

瑞浪超深地層研究所の調査データに基づく割れ目調査手法の検討

笹尾英嗣*1

花崗岩などの結晶質岩では、割れ目が地下水や物質の移行経路となることから、高レベル放射性廃棄物の地層処分においては割れ目の頻度や走向傾斜などの情報を把握することが重要である。地表からのボーリング調査では、割れ目の走向傾斜とボーリング孔の交差角に起因する捕捉率により、ボーリング調査で確認される割れ目に関する情報は不確実性を有する。そこで、瑞浪超深地層研究所の立坑掘削時の壁面調査で取得された割れ目分布に関するデータに基づいて、割れ目分布を限られた調査量で効率的に把握できるボーリング調査方法を検討した。その結果、鉛直孔では高角度傾斜の割れ目の捕捉率が低いが、傾斜孔では割れ目の捕捉率が上昇するとともに高角度傾斜割れ目の捕捉率が上昇することから、鉛直孔よりも傾斜孔の方が割れ目分布を効率良く把握できると考えられた。しかし、割れ目の卓越方位は深度によって変化するため、ボーリングの掘削方位を一義的に決定することは困難である。一方で、瑞浪超深地層研究所近傍の地表露頭における割れ目の卓越方位は、換気立坑で観察された割れ目面の平均方位とほぼ同じであることから、ボーリングの掘削方位は地表調査の結果に基づいて決定することが望ましいと考えられた。

Keywords: 割れ目, ボーリング調査, 結晶質岩, 瑞浪超深地層研究所

Since fractures in the crystalline rock such as granite can act as the pathways for groundwater flow and mass transport, understanding of the fracture distribution is an important subject for the disposal of high-level nuclear waste. Fracture data obtained through the borehole investigation from the ground surface contains errors due to the crossing angle between boreholes and fractures. Therefore, I studied method of borehole investigation that can effectively characterize the fracture distribution based on fracture information obtained from geological investigation of ventilation shaft wall at the Mizunami Underground Research Laboratory. As a result, it was found that inclined lines on shaft wall captured larger number of fractures, especially high-angle fractures, than vertical ones. This indicates that inclined boreholes are preferable for efficient capture of the fractures. However, since the fracture orientation varies with depth, it is difficult to uniquely determine the drilling direction. On the other hand, predominant orientation of fractures at surface exposure, which locates close to Mizunami Underground Research Laboratory, is well concordant with average of strike and dip of fractures observed at ventilation shaft, which implies that the drilling direction should be determined based on the result of surface fracture mapping.

Keywords: fracture, borehole investigation, crystalline rock, Mizunami Underground Research Laboratory

1 はじめに

結晶質岩においては、割れ目が地下水や物質の移行経路となることから、高レベル放射性廃棄物の地層処分においては、割れ目の頻度や走向傾斜などの情報（本論では、この情報を「割れ目分布」という）、割れ目面の形状や充填物の有無、割れ目の連続性、および透水性などを把握することが重要である。

我が国の地層処分事業においては、文献調査、概要調査、精密調査の3段階で調査が行われるが、事業初期には既存文献調査と地表からの調査が主となる。地表から地下深部の割れ目分布を把握するためにはボーリング調査が主体となると考えられるが、割れ目分布は不均質であることが多く、割れ目の走向傾斜とボーリング孔の交差角に起因する捕捉率の違いなどにより、ボーリング調査時の傾斜角や掘削方位によって、調査で取得される割れ目分布に関する情報は不確実性を有する。不確実性を低減するためには、調査量を増やすことが考えられるが、調査に要する時間や費用などの制約もあるため、より少ない調査量で効率的に割れ目分布を評価できることが望まれる。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構では、高レベル放射性廃棄物の地層処分に関する研究開発のうち、深地層の科学的研究の一環として、岐阜県瑞浪市において瑞浪超深地層研究所を建設した。研究所では、白亜紀後期に形

成された土岐花崗岩中に研究坑道を掘削し、割れ目分布の把握を含む地質学的調査を行った[1-2]。この調査の結果、研究坑道周辺の狭い範囲ではあるものの、割れ目の空間分布を把握することができた。そこで、本論では、研究所で取得された割れ目分布に関するデータに基づいて、地表からの調査を念頭に、割れ目分布を効率的に把握できるボーリング調査方法を検討する。

2 瑞浪超深地層研究所と研究所における地質学的調査の概要

2.1 瑞浪超深地層研究所の概要

瑞浪超深地層研究所は研究坑道および関連施設からなる施設の名称である（Fig.1）。地質学的には領家帯および山陽帯に属する深成岩類と美濃帯堆積岩類の境界部に位置し、研究所周辺には白亜紀後期の土岐花崗岩とそれを不整合に被覆する新第三紀中新世の瑞浪層群と鮮新世の瀬戸層群が分布する[3]。

研究坑道は、深度 500 m の 2 本の立坑（主立坑；掘削径 7.3 m、覆工後の内径 6.5 m、および換気立坑；掘削径 5.3 m、覆工後の内径 4.5 m）、深度 100 m ごとに主立坑と換気立坑をつなぐ予備ステージ、並びに深度 300 m と 500 m に設置した主要な水平坑道から構成された[4]（Fig.1）。

研究坑道には、土岐花崗岩と瑞浪層群が分布しており、両者の不整合面は主立坑で深度 166 m、換気立坑で深度 169 m に位置する[3]。

2.2 地質学的調査の概要

立坑掘削時には、2 回の発破・ずり出し後に約 2.6 m の高さの壁面スケッチが行われた[1]。この際には、割れ目分

Study on investigation method of fracture distribution based on data obtained at the Mizunami Underground Research Laboratory, central Japan by Eiji SASAO (sasao.eiji@jaea.go.jp)

*1 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構東濃地科学センター
Tono Geoscience Center, Japan Atomic Energy Agency
〒509-5102 岐阜県土岐市泉町定林寺 959-31

(Received 18 May 2022; accepted 31 October 2022)

布が 1/20 のスケールでスケッチされている (Figs.2, 3). さらに, トレース長の長い割れ目や湧水の認められた割れ目などにおいては, 走向傾斜, 開口幅, 充填物の特徴が記載されている[1, 5-6].

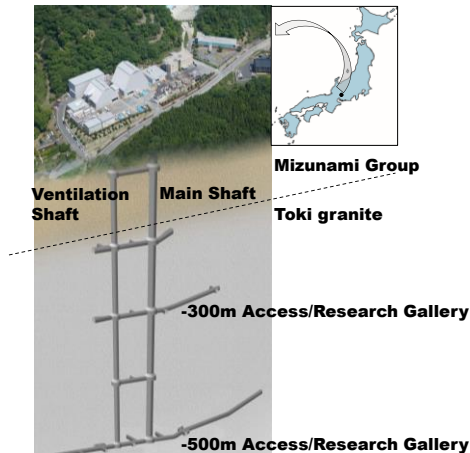


Fig.1 Location and schematic layout of the Mizunami Underground Research Laboratory (MIU).

なお, 主立坑の掘削位置には, 花崗岩中では顕著な変質を伴う地質断層 (主立坑断層) が分布している. 主立坑では, 断層活動によって割れ目密度が高くなっていること[8]から, 本検討では換気立坑の割れ目分布に関するデータのみを用いることとする.

3 換気立坑で観察された割れ目

換気立坑での割れ目分布 (花崗岩中におけるスケッチを統合したもの) を Fig.2 に示す. Fig.2 からは, 深度約 460 m を境に, それ以上は比較的割れ目が多く, 以深は割れ目が少ない. この深度は平均的な透水係数が 1×10^{-8} m/sec オーダーで割れ目の多い上部割れ目帯と, 1×10^{-9} m/sec オーダーで割れ目の少ない下部割れ目低密度帯[2]の境界に当たる. また, 深度 200~300 m では低角度傾斜の割れ目が多く, 特に深度 200~250 m では低角度傾斜の割れ目が密集する.

本検討では, 次章で詳述するように, 深度約 2.6 m ごとに行われたスケッチ[5-6]の北, 北東, 東, 南東, 南, 南西, 西, 北西の 8 か所 (Fig.3 の青色の●) から鉛直下向きの測線を引き (Fig.3 の青色の線; この測線を「鉛直測線」とい

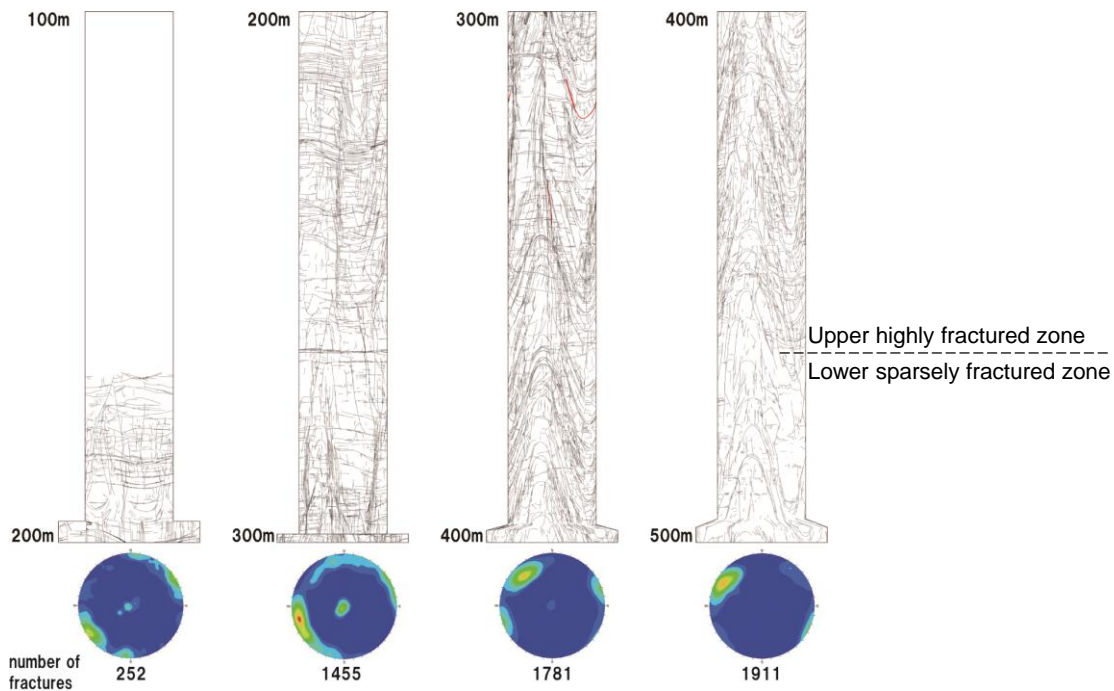


Fig.2 Sketch map of fracture distribution within the ventilation shaft (development view of shaft wall), and Schmidt stereonet diagrams showing fracture orientations (lower hemisphere projections of poles to fracture) [7].

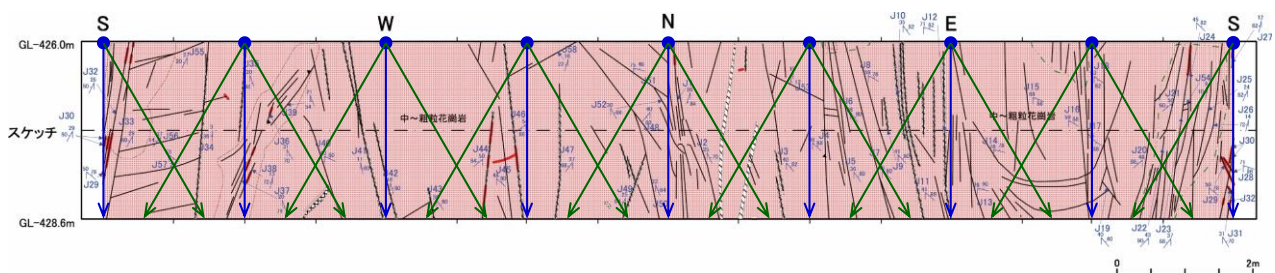


Fig.3 Sketch of shaft wall of the Ventilation shaft [6]. Blue and green lines indicate arrangement of lines to count fractures captured (blue and green lines indicate vertical and declined lines, respectively).

う), この測線と交差する割れ目を数えた (これを「割れ目捕捉数」という)。なお, 割れ目捕捉数を測線の長さで除したものが 1 m 当たりの割れ目捕捉数 (単位は割れ目数/m) であり, これを「割れ目捕捉率」という。Fig.4 には各深度における割れ目捕捉率 (各深度における 8 測線の割れ目捕捉率の平均) を示した。Fig.4 から深度約 300 m 以浅では割れ目頻度のばらつきが大きい (深度によって割れ目の多寡が異なる) のに対し, 深度約 300 m 以深では深部に向かって割れ目捕捉率が減少する傾向が認められる。

ところで, 割れ目の走向傾斜は同一深度でも複数認められることが多いと推定される。割れ目分布を把握するためには, 割れ目面に直交する方向にボーリングを掘削すれば良いが, 割れ目の走向傾斜が複数認められる場合, 割れ目分布を把握するために複数のボーリング孔を掘削することは現実的ではない。例えば, 瑞浪超深地層研究所での立坑掘削時の調査において, 最深部の深度 493.0~495.6 m の区間では走向傾斜が記載された割れ目 35 本中, 北東-南西走向で南西傾斜の割れ目が 19 本で, 他は南北走向・東傾斜 (5 本), 北西-南東走向・北東傾斜と北西-南東走向・南西傾斜 (各 3 本) などが認められた。こうした割れ目を効率よく捕捉するためには, できるだけ多くの割れ目面に交差する方向にボーリングを掘削すればよいと考えられる。そこで, 1 枚のスケッチ (深度約 2.6 m 分) 中で割れ目面の下向き法線の方位を求め, 全ての割れ目の下向き法線の方位の平均値を, 清水[9]に基づいて求めた (Fig.5)。なお, この方法は, 複数の方位データについて, 各方位データを角度 θ , 長さ 1 のベクトルとし, これを合成したものを平均値とするものである。Fig.5 から, 割れ目面の平均方位は, 比較的浅部 (深度約 170~250 m) では北西-南東走向で北東傾斜から南北走向で東傾斜であるが, 深度 300 m 以深では北東-南西走向で南東傾斜となり, 割れ目の平均方位は深度によって変化する。その間の深度 250~300 m では南北走向で東傾斜から北東-南西走向で南東傾斜を経て東西走向で南傾斜までばらつきを有する。

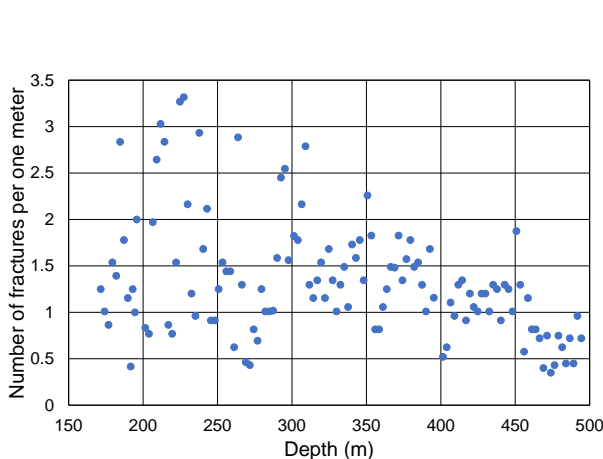


Fig.4 Depth variation of average fracture capture rate at 8 survey lines for each sketch (about 2.6m depth).

4 地表からのボーリング調査を想定した割れ目捕捉数

4.1 方法

本検討においては, 最初に鉛直下向きのボーリング調査を想定し, 換気立坑の深度 170.2~495.6 m の区間を対象として, 割れ目スケッチと記載[5-6]を用い, 割れ目スケッチ上に鉛直下向きの測線を引き (Fig.3 の青色の線; この測線を「鉛直測線」という), その線と交差する割れ目の数を数えた (Fig.3)。鉛直測線は, スケッチ上での測線の引きやすさを考慮して, スケッチ上で位置が明示されている立坑の北, 北東, 東, 南東, 南, 南西, 西, 北西の 8 点から引いた。測線の長さは, 土岐花崗岩と上位の堆積岩との不整合面を含むスケッチと, 水平坑道との接続部 (立坑の径が変わるため) を除いた合計 316.2 m である。また, 割れ目の傾斜については, スケッチ時の記載データ[5-6]を利用し, 低角度 (傾斜角 $0\sim 30^\circ$), 中角度 ($31\sim 60^\circ$), 高角度 ($61\sim 90^\circ$), 記載なしの 4 つに区分して集計した (Table 1)。

鉛直測線は鉛直下向きにボーリング孔を掘削した場合を想定している。一方で, 高角度傾斜の割れ目を効率的に捕捉するためには, ボーリング孔を水平に近い角度で掘削することが好ましい。しかし, ボーリング調査は割れ目を捕捉するためだけに行われるものではなく, ボーリング孔の掘削角度を水平に近づけるほど目的とする深度までの掘削長が長くなってしまい, 調査期間やコストの面で不利になる。本検討では, こうした点を考慮して水平面から下向きに 60° 傾斜のボーリング調査を想定し, 各スケッチ上端の北, 北東, 東, 南東, 南, 南西, 西, 北西の 8 点 (Fig.3 の青色の●) から水平面から下向きに 60° 傾斜の測線を引き (Fig.3 の緑色の線; この測線を「傾斜測線」という), 割れ目の捕捉数を数えた。傾斜測線はスケッチ上で左右 2 方向に設定した (Fig.3)。なお, Fig.6 に示すように, 傾斜測線は各スケッチの上端から引いており, 測線が鋸歯状になっている。このため, 高角度傾斜の割れ目が密集する場所では, 割れ目の捕捉数が実際の調査に比べて多くなっている可能性がある。

割れ目捕捉数を計測した測線は, 鉛直下向き (鉛直測線)

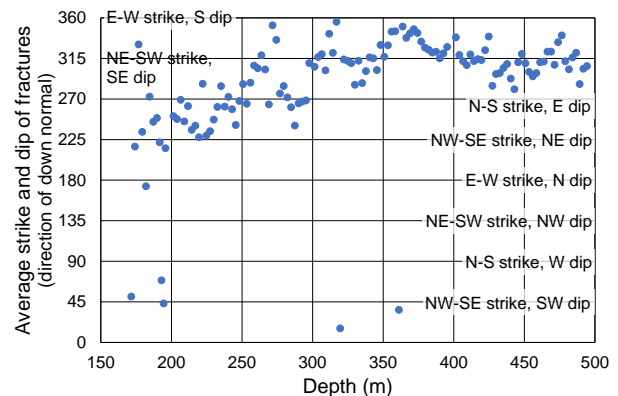


Fig.5 Depth variation of the average of strike and dip (direction of the downward normal of the face) of the fracture with strike and dip described in each sketch (for about 2.6 m depth).

に 8 本, 60° 傾斜 (傾斜測線) がスケッチ上で左右 2 方向に各 8 本であり, 合計 24 本である (Fig.3).

4.2 結果

4.2.1 鉛直測線

各測線における割れ目捕捉数を **Table 1** にまとめた. また, 捕捉した割れ目の傾斜ごとの割合を **Table 2** に示す.

鉛直測線での割れ目捕捉数は 350~472 本 (平均は 424 本) であり, わずか数 m 離れた測線でも捕捉数に最大 120 本にも及ぶ差異が認められた (**Table 1**). そこで, 8 本の鉛直測線での割れ目捕捉数を用いて変動係数を求めたところ, 10.3 %となった. なお, 変動係数はデータの標準偏差を平均値で除したもので, データにおける数値の大きさの影響を排除したものであり, 数値 (平均値) の大小に関係なく, データの平均値に対する相対的なばらつきの程度を表すものである (例えば, 尾上ほか[10]).

4.2.2 傾斜測線

傾斜測線の割れ目捕捉数を **Table 3** に示す. また, 割れ目の傾斜ごとの割合を **Table 4** に示す. **Table 3** と **Table 4** では, 各スケッチ上端の北, 北東, 東, 南東, 南, 南西, 西, 北西の 8 点から左右 2 方向への結果を示している.

傾斜測線の測線長は, 鉛直測線に比べて約 1.15 倍長くな

Table 1 Number of fractures captured on vertical counting lines and coefficient of variation.

Vertical counting line	All fractures	Dip angle			
		Low (0-30°)	Middle (30-60°)	High (60-90°)	No information
North	432	119	18	122	173
Northeast	454	113	18	109	214
East	470	117	21	156	176
Southeast	472	77	18	194	183
South	434	98	26	168	142
Southwest	404	111	21	154	118
West	379	110	24	140	105
Northwest	350	85	17	113	135
Total	3395	830	163	1156	1246
Average	424	104	20	145	156
Standard deviation	43.7	15.5	3.2	29.3	36.8
Coefficient of variation (%)	10.3	15.0	15.9	20.3	23.6

Table 2 Ratio of dip of fractures captured on vertical counting lines (unit: percent).

Counting line	Low (0-30°)	Middle (30-60°)	High (60-90°)
North	46	7	47
Northeast	47	8	45
East	40	7	53
Southeast	27	6	67
South	34	9	58
Southwest	39	7	54
West	40	9	51
Northwest	40	8	53
Average	39	8	54

Table 3 Number of fractures captured on declined counting lines and coefficient of variation.

Starting point of counting line	Direction of declined counting line		All fractures	Dip angle			
	On sketch	Azimuth		Low (0-30°)	Middle (30-60°)	High (60-90°)	No information
North	to the right (Eastward)	106.2	621	115	20	204	282
	to the left (Westward)	253.8	855	119	20	420	296
Northeast	to the right (Southeastward)	151.2	607	108	21	211	267
	to the left (Northwestward)	298.8	830	129	36	319	346
East	to the right (Southward)	196.2	626	110	23	260	233
	to the left (Northward)	343.8	826	117	23	365	321
Southeast	to the right (Southwestward)	241.2	835	95	24	391	325
	to the left (Northeastward)	28.8	746	86	20	360	280
South	to the right (Westward)	286.2	982	107	44	532	299
	to the left (Eastward)	72.8	609	101	23	239	246
Southwest	to the right (Northwestward)	331.2	778	114	22	391	251
	to the left (Southeastward)	118.8	678	95	19	357	207
West	to the right (Northward)	16.2	650	114	28	337	171
	to the left (Southward)	163.8	528	103	13	242	170
Northwest	to the right (Northeastward)	61.2	614	80	17	314	203
	to the left (Southwestward)	208.8	532	101	14	240	177
Total			11317	1694	367	5182	4074
Average			707	106	23	324	255
Standard deviation			131.3	12.7	7.8	88.7	56.9
Coefficient of variation (%)			18.6	12.0	33.8	27.4	22.4

っているが, 割れ目捕捉数は鉛直測線での平均 424 本に対して傾斜測線では平均 707 本であり, 約 1.7 倍増加した. また, 鉛直測線に比べて高角度傾斜の割れ目の捕捉率が増加している (**Table 4**).

5 考察

5.1 割れ目分布の不均一性

変動係数は岩盤中における割れ目分布の不均一性, および測線と割れ目の傾斜が近いことによる捕捉率の双方に起因すると考えられる.

傾斜測線での割れ目捕捉数の変動係数は 18.6 %であり (**Table 3**), 鉛直測線での変動係数よりも大きくなった. これは, 傾斜測線では鉛直測線に比べて測線ごとの割れ目捕捉数のばらつきが大きくなったことを意味する. 傾斜測線では **Fig.6** に示したように, 高角度傾斜の割れ目を重複して数えている可能性があるものの, 鉛直測線でも測線の位置によって割れ目捕捉数に約 10 %の差異が認められている. この差異は, 瑞浪超深地層研究所に分布する花崗岩の割れ目分布の不均一性に起因する可能性がある.

なお, 傾斜測線では, 鉛直測線に比べて捕捉された全ての割れ目に対する高角度傾斜の割れ目の割合が高くなっており (**Table 2** および **Table 4** を参照), 測線と割れ目との交差角に起因する捕捉率は改善されていると考えられる.

ところで, 全ての割れ目のうち, 鉛直測線で約 37 %, 傾斜測線で約 36 %の割れ目については走向傾斜が記載されていない (**Table 1** および **Table 3** を参照). 後述するように, 本論では, 割れ目面の方位に基づいた議論を行うため, 走

Table 4 Ratio of dip of fractures captured on declined counting lines (unit: percent).

Starting point of counting line	Direction of declined counting line		Dip angle		
	On sketch	Azimuth	Low (0-30°)	Middle (30-60°)	High (60-90°)
North	to the right (Eastward)	106.2	34	6	60
	to the left (Westward)	253.8	21	4	75
Northeast	to the right (Southeastward)	151.2	32	6	62
	to the left (Northwestward)	298.8	27	7	66
East	to the right (Southward)	196.2	28	6	66
	to the left (Northward)	343.8	23	5	72
Southeast	to the right (Southwestward)	241.2	19	5	77
	to the left (Northeastward)	28.8	18	4	77
South	to the right (Westward)	286.2	16	6	78
	to the left (Eastward)	72.8	28	6	66
Southwest	to the right (Northwestward)	331.2	22	4	74
	to the left (Southeastward)	118.8	20	4	76
West	to the right (Northward)	16.2	24	6	70
	to the left (Southward)	163.8	29	4	68
Northwest	to the right (Northeastward)	61.2	19	4	76
	to the left (Southwestward)	208.8	28	4	68
Average			24	5	71

向傾斜が記載されていない割れ目が以後の議論に影響を及ぼす可能性がある。この影響を確認するため、走向傾斜が記載されている割れ目の本数のみを合計して変動係数を求めたところ、鉛直測線で 10.6 %、傾斜測線で 21.0 % となり、割れ目本数のばらつきに関しては、記載無しの割れ目を含めた場合と比較して大きな差は認められなかった。また、低角度傾斜の割れ目は長さ 2 m 以上のものはすべて記載されていること [1]、傾斜測線でも割れ目捕捉数のばらつきに大きな差が無かったことから、走向傾斜の記載されている割れ目のみを議論に用いても結果に大きく影響しないと考えられる。

5.2 ボーリング孔の傾斜角度に関する検討

Table 4 に示したように、傾斜測線では高角度傾斜割れ目を効率的に捕捉できていると考えられ、割れ目分布を効率的に把握するためには傾斜掘りのボーリング調査が有効であると言える。傾斜角については、水平面に対してより低角度のボーリングの方が高角度傾斜を効率的に捕捉できると考えられるが、一方で水平面からの傾斜角が低くなればなるほど、目的とする深度までの掘削長が長くなるため、角度については他の調査項目や調査期間、想定されるコストなどと合わせて決定することが好ましいと考えられる。

5.3 ボーリング孔の掘削方位に関する検討

ボーリング掘削時の傾斜角を鉛直下向きから浅くしても、掘削方位と高角度傾斜の割れ目の走向が一致していれば、そうした割れ目を全く捕捉できないことになる。このため、

ボーリングの掘削方位も割れ目調査には重要な視点である。

Fig.5 に示したように、割れ目の走向傾斜は深度によって変化し、瑞浪超深地層研究所の換気立坑では 250 m 以浅と 300 m 以深では割れ目の面の下向き法線の方位の平均値に最大 90° 程度の違いがあることがわかる。ここで、この法線は割れ面に垂直であるため、法線の方位にボーリングを掘削することにより、その割れ目を効率的に捕捉できると考えられる。しかし、Fig.5 に示したように、卓越する割れ目方位が深度によって変化する場合、割れ目分布を効率的に捕捉できるボーリングの掘削方位を一義的に決定することは困難であると思われる。

そこで、個々の割れ目の走向傾斜(割れ目面の法線方位)に基づいた検討を行う。走向傾斜が記載された割れ目について、下向き法線の方位ごとの割れ目数を Table 5 にまとめた。その結果、全体としては北東-南西走向で南東傾斜の割れ目が卓越する。深度ごとに見ると、深度 200~300 m では北西-南東走向で北東傾斜の割れ目が卓越し、次いで南北走向で東傾斜の割れ目が多い (Table 5)。この特徴は Fig.5 に示した割れ目の下向き法線の方位の平均値から求めた割れ目の平均的な走向傾斜と一致する。また、深度 300~500 m では、北東-南西走向で南東傾斜の割れ目が卓越するが (Table 5)、これも Fig.5 に示した割れ目の平均的な走向傾斜と一致する。

Table 6 には北、北東、東、南東、南、南西、西、北西の各点での鉛直測線における割れ目捕捉数に対する左右 2 方向への傾斜測線での割れ目捕捉数の比を示す (Table 6 には傾斜測線の方位角も示してある)。Fig.6 に示したように、傾斜測線は鋸歯状になっているため、割れ目を重複して数えている可能性はあるものの、一部の測線の低角度傾斜割れ目以外は傾斜測線での割れ目捕捉数が鉛直測線での割れ目捕捉数を上回っている。中でも、傾斜測線での中角度~高角度傾斜割れ目の捕捉数は鉛直測線と比べて顕著に多く、傾斜測線で捕捉された割れ目では高角度傾斜の割合が多くなっていることとも合致する (Tables 2, 4)。また、傾斜測線で割れ目捕捉数が比較的多くなる測線の方位 (Table 6 で All fractures の値が 2 を超す、数値に下線を付したものは西 (方位角が 286.2° と 253.8° の測線) で、次いで北西 (方

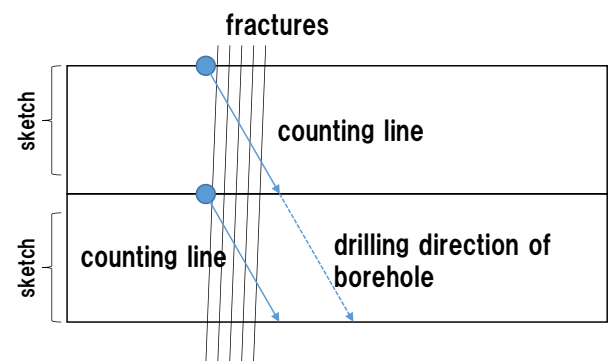


Fig.6 Schematic illustration of allocation of counting lines for fracture in this study (solid lines) and of borehole (dotted line).

Table 5 Number and ratio of fractures in each direction of down normal. Underlined numbers indicate largest number and ratio at each depth.

Fractures with all dip angle

Direction of down normal (strike and dip direction)		North (E-W strike, S dip)	Northeast (NW-SE strike, SW dip)	East (N-S strike, W dip)	Southeast (NE-SW strike, NW dip)	South (E-W strike, N dip)	Southwest (NW-SE strike, NE dip)	West (N-S strike, E dip)	Northwest (NE-SW strike, SE dip)
Azimuth (clockwise)		337.5 - 22.5	22.5 - 67.5	67.5 - 112.5	112.5 - 157.5	157.5 - 202.5	202.5 - 247.5	247.5 - 292.5	292.5 - 337.5
All depth	number of fractures	524	536	385	196	288	666	912	<u>1604</u>
	percent	10	10	8	4	6	13	18	<u>31</u>
200 - 300 m	number of fractures	198	125	62	24	126	<u>351</u>	320	147
	percent	15	9	5	2	9	<u>26</u>	24	11
300 - 400 m	number of fractures	172	159	186	92	45	129	207	<u>698</u>
	percent	10	9	11	5	3	8	12	<u>41</u>
400 - 500 m	number of fractures	130	213	113	68	89	120	353	<u>742</u>
	percent	7	12	6	4	5	7	19	<u>41</u>

Table 6 Ratio of number of fractures captured on the declined counting lines to vertical lines. Underlined numbers indicate largest ratio in each direction.

Starting point of counting line	Direction of declined counting line		All fractures	Fractures with information on dip angle				Fractures without information on dip angle
	On sketch	Azimuth		Total	Low angle	Middle angle	High angle	
West	to the right (Northward)	16.2	1.75	1.04	1.17	2.41	1.63	1.52
SE	to the left (Northeastward)	28.8	1.61	1.12	1.11	1.86	1.53	1.30
NW	to the right (Northeastward)	61.2	1.91	0.94	1.00	2.78	1.50	1.24
South	to the left (Eastward)	72.8	1.24	1.03	0.88	1.42	1.73	1.48
North	to the right (Eastward)	106.2	1.31	0.97	1.11	1.67	1.63	1.85
SW	to the left (Southeastward)	118.8	1.65	0.86	0.90	2.32	1.75	2.00
NE	to the right (Southeastward)	151.2	1.42	0.96	1.17	1.94	1.25	1.12
West	to the left (Southward)	163.8	1.31	0.94	0.54	1.73	1.62	1.43
East	to the right (Southward)	196.2	1.34	0.94	1.10	1.67	1.32	1.60
NW	to the left (Southwestward)	208.8	1.65	1.19	0.82	2.12	1.31	1.24
SE	to the right (Southwestward)	241.2	1.76	1.23	1.33	2.02	1.78	1.33
North	to the left (Westward)	253.8	<u>2.16</u>	1.00	1.11	3.44	1.71	2.15
South	to the right (Westward)	286.2	<u>2.34</u>	1.09	1.69	3.17	2.11	1.59
NE	to the left (Northwestward)	298.8	<u>2.02</u>	1.14	2.00	2.93	1.62	1.42
SW	to the right (Northwestward)	331.2	1.84	1.03	1.05	2.54	2.13	2.11
East	to the left (Northward)	343.8	1.72	1.00	1.10	2.34	1.82	1.55
			1.69	1.03	1.13	2.27	1.65	1.56

Table 7 Rate of increase of number of fractures captured on the declined counting lines to vertical lines in each depth. Underlined numbers indicate maximum number and ratio in each direction.

Starting point of counting line	Direction of declined counting line		200 - 300 m		300 - 400 m		400 - 500 m	
	On sketch	Azimuth	All fractures with information on dip angle	High angle fractures	All fractures with information on dip angle	High angle fractures	All fractures with information on dip angle	High angle fractures
West	to the right (Northward)	16.2	1.44	3.00	2.20	2.76	1.84	2.02
SE	to the left (Northeastward)	28.8	1.67	1.94	1.78	2.01	1.15	1.35
NW	to the right (Northeastward)	61.2	1.71	3.70	2.20	2.51	2.07	2.24
South	to the left (Eastward)	72.8	1.85	4.67	0.92	0.94	1.07	1.26
North	to the right (Eastward)	106.2	1.15	1.32	1.38	1.72	1.62	1.86
SW	to the left (Southeastward)	118.8	1.34	2.38	2.08	2.50	1.63	2.00
NE	to the right (Southeastward)	151.2	1.28	2.92	1.65	1.90	1.30	1.57
West	to the left (Southward)	163.8	1.26	2.22	1.13	1.26	1.80	2.29
East	to the right (Southward)	196.2	1.65	3.76	1.11	1.10	1.12	1.21
NW	to the left (Southwestward)	208.8	1.80	3.30	1.71	1.75	1.43	1.64
SE	to the right (Southwestward)	241.2	1.70	2.04	1.74	1.84	1.67	1.98
North	to the left (Westward)	253.8	2.03	5.08	2.50	3.50	2.25	2.45
South	to the right (Westward)	286.2	1.92	4.07	<u>3.15</u>	3.86	1.98	2.20
NE	to the left (Northwestward)	298.8	1.62	4.00	2.32	2.72	2.28	2.84
SW	to the right (Northwestward)	331.2	1.52	2.85	1.88	2.13	<u>2.36</u>	2.98
East	to the left (Northward)	343.8	1.03	1.38	2.56	2.48	2.29	2.74

位角 298.8° の測線) となった。これらの測線に垂直の割れ目の走向傾斜は南北走向で東傾斜, 次いで北東-南西走向で南東傾斜であり, **Table 5** で示した割れ目分布が比較的

多い方位と一致する。

Table 7 には深度別の鉛直測線における割れ目捕捉数に対する左右 2 方向への傾斜測線での割れ目捕捉数の比を示

した。換気立坑では卓越する割れ目方位が深度によって変化するが、深度 200~300 m では西向き測線で割れ目捕捉数の比が最も高くなっており、傾斜測線では鉛直測線に比べて南北走向で東傾斜の割れ目の捕捉数が最も多くなったことを示す。この深度では北西-南東走向で北東傾斜の割れ目に次いで南北走向で東傾斜の割れ目が多く、割れ目面に直交する方位の測線で割れ目捕捉数の比が高くなっている。また、割れ目捕捉数の比が高い場合、高角度傾斜の割れ目捕捉数の比も非常に高くなっている (Table 7)。こうした傾向は他の深度でも同様であり、多くの高角度傾斜の割れ目面に直交する方位にボーリングを掘削することによって、より効率的に割れ目分布を把握することができることを示す。

ところで、土岐花崗岩の地表における割れ目分布は藤井[11]および藤井・小島[12]によって調査されている。その結果に基づく、超深地層研究所に最も近い計測点 (藤井ら[11, 12]の明世; 研究所から 1km 西南西と 1.7 km 南西の 2 地点) では、ほぼ水平の割れ目と北東-南西走向 (N30°E) で垂直の割れ目系が卓越し、次いで北西-南東走向 (N40°W) で垂直の割れ目が多いとされる[12]。換気立坑では、浅部 (深度 200~300 m) では割れ目面の平均方位は北西-南東走向で、深部 (深度 300 m 以深) では北東-南西走向であり、藤井ら[11, 12]の明世における割れ目の卓越方位とはほぼ一致する。この結果は、最初に掘削するボーリング孔の掘削方位は地表調査の結果に基づいて決定することが望ましいことを示唆する。ただし、藤井ら[11, 12]に基づけば、割れ目の走向傾斜は同一岩体でも場所によって異なるため、広範囲の地表調査の結果だけではなく、ボーリング掘削地点周囲の情報に基づく必要があるものと考えられる。

6 まとめ

本論文では、瑞浪超深地層研究所の換気立坑で取得された割れ目データに基づいて、地表からの調査を念頭に、割れ目分布を限られた調査量で効率的に把握できるボーリング調査方法を検討した。その結果、ボーリング掘削時は鉛直孔よりも傾斜孔の方が割れ目分布を効率良く把握できることが分かった。しかし、割れ目の卓越方位は深度によって変化するため、ボーリングの掘削方位を一義的に決定することはできなかった。一方で、瑞浪超深地層研究所近傍の地表露頭における割れ目の卓越方位は、換気立坑で観察された花崗岩中の割れ目面の平均方位とほぼ同じであることから、ボーリングの掘削方位は地表調査の結果に基づいて決定することが望ましいと考えられた。

謝辞

研究坑道の壁面地質調査は、日本原子力研究開発機構、清水・鹿島・前田特定共同企業体 (換気立坑) および大林・大成・間特定共同企業体 (主立坑) の技術者によって実施されました。瑞浪超深地層研究所の研究者・技術者の方々には、論文作成にあたって有形無形の支援を頂きました。

ここでは個々の方のお名前は記しませんが、調査に関わった方々に深く感謝の意を表します。

日本原子力研究開発機構の島田耕史博士には割れ目データの解析法をご教示頂きました。島田博士と同機構・竹内竜史博士には本稿をお読み頂き、貴重なコメントを頂きました。同機構・浅井政枝氏には英文を校閲して頂きました。また、匿名の査読者の方々には本稿の改善に役立つ貴重なコメントを頂きました。以上の方々に深く感謝致します。

参考文献

- [1] 鶴田忠彦, 笹尾英嗣: 瑞浪超深地層研究所における研究坑道掘削に伴って実施した壁面地質調査. 応用地質 **56**, pp.298-307 (2016).
- [2] 鶴田忠彦 他: 瑞浪超深地層研究所における深部地質環境のモデル化を目指した地質学的調査. 地質学雑誌 **119**, pp 59-74 (2013).
- [3] 持田裕之, 天野健治, 鶴田忠彦: 3D レーザースキャナーの受光強度画像を用いた画像処理による岩相区分の試みー瑞浪超深地層研究所に分布する瑞浪層群の適用事例ー. 応用地質 **48**, pp.126-131 (2007).
- [4] 笹尾英嗣: 日本原子力研究開発機構東濃地科学センターの歩みと瑞浪超深地層研究所の概要. 地質と調査 No.154, pp.67-72 (2019).
- [5] 川本康司 他: 超深地層研究所計画 瑞浪超深地層研究所 研究坑道の壁面調査データ集. JAEA-Data/Code 2012-009, 日本原子力研究開発機構 (2012).
- [6] 川本康司 他: 超深地層研究所計画 瑞浪超深地層研究所 深度 300 m~500 m の研究坑道の壁面調査データ集. JAEA-Data/Code 2012-025, 日本原子力研究開発機構 (2013).
- [7] Sasao, E. et al.: Formative mechanism of inhomogeneous distribution of fractures, an example of the Toki Granite, Central Japan. *Proceedings of 10th Asian Regional Conference of International Association for Engineering Geology and the Environment*, Tp3-P01 (2015).
- [8] 窪島光志 他: 超深地層研究所計画地質・地質構造に関する調査研究ー深度 300 m までの地質・地質構造ー. JAEA-Research 2012-037, 日本原子力研究開発機構 (2013).
- [9] 清水邦夫: 方向統計学の最近の発展. 計算機統計学 **19**, pp.127-150 (2006).
- [10] 尾上博則 他: 長期的な地形変化と気候変動による地下水流動状態の変動性評価手法の構築. 原子力バックエンド研究 **26**, pp.3-14 (2019).
- [11] 藤井幸泰: 中部日本東濃地方, 土岐花崗岩中の割れ目解析. 地質学雑誌 **106**, pp.249-263 (2000).
- [12] 藤井幸泰, 小島智: 岐阜県南部土岐花崗岩中の割れ目解析. 平成 8 年度応用地質学会中部支部研究発表会・講演会予稿集, pp.9-12 (1996).