

我が国を対象とした地下水流動解析

その1 中部日本を対象とした地下水流動解析



1992年 7月

柳 澤 孝 一
今 井 久
古 屋 和 夫
若 松 尚 則
梅 田 浩 司

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

我が国を対象とした地下水流動解析
— その1 中部日本を対象とした地下水流動解析

柳澤孝一, 今井 久, 古屋和夫, 若松尚則, 梅田浩司

要 旨

わが国に存在する地下深部の水理条件を把握するために、中部日本の大小2つの領域を対象とした地下水流動解析を行った。中部日本(300×500km×深さ10km)の解析では文献資料をもとに水理地質構造モデル(透水係数分布を表したモデル)を構築し、その一部である東濃地域(8×7km×深さ3km)の解析では原位置調査結果をもとに水理地質構造モデルを構築した。これらのモデルに基づき、有限要素法を用いて定常三次元飽和不飽和浸透流解析を行った。

解析の結果、以下の点が判明した。

- (1) 中部日本の解析では、ピエゾ水頭分布は領域の地形に沿ったものとなる。
- (2) 東濃地域の解析では、表層付近のピエゾ水頭分布は局所的な地形に沿ったものとなり、深部でのピエゾ水頭分布は領域の大局的な地形を反映したものとなる。
- (3) いずれの解析においても、ピエゾ水頭の鉛直方向の変化は浅部を除いて極めて小さく、ほぼ静水圧分布である。
- (4) 深部(深度500m以深)での動水勾配は、いずれの領域においてもほとんどの部分で0.04未満である。
- (5) 中部日本の解析では、標高-3,000m以深の透水係数分布、飽和度と圧力水頭の関係、および海岸部の側方境界条件を変えても、流動状況に大きな違いは現れない。

GROUNDWATER FLOW ANALYSES IN JAPAN
- Part1 : GROUNDWATER FLOW ANALYSES IN CENTRAL JAPAN

K. Yanagizawa, H. Imai, K. Furuya, H. Wakamatsu, K. Umeda

ABSTRACT

Groundwater flow was analysed in the two areas of different scale situated in central Japan, in order to estimate hydrological condition existing at the deep underground in Japan. For the analysis in the Central Japan area (300×500km × 10km deep), a hydrogeological model (a model expressing distribution of hydraulic conductivity) was built up with data from literature published so far. The model in the Tono area (8 × 7km × 3km deep) which is a part of the Central Japan area, a hydrogeological model was built up with field data from the area studied. Based on these models, steady state three-dimensional groundwater flow under a saturated-unsaturated condition was calculated by means of FEM.

The results are as follows:

- (1) In the Central Japan area, distribution of piezometric head harmonizes with topography in the area.
- (2) In the Tono area, distribution of piezometric head in the sub-surface part is governed by local topography, while that in the deeper part is governed by underlying regional topography.
- (3) In both areas, vertical variation of piezometric head is rather small without the shallow part, which indicates hydrostatic distribution.
- (4) Hydraulic gradient is less than 0.04 in the most part below GL-500m in both areas.
- (5) The results of the analysis in the Central Japan area show that types of distribution of hydraulic conductivity below EL-3,000m, of relationship between saturation ratio and pressure head, and of lateral boundary condition, do not remarkably affect the flow situation.

目 次

1. はじめに	1
2. 解析の手順	2
3. 中部日本を対象とした解析	4
3.1 解析の目的と特徴	4
3.2 解析領域	4
3.3 地形・地質概要	4
3.4 水理地質構造モデルの構築	4
3.5 解析条件	6
3.6 解析条件のバリエーション	6
3.7 解析結果	7
3.8 中部日本を対象とした解析のまとめ	9
3.9 解析結果の妥当性の検討	9
4. 東濃地域を対象とした解析	33
4.1 解析の目的と特徴	33
4.2 解析領域	33
4.3 地形・地質概要	33
4.4 水理地質構造モデルの構築	33
4.5 解析条件	35
4.6 解析結果	36
4.7 東濃地域を対象とした解析のまとめ	37
4.8 解析の妥当性の検討	37
4.9 中部日本の解析結果との比較	37
5. まとめ	50
6. 今後の課題	51
文献	52
付図, 付表	

1. はじめに

動燃事業団では、地層科学研究の一環として、わが国の地下深部の地下水流動に関する研究を進めている。地下水流動解析の目的は、日本全国の地下深部の水理条件を把握し、わが国に存在する地下水理条件の範囲を明らかにすることである。本報告書では、その1例として現在までに動燃事業団により行われた中部日本を対象とする地下水流動解析の結果を示す。

本解析は、スケールの異なる以下の2つの領域を対象に行った。

- ① 中部日本 (200km×300km×深さ10km)
- ② 東濃地域 (8km×7km×深さ3km)

②の領域は①の領域の一部である。①の領域では広域の地下水流動の概略を把握し、②の解析はその中の特定地域の流動特性を詳細に把握するものである。①の領域の解析では、中部日本全体の地形・地質・水理特性に関するデータを特定地域に偏ることなく反映するために、既存の文献資料に基づいてモデルを構築して解析を行った。これに対し②の解析は、対象領域内で行われた原位置試験・調査結果に基づいて行った。

ある領域を対象として解析を行う場合、境界条件の与え方によって解析結果に違いが生じることが考えられる。一般に領域が大きくなるほど詳細なデータが得られ難く、境界条件の適切な設定は難しくなる。このため大スケールである①の解析においては、側方境界条件の設定を容易にするために海岸線を外側境界とする領域を選んだ。②の解析の境界条件は、①の解析で得られた結果を考慮し、これに原位置でのデータを合わせることで設定した。

①の解析では、解析条件の違いが結果に与える影響を調べるため、解析条件を変えて行った結果も比較して示す。

2. 解析の手順

解析の手順は、スケールの異なる2つの解析において同様である。

解析は次の3ステップよりなる(図2.1)：

- (1) 水理地質構造モデルの構築(透水係数分布のモデル化)
- (2) 解析条件の設定
- (3) (1)(2)に基づいた、浸透流解析コードによる数値解析

それぞれの手順は以下に示す通りである。

(1) 水理地質構造モデルの構築

① 地形モデルの構築

接峰面図(概略の地形図)をもとに、地形に沿うように平面図上での要素分割を行った。各要素表面の標高の平均値を算出し、地形モデルとした。

② 地質構造モデルの構築

地質調査結果および文献資料をもとに、モデル対象領域の地質構造を三次元的に検討し、地質構造モデルを構築した。

③ 岩石の透水性の検討

文献資料あるいは解析領域内での水理試験結果に基づいて岩石の透水性を検討し、岩種ごとの平均の透水係数を設定した。

④ 水理地質構造モデルの構築

地形モデル・地質構造モデルに岩石の透水係数を与えることにより、透水係数の三次元分布を表し、水理地質構造モデルを構築した。水理地質構造モデルは、有限要素法を用いた数値解析を実施するため、六面体8節点の要素に分割された形で表してある。

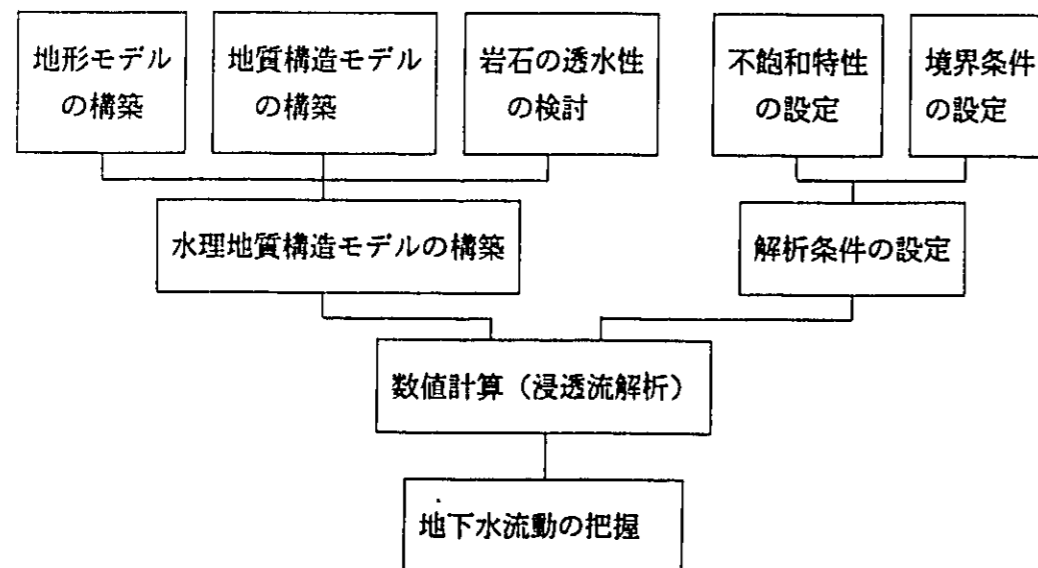


図2.1 解析のフロー

(2) 解析条件の設定

① 不飽和特性の設定

飽和不飽和浸透流解析を行う際に必要な、不飽和領域における飽和度と不飽和透水係数の関係および飽和度と圧力水頭(サクション)の関係を設定した。

② 境界条件の設定

モデルの上部・側方・下部の各境界に、透水あるいは不透水の条件を設定した。上部境界(地表)には涵養量を、側方境界には場所により定水位条件も設定した。

(3) 数値解析

解析は、有限要素法による飽和不飽和地下水解析コードTAGSAC(渡辺ほか,1990;今井・柳澤,1990)を用いて、定常状態の地下水流動のシミュレーションを行った。地下水流動場は多孔質体、不飽和状態は各要素内で一様と仮定し、ダルシー則を不飽和状態にまで拡張した運動方程式と質量保存方程式を合わせた次の式を用いた。

$$\{C(\theta) + \alpha S_s\} \frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial X_i} \left\{ K_{ij} \cdot Kr(\theta) \frac{\partial \phi}{\partial X_j} \right\} + q$$

ϕ : ピエゾ水頭 (piezometric head)

Z : 位置水頭 (potential head)

$$\phi = Z + \Psi$$

Ψ : 圧力水頭 (pressure head)

$C(\theta)$: 比水分容量 (specific moisture contents)

S_s : 比貯留率 (specific storage) α : $\alpha=1$ (飽和領域内), $\alpha=0$ (不飽和領域内)

K_{ij} : 透水係数 (hydraulic conductivity)

$Kr(\theta)$: 相対透水係数 (relative permeability) ($0 \leq Kr(\theta) \leq 1$)

θ : 飽和度 (saturation) ($0 \leq \theta \leq 1$) q : 発生消失率 (sink source term)

X_i : 直交座標系 ($i=1,2,3$) (orthogonal coordinate) t : 時間 (time)

解析の結果として、ピエゾ水頭(水理ポテンシャル)、ダルシー流速、動水勾配の頻度分布、水収支(流入・流出量)、浸出点分布を出力した。

3. 中部日本を対象とした地下水流動解析

3.1 解析の目的と特徴

(1) 目的

本解析の目的は、300×500km×深さ10kmスケールの地下水流動解析を行い、広域的な地下水の流れを推定することである。

(2) 特徴

本解析の主な特徴は次のとおりである。

- (1) 地形および地質構造のバリエーションに富む地方を対象とすること。
- (2) 既存の調査・研究資料に基づき水理地質構造モデルを構築すること。
- (3) 透水係数分布・不飽和特性・側方境界条件の設定を変えた解析も行い、これらの設定が解析結果に与える影響を確かめること。

3.2 解析領域

本地域における解析領域は、東側境界を糸魚川-静岡構造線、西側境界を小浜と尼崎を結ぶ直線とする範囲である(図3.1)。北側および南側境界は海岸線である。

3.3 地形・地質概要

本地域の地形(図3.1)は、大きく見ると中央部の山地部(中部山岳地帯)、山地部の周囲に分布する丘陵部、および太平洋側・日本海側の平野部に分けられる。山地部は標高3,000m級の飛騨・木曾・赤石山脈がほぼ南北方向に延び、その西側に標高1,000~2,000mの飛騨山地・美濃三河高原が、さらにその西側では標高1,500~2,000mの両白山地が分布する。丘陵部は標高300~500m程度の定高性丘陵地~丘陵性山地である。太平洋側・日本海側の平野部は大部分が低地で占められる。

本地域の地質概略図を図3.2に示す。当地域の地質に関する文献(例えば、地質調査所1982;中沢ほか編1987;植村ほか編1988;山下ほか編1988)によると、基盤の深成岩類・変成岩類・古生代~古第三紀堆積岩の上には、一部では中生代の堆積岩や中生代の火山岩(濃飛流紋岩)からなる岩体が分布する。日本海側では基盤上に新第三紀中新世の堆積岩が厚く堆積し、さらにその上部には新第三紀鮮新世~第四紀の堆積物が分布する。太平洋側および内陸部では新第三紀以降の堆積物が伊勢湾周辺、大阪湾周辺、琵琶湖周辺に広く分布する。第四紀火山岩類は領域中~北部の山地(飛騨山脈、両白山地)を中心に分布する。

3.4 水理地質構造モデルの構築

(1) 地形モデルの構築

地形のモデル化の手順を以下に記す。

(a) 地形特性図上での要素分割

本地域の地形特性を把握するために、初めに100万分の1接峰面図(岡山,1988)より地形分類上の境界となるコンター線を選んだ(この図を地形特性図と呼ぶ)。次に地形特性図上で地下水流動解析コードの要素数の制限を考慮しつつ、解析対象領域

内の地形特徴が表現されるように(すなわち地形特性図のコンターに沿うように)要素分割を行った(図3.3)。

(b) 平均標高の算出

標高を設定するために、各要素における国土数値情報(建設省国土地理院,1983)の標高データ(KS-110-1)を平均し、要素の平均標高を算出した(図3.4)。なお、国土数値情報の点間隔は、緯度方向に7.5秒、経度方向に11.25秒であり、これは北緯35度で各々約230m,280mの間隔である。

(c) モデル標高の設定

モデル上での地表面の標高は、地形分類を考慮して低地・台地・丘陵・山地(3段階)のおよその標高にあたる30,100,500,1000,1500,2000mに設定した。琵琶湖の湖底面は0mとした。図3.5に地形モデル上の各要素の標高を示す。

(d) 地形モデルと実際の地形との比較

本解析で構築した地形モデルの妥当性を検討するために、地形モデルと解析対象領域の地形との比較を行った。また、地形モデルでの標高頻度と実際の地形の標高頻度を比較した。その結果、構築した地形モデルには解析対象領域内に位置する飛騨山脈、赤石山脈、両白山地、紀伊山地、濃尾平野、富山平野、福井平野等が表現されており(図3.5および図3.1参照)、標高頻度も地形モデルと実際の地形は共に同様の傾向を示す(図3.6)ことから、今回の地形モデルは対象領域の地形の特徴を良く表現しているといえる。

(2) 地質構造モデルの構築

本地域の地質構造モデルは、100万分の1地質図(地質調査所,1982)およびその他の地質構造に関する文献資料(中沢ほか編1987;植村ほか編1988;山下ほか編1988など)に基づいて構築した。本領域のモデル化された地質構造の特徴は次のとおりである。

(a) 本地域の山地部には、基盤をなす深成岩類、変成岩類、古生代~古第三紀の堆積岩が分布する。

(b) 丘陵部には、主として新第三紀堆積岩、第四紀層が分布する。基盤の深成岩類、変成岩類、中・古生代~古第三紀の堆積岩も一部露出する。

(c) 平野部のはとんどの部分は、新第三紀堆積岩、第四紀層よりなる。

地質構造モデルの断面図の1例を図3.7に示す。

(3) 岩石の透水性の検討

本地域に分布する岩石の透水性を、既存の文献に基づいて検討した。対象とした資料は表3.1に示すわが国の土木・地下水等に関する雑誌である。

収集した透水係数データをもとに、岩種ごとの透水係数の平均値(幾何平均値)を求めた(表3.2)。

(4) 水理地質構造モデルの構築

水理地質構造モデルでは、モデルの構成要素として4つの水理地質ユニットを設定した。それらはそれぞれ、基盤岩類(花崗岩類・流紋岩類・変成岩類・先新第三紀岩類)、新第

三紀堆積岩類、第四紀堆積層、第四紀火山岩類よりなるものである。各水理地質ユニットの透水係数は、構成する岩石の透水係数(表3.2)を平均して、表3.3のように設定した。

それぞれのユニットの三次元的分布は、地質構造モデルにおける岩石の分布に従って与えた。また、モデル表面の形状は地形モデルに従って設定した(図3.8)。

水理地質構造モデルを解析モデルとして用いた。解析モデルは6面体8節点の要素1973個よりなり、節点数は2768である。

3.5 解析条件

(1) 不飽和特性の設定

不飽和領域における飽和度と不飽和透水係数の関係および飽和度と圧力水頭(サクシオン)の関係は、図3.9に示す曲線に従うものとした。

(2) 境界条件

本解析で設定した境界条件を図3.10に示す。

a) 上部境界条件

上部境界条件の1つとして地表からの涵養量が必要である。しかしわが国の広域の涵養量分布に関するデータはほとんどないのが現状である。このため本解析では、東濃地域の1流域で観測された涵養量0.57mm/日(4.5節参照)を領域全体に一様に設定した。

地表部の節点には、飽和状態(圧力水頭が正值の場合)には表面流出を生じる自由浸出条件を設定した。

b) 側方境界条件

陸上の側方境界は不透水境界とした。

海岸部の側方境界は透水境界とし、標高0m(海水位)の定水位条件を与えた。

c) 下部境界条件

下部境界は不透水境界とした。

3.6 解析条件のバリエーション

上記の3.4、3.5節で設定したモデル・条件に基づく解析(これを基本ケースと呼ぶ)に加えて、地下深部の透水係数の設定の違い、不飽和特性の設定の違い、および側方境界条件の設定の違いが解析結果に与える影響を見るために、これらの設定を変えた以下の3つの解析も行った。

(1) 解析ケース2

従来の透水試験の結果では、岩盤の透水性には深度依存性が認められている。図3.11はスウェーデンにおける花崗岩の透水係数と深度の関係(Almenほか、1986)を、図3.12は東濃地域のある地点での花崗岩の割れ目帯の透水係数と深度の関係(柳澤ほか、1989)をそれぞれ示したものであり、いずれも深度の増大に伴う透水係数の低下が認められる。透水性の深度依存性は、割れ目の密度分布の深度方向の変化や、深度増加に伴う応力増加による割れ目幅の減少などに起因していると考えられる。ただし現在のところ、透水係数と深度との関係は定量的には把握されておらず、岩種による特性の違いも明らかでない。

そこで本ケースでは、標高-3,000m以深ではそれ以浅よりも透水係数が小さいものとし、標高-3,000m以深での透水係数を 1.0×10^{-6} cm/secとしたモデル(表3.4、図3.13)を設定

して解析した。標高-3,000m以浅の透水係数分布は基本ケースと同様に設定した。

(2) 解析ケース3

飽和度と負の圧力水頭の関係の設定が解析結果へ与える影響を見るため、同一の飽和度に対して圧力水頭が基本ケースの2倍となる条件(図3.9)を設定した。

(3) 解析ケース4

基本ケースでは海岸部の側方境界は透水境界として標高0mの定水位条件を与えたが、海岸部の下には淡水-塩水境界が存在し、境界面での拡散を無視すれば不透水境界とみなすこともできる。このため本ケースでは、海岸部の側方境界は不透水境界とし、上端(海岸線)でのみ水の出入りがおこるとする条件で解析した(図3.10)。

表3.5 解析ケースと解析条件

解析ケース	-3000m以深の透水係数	不飽和特性	海岸部の側方境界
1 (基本ケース)	5.0×10^{-5}	通常の設定	定水位
2	1.0×10^{-6}	通常の設定	定水位
3	5.0×10^{-5}	圧力水頭2倍	定水位
4	5.0×10^{-5}	通常の設定	不透水

3.7 解析結果

(1) ピエゾ水頭、ダルシー流速

基本ケースのピエゾ水頭を図3.14に、ダルシー流速を図3.15に示す。図3.14(a)は地表でのピエゾ水頭(起伏にかかわらず領域の表面を真上から描写したもの)、(b)~(e)は深度別の水平断面でのピエゾ水頭、(f)~(i)は鉛直断面内のピエゾ水頭を示す。また、水平面内のダルシー流速分布を図3.15に示す。

図3.14(a)、(b)~(e)を見ると、領域東部の中部山岳地帯や南西部の紀伊山地に当たるところにピエゾ水頭の高い部分が見られ、逆に中央部の濃尾平野や西部の大阪平野にあたる部分ではピエゾ水頭が低くその変化も極めて小さい。山地と丘陵の境界部や丘陵と平野の境界部にあたる部分にはピエゾ水頭コンターの密な部分がある。このようなピエゾ水頭分布の特徴はモデルの標高分布(図3.5)の傾向に一致しており、ピエゾ水頭は領域の地形に調和した分布を示している。

鉛直断面内のピエゾ水頭コンター(図3.14(f)~(i))は、山地部の下や浅層部の一部の領域を除き、標高0m以深ではほぼ鉛直方向に向いている。これより、地下深部では鉛直方向の流れがほとんどなく、ほぼ静水圧分布であることを示す。このことは、図3.14(f)~(i)に示す標高-500m~-5,000m水平面内のピエゾ水頭が深度にかかわらずほとんど変わらないことにも示されている。

ダルシー流速もピエゾ水頭コンターと同様に地形を反映している(図3.15)。

(2) 動水勾配の頻度分布

動水勾配は場所により異なるが、解析領域における動水勾配の値の範囲やばらつきを知るために、相対度数分布図（ヒストグラム）および累積相対度数曲線を用いて動水勾配の大きさ（対数刻み）の分布傾向を示した。ここでは、動水勾配を解析モデルの各要素ごとに算定し、各要素の体積を度数として表した。それらを解析領域全体の体積で除して各要素ごとの相対度数とした。

図3.16および表3.5に、基本ケースにおける領域全体の動水勾配分布を示す。動水勾配は0.01前後をピークに分布し、領域内のほとんど（99%以上）の部分で0.04より小さい。

図3.17および表3.5には、深度別の動水勾配の頻度分布を見るために、深度0～500m（地表～地表下500m）、深度500～1,000m、深度1,000～1,500m、深度0～1,500mの4領域ごとの動水勾配分布を示してある。深度500～1,000m領域では分布のピークが0.02～0.03付近にあり、0.04を越える部分が4.5%ある。深度500～1,000mおよび深度1,000～1,500m領域では、深度0～500mよりも全体に分布が小さい方へ移動し、0.04を越える部分の割合は約1%となる。深度0～1,500mについて見た場合は、0.04を越える部分は約2%である。

(3) 浸出点分布と水収支

基本ケースにおける解析領域での浸出点の分布と水収支を図3.18(a)に示す。浸出点は山地と丘陵部の境界および平野の周辺部に多く位置する。

水収支についてみると、太平洋および日本海への湧出量はいずれもおおよそ $5 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{日}$ である。琵琶湖にも地下水が湧出する。涵養量は $26.5 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{日}$ 、地表での浸出量は $18.2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{日}$ であり、涵養量の約75%が表面から浸出する。

(4) 解析ケースごとの結果の比較

a) ピエゾ水頭、ダルシー流速

4つの解析ケースにおける標高-1,000m水平面でのピエゾ水頭分布を図3.19に示す。いずれのケースでもピエゾ水頭は基本ケースと同様に地形に調和した分布を示す。解析ケース2および3では、領域東部の中部山岳地帯でのピエゾ水頭のピークが、基本ケースおよびケース4に比べて200～300m高い。しかし、山岳部以外の部分でのパターンは4つのケースすべてにおいてほぼ同様で、ピエゾ水頭の分布にはほとんど違いがない。このことは他のレベルの水平面や鉛直断面でも同様である。

解析ケースごとに標高-500m水平面でのダルシー流速を比較しても、ケースによる違いはほとんどない（図3.20）。

これらのことから、標高-3,000m以深の透水係数の違いはピエゾ水頭・ダルシー流速にほとんど影響を与えず、ここで得られた結果は標高-3,000m以浅の水理地質特性や地形形状を反映していることがわかる。

b) 動水勾配の頻度分布

図3.21および表3.5では、解析条件が動水勾配分布に与える影響を見るために4つの解析ケースの結果を比較してある（いずれも全領域を対象）。この図において、4つのケー

スで顕著な違いは認められない。解析ケース2は動水勾配が小さな部分（0.01未満の部分）が比較的多いが、0.04以上の部分も約2%と他のケースよりわずかに多い。

図3.22および表3.5は、深度別に4つの解析ケースの動水勾配分布を比較したものである（対象領域は深度0～500m、500～1,000m、1,000～1,500m、0～1,500m）。いずれの領域においても解析ケース2は動水勾配が小さな部分が比較的多く、同時に、0.04以上の部分の割合が他のケースに比べてやや多い（約2%）。しかし全体の分布傾向は4ケースで大きな差はない。

c) 浸出点および水収支

図3.18には4つのケースの浸出点分布と水収支を示してある。涵養量および側方境界からの海への浸出量（太平洋側と日本海側への合計）はケース3でやや多くケース2で少ないが、他のケースとオーダーで異なることはなく、水収支についても解析ケースによる大きな差はない。

d) 沿岸部での湧出量

図3.23は、海岸部に位置する3地点での深度別の湧出量について、基本ケースおよび解析ケース2の結果を示す。

沿岸部での湧出のほとんどは標高0mの節点で生じており、それより深い部分からの湧出量は非常に小さい。A、B点は表層部に高透水性が存在する所、C点は深度方向の透水性の変化のない所であるが、3点のいずれにおいても湧出のほとんどが標高0mの節点で生じていることに違いはない。これらの結果は、側方境界に不透水条件を与えた解析ケース4の結果とほぼ同様となる。

解析ケース2では標高-3,000m以深の透水係数を基本ケースに比べて小さく設定したため標高-3,000m以深での湧出量がやや小さくなっているが、深度方向の分布傾向には基本ケースと大きな差異は認められない。

このように、全体に4つのケースの結果には顕著な差異が認められず、標高-3,000m以深の透水係数の設定、不飽和特性の条件設定および淡塩境界部の条件設定は解析結果に大きな影響を与えないことがわかる。

3.8 中部日本を対象とした解析のまとめ

以上の解析結果をまとめると次のようになる。

- ① ピエゾ水頭は地形に調和した分布を示す。
- ② ピエゾ水頭の鉛直方向の変化は浅部を除く領域のほとんどの地点において極めて小さく、ほぼ静水圧分布を示す。
- ③ 動水勾配は解析領域のほとんどの部分（基本ケース、解析ケース3、4では99%以上、解析ケース2では98%の領域）で0.04より小さい。
- ④ 深度500m以深における動水勾配は、それ以浅に比べ小さな値を示す。
- ⑤ 本解析では、地下深部の透水係数分布・不飽和特性・海岸部での側方境界条件（淡塩境界）の設定を変えても、ピエゾ水頭、動水勾配分布および地表・海城への浸出量の解析結果に顕著な違いは現れない。

3.9 解析の妥当性の検討

濃尾平野での地下水の取水量は昭和50年前後で約 4.2×10^8 m³/日となっている（環境庁水質保全局企画課編, 1978）。昭和50年前後は濃尾平野における地盤沈下等の問題に対して取水量制限が加えられ沈下量が減少しつつある時期であり、この値はほぼ濃尾平野を涵養する水量に匹敵すると考えられる。本解析の結果による太平洋側への湧出量は $4 \sim 5 \times 10^8$ m³/日であり、濃尾平野の取水量にほぼ相当する。このことは、解析により得られた湧出量の妥当性を示唆するものと考えられる。

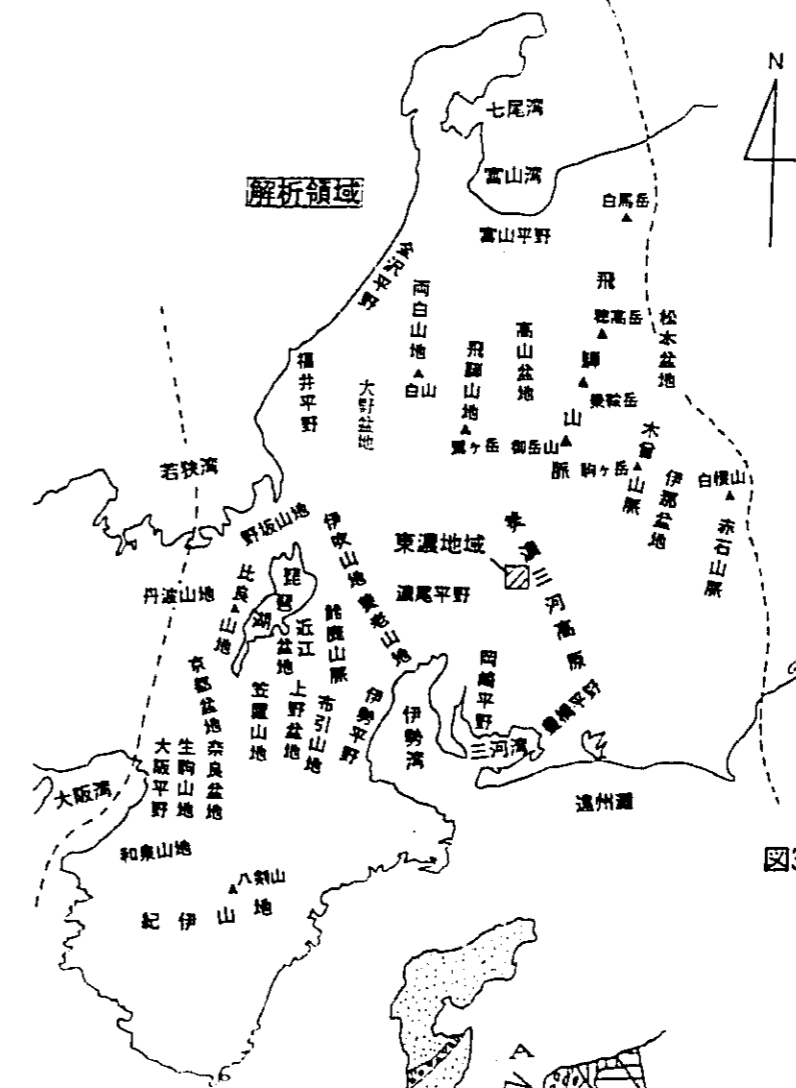


図3.1 解析対象領域と地形

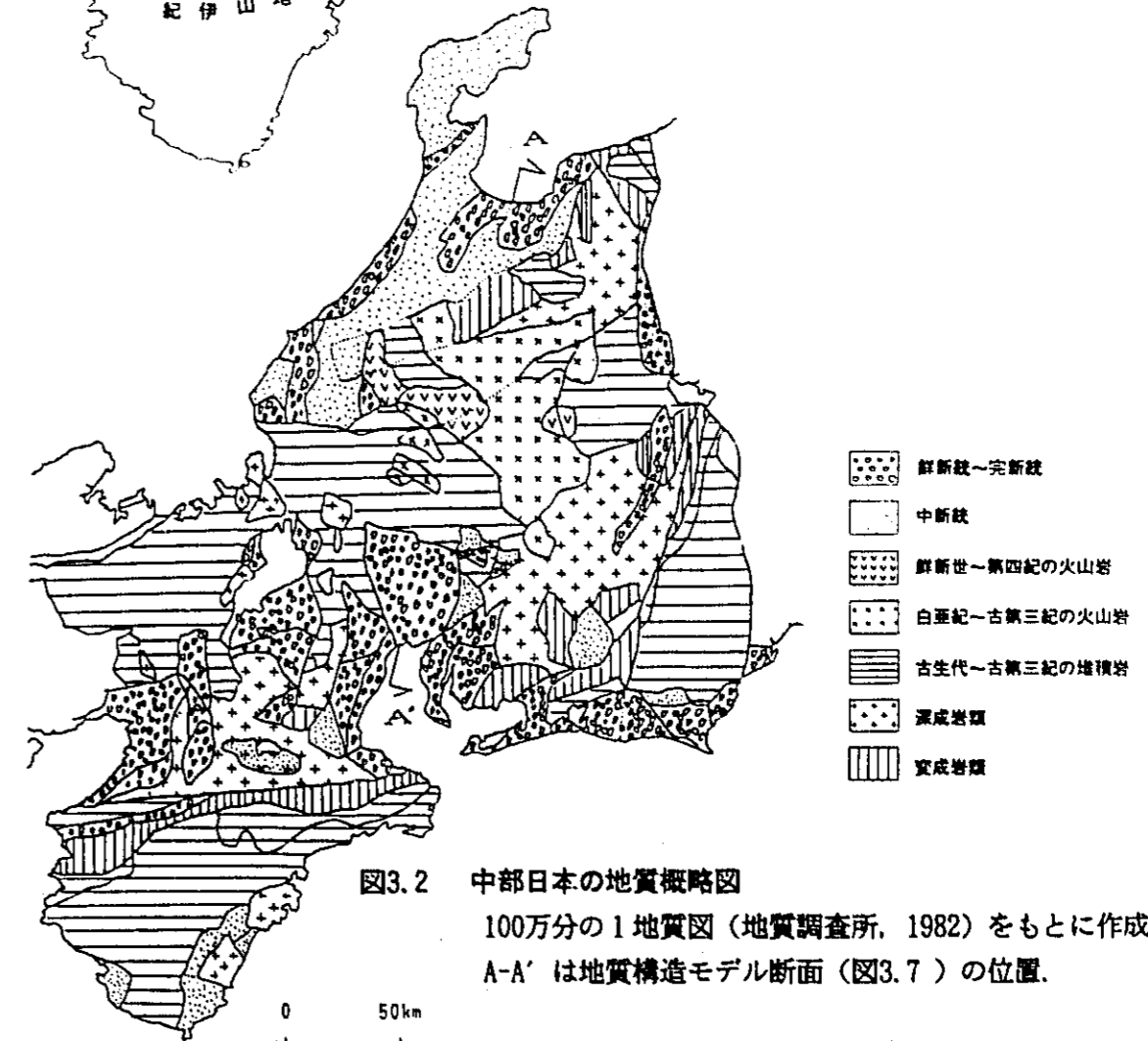


図3.2 中部日本の地質概略図
100万分の1地質図（地質調査所, 1982）をもとに作成。
A-A' は地質構造モデル断面（図3.7）の位置。

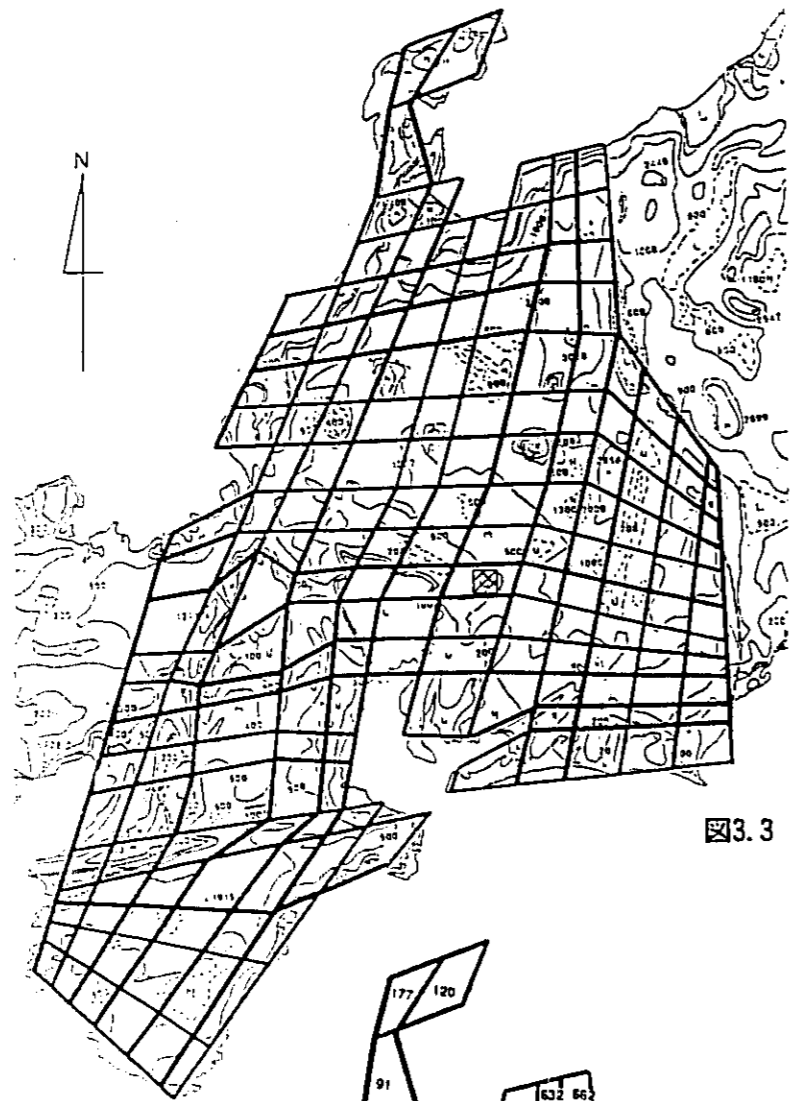


図3.3 中部日本の地形特性図と平面的な要素分割

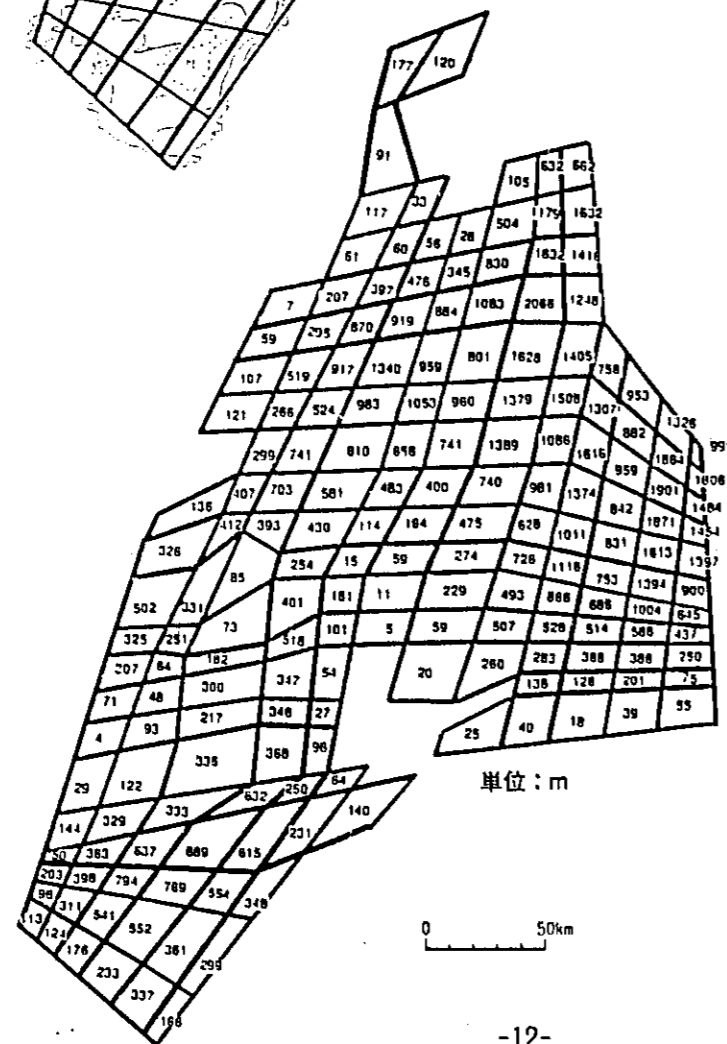


図3.4 各要素の平均標高

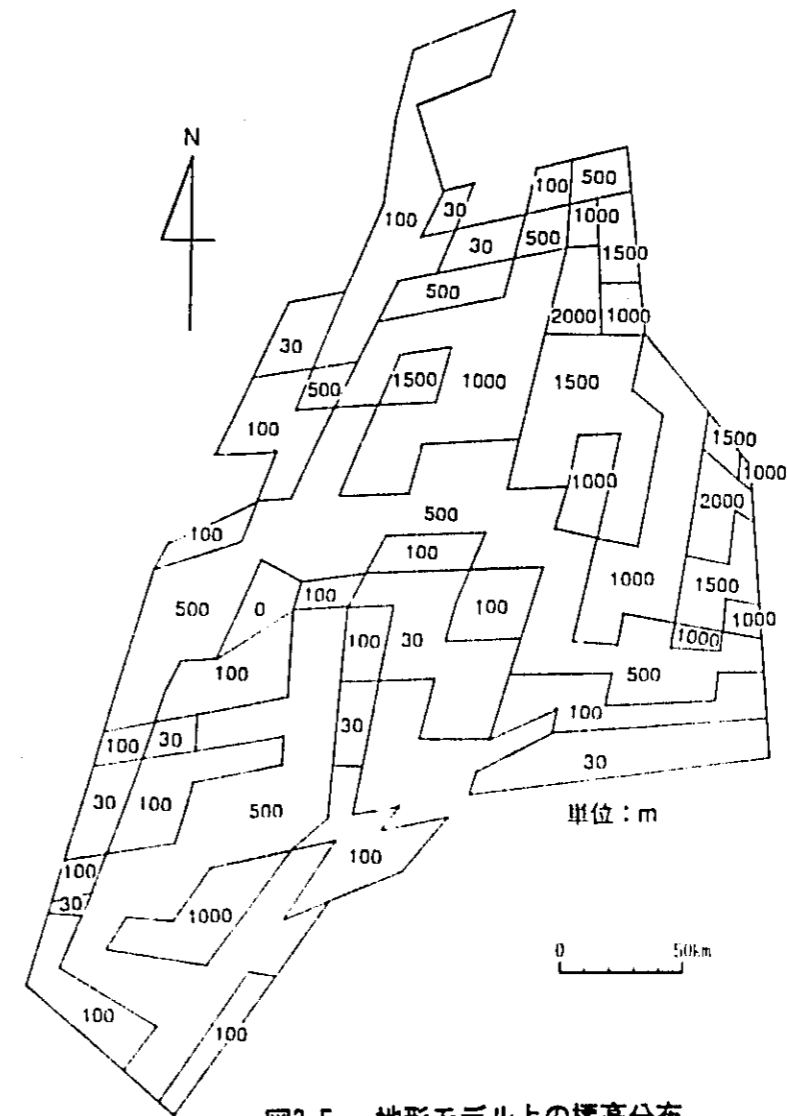


図3.5 地形モデル上の標高分布

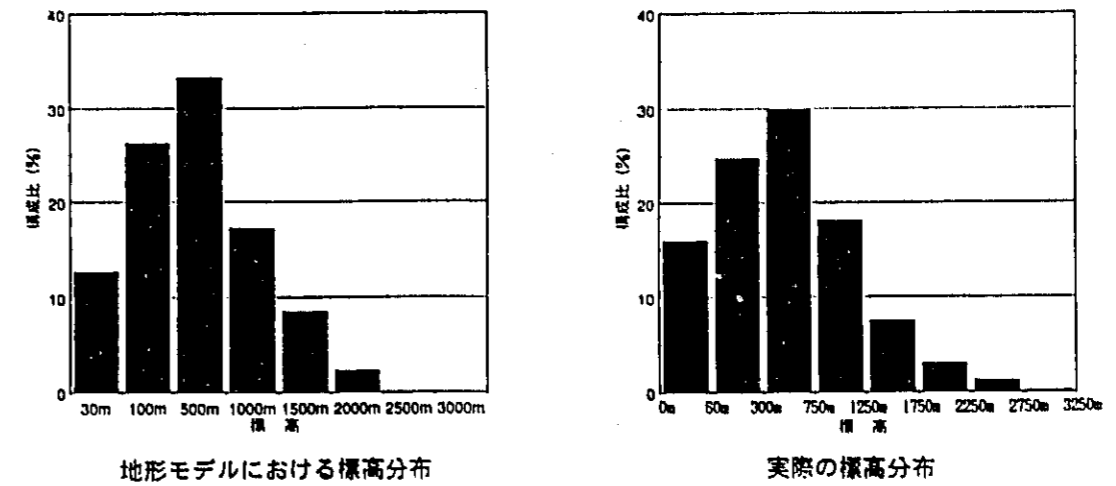


図3.6 中部日本のモデル上および実際の標高頻度分布

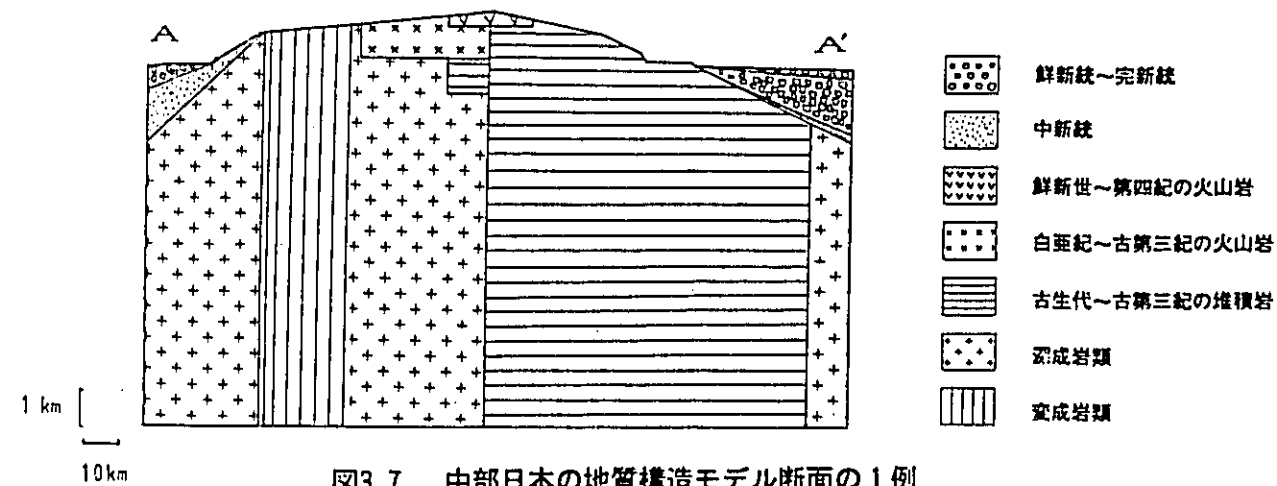


図3.7 中部日本の地質構造モデル断面の1例
断面の位置については図3.2 参照.

表3.1 透水係数データを収集した文献資料

文献(雑誌)	対象年	文献(雑誌)	対象年
電力土木	1980～1989	石油技術協会誌	1980～1989
土木施工	1980～1989	地熱	1980～1989
ダム技術	1983～1989	地熱エネルギー	1980～1989
大ダム	1980～1989	土木技術	1980～1989
土木学会誌	1980～1989	土木技術資料	1980～1989
土木学会論文報告集	1980～1989	地下水と井戸とポンプ	1980～1988
トンネルと地下	1980～1989	地下水技術	1988～1989
日本鉱業会誌	1980～1989	鉄道技術研究報告	1980～1984
応用地質	1980～1989	鉄道土木	1980～1986

表3.2 文献資料に基づく中部地方の岩種ごとの透水係数

岩種	透水係数の平均値 (cm/s)
花崗岩類	4.3×10^{-5}
流紋岩類	6.0×10^{-5}
変成岩類	4.8×10^{-5}
先新第三紀堆積岩類	2.8×10^{-5}
新第三紀堆積岩類	4.6×10^{-5}
第四紀堆積層	1.5×10^{-3}
第四紀火山岩	1.5×10^{-5}

表3.3 水理地質ユニットの区分(基本ケース, 解析ケース3, 4)

水理地質ユニット	透水係数 (cm/s)	岩相
ユニット1	5×10^{-5}	花崗岩類, 流紋岩類, 変成岩類, 先新第三紀堆積岩類
ユニット2	5×10^{-5}	新第三紀堆積岩類
ユニット3	1×10^{-3}	第四紀堆積層
ユニット4	1×10^{-5}	第四紀火山岩類

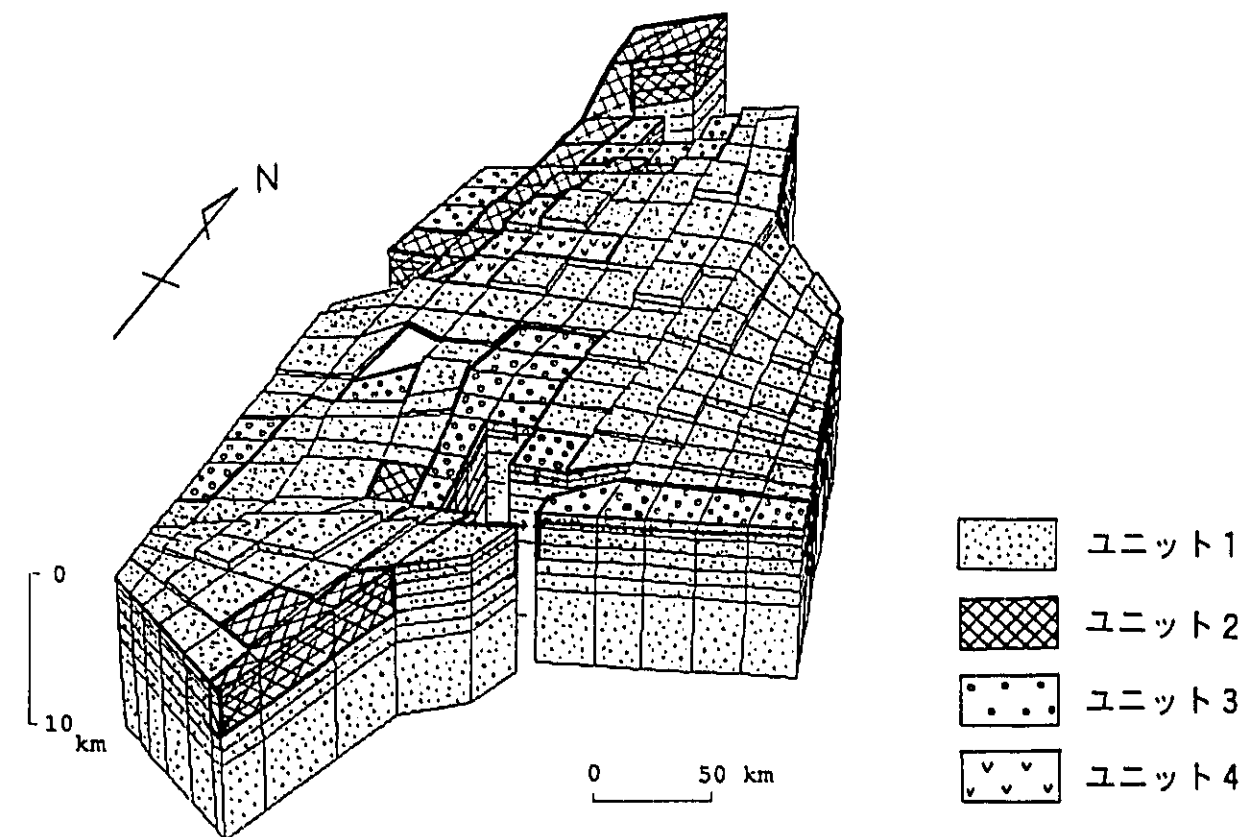


図3.8 中部日本の水理地質構造モデル(基本ケース, 解析ケース3, 4)

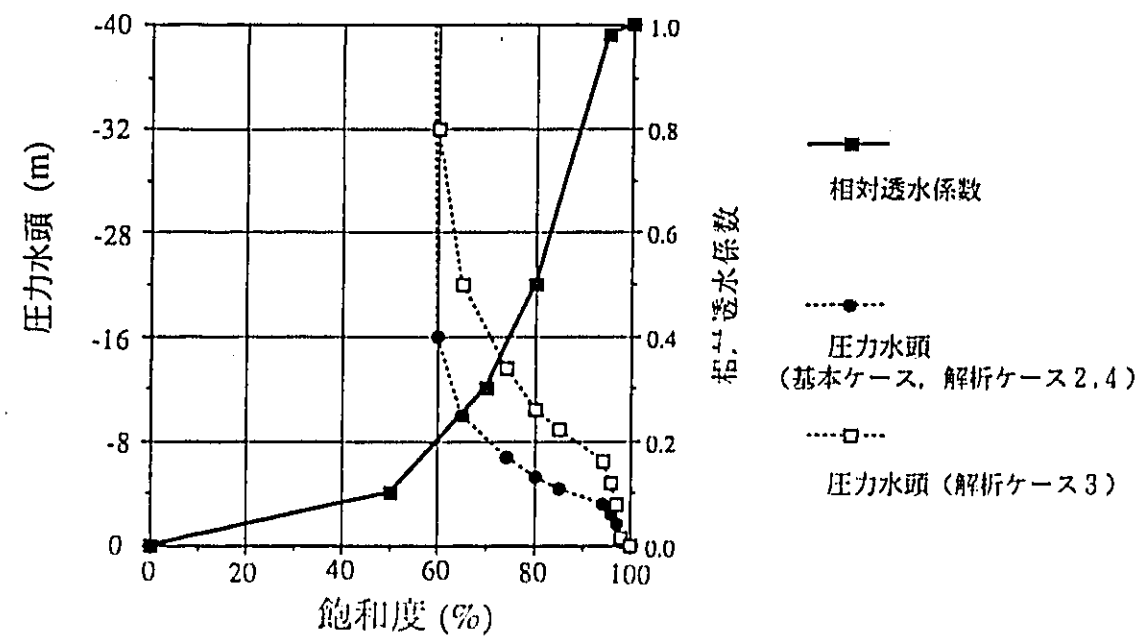


図3.9 本解析で用いた飽和度と相対透水係数の関係および飽和度と圧力水頭の関係

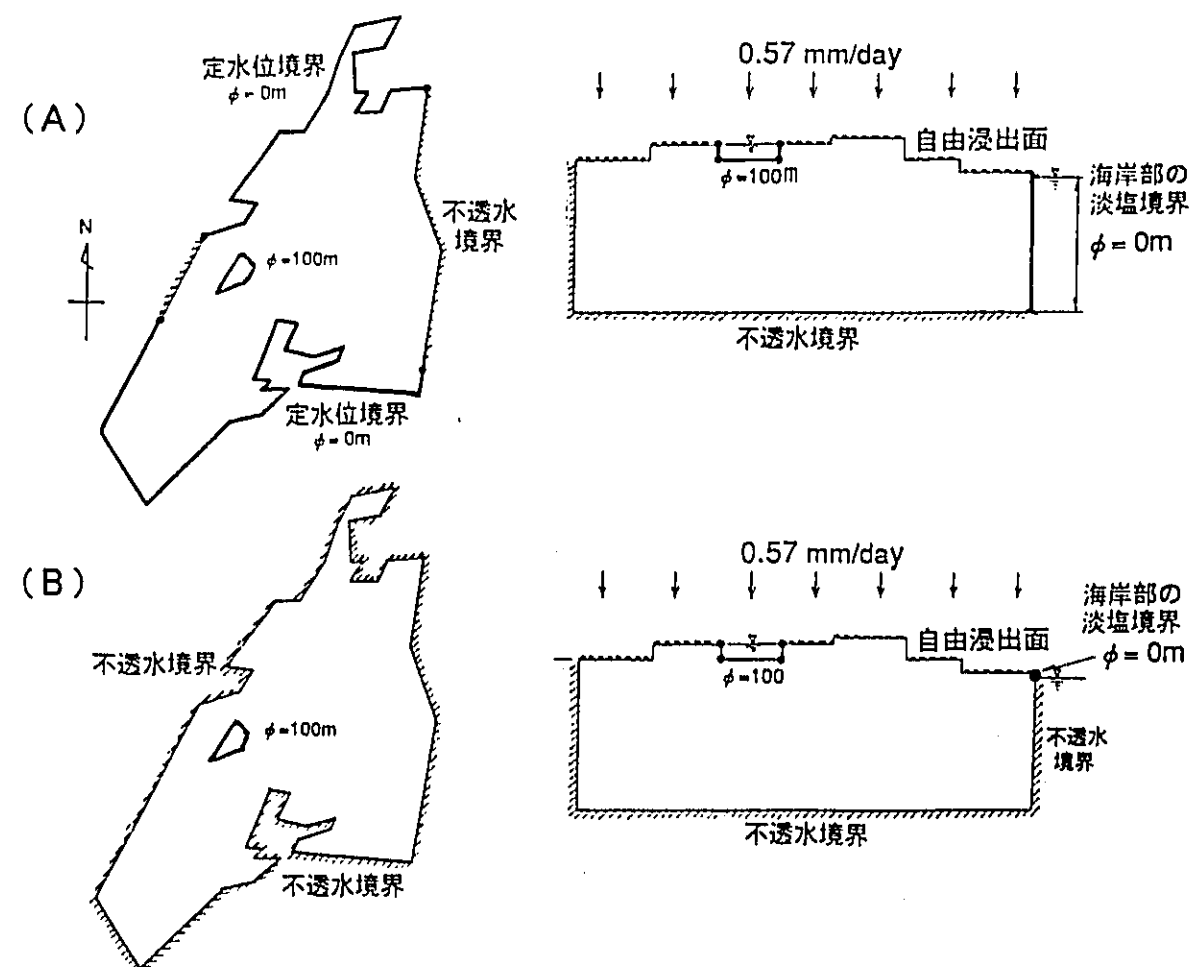


図3.10 境界条件

(A) 基本ケース, 解析ケース2, 解析ケース3での境界条件
 (B) 解析ケース4での境界条件

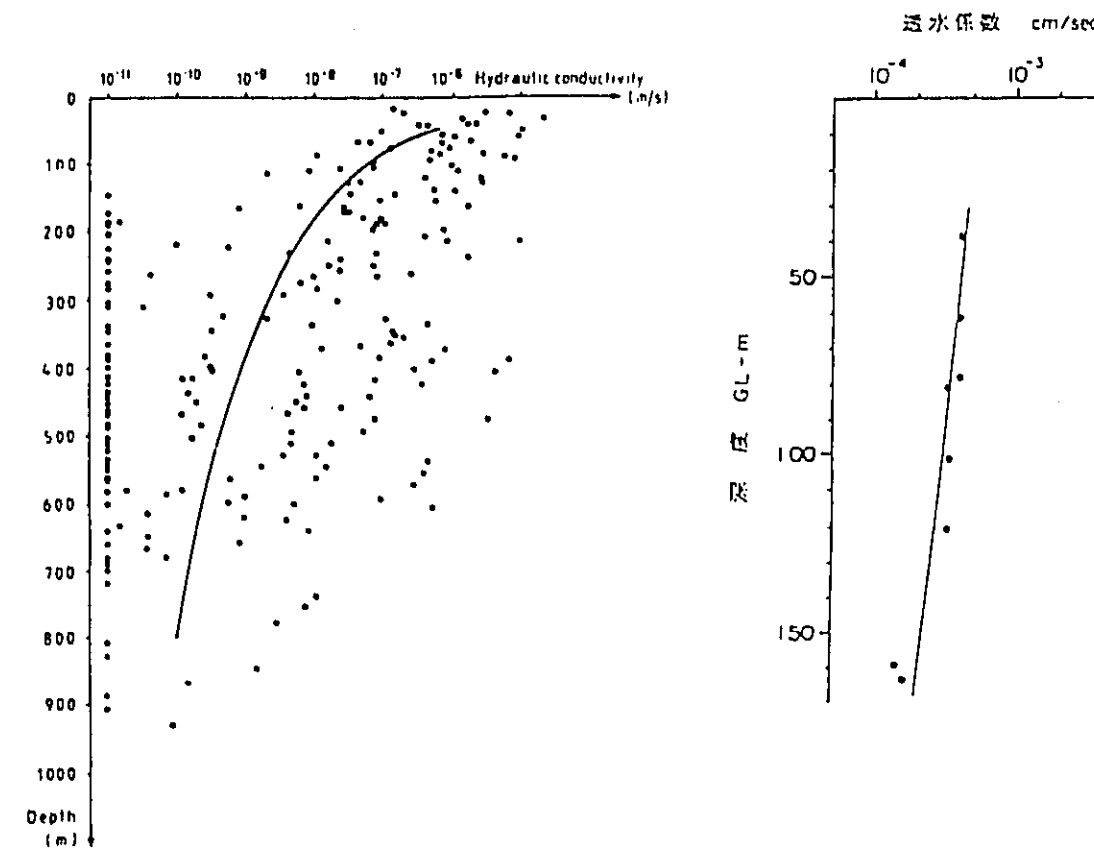


図3.11 SKBサイト(スウェーデン)における花崗岩の透水係数と深度の関係 (Almén ほか, 1986)

図3.12

東濃地域における花崗岩の透水係数と深度の関係 (柳澤ほか, 1989)

表3.4 水理地質ユニットの区分 (解析ケース2)

水理地質ユニット	透水係数 (cm/s)	岩相
ユニット1	5×10^{-6}	花崗岩類, 流紋岩類, 変成岩類, 先新第三紀堆積岩類 (標高-3,000m以浅)
ユニット2	1×10^{-6}	花崗岩類, 流紋岩類, 変成岩類, 先新第三紀堆積岩類 (標高-3,000m以深)
ユニット3	5×10^{-5}	新第三紀堆積岩類
ユニット4	1×10^{-3}	第四紀堆積層
ユニット5	1×10^{-5}	第四紀火山岩類

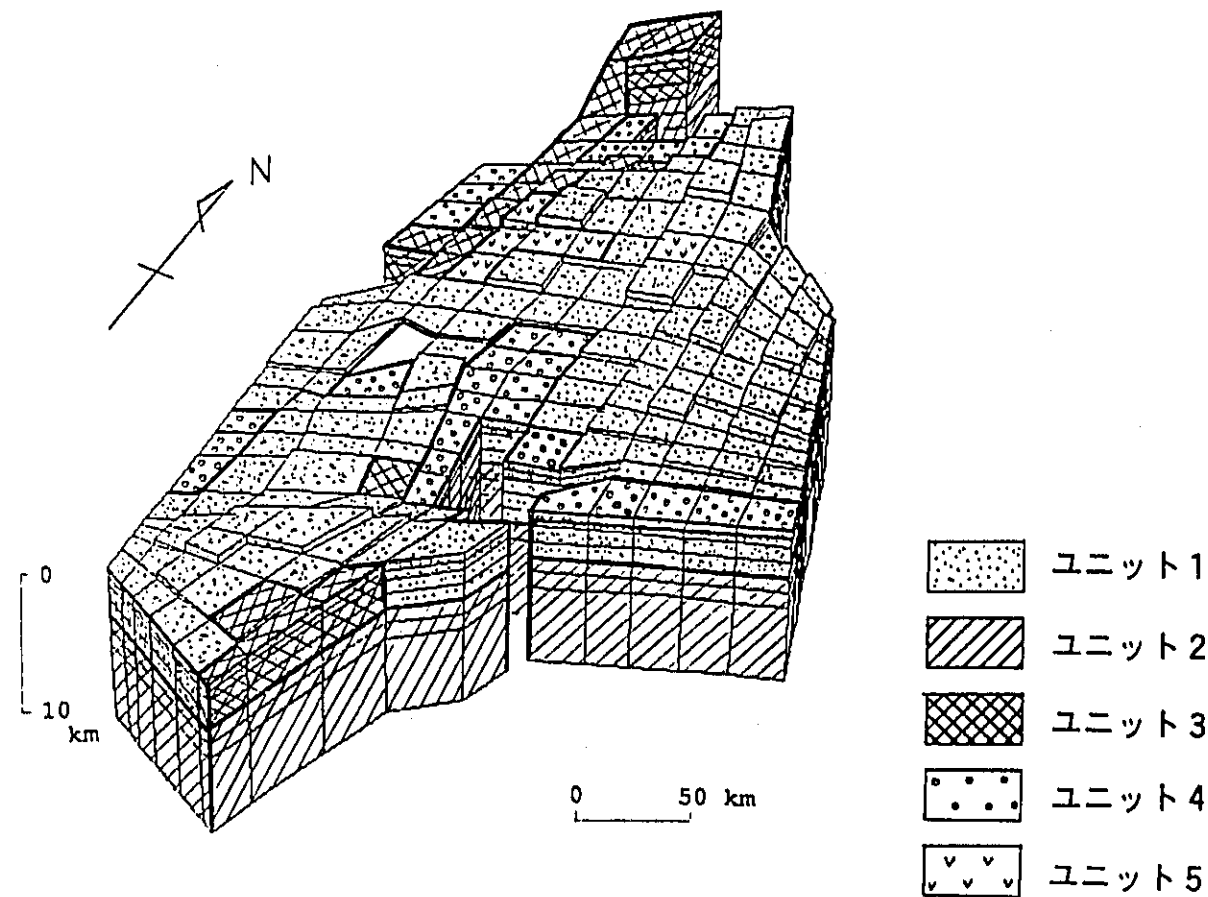


図3.13 中部日本の水理地質構造モデル (解析ケース2)

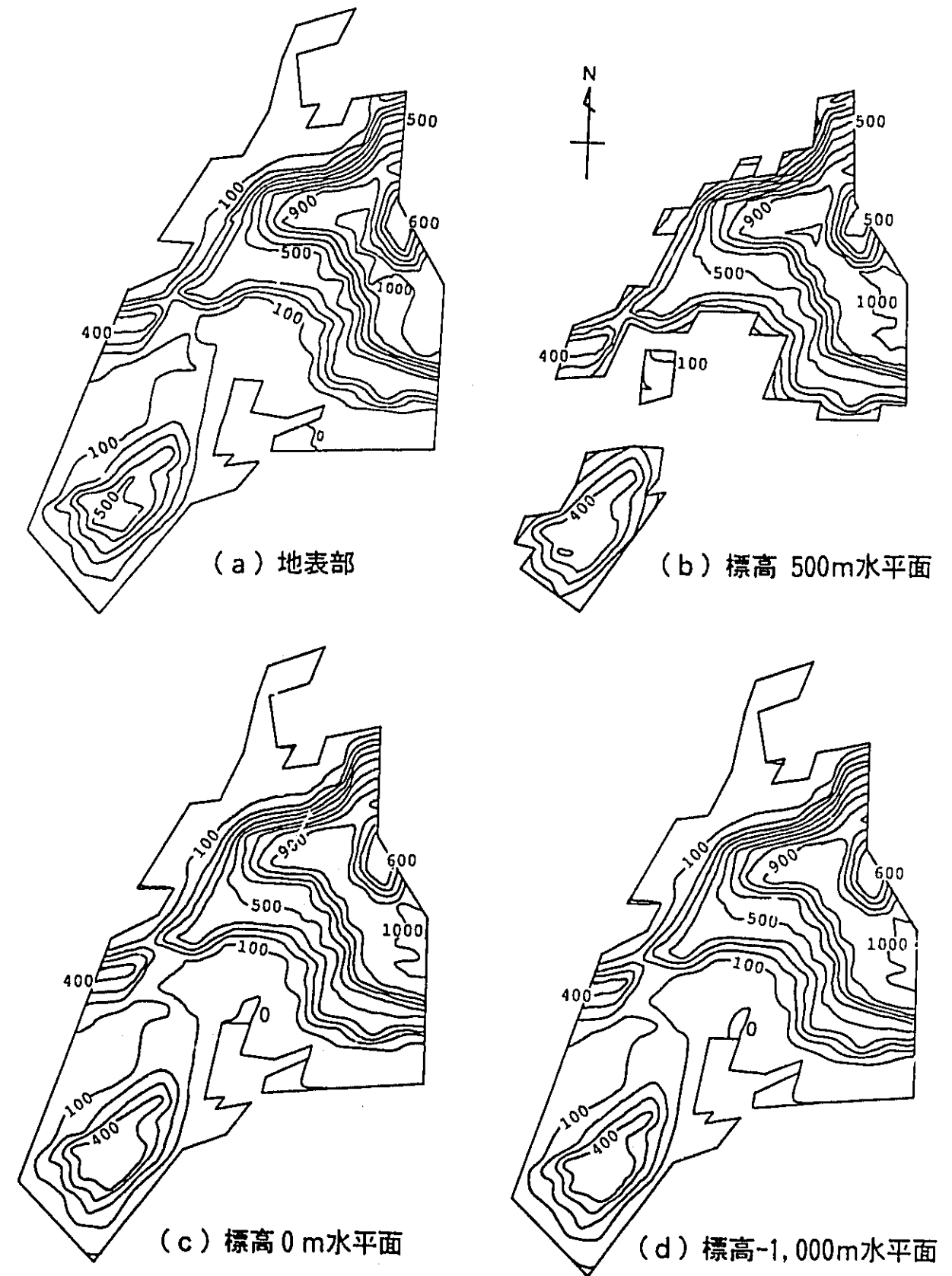


図3.14 ピエゾ水頭の計算結果 (基本ケース) - その1
コンターの数字の単位: m (標高)

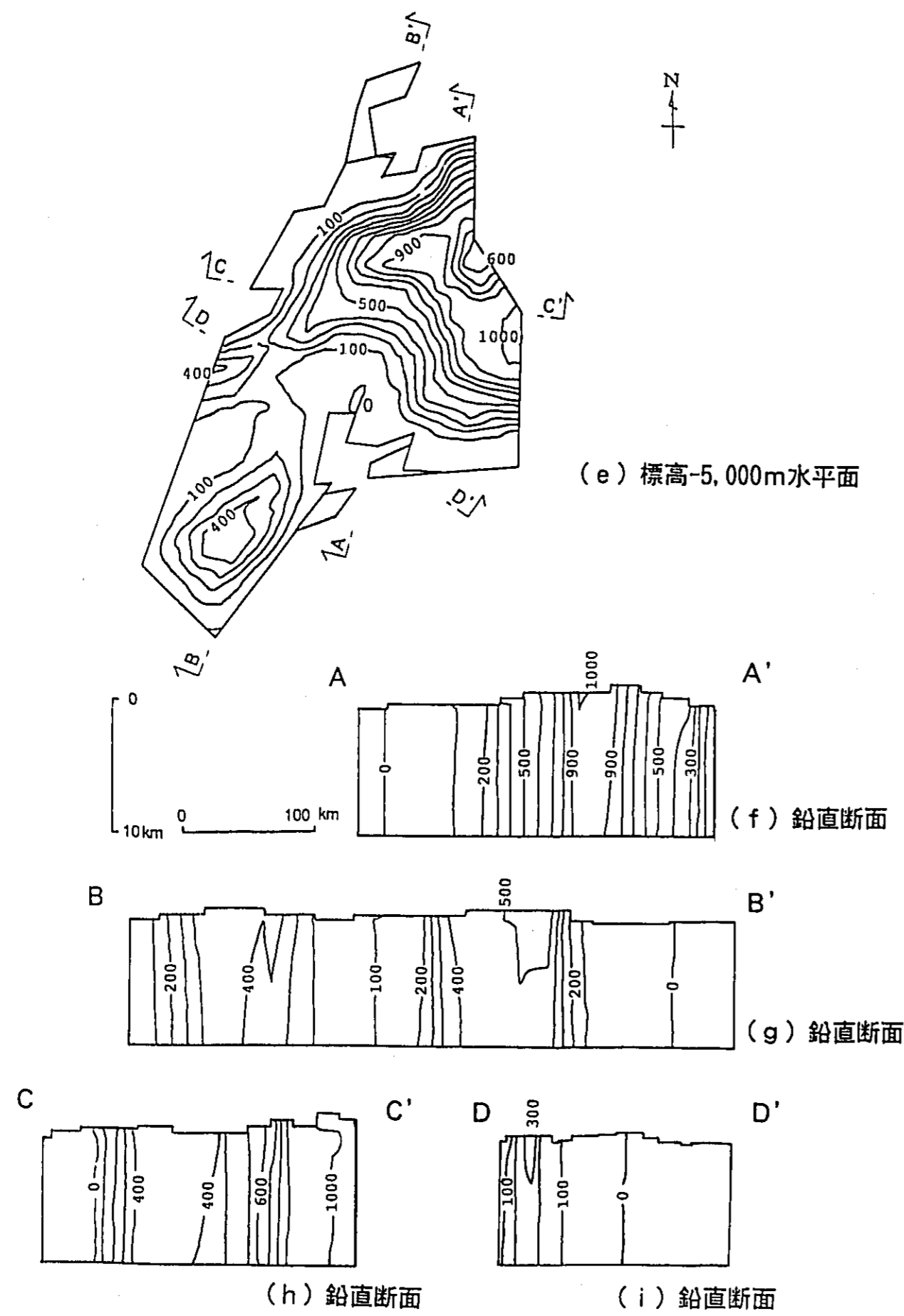


図3.14 ピエゾ水頭の計算結果 (基本ケース) - その2
 コントアの数字の単位: m (標高)

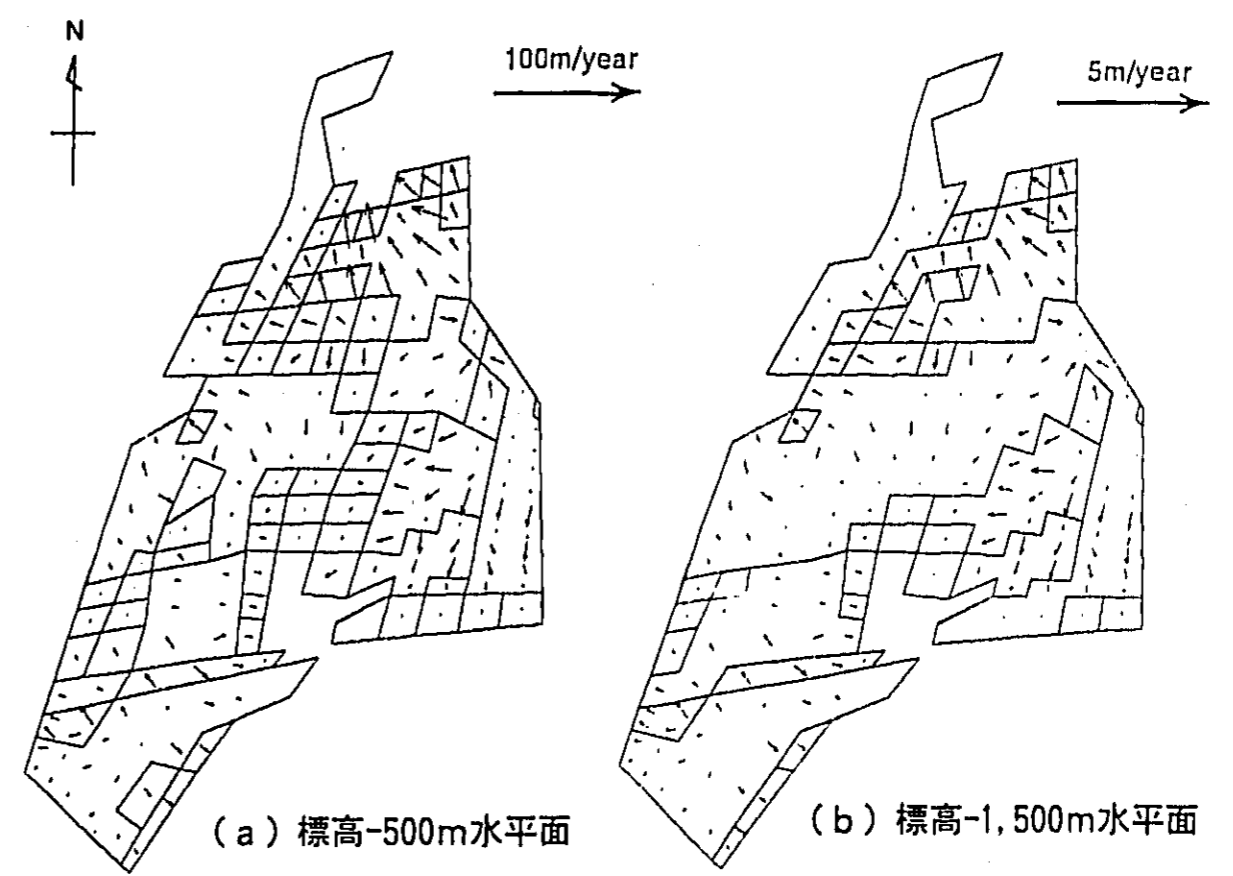


図3.15 ダルシー流速の計算結果 (基本ケース)

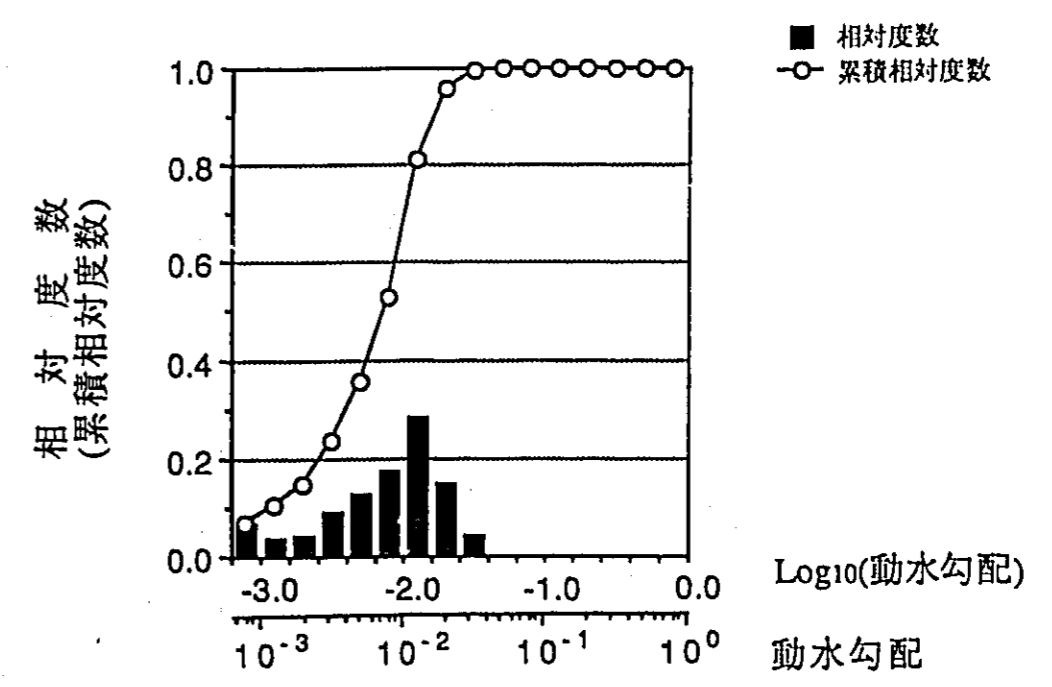


図3.16 全領域を対象とした動水勾配の頻度分布 (基本ケース)

表3.5 中部日本における動水勾配の頻度分布 - その1

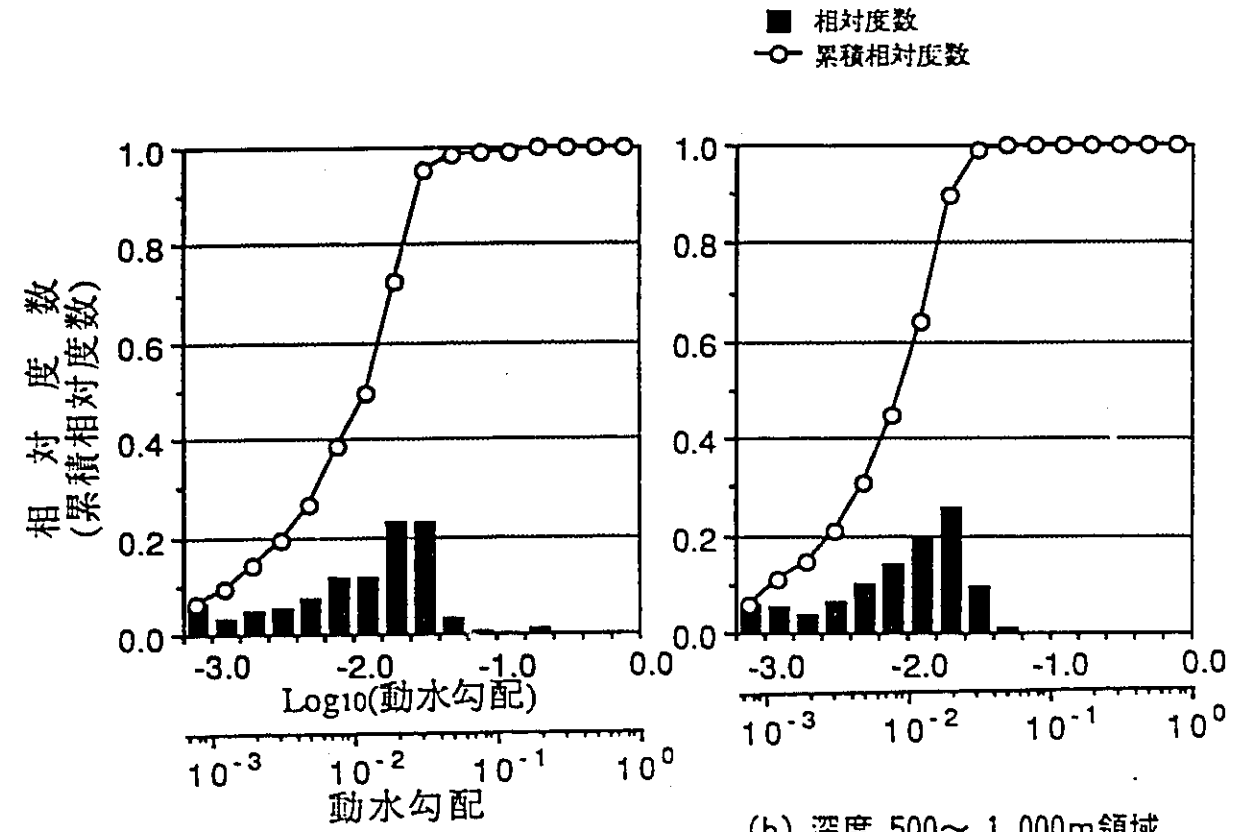
全領域	Log10(gr)	相対度数	累計相対度数	相対度数	累計相対度数	相対度数	累計相対度数	相対度数	累計相対度数
		基本ケース	基本ケース	解析ケース2	解析ケース2	解析ケース3	解析ケース3	解析ケース4	解析ケース4
	-3.0	0.068	0.068	0.085	0.085	0.065	0.065	0.058	0.058
	-2.8	0.037	0.105	0.053	0.137	0.032	0.096	0.029	0.087
	-2.6	0.040	0.145	0.065	0.202	0.033	0.129	0.041	0.128
	-2.4	0.089	0.234	0.059	0.261	0.087	0.217	0.104	0.232
	-2.2	0.124	0.358	0.123	0.384	0.126	0.343	0.136	0.369
	-2.0	0.173	0.531	0.123	0.507	0.169	0.512	0.173	0.541
	-1.8	0.282	0.813	0.236	0.743	0.286	0.798	0.271	0.812
	-1.6	0.144	0.957	0.165	0.908	0.156	0.954	0.142	0.955
	-1.4	0.040	0.997	0.072	0.980	0.042	0.996	0.041	0.996
	-1.2	0.002	0.999	0.019	0.999	0.003	0.999	0.003	0.999
	-1.0	0.000	0.999	0.000	1.000	0.000	1.000	0.001	0.999
	-0.8	0.000	1.000	0.000	1.000	0.000	1.000	0.000	1.000
	-0.6	0.000	1.000	0.000	1.000	0.000	1.000	0.000	1.000
	-0.4	0.000	1.000	0.000	1.000	0.000	1.000	0.000	1.000
	-0.2	0.000	1.000	0.000	1.000	0.000	1.000	0.000	1.000
	0.0	0.000	1.000	0.000	1.000	0.000	1.000	0.000	1.000
地表-GL-500m	Log10(gr)	相対度数	累計相対度数	相対度数	累計相対度数	相対度数	累計相対度数	相対度数	累計相対度数
		基本ケース	基本ケース	解析ケース2	解析ケース2	解析ケース3	解析ケース3	解析ケース4	解析ケース4
	-3.0	0.063	0.063	0.083	0.083	0.063	0.063	0.049	0.049
	-2.8	0.033	0.096	0.049	0.131	0.042	0.105	0.026	0.078
	-2.6	0.047	0.143	0.054	0.185	0.044	0.148	0.054	0.130
	-2.4	0.051	0.194	0.028	0.214	0.055	0.203	0.064	0.194
	-2.2	0.072	0.266	0.097	0.311	0.073	0.276	0.083	0.257
	-2.0	0.117	0.384	0.106	0.417	0.107	0.383	0.121	0.378
	-1.8	0.112	0.496	0.099	0.516	0.113	0.496	0.112	0.490
	-1.6	0.229	0.725	0.197	0.712	0.239	0.735	0.231	0.721
	-1.4	0.230	0.955	0.218	0.930	0.217	0.953	0.224	0.945
	-1.2	0.031	0.985	0.055	0.985	0.038	0.990	0.040	0.985
	-1.0	0.006	0.991	0.006	0.991	0.000	0.991	0.006	0.991
	-0.8	0.001	0.992	0.001	0.992	0.001	0.992	0.002	0.992
	-0.6	0.008	1.000	0.008	1.000	0.008	1.000	0.008	1.000
	-0.4	0.000	1.000	0.000	1.000	0.000	1.000	0.000	1.000
	-0.2	0.000	1.000	0.000	1.000	0.000	1.000	0.000	1.000
	0.0	0.000	1.000	0.000	1.000	0.000	1.000	0.000	1.000

表3.5 中部日本における動水勾配の頻度分布 - その2

GL-500m-GL-1000m	Log10(gr)	相対度数	累計相対度数	相対度数	累計相対度数	相対度数	累計相対度数	相対度数	累計相対度数
		基本ケース	基本ケース	解析ケース2	解析ケース2	解析ケース3	解析ケース3	解析ケース4	解析ケース4
	-3.0	0.055	0.055	0.105	0.105	0.089	0.089	0.050	0.050
	-2.8	0.052	0.107	0.058	0.162	0.040	0.109	0.013	0.083
	-2.6	0.039	0.146	0.060	0.223	0.040	0.149	0.057	0.120
	-2.4	0.062	0.208	0.037	0.260	0.053	0.202	0.089	0.189
	-2.2	0.098	0.306	0.114	0.374	0.118	0.319	0.098	0.287
	-2.0	0.142	0.448	0.130	0.504	0.134	0.454	0.162	0.449
	-1.8	0.192	0.640	0.182	0.586	0.182	0.636	0.199	0.648
	-1.6	0.254	0.894	0.163	0.849	0.238	0.874	0.223	0.871
	-1.4	0.094	0.988	0.116	0.965	0.107	0.981	0.109	0.980
	-1.2	0.011	0.999	0.034	0.999	0.018	0.999	0.018	0.998
	-1.0	0.001	1.000	0.001	1.000	0.001	1.000	0.002	0.999
	-0.8	0.000	1.000	0.000	1.000	0.000	1.000	0.001	1.000
	-0.6	0.000	1.000	0.000	1.000	0.000	1.000	0.000	1.000
	-0.4	0.000	1.000	0.000	1.000	0.000	1.000	0.000	1.000
	-0.2	0.000	1.000	0.000	1.000	0.000	1.000	0.000	1.000
	0.0	0.000	1.000	0.000	1.000	0.000	1.000	0.000	1.000
GL-1000m-GL-1500m	Log10(gr)	相対度数	累計相対度数	相対度数	累計相対度数	相対度数	累計相対度数	相対度数	累計相対度数
		基本ケース	基本ケース	解析ケース2	解析ケース2	解析ケース3	解析ケース3	解析ケース4	解析ケース4
	-3.0	0.066	0.066	0.134	0.134	0.067	0.067	0.045	0.045
	-2.8	0.054	0.121	0.083	0.197	0.059	0.126	0.052	0.097
	-2.6	0.050	0.171	0.065	0.262	0.041	0.168	0.049	0.147
	-2.4	0.071	0.242	0.065	0.327	0.069	0.236	0.080	0.227
	-2.2	0.094	0.336	0.103	0.430	0.096	0.332	0.100	0.326
	-2.0	0.171	0.508	0.119	0.549	0.160	0.493	0.161	0.488
	-1.8	0.195	0.703	0.179	0.728	0.204	0.697	0.199	0.687
	-1.6	0.227	0.930	0.153	0.882	0.226	0.923	0.234	0.921
	-1.4	0.064	0.994	0.088	0.970	0.071	0.994	0.069	0.991
	-1.2	0.003	0.997	0.028	0.998	0.002	0.996	0.005	0.996
	-1.0	0.002	0.999	0.002	1.000	0.003	1.000	0.003	0.999
	-0.8	0.001	1.000	0.000	1.000	0.000	1.000	0.001	1.000
	-0.6	0.000	1.000	0.000	1.000	0.000	1.000	0.000	1.000
	-0.4	0.000	1.000	0.000	1.000	0.000	1.000	0.000	1.000
	-0.2	0.000	1.000	0.000	1.000	0.000	1.000	0.000	1.000
	0.0	0.000	1.000	0.000	1.000	0.000	1.000	0.000	1.000

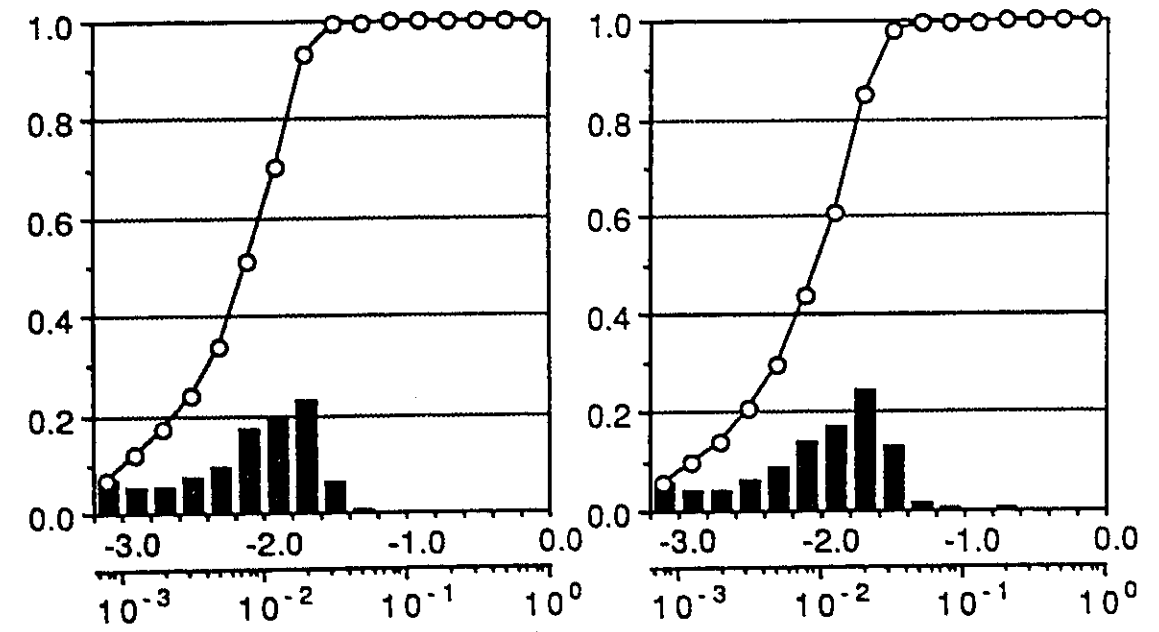
表3.5 中部日本における動水勾配の頻度分布 - その3

GL-1500m	Log10(μ)	基本ケース				解析ケース1				解析ケース2				解析ケース3				解析ケース4			
		相対度数	累計相対度数	相対度数	累計相対度数	相対度数	累計相対度数	相対度数	累計相対度数	相対度数	累計相対度数	相対度数	累計相対度数	相対度数	累計相対度数	相対度数	累計相対度数	相対度数	累計相対度数		
	-3.0	0.069	0.069	0.081	0.081	0.064	0.064	0.081	0.081	0.064	0.064	0.081	0.081	0.064	0.064	0.081	0.081	0.064	0.064	0.081	0.081
	-2.8	0.036	0.105	0.052	0.157	0.029	0.093	0.133	0.230	0.029	0.093	0.133	0.230	0.029	0.093	0.133	0.230	0.029	0.093	0.133	0.230
	-2.6	0.039	0.143	0.095	0.238	0.198	0.436	0.198	0.436	0.198	0.436	0.198	0.436	0.198	0.436	0.198	0.436	0.198	0.436	0.198	0.436
	-2.4	0.094	0.237	0.092	0.329	0.250	0.579	0.250	0.579	0.250	0.579	0.250	0.579	0.250	0.579	0.250	0.579	0.250	0.579	0.250	0.579
	-2.2	0.130	0.367	0.126	0.493	0.386	0.879	0.386	0.879	0.386	0.879	0.386	0.879	0.386	0.879	0.386	0.879	0.386	0.879	0.386	0.879
	-2.0	0.178	0.545	0.123	0.668	0.509	1.177	0.509	1.177	0.509	1.177	0.509	1.177	0.509	1.177	0.509	1.177	0.509	1.177	0.509	1.177
	-1.8	0.301	0.847	0.230	1.077	0.739	1.816	0.739	1.816	0.739	1.816	0.739	1.816	0.739	1.816	0.739	1.816	0.739	1.816	0.739	1.816
	-1.6	0.128	0.975	0.164	1.139	0.823	2.062	0.823	2.062	0.823	2.062	0.823	2.062	0.823	2.062	0.823	2.062	0.823	2.062	0.823	2.062
	-1.4	0.025	1.000	0.081	1.081	0.984	2.065	0.984	2.065	0.984	2.065	0.984	2.065	0.984	2.065	0.984	2.065	0.984	2.065	0.984	2.065
	-1.2	0.000	1.000	0.016	1.016	1.000	2.081	1.000	2.081	1.000	2.081	1.000	2.081	1.000	2.081	1.000	2.081	1.000	2.081	1.000	2.081
	-1.0	0.000	1.000	0.000	1.000	1.000	2.081	1.000	2.081	1.000	2.081	1.000	2.081	1.000	2.081	1.000	2.081	1.000	2.081	1.000	2.081
	-0.8	0.000	1.000	0.000	1.000	1.000	2.081	1.000	2.081	1.000	2.081	1.000	2.081	1.000	2.081	1.000	2.081	1.000	2.081	1.000	2.081
	-0.6	0.000	1.000	0.000	1.000	1.000	2.081	1.000	2.081	1.000	2.081	1.000	2.081	1.000	2.081	1.000	2.081	1.000	2.081	1.000	2.081
	-0.4	0.000	1.000	0.000	1.000	1.000	2.081	1.000	2.081	1.000	2.081	1.000	2.081	1.000	2.081	1.000	2.081	1.000	2.081	1.000	2.081
	-0.2	0.000	1.000	0.000	1.000	1.000	2.081	1.000	2.081	1.000	2.081	1.000	2.081	1.000	2.081	1.000	2.081	1.000	2.081	1.000	2.081
	0.0	0.000	1.000	0.000	1.000	1.000	2.081	1.000	2.081	1.000	2.081	1.000	2.081	1.000	2.081	1.000	2.081	1.000	2.081	1.000	2.081
GL-1500m	Log10(μ)																				
	-3.0	0.059	0.059	0.059	0.059	0.059	0.059	0.059	0.059	0.059	0.059	0.059	0.059	0.059	0.059	0.059	0.059	0.059	0.059	0.059	0.059
	-2.8	0.040	0.099	0.058	0.157	0.041	0.198	0.153	0.351	0.153	0.351	0.153	0.351	0.153	0.351	0.153	0.351	0.153	0.351	0.153	0.351
	-2.6	0.043	0.142	0.061	0.203	0.039	0.242	0.039	0.281	0.039	0.320	0.039	0.359	0.039	0.398	0.039	0.437	0.039	0.476	0.039	0.515
	-2.4	0.063	0.205	0.039	0.244	0.060	0.304	0.253	0.557	0.253	0.610	0.253	0.863	0.253	1.116	0.253	1.369	0.253	1.622	0.253	1.875
	-2.2	0.090	0.295	0.107	0.402	0.098	0.500	0.380	0.880	0.380	1.260	0.380	1.640	0.380	2.020	0.380	2.400	0.380	2.780	0.380	3.160
	-2.0	0.141	0.438	0.121	0.559	0.481	1.040	0.481	1.521	0.481	2.002	0.481	2.483	0.481	2.964	0.481	3.445	0.481	3.926	0.481	4.407
	-1.8	0.170	0.607	0.157	0.764	0.638	1.402	0.638	2.040	0.638	2.678	0.638	3.316	0.638	3.954	0.638	4.592	0.638	5.230	0.638	5.868
	-1.6	0.241	0.848	0.174	1.022	0.812	1.834	0.812	2.646	0.812	3.458	0.812	4.270	0.812	5.082	0.812	5.894	0.812	6.706	0.812	7.518
	-1.4	0.131	0.979	0.143	1.120	0.956	2.076	0.956	3.032	0.956	3.988	0.956	4.944	0.956	5.900	0.956	6.856	0.956	7.812	0.956	8.768
	-1.2	0.015	0.994	0.040	1.009	0.994	2.023	0.994	3.017	0.994	4.011	0.994	5.005	0.994	6.000	0.994	7.000	0.994	8.000	0.994	9.000
	-1.0	0.003	0.998	0.003	1.001	0.997	2.000	0.997	3.000	0.997	4.000	0.997	5.000	0.997	6.000	0.997	7.000	0.997	8.000	0.997	9.000
	-0.8	0.001	0.999	0.001	1.000	0.997	2.000	0.997	3.000	0.997	4.000	0.997	5.000	0.997	6.000	0.997	7.000	0.997	8.000	0.997	9.000
	-0.6	0.003	1.000	0.003	1.000	1.000	2.000	1.000	3.000	1.000	4.000	1.000	5.000	1.000	6.000	1.000	7.000	1.000	8.000	1.000	9.000
	-0.4	0.000	1.000	0.000	1.000	1.000	2.000	1.000	3.000	1.000	4.000	1.000	5.000	1.000	6.000	1.000	7.000	1.000	8.000	1.000	9.000
	-0.2	0.000	1.000	0.000	1.000	1.000	2.000	1.000	3.000	1.000	4.000	1.000	5.000	1.000	6.000	1.000	7.000	1.000	8.000	1.000	9.000
	0.0	0.000	1.000	0.000	1.000	1.000	2.000	1.000	3.000	1.000	4.000	1.000	5.000	1.000	6.000	1.000	7.000	1.000	8.000	1.000	9.000



(a) 深度 0 ~ 500m 領域

(b) 深度 500 ~ 1,000m 領域



(c) 深度 1,000 ~ 1,500m 領域

(d) 深度 0 ~ 1,500m 領域

図3.17 深度別に見た動水勾配の頻度分布 (基本ケース)

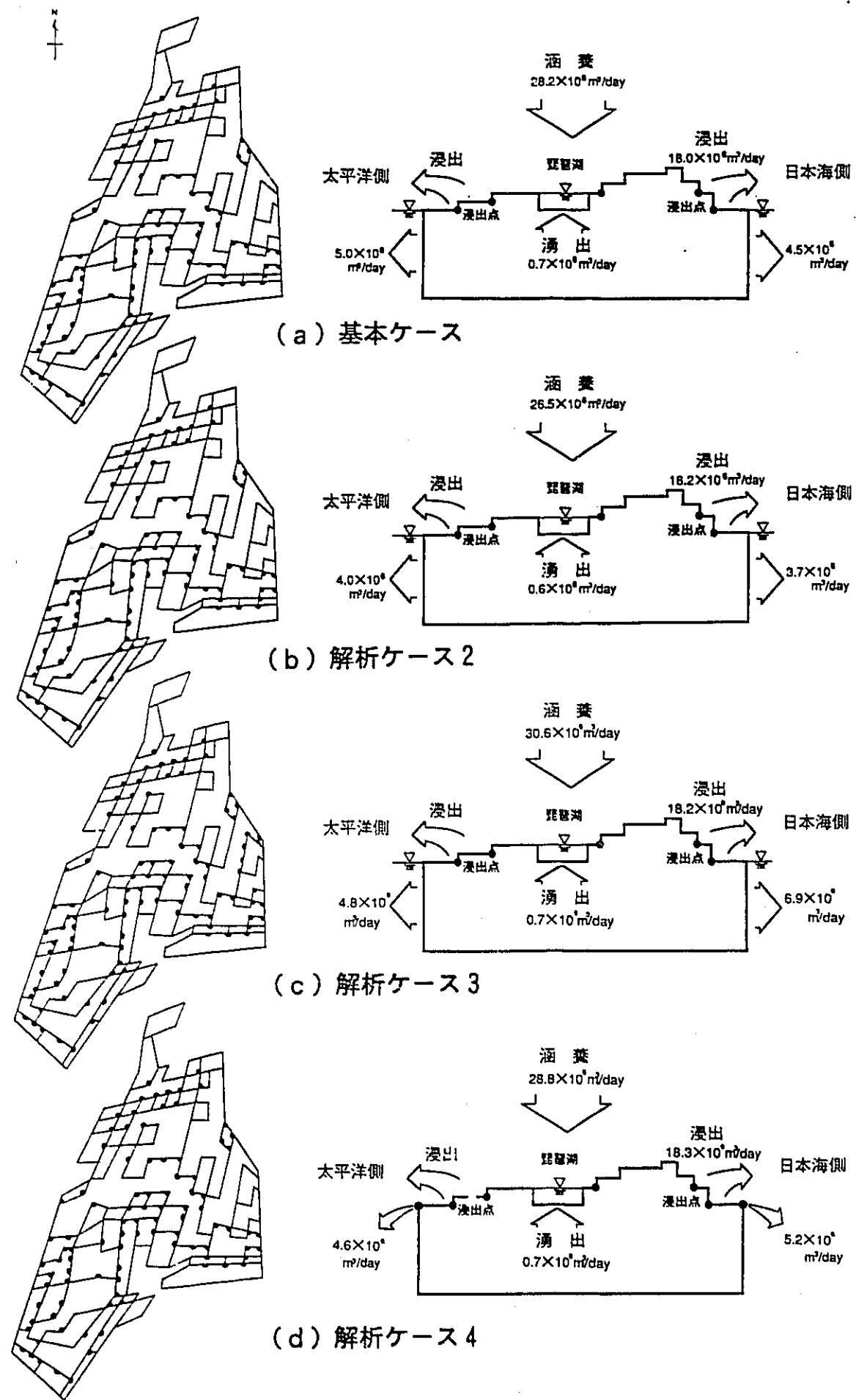


図3.18 湧出点分布と水収支

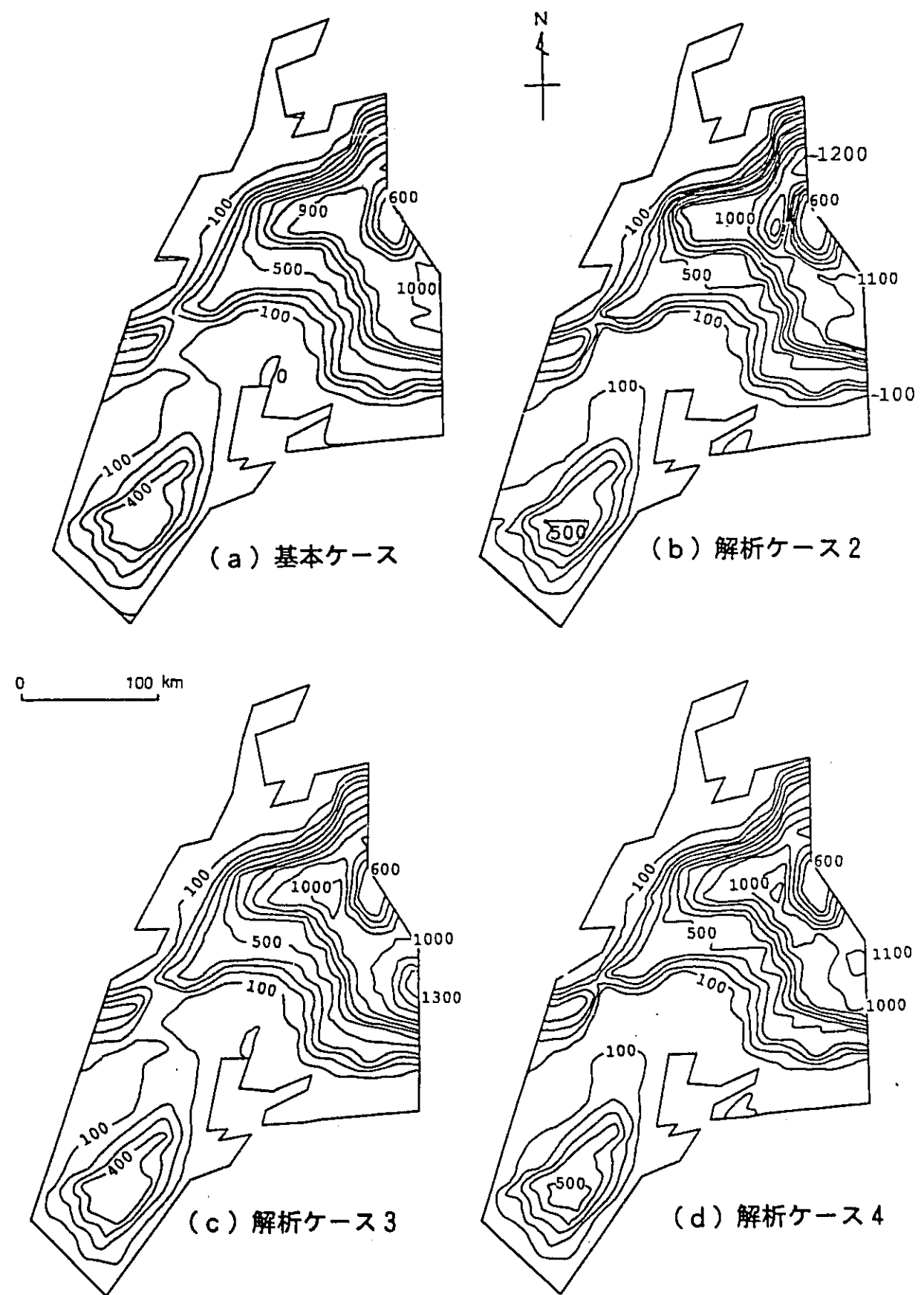


図3.19 4つの解析ケースのピエゾ水頭分布の比較 (標高-1,000m水平面)

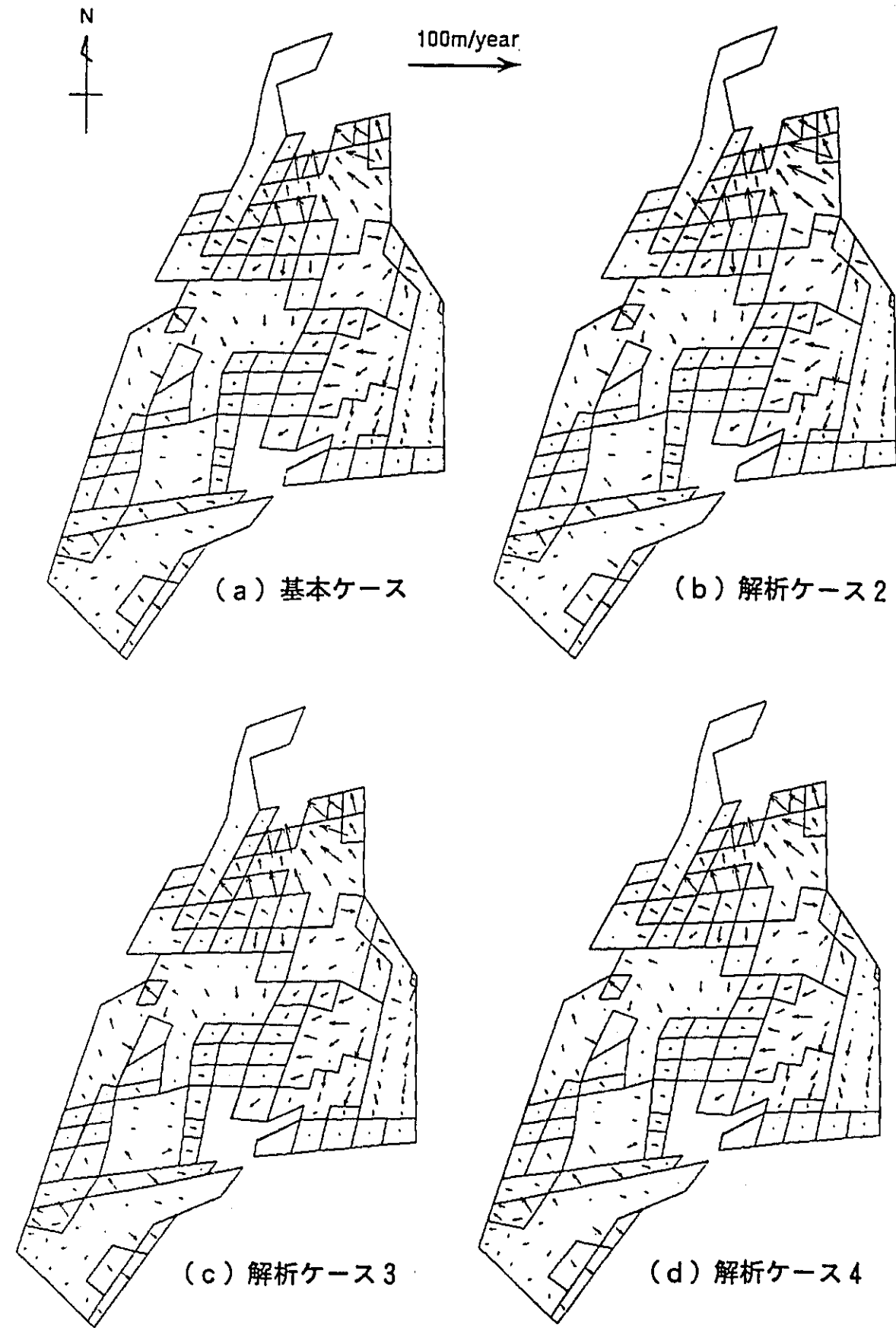


図3.20 4つの解析ケースでの標高-500m水平面におけるダルシー流速

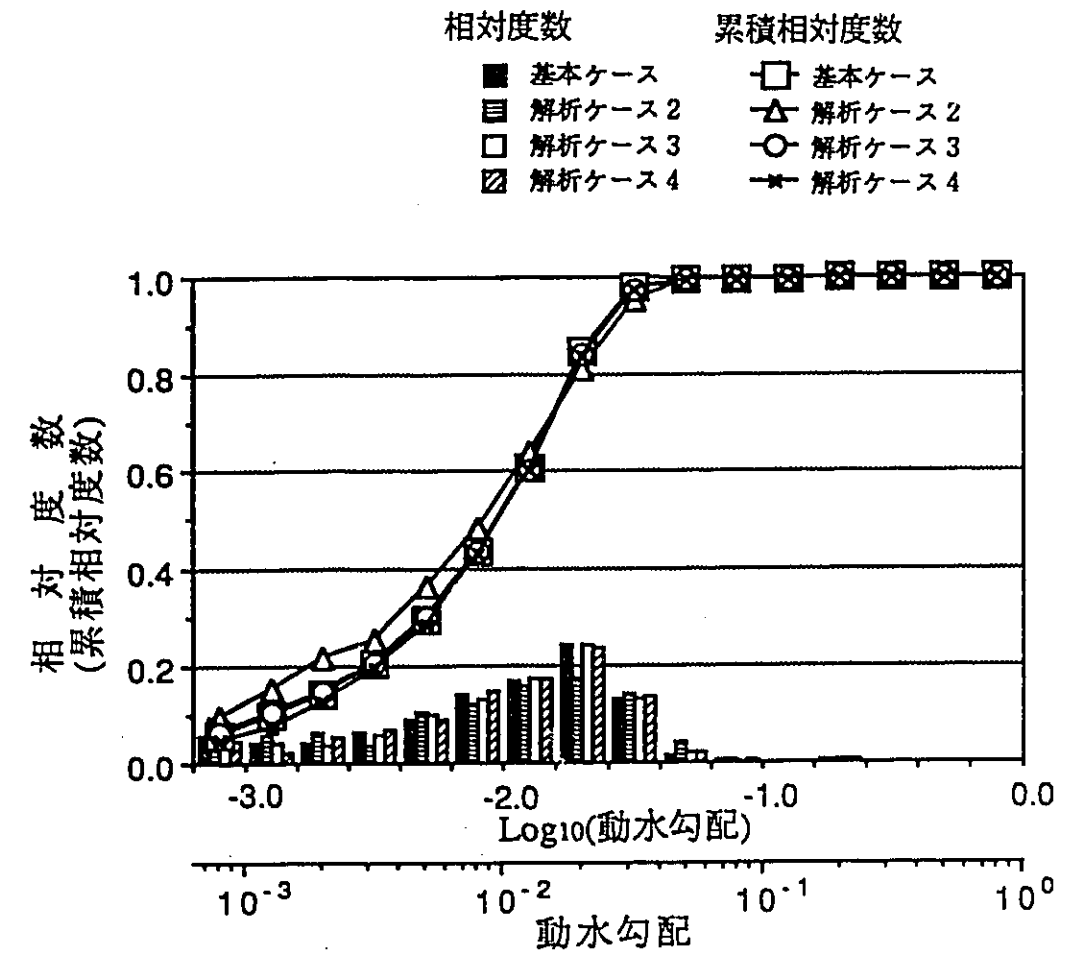
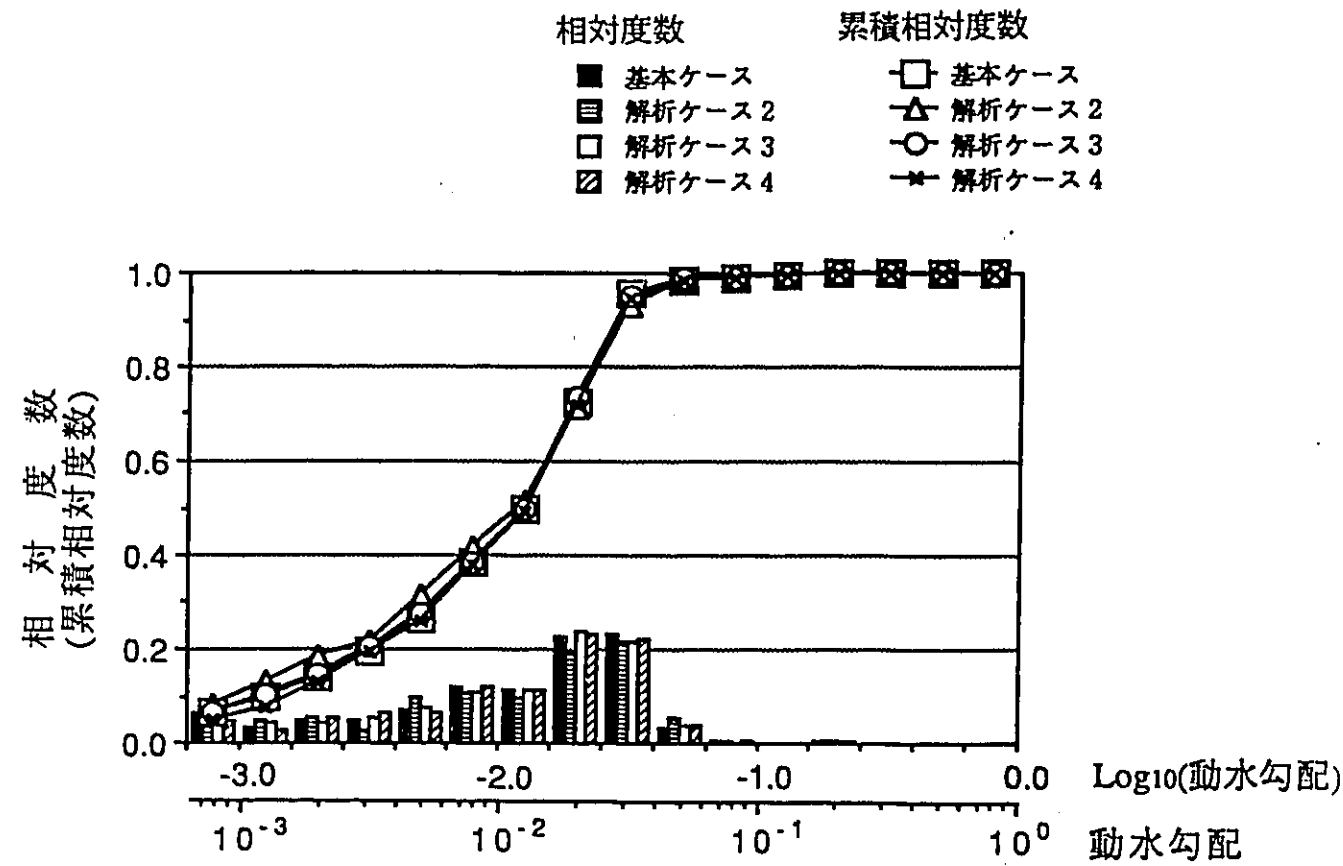
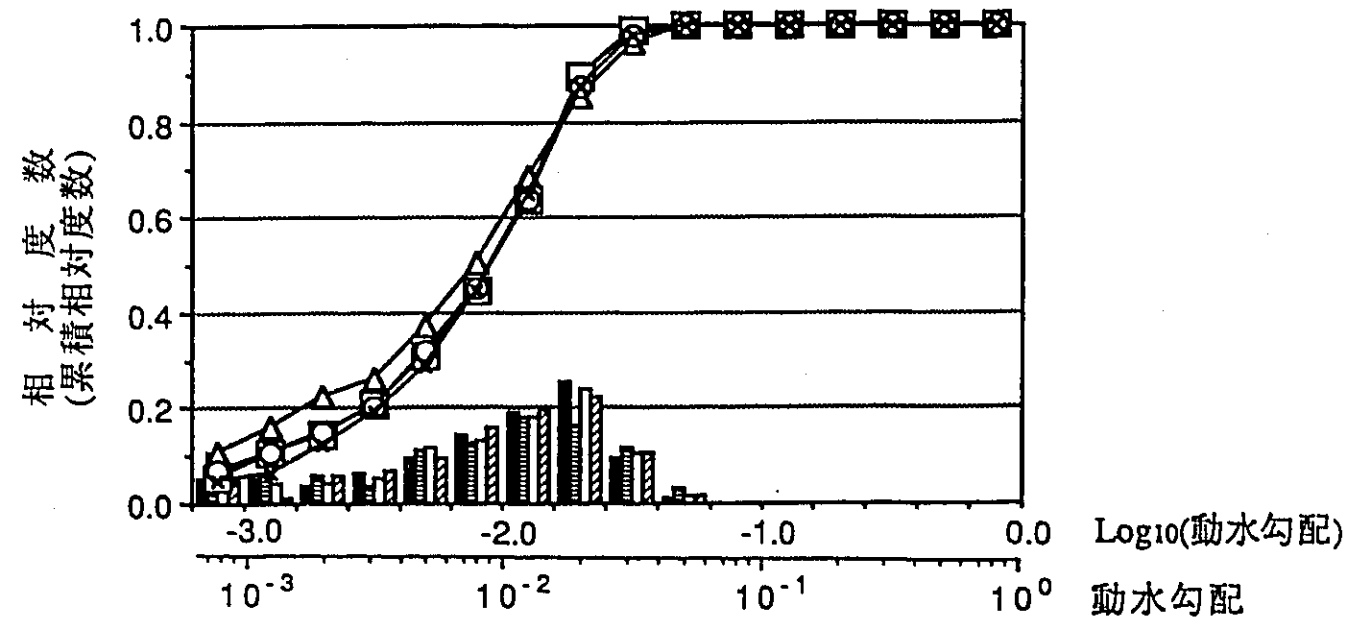


図3.21 解析ケース別に見た動水勾配の頻度分布
いずれのケースも全領域を対象としてある。

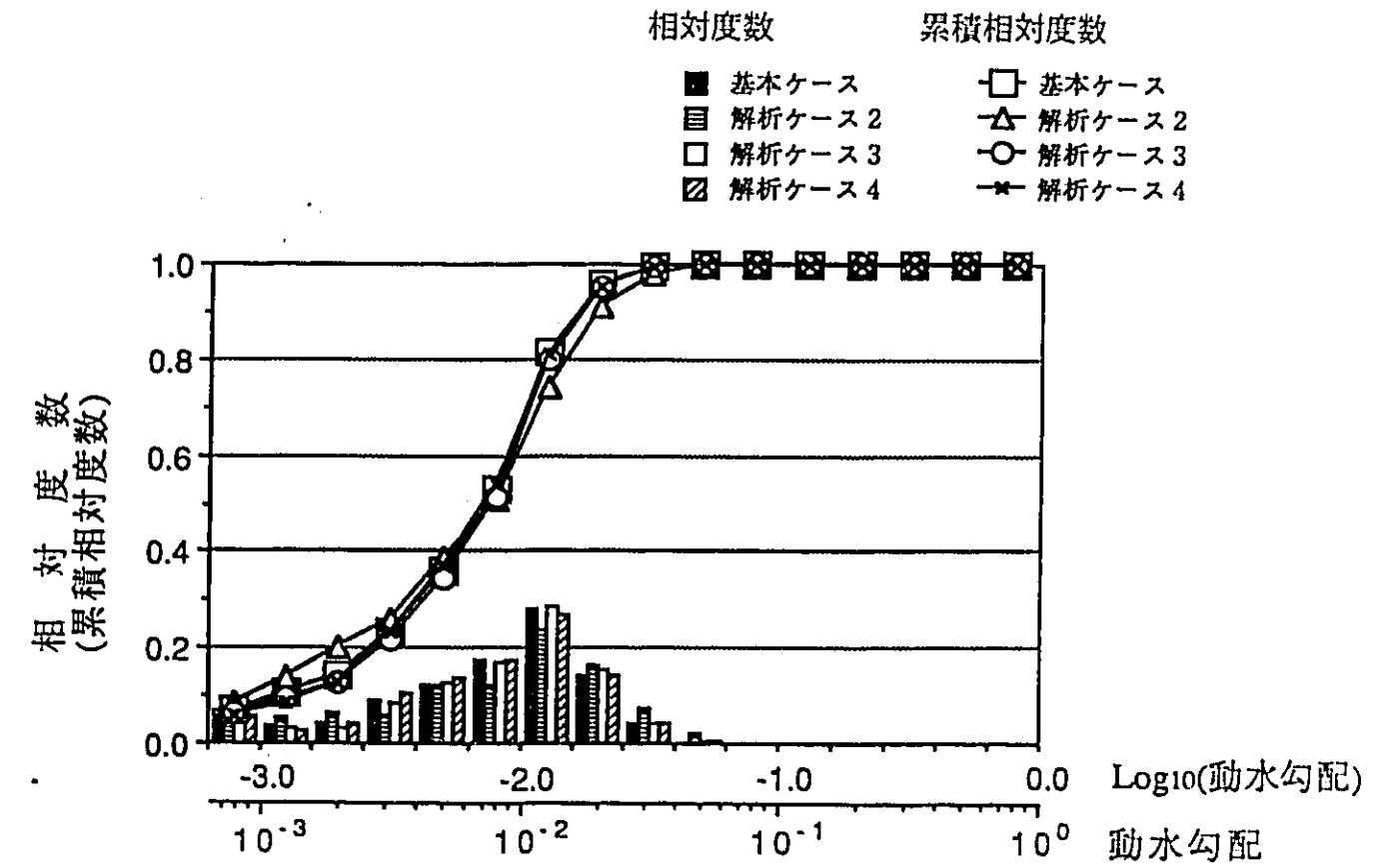


(a) 深度 0 ~ 500m 領域

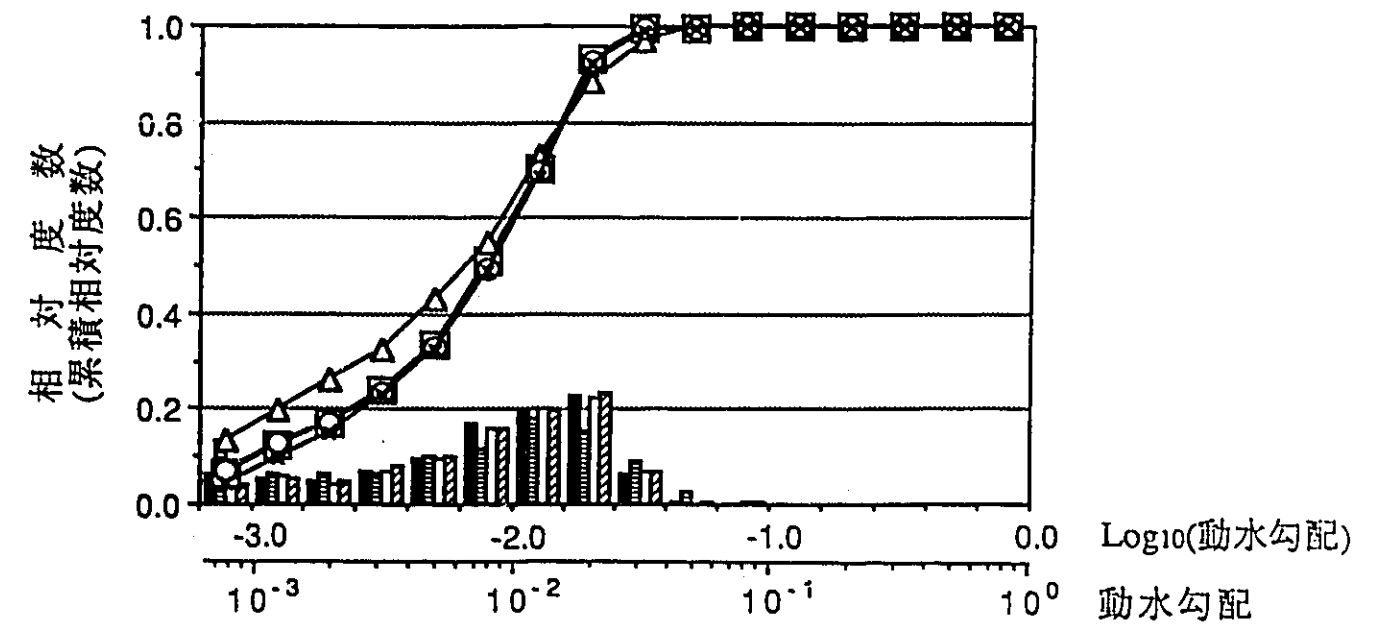


(b) 深度 500 ~ 1,000m 領域

図3.22 深度別に見た4つの解析ケースの動水勾配の頻度分布 - その1



(c) 深度 1,000 ~ 1,500m 領域



(d) 深度 0 ~ 1,500m 領域

図3.22 深度別に見た4つの解析ケースの動水勾配の頻度分布 - その2

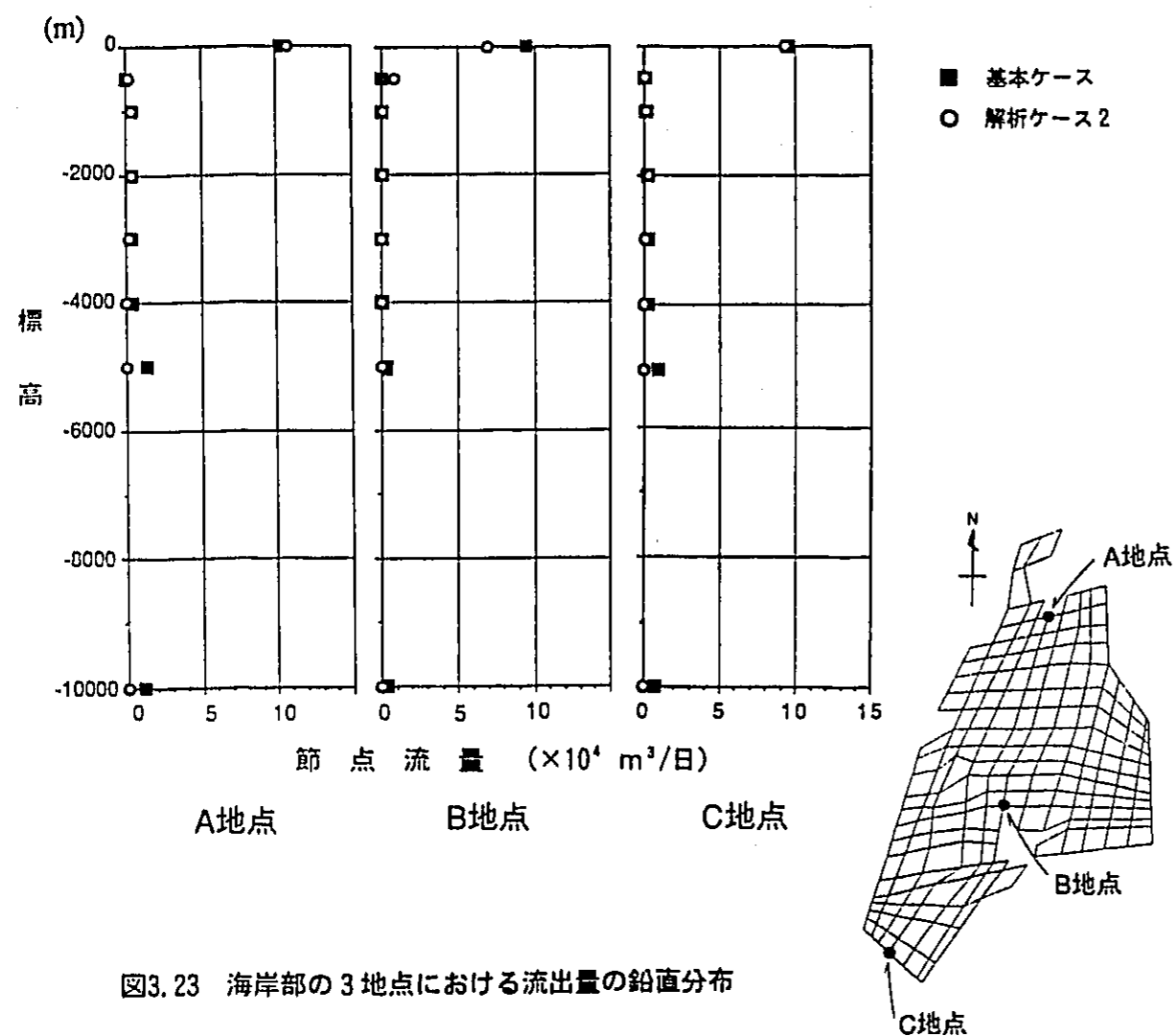


図3.23 海岸部の3地点における流出量の鉛直分布

4. 東濃地域を対象とした地下水流動解析

4.1 解析の目的と特徴

(1) 目的

本解析は、東濃地域の $8 \text{ km} \times 7 \text{ km}$ の領域における地下水流動解析を行い、地下1,000 m までの地下水の流れの概要を把握することを目的とする。

(2) 特徴

本解析の主な特徴は次の点である。

- ① 花崗岩の基盤上に新第三紀以降の堆積物が分布するという日本の典型的な堆積盆の一部を対象とする。
- ② 現地で得られた地質調査結果と水理試験結果を用いて解析を行う。
- ③ 中部日本を対象とした解析の結果を考慮して境界条件を設定する。

4.2 解析領域

解析対象領域は、岐阜県土岐市と瑞浪市の境界付近に位置し、いわゆる土岐・瑞浪盆地の北部にあたる東西約 8 km、南北約 7 km の範囲である (図4.1)。

本領域は中部日本の領域の一部であり、その中央部近くの丘陵に位置する。

4.3 地形・地質概要

本領域周辺には標高300 ~ 400 m の定高性丘陵地・丘陵性山地が広がり、当地域の北方および東方は美濃三河高原に向かって高度を増す。本領域の南縁では土岐川が西~南西に向かって流下し、領域は全体に南に向かって緩く傾斜する。本領域中央部のやや東寄りには、土岐川支流の日吉川による谷地形がほぼ南北に伸びる。

本地域は白亜紀~古第三紀の花崗岩を基盤とし、その上に、現在の土岐・瑞浪盆地を構成する中新統 (瑞浪層群) が分布する。さらにその上の地形的高所には、未固結の鮮新~更新統 (瀬戸層群) が分布する (図4.2)。

4.4 水理地質構造モデルの構築

(1) 地形モデルの構築

対象地域の地形の概略を表すために接峰面図を作成した (図4.1)。接峰面図は2万5千分の1地形図を縦横10等分し、各メッシュ内の最高点の位置と標高を用いて内挿法により50mごとの等高線を引いて作成した。この接峰面図の等高線になるべく沿うように平面図上での要素分割を行った。

各要素の地形面の平均標高は、各要素内における国土数値情報 (建設省国土地理院、1983) 標高データ (KS-110-1) の平均値をもとに算出した (図4.3)。

モデル化にあたって、ほぼ水平な地質境界面の存在する 260m と 200m (後述) および主な尾根部・谷底部の標高である 360, 310, 150m の5つの標高を選び、これらの5つの標高のうち平均標高に最も近いものをもって各要素のモデル上の標高とした (図4.4)。

(2) 地質構造モデルの構築

対象領域内で行った地表踏査および約300本のボーリングコア観察に基づいて岩相・粒度・固結度・風化程度・割れ目等の地質学的特性を明らかにし(図4.5)、地質構造モデルを構築した(図4.6)。モデル化された地質構造の主な特徴は次のとおりである。

- (a) 本領域の基盤花崗岩は、風化および節理の発達によって、上部より、マサ部(厚さ約10m)、シーティング節理卓越部(厚さ約10m)、鉛直方向節理卓越部に分けられる。
- (b) 瑞浪層群は基盤花崗岩を不整合に覆い、領域の南東部において厚く分布する(最大層厚約200 m)。全体にはほぼ水平な地層で、大局的には上方へ細粒化する。下位より、礫岩・粗粒砂岩(土岐夾炭累層下部;花崗岩表面のチャンネルを埋めて分布する)、凝灰岩・凝灰質砂岩(土岐夾炭累層上部;標高150~200m付近)、凝灰質砂岩~泥岩を主体とする地層(明世累層、生伎累層)の順に分布する。
- (c) 瀬戸層群は、礫を主体とした未固結堆積物であり、花崗岩・瑞浪層群を不整合に覆って標高260mより高所に分布する。

(3) 岩石の透水性の検討

東濃地域に分布する岩石の透水性は極めて低く、従来の手法の測定レンジを越えているものもある。このため動燃事業団では、難透水性岩盤を対象とする原位置透水試験装置として、動燃式低水圧制御水理試験装置(柳澤ほか, 1989)および低圧ルジオン水理試験装置(尾方ほか, 1992)を開発し、本領域内の試錐孔を利用した透水試験を行った。また、水理学的特性を鉛直方向に連続的に捉えるため、透水係数と高い相関のある比抵抗値の測定も行った(尾方ほか, 1992)。

これらの調査結果より、次のことが明らかになった。

- a. 水理地質学的には、花崗岩は風化層とそれ以下の部分の2つに分けられる。
- b. 凝灰岩や砂岩・泥岩は比抵抗値が低く透水性も低い(透水係数 10^{-8} cm/secオーダー)。礫岩を伴う部分は透水性が高く(10^{-6} ~ 10^{-5} cm/secオーダー)、岩相・比抵抗値・透水係数の水平方向の変化が大きい。
- c. 花崗岩のマサ部やシーティング節理卓越部の風化部分は透水性が高い(最大 10^{-5} cm/secオーダー)。

また、地下水の賦存量・滞留時間を表すと考えられている渇水期の流量(流出高)および水質を調査した。その結果、瀬戸層群の分布する流域では渇水期の流出高が大きく、電気伝導度は低いことがわかった(図4.7)。このことから、瀬戸層群は貯留層としての役割をなし、その中では地下水の流れが比較的速いことが推定された。

(4) 水理地質構造モデルの構築

地形モデルおよび地質構造モデルを基本とし、水理学的特性および水文学的特性を考慮して水理地質構造モデルを構築した(図4.8)。水理地質構造モデルでは7つの水理地質ユニットを設定した。各ユニットの平均的な透水係数と主な岩相および分布特性を表4.2

に示す。本モデルの主な特徴は、次のとおりである。

- a. 花崗岩最上部には、高透水性の風化層(ユニット6)が分布する。
- b. 花崗岩の直上には高透水性の礫岩(ユニット5;土岐夾炭累層の最下部に相当)が分布する。この礫岩は基盤表面のチャンネル部に分布する。
- c. 標高150~200 mの間には、難透水性の凝灰質岩(ユニット3;土岐夾炭累層上部に相当)がほぼ水平に分布する。
- d. 標高260m以上の場所には、高透水性の未固結堆積物(ユニット1;瀬戸層群に相当)が分布する。

こうして構築した水理地質構造モデルを解析モデルとした。モデルは、6面体8節点の要素1327個よりなり、節点数は1733である。

4.5 解析条件

(1) 不飽和特性

不飽和特性に関しては、飽和度と相対透水係数の関係および飽和度と圧力水頭の間関係を図4.9に示すように設定した。

(2) 境界条件

本解析の境界条件を図4.10に示す。

a) 上部境界条件

上部境界条件のうち地中への涵養量は、領域のほぼ中央部に位置する流域(約0.54 km²)で1989年4月~1990年3月に測定された降水量・河川流量および同流域内の気象観測データよりペンマン法で求めた蒸発散量を用いて算出した(中島ほか, 1991):

$$\begin{aligned} \text{涵養量} &= \text{降水量} - \text{蒸発散量} - \text{河川流量} \\ &= 1944 - (0.7 \times 630.8) - 1294.9 \\ &= 207.5 \text{ mm/年} \\ &= 0.57 \text{ mm/日} \end{aligned}$$

この値を全解析領域に一様に与えた。

地表の節点には、飽和状態(圧力水頭が正値をとる場合)には表面流出を生じる自由浸出条件を設定した。

b) 側方境界条件

前述の中部日本を対象とした解析では、ピエゾ水頭分布は領域の大局的な地形に調和するという結果が得られている。そこで本解析においては、対象領域周辺の地形を考慮して以下のように側方境界条件を与えた。

本解析領域周辺の地形は全体に南へ傾斜している。このため、東側および西側境界は不透水境界とし、北側および南側境界には北から南へ向かって勾配をもつような定水位条件を設定した。ここで、本領域内における地下水位は地下10m内外の深さにあることが観測結果よりわかっているため、北側および南側の境界には表面より10m下に定水位条件を設定した。この設定によると、北側境界の地下水位は南側境界よりも

高い位置にあるため、表層では北から南へ向かって平均約0.02の動水勾配があることとなる。

c) 下部境界条件

中部日本を対象とした解析結果からは、地下深部ではほぼ静水圧であり、地下水の鉛直方向の流れはほとんどないことが示されている。よって本解析では、下部境界は不透水境界とした。

4.6 解析結果

(1) ピエゾ水頭、ダルシー流速

ピエゾ水頭を図4.11に、ダルシー流速を図4.12に示す。

地表部でのピエゾ水頭の分布(図4.11(a))を見ると、ピエゾ水頭は細かく変化し、コンター線が密になっている部分もある。これは、モデル標高分布(図4.4)に示された尾根・谷などの地形に沿っている。

これに対し深度0、-500、-1000 mにおけるピエゾ水頭分布は、いずれの深度においても北部で高く南へ緩く低下する単調な傾向を示し(図4.11(b)、(c)、(d))、地下水はほぼ真南に向かって流れることが示されている(図4.12)。このことは、本領域周辺の地形が大局的に南下がりを示すことに調和するものである。

南北断面のピエゾ水頭分布を見ると(図4.11(e))、北側境界付近を除いて、標高0 m以深の深部ではコンター線がほぼ鉛直に向き(すなわち静水圧分布を示し)、地下水は南へ向かってほぼ水平に流れるという結果になっている。北側境界付近では地下水が下向きに流れることが示され、涵養域であることがわかる。東西方向のピエゾ水頭断面(図4.11(f))では、南北方向に比べてコンター線の密度が低く、東西方向の動水勾配が極めて小さいことが示されている。

(2) 動水勾配の頻度分布

動水勾配の頻度分布を図4.13、図4.14、表4.2に示す。動水勾配は要素ごとに算定し、各要素の体積を度数として表した。それらを全体の体積で除して相対度数とした。

解析領域全体の動水勾配(図4.13、表4.2)は、約0.02となる場所が最も多い。また、領域内の大部分(96%以上)において0.04を越えない。

深度別の動水勾配の頻度分布を図4.14および表4.2に示す。対象領域は、深度0~500 m(地表下500mまで)、深度500~1,000m、深度1,000~1,500m、深度0~1,500mの4領域である。深度0~500mではピークは領域全体の場合と同様に0.02付近にあるが、0.04以上の部分も約20%あり、ばらつきが大きい。深度500~1,000mおよび1,000~1,500m領域でも分布のピークは同様に0.02付近にあるものの、大部分が0.01~0.04の間に入り、0.04を越える部分はほとんどない(1%未満)。このように、深度500m以深での動水勾配分布は500m以浅を対象とした場合よりも全体に小さくなる。

深度0~1,500mを対象とした場合、0.04を越える部分が約7%あるが、この大部分が深度500m以浅にあることがわかる。

(3) 水収支と浸出点分布

図4.15には流量の解析結果より得られた解析領域の水収支と浸出点の分布を示す。

6,300 m³/日(約2.3×10⁶ m³/年)の水が地表へ浸出し、南側境界からはこの約4倍の水が地下流出することが示されている。

また、浸出点の分布を見ると、南部および東部の斜面下部に多いことがわかる。

4.7 東濃地域を対象とした解析のまとめ

以上の東濃地域を対象とした解析の結果は、次のようにまとめられる。

- ① 表層付近の地下水の流れは局所的な地形に沿ったものとなる。
- ② 深度500m以深の深部地下水の流れは、領域全体の大局的な地形を反映したのものとなる。
- ③ 深度500m以深における地下水圧分布は、ほぼ静水圧分布を示す。
- ④ 動水勾配は全領域の96%以上の部分で0.04を越えない。
- ⑤ 深度500m以深での動水勾配は、それ以浅に比べて小さくなる。

4.8 解析結果の妥当性の検討

本領域では、試錐孔を用いて多深度におけるピエゾ水頭の測定(MPシステムによる測定)が行われており、少なくとも地下200m付近までは静水圧分布をしていることがわかっている(図4.16)。また、地下1,000m付近での間隙水圧測定においても同様のピエゾ水頭が示され、地下水圧はおよそ静水圧分布であると推定されている。これらの原位置調査結果は、地下深部の地下水圧はほぼ静水圧分布を示すという本解析の結果と調和的であり、本解析の妥当性を示唆するものと考えられる。

4.9 中部日本の解析結果との比較

中部日本および東濃地域の解析結果を比較し、スケールの異なる2つの領域を対象とした場合の解析結果の類似点と相違点を述べる。

中部日本・東濃地域いずれのスケールにおいても、地表付近の一部を除いて、鉛直方向のピエゾ水頭の変化は極めて小さく、ほぼ静水圧分布であることが示されている。

動水勾配分布の解析結果を見ると、中部日本・東濃地方のいずれにおいても動水勾配が0.04を越えるのはそれぞれの領域内の数%未満の部分であり、対象領域の大きさによる顕著な違いは現れていない。しかし、動水勾配分布を深度500m以浅で比較すると(図3.17および図4.14)、東濃地域では0.04以上となる部分が約20%あり、中部日本の5~7%に比べて大きな値を示す。この理由として、東濃地域が丘陵部にあたり地形勾配の大きな部分であることが考えられる。また、東濃地域の解析ではより細かなメッシュ分割を行っているため、中部日本のモデルでは表現しきれない細かな起伏までもモデル化されて大きな動水勾配が算出されたことも考えられる。

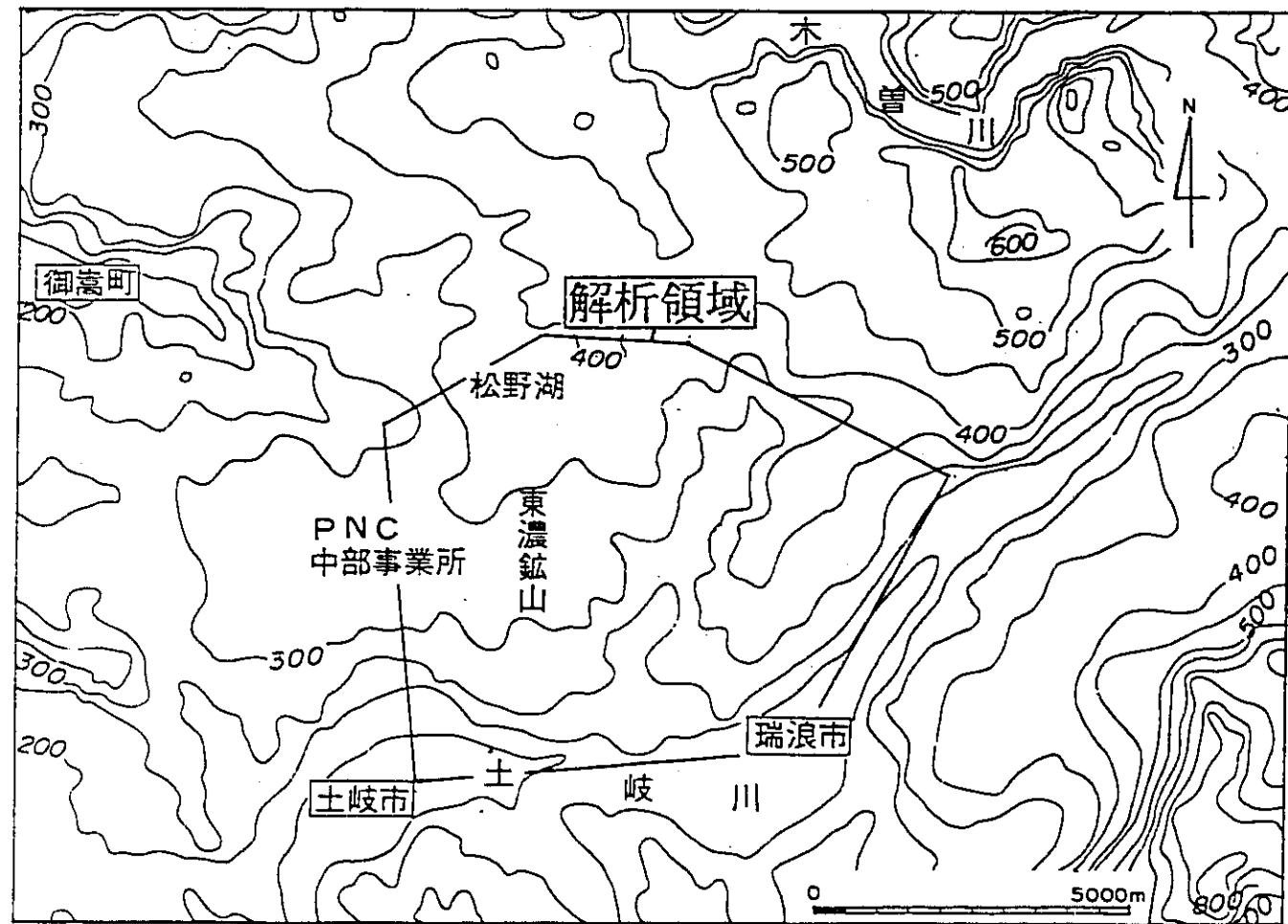


図4.1 東濃地域の接峰面図と解析領域

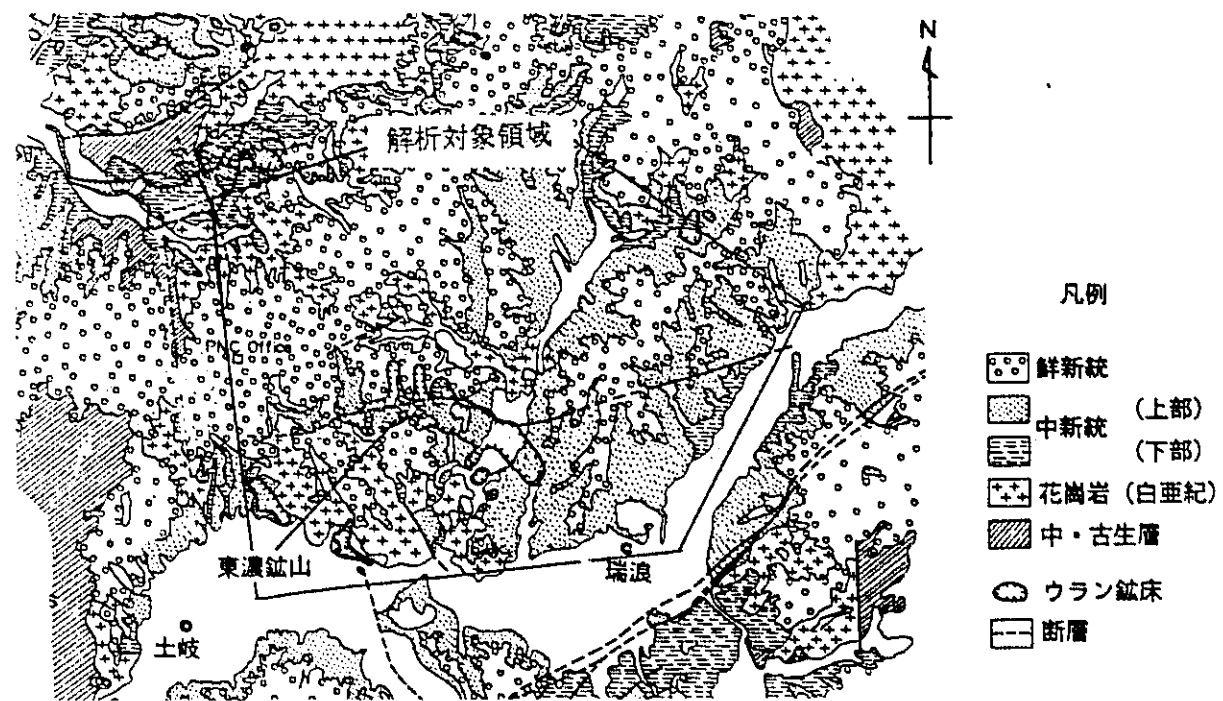


図4.2 東濃地域の地質図

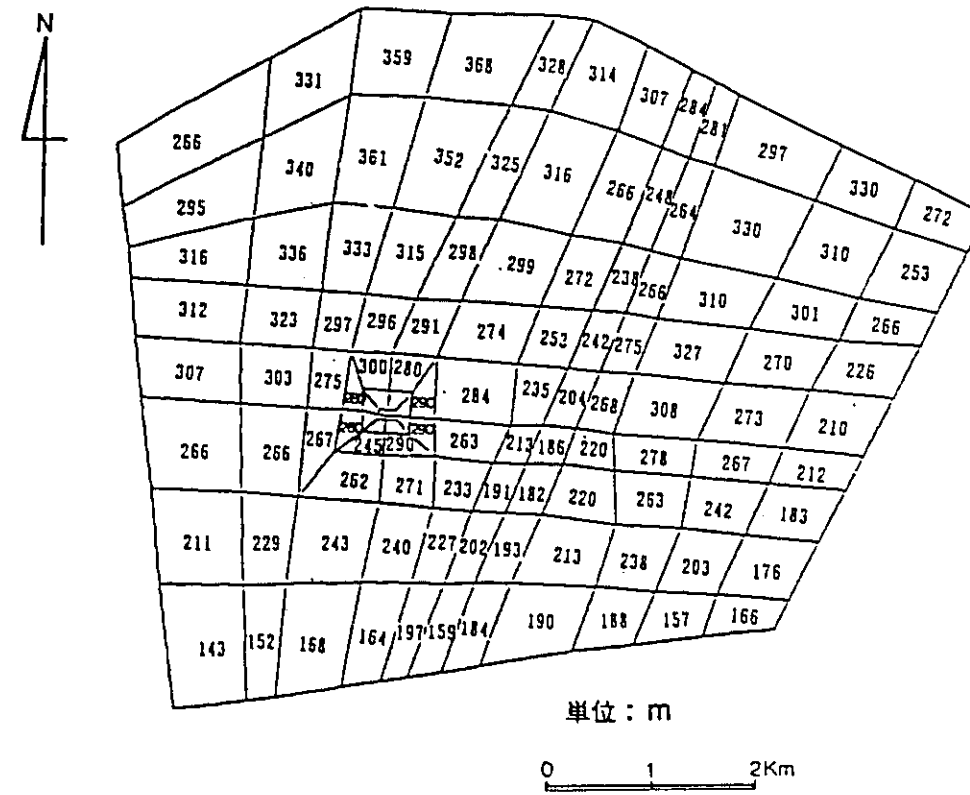


図4.3 各要素の平均標高

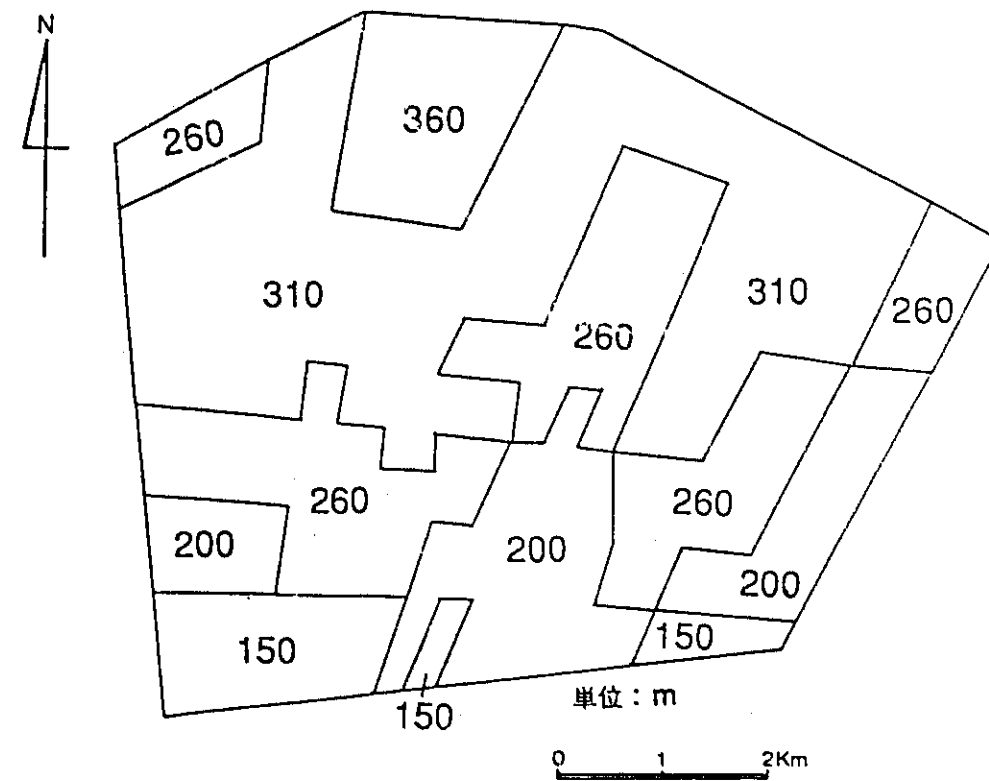


図4.4 モデル上の標高

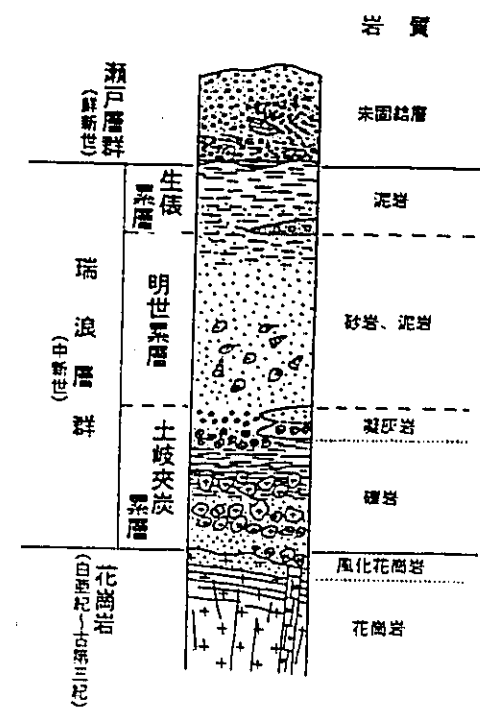


図4.5 東濃地域の層序の概略

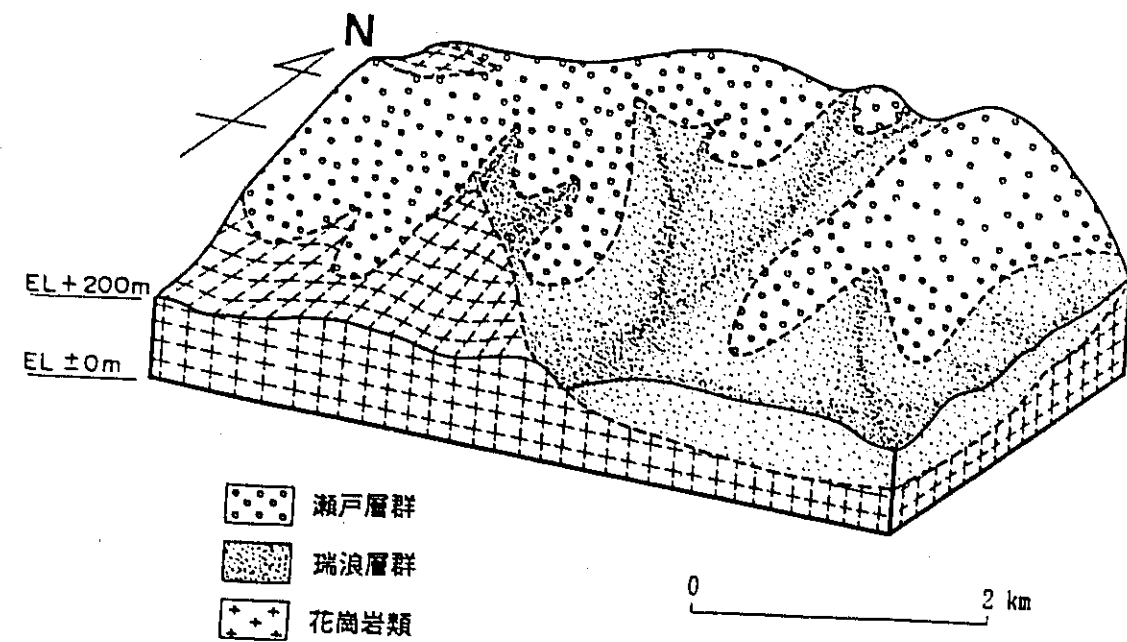
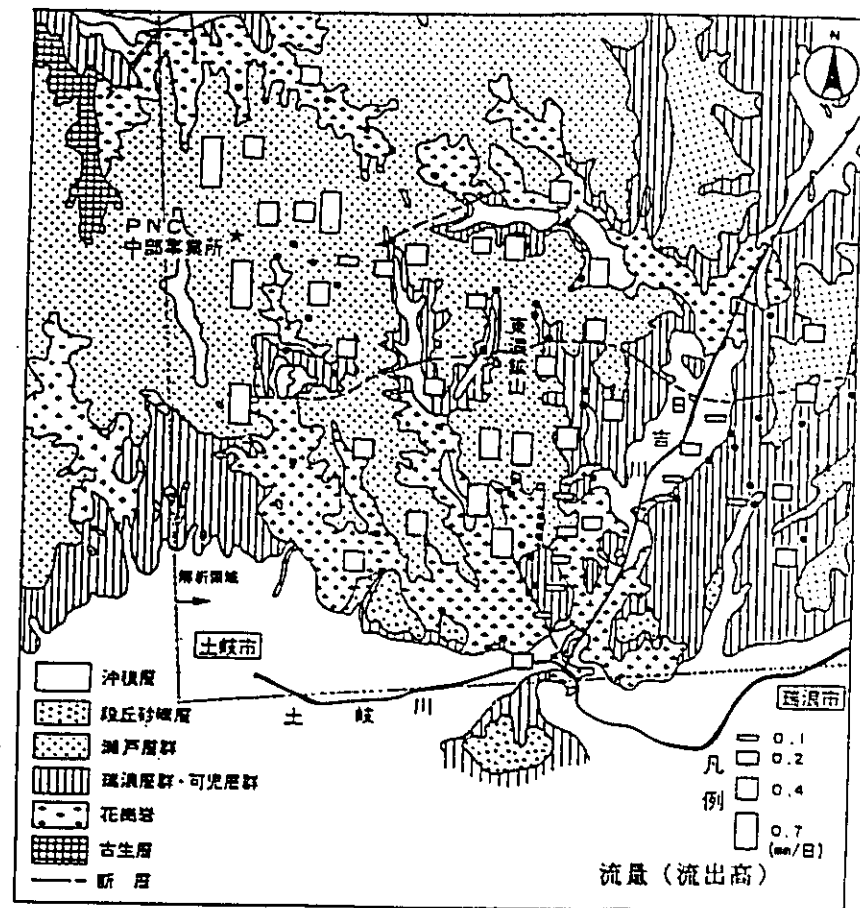


図4.6 東濃地域の地質構造モデル

A. 渇水期の流量



B. 渇水期の電気伝導度

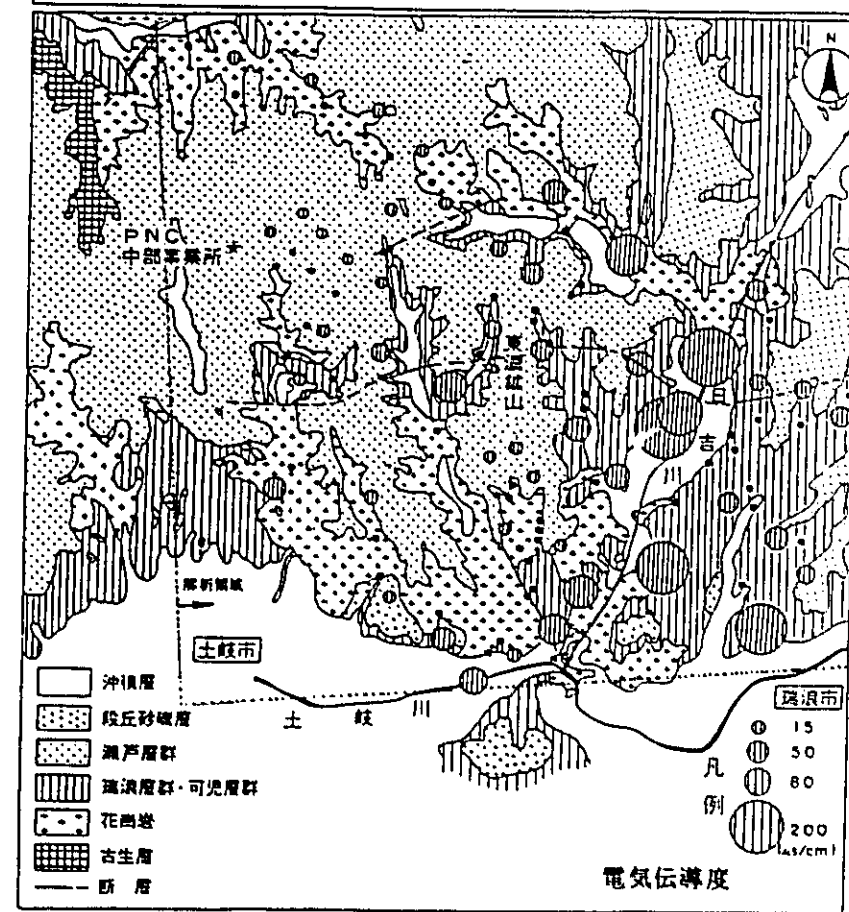


図4.7 渇水期の流量 (流出高) と電気伝導度

表4.1 水理地質ユニットの区分

水理地質ユニット	透水係数 (cm/s)	岩相
ユニット1	1.0×10^{-4}	未固結堆積物
ユニット2	1.9×10^{-6}	砂岩 (中～粗粒)
ユニット3	5.4×10^{-8}	砂岩 (凝灰質, 細～中粒)
ユニット4	2.1×10^{-6}	礫岩 (細～中粒)
ユニット5	6.6×10^{-5}	礫岩 (中～粗粒)
ユニット6	2.4×10^{-5}	風化花崗岩
ユニット7	6.3×10^{-6}	花崗岩

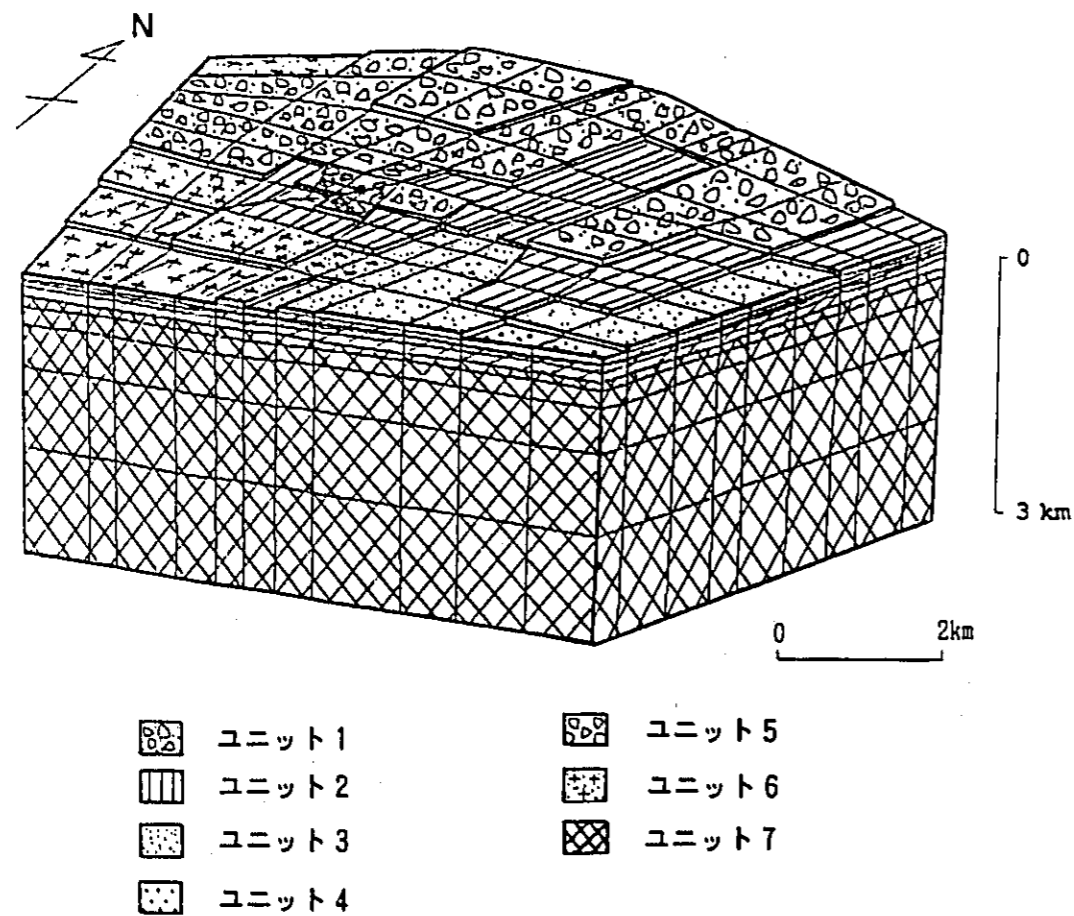


図4.8 東濃地域の水理地質構造モデル

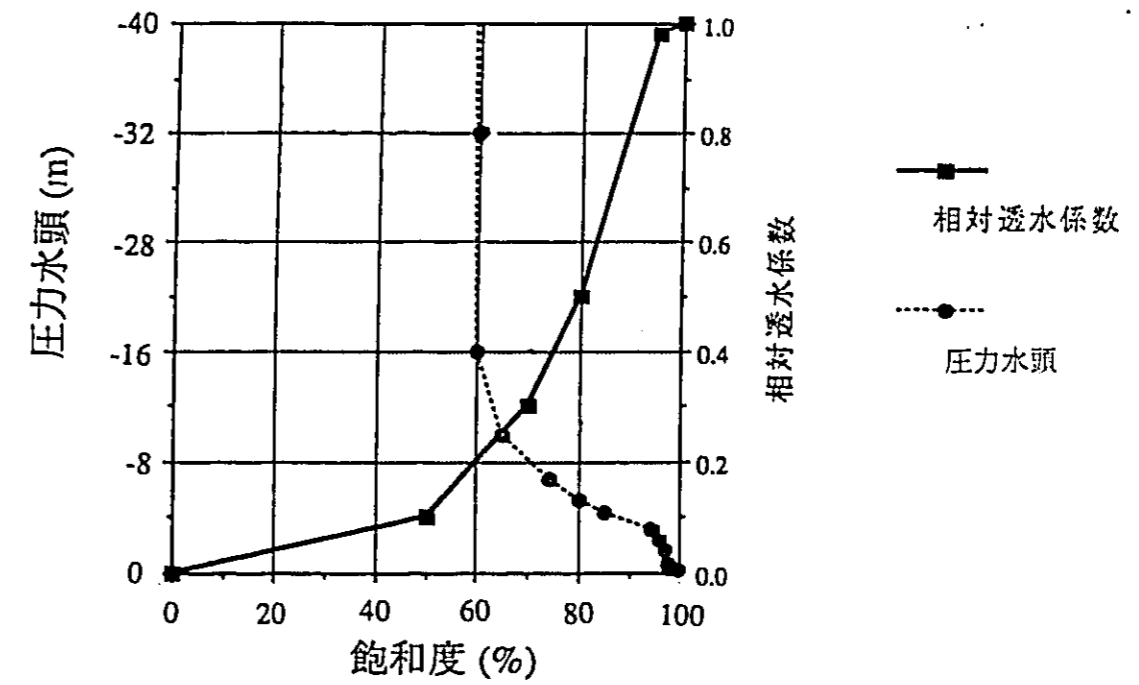


図4.9 本解析で用いた飽和度と相対透水係数の関係および飽和度と圧力水頭の関係

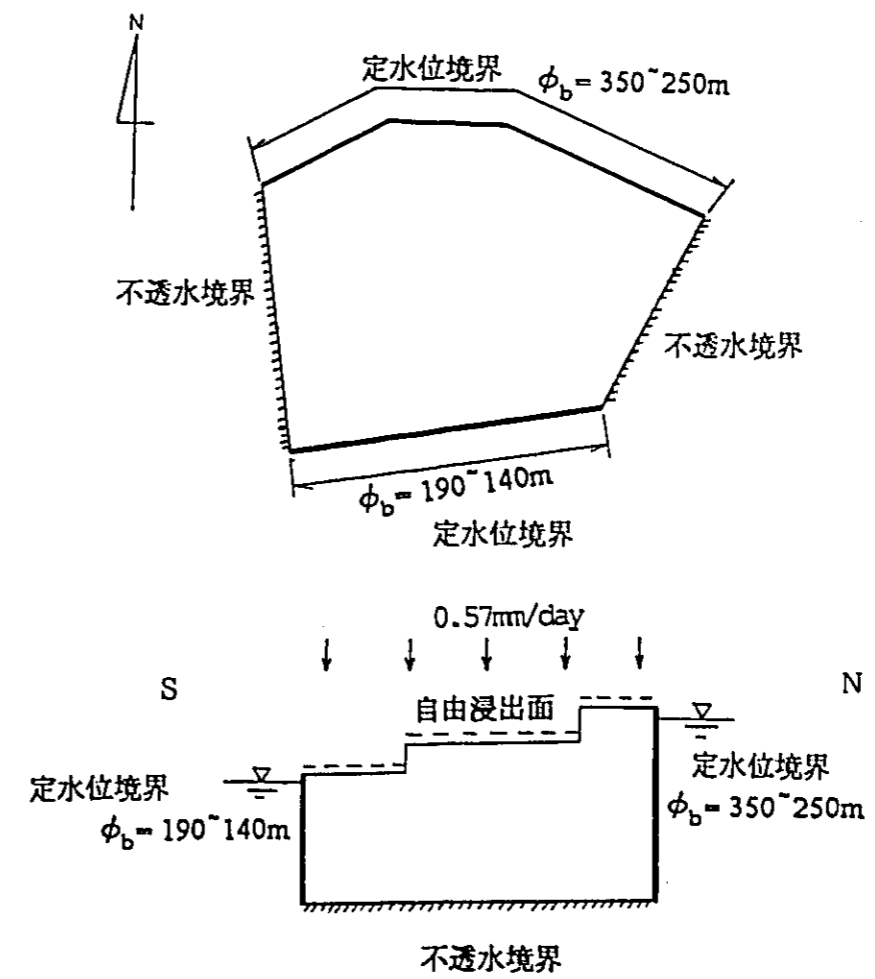


図4.10 境界条件

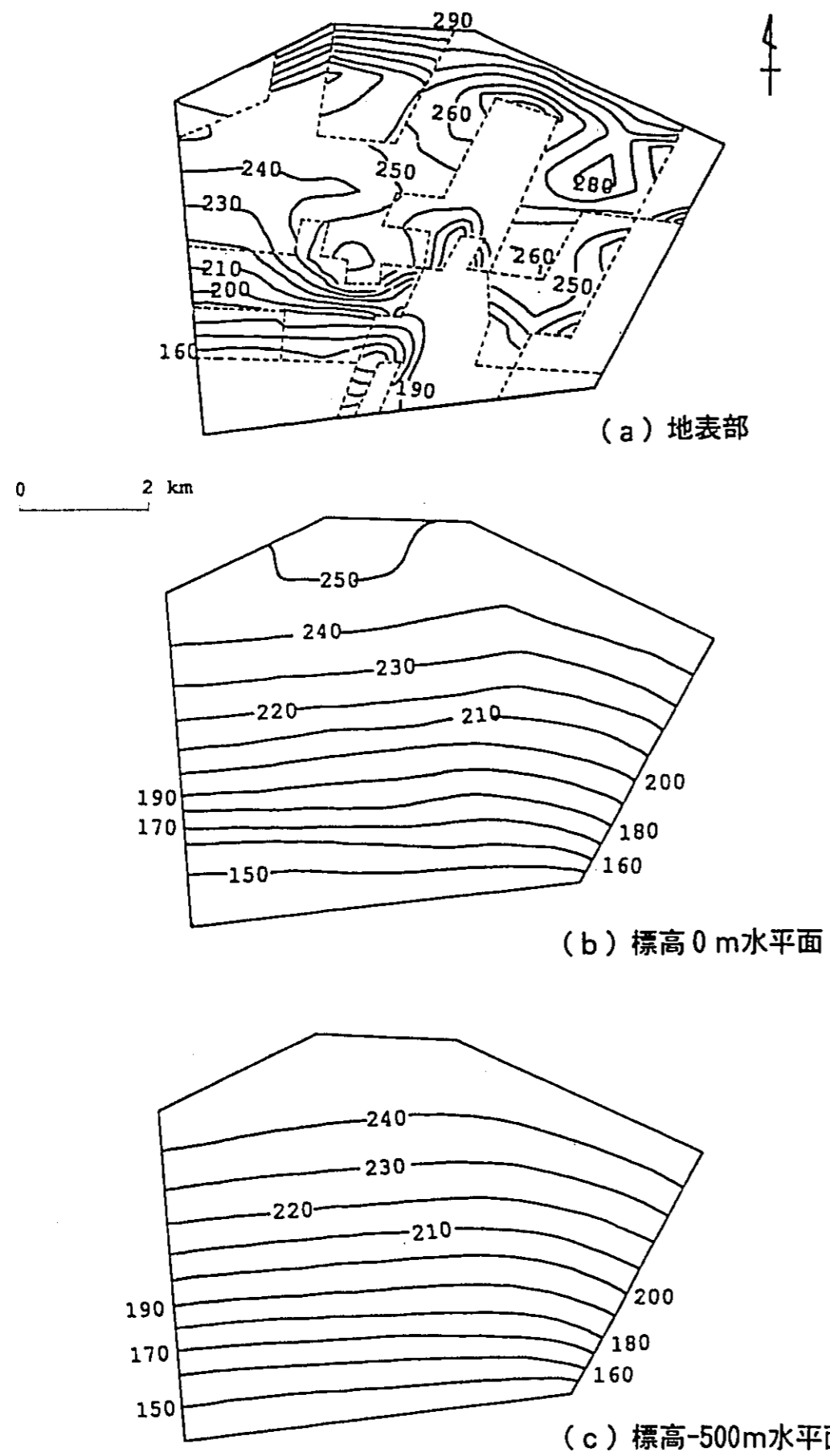


図4.11 ピエゾ水頭の計算結果 (その1)

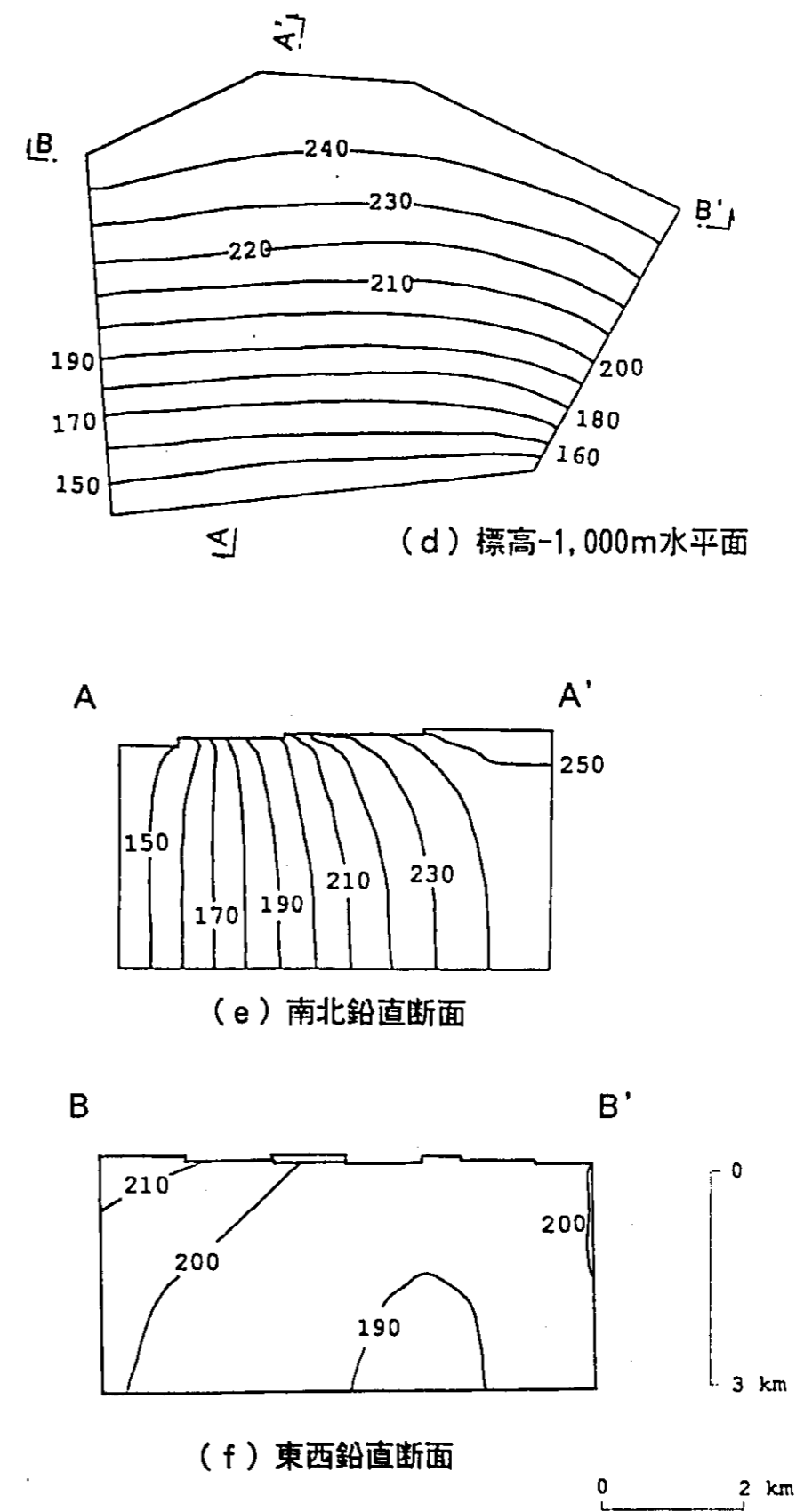


図4.11 ピエゾ水頭の計算結果 (その2)

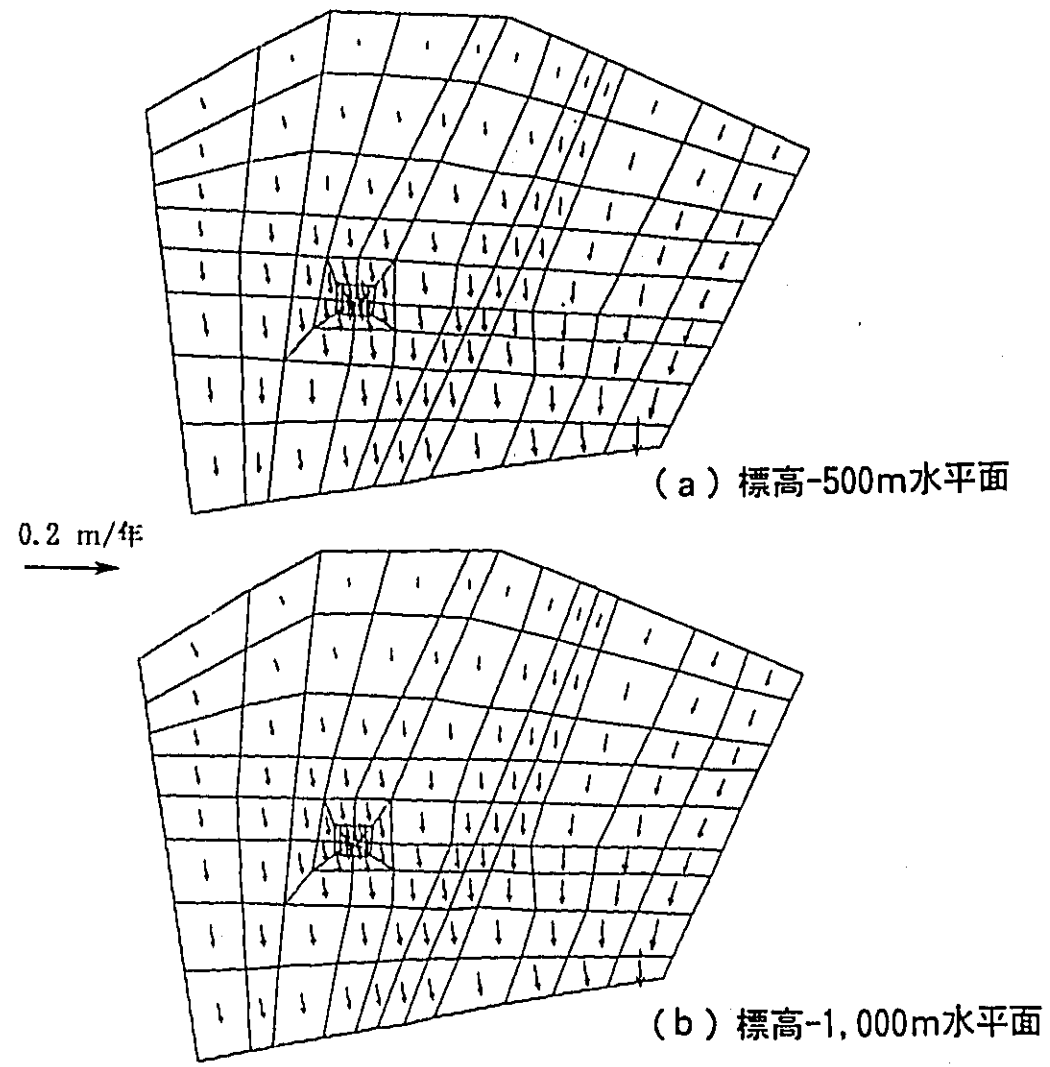


図4.12 ダルシー流速の計算結果

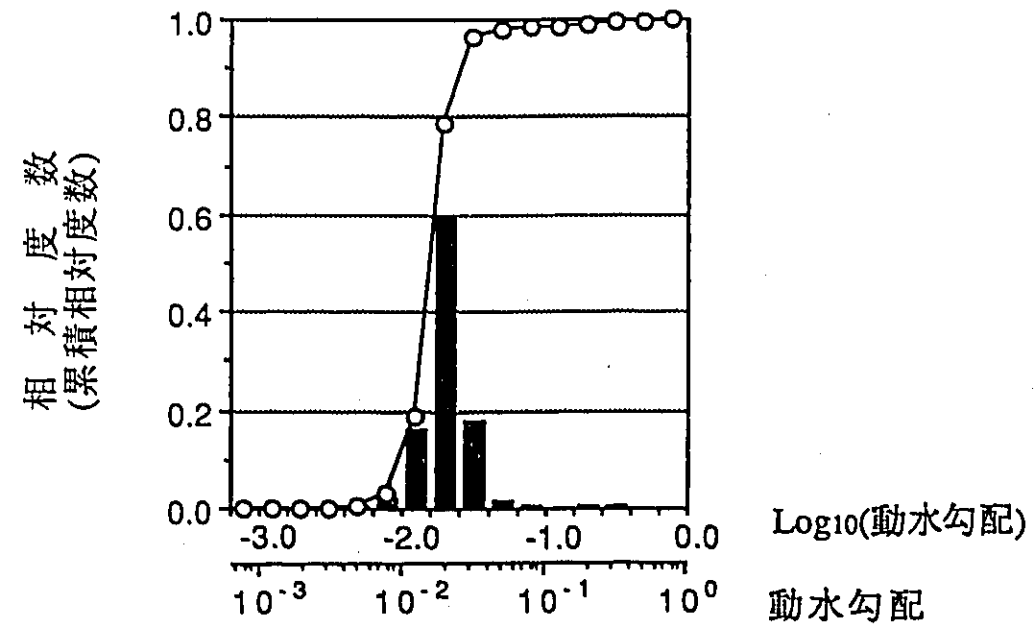


図4.13 全領域を対象とした動水勾配の頻度分布

表4.2 東濃地域における動水勾配の頻度分布

[Log ₁₀ (g)]	全領域		地床-GL-500m		GL-300-1000m		GL-1000-1500m		GL-1500m以深		GL-0-1500m	
	相対度数	累積相対度数	相対度数	累積相対度数	相対度数	累積相対度数	相対度数	累積相対度数	相対度数	累積相対度数	相対度数	累積相対度数
-3.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
-2.8	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
-2.6	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
-2.4	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
-2.2	0.007	0.007	0.007	0.007	0.008	0.029	0.029	0.008	0.008	0.000	0.000	0.000
-2.0	0.022	0.029	0.048	0.056	0.044	0.073	0.073	0.042	0.042	0.006	0.006	0.015
-1.8	0.161	0.190	0.091	0.147	0.173	0.246	0.246	0.167	0.176	0.006	0.006	0.042
-1.6	0.595	0.786	0.344	0.491	0.475	0.721	0.721	0.612	0.696	0.182	0.144	0.200
-1.4	0.178	0.984	0.303	0.794	0.273	0.994	0.994	0.174	0.118	0.877	0.477	0.677
-1.2	0.017	0.981	0.080	0.874	0.006	1.000	1.000	0.006	0.005	1.000	0.250	0.928
-1.0	0.003	0.984	0.019	0.893	0.000	1.000	1.000	0.000	0.000	1.000	0.031	0.956
-0.8	0.002	0.986	0.013	0.906	0.000	1.000	1.000	0.000	0.000	1.000	0.006	0.964
-0.6	0.003	0.989	0.021	0.927	0.000	1.000	1.000	0.000	0.000	1.000	0.004	0.969
-0.4	0.006	0.995	0.038	0.966	0.000	1.000	1.000	0.000	0.000	1.000	0.007	0.976
-0.2	0.002	0.997	0.016	0.981	0.000	1.000	1.000	0.000	0.000	1.000	0.013	0.989
0.0	0.002	0.999	0.019	1.000	0.000	1.000	1.000	0.000	0.000	1.000	0.005	0.994
											0.006	1.000

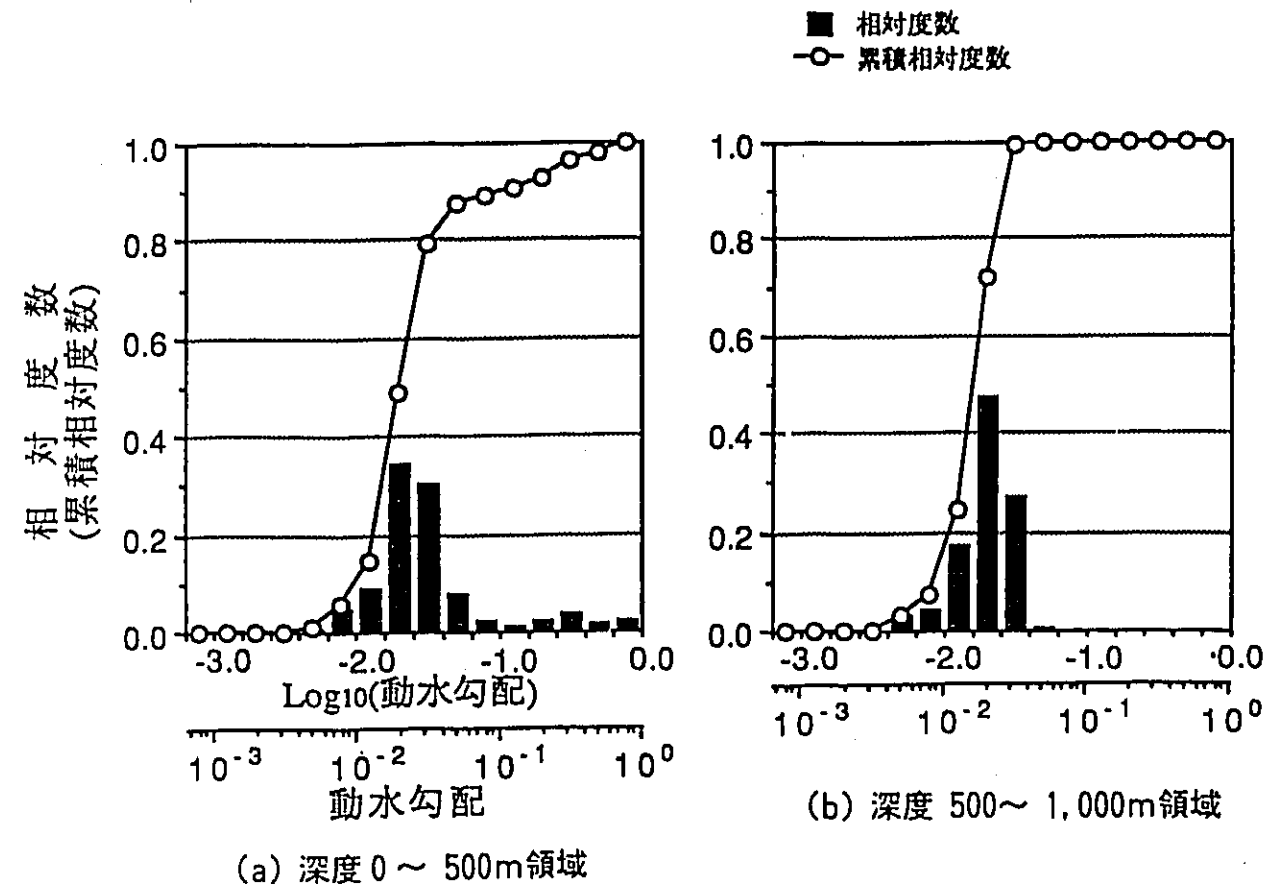


図4.14 深度別に見た動水勾配の頻度分布

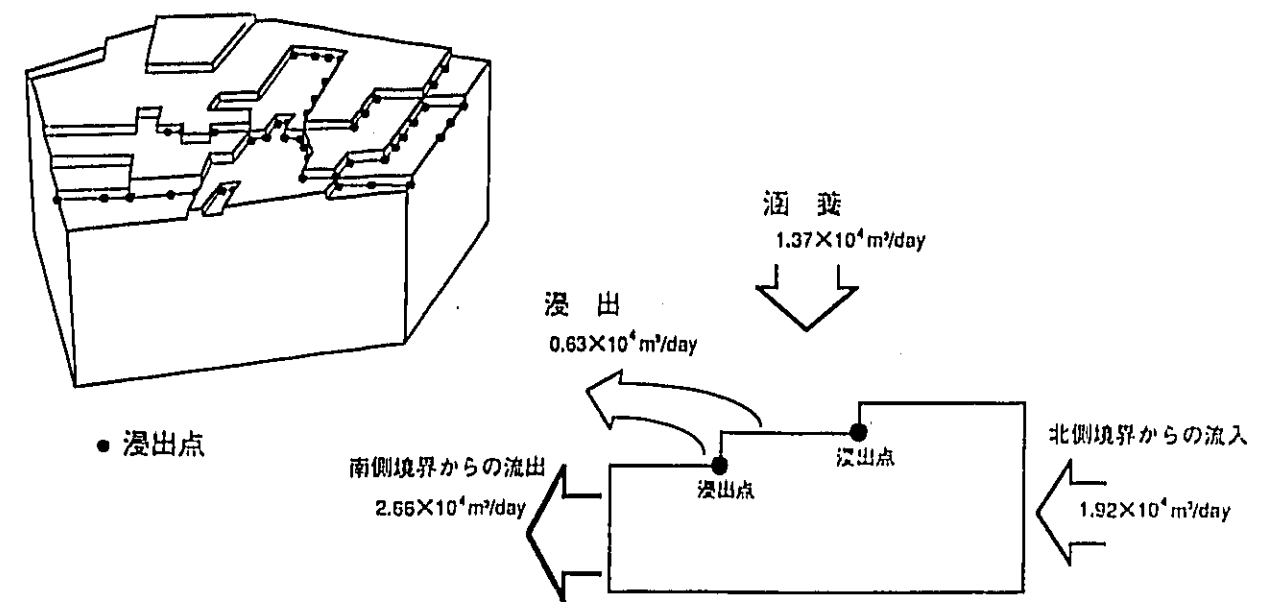


図4.15 浸出点分布と水収支

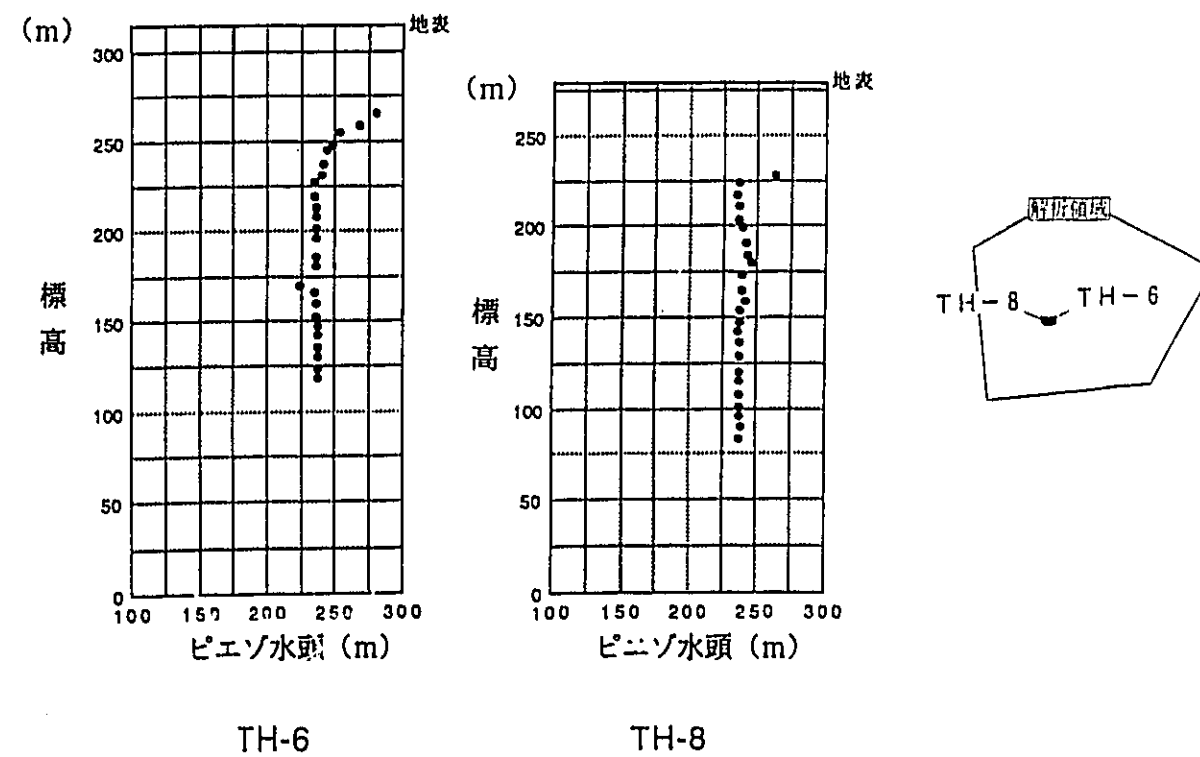


図4.16 MPシステムによるピエゾ水頭の測定結果
TH 6号孔, TH 8号孔での結果.

5. まとめ

以上で述べた中部日本の大小2つのスケールの領域を対象とした地下水流動解析の結果をまとめると次のようになる。

中部日本を対象とした解析（大スケールの解析）では、既存文献に基づく解析を実施した。東濃地域を対象とした解析（小スケールの解析）では、現地調査・試験の結果に基づき水理地質構造モデルを構築し、中部日本の解析結果を考慮した境界条件を設定して解析を実施した。これらの解析から以下のことが明らかになった。

- ① 中部日本を対象とした解析結果によると、ピエゾ水頭分布は地形の概形に沿ったものとなる。
- ② 東濃地域を対象とした解析結果によると、地表付近のピエゾ水頭分布は局所的な地形に大きく影響される。深部でのピエゾ水頭分布は大局的な地形を反映したのものとなる。
- ③ いずれの解析領域においても、山地部などの地形変化の大きい場所の浅部を除いてピエゾ水頭の鉛直方向の変化は極めて小さく、静水圧分布を示す。
- ④ 深度 500m以深の地下深部における動水勾配は、いずれの解析領域においても深度 500m以浅での動水勾配よりも小さく、ほとんどの部分で0.04未満である。
- ⑤ 今回の中部日本を対象とした解析では、標高-3,000m以深の部分の透水係数、飽和度と圧力水頭の関係、および海岸部の側方境界条件を変えても、解析結果に大きな違いは現れない。

6. 今後の課題

今回行った解析をより信頼性の高いものとするため、課題として以下の点があげられる。

- (1) 水理地質構造モデルに関する課題
 - ① 透水係数データの蓄積と信頼性の向上、とくに低透水性岩盤の透水係数と透水性の深度依存性・異方性の把握。
 - ② 断層等の不連続面や割れ目帯をモデルに反映すること
- (2) 解析条件に関する課題
 - ① 不飽和特性の把握
 - ② 涵養量の不均一性を反映した上部境界条件の設定
 - ③ 側方・下部境界条件の設定方法
- (3) 数値解析手法に関する課題
 - ① 解析結果からのフィードバックによるより適正な涵養・浸出条件の設定と再解析
 - ② 岩盤を亀裂性媒体とした解析（亀裂ネットワークモデルによる解析）
- (4) 地下水流動に影響を与える因子に関する課題
 - ① 地形のモデル化手法の違いが解析結果へ与える影響の把握
 - ② 地下水流動に影響を与える地形・透水係数分布以外の因子（温度分布や地殻変動など）を考慮した解析。

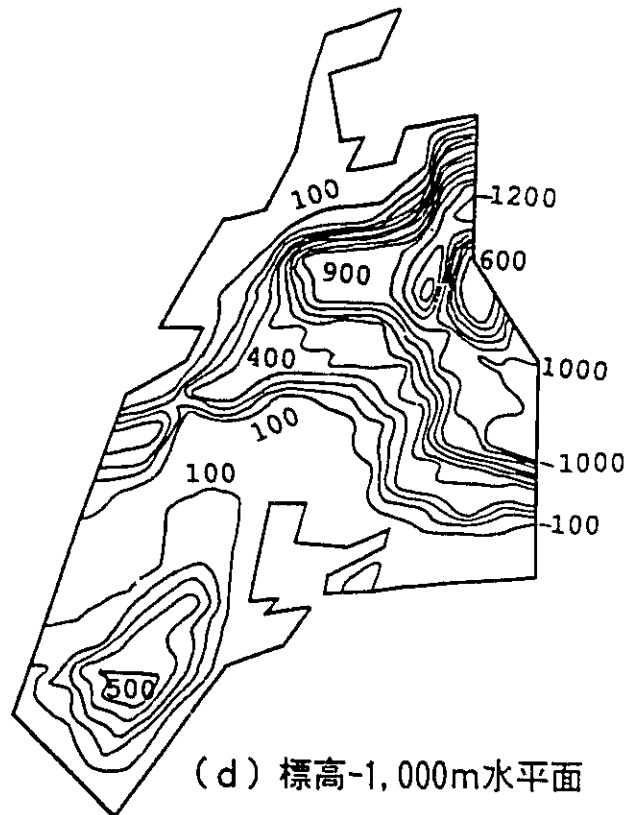
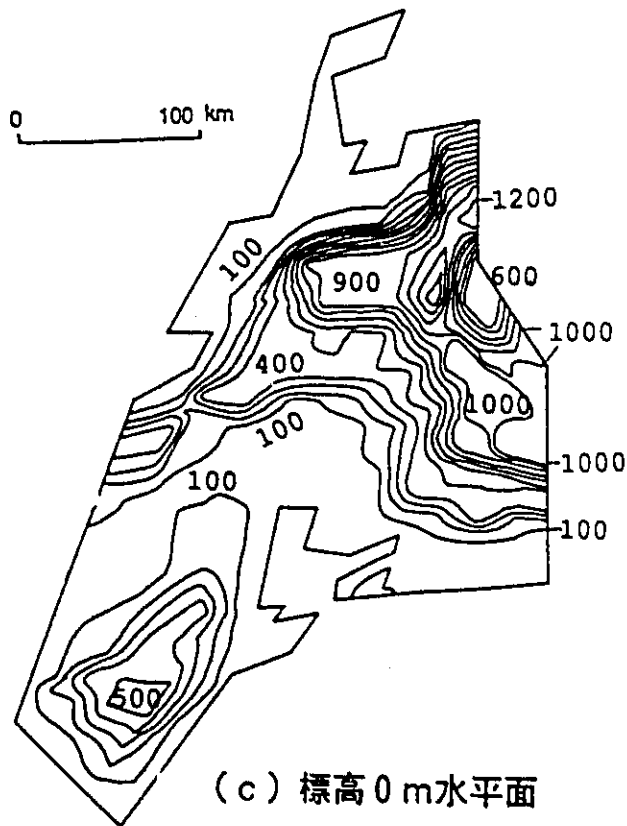
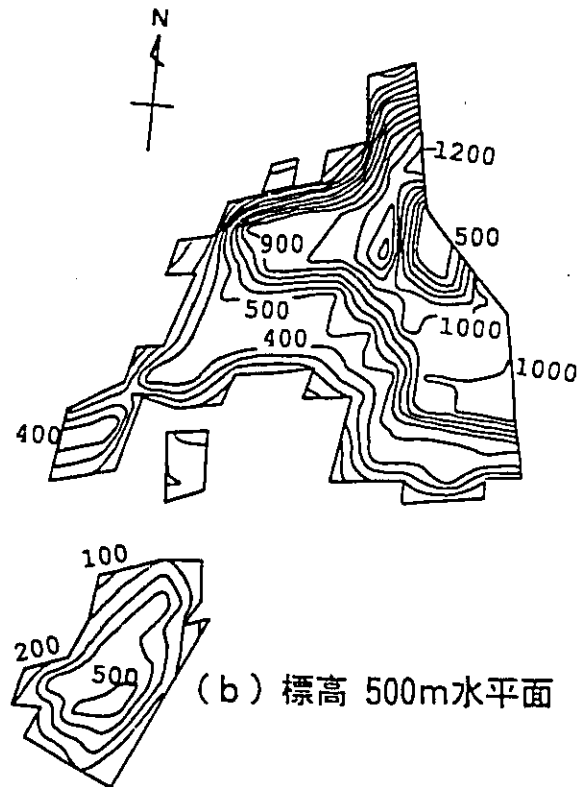
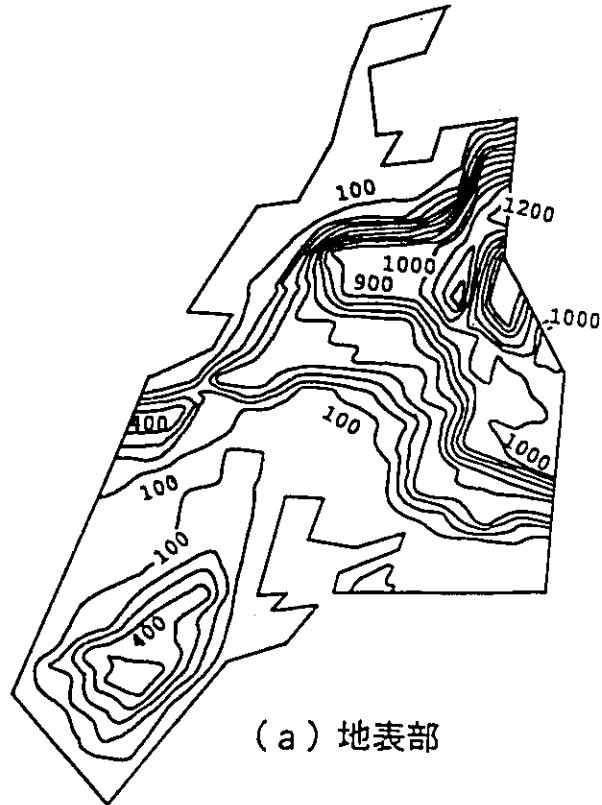
謝 辞

本研究において、東京大学工学部小島圭二教授、京都大学工学部大西有三助教授、岡山大学工学部西垣 誠助教授、埼玉大学工学部渡辺邦夫助教授、筑波大学水理実験センター嶋田 純講師には、研究の進め方および数値解析手法に関してご指導頂いた。記して感謝の意を表す。

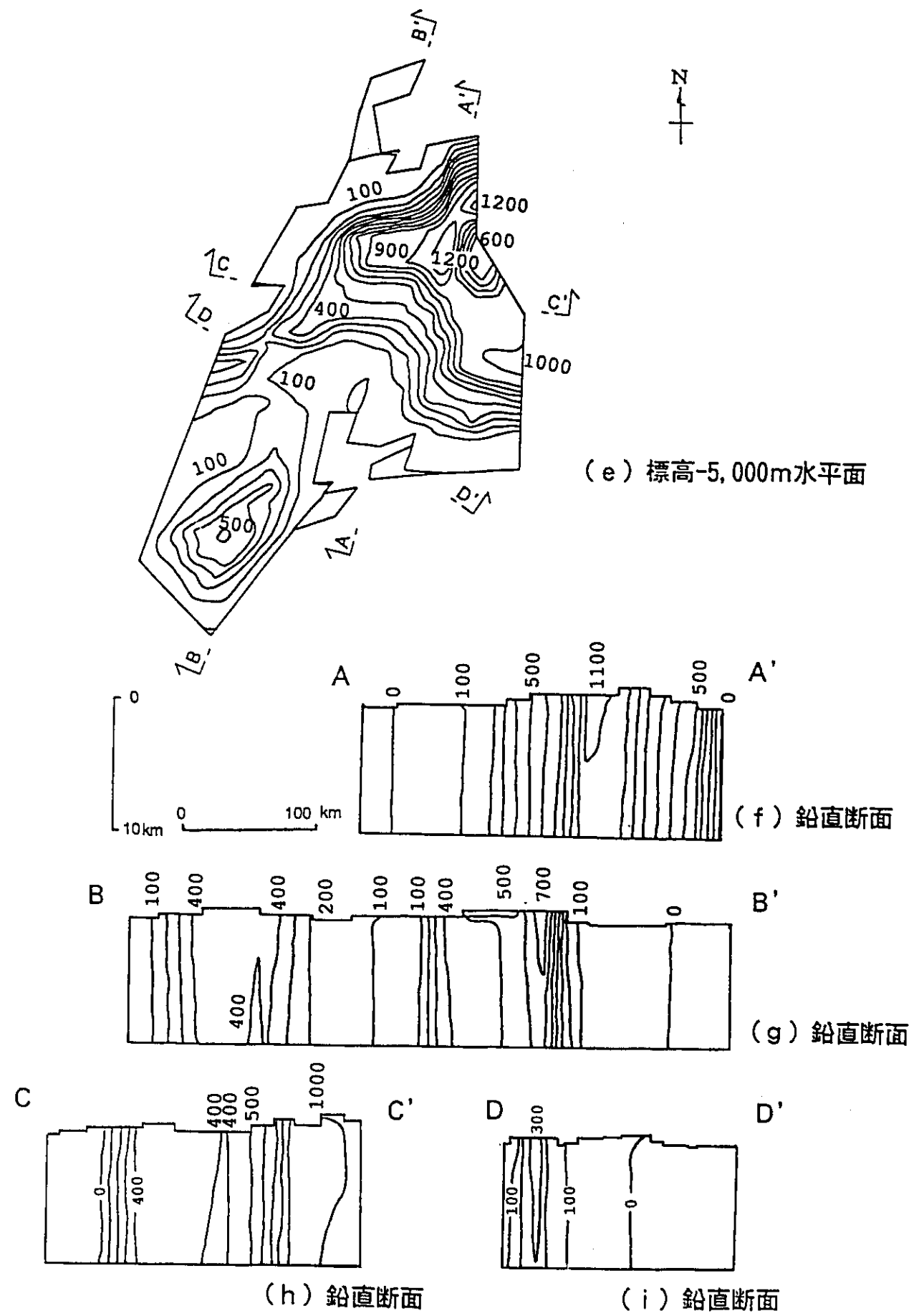
文 献

- Almén, K-E et al. (1986) : Site investigation equipment for geological, geo-physical, hydrogeological and hydrochemical characterization. SKB Technical Report 86-16.
- 地質調査所 (1982) : 100万分の1地質図. 日本地質アトラス.
- 今井 久・柳澤孝一 (1990) : 三次元飽和不飽和浸透解析プログラムTAGSACの概要. PNC Technical Report GE-90-01.
- 環境庁水質保全局企画課編 (1978) : 地下水と地盤沈下対策. 白亜書房.
- 建設省国土地理院 (1983) : 国土数値情報の概要.
- 尾方伸久・大沢英昭・中野勝志・柳澤孝一・西垣 誠 (1992) : 堆積岩の地質学的特性および透水係数, 見かけ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. 応用地質, 第32巻, 6号, pp.51-62.
- 岡山俊雄 (1988) : 日本列島の接峰面. 古今書院, 東京.
- 中島 誠・中野勝志・柳澤孝一・嶋田 純 (1991) : 瀬戸層群分布域における表層部未固結層から下層泥岩・砂岩層への涵養量の算定. 日本地下水学会1991年度秋期講演会講演要旨, pp.100-103.
- 中沢圭二ほか編 (1988) : 日本の地質6 近畿地方. 朝倉書店, 東京.
- 植村 武ほか編 (1988) : 日本の地質4 中部地方I. 朝倉書店, 東京.
- 渡辺邦夫・藍沢稔幸・柳澤孝一 (1990) : 岩盤浸透流の3次元解析の考えと多孔質モデルによる広域解析例. 土木学会第45年次学術講演会 (平成2年9月) 予講集.
- 山下 昇ほか編 (1988) : 日本の地質5 中部地方II. 朝倉書店, 東京.
- 柳澤孝一・西垣 誠・平田洋一 (1989) : 動燃式低水圧制御水理試験機 (動燃式JFT) の原理と適用例. 地下水学会誌, 第30巻, 第3号, pp.127-137.
- 柳澤孝一・斉藤 章・西垣 誠・平田洋一 (1989) : 新しい現場透水試験法 (動燃式JFT) の開発と測定例. 土と基礎, 37-7(378), pp.47-52.

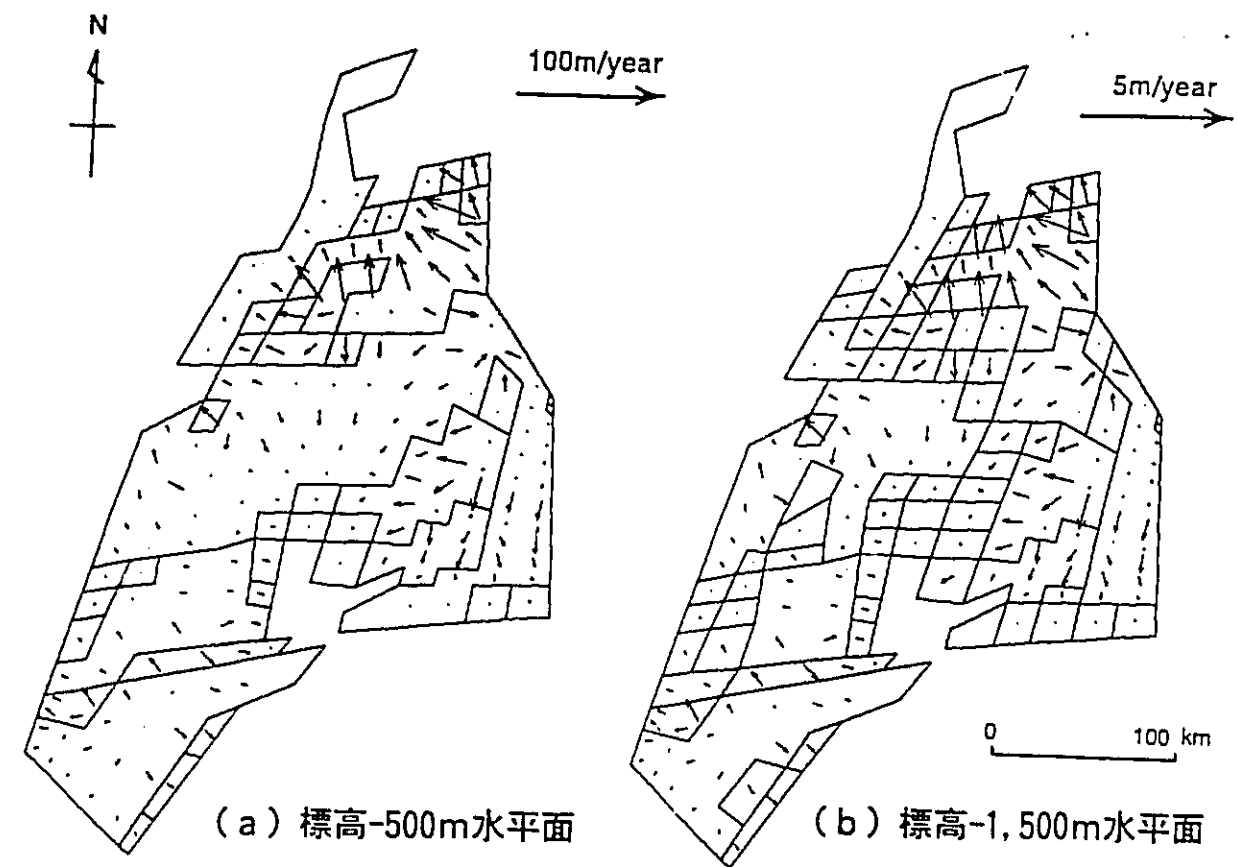
付図, 付表



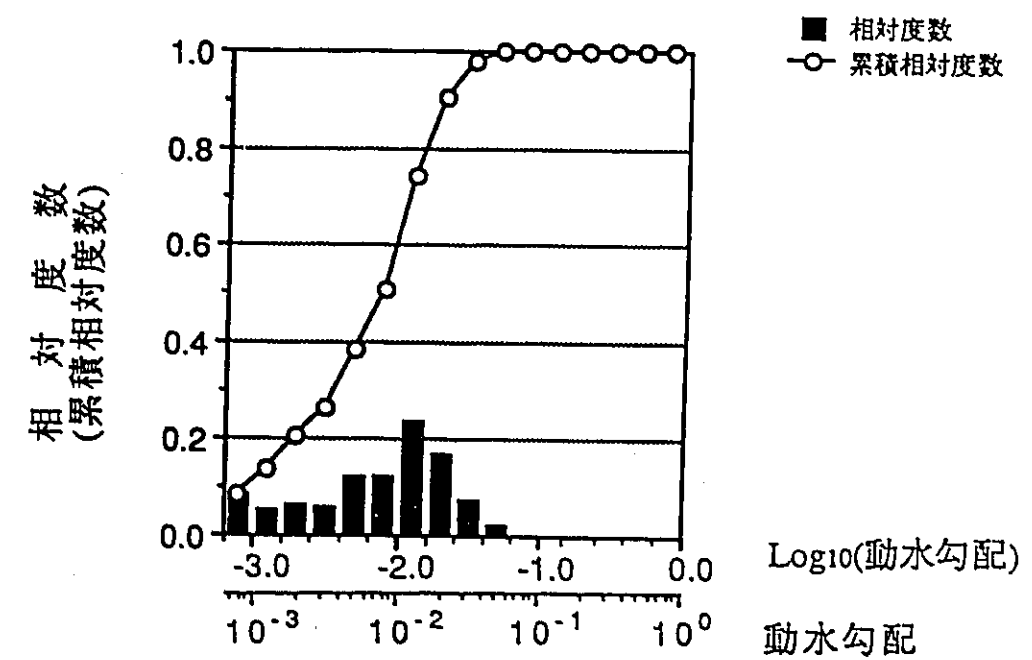
図A-1 ピエゾ水頭の計算結果(解析ケース2) -その1
 コントアの数字の単位:m(標高)



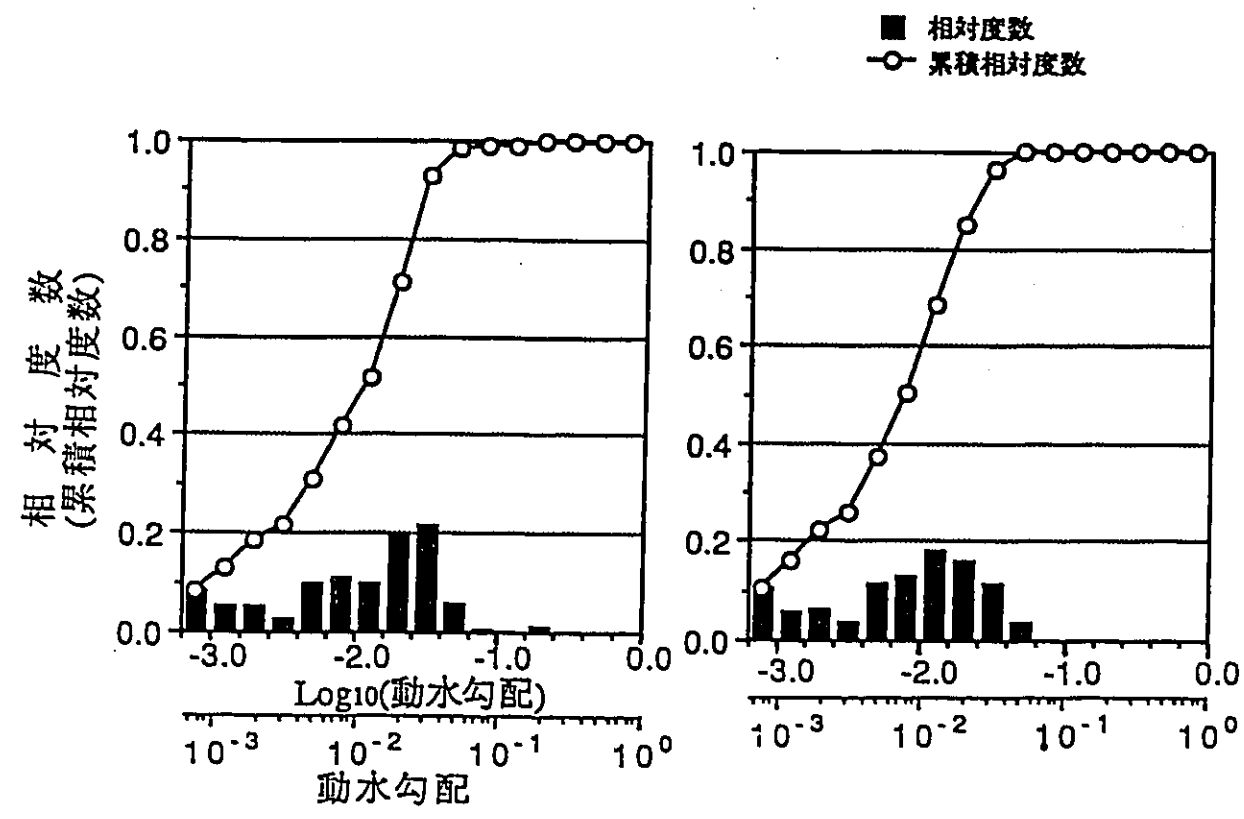
図A-1 ピエゾ水頭の計算結果(解析ケース2) - その2
 コントアの数字の単位: m (標高)



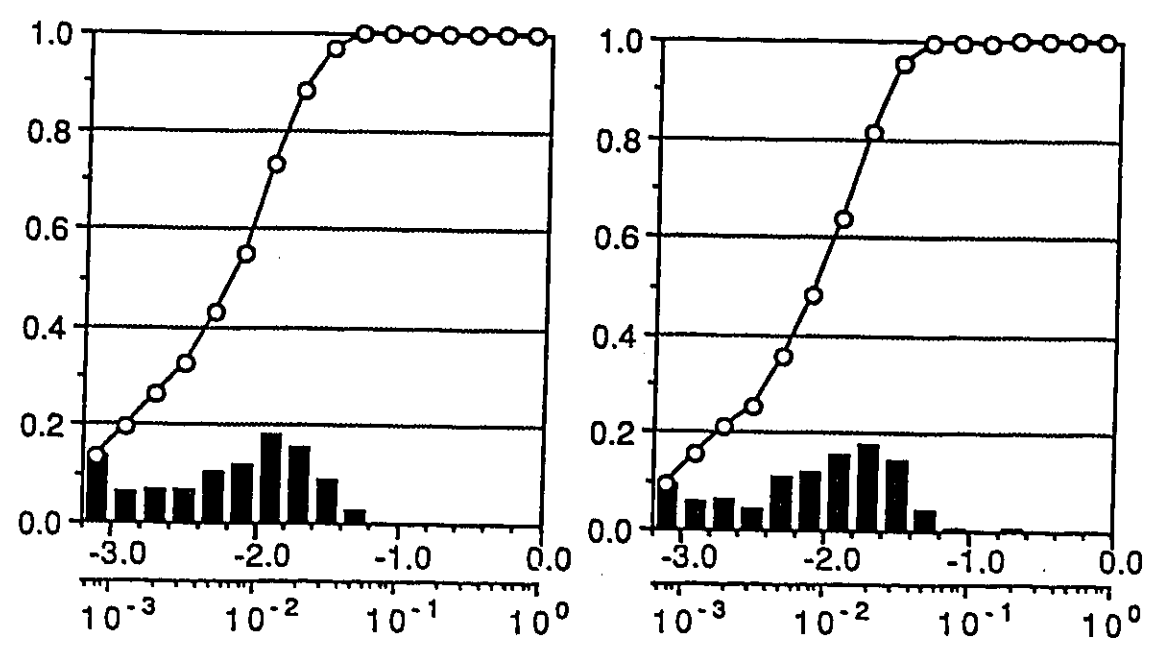
図A-2 ダルシー流速の計算結果(解析ケース2)



図A-3 全領域を対象とした動水勾配の頻度分布(解析ケース2)

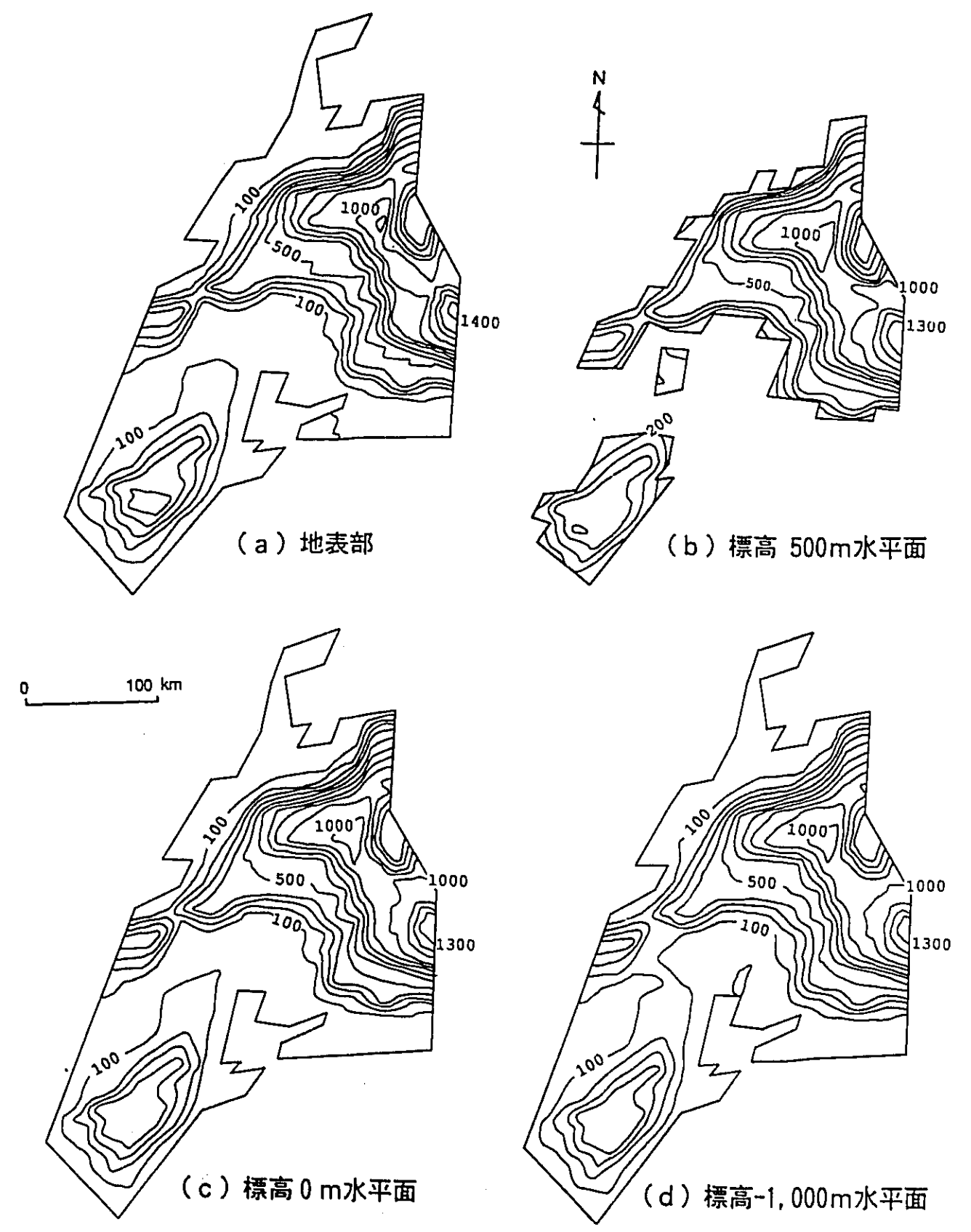


(a) 深度 0 ~ 500m 領域 (b) 深度 500 ~ 1,000m 領域

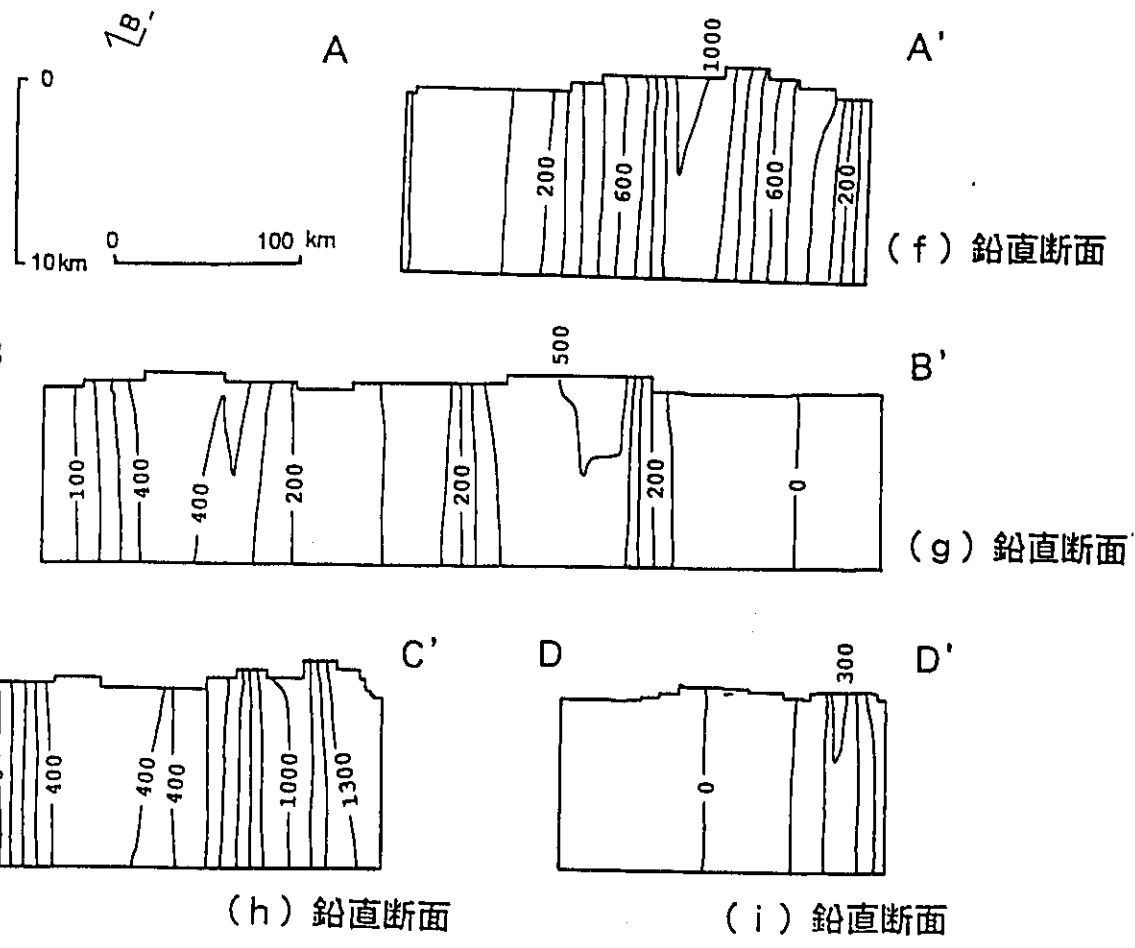
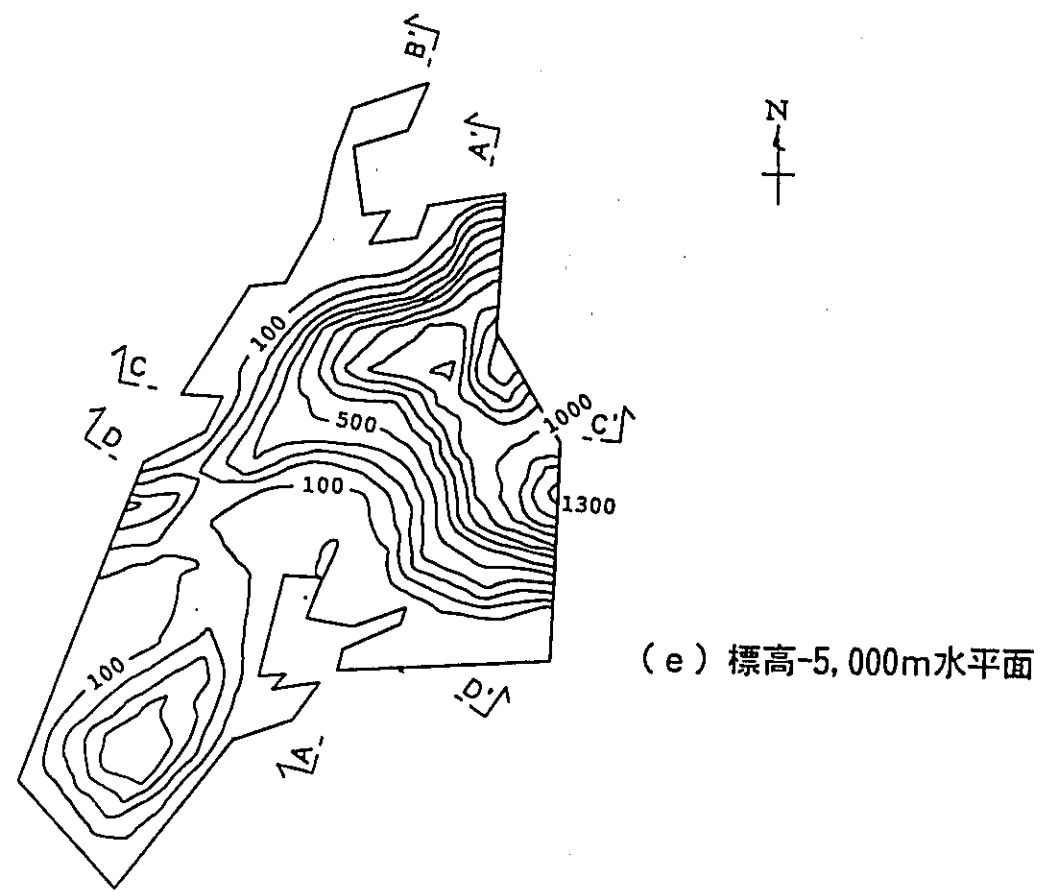


(c) 深度 1,000 ~ 1,500m 領域 (d) 深度 0 ~ 1,500m 領域

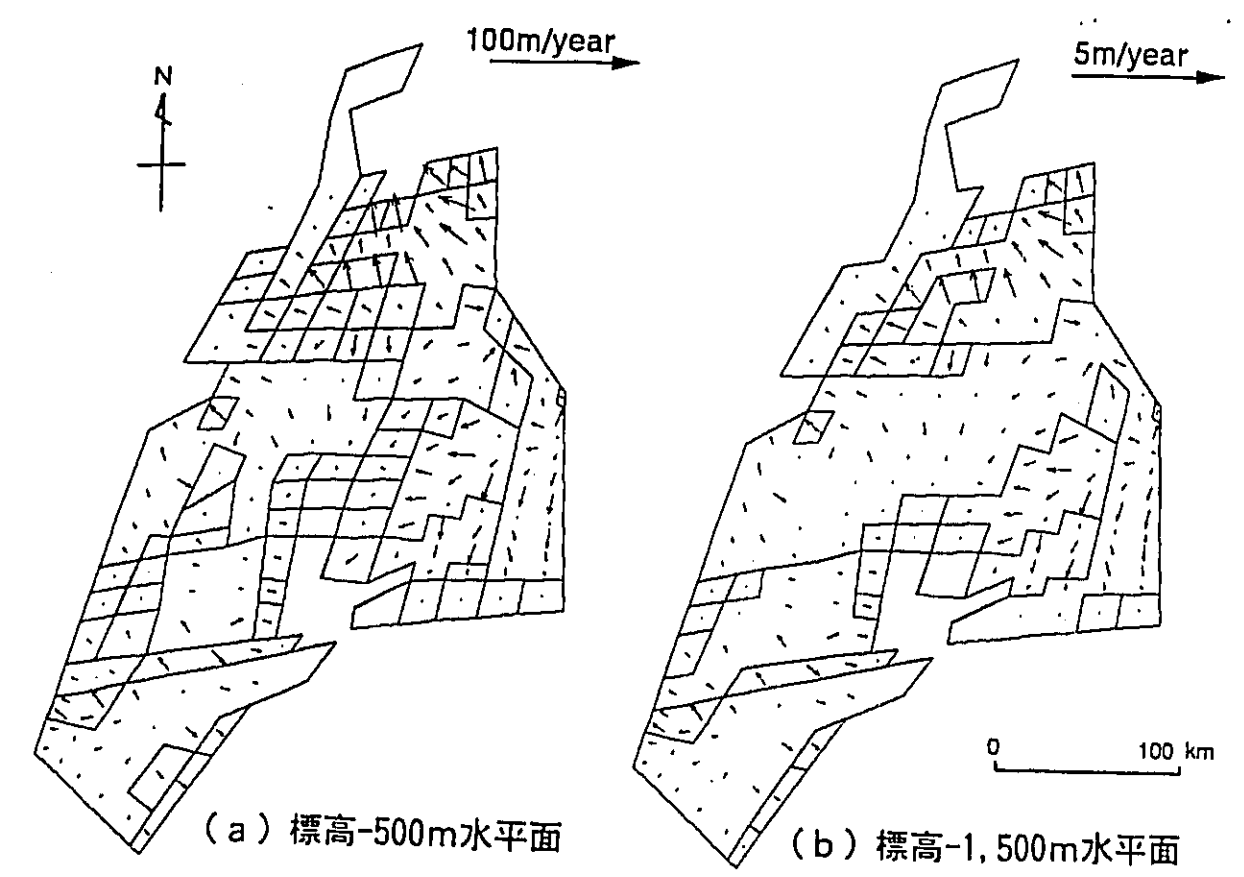
図A-4 深度別に見た動水勾配の頻度分布 (解析ケース2)



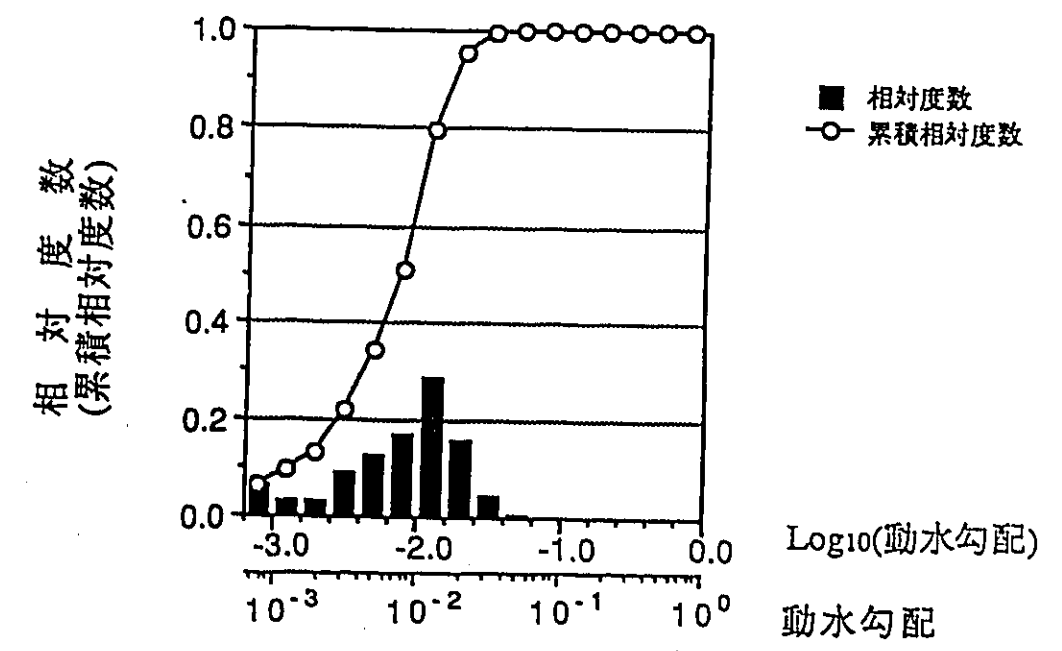
図A-5 ピエソ水頭の計算結果 (解析ケース3) - その1
コンターの数字の単位: m (標高)



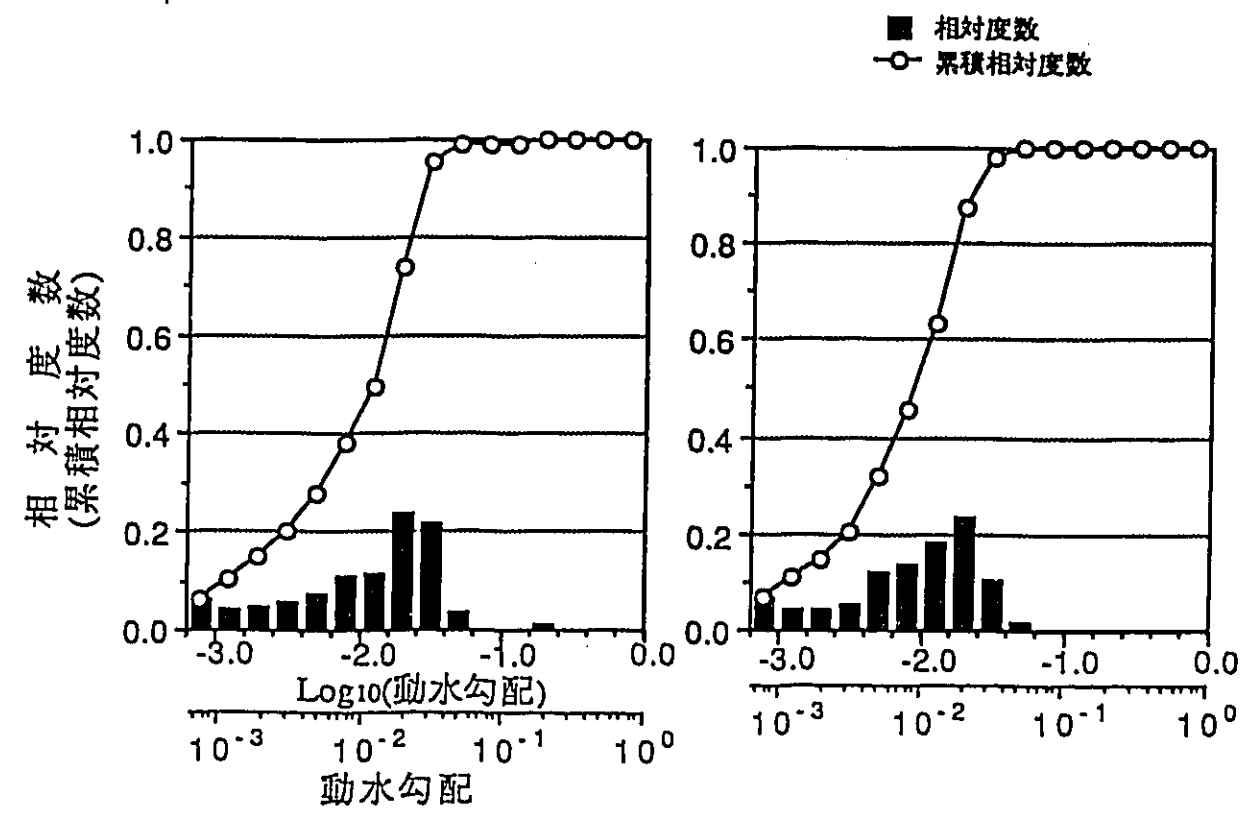
図A-5 ピエゾ水頭の計算結果 (解析ケース3) - その2
コンターの数字の単位: m (標高)



図A-6 ダルシー流速の計算結果 (解析ケース3)

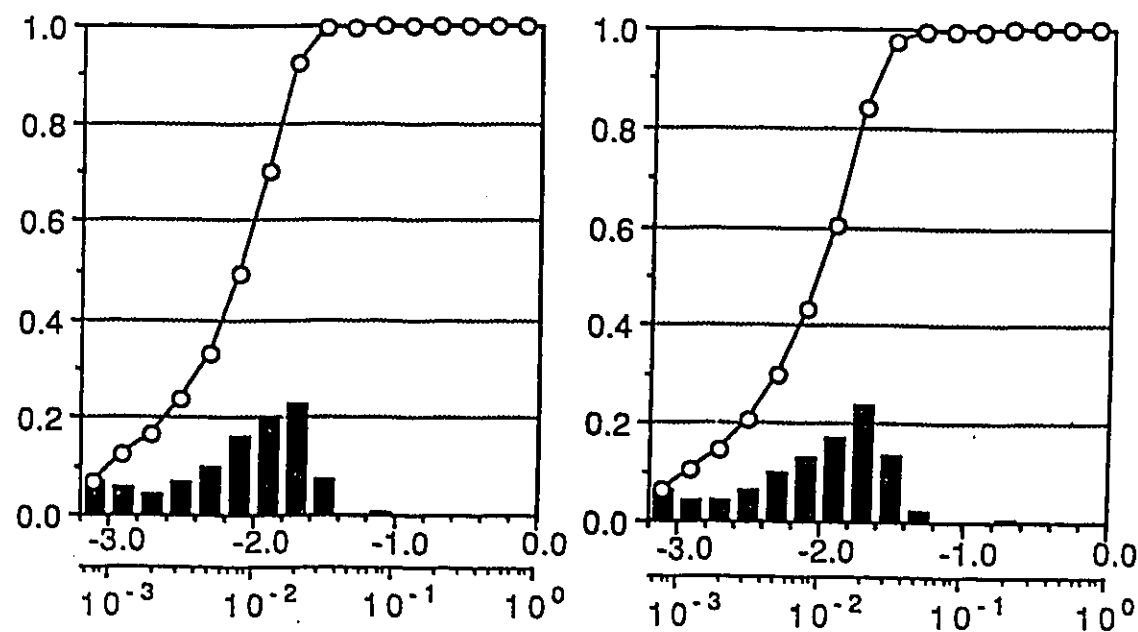


図A-7 全領域を対象とした動水勾配の頻度分布 (解析ケース3)



(a) 深度 0 ~ 500m 領域

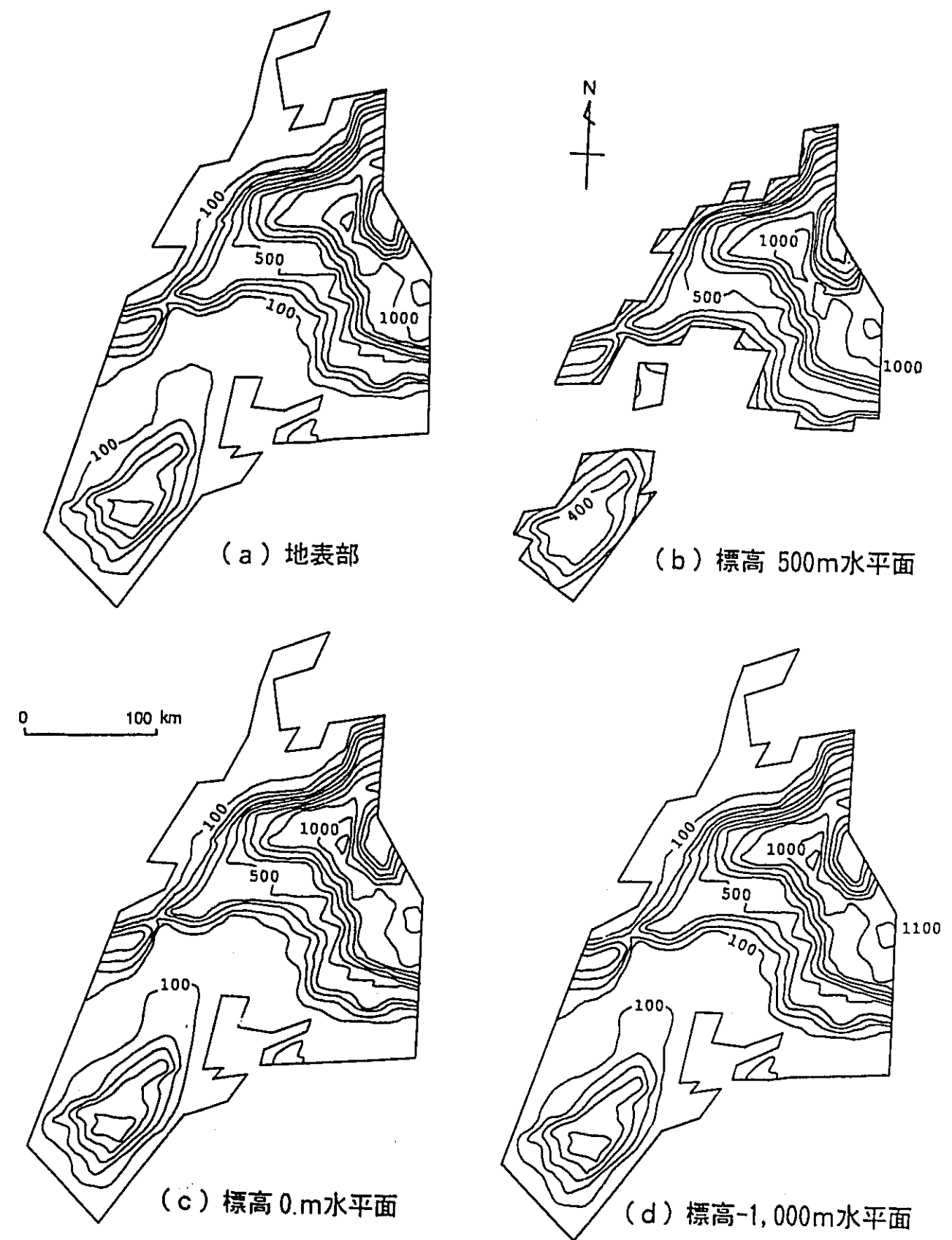
(b) 深度 500 ~ 1,000m 領域



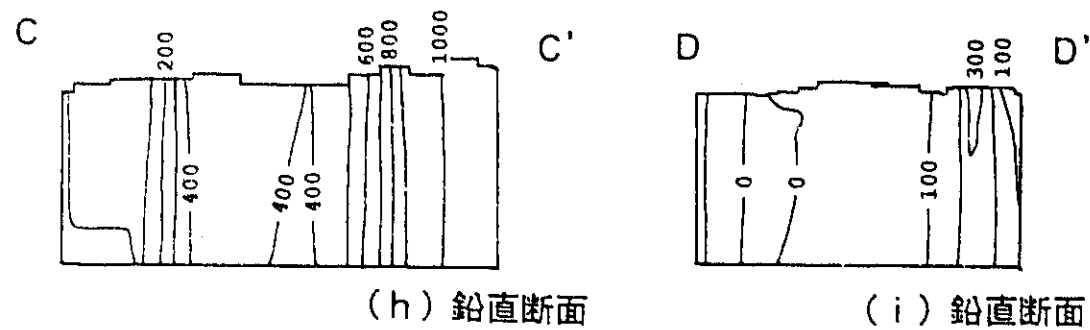
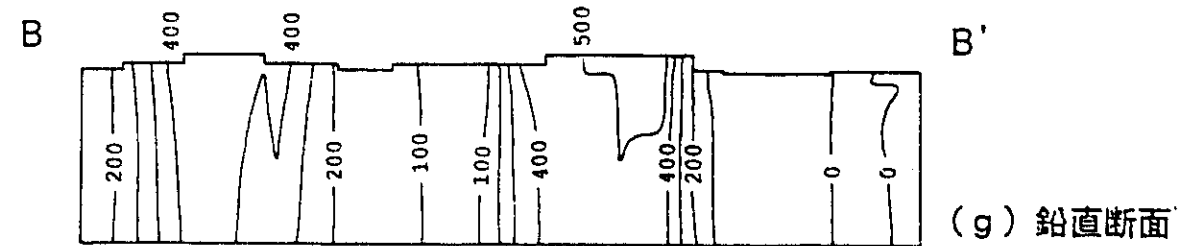
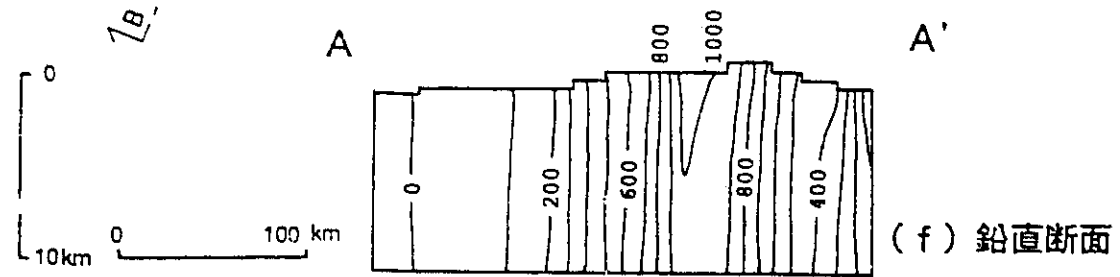
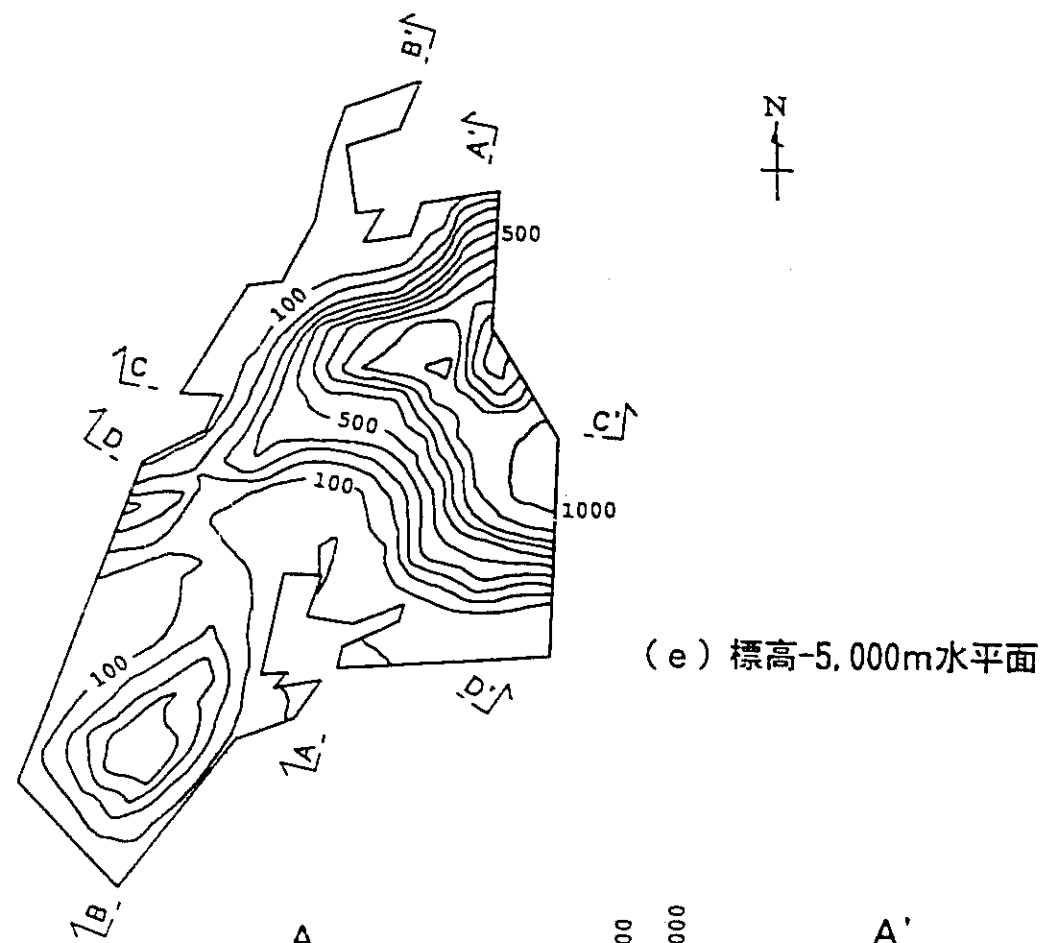
(c) 深度 1,000 ~ 1,500m 領域

(d) 深度 0 ~ 1,500m 領域

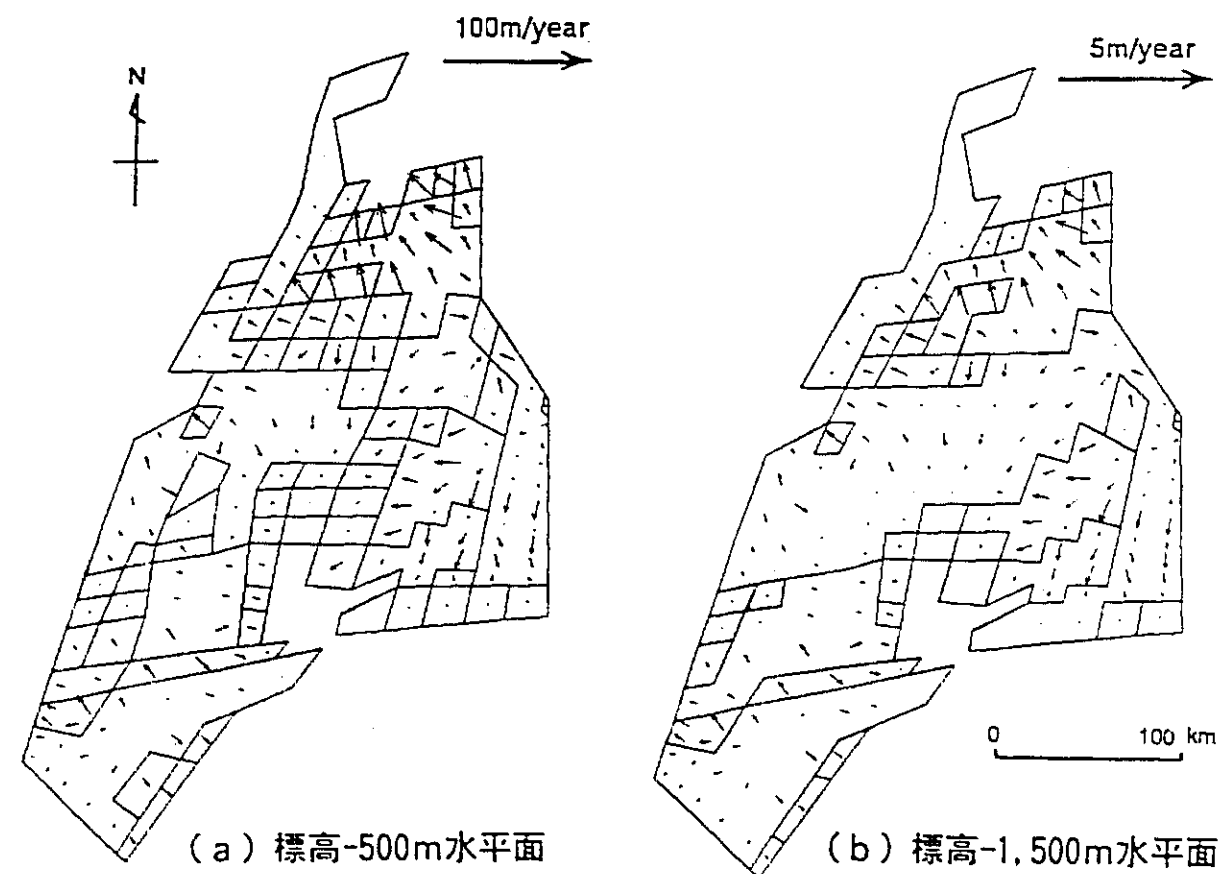
図A-8 深度別に見た動水勾配の頻度分布 (解析ケース3)



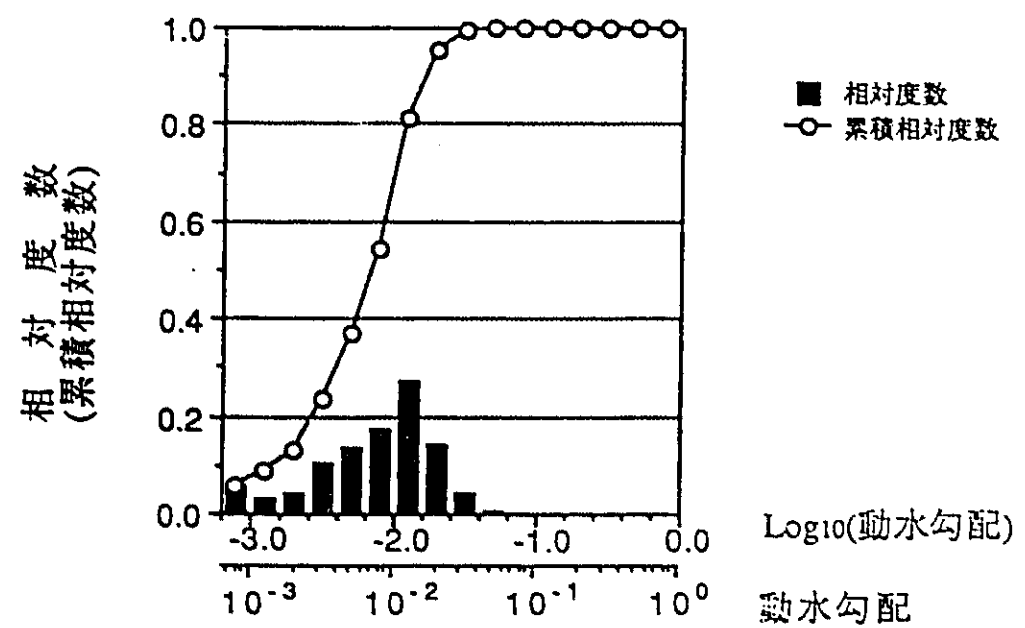
図A-9 ピエゾ水頭の計算結果 (解析ケース4) -その1
コンターの数字の単位: m (標高)



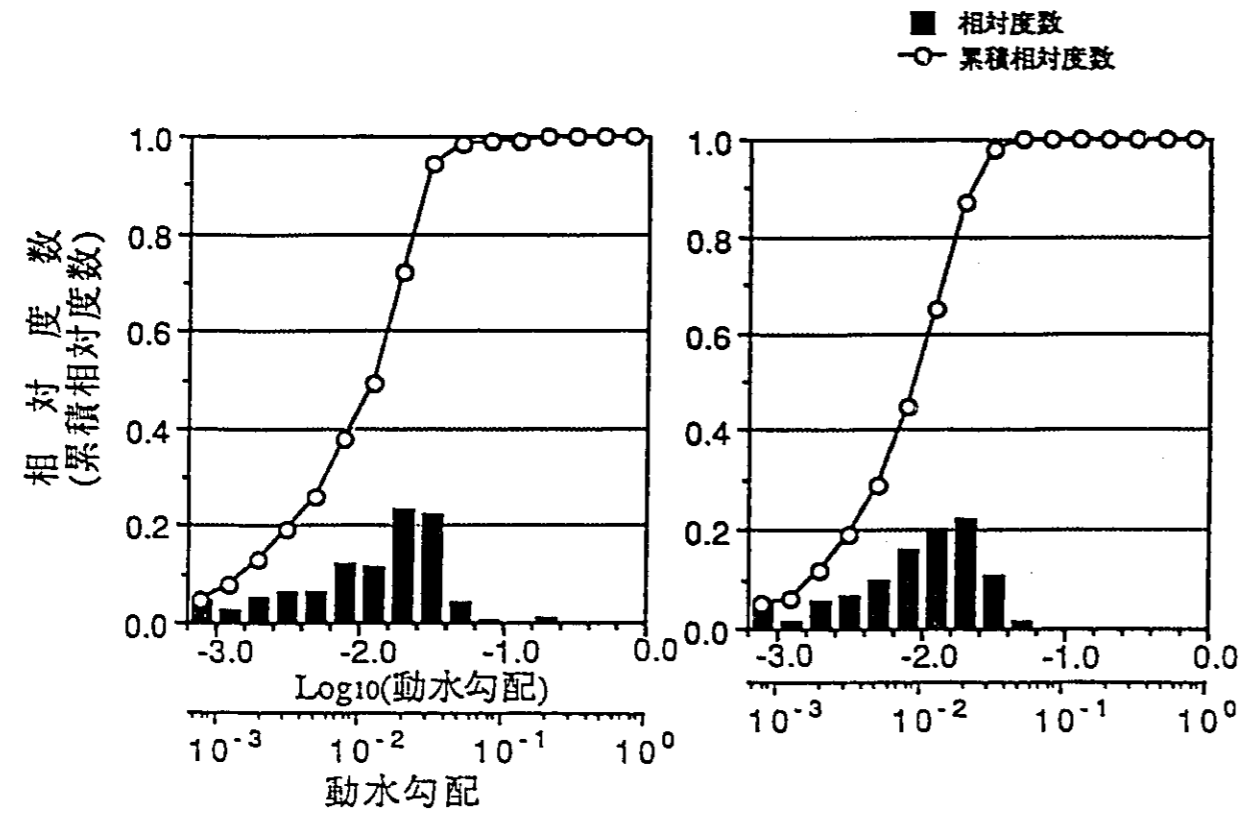
図A-9 ピエゾ水頭の計算結果(解析ケース4) -その2
 コントアの数字の単位:m(標高)



図A-10 ダルシー流速の計算結果(解析ケース4)

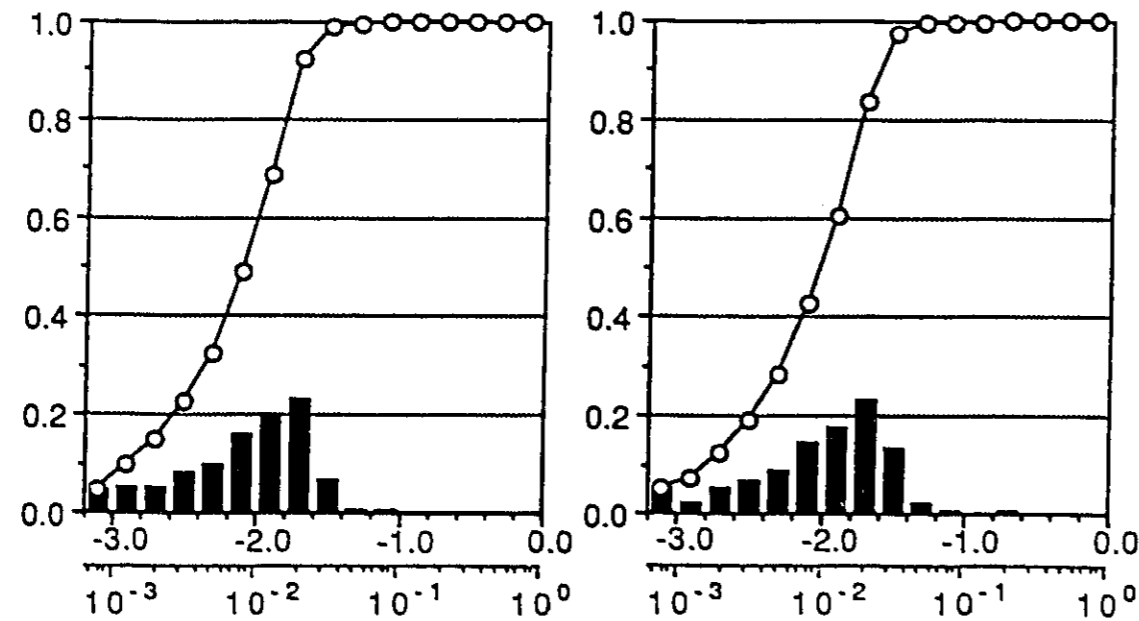


図A-11 全領域を対象とした動水勾配の頻度分布(解析ケース4)



(a) 深度 0 ~ 500m 領域

(b) 深度 500 ~ 1,000m 領域



(c) 深度 1,000 ~ 1,500m 領域

(d) 深度 0 ~ 1,500m 領域

図A-12 深度別に見た動水勾配の頻度分布 (解析ケース4)

- 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動影響予測解析，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 91-02 中野勝志・斎藤章・花木達美：難透水性岩石を対象とした室内透水試験装置の開発，PNC TN7410 91-050
- 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
- TR/GE 91-04 石丸恒存・清水和彦：地質環境の長期的隔離性能に係わる天然事象について(2)－火山活動－，PNC TN7410 91-031
- TR/GE 91-05 仙波毅・尾方伸久・長谷川健・岩崎浩・渡辺邦夫：ボアホールレーダ－による結晶質岩盤中の割れ目帯調査－釜石鉱山原位置試験場における調査について－，PNC TN7410 92-005
- TR/GE 92-01 柳澤孝一，古屋和夫，大澤英昭，若松尚則，梅田浩司：我が国における地盤の透水性に関する調査・研究（その1），PNC TN7410 92-015

- TR/GE 92-02 佐藤稔紀・石丸恒存・杉原弘造・清水和彦：文献調査による我が国の岩石の物理的特性に関するデータの収集，PNC TN7410 92-018
- TR/GE 92-03 瀬尾俊弘，清水和彦：我が国における地下水の水質に関するデータの収集・解析，PNC TN7410 92-017