



# 日本全国を対象とした地下水流動解析(I) —北海道および東北日本を対象とした 解析事例—

稲葉 秀雄 前川 恵輔 小出 肇  
柳澤 孝一

東濃地科学センター

資料番号: 96-12

Groundwater Flow Analyses in Japan (I)  
— Case Studies in Hokkaido and Northeast Japan —

Hideo Inaba Keisuke Maekawa Kaoru Koide  
Koichi Yanagizawa  
(Tono Geoscience Center)

日本の地下深部における地下水流動特性を概括的に把握するための解析の一環として、北海道および東北日本を対象とした地下水流動解析を実施した。解析にあたっては、解析対象領域の水理地質構造モデルを作成し、そのモデルを多孔質媒体と仮定した3次元有限要素法による定常飽和・不飽和浸透流解析を実施した。

解析結果として、以下のことが得られた。

- ① 地下水流動の方向は大局的な地形に支配されている。
- ② 深度方向のピエゾ水頭の変化は小さく、深度1,000m以深ではほぼ静水圧分布を示す。
- ③ 深度500m以深では、動水勾配はほぼ0.04以下である。
- ④ 海岸部での側方境界条件の違いによって、解析結果に顕著な変化は生じない。

## 1. はじめに

動燃事業団・東濃地科学センターでは、地層処分研究開発の基盤となる地質環境に関する科学的・技術的知見の取得・蓄積を目的として、地層科学研究を実施している。その一環として、我が国における地下深部の地下水流動特性（主に地下水流動の動水勾配の分布傾向）を把握することを目的としたコンピューターシミュレーションを行っている<sup>1)~3)</sup>。

一般に、地下水流動解析を行うために必要な地形や地質構造あるいは水理パラメータ等の情報の質と量は、対象とする領域の規模によって制限される。特に、数万km<sup>2</sup>におよぶ広範囲な領域を解析の対象とする場合には、全領域にわたって実際に詳細な調査を行うことは困難であるため、それぞれの情報に関連する分野の文献や報告書等の既存の資料に基づいて解析に必要な情報を取得しなければならない。本研究では、対象とする領域の地形や地質構造を、それらの特徴が可能な限り反映されるように考慮した上で、単純化して表現する

ことを試みた。そして、既存の資料から決定した透水係数等の水理パラメータと水理学的な境界条件に基づいて、3次元有限要素法による定常飽和・不飽和浸透流解析を実施し、当該領域の概括的な地下水流動特性の把握を試みた。

ここでは、我が国を対象とした地下水流動解析のうち、現在までに解析を終了している北海道、および東北日本を対象とした地下水流動解析について報告する。

## 2. 北海道を対象とした地下水流動解析

### 2.1 解析対象領域

周辺の島々を除く北海道全域を解析対象領域とした。当該領域は東西方向約500km、南北方向約400kmにおよび、周囲の境界はすべて海岸線である。

### 2.2 解析の手順

本研究では次の手順にしたがって解析を行った。

- ① 水理地質構造モデルの作成
- ② 水理学的境界条件の設定

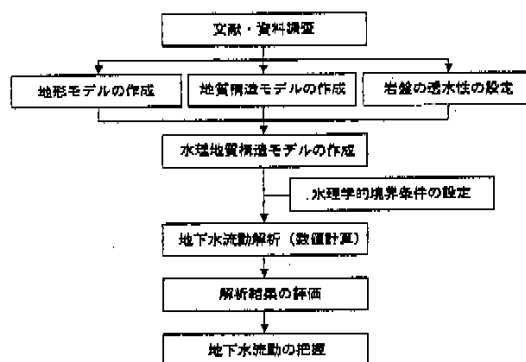


図1 解析手順のフローチャート

### ③ 地下水流動解析

水理地質構造モデルの作成には以下の三つの作業が含まれる。

- a. 地形モデルの作成
- b. 地質構造モデルの作成
- c. 岩盤の透水性の設定

解析手順のフローチャートを図1に示す。

## 2.3 水理地質構造モデルの作成

解析対象領域の地下水流動を表現するためには、地下水流動に影響を与える地形や地質構造を、それぞれの特徴が反映されるように考慮した上で簡略化して表現すること（モデル化）が必要となる。

地下水流動に影響を与える要因のうち、地下水流動場のいわば器に相当する地盤を表現した『水理地質構造モデル』は、地形を表現した『地形モデル』と地質区分に基づいた『地質構造モデル』とを組み合わせ、地質区分ごとの透水性（透水係数）を設定することによって作成される。

### (1) 地形モデルの作成

#### 1) 接峰面図と地形特性図

広範囲な領域の地形をモデル化するためには、大略的な地形を把握することが必要になる。これについては、日本列島が低地、台地、丘陵地、山地に分類できる（表1）<sup>4) 5)</sup>ことを考慮して、地形のモデル化を行うことにした。

まず、対象領域における地形の特徴を捉えるための基図として接峰面図を用いた。これは100万分の1地形図を等面積の方眼で区切り、各方眼内の最高点の標高値とその位置座標を用いて作成した等高線図である。接峰面図は、各方眼内の最高点に接する仮定の曲面を表現したものに相当することから、地形の概略の形状を表現したものであるといえる。

表1 地形分類とその特徴<sup>4),5)</sup>

| 地形分類項目 | 標高                          | 代表標高    | 地形の特徴                            | 地形モデルの標高                           |
|--------|-----------------------------|---------|----------------------------------|------------------------------------|
| 山地     | 3,000 m<br>1,000 m<br>500 m | 1,000 m | 傾斜20度以上の急斜面が多く、谷底には平地がほとんど見られない。 | 1,000 m<br>800 m<br>600 m<br>500 m |
| 丘陵地    | 200 m                       | 500 m   | 尾端の高さは揃っており、谷底に無い低地が見られる。        | 400 m<br>200 m                     |
| 台地     | 20-100 m                    | 100 m   | 周囲を崖に囲まれた高台あるいは階段状の平坦地。          | 400 m                              |
| 野低地    | 30 m                        | 30 m    | 河川とはほぼ同じ高さで、下流ほど勾配の小さい平坦地となる。    | 40 m<br>0 m                        |

この接峰面図から、さらに山地や低地等の地形の特徴が表現されるように地形分類上の境界となる等高線を抽出した地形特性図（図2）を作成した。地形モデルの水平面における2次元の要素分割には、この地形特性図を基準として用いた。

### 2) 地形特性図上での要素分割

地形モデルの水平面における2次元の要素分割にあたっては、地形特性図上の起伏の特徴を表現できるように要素の分割の程度を考慮した。また、要素の分割数については、計算機での処理効率を考慮し、過度に多くの要素とならないように配慮した。特に山地や盆地等の地形的な特徴を表現するため、分割した一つの要素が他の地形分類項目の地域と重複しないようにした。また、北海道における主要な湖沼である洞爺湖、支笏湖、屈斜路湖の三つの湖が要素分割の格子点上に位置するようにした。以上のようにして作成した2次

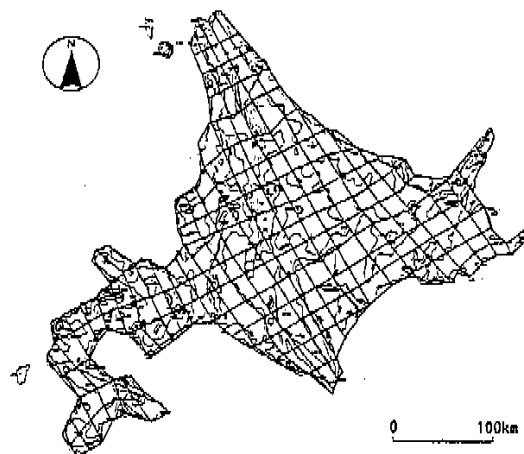


図2 地形特性図と2次元要素分割

元要素分割図を図2に示す。

### 3) 平均標高値の算出

次に、国土地理院が作成した国土数値情報の標高データファイル(KS-110-1)を用いて、各要素における標高値(平均標高値)を求めた。

国土数値情報は、地図に表現されている地理的情報等を情報工学的手法により数値や符号に変換したもので、標高データファイルには1/4地域メッシュと呼ばれるおよそ250m方眼(緯度方向7.5秒、経度方向11.25秒)の格子点における標高値がまとめられている。

この標高データファイルと、地形特性図を基にして作成した水平面における2次元要素分割図(図2)から各要素における平均標高値を算出した。

### 4) 地形モデルの標高値の決定

地形を簡略化して表現するため、地形分類の境界の標高値、および代表標高値を基にして、地形モデルの標高値を表1のように9段階に分類することとした。そして、3)で求めた平均標高から各要素の標高値を設定した(図3)。

この地形モデルの妥当性を検討するため、地形モデル、および実地形のデータである国土数値情報から標高値の頻度分布図を作成し、両者を比較した(図4)。具体的には、国土数値情報については対象領域の内部に含まれる格子点を各階級ごとに加算したものの割合を求め、一方、地形モデルについては各階級ごとの要素の面積の割合を求めて標高値の頻度分布とし、それぞれを比較した。その結果、設定したモデルの標高分布は国土数値情報の標高データを忠実に再現しているといえる。

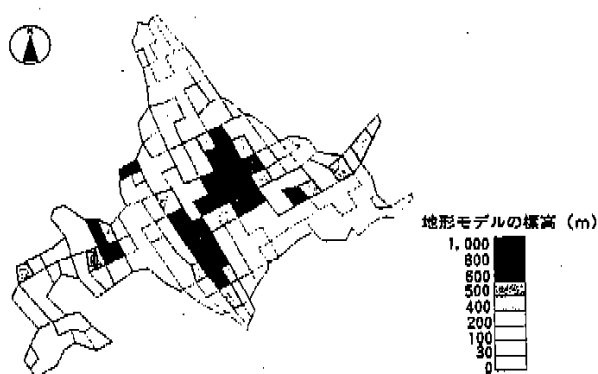


図3 北海道の地形モデル

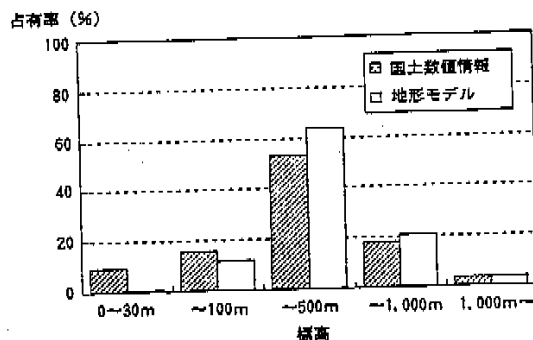


図4 実地形および地形モデルの標高頻度分布

### (2) 地質構造モデルの作成

本地域の地質構造は、100万分の1地質図<sup>6)</sup>および北海道の地質構造に関する文献資料<sup>7)</sup>に基づいて推定した。このとき地表から地下深部にわたる概括的な地質構造が表現されるように考慮した上で、100万分の1の縮尺から読みとることができる地質区分を簡略化して表現した。地質区分は地質年代、成因、構成岩石および透水性によって7種類に分類した(表2参照)。地質区分の分布図は、以下の仮定に基づいて作成した。

- ① 基盤岩(古生界~古第三系の大部分と深成岩、変成岩)は、その境界面以深へ連続し、かつ鉛直に分布している。
- ② 白亜紀~古第三紀火山岩および古生界~古第三系は、その連続性が乏しく層厚が不明瞭なものについては、確認できる最大の層厚とする。
- ③ 鮮新世以降の新しい堆積物は、一定の傾斜を有する紡錘型あるいはくさび型に分布する。
- ④ 鮮新世~第四紀の火山岩については、その最大層厚が火山岩体の層厚となるような水平な下部境界とする。
- ⑤ 断層は地質構造を分けるもののみを対象とし、その方向は鉛直とする。

### (3) 岩盤の透水性の設定

各地質区分における透水性(透水係数)については、次のように設定した。

まず、地下深部1,000m付近までを対象として、日本全国の地盤の透水性に関する文献調査を実施した。文献調査は、過去10~20年間における資源や土木関係の雑誌およびダムの工事誌等29誌を対象として、原位置試験による透水係数データ1,517件を収集し各地質区分の透水係数データとしてとりまとめた<sup>8)</sup>。その結果、各地質区分における透水係数の頻度分布がほぼ対数正規分布を示すこと

から、解析モデルに設定する透水係数として幾何平均値を採用することにした（表2参照）。

地盤の表層付近に生ずると考えられる不飽和領域の透水性については、水分特性曲線によって飽和度と負の圧力水頭（地表面から地下水面までの距離に相当）との関係を設定し、飽和度と不飽和透水係数（飽和透水係数との相対値として表示）との関係を設定した（図5）。不飽和領域での透水性に関するパラメータは計測例が少なく、試験方法自体もまだ確立されていないため、不均一な粒度を有する細砂の不飽和特性を参考に設定した。間隙率は砂層の平均的な値として33%を設定した<sup>9)10)</sup>。

以上のようにして作成した地形モデルと地質構造モデルを組み合わせ、各地質区分ごとに透水係数を与えることにより、水理地質構造モデルを作成した（図6）。なお、水理地質構造モデルの深さは10km（海水面から）とした。

このモデルは有限要素モデルとするため、六面体8節点要素によって分割し、要素数は2,319、節点数は3,380とした。

## 2.4 水理学的境界条件の設定

対象領域の水理学的な場をモデル化するためには、水理地質構造モデルに水理学的境界条件を設定することが必要となる。

解析領域の外側境界条件は、次のように設定した（図7）。

〔上面（地表面）〕 解析モデルの上面（地表面）は、湧水を考慮して水の流入・流出がある自由浸出面と仮定した。その上で、降雨・降雪に伴う

表2 各地質区分に設定した透水係数

| 地 質 区 分     | 凡 例   | 透 水 係 数 (cm/sec)     |
|-------------|-------|----------------------|
| 完新統～更新統     |       | $1.0 \times 10^{-3}$ |
| 鮮 新 統       |       | $1.0 \times 10^{-3}$ |
| 中 新 統       |       | $7.0 \times 10^{-3}$ |
| 第四紀～鮮新世の火山岩 |       | $2.5 \times 10^{-4}$ |
| 基 盤         | 先新第三系 | $5.0 \times 10^{-5}$ |
|             | 深 成 岩 | $1.0 \times 10^{-4}$ |
|             | 変 成 岩 | $1.0 \times 10^{-4}$ |

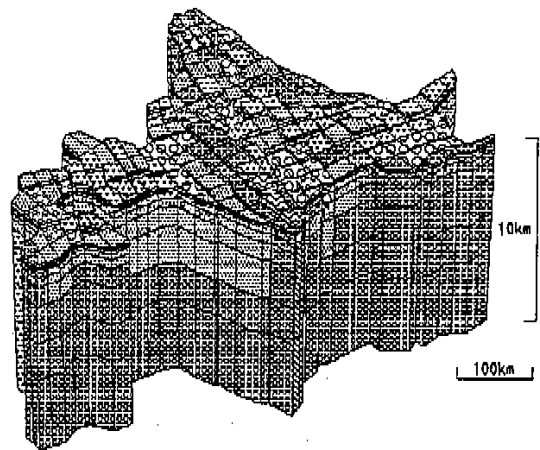


図6 北海道の水理地質構造モデル（凡例は表2）

地下への水の涵養量を設定した。

涵養量は、以下に示すような水収支の式から算出した。

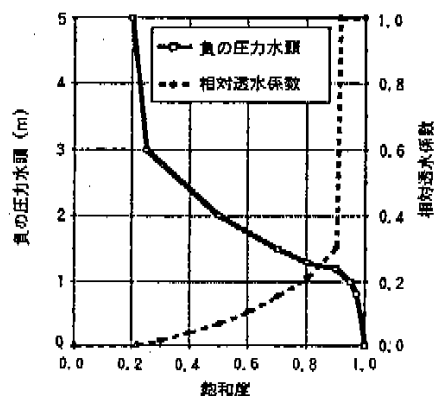


図5 不飽和特性  
〔飽和度と圧力水頭および不飽和透水係数との関係〕（地下水ハンドブック、土壌の物理等を参考に設定）

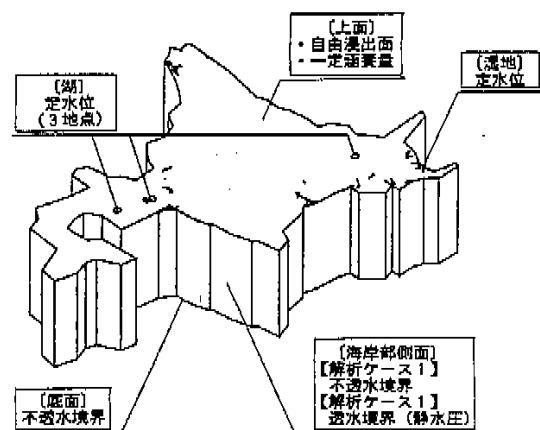


図7 解析領域に設定した境界条件

$$G = P - E - Q$$

G: 涵養量

P: 降水量

E: 蒸発散量

Q: 河川流出量

北海道においては年間を通じた涵養量が負の値をとるという結果になったが、北海道全体でこのような現象が起こるということは現実的には考えられない。この結果は山地での降水量、とくに降雪量の測定の不備が原因で、公表されている降水量が実際よりも少ないために生じたものと考えられる。したがって、ここでは気候的に北海道に最も近いと考えられる東北日本において算出された涵養量の値0.15mm/日を用いた。

〔湖〕 湖については、洞爺湖、支笏湖、屈斜路湖の3湖を考慮し、その地点での水位の変動はないものとして、各湖の位置でそれぞれの節点の標高値に相当する定水位を設定した。

〔湿地〕 北海道で多くみられる湿地においては、地下水面は常に地表面に現れているものとして、湿地の部分にあたる節点にはその節点の標高値に相当する定水位を設定した。

〔底面〕 解析モデルの底面の境界には、それ以上深い部分との間で水のやりとりがない不透水の条件を設定した。

〔海岸部側面〕 海岸部側面に設定した側方境界条件については、以下のとおりである。

〔解析ケース1〕 海水（塩水）と淡水の密度の違いによってその境界が不透水となり得ると考えて、不透水の条件を設定した。解析ケース1を本研究の基本ケースとした。

〔解析ケース2〕 境界条件の違いによる解析結果への影響を比較する目的から、海岸部の側面を透水境界とした上で、標高0mすなわち海水面で水圧ゼロとなるような静水圧を側面に与えた。

## 2.5 地下水流動解析

### (1) 数値解析手法

地盤中の飽和・不飽和浸透流に関する支配方程式（現象を表現した偏微分方程式）は、不飽和領域を考慮したダルシー則と、水の相について立てた連続式（質量保存則）から求められ、次の式で表される<sup>11)~13)</sup>。

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ K_{ij} \cdot k_{rw}(\theta) \frac{\partial h}{\partial x_j} \right\} + q = \left\{ C(\theta) + \alpha S_s \right\} \frac{\partial \Psi}{\partial t}$$

$h$ : ピエゾ水頭

$$h = \Psi + Z$$

$\Psi$ : 圧力水頭

$Z$ : 位置水頭

$K_{ij}$ : 飽和領域での透水係数テンソル

$k_{rw}(\theta)$ : 水の相に対する相対透水係数

$\theta$ : 体積含水率

$C(\theta)$ : 比水分容量

$$\alpha = \begin{cases} = 1 & (\text{飽和}) \\ = 0 & (\text{不飽和}) \end{cases}$$

$S_s$ : 比貯留率

$q$ : 単位体積当たりの水の湧きだし

$x_i$ : 直交座標系 ( $i=1, 2, 3$ )

$t$ : 時間

ここでは、水の体積変化は無視しうるものとし、地下水流動場は等価多孔質媒体であると仮定した。

この支配方程式を有限要素法によってプログラム化したTAGSAC(Three dimensional Analyses of Groundwater flow Saitama university Code)コード<sup>14)</sup>を用いて定常状態の地下水流動解析を行った。

### (2) 地下水流動解析結果

解析結果は、ピエゾ水頭（水理ポテンシャル、圧力水頭と位置水頭の和）の分布図とダルシー流速ベクトル図としてまとめた。また、地下水流動の指標となる動水勾配（水理ポテンシャルの勾配）の頻度分布図を作成した。

ここでは、本研究の基本ケースである解析ケース1の結果を中心にまとめる。

#### 1) ピエゾ水頭、ダルシー流速ベクトル

解析領域の標高-1,000m水平断面におけるピエゾ水頭分布にダルシー流速ベクトルを重ねたものを図8に示す。また、解析領域中央付近をほぼ南西-北東に横切る鉛直断面（図中のa-a'断面）におけるピエゾ水頭分布とダルシー流速ベクトルを図9に示す。図9には比較のため解析ケース2の結果も示す。

水平断面におけるピエゾ水頭分布（図8）から、解析領域中央部およびその南側の山地（石狩山地、夕張山地、日高山脈）に相当する部分でピエゾ水頭が高くなっていることが認められる。また、積丹半島の付け根の部分（石狩平野の西側の山地）でもピエゾ水頭が高くなっている。これらの山地部に入り込むような形で等高線が見られるが、この等高線が入り込んでいる部分は盆地（名寄盆地：中央部北側、上川盆地：中央部西側）あるいは平野（十勝平野：中央部南側）に相当する。

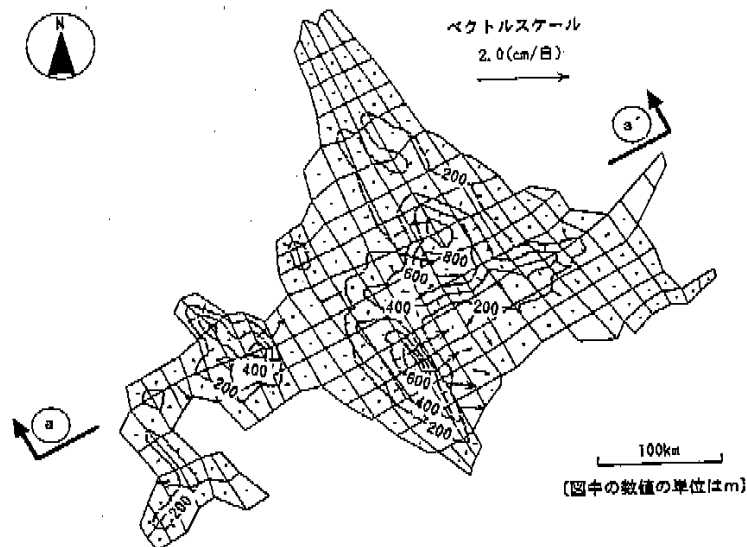


図8 標高1,000 mにおけるピエゾ水頭とダルシー流速ベクトル（解析ケース1）

この分布形状は、標高の分布（図2）とよく一致していることから、地下水流動の傾向が地形を反映したものであることが分かる。

ダルシー流速ベクトル図（図8）からは、

地下深部での地下水の流動が極めて緩慢（速いところでも1.0 cm/日未満）であることが分かる。そして、標高の高い山地部から盆地部、あるいは平野部への地下水の流動が認め

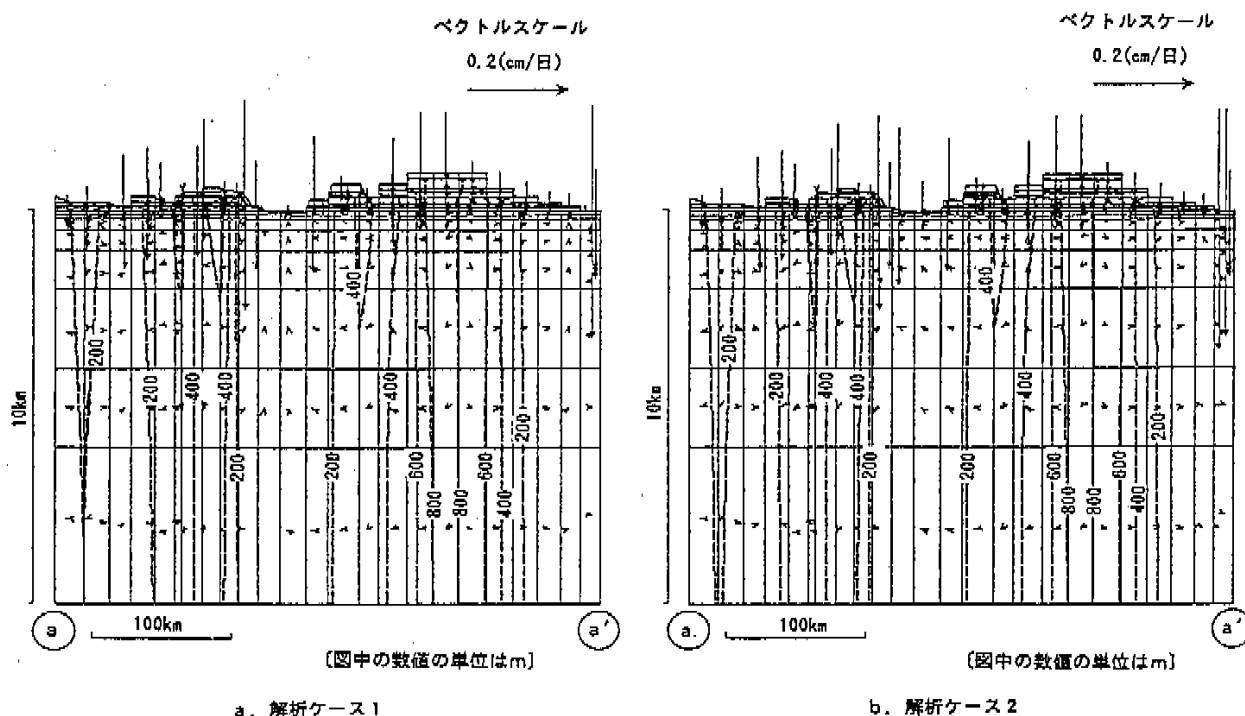
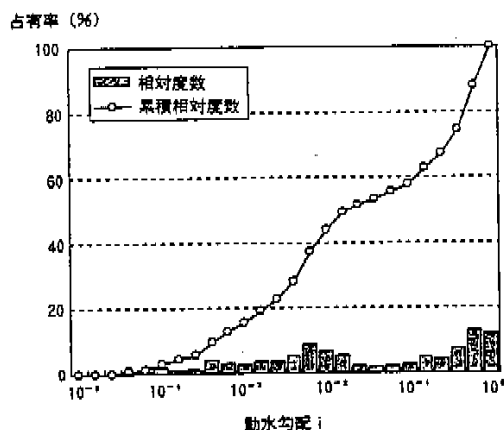
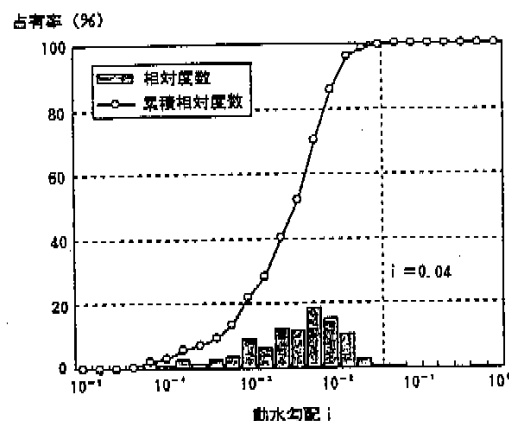


図9 a-a'鉛直断面におけるピエゾ水頭とダルシー流速ベクトル



(a) 深度0~500m



(b) 深度500m以深

図10 動水勾配の頻度分布

られる。

鉛直断面におけるピエゾ水頭分布とダルシー流速ベクトル図(図9)から、深度500m付近までは鉛直方向の地下水流動が見られるが、それ以深では流速は小さくなり、次第に水平方向の流動が支配的になっていくことが分かる。さらに、およそ深度1,000m以深では、ピエゾ水頭分布を表す等高線はほぼ平行になっていることから、ピエゾ水頭の変化は小さく、静水圧分布に近い状態になっていることが分かる。

## 2) 動水勾配の頻度分布

深度0~500m、および深度500m以深での動水勾配の頻度分布を図10に示す。これらの図は、ある動水勾配をもつ部分が各深度の範囲に占める体積の割合を表したものである。この結果から、深部ほど動水勾配は小さくなる傾向が認められ、深度500m以深においては、その95%以上の領域が動水勾配0.04以下(透水係数を $1.0 \times 10^{-4}$  cm/secとした場合、地下水の流速は3.5mm/日以下)であることが明らかとなった。

## 3) 側方境界条件の違いによる解析結果への影響

海岸部の側方境界を透水境界とした解析ケース2については、ピエゾ水頭分布、ダルシー流速ベクトル(図9)、および動水勾配の占有率とも解析ケース1とほぼ同様の結果が得られ、側方境界条件の違いによる解析結果への影響は見られなかった。

## 3. 東北日本を対象とした地下水流動解析

### 3.1 解析対象領域

猪苗代湖を含む阿武隈川-阿賀野川の水系より北側の本州を解析対象領域として設定した。阿賀野川と猪苗代湖、および阿武隈川を結ぶ水系は、地形的にみてそれ以南の地域との分水界になっているものと考えられる。

当該領域は東西方向約300km、南北方向約500kmにおよび、東西と北側の境界は海岸線である。

### 3.2 地下水流動解析

北海道を対象とした地下水流動解析と同様の方法で解析を行った。

東北日本の水理地質構造モデルを図11に示す。要素数は2,032、節点数は2,882である。境界条件は基本的に北海道の場合と同様であるが、南側側面(阿賀野川と猪苗代湖、および阿武隈川を結ぶライン)は不透水境界とし、東北日本における主

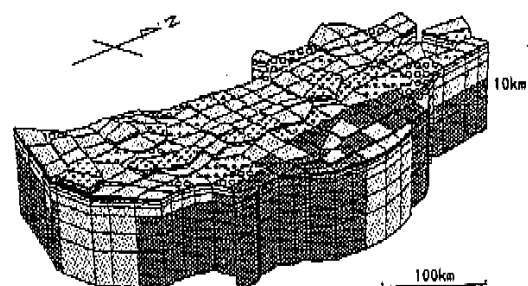


図11 東北日本の水理地質構造モデル(凡例は表2)

要な湖沼である十和田湖、田沢湖、猪苗代湖に当たる節点を定水位と仮定した。

解析結果として、標高1,000mにおけるピエゾ水頭分布図にダルシー流速ベクトルを重ねたものを図12に示す。また、岩手県釜石鉱山の位置に相当する部分を含む東西方向の鉛直断面（図中のa-a'断面）におけるピエゾ水頭分布とダルシー流速ベクトルを図13に示す。

東北日本の広域的な地下水流動の方向は、南北に配列した山地部から山間の盆地部や海岸部に向かうものとなっており、このことから地下水流動の方向は大局的な地形に支配されていることが分かる。また、深度方向のピエゾ水頭の変化は小さく深度1,000m以深で静水圧を示すこと、深度500m以深では動水勾配がほぼ0.04以下となること、海岸部側面の側方境界条件の違いによって解析結果に顕著な変化は生じないこと等、北海道を対象とした解析とはほぼ同様の結果が得られた。

#### 4. まとめ

以下に、本研究の解析結果をまとめる。

- ① 広域的な地下水流動の方向は、北海道においては中央部の山地から山間部の盆地や周辺の平野部へ、東北日本においては南北に配列した山地部から山間の盆地部や海岸部へ向かうものであるという結果が得られ、広域的な地下水流動の方向が大局的な地形に支配されていることが確認された。
- ② 深度500m付近までは鉛直方向の地下水の流動が見られるが、それ以深では鉛直方向の流速は小さくなり、流動の方向は次第に水平方向に移行していく。そして、深度1,000m以深では深度方向のピエゾ水頭の変化は小さくほぼ静水圧分布を示す。
- ③ 動水勾配は深度が深くなるにしたがって小さくなり、深度500m以深ではほぼ0.04以下である。
- ④ 海岸部の側方境界条件の違い（不透水境界と透水境界の違い）によって、解析結果に顕著な変化は生じない。

#### 5. おわりに

日本の地下深部における概括的な地下水流動特性を把握するために、今後は解析対象地域を拡張、各地域の解析結果から地形分類（低地、台地、丘陵地、山地）別に地下水流動特性を求める予定である。

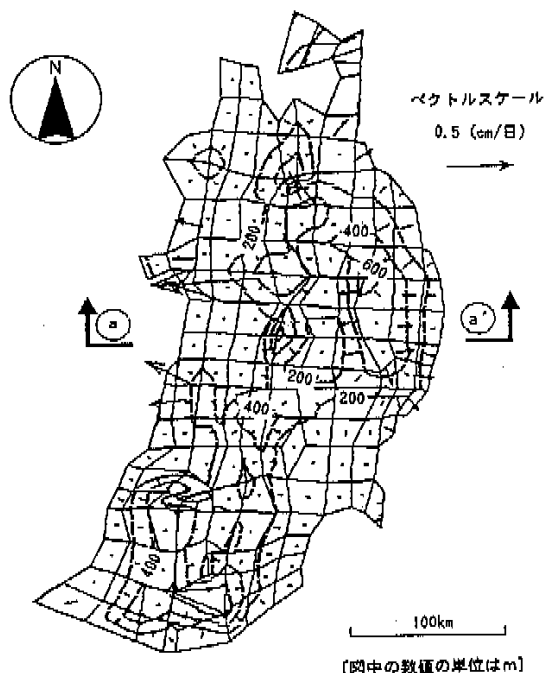


図12 標高1,000mにおけるピエゾ水頭分布とダルシー流速ベクトル

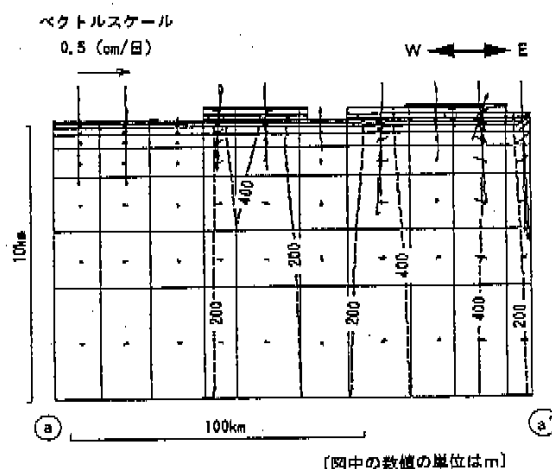


図13 a-a' 鉛直断面におけるピエゾ水頭とダルシー流速ベクトル

#### 参考文献

- 1) 棚澤平一, 今井 久, 他: 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, PNC TN 741092-019, (1992).
- 2) 前川忠輔, 梅田浩司, 他: 我が国を対象とした地下水流動解析 その2 東北日本を対象とした地下水流動解析, PNC TN 7410

- 94-029, (1994).
- 3) 稲葉秀雄, 前川恵輔, 他: 我が国を対象とした地下水流動解析  
その3 北海道を対象とした地下水流動解析, PNC TN 741095-  
012, (1995).
  - 4) 岡山俊雄: 「接峰面図」1:2,000,000, 第四紀地殻変動図, No.  
6, 国立防災科学技術センター, (1969).
  - 5) 鈴木隆介: 現場技術者のための地形図読図入門2 読図の手順  
と図上作業, 測量, 1977-6, 47-55, (1977).
  - 6) 地質調査所: 日本地質図, (1962).
  - 7) 加藤 誠, 他編: 日本の地質1 北海道地方, 共立出版, (1990).
  - 8) 梅田浩司, 柳澤孝一, 他: 日本の地盤を対象とした透水係数  
データベースの作成, 日本地下水学会誌, 第37巻第1号, 69-77,  
(1995).
  - 9) 地下水ハンドブック編集委員会編: 地下水ハンドブック, 建設  
産業調査会, (1989).
  - 10) D.K.Todd: Groundwater Hydrology Second edition, John  
Wiley & Sons, (1980).
  - 11) Watanabe Kunio: Analysis of Three-Dimensional Groundwater  
Flow in the Near-surface Layer of a small Watershed, Journal  
of Hydrology, 102, 287-300, (1988).
  - 12) 西坂 誠: 地下水数値計算法(3)1-2, 有限要素法による不飽和  
浸透流の解析, 地下水学会誌, 第32巻第3号, 163-171, (1990).
  - 13) P.S. ファヤコーン, G.F. ビンダー: 地下水解析の基礎と応用, 現代  
工学社, (1988).
  - 14) 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 TN 741090-026, (1990).