

公 開

多変量統計解析手法を用いた 結晶質岩盤の割れ目解析

1992年2月

尾 方 伸 久
大 澤 英 昭
仙 波 毅
柳 澤 孝 一

動力炉・核燃料開発事業団 中部事業所

岐阜県土岐市泉町定林寺園戸959-31

TEL 0572-54-1271 FAX 0572-54-8940

多変量統計解析手法を用いた結晶質岩盤の割れ目解析

尾方 伸久、大澤 英昭、仙波 毅
柳澤 孝一

要旨

岩盤中の地下水の流れを評価するためには、まず岩盤中の水理地質構造をモデル化する必要がある。そのモデルを構築する際には、地形や水理地質構造をいかに簡略化するか、境界条件や透水係数などの水理定数をいかに現実にそくした妥当な値に設定するのかが重要な課題となる。結晶質岩盤中の透水係数は、岩盤中のさまざまな割れ目の要因（性状、密度、ネットワーク等）に支配されていると考えられている。

その透水係数と各割れ目特性との関係を明らかにするため、多変量解析の手法（重回帰分析、クラスター分析）を用いて解析をおこなった。用いたデータは、岐阜県東濃地域の花崗岩中に掘削された2孔の試錐孔で得られたAN-1,32点・AN-3,24点での透水係数測定値とそれに対応する物性値である。

その結果、以下の事が明らかとなった。

- ①本地域の花崗岩の透水性を支配しているのは、岩盤中に発達する割れ目系であり、その割れ目の数、割れ目の開口程度、充填鉱物の有無などの違いにより透水係数値が決定づけられている。
- ②クラスター分析によって各透水係数に対応する分類構造が得られた。各クラスターにはそれぞれ異なった透水係数が分布し、その特性は割れ目の開口、充填幅、交差本数、孔井の割れ目卓越方向などに支配されている。
- ③クラスター分析の結果、同一透水係数を示す異なった試験区間でも、割れ目性状が微妙に異なっている場合がある。したがって、透水係数値のみで分類するのではなくほかの特性も考慮した分類が必要である。

今回実施したような統計解析手法を用いて解析をおこなうには、使用したデータ数では不十分であり、現在の解析精度には若干問題が残る。今後データの集積を図るとともに再解析をおこなう予定である。

FRACTURE ANALYSIS IN CRYSTALLINE ROCK WITH METHOD
OF MULTIVARIATE ANALYSIS

N.OGATA, H.OHSAWA, T.SEMBA, and K.YANAGIZAWA

ABSTRACT

In order to groundwater flow in rock formation, it is essential to make a topographic and hydrogeological models and to set up the initial and boundary conditions. Hydraulic properties are considered to be dominated by various factors of fracture (i.e. width, density, network) in the crystalline rock. Investigated was relationship between the hydraulic conductivity, which is one of important factors for evaluation of groundwater flow, and the fracture properties, using the method of multivariate analysis such as multiple regression analysis and cluster analysis. A total of 56 data on hydraulic conductivity and physical parameter were used that had been obtained from 2 boreholes drilled in the granitic rock of Tono area, Gifu, in the central Japan.

The results are as follows:

- (1) The results of these two multivariate analysis are almost consistent. The hydraulic conductivity in the granitic rock is dominated by fracture system, such as number and width of the fracture, fissure-filling minerals.
- (2) The classificatory structure which obtained from the cluster analysis corresponds to that from hydraulic conductivity. Different hydraulic conductivities were distributed in each cluster that is dominated by width of open fracture, filling minerals, number of intersect and predominant direction of fractures.
- (3) The cluster analysis also implies that fracture properties of test sections with the similar hydraulic conductivities occasionally differ among them. Hence, the classifications is must be made based on the data of fracture properties as well as hydraulic conductivities.

Future studies using sufficient number of data is necessary.

目 次

1.はじめに	1
2.調査地域、試錐孔、地質の概要	1
3.多変量解析法	1
3.1 重回帰分析	5
3.1.1 重回帰分析手法による各測定値と透水係数との関係	7
3.1.2 AN-1号孔の解析結果	12
3.1.3 AN-3号孔の解析結果	14
3.1.4 AN-1, 3号孔の解析結果の考察	17
3.2 クラスター分析	18
3.2.1 クラスター分析の方法	18
3.2.2 クラスター分析によるAN-3号孔データの解析	18
4.今後の予定	26
参考文献	26
付図一覧	28

1. はじめに

地下深部岩盤中に存在する地下水の流れを評価するには、一般にコンピュータシミュレーション解析をおこなうが、この際地形や水理地質構造をいかに簡略化しモデル化するか、境界条件や透水係数などの水理定数をいかに現実にそくした妥当な値に設定するのかが重要な課題となる。特に地下深部岩盤の透水係数分布をいかに正確に把握するかが、地下水流动解析結果の信頼性を大きく左右する。

しかし、試錐孔を利用した原位置透水試験による水理学的データの取得には多大の時間と経費を必要とし、計測区間も不連続となる。これに対して物理検層、ボアホールテレビ（以下BTVと記す）などの方法では、岩盤の諸物性を連続的に計測することが可能であり、これと透水試験結果を組み合わせることにより、岩盤の連続的な水理学的評価が可能となる。

尾方らは¹⁾、堆積岩中において電気検層による見掛け比抵抗値と透水係数との間には明瞭な相関関係があり、物理検層から透水係数値が推定できることを示した。しかし亀裂系の結晶質岩盤においては、他の手段により間接的に岩盤中の透水係数値を推定できるような有効な手段がまだ確立されていない。

今回は花崗岩岩盤中の割れ目に着目し、それと透水係数との関係を明らかにするため多変量解析の手法による解析を試みたので、その結果について報告する。用いたデータは岐阜県の花崗岩中に掘削された深層試錐孔AN-86-001（掘削深度1,000m、以下AN-1号孔と呼ぶ）とAN-87-003（掘削深度408m、以下AN-3号孔と呼ぶ）において実施された、物理検層、BTV、岩芯観察（割れ目分類）、透水試験などの試験結果である。

2. 調査地域、試錐孔、地質の概要

今回の検討を実施した試錐孔は、岐阜県瑞浪市に位置する正馬様水理試験サイト内に掘削されている（図-1）。試錐孔は、AN-1号孔、AN-3号孔がおののおの花崗岩中に掘削されており（図-2）、試錐孔では物理検層、BTV、岩芯観察（割れ目分類）、透水試験が実施されている。その岩相の記載などについては、吉田らや、尾方らが報告している^{2) 3)}。本地域の地質は、中・古生層および花崗岩類を基盤岩として、それを覆って新第三系と第四系が分布する（図-3）。新第三系瑞浪層群は、基盤花崗岩を不整合で覆って分布する。その上位には瀬戸層群が、これらを不整合で覆って分布する。詳細については、上記吉田ら、尾方らの論文を参照されたい。

3. 多変量解析法

我々が調査研究の対象としている結晶質岩盤中の透水係数は、岩盤中割れ目のさまざまな要因（性状、密度、ネットワーク等）に支配されていると考えられている。その特性を明らかにするには、多数の計測が必要であり、その計測値相互と透水係数との関係を把握する必要がある。その場合、その現象に対して測定されたいいくつかの特性値は互いになんらかの関係を持っており、これらの特性値を一つずつ解析する1変量解析（単回帰分析等）の手法では現象を十分に説明できない場合がある。したがって、それらの特性値間の相関関係を考慮に入れた解析手法である、多変量解析法が必

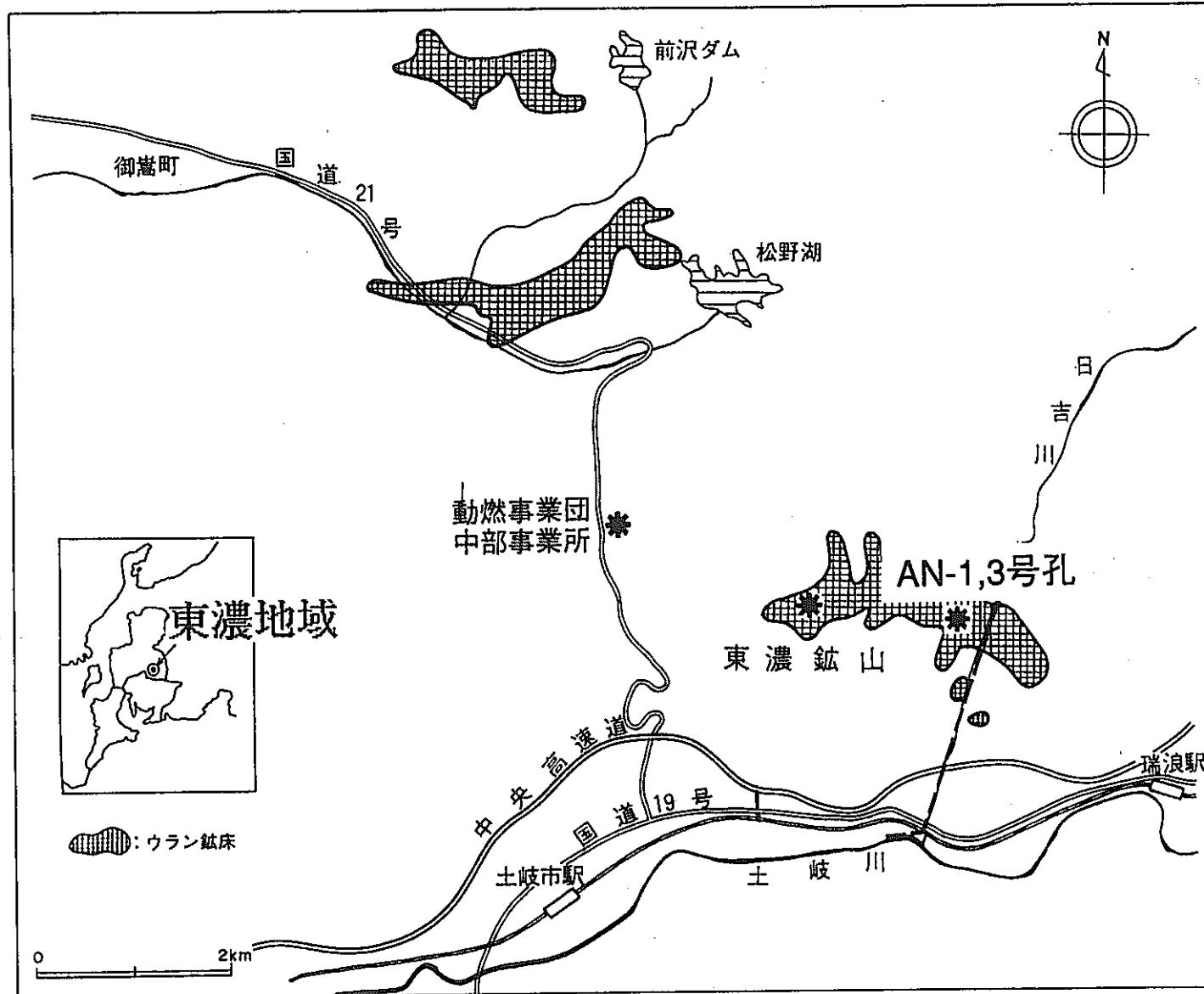


図-1 正馬様洞水理試験サイト位置図

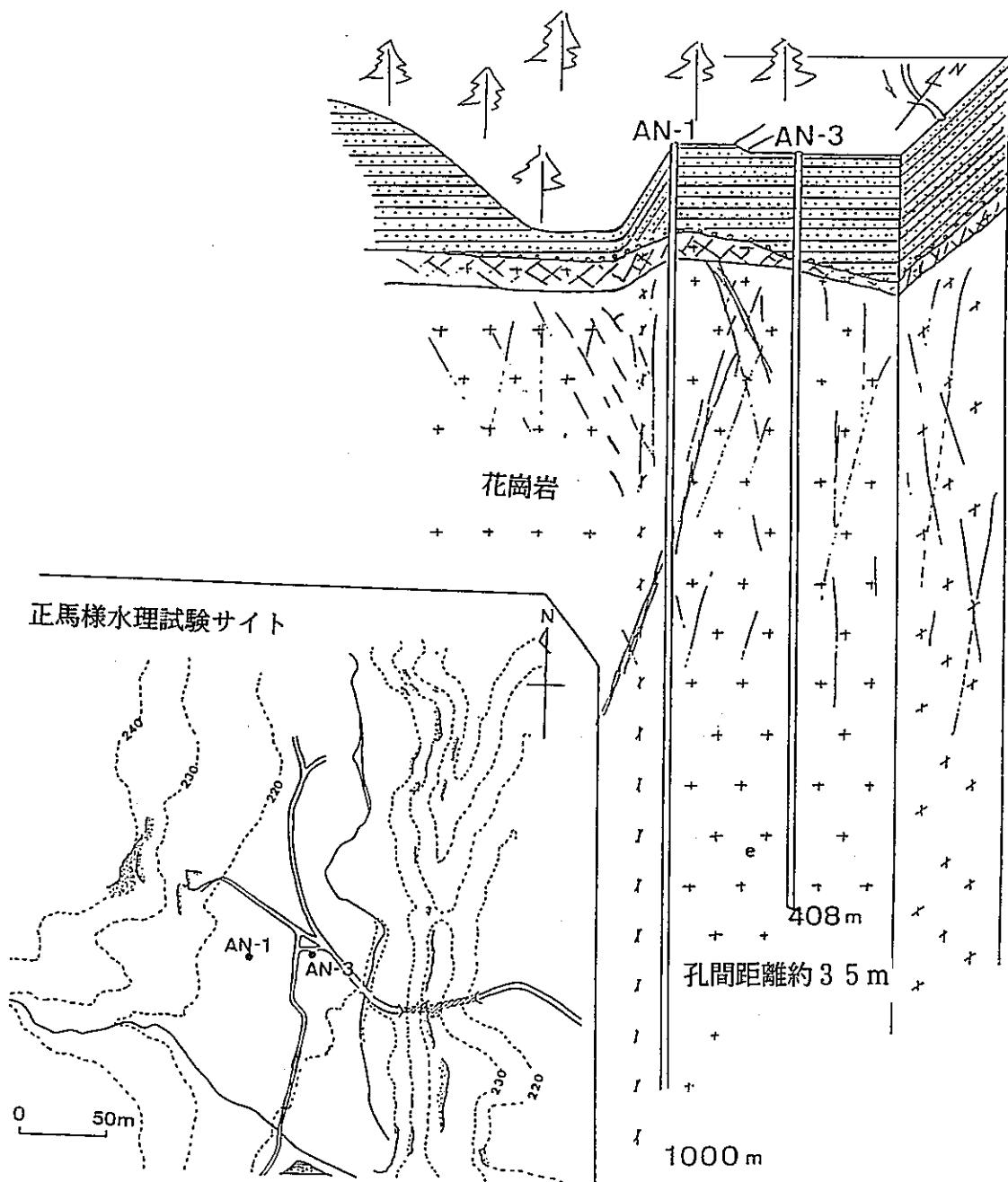


図-2 試錐孔配置図

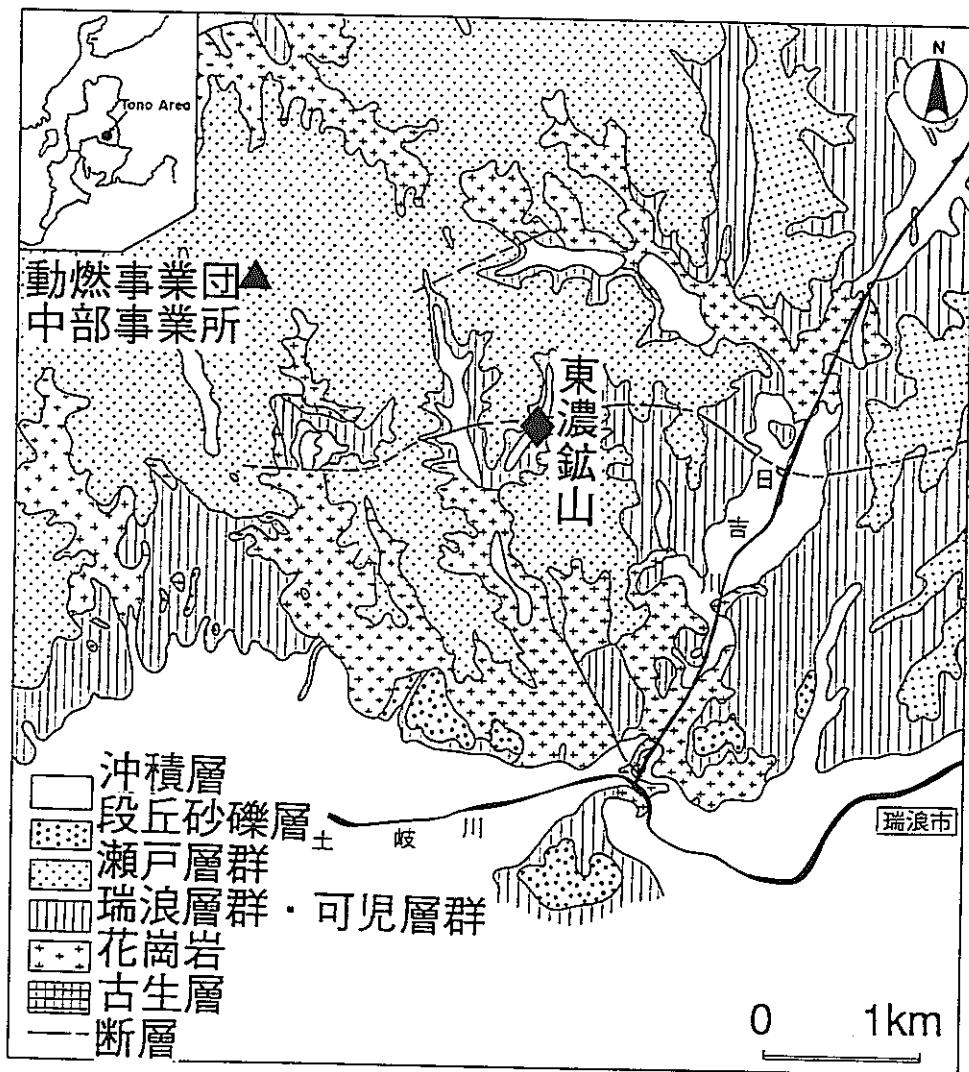


図-3 表層地質図

要となる。その解析フローを図-4に示す。

多変量解析法とは、 n 個のサンプルに対して得られた p 個の特性値（変量）の持つ情報を要約する手法である。

解析手法としては、

- ・重回帰分析
- ・判別分析
- ・主成分分析
- ・因子分析
- ・クラスター分析などがある。

このうち今回の解析に用いた分析法は、重回帰分析とクラスター分析である。使用したプログラムは、NEC社製PC9801シリーズのコンピューターのN88BA SIC上にて起動できるプログラムであり、一般に市販され広く使われているものである⁴⁾。

3.1 重回帰分析

目的としている変数Yに対して関係の深いと思われる変数Xがいくつか考えられる場合に、Xの値が変化するとそれに伴ってYの値も変化するというような関係が見られる場合が多い。このような関係を数式で表わすことができれば、Xの値からYの値を推定することができる。回帰分析とはこのように、ある変数Y（目的変数、本報告の場合は透水係数）とそれになんらかの関係で影響すると考えられる変数X₁～X_n（説明変数、各計測値）との間の関係式を求め、Yの値を予測したり、各Xの影響の大きさを評価する分析手法で、説明変数が2つ以上の場合を重回帰分析という⁴⁾。

また重回帰分析を行う際には、説明変数として使えると思われる多数の変数の中から、目的変数の予測に役立つ主要な変数を選んで分析を行うことになる。その際、変数選択としていくつか提案されており以下の手法がある。

①変数増加法

説明変数が一つも含まれていないモデルからスタートして、1つずつ変数を採用して单回帰式を計算し、回帰係数の検定のためのF₀値が最大となる変数を選び、その変数が指定された限界値Fより大きければこの変数を取り込んで次のステップに進む方法⁴⁾。

②変数減少法

説明変数の候補すべてが含まれたモデルからスタートして、モデルに含まれている変数のおののに対して、回帰係数検定のためのF₀値を計算し、その値が最小となる変数を選び、限界値Fより小さい場合はこの変数を落とす。同様に他の変数を計算し限界値より大きければ、これ以上変数を落とさず終了する⁴⁾。

上記で述べた限界値Fは、計算上2.0⁴⁾が経験的に良いとされ一般に用いられており、本解析の計算でもこの値を用いた。

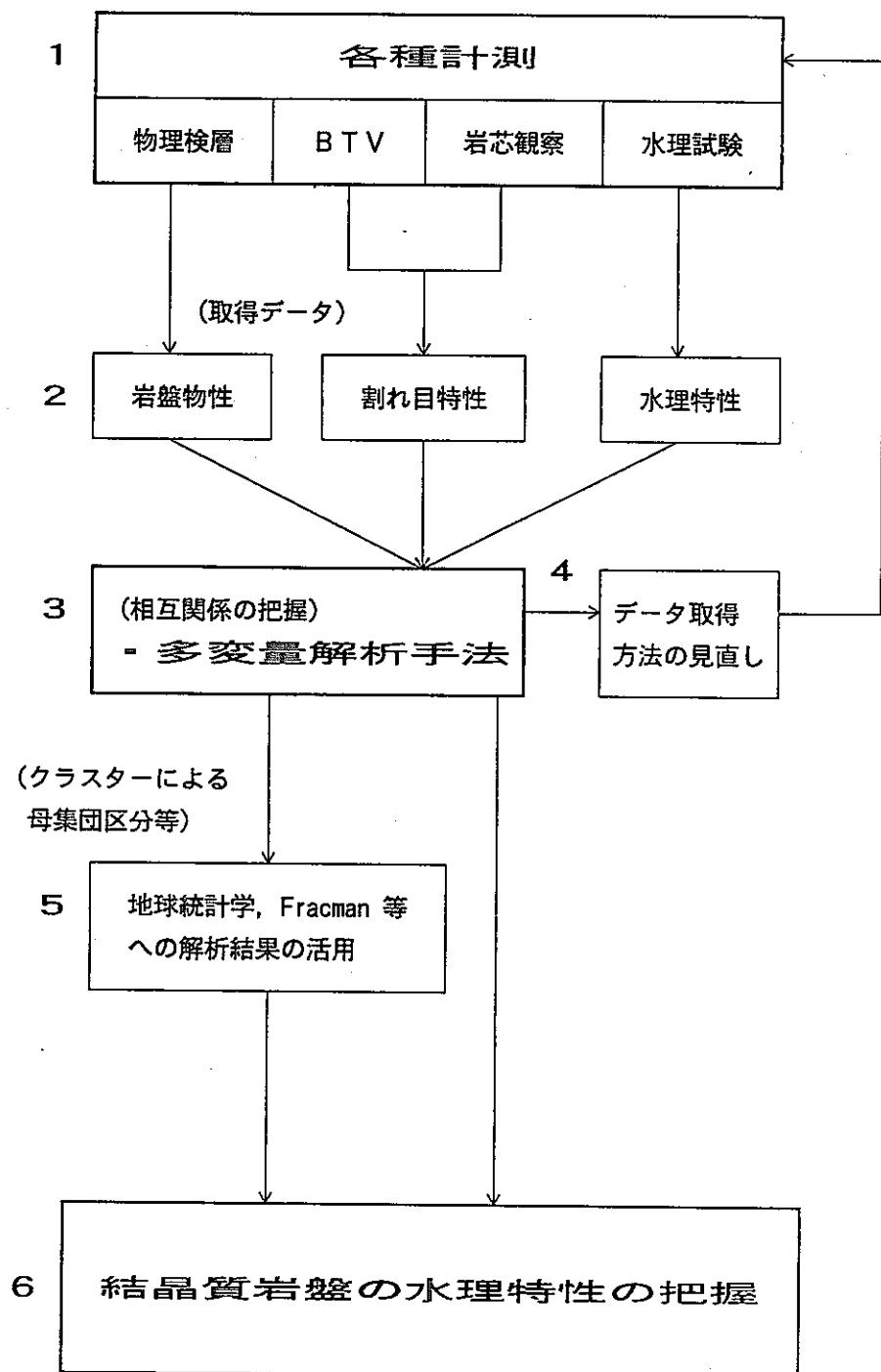


図-4 解析フロー図

3.1.1 重回帰分析手法による各測定値と透水係数との関係

深層試錐孔AN-1, 3号孔においては、各種の測定が実施されている。以下にその計測項目を示す。（図-4の解析フローでの1～2に対応）

①物理検層

- ・電気検層（25cm, 100cmノルマル比抵抗値）
- ・密度検層
- ・中性子検層（孔隙率）
- ・音波検層（P波速度）
- ・温度検層
- ・孔径検層

以上全てAN-1(1,000m), AN-3(408m)深度まで計測。

②BTV検層

- ・開口割れ目数
- ・充填割れ目数
- ・開口幅
- ・充填幅
- ・割れ目の連続性, 方向性
- ・割れ目の交差本数（AN-3号孔のみ）
- ・割れ目の傾斜, 走向

以上全てAN-1号(500m), AN-3号(400m)深度まで計測。

③透水試験（測定区間長約2.6m）

- ・透水係数
- ・間隙水圧

以上全てAN-1号(500m), AN-3号(400m)深度まで計測。

④岩芯観察

- ・R Q D*
- ・割れ目数
- ・割れ目分類（P, I, C, Sの各割れ目タイプ毎の記載）
- ・割れ目充填鉱物

以上全てAN-1(1,000m), AN-3(408m)深度まで計測。

ただし、割れ目1本毎に対応する割れ目充填鉱物の記載は、AN-3号孔のみ。

上記の計測項目から、結晶質岩盤の透水性を主に支配している可能性のある割れ目の特性をとらえていると考えられるデータを抽出し、透水係数値との間で重回帰分析を実施した。それにより、割れ目特性を計測していると考えられる説明変数個々のうち特にどれが、目的変数である透水係数の説明に寄与しているのかが判定できる。

* R Q D (Rock Quality Designation)はコア採取率、コアの割れ目による要素を含めた表示であり、岩盤の良好度の指標。単位掘削長（例えば1m）に対するコア長約10cm以上の部分の全長をもって表示する⁵⁾。

各計測項目から抽出したデータを表-1(a), (b)に示す(表中、深度は計算に含まない)。X(1)～X(16)の記号は、計算する際の変数番号を示す(コラムB～Qに対応)。

表中の各コラムは、次の測定、観測値を表す。

- ①コラムB, 透水試験結果(透水係数)
- ②コラムC～D, BTV観測値(割れ目の開口幅, 充填幅)
- ③コラムE～G, 物理検層値(中性子検層からの孔隙率, 電気検層(電極間隔100cm)からの比抵抗値, 音波検層からの速度(P波速度))
- ④コラムH, 岩芯観察結果(RQD)
- ⑤コラムI, BTV観測値(傾斜角)
- ⑥コラムJ～O, BTV観測値(各卓越方向毎の割れ目数)
- ⑦コラムP～Q, BTV観測値(開口割れ目数, 充填割れ目数)

なお、⑥のBTV観測値(各卓越方向毎の割れ目数)については大澤らで区分されているAN-1, 3号孔に卓越する割れ目の方向分類を用いた⁶⁾(図-5)。

- ・グループ1: N60°W～N30°E/40～90°SW～SE
(表-1ではSW～S Eと表示)
- ・グループ2: 傾斜40°以下全方位
(同D-40A)
- ・グループ3: N30°E～N60°W/40～60°SE～NE
(同SE～NE1)
- ・グループ4: N30°E～N60°W/60～90°SE～NE
(同SE～NE2)
- ・グループ5: N60°E～N60°W/40～90°NW～NE
(同NW～NE)
- ・上記グループに属しない割れ目
(同NC)

孔隙率、比抵抗値、速度、RQD、傾斜角は、透水試験区間に對応する深度の算術平均値で、割れ目の開口幅、充填幅、開口割れ目数、充填割れ目数、各卓越方向毎の割れ目数は合計値として与えてある。

AN-1号孔とAN-3号孔は、比較的近傍(水平距離約35m)にあるにも係わらずその割れ目の発達程度に差異が見られる。大きな違いとしては、岩芯観察、BTVの結果ではAN-1号よりAN-3号のほうが全体に多く割れ目が発達している。またAN-3号はBTVの観測結果から、割れ目が多く発達しているにも係わらず割れ目の充填鉱物による充填が少ないという報告がされているが⁶⁾、AN-3号は、掘削終了後に孔壁面に黒色の付着物質が認められており、光学的観測を行うBTVの場合、割れ目の計測に誤差を生じている可能性も考えられる⁶⁾。以上、割れ目発達状況、計測の精度等を考慮して、解析をおこなうにあたっては両孔別々に解析をおこなった。

表-1(a) AN-1.3号孔重回帰分析使用データ

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
	X(1)	X(2)	X(3)	X(4)	X(5)	X(6)	X(7)	X(8)	X(9)	X(10)	X(11)	X(12)	X(13)	X(14)	X(15)	X(16)
深度(m)	透水係数 (cm/s)	開口幅 (mm)	充填幅 (mm)	孔隙率 (%)	比抵抗 (ohm·m)	速度 (km/s)	RQD	傾斜角 (degree)	SWSE	D-40A	SE-NE1	SE-NE2	NW-NE	NC	開口割れ目数 (本)	充填割れ目数 (本)
AN-1																
1	25.2 ^{27.8}	3.10E-08	6	1.3	9.41	468	3.69	80	36.1	2	11	2	0	0	0	26
2	38.0 ^{40.3}	4.00E-04	14.8	0	8.88	546.3	4.19	50	31.9	1	5	0	0	0	1	10
3	44.7 ^{47.0}	7.70E-09	0.7	0.4	6.71	875.9	4.34	80	53.7	0	0	3	0	0	0	3
4	50.3 ^{55.265}	1.60E-07	3.9	9.1	11.5	726.4	3.69	50	51.7	4	2	0	1	2	0	12
5	52.3 ^{54.65}	5.30E-08	2.8	7.7	6.93	957.3	4.03	50	56	9	1	1	1	1	0	15
6	57.9 ^{60.5}	2.50E-05	1.5	0.5	9.1	2323.1	3.98	70	48.4	0	3	2	2	0	0	9
7	60.5 ^{62.8}	3.90E-04	1.8	8.6	12.45	826.03	3.98	40	44	0	3	3	1	0	0	7
8	68.8 ^{71.15}	7.90E-08	2.2	9.4	6.78	1761	4.38	90	51.8	0	2	0	1	1	1	3
9	77.7 ^{80.0}	3.90E-04	1.7	12.4	14.91	759	3.4	30	37.08	2	7	0	2	0	0	11
10	80.8 ^{83.1}	3.10E-04	6.2	120.1	9.28	1108	3.8	30	60.1	8	2	0	0	0	0	4
11	88.5 ^{91.10}	1.20E-06	2.2	4.3	8.6	1177.7	4.09	40	35.2	0	8	0	4	0	0	11
12	101.4 ^{103.75}	3.30E-04	50.3	0	18.58	741.9	3.69	30	80	1	0	0	0	0	0	0
13	110.2 ^{20.12.8}	9.30E-09	2.4	0	9.38	801.8	4.21	50	58	0	1	0	3	4	0	11
14	120.5 ^{55.122.85}	3.20E-04	0.9	0	8.8	1394.5	3.77	30	67.3	2	0	0	0	1	0	4
15	138.2 ^{20.140.8}	1.60E-08	2	55.6	8.6	2144.6	4.35	40	59.6	1	0	4	0	2	0	11
16	145.4 ^{2148.0}	1.10E-07	1	10.3	7.64	2614	4.35	20	54.8	0	1	0	3	1	1	5
17	159.2 ^{25.161.55}	1.30E-04	0.3	161.3	13.79	2684.7	4.15	50	58	1	0	7	6	0	0	2
18	162.8 ^{27165.17}	1.50E-04	1.8	3.8	10.29	1916.2	3.47	40	27.4	0	14	1	2	0	0	8
19	173.4 ^{0.176.0}	1.30E-07	1.8	0.6	6.01	4118.6	4.32	70	54	1	1	1	1	0	0	6
20	178.7 ^{2181.3}	8.10E-09	0.6	0	5.8	4841.7	4.36	90	42	0	1	0	0	0	0	3
21	187.7 ^{2190.3}	9.90E-10	0.6	0.6	6.43	5798.6	4.51	90	34	0	1	1	1	0	0	3
22	204.7 ^{207.3}	9.50E-08	4.6	0	6.4	2571.2	4.3	70	36.3	0	7	3	3	0	0	17
23	217.9 ^{220.5}	8.00E-07	6	0	11.42	1519.6	4.2	60	84.5	1	0	0	0	0	0	2
24	221.6 ^{224.2}	1.80E-06	3.8	0	16.34	497.85	3.15	0	73.5	0	0	0	1	0	0	7
25	229.2 ^{231.8}	3.30E-10	2.1	0	5.27	2064.5	4.93	100	60	0	0	0	0	0	0	2
26	243.7 ^{246.3}	1.30E-08	2.3	0.5	6.76	1733.7	4.52	90	57.6	2	1	3	3	1	0	3
27	253.2 ^{255.8}	4.90E-07	3.4	0.7	7.2	838.3	3.88	70	31.3	0	5	4	4	0	0	28
28	265.2 ^{267.8}	2.10E-04	2.6	0.8	7.21	1211.3	4.19	10	53.3	2	0	5	5	0	1	10
29	268.7 ^{271.3}	2.00E-06	3.1	2.5	9.87	1524.3	4.22	30	62.7	4	0	2	2	0	0	18
30	278.7 ^{281.3}	9.30E-08	1.9	0.8	6.03	4236.2	4.64	90	57.2	1	0	0	3	1	1	8
31	292.1 ^{294.7}	3.40E-06	1.6	1.1	8	3473.3	4.42	70	52.8	0	1	2	2	2	0	9
32	302.4 ³⁰⁵	6.30E-06	1.6	0.7	10.68	3997	3.92	40	51.8	1	0	0	0	1	1	7
33	AN-3															
34	45.7 ^{48.3}	1.60E-05	1.2	1	7.48	1326.2	4.07	90	41.1	1	4	2	0	0	1	7
35	49.4 ^{52.0}	4.30E-08	1.3	0.4	6.74	904.5	4.28	80	38.5	0	4	3	0	1	0	9
36	59.7 ^{62.3}	6.00E-07	0.8	0	6.92	856.03	4.35	60	38.8	0	2	2	0	0	0	4
37	66.7 ^{69.3}	5.70E-08	1.2	0.4	6.56	612.4	4.19	80	37.6	0	4	1	0	1	0	7
38	73.3 ^{75.9}	6.80E-05	1	0	14.27	3239.8	4.92	80	20	0	2	0	0	0	0	4
39	77.7 ^{80.3}	3.70E-05	4.3	1.2	12.47	1879.6	4.04	60	50.6	0	2	3	2	0	0	18

表-1(b) AN-1.3号孔重回帰分析使用データ

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
40	82.1'84.7	6.60E-05	1.3	0	11.87	5563.5	5.1	90	19.7	1	4	0	0	0	0	7	0
41	86.7'89.3	1.80E-06	1.9	0.4	8.03	849.7	4.15	40	60.8	3	1	1	0	1	3	10	2
42	104.7'107.3	9.20E-08	6.1	0	10.71	832.4	4.49	40	43.9	4	10	1	1	2	1	28	0
43	115.2'117.8	9.50E-05	4.7	0.6	8.4	2167.1	4.68	40	42.5	0	4	1	0	1	0	13	3
44	137.0'139.6	4.60E-06	2.1	0	9.7	1024.1	4.46	30	45.3	0	1	0	1	1	0	13	0
45	150.2'152.8	1.00E-04	3.5	0	8.56	3180.9	4.6	60	22.9	0	13	0	0	0	0	15	0
46	153.7'156.3	4.60E-04	8.2	6.8	6.93	1880.2	4.29	60	20.3	0	16	0	0	0	0	24	6
47	160.7'163.3	3.80E-05	2.4	0	7.61	4480.2	4.62	90	34.3	2	7	0	0	1	0	14	0
48	172.7'175.3	6.80E-08	1.7	0	9.84	3823.9	4.66	50	29.3	0	5	0	0	0	3	14	0
49	214.7'217.3	4.50E-07	1.7	0.2	10.87	2842.8	3.87	20	66.5	0	0	0	0	0	2	10	1
50	229.7'232.3	4.90E-07	3.2	0	5.88	2571.7	4.98	70	44.8	0	1	1	0	0	0	20	0
51	233.7'236.3	1.40E-07	3.3	0	5.43	1962.8	4.7	50	37.4	0	5	0	3	0	0	22	0
52	243.7'246.3	2.30E-04	6.1	0	5.09	1142.4	4.14	60	48.8	1	5	6	2	1	1	29	0
53	250.2'252.8	2.00E-08	3	0	6.31	1344.3	4.84	90	27.7	0	9	1	0	0	1	22	0
54	282.7'285.3	7.50E-08	4.1	0	3.39	2035.4	4.94	50	54.9	4	2	0	0	2	0	24	0
55	288.7'291.3	1.40E-04	6.7	0	6.63	1501.3	4.41	50	36	0	9	2	1	0	1	36	0
56	293.7'296.3	9.90E-05	6.6	0	4.59	3181.1	4.41	30	47.1	1	3	1	2	0	1	37	0
57	302.7'305.3	5.00E-04	6.4	0	8.04	5246.6	4.47	30	30.7	0	16	1	0	0	1	37	0

1. SW~SE系
2. D-40A系
3. SE~NE1系
4. SE~NE2系
5. NW~NE系

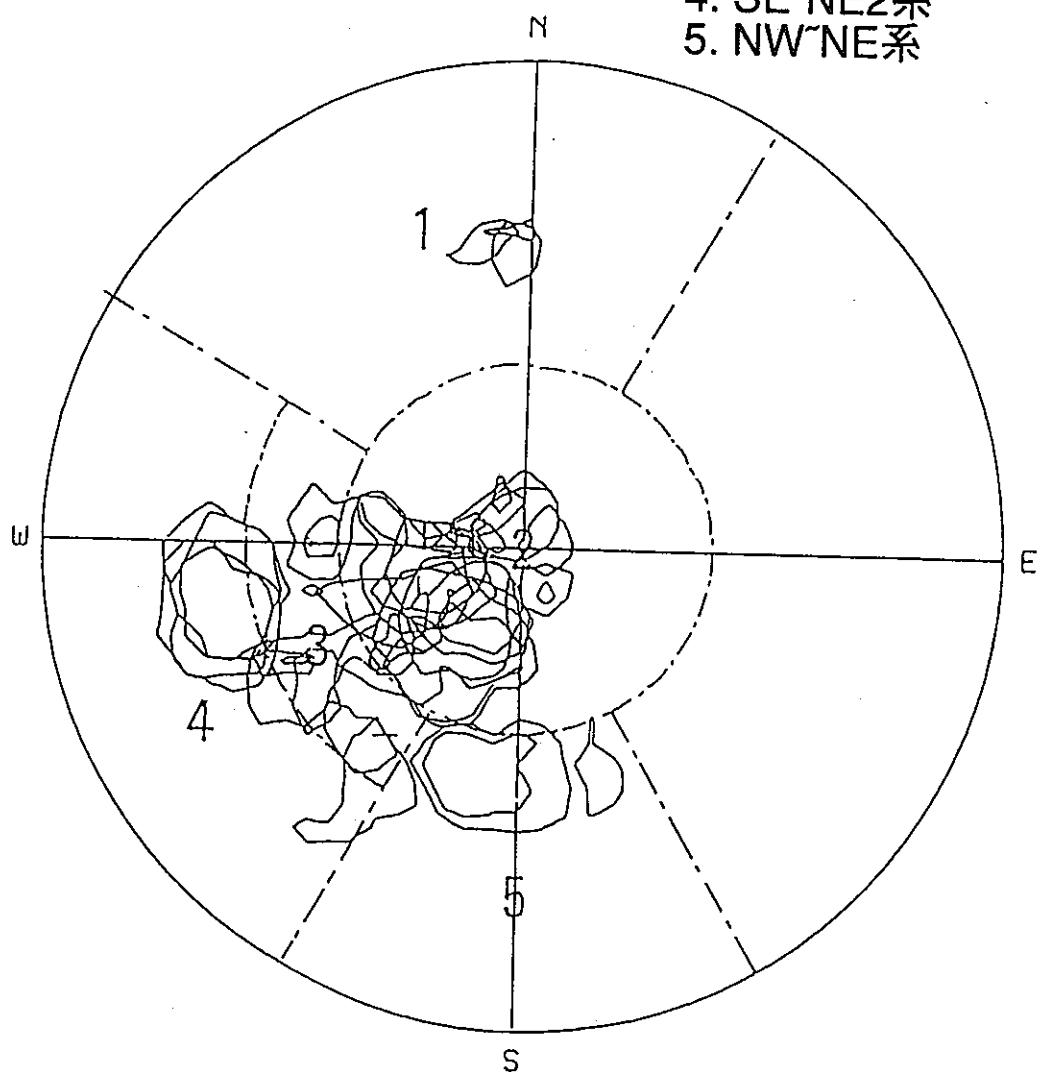


図-5 BTVによる各割れ目グループ⁶⁾

3.1.2 AN-1号孔の解析結果

表-2は、AN-1号孔のデータを変数減少法を用いて、前述したプログラムにより計算した結果である。表には、重相関係数、変数の数を考慮した自由度調整済重相関係数、寄与率、AIC（赤池の情報量基準）*、Cp統計量（マローズのCp）**重回帰式を示す。また回帰の有意性を検討するため分散分析をおこない、検定のためのF値の算出、得られた変数の回帰係数、偏相関係数、変数個々のF値等の各統計量を算出した結果を示す。

プログラム上の計算の流れとしては、まず各ステップごとの重相関係数等の統計量を計算し、次に分散分析結果を出力するという流れを繰り返しおこない、最終モデルまで計算を進めていく。今回の表-2のモデルを最終的に選択するにあたっては、最良のモデルを選択する基準として最近良く用いられるAICの値、Cp統計量（両者の値は小さい程、望ましいとされている¹⁾）が最も小さくなつたモデルを採用した。（なおAN-3号孔も同様に選択した）

その結果、AN-1号孔では目的変数である透水係数に最も関係している説明変数は、RQD、充填割れ目数、開口割れ目幅、NW～NE系の割れ目本数の順である。

重相関係数は0.79で目的変数である透水係数に対する4変数の寄与率は0.62である。このことは、上記4つの変数で透水係数の変化を62%説明できることを意味する。

得られた重回帰式は、

$$Y = -4.78011 + (-0.03513)x_1 + 0.27012x_2 + 0.05578x_3 + (-0.34293)x_4$$

である。

なお、この回帰モデルの有意性を検討する方法として分散比F₀が、

$F_0 \geq F_{n-p-1}^p(\alpha)$ ならば仮説 $H_0: a_1 = \dots = a_p = 0$ は危険率 α で棄却され（このとき回帰は有意であるといわれる）、とりあげた説明変数は全体として目的変数Yの予測に役立つと結論づけられる⁴⁾。

ここで、AN-1号のF₀は表-2のF値(11.3186)、pは自由度（説明変数の数表-1(a)により16）、nはサンプル数（表-1(a)により32）である。

表-1(a)の、AN-1号孔の結果を検定すると、

$F_{n-p-1}^p = F_{15}^{16}(0.025)2.86^{***} < F_0 = 11.3186$ となり、危険率2.5%で棄却され取り上げた4つの変数は全体として目的変数Y（透水係数）の予測に役立つと言える。

* AIC（赤池の情報量基準），目的変数の将来の予測値yの分布に対する推定量として $f(y|\hat{\beta}_0, \dots, \hat{\beta}_p)$ を考え、yの真の分布 $g(y)$ と予測分布 $f(y|\hat{\beta}_0, \dots, \hat{\beta}_p)$ の間のKullback-Leiblerの情報量で測った距離を、できるだけ小さくするという観点から導入されたモデル選択の一般的基準⁷⁾。

** Cp統計量（マローズのCp），目的変数yの予測という立場から、偏りとバラツキを両方考慮して、平均2乗誤差を最小にするように導入された基準⁷⁾。

*** $F_{15}^{16}(0.025)2.86$ の値は、田中、脇本⁴⁾のFの表による。

表-2 AN-1号孔重回帰分析結果（変数減少法）

目的変数 X (1) 透水係数	変数減少法による選択説明変数 X (7) R Q D X (16) 充填割れ目数 X (2) 開口割れ目幅 X (13) NW~NE系の割れ目本数		
解析により算出された統計量			
目的変数と説明変数間の重相関係数	0. 791469		
説明変数の透水係数に対する寄与率	0. 626423		
赤池の統計量 (A I C)	108. 46		
	C p 統計量		
	-1. 37135		
回帰分析の有意性検討のための分散分析結果			
説明変数全体の回帰係数検定のF値	11. 3186		
<u>説明変数個々の分散分析結果</u>			
X (7) R Q D	回帰係数 -0. 03513	偏相関係数 -0. 62017	回帰係数検定のF値 16. 87460
X (16) 充填割れ目数	0. 27012	0. 50360	9. 17412
X (2) 開口割れ目幅	0. 05578	0. 38016	4. 56125
X (13) NW~NE系の割れ目本数	-0. 34293	-0. 29251	2. 52635
CONST	-4. 78011		
重回帰式			
$Y = -4.78011 + (-0.03513)x_1 + 0.27012x_2 + 0.05578x_3 + (-0.34293)x_4$			

次に取り上げた変数個々の回帰係数の検定をおこなうと、

X(7)RQD	$F^P_{n-p-1} = F^I_{15}(0.025) 6.20 < F_0 = 16.87460$
X(16)充填割れ目数	$F^P_{n-p-1} = F^I_{15}(0.025) 6.20 < F_0 = 9.17412$
X(2)開口割れ目幅	$F^P_{n-p-1} = F^I_{15}(0.025) 6.20 > F_0 = 4.56125$
X(13)NW～NE系の割れ目本数	$F^P_{n-p-1} = F^I_{15}(0.025) 6.20 > F_0 = 2.52635$

となり、RQD、充填割れ目数以外の変数は寄与してはいるが、その関与の度合いが薄い。開口割れ目幅、NW～NE系の割れ目本数は、係数がゼロでないと言えないため、まだ解析の精度が不十分である。これはデータ数の少なさなどが考えられ、今後の課題である。

偏相関係数でみても、

X(7)RQD	= - 0.62017
X(16)充填割れ目数	= 0.50360
X(2)開口割れ目幅	= 0.38016
X(13)NW～NE系の割れ目本数	= - 0.29251

となり、開口割れ目幅、NW～NE系の割れ目本数が特に透水係数との相関が低い。

ここで問題となるのは、充填割れ目数が正の相関性を示していることである。一般的には、充填割れ目の数が増えれば透水係数は低くなると考えられるが、この解析結果では逆の傾向を示している。この原因としては、BTVを用いて観測した結果で充填割れ目と記載されていても、割れ目表面を光学的に観測するBTVの場合は誤差を生じている可能性が考えられる。そのため、充填鉱物が割れ目全てを本当に充填していたのかは定かではない。割れ目全てが充填されていない場合（一部未充填の場合）は、その割れ目は開口割れ目に近い特性を示すと考えられ、他の割れ目そのものが少ない区間よりは、試験区間の透水性を高くする可能性も考えられる。しかし、その原因については現在のところ明確ではない。他の原因としては、計算の精度上の問題が考えられる。この件に関しては、後述するクラスター分析に用いたデータで興味深い結果がでているためそこでまた議論する。

3.1.3 AN-3号孔の解析結果

表-3は、AN-3号孔の解析結果を示したものである。変数減少法を用いて解析をおこないAN-1号孔と同様に重相関係数等を算出した。

その結果、目的変数である透水係数に最も関係している説明変数は、開口割れ目幅、比抵抗値、速度、傾斜角、D-40A系の割れ目本数の順であり、重相関係数

0.78、目的変数に対する6変数の寄与率0.61である。このことは、AN-1号孔同様に上記5つの変数は透水係数の変化を61%説明できることを意味する。

得られた重回帰式は、

$$Y = -8.08971 + 0.53352x_1 + 0.00055x_2 + (-2.70299)x_3 + (-0.08476)x_4 + (-0.20523)x_5$$

である。

表-3 AN-3号孔重回帰分析結果（変数減少法）

目的変数 X (1) 透水係数	変数減少法による選択説明変数 X (2) 開口割れ目幅 X (5) 比抵抗値 X (6) 速度 X (8) 傾斜角	X (10) D-40A系の割れ目本数	
解析により算出された統計量			
目的変数と説明変数間の重相関係数	0. 785842	説明変数の数を考慮した 自由度調整済重相関係数 0. 51131	
説明変数の透水係数に対する寄与率	0. 617547		
赤池の統計量 (AIC)	77. 2075	Cp統計量 2. 74687	
回帰分析の有意性検討のための分散分析結果			
説明変数全体の回帰係数検定のF値	5. 8129		
<u>説明変数個々の分散分析結果</u>			
X (2) 開口割れ目幅 X (5) 比抵抗値 X (6) 速度 X (8) 傾斜角 X (10) D-40A系の割れ目本数 CONST	回帰係数 0. 53352 0. 00055 -2. 70299 -0. 08476 -0. 20523 -8. 08971	偏相関係数 0. 64459 0. 59201 -0. 57750 -0. 52971 -0. 45336	回帰係数検定のF値 12. 79560 9. 71276 9. 00685 7. 02075 4. 65663
重回帰式	$Y = -8.08971 + 0.53352x_1 + 0.00055x_2 + (-2.70299)x_3 + (-0.08476)x_4 + (-0.20523)x_5$		

なお、AN-1号孔同様に回帰の有意性を検討すると、F値(5.8129)、pは自由度(説明変数の数、表-1(b)により16)、nはサンプル数(表-1(b)により24)である。 $F^P_{n-p-1} = F^{16}_{(0.025)4.57} < F_0 = 5.8129$ となり、危険率2.5%で棄却され取り上げた5つの変数はY(透水係数)の予測に役立つと言える。

次に取り上げた変数個々の回帰係数の検定をおこなうと、

X(2)開口割れ目幅	$F^P_{n-p-1} = F^{16}_{(0.025)8.07} < F_0 = 12.79560$
X(5)比抵抗値	$F^P_{n-p-1} = F^{16}_{(0.025)8.07} < F_0 = 9.71276$
X(6)速度	$F^P_{n-p-1} = F^{16}_{(0.025)8.07} < F_0 = 9.00685$
X(8)傾斜角	$F^P_{n-p-1} = F^{16}_{(0.025)8.07} > F_0 = 7.02075$
X(10)D-40A系の割れ目本数	$F^P_{n-p-1} = F^{16}_{(0.025)8.07} > F_0 = 4.65663$

となり、開口割れ目幅、比抵抗値、速度以外の変数は寄与してはいるが、その関与の度合いが薄い。傾斜角、D-40A系の割れ目本数については、まだ解析の精度が不十分である。これはデータ数の少なさなどが考えられ、今後の課題である。

偏相関係数でみても、

X(2)開口割れ目幅	= 0.64459
X(5)比抵抗値	= 0.59201
X(6)速度	= -0.57750
X(8)傾斜角	= -0.52971
X(10)D-40A系の割れ目本数	= -0.45336

となり、傾斜角、D-40A系の割れ目本数が特に透水係数との相関が低い。

ここでAN-1号孔と同様の問題点としては、比抵抗値が正の相関性を示すことである。結晶質岩の場合一般的には比抵抗値が高くなれば、岩盤状態としては良好と考えられ、透水係数も低くなると考えられる。しかし、この解析結果は逆の結果を示している。この原因として次のことが考えられる。すなわち、電気検層による比抵抗値は、ある一定の電極間隔(本報告で使用した電極間隔は100cm)を持つ電極間の平均として測定される。そのため透水試験区間の岩盤が比較的良好、開口割れ目が1~2本存在したと仮定した場合にその区間の比抵抗値は、開口割れ目が1~2本存在したときより、粘土鉱物などによる充填割れ目が存在したほうがより比抵抗値の低下につながる。また透水係数は、上記の仮定のばあい開口割れ目が存在するときより、完全に充填された割れ目が存在するほうが低くなると考えられ、両者は整合すると考えられる。傾斜角(傾斜角が大きくなると透水係数が小さくなる)、D-40A系の割れ目本数(傾斜40°以下が増えれば透水係数が小さくなる)の結果は、双方矛盾する結果を示すがこれは計測上及び解析の精度上の問題と考えられる。

***** $F^{16}_{(0.025)4.57}$ の値は、田中、脇本⁴⁾のFの表による。

3.1.4 AN-1, 3号孔の解析結果の考察

ここで、目的変数である透水係数に影響を与える説明変数として、

AN-1号

- ・R Q D
- ・充填割れ目数
- ・開口割れ目幅
- ・NW～NE系の割れ目本数

AN-3号

- ・開口割れ目幅
- ・D-40A 系の割れ目本数
- ・比抵抗値
- ・速度
- ・傾斜角

が得られたが、同じ花崗岩中に掘削され同様の透水試験が行われたにも係わらず、透水係数に関与する説明変数に一部差異が認められた。この原因として以下のことが考えられる。

- ① AN-1号孔は、AN-3号孔に比較して割れ目の発達が少なく、R Q D等の人為的または自然的（割れ目のブロック化など）割れ目密度の増加などに左右される値の計測精度が、AN-3号より良くなり解析上有利にはたらいた。
- ② AN-3号孔で最も関係が強い開口割れ目幅については、前述したAN-1号孔よりAN-3号孔のほうが割れ目の発達が多く、かつ充填鉱物が少ない。
- ③ 透水試験区間に存在する割れ目のうちほとんどが充填されていない場合、一部の割れ目が充填されているとその影響が顕著に透水係数の値にあらわれ、試験区間の透水係数値を左右すると考えられる。
- ④ AN-1, 3号孔を比較して特徴的なことは、説明変数として物理検層の値がAN-1号孔では残っていないが、AN-3号孔では速度と比抵抗が残っていることである。これは、AN-3号孔では、AN-1号孔より割れ目が発達しており、また割れ目が一部ブロック化しているような部分も存在するため、そのような割れ目がブロック化したような箇所では、堆積岩に見られたような透水係数と比抵抗値との関係が存在した。また速度については、岩盤を伝播する弾性波速度は割れ目の影響を受け、割れ目の発達する部分で減速されるため、割れ目の発達状況に左右される。AN-3号孔はAN-1号孔に比較して全体に良く割れ目が発達しており、速度値の低下の程度がより顕著にあらわれ、割れ目の発達状況に左右される透水係数と比較的良好な相関性を示した。

このAN-1号孔、AN-3号孔の解析結果をまとめると、結晶質岩盤である本地域の花崗岩の透水性を支配しているのは岩盤中に発達する割れ目系であり、その割れ目の数、割れ目の開口程度、充填の有無などの違いにより透水係数が決定づけられていることを定量的に示したと考えられる。この統計的処理で用いたデータは、32点(AN-1号)、24点(AN-3号)とその数は必ずしも十分ではなく、計測上の問題及び解析上の問題によると思われる矛盾した結果が一部存在した。しかし、結晶質岩盤の透水性を支配しているのは、岩盤中に存在する割れ目であり、またそのネットワークである⁸⁾と言っていた従来からの仮説を裏付ける結果は得たと考えられる。

今後、同様の調査研究を実施する際には、割れ目を直接的に試錐孔内で詳細に観察できるB T Vを用いて、割れ目1本1本を現在より詳細に観察し、データの蓄積をおこない多変量解析法を用いて解析をおこなうことで各計測値から透水係数値を推定する手法が確立できると考える。(図-4 解析フローの4に対応)

3.2 クラスター分析

3.2.1 クラスター分析の方法

重回帰分析同様、多変量を用いた解析手法の一つとしてクラスター分析がある。

クラスター分析とは、異質なものが混ざりあっている対象（それは個体=物の場合と変数の場合もある）を、それらの間に何らかの意味で定義された類似度（similarity）を手掛かりにして似たものを集め、いくつかの均質なものの集落（cluster）に分類する方法を総称したもので、階層的、非階層的方法がある。また純然に得られた観測データのみを用いて分類することから数値分類法とも呼ばれる。一般的には階層的方法がよく用いられ、結果としては樹形図（dendrogram）が得られる。とくにクラスター数は定めず、対象の階層的構造を求め、目的に応じて大分類から小分類まで利用することができる。一般に用いられている内容としては、症状や検査値に基づく疾患の分類、財務指標による企業の分類、形状や性質による細菌の分類等、さまざまな分野で利用されている⁷⁾。また、クラスター分析の大きな特徴としては、得られた物性値が同一母集団からの独立標本であるかどうかの検討ができる。また処理効果以外に不審な変位を含んでいないかどうかについても検討可能である。このクラスター分析の解析プログラムは、重回帰同様NEC社製PC9801シリーズのコンピューターのN88 BASIC上にて起動できるプログラムであり、一般に市販され広く使われているものである⁴⁾。

以下に樹形図（dendrogram）の作成方法（階層的方法）について述べる。

いまここに7つの2変量データがあるとする（図-6）。7つの点のユークリッド距離に着目して、すなわち各データの類似度の指標としてユークリッド距離を用いてその大きさを見ると、④と⑤が一番近い。そこで④と⑤を一つの組としてまとめる。

以下同様にして組にまとめていく。まとめた組、点の距離を定義する方法としては、最短距離、最長距離、群平均、ウォード、重心、メジアン、可変法などがある。

この中で一般に良く用いられている分類法は、最短距離、最長距離、群平均、ウォード法である。各手法によってさまざまな分類構造が得られるが、分析者の専門知識によって最良な分類を選び利用すればよい⁴⁾。

3.2.2 クラスター分析によるAN-3号孔データの解析

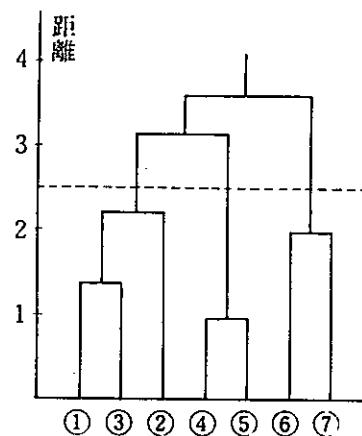
前項で示した各測定値の重回帰分析の結果では、割れ目系の特徴が結晶質岩盤の透水性を主に支配していると考えられる結果を得た。そのためここでは、岩芯観察の際に割れ目1本1本の詳細な記載（タイプ別、各種の充填鉱物を伴う割れ目の有無）があるAN-3号孔のデータを用いて、クラスター分析をおこない得られている割れ目系のデータで各測定値から見た透水係数の母集団区分が可能かどうか、また実際に各割れ目系の特徴に透水係数が支配されているのかどうかを検討した。

また、ある母集団に区分された透水係数グループは、「Fracman⁸⁾」等の割れ目解析コードを用いて解析をおこなう際に、入力データの選別等に有益な情報を提供できると考えられ、解析精度の向上につながると考える。

（図-4 解析フローの5に対応）

7個の2変量データ

番号	x_1	x_2
①	1	2
②	3	1
③	2	3
④	3	6
⑤	4	6
⑥	7	2
⑦	7	4



7つのデータの樹形図（デンドログラム）

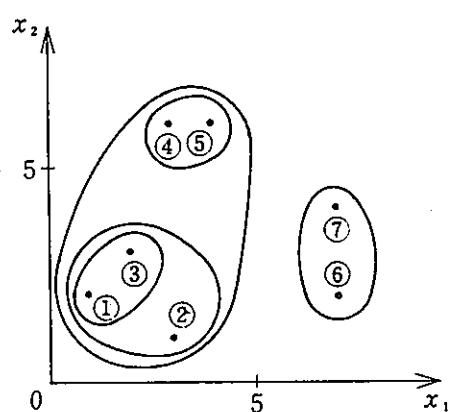


表1のデータの散布図

図-6 デンドログラム（樹形図）の作成方法⁴⁾

表-4に使用データの一覧を示す。(表中、深度と透水係数値は計算に含まない)

- ①コラムC～D, BTV観測値(割れ目の開口幅, 充填幅)
- ②コラムE, 岩芯観察結果(RQD)
- ③コラムF～K, BTV観測値(各卓越方向毎の割れ目数, (重回帰と同様の値))
- ④コラムL, BTV観測値(割れ目観測結果から推定した孔井内割れ目の予想交差本数(CF))
- ⑤コラムM～P, 岩芯観察結果(各割れ目タイプ毎の本数)
- ⑥コラムQ～W, 岩芯観察結果(各割れ目充填鉱物を伴う割れ目の本数)
- ⑦コラムX, BTV観測値(傾斜角)

⑤コラムM～Pの記号は、Pタイプ割れ目(P), Iタイプ割れ目(I), Cタイプ割れ目(C), Sタイプ割れ目(S)と表示^{2) 6)}。

⑥コラムQ～Wの記号は、セリサイト(SR), 石英(QZ), 粘土(CY), 緑泥石(CL), 鉄酸化鉱物(FR), 方解石(CA), 黄鉄鉱 PY)と表示⁶⁾。

なお、RQD, 傾斜角は透水試験区間内の算術平均で、割れ目の開口幅, 充填幅, 各卓越方向ごとの割れ目数, 予想交差本数, 各割れ目タイプごとの本数, 充填鉱物を伴う割れ目の本数は合計値で与えてある。

解析は、最短距離, 最長距離, 群平均, オード, の各分類について計算をおこない、本解析のニーズである各割れ目データによる透水係数の分類に最も合致した最長距離法の分類を最終的に選択した。

図-7に表-4のデータから計算した最長距離法の樹形図を示す。図中で樹形図の下に示す数字は、各クラスターに分類されたサンプルの番号である。

次に、得られた樹形図を前述したようにニーズに合致するように、任意に12のクラスターに分割した。以下に、各クラスターごとのサンプル分布番号を示す。

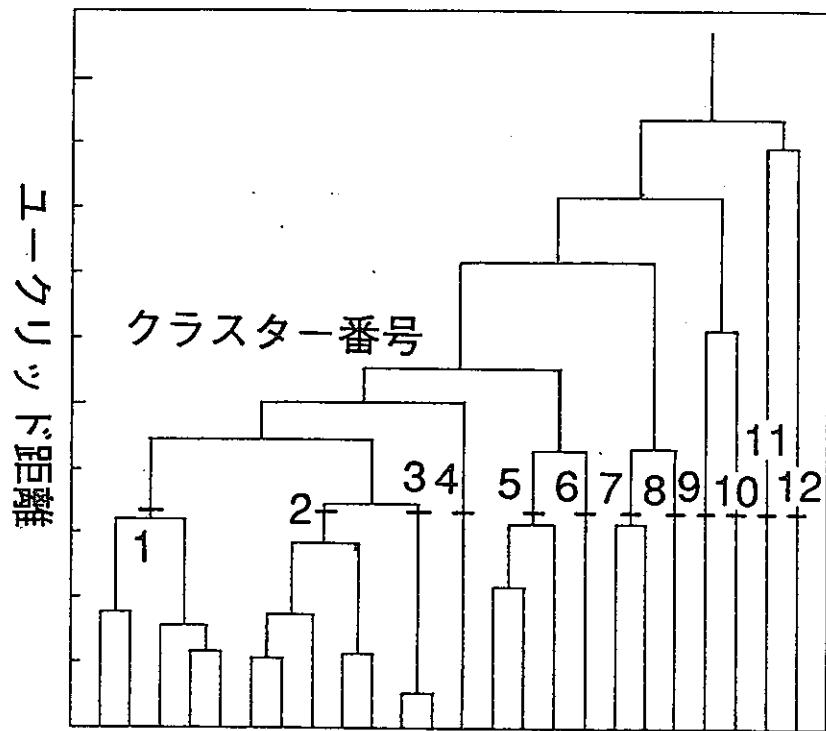
- ・クラスター1 (1, 14, 2, 5, 7) 表-4のサンプル番号に対応(以下同)
- ・クラスター2 (11, 17, 18, 12, 20)
- ・クラスター3 (22, 24)
- ・クラスター4 (3)
- ・クラスター5 (8, 16, 15)
- ・クラスター6 (10)
- ・クラスター7 (9, 21)
- ・クラスター8 (23)
- ・クラスター9 (4)
- ・クラスター10 (6)
- ・クラスター11 (13)
- ・クラスター12 (19)

また分割したクラスターの特性を把握するため表-4の値を基に各クラスターごとのヒストグラムを作り解析した。ここではクラスター1について図-8(a)～(c)に

表-4 AN-3号孔クラスター分析使用データ

A 深度(m) AN-3	B 透水係数 (cm/s)	C 開口幅 (mm)	D 充填幅 (mm)	E RQD (%)	F SW SE (本)	G D-40A (本)	H SE'NE1 (本)	I SE'NE2 (本)	J NW'NE (本)	K NC (本)	L 交差本数 (本)	M P (本)	N I (本)	O C (本)	P S (本)	Q SR (本)	R QZ (本)	S CY (本)	T CL (本)	U FR (本)	V CA (本)	W PY (本)	X 傾斜角 (degree)
1 45.7~48.3	1.60E-05	1.2	1	90	1	4	2	0	0	1	3	5	4	2	0	1	0	2	0	0	0	0	41.1
2 49.4~52.0	4.30E-08	1.3	0.4	80	0	4	3	0	1	0	1	10	2	0	0	0	0	3	1	0	0	0	38.5
3 59.7~62.3	6.00E-07	0.8	0	60	0	2	2	0	0	0	0	4	16	0	0	0	0	1	1	2	0	0	38.8
4 66.7~69.3	5.70E-08	1.2	0.4	80	0	4	1	0	1	0	2	5	12	0	0	0	0	2	2	0	0	2	37.6
5 73.3~75.9	6.80E-05	1	0	80	0	2	0	0	0	0	0	8	4	0	0	0	0	6	1	1	0	0	20
6 77.7~80.3	3.70E-05	4.3	1.2	60	0	2	3	2	0	0	2	15	1	0	0	0	0	12	2	0	0	0	50.6
7 82.1~84.7	6.60E-05	1.3	0	90	1	4	0	0	0	0	0	2	3	0	0	1	0	1	1	0	0	0	19.7
8 86.7~89.3	1.80E-06	1.9	0.4	40	3	1	1	0	1	3	7	9	14	0	0	0	1	5	0	0	0	0	60.8
9 104.7~107.3	9.20E-08	6.1	0	40	4	10	1	1	2	1	5	11	8	0	0	0	0	7	0	0	0	0	43.9
10 115.2~117.8	9.50E-05	4.7	0.6	40	0	4	1	0	1	0	3	7	13	0	0	6	2	2	0	0	0	0	42.5
11 137.0~139.6	4.60E-06	2.1	0	30	0	1	0	1	1	0	2	9	12	0	0	0	0	3	0	0	0	0	45.3
12 150.2~152.8	1.00E-04	3.5	0	60	0	13	0	0	0	0	0	14	9	0	0	4	1	2	0	0	0	0	22.9
13 153.7~156.3	4.60E-04	8.2	6.8	60	0	16	0	0	0	0	0	17	9	15	1	0	0	4	0	0	0	0	20.3
14 160.7~163.3	3.80E-05	2.4	0	90	2	7	0	0	1	0	0	8	11	1	0	4	0	1	0	0	0	0	34.3
15 172.7~175.3	6.80E-08	1.7	0	50	0	5	0	0	0	3	10	4	20	0	0	0	2	3	1	0	0	0	29.3
16 214.7~217.3	4.50E-07	1.7	0.2	20	0	0	0	0	0	2	4	0	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	66.5
17 229.7~232.3	4.90E-07	3.2	0	70	0	1	1	0	0	0	4	9	8	0	0	2	0	5	0	0	0	0	44.8
18 233.7~236.3	1.40E-07	3.3	0	50	0	5	0	3	0	0	8	13	11	0	0	0	5	0	0	0	0	0	37.4
19 243.7~246.3	2.30E-04	6.1	0	60	1	5	6	2	1	1	15	4	14	1	0	1	0	3	0	0	2	0	48.8
20 250.2~252.8	2.00E-08	3	0	90	0	9	1	0	0	1	0	8	10	0	0	2	0	0	0	0	0	0	27.7
21 282.7~285.3	7.50E-08	4.1	0	50	4	2	0	0	2	0	4	6	10	1	1	0	0	0	0	0	0	0	54.9
22 288.7~291.3	1.40E-04	6.7	0	50	0	9	2	1	0	1	14	2	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	36
23 293.7~296.3	9.90E-05	6.6	0	30	1	3	1	2	0	1	12	10	16	0	1	2	0	0	0	0	0	0	47.1
24 302.7~305.3	5.00E-04	6.4	0	30	0	16	1	0	0	1	12	1	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30.7

樹形図 最長距離法



各クラスターごとのサンプル分布番号を示す。

- ・クラスター1 (1, 14, 2, 5, 7) 表-4のサンプル番号に対応 (以下同)
- ・クラスター2 (11, 17, 18, 12, 20)
- ・クラスター3 (22, 24)
- ・クラスター4 (3)
- ・クラスター5 (8, 16, 15)
- ・クラスター6 (10)
- ・クラスター7 (9, 21)
- ・クラスター8 (23)
- ・クラスター9 (4)
- ・クラスター10 (6)
- ・クラスター11 (13)
- ・クラスター12 (19)

図-7 最長距離法によるAN-3号の樹形図

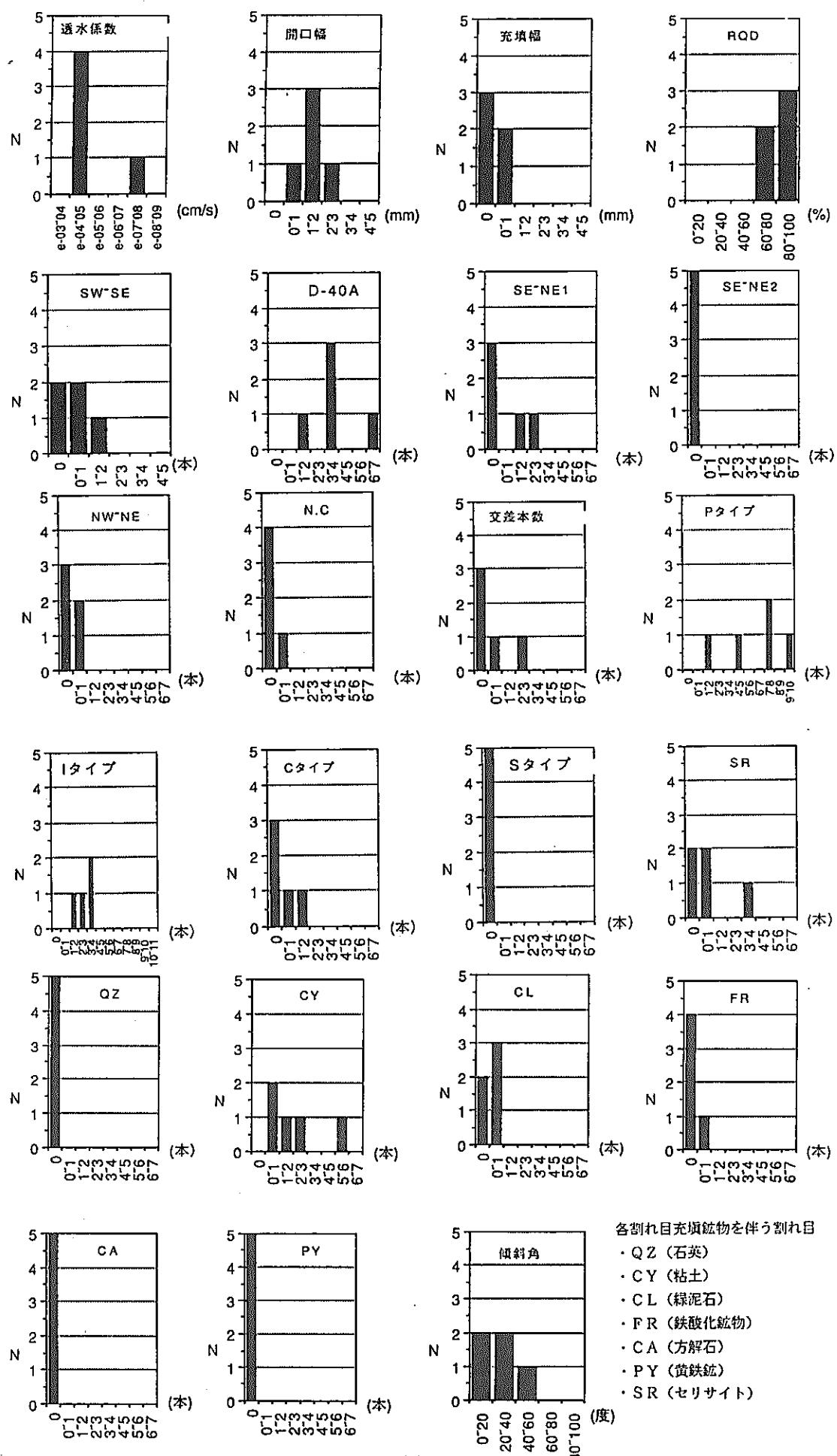


図-8 クラスター1のヒストグラム

示し、その他のクラスターについては、巻末付図に示す。

図-8(a)～(c)のヒストグラムは、縦軸にサンプル数（クラスター1の場合は、サンプル番号1, 14, 2, 5, 7の5サンプル）、横軸には各クラスターに分類された各サンプル値の分布状況を示す。巻末付図も同様である。図-8(a)～(c)のクラスター1ヒストグラムの特徴を示すと、透水係数値は $10^{-4} \sim 10^{-5}$ cm/sがおもに分布する。

次にBTV観測値では、割れ目の開口幅は1～2mm、充填幅は0～1mmである。D-40AとSE～NE1系の割れ目が卓越する。割れ目の交差本数は比較的少なく、割れ目の傾斜角は緩い。岩芯観察の結果では、Pタイプ割れ目が卓越し、各割れ目充填鉱物を伴う割れ目のヒストグラムでは、SR（セリサイト）、CY（粘土）を伴う割れ日本数が多い。この結果は、BTVの観測値とは矛盾するが、BTVと岩芯観察では観察精度が違うこと（孔壁内部で割れ目を充填している場合はBTVでは観測できない）、岩芯観察で割れ目に粘土鉱物を伴うと記載されても、それが原位置で割れ目を全て充填しているかどうかは疑問である点が考えられる。前述したAN-1号孔の重回帰分析では、AN-3号孔のように割れ目1本ごとに対応する岩芯観察結果が無かったため、BTV観測によって得られた充填割れ目数を計算に取り込んだが、このAN-3号孔のクラスターヒストグラムに見られるように、観測精度の影響により実際の値に対する計測値が誤差を含んでいたためAN-1号孔の結果に見られたような、充填割れ目数が一般的ではない傾向を示した一つの原因と考えられ、解析精度に影響を与えたと考えられる。なお、AN-3号孔の重回帰分析に岩芯観察の各充填鉱物を伴う割れ目数を計算に取り込まなかったのは、サンプル数（24）に対して説明変数の数が増えすぎ計算できなかつたためであり、今後サンプル数を増やして再解析する必要がある。

また、このようなBTVと岩芯観察の結果の相違については、他のクラスターについても見られる。クラスター2～12の特徴については付図を参照されたい。

これらのヒストグラムの内、透水係数、開口幅、充填幅、交差本数、各BTVによる方向性区分、各割れ目タイプ、割れ目に伴う充填鉱物について分布状況をまとめたものが表-5である。

この結果から以下のことが明らかとなった。

- ① 12に区分された各クラスターは、異なる透水性、割れ目特性を示す。
- ② 透水係数の高い値を示すクラスターは、一般に開口幅が大きく4mm以上を示す。開口幅が大きくても透水係数が低い値を示すクラスターは、充填物を伴う割れ目が多い。
- ③ 透水係数の高い値を示すクラスターは、一般に割れ目の交差本数が大きく10以上を示す。
- ④ 透水試験区間に分布する割れ目の方向性が、主としてD-40A（傾斜40°以下全方位）、SE～NE1, SE～NE2（図-5）の方向を示す場合は、一般に透水係数が高い値を示す。この方向の割れ目は、他の方向の割れ目と比較し開口幅が大きくかつ充填していることが少ない。
- ⑤ 透水試験区間に分布する割れ目の方向性が、主としてSW～SE, NW～NEの方向を示す場合は、一般に透水係数が低い値を示す。この方向の割れ目は、D-

表-5 各クラスター毎の割れ目特性 (AN-3号)

クラスター番号	透水係数値 (cm/sec)	BTB 開口幅 (mm)	BTB 充填幅 (mm)	交差本数	BTBによる方向性区分					各割れ目タイプ				割れ目に伴う充填鉱物					
					SW~SE	D-40A	SE~NE1	SE~NE2	NW~NE	P	I	C	S	SR	QZ	CY	CL	FR	CA
①	$10^{-4} \sim 10^{-5}$ H	0~3小	0~1小	0~3小	△	○	○			○	△	△		○		○	△		
②	$10^{-5} \sim 10^{-8}$ M~L	2~4小	0 小	1~8中		○			△	△	○	○		○	△	○			△
③	$10^{-3} \sim 10^{-4}$ H	6~8大	0 小	12~15多		◎	○	△		△	○								
④	10^{-7} L	0. 8小	0 小	0 小		△	△			○	○					△	△	○	
⑤	$10^{-5} \sim 10^{-8}$ M~L	1~2小	0~1小	4~11中	○	△				△	◎	◎			○	○	△		
⑥	10^{-6} H	4. 7大	0~1小	2~3小	△	△	△			○	○			○	△	△			
⑦	$10^{-7} \sim 10^{-8}$ L	4~6中	0 小	4~5小	○					○	○	○	△	△		○			
⑧	10^{-5} H	6. 6大	0 小	12 多		◎	△	○		○	○	○	△	△					
⑨	10^{-8} L	1. 2小	0~1小	2 小		○				△	△	○			○	○			○
⑩	10^{-5} H	4. 3大	1~2中	2 小		◎	◎	◎		◎	△				○	△			
⑪	10^{-4} H	8. 2大	6~7大	17 多		◎				○	○	△				△			
⑫	10^{-4} H	6. 1大	0 小	15 多	△	◎	○	◎		△	○	△		△	△			△	

※ H : 高透水性 ◎:多い
 M~L : 中~低透水性 ○:中
 L : 低透水性 △:少ない

- SR (セリサイト) • FR (鉄酸化鉱物)
- QZ (石英) • CA (方解石)
- CY (粘土) • PY (黄鐵鉱)
- CL (緑泥石)

40A, SE~NE1, SE~NE2の方向の割れ目と比較し、開口幅が小さくかつ充填していることが多い。

- ⑥ 各割れ目タイプ毎の本数に、有意な差は認められなかった。

以上、割れ目特性に基づくデータを用いてAN-3号孔の透水係数値をクラスター分析により分類した結果、各透水係数に対応する分類構造が得られた。各クラスターにはそれぞれ異なった透水係数が分布し、その特性は割れ目の開口幅、充填幅、交差本数、孔井の割れ目卓越方向等に支配されている。

結果は前項で述べた重回帰分析の結果とほぼ一致し、結晶質岩盤の透水係数を支配しているものは、岩盤中の割れ目系の特性と言える。

また、低・高透水性部において、それぞれ同じ透水係数を示す場合でも、割れ目特性の微妙な差異により幾つかのクラスターに分類されている。したがって、他の解析手法を用いて割れ目の透水性解析などを実施する際には、同様の透水係数値を示す試験区間の結果でも、割れ目特性からみれば微妙に異なっている可能性があることに注意すべきである。透水係数値のみで分類するのではなく、他の関係するデータと共にクラスター分析を実施し母集団区分をおこなうことが解析の精度向上につながるものと考える。（図-4 解析フローの5に対応）

4. 今後の予定

今回実施したような統計学的手法を用いて解析をおこなうには、現在手元にあるデータ数では必ずしも十分ではない。また、各計測値間のデータの精度を整える必要性が今回明らかになった。従って、現在の解析精度には若干問題が残る。今後は、測定データの集積を図る際には前述した問題点を考慮した計測・観察をおこない、データ相互間のマッチングを図り、割れ目特性と透水係数の関係をさらに明らかにしていく予定である。

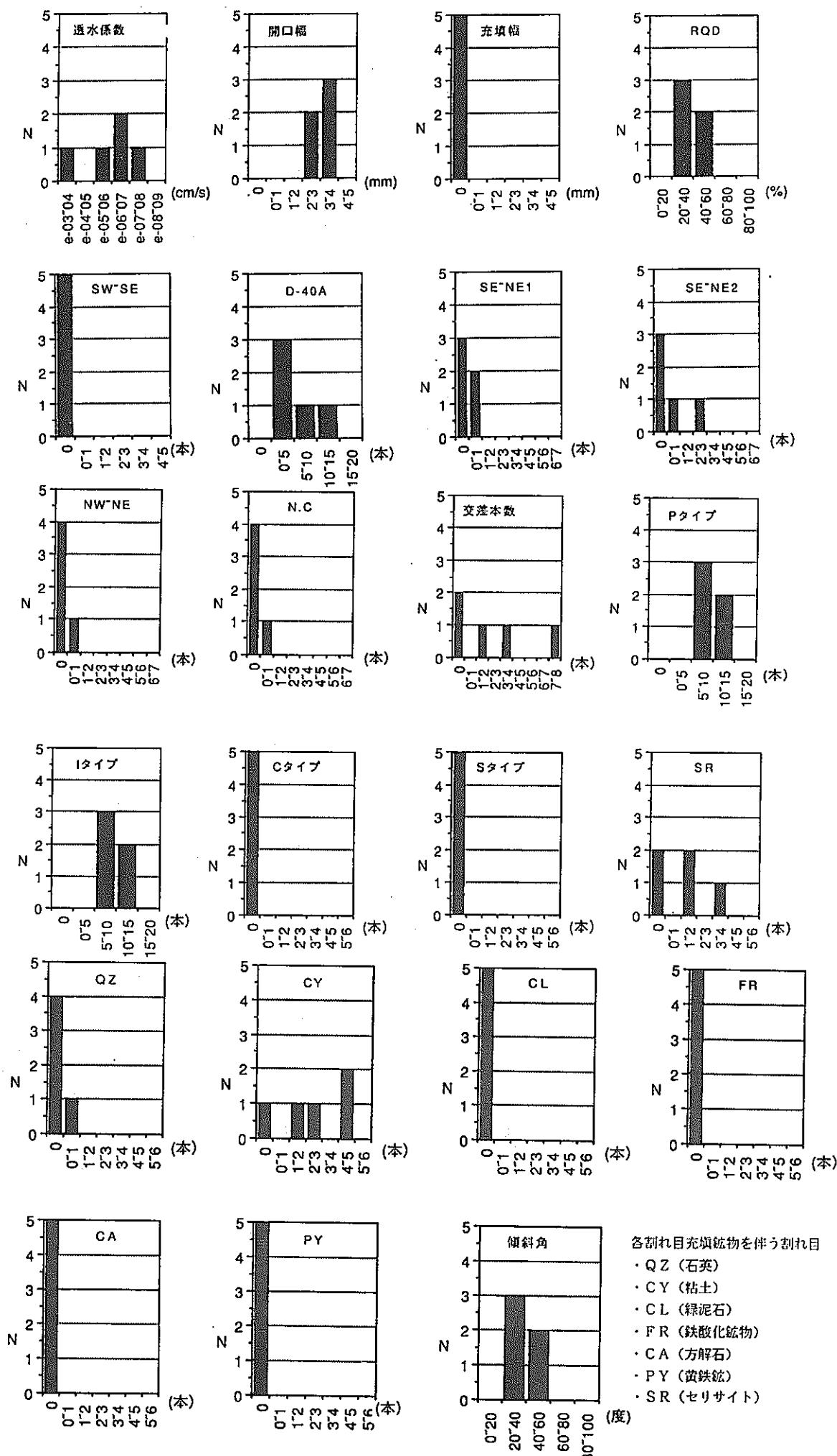
参考文献

- 1) 尾方伸久、大澤英昭、中野勝志、柳澤孝一、西垣誠(1992)：堆積岩の地質学的特性及び透水係数、見掛比抵抗相互の関係とその水理地質構造モデル化への適用、投稿中。
- 2) 吉田 英一、大澤 英昭、柳澤 孝一、山川 稔(1989)：深部花崗岩中の割れ目解析、-岐阜県東濃地域に分布する花崗岩類を例にして-、応用地質、Vol. 30, No. 3, pp. 11-22.
- 3) 尾方 伸久、大澤 英昭(1990)：地下水特性調査技術開発の現状、検層技術(1), PNC, Technical Report GE 89-04, PNC TN7410 90-005.
- 4) 田中豊、脇本和昌 (1983)：多変量統計解析法、現代数学社, pp. 296.
- 5) 土木学会岩盤力学委員会(1983)：トンネルの地質調査と岩盤計測、社団法人土木学会, pp. 29.
- 6) 大澤英昭、吉田英一、尾方伸久、柳澤孝一、瀬尾俊弘、斎藤章、山川稔、田中和弘、宮川公雄、井上大栄、田中靖治、河西基、駒田広也(1989)：東濃鉱山における花崗岩の断裂系の特性調査と岩盤評価、共同研究最終報告書, PNC SY7469 90-001(1)(2)

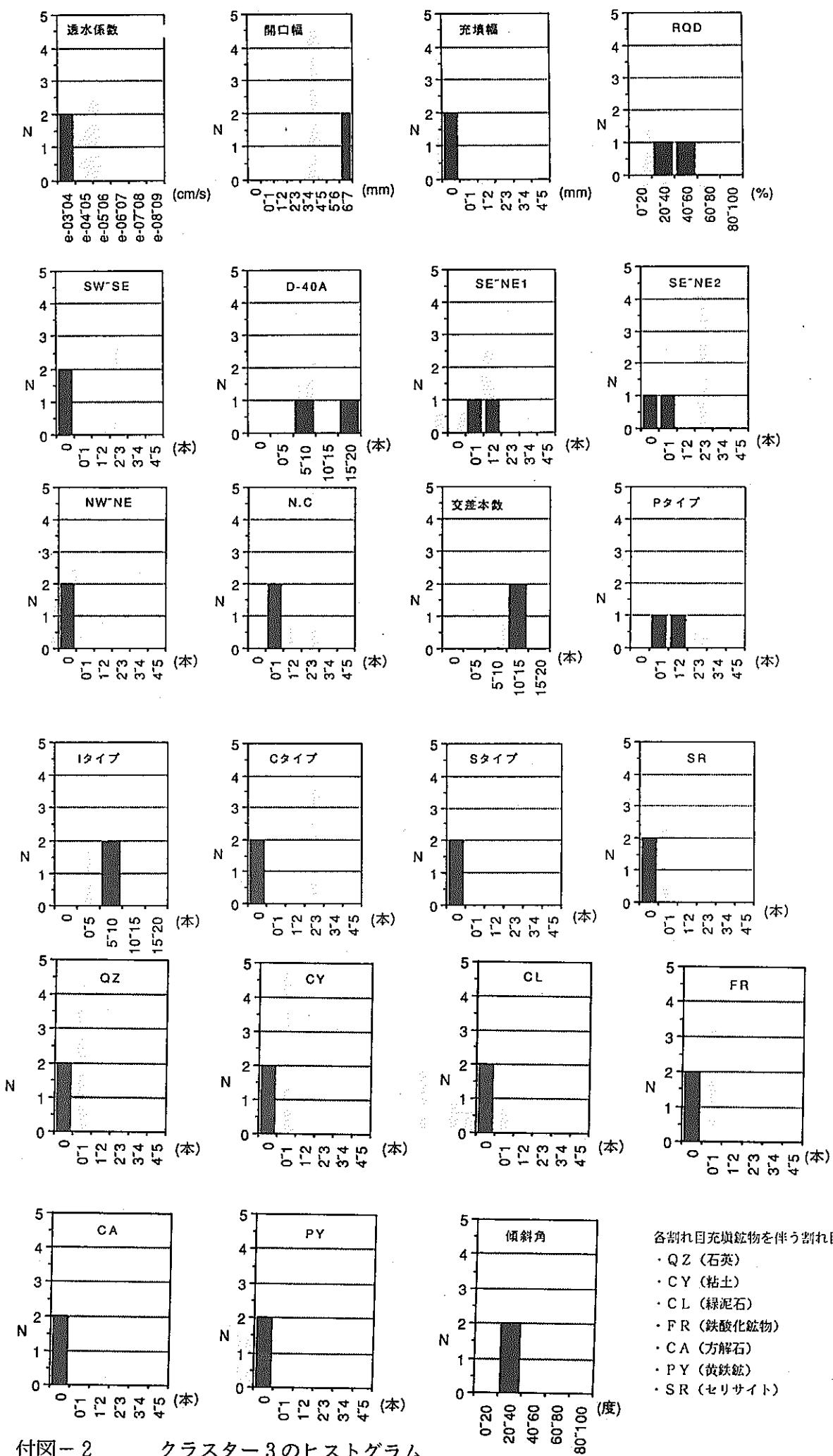
) U989007, pp. 82.

- 7)田中豊, 垂水共之, 脇本和昌(1984): パソコン統計解析ハンドブックⅡ多変量解析編, 共立出版株式会社, pp. 400.
- 8)ANDERSSON, J. (1984): A Stochastic Model of a Fractured Rock Conditioned by Measured Informations, Water Resour. Res., Vol. 20(1), pp. 79-88.
- 9)GOLDBER ASSOCIATE INC. (1989): FRACMAN Version2.1 Interactive Rock Fracture Geometric Model, User Documentation.

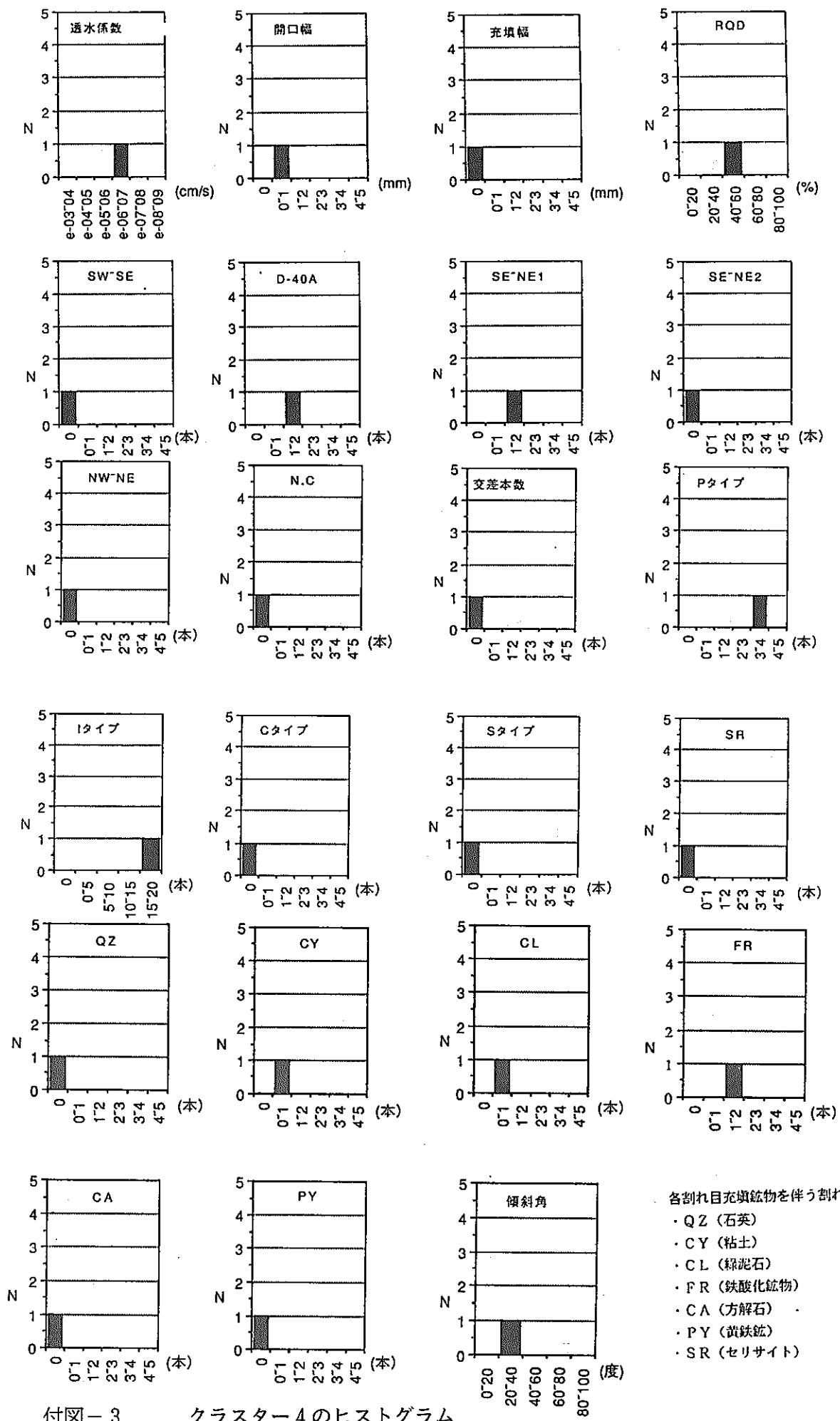
付図一覧



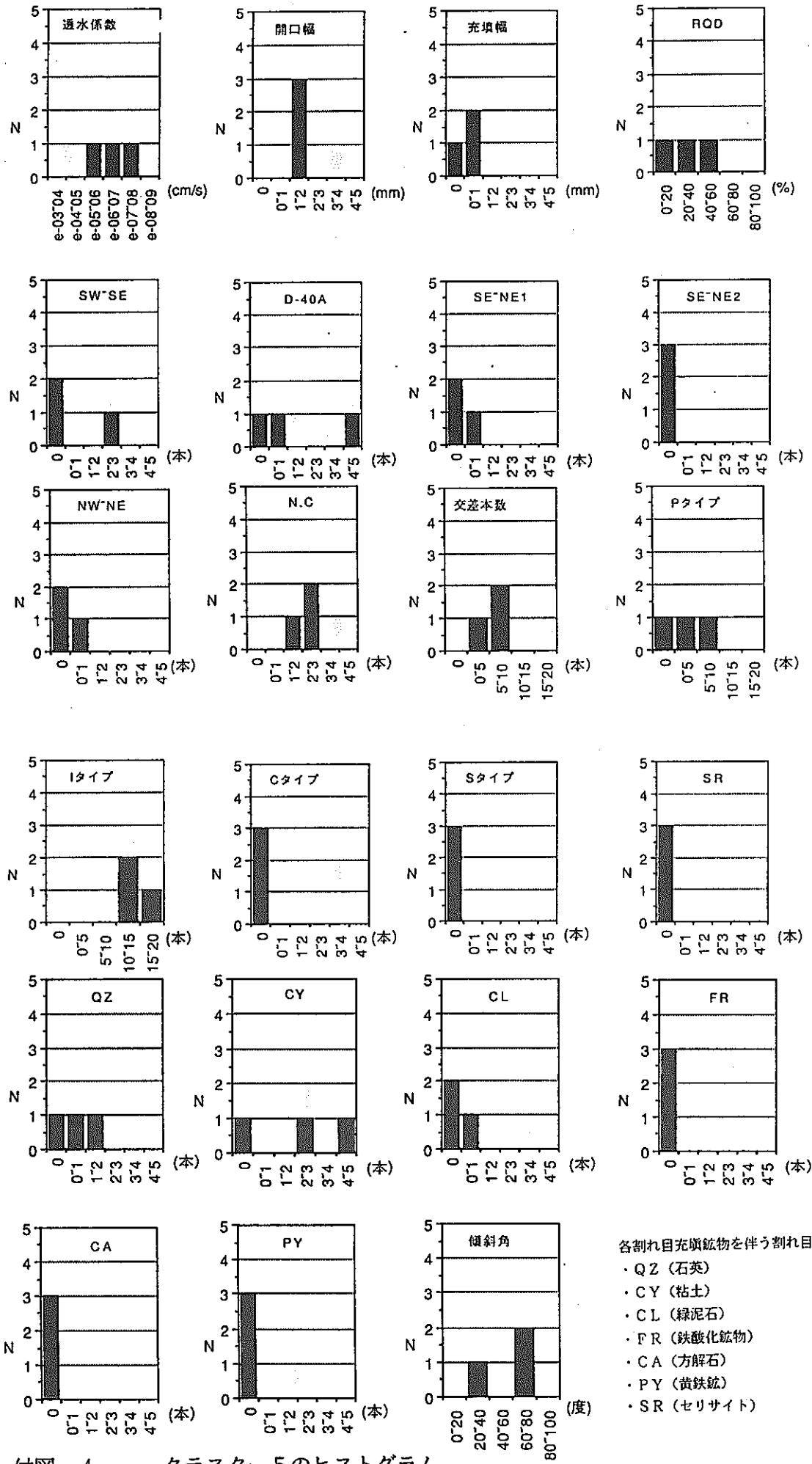
付図-1 クラスター2のヒストグラム



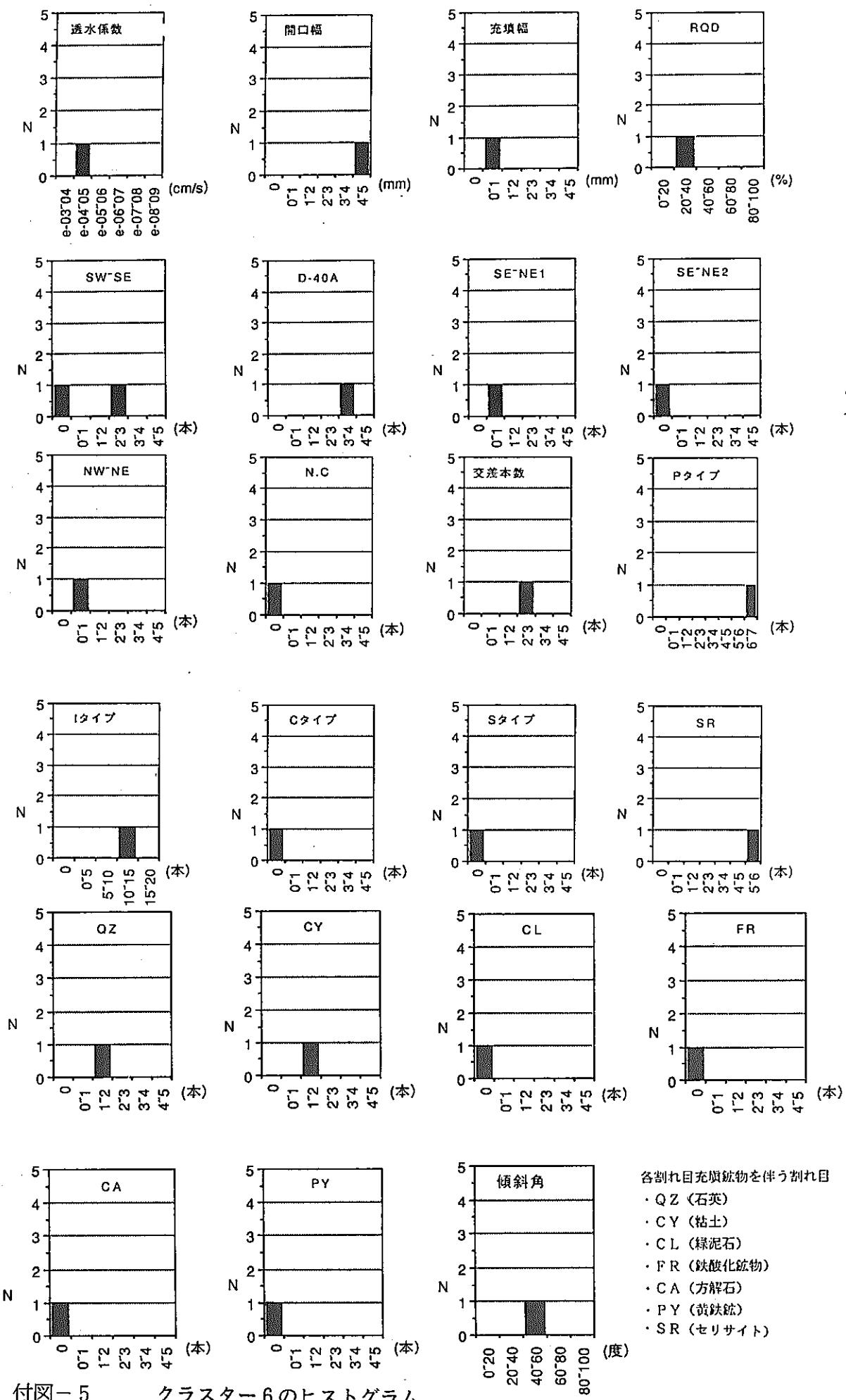
付図-2 クラスター3のヒストグラム



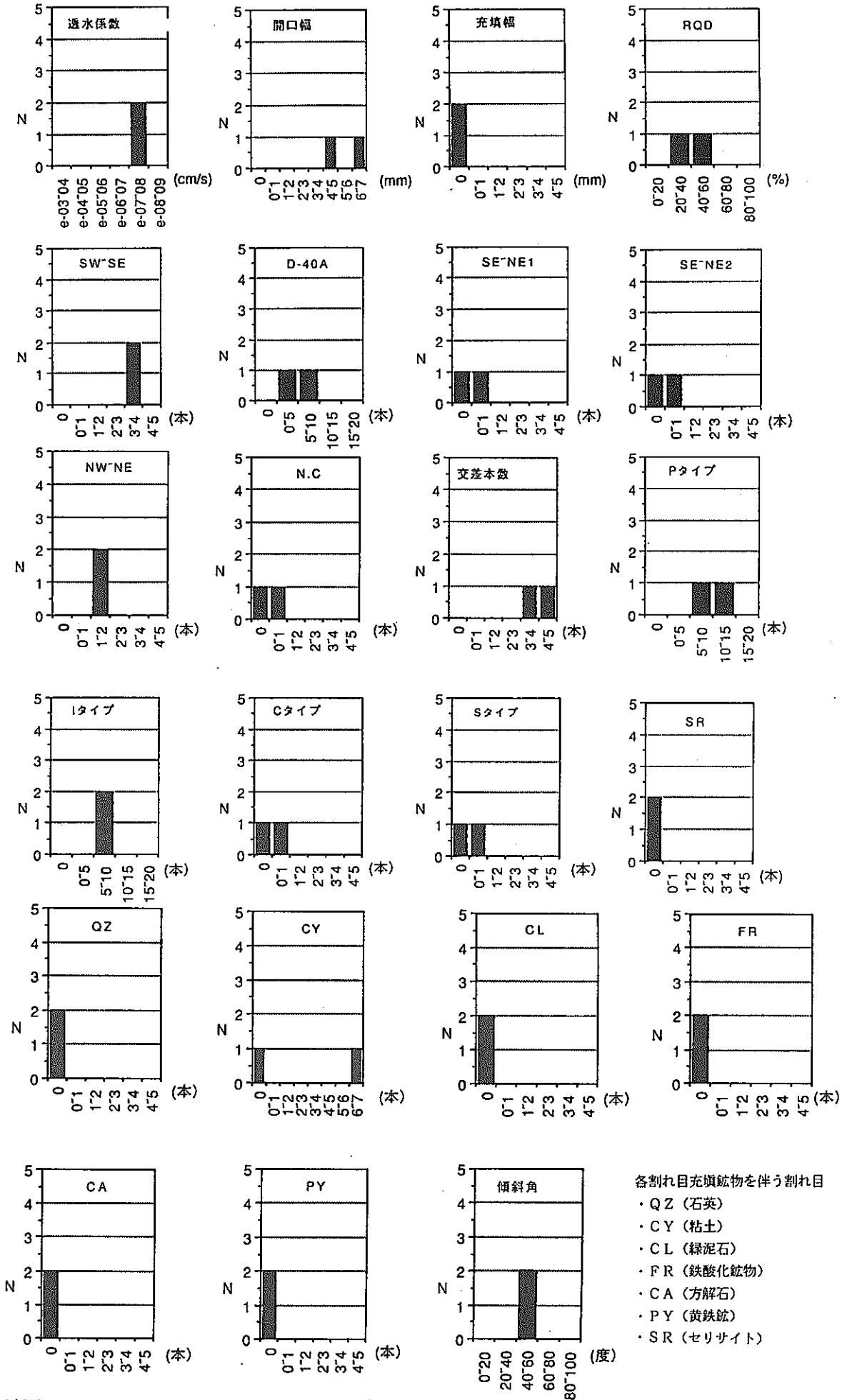
付図-3 クラスター4のヒストグラム



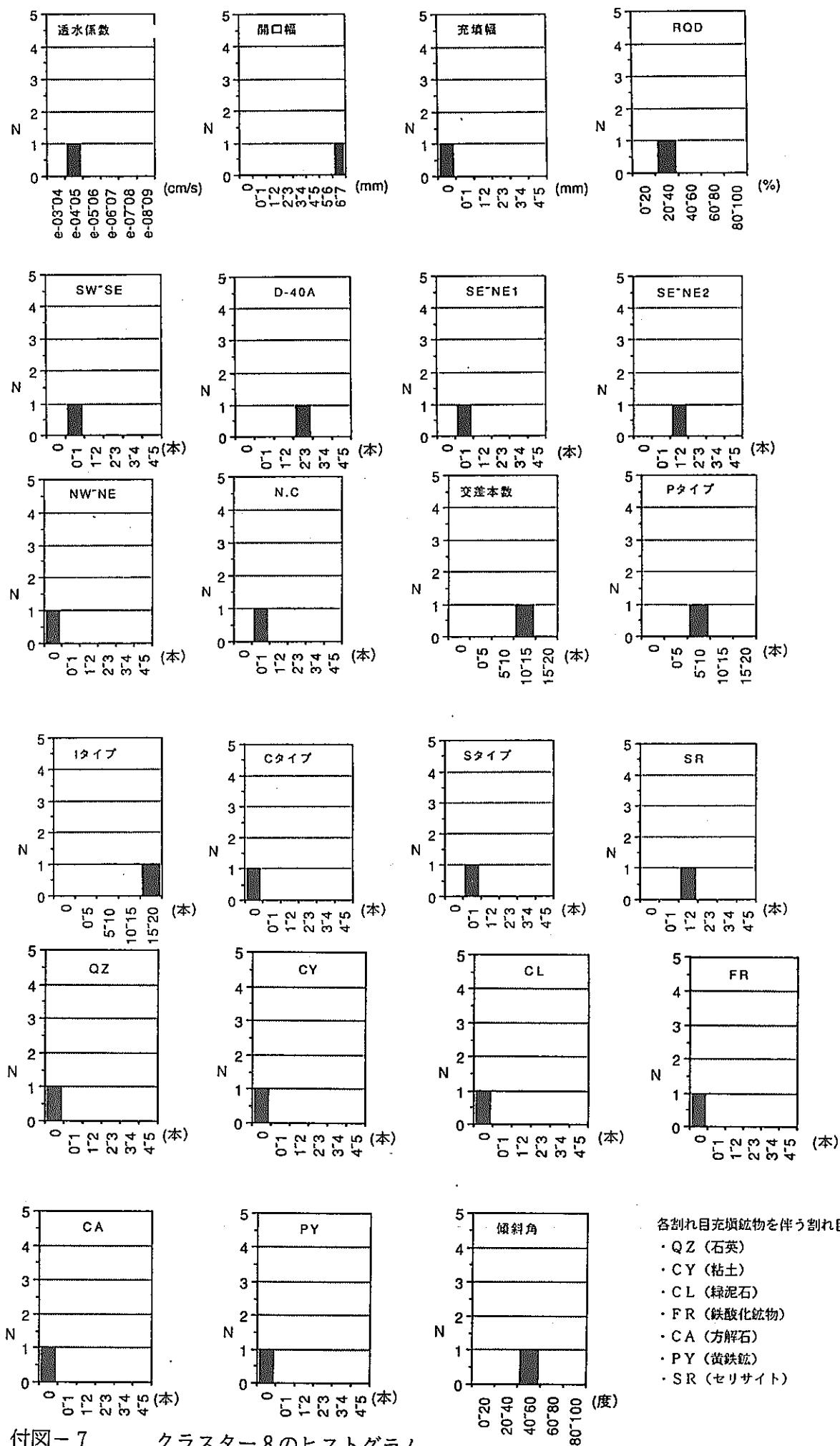
付図-4 クラスター5のヒストグラム



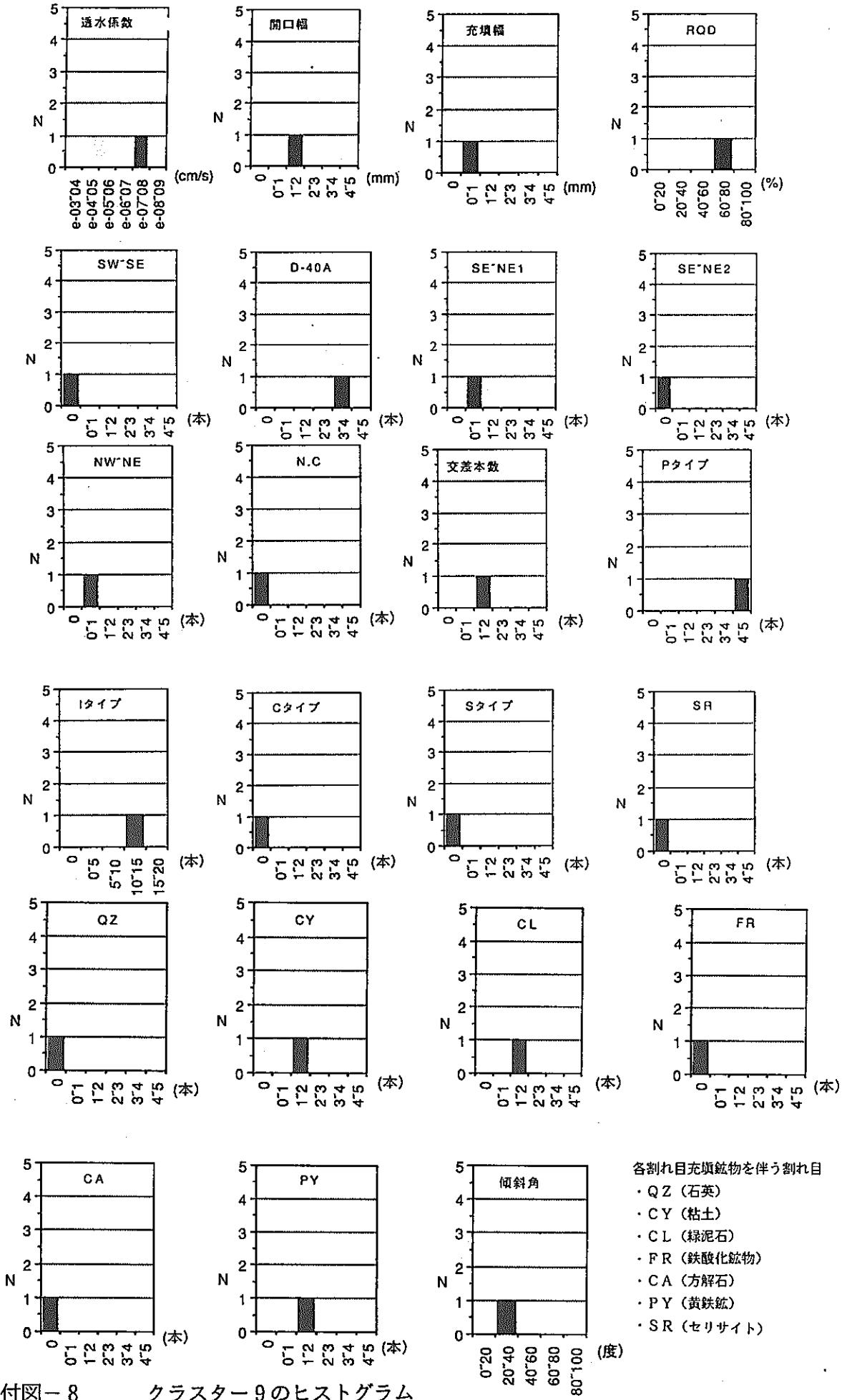
付図-5 クラスター6のヒストグラム



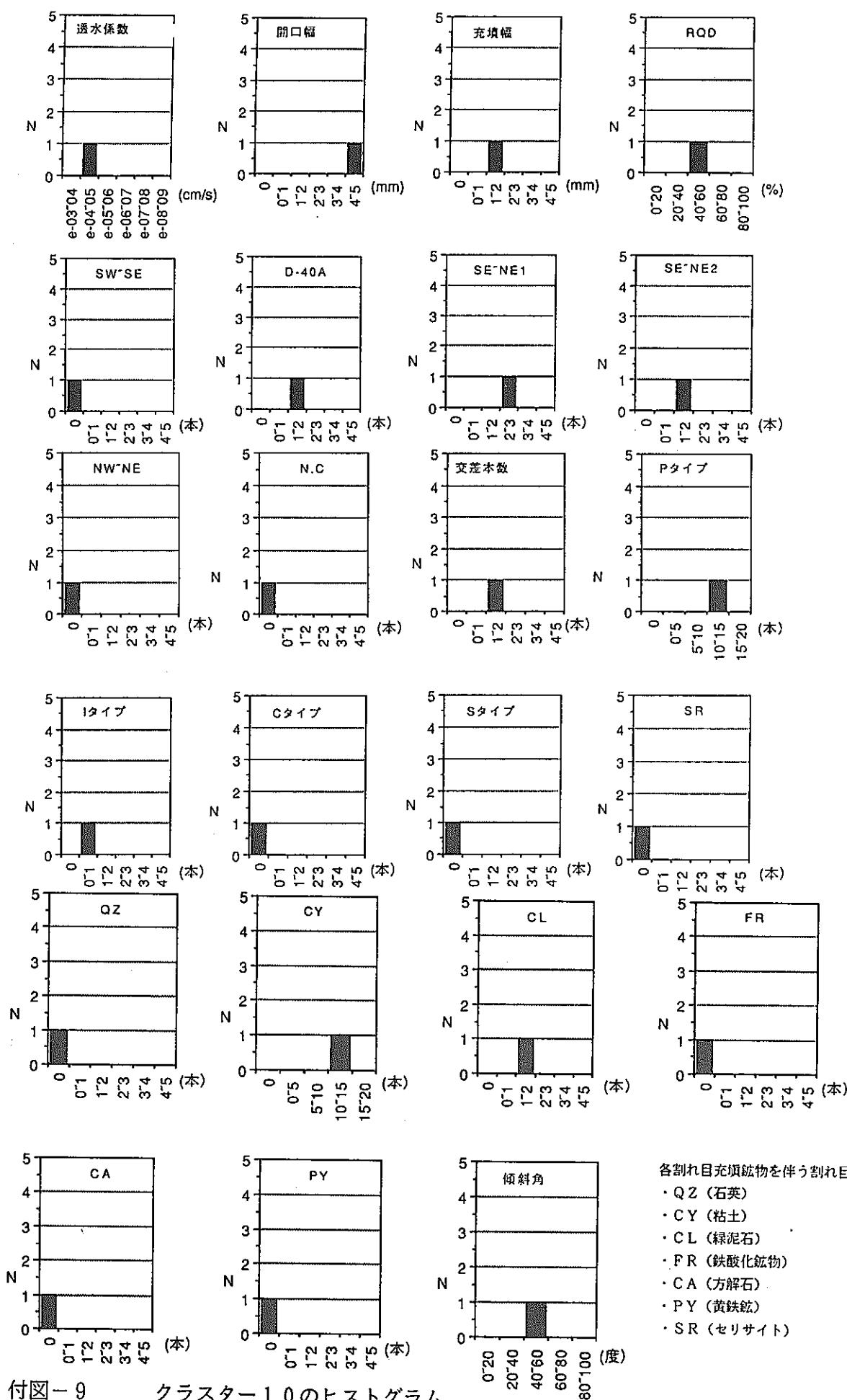
付図-6 クラスター7のヒストグラム



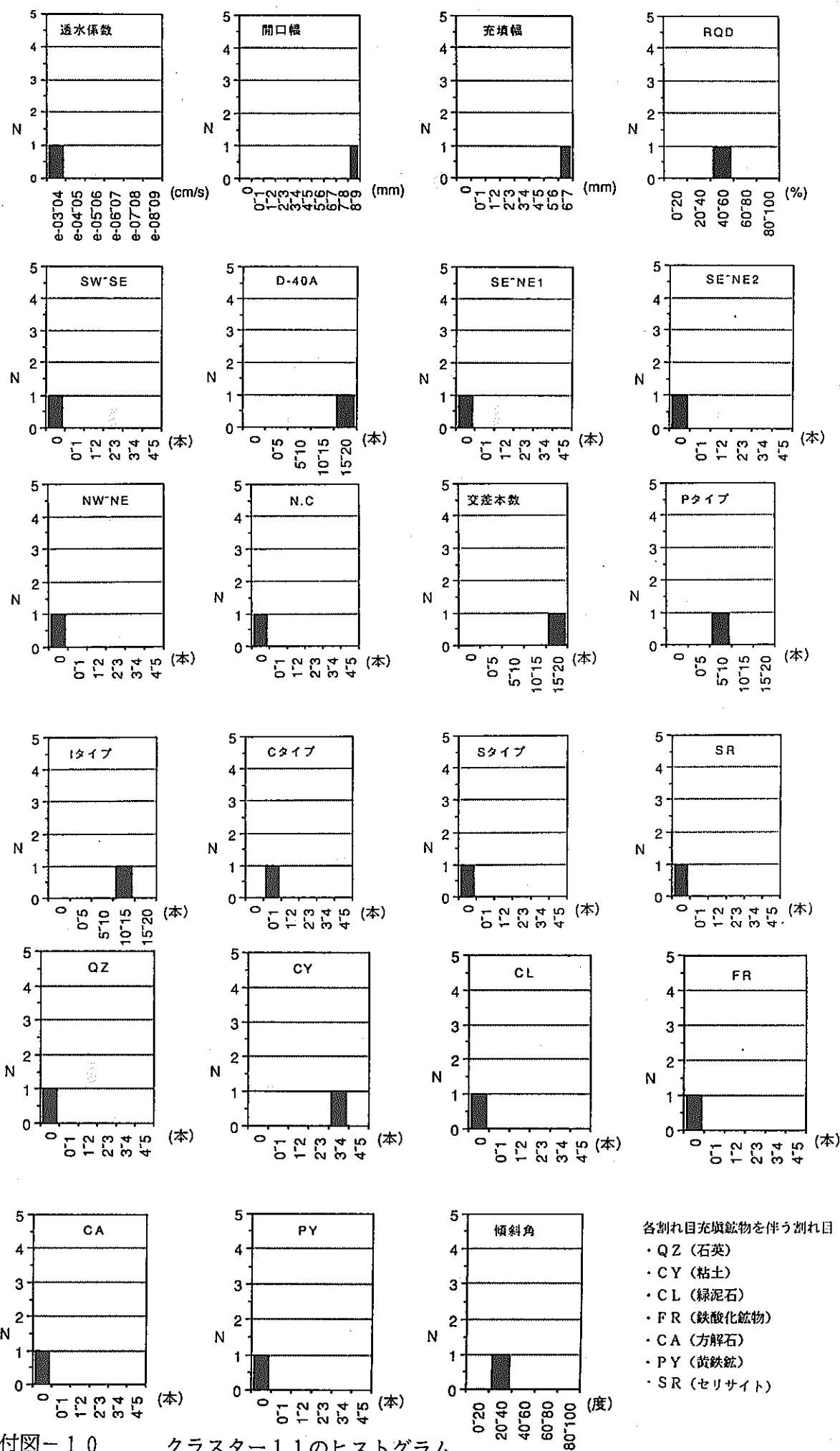
付図-7 クラスター8のヒストグラム



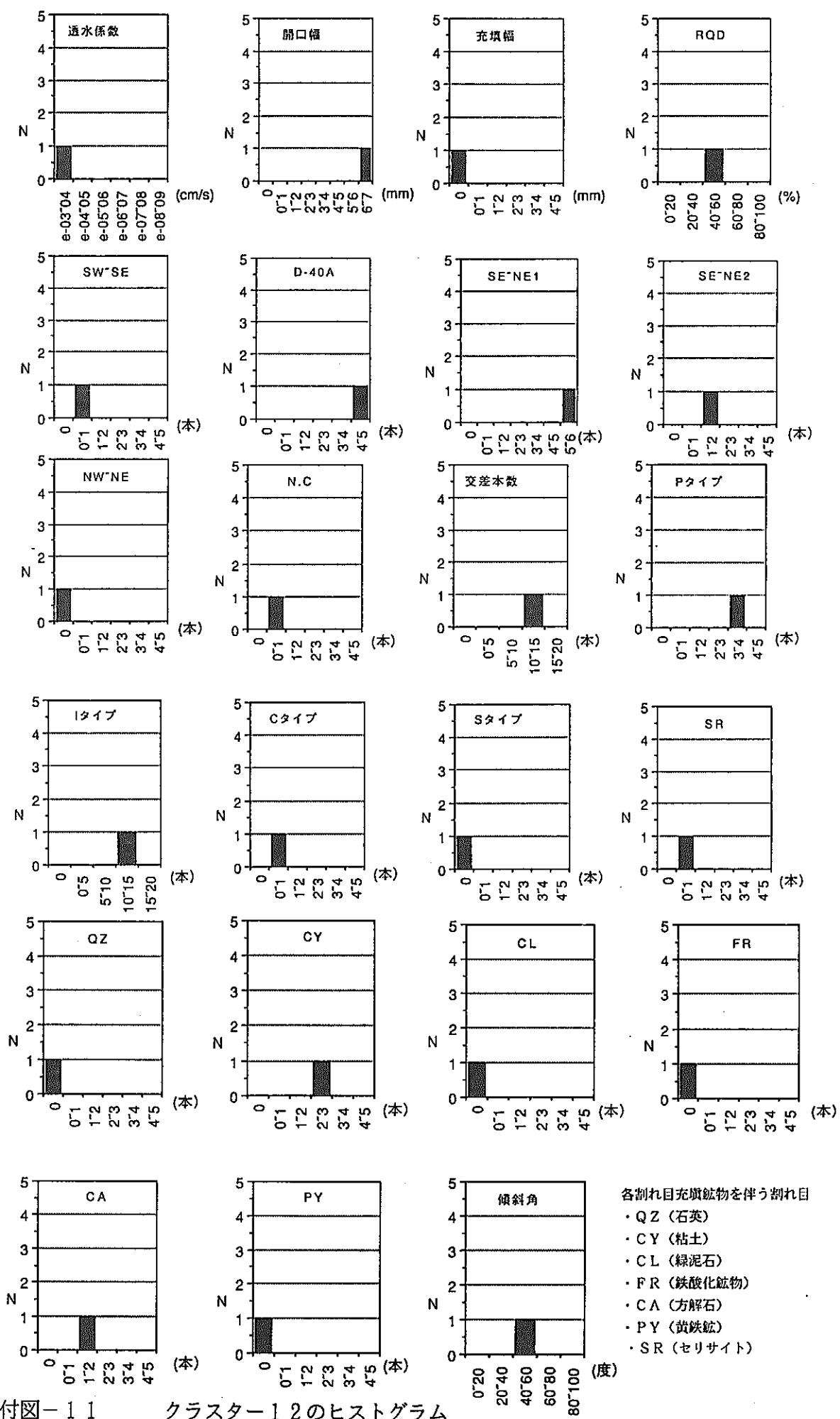
付図-8 クラスター9のヒストグラム



付図-9 クラスター10のヒストグラム



付図-10 クラスター11のヒストグラム



付図-11 クラスター12のヒストグラム

— 技術レポートリスト —

TR/GE 89-01 清水和彦：地質環境データベースシステムの開発研究（基本設計），
PNC TN7410 89-029

TR/GE 89-02 仙波毅・尾方伸久・坪田浩二：ボアホールレーダの我が国における花
崗岩岩盤への適用試験， PNC TN7410 90-003

TR/GE 89-03 武田精悦（訳）：国際ストリパプロジェクト， PNC TN7410 90-004

TR/GE 89-04 尾方伸久・大澤英昭：地下水特性調査技術開発の現状， 検層技術(1)，
PNC TN7410 90-005

TR/GE 89-05 尾方伸久・大澤英昭：地下水特性調査技術開発の現状， 検層技術(2)，
PNC TN7410 90-006

TR/GE 89-06 大澤英昭・吉田英一：深部花崗岩中の割れ目解析－花崗岩岩盤における
割れ目特性およびその分布特性に関する研究－，
PNC TN7410 90-007

TR/GE 89-07 杉原弘造・二宮康郎：堆積岩盤中における掘削影響評価－掘削による
緩み領域の計測・評価手法の研究開発－，
PNC TN7410 90-009

TR/GE 89-08 柳澤孝一：広域地下水流動調査の現状について， PNC TN7410 90-021

TR/GE 89-09 吉田英一：粘土質岩中における核種移行試験・研究－ベルギー・モル
原子力研究所との共同研究（その1）－，
PNC TN7410 90-019

TR/GE 90-01 今井久・柳澤孝一：3次元飽和不飽和浸透流解析プログラムTAGSACの
概要， PNC TN7410 90-026

- TR-GE 90-02 野原壯・瀬尾俊弘・落合洋治：ウラン鉱床を利用したナチュラルアナログ研究（その1）－ウラン系列核種の放射非平衡について， PNC TN7410 91-030
- TR/GE 90-03 吉田英一：粘土質岩中における核種移行試験研究－ベルギー・モル原子力研究所との共同研究（その2）－， PNC TN7410 91-017
- TR/GE 90-04 柳澤孝一・今井久・斎藤章・大澤英昭・中島誠：立坑掘削影響試験における地下水流动影響予測解析， PNC TN7410 91-013
- TR/GE 90-05 清水和彦：地質環境の長期的隔離能に係わる天然事象について(1)－気候変動と海面変動－， PNC TN7410 91-010
- TR/GE 91-01 Yoshida, H., M. Yui and T. Shibutani:A Study of Influence Factor on Uranium Fixation in the Tono Uranium Deposit, Japan, PNC TN7410 91-061
- TR/GE 91-03 尾方伸久・大澤英昭・仙波毅・柳澤孝一：多変量統計解析手法を用いた結晶質岩盤の割れ目解析， PNC TN7410 92-001