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 —

大野博之*・小島圭二**

Fractal on the Spatial Distribution of Fractures in Rock Mass

Part 2 : Fractal Characteristics and Variability of Fractal Distribution

Hiroyuki OHNO* and Keiji KOJIMA**

Key words : 岩盤割れ目 fractures in rock mass, フラクタル fractal, フラクタル特性 fractal characteristics, フラクタル分布のばらつき variability of fractal distribution

Abstract

The authors examine the variability of the distribution of the fracture trace length in some objective districts. Further, we elucidate the influence of the geological factors (the rock type, the age of rock mass and the geological processes of fracturing) on the fractal characteristics (the fractal dimension and the intercept of the fractal distribution).

On ten objective districts dominated by the shear fractures, the fracture trace length was investigated. Four objective districts were governed by the sedimentary rocks (slate, sand stone etc.). Five objective districts were granitic area. Another objective district was covered by andesite. Further, four objective districts investigated to the tension fractures were one dominated by the cooling joints in granite, the other dominated by the cross joints in alternation of sand and mud stone, the other two dominated by the sheeting joints in granitic rocks.

The results are summarized as follows :

- 1) The frequency distribution of the scan grid, in which fractures longer than a certain length l are numbered N , shows the log-normal distribution. The standard deviation σ of $\log N$ calculated from the average fractal distribution curve has the range of 0.16 to 0.29.
- 2) The fractal dimension D_f of fracture trace length is influenced significantly by the geological processes of fracturing, particularly, the difference of the tension and the shear fractures. The tension fractures affected by the geological boundary do not seem to have the fractal property.
- 3) From the measured data, the fractal dimensions D_g of fracture pattern are 1.5~2.0 regardless of the geological factors.
- 4) The C-value (the intercept of fractal distribution) for the igneous rock increases with the age of rock mass.
- 5) The variability of fracture distribution is reduced by the classification of the fractal characteristics because the variability is affected by the multi-fractal property of the fracture system. The measuring method is also another main cause of the variability among the different scales.

* 東京大学工学部, 現, 応用地質(株) Faculty of Engineering, University of Tokyo, Now at OYO Corporation

** 東京大学工学部 Faculty of Engineering, University of Tokyo

1. はじめに

MANDELBROT によって提唱されたフラクタルの概念はさまざまな自然界の複雑性を表現するのに有効であることが、多くの研究者によって示されている。

フラクタルの特徴の1つは、スケーリングと呼ばれるスケール不変性である。対象構造物で問題となる規模の割れ目系を把握する場合には、そのスケールでの調査・計測が最も有効であるが、なんらかの事情で調査・計測が不可能な場合には、別のスケールから予測・評価する必要がある。このような場合におけるスケール変換の方法は、技術者の経験的判断に任されてきたのが現状である。

最近の研究では、岩盤割れ目の幾何パターンがフラクタルであるということが示され^{1)~3)}、さらに、割れ目のトレース長さ^{3)~5)}や断層の破碎幅⁵⁾、割れ目の密度*の空間分布^{6),7)}などがフラクタル性を示すことが報告されている。

このことは、フラクタル性を基にして、岩盤割れ目のスケール変換を実施することが可能なことを示唆している。しかしながら、岩盤割れ目の場合、フラクタルとは言っても完全に自己相似ではなく、統計的な自己相似であり、割れ目の分布にはばらつきが生じるはずである。また、同一の岩体であっても割れ目の成因や形成過程が異なる割れ目群が混在している場合が多く、これらの割れ目群は同じフラクタル特性を持っているとは限らないため、適切な分類を行わないと、これもまた割れ目分布のばらつきの大きな原因となる。これらを把握した上でないと、スケール変換による評価を誤ったものにする可能性がある。

実際の岩盤割れ目のスケール変換の実用的な方法を確立するためには、岩盤割れ目のフラクタル分布の実態を把握し、またそのばらつきの原因を整理し、計測方法や割れ目の分類方法に起因するばらつきを低減する方策を練ることが重要である。本論文では、いくつかの地質要因の異なる地域の実測データを用いて、フラクタル特性の違いがどのような地質要因に影響されるのかについて検討を行い、さらに、岩盤割れ目分布のばらつきとその低減の可能性について論じた。

* 割れ目の密度とは、ある計測領域内に計測される割れ目の本数または割れ目の総長さを計測領域の面積で割ったものである。また、それぞれ本数密度、長さ密度と呼ぶことにする。

2. フラクタル特性・フラクタル分布のばらつきとは

2.1 フラクタル特性とは

フラクタル性は、ある要素がその要素に関連した個数と両対数グラフ上で直線関係にあることで確かめることができる。この時の直線の傾きがフラクタル次元に比例する。例えば、割れ目のトレース長さの分布は次式のようなフラクタル分布となり、その傾きからフラクタル次元が求められる³⁾。

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

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)、

D_f : 長さのフラクタル次元

こうしたフラクタル次元は、フラクタル分布の特性の違いを示す指標となる。例えば、長さのフラクタル次元は、その値が大きいほどある一定の視野の中に相対的に長さの小さいものが多く分布し、逆に、フラクタル次元が小さいほど長さの大きいものが多く分布しているように見えることを示している。

割れ目にはさまざまな成因があり、また、地史的には形成過程の違いがある。この結果、割れ目の分布形態も平行板状のもの、立方格子状のもの、また、それらの重なったものなどさまざまな違いを示す。このような違いもフラクタル次元に現れると考えられる。

また、(1)式のようなフラクタル分布の切片も割れ目のフラクタル特性を示すものと捉えられる。割れ目のトレース長さ等のフラクタル分布を見た場合、フラクタル分布の切片は、ある領域における割れ目の本数を示している。この本数は割れ目の密度と関連する。したがって、割れ目の形成過程などの違いによって切片の値が異なってくる可能性が考えられる。

このように、フラクタル次元やフラクタル分布の切片は、フラクタル特性を知る上での重要な指標となる。

2.2 フラクタル分布のばらつきとは

割れ目系全体がフラクタル性を示すのであれば、割れ目の空間的な分布には偏りが生じる可能性がある。特に、二次元平面におけるパターンのフラクタル次元 D_g (割れ目の幾何パターンをボックスカウンティング法³⁾によって求めたフラクタル次元) が2.0より小さくなることがいくつか報告されており^{1)~3)}、割れ目のほとんど存在しない部分や、それとは逆に割れ目の密集する部分が存在し、場所の違いによるばらつきが生じる場合が

Fig. 1 The location map of the objective districts.

The dominant orientations of fracture system at each objective district are described by the rose diagram or the wulff net.

ある（このような性質を，ここではフラクタル性による空間分布の偏りと呼ぶ）。つまり， $D_g < 2.0$ の場合には，一様ランダムな空間分布ではなく，フラクタル的な空間分布となる可能性が大きい。

また，フラクタル性は成立するものの，1つのフラクタル次元で表現できないような場合がある。つまり，全体集合 U はフラクタル性を示すが，ある集合 u_1 とそれとは別の集合 u_2 ($u_1 \in U$, $u_2 \in U$, $u_1 \cap u_2$ は空集合) が異なったフラクタル特性を持つ場合，全体集合 U を1つのフラクタル次元で表すことができないような場合がある（このようなフラクタルをマルチフラクタルと呼ぶ）。したがって，このような全体集合 U は，いくつかの集合 u_i に分類した取り扱いが必要になる。

岩盤割れ目はフラクタル性による空間分布の偏りやマルチフラクタル性を持っていると考えられ，これらの性質からトレース長さなどのフラクタル分布にはばらつきが生じると思われる。スケール変換を行う場合に，このばらつきがどの程度であるのかを捉えることは，その変換の精度を知る上で重要となる。

一般に，ある領域にどの程度の規模の割れ目がどの程度存在するかを知ることが工学的には重要となる。したがって，割れ目分布のばらつきは，工学的な立場から，

割れ目の本数密度の場所によるばらつきとして捉えるのが有効と思われる。そこで，本論文では，割れ目のトレース長さの分布のばらつきがどうなるかを検討した。

3. 岩盤割れ目分布の事例

3.1 割れ目の計測地域と地質

前述した割れ目分布のフラクタル特性とばらつきを見るために，いくつかの地域についての岩盤割れ目を計測した。用いたデータは，Fig. 1 に示す10地域についての割れ目のトレース長さである。

Sd.A 地域は，北部北上山地の古生代二疊紀～中生代ジュラ紀の粘板岩・輝緑凝灰岩・石灰岩からなる地域である。粘板岩や輝緑凝灰岩は，全体的に片理構造が発達している。また，比較的大きな断層系と小断層系の2系列のものが認められる一方，層理面にはほぼ平行と垂直な引張りによると思われる割れ目群*が発達している。

Sd.B 地域は，山口県豊浦郡の中生代ジュラ紀に形成

* せん断割れ目は，他の割れ目や地層をずらすような断層のほかに，断層やずれを伴う割れ目に付随して発生したと思われる割れ目も含んでせん断割れ目とした。引張り割れ目は，火山岩などの冷却時に生じた割れ目やシーティングジョイントなどの割れ目を引張り割れ目とした。

された豊浦層群中の砂岩と頁岩の互層の分布する地域で、断層の卓越方向として3系列のものが発達する。

城ヶ島地域は、神奈川県城ヶ島西南部の新第三紀の三崎層(砂岩・泥岩・凝灰岩)の分布する地域で、割れ目系は多数の小断層群からなっており、更新世前期から現在に至る地殻変動によって5系列の小断層群が発達する^{8),9)}。

各務原地域は、木曽川上流の岐阜県各務原の中生代三畳紀に形成されたチャートと頁岩の互層である。割れ目の方向としては、2方向のものが卓越し、共役断層(NE-SW系とNW-SE系)となっている。

Gr.D地域は、岩手県内の北部北上山地に属する中生代白亜紀の花崗岩の分布する地域である。割れ目系やリニアメントは、NWW-SEE系のものが卓越し、NE-SW系やE-W系も認められる。

Gr.H地域は、山形県朝日山地の白亜紀の花崗岩地域である。割れ目群の卓越方向はほぼ4方向のものに分類できる。

Gr.I地域は、香川県讃岐平野内の白亜紀後期～古第三紀初期にかけて形成された花崗岩地域で、割れ目は4系列のものが発達する。

屋久島地域は、新第三紀中新世中期～後期に貫入した花崗岩の分布する地域である。リニアメントは、ほぼ2系列のものが認められる。

足摺岬地域は、高知県足摺岬に分布する新第三紀中新世中期～後期に形成された花崗岩で、NE-SW系のものが卓越し、そのほかにNNW-SSE系とNWW-SEE系の割れ目群が認められる。

初狩地域は、山梨県大月市初狩の新第三紀御坂層群中の安山岩で、この露頭では2方向の卓越したせん断割れ目が発達している。また、安山岩の冷却時に生じたと思われる引張り割れ目が露頭全体にわたって広く観察される。

さらに、引張り割れ目の観察される地域として、上記の地域のほかに5地域の計測を行った。山梨県大月市笹子に分布する貫入岩(花崗岩)中に見られる冷却割れ目を計測したもの、Gr.I地域に見られる比較的幅の広い岩脈内部に存在する割れ目を計測したもの、房総半島の相模層群下部(大田代層)の砂泥互層内部に見られる層理面に直交した割れ目を計測したもの、神奈川県丹沢山地の花崗岩中に見られるシーティングジョイント、スウェーデンの片麻状花崗岩中のシーティングジョイントである。

3.2 割れ目の計測方法

割れ目の計測方法については、基本的には粗視化の度

合を変える方法を用いた³⁾。計測する割れ目の長さは、スキヤングリッド*の辺の長さに対して1/20～1/40程度まで計測した。Table 1に計測データの内容を示した。

Sd.A地域で用いたデータは、2種類のスケールの異なる調査坑壁面写真(スキヤングリッドの領域と分解能は、それぞれ、1m×1mと3cm, 50cm×50cmと0.8cm)から割れ目を抽出したものである。スキヤングリッドの数は、それぞれ8グリッド、12グリッドである。

Sd.B地域では、岩盤掘削面の割れ目をスケッチしたもの(全体領域20m×20m)を用いた。このデータは、5m×5mの部分領域で30cm以上の割れ目をスケッチした16グリッドのデータを、20m×20mの全体領域にモザイク状に合成したものである。これによって、全体領域の中での細かい割れ目(30～50cm程度の割れ目)も把握することが可能となった。

城ヶ島のデータは、空中写真(1:25,000の原図と拡大図)を利用した。ここで、空中写真から読み取った10m以上の割れ目は、表土の覆っていない海蝕台の露頭部分のみ扱った(全体領域は、約10⁴m²)。拡大空中写真は、空中写真原図を10倍に拡大して2m以上の割れ目を抽出した。この時のスキヤングリッドの数は、24グリッドである。

各務原地域のデータは、水谷・金折¹⁰⁾によってスケッチされた割れ目位置図を用いた。

Gr.D地域で用いたデータは、空中写真(1:25,000)のリニアメント解析図と地表踏査によって作成した断層位置図(1:5,000)である。

Gr.H地域は、スケールの異なるデータを10種類用いた。内訳は、調査坑壁面の割れ目スケッチ(計測分解能1cm, 3cm, 5cm)、複数の調査横坑調査から作成した断層位置図(1:400)、露頭調査によって作成された地質図(1:2,000, 1:50,000, 1:200,000, 1:500,000)、空中写真(1:25,000)とランドサット画像(1:200,000)のリニアメント解析図である。このうち割れ目スケッチのスキヤングリッドの数については、分解能5cmのものが1m×1m領域で40グリッド、分解能3cmのものが10グリッド、分解能1cmのものが40cm×40cm領域で8グリッドである。

Gr.I地域は、トンネル掘削機(TBM)によって掘削されたトンネルの壁面写真(1m×1m)から割れ目を抽出したものである。この地域のスキヤングリッドの数の

* 計測対象の岩盤をある大きさを持った格子(グリッド)で覆って計測するとき、このグリッドをスキヤングリッドと呼ぶ。また、計測対象の露頭または壁面全体の大きさを全体領域、その一部の大きさを部分領域と呼ぶ。

Table 1 The objective districts and the measuring methods.

District (Notation)	Measuring method	Area of scan grid	Min. length of fracture	Grid number
Sd. A (A)	Photograph of exploration adits	50cm×50cm	0.8cm	1 2
		1 m×1 m	3.0cm	8
Kakamigahara (K)	Outcrop sketch	790m ²	2.0m	1
Sd. B (B)	Outcrop sketch	20m×20m	30.0cm	1
Jougashima (J)	Enlarged aerial photo.	1.0×10 ⁴ m ²	2.0m	2 4
	Aerial photo. (1:25,000)	2.4×10 ⁵ m ²	10.0m	1
Gr. D (D)	Aerial photo. (1:25,000)	4 km ²	100.0m	1
	Ground survey (1:5,000)	4 km ²	100.0m	1
Gr. H (H)	Sketch of exploration adits	40cm×40cm	1.0cm	8
		1 m×1 m	3.0cm	1 0
		1 m×1 m	5.0cm	4 0
	Measurement of (1:400) exploration adits	150m×150m	8.0m	1
	Detailed ground survey (1:2,000)	320m×320m	20.0m	1
	Aerial photo. (1:25,000)	12.5km×12.5km	250.0m	1
	Ground survey (1:50,000)	10km×10km	500.0m	1
	Landsat (1:200,000)	50km×50km	1.0km	1
	Regional ground survey (1:200,000)	50km×50km	2.0km	1
	Regional ground survey (1:500,000)	45km×45km	3.0km	1
Gr. I (I)	Photograph of tonnel wall	1 m×1 m	2.0cm	2 3
Yakushima (Y)	Aerial photo. (1:22,000)	80km ²	100.0m	1
	SAR (1:200,000)	400km ²	500.0m	1
	Landsat (1:200,000)	400km ²	2.0km	1
Ashizuri (As)	Outcrop sketch	20m×20m	10.0cm	1
Hatsukari (Ha)	Outcrop photograph	20m×20m	0.5m	7 7
		40m×40m	1.0m	19.25
		80m×80m	3.0m	4.8125
		30800m ²	5.0m	1

は、23グリッドで、計測された割れ目の最小長さは2 cmである。

屋久島地域で用いたリニアメント解析図は、山口・長谷¹¹⁾によって解析された3つの画像(1:22,000空中写真, 1:200,000 SAR画像, 1:200,000ランドサット画像)を再トレースしたものを用いた。

足摺岬地域は、海蝕台の露頭に見られる割れ目をスケッチしたもの(全体領域20m×20m)である。このスケッチ図は、領域全体を2m×2mの部分領域に100等分し、その個々のスキヤングリッドで割れ目を計測し、最後に合成したものである。このような部分領域に分割した計測で、分解能10cmの計測が可能となった。

初狩地域のデータは、露頭写真を撮影したもの(露頭全体写真, 3種類の近接写真として80m×80m, 40m×40m, 20m×20m)を用いた。全体領域は30800m²である。近接写真はそれぞれ4.8125グリッド, 19.25グリッド, 77グリッドのデータがあり*, 各々をモザイク状に合成して全体領域を把握した。

また、引張り割れ目のみ観察した5地域のデータは、

全て露頭または壁面写真を用いた。

3.3 実測の割れ目のフラクタル特性とばらつき

前節で示した14地域について、そのフラクタル性を検討するために、割れ目のトレース長さの分布を分布関数法³⁾で、幾何パターンをボックスカウンティング法³⁾で検討した。ただし、同じ地域でも割れ目の成因の異なるものは、それらを分類した場合のフラクタル特性も求めた。これらの計測地域についてのフラクタル次元とフラクタル分布の切片をTable 2に示す。それぞれの長さのフラクタル次元は、ある大きさのスキヤングリッド内での(平均トレース長さ)～(グリッドの辺の0.8倍のトレース長さ)の範囲で決定した。また、パターンのフラクタル次元は、グリッドの辺の長さの1/2～1/32倍のボックスの辺の長さの範囲で決定した³⁾。

ただし、フラクタル特性の把握に当たっては以下の点に留意した。

* 本来グリッド数は整数であるが、グリッド部分が草木で覆われていたり、空となる部分があり、その面積分だけ小数となった。

Table 2 The fractal characteristics (D_f , C , σ , D_g) in the objective districts.

Objective district	Rock type	Geological time of rock (year)	Geological processes of fracturing	D _g		C		σ	D _g		Remarks
				Mean	S.D.	Mean	S.D.		Mean	S.D.	
Sasago	Granite	Miocene	Tension fractures (Cooling joints in dike)	∞	—	no ¹	—	—	1.99	—	Outcrop photograph (2 m × width of dike)
Tanzawa	Granite	—	Tension fractures (Sheeting joints)	2.20	—	—	—	—	1.99	—	Outcrop photograph
Sweden	Gneissose granite	—	Tension fractures (Sheeting joints)	2.10	—	—	—	—	1.96	—	Outcrop photograph
Bousou	Mud stone	Pliocene	Fractures perpendicular to bedding plane	6.50	—	1.81 ¹	—	—	—	—	Outcrop photograph (6 m × width of bed)
Sd. A	Slate Limestone	Permian	Fractures parallel to bedding plane	Not ²	—	—	—	—	—	—	Photograph in exploration adits
			Fractures perpendicular to bedding plane	1.55	0.46	-0.60	0.49	0.29	1.60	0.13	Two different scales 50 cm × 50 cm 100 cm × 100 cm
			Shear fractures (2 dominant orientations)	1.35	0.03	-0.44	0.07	0.18	1.62	0.04	
			Fracture system	1.30	0.04	0.35	0.07	0.23	1.79	0.06	
Kamagahara	Shale Chert	Triassic	Shear fractures (2 dominant orientations)	1.45	—	-0.18	—	—	1.60	—	Outcrop sketch (790 m ²)
Sd. B	Shale Sand stone	Jurassic	Shear fractures (3 dominant orientations)	1.35	—	-0.23	—	—	1.95	—	Outcrop sketch (20 m × 20 m)
Jougashima	Mud stone Sand stone Tuff	Miocene	Shear fractures (5 dominant orientations)	1.80	0.04	0.70	0.02	0.16	1.61	0.08	Aerial photograph (1:25,000). Enlarged aerial photograph (100 m × 100 m)
Gr. D	Granite	Cretaceous (105~135×10 ⁶)	Shear fractures (3 dominant orientations)	1.60	0.07	0.64	0.16	—	1.50	0.04	Aerial photo. (1:25000). Detailed ground survey (1:5000)
Gr. H	Granite	Cretaceous (60~90×10 ⁶)	Shear fractures (4 dominant orientations)	1.70	0.05	0.24	0.15	0.20	1.55	0.03	Ground survey, Landsat, Aerial photo., Exploration adits etc.
Gr. I	Granite	Cretaceous (80~90×10 ⁶)	Tension fractures (cooling joints in vein)	6.65	1.50	0.32 ¹	—	—	—	—	Photograph of vein (1 m × width of vein)
			Shear fractures (4 dominant orientations)	1.50	—	0.24	—	0.22	1.70	—	Photograph on tunnel wall (1 m × 1 m)
Yakushima	Granite	Miocene (14×10 ⁶)	Shear fractures (2 dominant orientations)	1.95	0.10	0.52	0.14	—	1.90	0.17	Aerial photo. (1:22000). SAR (1:200000), Landsat (1:200000)
Ashizuri	Granite	Miocene (12×10 ⁶)	Shear fractures (3 dominant orientations)	1.55	—	0.16	—	—	1.94	—	Outcrop sketch (20 m × 20 m)
Hatsukari	Andesite	Pliocene	Tension fractures (Cooling joints in lava)	2.70	0.29	1.38	0.13	0.20~0.25	1.70	0.42	Outcrop photograph
			Shear fractures (2 dominant orientations)	1.55	0.03	-0.02	0.02	0.21	1.52	0.04	Four different scales 30800 m ² 80 m × 80 m 20 m × 40 m 20 m × 20 m
			Fracture system	2.30	0.49	0.67	0.93	0.23	1.85	0.16	

 D_f : Fractal dimension of fracture trace length D_g : Fractal dimension of fracture pattern C : C-value (intercept of fractal distribution) = $\log$ (Number of fractures longer than 1 m) / (1 m²) σ : Standard deviation of $\log N$ calculated from the average fractal distribution curve. The data of N are taken from the same site grid.(I: Fracture trace length, N : Number of fractures longer than l)S.D.: Standard deviation calculated from the fractal characteristics in some different scales
Mean: Mean value calculated from the fractal characteristics in some different scales

*1 The C-value calculated from the number of fractures equal to the width of the geological boundaries such as bed thickness, width of dike.

*2 Because the mean fracture trace length in 1 m × 1 m grid area is nearly equal to that in 50 cm × 50 cm grid area, that fracture set is not fractal.

この表のフラクタル分布の切片 (C 値) は, 単位面積 1 m^2 におけるトレース長さ 1 m 以上の割れ目の本数の対数を示している。通常のフラクタル分布における割れ目本数は, ある領域内 ($s^2 \text{ m}^2$) での本数を示すので, パターンのフラクタル次元 D_g を用いて 1 m^2 当りの値に換算する必要がある。大野・小島³⁾によれば, C 値は次式で表される。

$$C = k + D_g \cdot \log(1/s) \quad (2)$$

ここで, k : 領域 $s^2 \text{ m}^2$ における長さ 1 m 以上の割れ目の本数 (フラクタル分布の切片)

各地域のフラクタル分布の切片 k を C 値に直した結果を Table 2 に示してある。

この表で長さのフラクタル次元 D_l が $6.0 \sim \infty^*$ の地域のデータは, 一方の地質境界からもう一方の地質境界に達するような長さの割れ目が全体の40%以上を占め, 平均長さ $\sim$ グリッドの辺の0.8倍の長さの範囲では次元が決定できず, 超過確率 (ある長さ以上の割れ目の存在確率) が50%程度以下の範囲で次元を求めた。

また, いくつかのスケールの異なるデータ (スキャングリッドの領域サイズや分解能の異なるデータ) のあるような地域については, 各スケール毎にフラクタル次元 (D_b , D_g) やフラクタル分布の切片 (C 値) が決定され, これらの値は若干異なる。そこで, この平均値 (表中の Mean) と標準偏差 (表中の S.D.) を示した。

さらに, Gr.H 地域のようにスケールが同じ (スキャングリッドの領域サイズや分解能が同じ) 場合でも, スキャングリッドの位置が異なることにより, フラクタル分布にばらつきが生じる。そこで, フラクタル分布上のばらつき σ を次式のように定義し, 表中に示した。

$$\sigma = \left\{ \left(\sum_{j=1}^n (\log N_j - \overline{\log N})^2 - D_l \sum_{j=1}^n (\log l_j - \overline{\log l}) (\log N_j - \overline{\log N}) \right) / (n-2) \right\}^{1/2} \quad (3)$$

ここで, n : フラクタル分布上のプロット点数,

N_j : トレース長さ l_j での超過本数,

$\overline{\log N}$: $\log N_j$ の平均

ここで, 長さのフラクタル次元 D_l は, 同じスケール

* トレース長さの分布を両対数グラフ上にプロットした時の傾きが -5.7 以下 (傾きの角度 80 度以上) の時には, はば長さの揃った分布に見えるので, その傾きを長さのフラクタル次元 D_l と呼ぶのには疑問が生じるが, 比較する上での便宜上, 長さのフラクタル次元とした。

Fig. 2 The distribution of the number of fractures N longer than a certain length.

(Granitic rock, Gr.H district, Yamagata)

The fractures longer than 5 cm were investigated in $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ grid area, and the number of scan grids was 40. The logarithmic probability paper is used. The probability is the cumulative frequency of the scan grids, in which the fractures longer than a certain length are counted, per total scan grids. An example diagram in the upper right is also shown.

The data lie almost on a straight line showing a log-normal distribution. The slope of straight line for each fracture trace length ranging from mean length of fracture trace to 0.8 times the side length of the scan grid is nearly constant, and the standard deviation σ_N for each distribution of $\log N$ is about 0.2.

の各スキャングリッド内のトレース長さの全データから求める。このような同じスケールのスキャングリッドの全データから求めた分布を, ここでは, 平均的なフラクタル分布と呼ぶことにする。これらの結果の詳細な検討については, 次章に譲る。

4. 考察

4.1 実測例に見るフラクタル分布のばらつき

岩盤割れ目は完全な自己相似ではなく, 統計的な自己相似であるために, 割れ目の分布にはばらつきが生じる。このばらつきは第3.3節で示したように2つに大別できる。

1つは, スキャングリッドの位置の違いなどの原因による同じスケールにおけるばらつきである。また, スケ

ールが異なることによってばらつきが生じる (便宜上, 前者を同一スケールのばらつき, 後者を異なるスケール間のばらつきと呼ぶ)。ここでは, このようにばらつきを分けて検討した。

(1) 同一スケールのばらつき

同一スケールにおけるフラクタル分布のばらつきを検討するために, 前章で取り上げた Gr.H 地域, 初狩地域, 城ヶ島地域の3地域について個々のスキヤングリッドの計測データの検討を行った。

Gr.H 地域における分解能 5 cm のデータについての割れ目の超過本数の分布を Fig. 2 に対数確率紙の形で示した。この図は, あるトレース長さ l 以上の割れ目が N 本含まれるグリッドの頻度分布 (超過本数分布) について, 長さ l を変化させたときの様子を示したものである。この図に見られるように, 割れ目の超過本数分布は長さ l の大小にかかわらず, どれもほぼ対数正規分布に近似できる。

また, この図を詳細に見ると, $l \geq 15.8$ cm の場合は, $\log N$ の分布の標準偏差 σ_N が他の場合の σ_N より小さかったり, $l \geq 100.0$ cm の場合には対数正規分布からはずれている。一方, フラクタル分布に適合する範囲 (割れ目の平均トレース長さ $\sim$ グリッドの辺の 0.8 倍のトレース長さの範囲) では, $\log N$ の分布の標準偏差 σ_N^* が約 0.2 とはほぼ一定になる¹²⁾。

他のデータについても, 平均トレース長さ $\sim$ グリッドの辺の 0.8 倍の長さの範囲内でばらつきを検討した。このばらつき σ は, (3) 式から求めた。

以上のようにして求めた 3 地域の各スキヤングリッドについての割れ目トレース長さの分布を Fig. 3 に示す。この図に見られるように, 各スキヤングリッドの計測データは, 平均的フラクタル分布の周りにばらついて分布することがわかる。このようにスキヤングリッドの位置によってばらつきが生じることは, 割れ目が統計的に自己相似であるために生じ, 自然状態において本来は

らつきを持つことを示していると思われる。

また, このばらつき σ は地域によって異なり (Table 2), その値は 0.16 $\sim$ 0.29 の範囲をとる。つまり, 実際の割れ目本数にして平均本数の 3 $\sim$ 9 割程度のばらつきがあることになり, 決して小さいものではない。このばらつきが, どの程度低減できるのかについては, 第 5 章で触れる。

(2) 異なるスケール間のばらつき

フラクタル次元がほぼ同一と見なせる範囲がどの程度であるかを把握することが, 異なるスケール間のばらつきを論じる上で重要になると思われる。そこで, 同じせん断割れ目系で同じ形成過程によると思われる広い領域を計測した Gr.H 地域のデータについて, そのフラクタル次元のばらつきを検討した。

Table 3 に見られるように, 同一岩体中のスケールの異なる割れ目分布でも, 長さのフラクタル次元はほぼ同じ値を示している。これは, 同岩種・同成因・同地史とみなせるような地域内では, スケールが異なっても同様なフラクタル特性を持つ可能性を示している。

一方, パターンのフラクタル次元については, 分解能 3 cm の横坑調査以外は, 長さのフラクタル次元と同様にほぼ同じ値を示している。分解能 3 cm のデータは, 他のスケールのデータと異なり, $\eta/s = 1/2 \sim 1/32$ の範囲ではフラクタル次元は $D_g = 1.82$ となるが, $\eta/s = 1/8 \sim 1/64$ の範囲では $D_g = 1.55$ となる。このような大きな値を示すのは, この分解能のデータだけで, 他は 1.55 前後の値を示すので, この地域のパターンのフラクタル次元は 1.55 程度とみなして良いのではないと思われる。分解能 3 cm のデータに見られるようなフラクタル次元の違いが, 本質的な問題か, 次元の決定方法または割れ目の計測方法などの問題かは今後の課題と言えよう。

以上のことから, 長さやパターンのフラクタル次元は, 同岩種・同成因・同地史とみなせるような地域内では, スケールが異なっても同様な値を示す可能性が示された。

では, 同岩種・同成因・同地史とみなせる地域内のフラクタル次元などの特性のばらつきは, どの程度なのだろうか?

この点を検討するために, Table 2 のフラクタル次元およびフラクタル分布の切片の平均とばらつき S.D. に注目してみる。

この表に見られるように, 引張り割れ目のばらつき S.D. はせん断割れ目のそれに比べて大きな値となっていることがわかる。引張り割れ目の場合は, スケールによって次元が大きく異なったり, 次元の決定し難いもの

* $\log l$ が一定の時には, $\log l_j = \log l$ となるので, (3) 式の σ は,

$$\sigma = \left\{ \left(\sum_{j=1}^n (\log N_j - \overline{\log N})^2 \right) / (n-2) \right\}^{1/2}$$

となる。ここで, n はプロット点数であるから, $\log l$ が一定の時はグリッド数 n_g と考えることもできる。また, $\log N$ の分布の標準偏差 σ_N は,

$$\sigma_N = \left\{ \left(\sum_{j=1}^{n_g} (\log N_j - \overline{\log N})^2 \right) / (n_g - 1) \right\}^{1/2}$$

である。 n_g が十分大きいときには, $\sigma \approx \sigma_N$ となる。したがって, σ_N は $\log l$ が一定の時の σ にほぼ等しいと考えることができる。

Fig. 3(a) The distribution of fracture trace length for the different measured points of scan grids in Gr. H district (Granitic rock). σ denotes the standard deviation of $\log N$ at the same size of scan grid.

Fig. 3(c) The distribution of fracture trace length for the different measured points of scan grids in Jougashima district (Sedimentary rock). σ denotes the standard deviation of $\log N$ at the same size of scan grid.

Fig. 3(b) The distribution of fracture trace length for the different measured points of scan grids in Hatsukari district (Andesitic rock). σ denotes the standard deviation of $\log N$ at the same size of scan grid.

などがあり、こうしたことが原因の1つと思われる。また、次節で詳細に論じるが、引張り割れ目の中にはフラクタルでない可能性のあるものもあり、こうしたことも原因の1つとして挙げられる。

せん断割れ目の場合、フラクタル次元のばらつき S.D. は0.03~0.17程度となり、求められたフラクタル次元の小数点2桁目はばらつきの中に入り、信頼性が低いことがわかる。本計測結果では、長さのフラクタル次元 D_l のばらつき S.D. は0.10が最大で、パターン of フラクタル次元 D_g のばらつき S.D. は0.17が最大である。したがって、フラクタル次元の違いなどは、この程度のばらつきがあることを念頭に入れて論じる必要がある。

4.2 フラクタル特性に影響を与える諸要因

割れ目には、せん断破壊によって生じた割れ目や引張り破壊によって生じた割れ目があり、割れ目の成因やその形成過程もさまざまであるため、成因などの異なる割れ目を1つにまとめて同一のフラクタル特性を持つと考えることには疑問が生じる。そこで、地質要因がどのように割れ目のフラクタル特性に影響を及ぼすかについて検討した。

ここで取り上げた地質要因としては、割れ目の成因の違い、岩種の違い、地質年代の違いである。

割れ目の成因については、せん断割れ目と引張り割れ目に分類した。引張り割れ目は、火成岩内の冷却割れ目、堆積岩内の引張り割れ目、シーティングジョイントに細別して検討した。

岩種については、大別して火成岩類と堆積岩類に分けられる。火成岩類は、花崗岩と安山岩に分類することができるが、堆積岩類は互層であり、その構成される岩種は地域によってそれぞれ異なるため、共通の岩種となる地域がない。したがって、花崗岩、安山岩と堆積岩類に分けて検討した。

地質年代は、岩石形成の年代を基に検討した。本来、割れ目の受けた応力履歴である地殻変動の過程も検討すべきであるが、今回は、十分なデータが得られず検討から除外することとした。地殻変動の激しさと地質年代の古さとは、単純な相関関係があるわけではないが、地体構造の一致するような場合は、岩石形成の年代が古いものほど多くの応力履歴を経たと考えられる。しかしながら、本計測データは、地体構造の一致するものが少なく、このことは論じにくい。

これらの要因について検討した結果を、Fig. 4, 5 および Table 4 に示す。以下、フラクタル特性毎に論じる。

(1) 長さのフラクタル次元

Table 2 に見られるように、地域が異なると長さのフラクタル次元が異なる。そこで、Fig. 4 に地質要因と長さのフラクタル次元の関係を示した。

この図に見られる最も特徴的なことは、長さのフラクタル次元が2.0を境として、せん断割れ目と引張り割れ目に分けられることである。しかし、Sd.A 地域の層理面に直交した引張り割れ目は例外的に1.55の次元となっている。Sd.A 地域の層理面に直交した引張り割れ目は、地層境界の検討を行わなかったデータである。この地域の層厚は、粘板岩・石灰岩の互層（層厚十数 cm）と粘板岩または輝緑凝灰岩（層厚数 m）では大きく異なり、計測グリッドの大きさにより長さのフラクタル次元が異なる（1 m×1 m の次元は1.20, 50 cm×50 cm は1.85）¹³⁾。つまり、粘板岩・石灰岩の互層部分の影響により、十数 cm 以下の短い割れ目の本数がこれよりも長い割れ目に比べて急激に多くなっていると考えられることができる。このことは、層厚十数 cm の粘板岩・石灰岩の互層の地質境界を考慮することで、より次元が大きくなる可能性を示している。さらに、同様な層理面に直交した引張り割れ目でも、房総のデータは岩相の違いを考慮したデータで、フラクタル次元は6.50の値をとる。こうしたことから、岩相の違いを考慮すると、層理面に直交

Table 3 The fractal dimension at the various scales.

In the case of the shear fracture sets in the same rock mass, the fractal dimensions are nearly constant regardless of the different scan grid area.

Rock type	Granitic rock mass at Asahi Mountainland, Yamagata (Gr. H)	
Dominant orientation of fractures (Shear fractures)	N60°E 80°N (41%), EW 70°N (27%) NE 80°N (16%), N45°E 25°S (16%)	
Measuring method and Map scale	Fractal dimension of fracture pattern (D _g) ^{*1}	Fractal dimension of fracture trace length (D _g)
Sketch of Explorational adits (Min. length ≒ 1cm)	1. 5 4	1. 7 1
Sketch of Explorational adits (Min. length ≒ 3cm)	1. 8 2 (1. 5 6) ^{*2}	1. 7 0
Sketch of Explorational adits (Min. length ≒ 5cm)	1. 5 4	1. 6 9
Measurement of Explorational adits (Map scale 1:400)	1. 5 3	1. 7 0
Detailed ground survey (Map scale 1:2,000)	1. 5 6	1. 6 5
Aerial photograph (Map scale 1:25,000)	1. 5 3	1. 7 9
Ground survey (Map scale 1:50,000)	1. 5 4	1. 6 5
Landsat imagery (Map scale 1:200,000)	1. 5 1	1. 7 6
Regional ground survey (Map scale 1:200,000)	1. 6 0	1. 6 3
Regional ground survey (Map scale 1:500,000)	1. 5 3	1. 6 7
Mean fractal dim.	1. 5 5	1. 7 0
Standard deviation	0. 0 3	0. 0 5

*1 The fractal dimension D_g is calculated on the box side length ranging from s/2 to s/32. (s: Side length of scan grid)

*2 The fractal dimension D_g is calculated for the range from s/8 to s/64.

した引張り割れ目の次元は大きな値を示す可能性が考えられる。

また、もう1つの特徴として、貫入岩や岩脈中の引張り割れ目のフラクタル次元や堆積岩の層理面に直交した割れ目のフラクタル次元は、3.0よりも大きく、6.0～∞の非常に大きな値となることが挙げられる。貫入岩や岩脈は、既存の岩内に貫入してきたものであり、割れ目はこの境界の間のみで発生する。逆に言えば、境界領域に影響されやすい割れ目である。また堆積岩の層理面に直交した割れ目も層理面に影響されてくるので、こうした割れ目についても大きなフラクタル次元となる。このように地質学的成因上の境界によって制限される割れ目は、フラクタル次元が異常に大きな値となり、トレース

長さのほぼ揃った分布の可能性もあるので¹⁴⁾、フラクタルではないことも考えられる。この問題については、今後詳細な検討が必要であろう。

MAIN *et al.*¹⁵⁾は、Gutenberg-Richter の式の検討や引張り系のマイクロクラックの実験結果から、長さのフラクタル次元は割れ目の成因にかかわらず $1.0 \leq D_f < 3.0$ となる可能性を示した。前述したような地質境界に影響される場合の引張り割れ目を除けば、本計測結果は、MAIN *et al.* の示した $1.0 \leq D_f < 3.0$ の範囲に収まる。

しかしながら、MAIN *et al.* はせん断割れ目と引張り割れ目のフラクタル次元は変わらないとしているが、本計測結果は、せん断割れ目と引張り割れ目は2.0を境に分類でき、この結果とは異なった。MAIN *et al.* の引張りのマイクロクラックの実験では、AE 計測によって b 値 (Gutenberg-Richter の式の傾き) を測定し、 $b = D_f$ とみなして長さのフラクタル次元を求めている。したがって、本計測結果との違いの原因は、 $b = D_f$ の仮定が常に成り立つわけではないという可能性が挙げられる。また、マイクロクラックを取り扱っていることも原因の1つとして考えられる。

次に、せん断割れ目の場合の特徴について検討した。

Fig. 4 の中で、花崗岩の屋久島と堆積岩の城ヶ島は、他の地域の長さのフラクタル次元に比べて大きな値を示している。

この2地域については、年代が新しいためにフラクタル次元が大きいくとも見えるが、より新しい初狩や足摺岬地域の次元が小さいので、一概には地質年代に影響しているとは見ることができないと思われる。

では、別の観点から見た場合、どのようなことが言えるだろうか？

城ヶ島は、地殻変動の向きが激しく変わった地域であり、古い割れ目が新しい割れ目に切断されることが多く、そうした短い割れ目の増加が長さのフラクタル次元 D_f を大きくしたと思われる。一方、他の3地域の堆積岩は、大断層系が1方向のSd.A地域など、城ヶ島のように割れ目が短くなる確率が低い地域であるために、城ヶ島より小さな次元となったと考えられる。このような地殻変動の向きの変化が影響することが考えられるが、このことは、地殻変動の複雑さが長さのフラクタル次元に影響する可能性を暗示しているようにも思える。

一方、屋久島は、リニアメント解析によるデータのみであり、リニアメントが必ずしも割れ目とは一致しないことが原因の1つとして考えられる。このような計測対象の違いが影響した可能性が考えられ、他の花崗岩の

Fig. 4 Relations of the fractal dimension D_f of fracture trace length and the geological factors.

The notations in this figure denote the objective districts in Table 1.

The fractal dimensions of the shear fractures are different from that of the tension fractures. Especially, the tension fractures affected by the geological boundary (these fractal dimensions are 6.0~ ∞) does not seem to have the fractal property.

Since there is a tendency that short lineaments are not always the fractures, the fractal dimension of the lineaments in Yakushima is larger than that of the fractures in the other igneous rock.

The fractal dimension in Jougashima is larger than one in the other sedimentary rock. This may be related to that the fractures in Jougashima are caused by the vigorous diastrophism throughout the Quaternary.

Therefore, on the shear fractures except Yakushima and Jougashima, the fractal dimension D_f of the igneous rock is about 1.60 and that of the sedimentary rock is about 1.40.

データとは別に取り扱う必要がある。

こうしたことから、本計測においては、火成岩中の割れ目の長さのフラクタル次元 D_f は1.60程度、堆積岩のそれは1.40程度とみなすことができよう。

以上のことから、長さのフラクタル次元に大きな影響を与える要因は割れ目の成因であり、岩石形成の年代の違いはあまり影響していないように見える。また、せん断割れ目では、岩種によって異なる可能性や地殻変動の複雑さが影響を与える可能性が暗示され、それぞれ特有の長さのフラクタル次元を持つ可能性がある。

Table 4 The fractal dimension D_g of fracture pattern classified by the geological factors
 D_g is not affected by the geological processes of fracturing, the age of rock mass and the rock type.

Geological factor			D g			
			Range ^{*1}	Mean ^{*1}		
Tension fractures			1.60~1.99	1.85		
	Cooling joints		1.70~1.99	1.85		
		In dike	1.99	1.99		
		In lava	1.70	1.70		
	Fractures perpendicular to bedding plane		1.60	1.60		
	Sheeting joints		1.96~1.99	1.98		
Shear fractures			1.96~1.99	1.98	Mean ^{*2}	
			1.50~1.95	1.69		1.67
	Rock type	Igneous rock	1.50~1.94	1.69	1.65	
		Sedimentary rock	1.60~1.95	1.70	1.73	
	Geological time	Paleozoic (Only sedimentary)		1.62	1.62	1.62
		Mesozoic		1.50~1.95	1.66	1.66
			Igneous	1.50~1.70	1.58	1.58
			Sedimentary	1.60~1.95	1.78	1.78
		Miocene	Igneous	1.61~1.94	1.82	1.94
			Sedimentary	1.90~1.94	1.92	1.94
			Igneous	1.61	1.61	—
			Sedimentary	1.61	1.61	—
	Pliocene (Only igneous)		1.52	1.52	1.52	

*1 Using the data of all districts

*2 Using the data of districts except Yakushima and Jougashima

(2) パターンのフラクタル次元

ここでは、パターンのフラクタル次元について検討した。

本計測において求められたパターンのフラクタル次元は、 $1.5 \leq D_g \leq 2.0$ の範囲であった (Table 4)。これに対して、HIRATA¹⁶⁾は、Griffith のエネルギーのつりあい式から、割れ目の表面積とそれを作るエネルギーとの競合により、パターンのフラクタル次元は、1.60程度が上限であることを定性的に示した。この中で HIRATA は、3次元空間におけるパターンのフラクタル次元 D_3 の上限値が2.60程度であるとし、これを2次元平面に直したとき、 $D_2 (=D_g) = D_3 - 1$ より、1.60程度としている。ところが、 $D_2 = D_3 - 1$ という式は、割れ目が3次元空間内で一様に分布する場合には成り立つが、空間的に偏りを持つような場合などには成り立たないと考えられる。したがって、必ずしもパターンのフラクタル次元 D_g の上限が1.60とは断定できない。また、平田²⁾自身も、この上限値については断定的なことが言えないとしている。

一方、長さのフラクタル次元とは異なり、パターンのフラクタル次元では割れ目の成因についての違いは見られない (Table 4)。LOUIS *et al.*¹⁷⁾は、一様引張り破壊のパターンのフラクタル次元とせん断破壊のそれとは、ほぼ同じ値となることをコンピュータによるモデル実験で示しており、この結果は、本計測結果を裏付けるものと言えよう。

このようにパターンのフラクタル次元 D_g は、割れ目

の成因によらないことが考えられる。さらに、岩種の違いや岩石形成の年代にも、ほとんど影響されていない (Table 4)。

では、どのようなことに影響されるのだろうか？

HIRATA¹⁶⁾は、地震断層における断層の幾何パターンを3つのタイプ (木状、枝状、葉理状) に分類して、フラクタル次元の検討を行っている。この中で、大きな主要断層の見られるような葉理状のものと、散逸するような木状のものとは、次元が違って来る可能性が示されている。

試験室内での割れ目の破壊形態を考えた場合でも、試験条件によってその形態が異なってくることがわかって¹⁸⁾いる。温度効果による熱誘起微視割れ目ではほぼ直線的な割れ目が形成されるが、熱水環境効果による割れ目では微細で左右に分岐したような割れ目が形成される。このような割れ目の破壊形態の違いによってその幾何パターンは異なってくるので、パターンのフラクタル次元 D_g も異なってくるものと思われる。

割れ目パターンは、このように破壊形態によって異なってくると考えられ、ここで示した地質要因よりは、こうしたことがパターンのフラクタル次元に影響する。今後は、破壊形態からの検討が必要となろう。

(3) フラクタル分布の切片

ここでは、フラクタル分布の切片 (C 値) について検討した。

フラクタル分布の切片は、長さのフラクタル次元の大小によっても影響される値である。したがって、同じフ

ラクトル次元とみなせる割れ目に分類して C 値の影響を検討した。

長さのフラクタル次元のばらつき S.D. (Fig. 4 中の縦棒) は 0.03~0.10 の値をとり、平均的には 0.06 である。このことを考えると、前述したように、城ヶ島と屋久島のデータを除けば、長さのフラクタル次元は、 $D_f=1.60$ の火成岩と $D_f=1.40$ の堆積岩に分類することができる。

Fig. 5 に C 値と地質要因の関係を示した。この図中には、参考として引張り割れ目や城ヶ島・屋久島のデータも示したが、長さのフラクタル次元が同一と見えないので、ここでの議論の対象外である。さらに、 C 値のばらつき S.D. は地域によって異なるが、0.15 程度である地域が多いので、このばらつきのもとで議論を進めることとした。

この図に見られるように、火成岩の C 値は堆積岩よりも大きな値となっていることがわかる。これは、火成岩と堆積岩の長さのフラクタル次元の違いが原因の 1 つとして挙げられる*。

また、堆積岩においては年代差が小さいので傾向が見いだせないが、火成岩においては、年代が古いものほど C 値がやや増加する傾向が見られる。

緒方・本荘¹⁹⁾は、スキャンライン上で計測したある破砕幅を持った断層の本数密度が、岩石の形成年代の古いものほど大きくなる傾向を見いだしている。断層の破砕幅とトレース長さの間には両対数グラフ上で直線関係が成り立つことがいくつか報告²⁰⁾されていることから、緒方・本荘の結果は、トレース長さにも拡張することができる。したがって、 C 値は割れ目密度と関連する値のために緒方・本荘と同様な結果となったと考えられる。

岩石形成の年代が古いものほど応力履歴を多く受けたと仮定するならば、この火成岩における傾向は、地殻変動の激しかった地域ほど C 値が大きくなる可能性を示しているように見える。

しかしながら、地体構造が一致していないことを考えると、このように判断することは早計であろう。また、地質年代と地殻変動の激しさの相関は別として、火成岩における C 値の差は、0.6 程度と小さなものである (割れ目本数にして、4 本/m² 程度)。また、今回の計測結果は、ほぼ同じフラクタル次元の地域で 3 または 5 地

Fig. 5 Relations of the C -value (the intercept of the fractal distribution) and the geological factors.

The notations in this figure denote the objective districts in Table 1.

On the igneous rock except Yakushima, the C -value increases with the age of rock mass. On the other hand, the C -value for the sedimentary rock does not seem to be affected by the age of rock mass as the range of age is small.

域と少ない。したがって、ここに見られる傾向が不変的なものかどうかについては、今後の課題と言えよう。今後は、調査地域の増加とともに応力履歴の十分な検討が必要である。

5. フラクタル分布のばらつきの低減の可能性

第4.1節で示したように、ばらつき σ は 0.16~0.29 程度の値を示し、決して小さなものとは言えない。一方、第4.2節で示されたように、割れ目の長さのフラクタル次元は割れ目の成因などに影響される。このことから、割れ目の成因などの分類によりばらつきを小さくすることができる可能性がある。そこで、フラクタル分布のばらつきが、どの程度低減できるかを検討した。

Table 2 に見られるように、割れ目系として捉え、成因などの分類を行っていない場合 (表中の System) のばらつき σ は、せん断割れ目のみ抽出した場合のばらつき σ よりも大きくなっている。一方、引張り割れ目の場合は小さくなるよりはむしろ大きくなっているものもあり、Sd.A 地域のデータに見られるように、地質境界に影響される場合の引張り割れ目の長さ分布がフラクタルではないということが原因の 1 つとして考えられる。

また、初狩地域のように、地質境界に影響されない引

* トレース長さ l m 以上の割れ目が N_c 本/m² ある 2 つの岩体の長さのフラクタル次元が、それぞれ D_h と D_g であるとき、1 m 以上の割れ目は、それぞれ $N_c l^{D_h}$ 本/m² と $N_c l^{D_g}$ 本/m² となり、それぞれの C 値は $\log(N_c l^{D_h})$ と $\log(N_c l^{D_g})$ となるように、長さのフラクタル次元に影響してくる場合がある。

Fig. 6 The C-value (the intercept of the fractal distribution) and the measuring methods.

On the same measuring methods, the C-values are nearly constants. On the other hand, the difference of the C-values among the different measuring methods is larger than 0.2.

張り割れ目とせん断割れ目の長さのフラクタル次元が異なるということは、割れ目系として考えた場合、マルチフラクタルとなっていることを示している。このマルチフラクタル性が割れ目系分布のばらつきを大きくしている原因の1つと考えられるので、ばらつきを低減させるためにはフラクタル特性毎に分類した取り扱いが必要と思われる。

しかしながら、こうした分類を行っても0.16~0.22のばらつき(割れ目の本数にして3割~6割のばらつき)があり、十分に小さくなったとは言えない。このばらつきの程度が自然本来のばらつきなのか、それとも、まだ何等かの計測誤差を含むものであるのかについては、今後の課題である。

次に、異なるスケール間のばらつき S.D. の低減について検討した。

異なるスケール間のばらつき S.D. は、ランドサットと露頭写真の違いのように、主に計測手法の違いから生じることが原因の1つとして考えられる。また、Table 2に示されるように、このばらつき S.D. のうち C 値のそれが最も大きい。そこで、まず、計測手法の違いと C 値の関係について検討した。

Fig. 6に見られるように、初狩地域や城ヶ島地域のような同じ計測手法の場合には、C 値の差は0.10以下であるのに対して、Gr.D 地域や Gr.H 地域のような計測手法の違う場合には、0.20以上の差を示す。したがって、計測手法の違いは、C 値のばらつきの重要な要因の1つと考えられる。

しかしながら、Gr.H 地域で見られるように、同じ地表面踏査でも C 値が大きく異なる場合がある。地表面踏査の場合、利用露頭によって計測データが異なったり、露頭データのみで作成したものと空中写真を併用したものとでは最終的に作成されたデータが異なるなどのために、このような差が生じたことが考えられる。また、この地域は他地域のデータよりも広い領域の計測が行われているので、フラクタル特性が長さの範囲によって異なることが原因とも考えられる。いずれにしろ、ばらつき S.D. は計測手法だけの問題ではなく、他の要因も考えられるので、その原因の究明が今後必要となろう。

また、長さやパターンのフラクタル次元のばらつき S.D. も計測手法が影響する可能性がある (Table 2)。C 値ほどの違いは生じていないが、計測手法の同じ初狩地域などは、計測手法の異なる Gr.D 地域などよりもフラクタル次元のばらつき S.D. は小さい。

以上から、ばらつきは、岩盤割れ目系のマルチフラクタル性によるフラクタル特性の違いと計測手法の違いによる割れ目の読み取り誤差が大きな原因と思われる。

以上、ここまで述べてきたことから、割れ目のトレス長さの分布は、全体としては1つの平均的なフラクタル分布になるが、個々の部分集合においては(スキャングリッドの位置の違いによって)、平均的なフラクタル分布のまわりに割れ目本数に対して対数正規分布となるような形でばらつく(第4.1節参照)。このばらつきは、割れ目のマルチフラクタル性によるフラクタル特性の違いを考慮した分類によって、ある程度低減できると思われる。また、計測手法の違いは、異なるスケール間のばらつきの重要な要因の1つと考えられる。

6. ま と め

フラクタル性を用いて岩盤割れ目のスケール変換を行うに当たって、岩盤割れ目分布のばらつきとそのフラクタル特性を把握することは、スケール変換に際しての指標を与える上で重要となる。そこで、本論文では、岩盤割れ目にフラクタル性が成立することを基にして、割れ目分布のばらつきとフラクタル特性を検討した結果、以下のことが示された。

1) 割れ目分布のばらつきについて検討した。その結果、ある長さ l 以上の割れ目が N 本含まれるグリッドの頻度分布は対数正規分布に近似された。また、このばらつきは $\log N$ の標準偏差 σ にして0.16~0.29本/ m^2 の値を示す。これは、実際の平均本数 N に対して3割~9割程度のばらつきであり、スケール変換にあたって工学的に有為な判断を下すには大きすぎる。

2) フラクタル特性に影響を与える諸要因について検討した結果、引張り割れ目とせん断割れ目の違いや地殻変動の複雑さの違いのように、地質学的な履歴も含めた割れ目の成因の違いに対応した、それぞれ特有の長さのフラクタル次元が存在することが示された。また、地質境界に左右される場合の引張り割れ目はフラクタルでない可能性がある。

3) 本計測結果においては、パターンのフラクタル次元は割れ目の成因などの地質要因に関係なく1.5~2.0の値を示した。

4) フラクタル分布の切片(C値)は、火成岩において、岩石形成の年代の古いものほど大きくなる傾向が見られた。

5) ばらつきは、割れ目系のマルチフラクタル性によるフラクタル特性の違いを考慮した分類によって、ある程度低減できると思われる。また、計測手法の違いもばらつきの重要な要因の1つと考えられる。

7. お わ り に

本計測データは、地域数にして14地域であり、十分なフラクタル特性を把握するだけのデータ数とは言えない。パターンのフラクタル次元やフラクタル分布の切片(C値)に影響する要因の解明が、今後の課題である。

また、フラクタル特性の把握に当っては、同程度のスケールでの同じ手法による計測データの比較が重要である。このような計測データを用いて、応力履歴を含めた割れ目の形成過程の詳細な検討と、ほぼ同じフラクタル次元を持つ地域の比較も今後の課題と言えよう。

さらに、引張り割れ目の長さ分布については、フラクタルではない可能性も含めて、その特性やばらつきの把握が必要となる。このことも今後解決していく必要がある。

最後に、本論文をまとめるに当って、御助言を戴いた東京大学工学部の登坂博行助教授、応用地質(株)の近藤達敏取締役、大塚康範博士の各位に謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 佐藤邦明, 市川正憲 (1987): 岩盤フラクチャーのフラクタル次元と水理特性の相関, 土と基礎, Vol. 35, No. 12, pp. 13~18.
- 2) 平田隆幸 (1988): 断層とフラクタル, 物理探査, Vol. 41, No. 6, pp. 401~408.
- 3) 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, Vol. 33, No. 3, pp. 133~146.
- 4) 浜島良吉, 山田俊男, 小出 仁 (1987): 不連続性岩盤のモデル化と移動変形問題の解析, 日本応用地質学会昭和62年度研究発表会講演論文集, pp. 49~52.
- 5) 大野博之, 小島圭二 (1988): 岩盤中の割れ目系にみられるフラクタル, 応用地質, Vol. 29, No. 4, pp. 11~18.
- 6) La POINTE, P.R. (1988): A method to characterize fracture density and connectivity through fractal geometry, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 25, No. 6, pp. 421~429.
- 7) 大野博之 (1990): 岩盤割れ目の寸法評価に関する研究, 東京大学博士論文, 192 p.
- 8) 小玉喜三郎 (1968): 城ヶ島における小断層解析, 地質学雑誌, Vol. 74, No. 5, pp. 265~278.
- 9) 久保田鉄工(株) (1980): 関東堆積盆地, アーバンクボタ, No. 18, 裏表紙
- 10) 水谷伸治郎, 金折裕司 (1976): 断層の形成過程, 科学, Vol. 46, No. 9, pp. 536~544.
- 11) 山口 靖, 長谷紘和 (1983): 多様な画像によるリニアメント頻度の解析—レーダ画像の屋久島地域への適用例について—, 写真測量とリモートセンシング, Vol. 22, No. 3, pp. 4~13.
- 12) 大野博之, 小島圭二 (1988): フラクタルによる岩盤評価のばらつき, 日本応用地質学会昭和63年度研究発表会講演論文集, pp. 131~134.
- 13) 大野博之, 鶴原敬久, 小島圭二, 近藤達敏 (1989): 割れ目系のフラクタル特性の計測—不連続パラメータ計測システム (DISPARMS) を用いて—, 第21回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 221~225.
- 14) 大野博之 (1992): 「佐々木靖人・阿部昌彦・平野 勇 (1991): 斜面崩壊の規模と発生数に関するフラクタル」についての討論, 応用地質, Vol. 33, No. 1, pp. 43~45.
- 15) MAIN, I. G., P. G. MEREDITH, P. R. SAMMONDS & C. JONES (1990): Influence of fractal flaw distributions on rock deformation in the brittle field, Deformation Mechanisms, Rheology and Tectonics, Geological Society Special Publication No. 54, pp. 71~79.
- 16) HIRATA, T. (1989): Fractal dimension of fault system in Japan: Fractal structure in rock fracture geometry at various scales, PAGEOPH, Vol. 131, Nos. 1/2, pp. 157~170.
- 17) LOUIS, E., F. GUINEA & F. FLORES (1986): The fractal nature of fracture, FRACTAL IN PHYSICS, pp. 177~180.
- 18) 日本機械学会編 (1989): 岩石破壊力学とその応用, 機械工学ライブラリー—応用編—6, コロナ社, pp. 40~48.
- 19) 緒方正彦, 本荘静光 (1981): 電力施設の耐震設計における断層活動性の評価, 応用地質, Vol. 22, No. 1, pp. 67~87.
- 20) 例えば, 大野博之, 小島圭二 (1987): フラクタル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.

(1992年7月25日受付, 1993年1月27日受理)