

地下水流动調査研究

一地下水流动の総合調査・解析システムの開発一

(先行基礎工学分野に関する研究詳細報告書)

2000年5月

埼玉大学

核燃料サイクル開発機構 東濃地科学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

Inquires about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184,

Japan

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

2000

地下水流动調査研究
地下水流动の総合調査・解析システムの開発
(先行基礎工学分野に関する研究詳細報告書)

渡辺 邦夫¹⁾
三枝 博光²⁾

要 旨

地下水流动機構把握のための調査・解析手法の開発と精度の向上、それらの体系化を目的に、地下水流动特性評価プロセスの構築に向けた研究を実施した。本研究は、主に①地下水が流れる「場」の性質を的確に捉えることを目的とした研究、②地下水流れのメカニズムを把握することを目的とした研究、③調査計測・評価技術の開発を目的とした研究、から構成されている。

本研究の主な概要及び成果は、以下の通りである。

- ① 割れ目系岩盤の地下水流动を評価するために、割れ目系のモデル化・解析手法の開発に関する研究を実施した。その結果、原位置調査から地下水流动を支配する割れ目系の規則性を抽出・把握するとともに、その調査結果に基づく、水理地質構造のモデル化手法や地下水流动解析手法を構築した。
- ② 地下水流动解析における重要な因子の一つである不飽和特性に関する研究を実施し、逆解析法による地盤の不飽和特性の評価方法を構築した。
- ③ 難透水性岩盤における水理学的特性を評価するための蒸発量測定装置の開発に関する研究を実施し、低蒸発性岩盤（低透水性岩盤）における蒸発量測定精度を向上させるための試験方法を示した。

また、広範囲な領域を対象とした水収支を把握することを目的に、地下水モニタリングシステムの構築に関する基礎的研究を実施した。その結果、広範囲な領域を対象とした水収支の把握やモニタリングデータの相互関係を評価する上で、ニューラル・ネットワークモデルによる解析手法が有効であることを示した。

1) 客員研究員（埼玉大学 理工学研究科 教授）

2) 核燃料サイクル開発機構 東濃地科学センター 地層科学研究グループ

目 次

1.はじめに	1
2.割れ目系のモデル化・解析手法の開発に関する研究	2
2.1 研究の背景及び目的	2
2.2 割れ目系の規則性と地下水流动特性に関する国際的研究の現状	2
2.3 割れ目系調査について	3
2.3.1 釜石鉱山における割れ目系調査結果	4
2.3.2 風化岩盤を対象とした割れ目系調査結果	7
2.3.3 断層破碎帯を対象とした割れ目系調査について	8
2.4 割れ目系岩盤を対象とした地下水流动解析手法について	10
3.不饱和特性に関する研究	36
3.1 研究の背景及び目的	36
3.2 不饱和特性の逆推定法について	36
3.3 不饱和特性の原位置測定	36
3.4 原位置測定結果に基づく不饱和特性の逆推定	37
4.蒸発量測定装置の開発に関する研究	42
4.1 研究の背景及び目的	42
4.2 室内試験の概要及び結果	42
5.地下水モニタリングシステム構築に関する基礎的研究	47
5.1 研究の背景及び目的	47
5.2 ニューラル・ネットワークモデルについて	47
5.3 ニューラル・ネットワークモデルによる河川流量の推定	48
5.4 ニューラル・ネットワークモデルによる解析結果の確認	48
参考文献	55

図表 目次

図 2-1 割れ目の一般的形状と各部名称 (Mazurek らの原図を簡略化したもの)	11
図 2-2 Finnsjon 地域の Zone2 の割れ目形態 (Ahlbom らの原図を簡略化したもの)	12
図 2-3 釜石鉱山 550m 坑道内の調査地点	13
図 2-4 KD-90 坑道内の割れ目方向分布	14
図 2-5 共役割れ目相互の変位プロセス	15
図 2-6 割れ目展開図	16
図 2-7 フラクチャーゾーンの 2 つの考え方の模式図	17
図 2-8 割れ目 A とそれと類似の方向を持つ割れ目の交線	18
図 2-9 C 地点割れ目の交線分布	19
図 2-10 ステップ、スプレイ構造中の割れ目交線模式図	20
図 2-11 共役割れ目とステップ構造の模式図	21
図 2-12 側壁 A を含む鉛直断面内の割れ目系推定図	22
図 2-13 湧水地点周辺の割れ目展開図	23
図 2-14(a) 湧水地点周辺の割れ目系のモデル化	23
図 2-14(b) 地下水流動の模式図	23
図 2-15 湧水地点の詳細割れ目スケッチと湧水箇所	24
図 2-16 割れ目交線分布の場所的変化	25
図 2-17 割れ目系の分類方法	26
図 2-18 割れ目系のタイプ分類に基づき構築した割れ目系モデル	27
図 2-19(a) 掘削面における割れ目系の詳細スケッチ	28
図 2-19(b) 主要割れ目系と強風化部の分布	28
図 2-20 割れ目系交線部の強風化状態のスケッチ	29
図 2-21 主要割れ目交線部のスケールの地表部と地下深部の関係	29
図 2-22 主要割れ目交線部のスケール分布	29
図 2-23 調査坑道沿いの地質断面図	30
図 2-24 茂住 - 祐延断層破碎帯構造のモデル化	31
図 2-25 断層破碎帯の区分の模式図	32
図 2-26 断層破碎帯粘土化部の粒径加積曲線	33
図 2-27 チャンネルモデルの基本的考え方模式図	34
図 2-28 Don-Chan モデルの解析例	35
図 3-1 不飽和特性の逆解析手順	38
図 3-2 不飽和特性の原位置測定時の境界条件	38
図 3-3 簡易ベンチレーション測定装置	39
図 3-4 不飽和特性の原位置測定方法	39

図 3-5 蒸発量の経時変化	39
図 3-6 飽和度の深度分布	40
図 3-7 推定した不飽和特性	41
図 4-1 Evaporation Logging System の概要	44
図 4-2 Evaporation Logging System の構造	44
図 4-3 室内試験概況	45
図 4-4 蒸発量センサー位置と測定精度の関係	46
図 4-5 ベンチレーション風量が蒸発量（絶対湿度）に与える影響	47
図 5-1 ニューラル・ネットワークモデルの概念	50
図 5-2 ニューラル・ネットワークモデルによる解析結果（学習段階）	51
図 5-3 ニューラル・ネットワークモデルによる河川流量の推定結果と観測結果の比較	
	52
図 5-4 実験対象ブロックの土壤状態	53
図 5-5 実験対象ブロックの植物の根の分布	53
図 5-6 人工降雨の流出量	54
 表 2-1 物性試験結果	33
表 2-2 鉱物組成鑑定結果	33
表 3-1 推定した Van-Genuchten 式のパラメータ	40

1. はじめに

地層処分研究開発の基盤研究として位置付けられている地層科学研究では、地表から地下深部までの地下水の流動特性を把握することが重要な研究課題とされている。本研究は、この課題に向けて、地下水流動機構把握のための調査・解析手法の開発と精度の向上、さらにはそれらの体系化を目的に、地下水流動特性評価プロセスの構築に向けた研究を実施する。

地表から地下深部までの地下水流動特性の評価にあたっては、以下の2点を総合することが重要である。

- ①地下水が流れる「場」の性質を的確に捉えること
- ②地下水流れのメカニズムを把握すること

岩盤中の地下水流動に関する研究あるいは実務の現状では、①の「場の把握」に関する技術開発が極めて重要な課題になっていると考えられる。これは、特に、割れ目系岩盤中の主要な地下水流動経路となると考えられる割れ目系の分布や性質の把握等に課題があることによるものである。

また、②の「メカニズムの把握」については、例えば、地下水流動が層流状態か乱流状態か、または、地下水流動場が飽和状態か不飽和状態かなどを的確に評価しておくことがある。これらの問題は当然、同時並行的に研究されねばならない。

さらに、「場の把握」及び「メカニズムの把握」を行う上で、それらを調査計測及び評価する技術を開発することも重要な課題の一つである。

したがって、本研究では、上記の目的を受けて以下の研究を実施した。

- ①地下水が流れる「場」の性質を的確に捉えることを目的とした研究
 - ・割れ目系のモデル化・解析手法の開発に関する研究
- ②地下水流れのメカニズムを把握することを目的とした研究
 - ・不飽和特性に関する研究
- ③調査計測・評価技術の開発を目的とした研究
 - ・蒸発量測定装置の開発に関する研究
 - ・地下水モニタリングシステム構築に関する基礎的研究

2. 割れ目系のモデル化・解析手法の開発に関する研究

2. 1 研究の背景及び目的

割れ目系岩盤中の地下水流动は、割れ目系に大きく影響されるため、研究対象地域の地下水流动を評価するためには、割れ目系の把握が必要・不可欠である。しかし、割れ目系の把握を行う上で、直接目に見えない割れ目の分布をどのように的確に把握し、水理地質構造をモデル化するかが問題である。堆積岩であれば、層理面などの情報を基に地層の分布などを推定することは可能である。推定した後、各地層特有の透水性などを測定すれば、容易に水理地質構造モデルが構築できる。このようなプロセスが可能である理由として、地層が基本的には平面的に連続し、ある程度の範囲では地層の性質が変化しない等の規則性を持っていることが挙げられる。割れ目系岩盤についても同様なプロセスで推定を行う上で、まず割れ目系の持つ規則性を抽出・把握する必要がある。規則性の抽出・把握こそが、割れ目系岩盤評価の出発点であると言える。

2. 2 割れ目系の規則性と地下水流动特性に関する国際的研究の現状

現在、割れ目系岩盤中の地下水流动に関する研究の一つの方向として、割れ目系の持つ規則性、あるいは、割れ目系の中に発達する、水みち系の規則性を見つける試みが国際的になされている。ここでは、まずそれらの試みについて述べる。

割れ目系の規則性を調べ、それを一般的な形で定式化する方向の研究は、高レベル放射性廃棄物処分の研究に関連して、イスラエルやスウェーデンで進んでいる。スウェーデンでは、この廃棄物処分研究のため、エスボ地下研究所周辺岩盤の割れ目系の研究が詳細に行われた。その結果、R. Munier¹⁾は、18億年の歴史を持つ当該岩盤中には極めて多くの割れ目があるものの、それらのうち地下水の流动経路となっている割れ目は、最近数百万年の間に形成されたか、もしくはその時期に再動(Reactivation)した古い割れ目であることを示した。つまり、最近活動した割れ目のみが地下水の流动経路となることを報告した。この成果は、地下水流动を評価を行うためには、割れ目形成過程の洞察に

基づいた、「地下水の流動経路となる割れ目の選別」が大事であることを明らかにしたものである。

また、スイスにおいては、アルプス山脈に建設されたグリムゼル地下研究所において岩盤の割れ目系の研究が行われた。その研究の中で、割れ目形成時期には、ダクタイルとブリットル破壊の2つの割れ目形成時期があり、後者のより新しい時期の割れ目が主要な地下水の流動経路となることを示した²⁾。また、時代の古いダクタイル変形時の割れ目一部が新しい時代に再動し、地下水の流動経路となることを明らかにした。この性質もスウェーデンでの結果と同様、地下水流动を評価するためには割れ目の形成過程の把握が重要であることを示している。

このような研究を踏まえ、スイスではその後、主に下記の2点について研究が進められた。

- ・新しく形成される割れ目の形態的特徴の把握
- ・再動割れ目の形態的、地下水流动特性の把握、及び物質移行特性（Matrix Diffusion）の把握

これらのうち新しく形成される割れ目の一般的形状として、Mazurek ら³⁾は図2-1に模式的に示す概念を提案した。図中(a)は、一方向に伸びた割れ目の一般的形状であり、(b) (c) (d)は各部の名称である。この提案によれば、まず割れ目は、複数のMaster Fractureより構成され、さらに基本的な割れ目構造は、単一割れ目部と割れ目端点付近のスプレイ構造よりなるSimple fracture部と各Master fractureをつなぐ、ステップ構造を呈するComplex fracture部から構成されるとしている。この提案は、割れ目は基本的にステップ・スプレイ構造を持つことが一般的であり、従来Fracture zoneと呼ばれていた割れ目集中部を、ステップ構造であると解釈するものである。この事は、後述するように、割れ目系の形態に関して従来とは異なった解釈である。図2-2は、以上のような考え方に基づいて表現された、スウェーデンの廃棄物処分場の一つの候補地であるFinnsjon地域の割れ目形態⁴⁾である。

2. 3 割れ目系調査について

本研究における割れ目系調査は、割れ目系岩盤を対象とした水理地質構造モ

モデルのモデル化に関する考え方を構築することを目的として、釜石鉱山、ダム建設現場、及び神岡鉱山を対象として実施した。その観点は、下記の通りである。

- ・ 2. 2で述べた割れ目形態が日本の岩盤でも一般的に確認できるか。
- ・ 2. 2で述べた割れ目形態以外にも地下水の流動経路となる構造は存在するか。

2. 3. 1 釜石鉱山における割れ目系調査結果

調査地点を図 2-3 に示す。図中の KD90 坑道及びその周辺は、核燃料サイクル開発機構（旧、動力炉・核燃料開発事業団）によって、岩盤地下水に関する研究が行われていた。

本研究における割れ目系の調査地点は、KD90 坑道から近い位置であり、また KD90 坑道とは同一の岩種（花崗閃緑岩）が分布していることから、KD90 坑道に分布する割れ目系と本研究における調査地点に分布している割れ目系の性質には密接な関係があると考えられる。

KD90 坑道に見られる割れ目系の特徴は、共役割れ目系であり、共役の組となる割れ目が何度も相互に切りあつたものである⁵⁾。図 2-4 は、この坑道内に見られる割れ目の方向分布を示したものである。図中、2つの割れ目方向集中部が見られるが、それらは、共役割れ目の組であり、それらの共役割れ目の交線の代表的な方向を黒丸で示している。一つの割れ目交線部について、微小割れ目の変位関係から読み取った割れ目相互の切り合いの歴史的変化を、図 2-5 に示す。この図から、KD90 坑道においては、共役の組をなす割れ目が相互に働き、結果として多くの微小割れ目を、交線部に発達させてきたことがわかる。

図 2-6 は、図 2-3 中(A)に示す調査地点における坑道壁面に見られる割れ目分布スケッチの展開図である。図中、A、B 地点には、坑道内でも明瞭にステップ構造を確認することができる。また、C 地点においては、割れ目の集中帯が分布していることが分かる。従来このような割れ目集中帯は、漠然とフランチャーボーンあるいは断層帯などと呼ばれてきた。従来、このようなゾーンは、図 2-7 (a) に模式的に示す様に、ほぼ平面的に連続しているものと考えられていた。しかし、前述の考えによれば、この部分はステップ構造部であり、その連続性は、図 2-7 (b) に示すように局所的、線状であることが考えられる。

図 2-7 中の(a)、(b)に示す考え方の違いにより、それぞれの考え方に基づく水理地質構造モデルは大きく異なるものとなる。したがって、地下水流动に与える影響は大きいと考えられる割れ目集中帯の形態を詳細に把握する必要がある。このことを考えて、まず、C 地点に分布している割れ目集中帯を詳細に観察した。

この割れ目集中帯における第 1 次的な規則性として、ほぼ同一方向に多数の割れ目が集中していることが挙げられる。さらに、割れ目集中帯中の割れ目相互の交線方向を用いて、この割れ目集中帯の詳細な規則性について検討した。

図 2-8 (a) に一つの割れ目（図中 A）とその割れ目と類似した方向性を持つ割れ目（図中 S）の交線の関係の模式図を示す。この図より、割れ目 S の方向性が微妙に異なることにより、割れ目の交線方向はそれぞれ大きく異なる。したがって、割れ目の方向性が類似していても、割れ目相互の交線は、割れ目面 A 上であれば、様々な方向に分布することが分かる。図 2-9 に C 地点に見られる割れ目集中帯の割れ目交線方向をステレオネット上半球に投影し、コンターマップで表現した。この図から、かなり多くの交線がある一定方向を持っていることが分かる。これが、C 地点に見られる割れ目集中帯の、2 番目の規則性である。つまり、この割れ目集中帯は、単に方向性が類似している以上の規則性を持っていることが明らかとなった。図 2-10 に示すように、割れ目集中帯内の交線方向が集中するような一般的地質構造として考えられるのは、ステップ・スプレイ構造であり、C 地点の割れ目集中帯はステップ構造であることを確認することができた。

また、この割れ目集中帯と岩盤全体の割れ目形成メカニズムとの関係を検討した。図 2-9 と図 2-4 を比較すると、KD90 坑道に見られた共役割れ目交線方向（図 2-4 中の黒丸位置）と、C 地点の割れ目交線集中方向（図 2-9）がほぼ一致していることが分かる。このことは、C 地点の割れ目集中帯が、岩盤全体の割れ目形成メカニズムと深い関連性を持っていることを意味している。ステップ構造と共に割れ目の形成の関係の模式図を図 2-11 に示す。この場合、ステップ構造は、共役割れ目交線方向に伸び、その方向はステップ内部割れ目集中帯の交線方向とも等しくなる。つまり、C 地点に見られる割れ目集中帯は、全体的な岩盤割れ目の形成過程と密接に関連したステップ構造である可能性が高い。

以上に述べた割れ目系の規則性に基づき、図 2-12 に示すように調査地点に

おける割れ目系の鉛直断面モデルを構築した。このモデルは、これまでに述べた議論からもかなり確度の高いものと考えている。

さらに、図 2-3 中(B)に示す地下水の湧水地点周辺の割れ目系についても同様の検討を実施した⁶⁾。図 2-13 に湧水地点周辺に見られる割れ目分布スケッチの展開図を示す。湧水は、図中 635 m 及び 643 m 地点に多数分布する割れ目開口部において観測されている。図中、坑道天井部に大きな破碎帯を伴う顕著な断層 (NW 走向) が認められる。この断層の方向性は、KD90 坑道の調査から得られた全体的な割れ目の方向性とは異なっている。またこの断層は、湧水点付近に掘削された試錐孔 (KF-1 孔) や、この断層の延長方向の KD90 坑道内では観察されず、局所的なものと判断された。以上の点と、本調査地点周辺の割れ目の卓越方向が NE 走向及び EW 走向であることから、この断層は、EW 走向の割れ目の局所的曲がり部と考えられる。さらに、図 2-13 中に顕著に見られるステップ構造を併せて、概略的な地質構造は図 2-14 (a) と判断される。本調査地点周辺の地下水流动は、図 2-14 (b) に示すように、ステップ構造内や断層の曲がり部周辺に形成される割れ目開口部を主な流动経路として坑道内に流出していると考えられる。図 2-15 に、640 m 付近に顕著に見られるステップ構造を湧水点と併せて示す。

さらに、直接観察されない岩盤中のステップ・スプレイ構造及び割れ目交線といった地下水の流动経路となる可能性の高い地質構造を把握する方法の一つとして、試錐調査が挙げられる。そのため、試錐調査より得られる割れ目データから、それらの構造の位置や方向性を推定する必要がある。試錐調査による割れ目系調査手法を検討するため、湧水点付近の坑道側壁に試錐孔を模擬した約 30 m の直線を引き、その直線に交わる割れ目の方向性を測定した。さらに、この直線を 6 区間に分割し、各区間毎の交線方向分布の特徴について検討した。各区間毎の交線方向分布を図 2-16 に示す。図より、各区間で交線方向集中部に差異があることが認められた。また、湧水点を含む 640 m 付近の区間の交線方向が図 2-12 の黒丸で示した方向、つまり、共役割れ目の交線方向とほぼ一致していることが分かる。他の区間ではこの傾向は顕著ではない。

以上のことから、ステップ・スプレイ構造及び割れ目交線といった地下水の流动経路となる可能性の高い地質構造を試錐調査から把握することの可能性が示された。

以上の検討結果に基づき、ステップ・スプレイ構造及び割れ目交線といった

構造を基本として、本調査地域における割れ目系を、図 2-17 に示す 4 種類のタイプ分類を行った。このタイプ分類に基づき構築した割れ目系の鉛直断面モデルを図 2-18 に示す。

2. 3. 2 風化岩盤を対象とした割れ目系調査結果

本調査では、花崗岩を基礎岩盤とするダムサイトにおいて、特に強風化・マサ化部に着目し、掘削面の調査を行い、地下水の流動経路の定量的評価法に関する検討を行った⁷⁾⁸⁾。

図 2-19 (a) は、調査領域の掘削面における割れ目分布スケッチであり、本領域は、高角度の EW ・ NE 系の割れ目が卓越していると共に、頻度は少ないが高角度の NS ・ NW 系の割れ目が存在しており、これらの割れ目系が主要構造と考えられる。また、主要構造以外に、シーティングジョイントと考えられる連続性の乏しい低角度の割れ目面が多く存在する。その面上にはほとんど風化は見られず、比較的新鮮な状態である。図 2-19 (b) は、これらの割れ目系の主要なものと強風化部の分布を示したもので、図中の網掛け部は $2m^2$ 以上の相対的に広い風化を伴うゾーン、●部は $2m^2$ 以下の風化面積を持つ領域を示しており、後者は主に割れ目系の交線部に位置している。図 2-20 に図 2-19 (b) 中の P1, P2, P3 の 3 地点の割れ目系交線部の強風化状態をスケッチしたものである。この図から、主要割れ目の交線部、その付近に見られる微少割れ目を中心に風化が進んでいる傾向が認められる。

風化部はその成因上、地下水及び地表からの水の流動経路であったと考えられる。風化部が調査領域中、主要構造の交線・集中部で顕著であるということは、これらが主要な地下水の流動経路を構成していると考えられる。また、既存の調査より、強風化・マサ化部の分布は、ある掘削面より 10~20m 程度以深から極端に見られなくなることが調査でわかつており、強風化・マサ化している交線部の風化前の状態は、新鮮部における主要構造の交線・集中部と同様の性状であったと考えられる。主要構造は連続しているものの、ある深度から風化部・新鮮部が連続的に変化していると考える。ただし、シーティング・弛みなどの影響で地表浅部の割れ目交線・集中部は風化の進行しやすい状態にあり、地下水の流動経路としてみた場合深部に比べてそのスケールは大きいと考

えられる。図 2-21 にその模式図を示す。地下水流動解析を行う際には、この地下水の流動経路の透水係数及びそのスケールを評価することが重要であると考える。

そこで、主要な地下水の流動経路と考えられる主要割れ目の交線・集中部の強風化・マサ化範囲を円で近似し、その直径から水みちのスケール調査を行い、スケール分布・強風化部の透水係数の評価をそれぞれ行った。

その結果、地下水の流動経路と考えられる構造のスケール分布は、図 2-22 に示すようになった。また、透水係数は、簡易的に風化部の間隙率からの評価を試みた。間隙率と透水係数の関係については、渡辺、関⁹⁾が報告している近似式、 $k=2.0 \times 10^{-9} \times \lambda P^5$ (cm/sec) で評価できる。ここに λP は、% 表示の間隙率である。今回、風化部の間隙率が 6 ~ 7 % となり、透水係数は $1.5 \times 10^{-5} \sim 5.5 \times 10^{-4}$ (cm/sec) と算定された。ただし、割れ目の交線・集中部の多くはマサ化しており、不搅乱状態でのサンプリングが困難なため、周辺部の岩片で評価を行った。一般にマサ土の透水係数が $1.0 \times 10^{-3} \sim 1.0 \times 10^{-2}$ (cm/sec) と報告されていることから、この値は妥当なものと考えられる。

2. 3. 3 断層破碎帯を対象とした割れ目系調査について

本調査では、形態及びその透水性がほとんど調査されていない、粘土化した大規模断層破碎帯のマクロな構造及びそれを構成する粘土化部の物性を把握することを目的に実施した¹⁰⁾。

調査は、神岡鉱山坑道のうち、茂住一祐延断層をほぼ垂直に貫く活断層調査坑道（土被り 315m）において実施した。図 2-23 に調査坑道沿いの地質断面図を示す。調査地点周辺の茂住一祐延断層は、概略的に 25m 程度の幅を有する 2 つの大きな断層破碎帯と 2 本の断层面から成っている。また、地質は手取層群の砂岩・頁岩互層から成る。

調査坑道内において、広域岩盤レベルにおける破碎帯の目視観察・スケッチを実施した結果、以下の特徴が把握された。

- ① 破碎帯内部の破碎の程度は一様でなく、割れ目状を呈するものから粘土化したものまで多様である。

- ② それらの各層は破碎帶面に平行な広がりを見せる層状構造を成している。
- ③ 破碎帶両端に高破碎度の粘土化した層があり、これが相対的に低い破碎度の層をサンドイッチ状に挟んでいる。

上記の特徴を踏まえて、破碎帶の全体構造をモデル化したものを図 2-24 に示す。図中、モデル化の根拠となった破碎部床面のスケッチも併記した。モデル化には粘土分含有率を基準として 5 段階に区分している。ここで、粘土分とは 2 cm 程度以下の礫を含みながらも周辺の割れ目状破碎部より粘土が卓越した柔らかい状態のもの、いわゆる“見掛け状の粘土”を指す。図 2-25 にはこれら破碎度の区分を模式的に表した。図中、A-zone から E-zone へ遷移するに従い、破碎度の高まりを表している。

本破碎帶におけるこのような構造から、破碎帶内部においては、破碎帶平面方向の地下水流動が卓越しており、逆に破碎帶平面を貫く坑道軸方向には高破碎帶の粘土化した層が遮水する形となり、難透水性を示すと考えられる。

さらに、破碎帶粘土化部 (E-zone) の物性を調べるために、現地で採取された 6 試料に対し、密度試験、含水比試験、粒度試験及び液性限界・塑性限界試験を実施した。その結果を表 2-1 及び図 2-26 に示す。粒度、コンシステンシー特性を見ると、現地での観察・サンプリング時には粘土化が激しいと感じたが、実際には礫・砂の粗粒分は 50% 以上を示し、細粒分が主に粘土であることから工学的分類は粘土質砂と判定された。

また、粘土化部に見られた黒色粘土、白色粘土、及び灰色粘土に対して鉱物組成鑑定を実施した。顕微鏡及び X 線回折検査の結果を表 2-2 に示す。含まれる鉱物種は一般的に見られる粘土鉱物がほとんどであり、80~150°C の温度で原岩が変質（破碎）されたと推定される。また、黒色粘土の原岩は頁岩、白色粘土は砂岩、そして灰色部はそれら地層の境界部にあったと判定された。したがって、灰色部は黒色と白色の混合であり、その鉱物組成は基本的にそれらの平均を示すものと考えられる。実際、石英、斜長石、白雲母等はほぼ平均であるが、スメクタイト等の変質鉱物は灰色部で平均よりやや多い。このことから変質は地層境界部を選択的に進み、結果的に変質（浸透）の程度は一様でないことが考えられる。

2. 4 割れ目系岩盤を対象とした地下水流动解析手法について

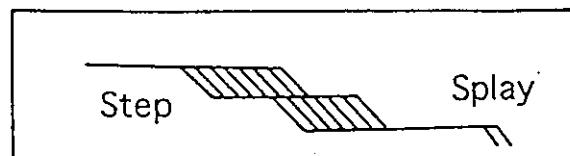
以上の割れ目系調査の結果から、割れ目系岩盤中の地下水流动を評価するために、ステップ・スプレイ構造及び割れ目交線、断層破碎帯といった割れ目系の規則性に基づく水理地質構造モデルの構築手法を提案した。このことは、割れ目系岩盤中の地下水流动は、割れ目系の構造に支配され、局所的な流れが多いことを示している。したがって、割れ目系岩盤中の地下水流动を解析するためには、この局所的な流れを解析モデル上表現することが重要である。

このような考え方に基づき開発している、岩盤内に発達する地下水の流动経路内の流れを解析する解析コード（Don-Chan モデル）について紹介する。

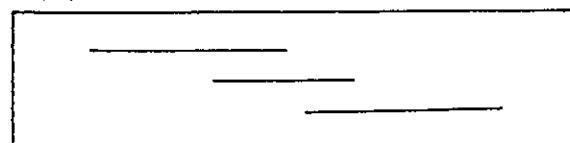
このモデルでは、図 2-11 に示すような、基本的な割れ目形成プロセスを基礎とする。その考えを極めて簡単に示したものが図 2-27 である。図は共役割れ目、共役割れ目の交線、ステップ構造、及びそれらに必ずしも分類されない古い割れ目などとの交線を示している。このような構造部は、前述したように微小割れ目などの集中度が高く、他の部分より透水性が大きいと考えられる。モデル化では、まず共役割れ目交線、ステップ、スプレイ構造の部分を透水性の高い管路（水みち、チャンネル）としてとらえている。次に、これらに分類されない割れ目との交線の影響を表すため、図中破線で示される仮想的管路を上記の線構造と直交方向に設定している。もし他の共役割れ目の組があれば、同様に管路系を作り、重ね合わせる。地下水流动は、作られた透水管路網の中の流れとして解析する。しかし、この図ではモデル化過程を単純化し過ぎており、実際には、たとえば必ずしも共役のペアとして認知し得ないが顕著な割れ目などとの交線も水みちとして取り上げている。このモデルの特徴は、実際の割れ目系の形成プロセスの特徴をとらえる中から、透水性の高いゾーンは基本的に線状に伸びていると考える点にある。このような考えの妥当性は、国際的な放射性廃棄物処分技術開発が行われたストリパプロジェクトの中でも指摘されている¹¹⁾¹²⁾。

このモデルにより解析された実例⁵⁾を図 2-28 に示す。この例は、前途の釜石鉱山 KD90 坑道周辺を対象としたものである。図中 (a) は割れ目図、(b) 管路網図 (c) トレーサー移動図である。トレーサー移動は、移流のみ考え、拡散を考慮しないパーティクル・トラッキング法により解析した。Don-Chan モデルはこのように、割れ目系の特性を調べることから開発されたものである。

(a) Fracture system



(b) Master fracture



(c) Simple fracture



(d) Complex fracture

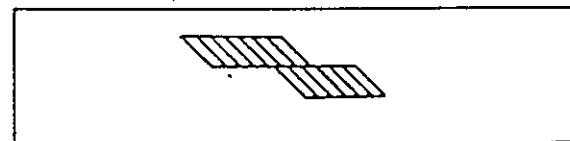


図 2-1 割れ目の一般的形状と各部名称 (Mazurek ら³⁾ の原図を簡略化したもの)

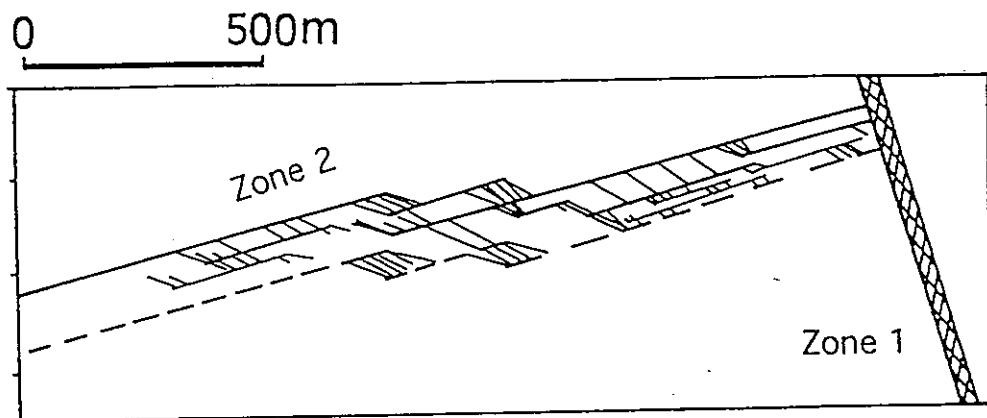


図2-2 Fimnjon 地域のZone2 の割れ目形態 (Ahlbom ら⁴⁾ の原図を簡略化したもの)

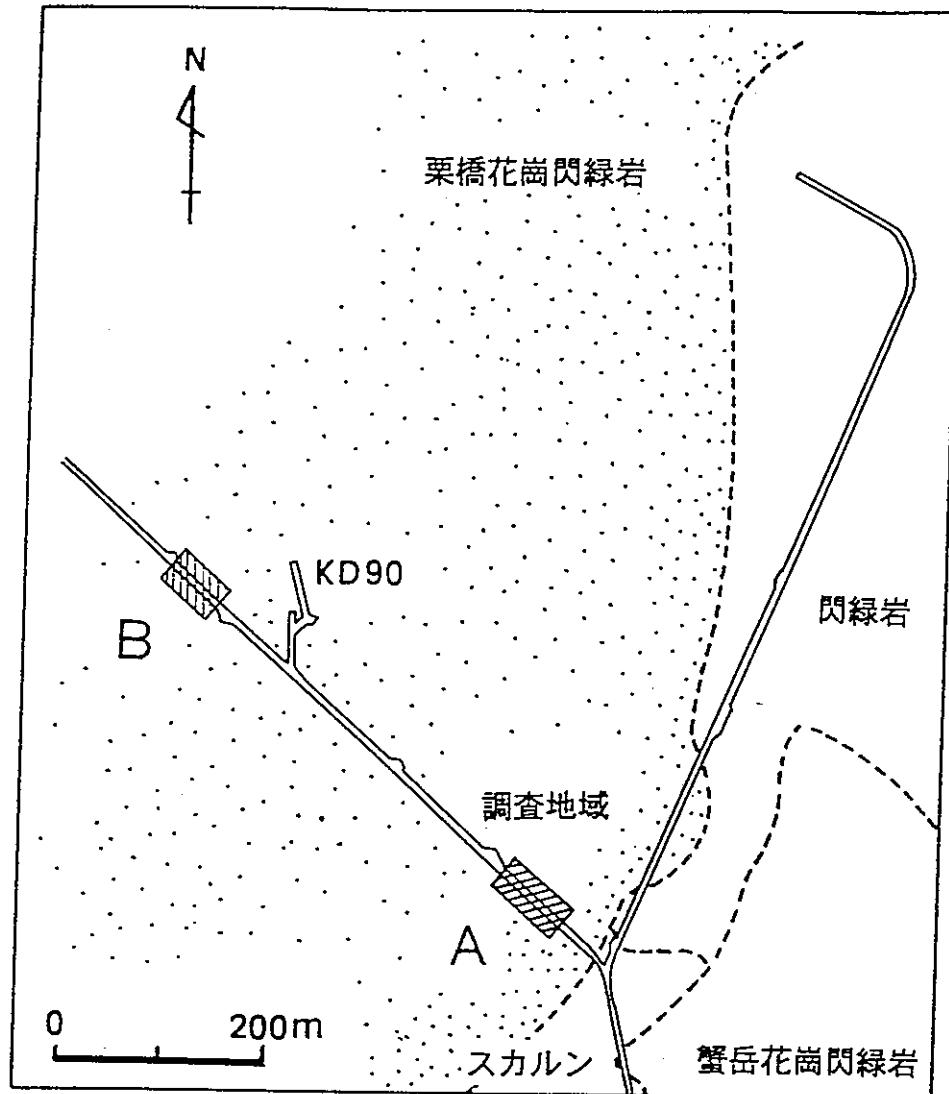


図2-3 釜石鉱山550m坑道内の調査地点

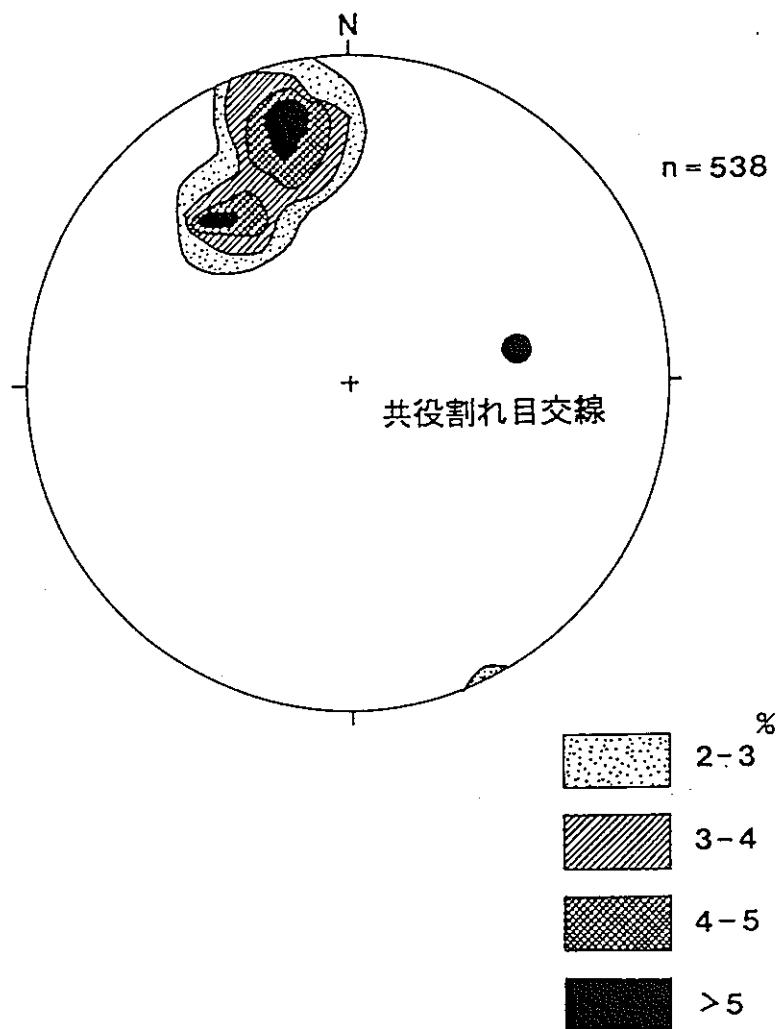


図 2-4 KD 90 坑道内の割れ目方向分布。共役割れ目系が見られる。黒丸は平均的な交線
方向

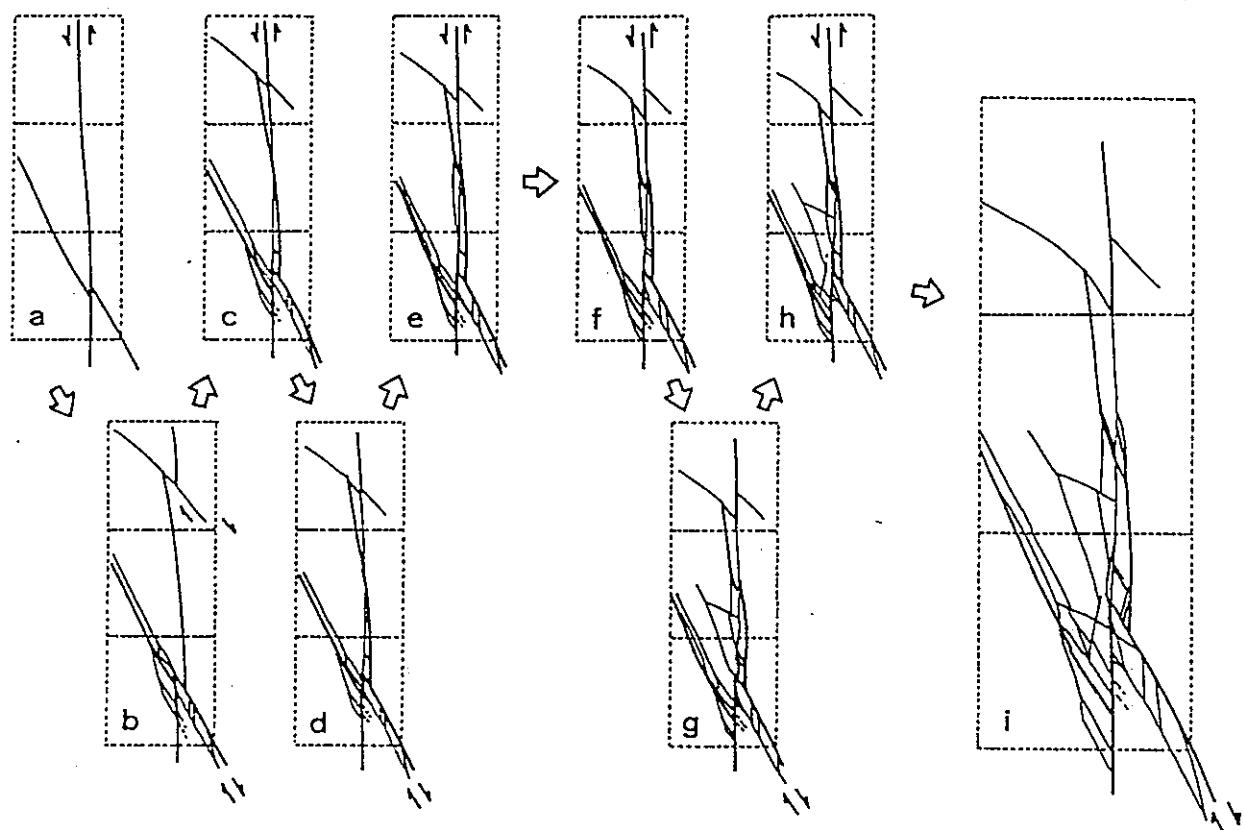


図2-5 共役割れ目相互の変位プロセス。(a)から(i)のプロセスが見られる。

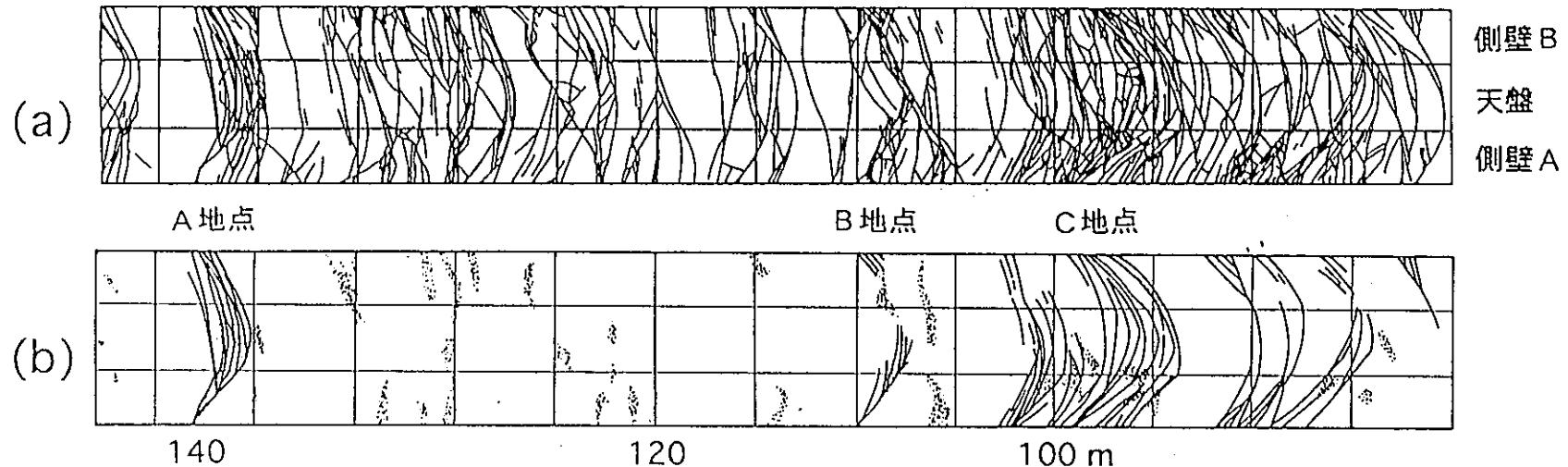


図 2-6 割れ目展開図。(b) は、ステップもしくはスプレイ構造と思われる割れ目。点で示した部分は、湧水地点。

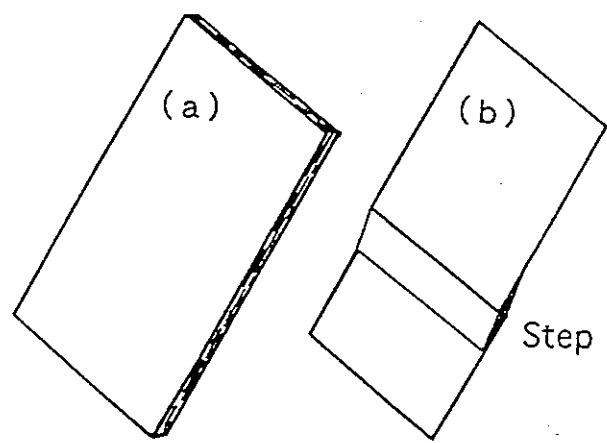


図 2-7 フラクチャージーンの 2 つの考え方の模式図。(a) は面的に広がることを仮定し、(b) ではステップと考えている。

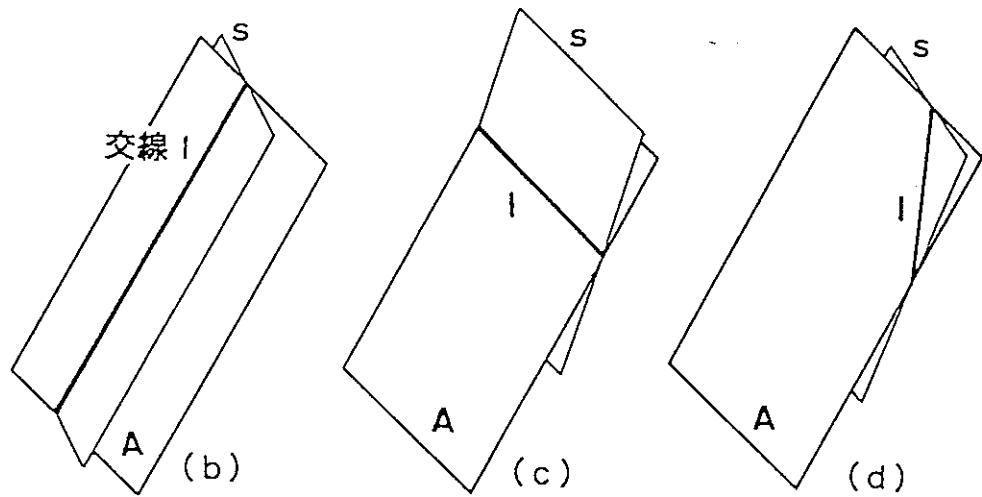
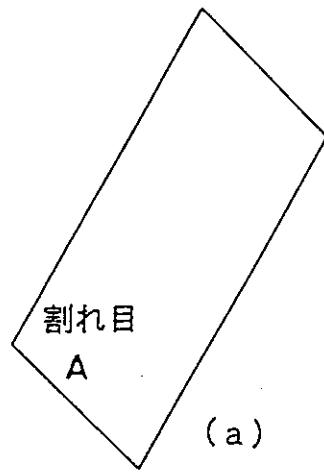


図2-8 割れ目Aとそれと類似の方向を持つ割れ目の交線

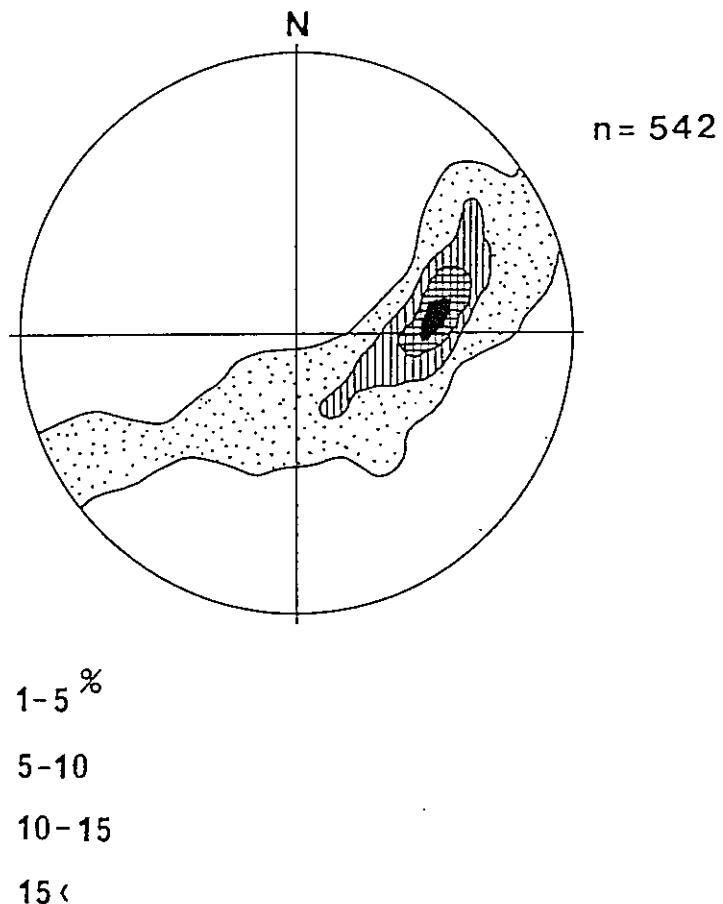


図 2-9 C 地点割れ目群の交線分布

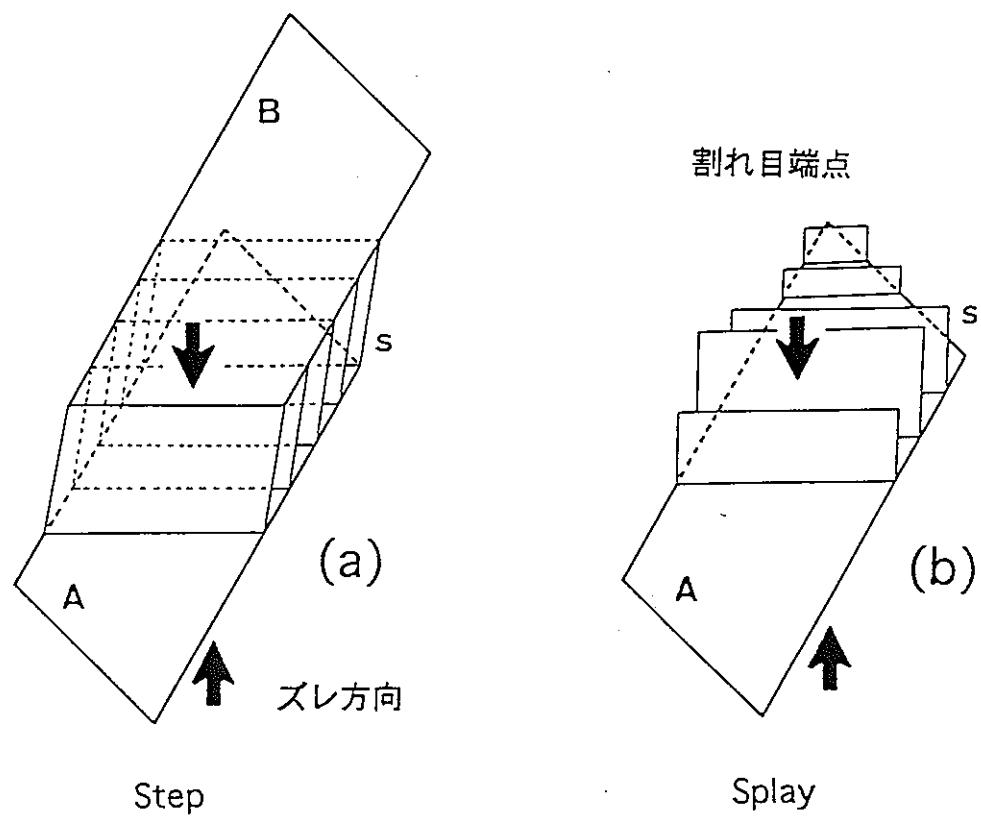


図 2-10 ステップ、スプレイ構造中の割れ目交線模式図

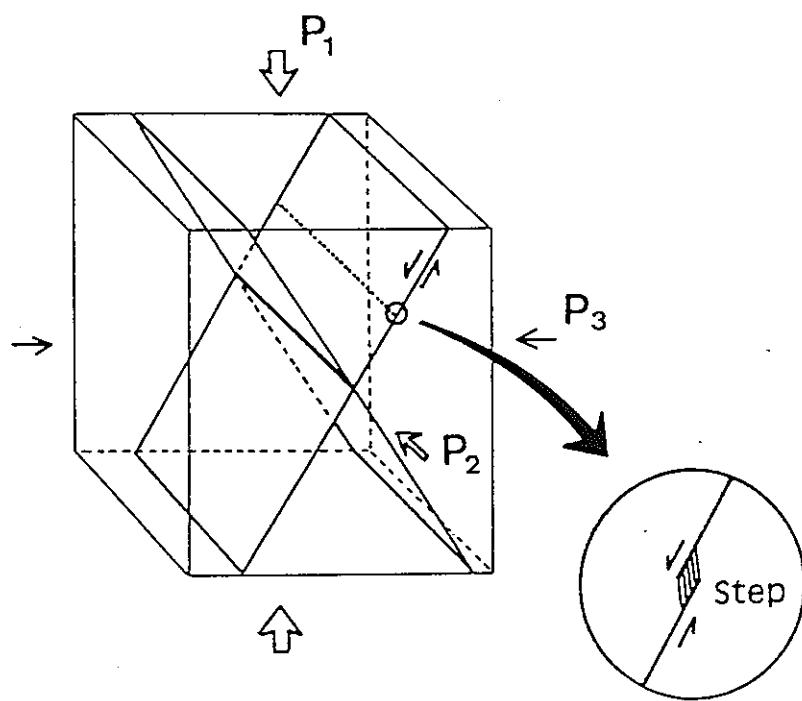
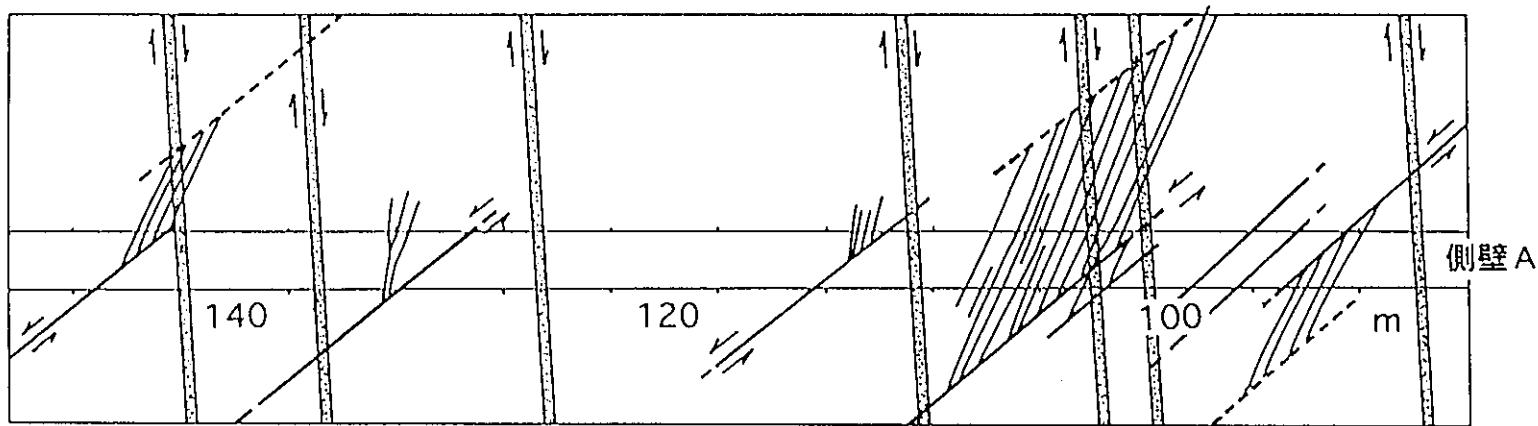


図 2-11 共役割れ目とステップ構造の模式図。 P_1 、 P_2 、 P_3 はそれぞれ最大、中間、最小主応力方向を示す。



22

図 2-12 側壁 A を含む鉛直断面内の割れ目系推定図。図中点で示した割れ目は、ステップ、
スプレイを持つ実線で示される割れ目と共に役の関係を持つ割れ目。

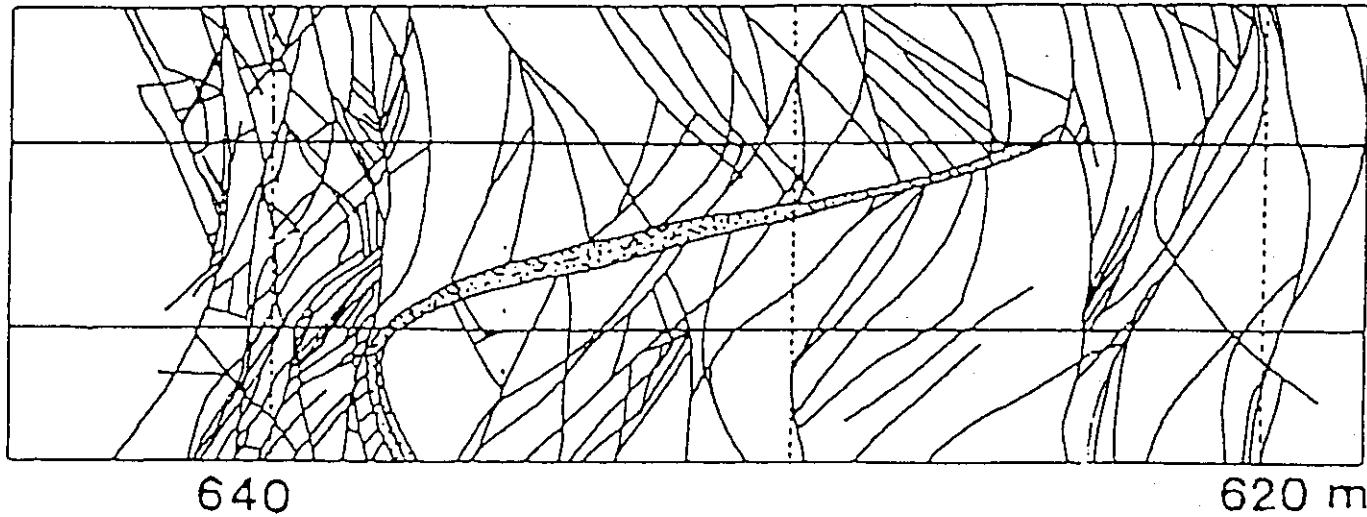


図2-13 湧水地点周辺の割れ目展開図

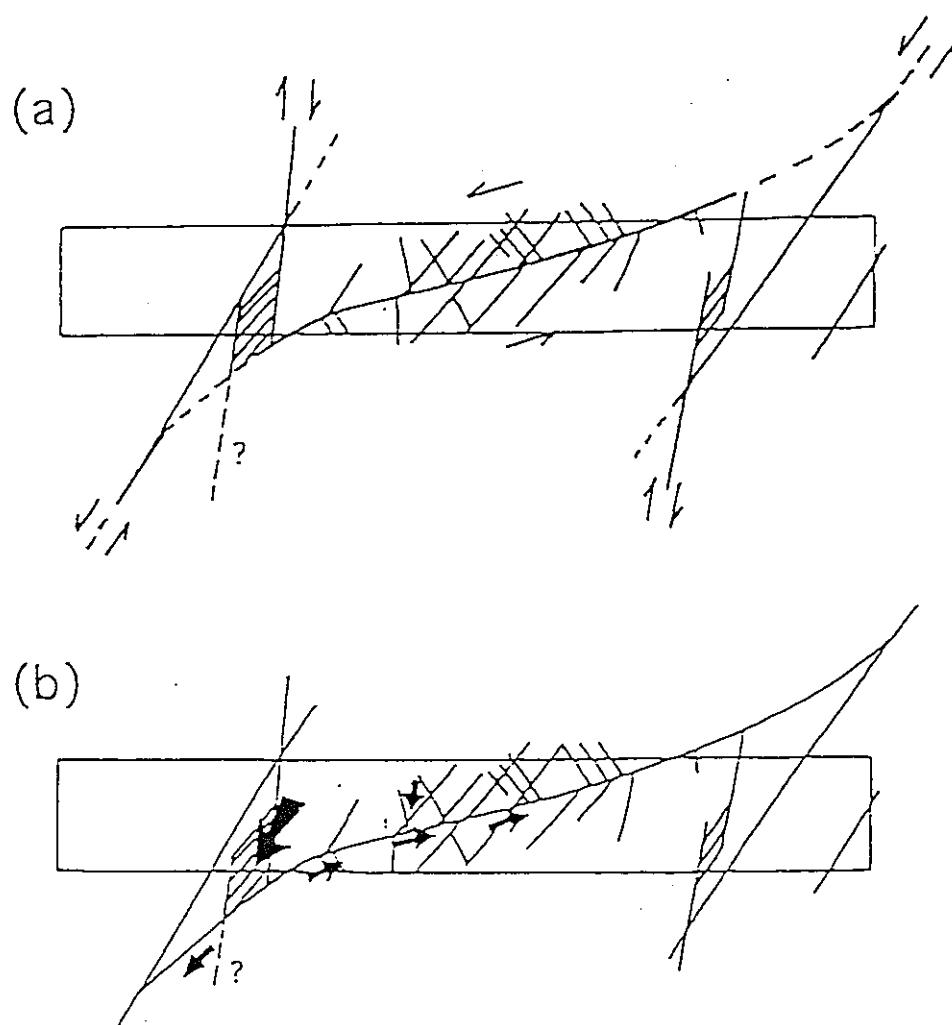


図2-14 (a) 湧水地点周辺の割れ目系のモデル化
(b) 地下水流動の模式図

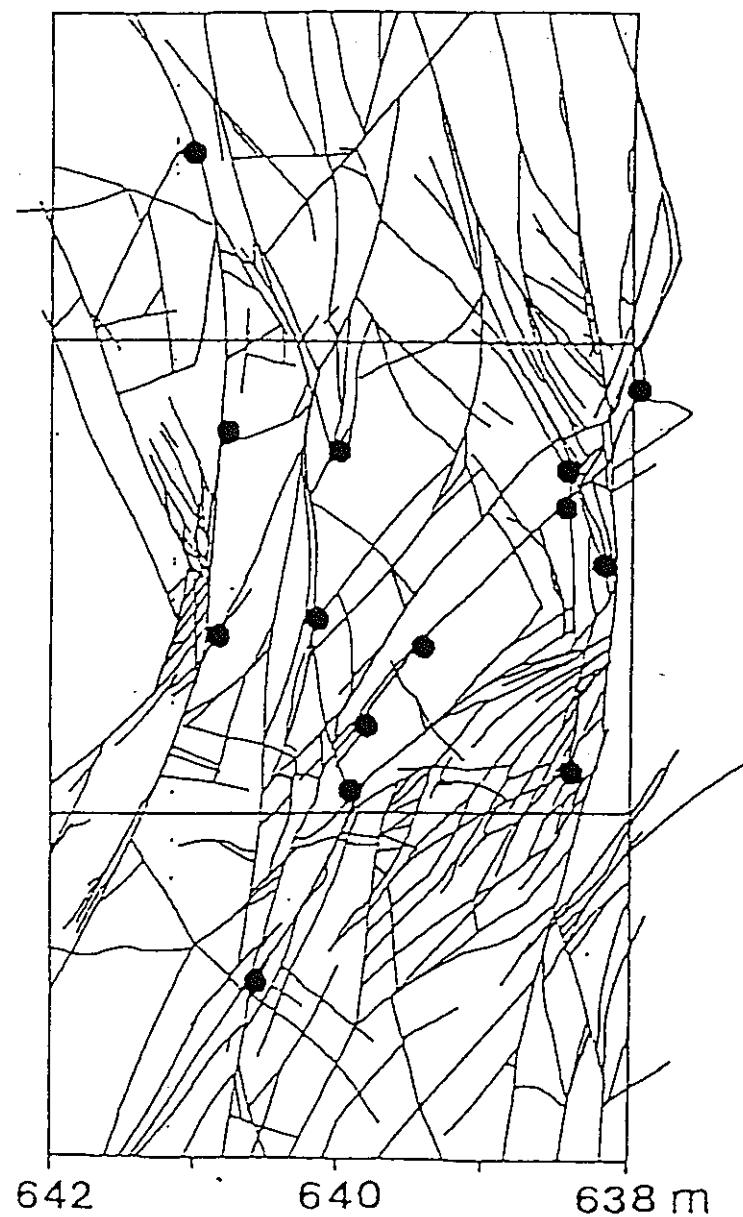


図2-15 湧水地点の詳細割れ目スケッチと湧水箇所

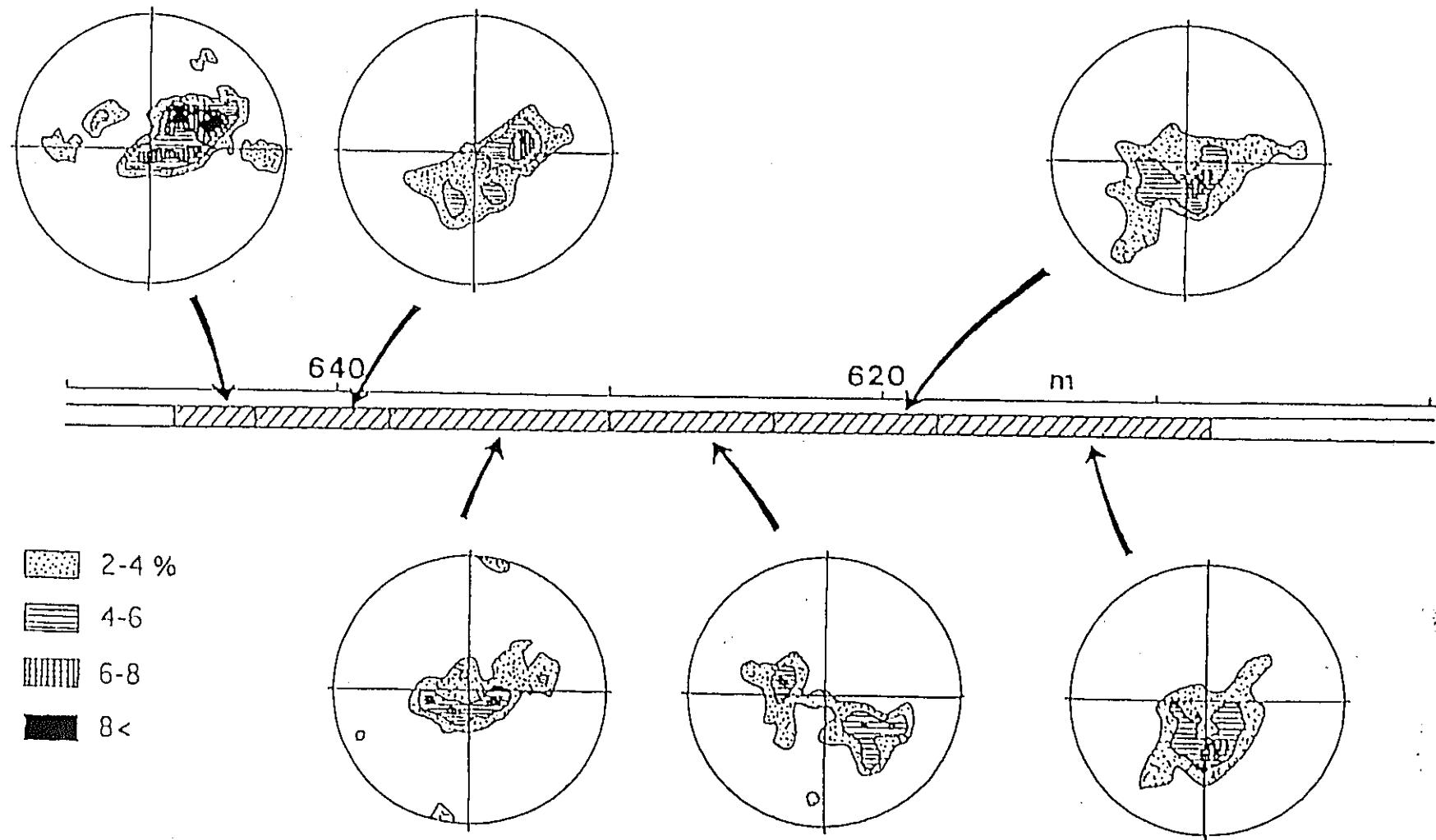


図 2-16 割れ目交線分布の場所的変化

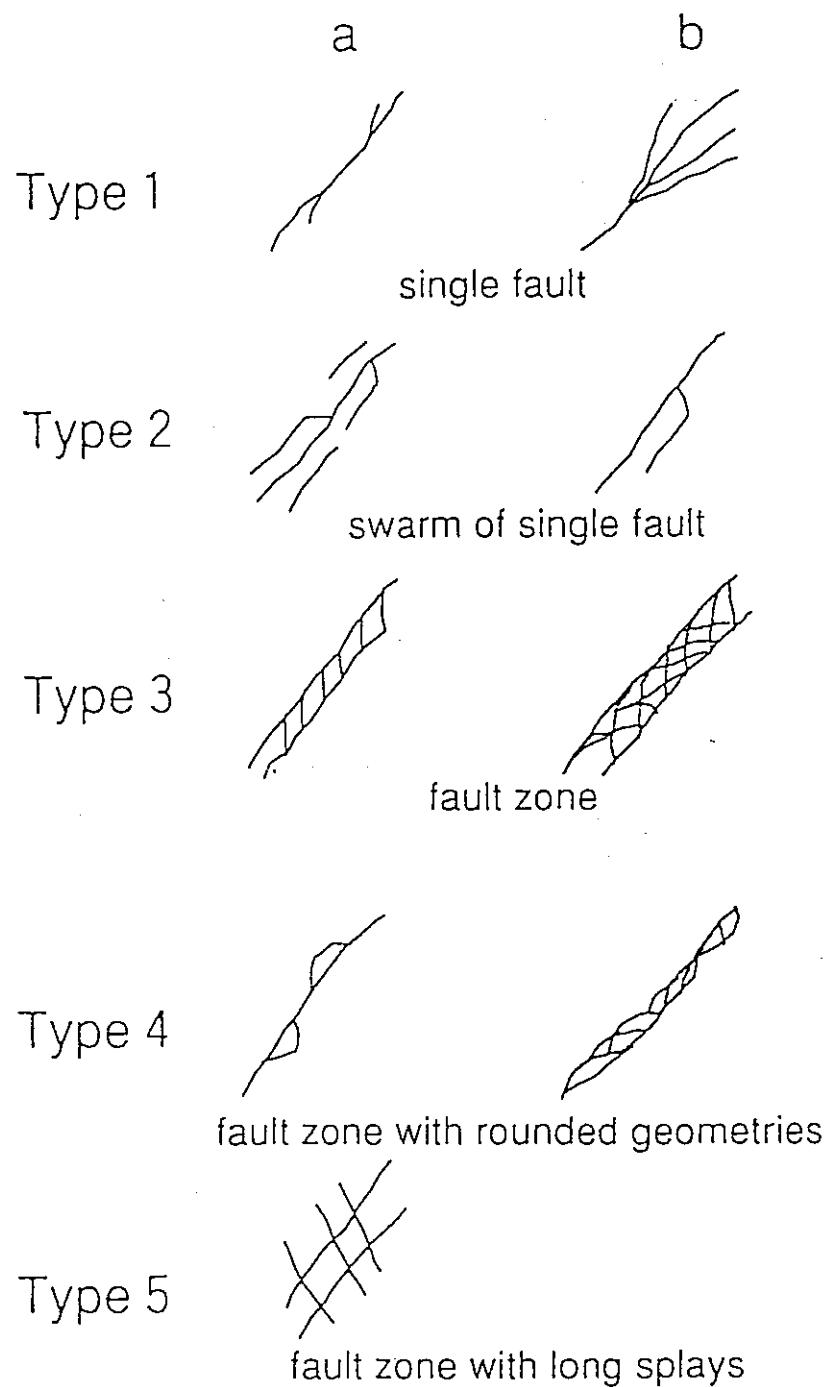


図2-17 割れ目系の分類方法

- a: ヨーロッパで提案されている割れ目系のタイプ分類
- b: a を考慮した釜石での割れ目系のタイプ分類

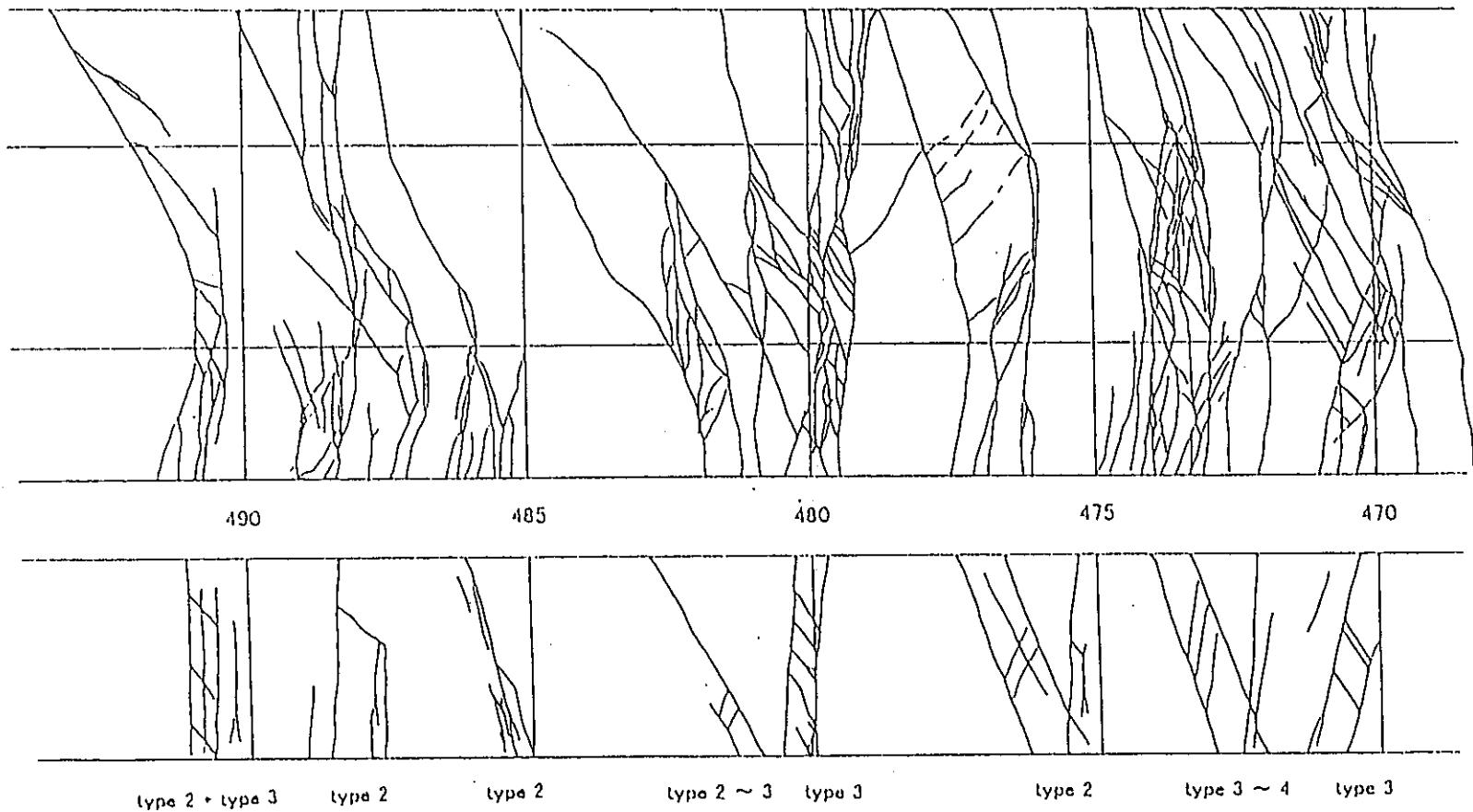


図2-18 割れ目系のタイプ分類に基づき構築した割れ目系モデル

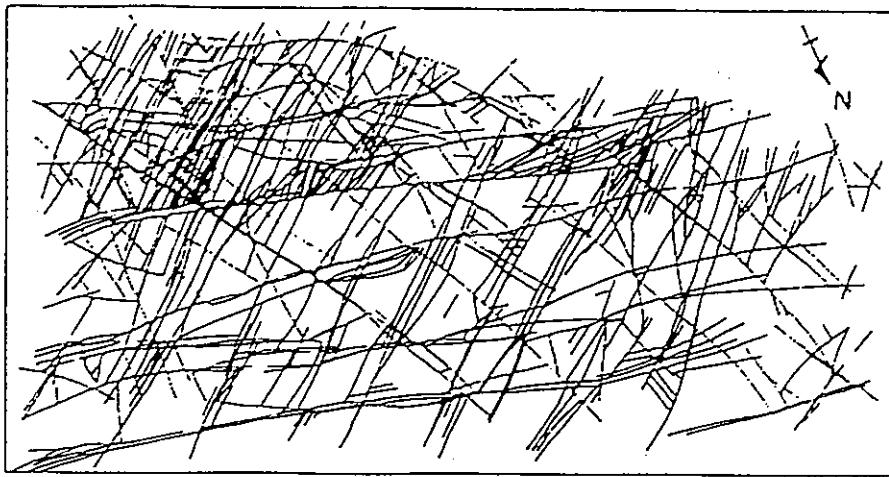


図2-19 (a) 掘削面における割れ目系の詳細スケッチ

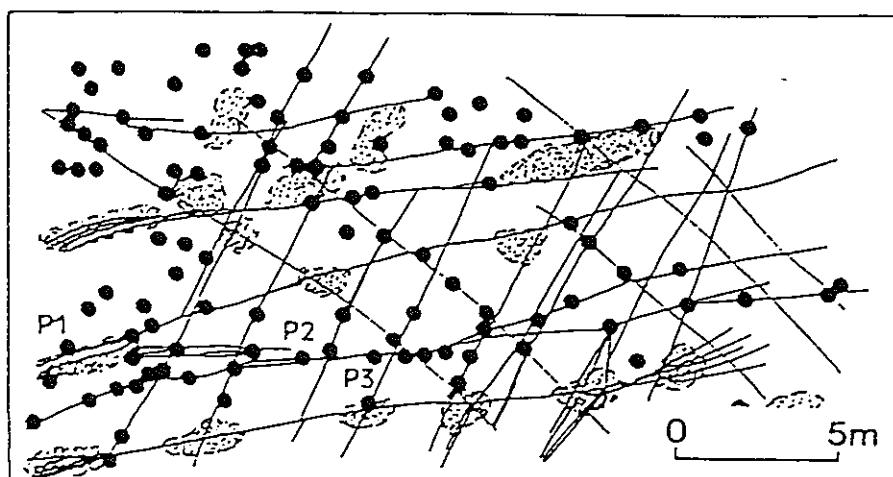


図2-19 (b) 主要割れ目系と強風化部の分布

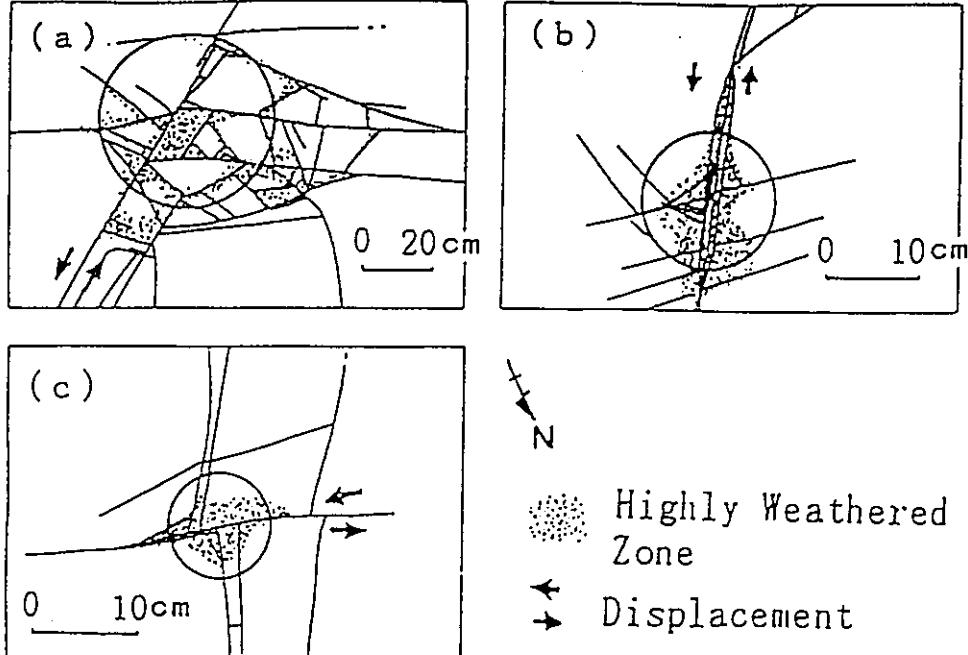


図 2-20 割れ目系交線部の強風化状態のスケッチ

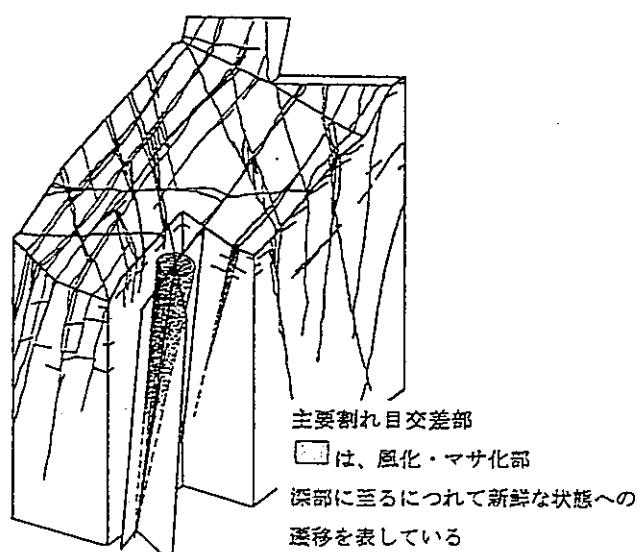


図 2-21 主要割れ目交線部のスケールの地表部と地下深部の関係

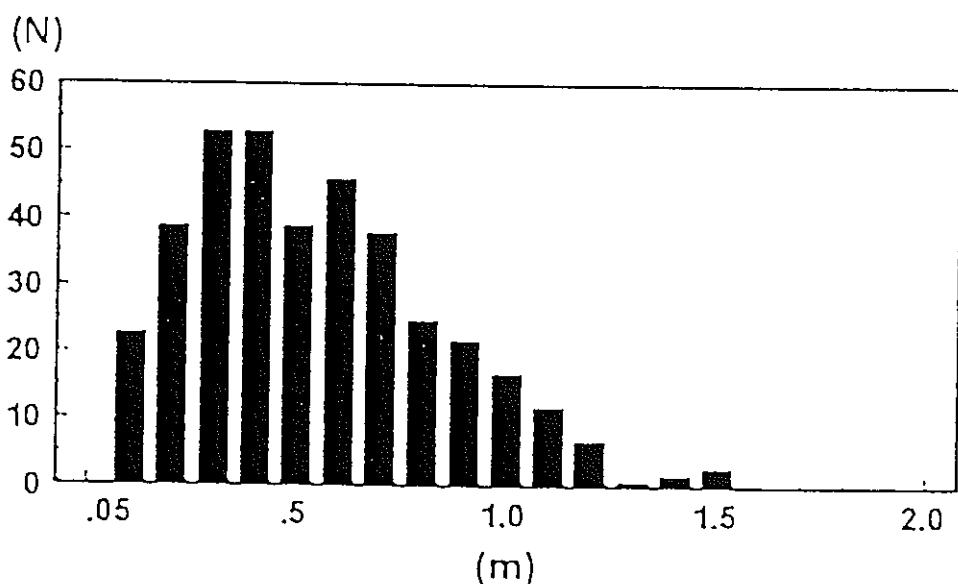


図 2-22 主要割れ目交線部のスケール分布

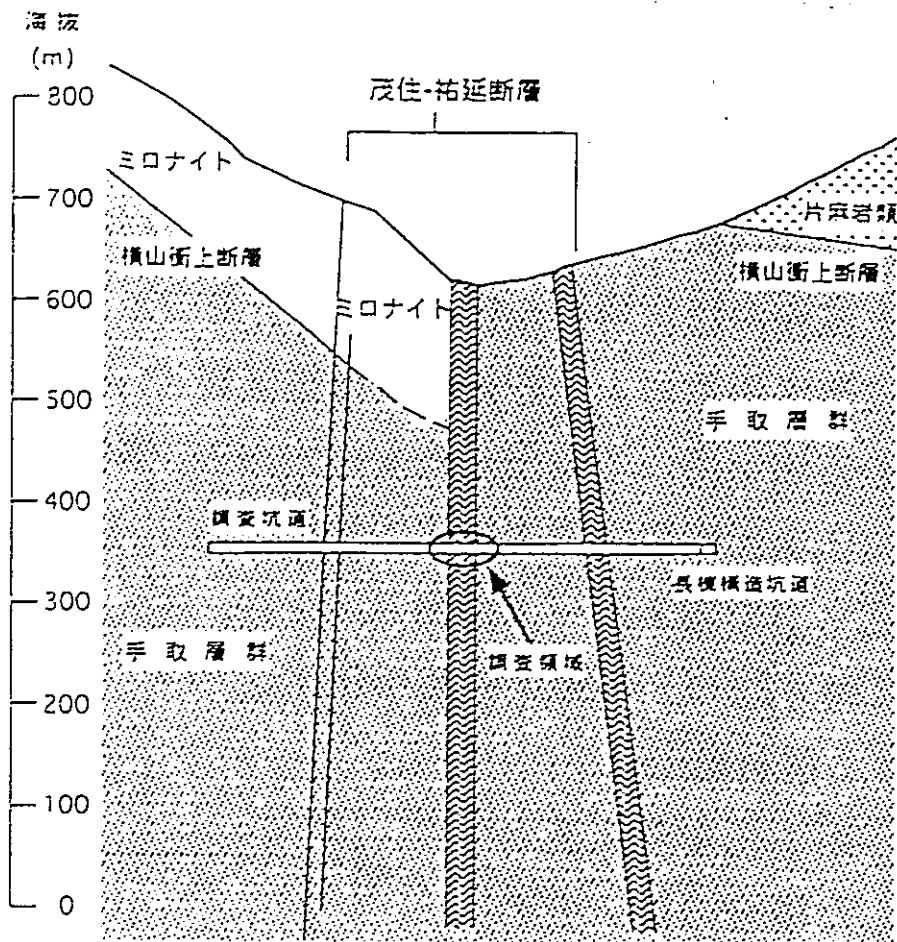


図 2-23 調査坑道沿いの地質断面図

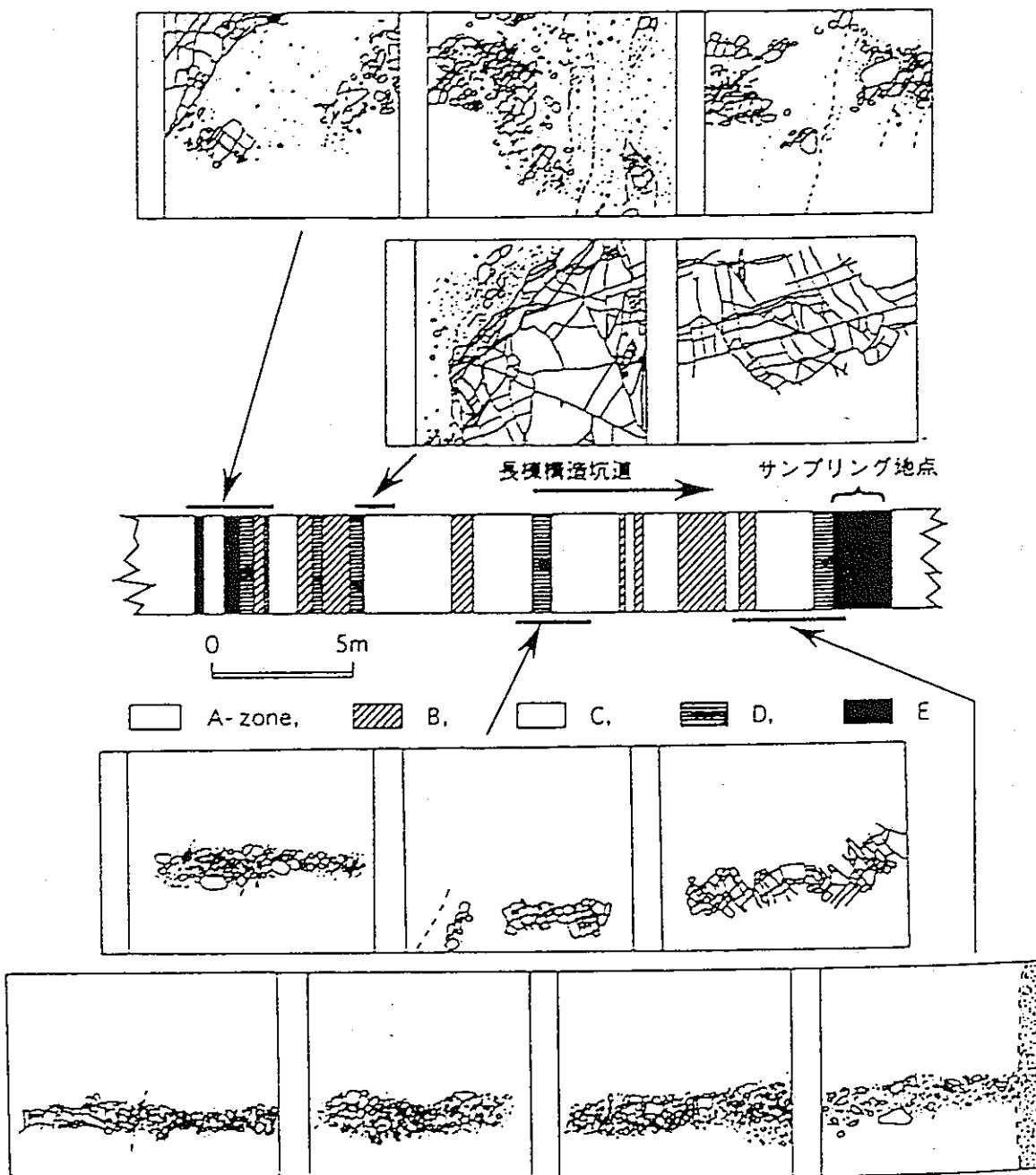


図 2-24 茂住一祐延断層破碎帶構造のモデル化

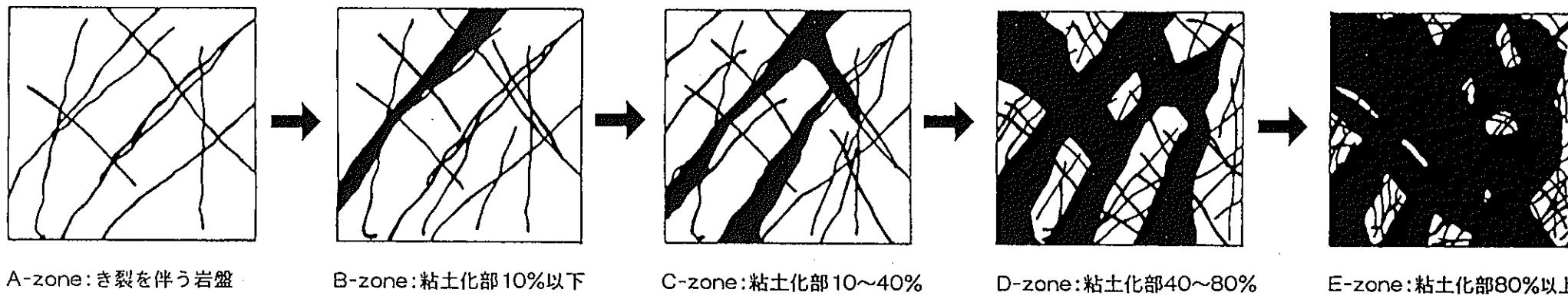


図2-25 断層破碎帯の区分の模式図

表2-1 物性試験結果

試料 NO.	密度 (g/cm ³)	含水比 (%)	コンシスティンシー特性		
			液性限界(%)	塑性限界(%)	塑性指数
a	2.744	12.5	-	-	-
b	2.766	6.8	22.1	10.2	11.9
c	2.742	6.8	23.5	11.9	11.6
d	2.751	5.9	22.7	10.2	12.5
e	2.748	6.6	23.8	10.9	12.9
f	2.785	7.1	22.6	10.8	11.8

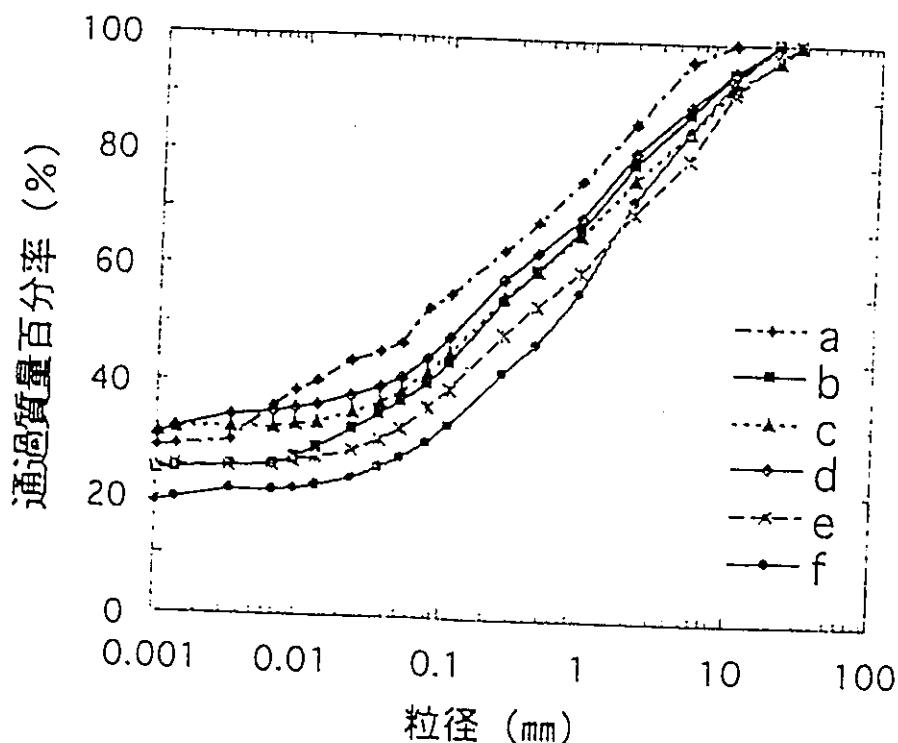


図2-26 断層破碎帶粘土化部の粒径分布曲線

表2-2 鉱物組成鑑定結果

	黒色粘土	白色粘土	灰色粘土
石英	□ ≈ 40	□ ≈ 50	□ ≈ 45
斜長石	◇	◇	◇
白雲母	△	△	△
緑泥石	◇	△	◇
スメクタイト	-	.	△
方解石	+	△	△
黄鐵銅	.	-	△
石膏	.	.	+
パイロフィタイト	.	+	.

□：かなり多量 (50~30%) , +：ごく少量 (5~1%)

◇：中量 (30~10%) , .：微量 (1%以下)

△：少量 (10~5%) , -：無し

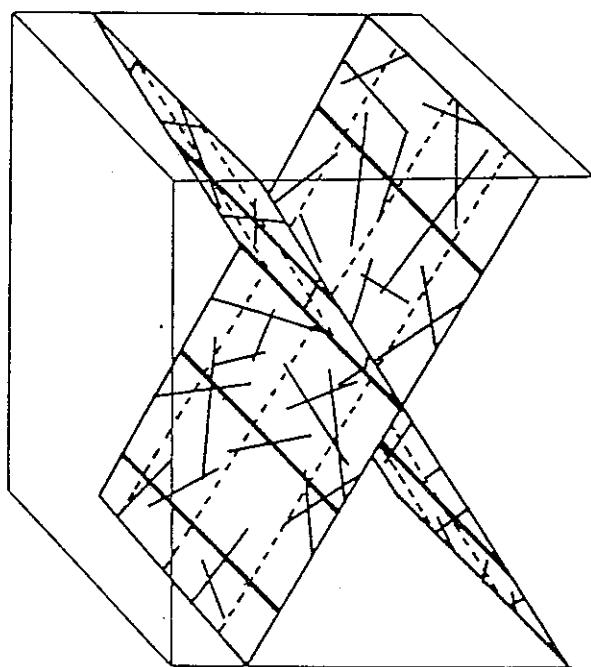


図 2-27 チャンネルモデルの基本的考え方模式図。図中、太い実線（共役割れ目交線、ステップなど）と破線が設定する水みち。

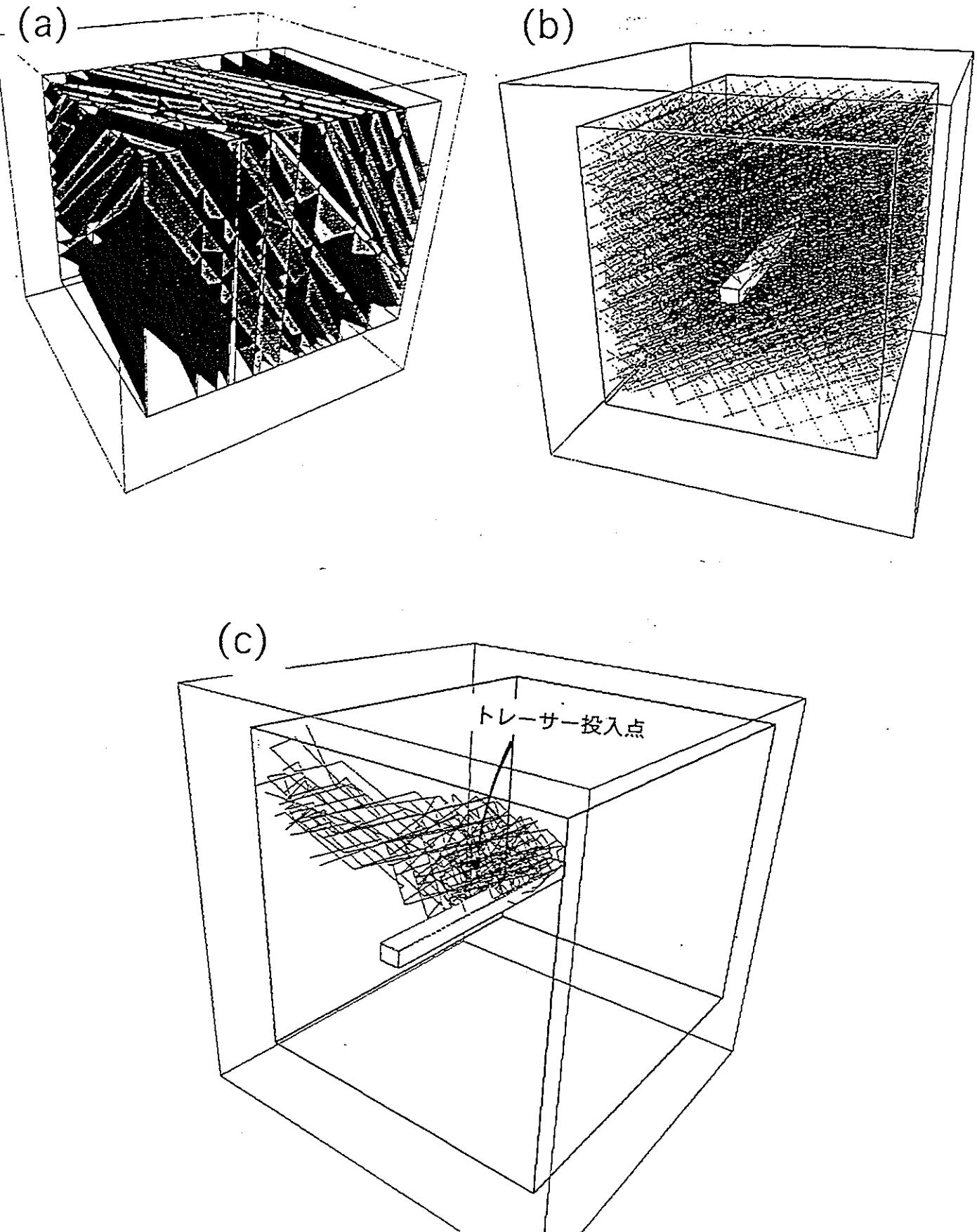


図 2-28 Don-Chan モデルの解析例
 (a) 割れ目図, (b) 管路網図, (c) トランサー移動図

3. 不飽和特性に関する研究

3. 1 研究の背景及び目的

不飽和状態の地盤内の地下水流动を解析するためには、その不飽和特性（飽和度－透水係数、飽和度－サクション圧の関係）を求めることが重要である。実際の地盤の不飽和特性を直接的に求めるためには、飽和度分布、水分フラックス、サクション圧分布を測定しなければならない。しかし、実際の地盤より不搅乱試料をサンプリングし、これらを精度良く測定することは困難であり、誤差も大きい。

したがって、本研究では、直接的な計測以外の方法として考えられる逆推定法¹³⁾により地盤の不飽和特性を把握することを試みた¹⁴⁾。

3. 2 不飽和特性の逆推定法について

不飽和特性の逆推定手順を図3-1及び以下に示す。

- ① 境界条件の既知の流れを原位置もしくは試料内で作成する。
- ② ①で設定した境界条件下での飽和度分布を測定する。
- ③ 地盤もしくは試料の不飽和特性を推定し、1次元地下水流动解析を行い飽和度分布を求める。
- ④ 解析によって求められた飽和度分布と実測値との差を最小にするように、不飽和特性をパラメータとした逆解析を行い、最適な不飽和特性を求める。

3. 3 不飽和特性の原位置測定

本研究では、3. 2で述べた手法を原位置地盤に適用することを試みた。

原位置において、境界条件の既知の流れを作成するために、図3-2に示すようなブロックを作成する。具体的には、ブロック側面をビニールシートで覆い、側面からの水分の出入りを遮断し、再びその回りを埋め戻す。上面からの蒸発

量を簡易ベンチレーション測定装置¹⁵⁾を用いて測定し、下端面における境界条件は底面部にテンシオメーターを設置し、その値の経時変化を記録した。これらの条件により、境界条件の既知の上向きの1次元不飽和流れを作ることが可能となった。簡易ベンチレーション測定装置は、図3-3に示すように、アクリルボックスで仕切られた区間を強制換気（ベンチレーション）し、風下側と風上側の空気に含まれる水分量の差からその区間の蒸発量を測定するものである。

本研究においては、上記の測定方法を用いて、図3-4に示すように3層より成る地盤における不飽和特性の評価を試みた。図3-5に簡易ベンチレーション測定装置を用いて測定したブロック上面からの蒸発量の経時変化を示す。ベンチレーション測定終了後、ブロックの深度方向にサンプリングし、飽和度を求めた。その結果を図3-6に示す。

3. 4 原位置測定結果に基づく不飽和特性の逆推定

3. 3で述べた測定結果に基づき、不飽和特性の逆推定を実施した。逆推定には、不飽和特性として Van-Genuchten 式¹⁶⁾を仮定し、1次元地下水流动解析より得られた飽和度分布と実測値をフィッティングさせ不飽和特性を算出した。よって、不飽和特性の推定には、Van-Genuchten 式中の2つのパラメーターを同定することになる。推定した不飽和特性を表3-1及び図3-7に示す。

本研究の結果より、測定された蒸発量を境界条件として使用することが実用的であることが明らかになった。

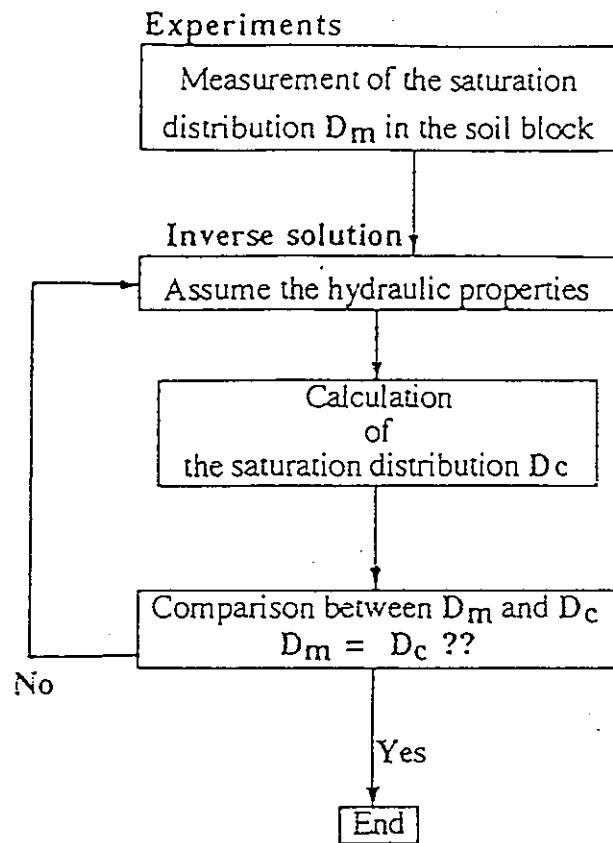


図 3-1 不飽和特性の逆推定手順

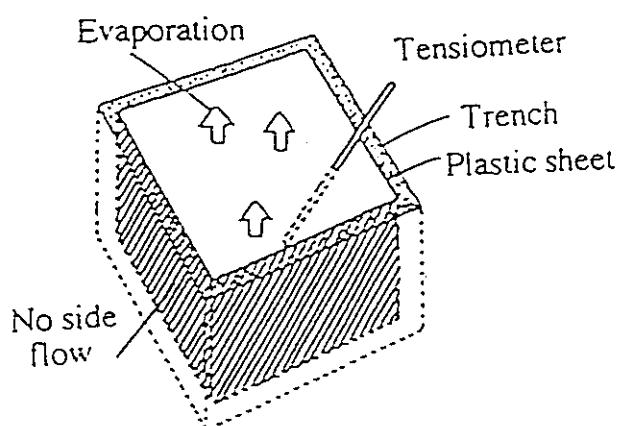


図 3-2 不飽和特性の原位置測定時の境界条件

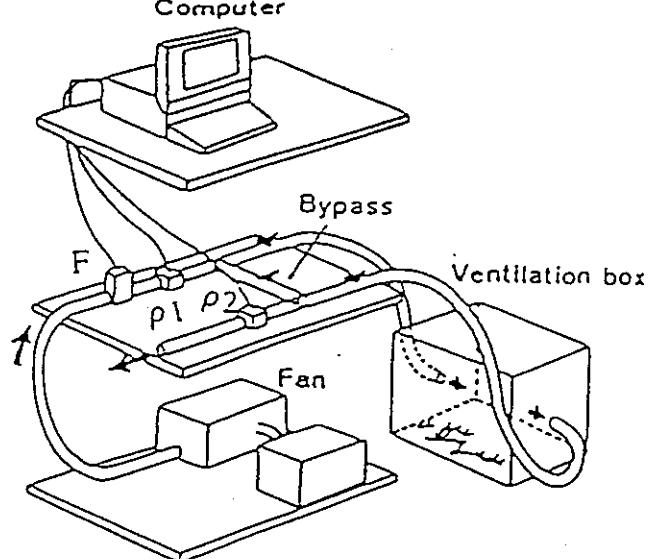


図3-3 簡易ベンチレーション測定装置

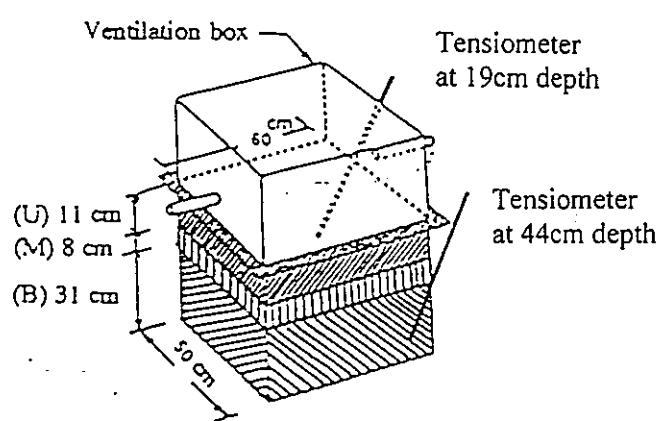


図3-4 不飽和特性の原位置測定方法

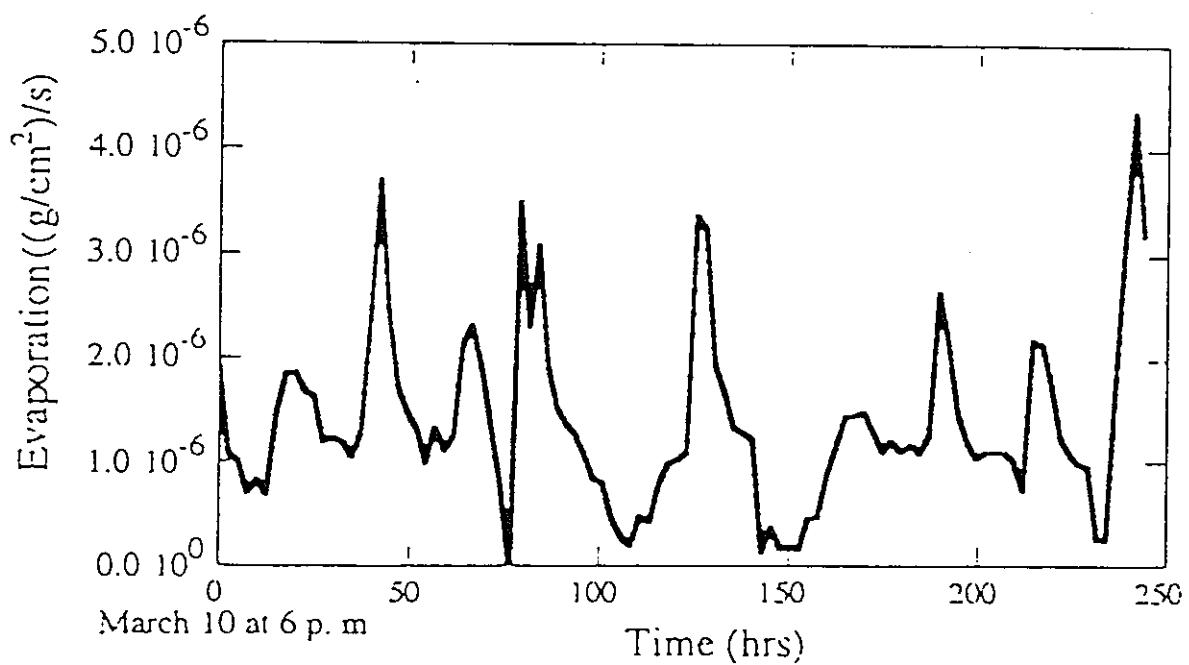


図3-5 蒸発量の経時変化

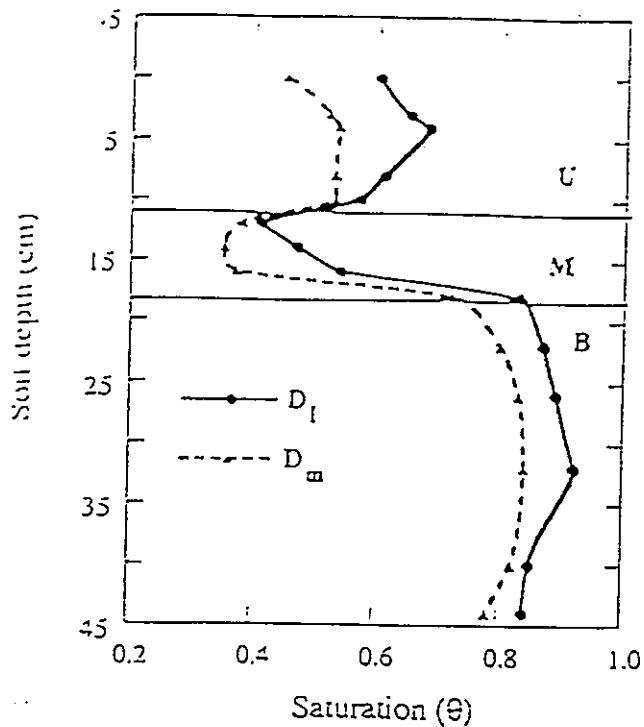


図3-6 饱和度の深度分布

表3-1 推定したVan-Genuchten式のパラメータ

Soil type and layer name	Ks cm/s	porosity ϕ	a cm ⁻¹	m	θ_r	θ_s
Soft silty soil (Upper,U)	1.66E-03	0.49	0.01	0.62	0.18	0.99
Compact clay,sand and gravel mix (Middle,M)	9.12E-03	0.26	0.015	0.67	0.2	0.99
Lean soft clayey soil Bottom,B)	1.03E-03	0.52	0.008	0.4	0.3	0.99

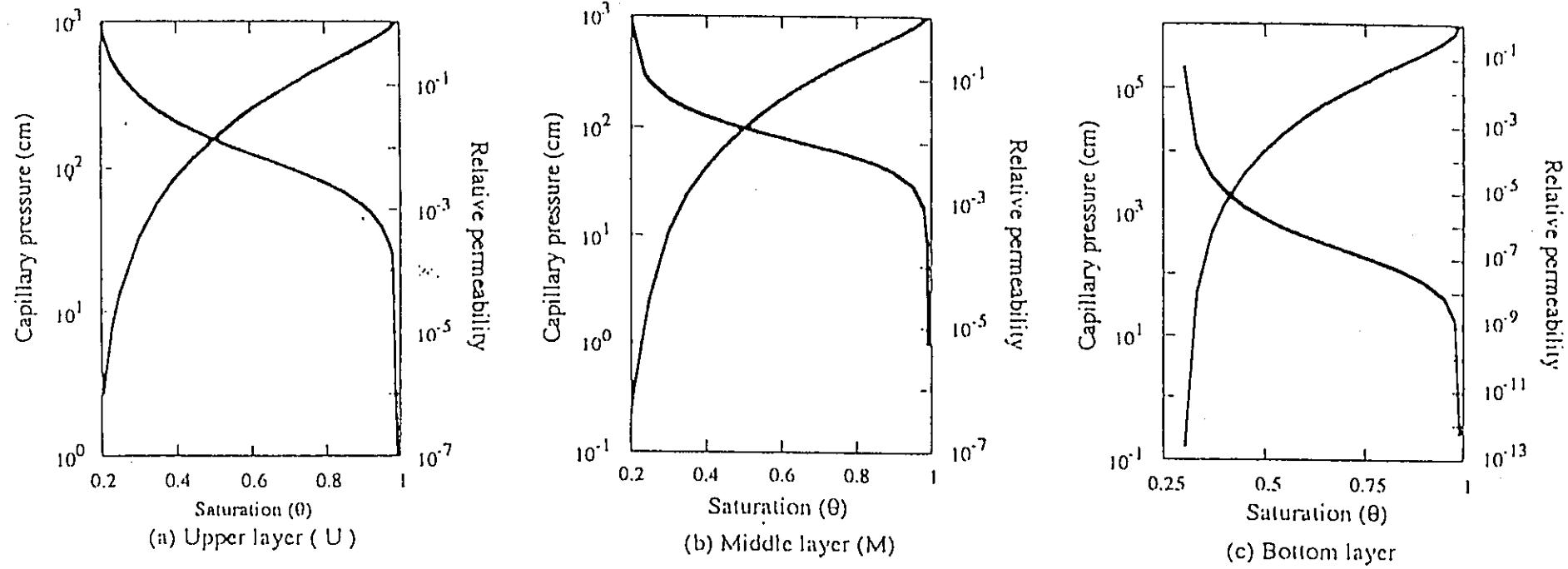


図3-7 推定した不飽和特性

4. 蒸発量測定装置の開発に関する研究

4. 1 研究の背景及び目的

試錐孔における蒸発量測定装置は、難透水性堆積岩の水理学的・地球化学的・岩盤力学的特性等を評価することを目的とした国際共同研究（モンテリー・プロジェクト）¹⁷⁾の一環として開発している装置¹⁸⁾であり、本研究においては、この装置の開発に関する基礎的検討を実施した¹⁹⁾。

本装置及び計測法の概要を図4-1に、装置の構造を図4-2に示す。本装置は、以下の2つの機能を併せ持っている。

- ①ダブル・パッカーで仕切られた試錐孔内をベンチレーションし、その区間内の全体的な蒸発量を入気・排気の湿度差より算定する。
- ②移動センサーで計測された孔軸方向の絶対湿度分布から高蒸発部を把握し、そこからの蒸発量の算定をする。

本装置を用いてモンテリー地下試験場の鉛直試錐孔で原位置予備試験を行った結果、蒸発量の場所的变化が捉えられることが明らかになっている。しかし、その精度の検証には課題が残された。また、流入風量が測定精度に大きく影響していること等の問題も指摘された。

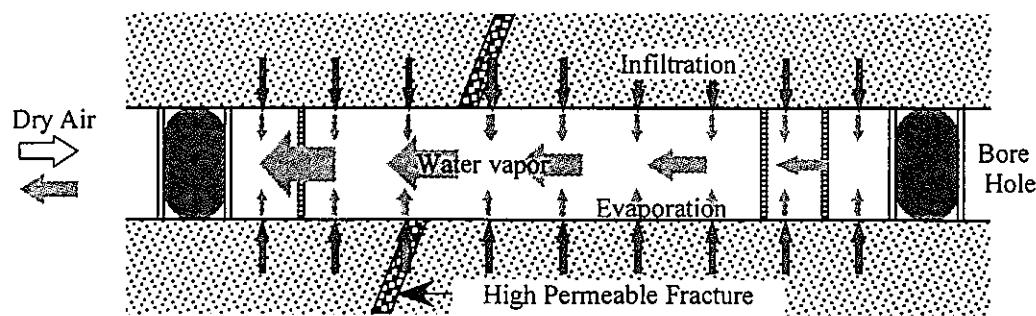
したがって、低蒸発性岩盤における本装置の適用性の検討と測定精度の向上を室内試験により行った。

4. 2 室内試験の概要及び結果

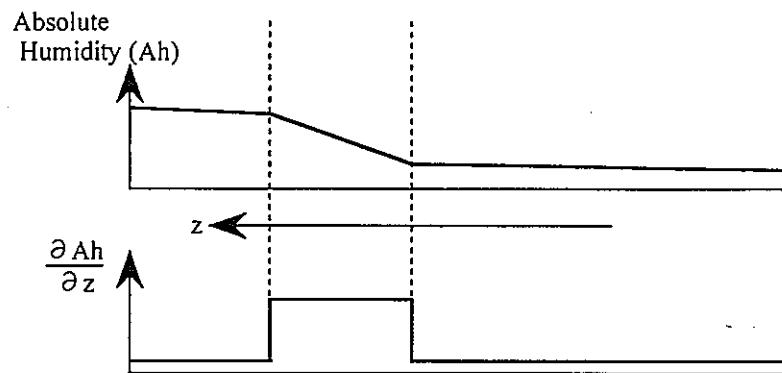
室内試験は、試料として蒸発性の低い砂岩を用い、アクリル製の模擬ボーリング孔と同径の穴を割り貫き、その面以外には水分の漏出を防ぐためのゴム性粘着材を湿布した。試験前には、試料の水浸により飽和度を高めた。この試料を図4-3に示すように模擬試錐孔で挟み込むことで蒸発点を設けた。計測は、まず、ベンチレーション（入気風量：24 l/min）を行い、孔内のセンサーを2 mm/sの速度で下流から上流へ移動させ、温度・湿度の場所的变化を測定した。

実験では砂岩壁面とセンサーの位置を変えて計測を行った。その結果を図 4-4 に示す。図中、蒸発を与えた位置を併せて示している。その結果、センサー設置台座より 30mm (孔壁より約 1cm) で蒸発量の変化を捉えられているものの、他の位置ではほとんど蒸発点を捉えられていないことが分かる。これは、蒸発量の大きさと風量に比べてセンサー精度が異なることが考えられた。そのため、風量を変化させて同様な試験を行った。

装置の機構上、制御が可能な最小風量 : 15 l/min で測定した結果が図 4-5 である。この場合においても、ほとんど蒸発量の変化が捉えられなかった。そこで風量、つまり入気を止めて計測を行った。これは、比較的大きな蒸発を呈する岩であれば、絶えずベンチレーションをしていなければ孔内は僅かの間に飽和状態に達してしまい、移動センサーによる湿度の場所的変化が捉えられなくなってしまうが、試料からの蒸発量が小さいため、飽和状態に達するまでに時間がかかるとの判断によるものである。試料の設置から計測開始まではベンチレーションを行い、蒸発量変化が定常状態に達した後、入気を止め、直ちに測定を開始した。その結果を図 4-5 に示す。図より、明瞭に蒸発点を捉えていることが分かる。つまり、かなり小さな蒸発の場合においても、本研究により検討した測定手法を用いることによって、その位置や量が把握することの可能性が示された。

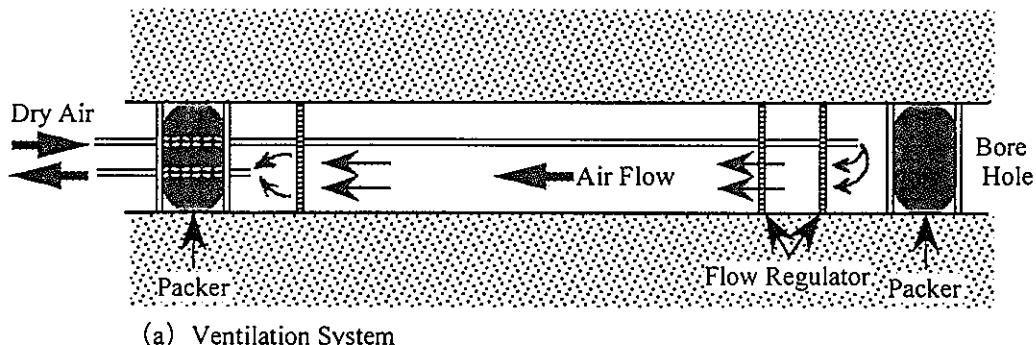


(a) Evaporation Caused By Ventilation

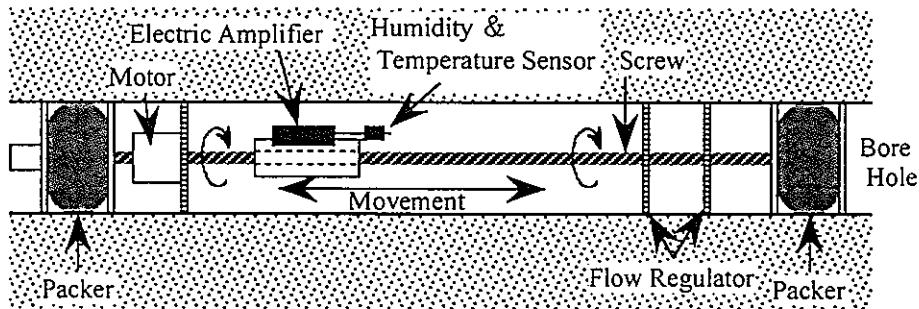


(b) Absolute Humidity & $\frac{\partial Ah}{\partial z}$ Distribution Along a Ventilation Borehole

図4-1 Evaporation Logging Systemの概要



(a) Ventilation System



(b) Mechanics for Sliding Sensor

図4-2 Evaporation Logging Systemの構造

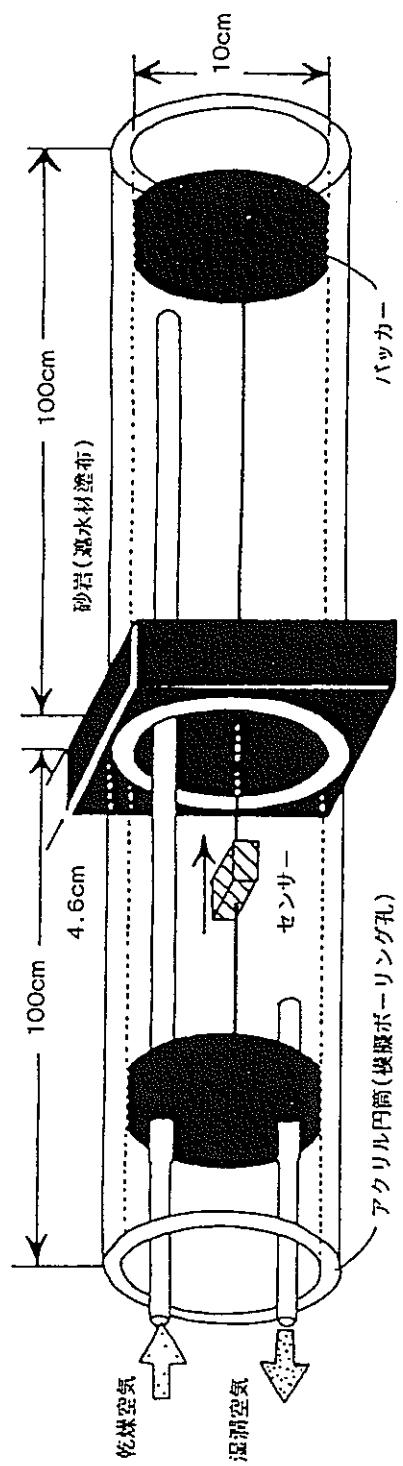


図4-3 室内試験概況

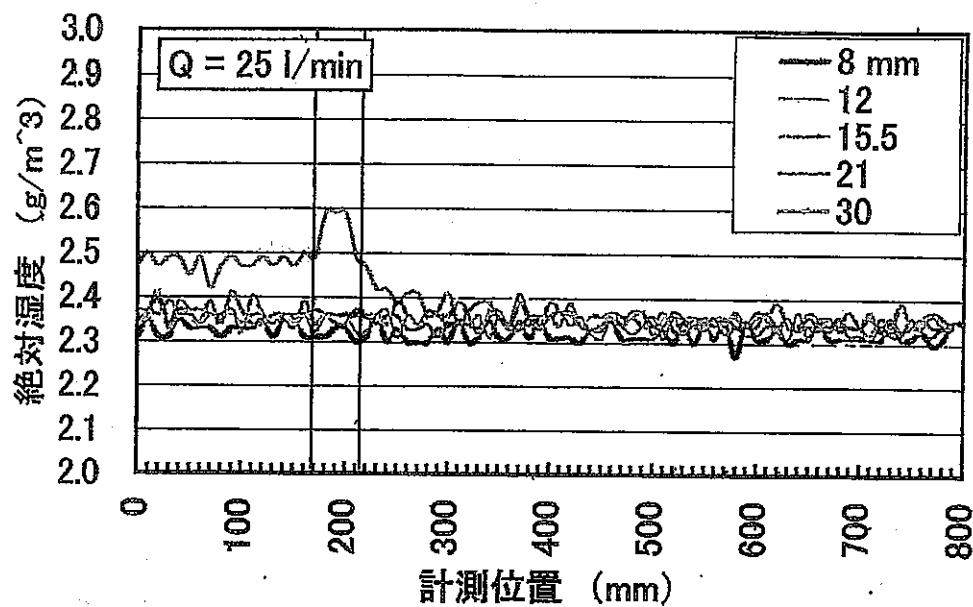


図4-4 蒸発量センサー位置と測定精度の関係

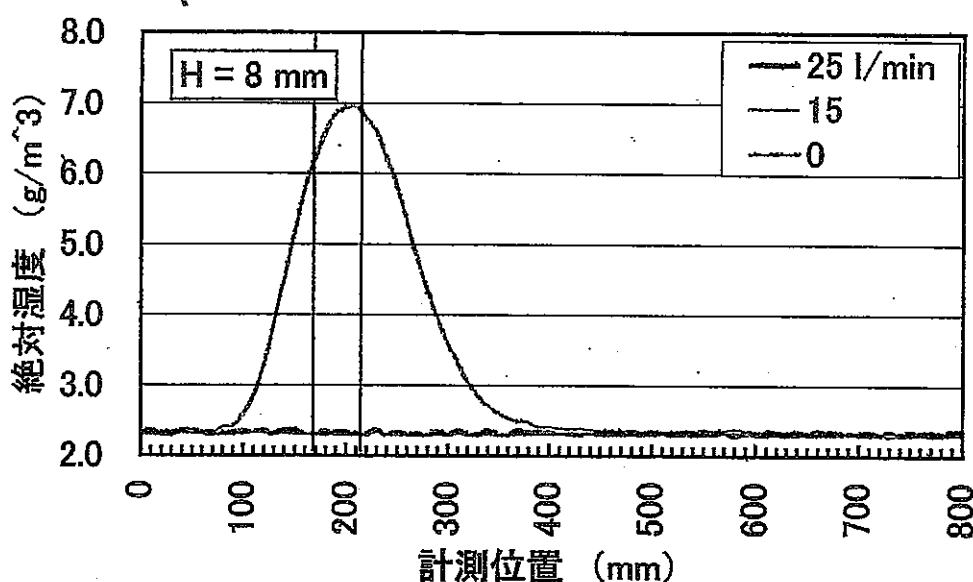


図4-5 ベンチレーション風量が蒸発量（絶対湿度）に与える影響

5. 地下水モニタリングシステム構築に関する基礎的研究

5. 1 研究の背景及び目的

地表部から地下深部までの地下水流动を把握するための調査研究において、地表部の流出現象の把握は、地下深部への涵養量の算定などを行う上で重要である。このため、サイクル機構、東濃地科学センターにおいては、降雨流出量や、地表付近の土壤水分量、気象データなどを測定している。また、三次元飽和・不飽和地下水流动解析によって、地表部の地下水流动の評価を実施している。これらの方法では、小さい領域の地下水流动を詳細に評価することは可能であるが、複雑な地形や土壤構造を有している広範囲な領域における、地表部の地下水流动の評価には適していない。そのため、広範囲の領域を対象とした地表部の地下水流动を評価する際には、タンクモデルなどの確率モデルの方が適している。しかし、確率モデルでは、対象流域の物理現象の評価ができない問題点がある。したがって、最終的に広範囲な領域を対象とした地表部の地下水流动を評価するためには、地下水流动解析などの物理モデルと確率モデルを融合した手法を用いる必要がある。

以上のことから、本研究は、まず確率モデルを構築するために、統計学的手法の一つであるニューラル・ネットワークモデルを用いて、広範囲な領域を対象とした水収支を把握することを目的に実施した。

5. 2 ニューラル・ネットワークモデルについて

ニューラル・ネットワークモデルの概念²⁰⁾を図 5-1 に示す。このモデルは、複数の入力データと出力データを与えると、それらの相互関係をネットワークの重みによって調整し、入力データと出力データの相互関係を記憶（これを学習と呼ぶ）する。そして、入力データが変化した時に学習した結果に基づき出力データの変化の予測を行うものであり、言い換えれば、ニューラルネットワークモデルは、経験則に基づく解析手法である。

このモデルの特徴としては、数学的なモデル化が困難な現象を評価する場合に有効であることることが挙げられる。

5. 3 ニューラル・ネットワークモデルによる河川流量の推定

ニューラル・ネットワークモデルの適用性を検討するために、サイクル機構の東濃鉱山及び正馬様用地周辺において取得されている、表層水理観測データの一つである土壤水分観測結果から河川流量の推定を試みた²¹⁾。

解析では、以下の手順で実施した。

- ①ある観測期間の土壤水分観測結果を入力データとし、河川流量観測結果を出力データとして与え、それらの相互関係を学習させる。
- ②この学習した結果を基に、次の観測期間の河川流量を推定する。
- ③推定された河川流量と観測値を比較し、推定結果（解析結果）の妥当性を評価する。

図 5-2 に、ある観測期間の土壤水分観測結果を入力データとし、河川流量観測結果を出力データとして与え、それらの相互関係を学習させた結果を示す。学習では、前述したように解析結果が観測結果と比較し、最適なネットワークの重みを調整する。これらの学習結果を基に、次の観測期間における河川流量の推定結果と観測結果の比較を図 5-3 に示す。

これらの結果より、土壤水分観測結果を用いて、河川流量を推定することが可能であることが示された。また、特に深度 40 cm の土壤水分量が河川流量に大きな影響を与えていたことが解析結果より示された。

5. 4 ニューラル・ネットワークモデルによる解析結果の確認

ニューラル・ネットワークモデルによる解析結果の確認を行うことを目的として、表層水理観測データが取得されている流域において人工降雨流出実験を実施した。実験は、斜面上の約 1×1.5 m、深度 70 cm のブロックを対象とした。

実験に先立ち、外側境界条件（不透水境界）を明確にするために、ブロックの斜面の上側及び側方を掘削し、ビニールシートで覆った後に埋め戻した。また、ブロックの斜面下側からの流出量を観測するために、観測用の溝を掘削した。

実験対象ブロック内の土壤の状態を図 5-4 に、また、植物の根の分布を図 5-5 に示す。これらの図より、実験対象ブロック内の土壤は、上部のレキの少ない層とレキが多数分布する層に区分でき、その境界は深度約 40 cm である。

実験では、上述したブロック上面に人工降雨を降らせ、ブロックの斜面の下側からの流出量を測定した。その結果、人工降雨の流出量は、図 5-6 に示すように上部層より下部層の方が多いことが明らかとなった。このことは、深度約 40 cm より下部のレキ層での土壤水分状態が流出量（河川流量）に大きな影響を与えていていることを示唆している。

この結果から、人工降雨流出実験の結果は、6. 3 で述べたニューラル・ネットワークモデルによる解析結果と整合的であり、ニューラル・ネットワークモデルの適用性を確認することができた。

以上の検討結果より、広範囲な領域を対象とした水收支を把握するためのニューラル・ネットワークモデルによる解析手法の適用性が示された。また、同時に地下水モニタリングデータの相互関係や地下水流动場を評価するための解析を行う際に、ニューラル・ネットワークモデルを適用することの有効性が示された。

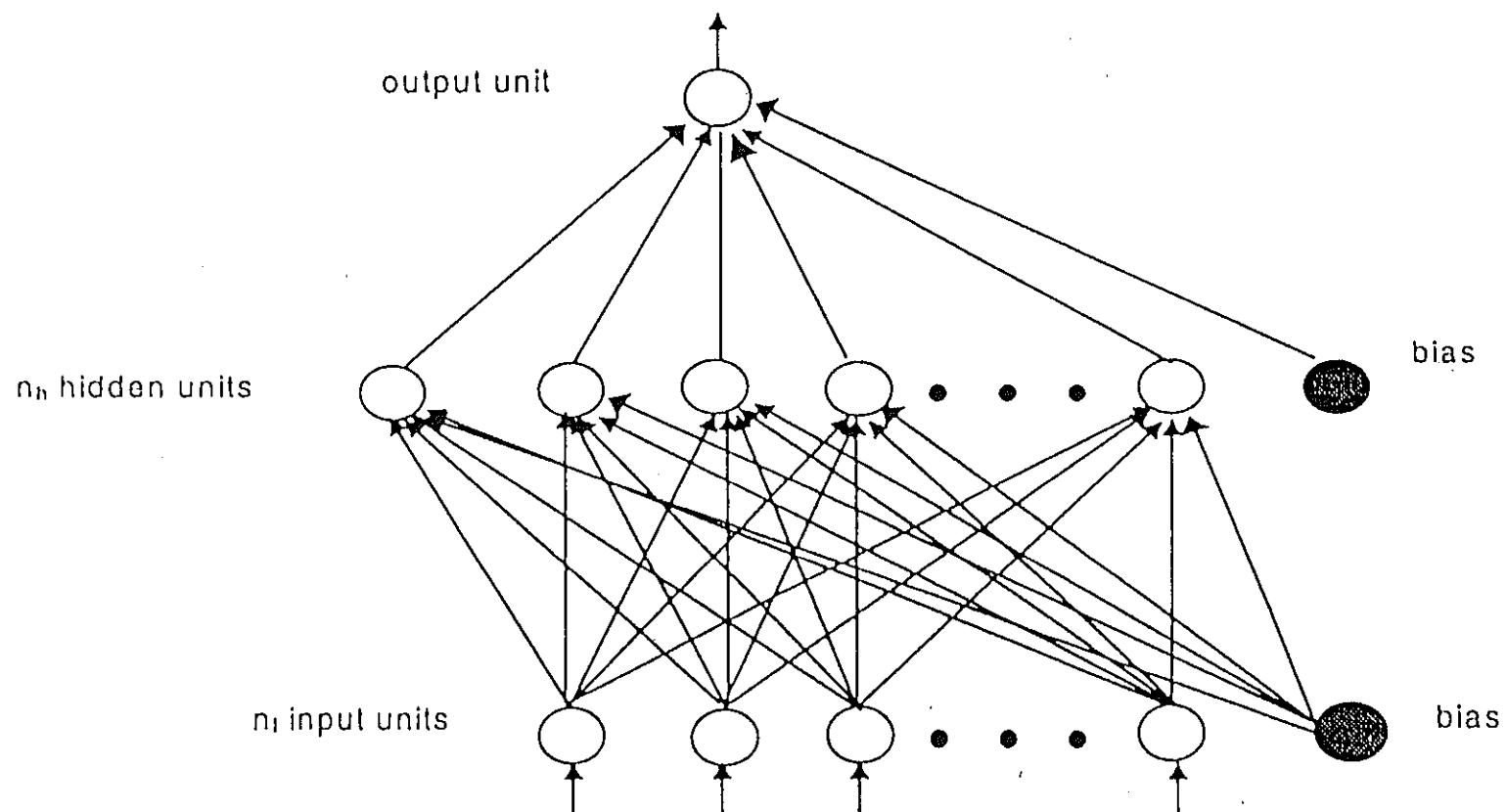


図5-1 ニューラル・ネットワークモデルの概念

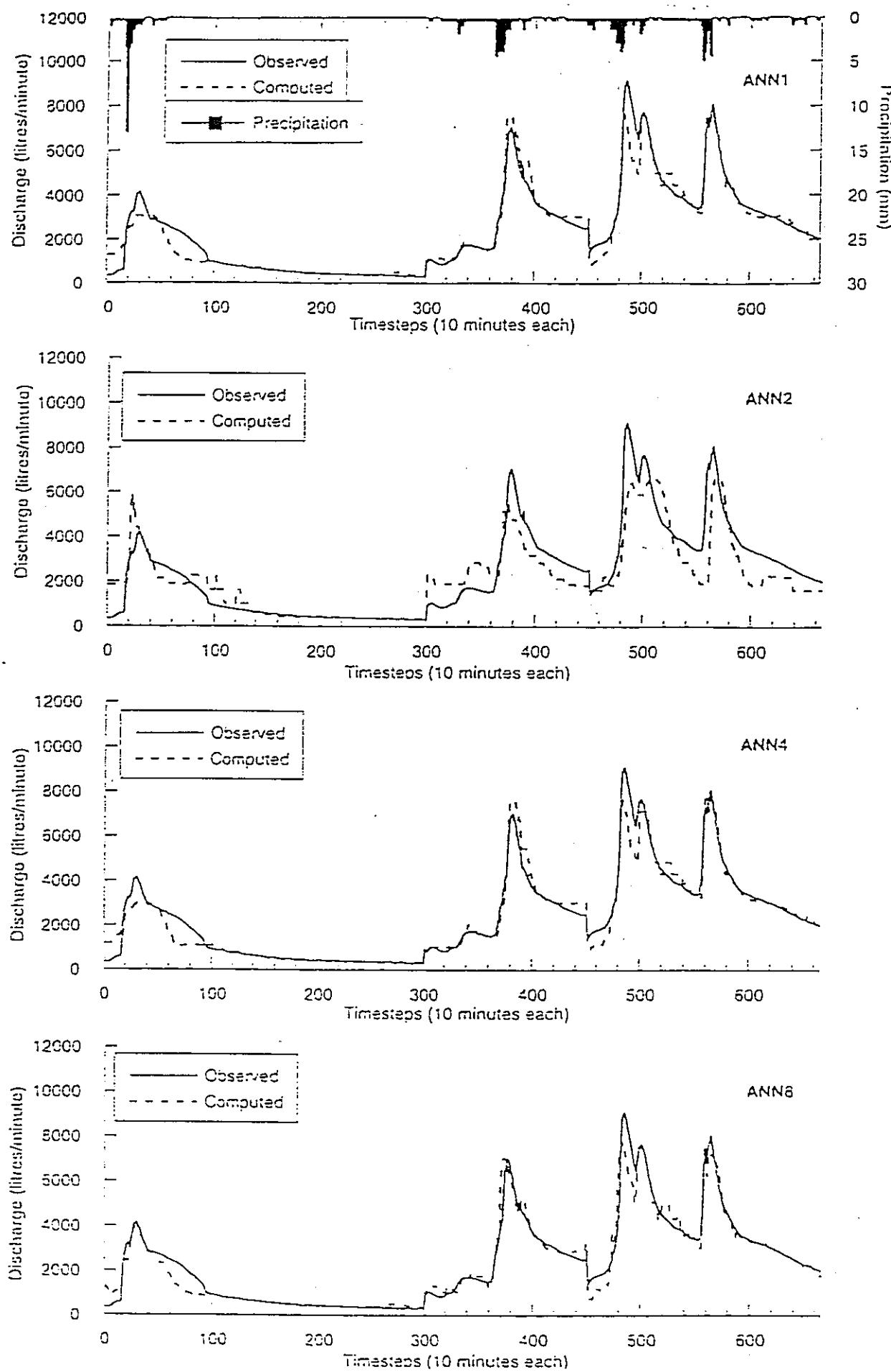


図5-2 ニューラル・ネットワークモデルによる解析結果（学習段階）

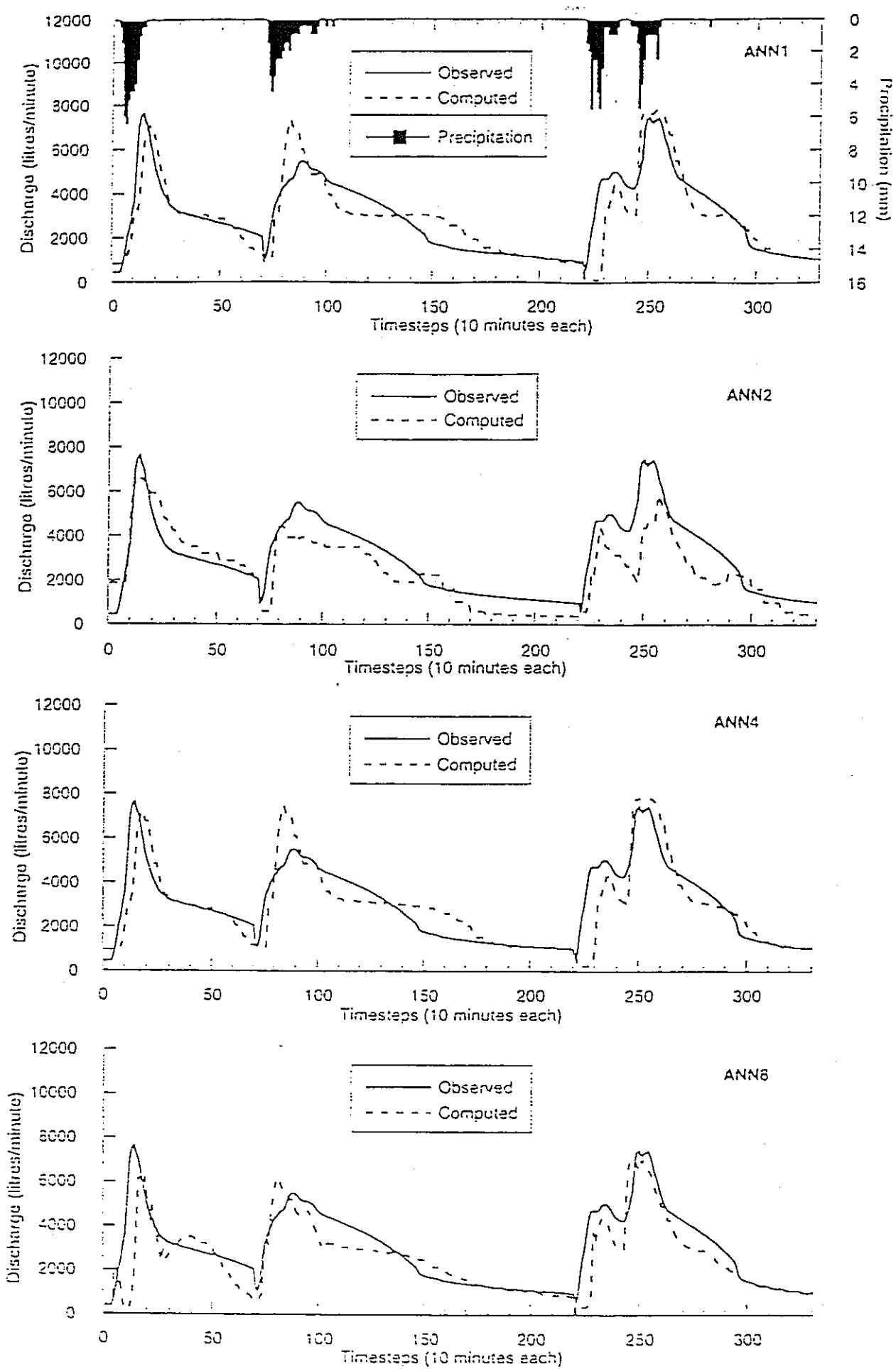


図5-3 ニューラル・ネットワークモデルによる河川流量の推定結果と観測結果の比較

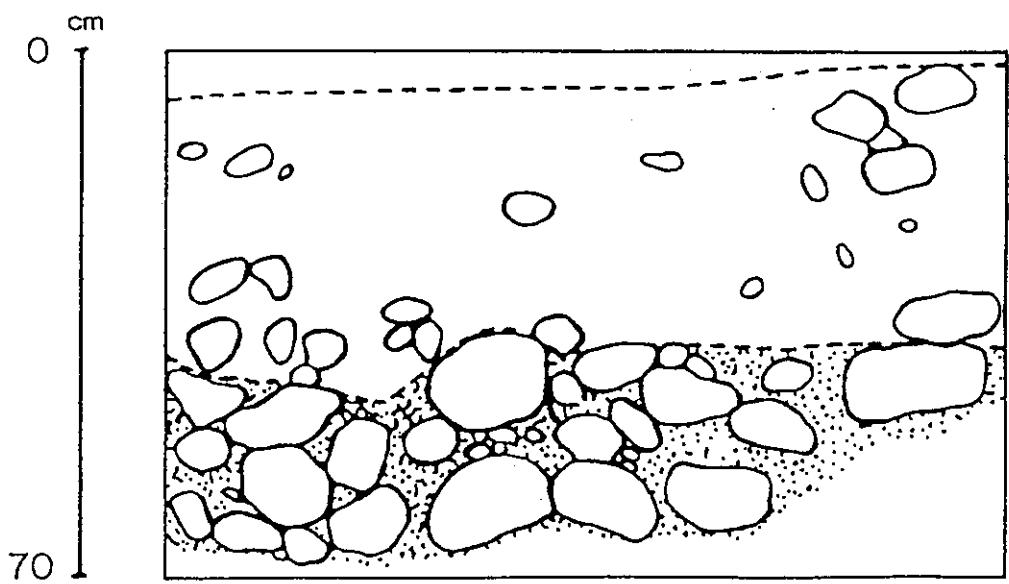


図5-4 実験対象ブロックの土壤状態

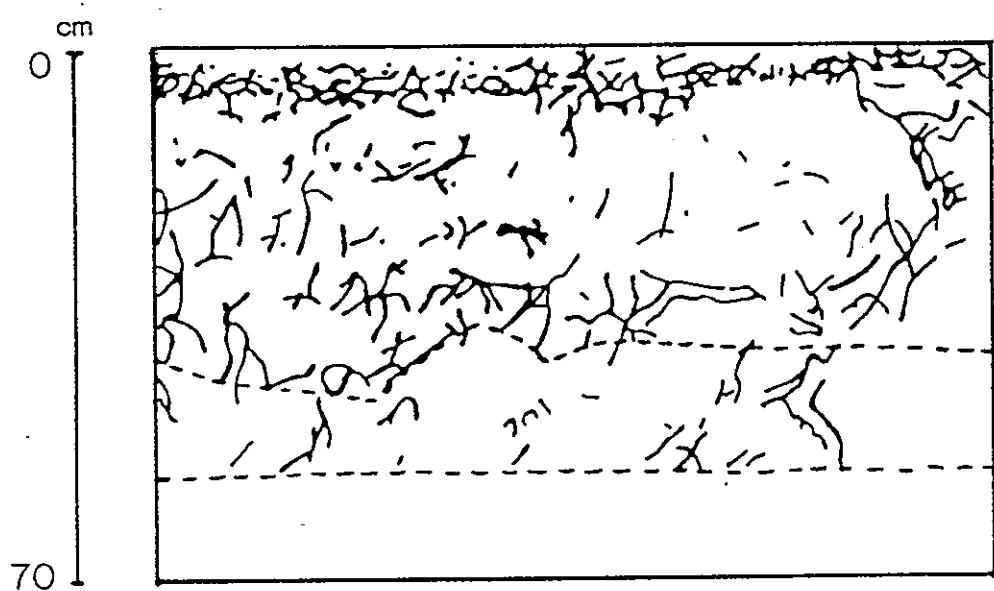


図5-5 実験対象ブロックの植物の根の分布

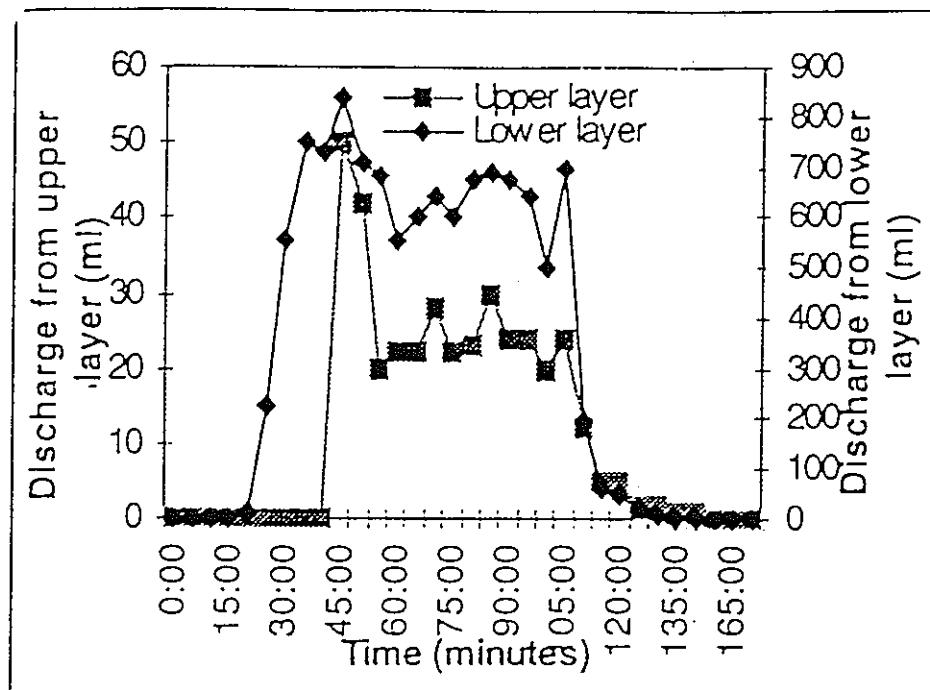


図5-6 人工降雨の流出量

参考文献

- 1) R. Munier : Four dimensional analysis of fracture at the Aspo hard rock laboratory , Engineering Geology, Vol.33, pp.159-175, 1993.
- 2) P. Bossart, M. Mazurec : Structural geology and water flow paths in the migration shear zone, TR91-12, NAGRA, pp.1-55, 1991.
- 3) M. Mazurek, P. Bossart, T. Eliasson : Classification and characterization of water conducting features at Aspo, Results of Phase 1 investigations, Progress Report 25-95-03, SKB, pp.1-73, 1995.
- 4) K. Ahlbom, S. Tiren : Overview of geologic and geohydrologic conditions at the Finnsjon site and its surroundings, Technical Report 91-08, SKB, pp.1-52, 1991.
- 5) 渡辺邦夫, 田中達也, 内田雅大, 岩崎浩 : 地質構造を基礎としたフラクチャーネットワークモデルの開発(その2), 応用地質, Vol.35, pp.132-142, 1994.
- 6) 志田原史子, 渡辺邦夫, 森田豊 : トンネル内湧水地点の水理地質構造と割れ目交線分布の特徴, 第32回地盤工学会発表会講演論文集, pp.271-272, 1997.
- 7) 森田豊, 三枝博光, 杉村淑人, 渡辺邦夫 : 龜裂性岩盤の水みちに関する基礎的研究, 土木学会第51回年次学術講演会講演概要集第3部, pp.624-625, 1996.
- 8) 杉村淑人, 森田豊, 渡辺邦夫 : ダム基礎岩盤の水みち構造把握の試み, 土木学会論文集 No. 582 / Ⅲ-41, pp.229-246, 1997
- 9) 渡辺邦夫, 関陽太郎 : 花崗岩風化に関する地下水流れの基礎的性質, 岩石鉱物鉱床学会誌, 第77巻, 第2号, 1982
- 10) 吉沢達夫, シュリアンキ, 渡辺邦夫, 大澤英昭, 石山宏二 : 透水性に着目した断層破碎帯の構造特性評価, 土木学会第53回年次学術講演会講演概要集第3部, pp.566-567, 1998.
- 11) J. Black, O. Olsson, J. Gale, D. Holmes : Site characterization and validation-stage 4-, TR91-08, Stripa Project, pp.51-163, 1990.
- 12) J. Ball, J. Black, M. Brightman, T. Doe : Large scale cross hole testing, TR91-17, Stripa project, pp.1-97, 1991.
- 13) 堤和大, 渡辺邦夫, 管伊三男, 山脇真二 : 岩盤の不飽和特性の逆推定法, 応用地質第35巻第2号, pp.23-30, 1994.
- 14) A. Gamal, K. Watanabe, A. Mohamed, N. Ali, A. Mohamed : Unsaturated Hydraulic Properties and Their Influence on The Moisture Content of Layered Soils, 地下水学

- 会誌, 第 39 卷第 2 号, pp.115-126, 1997.
- 15) K. Wanatabe, Y. Tsutsui : A new equipment used for measuring evaporation in a field, Proc. 7th. Congr. IAEG, pp.309-313, 1994.
 - 16) M. T. Van-Genuchten : A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Sci. Soc. Am. J., Vol.44, pp.892-898, 1980.
 - 17) M. Thury, P. Bossart : Mont Terri Rock Laboratory –Results of the Hydrogeological, Geochemical and Geotechnical Experiments Performed in 1996 and 1997, Geol. Rep. Swiss natl. hydrol. Geol. Surv. 23, 1999.
 - 18) 三枝博光, 渡辺邦夫, 今井久, 志田原史子 : Evaporation Logging System の開発, 岩盤地下水理に関するワークショッピング論文集, pp.1-6, 1999.
 - 19) 吉沢達夫, 三枝博光, 今井久, 渡辺邦夫 : Evaporation Logging System による低蒸発量測定法の検討, 土木学会第 54 回年次学術講演会講演概要集第 3 部, 1999.
 - 20) Hsu Kuo-Lin, V. P. Gupta, S. Sorooshian : Artificial neural network modeling of the rainfall-runoff process, Water Resour. Res, Vol.31, pp.2517-2530. 1995
 - 21) M. R. Gautam, K. Watanabe, H. Saegusa : Field experiment and observations of runoff generation processes in a forested mountainous catchment, Tono area, Japan, Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, Vol.44, 2000.