県産石英標準試料

表 5.3-3 比較結果一覧

	2θ	D 値
標準試料データベース	26.6431	3.34300
石英標準試料測定結果	26.6372	3.34381

\*\*\* マルチプロット \*\*\*

ファイル名 : GE3¥Qz100\_13\_2\_9\_1  
 サンプル名 : Qz100% 2013.2.9\_1      コメント :  
 分析日時 : 13-02-09 13:41:59  
 分析条件  
 X線管球 : Cu(1.54060 Å)    管電圧 : 30.0 kV    管電流 : 20.0 mA  
 測定範囲 : 2.0000 ~ 60.0000 度    ステップ幅 : 0.0200 度  
 計数時間 : 0.60 秒    スリット DS : 1.00 度    SS : 1.00 度    RS : 0.30 mm

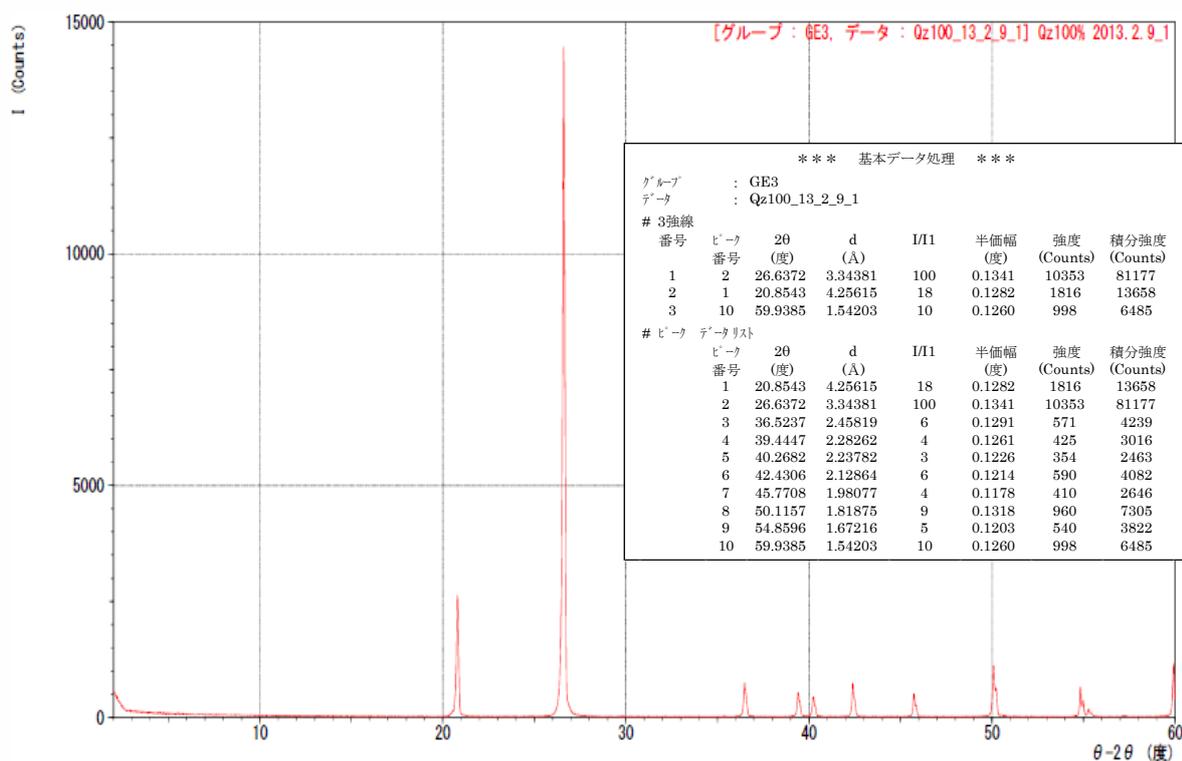


図 5.3-3 福島県産石英標準試料測定結果

### 5.4 X線回折分析結果

同定した鉱物名一覧を表 5.4-1 に示す。それぞれの試料の X 線チャートを図 5.4-1～図 5.4-15 に、X 線回折強度ピークの一覧を表 5.4-2～表 5.4-16 に示す。

表 5.4-1 含有鉱物一覧表

試料名 \ 鉱物名	スメクタイト	雲母粘土鉱物 <sup>※2</sup>	緑泥石	石英	カリ長石	斜長石	方解石	磁鉄鉱 <sup>※3</sup>
10MI23_87.576m	・ <sup>※1</sup>	○ (824)	・ (51)	◎ (3523)	◎ (1812)	◎ (2359)		
10MI25_20.782m		・～△ (161)	△ (324)	◎ (3357)	◎ (2418)	◎ (2630)	△ (124)	
12MI31_7.830m	・ <sup>※1</sup>	△ (736)	・ (27)	◎ (2887)	◎ (1781)	◎ (2217)		
Block_B	・ (46)	・ (97)	△ (263)	◎ (3162)	◎ (2326)	◎ (3250)	△ (137)	・
monopole2_13.950m		○ (1300)	・ (84)	○ (727)	◎ (1462)	◎ (2520)	・ (68)	

相対含有量：◎多量，○中量，△少量，・微量

( ) 内の数値は、各鉱物のピーク強度カウント数（石英 100%標準試料のピーク強度は、10000 カウント程度）

※1：不定方位試料測定時には確認されないが、水ひ後の定方位試料時にピークが確認される。

※2：肉眼観察では、黒雲母を主体とするが、ほかの雲母粘土鉱物（白雲母もしくはイライト）も含まれる。

※3：微量のピークが確認されるが、カウント数が低く、雲母粘土鉱物のピークと重なることなどから、確定不可

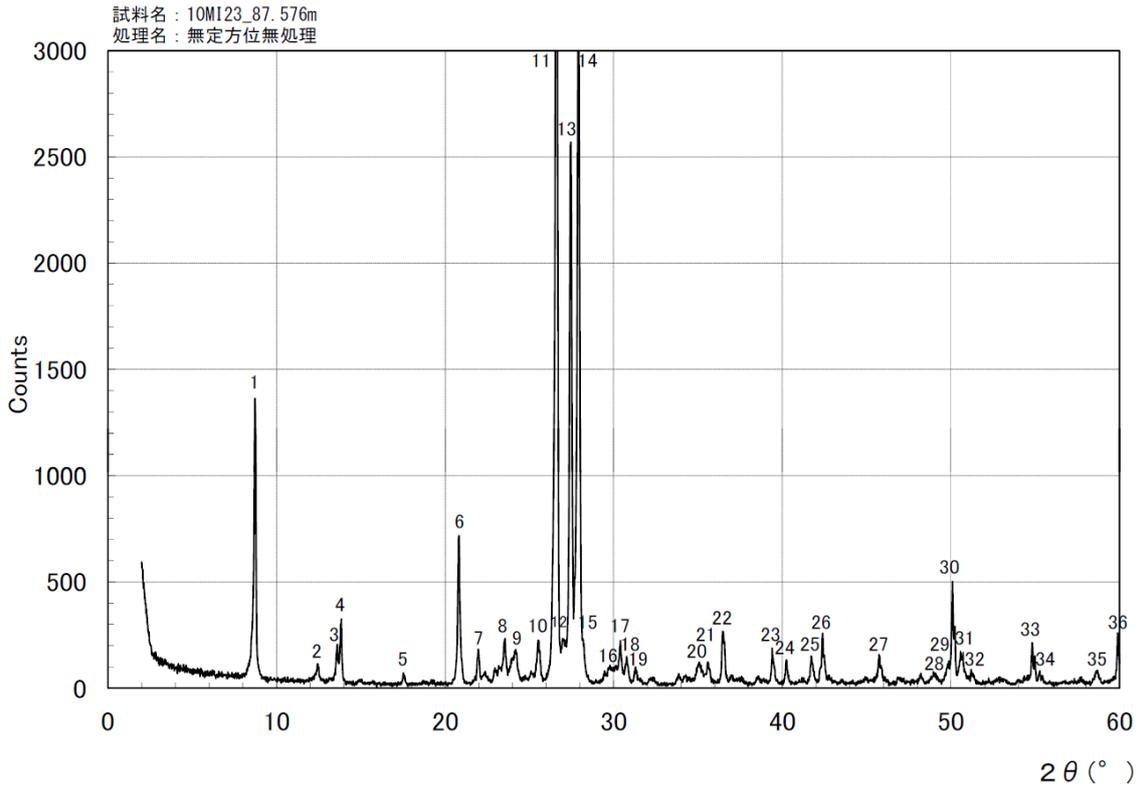


図 5.4-1 X線チャート[無定方位無処理] (試料名 : 10MI23\_87.576m)

表 5.4-2 X線回折強度ピークの一覧表[無定方位無処理] (試料名 : 10MI23\_87.576m)

件名 : 岩石試料を用いた室内拡散試験環境の整備と間隙率測定及び鉱物試験													
試料名 : 10MI23_87.576m													
ピーク 無定方位無処理													
No.	鉱物名	2θ (°)	d(Å)	I(count)*1	I/10(%)*2	備考	No.	鉱物名	2θ (°)	d(Å)	I(count)*1	I/10(%)*2	備考
1	雲母粘土鉱物※	8.825	10.012	824	23		21	雲母粘土鉱物※	35.580	2.521	67	2	
2	緑泥石	12.440	7.110	51	1		22	石英	36.509	2.459	201	6	
3	カリ長石	13.668	6.474	107	3		23	石英	39.437	2.283	115	3	
4	斜長石	13.884	6.373	186	5		24	石英	40.240	2.239	88	2	
5	雲母粘土鉱物※	17.520	5.058	30	1		25	カリ長石	41.720	2.163	99	3	
6	石英	20.857	4.256	479	14		26	石英	42.418	2.129	162	5	
7	斜長石	21.940	4.048	103	3		27	石英	45.740	1.982	104	3	
8	斜長石	23.564	3.772	132	4		28	カリ長石	49.000	1.858	32	1	
9	斜長石	24.120	3.687	84	2		29	斜長石	49.840	1.828	55	2	
10	カリ長石	25.569	3.481	131	4		30	石英	50.119	1.819	363	10	
11	石英	26.631	3.345	3523	100		31	カリ長石	50.560	1.804	87	2	
12	カリ長石	26.980	3.302	104	3		32	斜長石	51.220	1.782	37	1	
13	カリ長石	27.476	3.244	1812	51		33	石英	54.853	1.672	159	5	
14	斜長石	27.939	3.191	2359	67		34	カリ長石	55.260	1.661	45	1	
15	斜長石	28.226	3.159	108	3		35	斜長石・カリ長石	58.640	1.573	44	1	
16	カリ長石	29.680	3.008	43	1		36	石英	59.936	1.542	209	6	
17	斜長石	30.410	2.937	120	3								
18	カリ長石	30.740	2.906	71	2								
19	斜長石	31.280	2.857	47	1								
20	雲母粘土鉱物※	35.040	2.559	57	2								

雲母粘土鉱物※:肉眼観察では、主に黒雲母

\*1 0.5秒間のカウント数

\*2 ピークの最大値に対する相対値

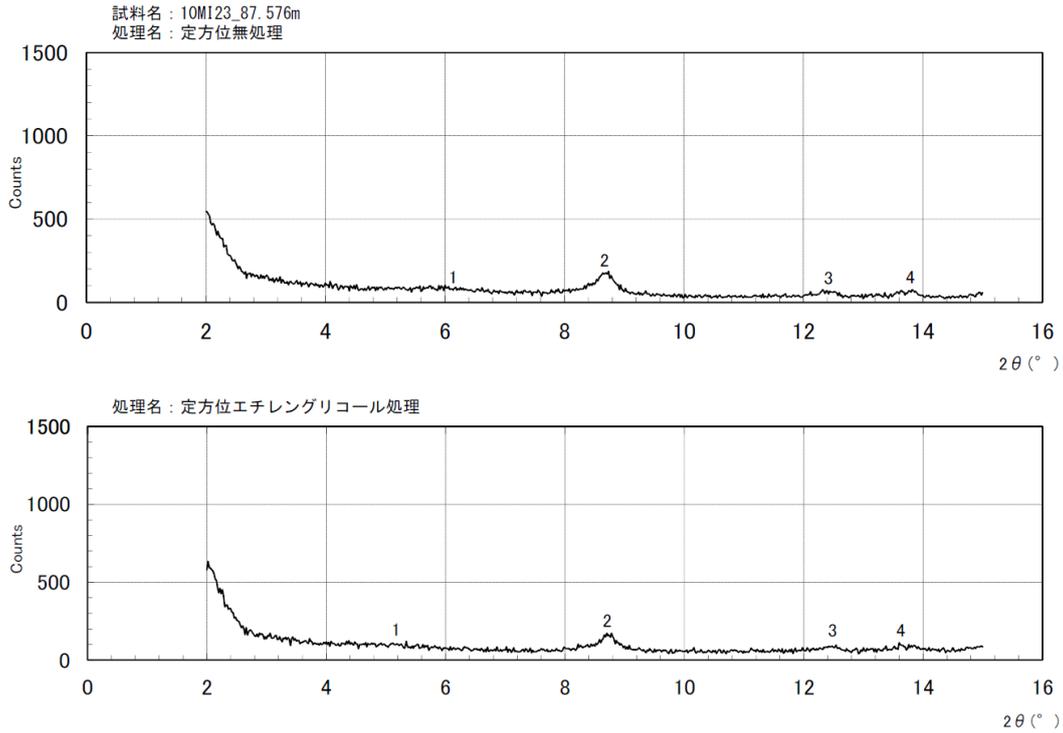


図 5.4-2 X線チャート[エチレングリコール処理] (試料名: 10MI23\_87.576m)  
 (上図) 定方位無処理 (下図) 定方位エチレングリコール処理

表 5.4-3 X線回折強度ピークの一覧表[エチレングリコール処理] (試料名: 10MI23\_87.576m)  
 (上表) 定方位無処理 (下表) 定方位エチレングリコール処理

件名: 岩石試料を用いた室内拡散試験環境の整備と間隙率測定及び鉱物試験													
試料名: 10MI23_87.576m													
No.	鉱物名	2θ (°)	d(Å)	I(count)*1	I/10(%)*2	備考	No.	鉱物名	2θ (°)	d(Å)	I(count)*1	I/10(%)*2	備考
定方位無処理													
1	スメクタイト	6.075	14.537	10	14								
2	雲母粘土鉱物※	8.774	10.070	70	100								
3	緑泥石	12.449	7.104	16	23								
4	カリ長石	13.789	6.417	16	23								
定方位エチレングリコール処理													
1	スメクタイト	5.346	16.518	6	11								
2	雲母粘土鉱物※	8.813	10.026	56	100								
3	緑泥石	12.494	7.079	17	30								
4	カリ長石	13.792	6.415	19	34								

\*1 0.5秒間のカウント数  
 \*2 ピークの最大値に対する相対値

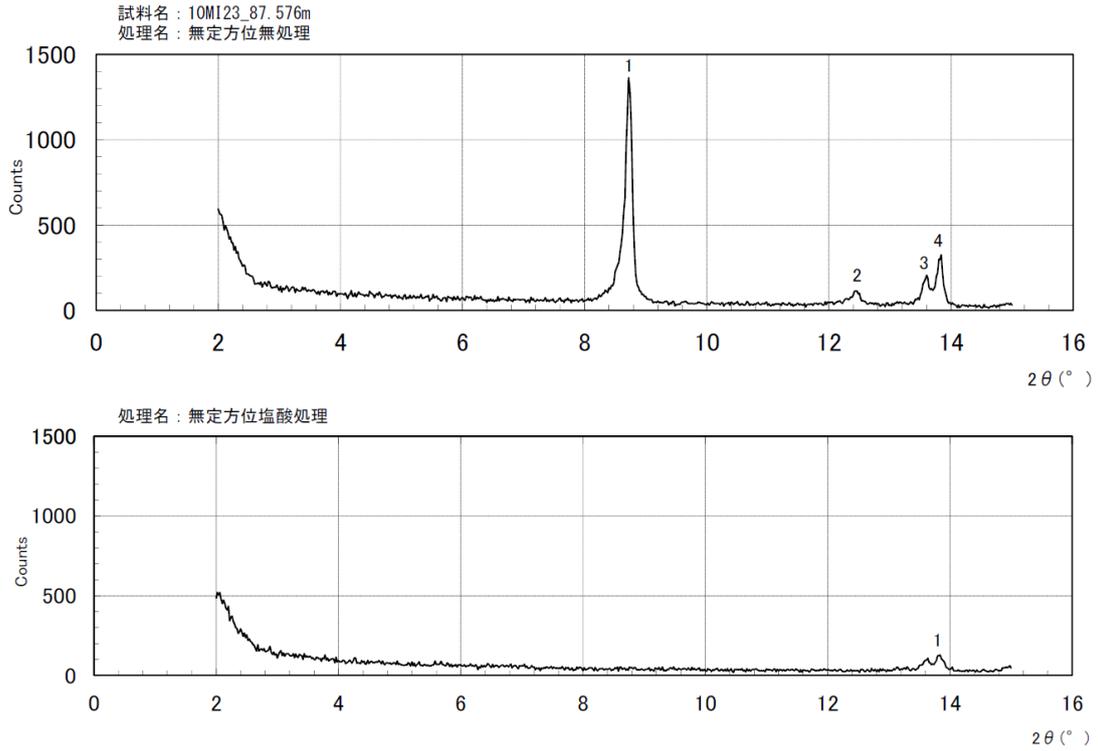


図 5.4-3 X線チャート[塩酸処理] (試料名 : 10MI23\_87.576m)  
(上図) 無定方位無処理 (下図) 無定方位塩酸処理

表 5.4-4 X線回折強度ピークの一覧表[塩酸処理] (試料名 : 10MI23\_87.576m)  
(上表) 無定方位無処理 (下表) 無定方位塩酸処理

件名 : 岩石試料を用いた室内拡散試験環境の整備と間隙率測定及び鉱物試験													
試料名 : 10MI23_87.576m													
ピーク 無定方位無処理													
No.	鉱物名	2θ (°)	d(Å)	I(count)*1	I/10(%)*2	備考	No.	鉱物名	2θ (°)	d(Å)	I(count)*1	I/10(%)*2	備考
1	雲母粘土鉱物※	8.825	10.012	824	23								
2	緑泥石	12.440	7.110	51	1								
3	カリ長石	13.668	6.474	107	3								
4	斜長石	13.884	6.373	186	5								
ピーク 無定方位塩酸処理													
No.	鉱物名	2θ (°)	d(Å)	I(count)*1	I/10(%)*2	備考	No.	鉱物名	2θ (°)	d(Å)	I(count)*1	I/10(%)*2	備考
1	カリ長石	13.758	6.432	47	100								

\*1 0.5秒間のカウント数  
\*2 ピークの最大値に対する相対値

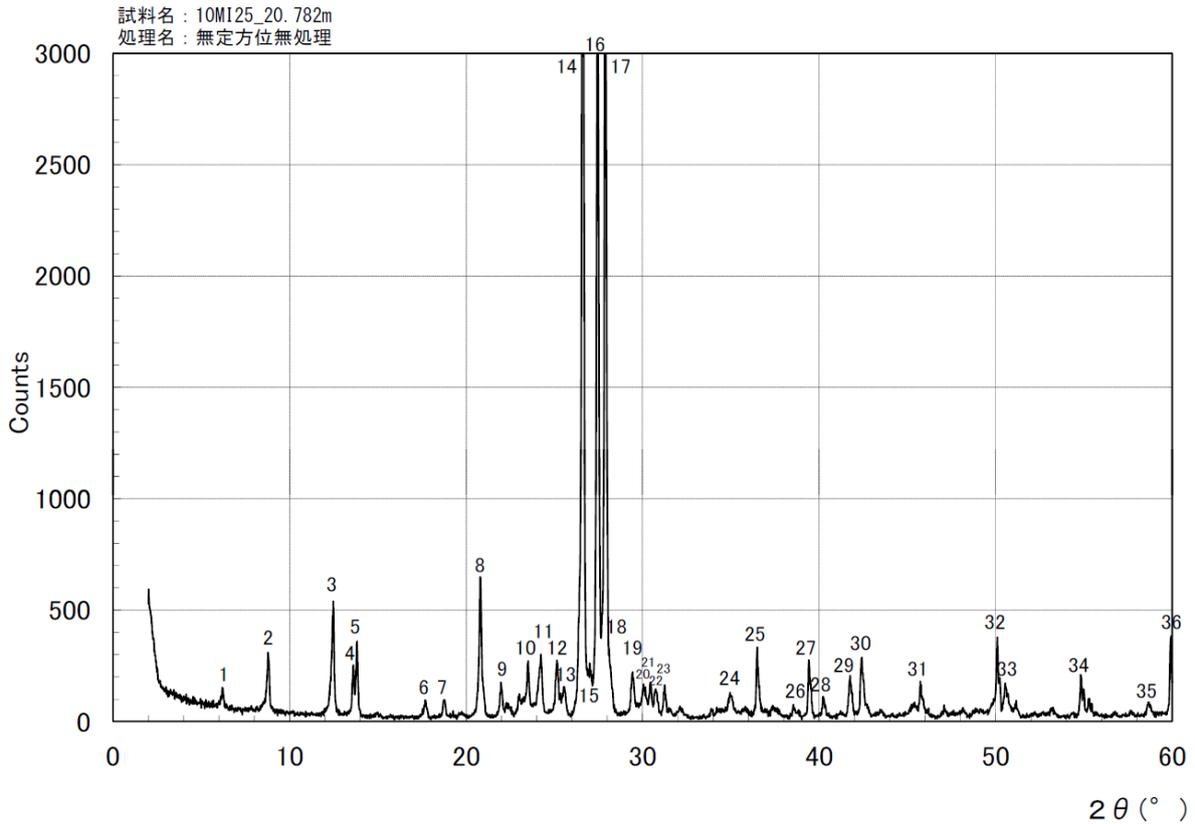


図 5.4-4 X線チャート[無定方位無処理] (試料名 : 10MI25\_20.782m)

表 5.4-5 X線回折強度ピークの一覧表[無定方位無処理] (試料名 : 10MI25\_20.782m)

件名 : 岩石試料を用いた室内拡散試験環境の整備と間隙率測定及び鉱物試験													
試料名 : 10MI25_20.782m													
ピーク 無定方位無処理													
No.	鉱物名	2θ (°)	d(Å)	I(count)*1	I/10(%)*2	備考	No.	鉱物名	2θ (°)	d(Å)	I(count)*1	I/10(%)*2	備考
1	緑泥石	6.200	14.244	54	2		21	斜長石	30.440	2.934	94	3	
2	雲母粘土鉱物※	8.888	9.942	161	5		22	カリ長石	30.700	2.910	73	2	
3	緑泥石	12.532	7.058	324	10		23	斜長石	31.240	2.861	93	3	
4	カリ長石	13.681	6.467	139	4		24	雲母粘土鉱物※	34.920	2.567	53	2	
5	斜長石	13.880	6.375	205	6		25	石英	36.521	2.458	238	7	
6	雲母粘土鉱物※	17.680	5.013	52	2		26	カリ長石	38.540	2.334	37	1	
7	緑泥石	18.740	4.731	53	2		27	石英	39.454	2.282	214	6	
8	石英	20.857	4.256	428	13		28	石英	40.240	2.239	77	2	
9	斜長石	21.980	4.041	96	3		29	カリ長石	41.770	2.161	131	4	
10	斜長石	23.546	3.775	159	5		30	石英	42.431	2.129	217	6	
11	斜長石	24.245	3.668	167	5		31	石英	45.771	1.981	121	4	
12	緑泥石	25.182	3.534	164	5		32	石英	50.119	1.819	267	8	
13	カリ長石	25.520	3.488	80	2		33	カリ長石	50.570	1.803	102	3	
14	石英	26.641	3.343	3357	100		34	石英	54.860	1.672	161	5	
15	カリ長石	26.983	3.302	111	3		35	斜長石・カリ長石	58.640	1.573	51	2	
16	カリ長石	27.481	3.243	2418	72		36	石英	59.944	1.542	323	10	
17	斜長石	27.924	3.193	2630	78								
18	斜長石	28.186	3.164	150	4								
19	方解石	29.460	3.030	124	4								
20	カリ長石・斜長石	30.060	2.970	73	2								

雲母粘土鉱物※:肉眼観察では、主に黒雲母

\*1 0.5秒間のカウント数

\*2 ピークの最大値に対する相対値

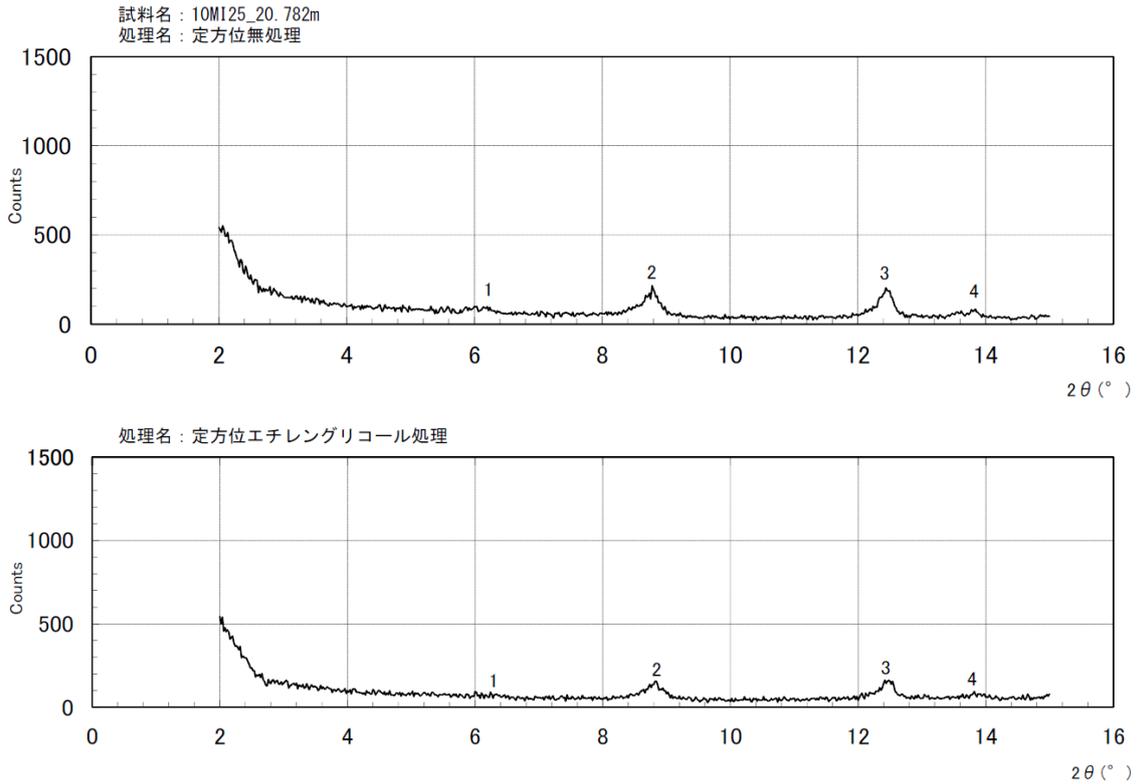


図 5.4-5 X線チャート[エチレングリコール処理] (試料名 : 10MI25\_20.782m)  
 (上図) 定方位無処理 (下図) 定方位エチレングリコール処理

表 5.4-6 X線回折強度ピークの一覧表[エチレングリコール処理] (試料名 : 10MI25\_20.782m)  
 (上表) 定方位無処理 (下表) 定方位エチレングリコール処理

件名 : 岩石試料を用いた室内拡散試験環境の整備と間隙率測定及び鉱物試験													
試料名 : 10MI25_20.782m													
ピーク 定方位無処理													
No.	鉱物名	2θ (°)	d(Å)	I(count)*1	1/I0(%)*2	備考	No.	鉱物名	2θ (°)	d(Å)	I(count)*1	1/I0(%)*2	備考
1	緑泥石	6.236	14.162	15	19								
2	雲母粘土鉱物※	8.852	9.981	72	94								
3	緑泥石	12.499	7.076	77	100								
4	斜長石	13.805	6.409	20	26								
ピーク 定方位エチレングリコール処理													
No.	鉱物名	2θ (°)	d(Å)	I(count)*1	1/I0(%)*2	備考	No.	鉱物名	2θ (°)	d(Å)	I(count)*1	1/I0(%)*2	備考
1	緑泥石	6.358	13.890	4	9								
2	雲母粘土鉱物※	8.887	9.942	45	98								
3	緑泥石	12.514	7.068	46	100								
4	斜長石	13.913	6.360	12	26								

\*1 0.5秒間のカウント数  
 \*2 ピークの最大値に対する相対値

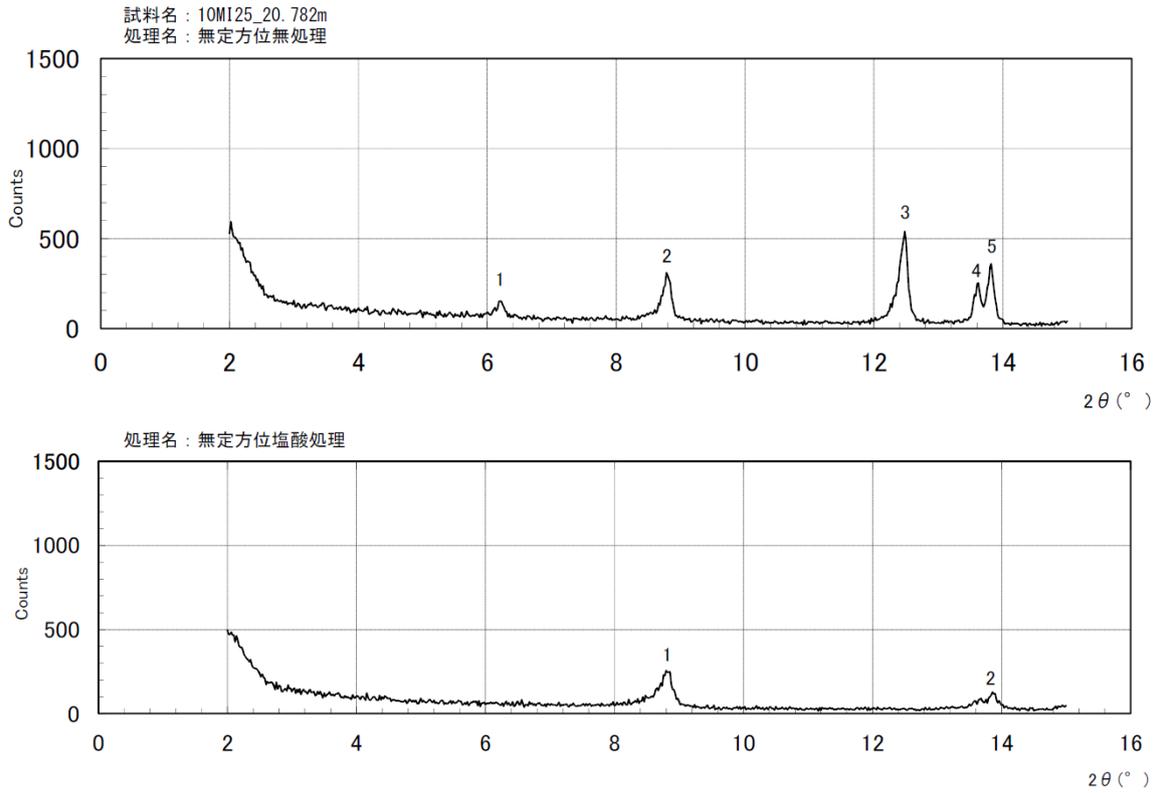


図 5.4-6 X線チャート[塩酸処理] (試料名 : 10MI25\_20.782m)  
(上図) 無定方位無処理 (下図) 無定方位塩酸処理

表 5.4-7 X線回折強度ピークの一覧表[塩酸処理] (試料名 : 10MI25\_20.782m)  
(上表) 無定方位無処理 (下表) 無定方位塩酸処理

件名 : 岩石試料を用いた室内拡散試験環境の整備と間隙率測定及び鉱物試験													
試料名 : 10MI25_20.782m													
ピーク 無定方位無処理													
No.	鉱物名	2θ (°)	d(Å)	I(count)*1	I/10(%)*2	備考	No.	鉱物名	2θ (°)	d(Å)	I(count)*1	I/10(%)*2	備考
1	緑泥石	6.200	14.244	54	2								
2	雲母粘土鉱物※	8.888	9.942	161	5								
3	緑泥石	12.532	7.058	324	10								
4	カリ長石	13.681	6.467	139	4								
5	斜長石	13.880	6.375	205	6								
ピーク 無定方位塩酸処理													
No.	鉱物名	2θ (°)	d(Å)	I(count)*1	I/10(%)*2	備考	No.	鉱物名	2θ (°)	d(Å)	I(count)*1	I/10(%)*2	備考
1	雲母粘土鉱物※	8.865	9.967	81	100								
2	斜長石	13.854	6.387	38	47								

\*1 0.5秒間のカウント数  
\*2 ピークの最大値に対する相対値

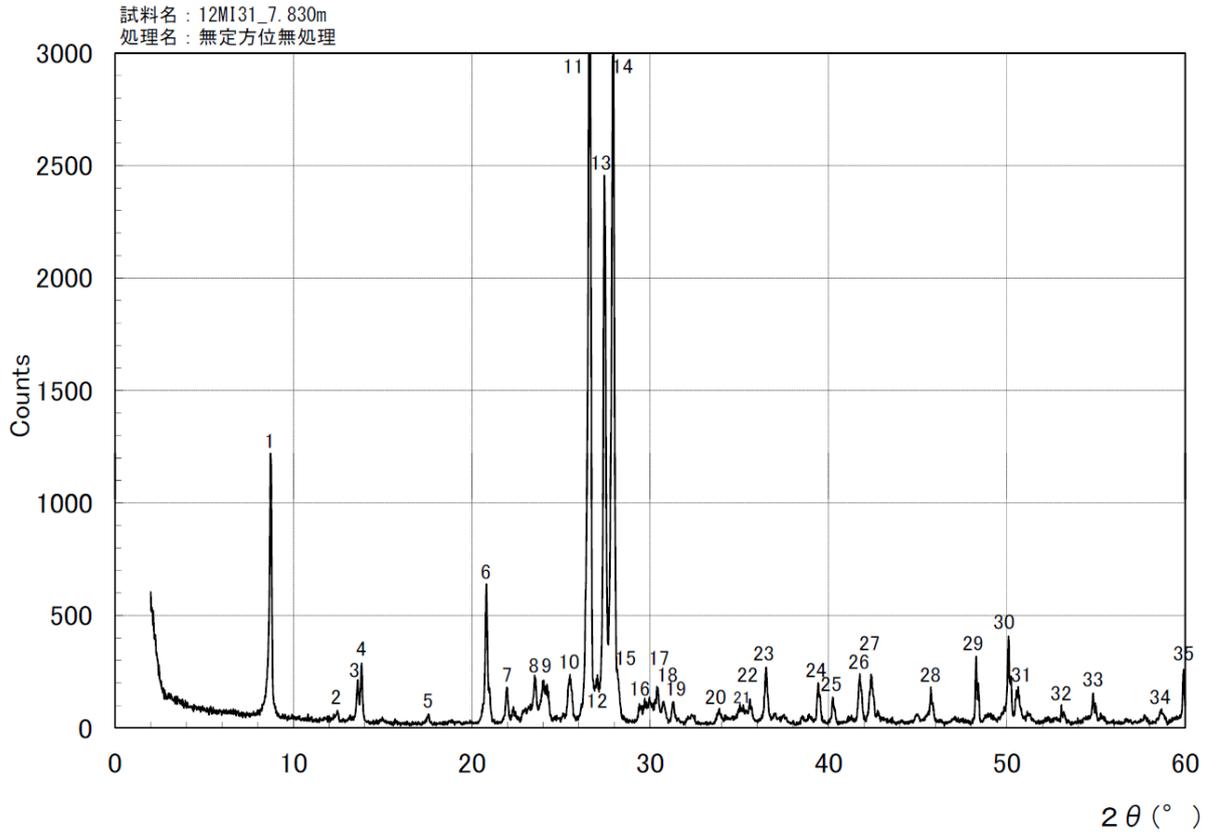


図 5.4-7 X線チャート[無定方位無処理] (試料名 : 12MI31\_7.830m)

表 5.4-8 X線回折強度ピークの一覧表[無定方位無処理] (試料名 : 12MI31\_7.830m)

件名 : 岩石試料を用いた室内拡散試験環境の整備と間隙率測定及び鉱物試験													
試料名 : 12MI31_7.830m													
ピーク 無定方位無処理													
No.	鉱物名	2θ (°)	d(Å)	I(count)*1	I/10(%)*2	備考	No.	鉱物名	2θ (°)	d(Å)	I(count)*1	I/10(%)*2	備考
1	雲母粘土鉱物※	8.825	10.012	736	25		21	雲母粘土鉱物※	35.220	2.546	37	1	
2	緑泥石	12.480	7.087	27	1		22	雲母粘土鉱物※	35.580	2.521	69	2	
3	カリ長石	13.672	6.472	114	4		23	石英	36.518	2.459	178	6	
4	斜長石	13.881	6.375	164	6		24	石英	39.448	2.282	143	5	
5	雲母粘土鉱物※	17.540	5.052	30	1		25	石英	40.277	2.237	95	3	
6	石英	20.863	4.254	417	14		26	カリ長石	41.770	2.161	158	5	
7	斜長石	22.012	4.035	108	4		27	石英	42.407	2.130	147	5	
8	斜長石	23.580	3.770	129	4		28	石英	45.771	1.981	107	4	
9	斜長石	24.053	3.697	115	4		29	斜長石	48.308	1.883	245	8	
10	カリ長石	25.534	3.486	117	4		30	石英	50.116	1.819	302	10	
11	石英	26.634	3.344	2887	100		31	カリ長石	50.595	1.803	105	4	
12	カリ長石	27.010	3.299	110	4		32	斜長石	53.060	1.725	48	2	
13	カリ長石	27.473	3.244	1781	62		33	石英	54.860	1.672	104	4	
14	斜長石	27.946	3.190	2217	77		34	斜長石・カリ長石	58.640	1.573	45	2	
15	カリ長石	28.226	3.159	133	5		35	石英	59.934	1.542	201	7	
16	カリ長石	29.680	3.008	61	2								
17	斜長石	30.408	2.937	110	4								
18	カリ長石	30.740	2.906	63	2								
19	斜長石	31.280	2.857	68	2								
20	斜長石	33.860	2.645	39	1								

雲母粘土鉱物※:肉眼観察では、主に黒雲母

\*1 0.5秒間のカウント数  
\*2 ピークの最大値に対する相対値

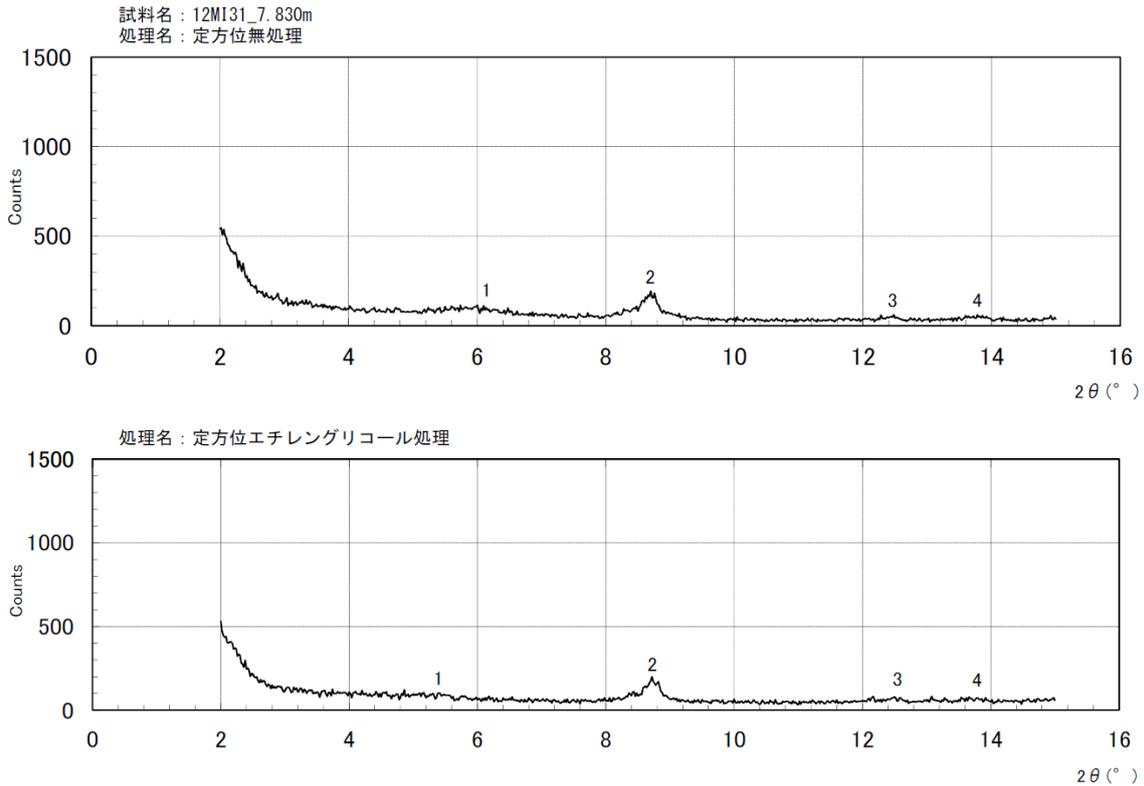


図 5.4-8 X線チャート[エチレングリコール処理] (試料名: 12MI31\_7.830m)  
 (上図) 定方位無処理 (下図) 定方位エチレングリコール処理

表 5.4-9 X線回折強度ピークの一覧表[エチレングリコール処理] (試料名: 12MI31\_7.830m)  
 (上表) 定方位無処理 (下表) 定方位エチレングリコール処理

件名: 岩石試料を用いた室内拡散試験環境の整備と間隙率測定及び鉱物試験														
試料名: 12MI31_7.830m														
ピーク														
定方位無処理														
No.	鉱物名	2θ (°)	d(Å)	I(count)*1	I/10(%)*2	備考	No.	鉱物名	2θ (°)	d(Å)	I(count)*1	I/10(%)*2	備考	
1	スメクタイト	6.104	14.467	19	29									
2	雲母粘土鉱物※	8.773	10.071	65	100									
3	緑泥石	12.469	7.093	9	14									
4	斜長石	13.784	6.419	9	14									
ピーク														
定方位エチレングリコール処理														
No.	鉱物名	2θ (°)	d(Å)	I(count)*1	I/10(%)*2	備考	No.	鉱物名	2θ (°)	d(Å)	I(count)*1	I/10(%)*2	備考	
1	スメクタイト	5.452	16.196	10	15									
2	雲母粘土鉱物※	8.813	10.026	66	100									
3	緑泥石	12.445	7.107	11	17									
4	斜長石	13.774	6.424	11	17									

\*1 0.5秒間のカウント数  
 \*2 ピークの最大値に対する相対値

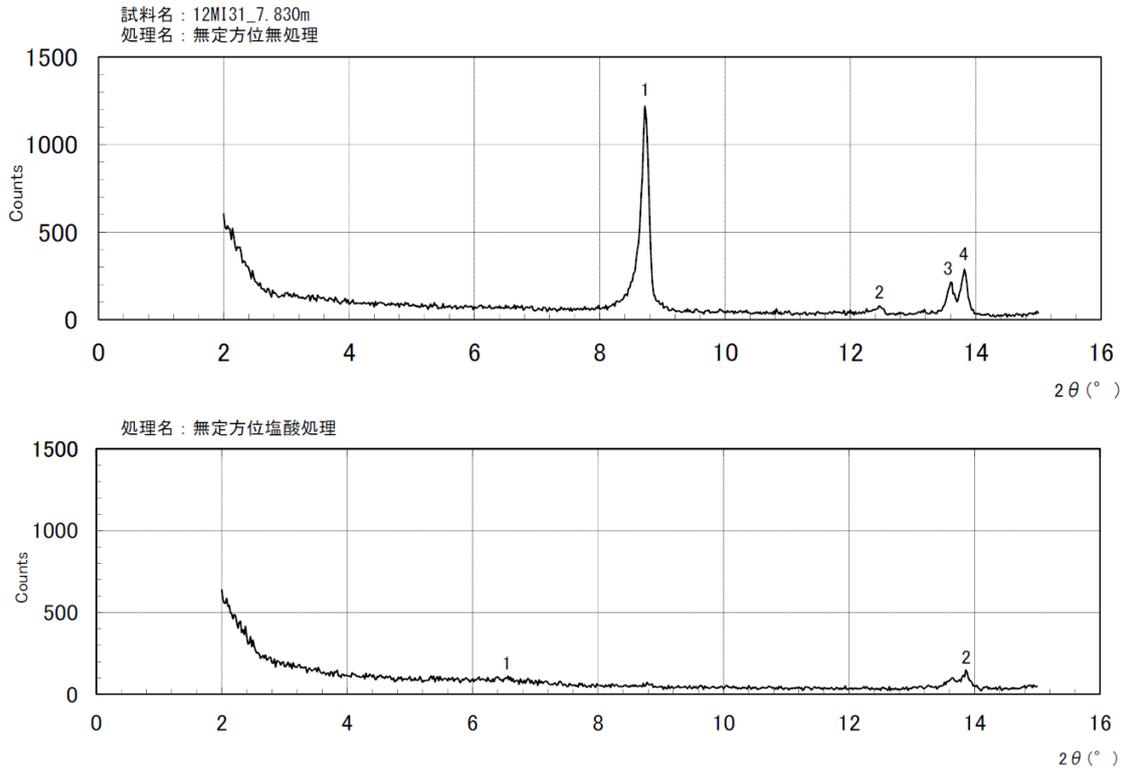


図 5.4-9 X線チャート[塩酸処理] (試料名 : 12MI31\_7.830m)  
(上図) 無定方位無処理 (下図) 無定方位塩酸処理

表 5.4-10 X線回折強度ピークの一覧表[塩酸処理] (試料名 : 12MI31\_7.830m)  
(上表) 無定方位無処理 (下表) 無定方位塩酸処理

件名 : 岩石試料を用いた室内拡散試験環境の整備と間隙率測定及び鉱物試験													
試料名 : 12MI31_7.830m													
ピーク 無定方位無処理													
No.	鉱物名	2θ (°)	d(Å)	I(count)*1	I/10(%)*2	備考	No.	鉱物名	2θ (°)	d(Å)	I(count)*1	I/10(%)*2	備考
1	雲母粘土鉱物※	8.825	10.012	736	25								
2	緑泥石	12.480	7.087	27	1								
3	カリ長石	13.672	6.472	114	4								
4	斜長石	13.881	6.375	164	6								
ピーク 無定方位塩酸処理													
No.	鉱物名	2θ (°)	d(Å)	I(count)*1	I/10(%)*2	備考	No.	鉱物名	2θ (°)	d(Å)	I(count)*1	I/10(%)*2	備考
1	スメクタイト	6.550	13.484	15	37								
2	カリ長石	13.744	6.438	41	100								

\*1 0.5秒間のカウント数  
\*2 ピークの最大値に対する相対値

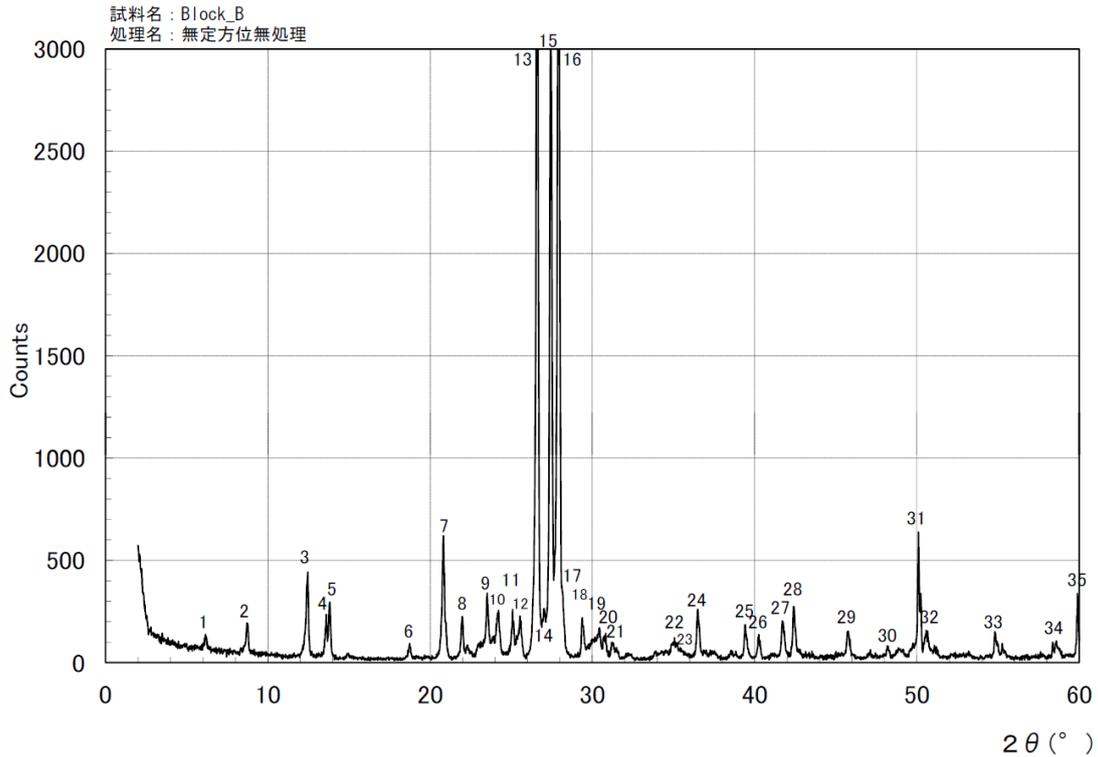


図 5.4-10 X線チャート[無定方位無処理] (試料名 : Block\_B)

表 5.4-11 X線回折強度ピークの一覧表[無定方位無処理] (試料名 : Block\_B)

件名 : 岩石試料を用いた室内拡散試験環境の整備と間隙率測定及び鉱物試験													
試料名 : Block_B													
No.	鉱物名	2θ (°)	d(Å)	I(count)*1	I/10(%)*2	備考	No.	鉱物名	2θ (°)	d(Å)	I(count)*1	I/10(%)*2	備考
1	スマクタイト・緑泥石	6.200	14.244	46	1		21	斜長石	31.200	2.864	48	1	
2	雲母粘土鉱物※	8.740	10.109	97	3		22	雲母粘土鉱物※	35.060	2.557	47	1	
3	緑泥石	12.507	7.072	263	8		23	磁鉄鉱※3	35.400	2.534	26	1	
4	カリ長石	13.666	6.474	118	4		24	石英	36.519	2.458	188	6	
5	斜長石	13.874	6.378	178	5		25	石英	39.443	2.283	129	4	
6	緑泥石	18.740	4.731	47	1		26	石英	40.240	2.239	86	3	
7	石英	20.860	4.255	403	12		27	カリ長石	41.746	2.162	148	5	
8	斜長石	22.019	4.034	138	4		28	石英	42.437	2.128	204	6	
9	斜長石	23.562	3.773	196	6		29	石英	45.763	1.981	109	3	
10	斜長石	24.212	3.673	132	4		30	斜長石	48.180	1.887	48	1	
11	緑泥石	25.130	3.541	122	4		31	石英	50.123	1.818	473	15	
12	カリ長石	25.568	3.481	114	4		32	カリ長石	50.540	1.804	92	3	
13	石英	26.626	3.345	3162	97		33	石英	54.849	1.672	113	3	
14	カリ長石	27.028	3.296	124	4		34	斜長石・カリ長石	58.600	1.574	52	2	
15	カリ長石	27.465	3.245	2326	72		35	石英	59.934	1.542	269	8	
16	斜長石	27.948	3.190	3250	100								
17	斜長石	28.206	3.161	193	6								
18	方解石	29.418	3.034	137	4								
19	斜長石	30.420	2.936	90	3								
20	カリ長石	30.720	2.908	69	2								

雲母粘土鉱物※:肉眼観察では、主に黒雲母

\*1 0.5秒間のカウント数  
\*2 ピークの最大値に対する相対値

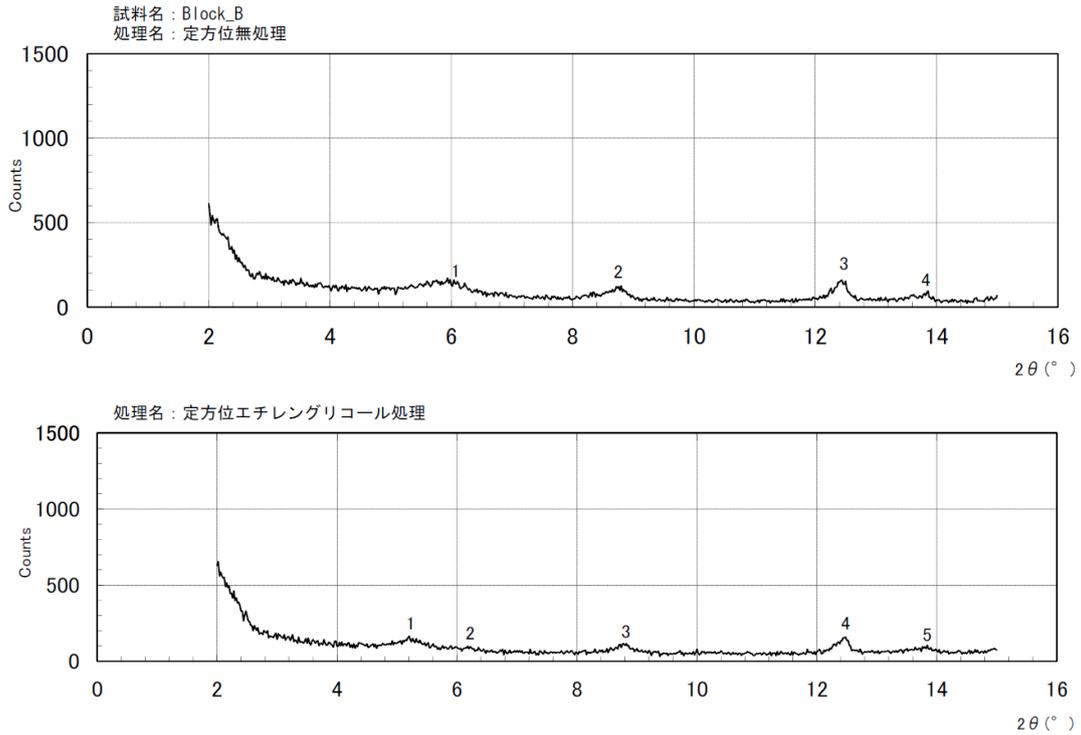


図 5.4-11 X線チャート[エチレングリコール処理] (試料名: Block\_B)  
 (上図) 定方位無処理 (下図) 定方位エチレングリコール処理

表 5.4-12 X線回折強度ピークの一覧表[エチレングリコール処理] (試料名: Block\_B)  
 (上表) 定方位無処理 (下表) 定方位エチレングリコール処理

件名: 岩石試料を用いた室内拡散試験環境の整備と間隙率測定及び鉱物試験														
試料名: Block_B														
No.	鉱物名	2θ (°)	d(Å)	I(count)*1	I/10(%)*2	備考	No.	鉱物名	2θ (°)	d(Å)	I(count)*1	I/10(%)*2	備考	
														ピーク
定方位無処理														
1	スメクタイト・緑泥石	6.010	14.694	41	79									
2	雲母粘土鉱物※	8.786	10.057	33	63									
3	緑泥石	12.474	7.090	52	100									
4	カリ長石	13.789	6.417	20	38									
定方位エチレングリコール処理														
1	スメクタイト	5.215	16.932	30	65									
2	緑泥石	6.000	14.718	8	17									
3	雲母粘土鉱物※	8.765	10.081	29	63									
4	緑泥石	12.413	7.125	46	100									
5	カリ長石	13.720	6.449	20	43									

\*1 0.5秒間のカウント数  
 \*2 ピークの最大値に対する相対値

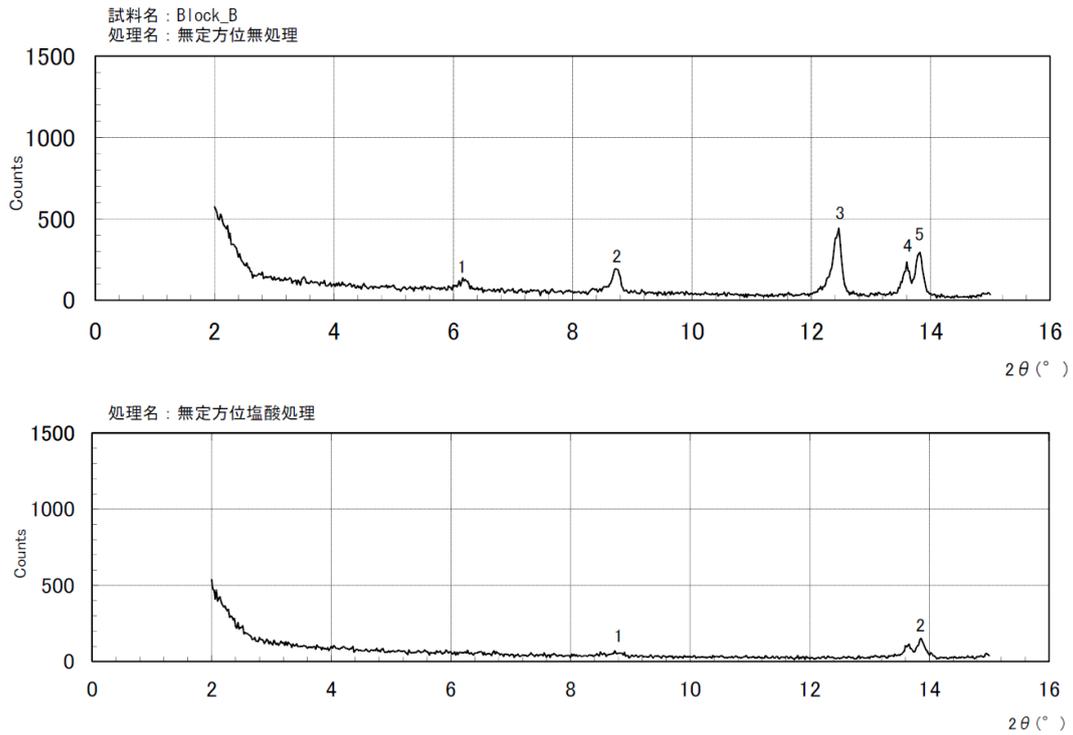


図 5.4-12 X線チャート[塩酸処理] (試料名: Block\_B)  
(上図) 無定方位無処理 (下図) 無定方位塩酸処理

表 5.4-13 X線回折強度ピークの一覧表[塩酸処理] (試料名: Block\_B)  
(上表) 無定方位無処理 (下表) 無定方位塩酸処理

件名: 岩石試料を用いた室内拡散試験環境の整備と間隙率測定及び鉱物試験													
試料名: Block_B													
ピーク													
No.	鉱物名	2θ (°)	d(Å)	I(count)*1	I/10(%)*2	備考	No.	鉱物名	2θ (°)	d(Å)	I(count)*1	I/10(%)*2	備考
1	スマクタイト・緑泥石	6.200	14.244	46	1								
2	雲母粘土鉱物※	8.740	10.109	97	3								
3	緑泥石	12.507	7.072	263	8								
4	カリ長石	13.666	6.474	118	4								
5	斜長石	13.874	6.378	178	5								
ピーク													
No.	鉱物名	2θ (°)	d(Å)	I(count)*1	I/10(%)*2	備考	No.	鉱物名	2θ (°)	d(Å)	I(count)*1	I/10(%)*2	備考
1	雲母粘土鉱物※	8.811	10.029	11	22								
2	斜長石	13.850	6.389	51	100								

\*1 0.5秒間のカウント数  
\*2 ピークの最大値に対する相対値

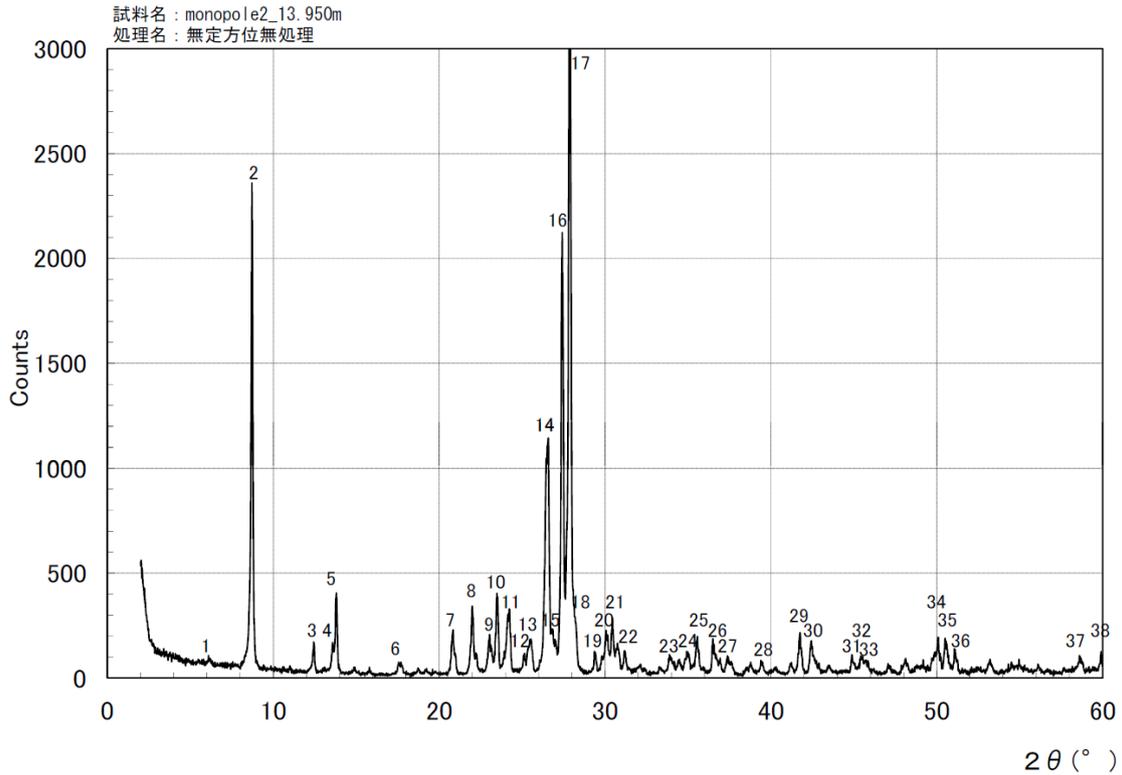


図 5.4-13 X線チャート[無定方位無処理] (試料名 : monopole2)

表 5.4-14 X線回折強度ピークの一覧表[無定方位無処理] (試料名 : monopole2)

件名 : 岩石試料を用いた室内拡散試験環境の整備と間隙率測定及び鉱物試験													
試料名 : monopole2_13.950m													
No.	鉱物名	2θ (°)	d(Å)	I(count)*1	I/10(%)*2	備考	No.	鉱物名	2θ (°)	d(Å)	I(count)*1	I/10(%)*2	備考
1	緑泥石	6.140	14.383	17	1		21	斜長石	30.466	2.932	155	6	
2	雲母粘土鉱物※	8.823	10.015	1300	52		22	斜長石	31.180	2.866	67	3	
3	緑泥石	12.513	7.068	84	3		23	斜長石	33.880	2.644	53	2	
4	カリ長石	13.659	6.478	83	3		24	雲母粘土鉱物※	34.980	2.563	53	2	
5	斜長石	13.861	6.384	235	9		25	雲母粘土鉱物※	35.569	2.522	107	4	
6	雲母粘土鉱物※	17.580	5.041	37	1		26	石英	36.532	2.458	113	4	
7	石英	20.873	4.252	131	5		27	斜長石・カリ長石	37.360	2.405	50	2	
8	斜長石	22.041	4.030	204	8		28	石英	39.440	2.283	41	2	
9	カリ長石	23.107	3.846	107	4		29	カリ長石	41.760	2.161	134	5	
10	斜長石	23.530	3.778	245	10		30	石英	42.443	2.128	115	5	
11	斜長石	24.218	3.672	193	8		31	カリ長石	44.880	2.018	65	3	
12	緑泥石	25.120	3.542	52	2		32	カリ長石	45.440	1.994	53	2	
13	カリ長石	25.499	3.491	102	4		33	石英	45.720	1.983	43	2	
14	石英	26.542	3.356	727	29		34	石英	50.092	1.820	105	4	
15	カリ長石	26.868	3.316	111	4		35	カリ長石	50.540	1.804	114	5	
16	カリ長石	27.451	3.247	1462	58		36	斜長石	51.119	1.785	89	4	
17	斜長石	27.902	3.195	2520	100		37	斜長石・カリ長石	58.640	1.573	51	2	
18	斜長石	28.246	3.157	150	6		38	石英	59.900	1.543	65	3	
19	方解石	29.380	3.038	68	3								
20	斜長石・カリ長石	30.124	2.964	115	5								

雲母粘土鉱物※:肉眼観察では、主に黒雲母

\*1 0.5秒間のカウント数  
\*2 ピークの最大値に対する相対値

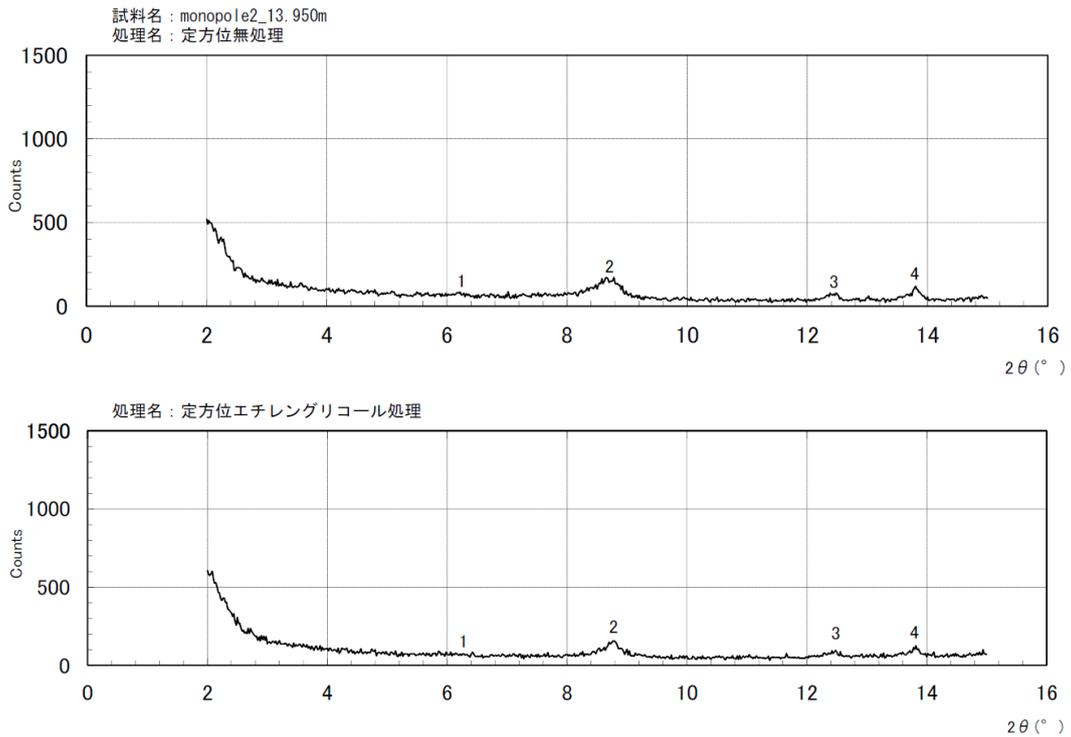


図 5.4-14 X線チャート[エチレングリコール処理] (試料名 : monopole2)  
 (上図) 定方位無処理 (下図) 定方位エチレングリコール処理

表 5.4-15 X線回折強度ピークの一覧表[エチレングリコール処理] (試料名 : monopole2)  
 (上表) 定方位無処理 (下表) 定方位エチレングリコール処理

件名 : 岩石試料を用いた室内拡散試験環境の整備と間隙率測定及び鉱物試験													
試料名 : monopole2_13.950m													
No.	鉱物名	2θ (°)	d(Å)	I(count)*1	I/10(%)*2	備考	定方位無処理						
							No.	鉱物名	2θ (°)	d(Å)	I(count)*1	I/10(%)*2	備考
1	緑泥石	6.261	14.107	5	8								
2	雲母粘土鉱物※	8.750	10.098	65	100								
3	緑泥石	12.468	7.094	16	25								
4	斜長石	13.849	6.389	27	42								
No.	鉱物名	2θ (°)	d(Å)	I(count)*1	I/10(%)*2	備考	定方位エチレングリコール処理						
							No.	鉱物名	2θ (°)	d(Å)	I(count)*1	I/10(%)*2	備考
1	緑泥石	6.095	14.490	5	11								
2	雲母粘土鉱物※	8.850	9.984	47	100								
3	緑泥石	12.509	7.070	17	36								
4	斜長石	13.859	6.385	25	53								

\*1 0.5秒間のカウント数  
 \*2 ピークの最大値に対する相対値

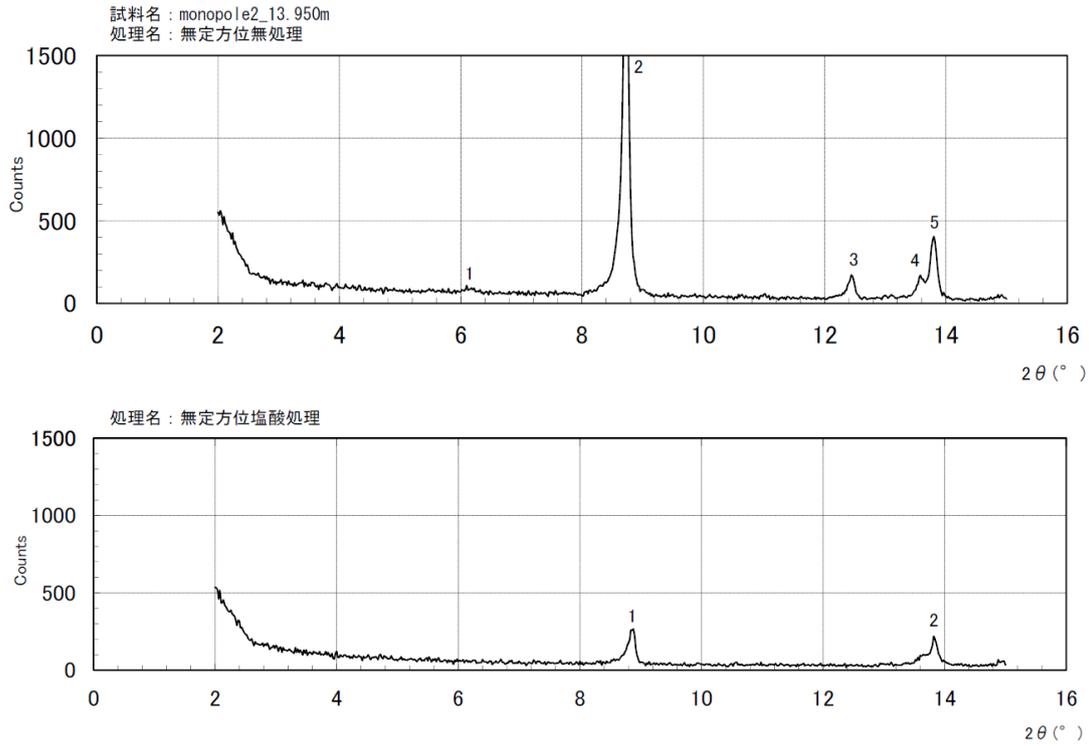


図 5.4-15 X線チャート[塩酸処理] (試料名 : monopole2)  
(上図) 無定方位無処理 (下図) 無定方位塩酸処理

表 5.4-16 X線回折強度ピークの一覧表[塩酸処理] (試料名 : monopole2)  
(上表) 無定方位無処理 (下表) 無定方位塩酸処理

件名 : 岩石試料を用いた室内拡散試験環境の整備と間隙率測定及び鉱物試験													
試料名 : monopole2_13.950m													
ピーク 無定方位無処理													
No.	鉱物名	2θ (°)	d(Å)	I(count)*1	I/I0(%)*2	備考	No.	鉱物名	2θ (°)	d(Å)	I(count)*1	I/I0(%)*2	備考
1	緑泥石	6.140	14.383	17	1								
2	雲母粘土鉱物※	8.823	10.015	1300	52								
3	緑泥石	12.513	7.068	84	3								
4	カリ長石	13.659	6.478	83	3								
5	斜長石	13.861	6.384	235	9								
ピーク 無定方位塩酸処理													
No.	鉱物名	2θ (°)	d(Å)	I(count)*1	I/I0(%)*2	備考	No.	鉱物名	2θ (°)	d(Å)	I(count)*1	I/I0(%)*2	備考
1	雲母粘土鉱物※	8.921	9.905	65	100								
2	斜長石	13.851	6.388	60	92								

\*1 0.5秒間のカウント数  
\*2 ピークの最大値に対する相対値

## 6.まとめ

物質移動に関する調査研究の一環として、割れ目の地質学的特徴と物質移動に関するパラメータ値の関係の把握ならびに、試験に用いた試料のサイズによる試験結果への影響の把握、さらに数値解析によって取得される拡散係数などのパラメータの妥当性の検証を行うことを目的とした試験を計画した。本報告書は、これらの試験に先立ち実施した以下の項目について取りまとめたものである。

- ・ 分類された割れ目タイプの地質学的特徴と物質移動に関するパラメータ値の関係を把握することを目的として実施する透過拡散試験に用いる試料の作製
- ・ 試験試料のサイズ依存性を確認することを目的として実施する岩石ブロックを用いた透過拡散試験環境の整備
- ・ 拡散試験の解析に用いるパラメータ値の取得のための間隙率測定結果と X 線回折分析結果

### (1) 透過拡散試験に用いる試料の作製

研究坑道において実施されたボーリング調査によって採取したコア、岩石ブロックの残試料およびグリムゼル原位置試験場<sup>10)</sup>において実施されたボーリング調査によって採取したコアから、透過拡散試験に用いる試料を 30 試料作製した。研究坑道において実施されたボーリング調査によって採取したコアについては、割れ目面の特徴を残すため、割れ目表面を研磨せずに割れ目表面形状を残すように試料を作製した。今後、作製した試料を用いた透過拡散試験を開始する予定である。

### (2) 岩石ブロックを用いた拡散試験環境の整備

研究所の深度 500m 研究アクセス北坑道より採取した岩石から、30cm×30cm×20cm の岩石ブロックを 2 試料作製し、岩石ブロック上に拡散試験のためのトレーサー添加孔とモニタリング孔を掘削した。成形した岩石ブロックを、浸水容器に設置し、試験装置の組立てを行った。現在、岩石を湿潤させるため、純水に浸水している。今後、この岩石ブロックを用いた拡散試験を開始する予定である。

### (3) 間隙率測定の実施

物質移動解析に必要なパラメータである間隙率について、試験に供する試料の大きさ、形状の違いが間隙率測定に与える影響の確認や、割れ目面からの距離に応じた間隙率の変化を把握することを目的に、岩石ブロックの残試料 (Block\_B, Block\_C)、12MI31 号孔より採取したコア (12MI31\_7.830m)、および monopole2 のコア (monopole2\_13.950m) を対象に、水銀圧入法<sup>11)</sup>および水飽和法<sup>11)</sup>による間隙率測定を行った。12MI31\_7.830m の試料の間隙率測定結果では、割れ目面に近いほど間隙率が高く、割れ目面より離れるほど低下する傾向が確認された。

### (4) X 線回折分析

拡散試験に用いる岩石試料の鉱物組成の把握を目的に、X 線回折分析による鉱物同定を行った。X 線回折分析には岩石ブロックの残試料および、12MI31 号孔より採取したコア (12MI31\_7.830m)、monopole2 のコア (monopole2\_13.950m) を対象に、X 線回折分析試料を作製した。X 線回折分析の結果、石英、カリ長石、斜長石、黒雲母粘土鉱物、スメクタイト、緑泥石および方解石が同定された。これらの成果は今後実施する収着試験の考察などに用いる予定である。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり，地層処分基盤研究開発ユニット 核種移行研究グループ(現所属：核燃料サイクル工学研究所 環境技術開発センター 核物質移行研究グループ)の館サブリーダーに，ご助言・ご協力をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 原子力委員会：“原子力政策大綱(平成 17 年 10 月 11 日)”，(2005).
- 2) 日本原子力研究開発機構：“超深地層研究所地層科学研究基本計画”，日本原子力研究開発機構，JAEA-Review 2010-016 (2010),37p.
- 3) 國丸貴紀，見掛信一郎，西尾和久，鶴田忠彦，松岡稔幸，石橋正祐紀，窪島光志，竹内竜史，水野崇，佐藤稔紀，真田祐幸，丹野剛男，引間亮一，湯口貴史，笹尾英嗣，尾方伸久，濱克宏，小出馨，池田幸喜，山本勝，島田顕臣，松井裕哉，伊藤洋昭，杉原弘造：“超深地層研究所計画 年度計画書(2012 年度)”，日本原子力研究開発機構，JAEA-Review 2012-028 (2012),31p.
- 4) 國丸貴紀，見掛信一郎，西尾和久，鶴田忠彦，松岡稔幸，早野明，竹内竜史，三枝博光，大山卓也，水野崇，丹野剛男，平野享，竹内真司，尾方伸久，濱克宏，池田幸喜，山本勝，弥富洋介，島田顕臣，松井裕哉，伊藤洋昭，杉原弘造：“超深地層研究所計画 年度報告書(2009 年度)”，日本原子力研究開発機構，JAEA-Review 2011-007 (2011),145p.
- 5) 核燃料サイクル開発機構：“釜石原位置試験総括報告書”，核燃料サイクル開発機構，JNC TN7410 99-001 (1999),348p.
- 6) 國丸貴紀，森川佳太，館幸男，久野義夫，細谷真一，下田紗音子，加藤博康，中澤俊之，生瀬博之，久保田政子：“花崗岩試料を用いた収着・拡散試験および間隙率測定”，日本原子力研究開発機構，JAEA-Data/Code 2012-013 (2012),96p.
- 7) 國丸貴紀，見掛信一郎，西尾和久，鶴田忠彦，松岡稔幸，石橋正祐紀，上野孝志，徳安真吾，大丸修二，竹内竜史，三枝博光，尾上博則，武田匡樹，狩野智之，水野崇，萩原大樹，佐藤稔紀，真田祐幸，丹野剛男，引間亮一，森川佳太，湯口貴史，尾方伸久，濱克宏，池田幸喜，山本勝，島田顕臣，松井裕哉，伊藤洋昭，杉原弘造：“超深地層研究所計画 年度報告書(2010 年度)”，日本原子力研究開発機構，JAEA-Review 2012-020 (2012),178p.
- 8) 佐藤治夫，館幸男，澁谷朝紀：“亀裂性結晶質岩におけるイオンのマトリックス拡散”，サイクル機構技報，No.4 (1999.9)，pp.75-85 (1999).
- 9) 喜多治之，岩井孝幸，中島悟：“花崗岩および凝灰岩間隙水中のイオンの拡散係数の測定”，応用地質，Vol.30，No.2，pp.26-32 (1989).
- 10) GRIMSEL TEST SITE, Long Time Diffusion (LTD) - Introduction：  
<http://www.grimself.com/gts-phase-vi/ltd/ltd-introduction> (2014.04.07 アクセス)
- 11) 山口徹治，磯部博志，中山真一：“花崗岩内の微小間隙構造の解析”，放射性廃棄物研究，vol.3 (2)，pp.99-107 (1997).
- 12) 牧野仁史，澤田淳，前川恵輔，柴田雅博，笹本広，吉川英樹，若杉圭一郎，小尾繁，濱克宏，操上広志，國丸貴紀，石井英一，竹内竜史，中野勝志，三枝博光，竹内真司，岩月輝希，太田久仁雄，瀬尾俊弘：“地質環境の調査から物質移行解析にいたる一連の調査・解析技術-2つの深地層の研究施設計画の地上からの調査研究段階(第 1 段階)における地質環境情報に基づく検討-”，サイクル機構技報，JNC TN1400 2005-021 (2005).
- 13) 石橋正祐紀，笹尾英嗣，尾上博則：“深部結晶質岩における割れ目の地質学的特徴と水理学的特徴”，応用地質学会，平成 24 年度 研究発表会講演論文集 (2012).
- 14) 高橋学，林為人，西田薫，養由紀夫：“水銀圧入式ポロシメーターによる岩石の内部空隙の寸法分布測定”，土と基礎，Vol. 47，No. 4，pp.30-32，(1999).
- 15) 島津製作所：<http://www.an.shimadzu.co.jp/powder/products/03porosi/spec.htm>  
(2014.04.03 アクセス)

# 国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

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
物質の量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m <sup>2</sup>
体積	立法メートル	m <sup>3</sup>
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s <sup>2</sup>
波数	毎メートル	m <sup>-1</sup>
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m <sup>2</sup>
比体積	立方メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 <sup>(a)</sup> , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>
屈折率 <sup>(b)</sup>	(数字の)	1
比透磁率 <sup>(b)</sup>	(数字の)	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。  
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表される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
平面角	ラジアン <sup>(b)</sup>	rad	1 <sup>(b)</sup>
立体角	ステラジアン <sup>(b)</sup>	sr <sup>(c)</sup>	1 <sup>(b)</sup>
周波数	ヘルツ <sup>(d)</sup>	Hz	s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N	m kg s <sup>-2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s
電荷, 電気量	クーロン	C	s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	Vs
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(e)</sup>	°C	K
光照射度	ルーメン	lm	cd sr <sup>(c)</sup>
放射線量	グレイ	Gy	J/kg
放射性核種の放射能 <sup>(f)</sup>	ベクレル <sup>(d)</sup>	Bq	s <sup>-1</sup>
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト <sup>(g)</sup>	Sv	J/kg
酸素活性	カタール	kat	s <sup>-1</sup> mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。  
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。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である数字の1は明示されない。  
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。  
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。  
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。  
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。  
 (g) 単位シーベルト (PV.2002.70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位	
	名称	記号
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s
表面張力	ニュートンメートル	N m
角速度	ニュートン毎メートル	N/m
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s <sup>2</sup>
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m <sup>2</sup>
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>
電荷密度	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>
電表面電荷	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>
電束密度, 電気変位	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>
誘電率	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>
透磁率	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎キログラム	C/kg
吸収線量率	ジュール毎キログラム	C/kg
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s
放射線輝度	グレイ毎秒	Gy/s
酵素活性濃度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m <sup>2</sup> sr)
	カタール毎立方メートル	kat/m <sup>3</sup>

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 <sup>24</sup>	ヨタ	Y	10 <sup>1</sup>	デシ	d
10 <sup>21</sup>	ゼタ	Z	10 <sup>2</sup>	センチ	c
10 <sup>18</sup>	エクサ	E	10 <sup>3</sup>	ミリ	m
10 <sup>15</sup>	ペタ	P	10 <sup>6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>12</sup>	テラ	T	10 <sup>9</sup>	ナノ	n
10 <sup>9</sup>	ギガ	G	10 <sup>12</sup>	ピコ	p
10 <sup>6</sup>	メガ	M	10 <sup>15</sup>	フェムト	f
10 <sup>3</sup>	キロ	k	10 <sup>18</sup>	アト	a
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h	10 <sup>21</sup>	ゼプト	z
10 <sup>1</sup>	デカ	da	10 <sup>24</sup>	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
リットル	L, l	1 L=1 dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
トン	t	1 t=10 <sup>3</sup> kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、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 単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 <sup>11</sup> m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1 MPa=100 kPa=10 <sup>5</sup> Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=100 pm=10 <sup>-10</sup> m
海里	M	1 M=1852 m
バイン	b	1 b=100 fm <sup>2</sup> =(10 <sup>12</sup> cm) <sup>2</sup> =10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>
ノット	kn	1 kn=(1852/3600) m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的関係は、 対数量の定義に依存。
ベール	B	
デジベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エル	erg	1 erg=10 <sup>-7</sup> J
ダイン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> =10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
スチルブ	sb	1 sb=1 cd cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> cd m <sup>-2</sup>
フオト	ph	1 ph=1 cd sr cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> lx
ガリ	Gal	1 Gal=1 cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm <sup>2</sup> =10 <sup>-8</sup> Wb
ガウス	G	1 G=1 Mx cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> T
エルステッド <sup>(c)</sup>	Oe	1 Oe <sub>e</sub> =(10 <sup>3</sup> /4π) A m <sup>-1</sup>

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「△」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 <sup>-4</sup> C/kg
ラド	rad	1 rad=1 cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 <sup>-9</sup> T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 <sup>-15</sup> m
メートル系カラット		1メートル系カラット=200 mg=2×10 <sup>-4</sup> kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858 J (「15°C」カロリ), 4.1868 J (「IT」カロリ), 4.184 J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1 μm=10 <sup>-6</sup> m

