

## 岩盤不連続面分布の幾何学性とそのモデル化に関する考察

(Modeling of the Spatial Distribution of Discontinuities in Rock Masses)

吉 中 龍 之 進<sup>i)</sup> (Ryunoshin Yoshinaka)吉 田 淳<sup>ii)</sup> (Jun Yoshida)山 辺 正<sup>iii)</sup> (Tadashi Yamabe)

キーワード：岩盤／岩盤不連続面／構造／節理／分布モデル (IGC: F 3/G 13)

## 1. はじめに

岩盤の力学的性質の著しい特徴の一つは、節理・層理・断層などの岩盤不連続面（以下、不連続面と呼ぶ）がその性質に大きな影響を与えることである。不連続面の影響をどのように評価し対処するかは、従来から岩盤力学の大きな課題であった。比較的小規模な節理などの不連続面はその数が極めて多くその取り扱いが容易でない。本文はこのような多数存在する不連続面の幾何学的条件の取り扱いを対象としている。

不連続性を考慮した岩盤解析の進歩は著しい。特に、最近開発されたブロック理論<sup>1)</sup>は、三次元的な不連続面分布の推定の精度が解析結果の精度を左右する。しかし、いずれの解析手法を用いるにしても岩盤の不連続性を考慮した解析を行うためには不連続面の分布特性を正確に把握することが基本となる。

不連続面の分布特性は、方向性・空間的位置・広がり（連続性）・分布密度等で特徴付けられる。方向性の解析はステレオ投影法による等密度コンター図の利用が一般的であり、優れた解説書<sup>2)~4)</sup>がある。方向性を統計的な立場から扱った研究<sup>5)</sup>は少ない。不連続面の広がりには露頭面と不連続面の交線が作るトレース長さ、分布密度は測線を切る割れ目間隔として計測される。いずれも二次元面での不連続面の分布関数の研究<sup>6)~10)</sup>が多い。しかし、不連続面の平面的広がりを直接観察できないなどのため不明な点が多い。二次元露頭の計測量から不連続面の三次元分布モデルを作成する試み<sup>9),11)~14)</sup>も積極的に行われている。

本文は岩盤内に多数分布する不連続面の三次元分布を表現する幾何学的モデルの作成方法を述べている。モデ

ル化は3段階の手順をふむ。第1は不連続面をその方向性に注目して統計的に有意なクラスターに分割すること。第2は各クラスターを特徴付ける不連続面の幾何学的パラメータ（方向性・大きさ・分布密度）を決定すること、ここでは岩盤露頭など二次元面での計測量と岩盤空間での三次元量との関係を考察する。第3は、定めた不連続面の幾何学的パラメータに基づいて所要岩盤空間に不連続面を発生させ岩盤不連続面モデルを作成する。三次元不連続面モデルの適用例に地下空洞岩盤の調査結果を例に取り、上記の手順の具体例を示すと共に、同モデルをブロック理論に適用して岩盤掘削面の局所的安定問題を検討した。

## 2. ジョイントディスクモデルの作成

## 2.1 モデル化の考え方

個々の不連続面にジョイントディスク(Joint Disk)の考え方を導入し、それぞれのジョイントディスクを、図-1の互いに独立な次の4つのパラメータで表現する：

- (a) ディスクの中心位置： $C_d=(X_d, Y_d, Z_d)$
- (b) ディスクの直径： $x$
- (c) ディスクの方位： $\hat{n}_d=(A_d, B_d, C_d)$
- (d) ディスクの開口幅： $t$

ただし、開口幅は本文で以下に検討する安定問題に直接に関係がないので考慮しない。各パラメータは岩盤調査で求めるデータの統計処理およびその解析から算定する。従って、各パラメータ特性を正確に推定することが精度の高いモデル化の基本と言える。

モデル化の手順は次のようである；不連続面の計測データについて方位解析を行い統計的に有意な卓越方位群（以下、クラスターと呼ぶ）を定める。続いて各クラスターごとに、ディスクモデルの方位、直径および空間位置についての各パラメータ特性を求める。この結果に基づいて仮想岩盤空間的にジョイントディスクを多数発生させて図-2のような岩盤モデルを作成する。このとき、各パラメータに対する理論モデルの形式は各クラスターごとに自由に設定できる。以上のモデル作成の手順を図

i) 埼玉大学工学部建設基礎工学科 教授（浦和市下大久保 255）

ii) 埼玉大学理工学研究科 博士後期課程

iii) 埼玉大学工学部建設基礎工学科 助教授

（1989. 7. 14 原稿受付・討議期限 1991. 4. 1, 要請があれば1か月の期限延長可能）

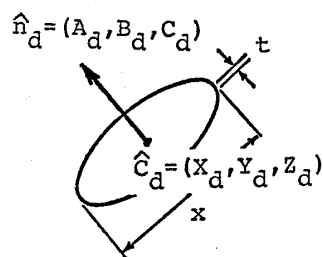


図-1 ジョイントディスクモデル

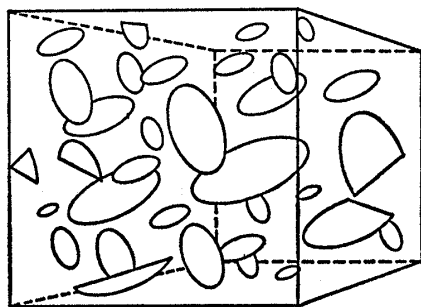


図-2 岩盤モデルの概念図

-3 のフローに示す。

## 2.2 ディスクモデルの理論的誘導

三次元空間に分布するディスク群の二次元サンプリング面（岩盤露頭）への現れ方は Warburton<sup>12)</sup> が理論的に検討している。ここでは、岩盤調査は限られた広がりの中で実施しなければならないという現実面での制約を考慮して考察する。

ディスク群はその直径  $x$  が確率密度分布  $g(x)$  に従い

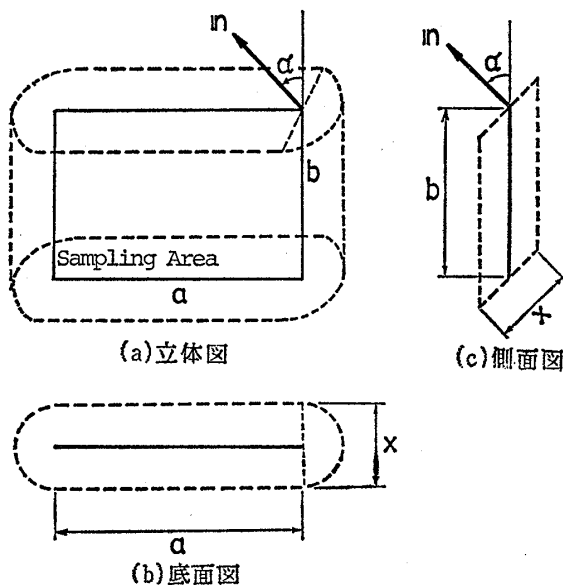


図-4 ディスクの中心が存在する領域

ディスクの方位を一定（すべてのディスクが平行）、また、ディスクの中心位置の数は単位空間当り  $N_V$  の一様分布と仮定し、ディスク群の法線  $n_d$  と角度  $\alpha$  をなす横  $a$ 、縦  $b$  の長方形サンプリング面を図-4 (a) のように考える。このときサンプリング面と交差する直径  $x$  のディスクの中心が存在しうる空間領域は、図中の破線で示した形状となる。この空間領域は図-4 (b) に示す長円を底面とした柱状体を、図-4 (c) のように底面ディスク群に平行になるように角度  $\alpha$  だけ歪ませたものであ

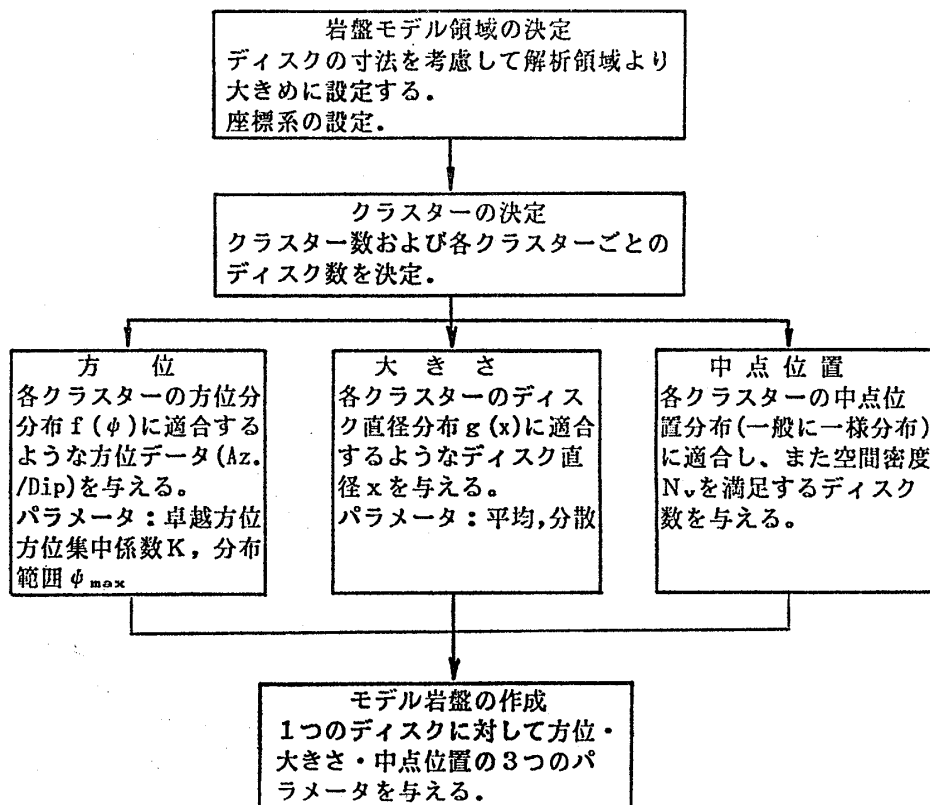


図-3 モデル作成の手順

る。Warburton は空間領域を単純な平行 6 面体として  
いる。上記の条件を基に若干の計算（付録参照）を行  
うと、サンプリング面に現れる単位面積当りのトレース  
数  $N_A$  は次式となる。

$$N_A = N_V \left( \mu_1 + \frac{\pi \mu_2}{4a} \right) \cos \alpha \quad (1)$$

ここで  $\mu_1, \mu_2$  は、式 (2) および (3) で表される確  
率密度分布  $g(x)$  の 1 次、2 次モーメントである；

$$1 \text{ 次モーメント} : \mu_1 = \int_0^\infty x \cdot g(x) dx \quad (2)$$

$$2 \text{ 次モーメント} : \mu_2 = \int_0^\infty x^2 g(x) dx \quad (3)$$

従って、サンプリング面に現れるトレース長さ  $y$  の確  
率密度分布  $h_A(y)$  は次式となる（付録参照）；

$$h_A(y) = \frac{y}{a\mu_1 + \frac{\pi}{4}\mu_2} \int_y^\infty \left( a + \frac{\pi}{4}x \right) \frac{g(x)dx}{\sqrt{x^2 - y^2}} \quad (4)$$

サンプリング面の寸法が、その面に現れるトレース  
（ジョイントディスク）の寸法に較べて十分大きいとき、  
上式は Warburton の式に一致する。しかし、一般的に  
実際の露頭ではこの条件は成り立ちにくい。

### 2.3 ジョイントディスクシミュレーションの方法

前節のディスクモデルの解析的な誘導は、実際の不連  
続面調査で得たトレース長分布  $h_A(y)$  から、ディスク  
直径分布  $g(x)$  を推定するために積分方程式を解く必要  
がある。しかし、分布関数には対数正規分布のように積  
分不可能なものがあるので、数値積分やジョイントシ  
ミュレーションで解析する場合もある。シミュレーション  
解析は複雑な条件でもある程度の水準の精度の解が求ま  
る。その端的な例は、複数のクラスターがある場合や卓  
越方位まわりにばらつきをもつ場合が挙げられる。しか  
し、これらは最も一般的な岩盤条件と言える。ここでは  
シミュレーションの方法を利用する。

この方法は、任意の岩盤空間に多数のジョイントディ  
スクを発生させて岩盤モデルをシミュレートし、次にそ  
の岩盤内に任意のサンプリング面を設定してその面と交  
差するディスクの計算（計測）を行う方法である。ディ  
スクモデルの発生とは、1つのディスクに前述の3つの  
独立なパラメータを与えることである。これらのパラメ  
ータはそれぞれ任意の確率密度分布に従うとして乱数を  
発生させて決定できる。

サンプリング計算の手順は、まず、サンプリング面  
に対してディスクモデルと同じくその位置、大きさ、方位  
を設定することである。この時、図-5 のサンプリング  
面上に現れるトレースは、サンプリング面とジョイント  
ディスクというある任意の拡がりを持つ2つの平面の交  
線で定められる。従って計算は図に示したトレース端点  
 $E_1, E_2$  を求めることである。

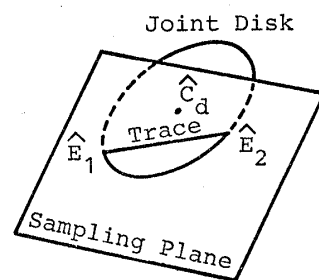


図-5 ジョイント・トレース

## 3. 不連続面データの解析

### 3.1 計測および統計処理

岩盤内の不連続面分布は複雑であるため、その三次元  
的な構造性は未だ十分明らかではないが、岩盤不連続面  
分布に関する次の特徴は良く知られている；

- (1) 不連続面はほぼ平面的とみなせる。
- (2) 同じ地質構造をなす岩体内の不連続面群はいく  
つかの卓越した方向性をもつ。
- (3) 不連続面の連続性・大きさには分布パターンが  
ある。
- (4) 不連続面の割れ目間隔の分布には分布パターン  
がある。

以上の特性をできるだけ正確に反映した三次元の不連  
続面岩盤モデルを作成することが目的である。不連続面  
のデータは通常の岩盤調査で求める。この場合、計測デ  
ータに関して次の問題がある。①不連続面は三次元量で  
あるが、その量は通常、岩盤露頭や掘削面などの二次元  
面で計測される。②対象とする岩盤範囲に対して限られ  
た範囲と量の計測データしか得られない。従って、二次  
元で計測するデータと三次元量との関係、および、計測  
したデータの統計的処理の問題である。以上に関して、  
前記 (1)～(4) の不連続面の特性を考慮して次の処理  
を行う；

統計的に有意なクラスター解析、二次元サンプリング  
の特性を考慮した不連続面の三次元空間での大きくて分布  
と密度の解析。一連の解析の手順を図-6 に示す。

### 3.2 不連続面群のクラスター解析

一般には不連続面の測定データをステレオ投影してそ  
の密度コンター図を作成し、データの集中方向を視覚的  
に判定して卓越方位とする。しかし、この方法は地形図  
の等高線に似て、統計的意味は不明確である。例えば、  
データ数に対する意味付け、コンターの描き方、卓越方  
向とそれに属する範囲（クラスター）判定の不明確さな  
ど種々の問題がある。また、個々のデータに対する数量  
的・統計的処理ができない。

このような問題点を統計的な立場で処理する Mahtab  
ら<sup>5)</sup>の方法がある。これは単位の半球面を図-7 のように

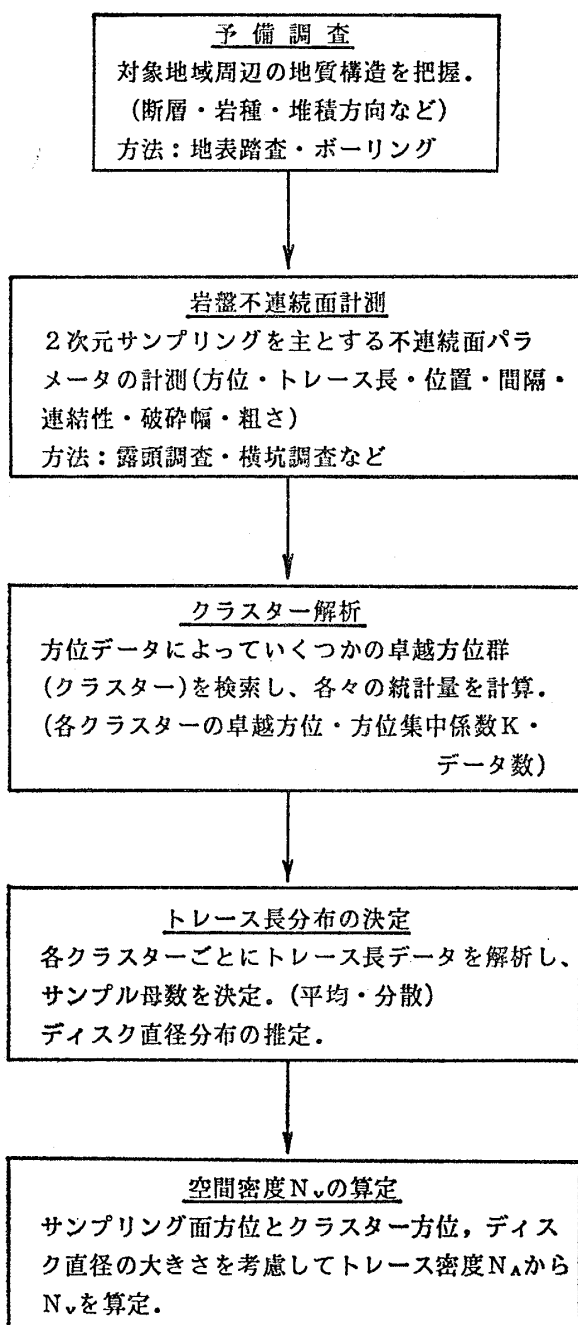


図-6 不連続面データの計測および統計処理の手順

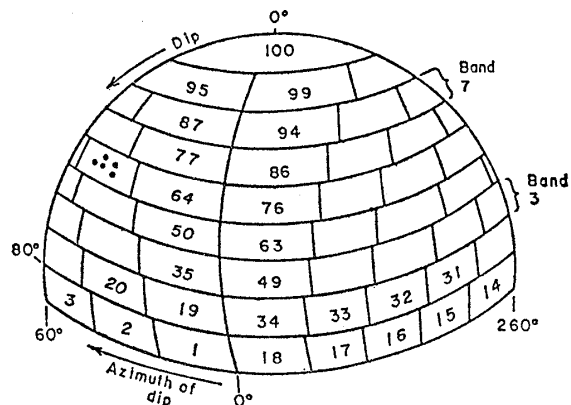


図-7 セル概念図(立体図)

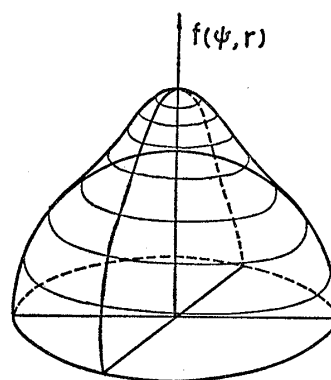


図-8 半球上正規分布

100 個の等面積パッチ (Patch) に分割した半球状セルを用いるクラスター判定方法である。クラスターはそれが半球上正規分布に従うとしてその検定には一般的なカイ2乗検定を用いる。半球上正規分布は、Fisher<sup>15)</sup> による三次元の方位のばらつきを処理する理論分布である。図-8 は半球上正規分布の概念を示したものである。単位球面 ( $r=1$ ) 上に中心から偏角傾斜角  $\psi$  (傾斜角あるいは緯度) が分布する確率密度関数  $f(\psi)$  は、次式で与えられる(半球上正規分布の誘導と詳細は、文献<sup>14), 15)</sup> 参照)；

$$f(\psi) = \frac{K \cdot \exp K(\cos \psi - 1)}{2\pi} \quad (5)$$

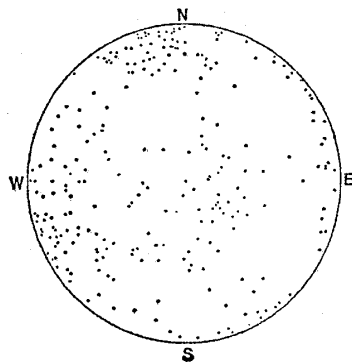


図-9 方位データのステレオ極投影(上半球等積投影)



図-10 コンター図(上半球等積投影)

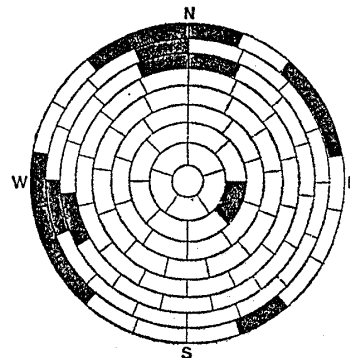


図-11 限界密度以上のパッチ

ここに $K$ は方位集中係数で、 $K$ が大きな値ほどデータの方位の集中を意味し、その変域は $[1, \infty]$ である。

図-9～11に Mahtab らの方法の適用例を示す。いずれも上半球等面積投影である。コンター図は文献<sup>16)</sup>に掲載したプログラムを用いてマイクロコンピュータで作成した。図-11は各パッチ内に含まれるデータ(単位法線ベクトル)数を計算して全データ数に対する密度(%)を求め、限界密度以上のパッチを集中度の高い部分とみなす。限界密度は生起確率5%のポアソン分布検定で算定した。限界密度以上で隣接するパッチは同じクラスターに属すると判定する。各クラスターを構成するパッチ内の全データからデータ数 $N$ 、卓越方位、方位集中係数 $K$ 、分布範囲 $\psi_{\max}$ を計算する。このとき卓越方位は各データの法線ベクトルの合ベクトル $\vec{R}$ 、また、分布範囲は卓越方位から最も離れたデータとの角度である。以上が Mahtab らの方法であるが、この処理のみではクラスターに含まれるデータは限界密度以上のパッチに属するものに限られる。上記の手順で明らかのように判定するクラスターの分布はパッチの配置方法に影響を受ける。解析条件の前提がデータの等方性半球上正規分布であることを考慮して、さらに次の操作を加えることとする。

判定されたクラスターの分布範囲 $\psi_{\max}$ に分布する全データを用いてクラスターの統計量を更新する。更新したクラスターについて再度その統計量を計算する。クラスターの分布範囲を同心円状に順次拡大する。拡大する範囲はカイ2乗検定と他のクラスターとの独立性を考慮し、できる限り多くのデータが含まれるように計算する。表-1はクラスターの計算結果である。表は Mahtab らの方法と改良方法を示している。表の結果から明らかのように手順を改良すれば、全データの70%以上をいずれかのクラスターにモデル化できることがわかる。図-12はこのようにして求めた3つのクラスターを示している。

表-1 クラスター解析結果の比較(データ数 286 点)

クラスター No.	Mahtab らの解析			改 良 方 法		
	No.1	No.2	No.3	No.1	No.2	No.3
卓越方位 { 傾斜方位	248.62°	348.25°	120.31°	248.62°	347.09°	118.39°
傾 斜	83.88°	80.75°	22.70°	83.88°	82.00°	16.26°
分布範囲 $\psi_{\max}$	31.91°	30.22°	11.20°	31.91°	44.90°	37.12°
方位集中係数 $K$	22.68°	22.08°	185.05°	22.68°	12.44°	12.74°
自 由 度 $\nu$	13	21	13	13	21	13
$\chi^2$ 値	13.24	44.11	24.81	13.24	28.80	19.98
理論的 $\chi^2$ 値	22.35	32.66	22.35	22.35	32.66	22.35
クラスターデータ数	57	77	7	57	113	45
クラスターに定義されるデータ数とその総数に対する割合	141 点 (49.3%)			215 点 (75.2%)		

[注] 理論的  $\chi^2$  値は有意水準  $\alpha=5\%$  において求めた

### 3.3 不連続面の大きさとその分布

岩盤の内部で不連続面がどのような形状と広がりを持つかは明らかではない。不連続面の成因や岩石の種類で異なると考えられるが、本文は取扱いの容易さを考慮して円形ディスクを仮定する。ディスクの直径を二次元露頭で計測するトレースの長さから推定しなければならない。

トレース長さを表す分布関数はいくつか報告<sup>7)~9)</sup>されている。負の指数分布型と対数正規分布型がその主なものである。不連続面には微少な無数のクラックから断層に至るまで様々な種類と寸法があるが、工学的にこれらを同一の視点で取り扱うことは不適当である。

図-13は実測データ<sup>17),18)</sup>を参考に、不連続面の種類ごとのトレース長さの相対的頻度分布を概念的に示している。分布数の絶対値は小スケールのものほど飛躍的に増加することは当然予想される。図は不連続面の種類ごとの分布が対数正規分布であることを示しているが、ここで種類による区分を除外してトレース長さのみに注目して考えると、トレース長さに対する分布頻度は負の指数分布型を取ると考えられる。図-13の傾向は統計学的フラクタル性についても報告<sup>19)</sup>されている。

次に別の観点からトレース長さの分布形を考察する。方法はジョイントディスクモデルによるシミュレーション

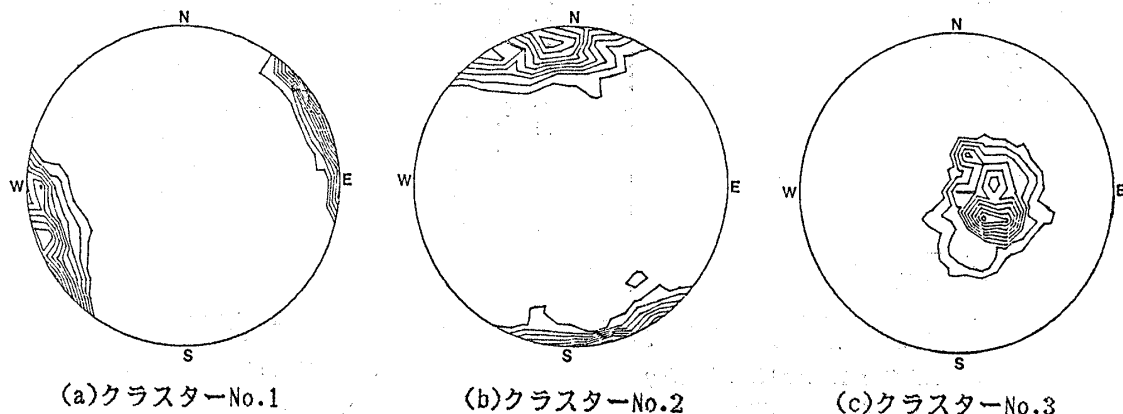


図-12 クラスター判定結果

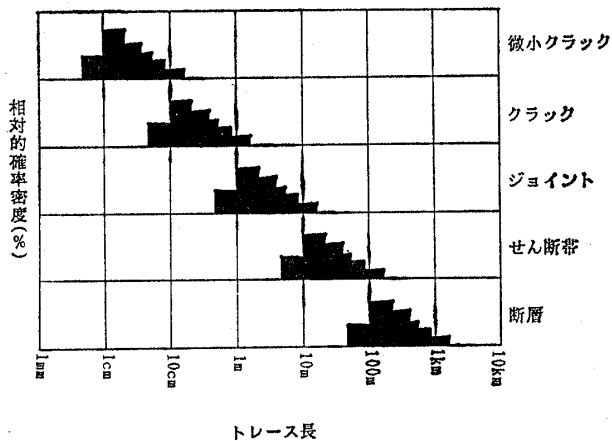


図-13 各スケールについてのトレース長の相対的分布

ンで三次元空間のディスク分布と二次元断面でのトレース分布  $h_A(y)$  の関係を調べる。解析条件は、ディスクの方位を一定とし、ディスクの直径  $x$  は任意の分布  $g(x)$ 、および、ディスク中点密度  $N_V$  を任意の値に設定する。

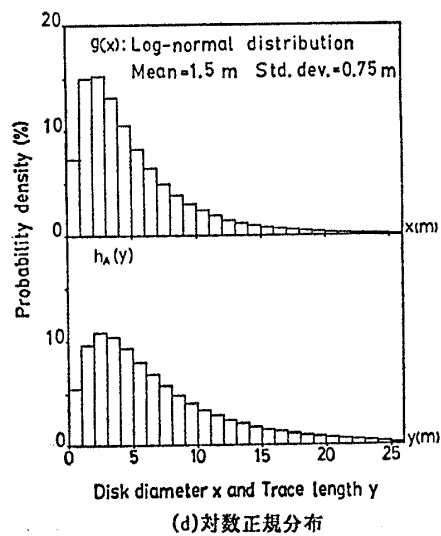
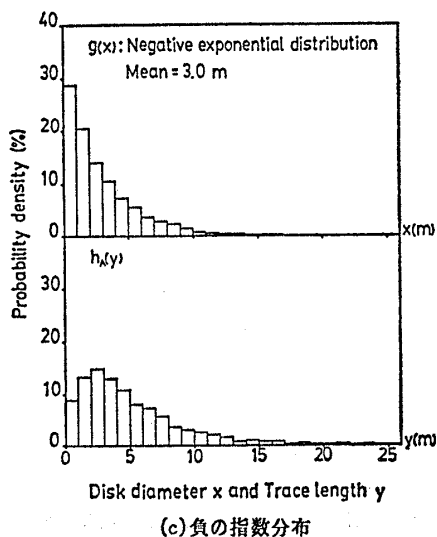
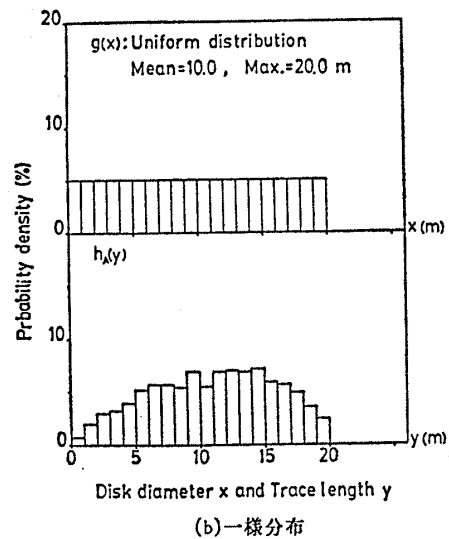
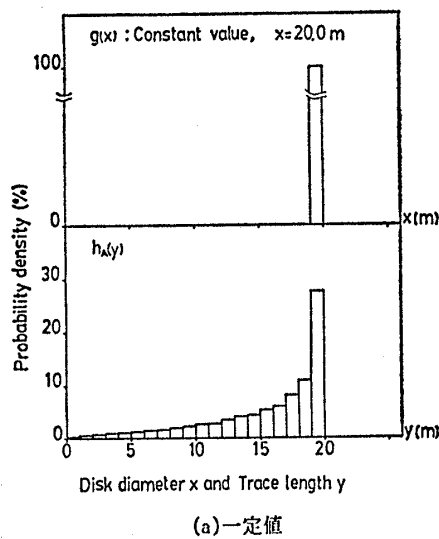


図-14 シミュレーションによるトレース長の推定結果

図-14 は解析結果である。各図の上側が設定したディスク直径分布  $g(x)$ 、下側が計測したトレース長分布  $h_A(y)$  である。ディスク直径分布は、(a) 一定値、(b) 一様分布、(c) 負の指数分布、(d) 対数正規分布である。図の結果からディスク直径分布  $g(x)$  が負の指数分布あるいは対数正規分布のとき、トレース長さ分布は対数正規に近い分布を示すことがわかる。

以上、岩盤露頭のトレース分布とシミュレーション結果の考察から、実用上で小さなディスクの分布が重要な意味を持たない場合はディスク直径分布  $g(x)$  はトレース長さ分布と同じく対数正規分布でモデル化するのが適当と言える。

### 3.4 不連続面の分布密度

ジョイントディスクモデルのパラメータに不連続面の空間的位置を表わすディスクの中点位置がある。単位空間内の中点位置の数が不連続面の密度である。現場調査

から中点位置を決めることは不可能に近い。従って、ここでは任意の空間内のディスクの中点は一様分布（ランダム分布）とし、その分布は密度  $N_V$  で表せるものとする。

二次元単位平面上に現れるトレースの本数はトレース密度  $N_A$  であり、現場調査で計測できる量は  $N_A$  で  $N_V$  は直接求まらない。 $N_A$  はサンプリング面と不連続面との角度関係と不連続面の大きさで変化する。ディスク群が平行のとき、両者の関係は式(1)で表せる。しかし、自然の不連続面は方向性のばらつきをもつのが普通であり、ばらつきがある場合の  $N_V$  の算定方法を検討する必要がある。ここでは先にディスク直径分布に行ったと同様にシミュレーションで検討する。ばらつきは、3.2で述べた方位集中度  $K$  で表現できる。しかし、 $K$  はその変域が  $1 \sim \infty$  で、数値の変化が大きい。そこで  $K$  に換えて、方位集中度  $A$  を次のように定義する。

$$A = \frac{|\bar{R}|}{N} = 1 - \frac{1}{K} \quad (6)$$

ここで  $\bar{R}$  は各データの法線ベクトルの合ベクトル、 $N$  はデータ総数である。

サンプリング面方位との関係は、2.2で定義したディスク群の卓越方位とサンプリング面のなす角度  $\alpha$  で検討できる。 $\alpha = 0^\circ$  はサンプリング面と卓越方位が直交、 $\alpha = 90^\circ$  は平行である。

図-15(a)～(e)は、トレース密度  $N_A$  と  $\alpha$  の関係を、ばらつきをパラメータとして示したものである。すべてのケースで  $N_V$  を一定とし、各ケースごとに数回の試行を行って平均値を破線で示した。図-15(a)の実線は理論値(式(1))で点で示したシミュレーション結果と比較している。図-15からばらつきが増加するに従い  $\alpha$  による  $N_A$  の変化が低減することが判る。図-16は、縦軸を  $A=1.0$ ,  $\alpha=0$  の時の  $N_A$  で正規化し、すべてのシミュレーション結果を総括したものである。ここで比  $(N_A / (N_A: A=1, \alpha=0))$  を密度補正係数  $C(A, \alpha)$  と置くと、ディスク方位がばらつく場合の  $N_A$  と  $N_V$  は次の関係となる。

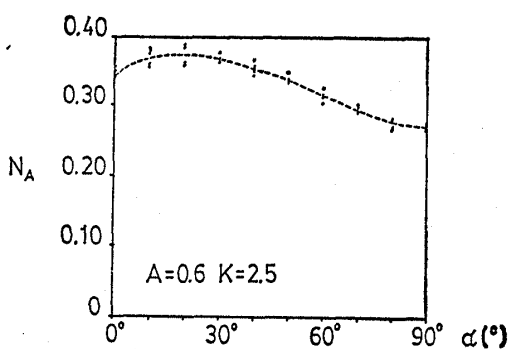
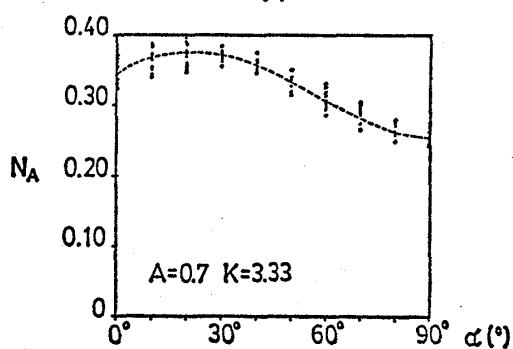
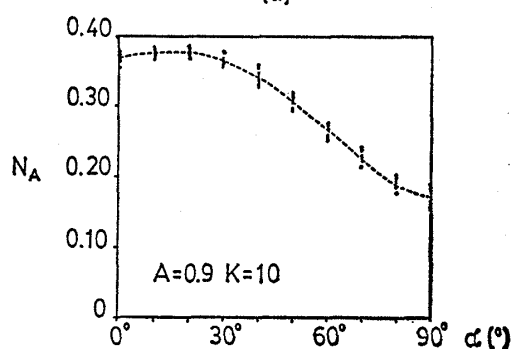
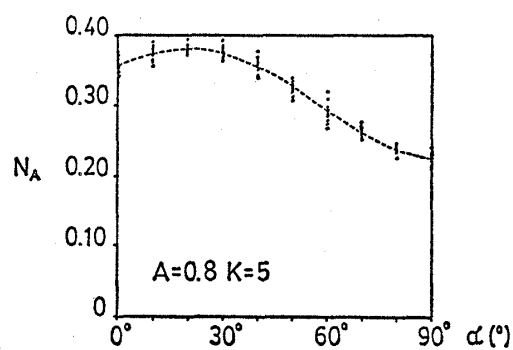
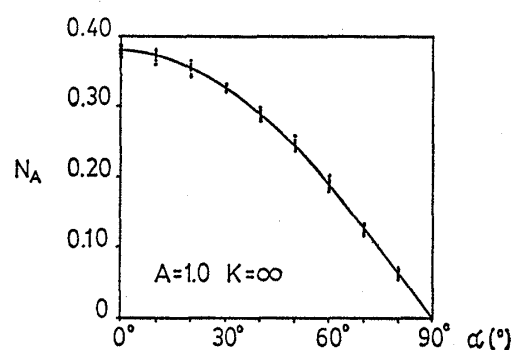
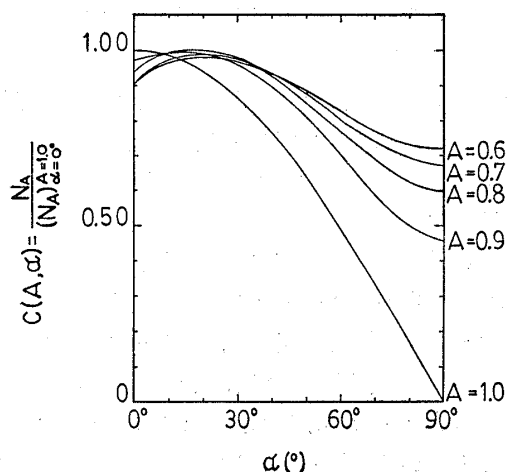


図-15 シミュレーションによるトレース密度の推定結果

図-16 密度計数  $C(A, \alpha)$ 

$$N_A = N_V \left( \mu_1 + \frac{\pi \mu_2}{4a} \right) \cdot C(A, \alpha) \quad (7)$$

次に、複数のクラスターが存在する場合を考える。 $m$  個のクラスターがありそれぞれのディスク密度を  $N_{V1}, N_{V2}, \dots, N_{Vm}$  とする。このとき任意のサンプリング面における全トレース密度  $N_A$  は各ディスク群についてのトレース密度  $N_{A1}, N_{A2}, \dots, N_{Am}$  の総和となる。従って;

$$N_A = \sum_{i=1}^m N_{Ai} = \sum_{i=1}^m N_{Vi} \left( \mu_{1i} + \frac{\pi \mu_{2i}}{4a} \right) \cdot C(A_i, \alpha_i) \quad (8)$$

であり、 $N_{Vi}$  についての  $m$  元連立 1 次方程式となる。すなわち異なる方位を持つサンプリング面をディスク群と同じ数だけ設定すれば、すべての  $N_{Vi}$  を求めることができる。

不連続面分布を表現するパラメータで密度と同様に扱われるものに割れ目間隔 (joint spacing) がある。しかし、割れ目間隔は真に独立したパラメータではなく、不連続面の密度と不連続面の大きさに依存した量であり、不連続面群による空間の分割の程度を表すものと考えられる。従って、本文は間隔を不連続面特性の独立したパラメータとしては取り上げていない。

#### 4. 岩盤空洞壁面の安定問題への適用例

##### 4.1 対象地域の概要

本文で述べたジョイント・ディスク・モデルを地下空洞掘削面の安定問題に適用した。安定解析はブロック理論で行う。この方法は不連続面と掘削面の三次元の幾何学的関係で安定性を判定するので、従来の等価連続体モデルでは取り扱えない。

解析の対象は地下発電所空洞<sup>20)</sup>である。岩盤は輝緑凝灰岩を主体とし、北北西-南南東と東西系の 2 つの急傾斜の断層系列が確認されている。地下空洞は長さ 57.5 m、幅 26.0 m、高さ 43.3 m のきのこ型断面で、地下

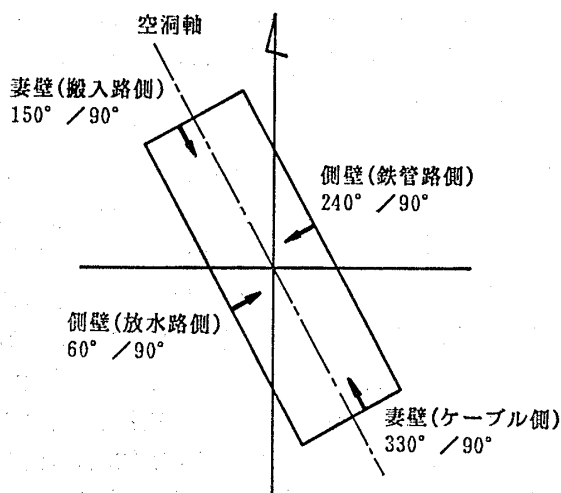


図-17 地下空洞平面図

150 m に図-17 のように配置されている。

##### 4.2 不連続面の幾何学的パラメータの推定

不連続面に関するデータは側壁 2 面、妻壁 2 面、および、天盤と床盤の 2 水平面の合計 6 面の岩盤掘削面の詳細なスケッチ図から求めた。スケッチ図に示されている不連続面のトレースおよび走向/傾斜の記録から、不連続面の方位・位置・トレース長さ・トレース密度を求めた。

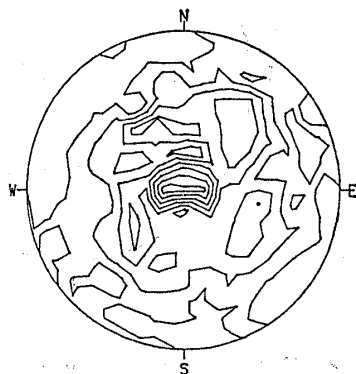
まず、方位データのクラスター解析を行う。解析では 6 つの壁面をそれぞれ平行な 2 面ずつ 3 組のデータに分類して行なった。図-18 は各組のデータと解析の結果のコンター図である。次に、クラスターの分布範囲とその卓越方位を等角投影法で図-19 に示した。これらから側壁は水平方向クラスター、水平面は鉛直方向クラスターのみが判定された理由は、壁面方位と不連続面群の方位関係、すなわち水平面に近い不連続面群は現われにくく、また側壁の方位が鉛直方向にある不連続面群の方位に近いことである。このうち鉛直方向が卓越するものは主断層系列に近い。各クラスターの卓越方位の合力ベクトルから図-20 の 2 つの卓越方向 (クラスター 1, クラスター 2) が求まる。各々の方位集中係数は、共に  $K=10$  である。

次に、各クラスターごとにトレース長さを解析してディスク直径分布  $g(x)$  を推定する。図-21 は各クラスターに属するデータで作成したトレース長さ分布  $h_A(y)$ 、また、図-22 はこのようなトレース長さ分布を与えるディスク直径分布  $g(x)$  である。このディスク直径分布は  $h_A(y)$ 、 $g(x)$  がともに対数正規分布するという仮定のもとに、シミュレーションで平均値と標準偏差の値を変化させて逆算の手法で求めたものである。

次に、3.4 に述べた方法でディスク中点密度  $N_V$  を推定する。表-2 は各壁面のトレース密度、また、表-3 はディスク中点密度の計算に必要な諸量である。密度補正

## SOKU-R.CON

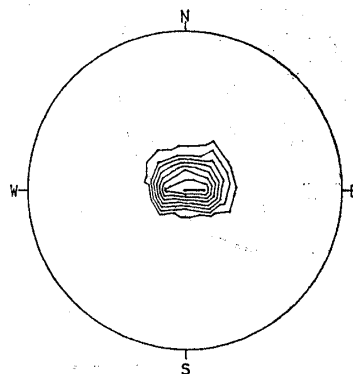
No. of Data= 549  
Center Interv(X)=.5  
Maximum level(X)= 3.825



(a-1)側壁のデータ

## SOK-R1.CON

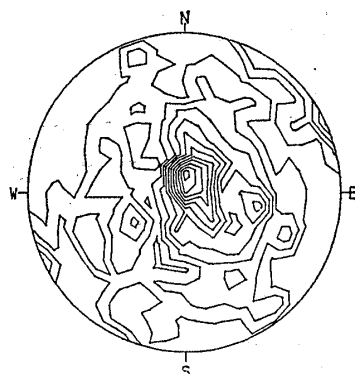
No. of Data= 83  
Center Interv(X)= 3  
Maximum level(X)= 24.09



(a-2)側壁のクラスター

## TSUM-R.CON

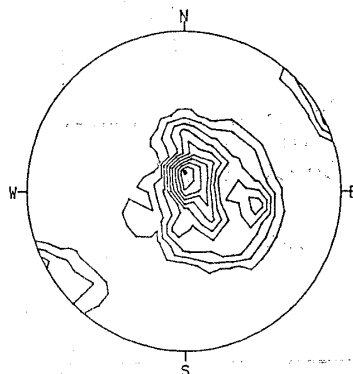
No. of Data= 278  
Center Interv(X)=.5  
Maximum level(X)= 5.755



(b-1)妻壁のデータ

## TSM-R1.CON

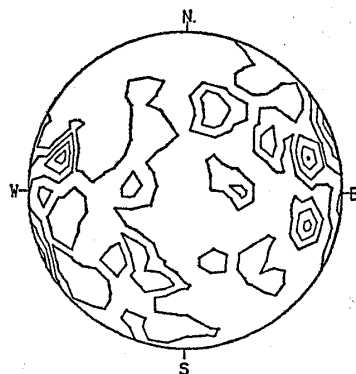
No. of Data= 158  
Center Interv(X)= 1  
Maximum level(X)= 10.12



(b-2)妻壁のクラスター

## ARCH-R.CON

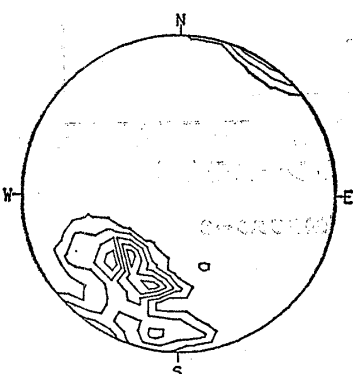
No. of Data= 172  
Center Interv(X)= 1  
Maximum level(X)= 4.651



(c-1)水平面のデータ

## ARC-R1.CON

No. of Data= 45  
Center Interv(X)= 2  
Maximum level(X)= 11.11



(c-2)水平面のクラスター

図-18 各組の方位データとクラスター

係数  $C(A, \alpha)$  は図-16 から求めた。この係数を用いて式(8)の連立方程式を解くが、その解領域は負となった。これは掘削方法との関係で掘削切羽に当たる妻壁や水平の床盤での計測精度を側壁と同様に確保することが

困難なため、これらの部分のトレース密度がやや小さくなったためである。したがって、式(8)を解く際、側壁の関係を固定して他の部分のトレース密度を修正することにより解を求め表-1に示した。このようにして求

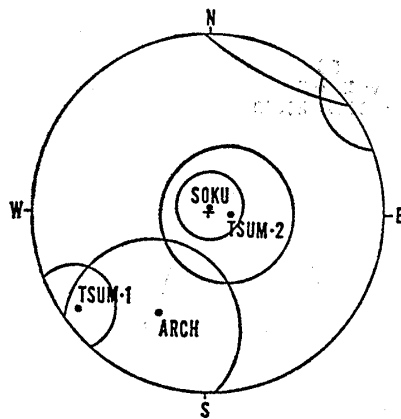


図-19 クラスタ解析の結果

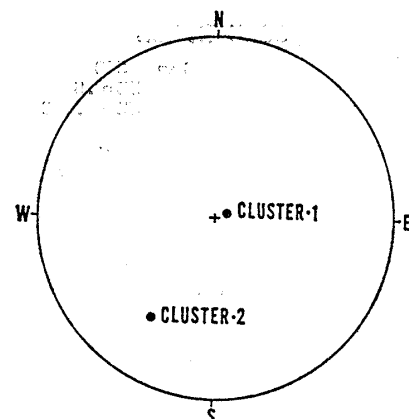
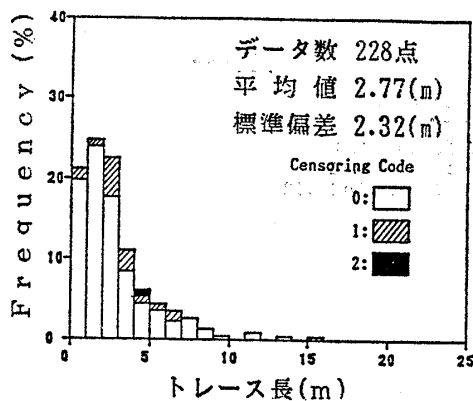
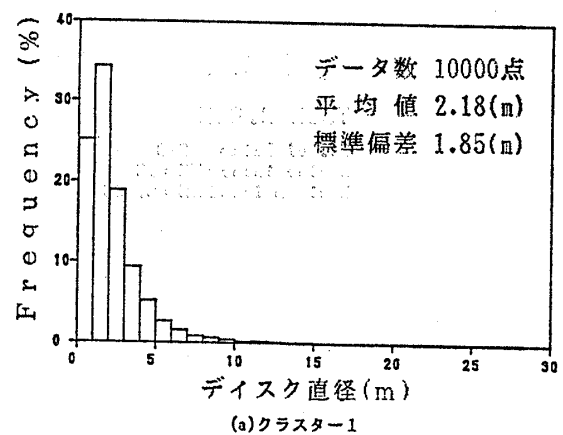


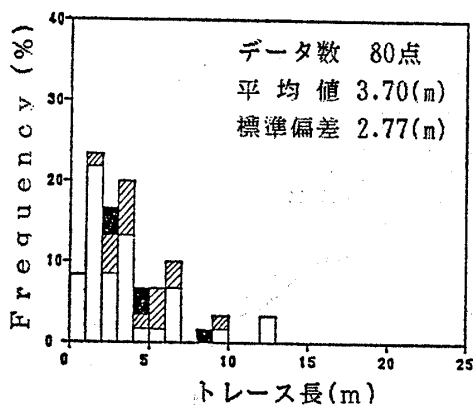
図-20 決定された2つの卓越方位



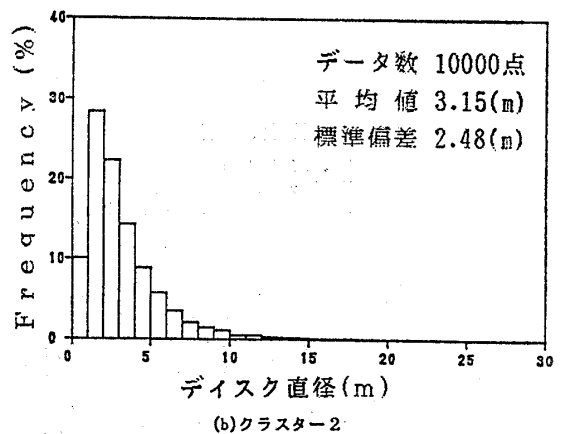
(a) クラスタ-1



(a) クラスタ-1



(b) クラスタ-2



(b) クラスタ-2

図-22 各クラスターディスク直径分布

図-21 各クラスターのトレース長分布

表-2 各壁面のトレース密度

	面 積 $A(\text{m}^2)$	トレース数 $n_2$	トレース密度 $N_A(\text{1/m}^2)$	変 更 値 $N_A'(\text{1/m}^2)$
側壁 鉄管路側	1563.8	267	0.171	0.178
側壁 放水路側	1528.9	282	0.184	
妻壁 ケーブル側	927.0	150	0.162	0.153
妻壁 搬入路側	889.7	128	0.144	
アーチ部	1540.1	93	0.060	0.070
底盤部	994.7	79	0.079	

めた各パラメータが表-4 である。

#### 4.3 シミュレーションによる解析

前節で求めた不連続面の各パラメータを用いてジョイントディスクモデルによるシミュレーション解析を行う。この方法は所定の大きさの岩盤モデルを作成し、そこに空洞モデルを設定する。シミュレーションで作成した空洞モデルの寸法は図-23 の通りである。

ブロック理論<sup>1)</sup>を適用し図-24 のように幾何学的に不安定な形状を持つブロックを検索する。解析と不安定性の判定に必要なパラメータは掘削面上で閉領域をなすジ

表-3  $N_V$  の算定に用いられる諸量

		クラスター1	クラスター2
$\mu_1$ $\mu_2$ $K$		2.183m	3.152m
		8.372m <sup>2</sup>	16.117m <sup>2</sup>
		10	10
$\alpha_i$	側壁	7.33°	64.30°
	妻壁	1.03°	18.39°
	水平面	82.60°	17.30°
$C(A, \alpha_i)$	側壁	0.984	0.654
	妻壁	0.973	0.992
	水平面	0.486	0.991
$a_i$	側壁	57.5m	43.3m
	妻壁	26.0m	43.3m
	水平面	26.0m	57.5m

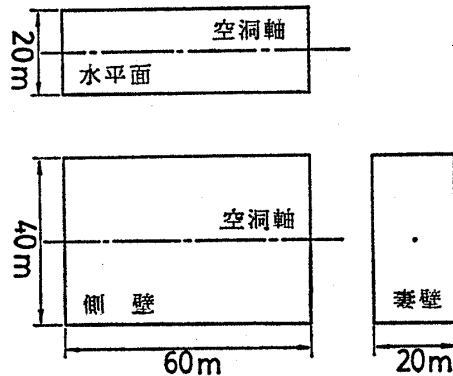


図-23 空洞モデルの寸法

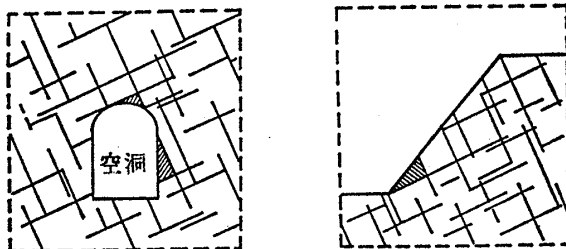


図-24 移動可能ブロック概念図

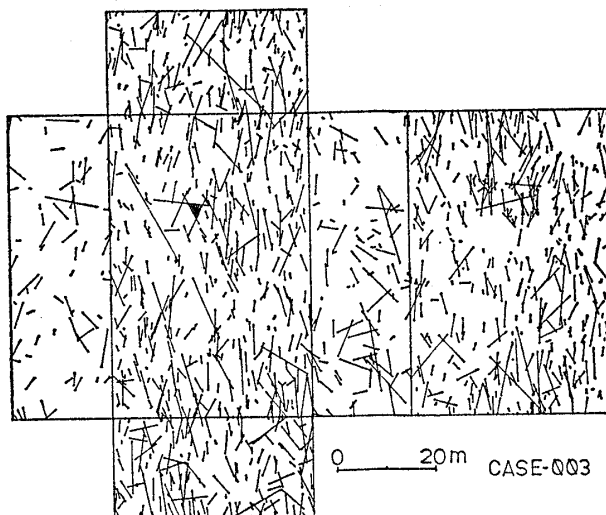


図-25 シミュレーションによって得られた壁面展開図

表-4 ディスクモデル・パラメータ

		クラスター1	クラスター2
方位	分布型	半球上正規分布	半球上正規分布
	卓越方位	68.0°/7.4°	220.7°/72.7°
	方位集中係数 $K$	10 ( $A=0.9$ )	10 ( $A=0.9$ )
直径	分布型 パラメータ	対数正規分布 $\mu=2.183\text{m}, \sigma=1.854\text{m}$	対数正規分布 $\mu=3.152\text{m}, \sigma=2.475\text{m}$
中点	分布型 密度 $N_V$	一様分布 0.070(1/m <sup>3</sup> )	一様分布 0.006(1/m <sup>3</sup> )

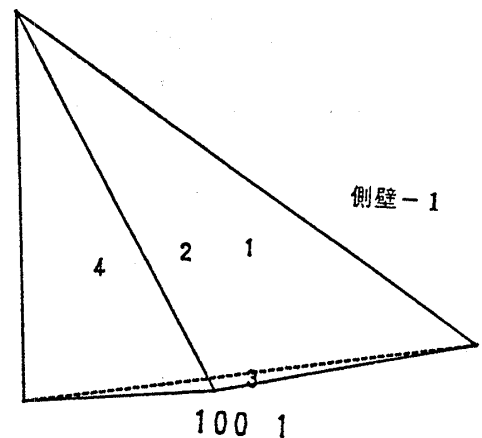


図-26 移動可能ブロック概念図（投射投影）

ポイント・トレース群の方位と位置である。図-25 はシミュレーションで作成した空洞モデル壁面の一例を展開図で示している。図で陰影をつけた部分が移動可能ブロックと判定した部分である。この内、大きなブロックの投射投影図を図-26 に示した。数ケースのシミュレーション解析を行うことにより、掘削面に予想される移動可能ブロックの形状・数・方向を求めて掘削面の安定性を考察することができる。

## 5. 結 論

岩盤内に多数分布する不連続面群の三次元分布を表現する幾何学的ディスクモデルの作成方法を述べた。モデル化は次の手順からなる。第1段階は不連続面群をその方向性に注目して統計的に有意なクラスターに分割する。第2は各クラスターを特徴付ける不連続面の幾何学的パラメータ（方向性・大きさ・分布密度）を決定する。パラメータはデータのばらつきを表現できる分布関数とその係数からなる。ここでは岩盤露頭などの二次元面の計測量を岩盤空間の三次元量に変換するための修正を行う。第3は、上記の幾何学的パラメータに基づいて所要岩盤空間に不連続面を発生させ岩盤不連続面モデルを作成する。最後に、地下岩盤空洞を例に本文に述べた幾何学的ディスクモデルを用いて、従来の等価連続体解析では不可能であった三次元の不連続体安定解析への適用性を示した。

## 参 考 文 献

- 1) Goodman, R.E. and Shi, G.H. (1985): Block Theory and Its Application to Rock Engineering, Prentice-Hall Inc.
- 2) Goodman, R.E. (1976): Methods of Geological Engineering in Discontinuous Rocks, St. Paul, West Publishing Company. (赤井・川本・大西訳: 不連続性岩盤の地質工学, 森北出版, 1978).
- 3) Hoek, E. and Bray, J.W. (1977): Rock Slope Engineering, 2nd ed., London, Inst. Min. Metall. (小野寺, 吉中訳: 岩盤斜面工学, 朝倉書店, 1979).
- 4) Priest, S.D. (1985): Hemispherical Projection Methods in Rock Mechanics, London, George Allen & Unwin.
- 5) Mahtab, M.A., Shanley, R.J., Bolstad, D.D. and Alldredge, J.R. (1972): "Analysis of fracture orientation for input to structural models of discontinuous rock," USBMRI, 7669.
- 6) Priest, S.D. and Hudson, J.A. (1976): "Discontinuity spacings in rock," Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.13, pp.135-148.
- 7) Cruden, D.M. (1977): "Describing the size of discontinuities," Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.14, pp.133-137.
- 8) Priest, S.D. and Hudson, J.A. (1981): "Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline," Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.18, pp.183-197.
- 9) Rouleau, A. and Gale, J.E. (1985): "Statistical characterization of the fracture system in the Stripa Granite," Sweden, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.22, pp.353-367.
- 10) 菊池宏吉・小林隆志・黒田英高・水戸義忠 (1986): 節理性岩盤中の節理群の定量的な評価に基づくモデル化手法, 「第18回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集」, pp.141~145.
- 11) Baecher, G.B., Lanney, N.A. and Einstein, H.H. (1978): "Statistical description of rock properties and sampling," Proc. 18th U.S. Sympo. Rock Mech. 5C1-8.
- 12) Warburton, P.M. (1980): "A stereological interpretation of joint trace data," Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.17, pp.181-190.
- 13) Dershowitz, W. and Einstein, H.H. (1987): "Three dimensional flow modeling in jointed rock masses," Proc. 6th ISRM Cong., Vol.1, pp.87-92.
- 14) 吉中龍之進・吉田 淳・藤田朝雄 (1987): 岩盤不連続面の方向性に関する分布特性の評価とそのブロック理論への応用, 「第7回岩の力学国内シンポジウム講演論文集」, pp.145~150.
- 15) Fisher, R.A. (1953): Dispersion on the sphere, Proc. of Royal Soci. in London, Ser. A, pp.295-305.
- 16) 吉中龍之進・吉田 淳: ステレオコンター図の作成方法 [投稿準備中].
- 17) Goodman, R.E. (1989): Introduction to Rock Mechanics, 2nd ed., John Wiley & Sons, p.147.
- 18) Londe, P. (1973): "The role of rock mechanics in the reconnaissance of rock foundations," Q. J. Engng Geol. Vol.6, p.60.
- 19) 大野博之・小島圭二 (1987): 割れ目の統計的相似性に基づく Site-Characterization の試み, 「第19回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集」, pp.416~420.
- 20) 井上大栄・田中和広 (1974): 高見揚水発電所の建設に伴

う地質工学的検討, 「電力中央研究所報告」, No.383065.

付録.  $N_A, h_A(y)$  の誘導

図-4 から, サンプリグ面と交差する直径  $x$  のディスクは破線で示された空間にその中心を持つ。その体積  $V_A$  は以下となる。

$$V_A = \left( ax + \frac{\pi}{4} x^2 \right) b \cos \alpha \quad (A1)$$

この空間内に含まれるディスクの中点数は,  $V_A$  に  $N_V$  をかけて求まる。

$$N_V \left( ax + \frac{\pi}{4} x^2 \right) b \cos \alpha \quad (A2)$$

上記のディスクの中でその直径が  $x$  から  $x+dx$  であるものの割合 (確率  $P\{x, x+dx\}$ ) は以下である。

$$P\{x, x+dx\} = N_V \left( ax + \frac{\pi}{4} x^2 \right) b \cos \alpha \cdot g(x) dx \quad (A3)$$

確率  $P$  を  $x$  のとりうるすべての範囲  $[0, \infty]$  について積分することにより, サンプリグ面にジョイントトレースとして現れるディスク数は次式となる。

$$N_V \left( a\mu_1 + \frac{\pi}{4} \mu_2 \right) b \cos \alpha \quad (A4)$$

(A4) をサンプリグ面積  $ab$  で除することによって, サンプリグ面上に現れる単位面積当りのトレース数  $N_A$  は以下のようになる。

$$N_A = N_V \left( \mu_1 + \frac{\pi \mu_2}{4a} \right) \cos \alpha \quad (1)$$

サンプリグ面に現れるトレースの中でそのディスク直径が  $[x, x+dx]$  であるものの割合は, (A3) を  $N_A$  と面積  $ab$  で除して求まる。

$$\frac{ax + \frac{\pi}{4} x^2}{a\mu_1 + \frac{\pi}{4} \mu_2} g(x) dx \quad (A5)$$

図-A1 から, 上述のトレースの中でサンプリグ面から距離  $[L, L+dL]$  の範囲に中点を持つものの割合は次式となる。

$$\frac{2dL}{x} \frac{ax + \frac{\pi}{4} x^2}{a\mu_1 + \frac{\pi}{4} \mu_2} g(x) dx \quad (A6)$$

また, 図-A2 からサンプリグ面に現れるトレース長  $y$  とサンプリグ面からディスク中点までの距離  $L$  との間には以下の関係がある。

$$y^2 = x^2 - 4L^2 \quad (A7)$$

これより直径が  $[x, x+dx]$  であるディスクがサンプリグ面上に  $[L, L+dL]$  のトレースとして現れる確率は次のようである。

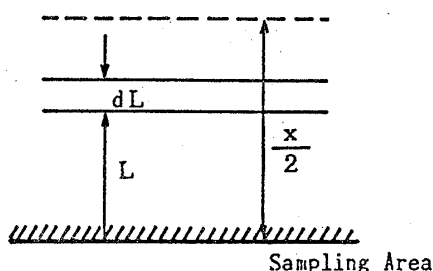


図-A 1

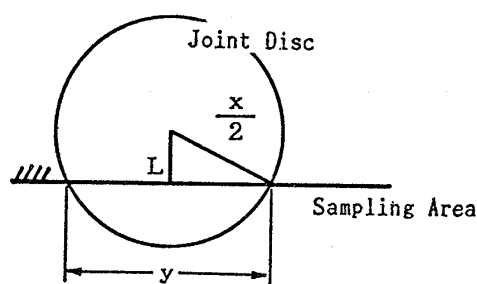


図-A 2

$$\frac{ax + \frac{\pi}{4}x^2}{a\mu_1 + \frac{\pi}{4}\mu_2} g(x) dx \frac{y}{\sqrt{x^2 - y^2}} dy \quad (\text{A8})$$

(A8) を  $x$  のとりうるすべての範囲  $[y, \infty]$  について積分することによって、サンプリング面に現れるトレース長が  $[y, y+dy]$  となる確率が求まる。

$$\frac{y}{a\mu_1 + \frac{\pi}{4}\mu_2} \int_y^\infty \left(a + \frac{\pi}{4}x\right) \frac{g(x)dx}{\sqrt{x^2 - y^2}} dy \quad (\text{A9})$$

従って、サンプリング面上に現れるトレース長  $y$  の確率密度分布関数  $h_A(y)$  は以下になる。

$$h_A(y) = \frac{y}{a\mu_1 + \frac{\pi}{4}\mu_2} \int_y^\infty \left(a + \frac{\pi}{4}x\right) \frac{g(x)dx}{\sqrt{x^2 - y^2}} \quad (4)$$

Warburton (1980)<sup>12)</sup> は、サンプリング面と交差するディスク中点の存在する空間領域を図-4 に示されている形状から両側の2つの半円柱体を省いた平行六面体として  $N_A, h_A(y)$  を以下のように導いている。

$$N_A = N_V \mu_1 \cos \alpha \quad (\text{A10})$$

$$h_A(y) = \frac{y}{\mu_1} \int_y^\infty \frac{g(x)dx}{\sqrt{x^2 - y^2}} \quad (\text{A11})$$

これらの式はサンプリング面の寸法がその面に現れるトレース（ジョイントディスク）の寸法に較べて十分に大きいときに先の誘導式に一致する。しかし実際の露頭調査ではこのような条件が成立しにくい。