

我が国の岩盤における亀裂特性について
(研究報告)

1999年11月

核燃料サイクル開発機構
東 海 事 業 所

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村大字村松4-33

核燃料サイクル開発機構 東海事業所

運営管理部 技術情報室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Information Section,

Administration Division,

Tokai Works,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-33 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1194,

Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
1999

JNC TN8400 99-091

1999年11月

我が国の岩盤における亀裂特性について
(研究報告)

井尻裕二*、澤田淳*、赤堀邦晃*

要旨

高レベル放射性廃棄物の地層処分における天然バリアの性能評価研究においては、岩盤中の支配的な核種移行経路となる亀裂の特性を把握しておく必要がある。本書は、既往の文献調査および釜石鉱山や日本全国の露頭や鉱山坑道壁面で実施した亀裂調査結果をもとに、我が国における地下岩盤の亀裂特性（亀裂の方向性、形状、頻度、空間分布、透水量係数、開口幅、亀裂内充填鉱物、亀裂周辺変質部、流路面積〔開口部面積〕およびこれらの相関関係）に関してまとめたものである。その結果、典型的な亀裂性岩盤である花崗岩中の亀裂特性に関しては、既往の文献も多いのに加え諸外国の性能評価研究や釜石鉱山での調査などデータが豊富であることから、ある程度定性的・定量的な評価が可能であることが示された。一方、花崗岩以外の岩種における亀裂特性に関しては、花崗岩と比較してデータも少なく定性的・定量的な評価は難しいことが示された。

* 東海事業所 環境保全・研究開発センター 処分研究部 システム解析グループ

JNC TN8400 99-091

November, 1999

Fracture Characteristics in Japanese Rock

Yuji Ijiri^{*}, Atsushi Sawada^{*}, Kuniaki Akahori^{*}

Abstract

It is crucial for the performance assessment of geosphere to evaluate the characteristics of fractures that can be dominant radionuclide migration pathways from a repository to biosphere. This report summarizes the characteristics of fractures obtained from broad literature surveys and the fields surveys at the Kamaishi mine in northern Japan and at outcrops and galleries throughout the country. The characteristics of fractures described in this report are fracture orientation, fracture shape, fracture frequency, fracture distribution in space, transmissivity of fracture, fracture aperture, fracture fillings, alteration halo along fracture, flow-wetted surface area in fracture, and the correlation among these characteristics. Since granitic rock is considered the archetype fractured media, a large amount of fracture data is available in literature. In addition, granitic rock has been treated as a potential host rock in many overseas programs, and has JNC performed a number of field observations and experiments in granodiorite at the Kamaishi mine. Therefore, the characteristics of fractures in granitic rock are qualitatively and quantitatively clarified to some extent in this report, while the characteristics of fractures in another rock types are not clarified.

^{*} System Analysis Group, Waste Isolation Research Division, Tokai Works

目 次

	頁
1. はじめに	1
2. 調査対象	2
2.1 既往の文献調査	2
2.2 露頭・鉱山坑道調査	2
2.3 釜石鉱山調査	2
3. 亀裂の種類	5
3.1 成因による分類	5
3.2 応力に起因した亀裂の種類	7
4. 亀裂特性	10
4.1 方向性	10
4.1.1 既往の文献	10
4.1.2 露頭・鉱山坑道	14
4.1.3 釜石鉱山	17
4.2 形状	20
4.3 大きさ	21
4.3.1 既往の文献	21
4.3.2 露頭・鉱山坑道	26
4.3.3 釜石鉱山	31
4.4 頻度	32
4.4.1 既往の文献	32
4.4.2 露頭・鉱山坑道	34
4.4.3 釜石鉱山	35
4.5 空間分布	37
4.5.1 既往の文献	37
4.5.2 釜石鉱山	37
4.6 透水量係数	39
4.6.1 既往の文献	39
4.6.2 釜石鉱山	40
4.7 開口幅	43
4.7.1 既往の文献	43
4.7.2 露頭・鉱山坑道	46
4.7.3 釜石鉱山	47

4.8 充填鉱物	49
4.8.1 既往の文献	49
4.8.2 露頭・鉱山坑道	49
4.8.3 篓石鉱山	49
4.9 変質部	51
4.9.1 露頭・鉱山坑道	51
4.9.2 篓石鉱山	51
4.10 流路面積（開口部面積）	53
4.11 パラメータ相関性	55
4.11.1 大きさ（トレース長）と頻度	55
4.11.2 大きさ（トレース長）と開口幅	55
4.11.3 頻度と岩盤の透水性	56
5.まとめと考察	57
6.参考文献	61
7.謝辞	69

図 目 次

	頁
図 2.3.1 坑道と地質の関係図 (550m レベル)	4
図 3.1.1 岩盤内の亀裂モデル (佐藤ほか、1978)	6
図 3.2.1 破壊パターン	7
図 3.2.2 リーデル破壊の進展状況 (Tchalenko, 1970)	8
図 3.2.3 スウェーデン H R L の湧水部の亀裂スケッチ (田中ほか、1994)	9
図 3.2.4 透水性の高い亀裂構造のパターン (田中ほか、1994)	9
図 4.1.1 内之浦地域の露頭における亀裂ステレオ投影図 (野沢・太田、1967)	12
図 4.1.2 花崗岩地域のボーリング孔内の亀裂ウルフネット投影図 (田中ほか、1996)	12
図 4.1.3 亀裂の方向パターン (木村、1981)	12
図 4.1.4 花崗岩における亀裂ステレオ投影図	13
図 4.1.5 亀裂シユミットネット下半球投影図 (斎藤ほか、1999；その 1)	14
図 4.1.5 亀裂シユミットネット下半球投影図 (斎藤ほか、1999；その 2)	15
図 4.1.5 亀裂シユミットネット下半球投影図 (斎藤ほか、1999；その 3)	16
図 4.1.6 250m レベルボーリング孔 (DH-1,2 ; KM-2 ; DK-1,2,3 ; DT-1,2) 亀裂ステレオ投影図 (長ほか、1994)	18
図 4.1.7 550m レベル坑道亀裂ステレオ投影図 (野口ほか、1991)	18
図 4.1.8 550m レベルボーリング孔 (KH-4~6, 9~18) 亀裂ステレオ投影図 (長ほか、1991)	18
図 4.1.9 岩種毎の亀裂ステレオ投影図 (野口ほか、1991)	19
図 4.2.1 等方弾性媒体中に発生するせん断亀裂 (Scholz, 1990)	20
図 4.3.1 トレース長分布	23
図 4.3.2 地下石油備蓄基地における亀裂分布図 (林ほか、1993)	24
図 4.3.3 花崗岩地域におけるトレース長累積頻度分布 (大野・小島、1992)	25
図 4.3.4 トレース長累積頻度分布 (大津ほか、1999；井尻ほか、2000)	25
図 4.3.5 トレース長の累積頻度分布 (斎藤ほか、1999；その 1)	26
図 4.3.5 トレース長の累積頻度分布 (斎藤ほか、1999；その 2)	27
図 4.3.5 トレース長の累積頻度分布 (斎藤ほか、1999；その 3)	28
図 4.3.5 トレース長の累積頻度分布 (斎藤ほか、1999；その 4)	29
図 4.3.6 トレース長のフラクタル次元 (斎藤ほか、1999)	30
図 4.3.7 半トレース長の頻度分布 (野口ほか、1991)	31
図 4.3.8 釜石鉱山 KD-90 坑道におけるトレース長累積頻度分布	31
図 4.4.1 花崗閃緑岩における亀裂密度と深度の関係 (緒方、1984)	33
図 4.4.2 閃緑岩質片麻岩における亀裂密度と深度の関係 (緒方、1984)	33
図 4.4.3 亀裂密度分布	34
図 4.4.4 亀裂タイプ (天野ほか、1995)	36
図 4.5.1 釜石鉱山 KD-90 坑道北側におけるコンパートメント構造	38

図 4.6.1 ストリバ鉱山における亀裂の透水量係数測定値	39
図 4.6.2 透水係数と開口亀裂の本数の関係	41
図 4.6.3 釜石鉱山での透水試験結果より算出した透水量係数のヒストグラムと フィッティングにより求めた対数正規分布（実線）	41
図 4.6.4 Oxfilet 法により求められた透水量係数分布	42
図 4.7.1 亀裂開口幅と頻度の関係（渡辺・佐藤、1978）	44
図 4.7.2 開口幅頻度分布（菊地ほか、1984）	44
図 4.7.3 開口幅と深度の関係（緒方、1984）	44
図 4.7.4 開口幅と深度の関係（Bianchi and Snow, 1968）	45
図 4.7.4 亀裂開口幅の分布	46
図 4.7.5 亀裂幅と累積頻度の関係（野口ほか、1991）	47
図 4.7.6 亀裂開口幅の頻度分布	48
図 4.8.1 充填鉱物幅の頻度分布	50
図 4.8.2 亀裂タイプ毎の充填鉱物幅の頻度分布（天野ほか、1995）	50
図 4.9.1 変質幅と頻度との関係（野口ほか、1991）	51
図 4.9.2 変質幅の頻度分布	52
図 4.9.3 250m レベル坑道における変質幅の頻度分布	52
図 4.10.1 花崗岩の亀裂面内のグラウト分布図（水戸ほか、1990）	53
図 4.10.2 流路面積（有効間隙面積率）の頻度分布（水戸ほか、1993）	54
図 4.10.3 花崗岩亀裂面内の低融点金属分布図（Pyrak-Nolte et al., 1987）	54
図 4.11.1 平均亀裂間隔（横軸）と平均亀裂長（縦軸）の関係（緒方、1978）	55
図 4.11.2 亀裂開口幅とトレース長の関係	55
図 4.11.3 開口亀裂の密度と透水係数の関係（木下ほか、1993）	56
図 5.1 Muskat の式摸式図	58
図 5.2 Muskat の式より算定した亀裂から坑道内への湧水量	59
図 5.3 亀裂開口幅分布	59
図 5.4 パラメータの関係	60

表 目 次

	頁
表 2.2.1 露頭・鉱山坑道調査箇所一覧（21 地点 43 ヶ所）	3
表 2.3.1 坑道およびボーリング孔一覧	4
表 4.1.1 卓越した亀裂群一覧表	19
表 4.1.2 亀裂分類（米田ほか、1997）	19
表 4.1.3 550m レベルのボーリング孔内における 卓越した亀裂群の特徴（長ほか、1991）	19
表 4.3.1 フラクタル次元（べき指数）一覧表（斎藤ほか、1999）	30
表 4.4.1 亀裂頻度一覧	33
表 4.4.2 釜石鉱山 550m レベルにおける亀裂頻度一覧	36
表 4.4.3 250m レベル坑道における亀裂頻度（Amano et al., 1998）	36

1. はじめに

我が国の岩盤に関しては、「日本は変動帯に属し、地殻変動が激しいため地質構造が複雑で断層・節理が多い。また地震も多い。そして火山活動が活発で、岩盤の熱水変質が著しい。凝灰質で膨張性を示す軟質な堆積岩が多いのも特徴である」のに加え、雨が多いため地表面近傍では風化が進んでいることから北欧の岩盤に比べて悪い印象が強い（小島、1982）。これに対し、小島（1982）は、我が国においても地下深部では健全な岩体が存在し、我が国地下深部の花崗岩における亀裂特性は北欧の花崗岩とそれ程差がないことを示し、我が国岩盤の悪いイメージが先行していることに注意を喚起している。さらに、我が国岩盤中の亀裂には充填鉱物が多いことから、充填鉱物による透水性の低下や放射性物質の吸着能の増加が期待できることも提起している。

本書は、高レベル放射性廃棄物地層処分の第2次取りまとめ（核燃料サイクル開発機構、1999a）における天然バリアの安全評価に資するために、既往の文献調査および釜石鉱山をはじめとする原位置調査などに基づいて我が国岩盤における亀裂特性についてまとめたものである。

なお、本書では安全評価の観点から、岩盤内の支配的な核種移行経路となるような数mから数100mスケールの亀裂および断層を評価の対象とし、数kmに及ぶ大規模な断層や岩盤の透水性にあまり寄与しないマイクロクラック等については言及しない。また、便宜上、本文中では亀裂と断層を総称して亀裂と呼ぶこととする。

2. 調査対象

亀裂特性の評価に用いた亀裂データの概要を以下に述べる。

2.1 既往の文献調査

国土の大部分が山地で覆われている我が国では、数多くのトンネルや地下空洞が建設され、ほとんどのトンネルや地下空洞で亀裂観察が実施されてきたにもかかわらず、これまでこれらの亀裂データはほとんど活用されていない。近年になってようやく亀裂データがトンネルや地下空洞の設計に反映されるようになり、亀裂に関する文献も見られるようになってきたものの未だその数は限られている。そこで、サイクル機構では、既往のトンネルや地下空洞で測定された亀裂データを収集し、亀裂解析を実施して亀裂特性について検討を行っている（大津ほか、1999；井尻ほか、2000）。本書では、これらの情報も含めて検討を行った。

2.2 露頭・鉱山坑道調査

サイクル機構では、様々な岩種における亀裂特性を明らかにするために、表 2.2.1 に示す日本全国の露頭と鉱山計 21 地点 43ヶ所において亀裂調査を実施している（斎藤ほか、1999）。亀裂に関する主な調査内容は、以下に示すとおりである。

- 露頭面および鉱山坑道壁面 1m × 10m 領域内での亀裂マップの作成と、亀裂頻度（1 次元および 2 次元亀裂密度の算定）、亀裂交差点数の算定
- 観察した亀裂沿いの充填鉱物、変質部、湧水部などの観察
- 室内樹脂浸透試験による亀裂周辺の空隙構造調査
- 粉末 X 線回折による母岩と亀裂充填鉱物の鉱物組成調査

2.3 釜石鉱山調査

釜石鉱山は、岩手県釜石市の西端に位置し、図 2.3.1 に示すように釜石鉱山の地質は前期白亜紀に形成された結晶質岩（栗橋花崗閃緑岩、蟹岳閃緑岩、蟹岳花崗閃緑岩などの酸性～中性深成岩類）と古生層堆積岩類、スカルンから構成されている。また、亀裂観察の結果より応力場の時間的変化は少ないことが指摘されている（渡辺ほか、1994）。

亀裂調査は、表 2.3.1 に示すように 550m レベル（標高約 575m、土被り約 260m）と 250m レベル（土被り約 730m）の坑道およびボーリング孔内において実施した。ここで、亀裂調査は、NW と NE 坑道では坑道壁面を横切る規模（長さ約 3m 以上）の亀裂とそれに交差する亀裂および湧水を伴う亀裂を対象としているのに対し、KD-90 坑道では長さ 0.5m 以上の亀裂、ボーリング孔ではボアホール TV により観察された全ての亀裂を対象として実施されている。NW と NE 坑道壁面で観察された亀裂は 1759 本、KD-90 坑道で 900 本以上、ボーリング孔でボアホール TV により観察された亀裂は 6720 本になる。

表 2.2.1 露頭・鉱山坑道調査箇所一覧 (21 地点 43ヶ所)

区分	岩種	調査箇所略号	岩盤年代	調査箇所
結晶質岩 (酸性)	流紋岩	I1,I2	白亜紀末	鉱山坑道
	花崗閃綠岩	I3,I4	白亜紀末	露頭
	花崗閃綠岩	OS1,OS2	中新世	露頭
結晶質岩 (塩基性)	斑礼岩	A3,A4	二疊紀	鉱山坑道
	玄武岩	HM1,HM2	中新世後期～鮮新世	露頭
	輝綠岩	S1,S2	白亜紀後期	鉱山坑道
	結晶質緑色片岩	SB1a,b,SB2	白亜紀	露頭
	安山岩	YN1,YN2	鮮新世	露頭
新第三紀 砂質岩	砂泥互層	BS1	中新世～鮮新世	水路トンネル壁
		NS3	鮮新世前期	露頭
	砂岩	NS4	鮮新世前期	露頭
		ST1	中新世前期～中期	露頭
	珪藻土	N1,N2	中新世中期～後期	露頭
新第三紀 泥質・凝灰質岩	泥岩	BS2	中新世～鮮新世	水路トンネル壁
		NS1,NS2	鮮新世	露頭
		O3	中新世中～後期	鉱山坑道
	頁岩	O1,O2	中新世中期	鉱山坑道
	凝灰岩	H1,H2	中新世前期～中期	鉱山坑道
		O4	中新世中期～後期	鉱山坑道
		Y1,Y2	中新世後期	露頭
先新第三紀 砂質岩	砂岩	KS1	始新世	露頭
		T1,T2	三疊紀	鉱山坑道
	砂泥互層	KS2	始新世	露頭
		ST2	始新世～漸新世	露頭
先新第三紀 泥質・凝灰質岩	粘板岩	A1,A2	二～三疊紀	鉱山坑道
	千枚岩	M1,M2	白亜紀後期	鉱山坑道

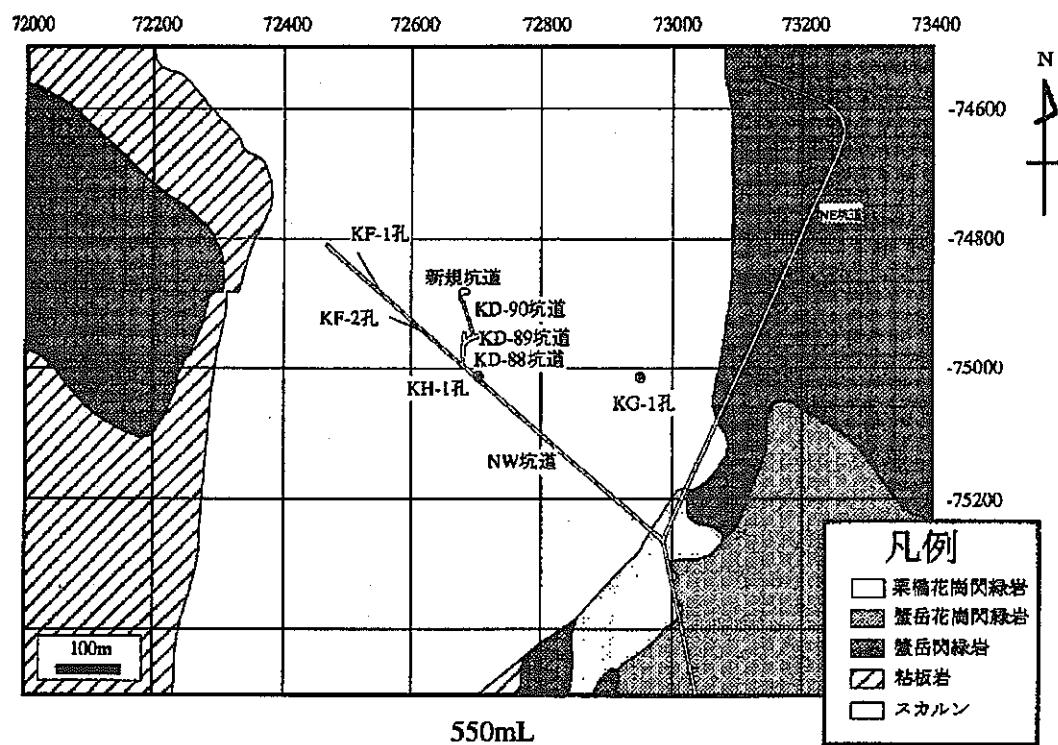


図 2.3.1 坑道と地質の関係図 (550m レベル)

表 2.3.1 坑道およびボーリング孔一覧

レベル	550m レベル	250m レベル
土被り	260m	730m
坑道	NW、NE 坑道（全長 1600m） KD-88、89、90 坑道 アクセス坑道 Task-4 エリア	
ボーリング孔	KE-1~3 (水平 3 孔) KH-1~25 (水平 21 孔、鉛直 4 孔)	DH-1~2 (各 50m, 1:水平, 2:垂直) DK-1~3 (各 10m, 1:水平, 2:45° 斜め方向, 3:垂直) DT-1~2 (各 20m、水平) KM-2 (20m)

3. 龜裂の種類

3.1 成因による分類

亀裂の成因および種類には、以下のようなものが挙げられる（図 3.1.1 参照）。

(1) 共役節理 (Conjugate joint)

応力に起因するせん断亀裂は、互いにせん断角度 $45^\circ - \phi/2$ ($30\sim40^\circ$) で交差する共役な関係にある亀裂群を形成することが多い。

(2) 解放節理 (Release joint)

応力解放により地表面に平行に生じる緩傾斜の節理で、地表面近くで密で地下深くなるほど粗になる。花崗岩類で著しく見られ、シーティング節理 (Sheeting joint) とも言う。また、褶曲や断層または最大圧縮方向に生じる 1 次節理により応力が解放され、1 次節理に直交する方向の応力が最大となって生じる 2 次節理のことも言う。

(3) 放射状節理 (Radial joint)

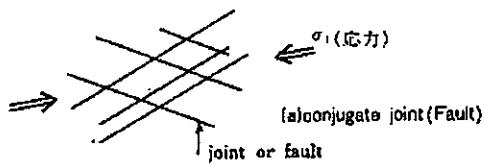
火成岩等の貫入に伴い放射状に生じる節理で、円錐状割れ目と組合せで形成されることが多い。

(4) 冷却節理 (Cooling joint)

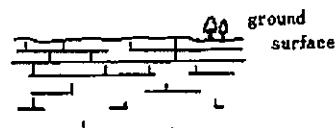
火成岩の冷却による収縮に伴って生じる節理で、伸張亀裂に属する。岩種により、図 3.1.1 に示すような柱状節理 (columnar joint)、板状節理 (platy joint)、方状節理 (cubic joint) がある。

(5) 乾燥節理 (Dessication joint)

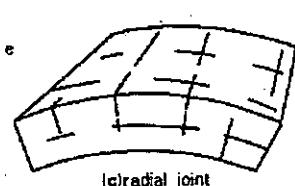
乾燥による体積縮小に伴って生じる節理で、堆積岩中に見られる。



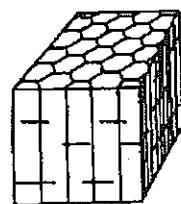
(a) 共役節理
(conjugate joint)



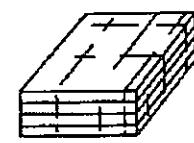
(b) 解放節理
(release joint)



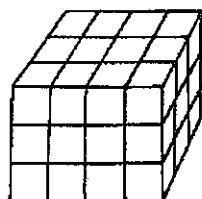
(c) 放射状節理
(radial joint)



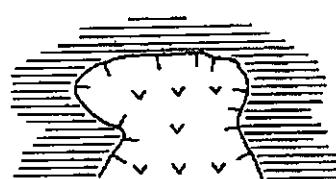
(d) 柱状節理
(columnar joint)



(e) 板状節理
(platy joint)



(f) 方状節理
(cubic joint)



(g) 貫入境界面節理
(cross joint)

図 3.1.1 岩盤内の亀裂モデル（佐藤ほか、1978）

3.2 応力に起因した亀裂の種類

亀裂は、発生時の応力状態すなわち主応力軸との関係によって、引張（伸張）亀裂とせん断亀裂に分類される。引張亀裂の成因としては、冷却、乾燥収縮、凍結、上昇・貫入岩体、断層、応力解放、褶曲等が、せん断亀裂の成因としては、上昇・貫入岩体、断層、褶曲等が挙げられる。

亀裂の構造は、地質とも深い関係を持ち、例えば、安山岩や玄武岩等の火山岩の冷却節理は、冷却面に直交する1~3組の引張亀裂群と冷却面に平行な1組の亀裂群から構成され、中世代の花崗岩のような構成運動の履歴を受けた岩盤内の亀裂は、2組の共役せん断亀裂群と1組の伸張亀裂群から構成されていることが多い（菊地ほか、1992）。特に、地殻応力により生じる亀裂は、その破壊パターンにより図3.2.1に示すような引張破壊（雁行破壊、T破壊）、リーデル破壊（R破壊）、スケンプトン破壊（P破壊）、Y破壊、劈開（S破壊）に分類できる。図3.2.2には、変位とともにリーデル破壊が進展していく過程を示す（Tchalenko, 1970）。同じような亀裂パターンは、図3.2.3に示す田中ほか（1994）のスウェーデン地下研究施設HRLの大量湧水部の亀裂スケッチにも見られる。田中ほか（1994）は、図3.2.4に示すような水みちとなる代表的な亀裂構造のパターンを示している。これらの構造パターンは、図3.2.2に示したリーデル破壊の中にも見られ、破壊が進展して亀裂集中部が増すにつれて透水性が増大すると考えられる。

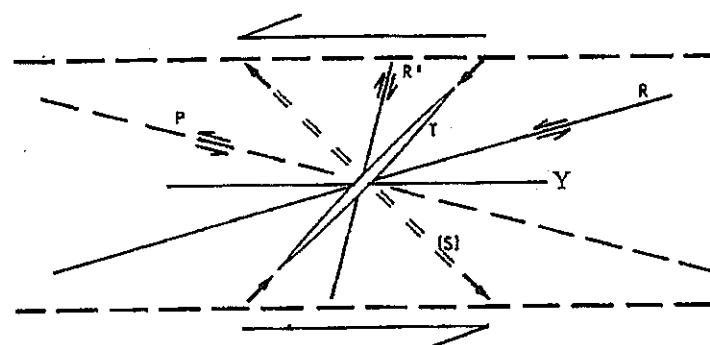


図3.2.1 破壊パターン

- | | |
|----------------|---|
| T : 引張破壊（雁行破壊） | : 最大主応力に平行に生じる。 |
| R : リーデル破壊 | : 最大主応力に対して共役方向 ($45^\circ \pm \phi/2$) に生じる。 |
| P : スケンプトン破壊 | : リーデル破壊に対してさらに共役方向に生じる。 |
| Y : Y破壊 | : 大きい相対変位を起こすような方向に生じる。 |
| S : 劈開 | : 最大主応力に垂直に生じる。 |

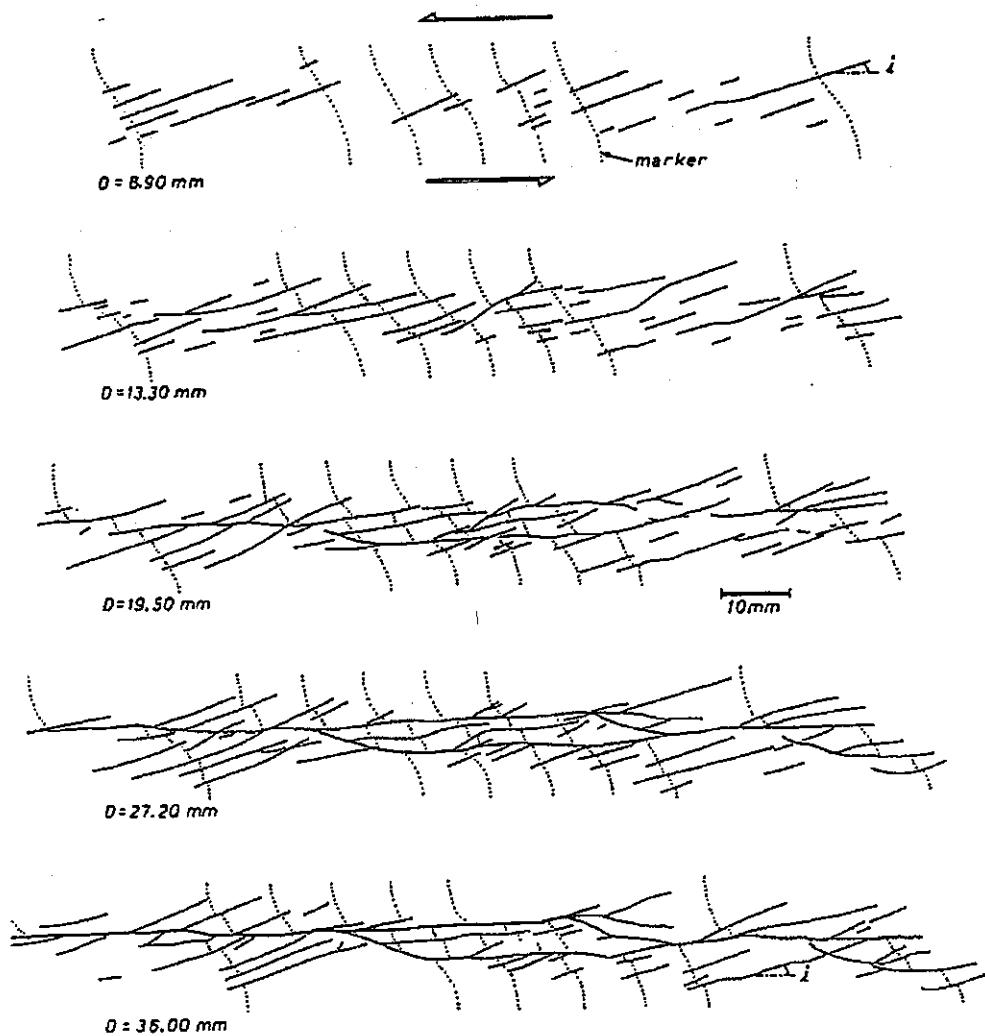


図 3.2.2 リーデル破壊の進展状況 (Tchalenko, 1970)

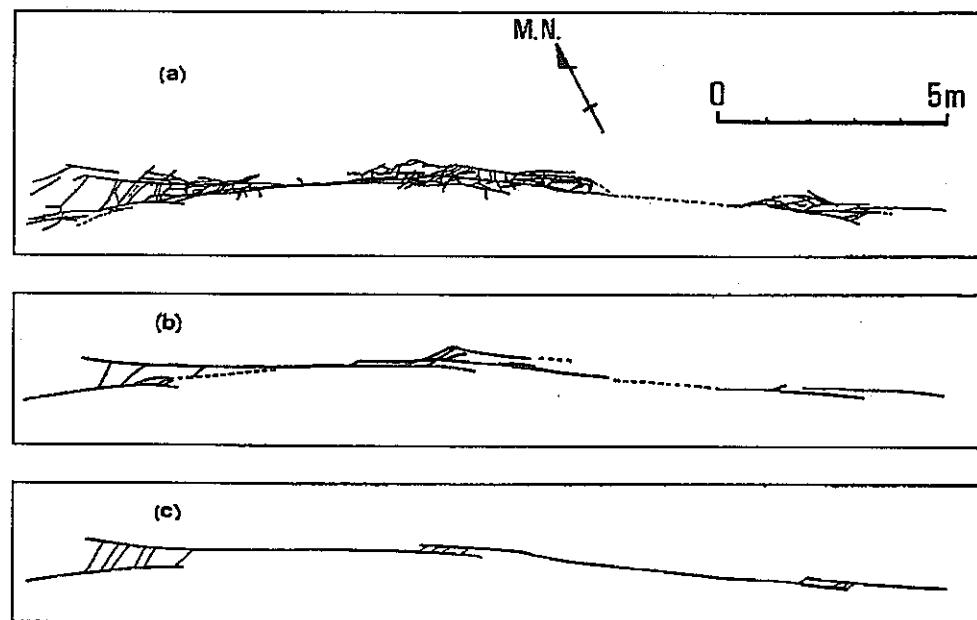


図 3.2.3 スウェーデン H R L の湧水部の亀裂スケッチ (田中ほか、1994)
(a : スケッチ, b : 顕著な割れ目を抽出, c : 亀裂集中部のモデル)

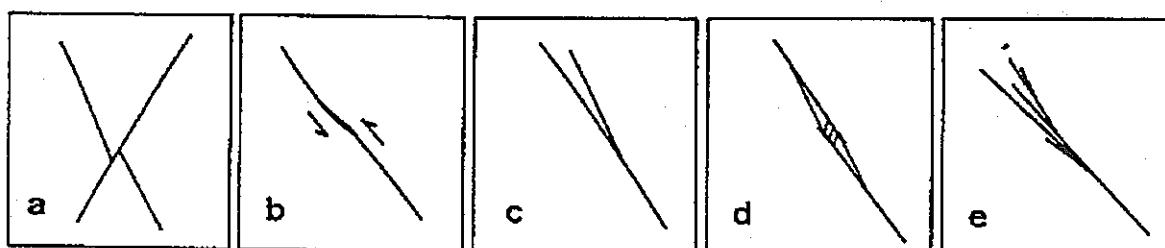


図 3.2.4 透水性の高い亀裂構造のパターン (田中ほか、1994)
(a : 交線部、b : 曲り部、c : 分岐部、d : ステップ構造、e : 端部)

4. 亀裂特性

本書では、岩盤内の支配的な核種移行経路となるような数 m から数 100m スケールの亀裂および断層を評価の対象とし、数 km スケールの大規模な断層や岩盤の透水性にあまり寄与しないような岩石中のマイクロクラック等は評価の対象としない。また、便宜上、本文中では亀裂と断層を総称して亀裂と呼ぶこととする。亀裂特性の評価にあたっては、亀裂構造特性（方向性、形状、大きさ、頻度、空間分布）、水理特性（透水量係数、開口幅）、亀裂内部構造特性（充填鉱物、変質部、流路面積）およびこれらの特性間の相関性について検討する。

4.1 方向性

4.1.1 既往の文献

(1) 岩種全般

亀裂の方向は、その成因（3 章参照）や地質状況に依存し、同じサイト内であっても場の応力や潜在クラックの不均質性等によりばらつきを持っているため、一般的な傾向を捉えるのは難しい。例えば、図 4.1.1 の鹿児島県内之浦地域周辺の花崗岩露頭での亀裂観察結果（野沢・太田、1967）や図 4.1.2 の花崗岩地域におけるボーリング孔内のボアホール TV 観察結果（田中ほか、1996）に示すように、亀裂の方向は局所的なスケールで変化している。

しかし、渡辺ほか（1982）が石英閃緑岩の露頭調査結果から示したように、局所的なスケールではばらつきが大きいものの、巨視的なスケールではある傾向を持つことが多い。例えば、菊間地下石油備蓄基地の領家花崗岩では、図 4.1.4(e)に示すボーリング孔内で観察された亀裂の方向にはばらつきがあるものの（下茂ほか、1992）、図 4.1.4(f)に示す岩盤タンク（高さ 30m×幅 20.5m）で観察された亀裂の方向にはある傾向が見られる（羽出山ほか、1993）。

一般に、亀裂の卓越方向は、断層の方向と一致することが多く（小島ほか、1981）、我が国のような地殻変動の激しい地域では 2、3 系統の傾斜が垂直に近い卓越した亀裂群が広範囲にわたって存在することが多い。また、越谷ほか（1991）が阿武隈山地南部で実施した調査によると、亀裂の卓越方向はリニアメントの卓越方向とも一致する傾向が認められている。

木村（1981）は、密に平行に発達した亀裂（図 4.1.3(a)）や共役のせん断により形成されたレンズ状破壊（図 4.1.3(b)）は地下深部で発生したものであり、不規則な亀裂（図 4.1.3(c)）は地下の浅い所で生じた亀裂であって地下深部で発生したものではないとし、地下深部にいくほど亀裂の方向の規則性が高くなることを指摘している。

岩種の中でも特に花崗岩は、緒方（1978）が実施した比較的亀裂の方向性の良い 5 種類の岩盤（花崗岩、花崗閃緑岩、斑礼岩、輝緑岩、石英閃緑岩）に対する亀裂調査結果が示すように、亀裂の方向性が高いことが知られている。そこで、以下では、花崗岩中の亀裂の方向性について述べる。

(2) 花崗岩

一般に、花崗岩においては3組の直交亀裂が卓越することが知られており、我が国各地の花崗岩地域で測定された亀裂の方向分布から花崗岩中の亀裂の方向性を以下で検証する。

大西ほか（1992）の六甲花崗岩中のトンネル壁面での観察結果によると、図4.1.4(a)に示すようにNS方向で鉛直方向に立った亀裂が卓越している。北川（1985）の広島花崗岩の露頭調査によると、図4.1.4(b)に示すように水平方向と鉛直方向の亀裂が卓越し、鉛直方向の亀裂はN40W、N10W、N30Wの3方向に卓越しているもののばらつきがある。越谷ほか（1991）の南部阿武隈山地の花崗岩での調査でも同様に、図4.1.4(c)に示すように水平方向と鉛直方向が卓越しているものの、鉛直方向の亀裂の走向にはばらつきが見られる。本島・堀（1982）の新高瀬川発電所の花崗閃緑岩地域での観察結果によると、亀裂は近傍にある破碎帯（N88W39S）の影響を受け図4.1.4(d)に示すようにN5E50SとN40E70N方向に卓越している。

一方、地下石油備蓄菊間基地の領家花崗岩（深度30～50m：羽出山、1993）では、図4.1.4(e)に示すようにN40～50EとN30～50W方向に亀裂が卓越しており、これらの2つの亀裂群は互いに約70～80°で交差している。N40～50Eの亀裂群はほぼ中央構造線に平行であることから中央構造線に伴って発生した亀裂群で、N30～50Wの亀裂群は先の亀裂群による応力解放により発生したものと考えられる。また、Oda（1985）の中津川花崗岩の露頭調査においては、図4.1.4(g)に示すように水平方向と鉛直方向の亀裂が卓越し、鉛直方向の亀裂は直交するNS方向とEW方向に卓越している。同じような傾向は、羽佐間島の花崗岩（羽田、1984；図4.1.4(h)参照）やアメリカコロラド州マニトバの花崗岩（Bianchi and Snow, 1968）においても認められ、水平方向の解放亀裂と鉛直方向の亀裂が卓越し、鉛直方向の亀裂は互いに直交する方向に卓越している。

以上より、亀裂の方向性はサイトの地質状況に依存するため、その一般性について言及することは難しいものの、花崗岩に関しては一般に亀裂の方向性が良く水平方向と鉛直方向の亀裂群が卓越し、鉛直方向の亀裂は互いに直交する方向に卓越していると考えられる。

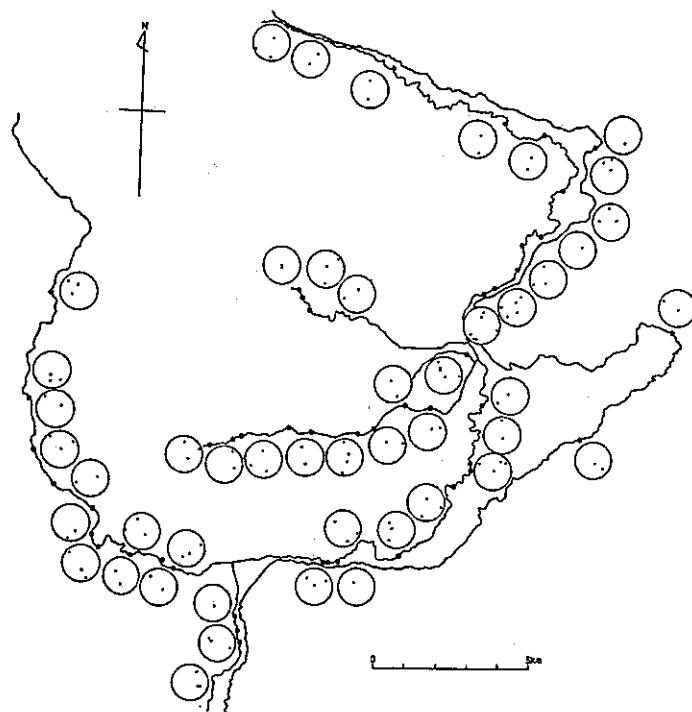


図 4.1.1 内之浦地域の露頭における亀裂ステレオ投影図（野沢・太田、1967）

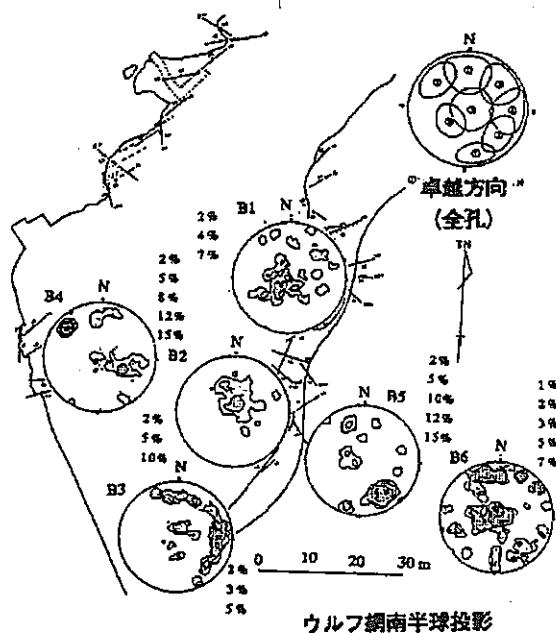


図 4.1.2 花崗岩地域のボーリング孔内の亀裂ウルフネット投影図（田中ほか、1996）

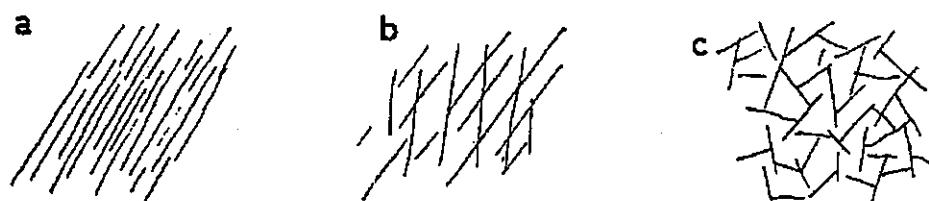
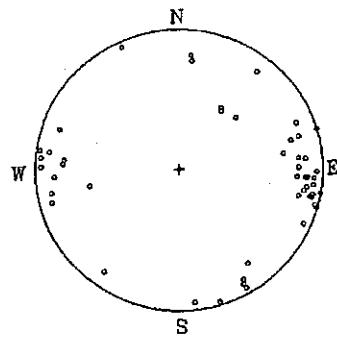
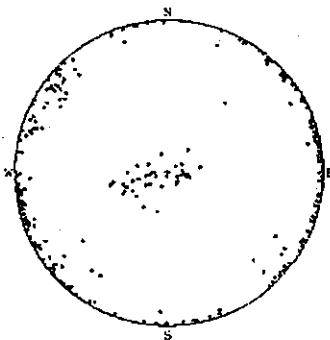


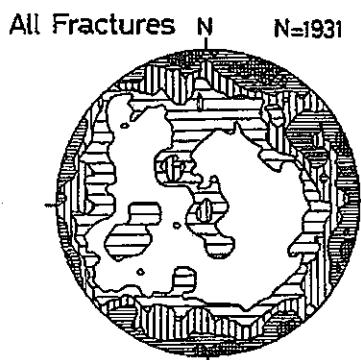
図 4.1.3 亀裂の方向パターン（木村、1981）



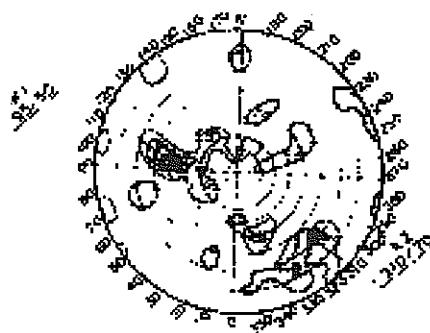
(a) 六甲花崗岩（大西ほか、1992；W）



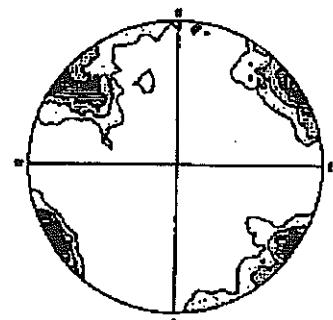
(b) 広島花崗岩（北川、1985）



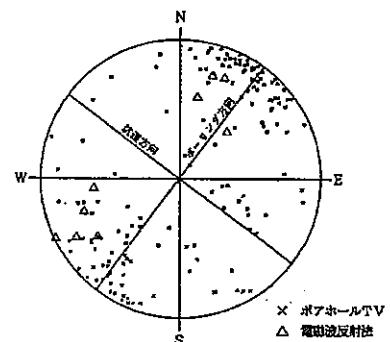
(c) 阿武隈花崗岩（越谷ほか、1991；S）



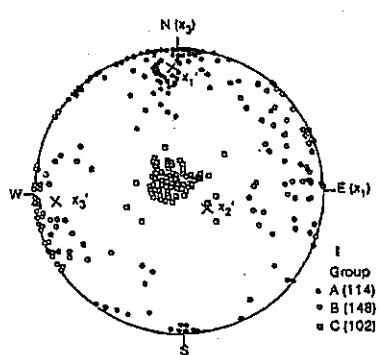
(d) 花崗岩（本島・堀、1982）



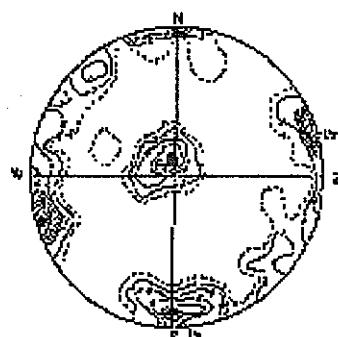
(e) 領家花崗岩（羽出山、1993；S）



(f) 領家花崗岩（下茂ほか、1992）



(g) 中津川花崗岩（Oda、1985；S）



(h) 花崗岩（羽田、1984）

図 4.1.4 花崗岩における亀裂ステレオ投影図
(S: シュミットネット、W: ウルフネット、その他は表記なし)

4.1.2 露頭・鉱山坑道

亀裂のシュミットネット下半球投影図を図 4.1.5 に示す（斎藤ほか、1999）。結晶質岩のうち花崗岩類では急傾斜の亀裂群と緩傾斜の亀裂群から構成され比較的方向性が高いものの、その他の岩種においては特に顕著な方向性は認められなかった。

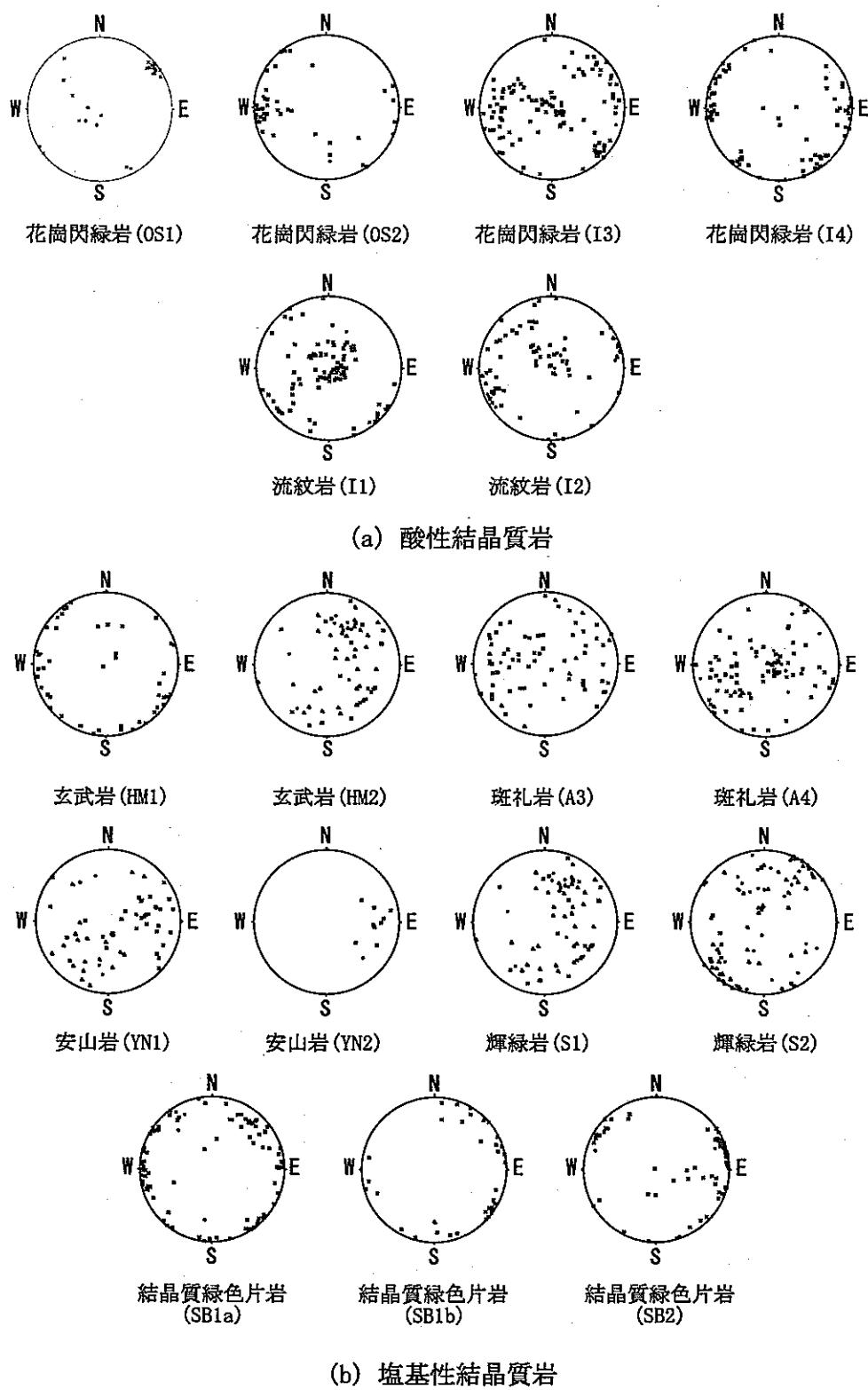
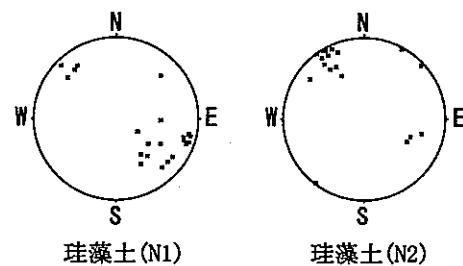
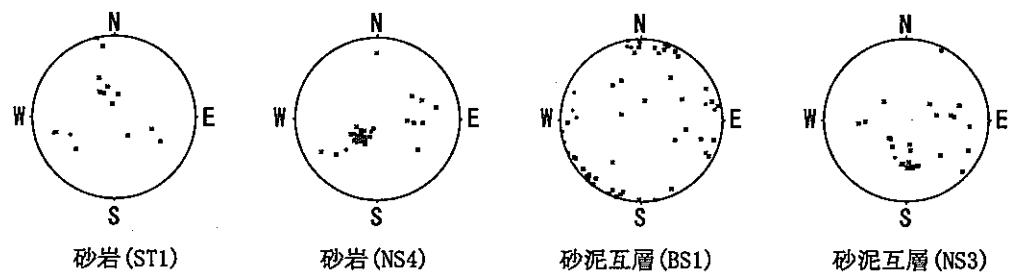
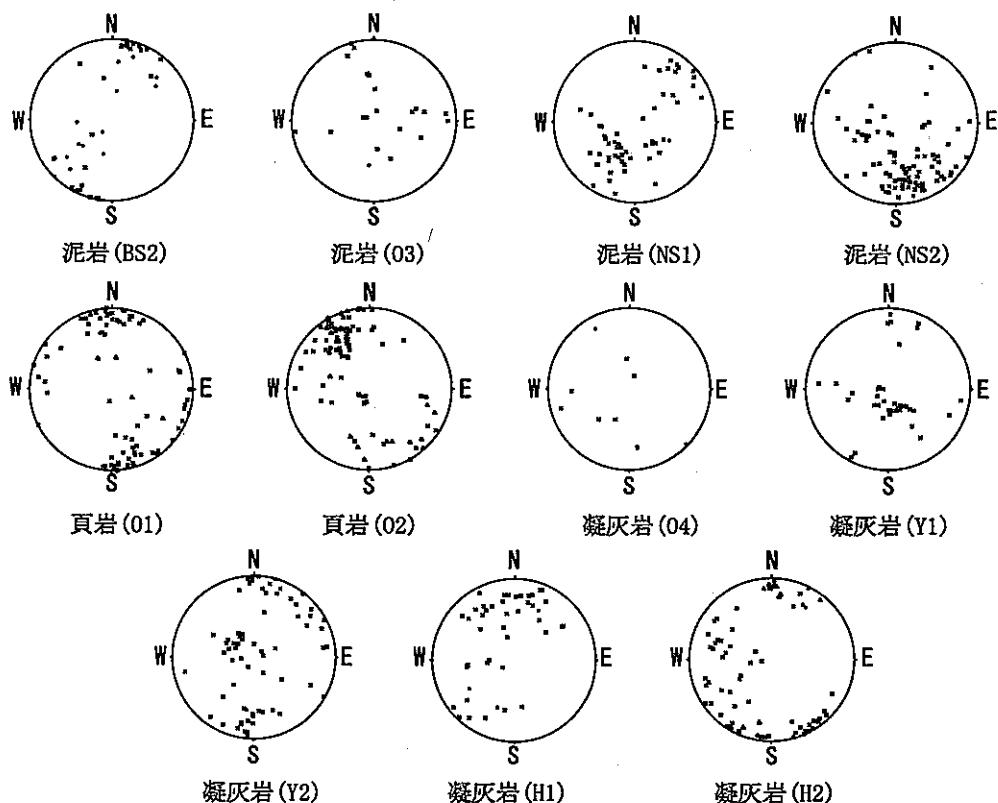


図 4.1.5 亀裂シュミットネット下半球投影図（斎藤ほか、1999；その 1）

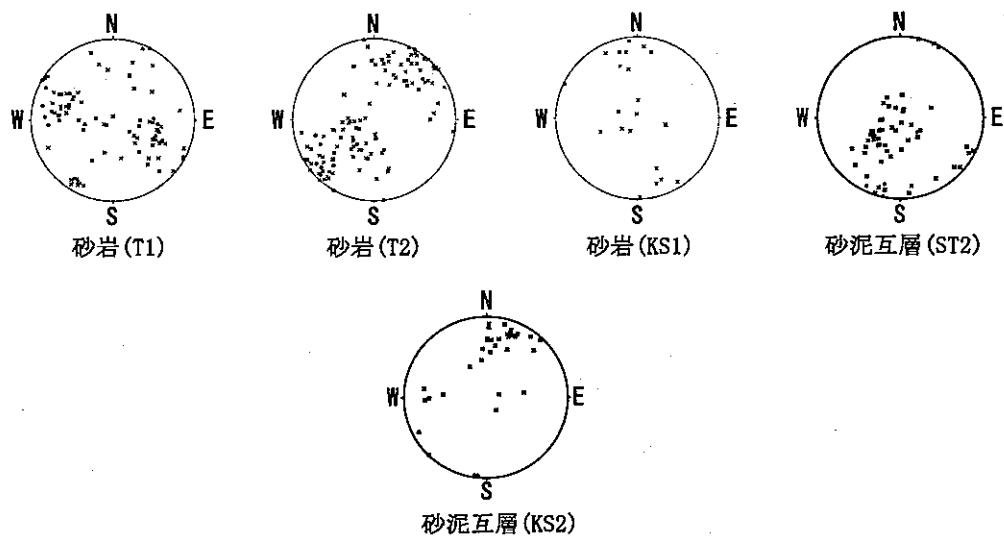


(c) 新第三紀堆積岩（砂質岩）

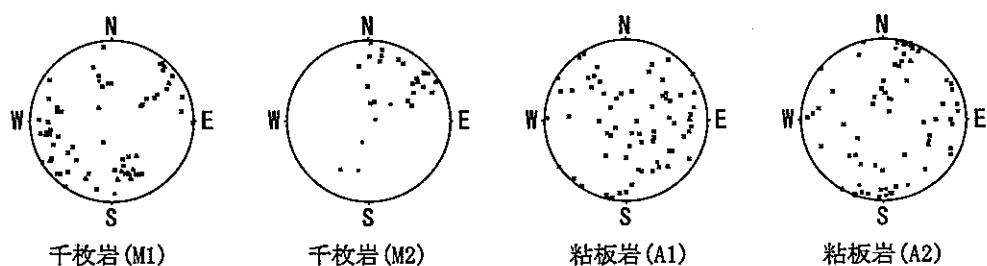


(d) 新第三紀堆積岩（泥質・凝灰質岩）

図 4.1.5 亀裂シュミットネット下半球投影図（斎藤ほか、1999；その 2）



(e) 先新第三紀堆積岩（砂質岩）



(f) 先新第三紀堆積岩（泥質・凝灰質岩）

図 4.1.5 亀裂シュミットネット下半球投影図（斎藤ほか、1999；その3）

4.1.3 釜石鉱山

250m レベルのボーリング孔 (DH-1,2 ; KM-2 ; DK-1,2,3 ; DT-1,2) で観察された亀裂のステレオ投影図 (シュミットネット下半球) を図 4.1.6 に、550m レベルの坑道 (NE、NW 坑道) およびボーリング孔 (KH-4~6, 9~18) で観察された亀裂のステレオ投影図を図 4.1.7 (a)、(b) と図 4.1.8 に示す。また、NE と NW 坑道で観察された亀裂の走向・傾斜の偏りを坑道の方向により補正した亀裂ステレオ投影図を図 4.1.7 (c) に示す (野口ほか、1991)。さらに、NE と NW 両坑道内で観察された亀裂を岩種毎にまとめたものを図 4.1.9 に示す (野口ほか、1991)。

これらの結果より、釜石鉱山の亀裂は 250m レベルと 550m レベルで卓越方向が若干異なり、表 4.1.1 に示すように 250m レベルのボーリング孔では N40W70SW、N75W80SW、N25E80NW 方向が卓越し、550m レベルの NW 坑道では N60E80NW、NE 坑道では N80E90、ボーリング孔では N40E60NW、N70E80NW、N20W90 の順に卓越していることがわかる。坑道やボーリング孔の方向により観察された亀裂の走向傾斜には偏りがあるものの、NW と NE 坑道の亀裂群とボーリング孔の亀裂群 N70E80NW は同じ亀裂群と考えられ、岩種による違いは認められない。250m レベルでは N75W 系と N25E 系がほぼ直交する方向にあり、550m レベルの N70~80E 系と図 4.1.6 に見られる N25W 系 (これに直交する方向のボーリング孔はない) もほぼ直交する方向にあり、釜石鉱山でも花崗岩の一般的な特徴が見られている。米田ほか (1997) は坑道やボーリング孔での観察結果から 250m レベルと 550m レベルの亀裂を表 4.1.2 のように分類し、長ほか (1991) は 550m レベルのボーリング孔内の各亀裂群の特徴を表 4.1.3 のようにまとめている。これらの結果によると、釜石鉱山においては初期の冷却に伴い発生した亀裂の連続性や透水性が高く、後生の亀裂ほど連続性も透水性も低くなる傾向があると考えられる。なお、釜石鉱山では水平方向の亀裂は非常に少なく、上部堆積物の侵食により地表面に現れたものではないことが伺える。

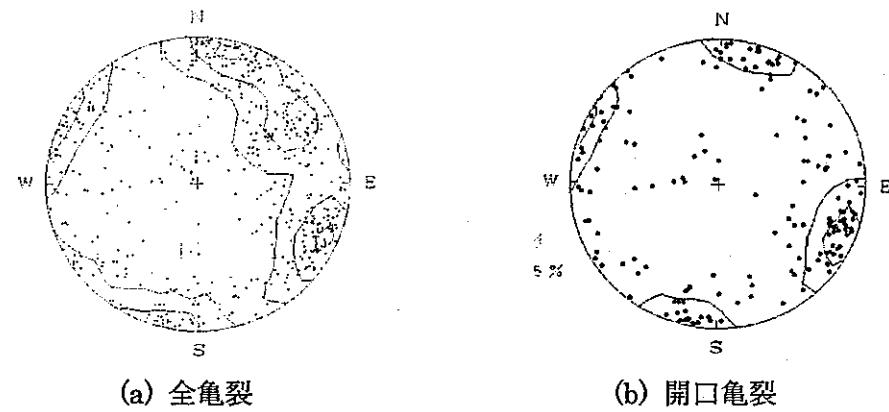


図 4.1.6 250m レベルボーリング孔 (DH-1,2 ; KM-2 ; DK-1,2,3 ; DT-1,2)
亀裂ステレオ投影図 (長ほか、1994)

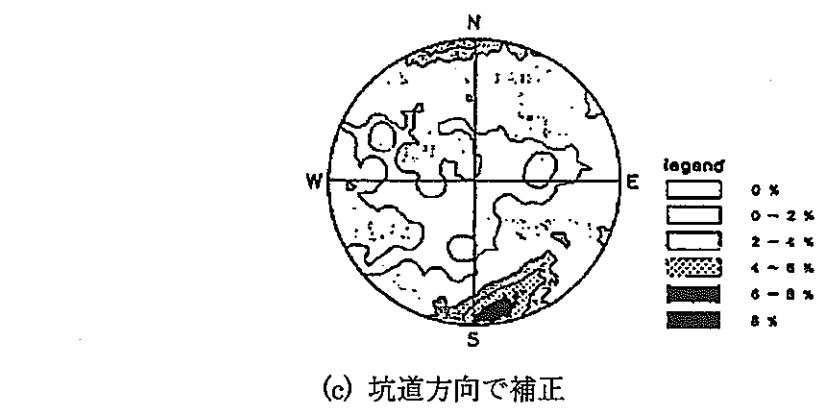
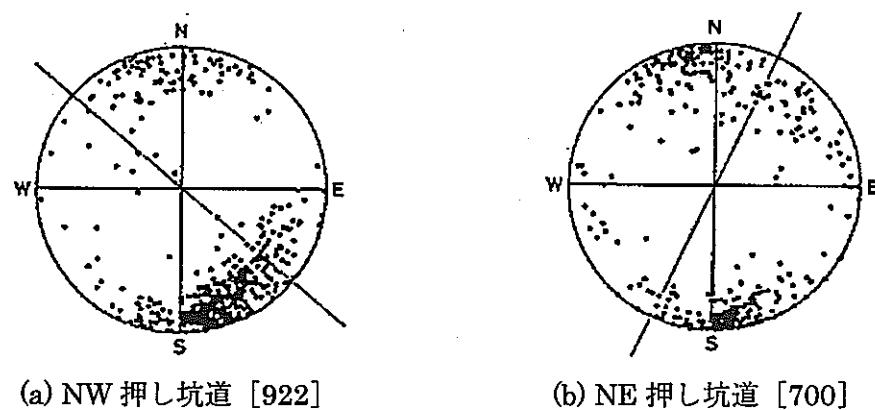


図 4.1.7 550m レベル坑道亀裂ステレオ投影図 (野口ほか、1991)

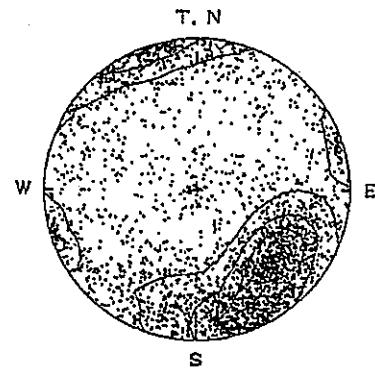


図 4.1.8 550m レベルボーリング孔 (KH-4~6, 9~18) 亀裂ステレオ投影図 (長ほか、1991)

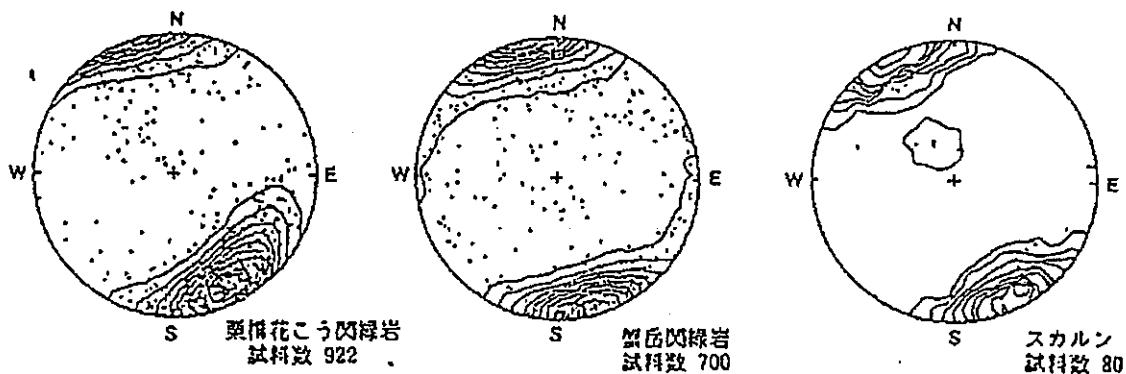


図 4.1.9 岩種毎の亀裂ステレオ投影図 (野口ほか、1991)

表 4.1.1 卓越した亀裂群一覧表

	550m レベル	250m レベル
NW 坑道	N60E80NW	—
NE 坑道	N80E90	—
ボーリング孔	N40E60NW N70E80NW N20W90	N40W70SW N75W80SW N25E80NW

表 4.1.2 亀裂分類 (米田ほか、1997)

形成順序	亀裂タイプ	550m レベル	250m レベル
1	冷却に伴う初生構造	Low Angle	Low Angle
2	〃	N30~50E75NW	N40W70SW
3	熱水性の断層構造 熱水活動 せん断運動	N65E80NW (主要) N50E75NW (派生・引張) N80E80NW (派生・せん断)	N85W80SW
3'	低温断層運動	N70~80W80NE	N60~75W80SW
4		N0~20E90	N25E80NW

表 4.1.3 550m レベルのボーリング孔内における卓越した亀裂群の特徴 (長ほか、1991)

亀裂群	特 徵
N40E60NW	最も頻度が高く、変質も強いため。亀裂幅も大きいことから連続性も高いと推測される。
N70E80NW	頻度、変質程度、亀裂幅ともに中間的である。
N20W90	頻度は低く、変質程度も弱い。また、亀裂端が消滅する亀裂が多く亀裂幅も小さいことから連続性も低いと考えられる。充填鉱物も含まない亀裂が多いことからその他の亀裂系よりも後から形成された亀裂と考えられる。

4.2 形状

これまでに原位置で岩盤中の亀裂の形状を測定した例はない。しかし、一般に、均質等方弾性媒体中に発生するせん断クラックは、図 4.2.1 に示すように円盤形状を呈することが知られている（例えば、Scholz, 1990）。また、既往の亀裂性岩盤のシミュレーション解析では、亀裂を多角形によりモデル化している例が多い（例えば、Veneziano, 1979；Dershowitz, 1984）。Dershowitz (1984) は、その理由として亀裂が互いに切れることによって亀裂の形状が多角形になることを挙げている。

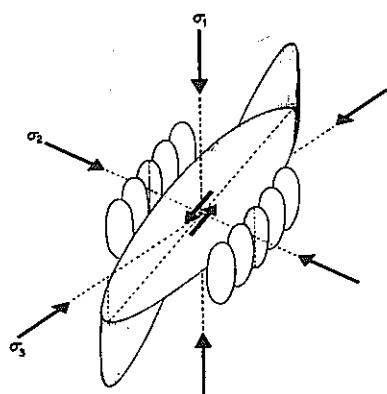


図 4.2.1 等方弾性媒体中に発生するせん断亀裂 (Scholz, 1990)
(図中央はせん断クラック、その他は引張りクラック)

4.3 大きさ

これまでに原位置で亀裂の大きさを測定した例はなく、以下では、露頭や坑道壁面などで観察される亀裂のトレース長について議論することとする。トレース長から亀裂半径を求める手法としては、ある亀裂半径分布にしたがって亀裂を発生させ、実際に観察されたトレース長とのキャリブレーションにより亀裂半径を求める手法（大西ほか、1992；Uchida et al., 1993）が一般的である。なお、トレース長実測値の補正方法については、様々な手法（Hudson and Priest, 1979；Xing and Guohua, 1990；大西ほか、1985）が提案されているが統一的な見解はないため、以下では言及しないこととする。

4.3.1 既往の文献

既往の文献によると、亀裂のトレース長分布には、負の指数分布（例えば、Priest and Hudson, 1981；Kikuchi et al., 1987；野口ほか、1991；菊地ほか、1992）と対数正規分布（例えば、Barton, 1977）が広く用いられている。

実際に原位置で測定された亀裂のトレース長分布は、微小な亀裂の頻度が少なく、数 m 付近にピーク値を持った対数正規分布形状を呈することが多い。例えば、菊地ほか（1984）は、中生代白亜紀の花崗岩での亀裂調査により平均トレース長を約 1m と求めている（図 4.3.1(a)）。大西ほか（1992）は、六甲花崗岩のトンネル内での観察結果よりトレース長分布は複数の亀裂群よりもなることを指摘し（図 4.3.1(b)参照）、2つのピークを持つトレース長分布の重ね合せによりシミュレーションを行っている。羽出山ほか（1993）は、菊間地下石油備蓄基地の岩盤タンク（幅 20.5m、高さ 30m）の側壁（24m×260m）で亀裂群毎（N40°～50°E, N30°～50°W）のトレース長分布を求めている（図 4.3.1(c)参照）。Oda（1985）も中津川花崗岩での亀裂調査より亀裂群毎のトレース長分布を求めている（図 4.3.1(d)参照）。このように亀裂のトレース長分布が対数正規分布形状を示す理由としては、

- 原位置の亀裂調査では、微小亀裂の測定漏れや微小な亀裂まで記載しないことが多い
- 亀裂が生じるためにはある値以上の岩盤のひずみが必要で、そのひずみによって生じる亀裂はある大きさ以上になる（小島ほか、1981）

ことから微小な亀裂の頻度が小さくなるためと考えられている。対数正規分布は、小さな亀裂の分布形状を捉えるには有効である反面、指数分布やべき乗分布に比べて小さな亀裂の分布形状への依存度が高いために観察スケールとモデル化スケールの差が大きくなるほど大きな亀裂の分布の推定精度は低くなることが指摘されている（大野・小島、1987, 1989；小田・木村、1990）。実際、菊間地下石油備蓄基地においては、岩盤タンク側壁で観察された亀裂群のトレース長のピークは 4～6m で数 m～十数 m にしか分布していないのに対し（図 4.3.1(c)参照；羽出山ほか、1993）、サイト内には基地を横断するような数 100m スケールの連続性の高い断層が比較的多いことが確認されている（図 4.3.2(a)参照；林ほか、1993）。久慈基地（花崗岩；図 4.3.2(b)参照）や串木野基地（安山岩；図 4.3.2(c)参照）においても同様に連続性の高い亀裂群が存在している。

そこで、大野・小島（1992）は、同じサイトにおいて 1m 四方の亀裂マップから最大 50 万分

の 1 の地質図まで大小様々なスケールでトレース長の測定を行い、図 4.3.3 に示すようにトレース長の累積頻度分布は岩種に拘わらずべき乗分布に従うことを示している。小田・木村（1990）も、亀裂の大きさはフラクタル性を有し、トレース長分布はべき乗分布に従うことを指摘している。核燃料サイクル開発機構では、このトレース長のフラクタル性に着目し、既往のトンネルや大規模地下空洞など様々なスケールで観察された亀裂データを収集してトレース長分布を求めた。その結果、図 4.3.4 に示すようにトレース長の累積頻度分布は、大野・小島（1992、1993）が示したように岩種やサイトに拘わらずべき乗分布に従うことを確認している（大津ほか、1999；井尻ほか、2000）。

なお、緒方（1978）は、小目の節理を有する岩盤（斑礼岩、輝緑岩、石英閃緑岩、緑泥片岩）の平均節理長さは 1m 以下と短く、花崗岩や安山岩などの大目の岩盤では数 m と長くなることを報告しており、岩種の中でも花崗岩中の亀裂の連続性は比較的高いと考えられる。

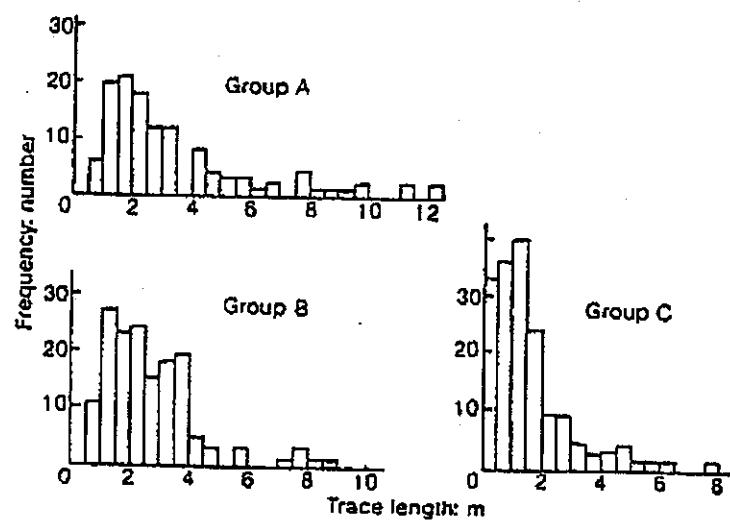
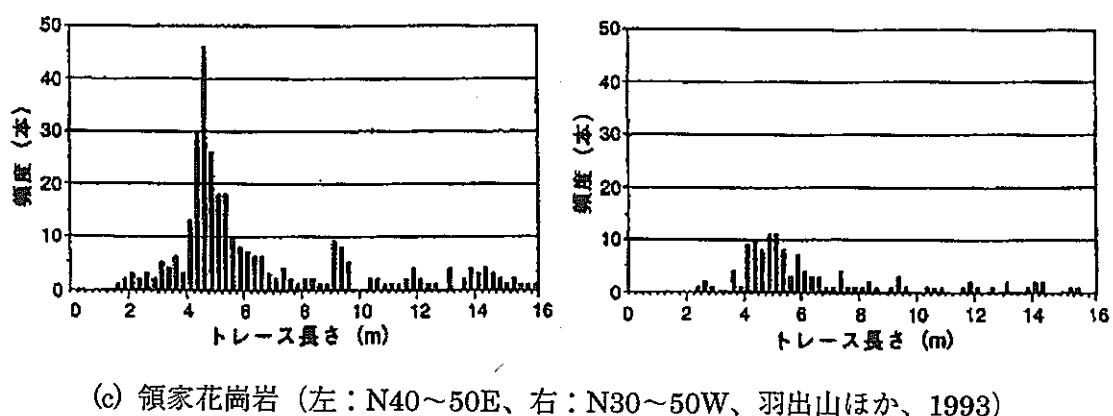
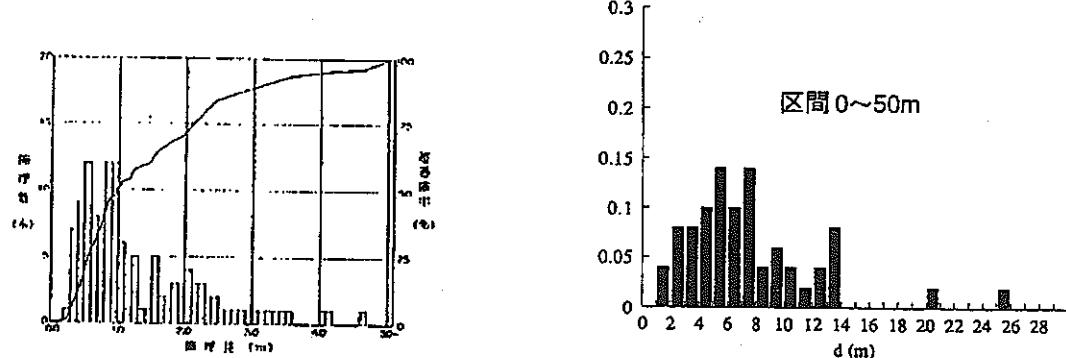
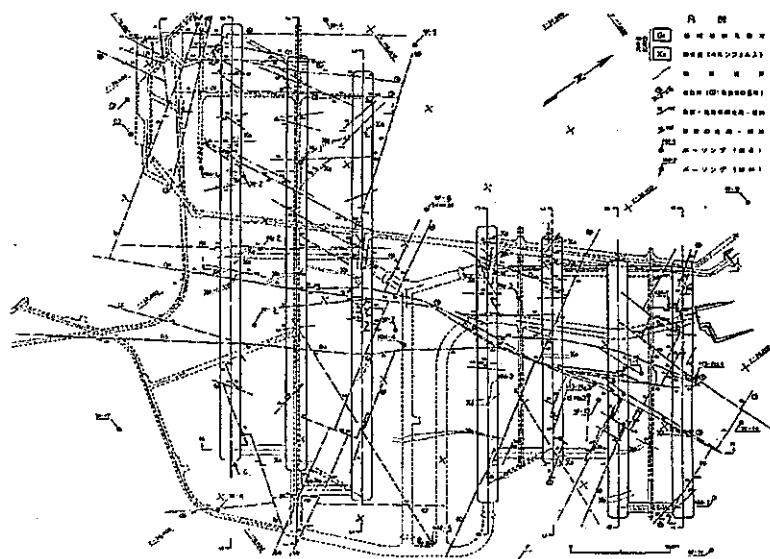
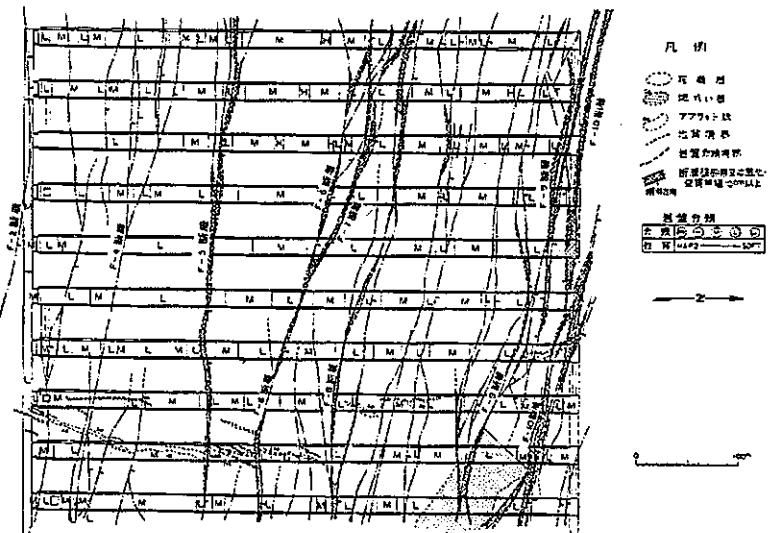


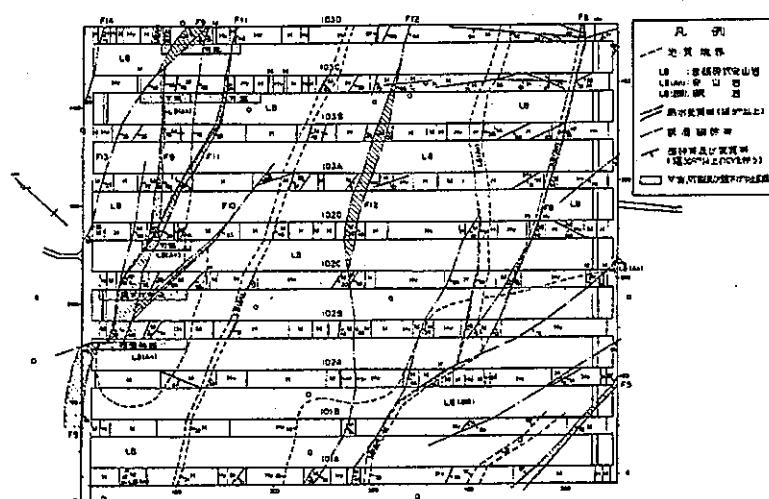
図 4.3.1 トレース長分布



(a) 菊間基地 [花崗岩]



(b) 久慈基地 [花崗岩]



(c) 串木野基地 [安山岩]

図 4.3.2 地下石油備蓄基地における亀裂分布図（林ほか、1993）

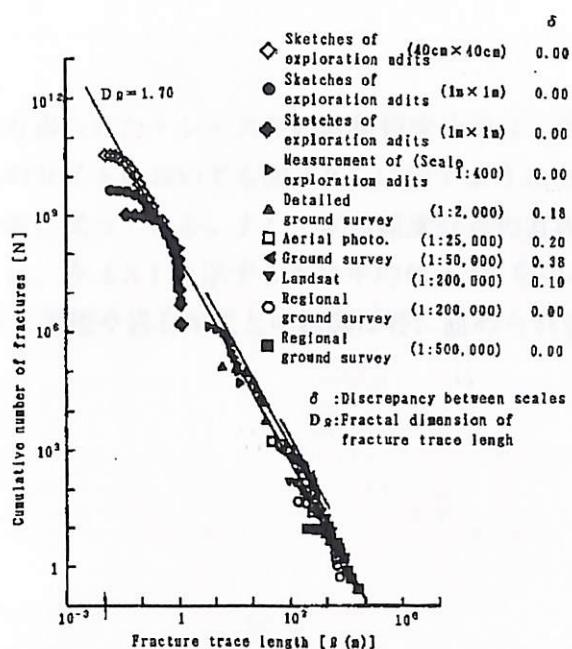


図 4.3.3 花崗岩地域におけるトレース長累積頻度分布（大野・小島、1992）

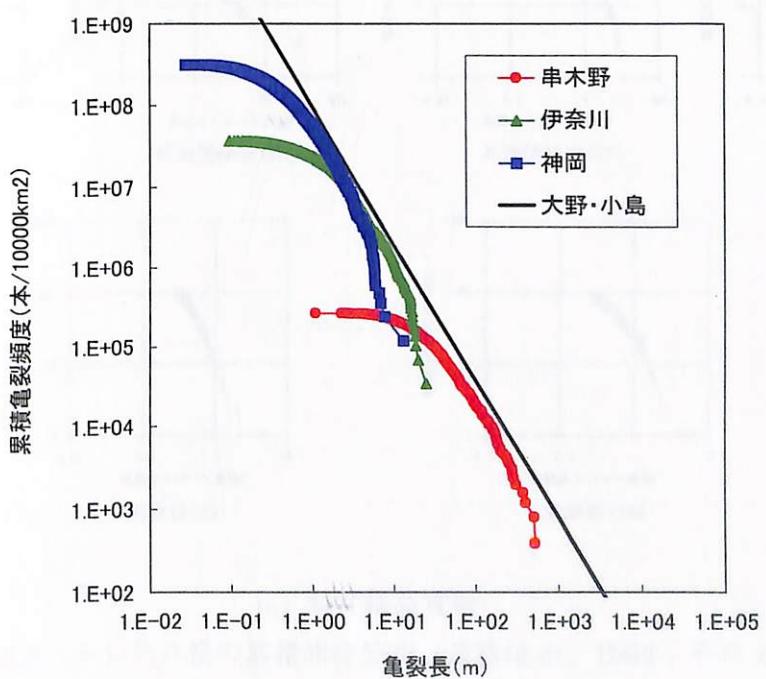
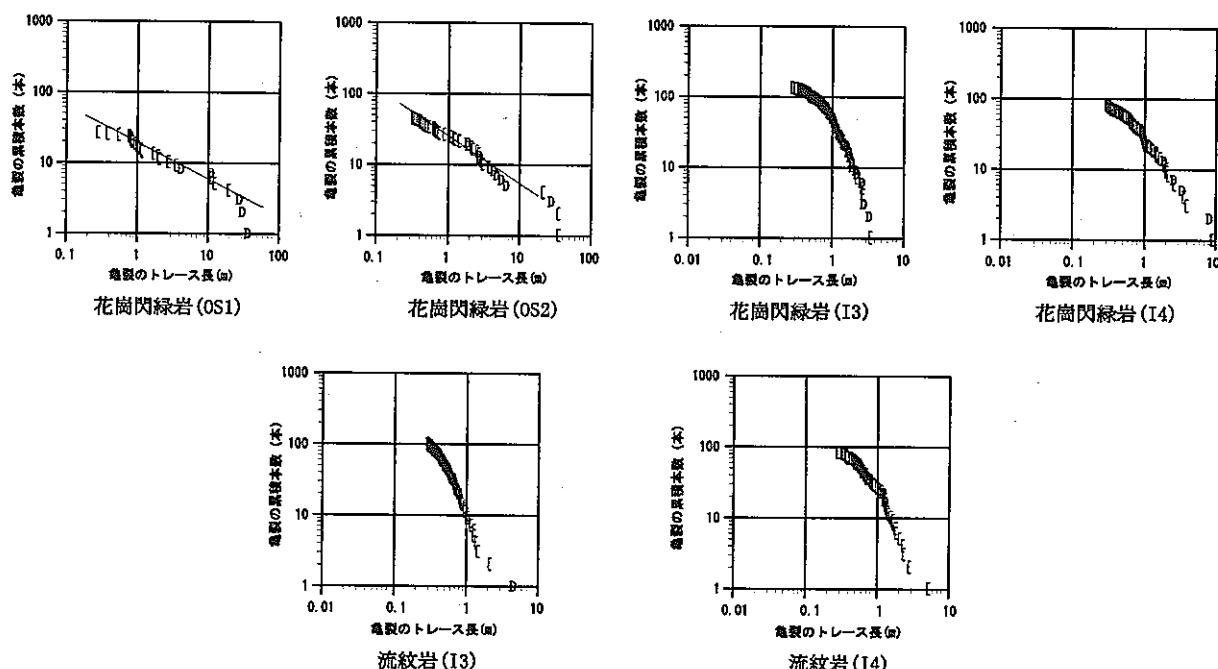


図 4.3.4 トレース長累積頻度分布（大津ほか、1999；井尻ほか、2000）
 (串木野地下石油備蓄基地〔安山岩〕、伊奈川地下発電所〔花崗岩〕、神岡試験坑道〔片麻岩〕)

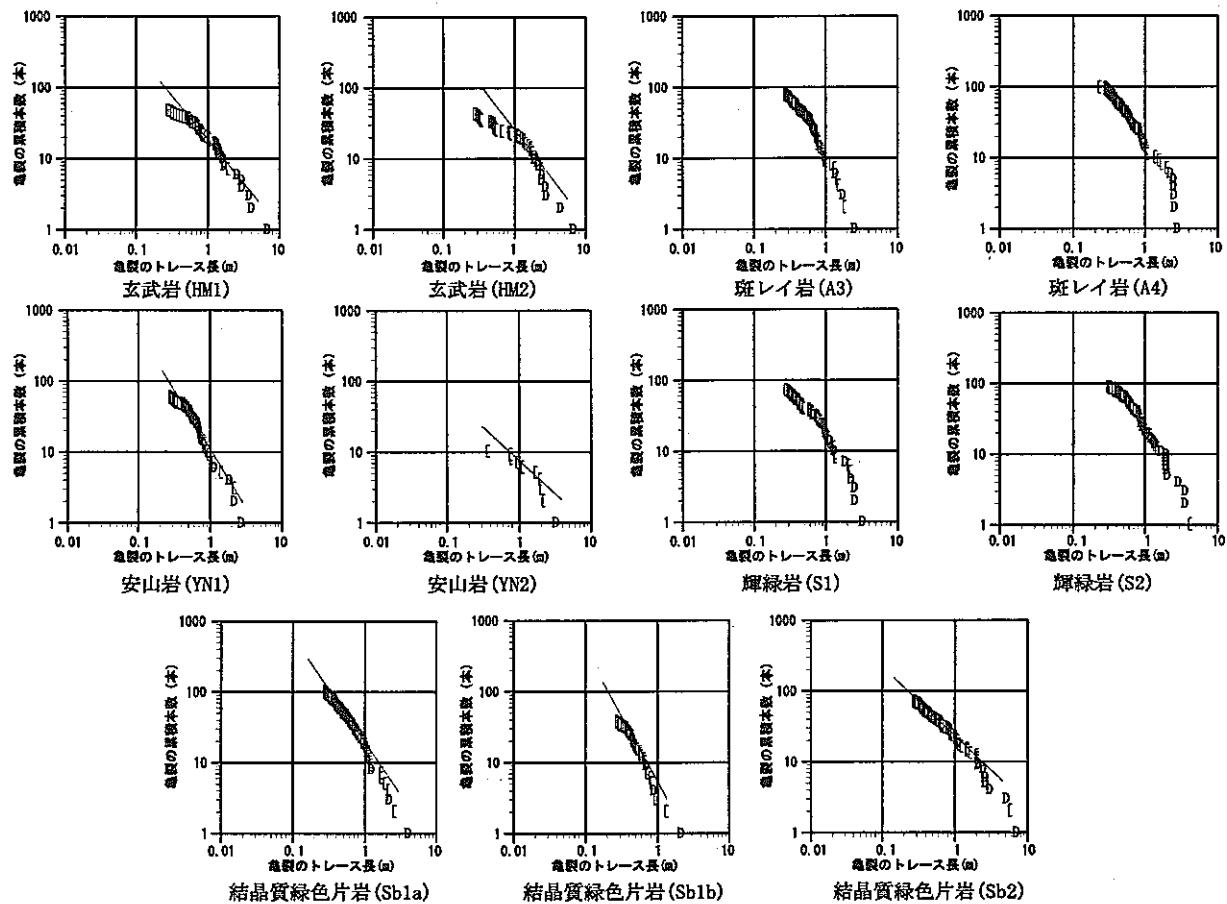
4.3.2 露頭・鉱山坑道

露頭・鉱山坑道調査により得られたトレース長の累積頻度分布は、30cm以上の大亀裂のみを対象としているため、いずれのサイトにおいても図4.3.5に示すように30cm前後で小さくなっているものの、ほぼべき乗分布に従っている。また、累積頻度分布の直線の傾きから求められるべき指数（フラクタル次元）は、表4.3.1に示すように平均値1.48を中心に0.54～3.23に分布しており、図4.3.6に示すように岩種や岩石年代との相関は特に認められなかった（斎藤ほか、1999）。



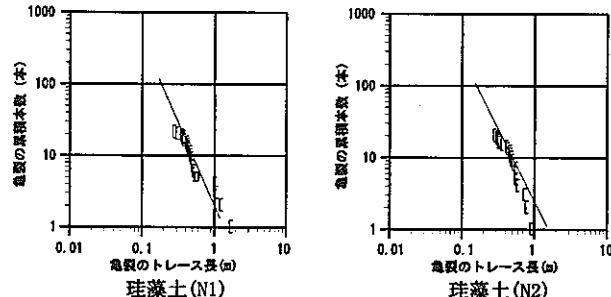
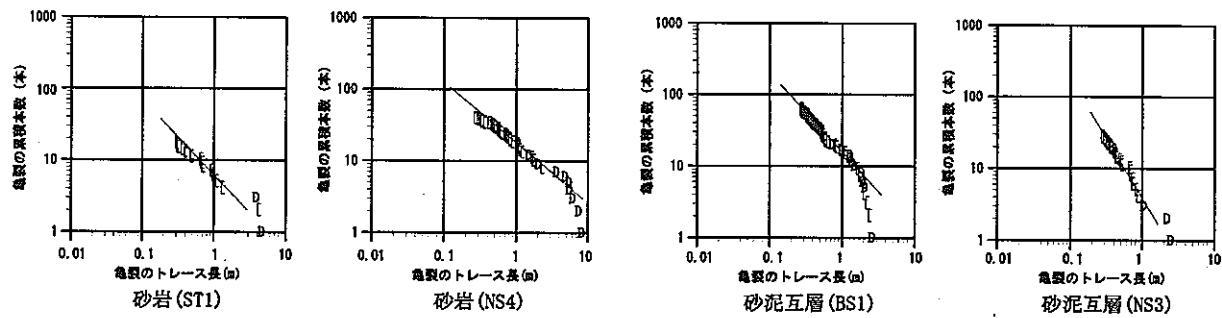
(a) 酸性結晶質岩

図4.3.5 トレース長の累積頻度分布（斎藤ほか、1999；その1）

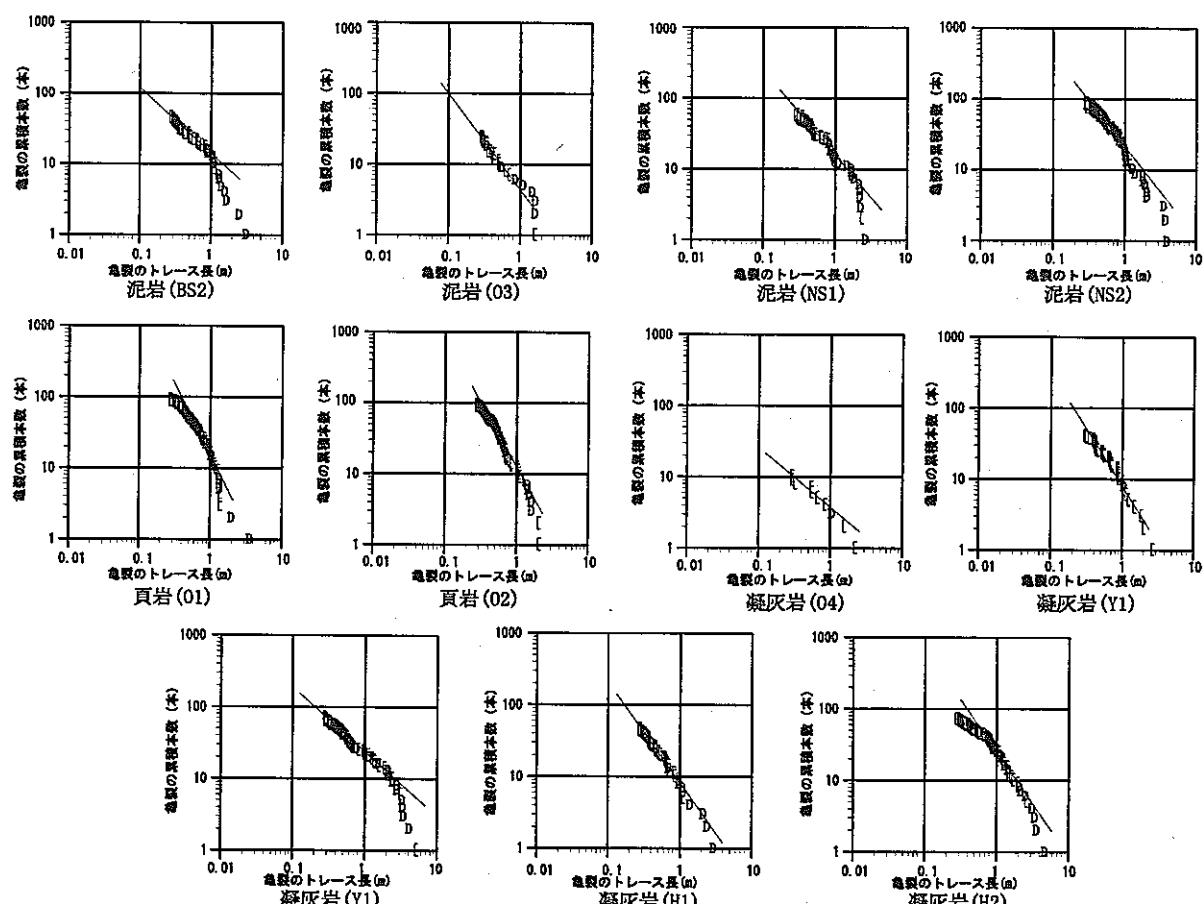


(b) 塩基性結晶質岩

図 4.3.5 トレース長の累積頻度分布 (斎藤ほか、1999；その 2)

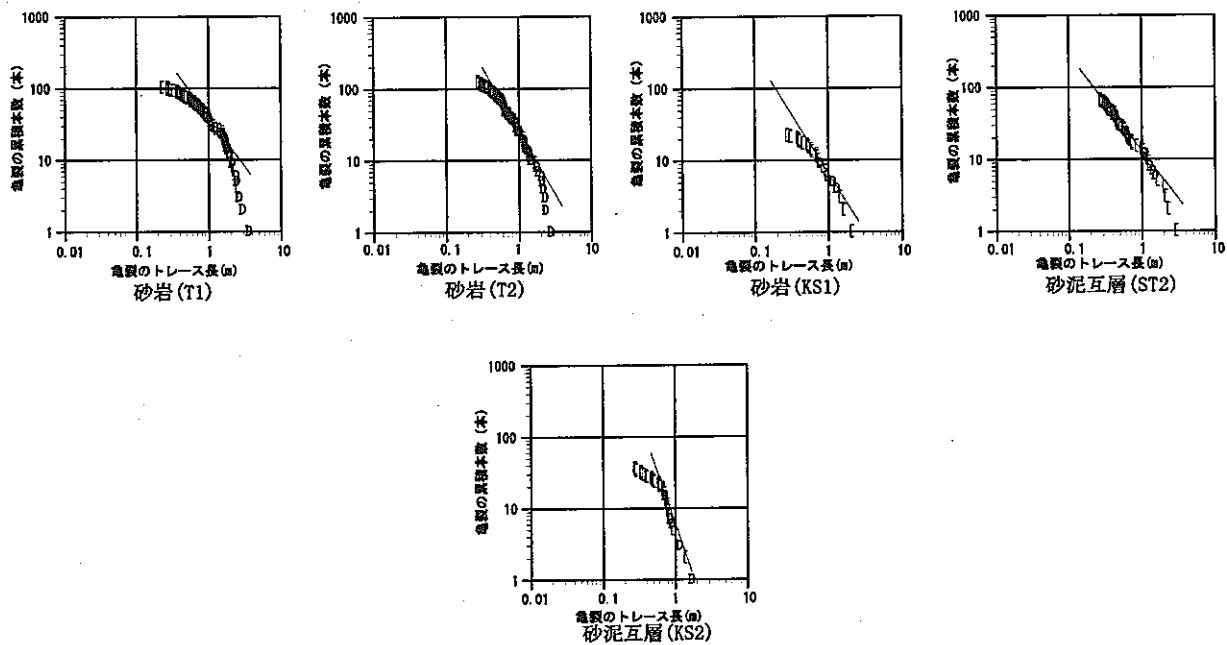


(c) 新第三紀堆積岩（砂質岩）

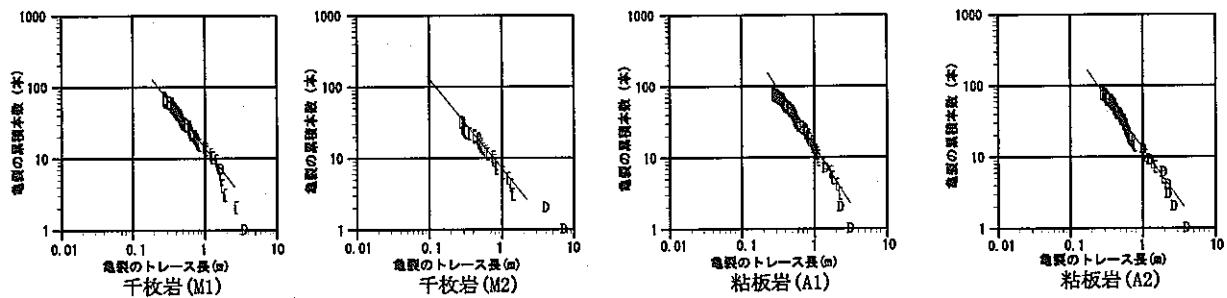


(d) 新第三紀堆積岩（泥質岩・凝灰質岩）

図 4.3.5 トレース長の累積頻度分布（斎藤ほか、1999；その 3）



(c) 先新第三紀堆積岩（砂質岩）

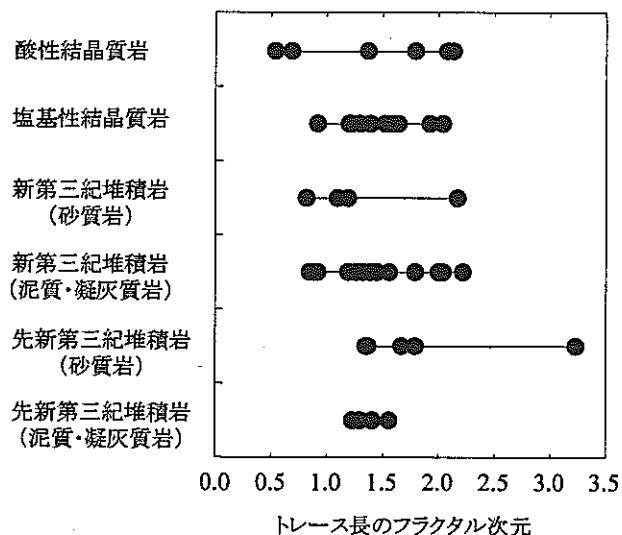


(d) 先新第三紀堆積岩（泥質岩・凝灰質岩）

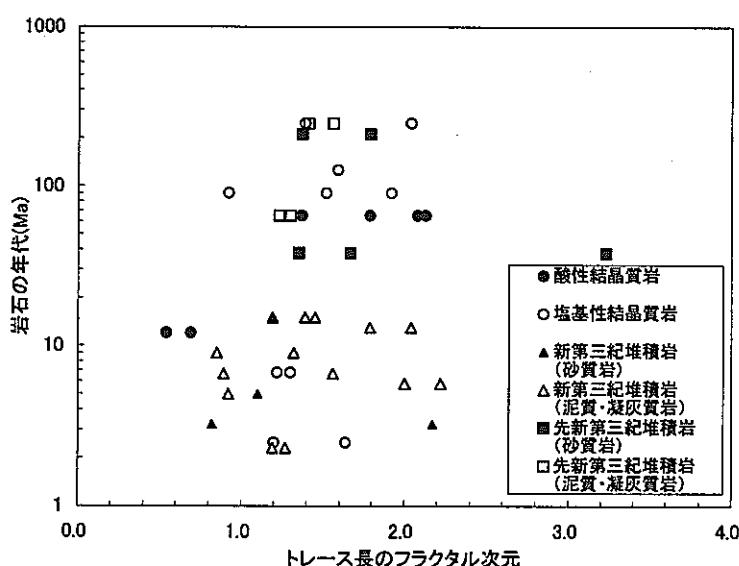
図 4.3.5 トレース長の累積頻度分布（斎藤ほか、1999；その 4）

表 4.3.1 フラクタル次元（べき指数）一覧表（斎藤ほか、1999）

	最小	最大	平均
結晶質岩（酸性）	0.54	2.13	1.43
結晶質岩（塩基性）	0.92	2.04	1.48
新第三紀砂質岩	0.82	2.17	1.32
新第三紀泥質・凝灰質岩	0.85	2.22	1.45
先新第三紀砂質岩	1.35	3.23	1.88
先新第三紀泥質・凝灰質岩	1.00	1.59	1.35
全体	0.54	3.23	1.48



(a) 岩種との関係



(b) 岩石年代との関係

図 4.3.6 トレース長のフラクタル次元（斎藤ほか、1999）

4.3.3 釜石鉱山

野口ほか（1991）は、NW坑道の35m区間（435～470m）において半トレース長が30cm以上の亀裂を対象としたスキャンライン法によるトレース長調査を実施し、図4.3.7に示すような半トレース長 r の頻度分布を次式に示すような負の指数分布で表している。

$$p_r(r) = 0.2 \exp(-0.2r) \quad (4.3.1)$$

釜石鉱山のKD-90坑道で実施された亀裂調査により得られたトレース長の累積分布を図4.3.8に示す。ここで、KD-90坑道で実施された亀裂調査ではトレース長が0.5m以上の亀裂を対象としており、また坑道高さが約3mであることから、トレース長が0.5m～3mの範囲内のみに着目すると、トレース長の累積分布はほぼべき乗分布に従うことがわかる。

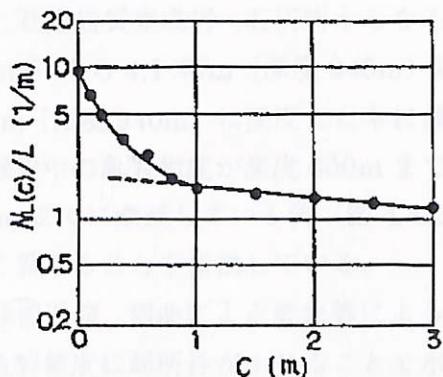


図4.3.7 半トレース長の頻度分布（野口ほか、1991）
(縦軸は期待値、横軸は半トレース長)

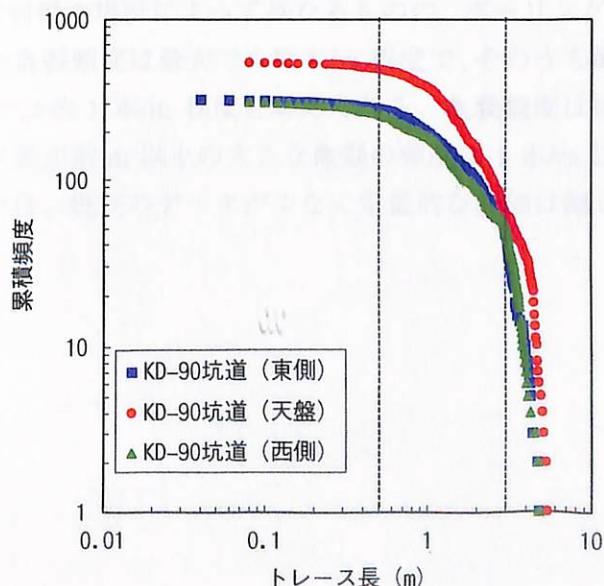


図4.3.8 釜石鉱山KD-90坑道におけるトレース長累積頻度分布

4.4 頻度

4.4.1 既往の文献

一般に、亀裂頻度は、測定場所だけでなく、測定方法（ボアホール TV 観察、スキャンライン法など）、測定の対象とする亀裂の大きさや性状（開口や湧水の有無など）、測定者などによって大きく異なるため、定量的な評価は難しい。表 4.4.1 に示す既往の文献（池田、1979；下茂ほか、1992；羽出山ほか、1993；木下ほか、1993）により得られた亀裂頻度によると、亀裂頻度は岩種間だけでなく同じ岩種や同じサイトでもばらつきがあることがわかる。また、菊間地下石油備蓄基地（領家花崗岩）の岩盤タンク（高さ 30m、幅 20.5m）内での亀裂観察では、亀裂頻度は 0.25~0.5 本/m（亀裂間隔 2~4m）と報告されている（羽出山ほか、1993）のに対し、岩盤タンク直上の水封トンネルから削孔されたボーリング孔内での亀裂頻度は 5 本/m 以上で、そのうち開口亀裂の頻度は約 1 本/m と報告されている（下茂ほか、1992）。岩盤タンク内での亀裂頻度がボーリング孔内での亀裂頻度よりも小さい理由は、岩盤タンク内での亀裂観察では空洞の安定性に係わるような大きな亀裂のみを対象としているためと考えられる。

木下ほか（1993）の片麻岩と花崗岩質変成岩・石灰岩からなる鉱山坑道での調査によると、亀裂頻度は、9.8 本/m（深度 240m）から 4.1 本/m（深度 940m）に、そのうち開口亀裂は 1.42 本/m（深度 150m）から 0.07 本/m（深度 940m）に深度とともに減少する傾向が見られている。一方、緒方（1984）は、花崗閃緑岩中の亀裂頻度が深度 600m まであまり変化しない例（図 4.4.1）と、閃緑岩質片麻岩で深度 70m までに漸減している例（図 4.4.2）から、亀裂頻度の分布性状は岩種や地質要因によって大きく異なることを指摘している。

緒方（1984）は、断層や破碎帯近傍、褶曲による変形等によって 2 次亀裂が発生したり、潜在性の亀裂が顕在化することで亀裂頻度に局所性が生じることを示している。菊地ほか（1992）や田中ほか（1994）は、亀裂長が短くても高密度で分布することによって連続性が高くなり透水性の高い亀裂系を形成することを指摘している。このような亀裂頻度の不均質性に関しては、亀裂の密集度を測定可能な 2 次元亀裂密度 (m/m^2) の採用が有効と考えられる（菊地ほか、1992）。

以上より、亀裂頻度は岩種や場所によって異なるものの、ボーリング孔や数 m 規模のトンネルや坑道などで測定された亀裂頻度は最大でも数本/m 程度で、そのうち開口亀裂の頻度はその数分の 1 程度で、花崗岩類では約 1 本/m 程度と考えられる。亀裂頻度は対象とする亀裂の大きさとともに減少し、トレース長が数 m 以上の大きな亀裂の頻度は 1 本/m 以下と考えられる。亀裂頻度の深度依存性に関しては、既往のデータが少なく定量的な評価は難しい。

表 4.4.1 亀裂頻度一覧

岩区分	岩種	頻度 (本/m)	場所	出典
結晶質岩	花崗閃綠岩	0.25~0.5 (開口亀裂: 1.0)	菊間石油備蓄基地	羽出山ほか(1993) 下茂ほか(1992)
		0.8~1.2	新清水トンネル	池田(1979)
		3.0~4.0	新浅水トンネル	
	片麻岩	4.1~9.8 (開口亀裂: 0.07~1.42)	鉱山坑道	木下ほか(1993)
堆積岩	凝灰岩	0.1~0.5	第2有壁トンネル	池田(1979)
	流紋岩質凝灰岩	0.5~0.8	西庄トンネル	
	安山岩質凝灰岩	2.0	親不知トンネル	
	凝灰角礫岩	0.8	親不知トンネル	
	シルト岩	0.5~0.8	青函トンネル	
	チャート	4.0~5.0	新関門トンネル	
	緑泥片岩	2~3、5~6	大志呂トンネル	

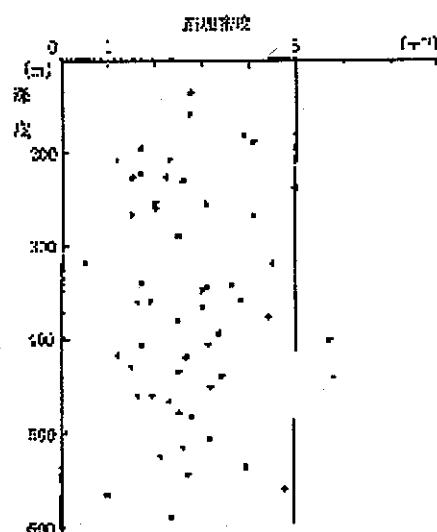


図 4.4.1 花崗閃綠岩における亀裂密度と深度の関係 (緒方、1984)

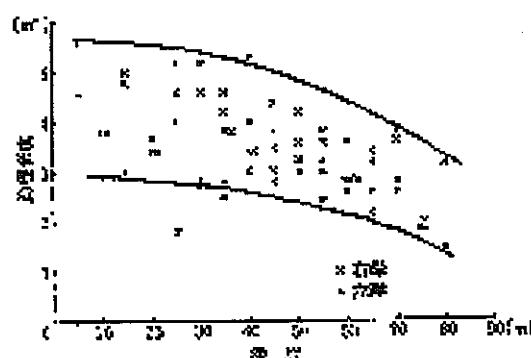
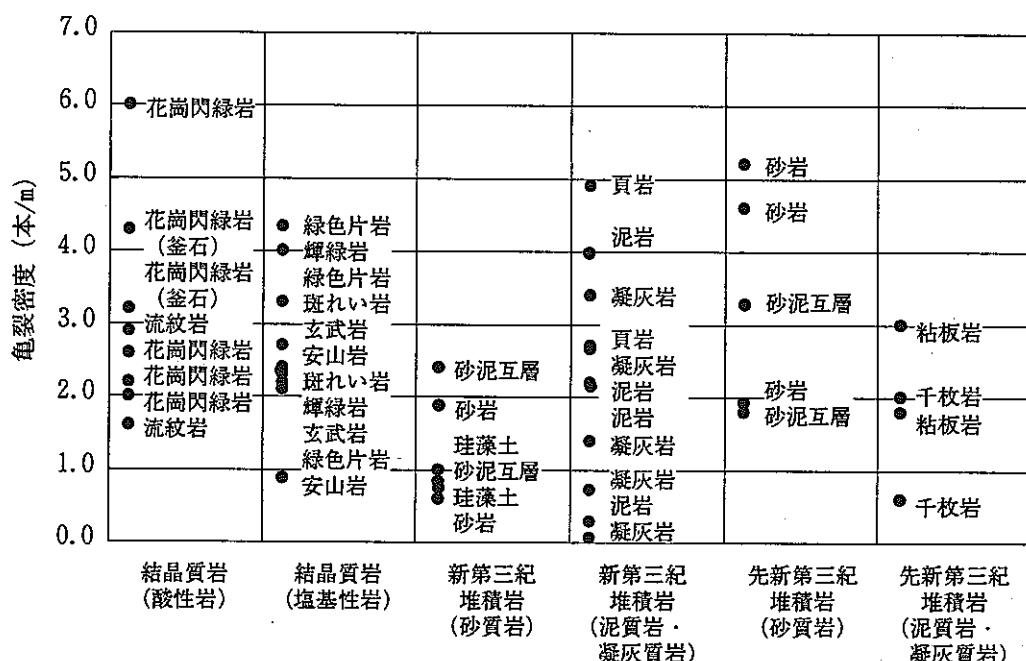


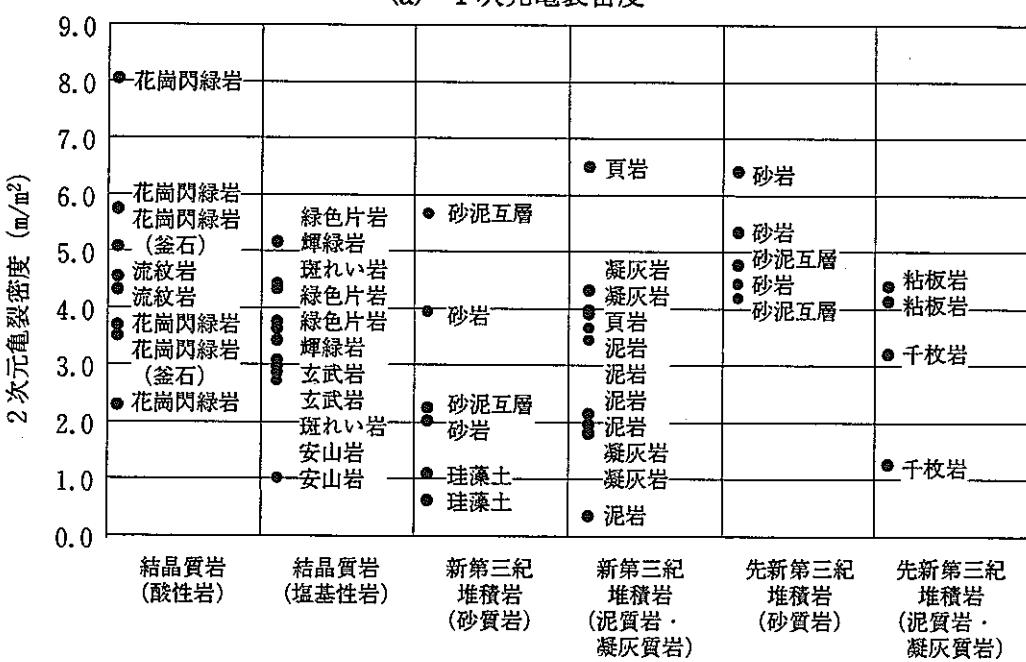
図 4.4.2 閃綠岩質片麻岩における亀裂密度と深度の関係 (緒方、1984)

4.4.2 露頭・鈍山坑道

露頭・鉱山坑道調査により得られた1次元および2次元亀裂密度を図4.4.3に示す。この図からわかるように、結晶質岩では1~6本/m ($2\sim8\text{ m/m}^2$)、堆積岩では1本/m以下から5本/m程度まで (1以下~ 7 m/m^2) 分布しており、同じ岩種でも場所によりばらつきがあるため、亀裂密度の定量的な評価は難しい。定性的な傾向としては、結晶質岩と先新第三紀堆積岩は同じような分布傾向を示し、結晶質岩の中でも花崗岩類は大きなばらつきがあるものの他の岩種に比べて相対的に密度が高いものが存在することから、亀裂が発達した岩種であると考えられる。また、新第三紀堆積岩の中には、比較的密度が小さく亀裂が未発達な岩盤が見られる。



(a) 1 次元亜裂密度



(b) 2 次元亀裂密度

図 4.4.3 亀裂密度分布

4.4.3 釜石鉱山

釜石鉱山 550m レベルの坑道およびボーリング孔における亀裂頻度の一覧を表 4.4.2 に示す。各坑道やボーリング孔における観察方法や観察した亀裂の大きさが異なるため、亀裂頻度にも以下に示すような傾向が見られる。

- NW・NE 坑道では、目視により長さ 3m 以上の亀裂を対象としているため、全亀裂数は小さく、湧水を伴う亀裂も非常に少ない。
- KD-90 坑道では、目視により長さ 50cm 以上の亀裂を対象としているため、NW・NE 坑道よりも亀裂数がかなり多くなっているものの、開口亀裂は非常に少ない。
- KH 孔では、ボアホール TV で観察された全ての亀裂を対象としているため亀裂数が多く、局所的な観察なため開口亀裂も坑道に比べて多くなっている。

ボーリング孔で観察された開口亀裂の頻度の平均値 1.3 本/m は、NW・NE 坑道の長さ 3m 以上の亀裂密度 1.0~1.4 本/m ともほぼ一致する。

天野ほか (1995) は、釜石鉱山 250m レベルの坑道 400m 区間において、図 4.4.4 に示すように亀裂の形態から充填鉱物を伴う单一亀裂 (タイプ A)、充填鉱物と変質部を伴う单一亀裂 (タイプ B)、破碎帶 (タイプ C) の 3 つのタイプに亀裂を分類して亀裂観察を実施している。その結果、赤色変質を伴うタイプ B の亀裂は連続性も透水性も高く、表 4.4.3 に示すように 250m レベル坑道 440m 区間で観察した 357 本の亀裂のうちタイプ B の亀裂の頻度は約 0.33 本/m であることが報告されている (天野ほか、1995; Amano et al., 1998)。

野口ほか (1991) は、NE・NW 坑道内での亀裂頻度を岩種毎にまとめ、栗橋花崗閃緑岩で 1.3 本/m、蟹岳花崗閃緑岩で 1.1 本/m、ざくろ石スカルン 1.2 本/m、全域平均で 1.1 本/m となっていることから、岩種によって亀裂頻度が極端に異なる傾向は認められないことを示している。

表 4.4.2 釜石鉱山 550m レベルにおける亀裂頻度一覧

観察場所	全長 (m)	全亀裂		湧水/開口亀裂	
		本数(本)	頻度(本/m)	本数(本)	頻度(本/m)
NW坑道	710	898	1.3	-	-
	ゾーンA+B+C	472	1.2	52	0.1
	ゾーンA	88	1.1	16	0.2
	ゾーンB	124	1.4	13	0.1
	ゾーンC	260	1.1	23	0.1
NE坑道	854	861	1.0	-	-
KD-90坑道	天盤	50	526	10.5	21
	東側側壁	50	277	5.5	7
	西側側壁	50	271	5.4	3
KH孔	全KH孔(4-25)	1170	6720	5.7	1467
	4,5,6,7,8,9	300	1994	6.6	500
	10,11,13,14,16,17	180	909	5.1	228
	12,15,18	90	524	5.8	115
	19,20,21,22,23,24,2	600	3293	5.5	624

注1) NW 坑道は目視により長さ 3m 以上の亀裂およびそれと交差する亀裂を対象とし、そのうち湧水を伴う亀裂を抽出した。KD-90 坑道は目視により長さ 50cm 以上の亀裂を、KH 孔はボアホール TV で観察された全ての亀裂を対象とし、そのうち開口亀裂を抽出した。

注2) KH 孔は、上から順に全ボーリング孔、KD-90 坑道軸方向、KD-90 坑道軸直角方向、鉛直方向、南北方向のボーリング孔での値を示す。

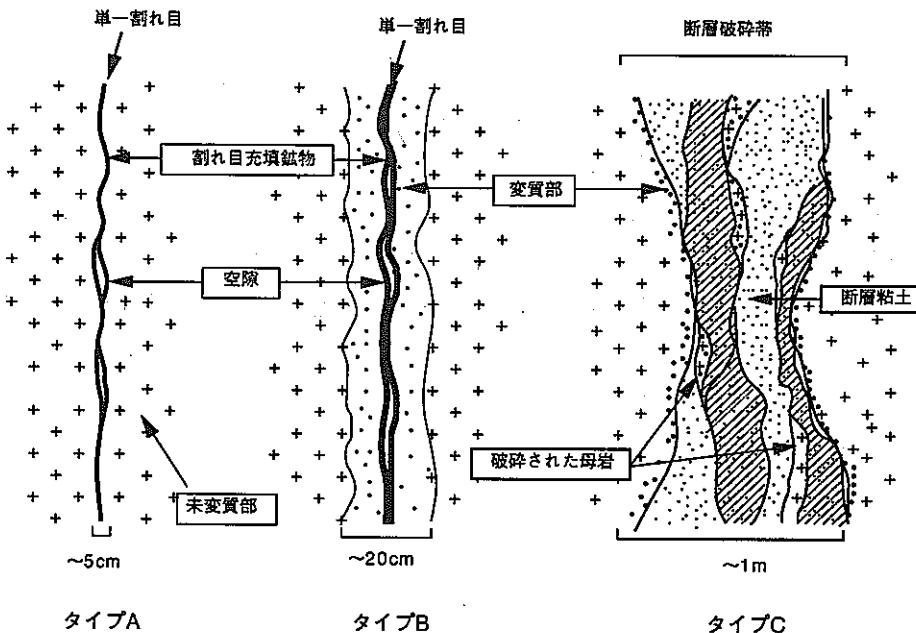


図 4.4.4 亀裂タイプ (天野ほか、1995)

表 4.4.3 250m レベル坑道における亀裂頻度 (Amano et al., 1998)

	タイプ A+B	タイプ A	タイプ B	タイプ C
変質部	-	赤色変質なし	赤色変質あり	赤色変質あり
本数(本) /割合	357	234 (64.6%)	123 (34.0%)	5 (1.4%)
亀裂間隔(m)	1.09	1.96	3.04	-
亀裂頻度(本/m)	0.91	0.51	0.33	-

4.5 空間分布

4.5.1 既往の文献

Priest and Hudson (1976) や Hudson and Priest (1979) は、測線上の亀裂位置はランダムで、一定区間内の亀裂数はポアソン分布に従うことを指摘している。また、村井 (1965) や大塚 (1979) は、房総半島の新第三紀層における卓越した亀裂系や断層系に対してポアソン分布を適用している。

一方、大規模な断層周辺には破碎帯を伴うのと同様に、せん断亀裂により生じた比較的規模の大きな亀裂周辺には小規模な分岐・派生した亀裂が発生することが知られている（例えば、小出ほか、1979；木村、1981；Tchalenko, 1970）。小島ほか（1981）は新第三紀堆積岩と花崗岩地域での断層調査により、比較的規模の大きな断層の周辺に小規模な断層が密集する傾向があることを示している。田中ほか（1994）の亀裂観察結果によると、断層と同様、亀裂に関しても同じような傾向があることがわかる。

大野・小島（1993）は、14 の地域でボックスカウンティング法により 2 次元平面内で割れ目分布のフラクタル次元を求め、フラクタル次元が 1.5~1.99 に分布することから、亀裂の分布は一様ではなく大なり小なり疎密があることを示している。

4.5.2 釜石鉱山

釜石鉱山では、ボーリング孔内の亀裂分布より亀裂の空間分布が一様ではなく、フラクタル性を示すことが確認されている（Uchida et al., 1993）。また、KD-90 坑道北側では、複数のボーリング孔間の水理応答測定結果と各パッカー区間の間隙水圧測定結果から、図 4.5.1 に示すように岩盤が水理学的な連結性が乏しい数 10m 規模の複数の領域（コンパートメント）から構成されていることが確認されている（Sawada et al., 1999；核燃料サイクル開発機構、1999b）。

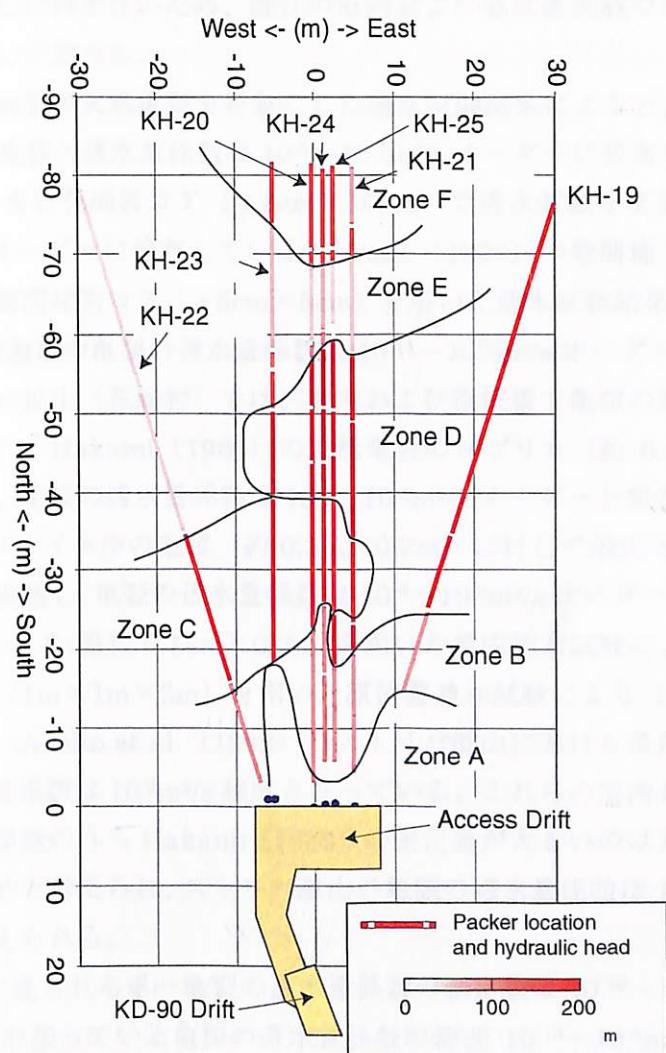


図 4.5.1 釜石鉱山 KD-90 坑道北側におけるコンパートメント構造

4.6 透水量係数

4.6.1 既往の文献

原位置では透水試験により亀裂を含む岩盤マスの透水係数は測定されるものの、個々の亀裂の透水量係数の分布を測定した例がないため、既往の室内および原位置試験で測定された天然の単一亀裂の透水量係数に関して述べる。

多田ほか（1994）の花崗岩の天然亀裂を対象にした透水試験結果によると、亀裂面への垂直応力が 1Mpa 程度の場合で亀裂の透水量係数は $10^{-8} \sim 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ オーダーに分布している。渡辺・星野（1980）は天然亀裂を含む花崗岩コア ($\phi 5\text{cm} \times 10\text{cm}$) で透水試験を実施し、亀裂の透水量係数は $10^{-10} \sim 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ オーダーに分布している。Iwano（1995）の菊間地下石油備蓄基地で採取した天然亀裂を含む花崗閃緑岩コア ($\phi 5\text{cm} \times 5\text{cm}$) を用いた透水試験結果によると、封圧 0.5 ~ 20Mpa での載荷・除荷過程の亀裂の透水量係数は $10^{-11} \sim 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ オーダーに分布している。

スウェーデンのストリバ鉱山（花崗岩）では、室内および原位置で亀裂の透水量係数が測定されている（図 4.6.1 参照）。Hakami（1989）の天然亀裂のレプリカ（約 $0.2\text{m} \times 0.1\text{m}$ ）を用いた透水試験結果によると、亀裂の透水量係数は $10^{-6} \sim 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ オーダーと報告されている。Gale et al.（1990）は、モンゾナイト中の亀裂（約 $0.3\text{m} \times 0.2\text{m}$ ）に対して最大 8Mpa の垂直応力を載荷して室内透水試験を実施し、亀裂の透水量係数は $10^{-8} \sim 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ オーダーと求められている。Makurat et al.（1990）は、コア（直径 $0.15\text{m} \times 0.2\text{m}$ ）を用いた室内透水試験により $10^{-10} \sim 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ オーダー、ブロック試料（ $1\text{m} \times 1\text{m} \times 2\text{m}$ ）を用いた原位置透水試験により $10^{-10} \sim 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ オーダーと求めている。また、Abelin et al.（1982）のストリバ鉱山における原位置トレーサ試験結果によると、亀裂の透水量係数は $10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 程度となっている。これらの室内および原位置透水試験により得られた透水量係数のうち Hakami（1989）の測定値が大きいのは天然の亀裂ではなくそのレプリカを用いたためと考えられ、ストリバ鉱山の亀裂の透水量係数は $10^{-10} \sim 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ オーダーに分布していると考えられる。

以上より、既往の文献に見られる単一亀裂の透水量係数の測定値は $10^{-10} \sim 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ オーダーに分布し、SKB（1992）で取扱っている亀裂の透水量係数の範囲 $10^{-10} \sim 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ と一致し妥当な範囲にあると考えられる。ただし、これらの値は数 10cm～数 m のスケールでの測定値である。

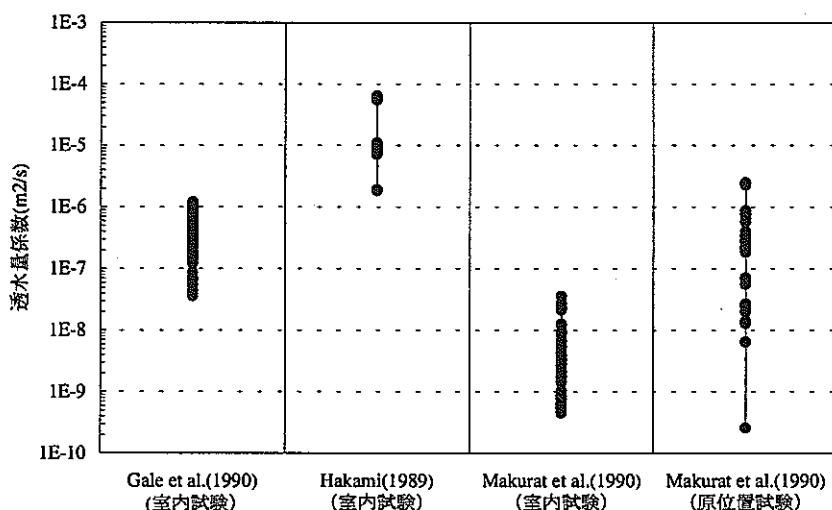


図 4.6.1 ストリバ鉱山における亀裂の透水量係数測定値

4.6.2 釜石鉱山

(1) 単一亀裂の透水量係数

釜石鉱山 KD-90 坑道直上のボーリング孔 (KH-7、KH-8) 間で実施したトレーサ試験のシミュレーション解析結果 (孔間距離 5.1m) によると、湧水亀裂の透水量係数は $1.07 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ と求められている (Uchida et al., 1994)。また、釜石鉱山 KD-90 坑道北側のボーリング孔 (KH-20、KH-21、KH-24、KH-25) 内で実施した流量検層の結果によると、湧水亀裂の透水量係数は $10^{-8} \sim 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ オーダーと求められている (核燃料サイクル開発機構、1999b、p. II-90)。

(2) 亀裂の透水量係数分布

前述したように既往の透水量係数分布測定値がないため、釜石鉱山のボーリング孔 (KE-3、KE-6、KE-7、KH-2、KH-3、KH-5 計 6 孔 48 区間) で実施したダブルパッカ式低圧ルジオン透水試験の結果から以下の 2 つの方法により亀裂の透水量係数分布の推定を試みる。推定にあたっては、透水試験により求められた透水係数とボアホール TV 観察から求められた開口亀裂の本数から亀裂の透水量係数分布を簡易的に算定する方法と、透水係数の分布をキャリブレーションすることにより亀裂の透水量係数分布を同定する OxFilet 法を用いた。

(a) 簡易算定法

釜石鉱山のボーリング孔で実施した低圧ルジオン透水試験結果とボアホールテレビにより観察された各透水試験区間の開口亀裂の本数から亀裂の透水量係数分布を推定する。図 4.6.2 に示すように、透水係数と開口亀裂の本数には相関が認められないことから、開口亀裂の透水性は一様ではなく分布を持つことがわかる。そこで、亀裂の透水量係数分布を各試験区間に内に含まれる開口亀裂の透水量係数は等しいと仮定して以下の式により求めた。

釜石鉱山で実施した透水試験の結果と各試験区間に内の開口亀裂の本数から同じ試験区間に内の亀裂の透水量係数は等しいと仮定して以下の式により透水量係数分布を求めた。

$$T_i = \frac{K_i \times L_i}{n_i} \quad (4.6.1)$$

ここに、 T_i 、 K_i 、 L_i 、 n_i は、それぞれ試験区間 i の亀裂の透水量係数 [m^2/s]、透水係数 [m/s]、区間長 [m]、開口亀裂の本数 [本] である。得られた透水量係数分布は、図 4.6.3 に示すように対数正規分布に従い、その対数平均値は -8.99、対数標準偏差は 1.07 で、標準正規変量の平均値 μ 、標準偏差 σ 、中央値 x_m は次式により、それぞれ $2.18 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ 、 $4.61 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 、 $1.02 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ と求められる。

$$\begin{aligned} \mu &= \exp(c\lambda + 1/2(c\zeta)^2) \\ \sigma &= \mu \sqrt{\exp(c\zeta)^2 - 1} \\ x_m &= \exp(c\lambda) \end{aligned} \quad (4.6.2)$$

ここで、 $c=\ln 10=2.303$ である。各試験区間内の亀裂の透水量係数は一様と仮定しており各区間内のばらつきが平均化されているため、得られた透水量係数分布は実際の分布よりもばらつきは小さくなっていると考えられる。得られた透水量係数分布は、既往の文献より得られた単一亀裂の透水量係数の分布範囲 $10^{-10} \sim 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ オーダーを包含している。

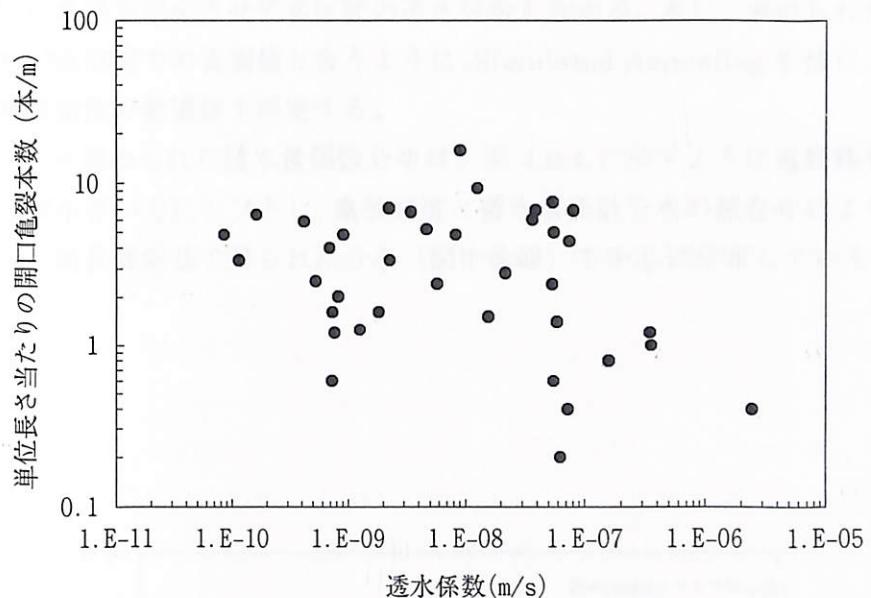
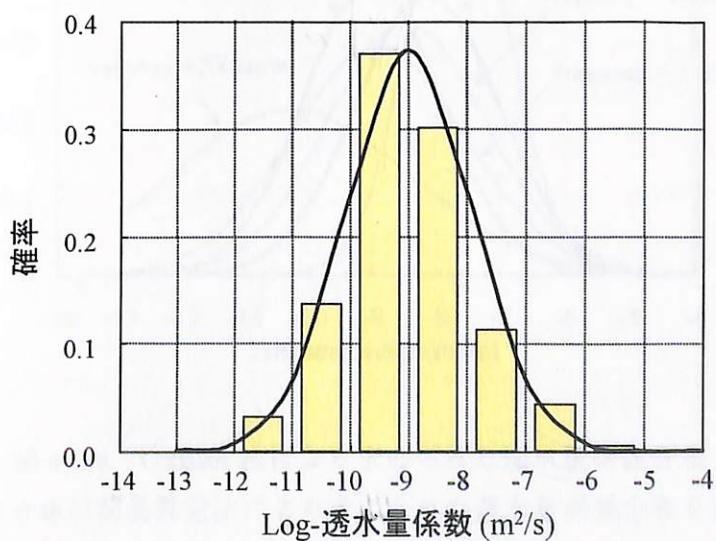


図 4.6.2 透水係数と開口亀裂の本数の関係

図 4.6.3 釜石鉱山での透水試験結果より算出した透水量係数のヒストグラムと
フィッティングにより求めた対数正規分布（実線）

(b) OxFilet 法

Osnes et al. (1988) により提唱された OxFilet 法 (Osnes eXtraction from Fixed-Interval-Length Effective Transmissivities) は、原位置で測定された透水係数の分布から亀裂の透水量係数分布と亀裂頻度を推定する手法である。OxFilet 法では、地下水は亀裂内のみ流れ岩盤基質部の透水性は無視し、各透水試験区間内の亀裂本数はポアソン分布に従うと仮定する。まず、亀裂の透水量係数の対数正規分布と亀裂頻度の初期値を設定し、モンテカルロシミュレーションにより各試験区間に亀裂を発生させて各区間の透水係数を求める。次に、求められた各試験区間の透水係数の分布が原位置での実測値と合うように、Simulated Annealing 手法により亀裂の透水量係数分布と亀裂密度の最適値を同定する。

OxFilet 法により求められた透水量係数分布は、図 4.6.4 に示すように亀裂頻度が大きいほど透水量係数分布が小さい方にシフトし、亀裂頻度と透水量係数分布の組合せにより唯一の解が得られないものの、簡易算定法で得られた分布（図中赤線）を中心に分布していることがわかる。

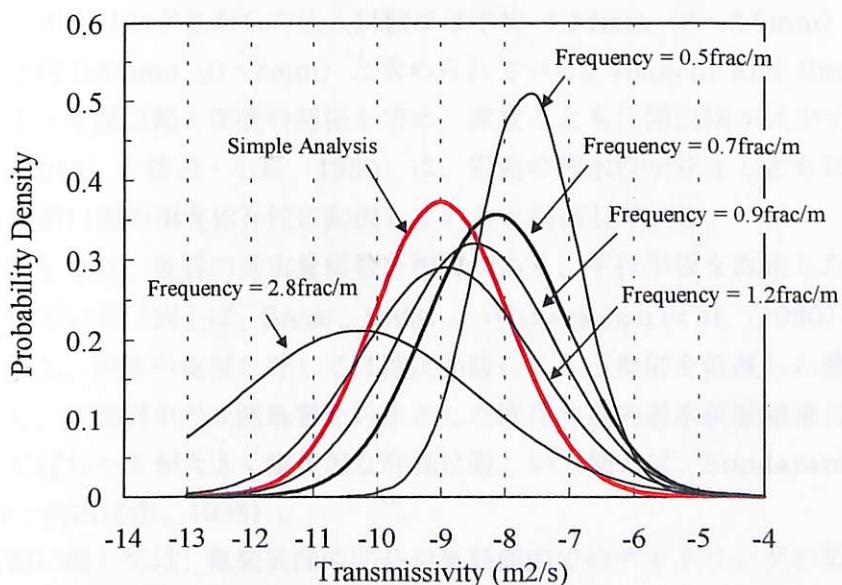


図 4.6.4 Oxfilet 法により求められた透水量係数分布
(図中赤線は簡易算定法により求められた透水量係数分布を表す)

4.7 開口幅

4.7.1 既往の文献

一般に、亀裂の開口幅は、幾何学的開口幅、水理開口幅、物質移行開口幅があり、評価方法によって異なることが知られている（例えば、Abelin et al., 1985；Tsang, 1992）。幾何学的開口幅は、亀裂表面の凹凸測定やレジン注入試験（Hakami, 1995）などにより物理的に測定した開口幅で、水理開口幅は透水試験の結果より亀裂を平行平板と仮定した三乗則などを用いて推定した開口幅で、物質移行開口幅はトレーサ試験で測定された亀裂内の実流速から推定した開口幅で、この順番で小さくなることが知られている。

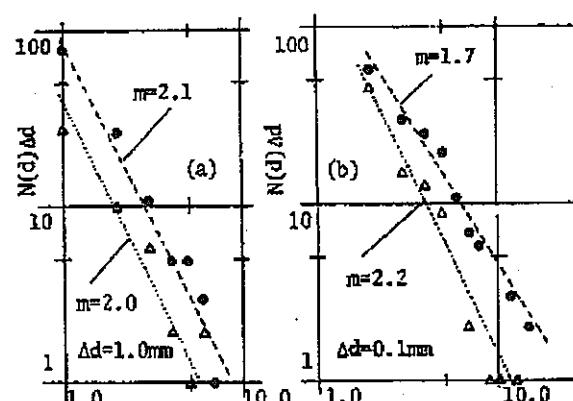
幾何学的開口幅に関しては、渡辺・佐藤（1978）は、安山岩および花崗岩地域において亀裂開口幅を測定し、図 4.7.1 に示すような亀裂開口幅の分布を求めていている。菊地ほか（1984）は、広島花崗岩の採石場での測定に基づいて図 4.7.2 に示すような亀裂開口幅の頻度分布を求め、対数正規分布となることを示している。緒方（1984）は、図 4.7.3 に示すような亀裂開口幅と深度の関係を測定し、花崗閃緑岩サイトにおいては 50m 以深で開口幅はほぼ一定（開口率 0.3～0.4%）となること、流紋岩サイトにおいては 60m 以深ではほぼ全亀裂が 0.5mm 以下になっていることから、地表面近傍での緩みが要因となっていることを指摘している。菊地ほか（1990）と水戸ほか（1990）が実施した花崗岩中の単一亀裂への超微粒子セメント注入試験結果によると、亀裂面内の流路の幅は、ボーリング孔からの注入試験では平均 1.14mm（0～3.5mm）、トレンチからの注入試験では平均 0.54mm（0～2mm）と求められている。Bianchi and Snow（1968）は、図 4.7.4 に示すような開口幅と深度の関係を求め、深度とともに開口幅が減少することを報告している。Snow（1968）や渡辺・小島（1980）は、岩盤の透水性が深度とともに減少する深度依存性は、この亀裂開口幅の深度依存性に起因していると指摘している。

水理開口幅に関しては、亀裂の透水量係数と相関があり、平行平板を仮定した三乗則に従うことが一般に知られている（例えば、Snow, 1968）。Witherspoon et al. (1980) は、亀裂表面の凹凸の影響を考慮し、実際の亀裂に対しては抵抗係数により三乗則を低減した修正三乗則を提案している。しかし、花崗岩中の天然亀裂を対象とした既往の室内透水試験結果によると、抵抗係数は亀裂によってばらつきが大きく定量的な評価は難しい（例えば、Sundaram et al., 1987；多田ほか、1994；内田ほか、1995）。

物質移行開口幅に関しては、亀裂表面の凹凸や亀裂面内でのチャネリングの影響が大きいため、Uchida and Sawada（1995）は、亀裂面内の流れをパイプ流と仮定した貯留則を釜石鉱山の単一亀裂内で実施したトレーサ試験の解析に適用し、非常に良いシミュレーション結果を得ている。

$$2b = c\sqrt{T} \quad (4.7.1)$$

ここに、 $2b$ は開口幅 [m]、 T は亀裂の透水量係数 [m^2/s]、 c は係数を表す。この係数 c は、釜石鉱山で実施したトレーサ試験により KD-90 坑道直上の単一亀裂に対しては 2.0（動力炉・核燃料開発事業団、1994、p.138-141）、Kd-90 坑道北側の単一亀裂および破碎帯に対しては 1.0～10.0 と求められている（核燃料サイクル開発機構、1999b、p. II-91）。また、スウェーデン HRL の大規模破碎帯で実施したトレーサ試験からは 0.1～1.0 と求められている（Uchida et al., 1994）。



(a) 花崗岩 (b) 安山岩

図 4.7.1 龜裂開口幅と頻度の関係 (渡辺・佐藤、1978)

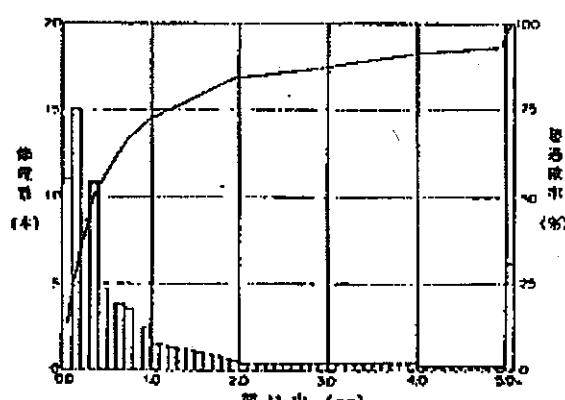
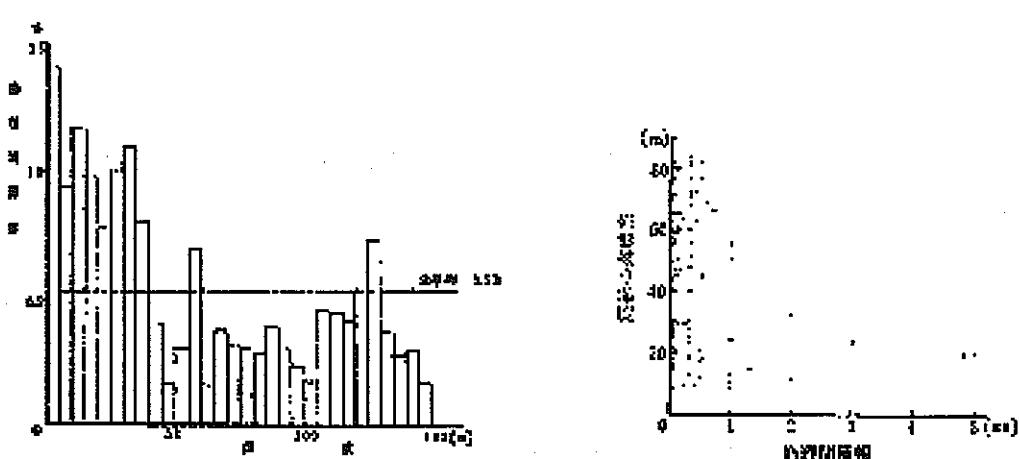


図 4.7.2 開口幅頻度分布 (菊地ほか、1984)



(a) 花崗閃緑岩

(b) 流紋岩

図 4.7.3 開口幅と深度の関係 (緒方、1984)

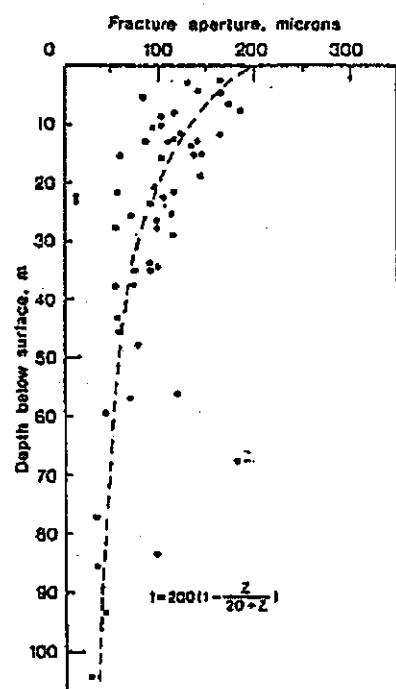


図 4.7.4 開口幅と深度の関係 (Bianchi and Snow, 1968)

4.7.2 露頭・鉱山坑道

露頭・鉱山坑道調査では、45ヶ所で亀裂開口幅が測定され、図4.7.4に示すようにその平均値は0.1~10mmを中心に分布している。また、亀裂の開口幅は、岩種との関係は認められず、構造運動や応力履歴などの地域特性に依存していると推定されている（斎藤ほか、1999、p.91）。

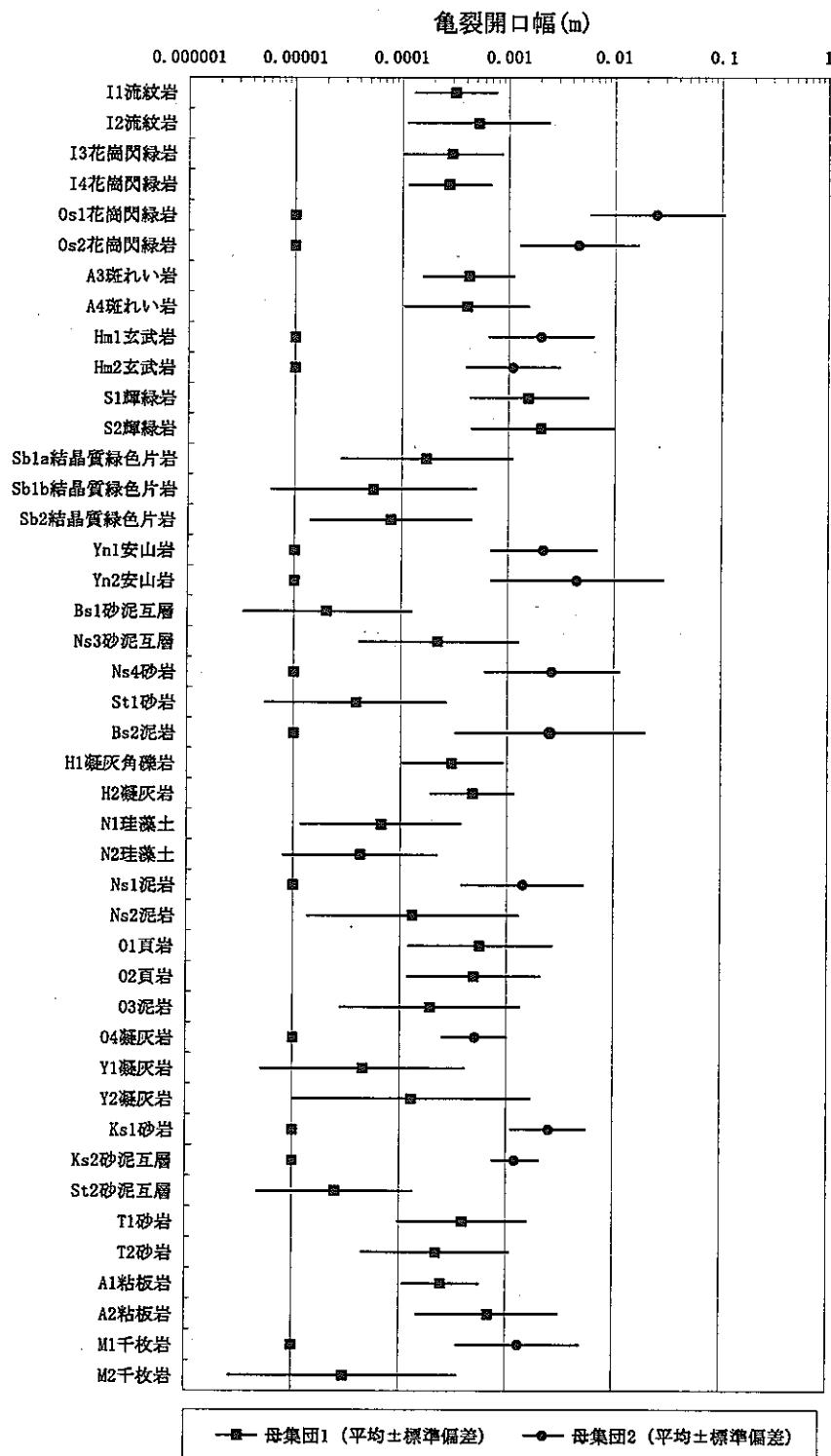


図4.7.4 亀裂開口幅の分布

4.7.3 釜石鉱山

新見ほか（1992）の原位置での単一亀裂内流下試験結果によると、亀裂の幾何学的開口幅は0.2～4mmに分布し、その対数平均値は1.03mmであった。野口ほか（1991）は、NW坑道およびNE坑道において図4.7.5に示すような開口幅の累積頻度分布を求めている。550mレベルのNW・NE坑道壁面観察およびボーリング孔（KE-3,6,7；KH-2～25；計27本）内ボアホールテレビ観察により測定された開口幅の頻度分布をそれぞれ図4.7.6(a), (b)に示す。これらの図より、測定された開口幅のほとんどが2mm以下に分布していることがわかる。

なお、物質移行開口幅に関しては、4.7.1に述べたとおりである。

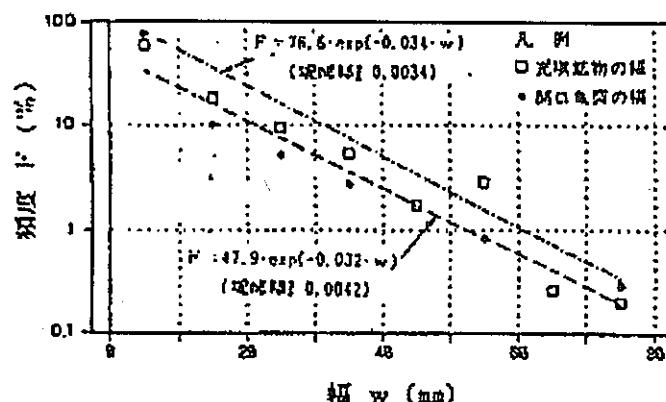
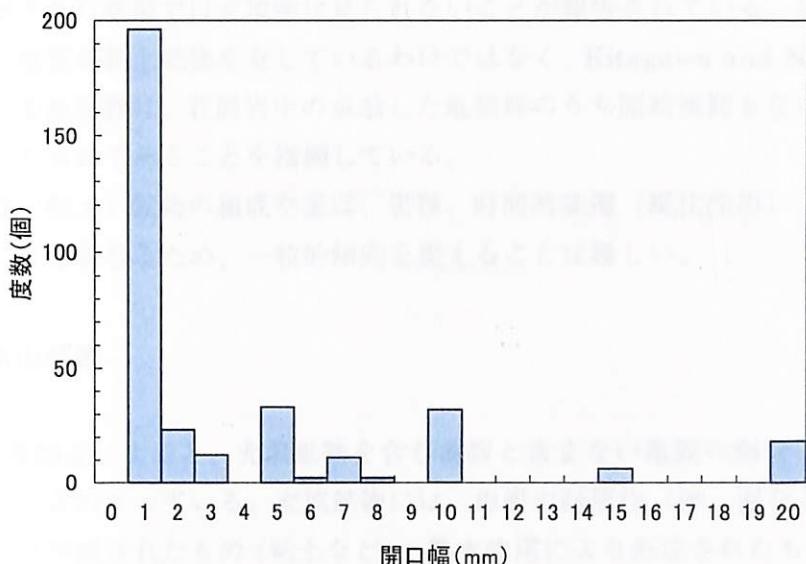
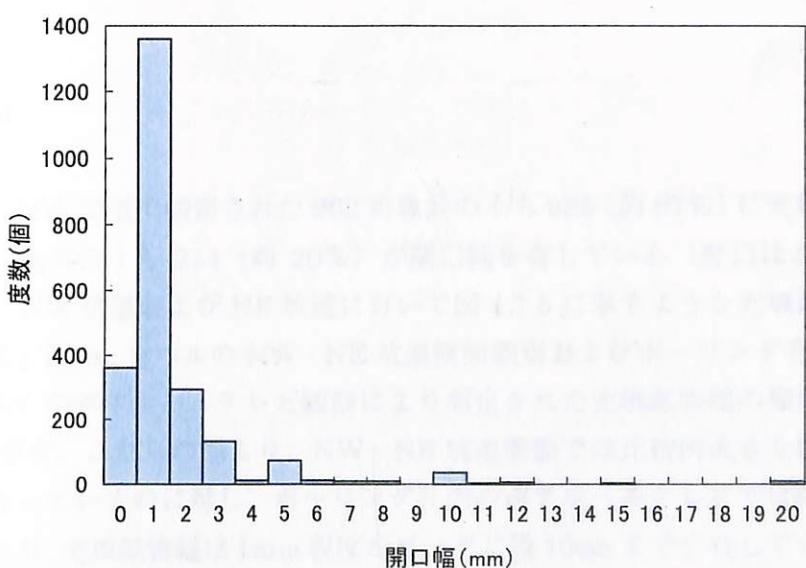


図4.7.5 亀裂幅と累積頻度の関係（野口ほか、1991）



(a) NW・NE 坑道



(b) ボーリング孔 (KE-3,6,7 ; KH-2~25 ; 計 27 本)

図 4.7.6 亀裂開口幅の頻度分布
(横軸の数値 1 は 1mm オーダーを表す)

4.8 充填鉱物

4.8.1 既往の文献

亀裂内の充填鉱物に関する既往の文献は少ない。緒方（1978）によると黒部川第四発電所圧力トンネルで観察された亀裂では充填物は見られないことが報告されている。北川（1985）の調査によると全ての亀裂が粘土鉱物を有しているわけではなく、Kitagawa and Nishido（1994）は、粘土鉱物を有する亀裂群は、花崗岩中の卓越した亀裂群のうち固結後間もない時期に広域圧縮応力場で形成されたものであることを指摘している。

亀裂中の充填（粘土）鉱物の組成や量は、岩種、時間的変遷（風化作用）、生成温度（熱水作用）等の違いにより異なるため、一般的傾向を捉えることは難しい。

4.8.2 露頭・鉱山坑道

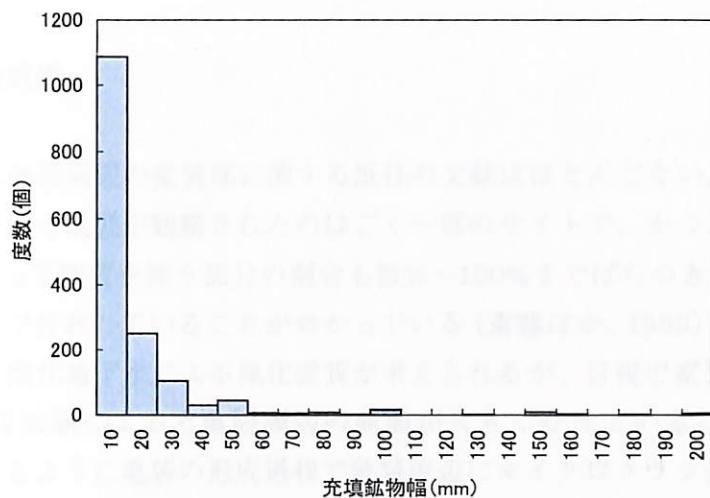
露頭・鉱山坑道調査によると、充填鉱物を含む亀裂と含まない亀裂の割合は、サイトによって大きく異なることがわかっている。充填鉱物には、母岩の碎屑物（砂、泥など）、碎屑物が地下水との反応により形成されたもの（粘土など）、熱水作用により形成されたもの（石英、方解石、硫化物など）、風化により形成されたもの（マンガン酸化物、酸化鉄、水酸化鉄など）などがあり、造岩鉱物や粘土鉱物を伴う亀裂が最も多いことがわかっている。また、粉末X線回折結果によると、母岩と充填鉱物を構成する鉱物の種類は大きく変わらないことがわかっている（斎藤ほか、1999）。

4.8.3 釜石鉱山

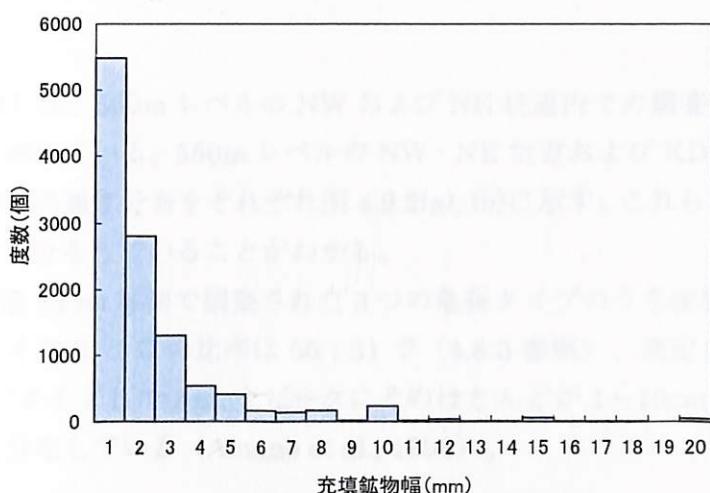
550m レベル NW 坑道で観察された 962 の亀裂のうち 935（約 97%）に充填鉱物が認められ、充填鉱物を伴う亀裂のうち 214（約 20%）が開口幅を有している（野口ほか、1990）。野口ほか（1991）は、NW 坑道および NE 坑道において図 4.7.5 に示すような充填鉱物幅の累積頻度分布を求めている。550m レベルの NW・NE 坑道壁面観察およびボーリング孔（KE-3,6,7；KH-2～25；計 27 本）内ボアホールテレビ観察により測定された充填鉱物幅の頻度分布をそれぞれ図 4.8.1(a), (b) に示す。これらの図より、NW・NE 坑道壁面では比較的大きな幅の充填鉱物が主に測定の対象となっているのに対し、ボーリング孔内のボアホールテレビでは幅の小さな充填鉱物も測定されており、充填鉱物幅は 1mm 程度をピークに数 10cm まで分布していることがわかる。

250m レベル坑道 440m 区間で観察された亀裂中の充填鉱物の幅は、図 4.8.2 に示すようにタイプ A、B はそれぞれ 0.5cm、2cm 前後をピークとした正規分布をなし、タイプ C は数 10cm～約 1m の破碎幅を有しており、タイプ A、B、C の順に充填鉱物の幅が大きくなっている。X 線回折結果によるとタイプ A、B、C の充填鉱物は、それぞれ単一鉱物、複合鉱物、断層粘土で構成され、この順に充填鉱物が変遷した履歴が認められる。また、タイプ A、B、C の順に亀裂の連続性も高くなっている、亀裂の形成過程と充填鉱物の履歴が一致することがわかっている。

以上より、釜石鉱山のほとんどの亀裂中には充填鉱物が認められ、亀裂の形成時期が古いほど充填鉱物の幅が大きく亀裂の連続性も高くなることがわかった。



(a) NW · NE 坑道



(b) ボーリング孔 (KE-3,6,7; KH-2~25; 計 27 本)

図 4.8.1 充填鉱物幅の頻度分布

(横軸の数値 1 は 1mm オーダーを表す)

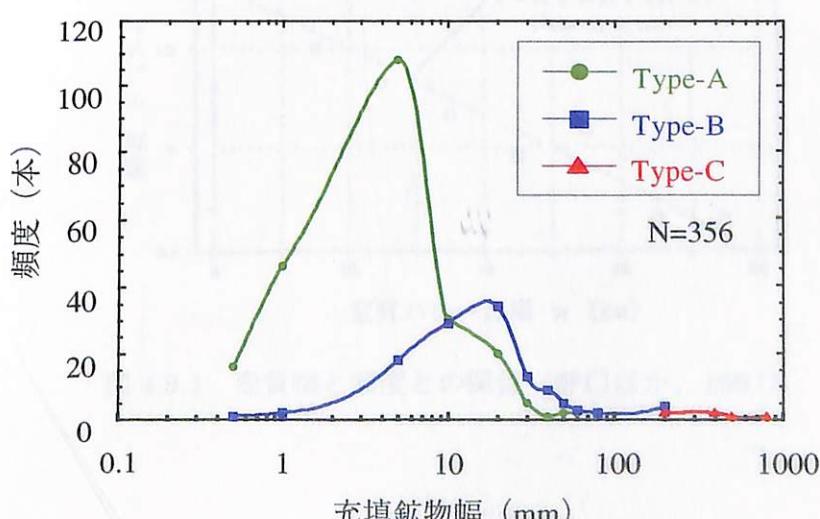


図 4.8.2 亀裂タイプ毎の充填鉱物幅の頻度分布 (天野ほか、1995)

4.9 変質部

4.9.1 露頭・鉱山坑道

我が国における亀裂周辺の変質部に関する既往の文献はほとんどない。露頭・鉱山坑道調査によると、変質部を伴う亀裂が観察されたのはごく一部のサイトで、かつごく一部の亀裂に限られている。亀裂によって変質を伴う部分の割合も数%～100%までばらつきがあり、変質幅も数mmから最大10cmまで分布していることがわかっている(斎藤ほか、1999)。変質の要因としては、熱水による変質と酸化地下水による風化変質が考えられるが、目視で変質部が確認できない亀裂でも室内樹脂浸透試験によると亀裂周辺の間隙が大きくなっていることから、Heath et al. (1992) の指摘するように亀裂の形成過程で亀裂周辺にマイクロクラックが形成されていると考えられる。

4.9.2 釜石鉱山

野口ほか(1991)は、550m レベルの NW および NE 坑道内での調査より図 4.9.1 に示すような変質幅の分布を求めている。550m レベルの NW・NE 坑道および KD-90 坑道の壁面観察により測定された変質幅の頻度分布をそれぞれ図 4.9.2(a), (b) に示す。これらの図より、変質幅のほとんどは 10cm 以下に分布していることがわかる。

250m レベル坑道 440m 区間で観察された 3 つの亀裂タイプのうち変質部を伴わないタイプ A と変質部を伴うタイプ B と C の比率は 55 : 31 で(4.8.3 参照)、測定された変質幅の分布は図 4.9.3 に示すようにタイプ B で 3cm をピークにそのほとんどが 1～10cm 以下に分布し、タイプ C では 10～30cm に分布している(Amano et al., 1998)。

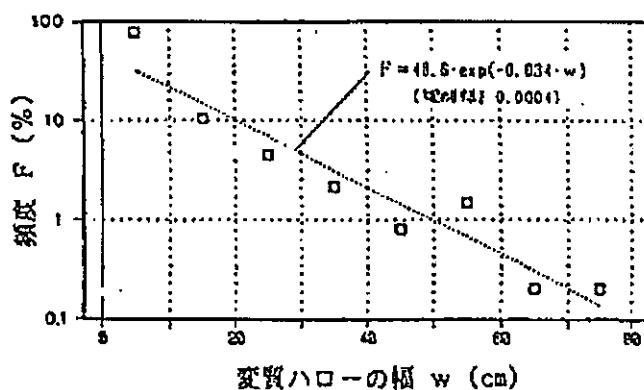
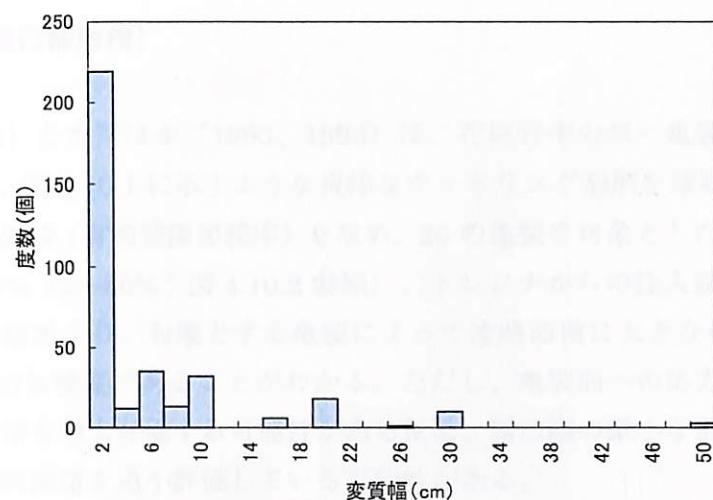
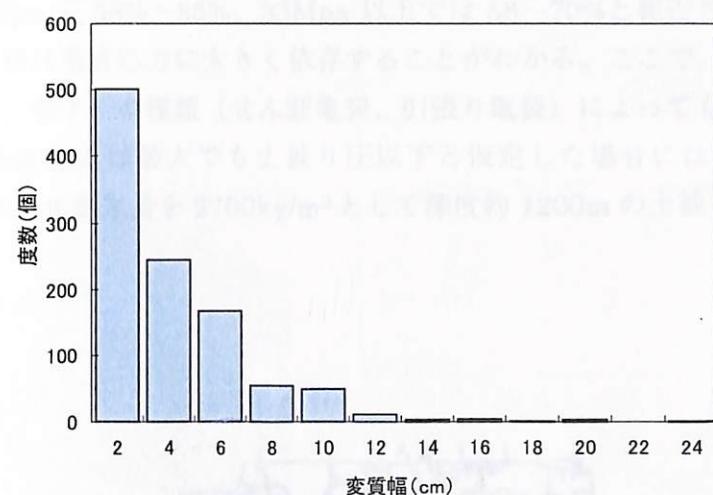


図 4.9.1 変質幅と頻度との関係(野口ほか、1991)



(a) NW · NE 坑道



(b) KD-90 坑道

図 4.9.2 変質幅の頻度分布

(横軸の数値 1 は 1cm オーダーを表す)

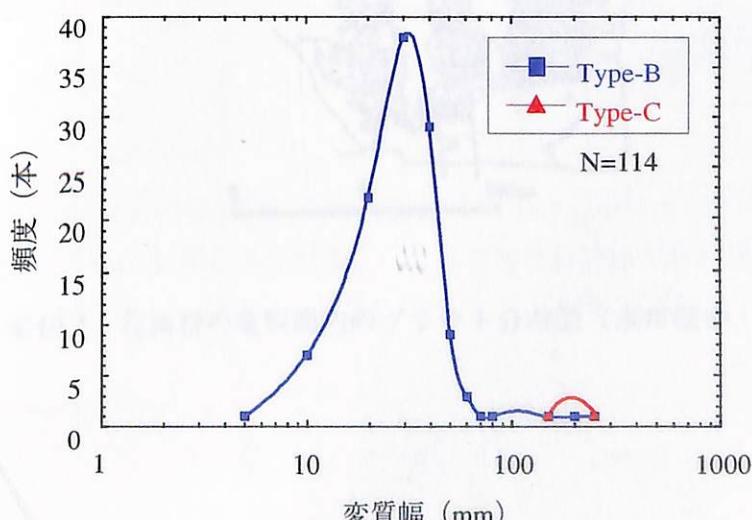


図 4.9.3 250m レベル坑道における変質幅の頻度分布

4.10 流路面積（開口部面積）

菊地ほか（1990）と水戸ほか（1990、1993）は、花崗岩中の単一亀裂への超微粒子セメント注入試験を実施し、図4.10.1に示すような複雑なチャネリング形態を確認するとともに、亀裂面全体に占める流路面積（有効間隙面積率）を求め、26の亀裂を対象としたボーリング孔からの注入試験で平均24.8%（2~66%；図4.10.2参照）、トレーナーからの注入試験で約33.2%と報告している。これらの結果より、対象とする亀裂によって流路面積に大きなばらつきがあるものの、平均的には20~30%程度であることがわかる。ただし、亀裂面への応力が小さく地下深部における亀裂の流路面積を過大評価する可能性がある反面、開口幅の微小な部分でセメントが詰まりを生じるため流路面積を過小評価している可能性がある。

一方、Pyrak-Nolte（1987）が実施した単一亀裂中への低融点金属（ウッズメタル）注入試験によると、図4.10.3に示すように亀裂面への垂直応力に応じて亀裂開口部の面積は変化し、3Mpaで85~92%、33Mpaで58%~85%、33Mpa以上では58~70%と報告されている。すなわち、亀裂面内の流路面積は垂直応力に大きく依存することがわかる。ここで、亀裂面への垂直応力は亀裂の方向（鉛直、水平）や種類（せん断亀裂、引張り亀裂）によっても異なると考えられるものの、亀裂面への垂直応力は最大でも土被り圧以下と仮定した場合には、亀裂面への垂直応力33Mpaは岩盤の単位体積重量を2700kg/m³として深度約1200mの土被り圧に相当する。

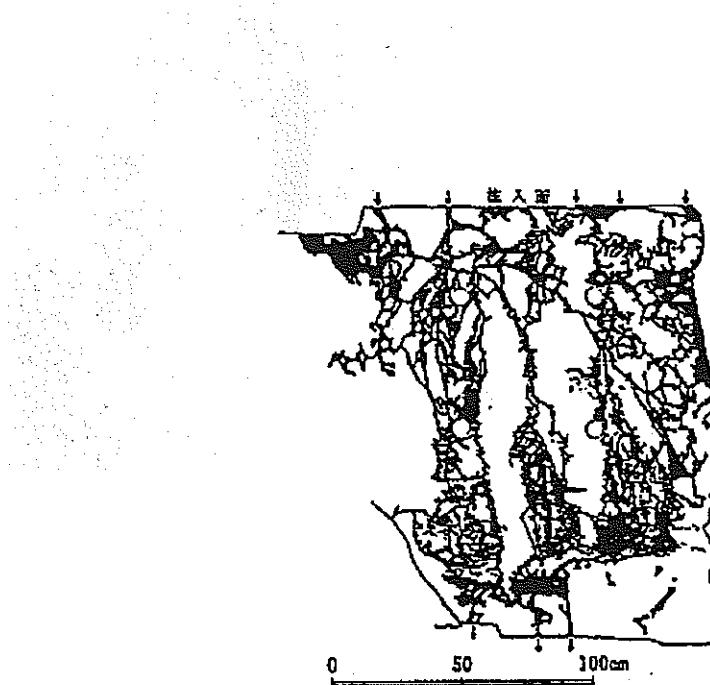


図4.10.1 花崗岩の亀裂面内のグラウト分布図（水戸ほか、1990）

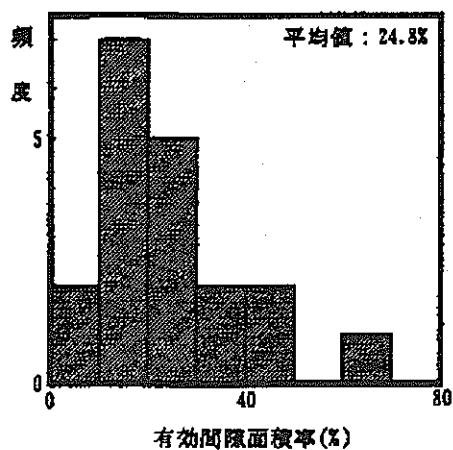


図 4.10.2 流路面積（有効間隙面積率）の頻度分布（水戸ほか、1998）

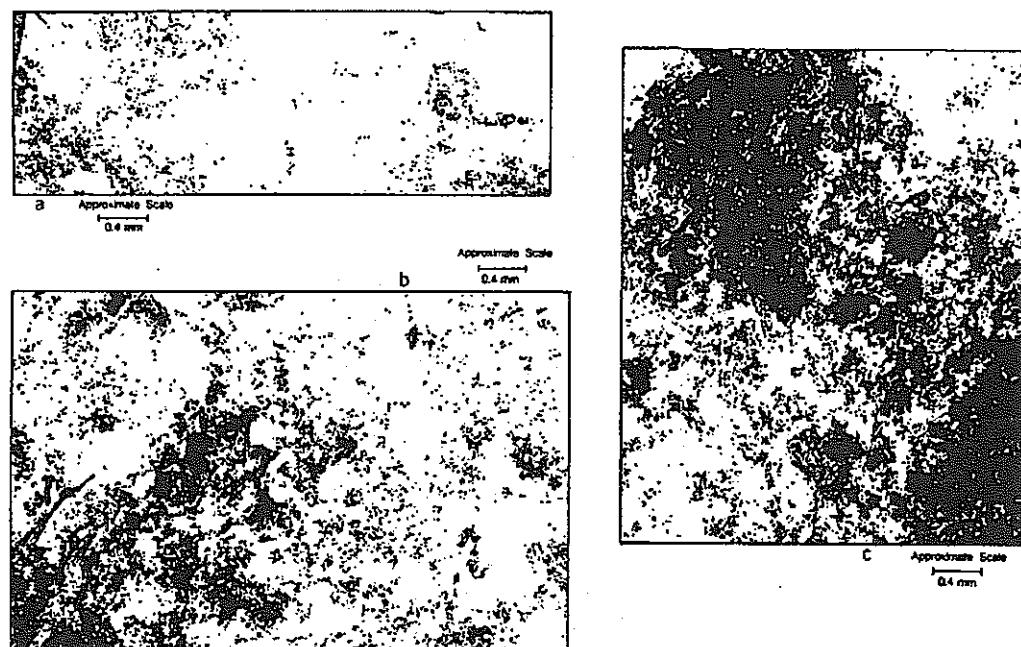


図 4.10.3 花崗岩亀裂面内の低融点金属分布図 (Pyrak-Nolte et al., 1987)

白色部は低融点金属、黒色部は亀裂閉塞部を示す。亀裂面への主直応力および低融点金属の面積比は、それぞれ a (左上) 3Mpa、92%、b (左下) 33Mpa、85%、c (右) 85Mpa、70%である。

4.11 パラメータ相関性

4.11.1 大きさ（トレース長）と頻度

緒方（1978）は、亀裂調査の結果より、図 4.11.1 に示すように平均亀裂間隔が大きくなるほど平均亀裂長も大きくなり、平均亀裂長は平均亀裂間隔の 2~6 倍の範囲にあることを示している。大野・小島（1992、1993）は、亀裂のトレース長の頻度分布はべき乗分布に従うことを示し、トレース長が大きくなるほど亀裂頻度が小さくなることを示している（4.3 参照）。

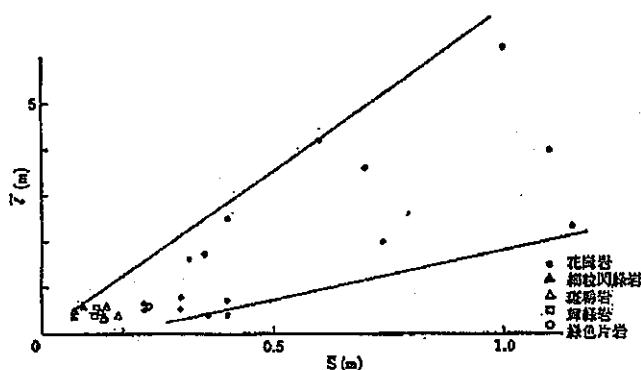
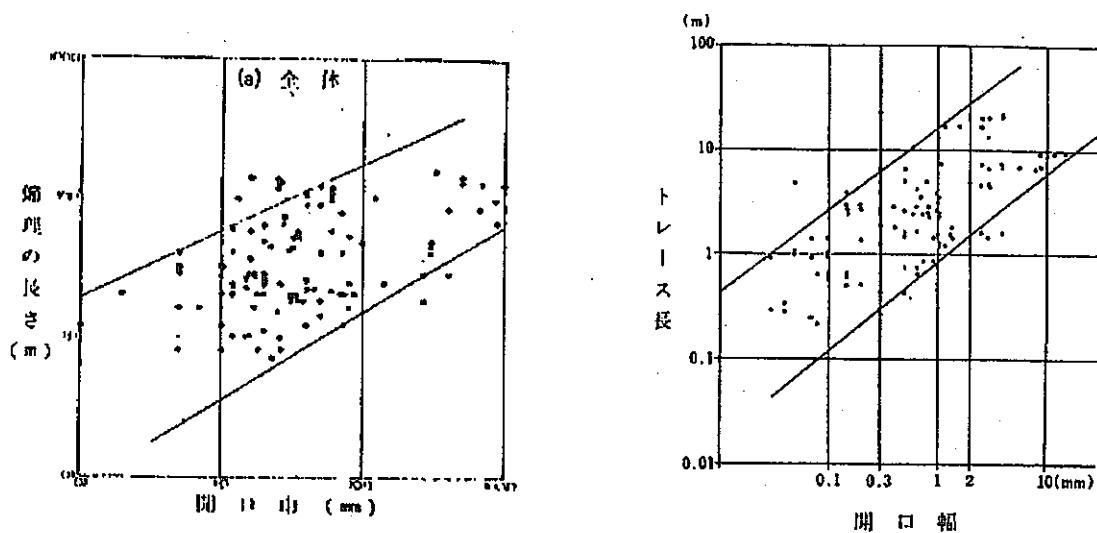


図 4.11.1 平均亀裂間隔（横軸）と平均亀裂長（縦軸）の関係（緒方、1978）

4.11.2 大きさ（トレース長）と開口幅

菊地ほか（1984、1992）は、広島花崗岩の採石場と第四紀安山岩地域での測定に基づいて図 4.11.2 に示すような亀裂開口幅とトレース長の関係を示し、亀裂開口幅とトレース長の間には弱い正の相関があることを指摘している。



(a) 広島花崗岩の採石場（菊地ほか、1984） (b) 第四紀安山岩地域（菊地ほか、1992）

図 4.11.2 亀裂開口幅とトレース長の関係

4.11.3 頻度と岩盤の透水性

木下ほか（1993）は、結晶質岩盤内の鉱山坑道のボーリング孔で透水係数と開口亀裂の密度を測定し、図4.11.3に示すように開口亀裂の密度と岩盤の透水係数の間に相関があることを報告している。下茂ほか（1992）が菊間地下石油備蓄基地の花崗閃緑岩中のボーリング孔で実施した調査においても、亀裂頻度と透水性の間には相関が認められている。菊地ほか（1992）や田中ほか（1994）は、短い亀裂でも高密度で分布することによって連結して透水性の高い水みちを形成することを指摘している。

釜石鉱山においては、野口・中村（1990）は、ボーリング孔で実施された透水試験結果より透水係数と亀裂数の関係を求め、卓越した亀裂群（N65E系）の開口亀裂が透水性に寄与していることを示している。野口ほか（1991）は、NW坑道のスカルンと栗橋花崗閃緑岩との境界やNE坑道の蟹岳花崗閃緑岩と栗橋花崗閃緑岩との境界などの地質境界部で湧水が多く、開口亀裂も多いことを指摘している。渡辺ほか（1994）は、KD-90坑道での観察結果より亀裂交線部に小亀裂が集中して水みちとなる可能性を指摘している。大沢ほか（1992）もKD-90坑道での蒸発量分布の測定より亀裂密集部での蒸発量が多いことから透水性も高いことを示唆している。

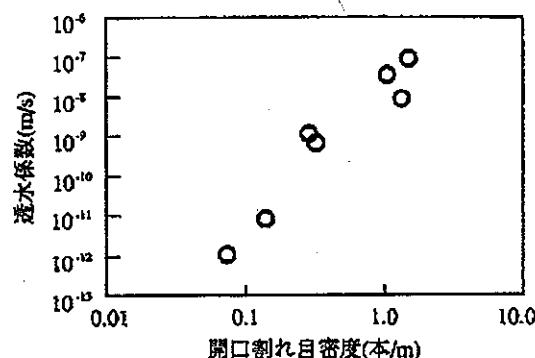


図4.11.3 開口亀裂の密度と透水係数の関係（木下ほか、1993）

5. まとめと考察

我が国の岩盤における亀裂特性に関して得られた知見を以下に要約し、考察を加える。

(1) 方向性

- 亀裂の方向は、地質特性などのサイト固有の影響を受けるため一般的な評価は難しい。
- 花崗岩では互いに直交する2組の鉛直亀裂群と水平方向の亀裂群が卓越する。ただし、地下深部では、応力解放により発生した水平方向の亀裂(sheeting joint)は少ないと考えられる。
- 釜石鉱山の花崗閃緑岩においては、亀裂群毎に成因や年代が異なり、連続性や透水性も異なる傾向が認められた。
- 花崗岩以外の岩種における定性的な傾向は認められない。

(2) 形状

- 既往の測定例がなく、既往の研究では多角形でモデル化することが多い。
- 均質等方弾性媒体中のせん断クラックは円盤となる。

(3) 大きさ

- 亀裂のトレース長分布は、べき乗分布に従う。
- 花崗岩中の亀裂の連続性は、他の岩種に比べて高いと考えられる。

(4) 頻度

- 亀裂頻度は、不均質で同じサイトでも場所によってばらつきがあるだけでなく、測定方法、対象とする亀裂の大きさや性状、測定者などによっても異なるため定量的な評価は難しい。
- 亀裂頻度は、数本/m程度で多い場合でも10本/m以下である。
- ポーリング孔内の開口亀裂やトレース長が数m以上の亀裂の平均的な頻度は1本/m程度である。
- 花崗岩の亀裂頻度は、結晶質岩の中でも比較的高いと考えられる。
- 新第三紀堆積岩の亀裂頻度は、結晶質岩や先新第三紀堆積岩に比べて小さい傾向がある。
- 菊間地下石油備蓄基地の岩盤タンク(高さ30m、幅20.5m)壁面で観察された空洞の安定性に影響を及ぼすような比較的大きな連続性の高い亀裂の頻度0.25~0.5本/mと、釜石鉱山の連続性および透水性が高い赤色変質を伴うタイプBの亀裂の頻度約0.33本/mがほぼ一致することから、花崗岩内の比較的大きな(数十~数百m)スケールでの透水に寄与するような連続性および透水性の高い亀裂の頻度は0.25~0.5本/m(2~4m間隔)程度と考えられる。

(4) 空間分布

- 大きな亀裂や断層周辺には小規模な亀裂が密集する傾向があり、亀裂の分布は一様ではなく大なり小なり疎密があると考えられる(したがって、亀裂頻度にも疎密があると考えられる)。

(5) 透水量係数

- 既往の文献より得られた花崗岩中の単一亀裂の透水量係数は $10^{-10} \sim 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ オーダーに分布している。
- 釜石鉱山の透水試験により得られた透水係数とボアホールテレビで観察された開口亀裂の本数から推定された透水量係数分布は、対数平均 $8.99 \text{ m}^2/\text{s}$ 、対数標準偏差 $1.07 \text{ m}^2/\text{s}$ の対数正規分布に従う（標準正規変量の平均 $2.18 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ 、標準偏差 $4.61 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 、分布範囲約 $10^{-12} \sim 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ）。この透水係数と開口亀裂の本数から推定された透水量係数分布は、単一亀裂の透水量係数実測値の分布範囲 $10^{-10} \sim 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ オーダーを包含しており妥当な範囲にあると考えられる。

透水係数と開口亀裂の数から求められた透水量係数分布（対数平均 $8.99 \text{ m}^2/\text{s}$ 、対数標準偏差 $1.07 \text{ m}^2/\text{s}$ 、分布範囲約 $10^{-12} \sim 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ）の妥当性についてさらに検討を加える。

分布範囲の最大値側である透水量係数 $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ や $10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ の亀裂に関しては、次の Muskat の式によりこれらの亀裂から坑道内への湧水量を算定する。

$$Q = \frac{72\pi Ta}{\ln(4a/d)} \quad (5.1)$$

ここに、 Q は坑道内への湧水量 [m^3/s]、 T は亀裂の透水量係数 [m^2/s]、 a は亀裂内の地下水頭 [m]、 d は坑道直径 [=2.2m] である（図 5.1 参照）。その結果、坑道の直径を 2.2m とした場合の亀裂から坑道内への湧水量は図 5.2 のように求められ、坑道上方 100m に地下水位がある場合の透水量係数 $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ および $10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ の亀裂から坑道内への湧水量はそれぞれ約 $300 \text{ l}/\text{min}$ と約 $30 \text{ l}/\text{min}$ となり、比較的湧水量の多い亀裂に相当することがわかる。

一方、分布範囲の最小値側である透水量係数 $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ や $10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ の亀裂に関しては、釜石鉱山における花崗閃緑岩の岩石基質部の透水係数を $10^{-13} \sim 10^{-12} \text{ m}/\text{s}$ （井尻ほか、1999）、空隙率を 2%（佐藤ほか、1992）とすると動水勾配 1 に対して岩石基質内の実流速が $1.6 \times 10^{-4} \sim 1.6 \times 10^{-3} \text{ m}/\text{y}$ であるのに対し、これらの亀裂内の流速は貯留則を用いた場合にはそれぞれ約 $0.13 \text{ m}/\text{y}$ と $0.4 \text{ m}/\text{y}$ となり、岩石基質内の流速よりも 2~3 衡高い流速を有していることがわかる。

したがって、透水係数と開口亀裂の数から求められた透水量係数分布（対数平均 $8.99 \text{ m}^2/\text{s}$ 、対数標準偏差 $1.07 \text{ m}^2/\text{s}$ 、分布範囲約 $10^{-12} \sim 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ；4.6.2 参照）は、岩石基質部よりも 2~3 衡透水性の高い亀裂から比較的透水性の高い亀裂まで包含し現実的な範囲にあると考えられる。

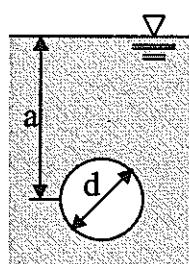


図 5.1 Muskat の式模式図

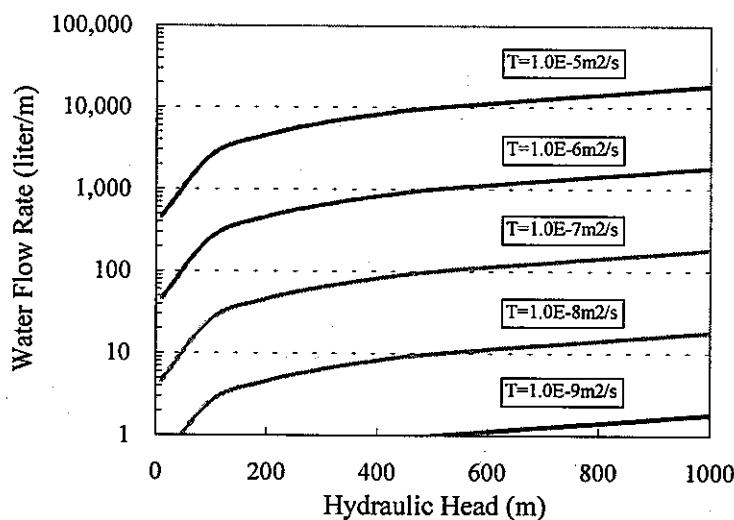


図 5.2 Muskat の式より算定した亀裂から坑道内への湧水量

(6) 開口幅

- 開口幅には、幾何学的開口幅、水理開口幅、物質移行開口幅があり、この順に小さくなる。
- 幾何学的開口幅に関しては、既往の測定値より 1mm 以下に最頻値を持つ対数正規分布形状や負の指数分布を示し、地表面近傍ほど大きくなる傾向があることがわかっている。
- 水理開口幅に関しては、亀裂表面の凹凸の影響を考慮した修正三乗則で表され、透水量係数と相関があることが知られている。
- 物質移行開口幅に関しては、釜石鉱山やスウェーデン HRL などで貯留則（式 4.8.1）の適用性が確認されている。

透水係数と開口亀裂の本数より求められた透水量係数分布に貯留則 ($c=2$) を適用して得られた開口幅の分布は、図 5.3 に示すように対数平均-4.19、対数標準偏差 0.54 の対数正規分布（標準正規変量の平均 1.37×10^{-4} m、標準偏差 2.58×10^{-4} m）となる。この貯留則より求めた開口幅分布が開口幅測定値の 70%以上が 1mm 以下に分布している菊地ほか（1984）の広島花崗岩での測定結果（図 4.8.1 参照）よりも小さいのは、菊地ほか（1984）の測定値が幾何学的開口幅であるのに対して、物質移行開口幅を用いたためと考えられる。

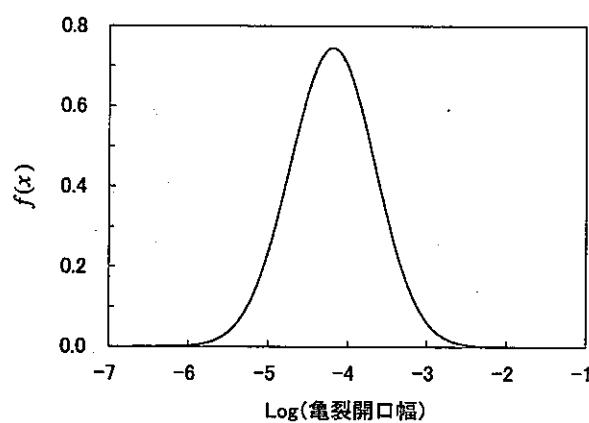


図 5.3 亀裂開口幅分布（縦軸は確率密度関数を表す）

(7) 充填鉱物

- 形成時期が古い亀裂ほど充填鉱物（粘土鉱物）を有する傾向があり、充填鉱物を有する亀裂とそうでない亀裂の割合はサイトにより異なる。
- 釜石鉱山においては、ほとんどの亀裂で充填鉱物が認められ、タイプAで0.5cm、タイプBで2cmに最頻値を有している。

(8) 変質部

- 亀裂周辺に変質部を伴う亀裂の割合はサイトにより異なる。
- 釜石鉱山においては、変質部を伴う亀裂は約37%で、変質幅は数cm程度である。
- 目視できる変質部を伴わなくとも亀裂周辺にはマイクロクラックが形成され間隙が大きくなっていると考えられる。

(9) 流路面積

- 亀裂によってばらつきが多く、地下1000m以上の土被り圧に相当する垂直応力下においても流路（開口部）面積は亀裂面全体の50%以上と考えられる。

(10) パラメータ相関性

- 大きな亀裂ほど分布頻度は小さく開口幅は大きい。
- 亀裂密度が高いほど岩盤の透水性が高くなる傾向がある。
- パラメータ（大きさ、頻度、開口幅、透水性、充填鉱物幅、変質幅）間の相関関係を図5.4に示す。

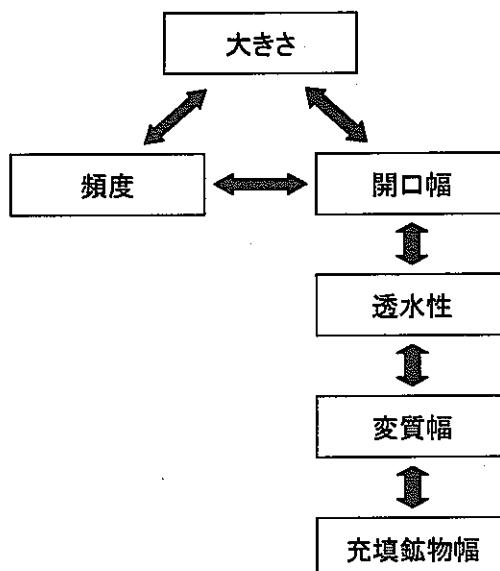


図5.4 パラメータの関係
(青矢印は正の相関、赤矢印は負の相関関係を表す)

6. 参考文献

天野健二、吉田英一、笹本広（1995）：釜石鉱山における栗橋花崗岩体中の割れ目形態と空隙構造、平成7年度支部研究発表会・講演会予稿集、日本応用地質学会中部支部、pp.9-12.

池田和彦（1979）：割れ目岩盤の性状および強度、応用地質、第20巻第4号、pp.20-32.

井尻裕二、澤田淳、赤堀邦晃（1999）：我が国の岩盤の水理特性について、核燃料サイクル開発機構技術資料、JNC TN8400 99-090.

井尻裕二、澤田淳、山田直之、大西有三、大津宏康、土山富広（2000）：亀裂のトレース長分布とそのモデル化に関する研究、第35回地盤工学研究発表会（投稿中）.

内田雅大、野田兼司、丸山誠、須藤賢（1995）：亀裂性媒体水理試験装置による単一亀裂岩体の透水・トレーサー試験、第26回岩盤力学に関するシンポジウム、pp.156-160.

大津宏康、田中誠、土山富広、陳光斎、干青春、井尻裕二、澤田淳、山田直之、坂本和彦、内田雅大、石黒勝彦（1999）：我が国の岩盤における亀裂特性とそのモデル化に関する研究、－先行基礎工学分野に関する平成10年度報告書－、JNC TY8400 2000-001.

大塚康範（1979）：断層変形に関する地質工学的研究、東京大学工学部資源開発工学科博士論文.

大西有三、鍵本広之、菊地宏吉（1985）：不連続性岩盤の節理分布性状の幾何学モデル作成に関する研究、第20回土質工学研究発表会、pp.931-934.

大西有三、田中誠、中川誠司、松田泰英、鳥居聰（1992）：トンネル先進側壁導坑の観察による未掘削部分の岩盤性状の推定、第27回土質工学研究発表会、pp.1315-1318.

緒方正慶（1978）：硬質岩盤における節理分布の数量モデル化およびその適用に関する考察、応用地質、第19巻第1号、pp.12-20.

緒方正慶（1984）：岩盤分類の要因としての岩盤の不連続面、岩盤分類、応用地質、特別号、応用地質学会、pp.17-24.

小田匡寛、木村健司（1990）：亀裂の寸法分布について一フランタル性を仮定して一、第8回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、pp.55-60.

大沢聰、渡辺邦夫、中村直昭、新見健（1992）：釜石鉱山における、壁面上蒸発量分布の特性、土木学会第47回年次学術講演会、第3分冊、pp.658-659.

大野博之、小島圭二（1987）：割れ目の統計的相似性に基づく Site Characterization の試み、第 19 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp.416-420.

大野博之、小島圭二（1989）：フラクタル性を考慮した岩盤割れ目の寸法評価と透水性、第 7 回 岩の力学国内シンポジウム講演論文集、pp.157-162.

大野博之、小島圭二（1992）：岩盤割れ目のフラクタル（その 1）－フラクタル分布－、応用地質、 33 卷 3 号、pp.11-24.

大野博之、小島圭二（1993）：岩盤割れ目のフラクタル（その 2）－フラクタル特性と分布のばらつき－、応用地質、34 卷 2 号、pp.12-26.

核燃料サイクル開発機構（1999a）：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.

核燃料サイクル開発機構（1999b）：釜石原位置試験総括報告書、JNC TN7410 99-001.

菊地宏吉、三室俊昭、大村富士夫、原敏昭（1984）：節理性岩盤のモデル化に関する研究、第 1 6 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp.126-130.

菊地宏吉、水戸義忠、本多眞、三室俊昭、吉田順（1990）：原位置試験による節理性岩盤の浸透流解析に関する研究、第 8 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、pp.435-440

菊地宏吉、水戸義忠、本多眞（1992）：節理分布性状の確率統計学的モデル化に関する研究（そ の 2）－節理分布特性要素と確率モードー、応用地質、第 33 卷第 5 号、pp.19-31.

北川隆司（1985）：花こう岩中に見られる粘土細脈と花こう岩の変質について、pp.93-117.

木下直人、安部透、竹村友之、横本誠一（1993）：原位置透水試験によるトンネル周辺岩盤の水理特性の調査、第 25 回岩盤力学シンポジウム講演論文集、pp.481-485.

木村敏雄（1981）：断層、とくに断層破碎帯の見方、考え方、応用地質、第 22 卷第 1 号、pp.4-16.

小出仁、山崎晴雄、加藤碩一（1979）：地震と活断層の本、（株）国際地学協会、p.61.

越谷信、長江亮二、大上和良、森田安彦（1991）：南部阿武隈山地花崗岩中の断裂系と地下水、 応用地質、第 32 卷第 4 号、pp.23-39.

小島圭二（1982）：北欧の花崗岩・日本の花崗岩－地下空洞に関する特徴－、応用地質、第 23 卷

第 2 号、pp.109-113.

小島圭二、大塚康範、山田敏博（1981）：断層密度および規模の分布とその予測の試み、応用地質、第 22 卷第 1 号、pp.88-103.

斎藤茂幸、杉山和稔、諸岡幸一、池田則生（1999）：ニアフィールド岩盤中の物質移行経路のモーデリングに関する基礎研究（VI）、核燃料サイクル開発機構研究委託内容報告書、JNC TJ1400 99-014.

佐藤邦明、渡辺邦夫、小田部淳（1978）：断層のトンネル湧水に与える影響、埼玉大学工学部地盤水理実験施設年報、Vol.4、pp.60-80.

佐藤稔紀、石丸恒存、杉原弘造、清水和彦（1992）：文献調査による我が国の岩石の物理的特性に関するデータの収集、PNC TN7410 92-018.

下茂道人、井尻裕二、飯星茂、橋本憲和、長田和洋（1992）：トモグラフィーとクロスホール透水試験による岩盤内地下水浸透経路の調査、第 24 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp.31-35.

多田浩幸、木下直人、若林成樹（1994）：岩石割れ目の透水係数と応力の関係を用いた空洞周辺岩盤の透水特性変化の予測手法、第 9 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、pp.139-144.

田中和広、田中靖治、宮川公雄、馬原保典、安池慎治、本荘静光（1996）：割れ目岩盤における水理地質構造の調査手法の提案と適用、応用地質、第 36 卷第 6 号、pp.18-30.

田中達也、渡辺邦夫、前川恵輔、中村直昭（1994）：地質構造を基礎としたフラクチャーネットワークモデルの開発（その 1）－解析の考え方－、応用地質、第 35 卷第 3 号、pp.22-33.

長久、野口義文、森田誠也、中村直昭、岩崎浩、堀田政國、穂刈利之（1991）：花崗岩における原位置試験（平成 2 年度）、動力炉・核燃料開発事業団委託研究成果報告書、日鉄鉱業株式会社、PNC ZJ1380 91-001.

長久、横井浩一、野口義文、森田誠也、中村直昭、高原弘幸、守屋俊文（1994）：釜石鉱山における深部地質環境特性調査（平成 5 年度）、動力炉・核燃料開発事業団委託研究成果報告書、日鉄鉱業株式会社、PNC ZJ1380 94-001.

動力炉・核燃料開発事業団（1994）：地層処分研究開発の現状（平成 5 年度）、PNC TN1410 94-094.

新見健、野口義文、堀田政國（1992）：花崗岩盤における割れ目内流れに関する基礎的研究、第

24回岩盤力学シンポジウム、pp.21-25.

野口義文、飯島章夫、中村直昭、小池克明、金子勝比古（1990）：岩盤における亀裂の計測とそのモデリング、第8回岩盤力学シンポジウム講演論文集、pp.43-48

野口義文、岩崎浩、小池克明（1991）：深部花崗岩体における亀裂情報のデータベース化とその利用、第23回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp.56-60.

野口義文、中村直昭（1990）：亀裂系岩盤における透水係数のバラつきに関する基礎的研究、資源・素材学会春季大会、pp.319-320.

野沢保、太田良平（1967）：内之浦地域の地質、地域地質研究報告（5万分の1図幅）、地質調査所。

羽田忍（1984）：岩盤分類のための地質要素の見方、応用地質、特別号、pp.176-189.

羽出山吉裕、大津宏康、大矢敏雄、岡本淳（1993）：クラックテンソル理論による地下空洞掘削時の原位置岩盤の透水性評価に関する一考察、第25回岩盤力学シンポジウム講演論文集、pp.313-317.

林信義、田中耕一、北村恵、上山邦彦（1993）：大規模地下空洞の施工実績—地下石油備蓄での例一、電発調査資料 No.92、pp.344-440.

水戸義忠、菊地宏吉、鶴田修、本多眞（1990）：実岩盤の節理流れに関する実験と考察（その2）、第22回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp.176-180.

水戸義忠、菊地宏吉、山本佳正、吉川浩二（1993）：節理性岩盤における3次元浸透流解析システムの提案、第25回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp.496-500

村井勇（1965）：房総半島勝浦付近に発達する節理と断層、地震研究所彙報、Vol.43、pp.829-869.

本島勲、堀義直（1982）：地下発電所周辺における地質と地下水問題、日本応用地質学会、昭和57年度シンポジウム及び研究発表会予稿集、pp.19-24.

米田吉宏、高原弘幸、中村直昭、秋山真介、守屋俊文、根木健之（1997）：釜石鉱山における深部地質環境調査（平成8年度）、動力炉・核燃料開発事業団委託研究成果報告書、日鉄鉱業株式会社、PNC ZJ1380 97-001.

渡辺邦夫、小原勝巳、新城栄一（1982）：岩盤中の割れ目系分布と透水異方性の調査例、日本応用地質学会、昭和57年度シンポジウム及び研究発表会予稿集、pp.57-60.

渡辺邦夫、小島圭二（1980）：断層・割れ目系岩盤中の地下水流れと関与する地質量の計測と評価、日本応用地質シンポジウム予稿、pp.2-16.

渡辺邦夫、佐藤邦明（1978）：岩盤浸透流の基礎的性質、第22回水理講演会論文集、pp.297-302.

渡辺邦夫、田中達也、内田雅大、岩崎浩（1994）：地質構造を基礎としたフラクチャーネットワークモデルの開発（その2）－釜石鉱山KD-90坑道・トレーサー試験の解析－、応用地質、第35巻第4号、pp.2-12.

渡辺邦夫、星野吉昇（1980）：岩盤中に発達する単一開口割れ目の透水係数の算定、埼玉大学工学部地盤水理実験施設年報、Vol.6、pp.60-70.

Abelin, H., Neretnieks, I., Tunbrant, S. and Moreno, L. (1985) : Migration in a single fracture: Experimental results and evaluation, final report, Stripa Project Technical Report 85-03.

Abelin, H., Gidlund, J. and Neretnieks, I. (1982) : Migration in a single fracture, Scientific Basis for Radioactive Waste Management V, W. Lutze (ed.), Elsevier Sci. Pub. Co., pp.529-538.

Amano, K., Semba, T., Ota, K. and Yoshida, H. (1998) : Overview of fracture systems in the Kurihashi granodiorite at the Kamaishi mine, Kamaishi International Workshop proceedings, PNC TN7413 98-023, pp.III-1-1-10.

Barton, N. (1977) : Geotechnical analysis of rock structure and fabric in C.S.A. mine, Cober, New South Wales, Applied Geomechanics Technical Paper, 24, p.125.

Bianchi, L. and D.T. Snow (1968) : Permeability of crystalline rock interpreted from measured orientations and apertures of fractures, Ann. Arid Zone, 8(2), pp.231-245.

Dershowitz, W.S. (1984) : Rock joint systems, Ph.D. Dissertation, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.

Gale, J., MacLeod, R. and LeMessurier, P. (1990) : Site characterization and validation - Measurement of flowrate, solute velocities and aperture variation in natural fractures as a function of normal and shear stress, Stage 3, Stripa Project Report 90-11.

Hakami, E. (1989) : Water flow in single rock joints, SKB Stripa Project Report 89-08.

- Hakami, E. (1995) : Aperture distribution of rock fractures, Ph.D. Dissertation, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.
- Heath, M.J., Montoto, M., Rodriguez Rey, A., Ruiz de Argandoña, V.G. and Menendez, B. (1992) : Rock matrix diffusion as a mechanism of radionuclide retardation: A natural analogue study of El Berrocal granite, Spain, Radiochimica Acta, 58/59, pp.379-384.
- Hudson, J.A. and Priest, S.D. (1979) : Discontinuities and rock mass geometry, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.16, pp.339-362.
- Iwano, M. (1995) : Hydromechanical characteristics of a single rock joint, Ph.D. Dissertation, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.
- Kikuchi, K., Kuroda, H. and Mito, Y. (1987) : Stochastic estimation and modeling of jointed rock masses based on statistical sampling, 6th Int. Congress ISRM, Montreal, Canada, pp.425-428.
- Kitagawa, R. and H. Nishido (1994) : Orientation analysis and formation ages of fractures filled with clay minerals (clay veins) in Hiroshima and Shimane prefectures, southwest Japan, 応用地質、35卷2号、pp.14-22.
- Makurat, A., Barton, N., Vik, G. and Tunbridge, L. (1990) : Site characterization and validation - Coupled stress-flow testing of mineralized joints of 200 mm and 1400 mm length in the laboratory and in situ, Stage 3, Stripa Project Report 90-07.
- Oda, M. (1985) : Permeability tensor for discontinuous rock masses, Geotechnique, Vol.35, No.4, pp.483-495.
- Osnes, J.D., Winberg, A. and Andersson, J. (1988) : Analysis of well test data – Application of probabilistic models to infer hydraulic properties of fractures, Topical Report RSI-0338, RE/SPEC Inc., Rapid City, South Dakota
- Priest, S.D. and Hudson, J.A. (1976) : Discontinuity spacing in rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.13, pp.135-148.
- Priest, S.D. and Hudson, J.A. (1981) : Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys, Int. Journal of Rock Mech. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.13, pp.135-148.

- Pyrak-Nolte, L.J., Myer, L.R., Cook, N.G.W. and Witherspoon, P.A. (1987) : Hydraulic and mechanical properties of natural fractures in low permeability rock, In Herget & Vongpaisal (ed.), The proceedings of the Sixth International Congress on Rock Mechanics, Rotterdam, Balkema, pp.225-233.
- Sawada, A., Uchida, M., Shimo, M., Yamamoto, H., Takahara, H. and Doe, T.W. (1999) : Non-sorbing tracer migration experiments in fractured rock at the Kamaishi mine, Northeast Japan, Engineering Geology, Kanaori, Y. (ed.), (in printing).
- Scholz, C.H. (1990) : *The Mechanics of Earthquakes and Faulting*, Cambridge University Press, (柳谷俊訳：地震と断層の力学、古今書院、p.30).
- SKB (1992) : SKB 91 - Final Disposal of Spent Nuclear Fuel; Importance of the Bedrock for Safety, SKB Technical Report 92-20.
- Snow, D.T. (1968) : Rock fracture spacings, openings and porosities, Proceedings of ASCE 96, pp.73-91.
- Sundaram, P.N., Watkins, D.J. and Ralph, W.E. (1987) : Laboratory investigations of coupled stress-deformation-hydraulic flow in a natural rock fracture, 28th U.S. Symposium on Rock Mechanics, pp.585-592.
- Tchalenko, J.S. (1970) : Similarities between shear zones of different magnitudes, Bull. Geol. Soc. Am., Vol.81, pp.1620-1640.
- Tsang, Y.W. (1992) : Usage of "equivalent apertures" for rock fractures as derived from hydraulic and tracer tests, Water Resources Research, Vol.28, No.5, pp.1451-1455.
- Uchida, M., Doe, T.W., Dershowitz, W.S. and Wallmann, P. (1993) : Simulation of fracture flow to the Kamaishi validation drift, Proc. Of the forth Annual International Conference of High Level Radioactive Waste Management, pp.437-442.
- Uchida, M. and Sawada, A. (1995) : Discrete fracture network modeling of tracer migration experiments at the Kamaishi mine, Materials Research Society, Vol.353, pp.387-394.
- Uchida, M., Doe, T., Dershowitz, W., Thomas, A., Wallmann, P. and Sawada, A. (1994) : Discrete-fracture modelling of the Äspö LPT-2, large-scale pumping and tracer test, SKB International Cooperation Report 94-09.
- Veneziano (1979) : Probabilistic model of joints in fractured rock, Technical Report,

Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge,
MA.

Witherspoon, P.A., Wang, J.S.Y., Iwai, K. and Gale, J.E. (1980) : Validity of cubic law for fluid
flow in a deformable rock fracture, Water Resources Research, Vol.16, No.6,
pp.1016-1024.

Xing, Z. and Guohua, L. (1990) : Estimation of confidence bounds for mean trace length of
discontinuities using scanline surveys, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech.
Abstr., Vol.27, No.3, pp.207-212.

7. 謝辞

本書の作成にあたっては、核燃料サイクル開発機構東濃地科学センター 吉田英一氏、太田久仁雄氏、天野健二氏の御協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。