

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－

(研究報告)

1999年10月

京都大学大学院工学研究科
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・転写する場合は、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

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
(亀裂モデルの信頼性評価手法の開発)
ー先行基礎工学分野に関する平成10年度報告書ー¹⁾
(研究報告)

大津宏康¹⁾、田中誠¹⁾、土山富広¹⁾、陳光齊¹⁾、千青春¹⁾
井尻裕二²⁾、澤田淳²⁾、山田直之²⁾、坂本和彦³⁾、内田雅大²⁾、石黒勝彦²⁾

要旨

サイクル機構では、地層処分研究に係わる天然バリアの性能評価において、我が国の岩盤を亀裂ネットワークによりモデル化するために、我が国の岩盤における亀裂特性について調査研究を進めてきた。しかし、これまでに得られた情報は、釜石鉱山をはじめとした花崗岩が主体で他地域や異岩種に関する情報が少なく、我が国の岩盤における亀裂特性を論ずる上で十分でない。そこで、本研究では、日本全国のトンネルや地下空洞で測定された亀裂データを利用して我が国の岩盤における亀裂特性を明らかにするとともに、亀裂ネットワークモデルの信頼性について検討することを目的とする。

本年度は、日本全国のトンネル、大規模地下空洞、ダム基礎など 10 サイトで観察された亀裂データを収集し、そのうち 3 つのサイトの亀裂データベースを構築して亀裂特性の評価を実施した。その結果、亀裂の方向性に関しては、花崗岩以外の岩種（片麻岩地域）では亀裂に方向性が認められないものの、花崗岩地域では互いに直交する方向に亀裂が卓越することが確認された。また、亀裂のトレース長に関しては、数 m～数 100m のスケールにおいてはトレース長の累積頻度が岩種に拘わらず対数軸上でほぼ一直線上に分布することがわかった。すなわち、第 2 次取りまとめ採用した 2 つの仮定、

- 地下深部の花崗岩においては直交する鉛直 2 組の亀裂群が卓越する。
- 亀裂の大きさは、べき乗分布に従う。

の妥当性を裏付ける結果が得られた。

*1) 京都大学大学院 工学研究科 土木システム工学専攻

*2) サイクル機構 東海事業所 環境保全・研究センター 処分研究部 システム解析グループ

*3) 検査開発（株）

目 次

1.はじめに	1
2.亀裂データ	2
2.1 亀裂データ一覧	2
2.2 亀裂データの概要	4
2.2.1 串木野地下石油備蓄基地	4
2.2.2 伊奈川第二地下発電所	8
2.2.3 神岡鉱山試験坑道	11
3.亀裂特性解析	13
3.1 亀裂データベース作成手順	13
3.2 解析結果	14
3.2.1 串木野地下石油備蓄基地	14
3.2.2 伊奈川第二地下発電所	17
3.2.3 神岡鉱山試験坑道	28
4.まとめと考察	34
参考文献	39

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発に係わる第2次取りまとめにおいては、我が国の岩盤は岩種に拘わらず亀裂が支配的な移行経路になっていることから、全ての岩盤は亀裂性岩盤として保守的に評価できるとし、亀裂ネットワークモデルを用いた核種移行解析により天然バリアの性能評価を実施している。したがって、性能評価の信頼性を高めるためには、岩盤中の支配的な核種移行経路となる亀裂の構造特性を把握することが重要である。サイクル機構では、これまでに亀裂構造に関する既往の文献調査を実施するとともに、釜石鉱山や全国 16ヶ所の露頭や鉱山坑道において亀裂調査を実施し、様々な地域や様々な岩種を対象とした亀裂データを蓄積し、亀裂特性を評価してきた。その結果、以下のような問題点が明らかとなっている。

- 既往の文献のほとんどは花崗岩を対象としており、大規模な亀裂調査を実施した釜石鉱山も花崗岩であることから、亀裂特性の評価も花崗岩が中心となっており、花崗岩と比較して他の岩種に関するデータが十分でない。
- 既往の文献では、文献毎に評価方法が異なり（例えば、亀裂の大きさ分布に対数正規分布や負の指数分布が用いられており統一されていない）、文献から生データが得られないために一定の基準で解釈し直すことができず、総合的に亀裂特性を評価することが難しい。
- 釜石鉱山の坑道や全国 16ヶ所の鉱山坑道および露頭における観察では、坑道や露頭の大きさが小さく観察できる亀裂の大きさにも制約があるだけでなく、1サイトにおけるデータ量も限られている。

そこで、本研究では、これらの問題点を解決するために、これまでに日本全国のトンネルや大規模な地下空洞（地下発電所、地下石油備蓄基地など）で測定された亀裂データを収集・整理し、異なる地域における花崗岩の亀裂特性、ならびに花崗岩以外の岩種における亀裂特性（方向性、大きさ、密度等）を明らかにすることを目的とする。これらのデータを用いる利点は以下のとおりである。

- 1サイトで比較的豊富な亀裂データが得られるため、比較的精度の高い亀裂特性評価ができる。
- 大規模地下空洞では比較的広い観察領域での亀裂データが得られるため、観察スケールの影響が少ない亀裂の大きさの評価ができる。

本年度（平成 10 年度）は、日本全国のトンネルや大規模地下空洞で観察された亀裂データを収集し（2章）、亀裂データベースを構築して亀裂特性の評価を実施した（3章）。

次年度（平成 11 年度）は、本年度に引き続き亀裂データベースの構築と亀裂特性評価を行うとともに、得られた知見より第2次取りまとめで構築した亀裂ネットワークモデルの妥当性について検討を行う。最終年度（平成 12 年度）は、次年度までに得られた亀裂特性に基づいて亀裂ネットワークモデルを構築し、亀裂パラメータが亀裂性岩盤中の水理に及ぼす影響を感度解析的に把握し、構築した亀裂ネットワークモデルの信頼性を評価する予定である。

2. 龜裂データ

2.1 龜裂データ一覧

今年度、収集した亀裂データの一覧を表 2.1-1 に示す。

亀裂データの観察断面の大きさに関しては、地下石油備蓄基地においては、並列に配した大規模な空洞（菊間：H30m×W20.5m×L230～460m×7 本、久慈：H22m×W18m×L540m×10 本、串木野：H22m×W18m×L555m×10 本）内での亀裂分布より約 500m 四方におよぶ広大な領域内の平面方向の亀裂分布が確認されている。地下発電所（伊奈川、奥多々良木、赤石）や神岡鉱山のスーパーカミオカンデでは、数 10m スケールの大規模な空洞内で亀裂が観察されている。また、京都山科の音羽ダムの基礎岩盤では、地表面近傍ながら 100m 規模の比較的大きな水平面で亀裂が観察されている。これらの観察断面の比較を図 2.1-1 に示す。

岩種に関しては、串木野地下石油備蓄基地が安山岩、奥多々良木地下発電所が流紋岩、赤石地下発電所が砂岩・頁岩互層、神岡鉱山試験坑道・スーパーカミオカンデが片麻岩、音羽ダムがチャート・粘板岩、その他のサイトが全て花崗岩である。

今年度は、これらのデータのうち串木野地下石油備蓄基地、伊奈川地下発電所、神岡鉱山試験坑道の 3 つのサイトについて亀裂データベースを作成し、亀裂特性について検討を行った。次節では、これら 3 サイトの亀裂データの概要を述べる。残りのサイトについては、平成 11 年度に実施する。

表 2.1-1 亀裂データ一覧

場所	断面方向	観測規模	データ種類	岩種
菊間地下石油備蓄基地	水平	約 500×500m ^{*1}	走向傾斜、亀裂マップ	花崗岩類
久慈地下石油備蓄基地	水平	約 500×550m ^{*1}	走向傾斜、亀裂マップ	花崗岩
串木野地下石油備蓄基地	水平	約 500×550m ^{*1}	走向傾斜、亀裂マップ	安山岩
伊奈川地下発電所	鉛直	約 25×32m ^{*2}	走向傾斜、亀裂マップ	花崗岩
	水平	約 16×19m		
奥多々良木地下発電所	鉛直	約 ?	走向傾斜、亀裂マップ	流紋岩類
赤石地下発電所	鉛直	約 11×28m ^{*2}	亀裂マップ	砂岩・頁岩互層
	水平	約 12×15m		
神岡鉱山スーパーカミオカンデ	鉛直	φ 40m	走向傾斜、亀裂マップ	片麻岩
神岡鉱山試験坑道	鉛直	約 145×5m	走向傾斜、亀裂マップ	片麻岩他
舞子トンネル	鉛直+水平	約 ?	走向傾斜、端点座標	花崗岩
音羽ダム	水平	約 190×140m	走向傾斜、亀裂マップ	チャート、粘板岩他

*1 ただし、地下備蓄基地はタンク内で観察された亀裂から領域内の亀裂分布を想定したものであり、実際に 500m 四方領域をすべて観測したものではない。

*2 ただし、伊奈川は 5 断面、赤石は 4 断面のうち最大なものを記載してある。

水平断面



菊間・久慈・串木野
地下石油備蓄基地
500m×550m

スーパー・カミオカンデ
 $\phi 40m$

伊奈川地下発電所
16m×19m

赤石地下発電所
12m×15m

鉛直断面

■ 伊奈川地下発電所
25m×32m
32m×16m

— 神岡鉱山試験坑道
5m×145m

■ 赤石地下発電所
11m×28m

図 2.1-1 観察断面の比較

2.2 龜裂データの概要

2.2.1 串木野地下石油備蓄基地

(1) 調査地点概要

構造物の種類	地下石油備蓄基地
所在地	鹿児島県串木野市
岩種	安山岩
データの内容	走向・傾斜、亀裂マップ
断面積	約 468×555m

(2) 地形地質概要

本対象地点は、串木野市の市街地北西方に位置し、北側の荒川川と南側のオコン川に挟まれた東北東-西南西方向に延びる丘陵地帯である（図 2.2-1、図 2.2-2 参照）。この丘陵性山地は、北西から南東に流れるオコン川支沢および北から南に流れる荒川川支沢により二分され、立岩（EL275.4m）を主峰とする北東部山地と、東シナ海に面して平均標高約 200m の南に開く馬蹄形の稜線を持つ南西部山地からなっている。南西部山地の海岸側は、比高 10 数メートルの急斜面が発達し、海岸には岩礁が点在している。また、対象地点の南側に当たるオコン川左岸は、白左工門と称する標高約 240m の丘陵性山地である。

対象地点および周辺の地質は、新第三紀の北薩古期安山岩類および北薩中期火山岩類ならびに第四紀の崖錐堆積層と沖積地堆積層からなり、北西側に北薩古期安山岩類が、南東側には北薩中期安山岩類が分布している。貯油施設対象地域には、古期安山岩類のうち自破碎状安山岩および礫岩が分布している（図 2.2-3 参照）。この地域内に高さ 22m×幅 18m×長さ 555m の空洞が 10 本並列に掘削されている（図 2.2-4 参照）。

領域内で確認された断層の一覧を表 2.2-1 に示す。

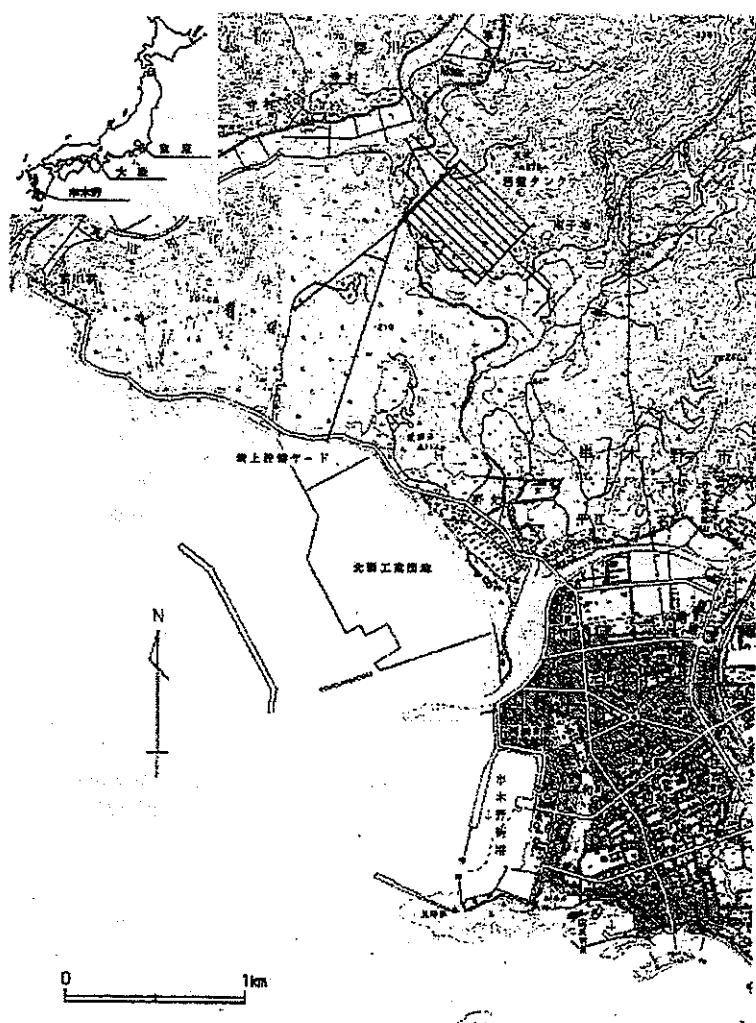


図 2.2-1 串木野基地位置図

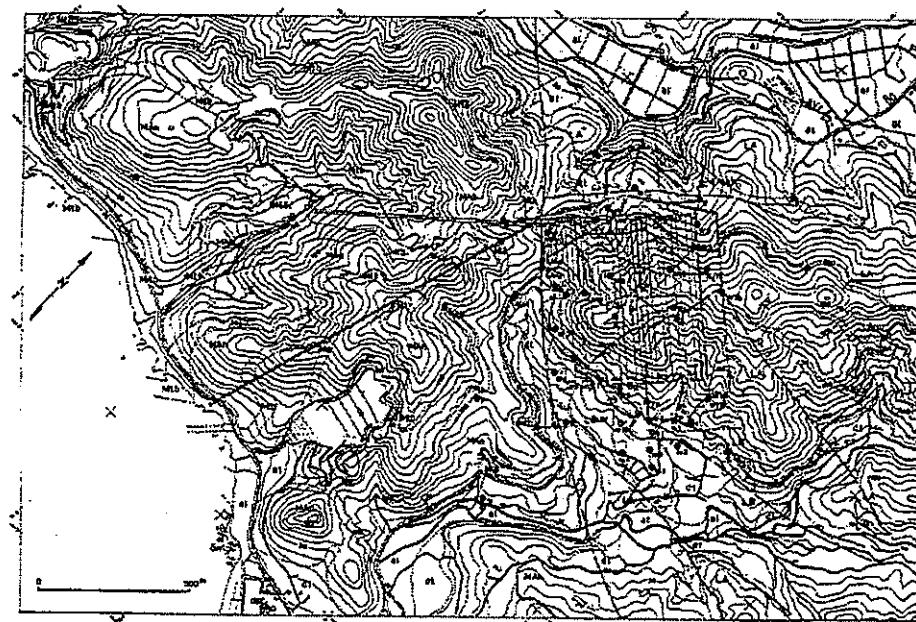


図 2.2-2 串木野基地岩盤タンク位置図

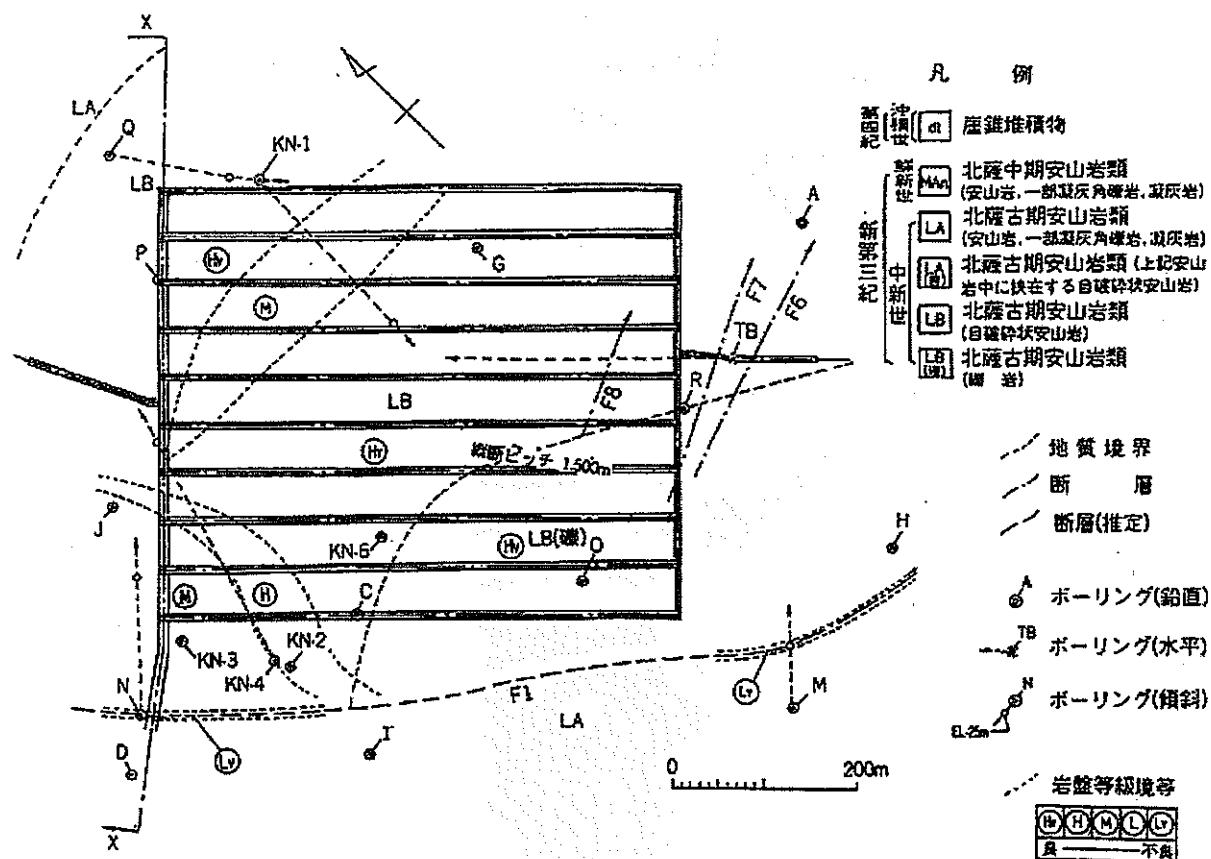


図 2.2-3 串木野基地岩盤タンク部地質平面図 (EL-25m)

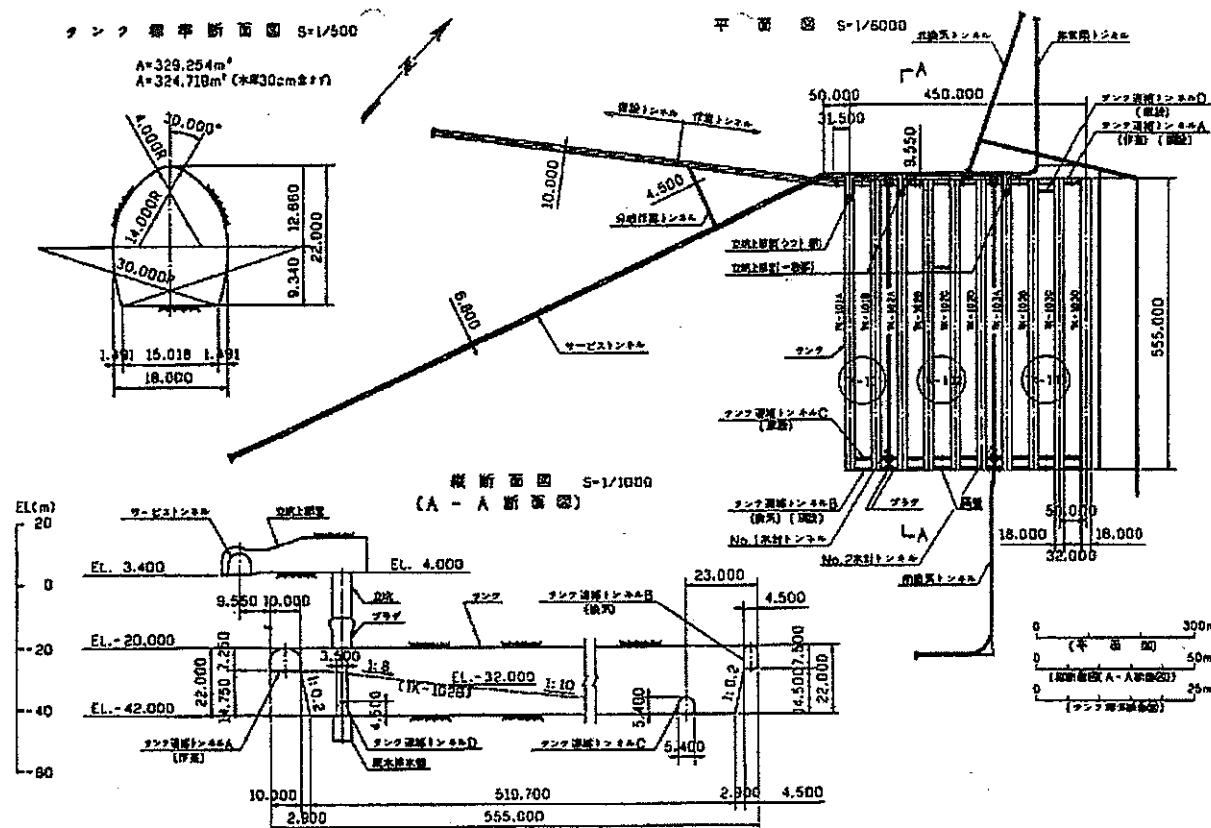


図 2.2-4 串木野基地岩盤タンク平面および断面図

表 2.2-1 主要断層一覧

名称	走向・傾斜	破碎帶幅 (m)	変質帶幅 (m)	性状
F-1	N65E-N65W55S (N90E55S)	4.5~9.0	30.0	粘土状
F-2	N67E80-90S (N67E85S)	0.2~0.25	0.4	粘土(幅 0.05~0.1m)+角礫(幅 0.15m+)
F-3	N30E54S	0.5~1.3	1.0	板状 (幅約 1cm)
F-4	N29E25S	0.1~1.3	0.1	板状 (幅約 1cm)
F-5	N68E-N70W83N-66S (N1W82S)	0.3	0.9	角礫状
F-6	N69E80-85S(N69E83S)	0.6	1.1	角礫状
F-7	記載なし	1.9	0.25	
F-8	N55E-N73E46-53SE (N64E50S)	1.38	0.78	
F-9	N50-75E38-55SE (N63E47S)	2.0~15.0	2.0~20.0	粘土 (幅 0.4~1.0m) を伴う
F-10	N75E-N82W82S-89E (N87E87S)	1.0~5.0	2.0~5.0	粘土 (幅 0.2~0.6m) を 1~2 枚伴う
F-11	N70-83E32-45SE (N77E39S)	0.1~6.0	1.0~5.0	粘土 (幅 0.3~0.8m) + 角礫 (幅最大 5m) + 開口割れ目 (一部)
F-12	N45-69E26-61SE (N57E44S)	2.0~3.0	0.5~2.0	粘土 (幅 0.1~0.3m) + 開口割れ目
F-13	N66E-N84W33N-41SE (N81E37S)	0.1~2.0	0.5~2.5	粘土 (幅 0.1~0.4m) + 角礫
F-14	N65-76E72-83SE (N71E78S)	0.05~1.0	0.03~0.4	一部開口割れ目を伴う

(3) 参考文献

- 日本地下石油備蓄(株)・電源開発(株)・鹿島建設(株)・大成建設(株)・清水建設(株)：地下石油備蓄基地建設関連発表文献集、1994。
- 岡本明夫：地下石油備蓄岩盤タンクの水封評価—久慈・菊間・串木野基地について—、東京大学工学博士論文、1998。
- 中澤保延：地下石油備蓄岩盤タンクで現れた岩盤の挙動と施工管理—地下石油備蓄串木野基地について—、東京大学工学博士論文、1998。
- 宮下国一郎：大断面空洞／迅速施工に対応した岩盤分類・評価手法の研究—地下石油備蓄串木野基地について—、東京大学工学博士論文、1998。
- 大津宏康・大西有三・福井謙三：岩盤地下タンク設計法の現状と将来像、土と基礎第 46 卷第 9 号、pp. 9-12, 1998。
- 岡本明夫・中澤保延・長谷川誠・小島圭二：岩盤の「割れ目」に対応した水封評価法、資源と素材第 114 号、pp. 19-27, 1998。

2.2.2 伊奈川第二地下発電所

(1) 調査地点概要

構造物の種類	地下発電所
所在地	長野県木曽郡大桑村
岩種	花崗岩
データの内容	走向・傾斜、亀裂マップ
断面積	側壁（水圧管路側、放水路側）：約 32×25m 底盤部：約 16×19m 妻壁（アーチ横坑側、主変圧器室側）：約 32×16m

(2) 地形地質概要

伊奈川第二発電所は、駒ヶ岳、空木岳、南駒ヶ岳、越百山と 2,600~3,000m 級の尾根が連なる中央アルプス西側中腹に位置しており、青年期～壮年期の山地地形を呈している。地下発電所は、長野県南西部の木曾川水系伊奈川の上流部国有林地内の既設伊奈川ダムの上流約 1km 地点に位置し、当サイトを流れる今朝沢は、南駒ヶ岳にその源を発し、伊奈川ダムにおいて伊奈川と合流し、蛇行しながらおおむね西流し、木曽川に注ぐ。

この地域の地質は、領家変成帯に属する伊奈川花崗岩である。領家変成帯は、西南日本中軸部を、東は天竜川沿いから西は九州国東半島に延びる延長 700km、最大幅 30km の広い範囲に分布しており、その特徴は、花崗岩が卓越し、断片的に変成岩の分布する低圧高温型の変成帯である。領家変成帯の花崗岩類は、古期と新期に分けられそれぞれ、先濃飛花崗岩、後濃飛花崗岩と呼んでおり、伊奈川花崗岩は後者に属する。発電所周辺の岩石は、一軸圧縮強度 970kgf/cm² 程度である。

また、本地点周辺の断層系は、約 30km 東側の中央構造線と平行な NNE-SSW 方向の断層系（伊那谷断層系）とそれらと約 60° 程度で交差する NW-SE 方向の阿寺断層系が認められている。発電所内には A～D と命名した 4 本の断層破碎帯が出現しており、比較的明瞭な連続性を示した。

- 断層 A は、最も規模が大きく、N59~76E/48~64NW の走向傾斜を有しており、発電所長軸方向に 70~80° で交差する断層である。最大幅は、アーチ部で 2m あまりあり、これに伴う脆弱部は 4m 程度で、厚さ 10~20cm の粘土脈を挟む。これは、掘削盤が下がるに従って細くなっていく。
- 断層 B は、断層 A の北側約 5m のところに位置し、断層 A とほぼ平行するもの (N61~68E/52~65NW) であり、これを挟む上下の岩盤は良好である。
- 断層 C は、N35E/76NW の走向傾斜を有する断層であり、東側壁調査横坑位置から、水圧管路方向に連続するものであるが底盤部では不明瞭になる。これは、走向傾斜やその性状からみて断層 D の派生断層と思われる。
- 断層 D は、東側壁と南壁の交線の 5 リフト付近から出現する断層であり、底盤部で明瞭に観察された。この断層の走向傾斜は、N65E/50~60NW であり、10cm 前後の粘土脈より構成されている。おおむね上下盤の岩盤は堅硬であるが、東側壁側の底盤部付近は風化、脆弱化している。

地下発電所の空洞形状は弾頭型（高さ 31.59m×幅 16.48m×長さ 25.08m）で、施工には吹付けコンクリートとロックボルトによる NATM を採用している。節理分布調査は、次の 3 つの方法で実施されたいるが、データベースには A を採用する。

- A. スケッチによる調査：地質図、岩盤等級図の作成を目的とした調査であり、533 個の走向／傾斜が測定されている。
- B. 写真撮影による調査：各壁、アーチ、底盤を撮影した。
- C. グリッドによる調査：各リフト（1 リフト=3m）ごとに 16 箇所の 1m の格子を考え、その格子に交わる節理を調査した。データ数は 444 個であった。

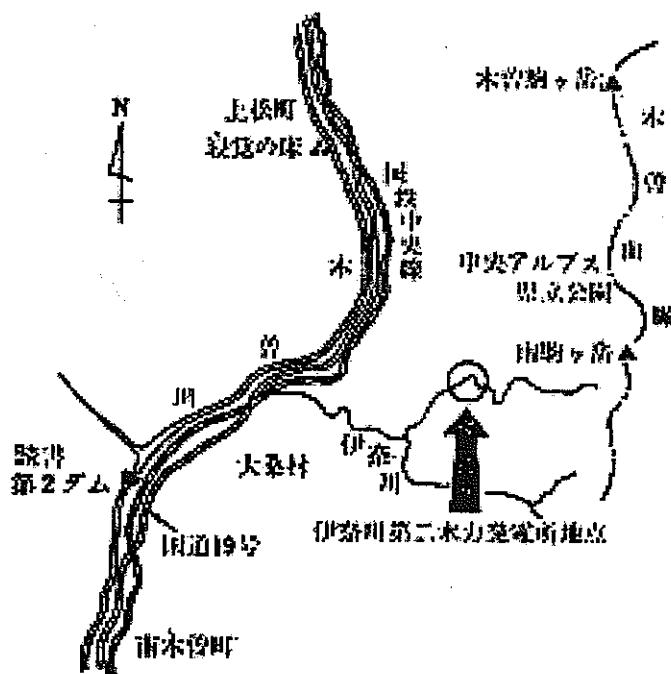
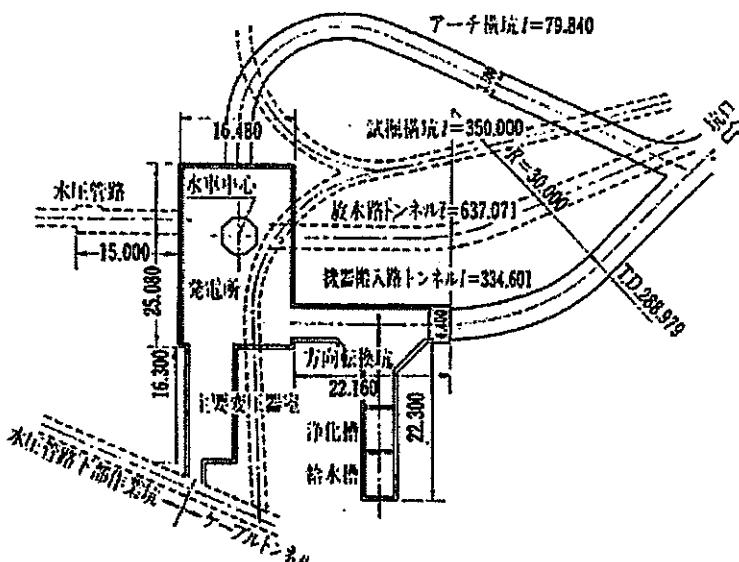
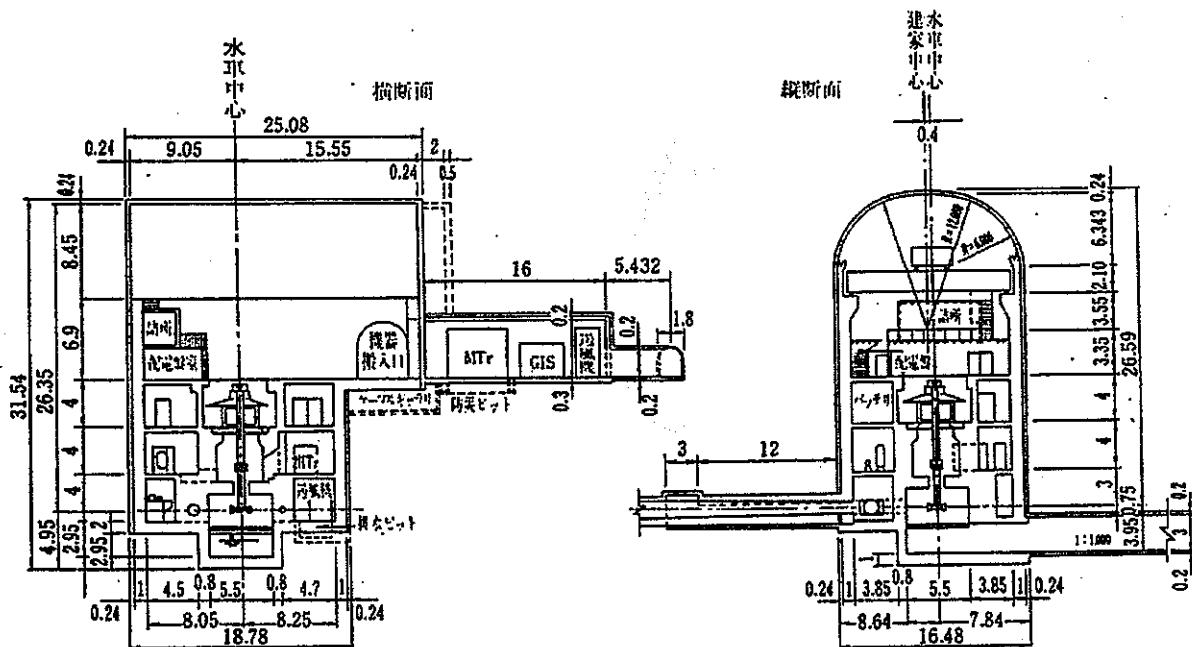


図 2.2-5 伊奈川第二水力発電所位置図



(a) 平面図



(b) 横断図

(c) 縦断図

図 2.2-6 地下発電所平面および断面図

(3) 参考文献

- 1) 草深守人・浜島良吉・川井忠彦：岩盤中に分布する中小規模亀裂面の定量評価手法、土質工学会論文報告集第 27 卷第 4 号、pp. 176-188, 1987.
- 2) 大萩力・近藤茂・片岡幸毅：伊奈川第二水力発電所地下発電所の設計と施工、電力土木第 196 号、pp. 72-84, 1985.
- 3) 土居泰作・山元政憲・越井力・磯野良隆：NATM による地下発電所の施工—関西電力（株）伊奈川第二水力発電所新設工事の例一、間組技術研究所年報、pp. A-129-A-148, 1984.

2.2.3 神岡鉱山試験坑道

(1) 調査地点概要

構造物の種類	坑道
所在地	岐阜県吉城郡神岡町
岩種	伊西岩・片麻岩・石灰岩・空地鉱・アプライト質岩・方解石脈
データの内容	走向・傾斜、亀裂マップ
断面積	約 5×145m

(2) 地形地質概要

神岡鉱山は飛騨帯に属し、飛騨片麻岩類、船津花崗岩類、手取層群が主体を占めている（図 2.2-7 参照）。特に、試験坑道のある柄洞付近は片麻岩類、メタベーサイト、花崗岩類、石英斑岩が分布している。片麻岩類の中には、石灰石や伊西岩（優白質～亜優黒で片麻状構造を呈さない花崗岩質岩）が含まれ、本鉱山のスカルン鉱体と密接な関係にある。メタベーサイトは、閃緑岩質の変成岩を主とする岩帶の総称である。石英斑岩は、片麻岩類の構造を切って分布している。本鉱床は、片麻岩類中の石灰岩を交代したスカルン型鉱床で、主要鉱石鉱物として閃亜鉛鉱、含銀方鉛鉱を産している。鉱石のタイプとしては、放射状の灰鉄輝石を多含する「空地鉱」と方解石、石英を脈石とする「白地鉱」に分類されている。これらの鉱体は、片麻岩内部に認められる複雑な褶曲構造に規制された分布を呈している。

亀裂調査は、神岡鉱山柄洞坑 0m レベルの試験坑道において実施された（1992 年 9～10 月；図 2.2-8 参照）。亀裂調査においては、調査対象の坑壁に設けた底盤から 1.5m 上がりの側線を横切る全亀裂が記録されている。

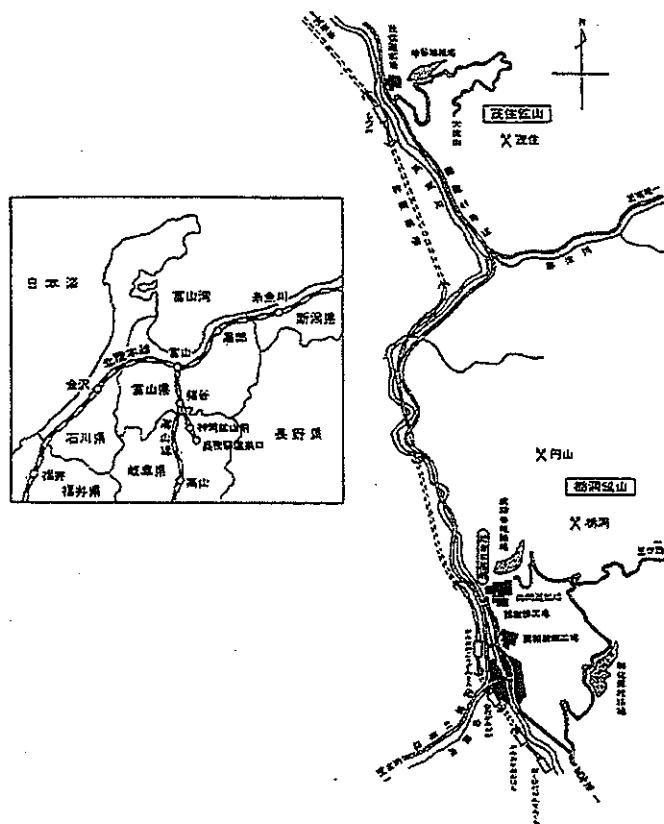


図 2.2-7 神岡鉱山位置図

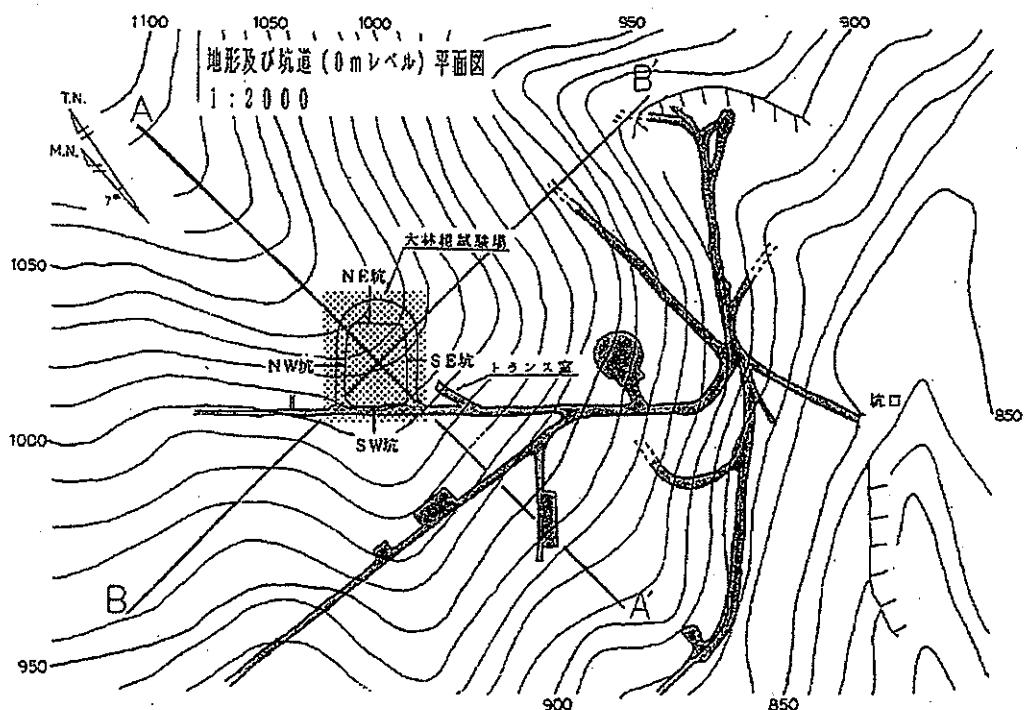


図 2.2-8 試験坑道位置図

(3) 参考文献

- 1) (株)ダイヤコンサルタント：神岡鉱山における研究開発のうち坑道亀裂調査報告書、1992.

3. 亀裂特性解析

3.1 亀裂データベース作成手順

(1) 走向・傾斜

走向・傾斜の記載にある亀裂は、次のトレース長データとともにデータベースに登録し、シミュネットネット下半球投影図として出力する。

(2) トレース長

坑道や空洞壁面で観察された亀裂マップは、以下の手順でデータベースとして登録する。

- 亀裂マップをスキャナーにより読み取る。
- 描画ソフト Adobe Illustrator 上で読み取った亀裂マップを開き、亀裂を折れ線でトレースする。
- トレースした各亀裂の折れ線の座標を Microsoft Excel ファイルに出力し、折れ線の長さを計算する。
- トレース長のヒストグラムを描く。
- トレース長の累積頻度分布を対数軸上に描き、累積頻度分布の傾きを求める。ただし、観察した規模に比べてトレース長が短い場合には十分に観察されていないと考えられることから、累積頻度分布の傾きをフィッティングにより求める際にはトレース長の短い亀裂は削除した。すなわち、観察規模が数 100m 四方の場合（串木野地下石油備蓄基地）はトレース長 10m 以下の亀裂を、観察規模が数 10m 四方の場合（伊奈川地下発電所および神岡試験坑道）はトレース長 1m 以下の亀裂をフィッティングから削除した。

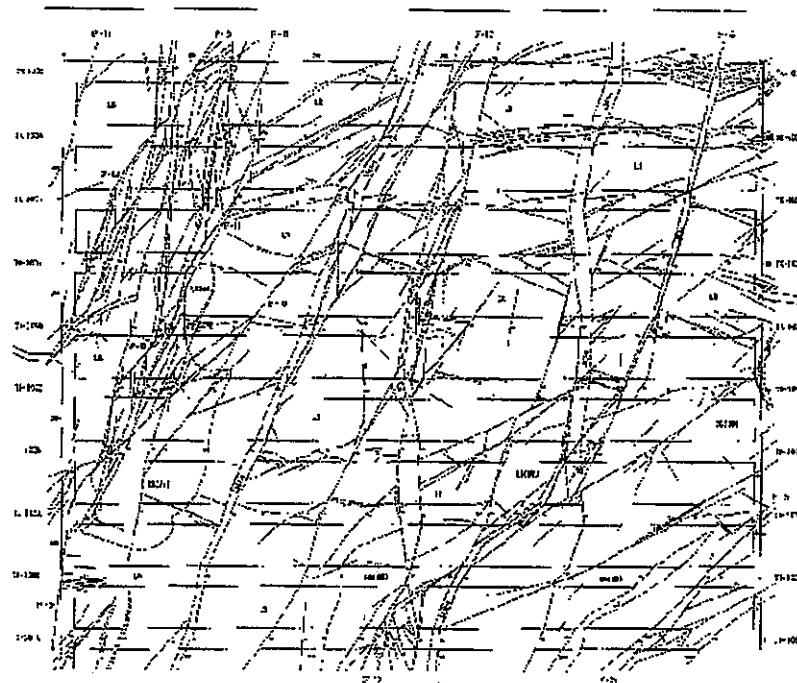
以上により得られた亀裂の方向分布、トレース長ヒストグラム、トレース長累積頻度分布（係数、傾き）から各サイト毎の亀裂特性について検討を行う。

3.2 解析結果

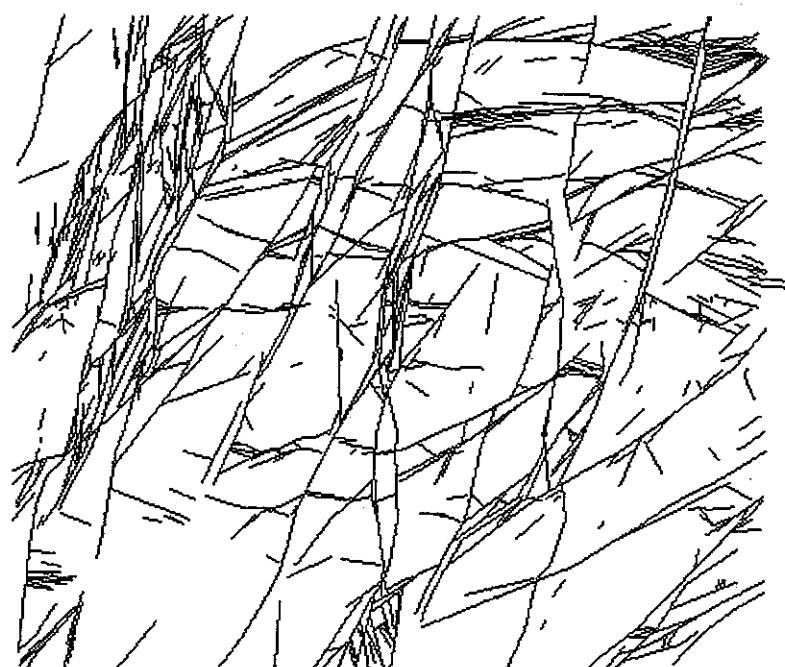
3.2.1 串木野地下石油備蓄基地

(1) 龜裂データの特徴

各空洞内で観察された亀裂分布から推定した領域全体での亀裂マップとそのトレースマップを図3.2-1(a)、(b)に示す。平面内での亀裂の分布が観察できる利点がある反面、複数の空洞にまたがるような大きな亀裂や断層のみを対象としているため、空洞内や空洞間に存在するような小さな亀裂は無視している。



(a) 観察マップ



(b) トレースマップ

図 3.2-1 亀裂マップ

(2) 方向分布

走向・傾斜の記載のある 13 本の断層 (F-1~6、F-8~14) のシュミットネット投影図を図 3.2-2 に示す (表 2.2-1 参照)。比較的規模の大きな 13 本の断層に関しては、ほぼ N60~70E 方向に卓越しているものの、それより規模の小さい亀裂の方向性を論じるデータは存在しない。

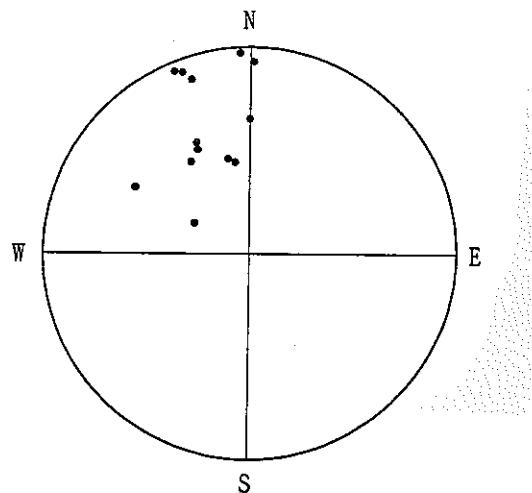


図 3.2-2 断層 (F-1~6、F-8~14) のシュミットネット下半球投影図

(3) トレース長ヒストグラム

トレース長のヒストグラムを図 3.2-3 に示す。図 3.2-1 に示すように領域全体を横切るような断層が見られ、トレース長の最大値は 500m 以上となっている。一方、トレース長の短い亀裂は無視されているため、トレース長の分布は約 20m をピークに 20m 以下の亀裂は少なくなっている。

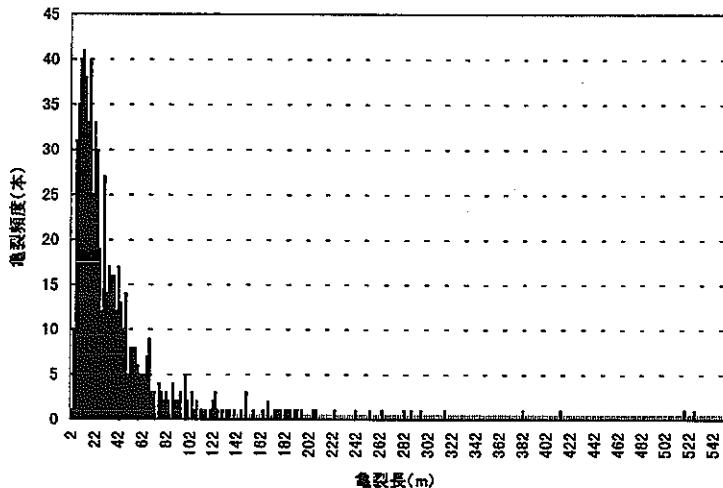


図 3.2-3 亀裂トレース長ヒストグラム

(4) トレース長累積頻度分布

トレース長の累積頻度分布を図 3.2-4 に示す。トレース長が 20m 以下の亀裂頻度が小さくなっているものの、それ以上の長さではほぼべき乗分布に従っている。

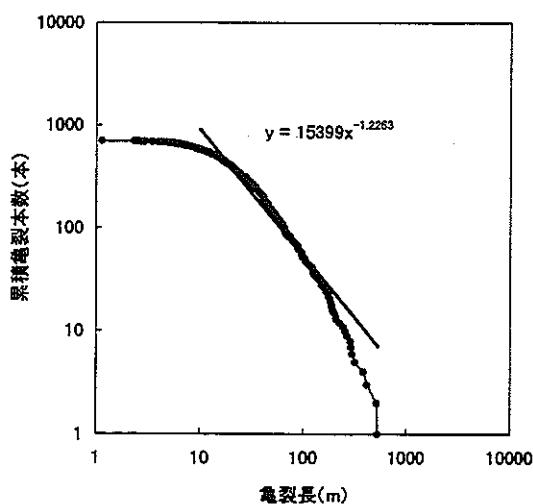


図 3.2-4 亀裂のトレース長累積頻度分布

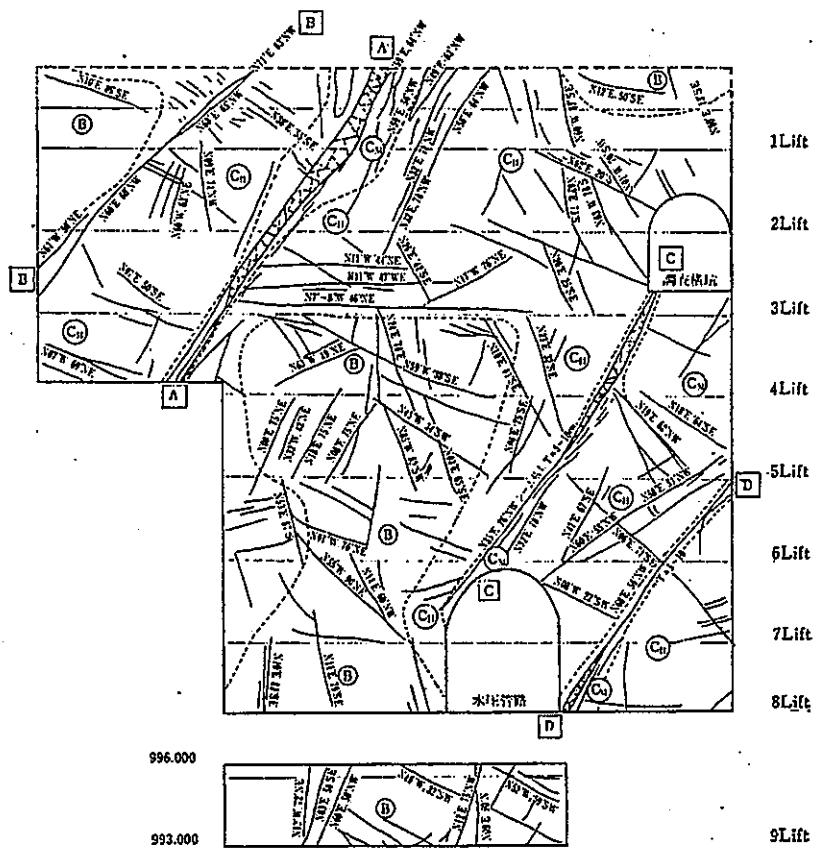
3.2.2 伊奈川第二地下発電所

(1) 亀裂データの特徴

地下発電所の曲面のアーチ部を除く側壁水圧管路側、側壁放水路側、アーチ部、底盤部、妻壁アーチ横坑側、妻壁主変圧器室側の各 6 断面で観察された亀裂マップとトレースマップをそれぞれ図 3.2-5~9 に示す。各断面の大きさは表 3.2-1 に示すように約 20m~30m 四方であり、水平断面は底盤部のみでその他の断面は全て鉛直断面である。

表 3.2-1 断面諸元一覧

	断面方向	断面の大きさ
側壁水圧管路側	鉛直（南北）	H31.54m×W25.08m
側壁放水路側	鉛直（南北）	H31.54m×W25.08m
底盤部	水平	W16.48m×L18.78m
妻壁アーチ横坑側	鉛直（東西）	H32.29m×W16.48m
妻壁主変圧器室側	鉛直（東西）	H32.29m×W16.48m

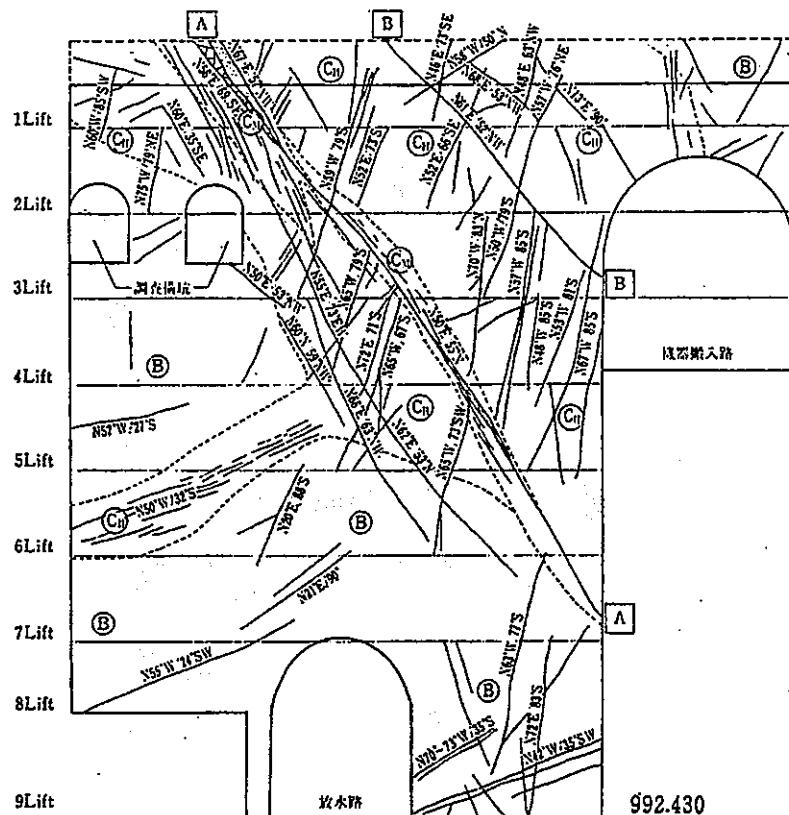


(a) 観察マップ

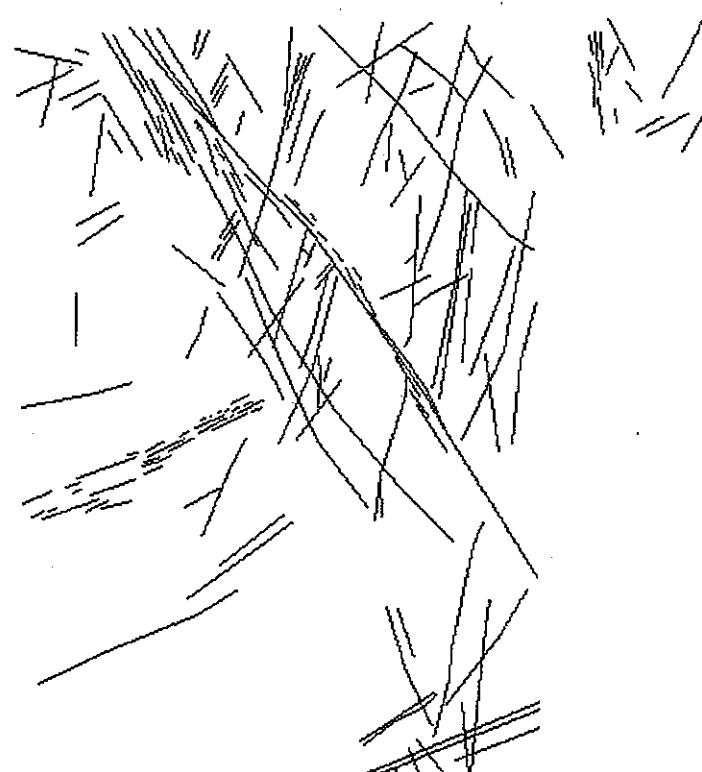


(b) トレースマップ

図 3.2-5 亀裂マップ（側壁水圧管路側）

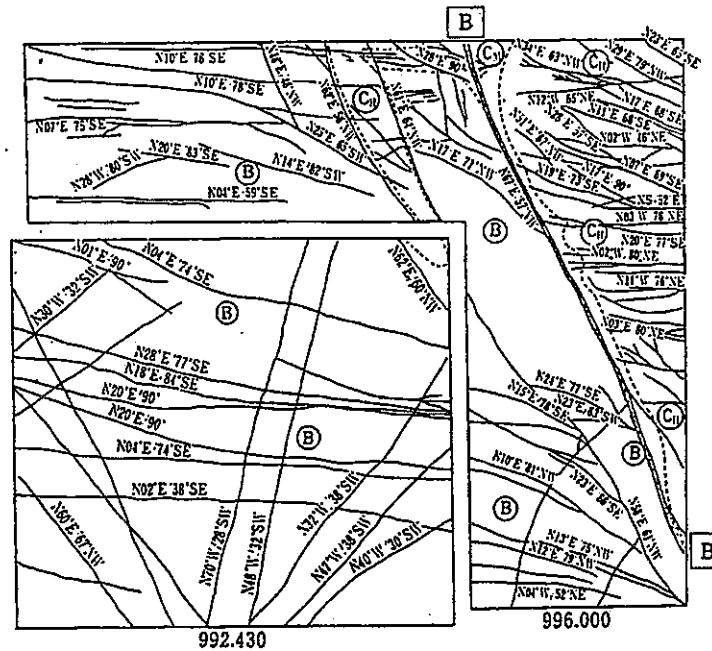


(a) 観察マップ

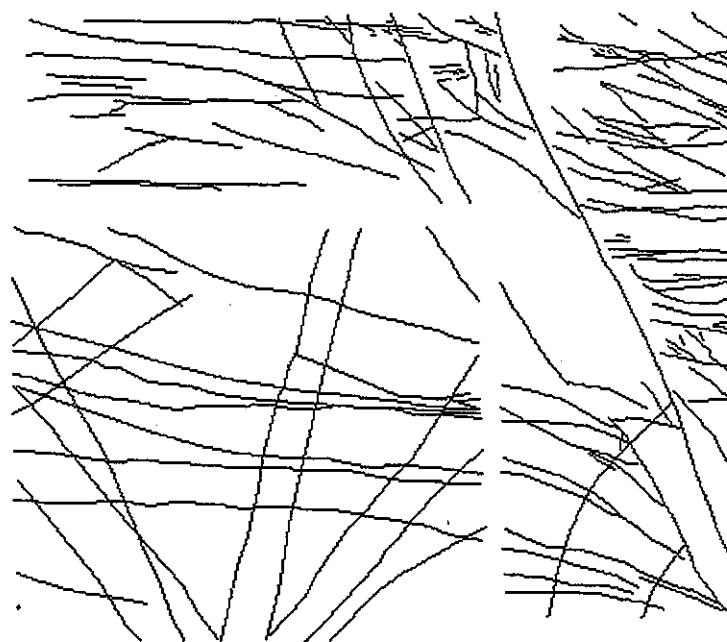


(b) トレースマップ

図 3.2-6 亀裂マップ（側壁放水路側）



(a) 観察マップ



(b) トレースマップ

図 3.2-7 亀裂マップ（底盤部）

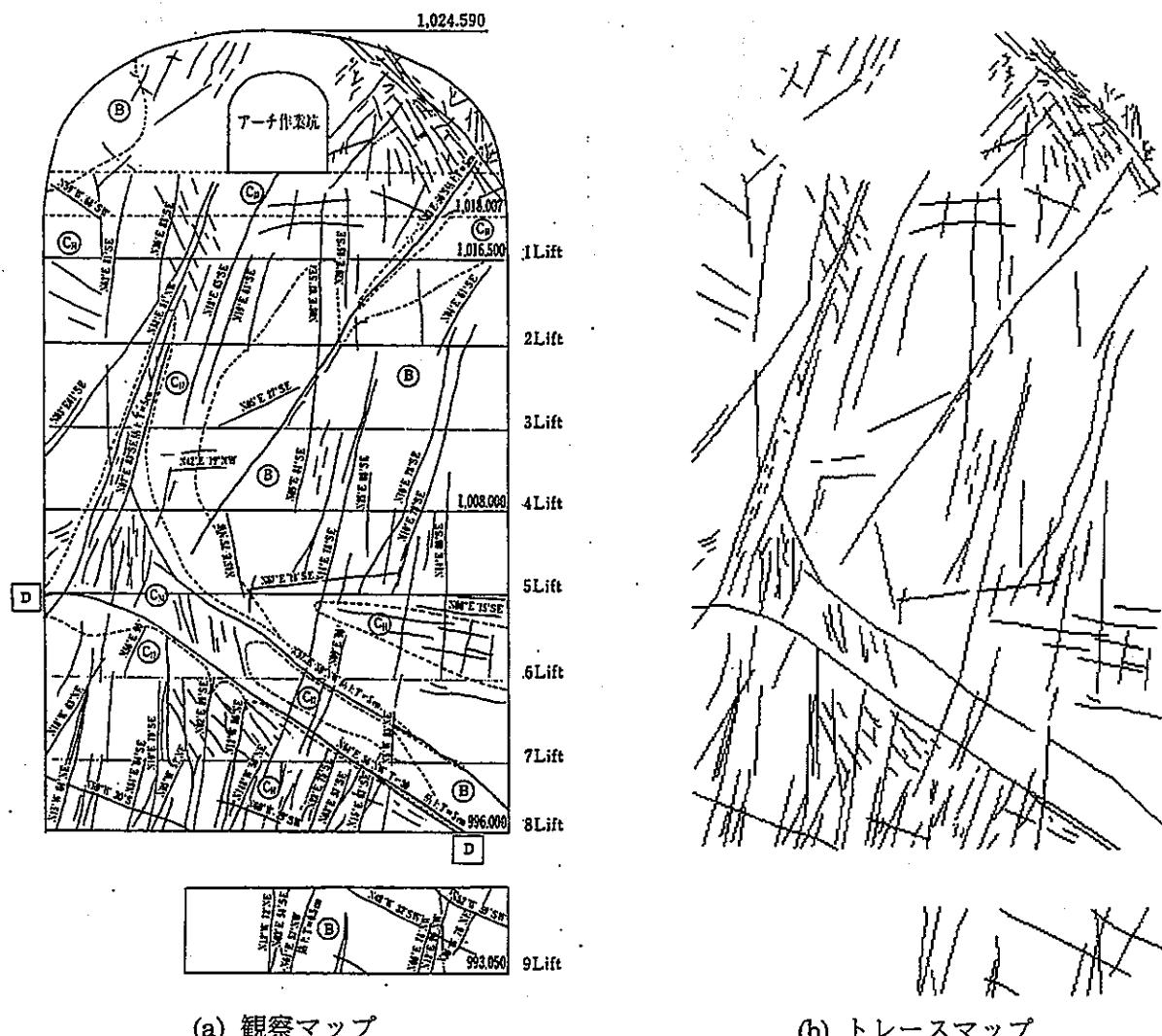
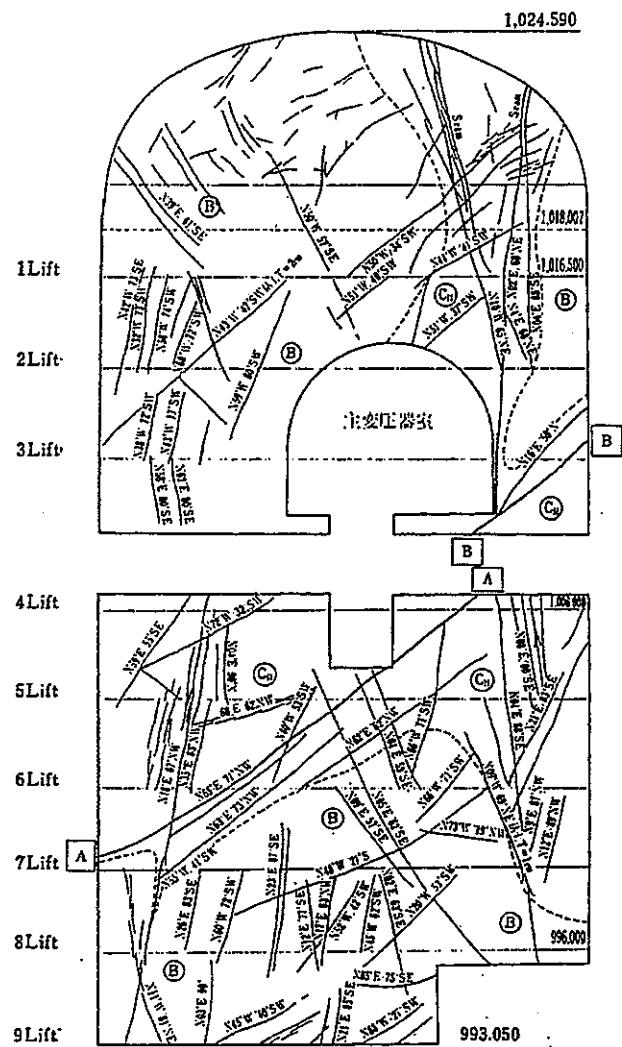


図 3.2-8 龜裂マップ (妻壁アーチ横坑側)



(a) 観察マップ



(b) トレースマップ

図 3.2-9 亀裂マップ（妻壁主変圧器室側）

(2) 方向分布

亀裂のシュミットネット投影図を図 3.2-10 に示す。水平断面である底盤部においては、N0~30E 方向の亀裂が卓越している。互いに直交する鉛直断面である側壁（南北方向）と妻壁（東西方向）における亀裂の方向性に顕著な違いは見られない。全断面の亀裂（図 3.2-10(f)）について亀裂セットを分類した結果、図 3.2-11 に示すように、2つの亀裂群に分類することができ、それらの主方向はそれぞれ(a)N20E80S、(b)N50W60S であり、ほぼ直交方向に亀裂が卓越する傾向が伺える。

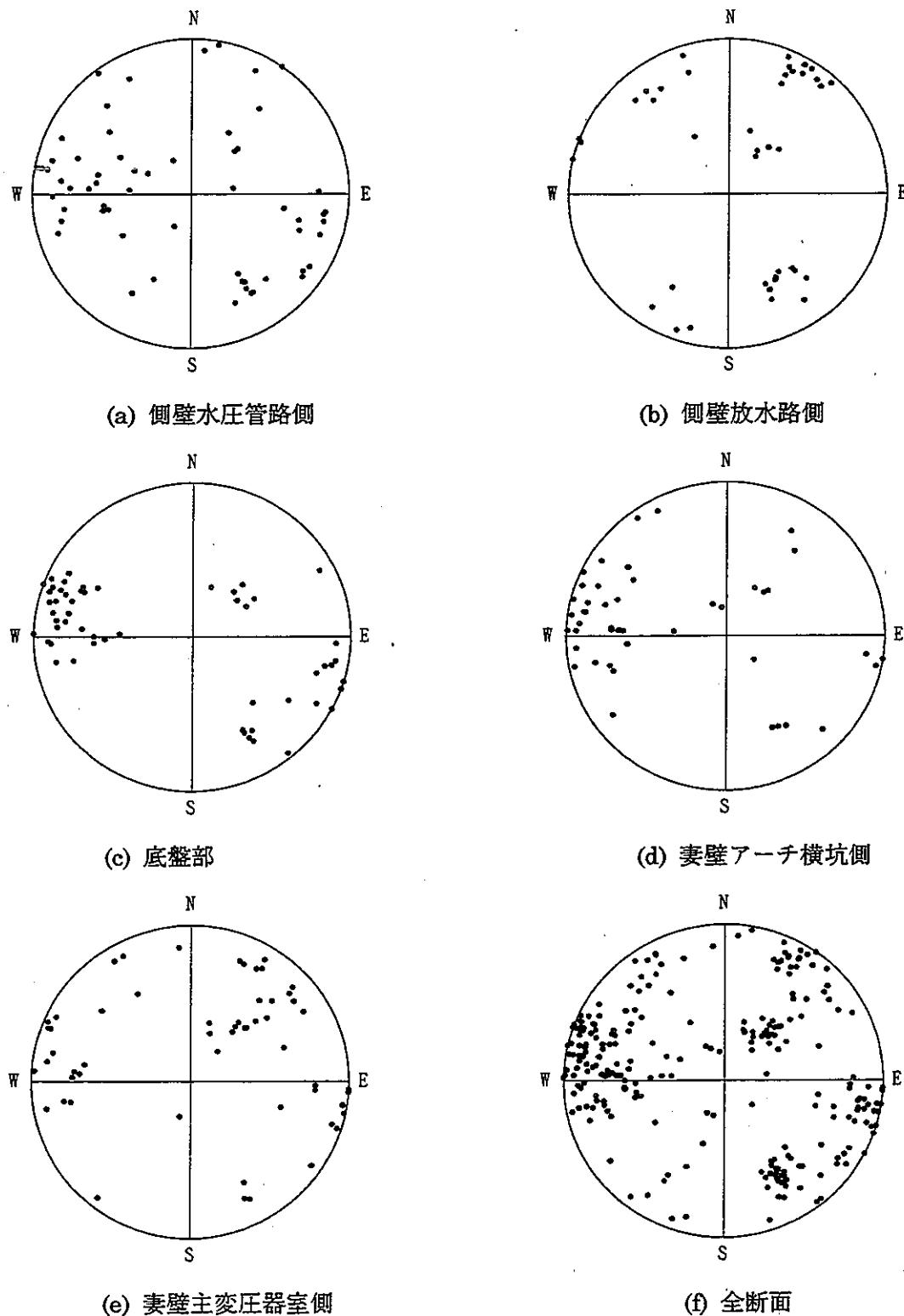


図 3.2-10 亀裂シュミットネット下半球投影図

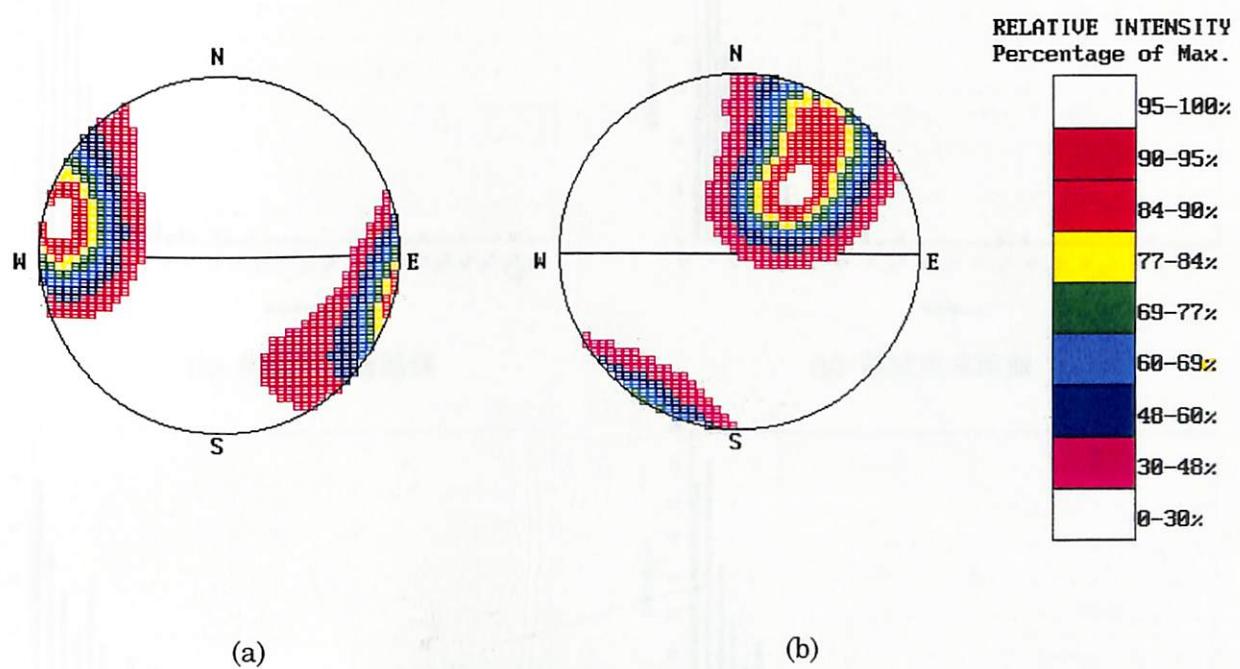


図 3.2-11 伊奈川全断面の亀裂セット分類

(3) トレース長ヒストグラム

亀裂のトレース長ヒストグラムを図 3.2-12 に示す。いずれの断面においてもほぼ同じような傾向を示し、全体的にはトレース長の最大値は約 26m で 1m 前後にピーカーが見られる。

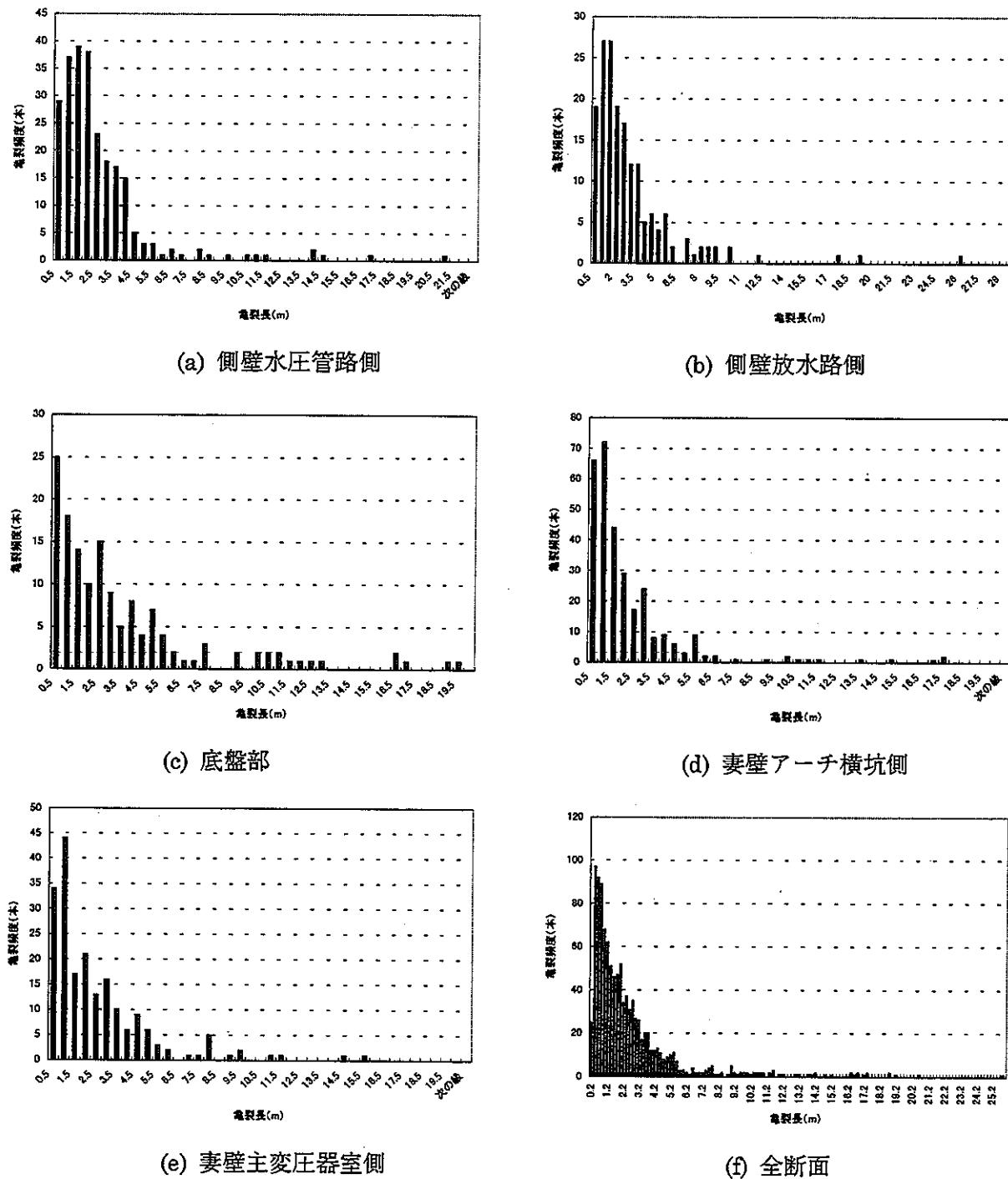


図 3.2-12 亀裂トレース長ヒストグラム

(4) トレース長累積頻度分布

亀裂のトレース長累積頻度分布を図 3.2-13 に示し、トレース長 1m 以上の累積頻度分布をフィッティングして求めた直線の係数と傾きの一覧を表 3.2-2 に示す。直線の係数は、亀裂密度に依存し、表中には各断面の断面積と係数を断面積で除した値も併せて示している。

トレース長に関しては、図 3.2-13 に示すように各断面とも同じような分布傾向を示すものの、トレース長 1m 以下の亀裂頻度が小さくなっているとともに、断面の短手方向が 16~25m 程度であることからトレース長が 20m 以上の亀裂頻度の精度は低いと考えられ、坑道によってばらつきが見られ直線性が得られていない。累積分布の傾きは、表 3.2-2 に示すように各坑道で -1.20~-1.51 に分布し、全体では -1.44 と求められている。

亀裂の密度に関しては、表 3.2-2 に示すようにフィッティング直線の係数を各坑道の断面積で除した値が 0.23~0.56 に分布しているものの、顕著な差は見られない。

表 3.2-2 累積頻度分布一覧

坑道	係数	断面積	係数/断面積	傾き
側壁水圧管路側	258.5	約 790m ² (31.54×25.08m)	0.33	-1.51
側壁放水路側	184.9	約 790m ² (31.54×25.08m)	0.23	-1.35
底盤部	172.4	約 310m ² (16.48×18.78m)	0.56	-1.20
妻壁アーチ横坑側	228.9	約 530m ² (32.29×16.48m)	0.43	-1.44
妻壁主変圧器室側	210.6	約 530m ² (32.29×16.48m)	0.40	-1.48
全断面	1064.9	約 2950m ²	0.36	-1.44

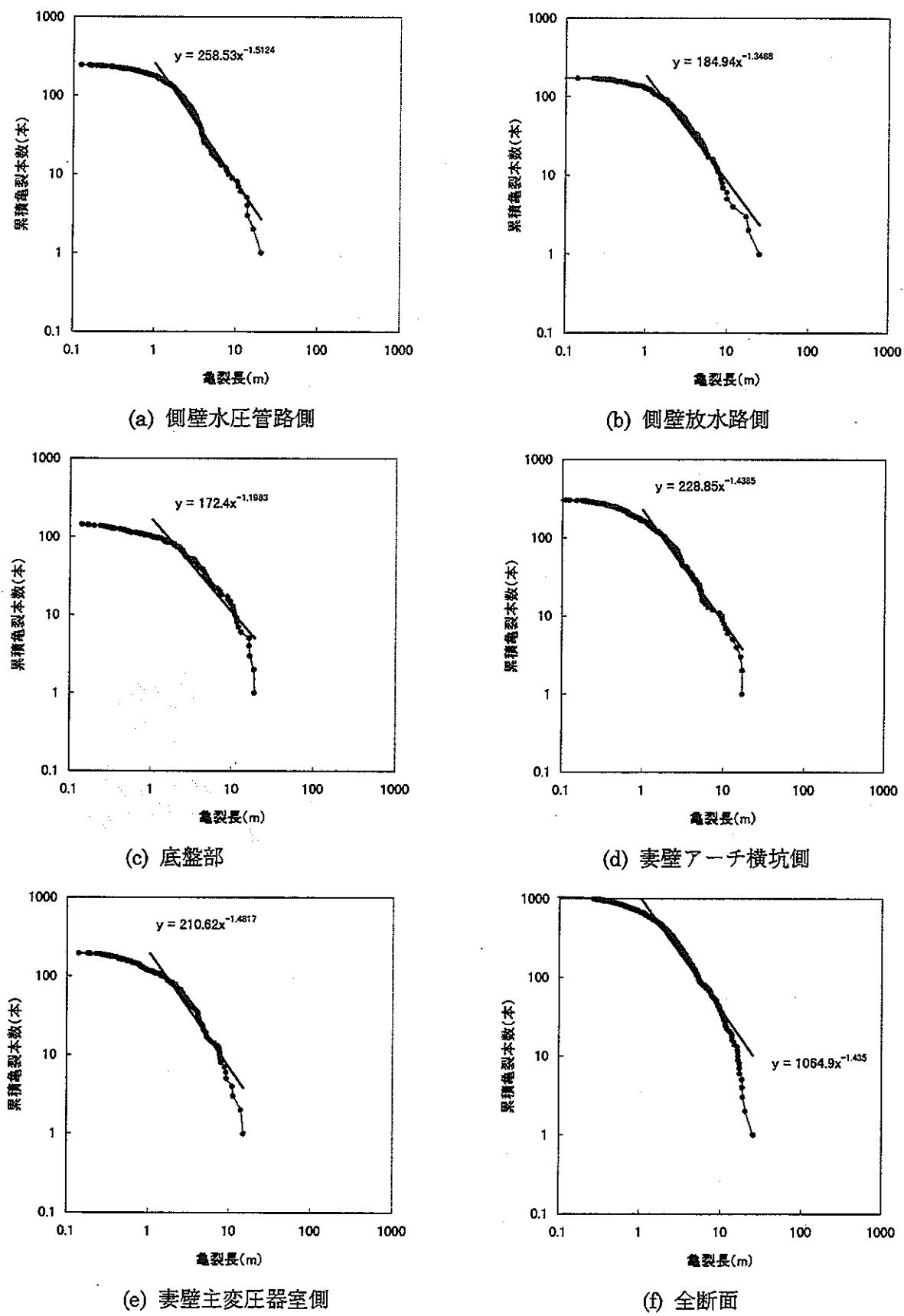


図 3.2-13 亀裂トレース長累積頻度分布

3.2.3 神岡鉱山試験坑道

(1) 亀裂データの特徴

矩形上に掘削された NE 坑道、NW 坑道、SE 坑道、SW 坑道の各断面で観察された亀裂マップとトレースマップをそれぞれ図 3.2-14~17 に示す。各断面の大きさは表 3.2-3 に示すように高さは約 5m、長さは 25~40m である。

表 3.2-3 断面諸元一覧

	断面方向	断面の大きさ
NE 坑道	北西-南東	約 H5.0m×L25.0m
NW 坑道	北東-南西	約 H5.0m×L40.0m
SE 坑道	北東-南西	約 H5.0m×L40.0m
SW 坑道	北西-南東	約 H5.0m×L30.0m

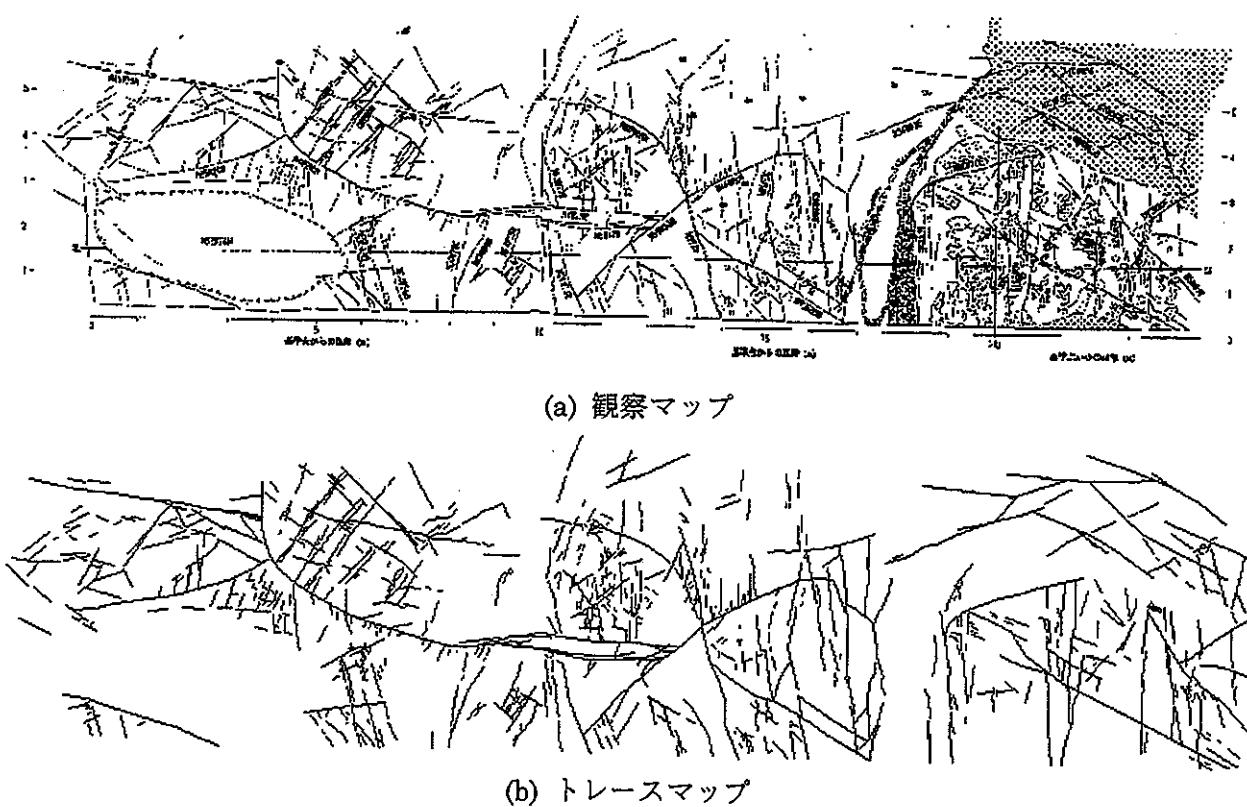
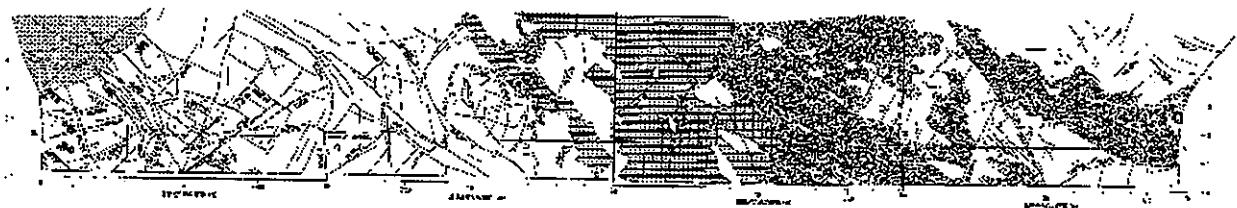


図 3.2-14 亀裂マップ (NE 坑道)



(a) 観察マップ



(b) トレースマップ

図 3.2-15 龜裂マップ (NW 坑道)



(a) 観察マップ



(b) トレースマップ

図 3.2-16 龜裂マップ (SE 坑道)



(a) 観察マップ



(b) トレースマップ

図 3.2-17 龜裂マップ (SW 坑道)

(2) 方向分布

亀裂のシュミットネット投影図を図 3.2-18 に示す。互いに直交する NE/SW 坑道と NW/SE 坑道における亀裂の方向性に顕著な違いは見られず、全体的にも顕著な方向性は見られない。

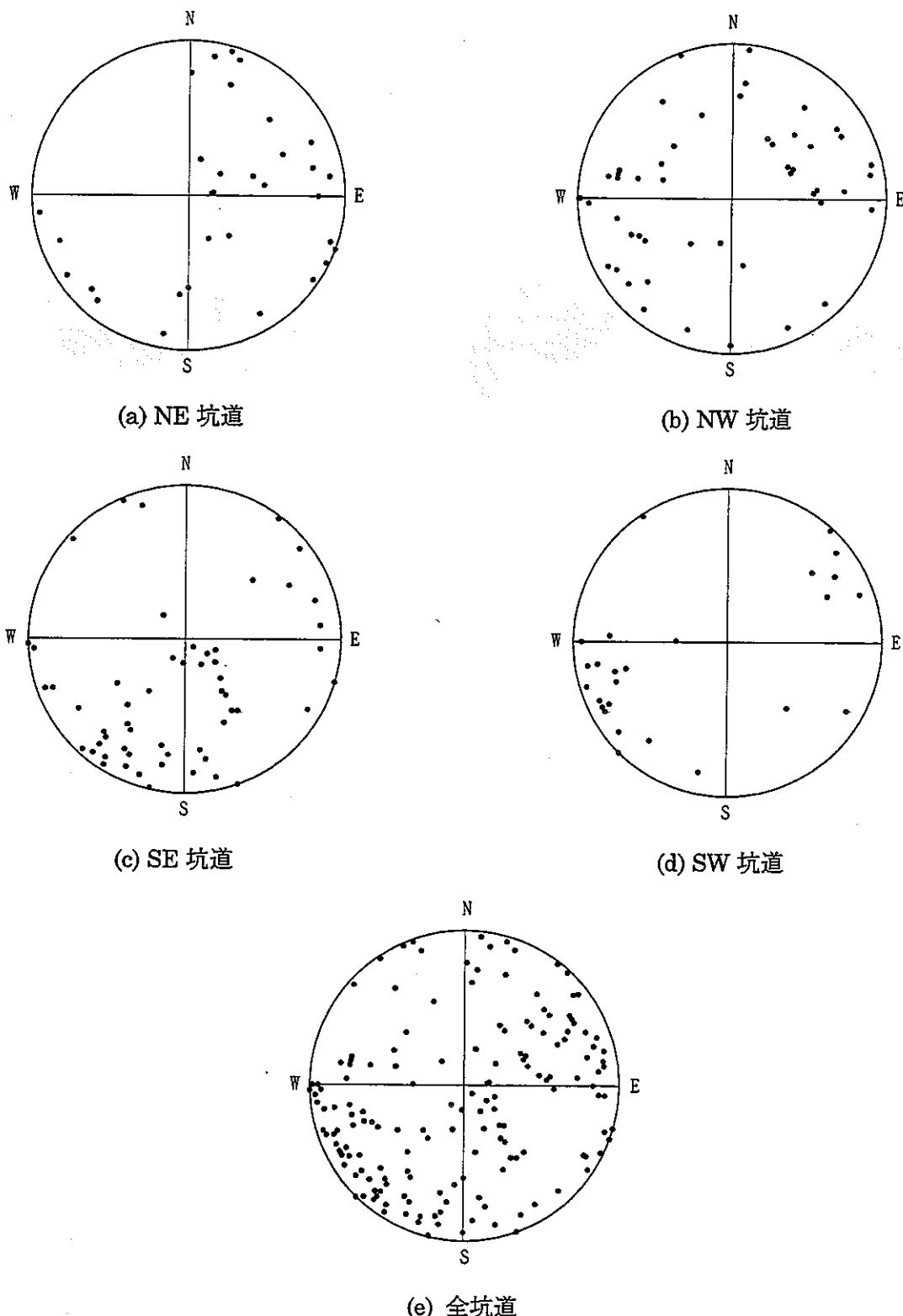
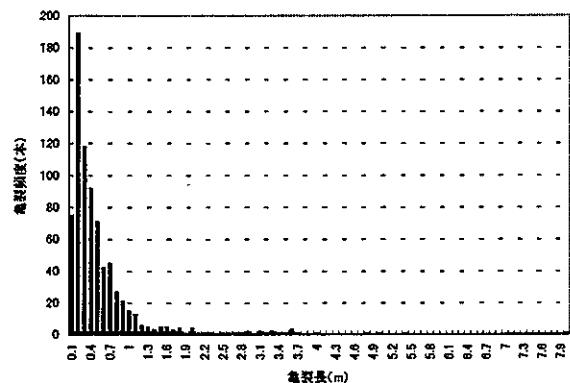


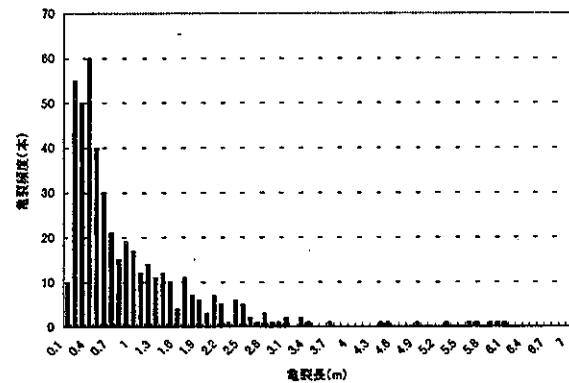
図 3.2-18 亀裂シュミットネット下半球投影図

(3) トレース長ヒストグラム

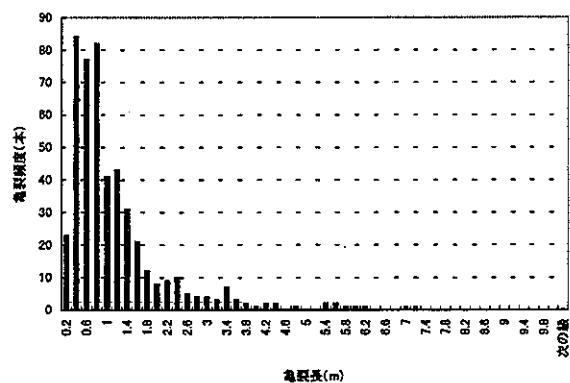
亀裂のトレース長ヒストグラムを図 3.2-19 に示す。いずれの断面においてもほぼ同じような傾向を示し、全体的にはトレース長の最大値は約 14m で約 0.2m にピークが見られる。



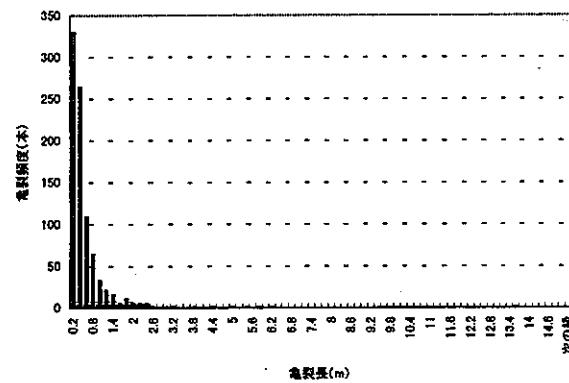
(a) NE 坑道



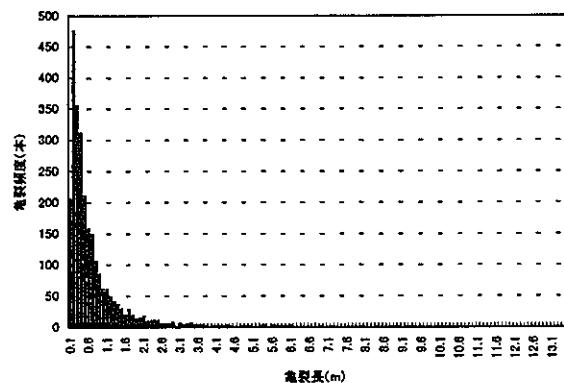
(b) NW 坑道



(c) SE 坑道



(d) SW 坑道



(e) 全坑道

図 3.2-19 亀裂トレース長ヒストグラム

(4) トレース長累積頻度分布

亀裂のトレース長累積頻度分布を図 3.2-20 に示し、トレース長 1m 以上の累積頻度分布をフィッティングして求めた直線の係数と傾きの一覧を表 3.2-4 に示す。直線の係数は、亀裂密度に依存し、表中には各断面の断面積と係数を断面積で除した値も併せて示している。

トレース長に関しては、図 3.2-20 に示すように各坑道とも同じような分布傾向を示すものの、トレース長 1m 以下の亀裂頻度が小さくなっているとともに、坑道の高さが約 5m であることからトレース長が 5m 以上の亀裂頻度の精度は低いと考えられ、坑道によってばらつきが見られ直線性が得られていない。累積分布の傾きは、表 3.2-4 に示すように各坑道で-1.8~-2.17 に分布し、全体では-2.04 と求められている。

亀裂の密度に関しては、表 3.2-4 に示すようにフィッティング直線の係数を各坑道の断面積で除した値が 0.58~1.00 に分布しているものの、顕著な差は見られない。

表 3.2-4 累積頻度分布一覧

坑道	係数	坑道断面積	係数/断面積	傾き
NE 坑道	82.6	約 125m ² (約 5×25m)	0.66	-1.80
NW 坑道	177.3	約 200 m ² (約 5×40m)	0.89	-2.17
SE 坑道	200.9	約 200 m ² (約 5×40m)	1.00	-1.93
SW 坑道	86.8	約 150 m ² (約 5×30m)	0.58	-1.86
全坑道	559.5	約 675 m ² (約 5×135m)	0.83	-2.04

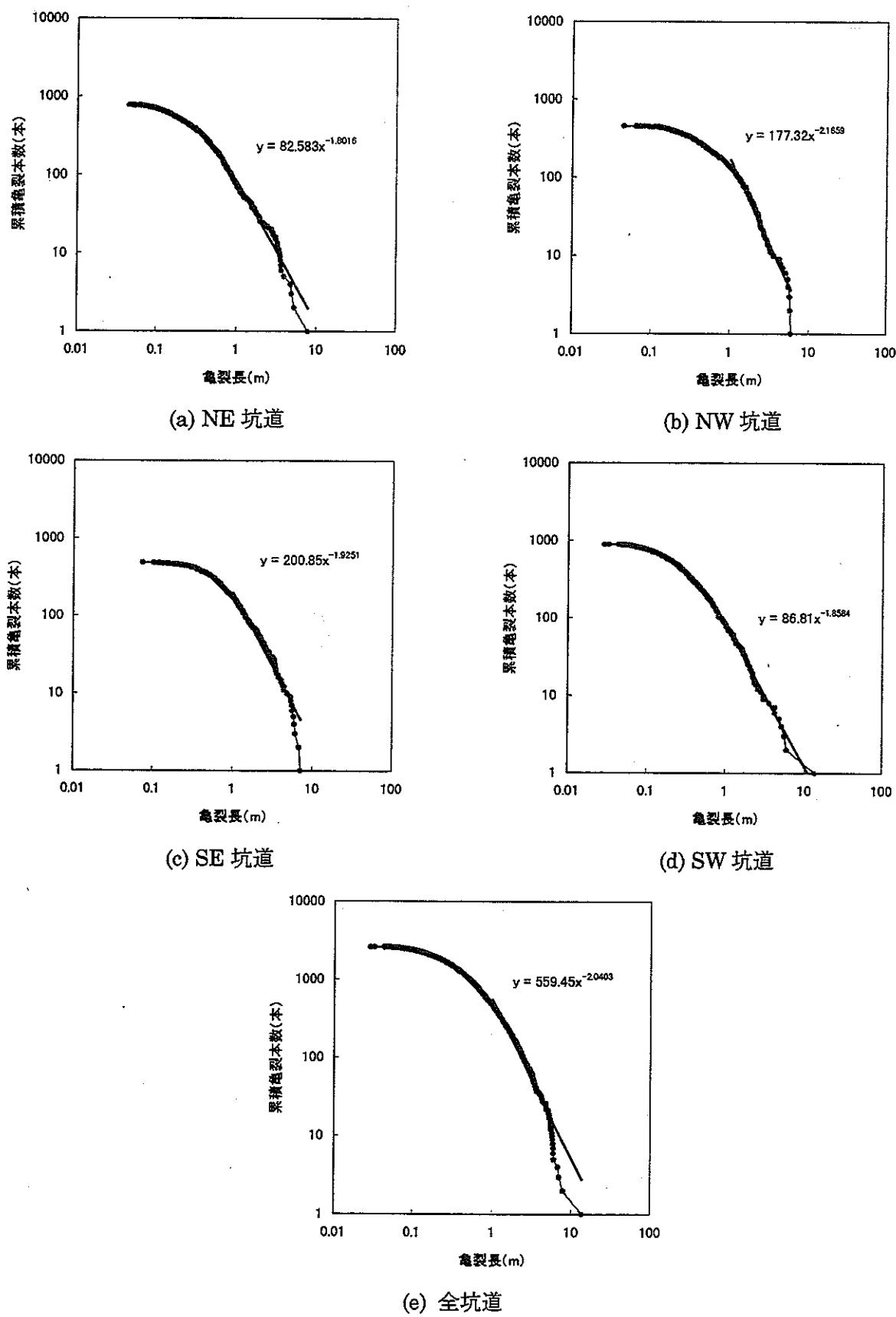


図 3.2-20 亀裂トレース長累積頻度分布

4.まとめと考察

4.1 亀裂の方向分布

前章で述べたように、串木野地下石油備蓄基地（安山岩）では走向傾斜に関するデータが十分でないために特徴を捉えることができなかった。伊奈川地下発電所（花崗岩）では、ばらつきも大きいものの、互いに直交する方向に亀裂が卓越している。神岡試験坑道（片麻岩）では、亀裂の方向性に顕著な傾向は認められなかった。

以上より、伊奈川地下発電所においても花崗岩では互いに直交する方向に亀裂が卓越する傾向が認められ、第2次取りまとめ採用した仮定（「地下深部の花崗岩では直交する2組の鉛直亀裂群が卓越する」）の妥当性が確認された。花崗岩以外の岩種に関しては、十分な情報が得られなかつたものの、片麻岩には亀裂の方向性はないと考えられる。

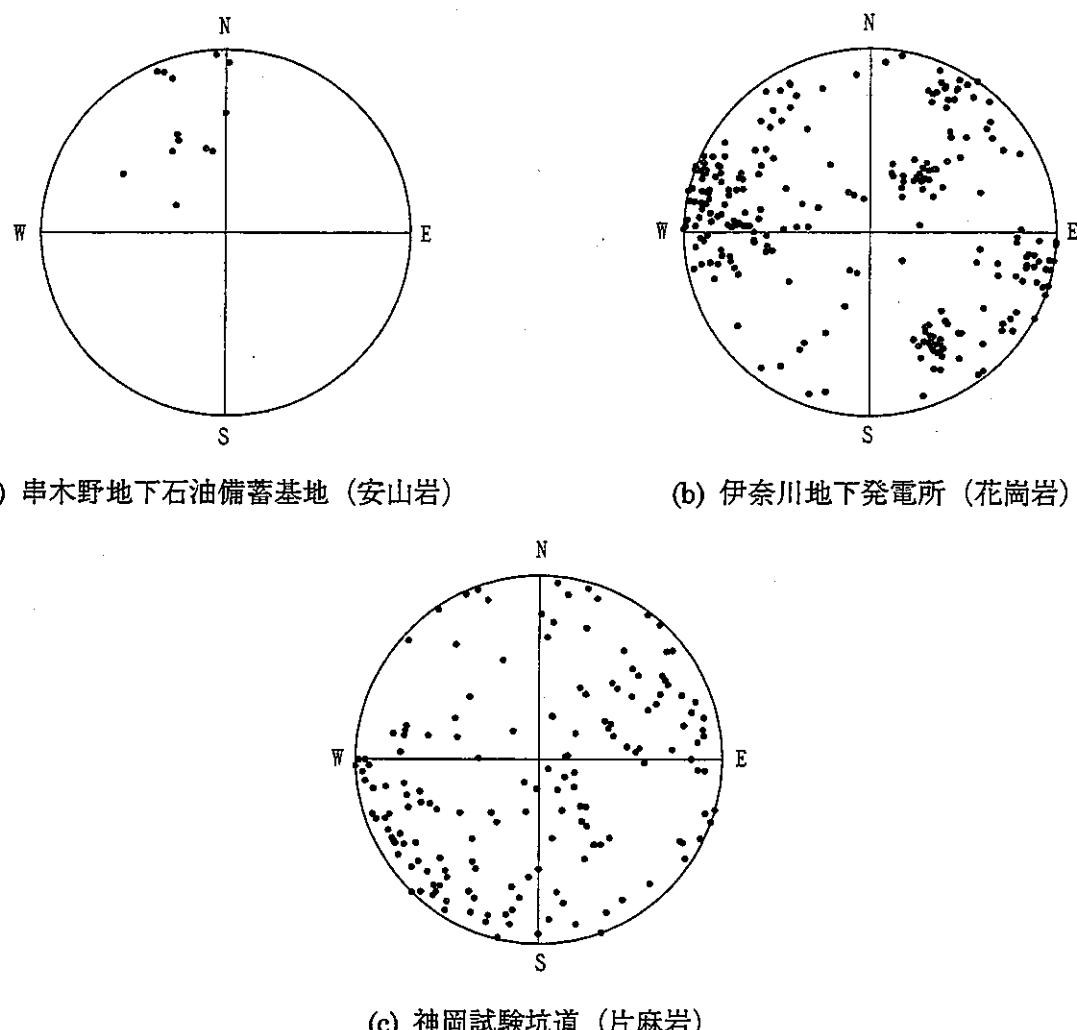


図 4.1-1 亀裂シュミットネット下半球投影図（再掲）

4.2 龜裂のトレース長分布

3 サイトにおけるトレース長のヒストグラムを図 4.2-1 に、トレース長の累積頻度分布を図 4.2-2 に示す。表 4.2-1 に示すように、3 サイトとも亀裂を観察しているスケールが異なるために観察されたトレース長の大きさも異なっている。また、累積頻度分布から求められた傾きも異なっている。

そこで、観察規模の異なる各サイトで得られた累積頻度を 10^4 km^2 あたりの累積頻度に換算（観察規模で正規化）し直し、同じグラフにプロットしたのが図 4.2-3 である。ここで、前述したように、観察断面の規模に比べて短いトレース長は、十分に観察されていないと考えられることから、短いトレース長の頻度は過小に評価されていると考えられる。また、観察断面の最小辺長さよりも長いトレース長の頻度も正確に評価できることから、過小に評価されていると考えられる。そこで、各サイト毎に比較的信頼性の高い部分（図 4.2-3 の区間表示部分）のみ注目すると、3 つのサイトの累積亀裂頻度は岩種に拘わらずほぼ同じ直線上に並び、しかもその直線は大野・小島（1993a,b）の花崗岩地域（Gr.H）の直線（図 4.2-4 参照）にはほぼ等しいことがわかる。

以上より、亀裂や断層のトレース長の分布は、岩種に拘わらず大野・小島（1993）の観察結果とほぼ同様の結果が得られ、第 2 次取りまとめ採用した仮定（「亀裂の大きさはべき乗分布に従う」）の妥当性が確認された。

なお、大野・小島（1993a,b）の直線（図 4.2-4 参照）は、以下の数式で求められる。

$$\log N = C - Dl \cdot \log l \quad (1)$$

ここで l : 割れ目のトレース長さ

N : 長さ l 以上の割れ目の本数（超過本数）

C : フラクタル分布の切片（ C 値）

Dl : 長さのフラクタル次元

$$N = N' \left(\frac{\eta_u}{\eta_s} \right)^{D_g} \quad (2)$$

ここで全体集合($\eta_u \times \eta_u$ 領域) のトレース長さの分布 N

部分集合($\eta_s \times \eta_s$ 領域) のトレース長さの分布 N'

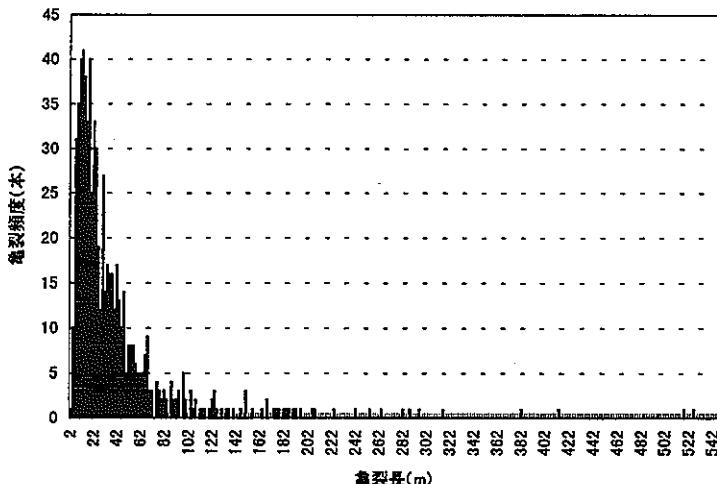
花崗岩地域（Gr.H）では、

$$C = 0.24$$

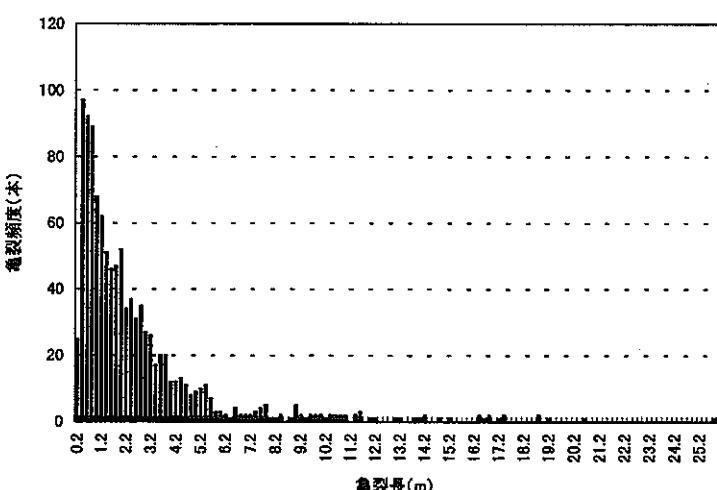
$$Dl = 1.70$$

$$D_g = 1.55$$

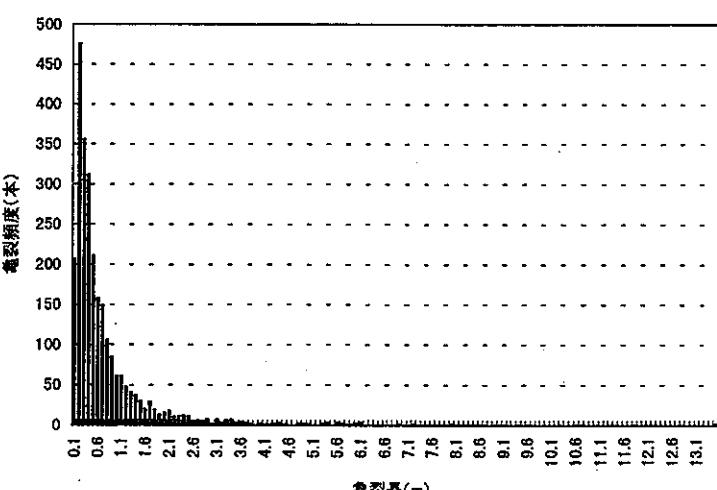
と報告されている。



(a) 串木野地下石油備蓄基地（安山岩）

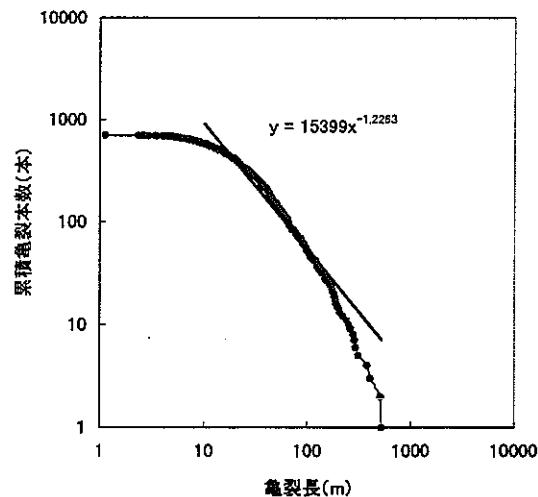


(b) 伊奈川地下発電所（花崗岩）

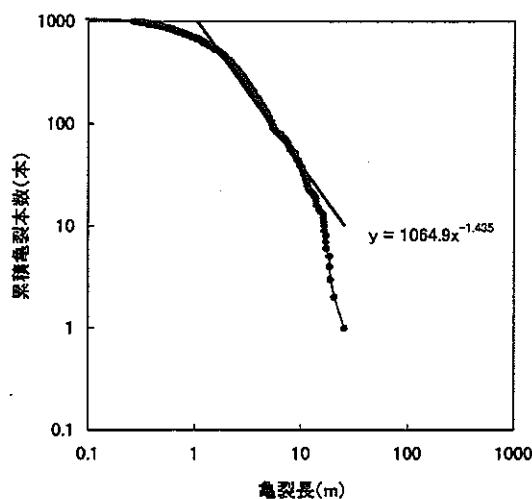


(c) 神岡試験坑道（片麻岩）

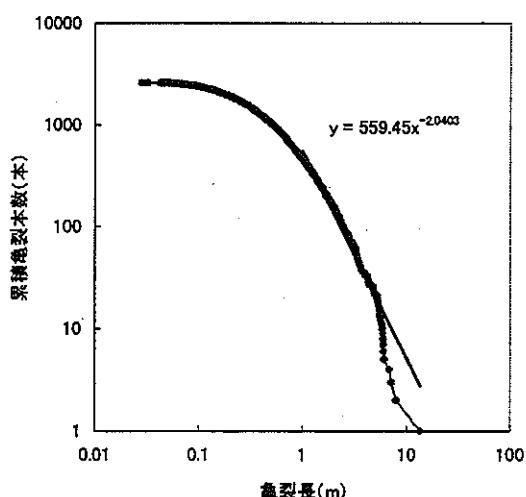
図 4.2-1 亀裂トレース長ヒストグラム（再掲）



(a) 串木野地下石油備蓄基地（安山岩）



(b) 伊奈川地下発電所（花崗岩）



(c) 神岡試験坑道（片麻岩）

図 4.2-2 亀裂のトレース長累積頻度分布（再掲）

表 4.2-1 各サイトにおける亀裂トレース長に関する諸元

	岩種	観察断面の 最小辺長さ	トレース長		累積分布 の傾き
			最大	最小	
串木野地下石油備蓄基地	安山岩	約 500m	524.4	1.13	-1.23
伊奈川地下発電所	花崗岩	約 20m	25.6	0.1	-1.44
神岡試験坑道	片麻岩	約 5m	7.95	0.03	-2.04

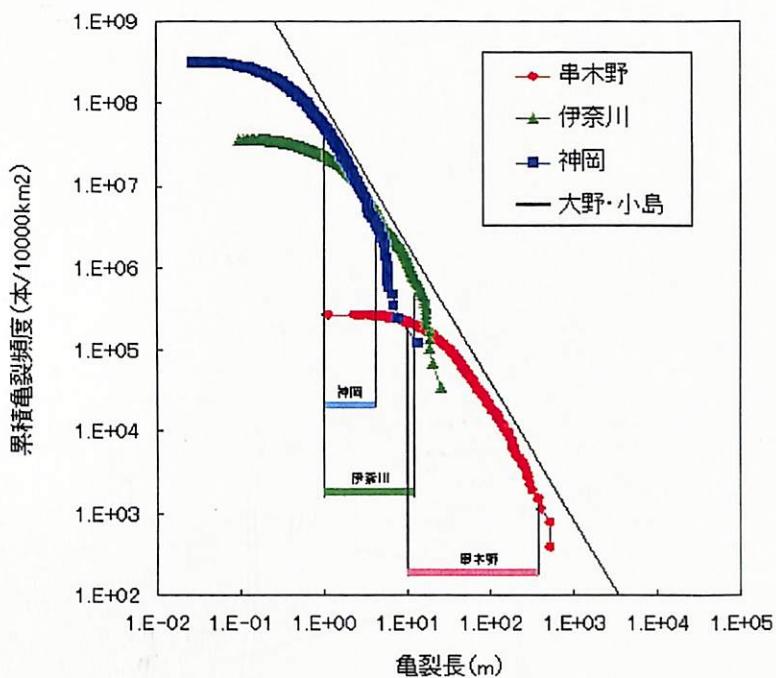


図 4.2-3 亀裂のトレース長累積頻度分布

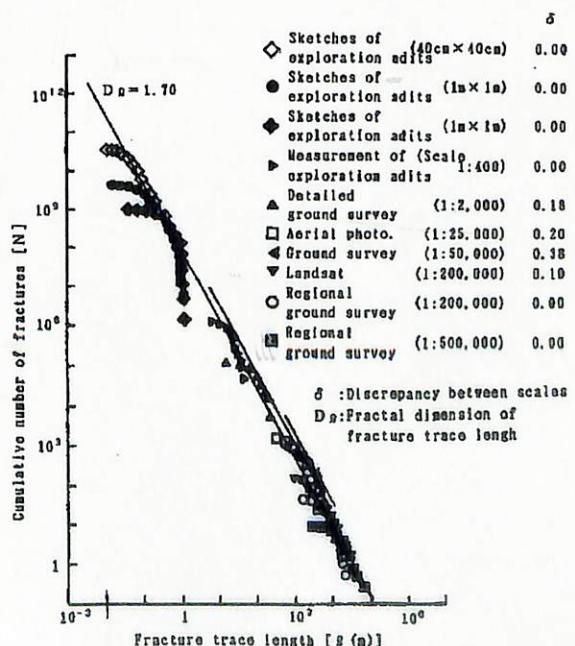


図 4.2-4 花崗岩地域における亀裂トレース長累積頻度分布（大野・小島、1993a）

参考文献

- 1) 大野博之、小島圭二 (1993a) : 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巻3号、pp.11-24
- 2) 大野博之、小島圭二 (1993b) : 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巻2号、pp.12-26