

幌延深地層研究センターにおける掘削損傷領域の  
可視化手法の検討（その2）  
（共同研究）

Visualization of Fractures in an Excavation Damaged Zone  
in the Horonobe Underground Research Laboratory: Part 2  
(Joint Research)

青柳 和平 陳 友晴 石井 英一 櫻井 彰孝  
宮良 信勝 石田 毅

Kazuhei AOYAGI, Youqing CHEN, Eiichi ISHII, Akitaka SAKURAI  
Nobukatsu MIYARA and Tsuyoshi ISHIDA

核燃料・バックエンド研究開発部門  
幌延深地層研究センター  
深地層研究部

Horonobe Underground Research Department  
Horonobe Underground Research Center  
Sector of Nuclear Fuel, Decommissioning and Waste Management Technology Development

March 2020

本レポートは国立研究開発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 (<https://www.jaea.go.jp>)  
より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課  
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方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  
Institutional Repository Section,  
Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department,  
Japan Atomic Energy Agency.  
2-4 Shirakata, 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

© Japan Atomic Energy Agency, 2020

## 幌延深地層研究センターにおける掘削損傷領域の可視化手法の検討（その2） （共同研究）

日本原子力研究開発機構 核燃料・バックエンド研究開発部門

幌延深地層研究センター 深地層研究部

青柳 和平, 陳 友晴\*<sup>1</sup>, 石井 英一, 櫻井 彰孝\*, 宮良 信勝\*, 石田 毅\*<sup>2</sup>

（2019年12月16日 受理）

本研究では、坑道掘削により周辺岩盤に形成された掘削損傷領域の割れ目の可視化を行うことを目的とした。幌延深地層研究センターの地下350mに掘削した直径4mの試験坑道を対象として、紫外線照射により発光する蛍光剤を添加した樹脂を坑道周辺の岩盤に注入し、掘削損傷領域の割れ目を固定した。これにより、割れ目を可視化して観察することに成功した。注入孔周辺で試料を採取し、紫外線照射下で観察を行い、割れ目の連結性や開口幅を分析した。結果として、割れ目の最大発達範囲は、孔口から約0.9m、吹付けコンクリートの厚さが約0.15mであったことから、坑道壁面岩盤から約0.75mの範囲であった。また、孔口から0.4mまでの範囲では割れ目密度が高く、0.4m以深では割れ目の間隔が広くなることがわかった。さらに、割れ目の開口幅を測定した結果、孔口から近いほど割れ目の開口幅も大きいことがわかった。特に、孔口から0.3mまでの範囲では、樹脂が浸透した割れ目が多く観察され、開口幅が最大で1.02mmであった。一方、孔口から0.3m以深は、樹脂が浸透した割れ目が少なく、開口幅は最大で0.19mmであった。

---

本報告書は、日本原子力研究開発機構が京都大学との共同研究契約により実施した研究成果に関するものである。

幌延深地層研究センター：〒098-3224 北海道天塩郡幌延町北進432-2

※ 技術開発協力員

\*1 京都大学大学院エネルギー科学研究科 エネルギー応用科学専攻

\*2 京都大学大学院工学研究科 社会基盤工学専攻（現在、京都大学名誉教授）

**Visualization of Fractures in an Excavation Damaged Zone  
in the Horonobe Underground Research Laboratory: Part 2  
(Joint Research)**

Kazuhei AOYAGI, Youqing CHEN<sup>\*1</sup>, Eiichi ISHII, Akitaka SAKURAI<sup>※</sup>,  
Nobukatsu MIYARA<sup>※</sup> and Tsuyoshi ISHIDA<sup>\*2</sup>

Horonobe Underground Research Department  
Horonobe Underground Research Center  
Sector of Nuclear Fuel, Decommissioning and Waste Management Technology Development  
Japan Atomic Energy Agency  
Horonobe-cho, Teshio-gun, Hokkaido

(Received December 16, 2019)

In this research, we performed the resin injection experiment at the 350 m Gallery of Horonobe Underground Research Laboratory in order to identify the distribution of fractures induced around the gallery owing to excavation. We also observed the rock cores obtained around the resin injection borehole under ultraviolet light. As a result, the extent of the development of EDZ fracture was 0.9 m from the gallery wall. In the depth within 0.4 m from the gallery wall, the density of the EDZ fracture is higher than the depth more than 0.4 m from the gallery wall. As a result of the analysis on the fracture aperture by image processing, the fractures with a large aperture (1.02 mm in maximum) were observed within 0.3 m from the gallery wall, while the maximum aperture was 0.19 mm in the depth more than 0.3 m from the gallery wall.

Keywords: Excavation Damaged Zone, Fracture Observation, Fracture Aperture, Fracture Interconnection, Resin Injection Experiment

---

This work has been performed in Japan Atomic Energy Agency as a joint research with Kyoto University.

※ Collaborating Engineer

\*1 Department of Energy Science and Technology, Graduate School of Energy Science, Kyoto University

\*2 Department of Civil and Earth Resources Engineering, Graduate School of Engineering, Kyoto University (Currently, Emeritus Professor, Kyoto University)

目 次

1. 緒言	1
2. 研究の概要	3
2.1 現場概要および試験対象岩盤物性	3
2.2 樹脂注入後の試料採取	4
2.3 削孔後の観察	6
3. 樹脂注入孔周辺で取得した岩石試料および孔壁面の観察結果	9
3.1 RS-2 孔	9
3.2 RS2-1 孔	29
3.3 RS2-2 孔	33
3.4 RS2-3 孔	38
3.5 まとめ	38
4. 樹脂注入孔周辺の EDZ 割れ目の評価	39
4.1 EDZ 割れ目の開口幅	39
4.2 EDZ 割れ目の分布	43
4.3 EDZ 評価のための調査手法に対する課題と調査フローの提案	46
5. 結言	48
謝辞	49
参考文献	49

Contents

1. Introduction	1
2. Overview of the research	3
2.1 Studied site and rock mass properties	3
2.2 Rock cores obtained after resin injection experiment	4
2.3 Observation of rock core and borehole wall	6
3. Results of the rock core analysis and observation of borehole wall	9
3.1 Borehole RS-2	9
3.2 Borehole RS2-1	29
3.3 Borehole RS2-2	33
3.4 Borehole RS2-3	38
3.5 Summary of the rock core analysis	38
4. Evaluation of EDZ fractures induced around the injection borehole	39
4.1 Aperture of EDZ fractures	39
4.2 Distribution of EDZ fractures	43
4.3 Future task for the investigation of EDZ characteristics and suggestion of workflow for the in situ survey	46
5. Conclusions	48
Acknowledgement	49
References	49

## 1. 緒言

高レベル放射性廃棄物の地層処分場の建設においては、立坑やアクセス坑道、処分坑道といった処分坑道の掘削に伴い、その周辺岩盤に掘削損傷領域（Excavation Damaged Zone、EDZ）が形成される。EDZ 内部では、新たな割れ目の形成などにより岩盤の透水性が増加することが想定されている<sup>1)2)</sup>。また、それらが廃棄体埋設後の放射性核種の移行経路になることも想定されている<sup>1)2)</sup>。そのため、高レベル放射性廃棄物の地層処分の安全性を担保するために、透水性の増大に寄与すると考えられる EDZ 内部の割れ目の連結性や開口幅の情報を把握することが重要となる。

これまでに地下研究所において実施された岩盤内の割れ目の可視化および評価の事例としては、スイスの Mont Terri 岩盤研究所やフランスの Bure 地下研究所において、掘削損傷領域に樹脂を注入し、固化後に試料を採取して観察する手法がいくつか報告されている<sup>3)4)5)6)7)</sup>。これらの事例では、水の 100 倍以上という高い粘性を有するエポキシ樹脂を使用しているが、開口幅が小さい EDZ 内の割れ目には浸透していかないことも予想される。特に、既往研究における樹脂注入試験に基づく EDZ の観察事例では、注入時に高い圧力が必要であることが示されており、注入圧による割れ目の擾乱を無視できない可能性もある。

このような背景のもと、日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構という）と京都大学は、2015～2016 年度に、坑道周辺岩盤への擾乱を抑制しつつ、開口幅が小さい割れ目にも浸透することが期待できる樹脂の注入による EDZ 内部の割れ目の可視化を行うことを目的とした共同研究を実施した<sup>8)</sup>。坑道周辺岩盤へ注入する樹脂として、粘性が低く（水の 7 倍程度）、常温で固化し、現場での取り扱いが容易なものを開発した。そして、実際の坑道周辺の岩盤に注入し、割れ目を固定した。その後、オーバーコアリングを行い、得られた試料の表面を紫外線照射下で観察することにより、割れ目の連結性や開口幅といった性状について検討を行った。その結果、孔口から 0.3m までは、複数本の割れ目が交差しており、一方で孔口から 0.3～0.9m に分布する割れ目は単独で存在し、開口幅は孔口から 0.3m までの割れ目よりも小さいことを定性的に示した<sup>8)</sup>。しかしながら、コア試料の表面の観察のみの実施となったため、坑道壁面からの距離と開口幅の分布の定量的な関係や、坑道周辺の割れ目の連続性に関して検討することが課題として残った。

そこで、上記の課題を遂行するために、2017～2018 年度の 2 年間共同研究を継続し、上述の未実施の研究項目の実施を進めた。図 1.1 に 2015～2018 年度にわたる研究の流れを示す。具体的には、樹脂注入孔周辺で岩石コア試料を採取した。採取した試料を半割し、紫外線照射下で樹脂の充填状況を確認することにより、EDZ 割れ目の分布図を作成するとともに、坑道周辺の割れ目の分布や連続性、走向について詳細に検討した。また、樹脂が充填された割れ目の画像解析を行うことにより、坑道周辺の EDZ 割れ目の開口幅を測定した。

結果として、割れ目発達状況としては、孔口から 0.4m 程度までが割れ目密度が高い領域であり、孔口から 0.4m 以深では割れ目の間隔が広がることがわかった。開口幅に関しては、孔口から約 0.3m までの範囲では、最大で開口幅が 1.02mm であったのに対し、孔口から 0.3m 以深では開口幅が比較的小さい割れ目（最大 0.19mm）が分布していたことがわかった。EDZ 割れ

目の走向に関しては、坑道を覆うように斜め方向に発達する傾向にあることがわかった。さらに、本研究で得られた知見を基に今後の検討課題を整理するとともに、EDZ を評価するための調査のフローとして提案した。

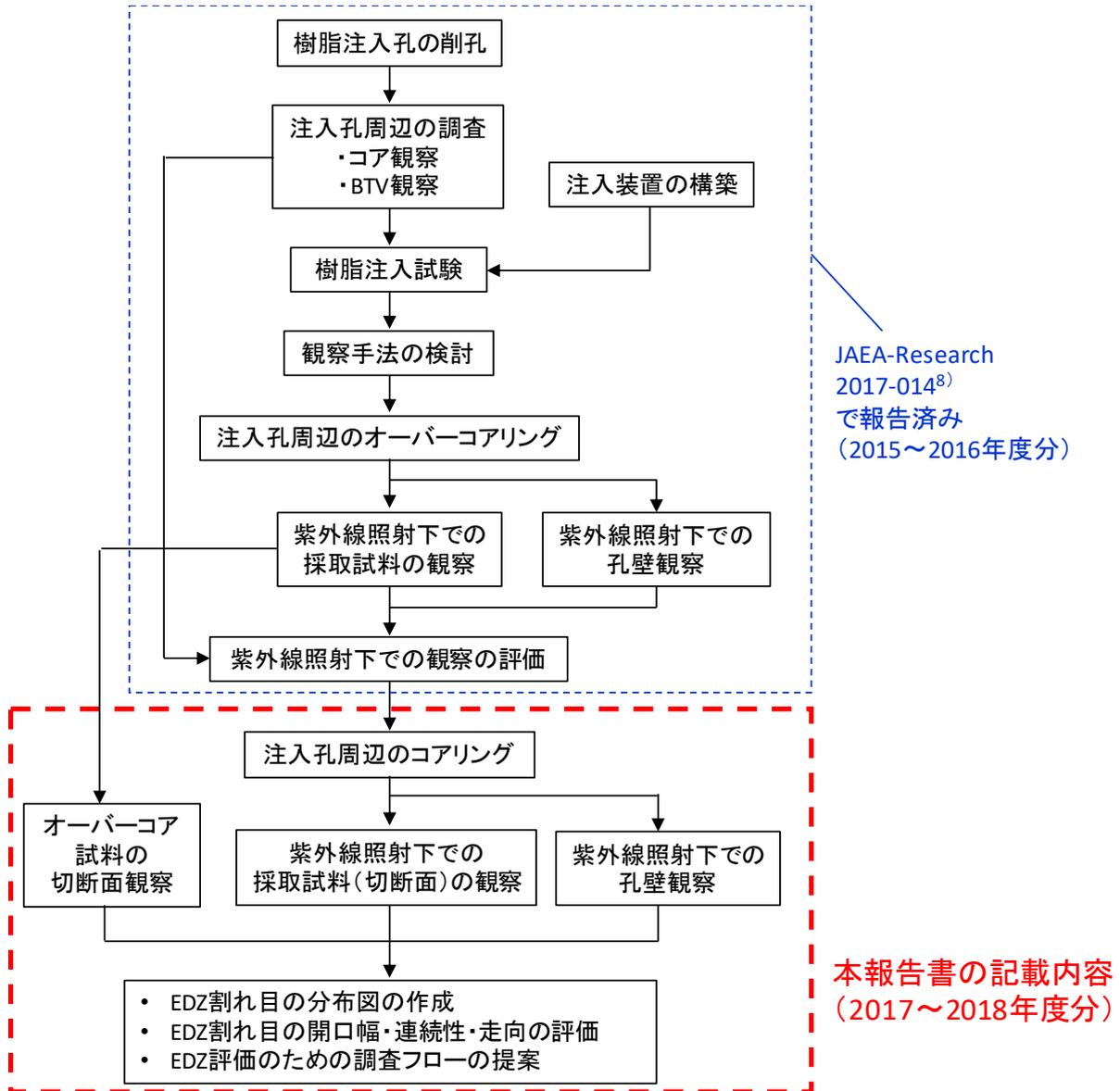


図 1.1 共同研究の流れ (2015～2018 年度)

## 2. 研究の概要

### 2.1 現場概要および試験対象岩盤物性

本研究では、原子力機構が地層処分技術開発を進めている、北海道天塩郡幌延町に位置する幌延深地層研究センターの地下施設を対象とした。図 2.1 に地下施設のうち、350m 調査坑道の平面図を示す。本共同研究で対象とした現場は、深度 350m に掘削された調査坑道のうち、試験坑道 3 である。また、表 2.1 に、試験坑道 3 に分布する稚内層岩石（珪質泥岩）の物性値を示す。対象とする試験坑道 3 の断面形状は三心円馬蹄形であり、幅が約 4m、高さが約 3.1m である（図 2.2）。主要な支保部材は、厚さ約 200mm の吹付けコンクリートと鋼製支保工である。坑道長は 25m であり、油圧ブレイカーによる機械掘削で施工された。

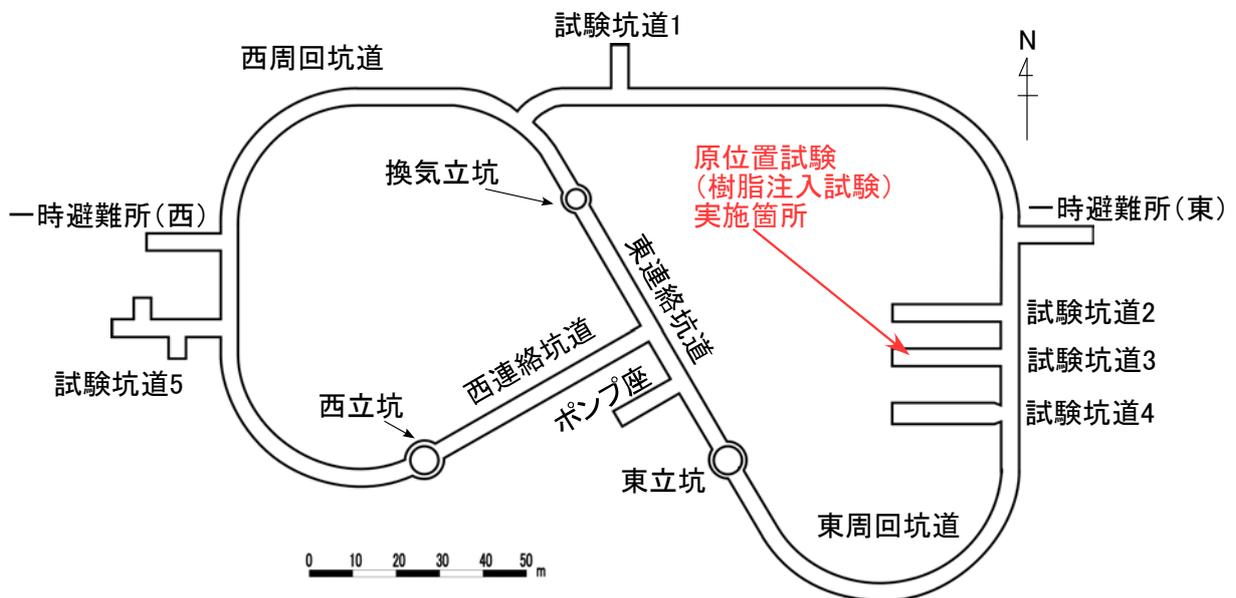


図 2.1 幌延深地層研究センターの 350m 調査坑道のレイアウトと原位置試験実施箇所

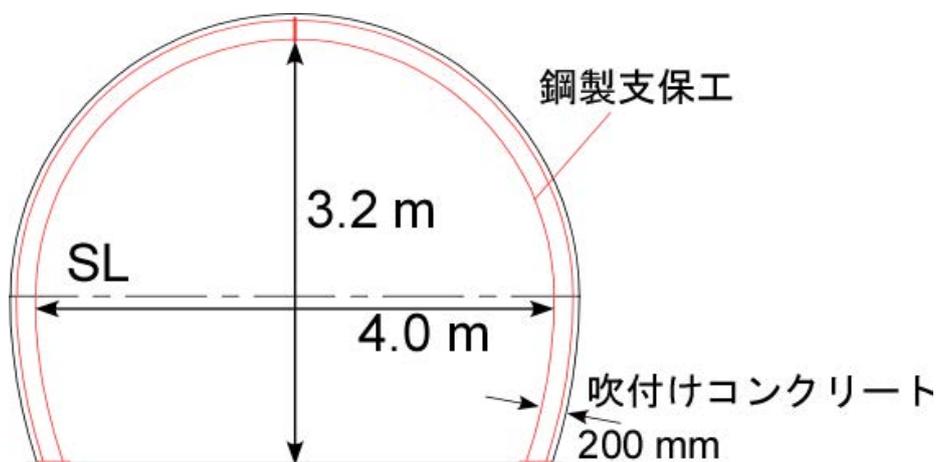


図 2.2 試験坑道 3 の断面図

表 2.1 稚内層岩石の主要な物性<sup>9)10)</sup>

物性	値
一軸圧縮強度 (MPa)	15.4
引張強度 (MPa)	1.83
弾性係数 (GPa)	1.82
ポアソン比	0.17
弾性波速度 (P 波) (km/s)	2.08
有効空隙率 (%)	41.6
飽和密度 (g/cm <sup>3</sup> )	1.84

## 2.2 樹脂注入後の試料採取

図 2.3 に、研究実施箇所の概要図を示す。図中の坑道を縦断する色つきの直線は鋼製支保工を、支保工上部の番号は、支保工番号を示す。樹脂注入に際し、図 2.3 に示すように RS-1、RS-2 の 2 孔の注入孔（直径 50mm）を削孔した。2016 年 3 月 8 日～9 日にかけて、350m 調査坑道のうち、試験坑道 3 において、樹脂注入を実施した。注入試験の結果、RS-1 孔では 252mL、RS-2 孔では 352mL の樹脂が注入された<sup>8)</sup>。また、樹脂固化後に実施したオーバーコアリング（直径 125mm）の結果、RS-1 孔周辺で取得した試料は坑道壁面付近で連続性が悪く、樹脂が浸透して割れ目が固定された状態にあるものが認められなかった。一方、RS-2 孔ではオーバーコア試料が割れ目とともに一体となって取得された。また、側面においても 9 本の割れ目に樹脂が浸透していることが確認された。このことから、RS-2 孔周辺のほうが、樹脂が割れ目内に広い範囲で浸透していることが予想された。そこで本研究では、RS-2 孔周辺を研究対象領域に設定した。なお、樹脂注入試験の詳細と、樹脂注入後に取得した試料側面の観察結果については、既報<sup>8)</sup>を参照されたい。

オーバーコアリング実施後、紫外線照射下でのボアホールテレビ観察を実施し、孔壁面の割れ目の樹脂浸透状況を確認した。その後、樹脂注入孔周辺の割れ目への浸透状況を広範囲で確認するために、図 2.4 に示すように、RS-2 孔周辺に直径 100mm の 3 つのボーリング孔（RS2-1～2-3）を掘削した。なお、坑道の安定性の確保の観点から、これらの孔の削孔前に、RS-2 孔をセメントで埋孔した。3 つのボーリング孔の削孔後に測量を行い、孔口の相対位置や水平角、鉛直角を求めた。各ボーリング孔の孔傾斜、掘削方位、および孔長を、表 2.2 にまとめて示す。なお、RS-2 孔については、孔口測量実施時にすでに埋孔済みであったため、鉛直角は掘削時のスラントによる測定結果を示し、水平角については南北方向に掘削されたと仮定した。

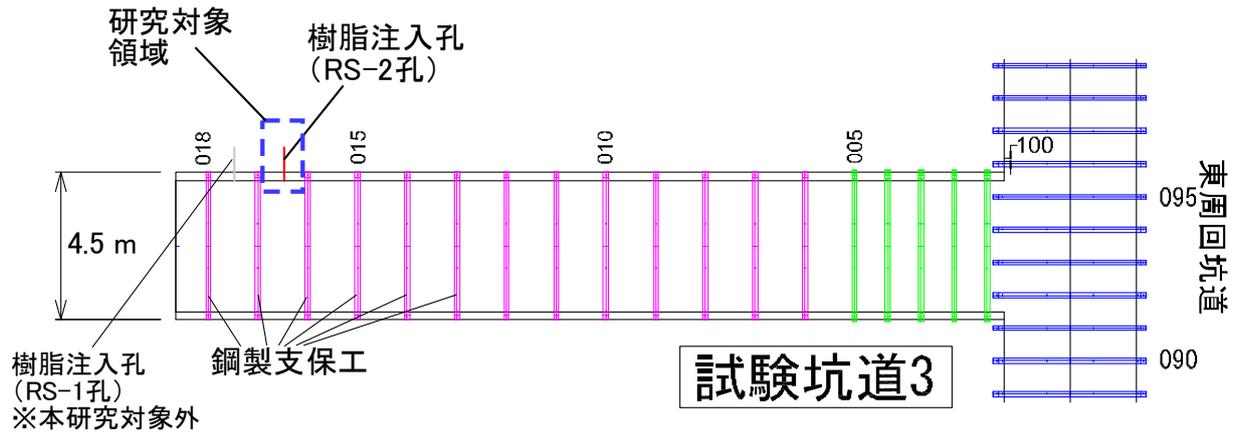


図 2.3 研究実施箇所概要図（平面図）

表 2.2 削孔したボーリング孔の情報

孔名	掘削日	孔傾斜	水平角*	孔長 (m)	孔径 (mm)
RS-2 (樹脂注入孔)	2016/1/27	下向き 3°	90.0°	1.04	50
RS-2 (オーバーコア実施孔)	2016/10/12	下向き 3°	90.0°	0.97	125
RS2-1	2018/5/18	下向き 1.7°	91.4°	0.97	100
RS2-2	2018/5/18	下向き 2.9°	89.4°	0.98	100
RS2-3	2018/11/19	下向き 1.1°	89.3°	0.95	100

※水平角は、東西方向からの角度を反時計回りを正として示したものです。RS-2 孔（樹脂注入孔、オーバーコア実施孔）に関しては、水平角の測定が困難であったため、90.0°（南北方向）と表記している。

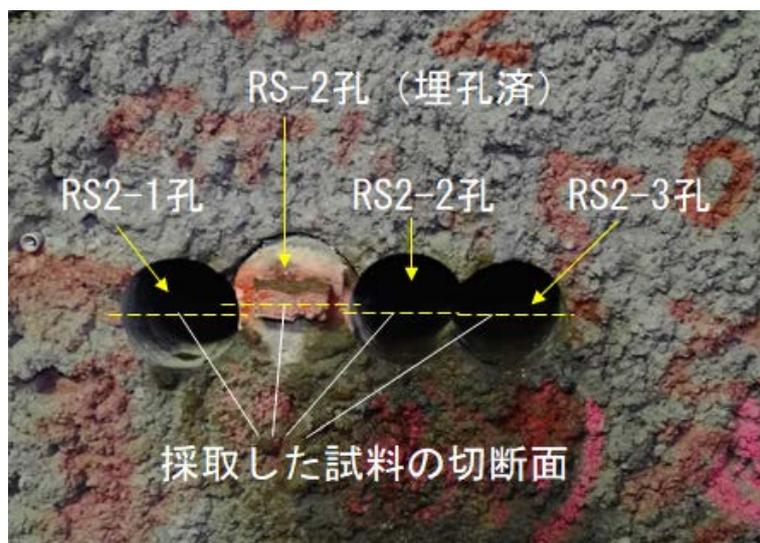


図 2.4 削孔した孔の位置関係と採取した試料を切断した面

## 2.3 削孔後の観察

### 2.3.1 岩石試料の蛍光法観察

蛍光法観察は、樹脂注入後のオーバーコアリングにより取得した岩石試料 (RS-2 孔) と、2018 年に RS2-1～RS2-3 孔で取得した岩石試料を対象として実施した。観察に際して、割れ目の分布を確認することを目的として、試料を半割した。半割の際の各試料の切断面は、図 2.4 に示すとおり、掘削方向に水平な断面である。観察に際しては、半割した断面に紫外線を照射して、割れ目内部への浸透状況を確認した。また、割れ目表面に紫外線を照射して樹脂の付着状況を観察した。なお、本報告書では、下半断面の観察結果で割れ目分布を示す。

### 2.3.2 紫外線照射下での BTV 観察

#### (1) 観察の概要

樹脂が充填された割れ目の位置の特定と走向傾斜の把握を目的として、オーバーコアリングを実施した RS-2 孔を対象として BTV 観察を実施した。BTV 観察の使用機器・機材一覧を表 2.3 に示す。BTV 装置は、株式会社レアックス社製 BIP-V システムを使用した。本システムは耐圧 10MPa (10N/mm<sup>2</sup>) のプローブと有効長 300m ケブラーケーブルを組み合わせて使用し、最大長 300m までのボーリング孔の全周を、連続孔壁展開画像として観察および記録することができる。

展開画像専用プローブ (以下 ODS) は孔壁展開画像取得のためのツールであり 1 ライン 720 画素、1 画素あたり RGB3 バイトのデジタルデータとして孔壁画像を記録することができる。このデジタルデータを専用ソフトウェアで解析することにより、不連続面の走向傾斜や幅などの値を求める。なお、分解能は 0.25mm である。本研究で利用した BTV システムの構成を図 2.5 に示す。

表 2.3 BTV 観察使用機器・機材

名称	型式	機能	備考
BIP システムコントロールユニット	BIP-V	展開画像作成・記録 プローブ制御機能	300m5 芯ケブラーケーブル 有効観察長 300m プローブ φ 50mm×L1.03m 観察可能口径 φ 120mm 以下
展開画像専用プローブ	BPR-553 /ODS	ボーリング孔壁画像 撮影カメラ	CCD カメラ (NTSC 準拠) 円錐ミラー LED 照明 磁気方位センサ アクリル窓 φ 48mm
深度測定プーリー・電動押し込み機	SCR-125	深度測定カウンター ケーシング取り付け 機構	0.1mm/Pulse
バックアップ用 VTR デッキ	Sony 社 製	円周画像記録	デジタルビデオ録画

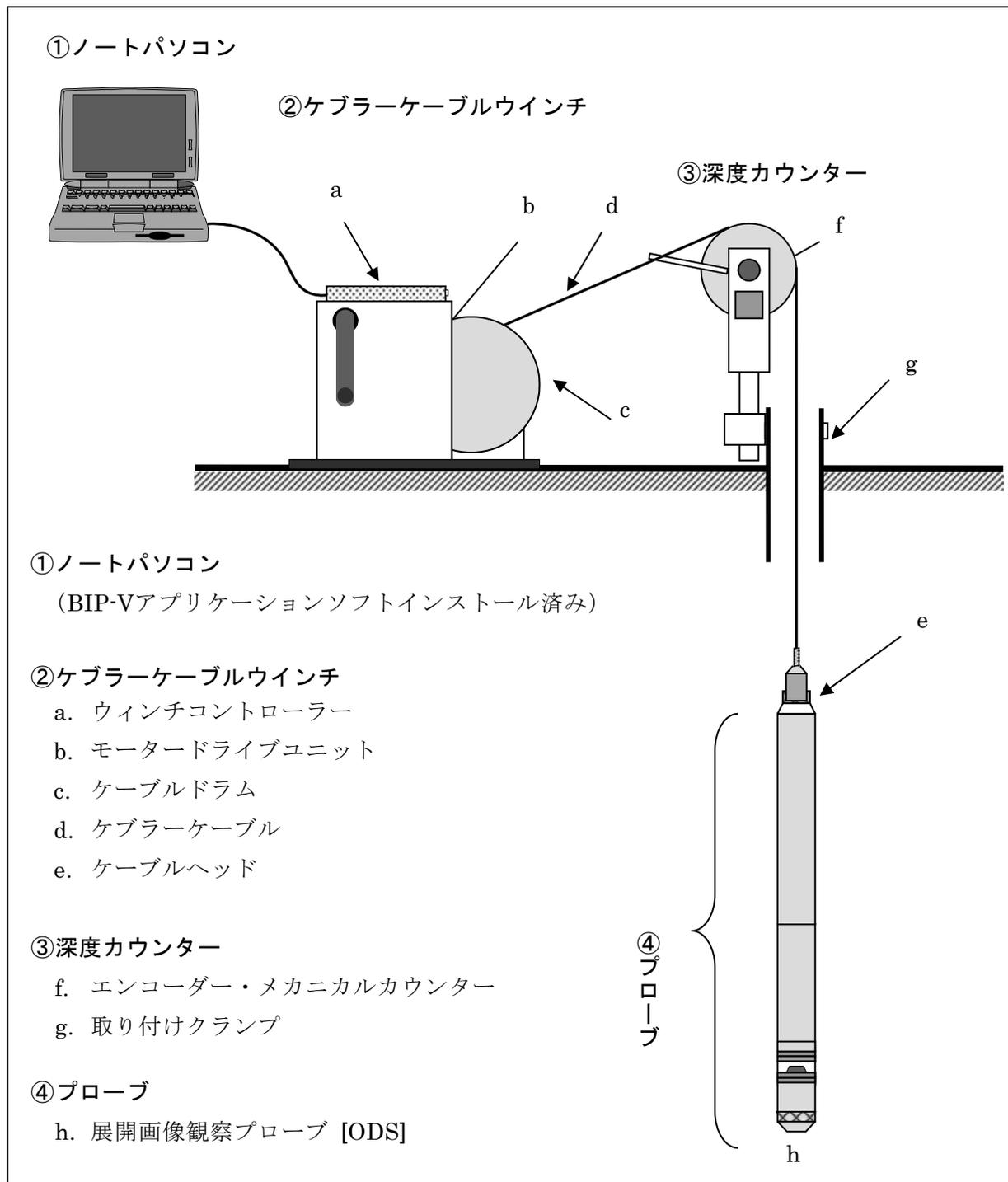


図 2.5 BTV システム構成

(2) 観察方法

プローブにアルミ製のロッドを取り付け、電動押し込み装置により押し込みながら孔壁を観察した。紫外線ランプを孔内に照射して観察する方法と、LED ライトで孔内を照射して観察する方法の 2 種類の方法を実施した。LED ライトはプローブのカメラ部に内蔵されており、孔壁の全周を照らすことが可能であるため、一度の観察で全周を観察できる。紫外線照射下での撮

影時は、紫外線ランプをプローブの外側のカメラ部付近に取り付けて観察した。紫外線ランプを使用して観察する時は、図 2.6 のように紫外線ランプを取り付けるため、プローブが影となり一度に孔壁の全周を照らすことができない。そこで、紫外線ランプの位置を変え数回に分けて全周を観察した。

深度は電動押し込み装置によりカウントされる。観察速度は 0.0~0.9m/min の範囲で調節して実施した。装置のセッティングイメージを図 2.6 に示す。また、観察作業実施の様子を図 2.7 に示す。

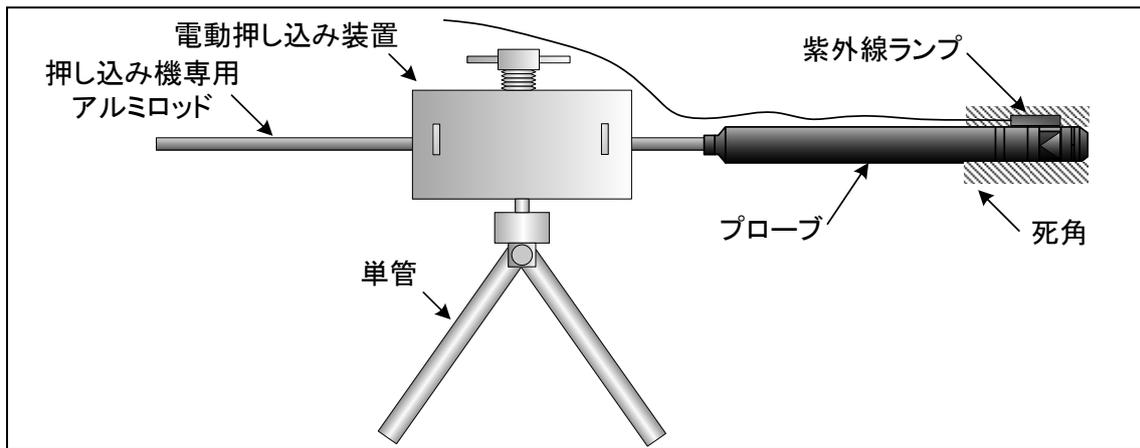


図2.6 紫外線ランプ使用時の装置のセッティングイメージ



図 2.7 BTV 観察実施状況

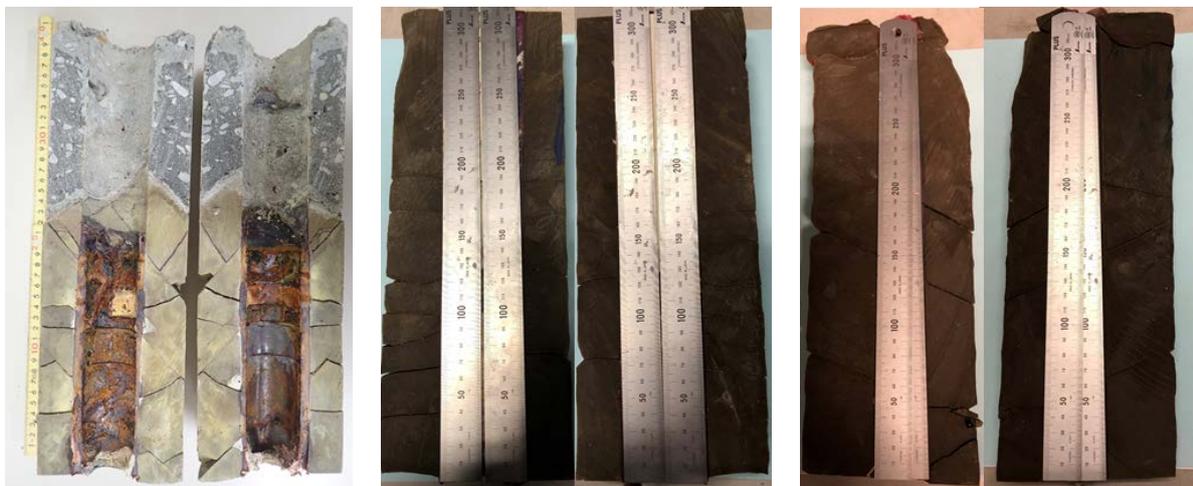
### 3. 樹脂注入孔周辺で取得した岩石試料および孔壁面の観察結果

本章では、樹脂を注入した RS-2 孔を含むオーバーコア試料 (RS-2 孔)、およびその周辺でコアリングした RS2-1～2-3 孔において取得した岩石試料を切断し、切断面の観察を実施した結果について述べる。さらに、割れ目の可視化に適した手法を検討することを目的として、RS-2 孔において、紫外線照射下による観察に加え、紫外線照射下での BTV 観察を実施し、オーバーコア取得後の壁面の割れ目の分布を検討した。

#### 3.1 RS-2 孔

##### 3.1.1 割れ目分布状況の概要

図 3.1 に、RS-2 孔で取得した試料を切断したときの切断面両側の試料の写真を示す。なお、画像の上側が孔口側を示している。孔口から 0.0～0.4m の岩石部 (吹き付けコンクリートを含む) は、樹脂注入に使用したパッカーが埋設されていたが、試料に擾乱をあたえることなく半割にすることができた。図 3.1(b), (c) では、スペーサーと樹脂で埋まっている注入孔部分をステンレス製定規で隠して、岩石部のみが写るように撮影を行っている。切断面のうち下半断面を観察し、その結果をとりまとめたものを図 3.2 に示す。10 本程度の樹脂の浸透した割れ目が観察され、それぞれに特徴があったので、樹脂の浸透状況によってこれらの割れ目を分類、整理した。樹脂が割れ目に完全に浸透していた割れ目 (図中の赤色トレース)、および割れ目表面に樹脂が付着していた割れ目 (図中の青色トレース) を、樹脂注入孔に対して東側、西側に分けて RS2E1～8、RS2W1～7 と付番した。



(a) 孔口から 0.0～0.4m

(b) 孔口から 0.4～0.7m

(c) 孔口から 0.7～1.0m

図 3.1 RS-2 孔の切断後の岩石試料の様子。それぞれの画像のうち、左側が試料の上半断面、右側が下半断面を示す。

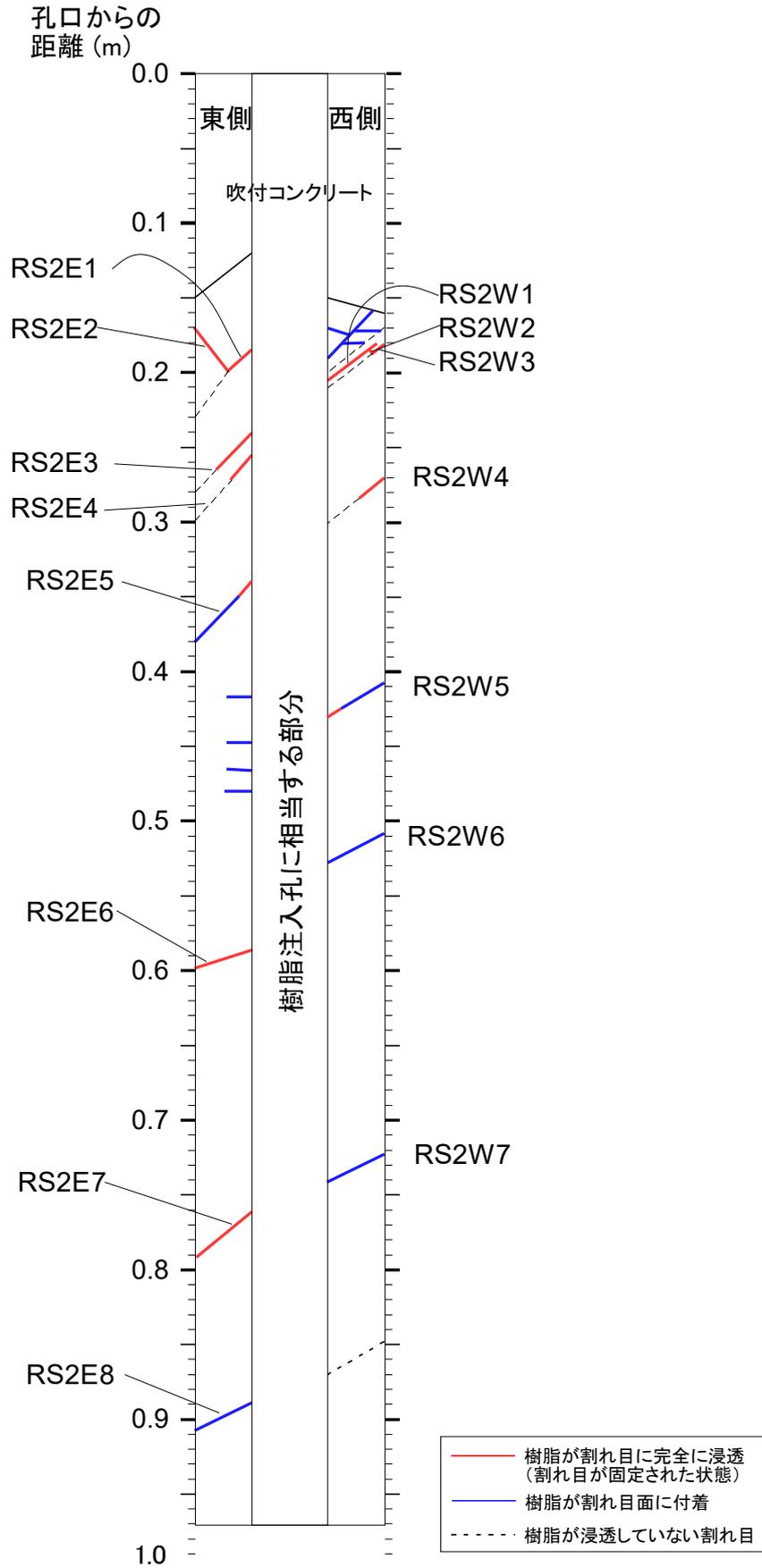


図 3.2 RS-2 孔で取得した岩石試料の半断面の樹脂充填状況

### 3.1.2 樹脂の浸透状況

#### (1) 孔口から 0.25m までの観察結果

図 3.3 に、孔口から 0.15～0.25m の位置の樹脂の浸透状況を示す。なお、図の上側が孔口側に相当する（以降の観察結果も同様）。図の中央部分は、注入孔壁面に固着した樹脂が発光したものである。RS2E1 と RS2E2、RS2W1～3 については、それぞれ割れ目が連結している様子がうかがえる。また、図 3.3 に示す、RS2W1～3 より孔口側で樹脂が割れ目表面に付着している割れ目群も、複雑に連結している様子が見られた。一部の割れ目には、樹脂が浸透していないことも確認された。RS2E1 の割れ目は、派生する RS2E2 の先にも連続しているが、樹脂は RS2E2 の割れ目の方を選択的に流動したことがうかがえる。

図 3.4 に、割れ目 RS2W1～RS2W3 付近を拡大した観察結果を示す。割れ目 RS2W1 は、注入孔寄りで分岐している様子がうかがえる。また、割れ目先端部付近において割れ目 RS2W3 に向けて割れ目が派生している様子がうかがえる。また、RS2W1 から派生した割れ目である RS2W2 にも樹脂が浸透し、さらに、その先の RS2W3 へと選択的に浸透したことも推察される。また、図 3.3 および図 3.4 に示す RS2W1～3 の割れ目よりも孔口寄りでは、樹脂が割れ目表面に浸透している割れ目が 4 本確認されているが、これらも互いに連結しあっている様子が確認された。このことから、坑道の近傍、孔口から約 0.25m の範囲内では、割れ目が連結した状態にあったことが示唆される。

図 3.3 および図 3.4 に掲載した割れ目を観察すると、割れ目表面は平滑ではなく、ある程度の凹凸を有していることがわかる。これは、樹脂が浸透したすべての割れ目において共通して確認される特徴であった。

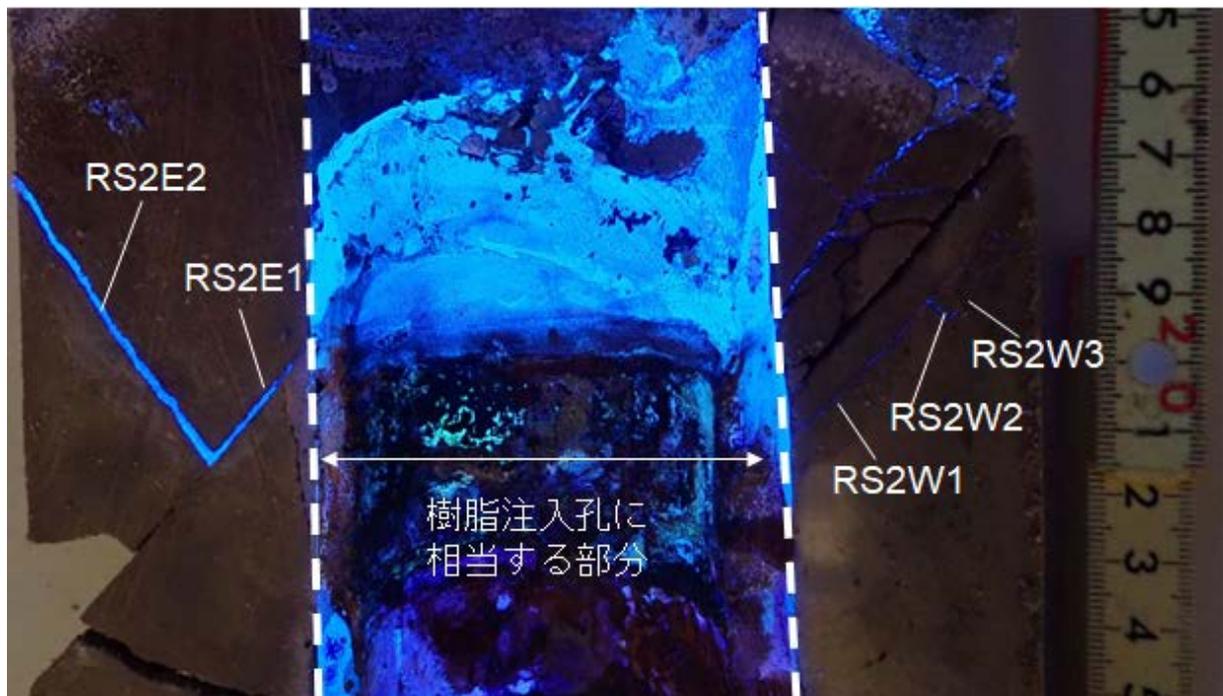


図 3.3 孔口から 0.15～0.25m における割れ目への樹脂の浸透状況（下半断面の観察結果）  
（中央部の樹脂注入孔に相当する部分は、孔壁に樹脂が全体的に付着し、発光している。）

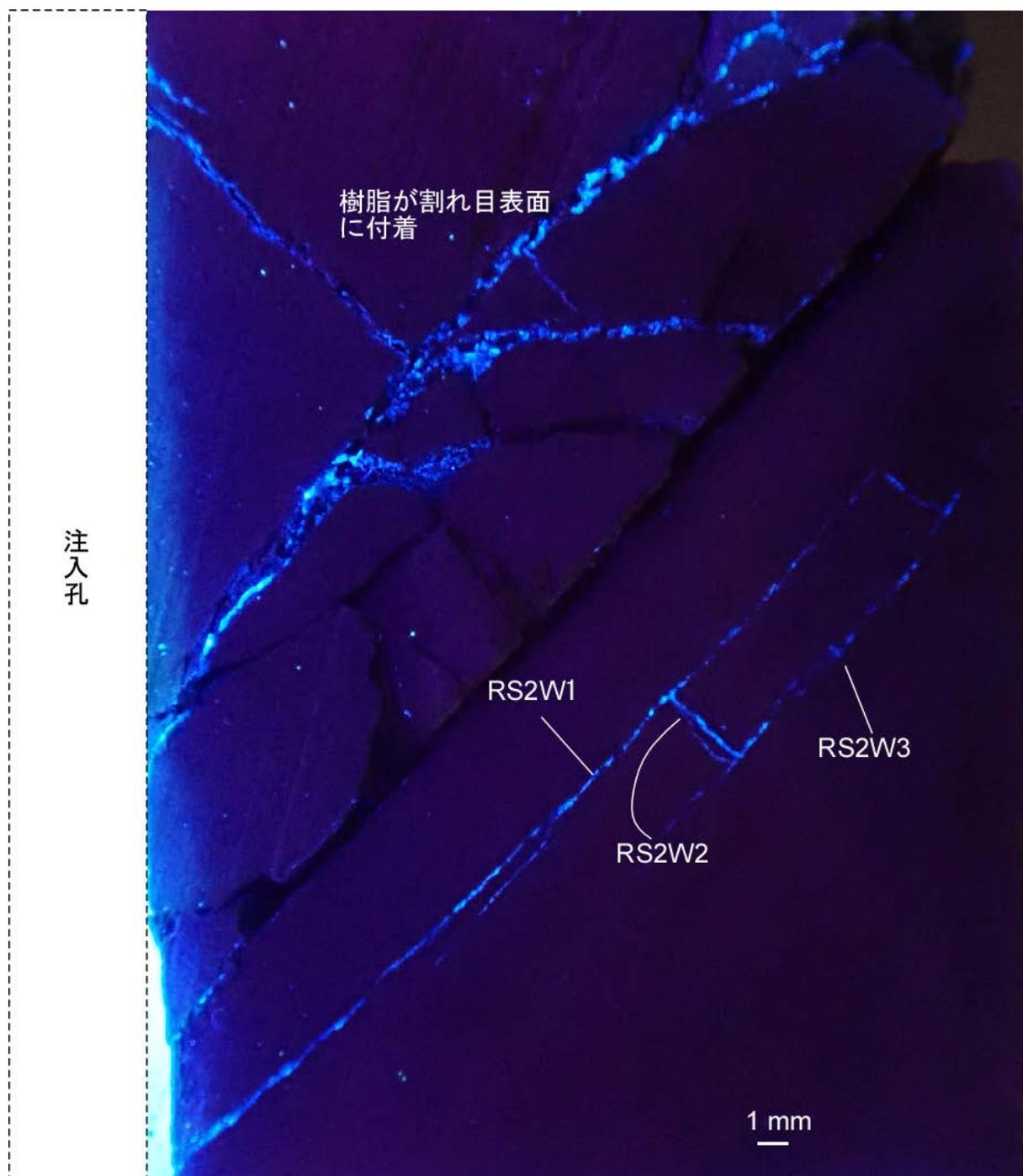


図 3.4 割れ目 RS2W1～RS2W3 の観察結果（下半断面）

## (2) 孔口から 0.25m～0.40m の観察結果

図 3.5 に、孔口から 0.20～0.33m における割れ目への樹脂の浸透状況を示す。図の中央部分は、注入孔壁面に固着した樹脂が発光したものである。図 3.6 に割れ目 RS2E3 および RS2E4、図 3.7 に割れ目 RS2W4 を拡大した観察結果をそれぞれ示す。

図 3.6 に示す割れ目 RS2E3 および RS2E4 については、樹脂注入孔付近では樹脂が割れ目に浸透した状態であったが、図中に示す黄色矢印の位置より注入孔から離れた部分では、切断面上では樹脂の浸透が確認されなかったが、わずかな発光が確認されたことから、樹脂が割れ目表面に付着した状況にあると推定される。

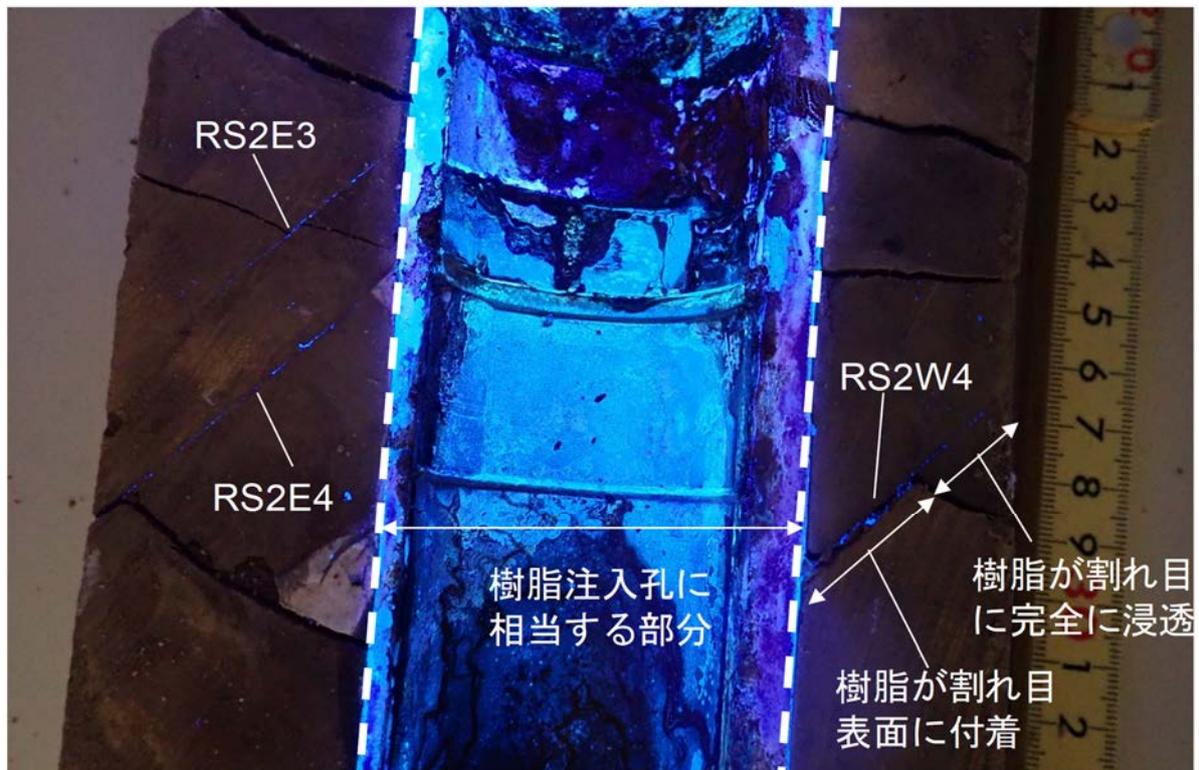


図 3.5 孔口から 0.20～0.33m における割れ目への樹脂の浸透状況（下半断面の観察結果）  
（中央部の樹脂注入孔に相当する部分は、孔壁に樹脂が全体的に付着し、発光している。）

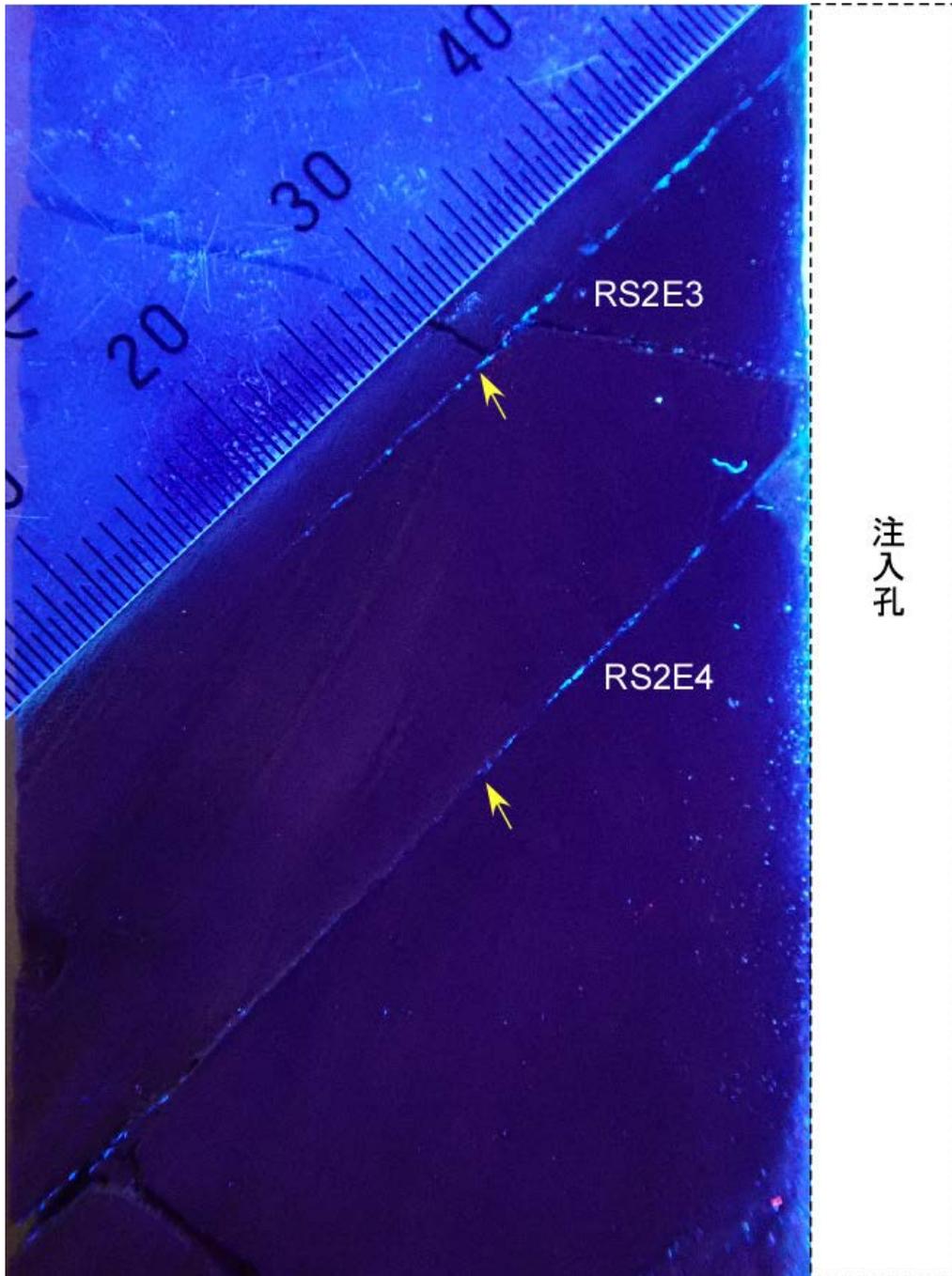


図 3.6 割れ目 RS2E3 および RS2E4 の観察結果  
(左上に示すスケール目盛りは 0.5mm)

図 3.7 に示す割れ目 RS2W4 については、RS2E3 や RS2E4 と類似した走向の割れ目である。樹脂の浸透状況としては、樹脂注入孔付近では割れ目面が剥離し、表面に樹脂が付着した状態であった。また、樹脂注入孔からある程度離れたところでは、樹脂が完全に浸透して割れ目が固定された状態であった。

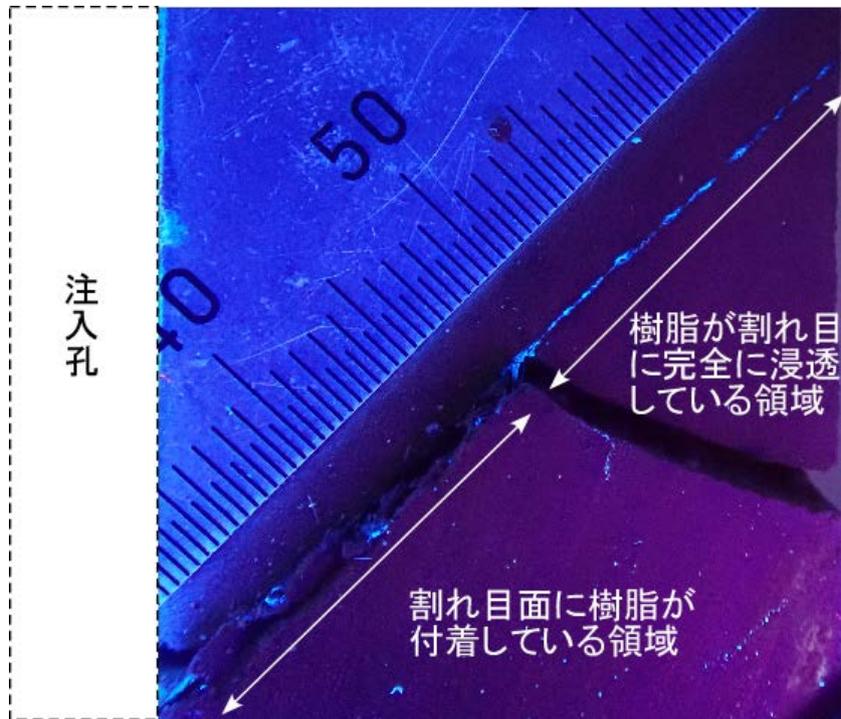


図 3.7 割れ目 RS2W4 の観察結果  
(左上に示すスケール目盛りは 0.5mm)

割れ目 RS2E5 に関しては、図 3.8 に示すとおり、注入孔付近は割れ目が完全に浸透して割れ目が固定されていたが、注入孔から離れたところでは樹脂が完全に浸透しておらず、割れ目の表面に樹脂が付着している様子が確認できた。

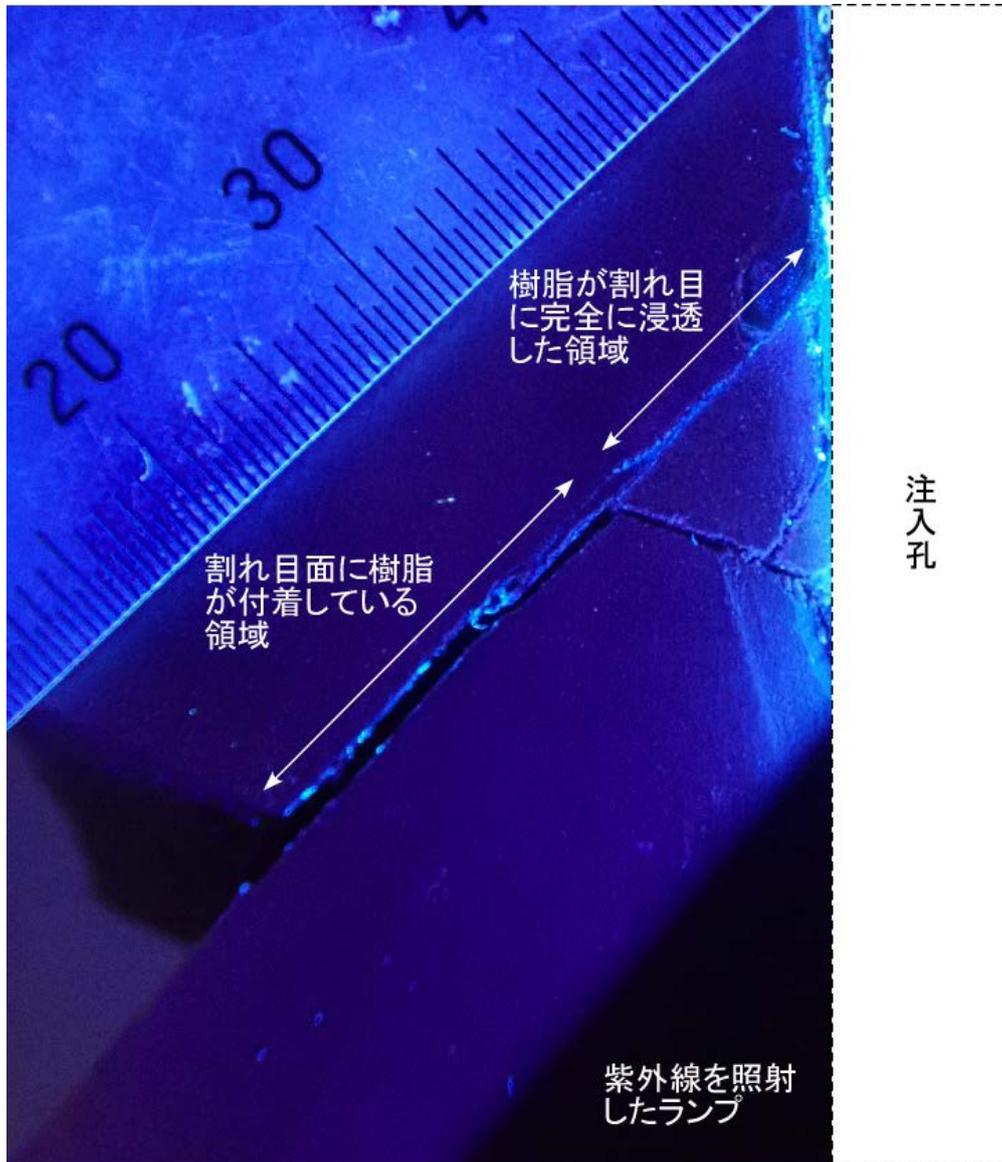


図 3.8 割れ目 RS2E5 への樹脂の浸透状況 (左上に示すスケール目盛りは 0.5mm)

## (3) 孔口から 0.40m 以深の観察結果

図 3.9 に、孔口から 0.40～0.53m の観察結果を示す。同図では、注入孔に相当する部分において樹脂が密に充填固化しており、紫外線照射によって強く発光するため、ステンレス製定規で隠して示している。

図 3.9 に示す割れ目 RS2W5 については、図右側に発光部が認められるが、樹脂注入孔を隔てて左側へ連続していなかった。また、樹脂注入孔の左側には、注入孔の掘削方向に直交する割れ目が 4 本見られる。図 3.10 に割れ目 RS2W5 を拡大した観察結果を示す。樹脂は注入孔付近にのみ浸透していたが、注入孔から離れた領域では割れ目面に樹脂が浸透していなかった。なお、図 3.9 に緑色の矢印で示すように、試料切断面の左側にボーリング孔軸に直交する割れ目が 5 本、右側に 1 本確認された。これは、ディスクングにより生じた割れ目であると考えられる。

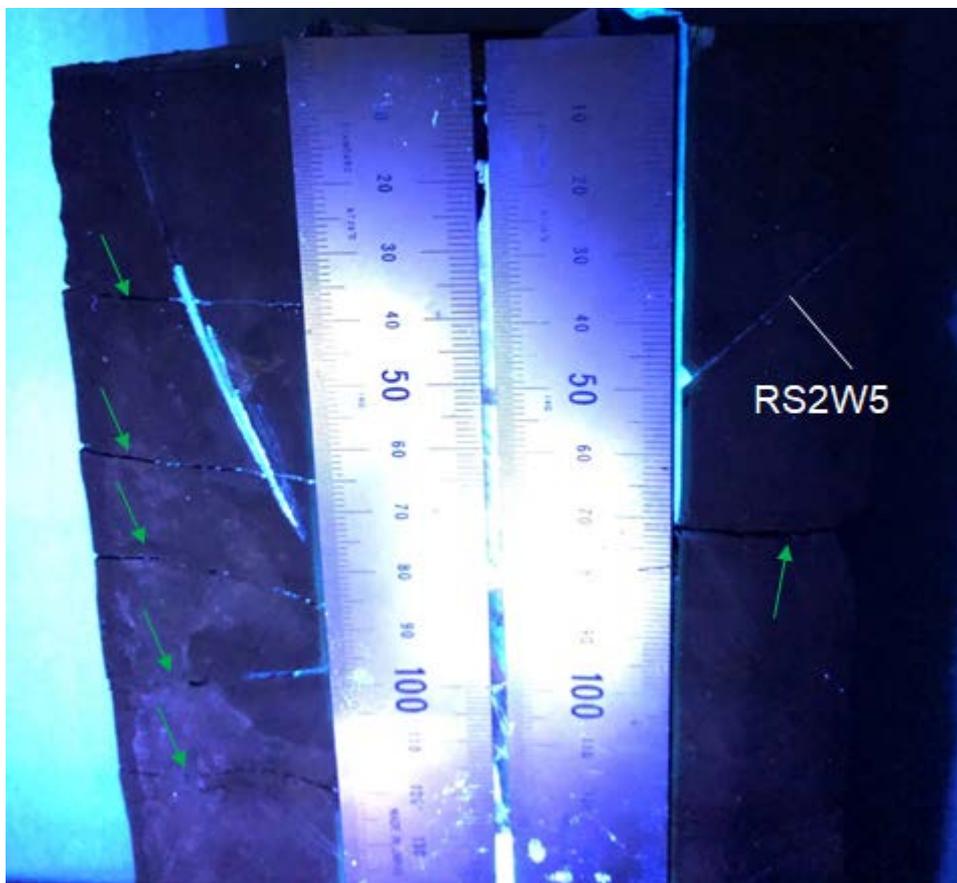


図 3.9 孔口から 0.40～0.53m における割れ目への樹脂の浸透状況（下半断面の観察結果）

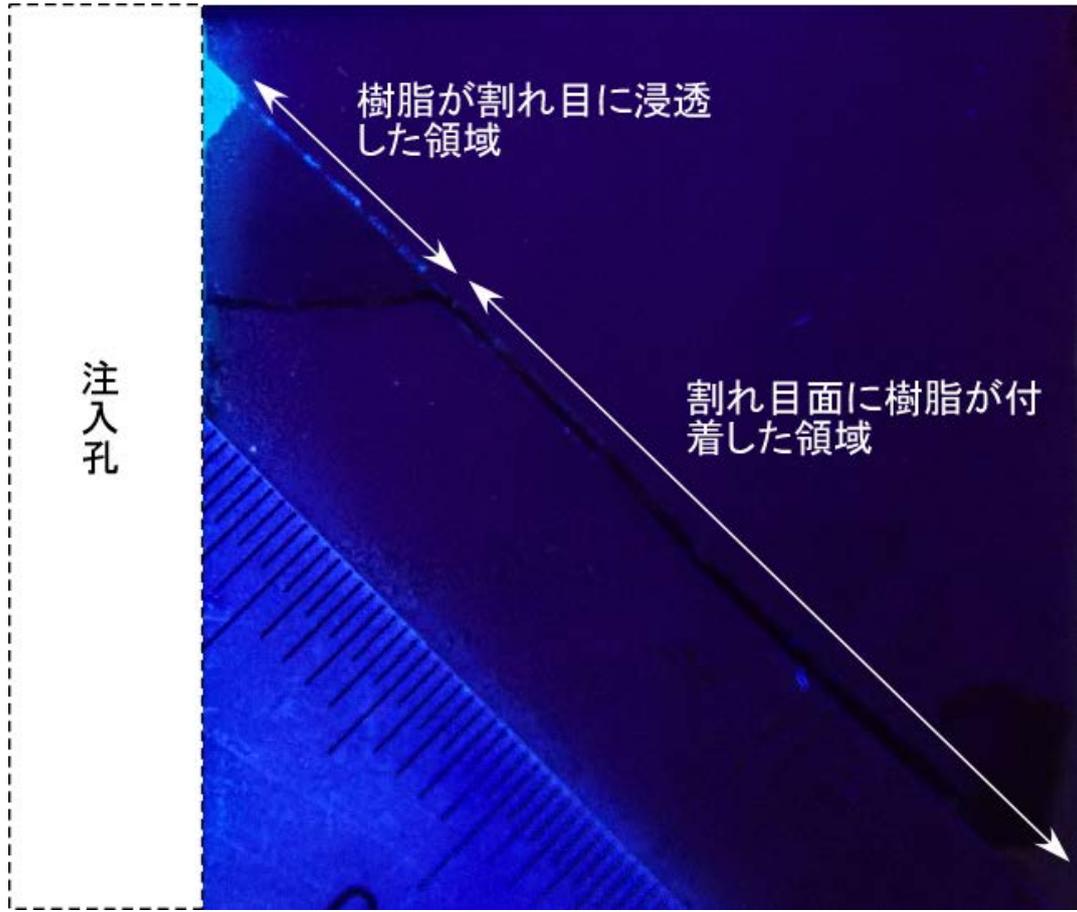


図 3.10 割れ目 RS2W5 の観察結果（上半断面の観察結果）

図 3.11 に孔口から 0.50～0.63m の観察結果を示す。割れ目 RS2E6 は、樹脂が割れ目全体に浸透して割れ目が完全に固定された状態であったが、割れ目 RS2W6 は、割れ目面に樹脂が付着している状況であった。また、割れ目 RS2E6 と RS2W6 は、走向が互いに異なっており、注入孔から発生している位置も異なっている。図 3.12 に示す側面の観察結果からもそれは明らかである。したがって、割れ目 RS2E6 と RS2W6 は連続するものではなく、互いに独立して存在していることがわかる。また、側面にはボーリング軸に直交する方向に等間隔に 4 本の割れ目が生じている (図 3.12(a) 緑色矢印部)。これらの割れ目には樹脂は浸透していないことから、ディスクキングにより生じた割れ目であると推定される。

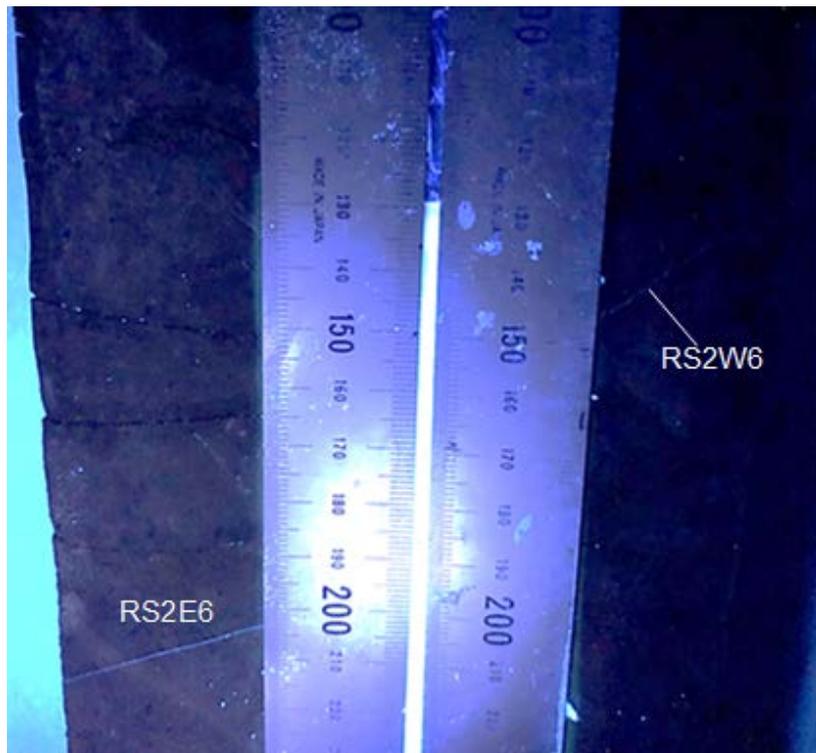
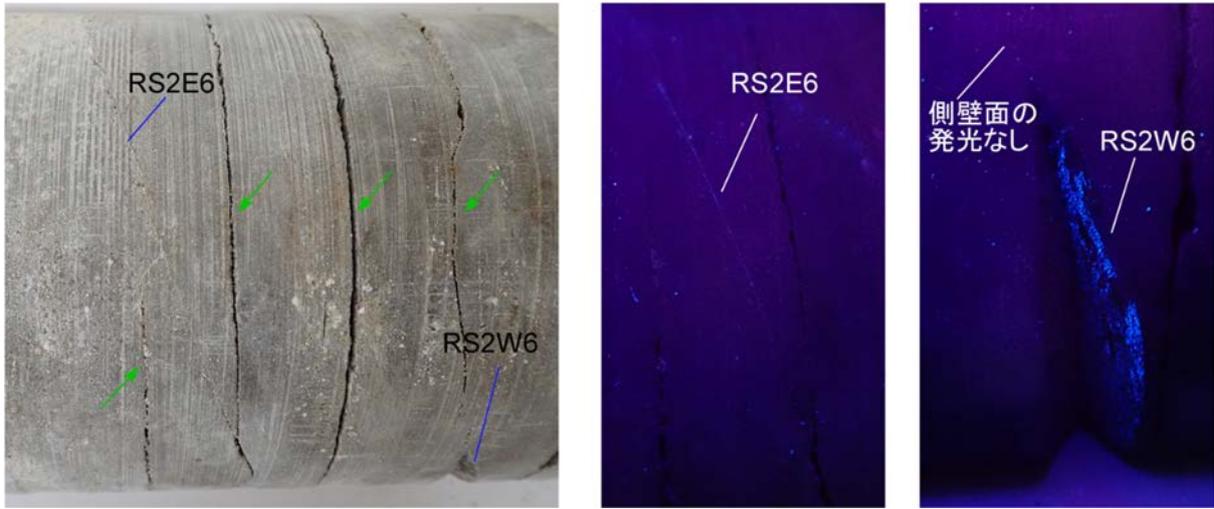


図 3.11 孔口から 0.50～0.63m における割れ目への樹脂の浸透状況 (下半断面の観察結果)



(a) 可視光下での観察結果

(b) 紫外線照査下での観察結果

図 3.12 試料側面の観察結果 (割れ目 RS2E6 および RS2W6)

図 3.13 に孔口から 0.70～0.83m の観察結果を示す。また、図 3.14 および図 3.15 に、割れ目 RS2E7 と RS2W7 の上半断面の観察結果を示す。図 3.14 から、割れ目 RS2E7 には樹脂が完全に浸透して割れ目が完全に固定された状態であったことがわかる。また、図 3.15 から、割れ目 RS2W7 は、割れ目面に樹脂が付着している様子が確認できたが、割れ目面が開口していた。なお、RS2E7 と RS2W7 は互いに連続した割れ目であると推定される。

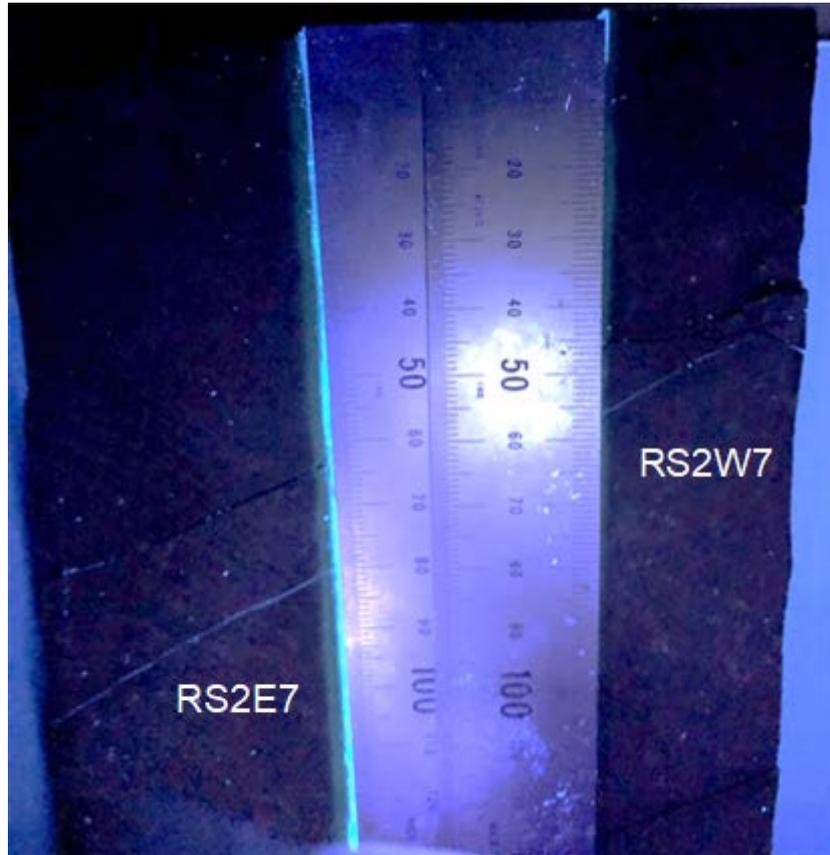


図 3.13 孔口から 0.70～0.83m における割れ目への樹脂の浸透状況（下半断面の観察結果）

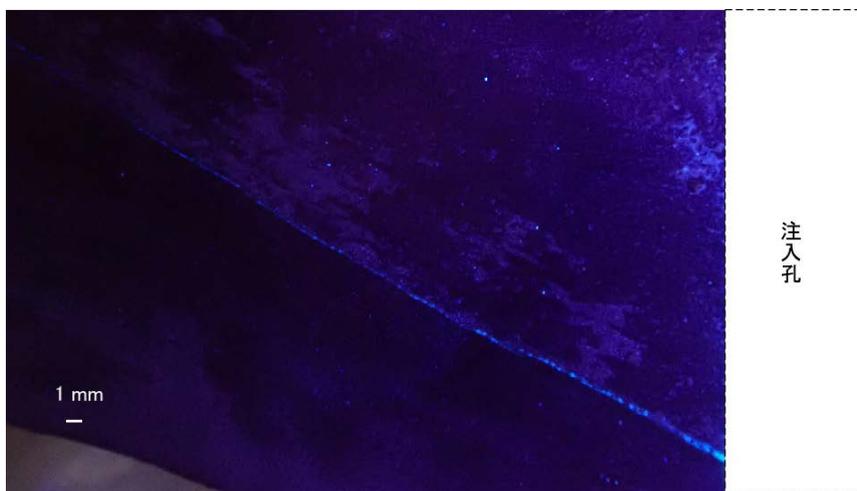


図 3.14 割れ目 RS2E7 の拡大写真（上半断面）

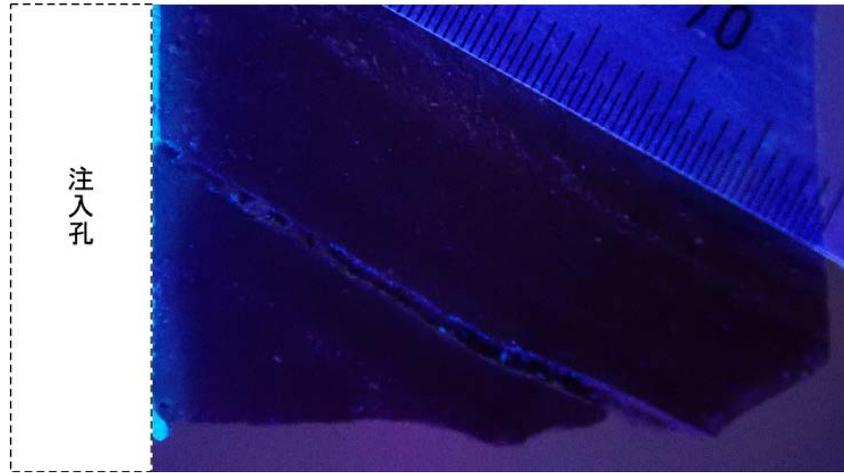


図 3.15 割れ目 RS2W7 の拡大写真（上半断面，右上部に示すスケール目盛りは 0.5mm）

図 3.16 に、孔口から 0.85～0.95m の観察結果を示す。当該区間では下半断面での樹脂の浸透状況を明瞭に撮影することができなかつたため、上半断面で観察した画像を示す。割れ目 RS2E8 は、割れ目面に樹脂が付着している様子が確認できたが、割れ目面が剥離しており、表面が発光している状態であった。図中の注入孔左側の割れ目 RS2E8 の延長線上には、紫外線照射下での発光が認められない、すなわち樹脂の浸透が確認できない割れ目が存在していた。

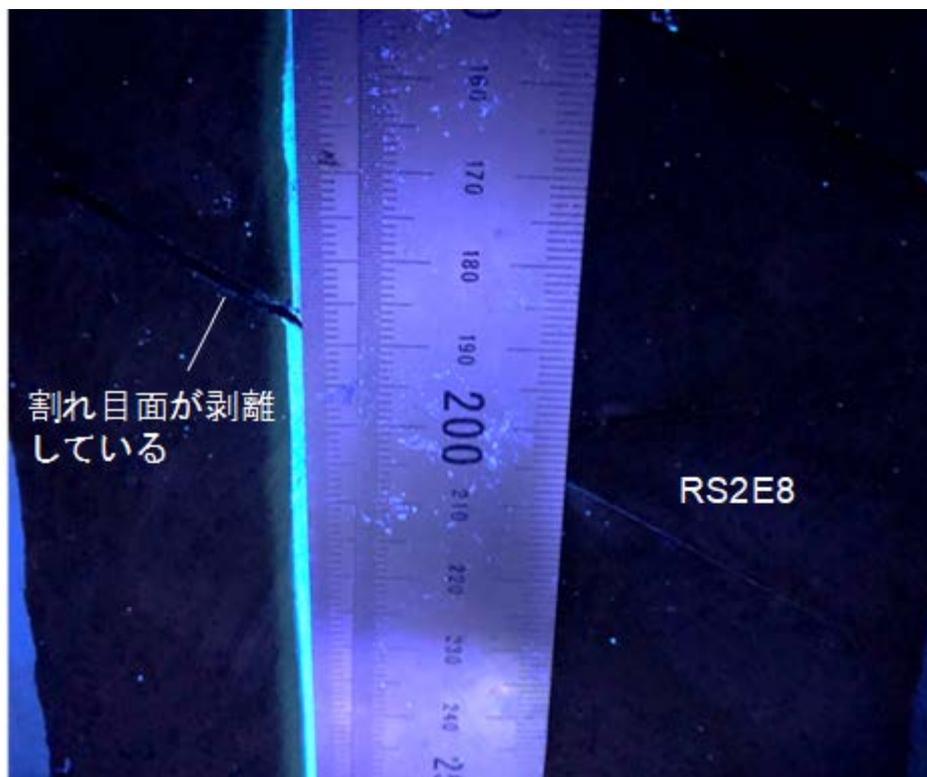


図 3.16 孔口から 0.85～0.95m における割れ目への樹脂の浸透状況（上半断面の観察結果）

### 3.1.3 紫外線照射下での BTV 観察結果

RS-2 孔の BTV 観察の結果得られた割れ目の位置と走向傾斜を表 3.1 に、紫外線照射下および LED ライト照射下で得られた孔壁の展開画像を図 3.17 に示す。紫外線照射下の画像は、用いた紫外線ランプが孔壁全周を照射することができないため、様々な方向で 8 回撮影して得られた画像を統合して作成したものである。

LED ライトを照射して観察した結果、観察区間の 0.00m から約 0.20m まで吹付けコンクリートで、以深は岩盤部であった。観察区間の 0.20m 付近において、切断面の紫外線照射下での観察により同定された割れ目 RS2E1 および RS2E2 に相当する、樹脂が浸透した比較的開口幅の大きな割れ目を確認した。約 0.40m から観察孔底まで削孔時についた削孔痕がみられた。LED ライトで観察した結果、3 本の割れ目を検出した (表 3.1)。3 本の割れ目の走向傾斜は類似したものであった。RS-2 孔で確認された樹脂が浸透した割れ目の分布からは、北東方向に走向を有する割れ目が多く存在していたことから (図 3.2)、BTV で確認された割れ目の走向に概ね整合する結果が得られた。しかしながら、孔口から 0.20m 付近で確認された、割れ目が連結しあって複雑に発達している様子に関しては、BTV 画像からは確認することができなかった。

次に、紫外線照射下の観察で樹脂の発光が見られたのは、比較的開口幅が大きかった割れ目 RS2E1 および RS2E2 に相当する孔口から約 0.20m 付近の 1 箇所のみであった。このように、現状のシステムでは、オーバーコア試料の蛍光法観察で確認された割れ目のほとんどをとらえることができなかった。これは、樹脂が充填された割れ目の開口幅が小さいことや、紫外線の照射光量が小さいことに起因していると思われる。全周を照射できるような照射強度の高い紫外線ランプを装着して画像撮影を行うことで、より詳細な展開画像を得ることができると考えられる。

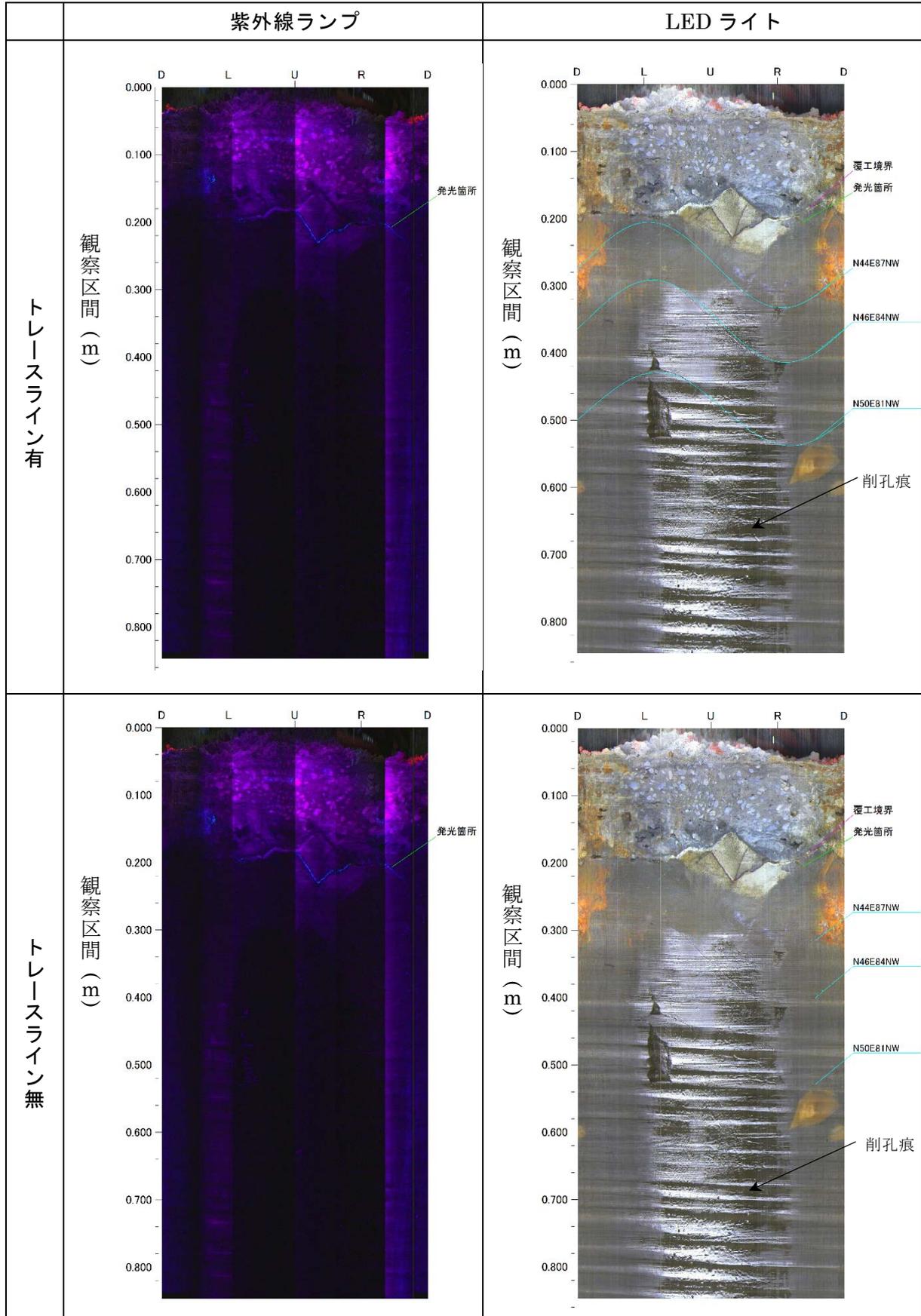


図 3.17 RS-2 孔壁面展開画像

表 3.1 BTV 観察により得られた割れ目の位置と走向傾斜

上端深度-下端深度 (m)	中間深度 (m)	走向傾斜
0.21-0.33	0.27	N44°E87°NW
0.29-0.41	0.35	N46°E84°NW
0.43-0.54	0.48	N50°E81°NW

### 3.1.4 樹脂注入孔のコア観察結果、RS-2 孔壁面の BTV 観察結果と、オーバーコア試料の観察結果の比較

樹脂注入孔では、注入試験実施前に注入孔で取得した岩石コア試料の表面の観察を行った<sup>8)</sup>。その結果、吹付けコンクリートと岩盤の境界面を除いて 10 本の割れ目を確認し、そのうち 8 本が EDZ 割れ目であると特定した。なお、既報から一部の観察結果を更新している。また、3.1.3 項では、オーバーコア後の壁面において、BTV 観察を行い、3 本の割れ目の走向傾斜を検出した。

それぞれの結果とオーバーコア試料半断面の蛍光法観察により得られた樹脂が浸透した割れ目分布をまとめたものを図 3.18 に示す。図中のピンク色の矢印は、樹脂が浸透した割れ目とコア観察で確認された割れ目との対応を示している。孔口から 0.5~0.6m のオーバーコア試料半断面で確認された割れ目は、樹脂注入孔のコア観察では認められなかったが、それ以外の割れ目は、オーバーコア試料半断面と樹脂注入孔のコア観察とでそれぞれ対応する結果となった。さらに、BTV 観察で確認された割れ目も、孔口から 0.40m までの割れ目に対応する結果となった。

また、側面の観察結果（図 3.19）と、オーバーコア試料で観察された割れ目の位置関係を表 3.2 に示す。側面で観察できた 9 本の割れ目については、それぞれ R2O-1~9 と番号を付した<sup>8)</sup>。側面の割れ目 R2O-8 に関しては、既報での記載のとおり、割れ目面に完全に浸透しておらず、一部のみ樹脂が浸透した状態であったため、切断面では確認されなかった。それ以外の側面で確認された割れ目は、切断面においても確認された。

なお、ボーリング孔軸に直交する割れ目（図 3.18 の右側で成因が D と記載されているもの）、が、孔口から約 0.56m 付近、0.75m 付近に分布していた。オーバーコア試料においても、孔口から約 0.4~0.6m の範囲までディスクングによるものと思われる割れ目が存在していた。

樹脂注入孔のコア観察結果

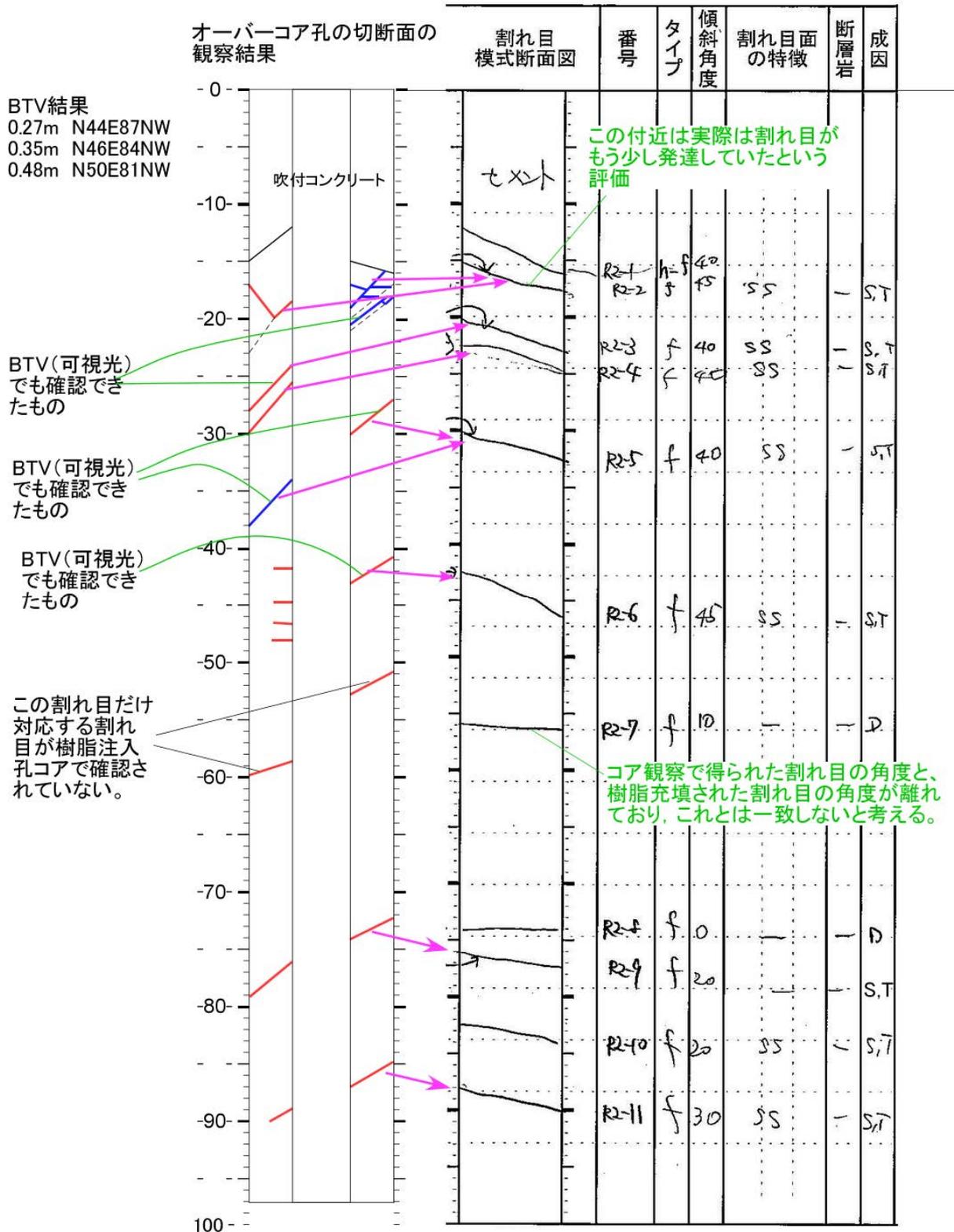


図 3.18 RS-2 孔の下半断面の観察結果、BTV 観察、樹脂注入孔のコア観察結果<sup>8)</sup>の比較

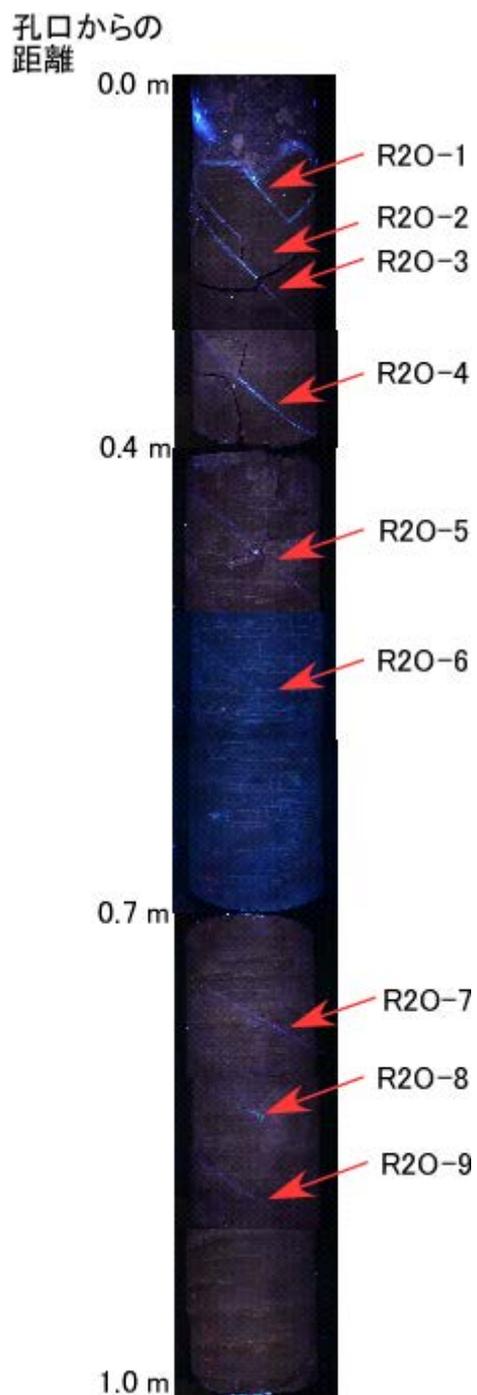


図 3.19 RS-2 孔（オーバーコアリング）で採取した試料側面の観察結果

表 3.2 オーバーコア試料の側面と半割断面で観察された割れ目の対比

オーバーコア試料側面で確認された割れ目	オーバーコア試料半割断面で確認された割れ目
R2O-1	RS2E1, RS2E2
R2O-2	RS2E3
R2O-3	RS2W1, RS2E4
R2O-4	RS2E5, RS2W4
R2O-5	RS2W5
R2O-6	RS2E6
該当なし	RS2W6
R2O-7	RS2E7, RS2W7
R2O-8	該当なし (側面では亀裂面の一部のみしか樹脂が浸透していないため、切断面では確認されなかった。)
R2O-9	RS2E8

## 3.2 RS2-1 孔

### 3.2.1 割れ目分布状況の概要

RS2-1 孔で取得した岩石コア試料（直径 100mm）の写真を図 3.20 に示す。試料側面の青色の直線は、半割にするための切断面を示している。岩石試料中数か所でディスクング割れ目が発達しているが、孔口から 0.65～0.70m 付近にみられるディスクング以外での目立ったコアロスはなく、比較的連続性を保った状態で試料を取得することができた。

得られた試料を切断し、各断面の樹脂の充填状況を観察し、分布のスケッチを作成した。また、樹脂の浸透状況についての記載も併せて行った。

図 3.21 に示す観察の結果、1 か所で割れ目に樹脂が完全に浸透・充填しており、3 か所で割れ目面に樹脂が付着していた。これらの割れ目については、図 3.21 に示すように RS2-1-1～RS2-1-4 と番号を付した。



図 3.20 採取した RS2-1 孔のコア試料の写真

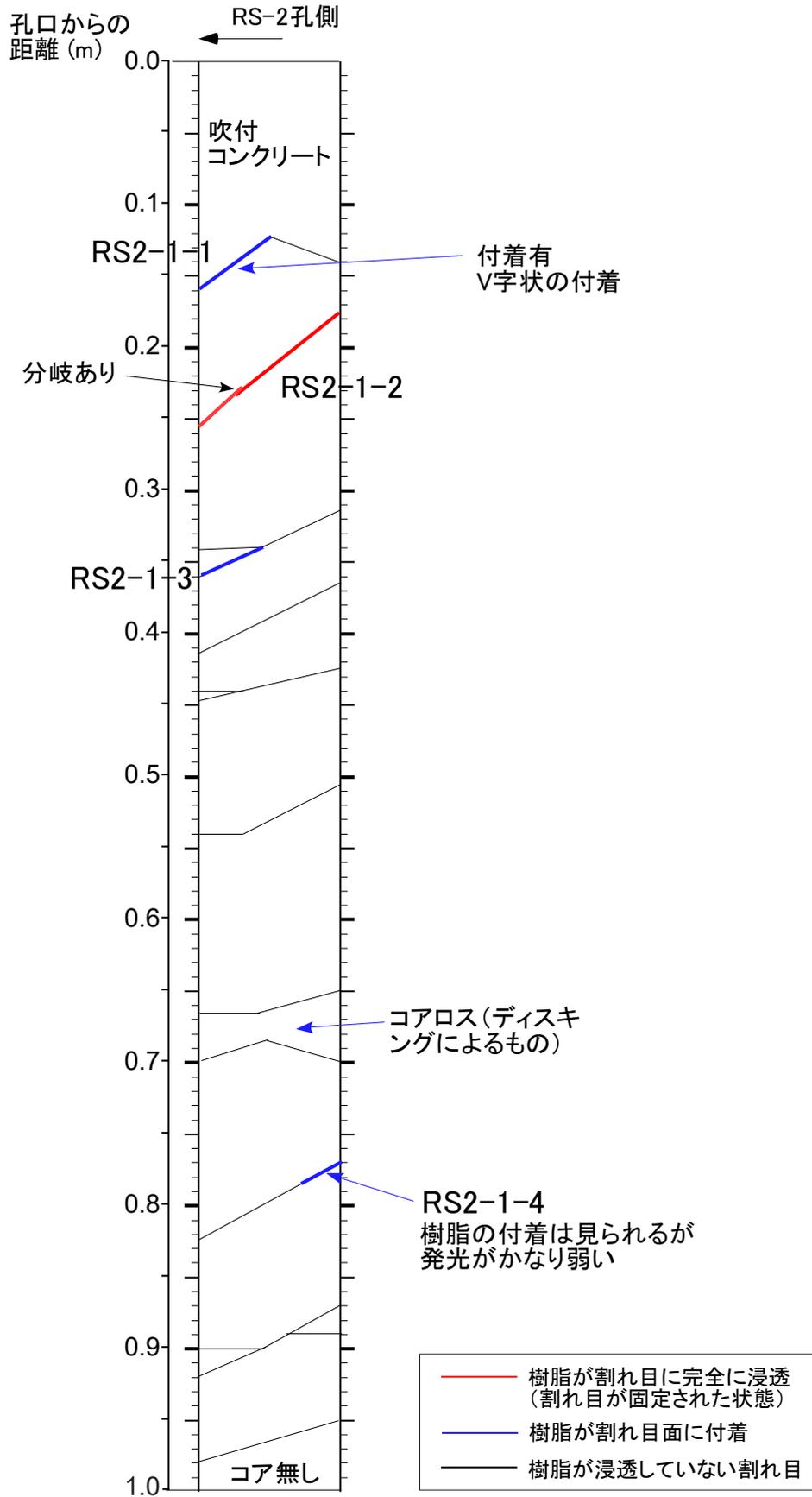


図 3.21 RS2-1 孔で取得した試料の半断面の樹脂充填状況のスケッチと記載 (下半断面)

### 3.2.2 割れ目への樹脂の浸透状況

図 3.21 に記載した割れ目 RS2-1-1～RS2-1-4 の紫外線照射下での観察画像を図 3.22 に示す。割れ目 RS2-1-1 は、吹付けコンクリートと岩盤の境界面に樹脂が付着している状況が確認できた(図 3.22(a))。割れ目 RS2-1-2 は、割れ目中に完全に樹脂が浸透し、固定されていた(図 3.22(b))。また、図 3.23 に割れ目 RS2-1-2 の全体図を、図 3.24 に紫外線照射下で撮影した拡大写真を示す。図 3.24 より、割れ目表面は平滑ではなく、開口部と閉口部を明確に確認することができる。また、図 3.24(b)に示すように、RS2-1-2 は 1 つの割れ目ではなく、割れ目同士が連結しあって連続して存在していることがわかった。

割れ目 RS2-1-3 は、割れ目面に樹脂が付着しているが、割れ目面の途中まで樹脂が浸透していることがわかる(図 3.22(c))。これは注入孔から到達した樹脂の先端を表しているものと思われる。割れ目 RS2-1-4 は、図 3.22(d)で黄色い枠で囲った部分でわずかながらの発光が認められた。このことから、孔口から約 0.8m 離れた割れ目においても、わずかではあるが樹脂が浸透したことが確認された。

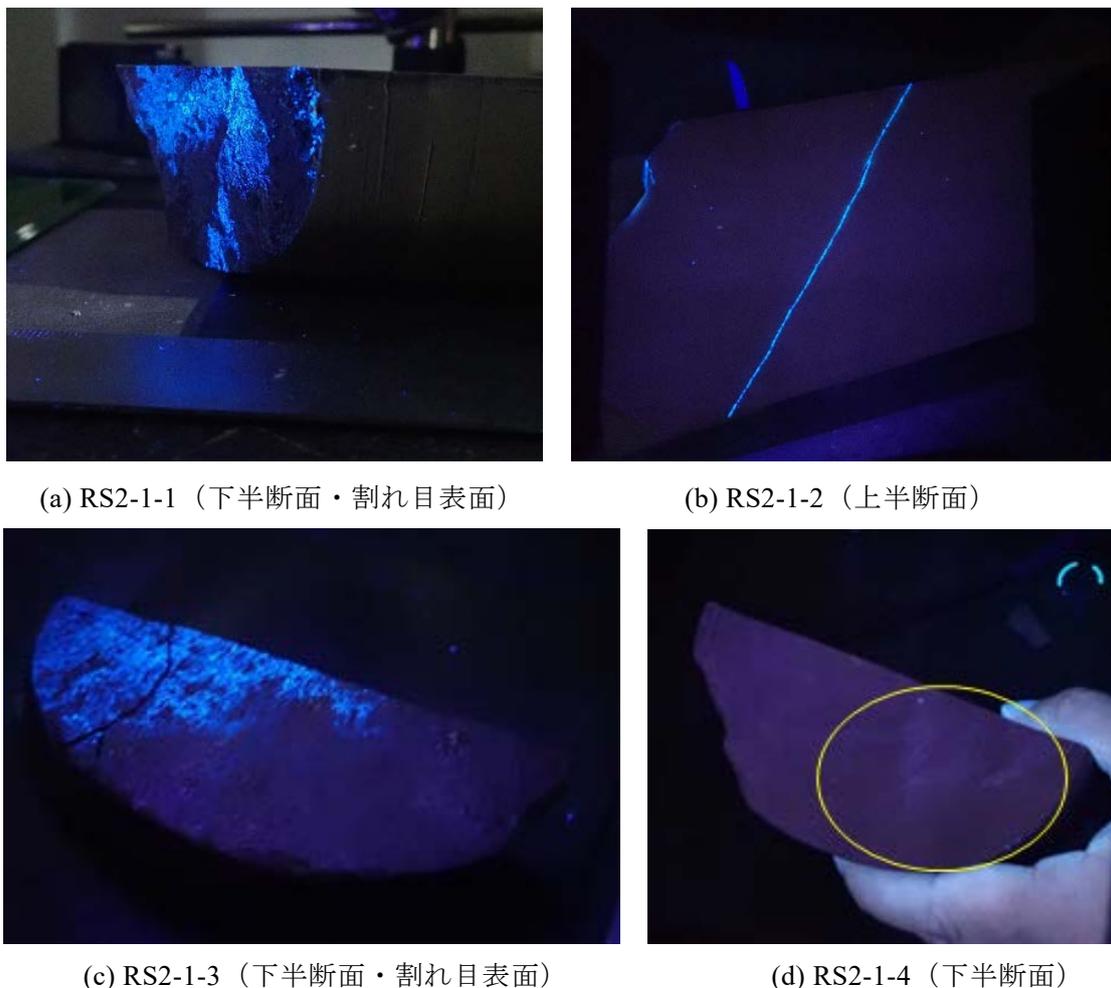
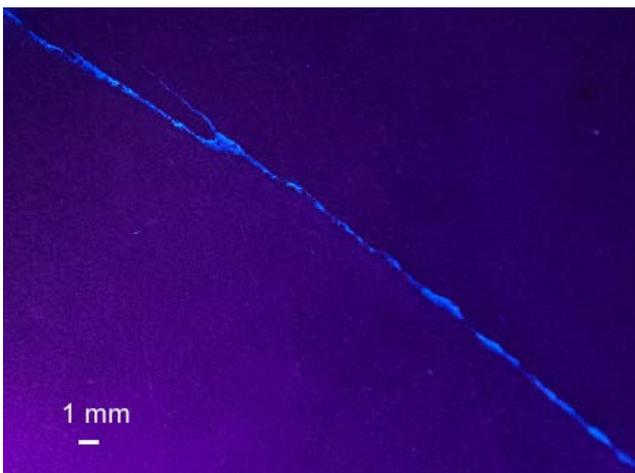


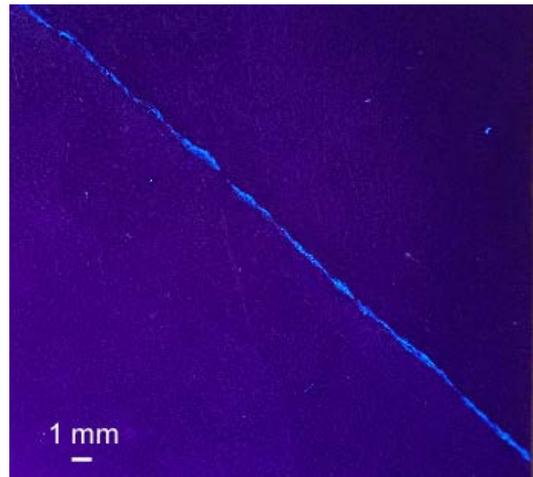
図 3.22 RS2-1 孔の岩石試料で確認された割れ目への樹脂の充填状況  
(紫外線照射下での観察結果)



図 3.23 割れ目 RS2-1-2 全体写真（可視光で撮影、上半断面の観察結果）



(a) 図 3.23(a)の部分の拡大写真



(b) 図 3.23(b)の部分の拡大写真

図 3.24 割れ目 RS2-1-2 の拡大写真（紫外線照射下で撮影、上半断面の観察結果）

### 3.3 RS2-2 孔

#### 3.3.1 割れ目分布の概要

RS2-2 孔で取得した岩石コア試料（直径 100mm）の写真を図 3.25 に示す。なお、オーバーコアリングした RS-2 孔と一部重複する位置で削孔したため、コア試料に RS-2 孔に相当する部分が曲面として残っている。この部分によって RS-2 孔との位置関係を明瞭に確定させた。コア試料中では数か所でディスクング割れ目が発達していたが、孔口から約 0.4m、約 0.6m 付近以外にコアロスはなく、比較的連続性を保った状態で試料を取得することができた。

半割した断面の紫外線照射下での割れ目の観察結果を図 3.26 に示す。観察結果には、樹脂の浸透状況の記載も併せて行った。図 3.26 に示す通り、RS2-2 孔で取得した岩石試料では、10 か所において樹脂の浸透が認められた。それぞれの割れ目に対して RS2-2-1～RS2-2-10 と番号を付けた。なお、ディスクングによると思われるボーリング軸に直交する割れ目が孔口から約 0.45~0.7m の範囲で存在していた。



図 3.25 採取した RS2-2 孔の試料の写真

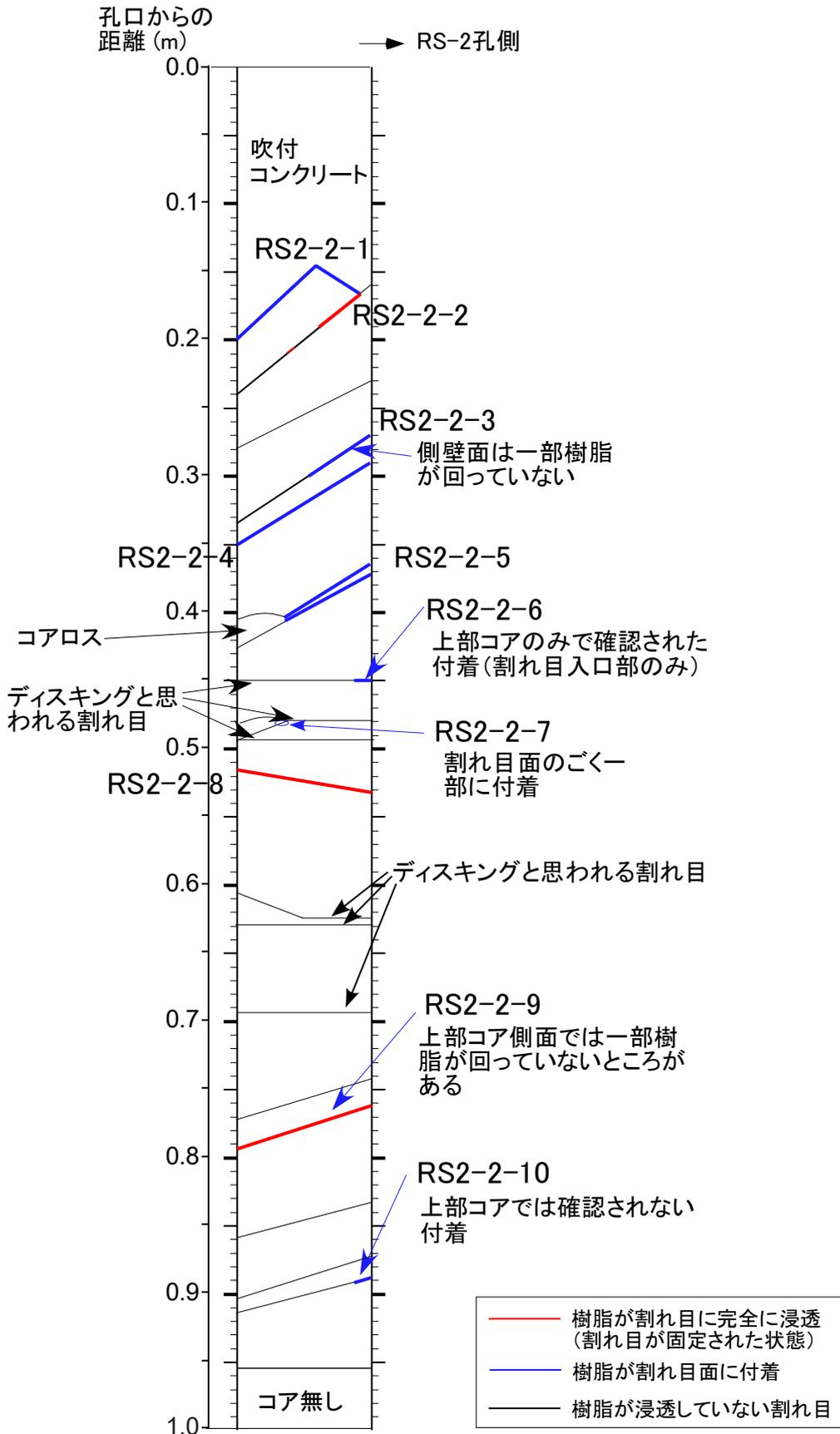


図 3.26 RS2-2 孔で取得した試料の半断面の樹脂充填状況のスケッチと記載 (下半断面)

### 3.3.2 樹脂の浸透状況

図 3.27 に示す RS2-2-1 に関しては、吹付けコンクリートと岩盤の境界面に相当する部分において樹脂が浸透したことがうかがえる。また、坑道の壁面に相当する部分から進展している割れ目 RS2-2-2 には、割れ目の途中まで樹脂が浸透している様子が確認された（図 3.28、3.29）。

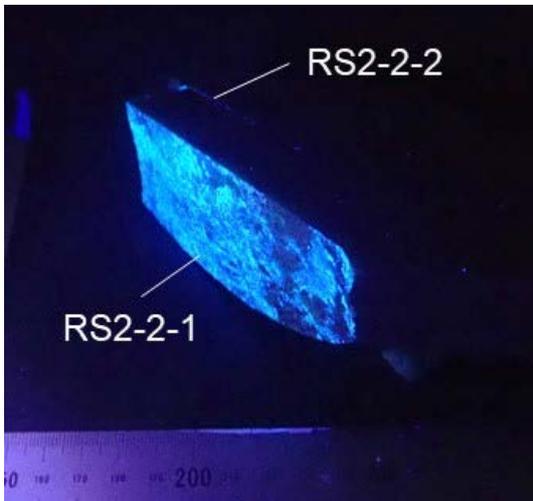


図 3.27 割れ目 RS2-2-1 への樹脂の浸透状況  
(下半断面の観察結果・割れ目表面)

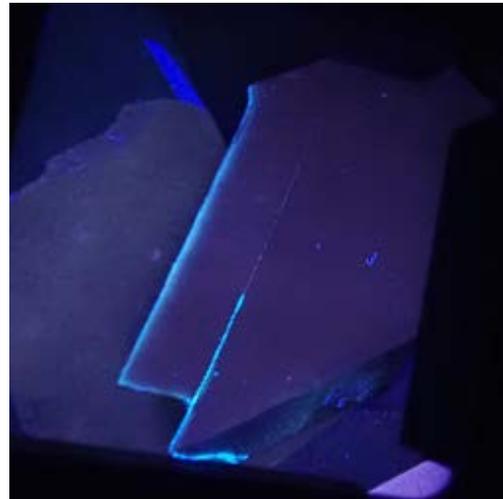
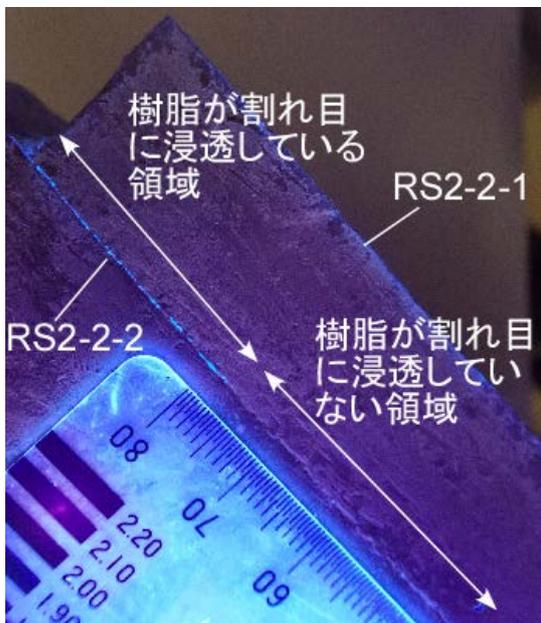


図 3.28 割れ目 RS2-2-2 への樹脂の浸透状況  
(上半断面の観察結果)



(a) 樹脂浸透状況の拡大写真



(b) 樹脂浸透部の拡大写真

図 3.29 割れ目 RS2-2-2 の拡大写真（上半断面の観察結果）

割れ目 RS2-2-3 に関しては、紫外線照射下で割れ目部は発光するものの、割れ目面は剥離していた（図 3.30）。RS2-2-3 の割れ目から 0.02m ほど奥側に、RS2-2-3 とほぼ水平な走向の割れ目 RS2-2-4 が確認されているが、これに関しては、樹脂は割れ目表面に付着している状態であ

った（図 3.31）。孔口から約 0.4m の位置にある RS2-2-5 に関しても同様の状態であった（図 3.32）。

図 3.33 および図 3.34 に示す、孔口から 0.45～0.5m 付近の発光箇所 RS2-2-6 および RS2-2-7 に関しては、樹脂の浸透した領域が非常に小さかった。RS2-2-6 に関しては、割れ目の方向が試料に対して直交方向であり、他の割れ目とトレンドが異なることや、RS2-2-7 に関しては、試料中央部にわずかに発光していることから、これらは掘削により生じた割れ目との関連性が小さいものと考えられる。

孔口から 0.52～0.53m 付近の割れ目 RS2-2-8、孔口から 0.76～0.79m 付近の割れ目 RS2-2-9 に関しては、樹脂が割れ目に完全に浸透して割れ目が固定された状態であった（図 3.35、図 3.36）。また、孔口から 0.9m 付近の割れ目 RS2-2-10 に関しては、下半断面のみにおいて、図 3.37 のように、RS-2 孔側の割れ目表面において、わずかな樹脂の浸透が確認された。

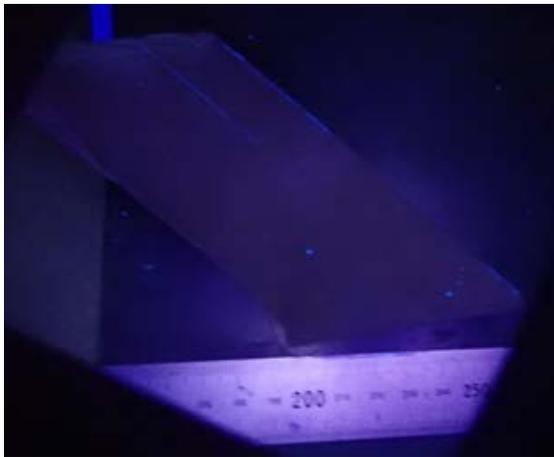


図 3.30 割れ目 RS2-2-3 への樹脂の浸透状況  
（下半断面の観察結果）



図 3.31 割れ目 RS2-2-4 への樹脂の浸透状況  
（下半断面の観察結果・割れ目表面）

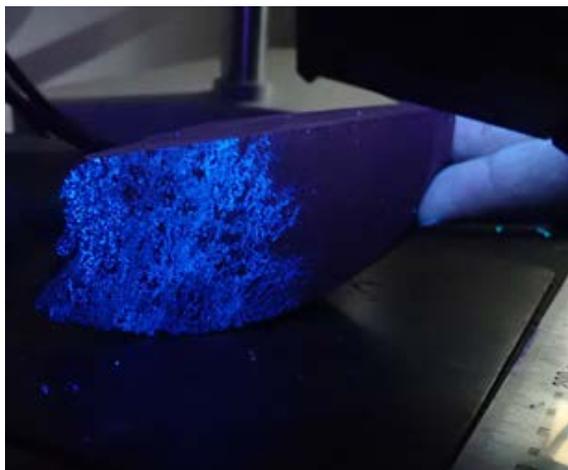


図 3.32 割れ目 RS2-2-5 への樹脂の浸透状況  
（下半断面の観察結果・割れ目表面）

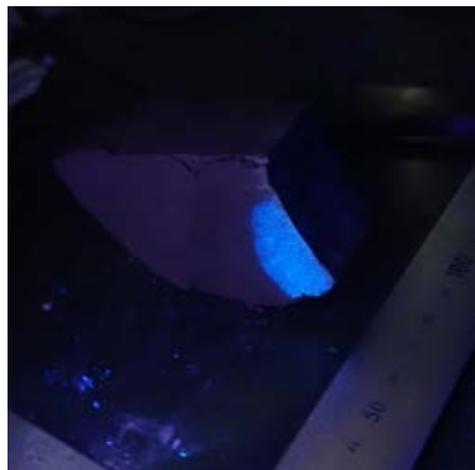


図 3.33 割れ目 RS2-2-6 への樹脂の浸透状況  
（上半断面の観察結果・割れ目表面）

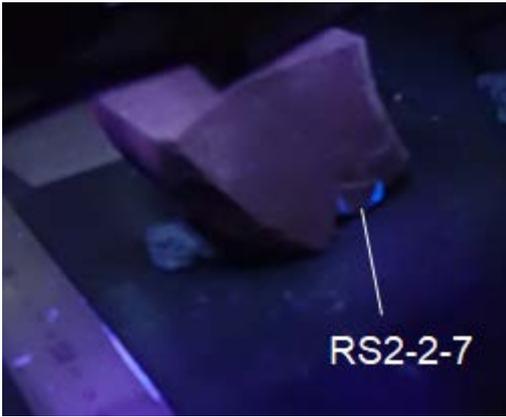


図 3.34 割れ目 RS2-2-7 への樹脂の浸透状況  
(下半断面の観察結果)

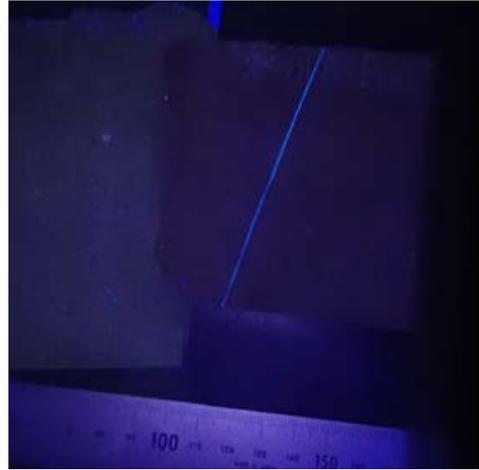


図 3.35 割れ目 RS2-2-8 への樹脂の浸透状況  
(下半断面の観察結果)



図 3.36 割れ目 RS2-2-9 への樹脂の浸透状況  
(上半断面の観察結果)

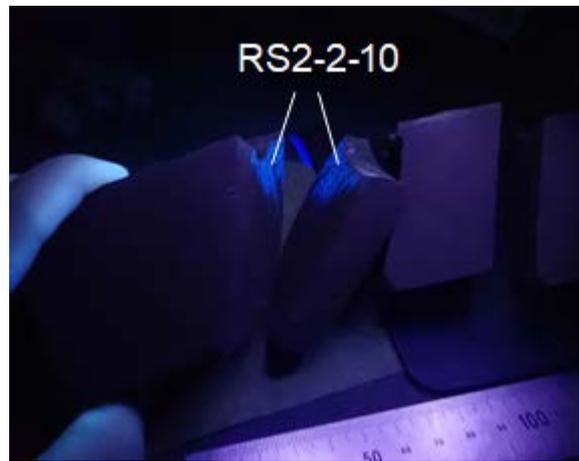


図 3.37 割れ目 RS2-2-10 への樹脂の浸透状況  
(上半断面の観察結果)

### 3.4 RS2-3 孔

RS2-3 孔で取得した岩石コア試料(直径 100mm)の写真を図 3.38 に示す。孔口から 0.2~0.3m, 0.5~0.7m の区間において、ディスクング割れ目が発達し、コアロスも見受けられるため、観察では樹脂が充填された割れ目の位置を正確に特定することが困難であった。樹脂が充填された割れ目としては、図 3.38 に示すように、完全に浸透した割れ目が孔口から 0.35~0.41m の位置で 1 か所、割れ目面に樹脂が付着したものが、吹付コンクリートと岩盤の境界部と、孔口から約 0.9m 程度の位置の 2 か所で確認された。樹脂が完全に浸透した割れ目の位置に関しては、孔内に CCD カメラを挿入した確認結果と、直接孔口から樹脂が浸透した割れ目までの距離を測定した結果を基に特定した。なお、RS2-3 孔においてはコアの連続性が良くなかったことと、樹脂が浸透した割れ目が他孔と比較して少なかったことから、切断面の観察を行っていない。

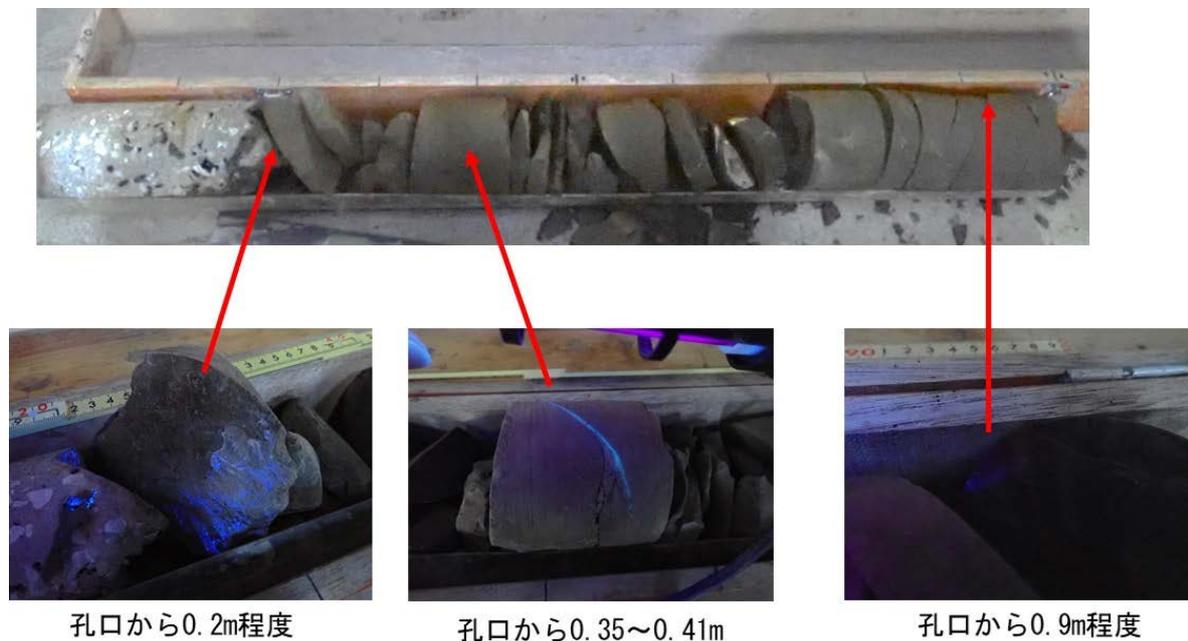


図 3.38 RS2-3 孔の岩石試料と、樹脂が充填された割れ目の状況

### 3.5 まとめ

樹脂注入孔を含む領域でオーバーコアリングした RS-2 孔、樹脂注入孔周辺で取得した RS2-1~RS2-3 孔において、樹脂が浸透した割れ目や樹脂が表面に付着した割れ目を観察し、割れ目分布図を作成することができた。なお、表 2.1 に示した通り、試験対象とした稚内層岩石の有効空隙率は 41.6%と大きいですが、各孔のコア試料を対象とした紫外線照射下の観察結果に示した通り、割れ目以外の岩質部に樹脂が浸透している状況は認められなかった。

#### 4. 樹脂注入孔周辺の EDZ 割れ目の評価

第 3 章では、坑道周辺の EDZ 割れ目の分布を検討することを目的として、樹脂を注入した RS-2 孔を含むオーバーコア試料およびその周辺で取得した岩石試料を観察した。本章では、坑道周辺に発達した EDZ 割れ目の連結性、連続性、割れ目発達範囲、割れ目の走向、開口幅と坑道壁面からの距離の定量的な関係性といった、EDZ を評価するためのデータを取得することを目的として、第 3 章に示した観察結果に基づいた割れ目の開口幅の測定、樹脂注入孔周辺の水平方向に 0.4m、深度方向に 1m の領域における割れ目分布の検討、割れ目の走向の検討を行った。また、第 3 章に示す観察結果および本章に示す分析結果に基づき、坑道掘削時に生じる EDZ の性状を把握するための調査フローを提案した。

##### 4.1 EDZ 割れ目の開口幅

###### 4.1.1 測定方法

RS-2 孔、RS2-1 孔、RS2-2 孔において樹脂が割れ目に完全に浸透した割れ目（図 3.2、図 3.21、図 3.26 において赤色のトレースで示した割れ目）を対象として開口幅を測定した。表 4.1 に、観察した全割れ目のうち、開口幅の測定の有無を示す。樹脂充填部が不明瞭なものや、掘削後の割れ目の開口により適切な開口幅が得られないものを除外し、RS-2 孔で 11 個、RS2-1 孔で 1 個、RS2-2 孔で 1 個の割れ目を開口幅の測定対象として選定した。

表 4.1 観察した割れ目と開口幅の測定の有無

観察孔	割れ目番号	開口幅測定	観察孔	割れ目番号	開口幅測定
RS-2	RS2E1	○	RS2-1	RS2-1-1	
	RS2E2	○		RS2-1-2	○
	RS2E3	○		RS2-1-3	
	RS2E4	○		RS2-1-4	
	RS2E5	○	RS2-2-1		
	RS2E6	○	RS2-2-2	○	
	RS2E7	○	RS2-2-3		
	RS2E8		RS2-2-4		
	RS2W1	○	RS2-2-5		
	RS2W2	○	RS2-2-6		
	RS2W3		RS2-2-7		
RS2W4	○	RS2-2-8			
RS2W5	○	RS2-2-9			
RS2W6		RS2-2-10			
RS2W7					

測定にあたっては、デジタルカメラ（OLYMPUS TOUGH TG-5）により紫外線照射下で撮影された高解像度画像を基に開口幅を測定した。図 4.1 に開口幅の測定イメージを示す。実際に取得したコアでは、ポーリング孔の削孔により割れ目が開口することも考えられるが、樹脂が浸透した範囲は、実際の割れ目の開口幅の場が保存された状態を保っていると考えられる。そのため、開口幅の測定に際しては、図 4.1 に示すように、紫外線照射下で発光した部分の幅を測定した。なお、樹脂は浸透しているが、浸透距離が割れ目の長さに対して短い割れ目（RS2E5、RS2W2、RS2W5）については、測定可能な部分に限定して測定を実施した。なお、測定対象とした各割れ目における開口幅の測定間隔については、表 4.2 を参照されたい。

実際の割れ目は、傾斜角を有しているため、図 4.2 に示すように、切断面で測定した開口幅は実際の開口幅とは異なっている。そこで、図 4.2 に示すような補正を行い、開口幅の測定結果として示すこととした。なお、図中に示されている割れ目の傾斜角 $\theta$ については、図 3.10 の BTV 観察結果を基に、 $84^\circ$ と設定した。

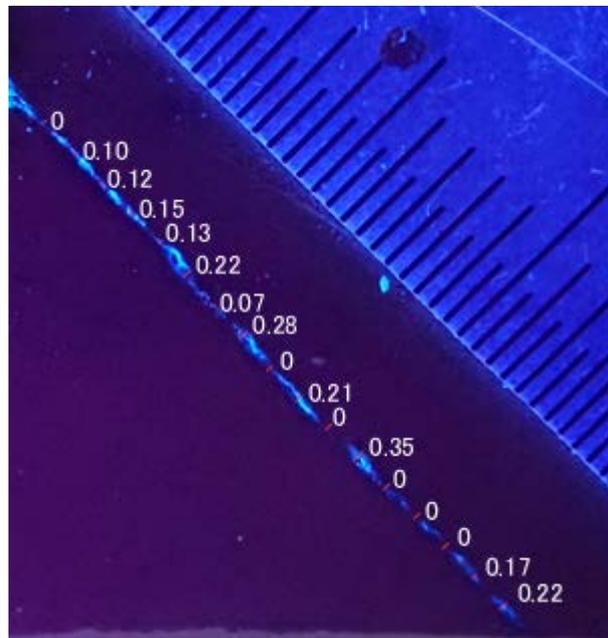


図 4.1 割れ目 RS2W4 における開口幅の測定のイメージ。図中の数値は開口幅（単位：mm）を示す。右側のスケール目盛りは 0.5mm である。

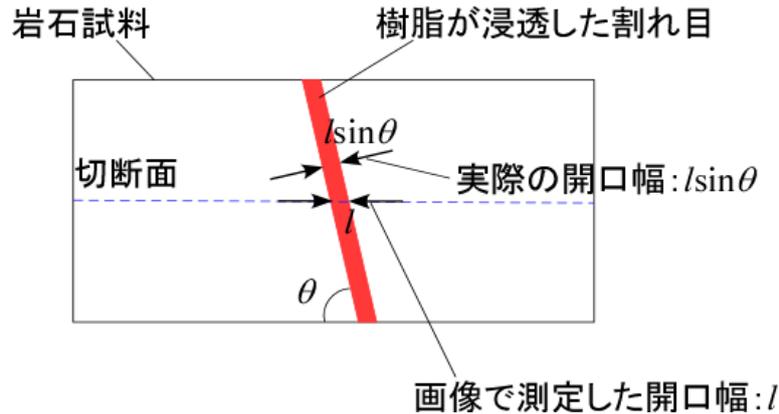


図 4.2 画像で測定した開口幅の補正方法（断面図）

#### 4.1.2 測定結果

開口幅測定対象とした割れ目の名称、開口幅の測定区間と、計測された開口幅の最大値と最小値の範囲、割れ目開口幅の測定間隔を、表 4.2 にまとめて示す。また、図 4.3 に、吹付けコンクリート部分を含む孔口からの距離と割れ目開口幅の情報を整理してグラフとして示す。なお、各割れ目において開口幅を測定した範囲と開口幅の取り得る最小値と最大値を幅として四角形で示している。

結果として、孔口から約 0.3m までの区間では、最大で約 1.02mm の開口幅を有する割れ目が確認された。この区間では、孔口から 0.3m 以深の区間と比較して開口幅の大きな割れ目が分布していることがわかる。また、0～1.02mm の範囲で開口幅が確認されており、開口幅のばらつきも大きいことがわかる。なお、各割れ目で開口幅が 0mm と測定されている箇所があるが、これは、樹脂が浸透した割れ目表面に凹凸が確認され、開口している部分と閉口している部分のコントラストが明確にあることに起因するものである。一方、孔口から 0.3m 以深は、割れ目の本数も少なく、開口幅は最大で 0.19mm であった。

表 4.2 各割れ目の分布位置（壁面からの距離）と開口幅の範囲

観察孔	割れ目名称	測定区間(孔口からの距離 (m))	開口幅(mm)		測定間隔もしくは測定箇所数
			最大値	最小値	
RS-2	RS2E1	0.211-0.230	0.68	0.40	7か所
	RS2E2	0.197-0.221	1.02	0.62	10か所
	RS2E3	0.260-0.275	0.31	0	5か所
	RS2E4	0.280-0.295	0.22	0	1mm間隔
	RS2E5	0.370-0.370	0.13	0.1	3か所
	RS2E6	0.611-0.626	0.19	0.05	8か所
	RS2E7	0.771-0.802	0.13	0.05	8か所
	RS2W1	0.201-0.225	0.34	0	1mm間隔
	RS2W2	0.195-0.195	0.27	0.16	5か所
	RS2W4	0.290-0.305	0.35	0	1mm間隔
	RS2W5	0.415-0.415	0.09	0.09	1か所
	RS2-1	RS2-1-2	0.195-0.275	0.48	0
RS2-2	RS2-2-2	0.191-0.199	0.31	0.15	7か所

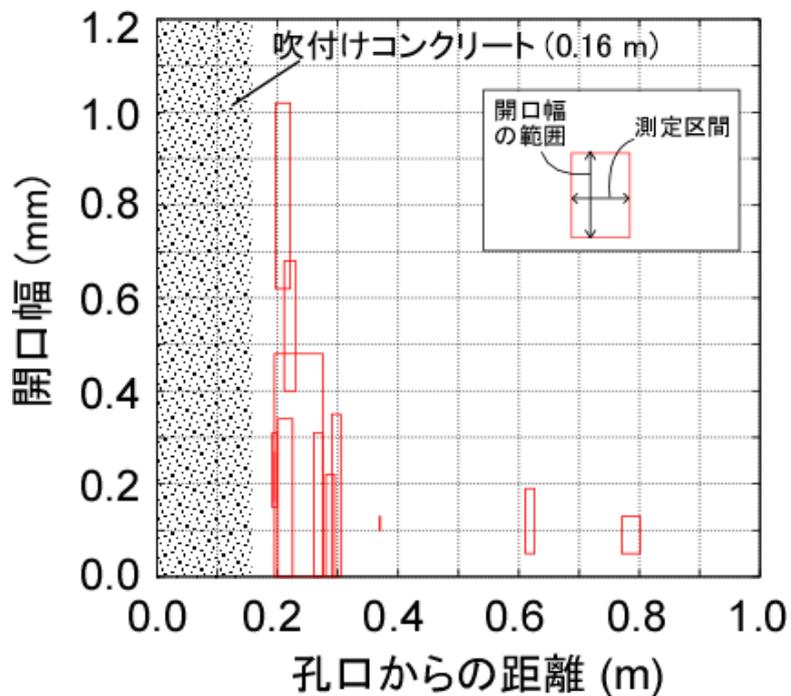


図 4.3 樹脂が充填された割れ目の開口幅と孔口からの距離の関係

## 4.2 EDZ 割れ目の分布

RS-2 孔、および RS2-1～2-3 孔の観察結果を統合し、樹脂注入孔周辺の割れ目分布図を図 4.4 のように作成した。横軸が深度方向、縦軸が水平方向を示す。なお、この分布図は、孔口測量により得られたボーリング孔の水平角と孔口の位置を反映して示したものである。また、RS2-3 孔については、ディスクングやコアロスが多かったため、樹脂が浸透した割れ目の位置のみを示しており、その位置は、孔口から直接定規により測定したものである。本図に示すように、深さ方向に 1m、水平方向に約 0.4m の範囲の割れ目分布図を作成することができた。

### 4.2.1 割れ目の発達状況

割れ目の深度方向の発達状況は、孔口から 0.4m 程度まで EDZ 割れ目が密に発達しており、それ以深は割れ目の間隔が広がることからわかる。割れ目の最大発達範囲は、孔口から約 0.9m であった。なお、樹脂注入孔から約 1m 坑口側に離れた地点で孔長約 1.8m のボーリング掘削を行い、採取したコア試料を観察した。結果として、深度 1m 以深には割れ目は存在していなかったため、孔口から約 0.9m 以深は割れ目が存在しない可能性がある。以上より、EDZ 割れ目の発達範囲は、吹付けコンクリート厚さが平均 0.15m であることを勘案し、坑道壁面の岩盤から最大で約 0.75m であると判断した。

また、EDZ の範囲の推定方法として、コアディスクングに着目する方法がある。過去に北海道幌内炭鉱において坑道周辺で実施したボーリングにより取得したコア観察結果では、ゆるみ域の外側からディスクングが発達していることがわかっている<sup>11)</sup>。これは、坑道掘削により塑性域が生じることによって坑道周辺の応力が緩和し、その塑性域の外側に弾性的な応力集中が生じたことを反映したものと推定されている<sup>12)</sup>。今回の調査で取得した岩石試料の観察では、樹脂注入孔で約 0.56～0.74m、樹脂注入孔のオーバーコア試料で約 0.4～0.6m、樹脂注入孔の RS2-1 孔および RS-2 孔でそれぞれ孔口から約 0.65～0.70m、約 0.45～0.70m の地点でディスクングによると思われる割れ目が存在していた。このことから、ディスクングに着目すると、EDZ は孔口から約 0.4～0.75m、すなわち吹付けコンクリート厚さが約 0.15m であることを考慮すると、岩盤壁面から約 0.25～0.60m となり、割れ目の可視化により推定された EDZ の範囲よりは小さく見積もられる。この深度よりも坑道壁面側で発生した割れ目は、塑性域で発達した割れ目に相当するため、掘削により開口した割れ目と考えられる。また、ディスクングが発達した領域以深で形成された割れ目は、実際の観察でも開口幅が小さいため、既存の割れ目が弾性変形した結果であると考えられることもできる。しかしながら、樹脂注入孔で取得した試料を観察したところ、孔口から 0.9m に位置する割れ目においても、坑道壁面周辺に形成された割れ目と同じ、引張破壊とせん断破壊の両要素を含むハイブリッド破壊の様式をとっていた(図 3.18)。また、研究対象の試験坑道 3 を掘削した際の壁面観察結果では、既存割れ目は観察されなかった<sup>9)</sup>。このため、観察された割れ目はすべて掘削により生じた割れ目と解釈したが、今後、ディスクングの発達領域と割れ目の破壊様式や EDZ の範囲との関連性について検討する必要がある。

樹脂注入試験を実施した試験坑道 3 で過去に EDZ 割れ目の発達領域を検討した結果を参照すると、割れ目が密に発達した領域を EDZ と定義した場合、その発達領域は壁面岩盤から約 0.1～0.6m 程度であることが報告されている<sup>10)</sup>。本調査で EDZ 割れ目の可視化により推定した

EDZ の範囲や、観察されたディスキング割れ目の発達範囲から推定した EDZ の範囲は、既存の調査結果を大きく逸脱するものではなかった。

#### 4.2.2 割れ目の連続性

各試料で確認された割れ目の連続性を、樹脂の浸透状況や割れ目の位置から推定した。図中に A～F で示した記号は、複数のコア試料にわたって連続していると思われる割れ目を示している。孔口座標や孔曲がりの測定の精度の関係上、完全に連続したトレースとして示すことはできていないが、複数の試料にわたって連続して樹脂が浸透した割れ目を 6 本確認することができた。

#### 4.2.3 割れ目の走向

EDZ 割れ目の走向は北東方向のものが多かった。試験坑道 3 は東西方向に掘削されたが、観察された EDZ 割れ目の走向は、坑道を覆うように斜め方向に発達する傾向にあることがわかった。堆積岩を対象として掘削したベルギーの Mol の地下研究施設や、フランスの Bure の地下研究施設において、EDZ 割れ目の走向傾斜を地質観察により分析した結果を参照すると、EDZ 割れ目は坑道を覆うような形状 (Herringbone pattern) で発達することが報告されている<sup>6)13)14)</sup>。また、幌延深地層研究センターの深度 250m の調査坑道で実施した地質観察結果においても、同様に坑道を覆うように EDZ 割れ目が発達することが概念的に示されている<sup>15)</sup>。したがって、本研究で得られた EDZ 割れ目の走向は、既往の地下研究施設において確認された傾向に整合するものであった。

また、RS-2 孔の孔口から 0.2m 付近においては、北東走向の割れ目に対して直交する方向に派生して連結する割れ目が見受けられた。EDZ 割れ目同士を連結するように派生する割れ目が存在することは、スイスの Mont Terri 岩盤研究所における割れ目の可視化事例<sup>3)4)</sup>においても報告されており、今回の観察結果も過去の事例に整合するものであった。

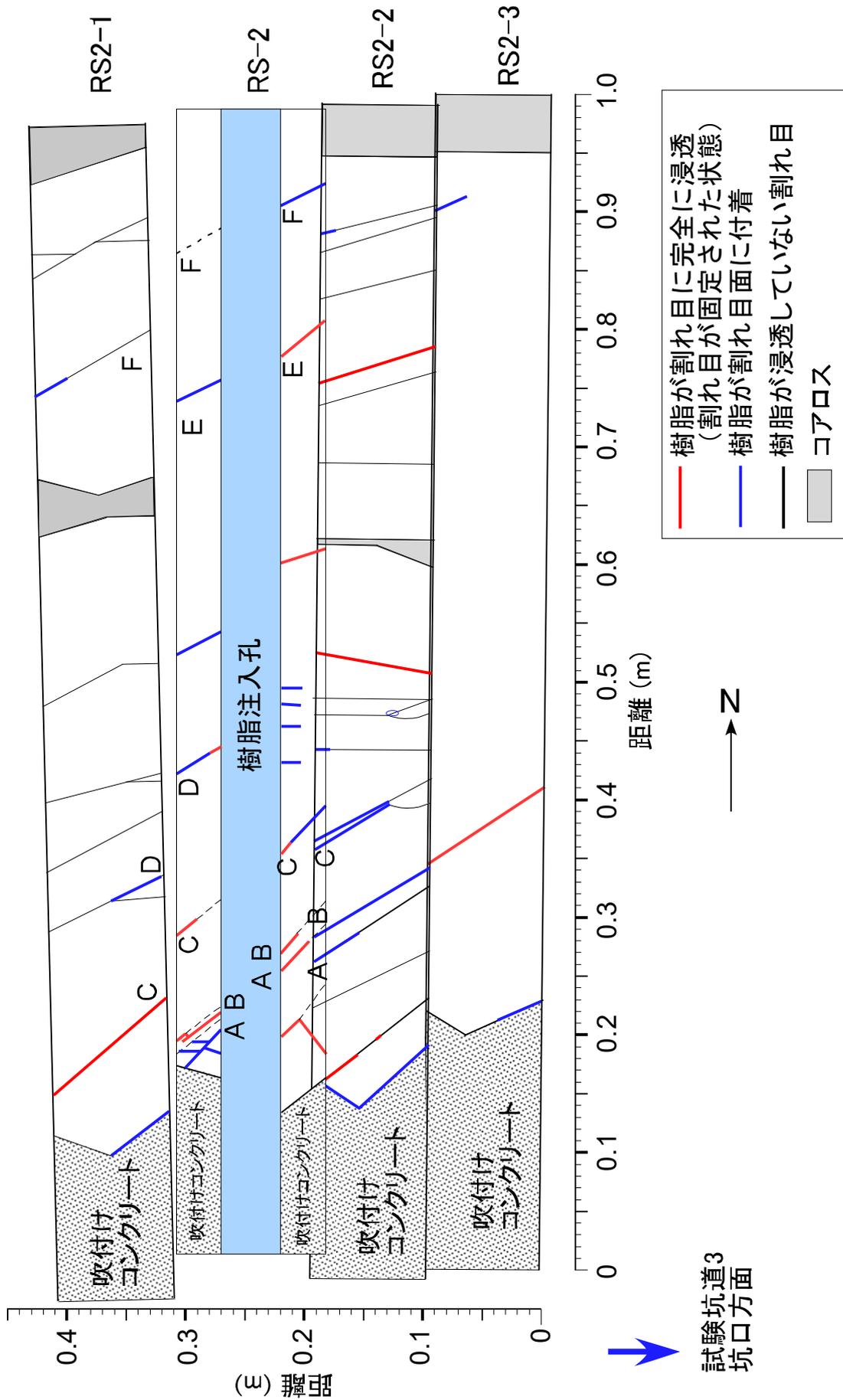


図 4.4 樹脂注入孔周辺で確認された樹脂が充填された割れ目 (EDZ 割れ目) の分布図

#### 4.3 EDZ 評価のための調査手法に対する課題と調査フローの提案

本研究では、樹脂注入試験およびその後の試料の観察により、坑道周辺に発達した EDZ 割れ目の連結性、連続性、割れ目発達範囲、割れ目の走向、開口幅と坑道壁面からの距離の定量的な関係性を確認することができた。本研究での成果を踏まえ、坑道掘削時に生じる EDZ の性状を把握するための調査フローを、図 4.5 のように提案する。なお、図中の青文字で示した項目は、今回の試験で検討課題として挙げたものである。

注入孔のオーバーコアリングにより取得したオーバーコア試料の観察に関しては、注入孔に付着した樹脂で割れ目を含む試料全体が固定されるため、EDZ 割れ目の正確な位置を特定することができる。また、観察後の試料の取り扱いも容易である。そのため、最も有効な手段であるといえる。

次に、注入試験孔周辺で取得した試料の観察により割れ目の進展範囲を推定することができた。これにより、水平方向に約 0.4m、深度方向に約 1m の範囲にわたって割れ目の分布状況や走向、開口幅の情報を得ることができた。しかしながら、ある程度注入孔から離れた場合は、ディスクングの発生などでコアが分離し、正確な位置を特定することが難しい状況も想定されるため、樹脂注入孔からある程度離れた領域では、CCD カメラによる割れ目位置の確認と併用して割れ目の位置を特定する必要がある。また、広範囲で EDZ 割れ目の発達状況を把握するためには、樹脂注入孔を増設することや、多くの樹脂を注入する必要がある。

紫外線照射下の BTV 観察では、本報告に記載した方法では、オーバーコアリング試料の観察により確認された割れ目のほとんどが観察できない状況であった。岩盤部の割れ目への充填状況を詳細に検討するためには、照射強度が高く、なおかつ孔壁全周を照射することができる紫外線ランプを開発して観察に用いる必要がある。

今後は樹脂注入前に透水試験を実施することにより、発達した割れ目性状と透水性の議論を詳細にすることができると考えられることから、透水試験と樹脂注入による割れ目の観察を併用して実施することを提案したい。特に、RS-2 孔の孔口から約 0.25m までで確認されたような、開口幅が大きな割れ目が連結しあって発達している場所と、それ以深で確認された、割れ目同士は連結していないが、ある程度の密度で存在している領域とを分けて透水試験を実施することが望ましい。

本研究で得られた成果と、今後検討すべき課題として挙げた BTV 観察システムの改良、透水試験を図 5.2 のフローに則って実施することにより、EDZ 割れ目の分布、透水係数、開口幅、連結性、割れ目密度といった性状を検討することができると考える。これらのデータは、高レベル放射性廃棄物の地層処分事業において、廃棄体埋設後の放射性核種の移行特性の検討に際して有効なデータであることから、EDZ 割れ目の可視化による分析が放射性廃棄物の地層処分の安全性の確保において重要なデータを提供する可能性がある。

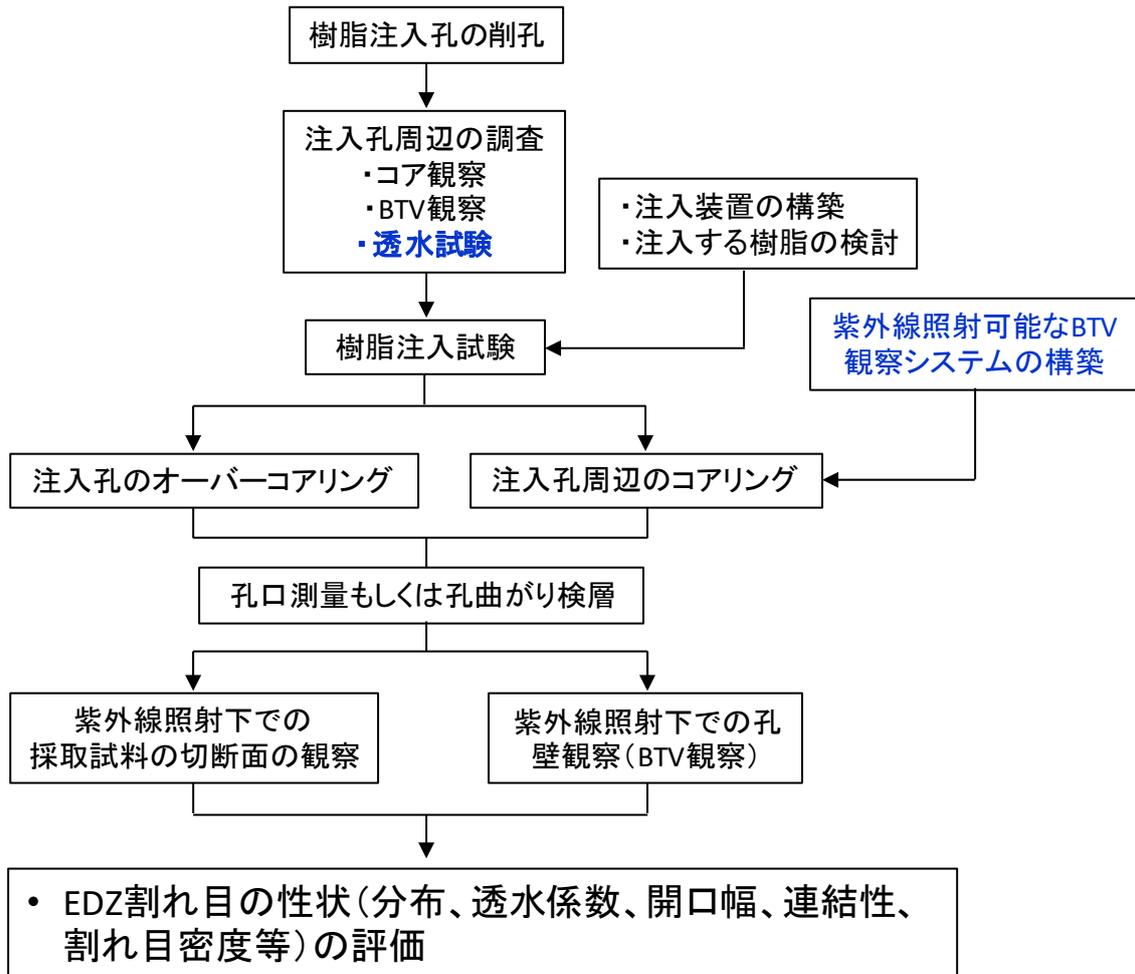


図 4.5 坑道周辺に発達した EDZ の性状を評価するための調査フローの案

## 5. 結言

高レベル放射性廃棄物の地層処分場の建設においては、坑道などの掘削に伴い、その周辺岩盤に EDZ が形成される。EDZ 内部では、新たな割れ目の形成などにより岩盤の透水性が増加することが想定される。また、それらが廃棄体埋設後の放射性核種の移行経路になることも想定される。そのため、高レベル放射性廃棄物の地層処分の安全性を担保するために、透水性の増大に寄与すると考えられる EDZ 内部の割れ目の連結性や開口幅の情報を把握することが重要となる。そこで本研究では、坑道周辺岩盤への擾乱を抑制しつつ、開口幅が小さい割れ目にも浸透することが期待できる樹脂の注入によって EDZ 内部の割れ目を可視化することを目的とした。具体的には、幌延深地層研究センターの 350m 試験坑道 3 において、樹脂注入を行った孔周辺で岩石コア試料を 3 本採取し、紫外線照射下で樹脂の充填状況を確認することにより、坑道周辺の割れ目の分布や連続性について詳細に検討した。

採取したコア試料を紫外線照射下で観察し、水平方向に約 0.4m、深度方向に約 1m の範囲の割れ目分布図を作成することができた。孔口から 0.4m 程度までが割れ目密度が高い領域であり、孔口から 0.4m 以深では割れ目の間隔が広がることがわかった。割れ目の最大発達範囲は、孔口から約 0.9m、吹付けコンクリートの厚さが 0.15m 程度であることを考慮すると、坑道壁面岩盤から約 0.75m の範囲であった。また、コア試料において確認されたディスクキングにより生じたと思われる割れ目に着目すると、孔口から 0.40~0.75m (岩盤壁面から約 0.25~0.60m) となり、割れ目の可視化により推定された EDZ の範囲よりは小さく見積もられる。これらの結果は、過去に本研究で対象とした試験坑道 3 において別途実施した BTV 観察やコア観察により推定した結果<sup>9)10)</sup> (EDZ の発達範囲は壁面から約 0.1~0.6m) を大きく逸脱するものではなかった。

樹脂が充填された割れ目の画像解析により、坑道周辺の EDZ 割れ目の開口幅を測定した。結果として、孔口からの距離が小さいほど割れ目の開口幅も大きいことがわかった。特に、孔口から 0.3m までの範囲では、最大で開口幅が 1.02mm の割れ目が確認された。一方、孔口から 0.3m 以深は、樹脂が浸透した割れ目の本数は少なかった。当該深度の割れ目の開口幅は最大で 0.19mm であり、開口幅が比較的小さい割れ目が分布していた。

EDZ 割れ目の走向に関しては、坑道を覆うように斜め方向に発達する傾向にあることがわかった。これは、過去に堆積岩を対象とした地下施設において実施した地質観察により得られた知見に整合する傾向であった。

今後の課題として、孔壁面で樹脂の浸透状況を確認するために、本共同研究では BTV 観察装置に紫外線ランプを装着した装置を用いて観察を実施したが、岩盤部の割れ目への充填状況を詳細に検討するためには、照射強度が高く、なおかつ孔壁全周を照射することができる紫外線ランプを開発することが挙げられる。さらに、上述のとおり割れ目の発達範囲、開口幅、連続性についての情報は得られたが、EDZ 割れ目の透水係数との関連性については考察できていないので、透水試験も含めた樹脂注入による割れ目の可視化手法を行うことも今後の課題とした。

## 謝辞

本報告書では、平成 27 年度に実施した坑道周辺の樹脂注入試験結果に基づいて EDZ 割れ目の分布や開口幅等の情報を分析した。東亜合成株式会社には、幌延深地層研究センターの 350m 調査坑道において注入した樹脂に関し多くの助言をいただき、また調合をお願いした。株式会社レーザックの藤井宏和氏、益子友裕氏には、樹脂注入試験の実施に際し、多大なるご協力をいただいた。株式会社レアックスの喜多淳滋氏には、紫外線照射下での孔壁展開画像の取得方法を工夫していただくとともに、BTV 観察により孔壁の展開画像を作成いただいた。本研究に関連する原位置試験の実施に際しては、大成・大林・三井住友建設特定工事共同企業体の諸氏に現場作業調整等の協力をいただいた。ここに深く謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 - 地層処分研究開発第 2 次取りまとめ - 分冊 3 地層処分システムの安全評価, JNC TN1400 99-023, 1999, 526p.
- 2) Tsang, C.F., Bernier, F., Davies, C.: Geohydromechanical processes in the Excavation Damage Zone in crystalline rock, rock salt, and indurated and plastic clays- in the context of radioactive waste disposal, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 42, pp.109-125, 2005.
- 3) Bossart, P., Meier, P.M., Moeri, A., Trick, T., Mayor, J.C.: Geological and hydraulic characterization of the excavation disturbed zone in the Opalinus Clay of the Mont Terri Rock Laboratory, *Eng. Geol.*, 66, pp.19-38, 2002.
- 4) Bossart, P., Trick, T., Meier, P.M., Mayor, J.C.: Structural and hydrogeological characterization of the excavation-disturbed zone in the Opalinus Clay (Mont Terri Project, Switzerland), *Applied Clay Science*, 26, pp.429-448, 2004.
- 5) Armand, G., Leveau, F., Nussbaum, C., Vaissiere, R.L., Noiret, A., Jaeggi, d., Landrein, P., Righini, C.: Geometry and Properties of the Excavation-Induced Fractures at the Meuse/Haute-Marne URL Drifts, *Rock Mech. Rock Eng.*, 47, pp.21-41, 2014.
- 6) Armand, G., Wileveau, Y., Morel, J., Cruchaudet, M., Rebours, H.: Excavation Damaged Zone in the Meuse Haute Marne underground research laboratory, *Proc. 11th Congress of the International Society for Rock Mechanics*, pp.33-36, 2007.
- 7) Kupferschmied, N., Wild, K.M., Amann, F., Nussbaum, C., Jaeggi, D., Badertscher, N.: Time-dependent fracture formation around a borehole in a clay shale, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 77, pp.105-114, 2015.
- 8) 青柳和平, 陳友晴, 櫻井彰孝, 石井英一, 石田毅：幌延深地層研究センターにおける掘削損傷領域の可視化手法の検討（共同研究）, *JAEA-Research 2017-014*, 2018, 49p.
- 9) 青柳和平, 石井英一, 石田毅：幌延深地層研究センターの 350m 調査坑道における掘削損傷領域の破壊様式の検討, *Journal of MMIJ*, Vol.133, pp.25-33, 2017.

- 10) Aoyagi, K., Ishii, E.: A Method for Estimating the Highest Potential Hydraulic Conductivity in the Excavation Damaged Zone in Mudstone, *Rock Mech. Rock Eng.*, 52, pp.385-401, doi: <https://doi.org/10.1007/s00603-018-1577-z>, 2019.
- 11) Ishida, T., Saito, T.: Observation of Core Discing and In Situ Stress Measurements; Stress Criteria Causing Core Discing, *Rock Mech. Rock Eng.*, 28, pp.167-182, 1995.
- 12) 石田毅, 金川忠, 矢田篤, 田仲正弘: 空洞掘削時の応力再配分に着目したゆるみ域測定法の提案, *土木学会論文集*, No.457/III-21, pp.41-50, 1992.
- 13) Martens, J., Bastiaens, W., Dehandschutter, B.: Characterisation of induced discontinuities in the Boom Clay around the underground excavations (URF, Mol, Belgium), *Applied Clay Science*, 26, pp.413-428, 2004.
- 14) Wileveau, Y., Bernier, F.: Similarities in the hydromechanical response of Callovo-Oxfordian clay and Boom Clay during gallery excavation, *Phys. Chem. Earth*, 33, pp.S343-S349, 2008.
- 15) Tokiwa, T., Tsusaka, K., Matsubara, M., Ishikawa, T.: Fracture characterization around a gallery in soft sedimentary rock in Horonobe URL of Japan, *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci.*, 65, pp.1-7, 2014.

# 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량	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 組立単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m <sup>2</sup>
体積	立方メートル	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	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン <sup>(b)</sup>	rad	1 <sup>(b)</sup>	m/m
立体角	ステラジアン <sup>(b)</sup>	sr <sup>(c)</sup>	1 <sup>(b)</sup>	m <sup>2</sup> /m <sup>2</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>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
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	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
静電容量	ファラド	F	C/V	m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-2</sup>
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>3</sup> A <sup>2</sup>
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
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>	cd
放射線量	グレイ	Gy	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
放射線量, 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	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
酸素活性化	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	SI基本単位による表し方
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>
表面張力	ニュートンメートル	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s <sup>-2</sup>
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> = s <sup>-1</sup>
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s <sup>2</sup>	m m <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup> = 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>	kg s <sup>-3</sup>
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
比エントロピー	ジュール毎キログラム	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
電荷密度	ボルト毎メートル	V/m	m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
電表面積	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> mol <sup>-1</sup>
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup>
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg <sup>-1</sup> s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>
放射線輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m <sup>4</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> = m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
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)	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> = kg s <sup>-3</sup>
	カタール毎立方メートル	kat/m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> mol

表5. SI 接頭語

乗数	名称	記号	乗数	名称	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>	zepto	z
10 <sup>1</sup>	デカ	da	10 <sup>-24</sup>	yocto	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=60 s
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/10 800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) 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 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=0.1MPa=100 kPa=10 <sup>5</sup> Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 <sup>-10</sup> m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm <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単位との数値的關係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	B	
デシベル	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
エルグ	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> =0.1Pa s
ストークス	St	1 St=1cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> =10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
ストルブ	sb	1 sb=1cd cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> cd m <sup>-2</sup>
フォトル	ph	1 ph=1cd sr cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm 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=1Mx cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> T
エルステッド <sup>(a)</sup>	Oe	1 Oe <sub>e</sub> =(10 <sup>3</sup> /4π)A m <sup>-1</sup>

(a) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「△」は対応關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=1cGy=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=0.2 g=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=4.1858J (「15°C」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ), 4.184J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1μm=10 <sup>-6</sup> m

