

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—  
(先行基礎工学分野に関する共同研究 最終報告書)

2001年3月

京都大学大学院  
核燃料サイクル開発機構

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。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49  
核燃料サイクル開発機構  
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:  
Technical Cooperation Section,  
Technology Management Division,  
Japan Nuclear Cycle Development Institute  
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184,  
Japan

© 核燃料サイクル開発機構  
(Japan Nuclear Cycle Development Institute)  
2001

## 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—  
(先行基礎工学分野に関する共同研究 最終報告書)

大津宏康<sup>\*1)</sup>、西山哲<sup>\*1)</sup>、土山富広<sup>\*1)</sup>、中井亮太朗<sup>\*1)</sup>  
澤田淳<sup>\*2)</sup>、山田直之<sup>\*3)</sup>、坂本和彦<sup>\*4)</sup>、内田雅大<sup>\*2)</sup>

### 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モデル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。

日本全国のトンネル、大規模地下空洞、ダム基礎などのサイトで観察された亀裂データについて亀裂データベースを作成し亀裂特性の評価を実施した。その結果、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は一直線上に分布することがわかった。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物質移行に及ぼす影響を感度解析的に把握することができた。また、この結果に基づいて、構築した亀裂ネットワークモデルの信頼性を評価する方法について検討した。

<sup>\*1)</sup> 京都大学大学院

<sup>\*2)</sup> 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

<sup>\*3)</sup> ダイヤコンサルタント

<sup>\*4)</sup> 検査開発（株）

Characteristics and modeling of fractures in Japanese rock mass  
(Evaluation of confidence in fracture network model)

- Heisei-11 progress report for the precedence-foundation engineering field -

Hiroyasu Ohtsu<sup>\*1)</sup>, Satoshi Nishiyama<sup>\*1)</sup>, Tomihiro Tsuchiya<sup>\*1)</sup>, Ryotaro Nakai<sup>\*1)</sup>  
Atsushi Sawada<sup>\*2)</sup>, Naoyuki Yamada<sup>\*3)</sup>, Kazuhiko Sakamoto<sup>\*4)</sup>, Masahiro Uchida<sup>\*2)</sup>

**Abstract**

JNC (Japan Nuclear Cycle Development Institute) has been studying characteristics of fractures in Japanese rock formations, in order to perform the geosphere performance assessment of HLW disposal site by using discrete fracture network model. This study aims to investigate the scale effects on fracture characteristics by using fracture trace maps obtained at various scales at tunnels, caverns and dam sites.

We developed fracture database by digitizing fracture maps and analyzed the characteristics of fracture trace length. As a result, it was found that fracture trace length follows negative power law distribution, that is, the accumulated number of fractures is inversely proportional to trace length in log-log plot, within the range from several meters to several hundreds meters regardless of rock types and regions. Based on this power law distribution of fracture trace length, we studied the sensitivity of the fracture trace length distribution to the nuclide migration in host rock. Additionally, we proposed the new method to evaluate confidence of fracture network model.

---

<sup>\*1)</sup> Kyoto University

<sup>\*2)</sup> Waste Isolation Research Division, Tokai Works, Japan Nuclear Cycle development Institute

<sup>\*3)</sup> Dia Consultants

<sup>\*4)</sup> Inspection Development Corporation

## 目 次

1.はじめに.....	1
2.亀裂データ.....	2
3.亀裂特性解析.....	4
3.1.亀裂データベース作成手順.....	4
3.2.解析結果.....	5
3.2.1.菊間地下石油備蓄基地.....	5
3.2.2.串木野地下石油備蓄基地.....	7
3.2.3.久慈地下石油備蓄基地.....	9
3.2.4.伊奈川地下発電所.....	11
3.2.5.赤石地下発電所.....	16
3.2.6.赤石地下発電所 立坑.....	19
3.2.7.神岡鉱山スーパーカミオカンデ.....	21
3.2.8.神岡鉱山試験坑道.....	23
3.2.9.音羽ダム.....	27
3.2.10.奈良俣ダム.....	29
3.2.11.大島ダム洪水吐.....	30
3.2.12.東濃地域リニアメント.....	32
3.3.亀裂トレース長分布特性について.....	35
3.4.ボックスカウンティングフラクタルを考慮した検討.....	39
4.トレース長分布影響解析.....	45
4.1.解析条件.....	45
4.2.モデルの平均的な透水係数.....	49
4.3.地下水移行時間.....	50
4.4.核種移行遅延効果.....	51
5.亀裂ネットワークモデルの信頼性評価手法について.....	54
6.おわりに.....	55
7.参考文献.....	56

## 図 目 次

図 2.1-1 観察断面の比較.....	3
図 3.2-1 菊間地下石油備蓄基地で観察された亀裂マップ.....	5
図 3.2-2 亀裂トレース長ヒストグラム（菊間地下石油備蓄基地）.....	6
図 3.2-3 亀裂のトレース長累積頻度分布（菊間地下石油備蓄基地）.....	6
図 3.2-4 串木野地下石油備蓄基地で観察された亀裂マップ.....	7
図 3.2-5 亀裂トレース長ヒストグラム（串木野地下石油備蓄基地）.....	8
図 3.2-6 亀裂のトレース長累積頻度分布（串木野地下石油備蓄基地）.....	8
図 3.2-7 久慈地下石油備蓄基地で観察された亀裂マップ.....	9
図 3.2-8 亀裂トレース長ヒストグラム（久慈地下石油備蓄基地）.....	10
図 3.2-9 亀裂のトレース長累積頻度分布（久慈地下石油備蓄基地）.....	10
図 3.2-10 伊奈川地下発電所亀裂マップ（側壁水圧管路側；土井ほか、1984）.....	11
図 3.2-11 伊奈川地下発電所亀裂マップ（側壁放水路側；土井ほか、1984）.....	12
図 3.2-12 伊奈川地下発電所亀裂マップ亀裂マップ（底盤部；土井ほか、1984）.....	12
図 3.2-13 亀裂マップ（妻壁アーチ横坑側；土井ほか、1984）.....	13
図 3.2-14 亀裂マップ（妻壁主変圧器室側；土井ほか、1984）.....	13
図 3.2-15 亀裂トレース長ヒストグラム（伊奈川地下発電所）.....	14
図 3.2-16 亀裂のトレース長累積頻度分布（伊奈川地下発電所）.....	15
図 3.2-17 赤石地下発電所で観察された亀裂マップ（西村ほか、1990）.....	16
図 3.2-18 亀裂トレース長ヒストグラム（赤石地下発電所）.....	17
図 3.2-19 亀裂のトレース長累積頻度分布（赤石地下発電所）.....	18
図 3.2-20 赤石地下発電所立坑で観察された亀裂マップ（展開図）.....	19
図 3.2-21 亀裂トレース長ヒストグラム（赤石地下発電所立坑）.....	20
図 3.2-22 亀裂のトレース長累積頻度分布（赤石地下発電所立坑）.....	20
図 3.2-23 スーパーカミオカンデで観察された亀裂マップ.....	21
図 3.2-24 亀裂のトレース長ヒストグラム（スーパーカミオカンデ）.....	22
図 3.2-25 亀裂のトレース長累積頻度分布（スーパーカミオカンデ）.....	22
図 3.2-26 亀裂マップ（NE 坑道）.....	23
図 3.2-27 亀裂マップ（NW 坑道）.....	24
図 3.2-28 亀裂マップ（SE 坑道）.....	24
図 3.2-29 亀裂マップ（SW 坑道）.....	24
図 3.2-30 亀裂トレース長ヒストグラム（神岡鉱山試験坑道）.....	25
図 3.2-31 亀裂トレース長累積頻度分布（神岡鉱山試験坑道）.....	26
図 3.2-32 音羽ダムで観察された亀裂マップ（大西ほか、1998、1999）.....	27
図 3.2-33 亀裂トレース長ヒストグラム（音羽ダム）.....	28
図 3.2-34 亀裂のトレース長累積頻度分布（音羽ダム）.....	28
図 3.2-35 奈良俣ダムで観察された亀裂トレースマップ.....	29
図 3.2-36 亀裂トレース長ヒストグラム（奈良俣ダム）.....	29
図 3.2-37 亀裂のトレース長累積頻度分布（奈良俣ダム）.....	30

図 3.2-38 大島ダムで観察された亀裂トレースマップ	30
図 3.2-39 亀裂トレース長ヒストグラム（大島ダム）	31
図 3.2-40 亀裂のトレース長累積頻度分布（大島ダム）	31
図 3.2-41 東濃地域（約 10km 四方）で抽出されたリニアメント（サイクル機構、2000）	32
図 3.2-42 東濃地域（約 30km 四方）で抽出されたリニアメント（サイクル機構、2000）	32
図 3.2-43 亀裂トレース長ヒストグラム	33
図 3.2-44 亀裂のトレース長累積頻度分布（東濃地域約 10km 四方）	34
図 3.3-1 亀裂のトレース長累積頻度分布（観察面積比を用いて 1km <sup>2</sup> あたりの亀裂数に規格化）	37
図 3.3-2 東濃地域におけるリニアメントの長さおよび花崗岩露頭での割れ目のトレース長分布 (山井ほか、1994)	38
図 3.3-3 亀裂のトレース長累積頻度分布（図 3.3-2 との比較）	38
図 3.4-1 ボックスカウンティング法によるパターンのフラクタル次元の求め方（大野、1992）	39
図 3.4-2 各サイトのメッシュサイズとメッシュ数の関係図	40-42
図 3.4-3 パターンのフラクタル次元を用いて規格化したトレース長のフラクタル分布	44
図 3.4-4 日本各地で観察されたトレース長のフラクタル分布（大野・小島、1993）	44
図 4.1 フラクタル特性の不確実性の幅	45
図 4.1-1 亀裂半径分布のべき乗数 $b$ を変えたケースにおける任意の水平面内における 亀裂トレース図	47
図 4.1-2 三次元亀裂密度 $P_{32}$ を変えたケースにおける任意の水平面内における亀裂トレース図	48
図 4.1-3 任意の水平断面における亀裂トレース長分布のフラクタル特性	49
図 4.1-4 各モデルの一次元亀裂頻度	49
図 4.2-1 モデル化対象領域と境界条件	50
図 4.2-2 モデルの平均的な透水係数	50
図 4.3-1 下流側境界におけるトレーサーの破過の様子と $t_{50}$	51
図 4.3-2 平均的な地下水移行時間	51
図 4.4-1 上流側からの核種移行率	52
図 4.4-2 下流側における核種移行率の最大値（ $b$ を変えたケース）	53
図 4.4-3 下流側における核種移行率の最大値（ $P_{32}$ を変えたケース）	53

## 表 目 次

表 2.1-1 亀裂データ一覧	2
表 3.2-1 断面諸元一覧（伊奈川地下発電所）	11
表 3.2-2 断面諸元一覧（神岡鉱山試験坑道）	23
表 3.3-1 亀裂トレース長データ総元	36
表 3.4-1 亀裂パターンのフラクタルと亀裂トレース長のフラクタル次元	43
表 4.1-1 亀裂ネットワークモデルに用いたパラメーター一覧（澤田ほか、2000）	46
表 4.4-1 核種移行パラメーター一覧	52

## 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中の核種移行評価を実施している（サイクル機構、1999）。したがって、その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、亀裂の長さの分布に対数正規分布や負の指數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長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。

本研究では、これらの問題点を解決するために、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、長さ、密度等）を明らかにすることを目的として、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・整理を行ってきた。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。

また、これ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（亀裂の長さの分布と亀裂密度）が亀裂性岩盤中の水理物質移行に及ぼす影響を感度解析的に把握するとともに、構築した亀裂ネットワークモデルの信頼性を評価する手法について提案する。

## 2. 亀裂データ

これまでに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）や神岡鉱山のスープ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、大島ダム洪水吐では、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。さらに、東濃地域では 20km～30km スケールを対象にランドサット衛星画像や航空写真等を用いたリニアメントが抽出されている。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・スープーカミオカンデが片麻岩、音羽ダムがチャート・粘板岩、大島ダム洪水吐が溶結凝灰岩で、その他のサイトが全て花崗岩類である。

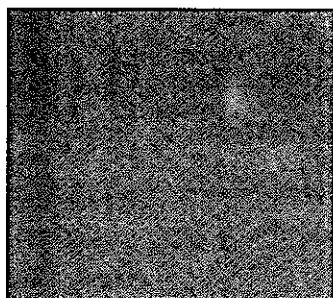
表 2.1-1 亀裂データ一覧

場所	断面方向	断面規模*	データ種類	岩種
菊間地下石油備蓄基地	水平	約 500m×500m <sup>*1</sup>	走向傾斜、亀裂マップ <sup>°</sup>	花崗岩類
久慈地下石油備蓄基地	水平	約 500m×540m <sup>*1</sup>	走向傾斜、亀裂マップ <sup>°</sup>	花崗岩
串木野地下石油備蓄基地	水平	約 500m×550m <sup>*1</sup>	走向傾斜、亀裂マップ <sup>°</sup>	安山岩
伊奈川地下発電所	鉛直	約 25m×32m <sup>*2</sup>	走向傾斜、亀裂マップ <sup>°</sup>	花崗岩
	水平	約 16m×19m		
奥多々良木地下発電所	水平	約 25m×130m	走向傾斜、亀裂マップ <sup>°</sup>	流紋岩類
	鉛直	約 47m×130m		
赤石地下発電所	鉛直	約 11m×28m <sup>*2</sup>	亀裂マップ <sup>°</sup>	砂岩・頁岩互層
	水平	約 12m×15m		
赤石地下発電所 立坑	鉛直	φ 13m×64m	走行傾斜、亀裂マップ <sup>°</sup>	砂岩・頁岩互層
神岡鉱山スープーカミオカンデ <sup>°</sup>	鉛直	φ 40m	走向傾斜、亀裂マップ <sup>°</sup>	片麻岩
神岡鉱山試験坑道	鉛直	約 145m×5m	走向傾斜、亀裂マップ <sup>°</sup>	片麻岩他
音羽ダム	水平	約 190m×140m	走向傾斜、亀裂マップ <sup>°</sup>	チャート・粘板岩他
奈良俣ダム	水平	約 40m×90m	亀裂マップ <sup>°</sup>	花崗岩類
大島ダム洪水吐	水平	約 480m×95m	亀裂マップ <sup>°</sup>	溶結凝灰岩
東濃地域リニアメント	水平	約 22m×19km	リニアメントデータ	花崗岩地域
		約 30m×30km		

\*1：地下石油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 四方領域を観察した結果ではない。

\*2 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。

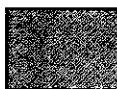
水平断面



菊間地下石油備蓄基地  
500m×500m  
久慈地下石油備蓄基地  
500m×540m  
串木野地下石油備蓄基地  
500m×550m



大島ダム洪水吐  
480m×95m



音羽ダム  
190m×140m

- 奈良俣ダム  
40m×90m
- 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
- 奥多々良木地下発電所  
25m×130m

鉛直断面

■ 伊奈川地下発電所  
25m×32m  
- 32m×16m

— 神岡鉱山試験坑道  
145m×5m

- 赤石地下発電所  
28m×11m

■ 奥多々良木地下発電所  
47m×130m

■ 赤石地下発電所 立坑  
 $\phi 13m \times 64m$

図 2.1-1 観察断面の比較

(東濃地域は 30km スケールで、地下石油備蓄基地の約 60 倍であるため、本図からは割愛した)

### 3. 龜裂特性解析

#### 3.1. 龜裂データベース作成手順

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。

- 1) 亀裂マップをスキャナーにより読み取る。
- 2) 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。
- 3) 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。
- 4) トレース長のヒストグラムを描く。
- 5) 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。

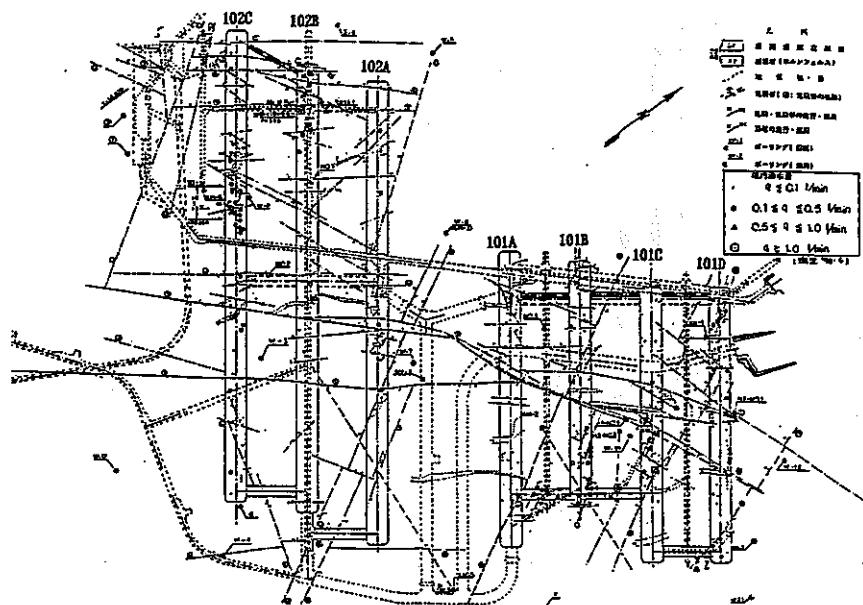
以上により得られたトレース長ヒストグラム、トレース長累積頻度分布（係数、傾き）からサイト毎の亀裂特性について検討を行う。

### 3.2. 解析結果

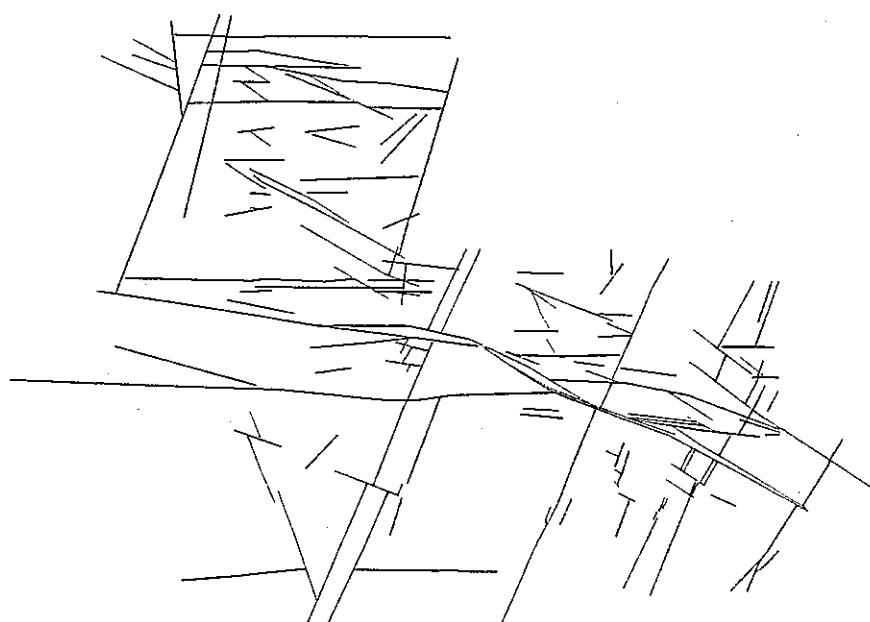
#### 3.2.1. 菊間地下石油備蓄基地

##### (1) 亀裂データの特徴

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（林ほか、1994）



(b) トレースマップ

図 3.2-1 菊間地下石油備蓄基地で観察された亀裂マップ

## (2) 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 3.2-2 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。

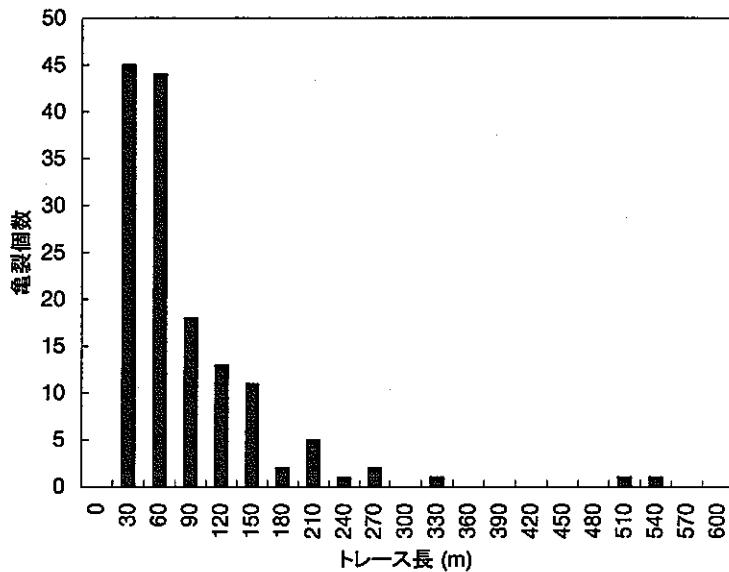


図 3.2-2 亀裂トレース長ヒストグラム（菊間地下石油備蓄基地）

## (3) 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 3.2-3 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。トレース長の範囲が約 20m~250m ではその傾きはおよそ-1.05 であった。

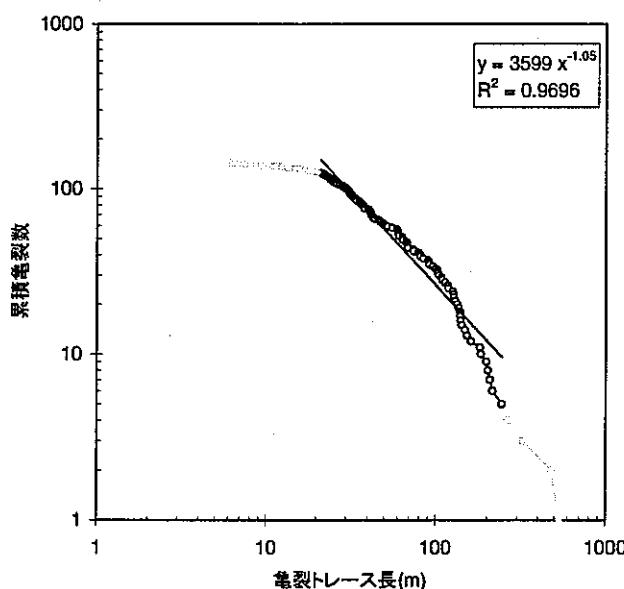
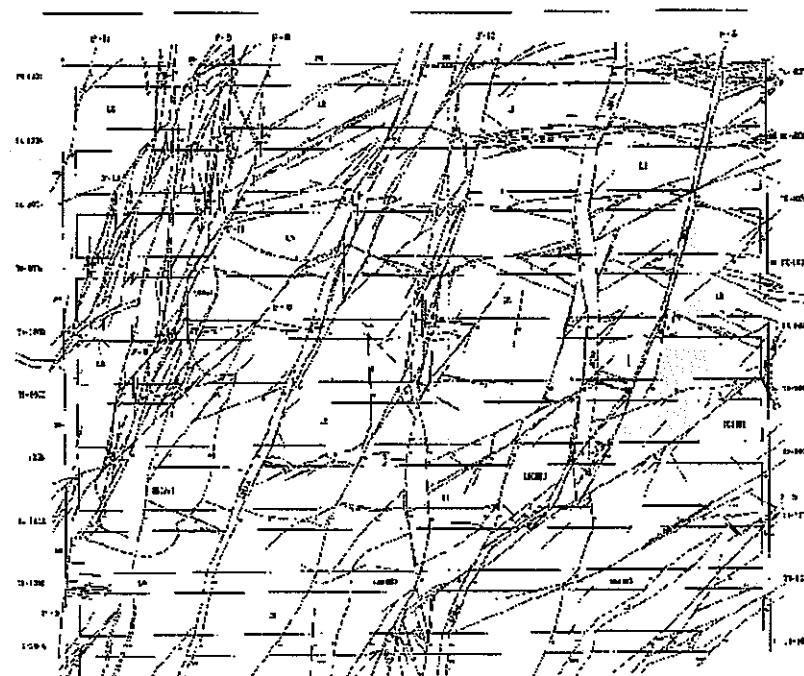


図 3.2-3 亀裂のトレース長累積頻度分布（菊間地下石油備蓄基地）

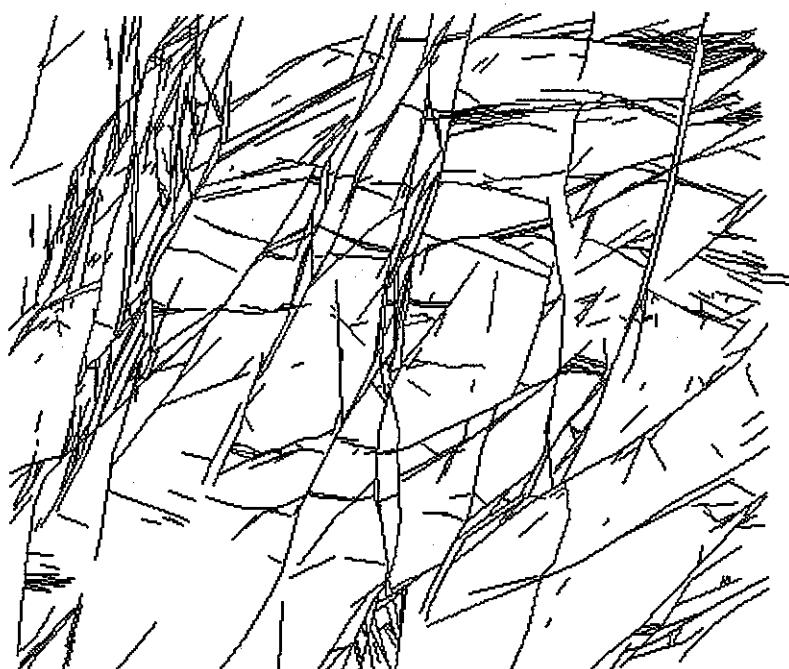
### 3.2.2. 串木野地下石油備蓄基地

#### (1) 亀裂データの特徴

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3.2-4(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（林ほか、1994）



(b) トレースマップ

図 3.2-4 串木野地下石油備蓄基地で観察された亀裂マップ

## (2) 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 3.2-5 に示す。図 3.2-4 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。

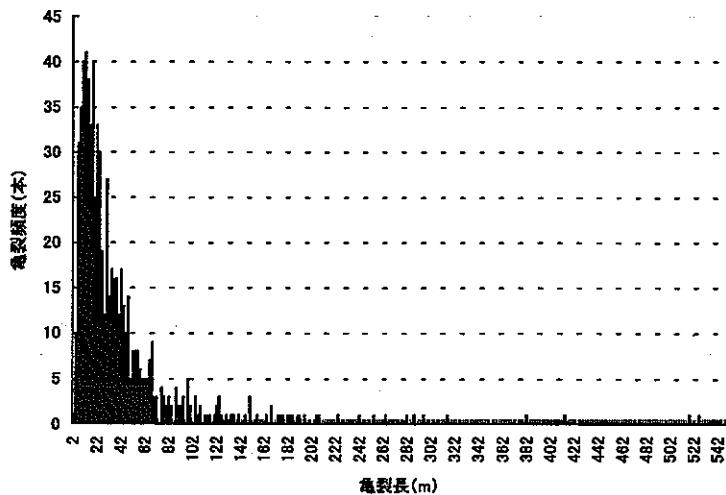


図 3.2-5 亀裂トレース長ヒストグラム（串木野地下石油備蓄基地）

## (3) 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 3.2-6 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。

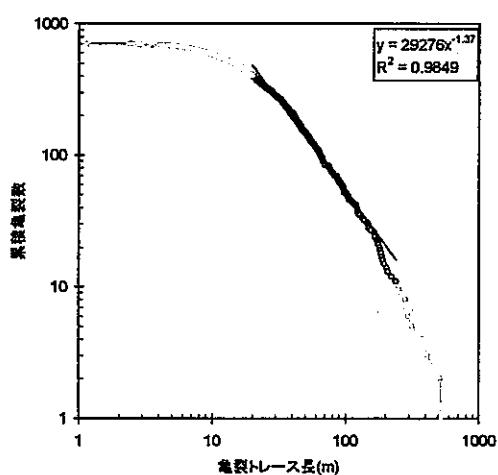
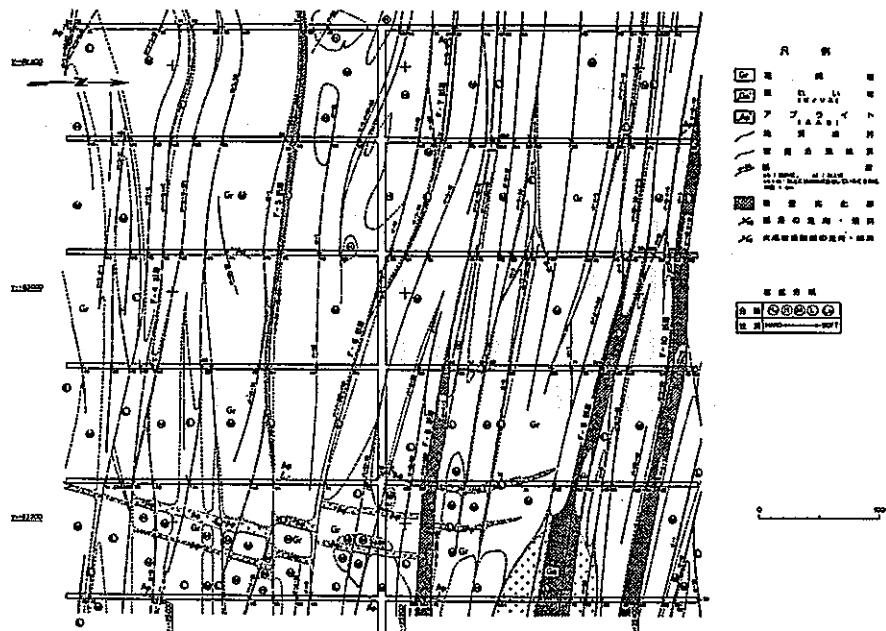


図 3.2-6 亀裂のトレース長累積頻度分布（串木野地下石油備蓄基地）

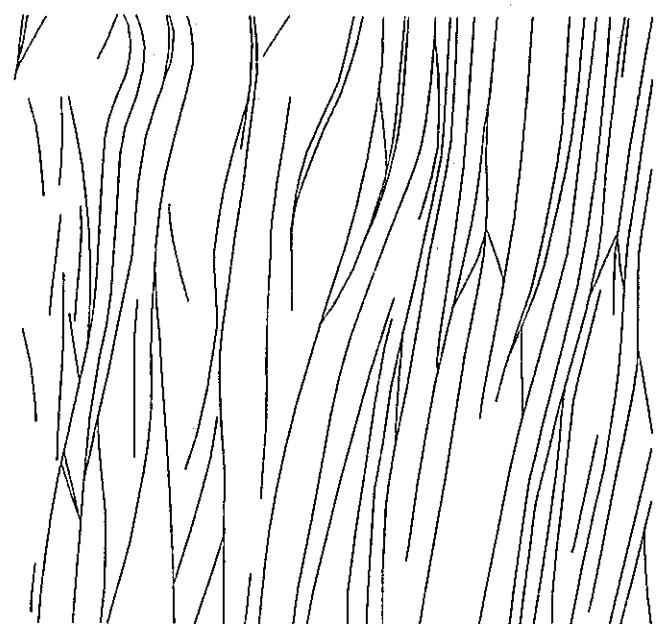
### 3.2.3. 久慈地下石油備蓄基地

#### (1) 亀裂データの特徴

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イスマップを図3.2-7 (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（林ほか、1994）



(b) トレイスマップ

図 3.2-7 久慈地下石油備蓄基地で観察された亀裂マップ

## (2) 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3.2-8示す。図3.2-7に示すように領域全体を横切るような断層が多く、500m以上 のトレース長を持つ断層が多く観察されている。一方で、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60mをピークにそれ以下の亀裂は観察されていない。

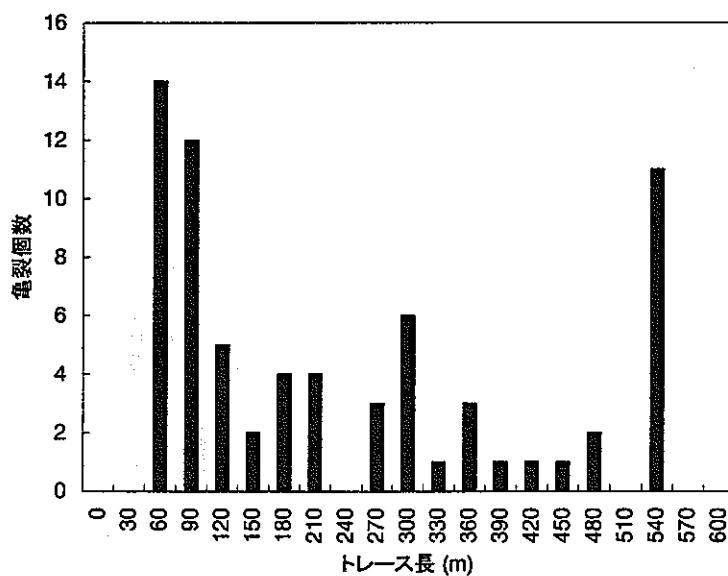


図3.2-8 亀裂トレース長ヒストグラム（久慈地下石油備蓄基地）

## (3) 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3.2-9に示す。図3.2-8に示されるように30m以下の亀裂は観察されておらず、またトレース長が500m付近の断層が多く観察されている。500m以上のトレース長を持つものは本来は観察面より大きな亀裂であるが、観察面の大きさにトレース長値が制限されているものと考えられる。トレース長の範囲が約30m～250mではその傾きはおよそ-0.49であった。

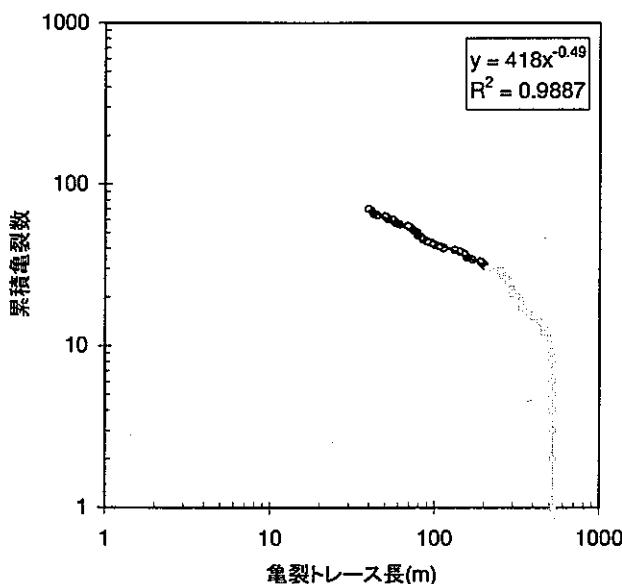


図3.2-9 亀裂のトレース長累積頻度分布（久慈地下石油備蓄基地）

### 3.2.4. 伊奈川地下発電所

#### (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3.2-10～14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（伊奈川地下発電所）

	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

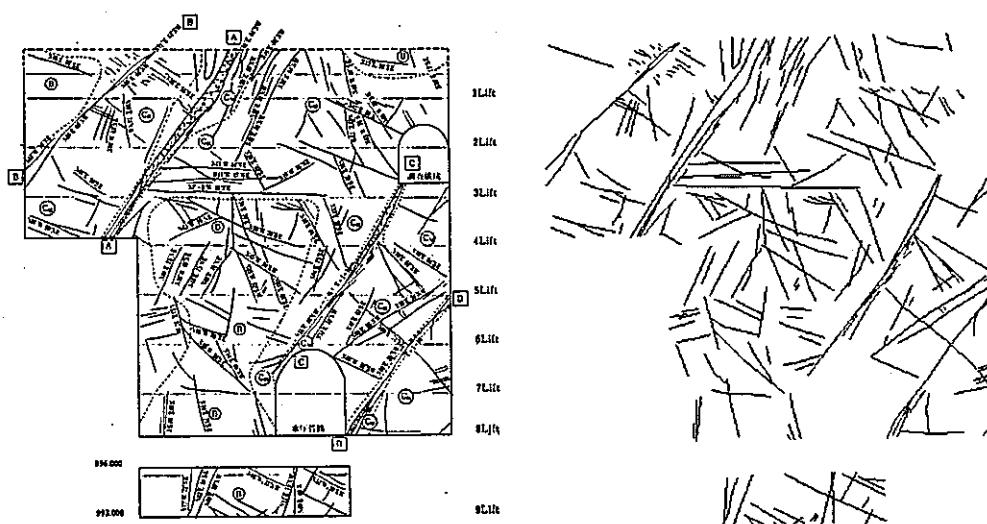
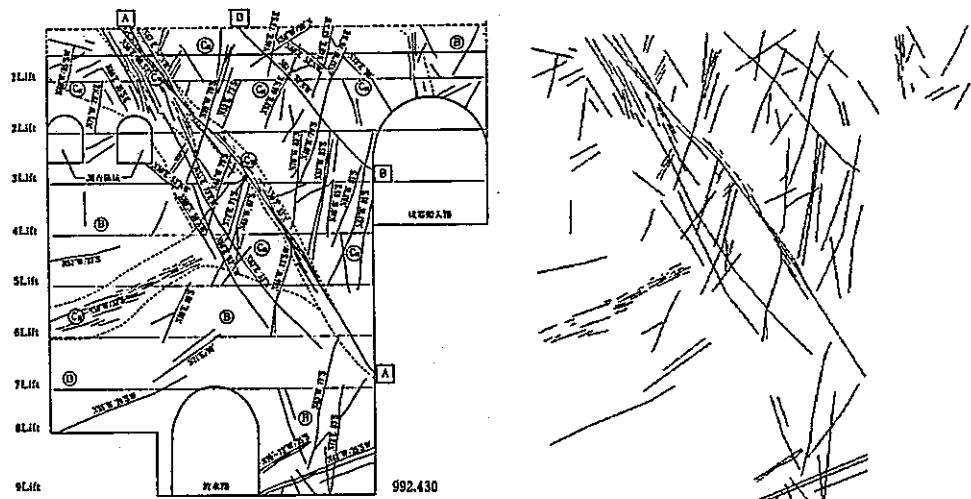
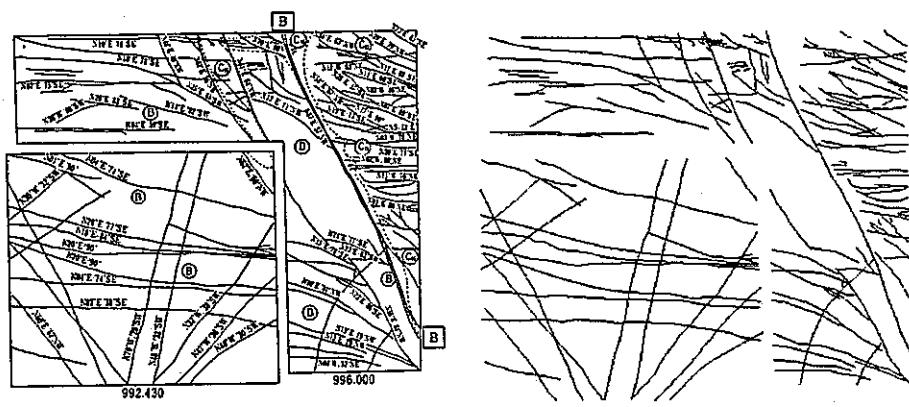


図3.2-10 伊奈川地下発電所亀裂マップ（側壁水圧管路側；土井ほか、1984）



(a) 観察マップ (b) トレスマップ  
図 3.2-11 伊奈川地下発電所亀裂マップ（側壁放水路側；土井ほか、1984）



(a) 観察マップ (b) トレスマップ  
図 3.2-12 伊奈川地下発電所亀裂マップ亀裂マップ（底盤部；土井ほか、1984）

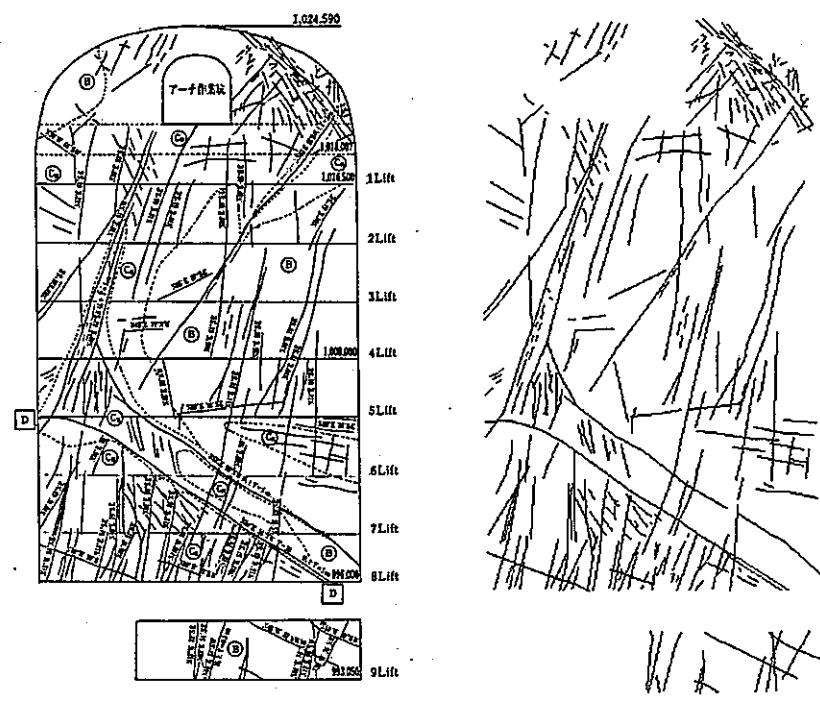


図 3.2-13 龜裂マップ（妻壁アーチ横坑側；土井ほか、1984）

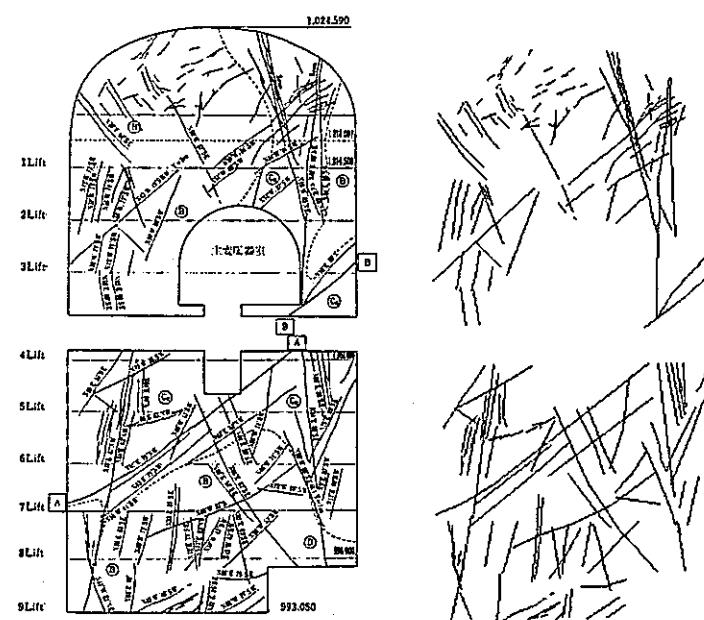
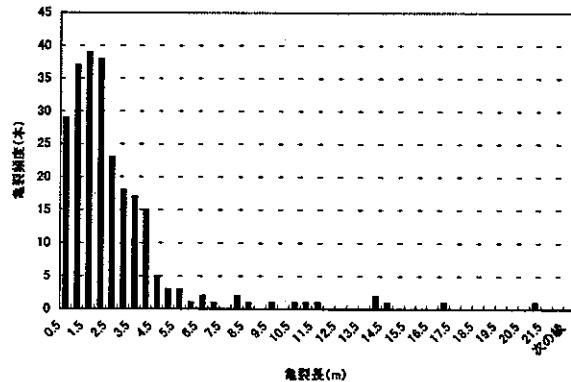


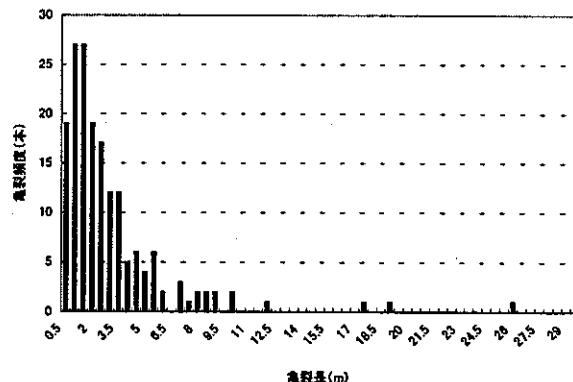
図 3.2-14 龜裂マップ（妻壁主変圧器室側；土井ほか、1984）

## (2) トレース長ヒストグラム

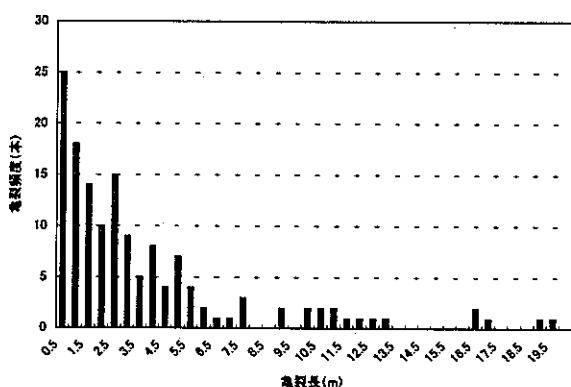
亀裂のトレース長ヒストグラムを図 3.2-15 に示す。いずれの断面においてもほぼ同じような傾向を示し、全体的にはトレース長の最大値は約 26m で 1m 前後にピークが見られる。



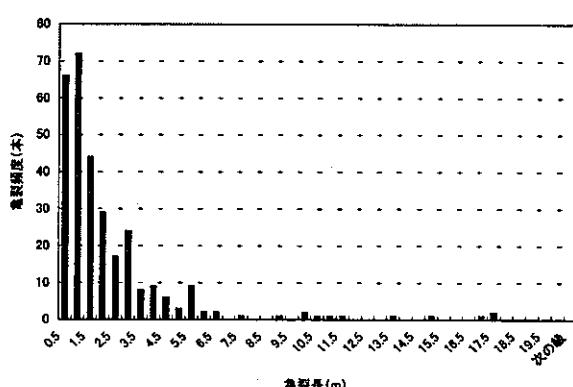
(a) 側壁水圧管路側



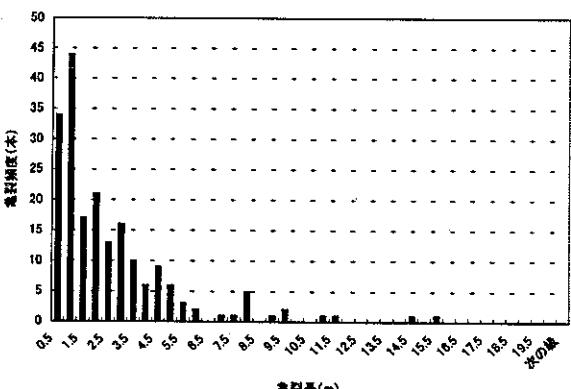
(b) 側壁放水路側



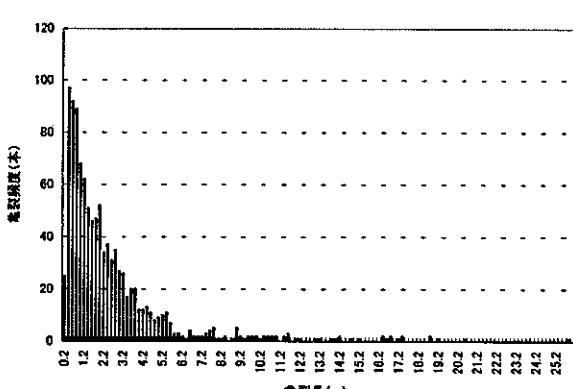
(c) 底盤部



(d) 妻壁アーチ横坑側



(e) 妻壁主変圧器室側



(f) 全断面

図 3.2-15 亀裂トレース長ヒストグラム（伊奈川地下発電所）

## (3) 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 3.2-16 に示す。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。

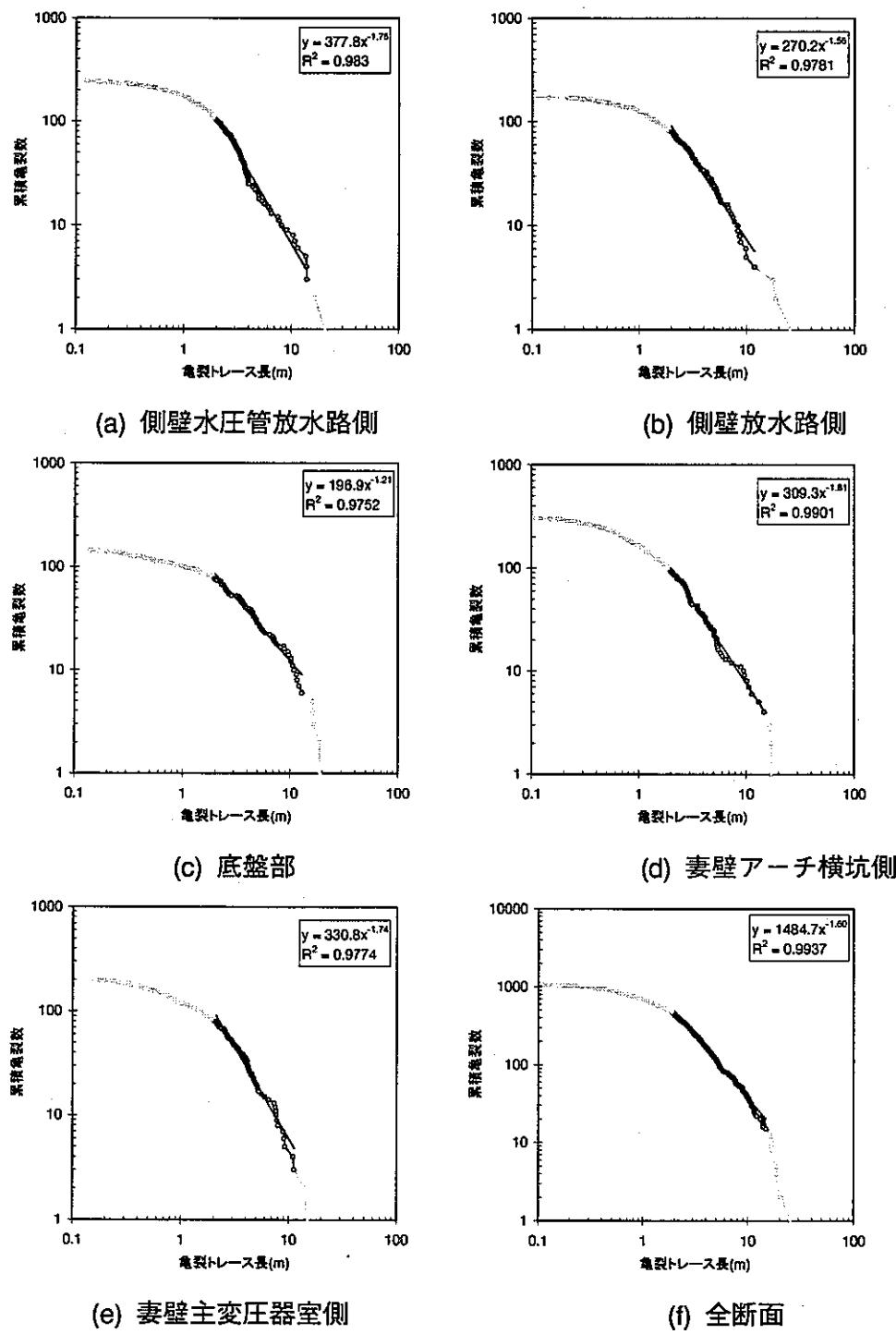
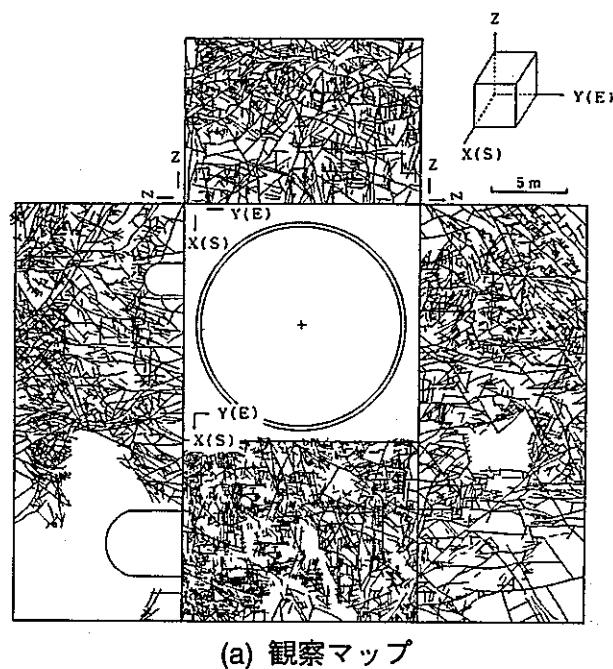


図 3.2-16 亀裂のトレース長累積頻度分布（伊奈川地下発電所）

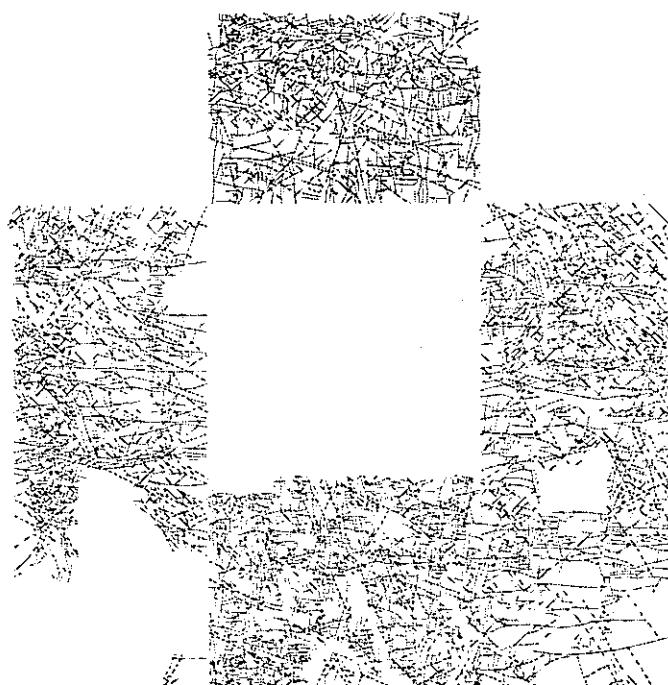
### 3.2.5. 赤石地下発電所

#### (1) 亀裂データの特徴

発電機室側壁で観察された写真撮影に基づく亀裂マップとそのトレースマップを図3.2-17(a)、(b)に示す。地質観察では3m以上のトレース長を持つ亀裂が観察されているが、本図は写真撮影による調査で得られた画像から判断・抽出できる全てのトレース（発破によるものと判断されるものを除く）が示されている。トレース長データは北妻壁面、西側壁面、東側壁面、底盤面の各面毎に整理した。



(a) 観察マップ



(b) トレースマップ

図3.2-17 赤石地下発電所で観察された亀裂マップ（西村ほか、1990）

## (2) 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 3.2-18 に示す。どの壁面においても 1m 程度のトレース長を持つものが多い。側壁面によってその分布が大きく異なることはないが底盤面では相対的に 1m 前後の小さな亀裂が多い。

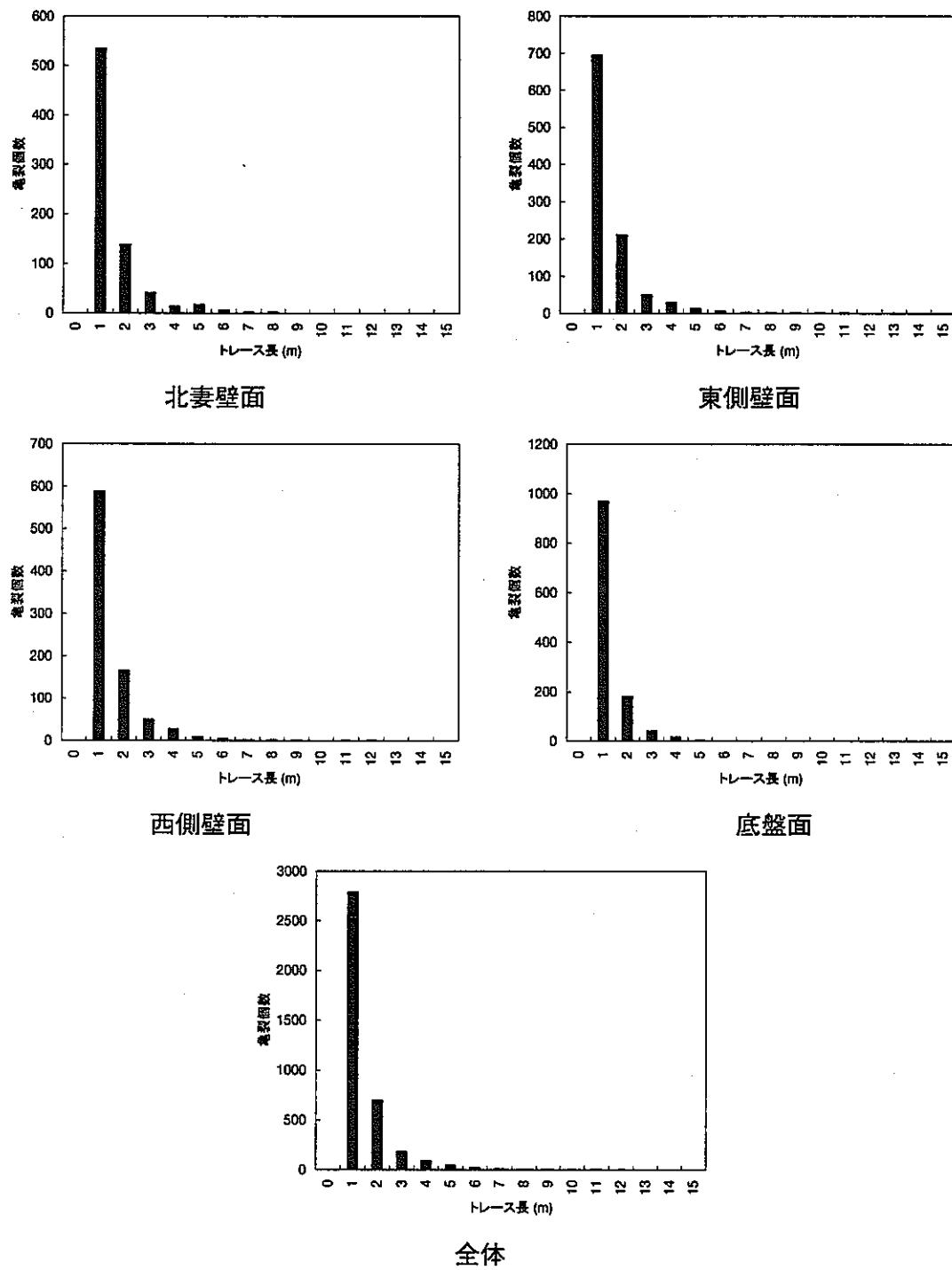


図 3.2-18 亀裂トレース長ヒストグラム（赤石地下発電所）

## (3) 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 3.2-19 に示す。各壁面ともにほぼべき乗分布に従っており、0.5m～4m の範囲でその傾きを求めると、およそ側壁面で-1.35～-1.37、底盤面で-1.77 であった。

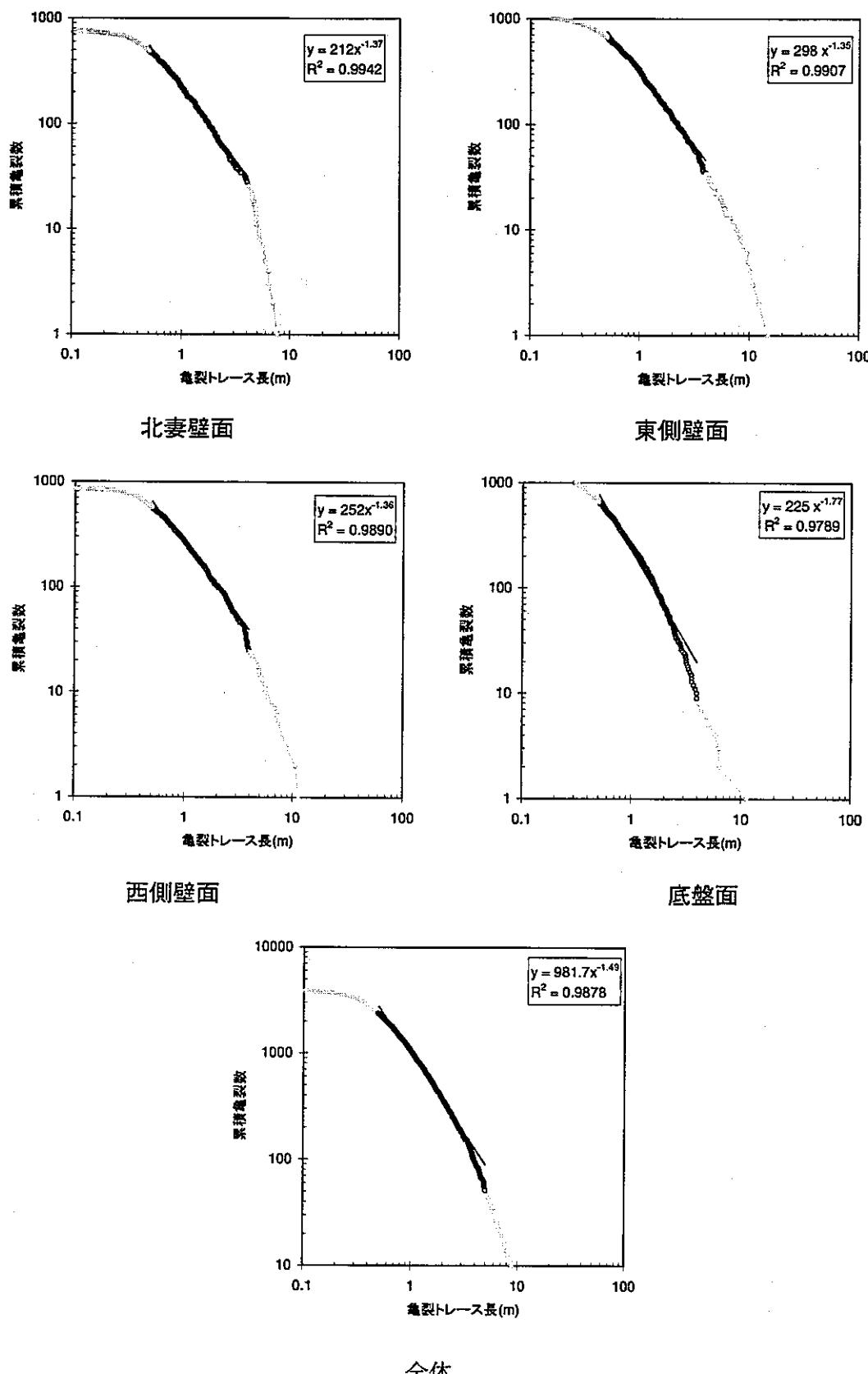
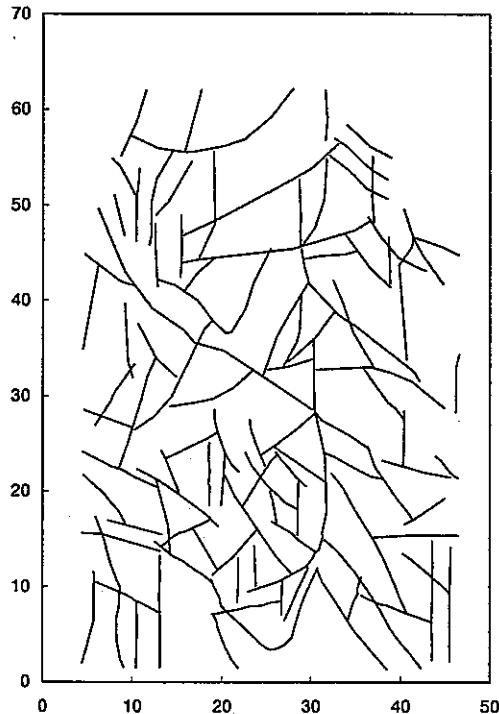


図 3.2-19 龜裂のトレース長累積頻度分布（赤石地下発電所）

### 3.2.6. 赤石地下発電所 立坑

#### (1) 亀裂データの特徴

立坑で観察された亀裂分布から推定した領域全体での亀裂のトレースマップを図 3.2-20 に示す。これは円筒状の坑道で観察された亀裂の展開図である。



(b) トレースマップ

図 3.2-20 赤石地下発電所立坑で観察された亀裂マップ（展開図）

#### (2) 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 3.2-21 示す。トレースマップは円筒状の立坑の展開図となっているため、展開図上の長さではなく円筒を考慮した距離でトレース長を換算した。直径 13m の円筒状の立坑で観察されたため数 m から 10m 程度の亀裂が多い一方で、図 3.2-20 に示されるように鉛直性の亀裂も観察されており、その一部は十数メートル以上のものも観察されている。

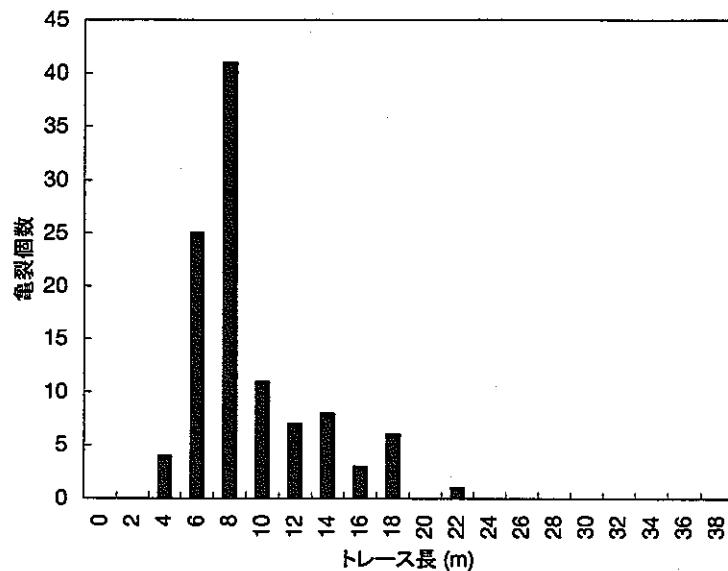


図 3.2-21 亀裂トレース長ヒストグラム（赤石地下発電所立坑）

## (3) 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 3.2-3 示す。トレース長が約 10m を超えると相対的に亀裂頻度が小さくなっているものの、それ以下の長さではほぼべき乗分布に従っている。トレース長の範囲が約 1.3m～13m ではその傾きはおよそ-1.98 であった。

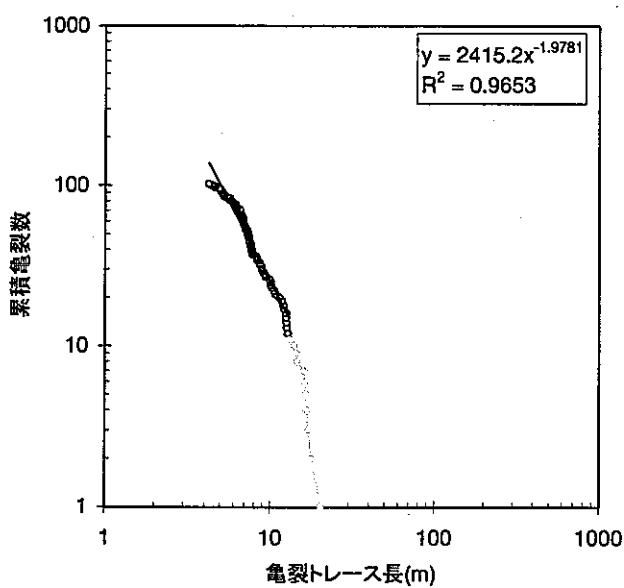
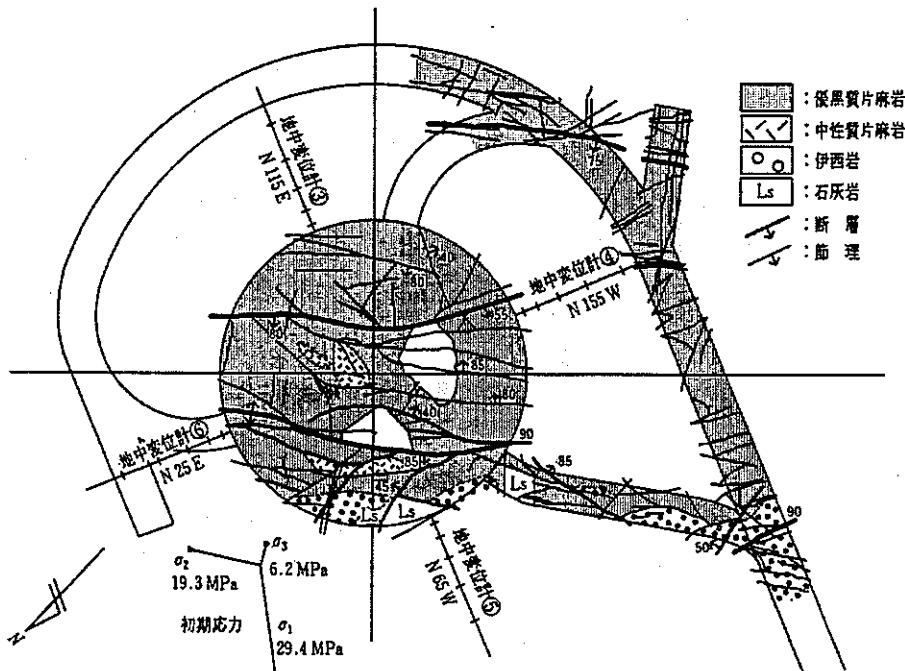


図 3.2-22 亀裂のトレース長累積頻度分布（赤石地下発電所立坑）

## 3.2.7. 神岡鉱山スープーカミオカンデ

## (1) 亀裂データの特徴

E.L.-514m の天盤における地質図とそのトレースマップを図 3.2-23 (a)、(b)に示す。地質観察では比較的大きな亀裂の記載がなされており、また、南西側の構造においても優黒質片麻岩とその周辺で亀裂が記載されている。



(a) 亀裂マップ (竹村ほか、1998)



(b) トレースマップ

図 3.2-23 スーパーカミオカンデで観察された亀裂マップ

## (2) 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 3.2-24 示す。6m 程度のトレース長を持つものが多く、図 3.2-23 に示されるように  $\phi 40\text{m}$  を横断する 40m を超えるトレース長を持つ亀裂も観察されている。

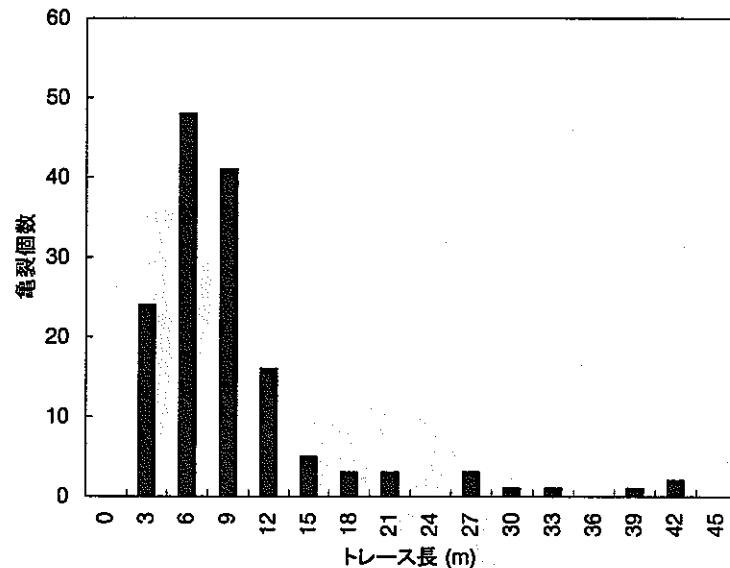


図 3.2-24 亀裂トレース長ヒストグラム（スーパーカミオカンデ）

## (3) 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 3.2-25 に示す。数メートル以上の亀裂ではほぼべき乗分布に従っており、5m~25m の範囲でその傾きはおよそ -1.75 であった。

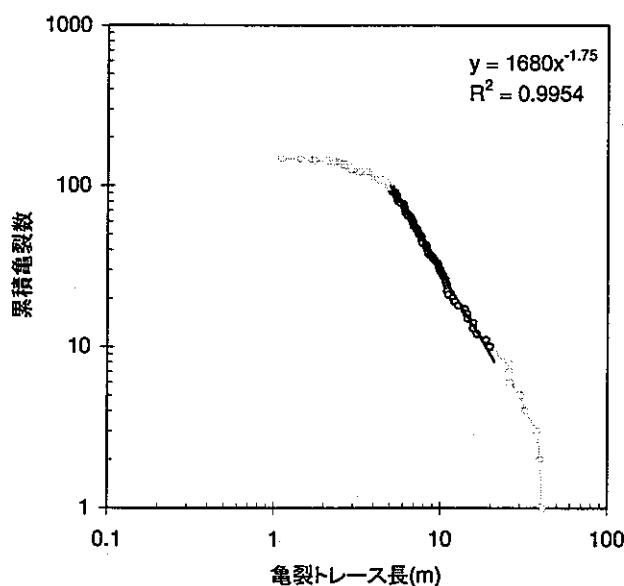


図 3.2-25 亀裂のトレース長累積頻度分布（スーパーカミオカンデ）

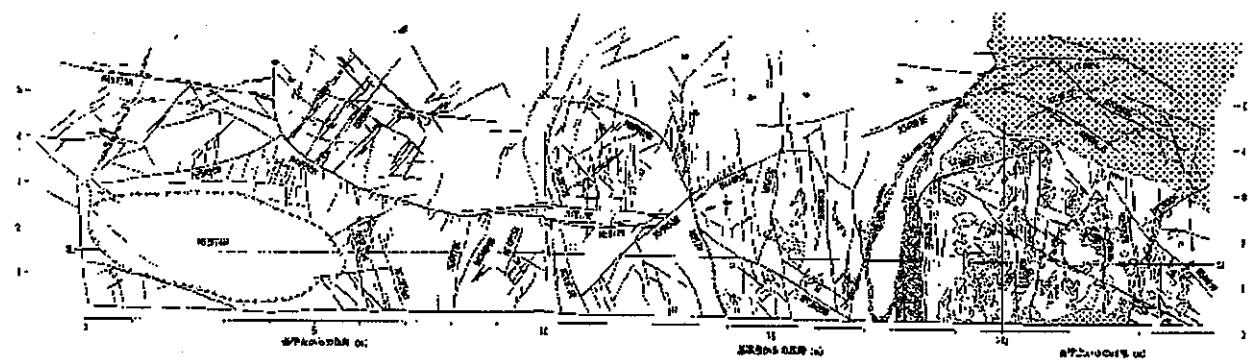
### 3.2.8. 神岡鉱山試験坑道

#### (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（白旗ほか、1994）とトレースマップをそれぞれ図 3.2-26～29 に示す。各断面の大きさは表 3.2-2 に示すように高さは約 5m、長さは 25～40m である。

表 3.2-2 断面諸元一覧（神岡鉱山試験坑道）

	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

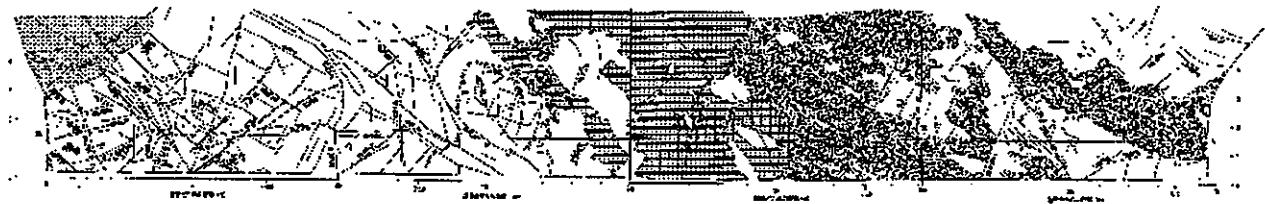


(a) 観察マップ



(b) トレースマップ

図 3.2-26 亀裂マップ (NE 坑道)



(a) 観察マップ

(b) トレースマップ

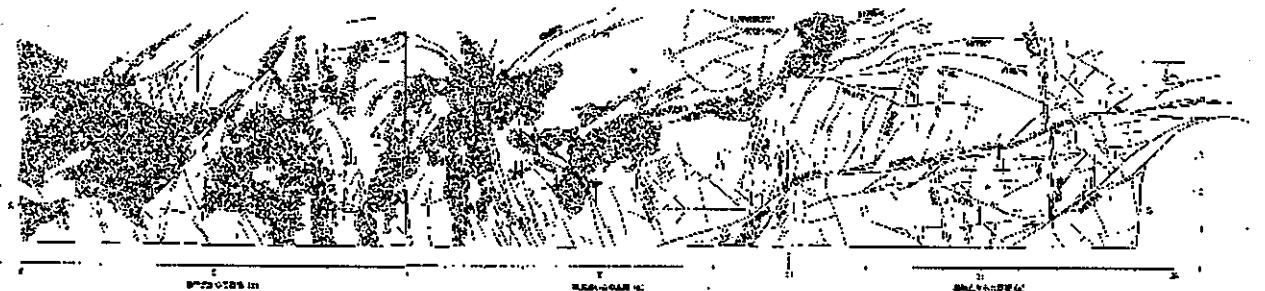
図 3.2-27 龜裂マップ (NW 坑道)



(a) 観察マップ

(b) トレースマップ

図 3.2-28 龜裂マップ (SE 坑道)



(a) 観察マップ

(b) トレースマップ

図 3.2-29 龜裂マップ (SW 坑道)

## (2) 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 3.2-30 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。

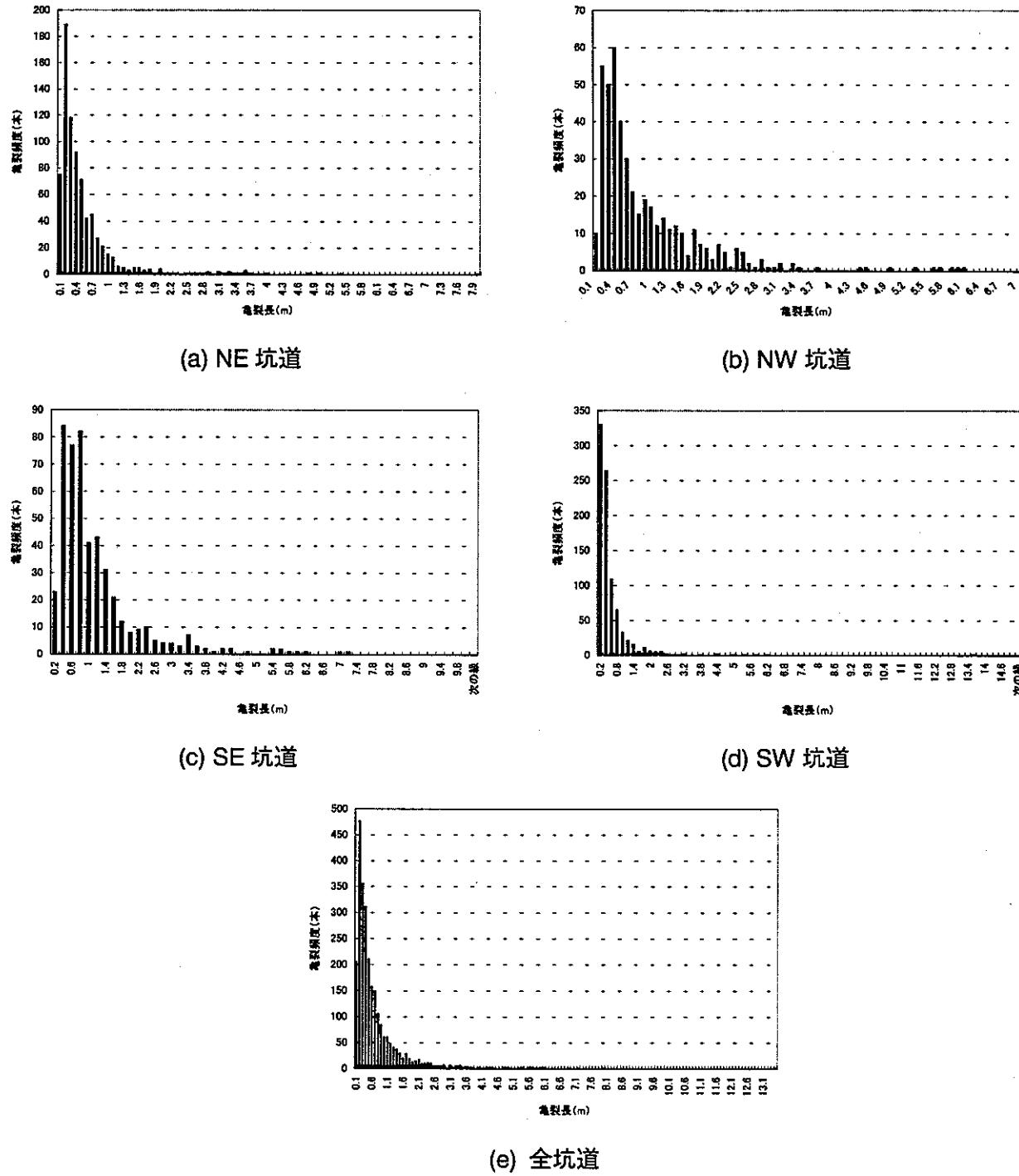


図 3.2-30 亀裂トレース長ヒストグラム（神岡鉱山試験坑道）

## (3) 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3.2-31に示す。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ない。

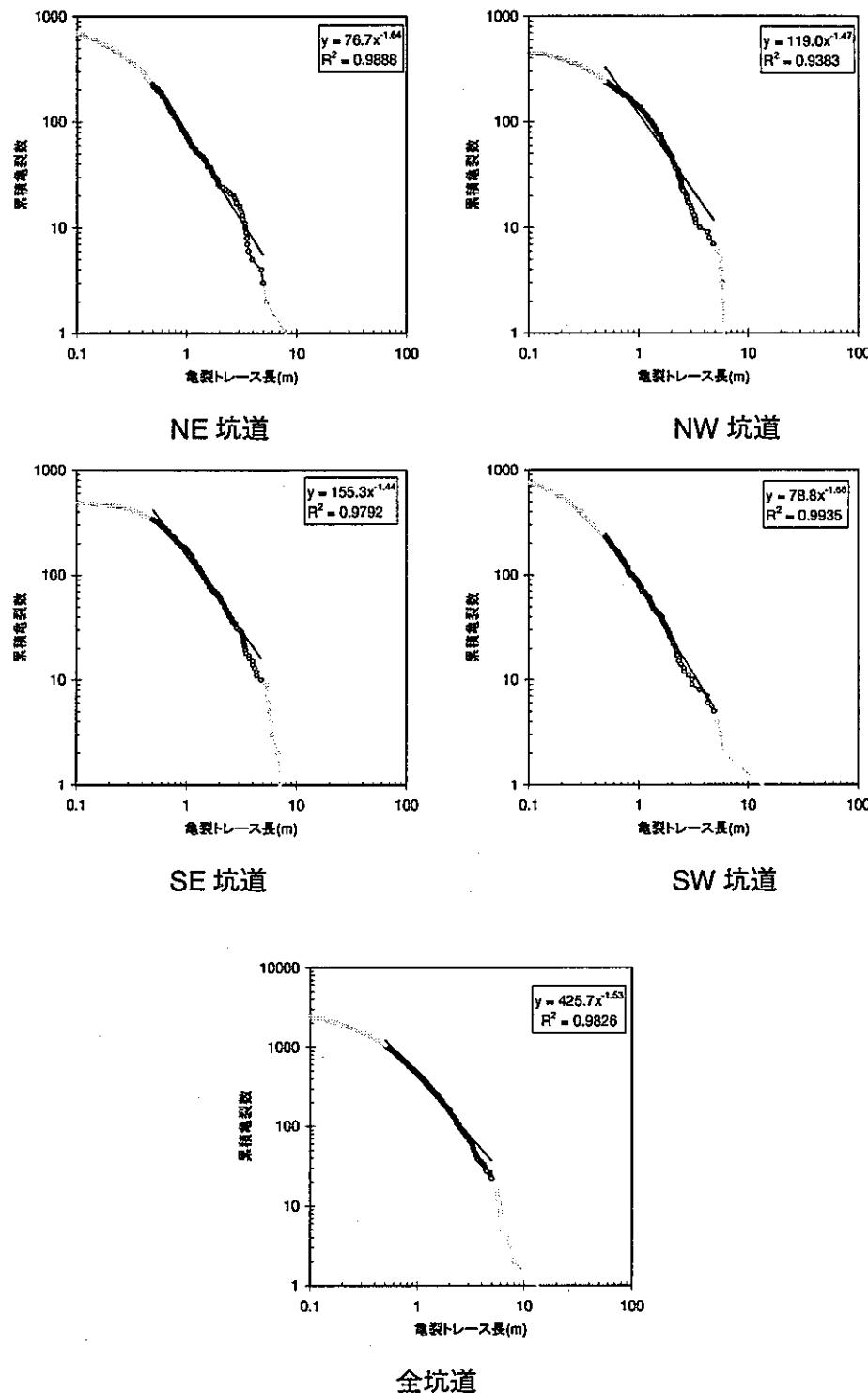


図3.2-31 亀裂トレース長累積頻度分布（神岡鉱山試験坑道）

### 3.2.9. 音羽ダム

#### (1) 亀裂データの特徴

ダム基礎底盤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 3.2-32(a)、(b)に示す。亀裂間マップでは 1m 以下のトレース長を持つ亀裂まで観察されているが、トレースマップではトレース長が 5m 以上の亀裂についてトレースした。

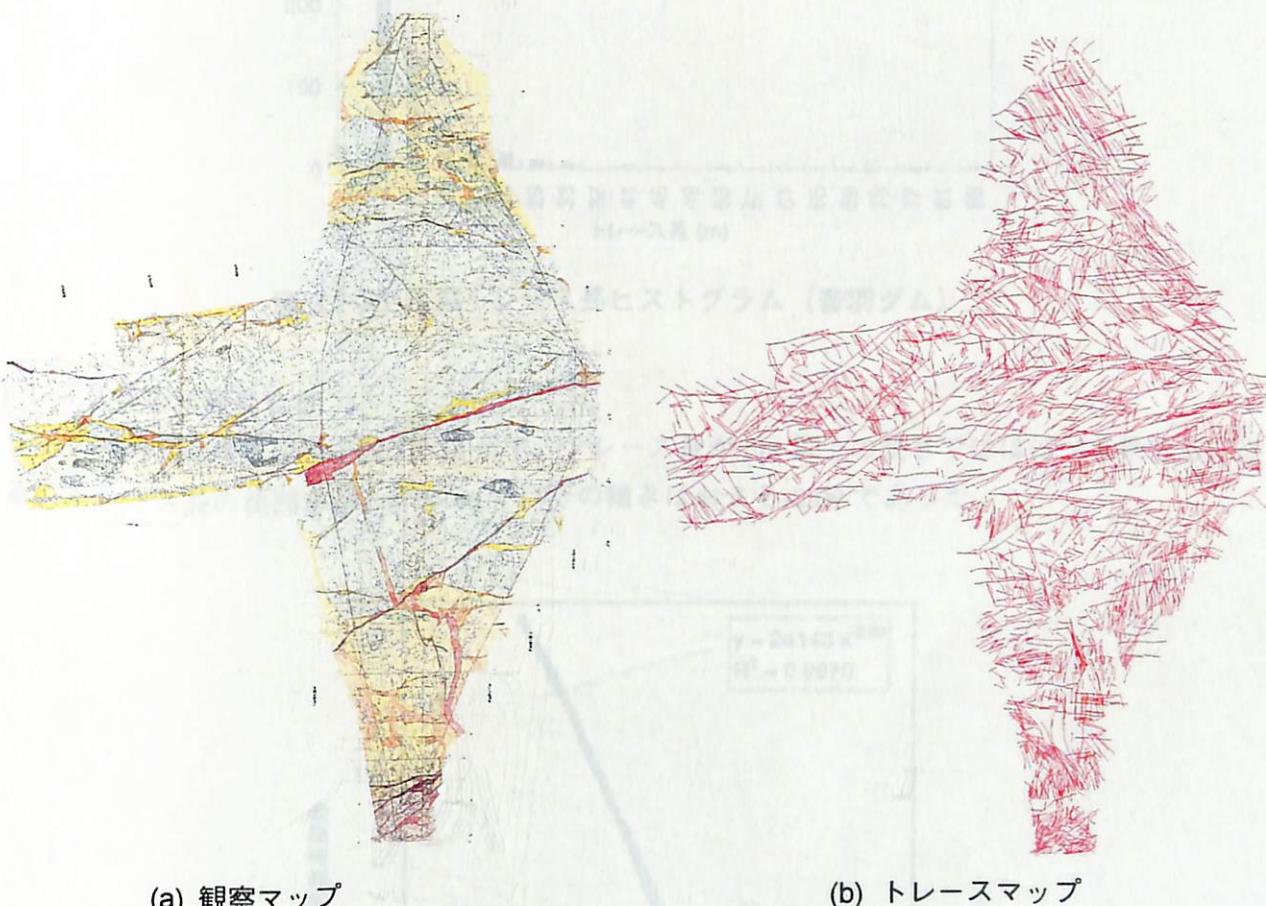


図 3.2-32 音羽ダムで観察された亀裂マップ（大西ほか、1998、1999）

#### (2) 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 3.2-33 示す。図 3.2-32 に示すように領域を横切るような亀裂が観察されている一方で、数メートルスケールの亀裂が多数観察されている。図 3.2-33 では 5m 以下のトレース長の短い亀裂を無視してプロットしている。

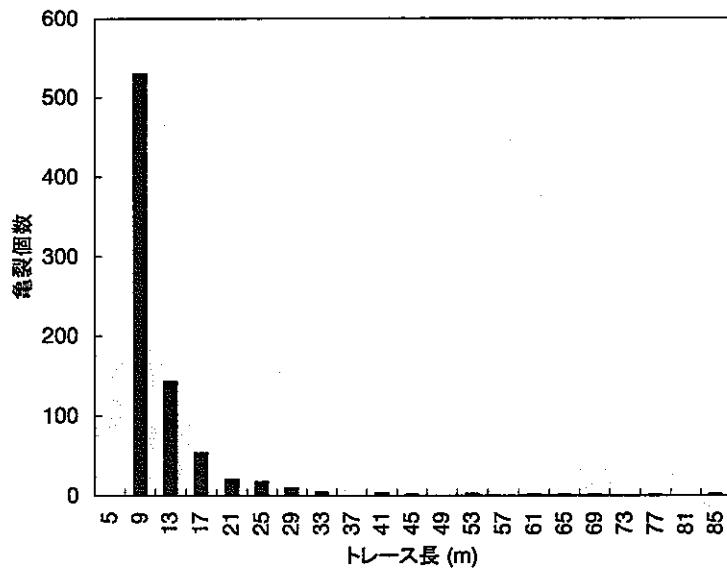


図 3.2-33 亀裂トレース長ヒストグラム（音羽ダム）

## (3) 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 3.2-34 示す。トレース長が 5m 以上の長さではほぼべき乗分布に従っている。トレース長の範囲が約 5m～50m ではその傾きはおよそ -2.09 であった。

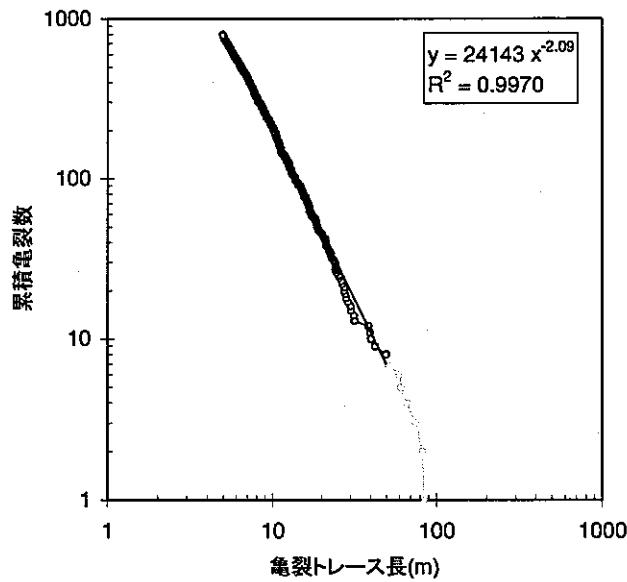


図 3.2-34 亀裂のトレース長累積頻度分布（音羽ダム）

### 3.2.10. 奈良俣ダム

#### (1) 亀裂データの特徴

ダム基礎底盤で観察された亀裂マップとそのトレースマップを図3.2-35に示す。観察断面を横断する亀裂が観察される一方で多数の小さな亀裂が観察されている。

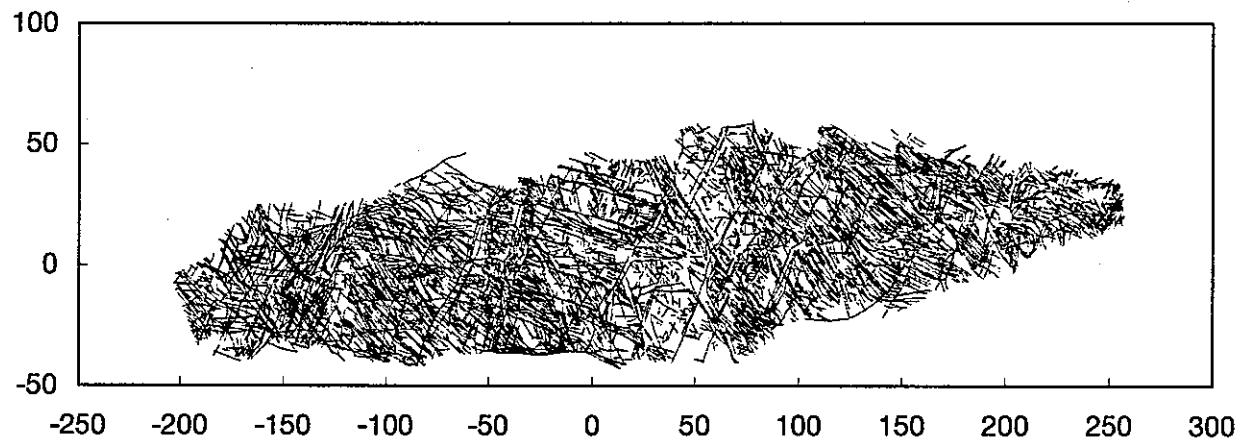


図3.2-35 奈良俣ダムで観察された亀裂トレースマップ

#### (2) 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3.2-36示す。図3.2-35に示すように亀裂の観察断面のスケールに比べて小さな亀裂が多く、数メートル程度のトレース長を持つ亀裂が多い。

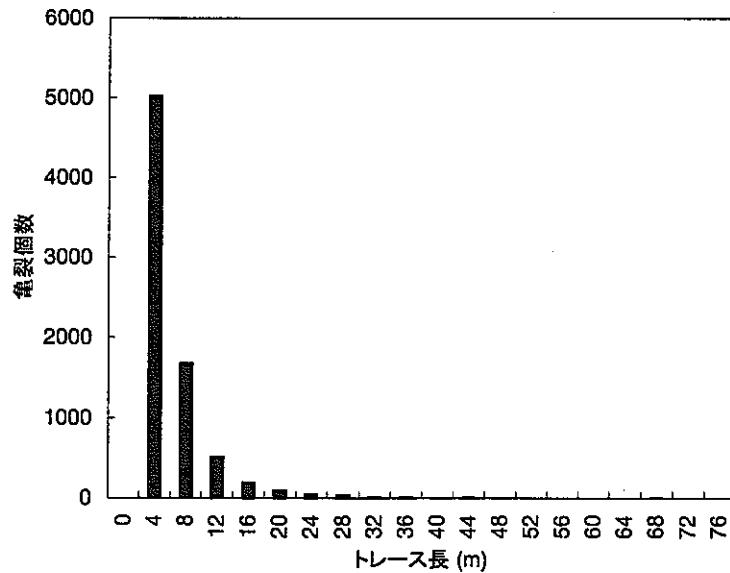


図3.2-36 亀裂トレース長ヒストグラム（奈良俣ダム）

#### (3) 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3.2-37に示す。数メートルから十数メートルにわたって直線性がみられ、トレース長の範囲が約9m～90mではその傾きはおよそ-2.47であった。

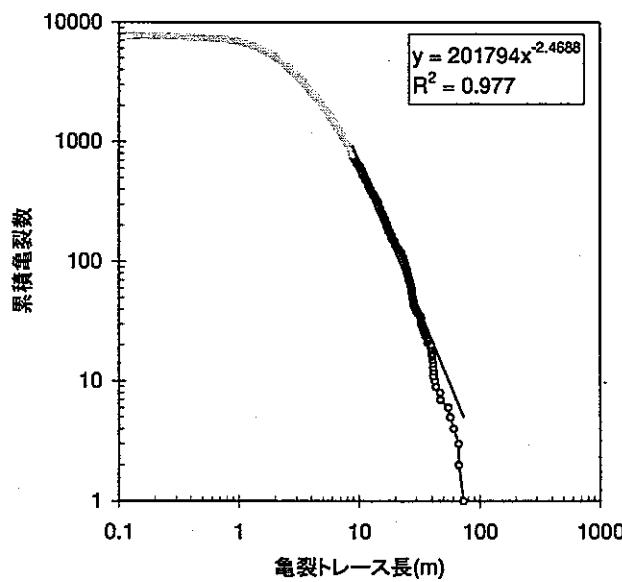


図 3.2-37 亀裂のトレース長累積頻度分布（奈良俣ダム）

### 3.2.11. 大島ダム洪水吐

#### (1) 亀裂データの特徴

ダム基礎底盤で観察された亀裂分布から推定した領域全体での亀裂トレースマップを図3.2-38に示す。

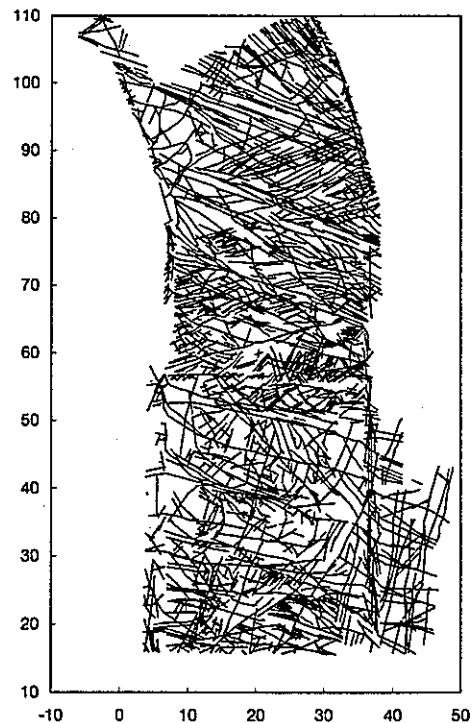


図 3.2-38 大島ダムで観察された亀裂トレースマップ

## (2) 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 3.2-39 示す。図 3.2-38 に示すように領域を横切るような亀裂が観察されている一方で、数メートルスケールの亀裂が多数観察されている。

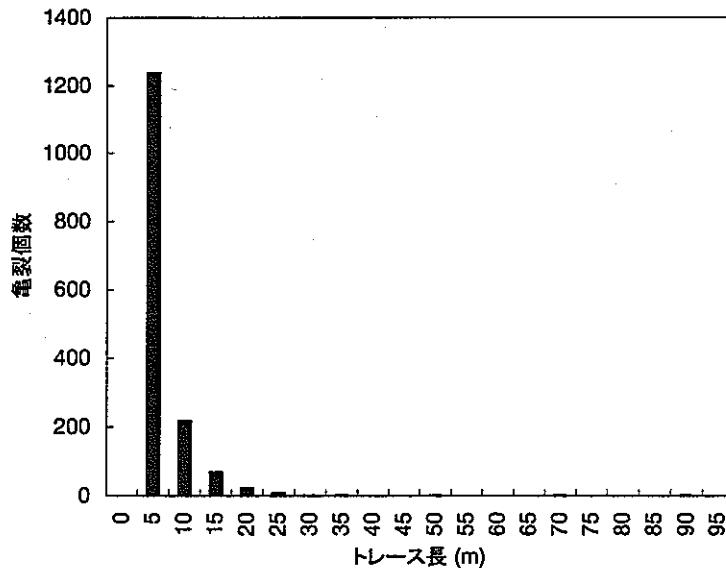


図 3.2-39 亀裂トレース長ヒストグラム（大島ダム）

## (3) 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 3.2-40 示す。トレース長が 5m 以上の長さではほぼべき乗分布に従っている。トレース長の範囲が約 5m~50m ではその傾きはおよそ -2.01 であった。

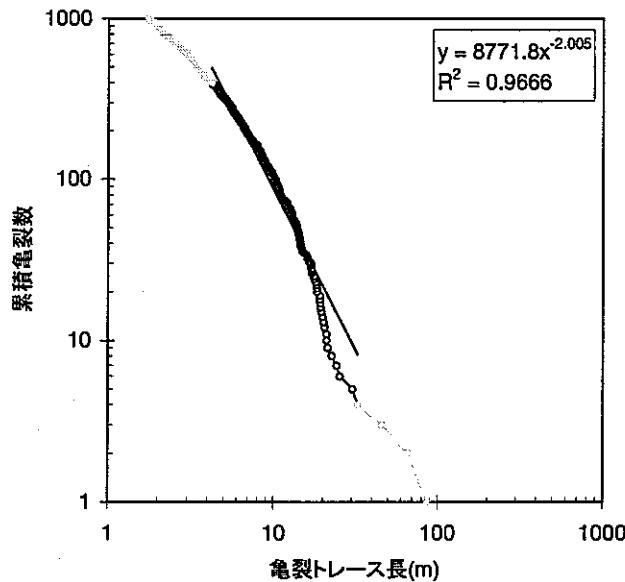


図 3.2-40 亀裂のトレース長累積頻度分布（大島ダム）

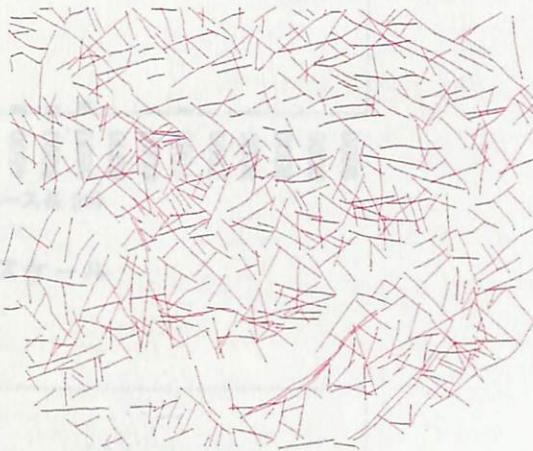
### 3.2.12. 東濃地域リニアメント

#### (1) 亀裂データの特徴

東濃地域の約 10km 四方を対象にランドサット画像および航空写真に基づき抽出されたリニアメント図を図 3.2-41 (a) に、それをトレースしたものを図 3.2-41 (b) に示す。また、それより大きな 30km スケールを対象にランドサット画像に基づき抽出されたリニアメント図を図 3.2-42(a) に、それをトレースしたものを図 3.2-42 (b) に示す。

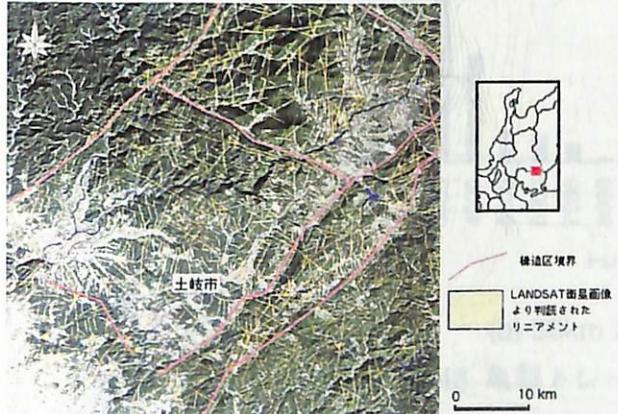


(a) リニアメントマップ

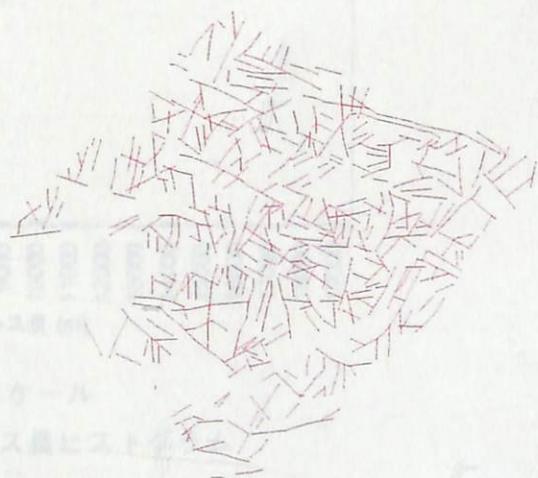


(b) トレースマップ

図 3.2-41 東濃地域（約 10km 四方）で抽出されたリニアメント（サイクル機構、2000）



(a) リニアメントマップ

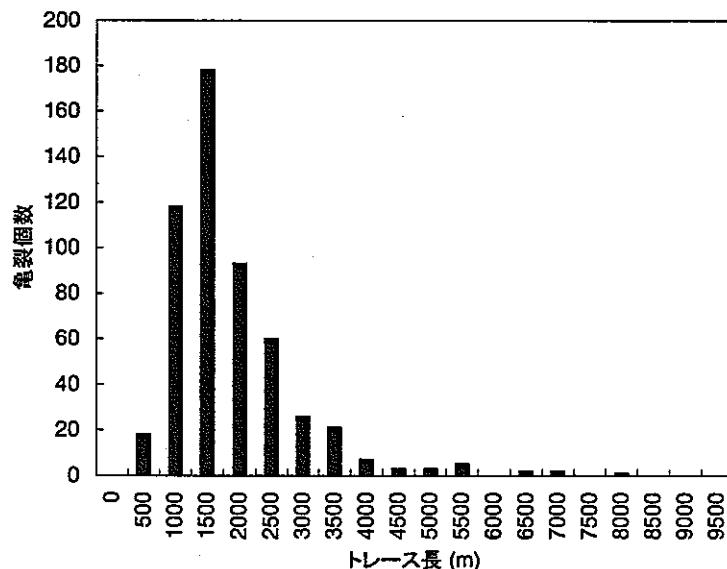


(b) トレースマップ

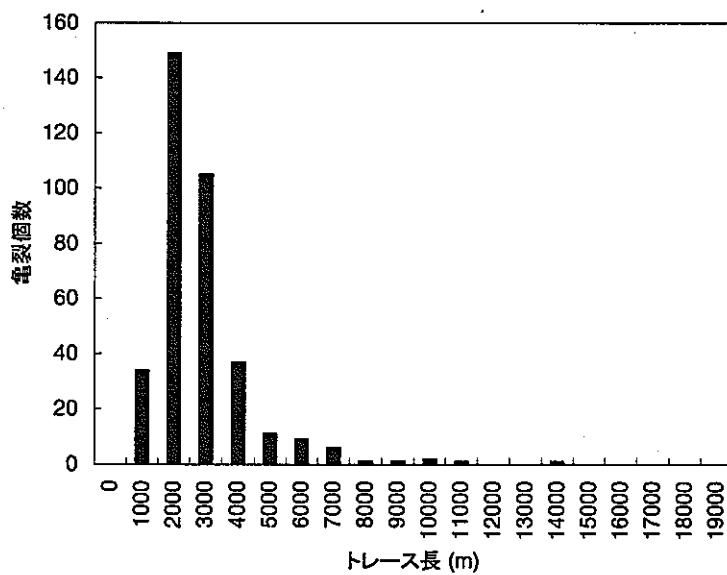
図 3.2-42 東濃地域（約 30km 四方）で抽出されたリニアメント（サイクル機構、2000）

#### (2) トレース長ヒストグラム

10km スケール、30km スケールそれぞれのリニアメントのトレース長ヒストグラムを図 3.2-43 に示す。10km スケールのリニアメントでは約 1km から 2km 前後のトレース長をもつものが多く、最大で約 7.6km のトレース長を持つものがある。また、30km スケールのリニアメントでは、2~4km 前後のトレース長を持つものが多く、最大で約 13km のトレース長を持つものが観察されている。



(a) 10km スケール

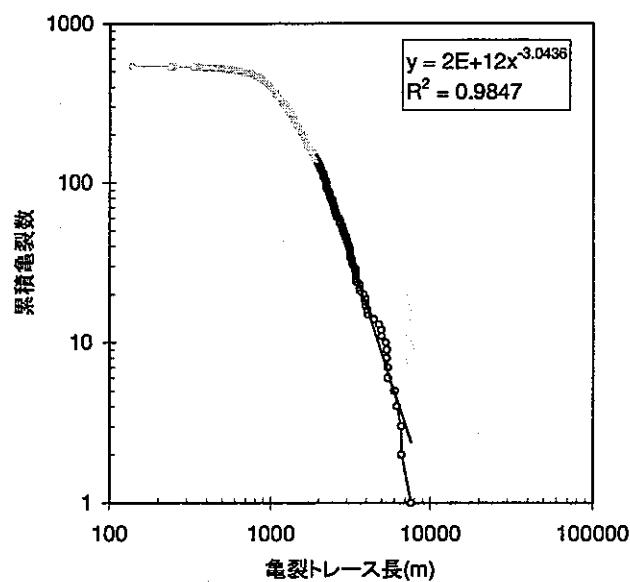


(b) 30km スケール

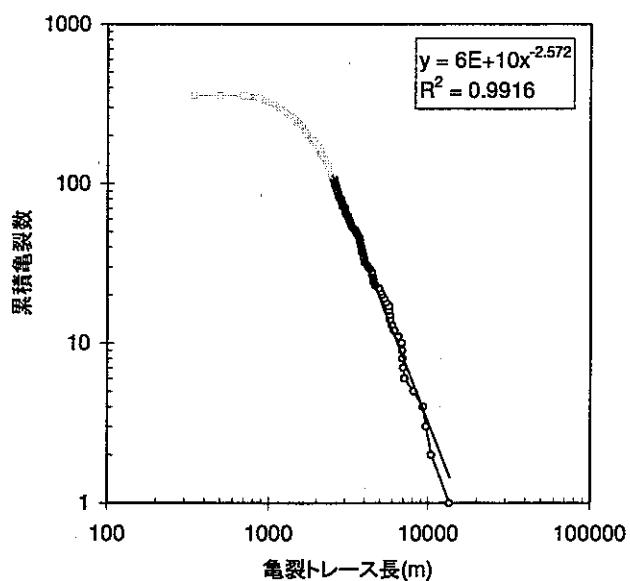
図 3.2-43 亀裂トレース長ヒストグラム

### (3) 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 3.2-44 に示す。10km スケールの場合には、約 1km 以上のトレース長を持つものがべき乗分布に従っており、1.9km~19km の範囲でその傾きを求めるとき、およそ -3.04 であった。また、30km スケールの場合には、数 km 以上のトレース長を持つリニアメントがべき乗分布に従い、約 2.5km 以上の範囲でその傾きは約 -2.75 であった。



(a) 10km スケール



(b) 30km スケール

図 3.2-44 亀裂のトレース長累積頻度分布（東濃地域約 10km 四方）

### 3.3. 亀裂トレース長分布特性について

3.2 節で求めた各サイトにおける亀裂トレース長データ緒言を表 3.3-1 にまとめた。また、観察規模の異なる各サイトで得られたトレース長データを、 $1\text{km}^2$ あたりに換算（観察面積比で換算）し、同じグラフにプロットしたものを図 3.3-1 に示す。観察断面の規模に比べて短いトレース長を持つ亀裂は観察解像度により観察数が不十分である傾向があり、また観察断面よりも長いトレース長を持つ亀裂は観察断面の大きさに制限され、正確なトレース長を測定できていない可能性がある。そこで、図 3.3-1 ではサイト毎に比較的信頼性が高いトレース長データ範囲（観察断面の短辺長からその 1/10 の範囲）を設定して、その範囲のみをプロットした。この結果から、亀裂トレース長の累積亀裂数は岩種・サイトに拘わらず一定の範囲で直線上に並んでいることが分かる。菊間地下石油備蓄基地や久慈地下石油備蓄基地は他のサイトと若干異なりその傾きが小さい。これらのサイトでは、全ての岩盤タンクを横切るような大きな亀裂や断層が観察されている一方で、各岩盤タンクスケールや複数の岩盤タンクを連続するスケールの亀裂の観察数が相対的に少なくなっているためと考えられる。

なお、東濃地域では、露頭調査ならびにランドサット画像や航空写真等のデータに基づき、トレース長のフラクタル特性について図 3.3-2 の検討がなされている（山井ほか、1994）。図 3.3-2 中の直線を面積補間して図 3.3-1 にプロットしたものを図 3.3-3 に示す。東濃地域で検討されたトレース長のフラクタル特性は本研究で求めた各サイトのトレース長分布のほぼ中央に示され、このことから亀裂のトレース長は地域・岩種によらずほぼ同じ直線上に分布することが分かる。

表 3.3-1 龜裂トレース長データ総元

サイト	観察面積	トレース長			亀裂観察 総数	フラクタル分布への近似				
		最大値	最小値	平均値		トレース 長データ 範囲	傾き	切片	R <sup>2</sup> 値(決 定係数)	
菊間地下石油備蓄基地	251,964 m <sup>2</sup> 274m×310m 548m×286m	533.5 m	6.2 m	70.1 m	144	20~250 m	-1.05	3599	0.9696	
串木野地下石油備蓄基地	295,261 m <sup>2</sup> 503m×587m	524.4 m	1.13 m	440 m	699	20~250 m	-1.37	29276	0.9849	
久慈地下石油備蓄基地	286,126.1 m <sup>2</sup> 553.24m×517.18m	524.9 m	39.5 m	220.6m	70	~200 m	-0.49	418	0.9887	
伊奈川地下発電所	①* 538.2 m <sup>2</sup> 27.6m×19.5m	20.5 m	0.1 m	2.4 m	243	2~15 m	-1.76	377.8	0.9830	
	②* 550.05 m <sup>2</sup> 28.5m×19.3m	25.6 m	0.1 m	2.8 m	172		-1.56	270.2	0.9781	
	③* 222 m <sup>2</sup> 11.1m×20m	1.91 m	0.1 m	3.5 m	143		-1.21	169.9	0.9952	
	④* 310.2 m <sup>2</sup> 16.5m×18.8m	17.3 m	0.1 m	2.0 m	303		-1.61	309.3	0.9901	
	⑤* 491.92 m <sup>2</sup> 17.2m×28.6m	15.1 m	0.1 m	2.3 m	195		-1.74	330.8	0.9774	
	全体 2388.01 m <sup>2</sup>	25.6 m	0.1 m	2.5 m	1056		-1.60	1485	0.9937	
赤石地下発電所	北妻壁 11.1m×15.6m	7.72 m	0.09 m	1.0 m	755	0.5~4 m	-1.37	212	0.9942	
	東側壁 11.1m×28.3m	14.72 m	0.10 m	1.07 m	1020		-1.35	298	0.9907	
	西側壁 11.1m×20m	11.42 m	0.10 m	1.06 m	856		-1.36	252	0.9890	
	底盤面 15.6m×12.3m	11.33 m	0.09 m	0.76 m	1216		-1.77	225	0.9789	
	全体 901.17 m <sup>2</sup>	14.72 m	0.09 m	0.25 m	3847		-1.49	982	0.9878	
赤石地下発電所立坑	427m <sup>2</sup> φ 13m×64m	20.4 m	3.4 m	8.2 m	106	13 m 以下	-1.98	2415	0.9653	
スーパー丸ミオカンデ	1256.6 m <sup>2</sup> φ 20 m	41.4 m	1.1 m	8.0 m	148	5~25 m	-1.75	1680	0.9954	
神岡鉱山試験坑道	NE 坑 25.2m×6.3m	8.0 m	0.05 m	0.5 m	769	0.5~5 m	-1.64	76.7	0.9888	
	NW 坑 40m×5.6m	6.0 m	0.04 m	0.9 m	454		-1.47	119.0	0.9383	
	SE 坑 40.2m×6.3m	7.1 m	0.07 m	1.1 m	484		-1.44	155.3	0.9792	
	SW 坑 29.9m×6.3m	13.5 m	0.03 m	0.5 m	884		-1.68	78.8	0.9935	
	全体 824.39 m <sup>2</sup>	13.5 m	0.03 m	0.36 m	2591		-1.53	425.7	0.9826	
音羽ダム	15,401.1 m <sup>2</sup> 82.0m×35.7m 56.8 m×100.5 m 99.7 m×35.3 m 59.3 m×54.7 m	84.8 m	5 m	9.6 m	788	5~50 m	-2.09	24143	0.9970	
奈良俣ダム	3,220 m <sup>2</sup>	0.1 m	73.2 m	4.4m	7648	9m 以上	-2.47	201794	0.9770	
大島ダム洪水吐	3,610 m <sup>2</sup>	0.1 m	86.0 m	3.7 m	1559	4.2~42 m	-2.01	8772	0.9666	
東濃地域リニアメント	10kmスケール	418,000,000 m <sup>2</sup> 22 km×19 km	7601 m	138 m	1611 m	755	1900 m 以上	-3.04	2x10 <sup>12</sup>	0.9874
	30kmスケール	969,636,000m <sup>2</sup> 31 km×31 km	343 m	13567 m	2323 m	357	2500 m 以上	-2.57	6x10 <sup>10</sup>	0.9916

\*: ①側壁水圧管路側、②側壁放水路側、③底盤部、④妻壁アーチ横坑側、⑤妻壁主変圧器室側

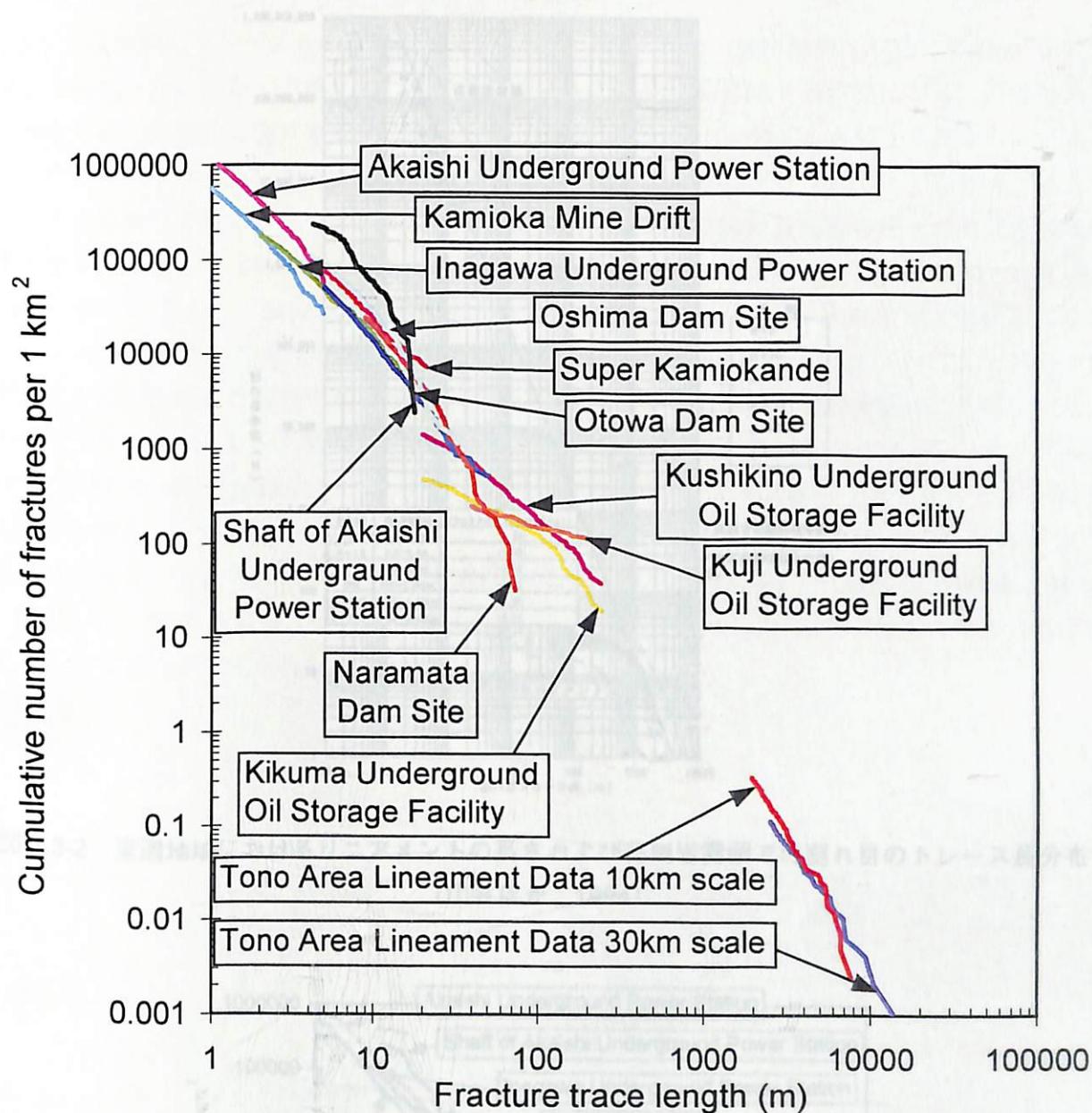


図 3.3-1 亀裂のトレース長累積頻度分布（観察面積比を用いて  $1\text{km}^2$  あたりの亀裂数に規格化）

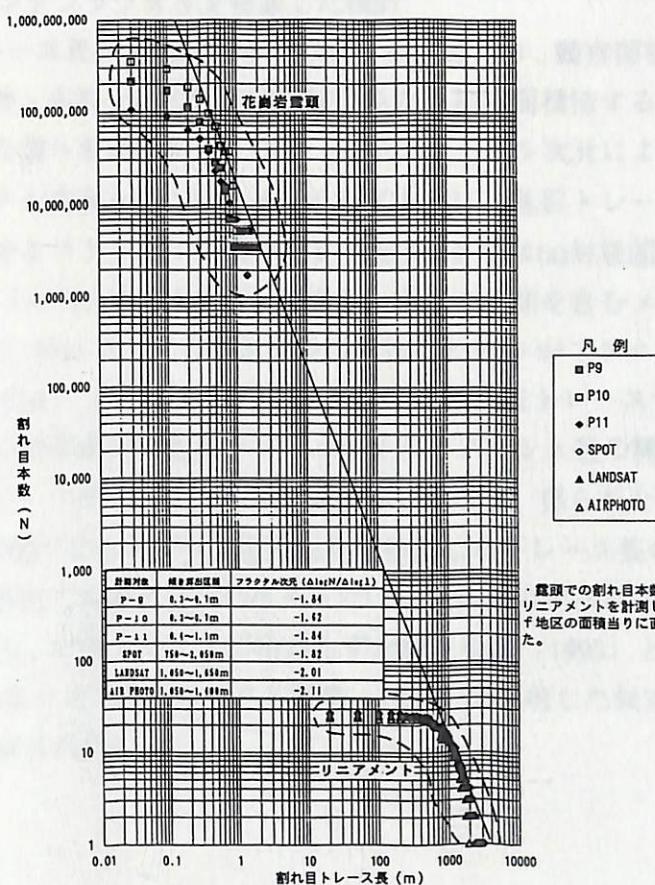


図 3.3-2 東濃地域におけるリニアメントの長さおよび花崗岩露頭での割れ目のトレース長分布  
(山井ほか、1994)

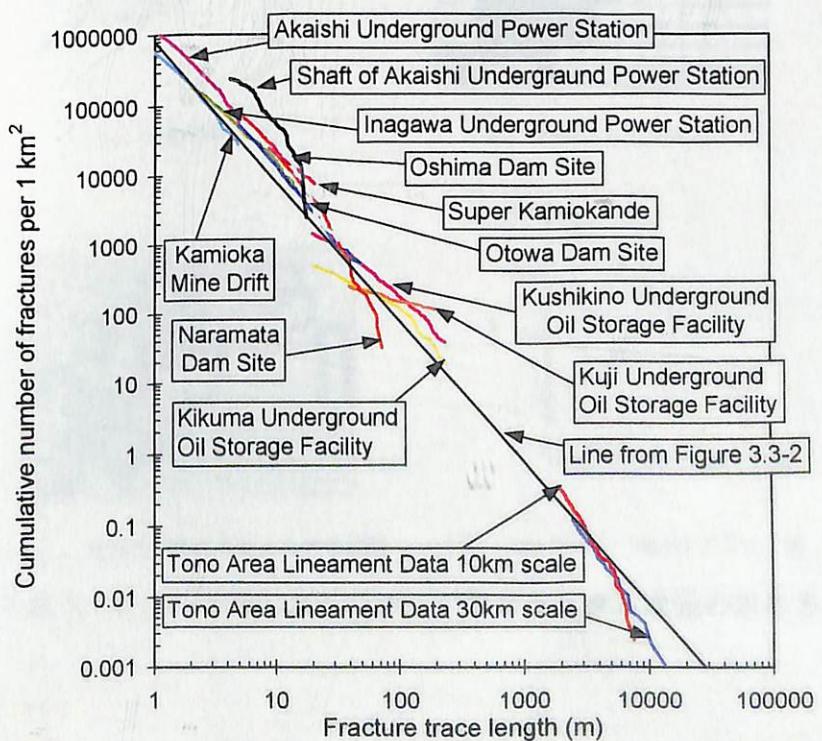


図 3.3-3 亀裂のトレース長累積頻度分布（図 3.3-2 との比較）

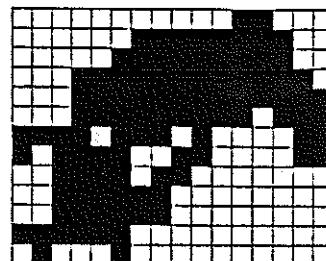
### 3.4. ボックスカウンティングフラクタルを考慮した検討

図3.3-1では亀裂のトレース長累積頻度分布を作成するにあたり、観察面積比を用いて  $1\text{km}^2$ あたりの亀裂数に規格化した。大野・小島（1992）は規格化にあたり単に面積倍するのではなく、観察断面における亀裂の分布の空間的な偏りを考慮して、パターンのフラクタル次元による補正を提案している。ここで、パターンのフラクタル次元とは、図3.4-1に示すように、亀裂トレースマップをボックスカウンティング法で解析して求めるフラクタル次元である。図3.4-1では(a)対象图形の任意の範囲を粗度の異なるメッシュに分割して（メッシュサイズを $r$ とする）图形の一部を含むメッシュの数 $N(r)$ の関係を求め、(d)図に示されるように $N(r) \propto r^{-D}$ の関係が満たされたとき $D$ がフラクタル次元と定義される。

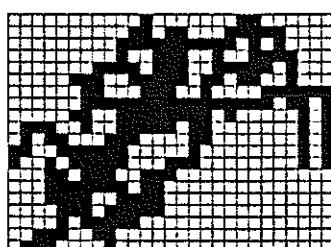
亀裂トレース図を用いてボックスカウンティング法により亀裂トレースマップのパターンのフラクタル次元を求めた。解析の結果求められるメッシュサイズとメッシュ数の関係を図3.4-2に、求めたパターンのフラクタルとトレース長のフラクタルを表3.4-1に示す。得られたパターンのフラクタル次元を用いて、大野・小島（1992）にしたがって亀裂数を規格化したトレース長のフラクタル分布を図3.4-3に示す。この図から、本研究で対象となったサイトでは東濃地域のデータは大野・小島（1993）よりも若干亀裂数が少ないものの、岩種・サイトに拘わらず大野・小島（1993）とほぼ同様の結果（図3.4-4参照）が得られ、第2次取りまとめ（サイクル機構、1999）で採用した仮定、「亀裂の長さはべき乗分布に従う」の妥当性が確認された。



(a) 対象图形



(b) 粗視化した対象图形



(c) 粗視化の度合を変えた対象图形

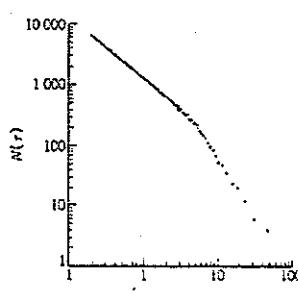
(d)  $\log N(r)-\log r$ のプロット図

図3.4-1 ボックスカウンティング法によるパターンのフラクタル次元の求め方（大野、1992）

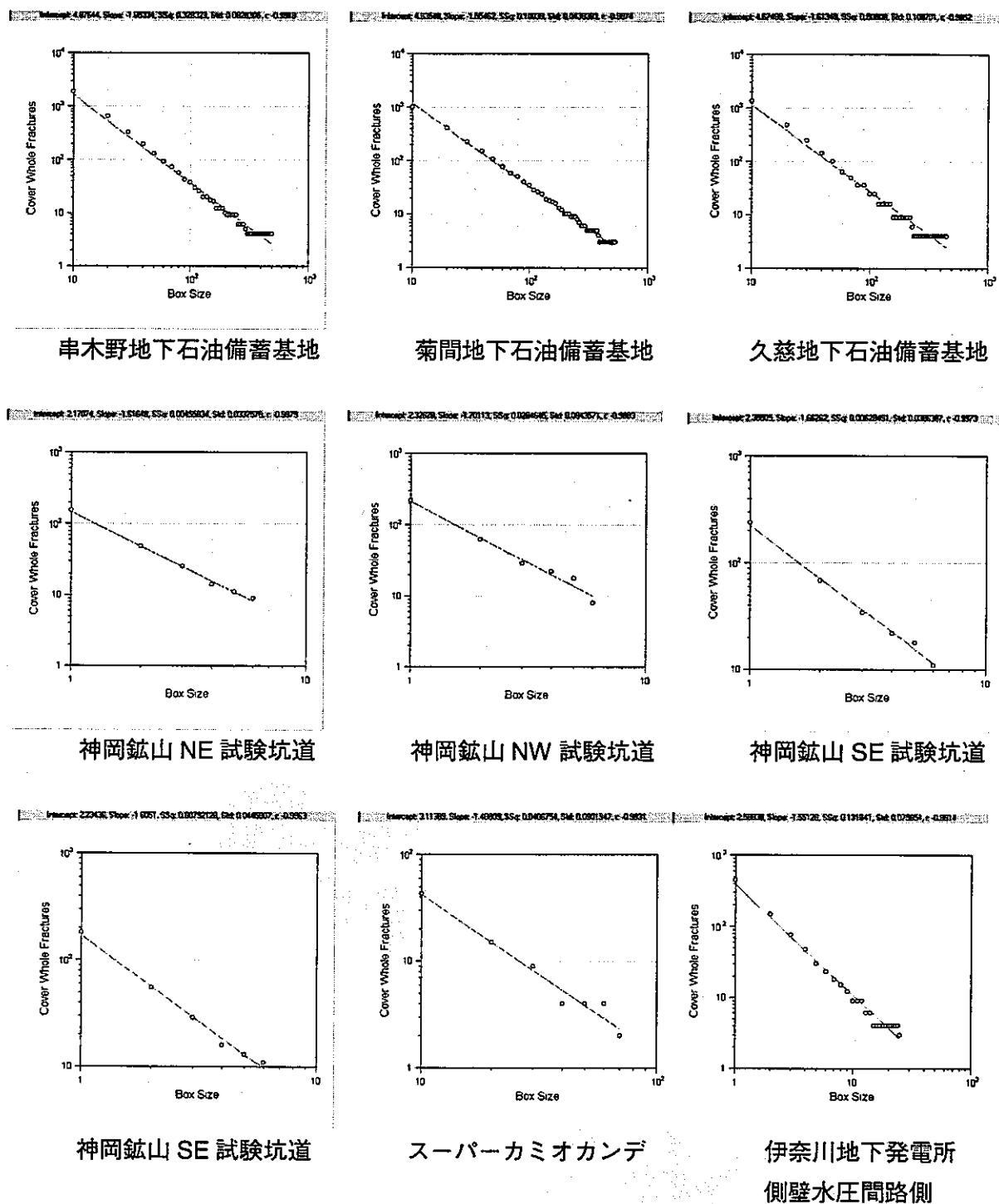


図 3.4-2 各サイトのメッシュサイズとメッシュ数の関係図

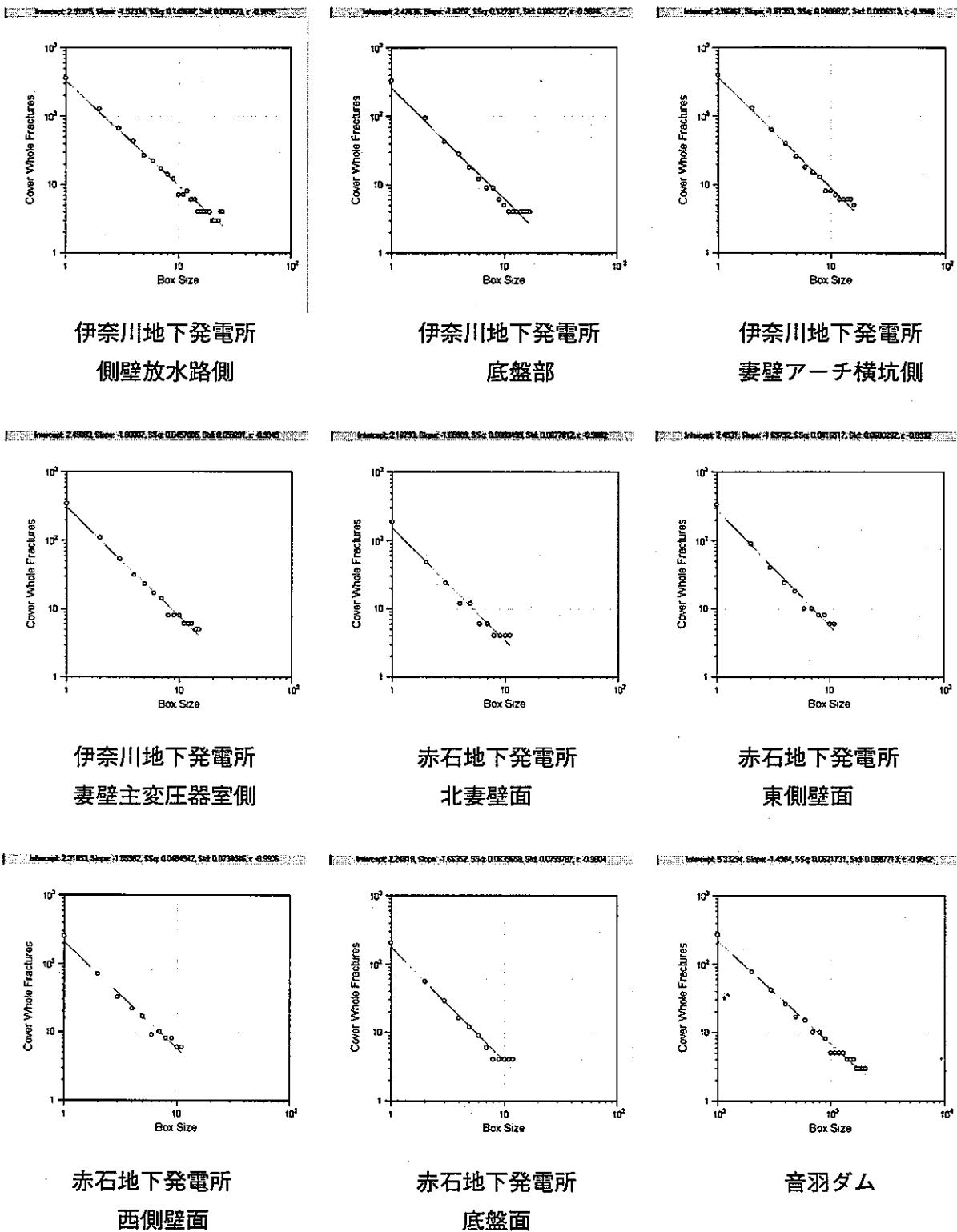


図 3.4-2 各サイトのメッシュサイズとメッシュ数の関係図（つづき）

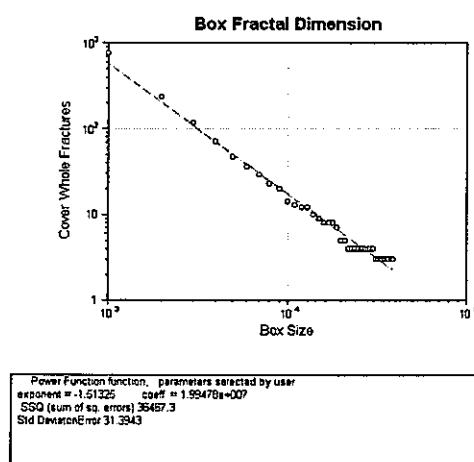
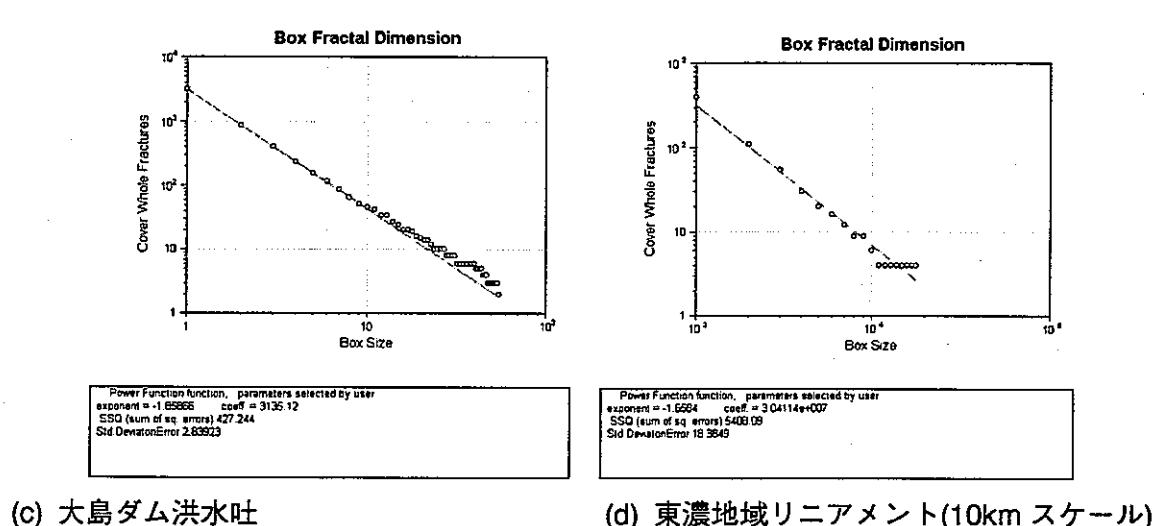
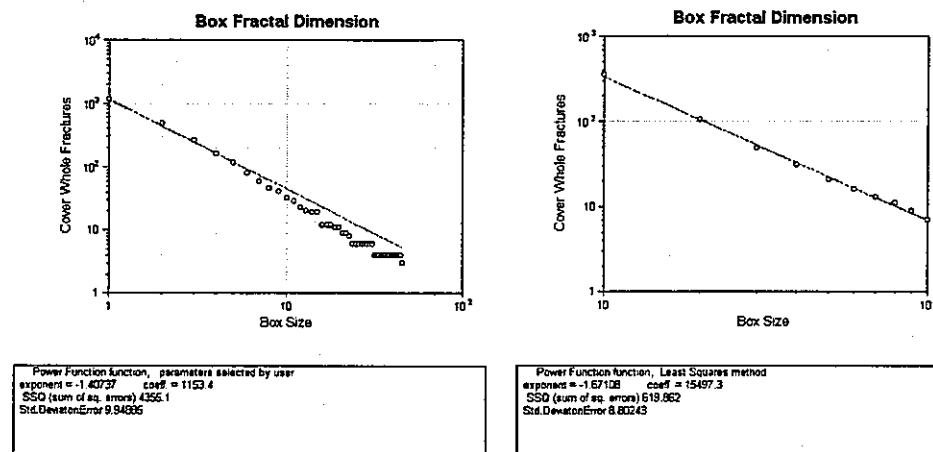


図 3.4-2 各サイトのメッシュサイズとメッシュ数の関係図（つづき）

表 3.4-1 龜裂パターンのフラクタルと亀裂トレース長のフラクタル次元

サイト		パターンの フラクタル次 元	トレース長の フラクタル次元
赤石地下発電所立坑		1.41	1.98
奈良俣ダム		1.67	2.47
大島ダム洪水吐		1.86	2.01
東濃地域	10km スケール	1.66	3.04
リニアメント	30km スケール	1.51	2.57
串木野地下石油備蓄基地		1.65	1.37
菊間地下石油備蓄基地		1.55	1.05
久慈地下石油備蓄基地		1.61	0.49
神岡鉱山試験坑道	NE 坑道	1.61	1.64
	NW 坑道	1.70	1.47
	SE 坑道	1.66	1.44
	SW 坑道	1.61	1.68
	全体	1.65	1.53
スーパーカミオカンデ		1.49	1.75
伊奈川地下発電所	側壁水圧管路側	1.55	1.76
	側壁放水路側	1.52	1.56
	底盤部	1.62	1.21
	妻壁アーチ横坑側	1.61	1.61
	妻壁主変圧器室側	1.60	1.74
	全体	1.58	1.60
赤石地下発電所	北妻壁	1.66	1.37
	東側壁	1.70	1.35
	西側壁	1.56	1.36
	底盤面	1.66	1.77
	全体	1.65	1.46
音羽ダム		1.49	2.09

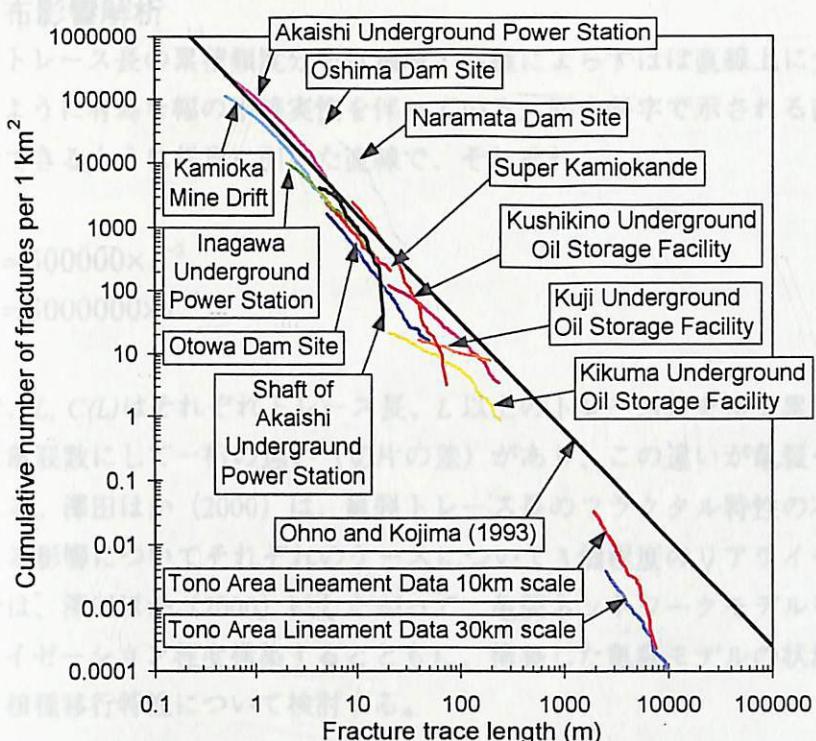


図 3.4-3 パターンのフラクタル次元を用いて規格化したトレース長のフラクタル分布

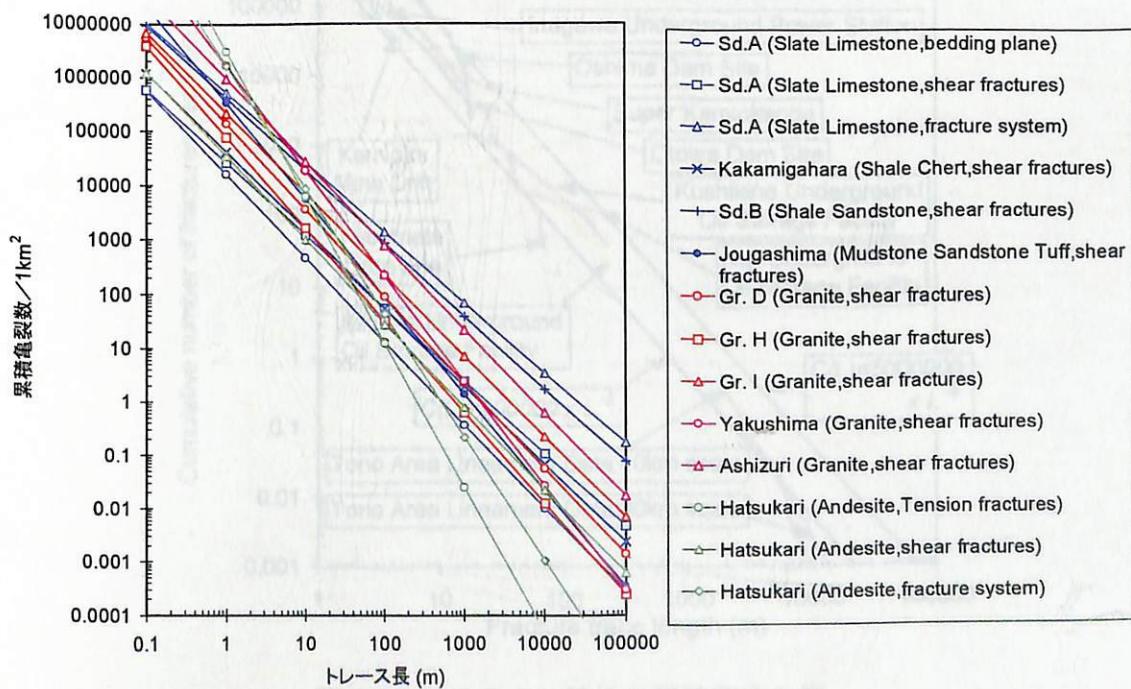


図 3.4-4 日本各地で観察されたトレース長のフラクタル分布 (大野・小島、1993)

#### 4. トレース長分布影響解析

3章では、亀裂のトレース長の累積頻度分布は地域・岩種によらずほぼ直線上に分布することを示したが、図4-1に示すように有為な幅の不確実性を伴っている。図中斜字で示される直線は、全てのデータをできるだけ包含できるように任意に引いた直線で、それぞれ

$$\text{下側直線: } C(L) = 500000 \times L^{-2}$$

$$\text{上側直線: } C(L) = 5000000 \times L^{-2}$$

で示される。ここで、 $L$ ,  $C(L)$ はそれぞれトレース長、 $L$ 以上のトレース長を持つ累積亀裂数、を示す。これらの直線の幅は亀裂数にして一桁の違い（切片の差）があり、この違いが亀裂モデルに与える影響は大きいと考えられる。澤田ほか（2000）は、亀裂トレース長のフラクタル特性の不確実性が、構築した亀裂モデルに与える影響についてそれぞれのケースについて3個程度のリアライゼーションにより検討している。ここでは、澤田ほか（2000）にしたがって、亀裂ネットワークモデルをそれぞれのケースについて10リアライゼーション程度構築するとともに、構築した亀裂モデルの状況、水理特性、物質移行特性に加えて、核種移行特性について検討する。

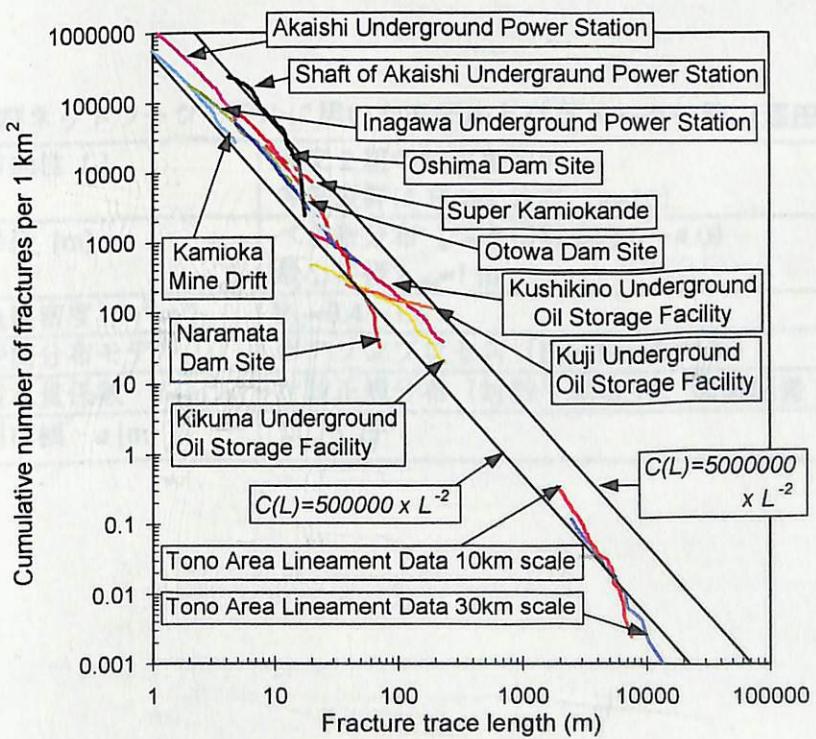


図4-1 フラクタル特性の不確実性の幅

##### 4.1. 解析条件

解析対象領域としては、 $100\text{m} \times 100\text{m} \times 100\text{m}$  の立方体領域を設定した。図4-1と同様のトレース長分布を示す亀裂ネットワークを構築するために、亀裂半径  $r$  の分布  $f(r)$  は以下のべき乗分布を用いた。

$$f(r) = \frac{b-1}{r_{min}} \left( \frac{r_{min}}{r} \right)^b \quad (r \geq r_{min}, b > 1)$$

$r_{min}$  : 亀裂半径の最小値 [m]  
 $b$  : 任意のべき指数 [-]

ここで、図 4-1 のトレース長の累積頻度は、べき指数  $b$  だけではなく亀裂密度にも影響を与える。亀裂ネットワークモデルの構築にあたっては、単位体積あたりの亀裂表面積 ( $\text{m}^2/\text{m}^3$ ;  $P_{32}$  と呼ぶ) が用いられる。本解析では  $b$  と  $P_{32}$  をパラメータとし、構築した亀裂ネットワークモデルに任意の水平断面を設定して測定したトレース長分布を図 4-1 の範囲と比較するとともに、それが地下水流動に与える影響を検討することとした。解析に用いる他のパラメータを表 4.1-1 に示す（澤田ほか、2000）。解析はそれぞれのケース 10 リアライゼーションについて実施した。

なお、 $b$  は 3.0、3.2、3.4、3.6、3.8、4.0 と変えてモデルを作成した。その際、 $P_{32}$  は 0.8 の固定値を設定した。また、 $P_{32}$  については 0.4、0.6、0.8、1.0、1.2、1.4、1.6 と変えてモデルを作成した。その際、 $b$  は 3.0 の固定値を設定した。これら構築したモデルに任意の水平断面を設定し、それに交差する亀裂のトレース図を図 4.1-1、図 4.1-2 に示す。また、それらのトレース長のフラクタル特性と図 4-1 との比較を図 4.1-3 に示す。これらの図から明らかなように、べき乗数  $b$  が増加するにつれて大きな亀裂の数が減少し相対的に小さな亀裂の数が増加していることがわかる。また、亀裂密度  $P_{32}$  の増減により大きな亀裂と小さな亀裂の相対的な存在頻度に違いはなく、モデル全体の亀裂数が増減することがわかる。

表 4.1-1 亀裂ネットワークモデルに用いたモデルとパラメーター一覧（澤田ほか、2000）

方向性 [-]	直交 2 組の鉛直亀裂群 各亀裂群は Fisher 分布 ( $\kappa=10$ )
半径 [m]	べき乗分布 (べき指数 $b=3.0 \sim 4.0$ ) 最小半径 $r_{min}=1 \text{ m}$
亀裂密度 [ $\text{m}^2/\text{m}^3$ ]	$P_{32}=0.4 \sim 1.6$
空間分布モデル	ポアソンプロセス (Baecher モデル)
透水量係数 $T [\text{m}^2/\text{s}]$	対数正規分布 (対数平均 -8.99、標準偏差 1.07)
開口幅 $a [\text{m}]$	$a=2\sqrt{T}$

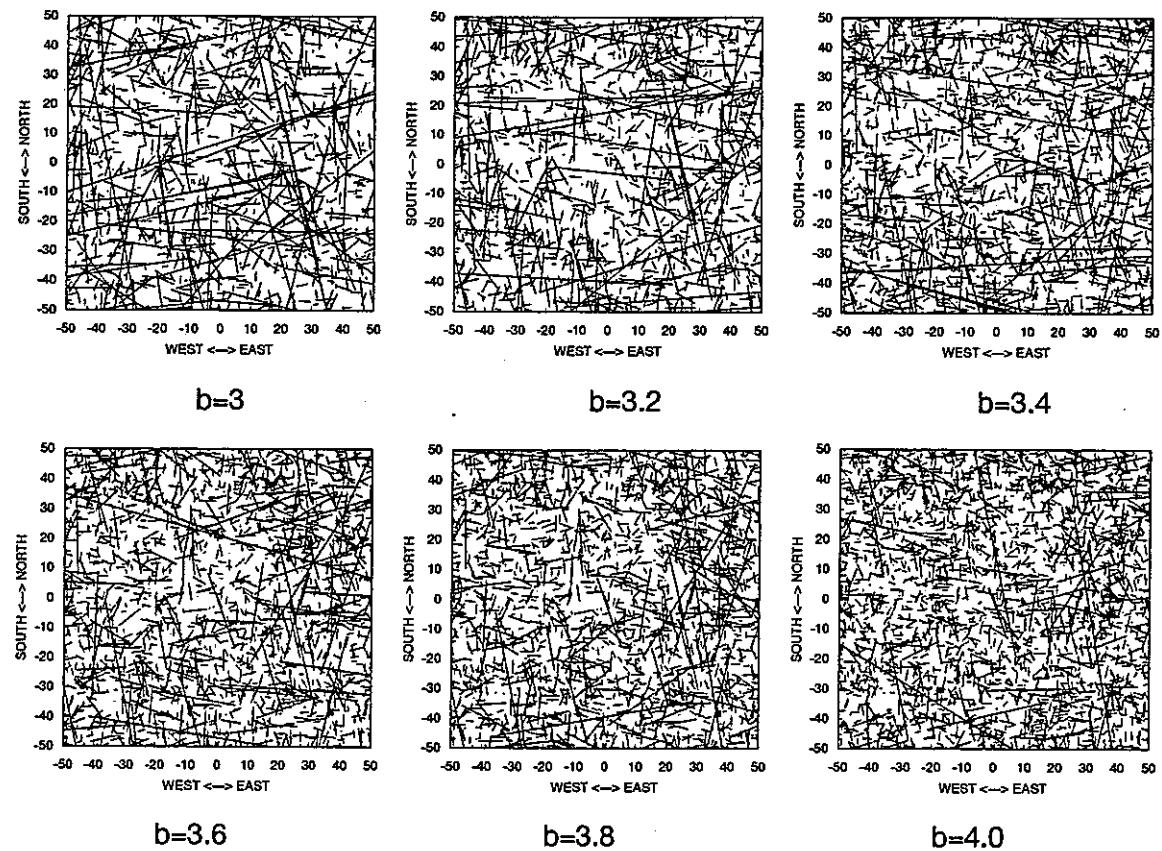


図 4.1-1 龜裂半径分布のべき乗数  $b$  を変えたケースにおける任意の水平面内における亀裂トレース図

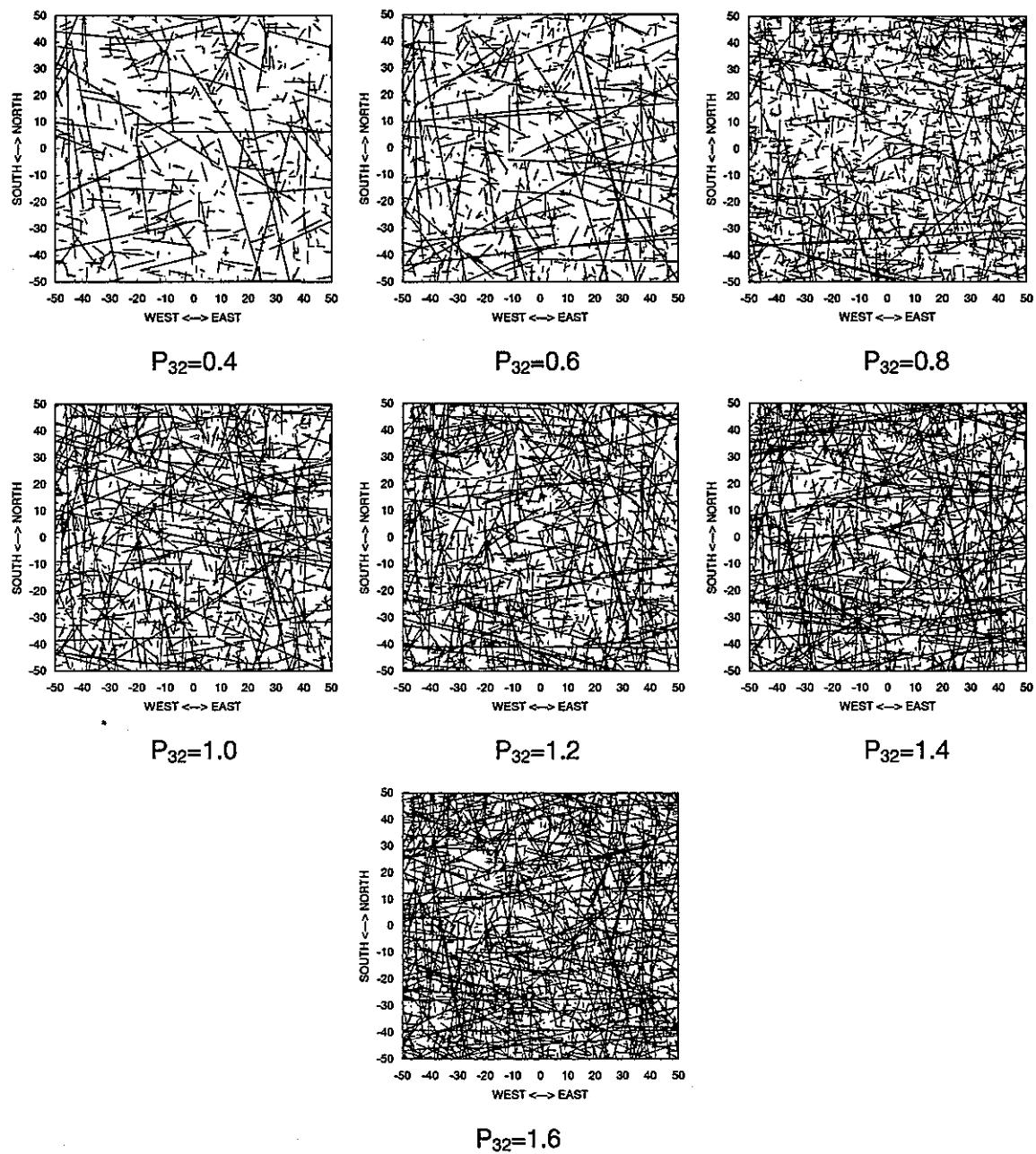


図 4.1-2 三次元亀裂密度  $P_{32}$  を変えたケースにおける任意の水平面内における亀裂トレース図

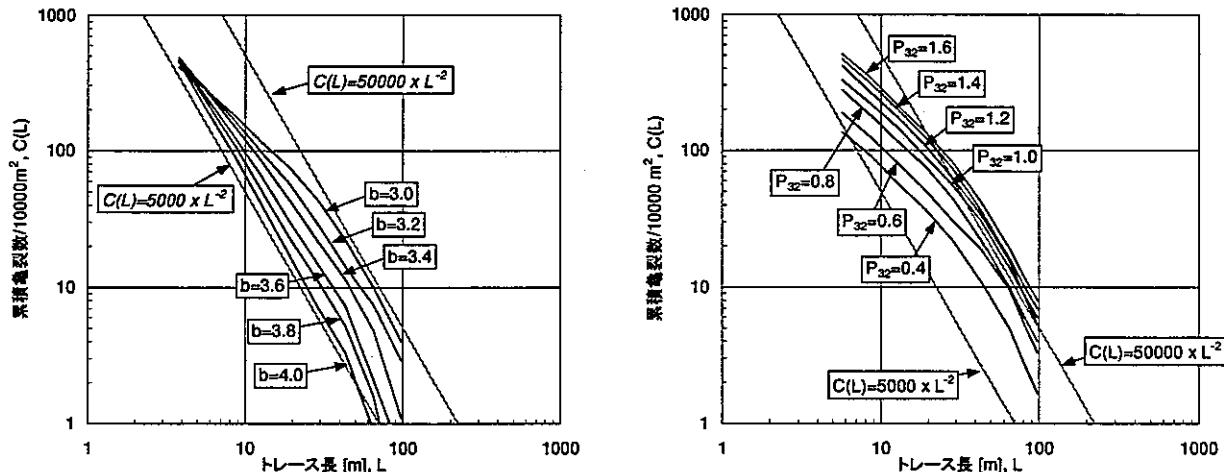


図 4.1-3 任意の水平断面における亀裂トレース長分布のフラクタル特性

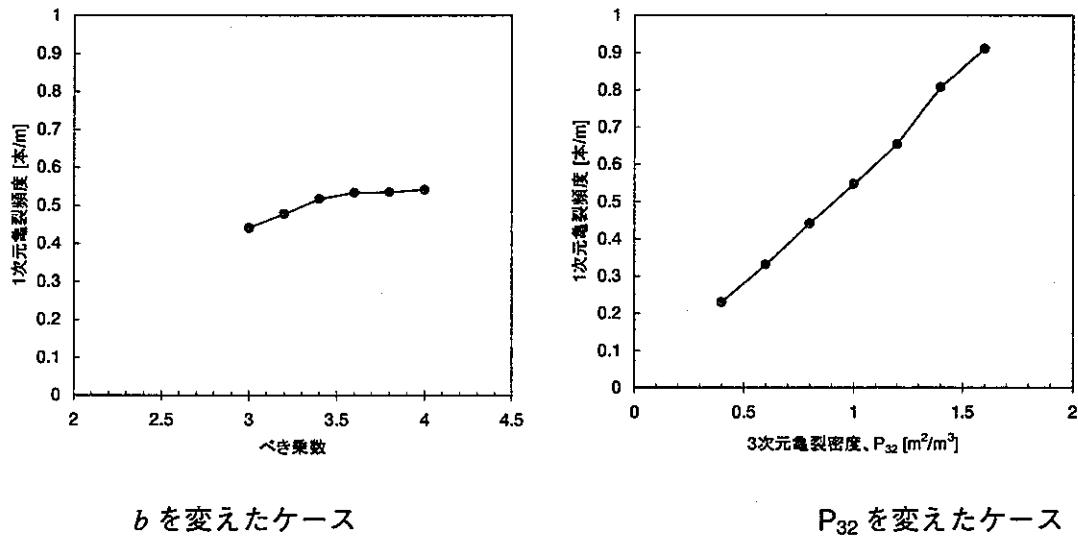


図 4.1-4 各モデルの一次元亀裂頻度

一般に原位置で測定される亀裂密度は任意の側線に交差する亀裂数（一次元亀裂頻度）で表されることが多い。構築したそれぞれのモデルに任意の側線を設定して求めた一次元亀裂頻度とべき乗数 $b$ または三次元亀裂密度 $P_{32}$ との関係を図 4.1-4 に示す。この図から、べき乗数 $b$ が変化しても一次元亀裂頻度は大きく変わらない一方で、一次元亀裂頻度と三次元亀裂密度には良い相関を示すことがわかる。

## 4.2. モデルの平均的な透水係数

構築したモデルそれぞれについて、図 4.2-1 に示すように境界条件を設定し、定常浸透流解析の結果から、モデルの平均的な透水係数を評価した。本解析では、第 2 次とりまとめレンスケース（サイクル機構、1999）と同様の動水勾配（0.01）を用いた。解析の結果、求められた透水係数を図 4.2-2 に示す。その結果、べき指数が増加するにつれて、モデルの平均的な透水係数が低下することがわかった。これは、べき指数の増加にしたがい、大きな亀裂の数が減少し、相対的に小さな亀裂の数が増加したために、亀裂と亀裂の連結性が低下したためと考えられる。また、3 次元亀裂密度の増加に比例してモデルの平均的な透水係数が増加することがわかる。

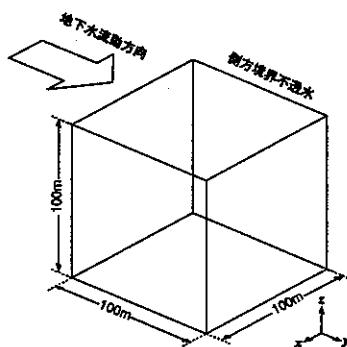


図 4.2-1 モデル化対象領域と境界条件

地下水水流動方向に沿って任意の動水勾配を保つように、固定水頭境界を与える

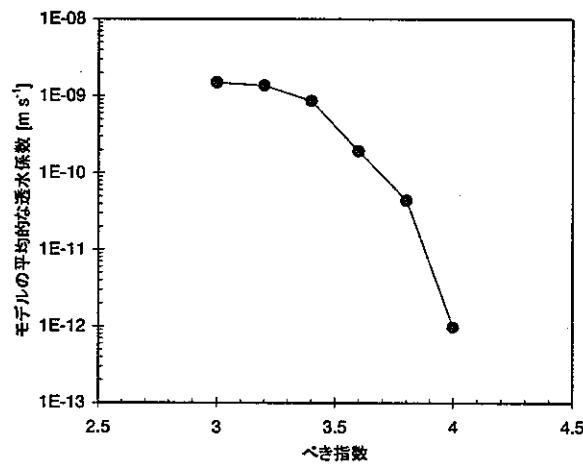
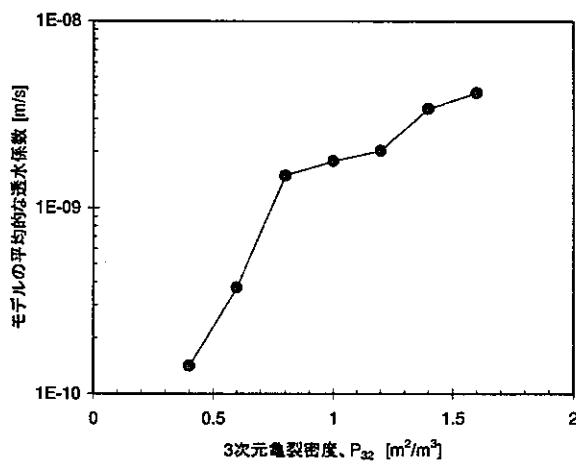
*b* をえたケースP<sub>32</sub> をえたケース

図 4.2-2 モデルの平均的な透水係数

### 4.3. 地下水移行時間

地下水移行時間は、第2次とりまとめ（サイクル機構、1999）同様に亀裂ネットワークモデルをチャンネルネットワークモデルに変換して核種移行ソルバーLTGを適用し、上部境界側に設定した一定濃度のトレーサーが移流分散によって下流側へ破過する様子から求める。平均的な地下水移行時間は、下流側への破過濃度が50%に達した時間 ( $t_{50}$  と呼ぶ；図4.3-1参照）により求める。

解析の結果（図4.3-2参照）、べき指数が増加するにつれて平均的な地下水移行時間も増大することがわかった。これは、べき指数が増加するにつれてモデルの平均的な透水係数が低下する上記の結果と整合的である。また、亀裂密度が増加するにつれて平均的な地下水移行時間が減少する傾向が見られるものの、3次元亀裂密度が0.8以上になるとおよそ50～70年の範囲で推移している。これは、3次元亀裂密度が増加するにつれてモデルの平均的な透水係数は増大するものの、個々の移行経路の透水量係数値は相対的に増減せず、ある程度以上の亀裂密度になれば、平均的な地下水移行時間に与える影響が小さくなるためと考えられる。

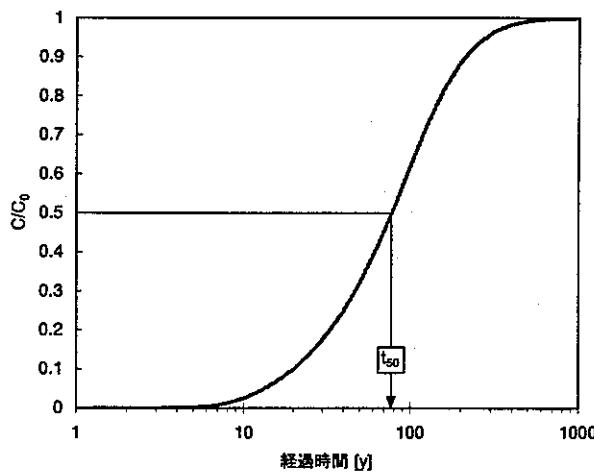


図 4.3-1 下流側境界におけるトレーサーの破過の様子と  $t_{50}$   
 $b=3.0$ 、 $P_{32}=0.8$  のケース (10 リアライゼーションの平均)

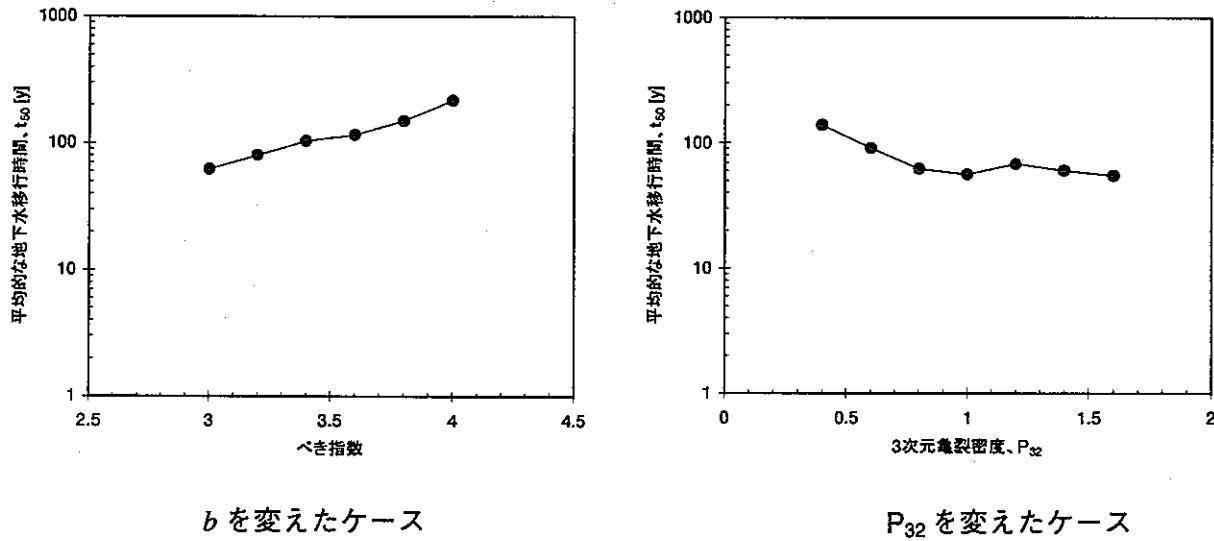


図 4.3-2 平均的な地下水移行時間

#### 4.4. 核種移行遅延効果

核種移行解析は 4.3 節と同様に、亀裂ネットワークモデルをチャンネルネットワークモデルに変換し、核種移行解析ソルバー LTG を用いた。解析の対象とした核種は第 2 次とりまとめレファレンスケース（サイクル機構、1999）で支配核種であり系列核種ではない Cs-135 ならびに Se-79 とした。核種移行パラメータ（例えば、マトリクス拡散深さ、拡散係数、Kd 等）についても、第 2 次とりまとめ（サイクル機構、1999）と同じ値を用い（表 4.4-1 参照）、レファレンスケースにおけるガラス固化体 1 本あたりの人工バリアからの核種移行率（図 4.4-1 参照）を上流側境界条件とした。

解析の結果を図 4.4-2、図 4.4-3 に示す。これらの図は、下流側断面における核種移行率の最大値をプロットした。赤線は上流からの核種移行率の最大値を示している。べき指数  $b$  をえたケースでは  $b$  が増加するにつれて、核種移行率の最大値が減少するものの、3 次元亀裂密度  $P_{32}$  をえたケースでは、その増減に対して核種移行率の最大値は大きく変動しない。べき指数を変えたケースについては、べき指数が増加するにつれて核種移行率の最大値が減少する。これは、べき指数が増加するにつれてモデルの

平均的な透水係数も低下し、地下水移行時間が増大する結果と調和的である。一方で亀裂密度を変えたケースでは、亀裂数の増大によりモデルの平均的な透水係数は増大するものの、個々の移行経路の透水量係数値は相対的に増減しないため個々の移行経路の流速に顕著な変化がないため核種移行率に大きな影響を与えない。

表 4.4-1 核種移行パラメータ一覧

名 称	設 定 値
分散長	2 m
マトリクス拡散寄与面積率	50 %
マトリクス拡散深さ	0.1 m
有効空隙率	2 %
乾燥密度	2640 kg/cm <sup>3</sup>
実効拡散係数	$3 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
分配係数	Se: 0.01 m <sup>3</sup> /kg, Cs: 0.05 m <sup>3</sup> /kg

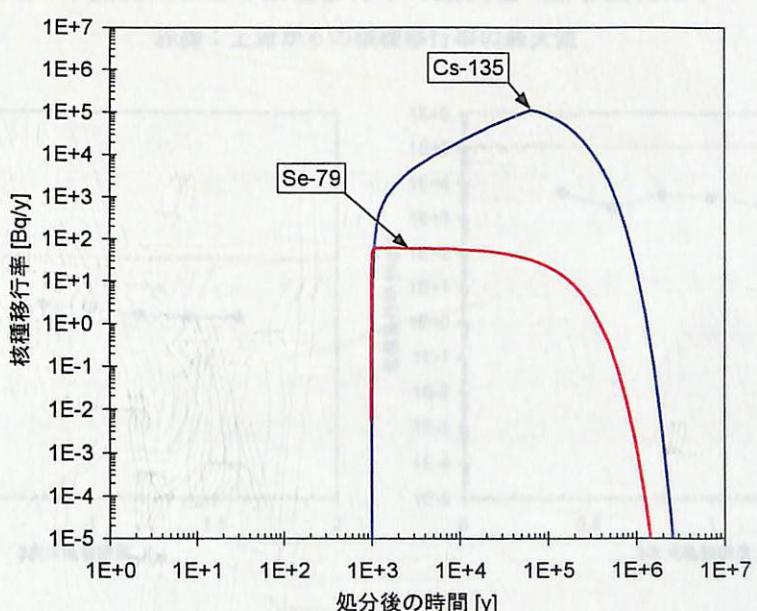
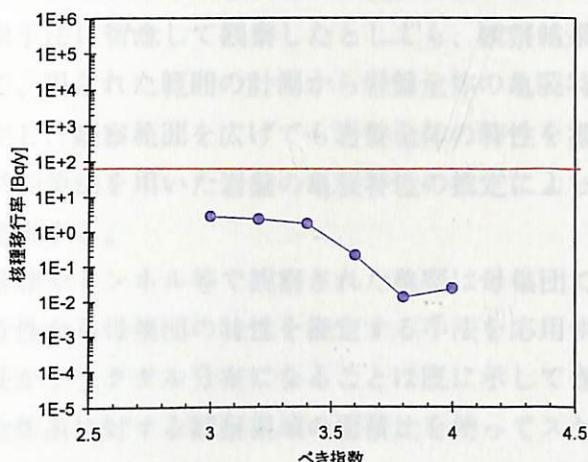
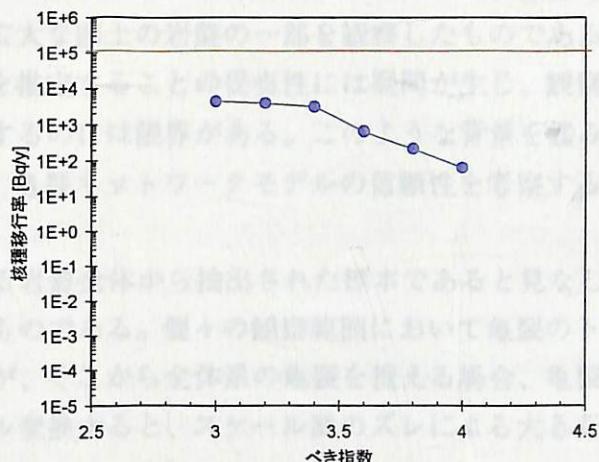


図 4.4-1 上流側からの核種移行率

## 放射ネットワークモデルの信頼性評価手法について



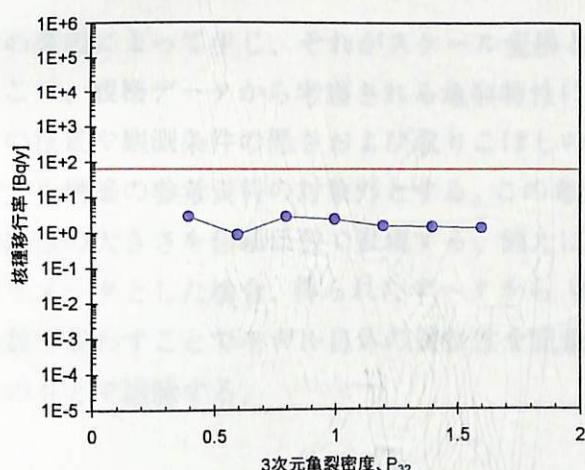
(a) Se-79



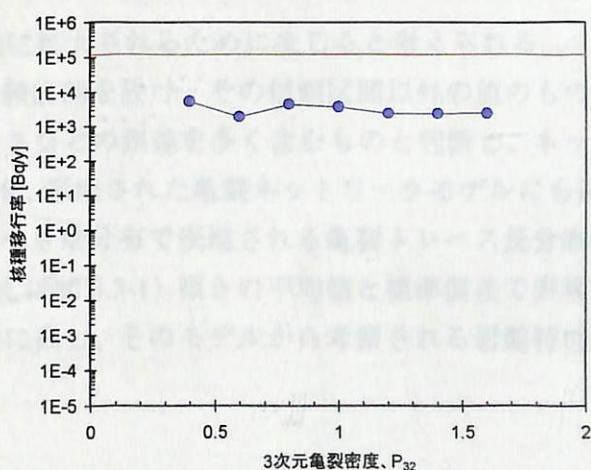
(b) Cs-135

図 4.4-2 下流側における核種移行率の最大値 (b を変えたケース)

赤線：上流からの核種移行率の最大値



(a) Se-79



(b) Cs-135

図 4.4-3 下流側における核種移行率の最大値 ( $P_{32}$  を変えたケース)

赤線：上流からの核種移行率の最大値

## 5. 亀裂ネットワークモデルの信頼性評価手法について

これまで収集した各現場での亀裂特性は、さまざまな岩種と地域から選択されたもので、地質要因や計測手法に留意して観察したとしても、観察結果は広大な国土の岩盤の一部を観察したものである。従って、限られた範囲の計測から岩盤全体の亀裂特性を推定することの妥当性には疑問が生じ、観察数を増やし、観察範囲を広げても岩盤全体の特性を推測するには限界がある。このような背景を鑑み、統計学的手法を用いた岩盤の亀裂特性の推定によって、亀裂ネットワークモデルの信頼性を考察する手法を提案する。

露頭やトンネル等で観察された亀裂は母集団である岩盤全体から抽出された標本であると見なし、標本特性から母集団の特性を推定する手法を応用するものである。個々の観察範囲において亀裂のトレース長がフラクタル分布になることは既に示してきたが、そこから全体系の亀裂を捉える場合、亀裂本数を全体系に対する観察領域の面積比を使ってスケール変換すると、スケール間のズレによる大きな誤差が生じる。このズレは、

- ・ 計測手法の違いによるもの：観察者の違いによる手法の違いも含む
- ・ 亀裂が空間的に均質でない場合、偏った地域特性だけで全体を判断してしまう（3.4章参照）

などの要因によって生じ、それがスケール変換と共に拡大されるために生じると考えられる。

そこで、観察データから考察される亀裂特性に信頼区間を設け、その信頼区間以外の値のものは、観測者の技量や観測条件の悪さおよび取りこぼしの多さなどの誤差を多く含むものと判断し、ネットワークモデル構築の参考資料の対象外とする。この考えを、形成された亀裂ネットワークモデルにも適用し、その誤差の大きさを信頼係数で表現する。例えば、べき乗分布で表現される亀裂トレース長分布の傾きをパラメータとした場合、得られたデータから（例えば図3.3-1）傾きの平均値と標準偏差で表現する信頼係数で表わすことでモデル自体の妥当性を定量的に表し、そのモデルから考察される岩盤特性を信頼係数のもとで議論する。

## 6. おわりに

本研究では、土木分野で広く集められている亀裂データのうち、主に亀裂の長さに着目してデータを解析した。その結果、亀裂のトレース長はべき乗則にしたがい、地域や岩種によらずほぼ同様の範囲に分布することが分かった。この結果は、これまで亀裂の長さのデータは調査対象地域に存在する露頭や坑道のスケールに依存してきたが、本成果を活用することでこれらのデータの入手が困難な調査初期段階においてもある程度亀裂の長さの分布を予測可能になると期待される。

しかしながら、その幅は亀裂数にして一桁の違いがあり、この違いが亀裂ネットワークモデルに与える影響は大きいと考えられ、このべき乗分布特性をパラメータに構築した亀裂ネットワークモデルの核種移行遅延特性に与える影響を検討した。その結果、個々の亀裂の透水特性を変えずに亀裂密度を増減させた場合には、モデル全体の透水量には影響を与えるものの核種移行遅延には大きな影響を与えないことが分かった。また、べき指数を増加させて相対的に大きな亀裂の数を少なくすると亀裂の連結性が低下し、べき指数3.4以上になると急激に核種遅延効果が増大することが分かった。

さらに、これらの知見に基づいて構築した亀裂ネットワークモデルの信頼性を示す方法として、既存のデータから推定された分布特性パラメータの平均値と標準偏差で表現される信頼係数でモデル自体の妥当性を定量的に表し、そのモデルから求められる岩盤特性を信頼係数のもとで議論する方法を提案した。しかしながら、本研究では提案に留まりその実例を示すことができなかった。今後は、この信頼性評価手法を本研究で求められた亀裂トレース長のべき乗分布に適用しその実用性を検討してゆく必要がある。

## 7. 参考文献

- 大西有三・大津宏康・田中誠・崎谷和貴 “ダム基礎岩盤のグラウト止水効果の評価に関する一考察”、地下水地盤環境に関するシンポジウム'98 発表論文集、pp. 109-120 (1998)
- 大西有三・大津宏康・田中誠・崎谷和貴 “逆解析によるグラウトの止水性評価に関する研究”、第 34 回地盤工学研究発表会講演概要集、pp. 1237-1238 (1999)
- 大野春雄 “土木工学におけるフラクタル理論の応用”、土木施工、33巻、7号、pp.5-11 (1992)
- 大野博之、小島圭二 “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 (1992)
- 大野博之、小島圭二 “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 (1993)
- 核燃料サイクル開発機構 “わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第 2 次とりまとめ－ 分冊 3 地層処分システムの安全評価”、JNC TN1400 99-023 (1999)
- 核燃料サイクル開発機構 “平成 12 年度地層科学研究情報・意見交換会－要旨集”、JNC TN7410 2000-003 (2000)
- 澤田淳、井尻裕二、坂本和彦、亘真吾 “亀裂性岩盤を対象とした天然バリア中の核種移行解析”、JNC TN8400 99-093 (1999)
- 白旗秀紀、玉井昭雄、金田勉 “調査結果に基づく亀裂群の定量化と亀裂分布予測手法”，第 9 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、pp.283-288 (1994)
- 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－”，間組技術研究所年報、pp. A-129-A-148 (1984)
- 林信義、田中耕一、北村恵、上山邦彦 “大規模地下空洞の施工実績 地下石油備蓄での例-”，地下石油備蓄基地建設関連発表文献集、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)，p344-440 (1994)
- 山井忠世、角南基亮、小林公一 “東濃地域を対象にしたリニアメント解析(その 1)”、PNC TJ7361 94-002 (1994)