

001

PNC TN7410 95-012

公開資料

TR/GE 95-02

技術資料		
開示区分	レポートNo.	受領日
T	N7410 95-012	1995.10.9
この資料は技術管理室保存資料です 閲覧には技術資料閲覧票が必要です <small>動力炉・核燃料開発事業団 技術協力部技術管理室</small>		

我が国を対象とした地下水流动解析

その3 北海道を対象とした地下水流动解析

稻葉秀雄
前川恵輔
小出馨
柳澤孝一

1995年7月

動力炉・核燃料開発事業団

東濃地科学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒509-51 岐阜県土岐市泉町定林寺園戸959-31

動力炉・核燃料開発事業団

東濃地科学センター

技術開発課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :
Geotechnics Development Section. Tono Geoscience Center. Power Reactor and
Nuclear Fuel Development Corporation 959-31, Jorinji, Izumi-machi, Toki-shi,
Gifu-ken 509-51, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development
Corporation) 1995

公開資料

PNC TN7410 95-012

1995年7月

我が国を対象とした地下水流动解析
その3 北海道を対象とした地下水流动解析

稲葉秀雄*、前川恵輔*、小出 肇*、柳澤孝一*

要旨

我が国の地下深部における水理学的特性を概括的に把握するための研究の一環として、北海道を対象とした地下水流动解析を実施した。解析にあたっては、文献資料をもとにして、北海道の地形や地質構造の特徴が反映されるように考慮した上で単純化した水理地質構造モデルを作成した。さらに、透水係数などの水理パラメータと水理的な境界条件に基づいて、解析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 北海道の広域的な地下水流动の方向は、中央部に位置する山地から、山間の盆地や周辺の平野部に向かい、地下水流动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。

PUBLIC
PNC TN7410 95-012
Jul.1995

GROUNDWATER FLOW ANALYSES IN JAPAN
—Part 3 : A Case Study in Hokkaido —

Hideo INABA*, Keisuke MAEKAWA*, Kaoru KOIDE*, and Koichi YANAGIZAWA*

ABSTRACT

An extensive study program has been carried out by PNC to estimate hydrogeological characteristics of deep underground in Japan. As a part of this program, groundwater flow analyses in Hokkaido were conducted. For the analyses of Hokkaido area (500km × 400km × 10km deep), a hydrogeological model representing topography, distribution of hydraulic conductivity was developed on the strength of information available from open literature. By the use of this model, steady state three-dimensional groundwater flow under a saturated-unsaturated condition was calculated by means of finite element method.

The results are as follows :

- (1) Distribution of piezometric head corresponds with topography in the study area.
- (2) Piezometric head distribution is hydrostatic below E.L.-1000m in the study area.
- (3) Hydraulic gradient in the study area is less than 0.04 below E.L.-500m.
- (4) Difference of boundary conditions at the shore side of this model does not affect the result of the analyses.

目 次

1. はじめに	1
2. 本研究の位置づけと目的	2
2.1 本研究の位置づけ	2
2.2 本研究の目的	2
3. 北海道を対象とした地下水流动解析	3
3.1 解析対象領域	3
3.2 北海道の概要	3
3.2.1 地形概要	3
3.2.2 地質概要	3
3.2.3 水文環境	6
3.3 解析の手順	9
3.4 水理地質構造モデルの作成	11
3.4.1 地形モデルの作成	11
3.4.2 地質構造モデルの作成	17
3.4.3 岩盤の透水性の設定	17
3.4.4 水理地質構造モデルの作成	17
3.5 水理学的境界条件の設定	23
3.6 地下水流動解析	27
3.6.1 数値解析手法	27
3.6.2 解析モデルの設定	28
3.6.3 数値解析結果	30
4. まとめ	57
5. 今後の課題	58
参考文献	60

図目次

図 3.1	北海道の地形概要	4
図 3.2	北海道の地質概要	5
図 3.3	北海道における年間降水量の分布	7
図 3.4	北海道のおもな河川と流量の年変化	8
図 3.5	解析手順のフローチャート	10
図 3.6	地形のモデル化方法	11
図 3.7	地形特性図	13
図 3.8	地形モデルの2次元要素分割図（水平面）	15
図 3.9	地形モデル	16
図 3.10	標高の頻度分布	16
図 3.11	不飽和特性	18
図 3.12	北海道の代表的な地質区分における透水係数の頻度分布	20
図 3.13	北海道の水理地質構造モデル	21
図 3.14	北海道の水理地質構造モデル（水平断面）	22
図 3.15	解析領域に設定した境界条件	23
図 3.16	各解析ケースにおける海岸部側面の境界条件	29
図 3.17	地下水流动解析結果〔解析ケース1〕	32
図 3.18	浸出点の分布〔解析ケース1〕	34
図 3.19	解析領域全体における水收支の計算結果〔解析ケース1〕	35
図 3.20	各深度における動水勾配の占有率〔解析ケース1〕	35
図 3.21	地下水流动解析結果〔解析ケース2〕	38
図 3.22	浸出点の分布〔解析ケース2〕	40
図 3.23	解析領域全体における水收支の計算結果〔解析ケース2〕	41
図 3.24	各深度における動水勾配の占有率〔解析ケース2〕	41
図 3.25	地下水流动解析結果〔解析ケース3〕	44
図 3.26	浸出点の分布〔解析ケース3〕	46
図 3.27	解析領域全体における水收支の計算結果〔解析ケース3〕	47
図 3.28	各深度における動水勾配の占有率〔解析ケース3〕	47
図 3.29	地下水流动解析結果〔解析ケース4〕	50
図 3.30	浸出点の分布〔解析ケース4〕	52
図 3.31	解析領域全体における水收支の計算結果〔解析ケース4〕	53
図 3.32	各深度における動水勾配の占有率〔解析ケース4〕	53

表目次

表 3.1 地形分類とその特徴	12
表 3.2 北海道における地質区分と解析モデルに設定した透水係数	18
表 3.3 日本の地盤の透水性に関する調査対象雑誌と収集データ件数一覧	19
表 3.4 各地質区分に設定した透水係数	21
表 3.5 北海道のおもな水系における涵養量算定結果	26

1. はじめに

動力炉・核燃料開発事業団では、我が国地質環境が本来有している物理的あるいは化学的な諸特性の把握を目的として「地層科学研究」を進めている。地層科学研究は、地表から地下深部にわたる地質環境中での、水理学、岩盤力学、地球科学および地質学など多岐の研究分野に関わる基礎的な課題の研究である。

この地層科学研究の一環として進めている広域の地下水流动に関する研究では、日本における地下深部の水理学的特性（地下水流动の方向性や動水勾配の分布傾向）を把握することを目的として、コンピューターを用いた地下水流动解析を行っている。

本報告書は、北海道における水理学的特性を明らかにするために行った地下水流动解析の結果をとりまとめたものである。

一般に、地下水流动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などの情報の質と量は、対象とする領域の規模によって制限される。特に、数百km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不可能なため、それぞれの情報に関する分野の文献や報告書などの既存の資料に基づいて対象領域の特徴を表現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、それらの特徴ができるだけ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など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水理学的特性の把握を行った。

2. 本研究の位置づけと目的

2.1 本研究の位置づけ

山地、盆地、平野部などの地形は、表層から地下深部にわたる地下水流动に影響を及ぼすことが知られている（J.Toth,1963）。そのため、広範な領域の地下水流动を把握する場合には、その領域の概括的な地形を考慮する必要がある。また、地質構造についても、地形とともに地下水流动に影響を与える重要な要素であるため、できるだけ特徴を考慮することが必要である。

本研究は、我が国を対象とした地下水流动解析の一環として、中部日本を対象とした地下水流动解析（柳澤ほか、1992）、東北日本を対象とした地下水流动解析（前川ほか、1994）に引き続いで、北海道を対象とした地下水流动解析を実施し、北海道の概括的な水理学的特性の把握を行ったものである。中部日本、および東北日本の場合と同様に、対象領域が数百km四方の広範囲におよぶため、地形や地質構造あるいは水理パラメータなどは既存の地質や土木に関する文献に記載されているデータに基づいて設定した。この方法は、中部日本および東北日本を対象とした地下水流动解析をとおして確立してきた、広範囲な領域を対象として地下水流动解析を行う場合のモデル化手法に則ったものである。

2.2 本研究の目的

本研究では、北海道における水理学的特性（地下水流动の方向性や動水勾配の分布傾向など）を把握することを目的とした。

さらに、これまでに検討課題として示されている海岸部分の境界条件の設定について、海岸付近の塩淡境界を考慮し、広範囲な領域を対象として地下水流动解析を行う場合の海岸部のモデル化手法を示すことを目的とした。

3. 北海道を対象とした地下水流动解析

3.1 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て設定した。当該領域は、東西方向約500km、南北方向約400kmに及び、周囲の境界はすべて海岸線である。

3.2 北海道の概要

地下水流动解析の実施に先立ち、地下水流动に影響を及ぼすものと考えられる地形、地質、水文環境について、解析対象とする北海道におけるそれらの概要を述べる。

3.2.1 地形概要

北海道の面積は約8万km²である。山地は全面積の約6割を占め、その約4割は火山性の山地である。平地のうち約7割近くは火山灰におおわれた台地状の地形になっている。北海道は石狩、勇払の2平野によって胴体部と半島部（または道南部）に分かれる（図3.1）。胴体部は天塩山地、夕張山地、日高山脈、石狩山地、北見山地、東部火山地域の各山地、天塩山地と北見山地との間の中央盆地群、十勝平野と周辺丘陵、根釧原野、石狩、勇払平野に分かれる。半島部は西部火山群域と渡島山地とに分けられる。天塩山地は標高1,000m以下、夕張山地は天塩山地の南につづくが天塩山地とは空知川の横谷によってへだてられている。日高山脈は北海道の脊梁をなし、1,500～2,000mの山峰が連なる。日高山脈の北には石狩山地、高度を減じて北見山地がある。北海道での最高点はほぼ中央にある大雪火山の旭岳で、標高2,290mである。天塩山地と北見山地の間に名寄盆地や上川盆地、天塩山地と石狩山地の間に富良野盆地などの中央盆地群が南北に並ぶ。日高山脈の東側の十勝平野は、火山灰におおわれた隆起扇状地と十勝川に沿う沖積平野に分けられる。また、根釧原野は根室台地と釧路平野の2部分に分けられる。

3.2.2 地質概要

北海道における地質区分は大別すると、先新第三系、中新統、鮮新統～完新統、および鮮新世～第四紀火山岩類である（図3.2）。基盤は大部分が古第三紀までの堆積岩からなる。中央部の山脈および半島部には深成岩があり、山脈の中軸部には変成岩もみられる。

北海道の西部（半島部）では、中生代ジュラ紀の複合地質体と白亜紀の花崗岩を、新第三紀～第四紀の火山岩、火碎岩類を含む堆積岩がおおっている。

北海道中央部の石狩低地帯には、支笏カルデラに由来する火碎流堆積物や、それをおおう樽前・恵庭などの火山に起源をもつ浮石火山灰が広く分布している。中央部には北海道の背骨にもたとえられる日高山脈があり、日高変成帶の岩石は変成作用を受け、新生代花崗岩に貫入された上部中世界と下部新世界を含む島弧性地殻が、東から衝上しているものと解釈されている。日高山脈の東側には十勝平野の新第三紀～第四紀堆積盆がある。北方

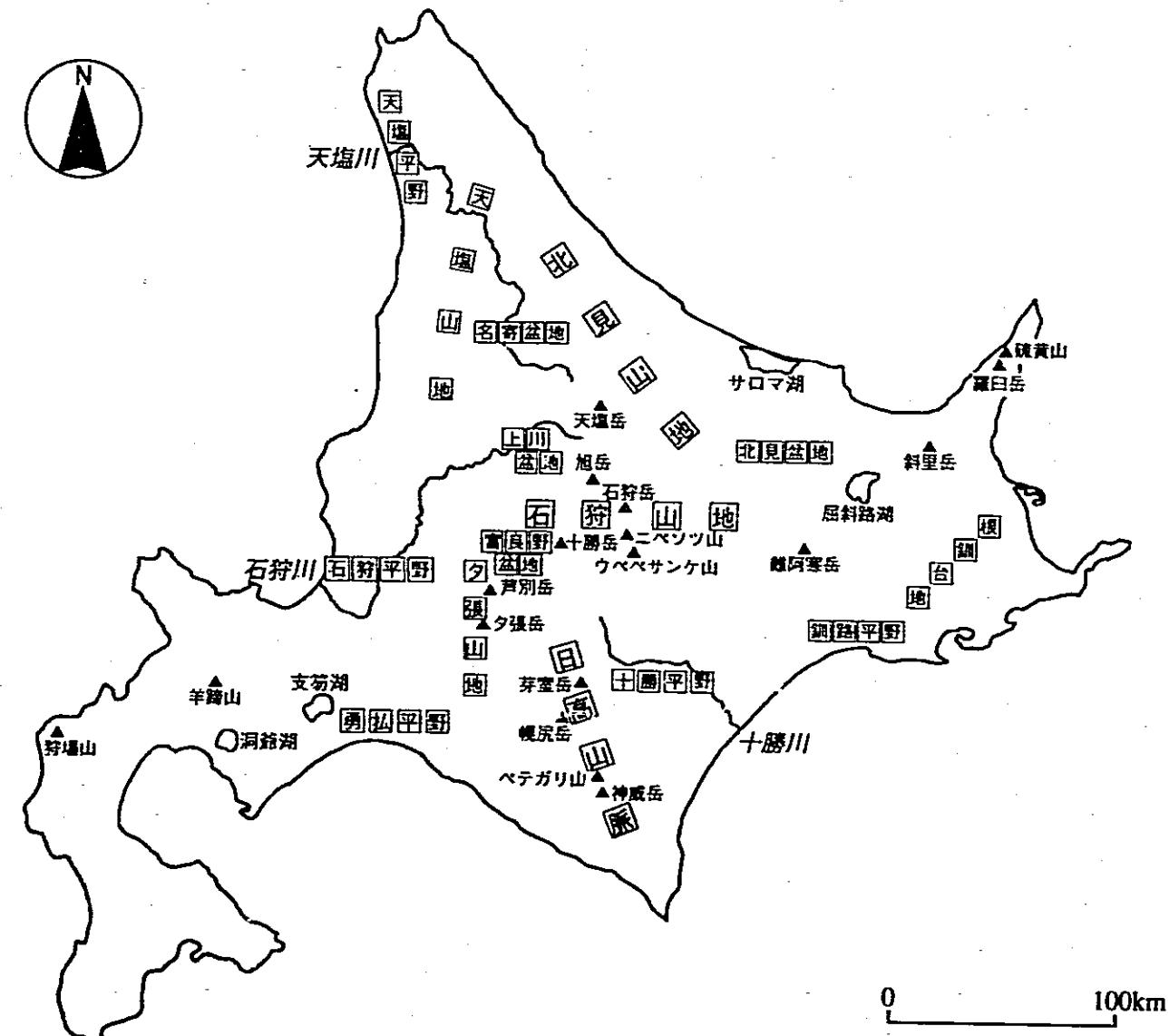


図3.1 北海道の地形概要

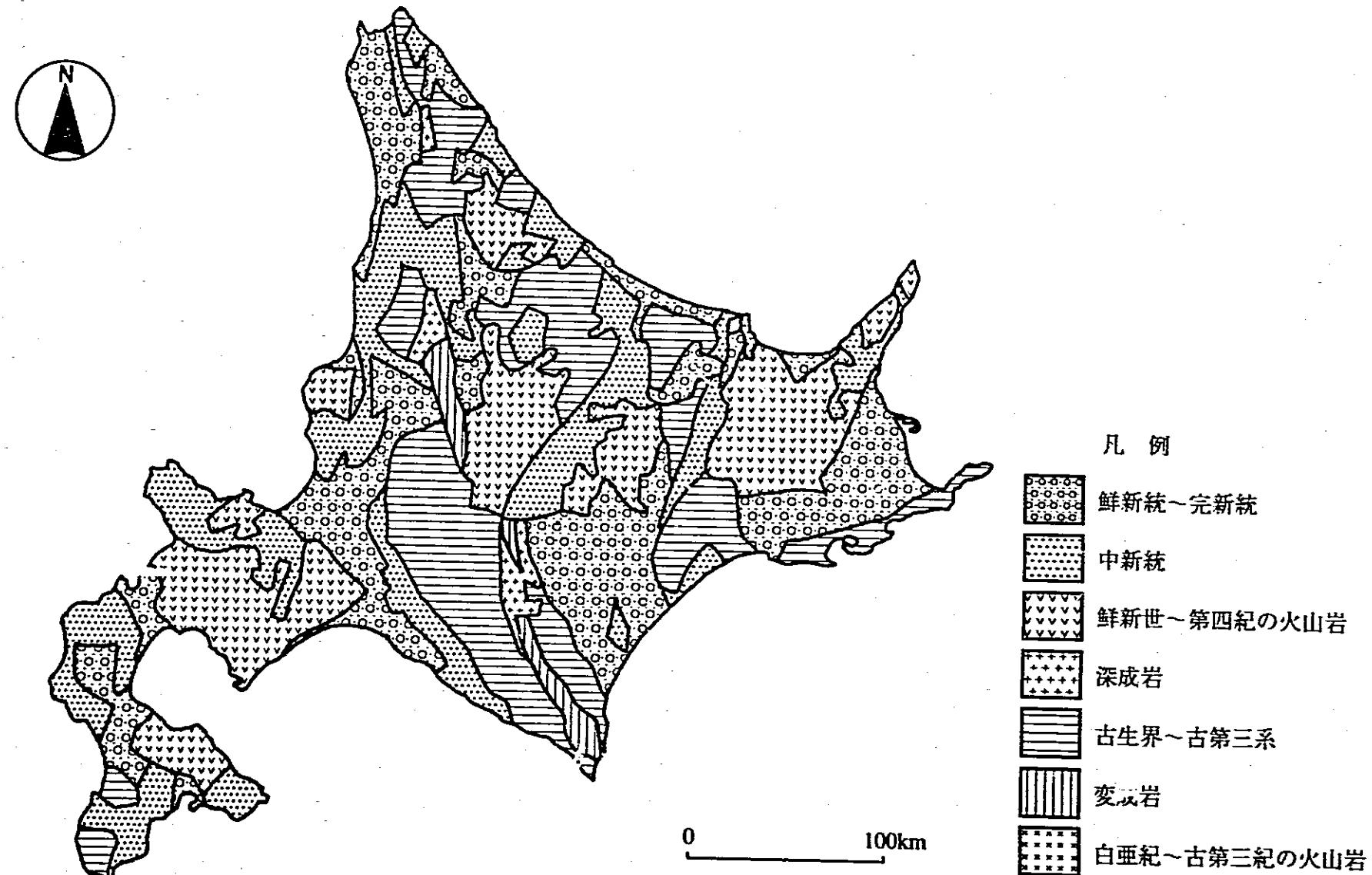


図3.2 北海道の地質概要
[100万分の1地質図（地質調査所、1982）をもとに作成]

には白亜紀堆積物の複合地質体が広がりそれを新第三紀の火山岩、火碎岩がおおう。

北海道東部の知床半島から西に向かって新第三紀以降の火山群が雁行状に配列している。地表には阿寒、屈斜路カルデラに由来する火碎流が台地を作っている。

3.2.3 水文環境

北海道は山地の配列、海流の影響などにより気候の地域差を示す。道南の半島部ならびに札幌付近の日本海沿岸などでは多量の積雪があるが、これに対し、天塩山地や日高山脈以東の地域では積雪が少ない。

北海道の年降水量は1,237mm／年（国土統計要覧（S.62））とされているが、前述の積雪量の大小を反映し、日本海側では1,000～1,800mm／年程度、天塩山地や日高山脈以東では800～1,400あるいはそれ以下となっている（図3.3）。

降水は、地下への浸透や地表からの蒸発あるいは地表付近からの河川への流出などによって散逸する。このことから、河川流量は水文環境に影響を与える重要な要素と考えられる。北海道のおもな河川（図3.4）についてみると、天塩山地、日高山脈以西の地域では流出高（年間の河川流出量をその河川の流域面積で除した値）は1,000～2,000mmであるのに對し、それ以東では1,000mm以下となっている。これは年間の降水量の大小を反映したものといえるが、河川によっては降水量よりも流出高の方が多いという現象がみられる。これは山地の降水量、とくに降雪量の測定の不備によるもので、北海道における眞の降水量は公表されているものを大きく上回るものと考えられている。

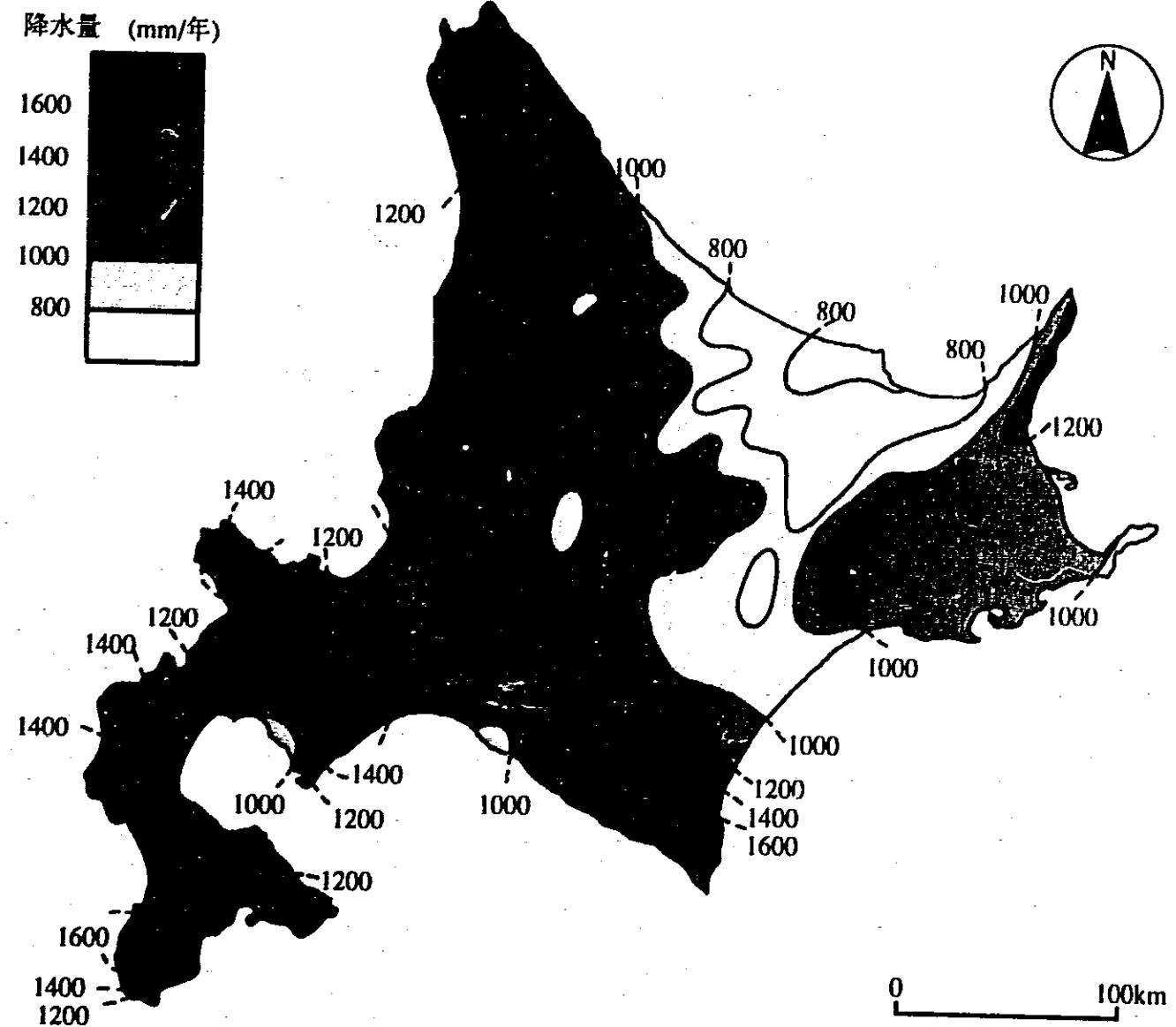


図3.3 北海道における年間降水量の分布
(気象庁、1970)

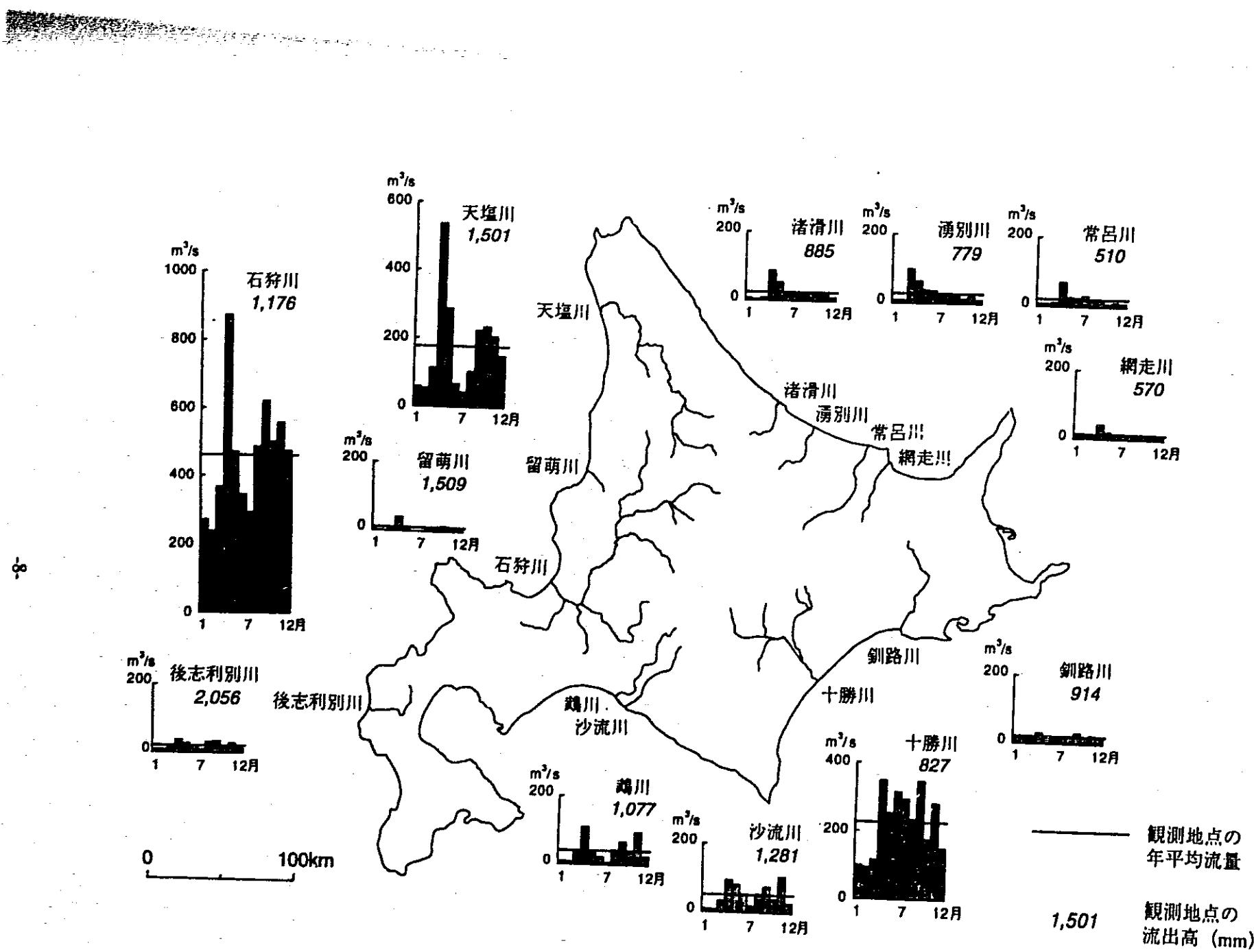


図 3.4 北海道のおもな河川と流量の年変化

3.3 解析の手順

本研究では次の手順に従って解析を行う。

- (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
- (3) 地下水流動解析

それぞれの手順の概要は、以下の通りである。

(1) 水理地質構造モデルの作成

① 地形モデルの作成

概略的な地形を表現した地形特性図（後述）をもとにして、山地や盆地などの地形の特徴ができるだけ反映されるような水平面の2次元要素分割図を作成した。分割した各要素の標高値は、標高値のデータファイルである国土数値情報（後述）を用いて代表標高値を決定し、地形モデルとした。

② 地質構造モデルの作成

文献資料に基づき、解析対象領域の地質を岩種や透水性によって7種類の地質区分に分類した。この地質区分により、解析対象領域における3次元的な地質構造を表現し地質構造モデルとした。

③ 岩盤の透水性の設定

文献資料から得られた地質区分ごとの原位置透水試験結果から、対象領域における透水係数を設定した。また、不飽和領域の透水性は、水分特性曲線（飽和度と負の圧力水頭との関係）、および飽和度と不飽和透水係数との関係により設定した。

④ 水理地質構造モデルの作成

地形モデルと地質構造モデルを組み合わせたものに、地質区分ごとの3次元的な透水係数の分布を設定することによって、水理地質構造モデルを作成した。

(2) 水理学的境界条件の設定

解析モデルの上面、すなわち地表面に相当する部分は自由浸出面、底面は不透水面とした。さらに上面には地表からの涵養量を、湖および湿地には定水位の条件を設定した。

海岸部の側面における境界条件はこれまでの例（中部日本、東北日本）に基づき、不透水境界としたものを基本ケースとし、境界条件の違いによる解析結果への影響を調べるために、海水面で一定水位となる条件を与えた解析モデルも設定した。さらに、海岸付近の塩淡境界を考慮した海岸部の側方境界条件を与えた解析モデルも設定した。

(3) 地下水流動解析

地下水流动解析は、Darcy則に基づいた3次元飽和・不飽和浸透流有限要素解析コードTAGSAC（渡辺ほか、1990；今井ほか、1990）を用いて、定常状態の地下水流动のシミュレーションを行った。

解析結果は、ピエゾ水頭（水理ポテンシャル）分布、ダルシー流速ベクトル図および動水勾配の占有率（頻度分布）などにまとめた。

以上の解析手順のフローチャートを図3.5に示す。

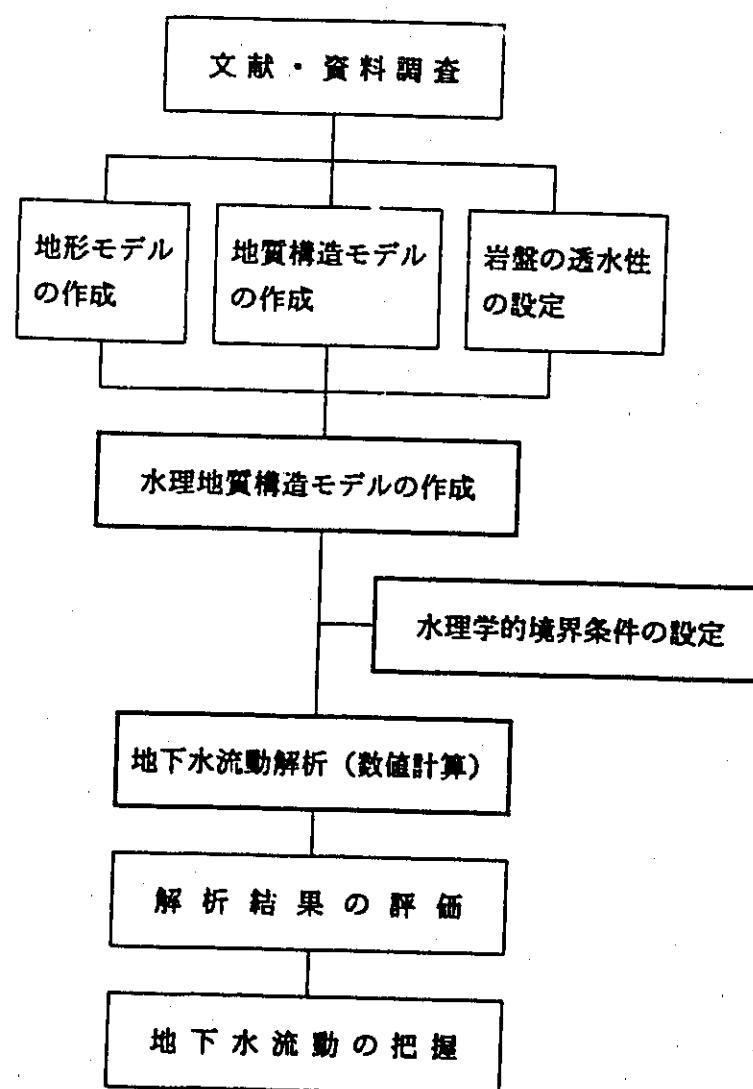


図 3.5 解析手順のフローチャート

3.4 水理地質構造モデルの作成

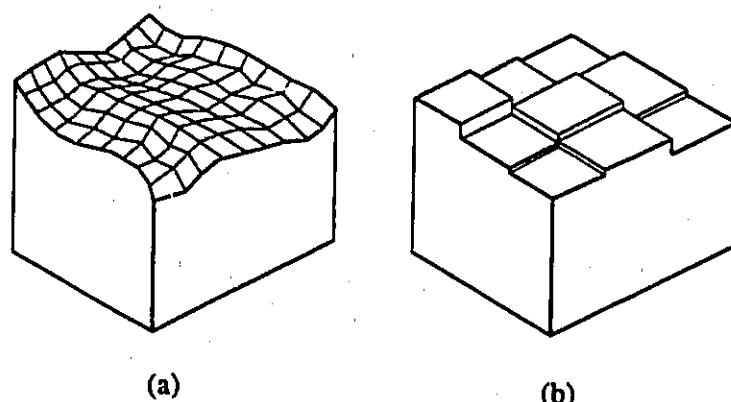
解析の対象とする領域の地形や地質構造を、実際の精密さと規模で表現することは不可能である。しかし、できるだけ実際のものと合致するように表現する必要がある。したがって、対象とする領域の地下水流动を表現するためには、地下水流动に影響を与える地形や地質構造を、それぞれの特徴が反映されるように考慮した上で、簡略化して表現すること（モデル化）が必要となる。

地下水流动に影響を与える要因のうち、地下水流动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。

そして、この水理地質構造モデルに水理学的境界条件を考慮することによって、対象領域の水理学的な場をモデル化することになる。

3.4.1 地形モデルの作成

地形をモデル化する方法には、標高値を有する各点を結ぶことによって地表面を表現する方法や、ある領域ごとに求めた平均標高値をその領域の標高値とする方法などが考えられる（図3.6）。本研究では、数百kmにおよぶ広範囲な領域を対象とするため、領域全体ができるだけ簡略化して表現することが必要である。本研究の地形モデルは、領域ごとに平均標高を求める方法（図3.6 (b)）を用いて作成することとした。



- (a) 標高が与えられた各点をつないで地形を表現したモデル
- (b) ある領域ごとに求めた標高値により地形を表現したモデル

図3.6 地形のモデル化方法

(1) 接峰面図と地形特性図

広範囲な領域を対象とするため、地形をモデル化する際にはその特徴的な概略の地形を把握することが必要になる。日本列島が低地、台地、丘陵地、山地に分類できる（表3.1）ことを考慮して、地形のモデル化を行うことにした。

表 3.1 地形分類とその特徴

地 形 分 類	標 高	代 表 標 高	地 形 の 特 徴
山 地	3,000m 1,000m 500m	1,000m	傾斜20度以上の急斜面が多く、谷底には平地が殆どみられない。
丘 陵 地		500m	尾根の高さは揃っており、谷底に狭い低地がみられる。
平 台 地	200m	100m	周囲を崖に囲まれた高台あるいは階段状の平坦地。
野 低 地	20-100m 0m	30m	河川とほぼ同じ高さで、下流ほど勾配の小さい平坦地となる。

（岡山、1969；鈴木、1977に基づく）

まず、対象領域の地形の特徴を捉えるための基図として接峰面図（岡山、1969）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想の曲面を表したものに相当することから、現在の地形が浸食される以前の原地形を復元したものと考えられ、地形の概略の形状を表現したものであるといえる。この接峰面図から、さらに山地や低地など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3.7）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。

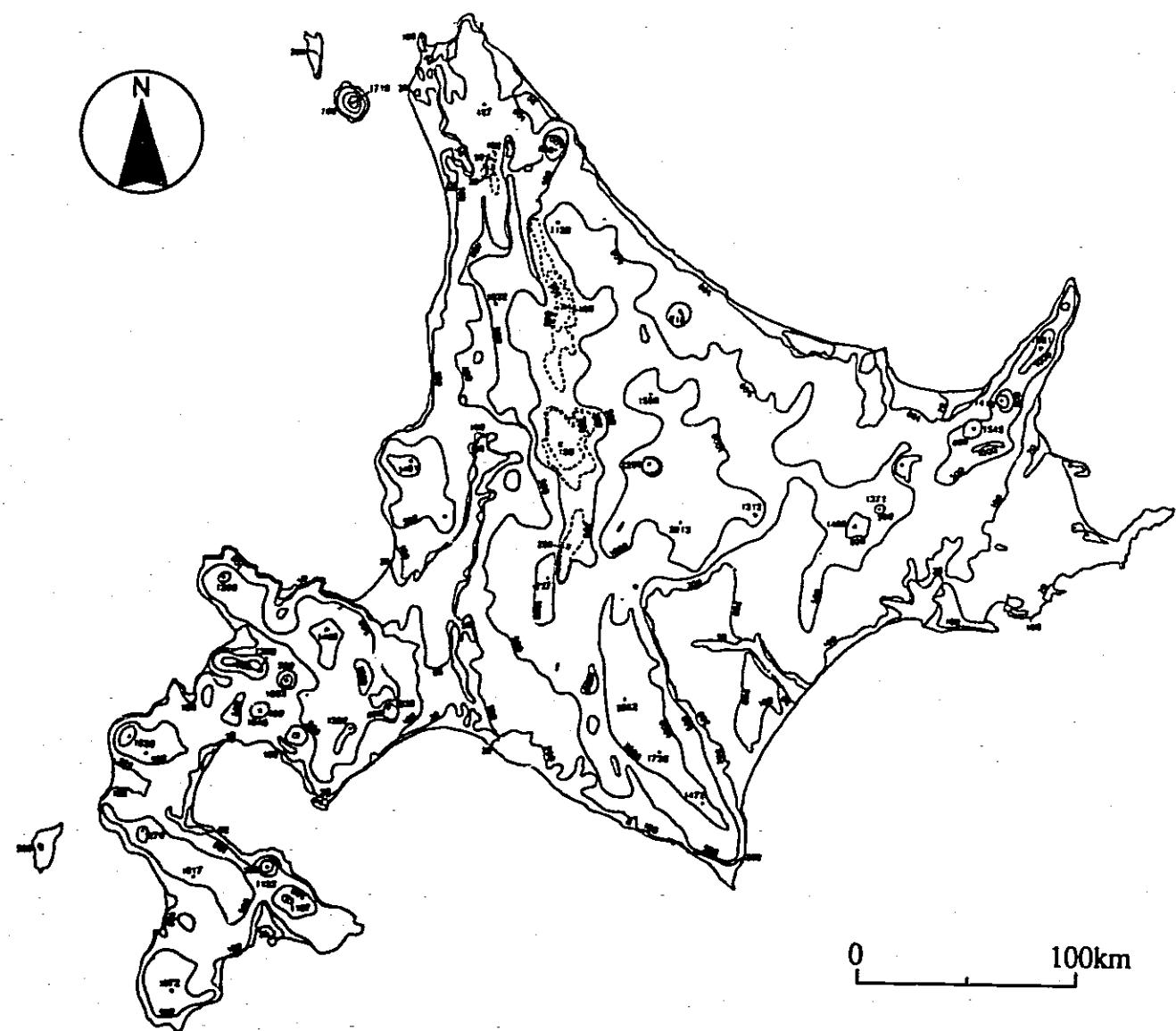


図 3.7 地形特性図

(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できるだけ忠実に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。とくに山地や盆地などの地形的な特徴を表現するために、分割した一つの要素がなるべくほかの地形分類の地域と重複しないようにした。また、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次元要素分割図を図3.8に示す。この要素分割図の要素形状に関する情報をコンピュータで処理するために、パーソナルコンピュータとデジタイザを用いて、各節点の座標値と要素形状の情報を数値データに変換した。

(3) 平均標高値の算出

次に、各要素領域における標高値（平均標高値）を求めるために、標高値の数値データである国土数値情報（建設省国土地理院、1983）の標高データファイル(KS-110-1)を用いた。

国土数値情報は、地図に表現されている地理的情報など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、地形特性図をもとに作成した水平面における2次元要素分割図（図3.8）とから各要素における平均標高値を算出した。

(4) 代表標高値の決定

地形を簡略化して表現するために、地形分類を考慮して低地、台地、丘陵地、山地のおよその標高値を設定した（表3.1）。この分類の境界は、地形特性図上で地形分類をおおむね反映することのできる高度の等高線を選択したものである。地形モデルの標高値は、こうして設定した地形分類の境界の標高値を含み、各要素の平均標高が生かされるような標高値を設定した（図3.9）。

この地形モデルの再現性について、標高値の頻度分布図を作成し、実地形のデータである国土数値情報との比較を行った（図3.10）。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、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良く再現しているといえる。

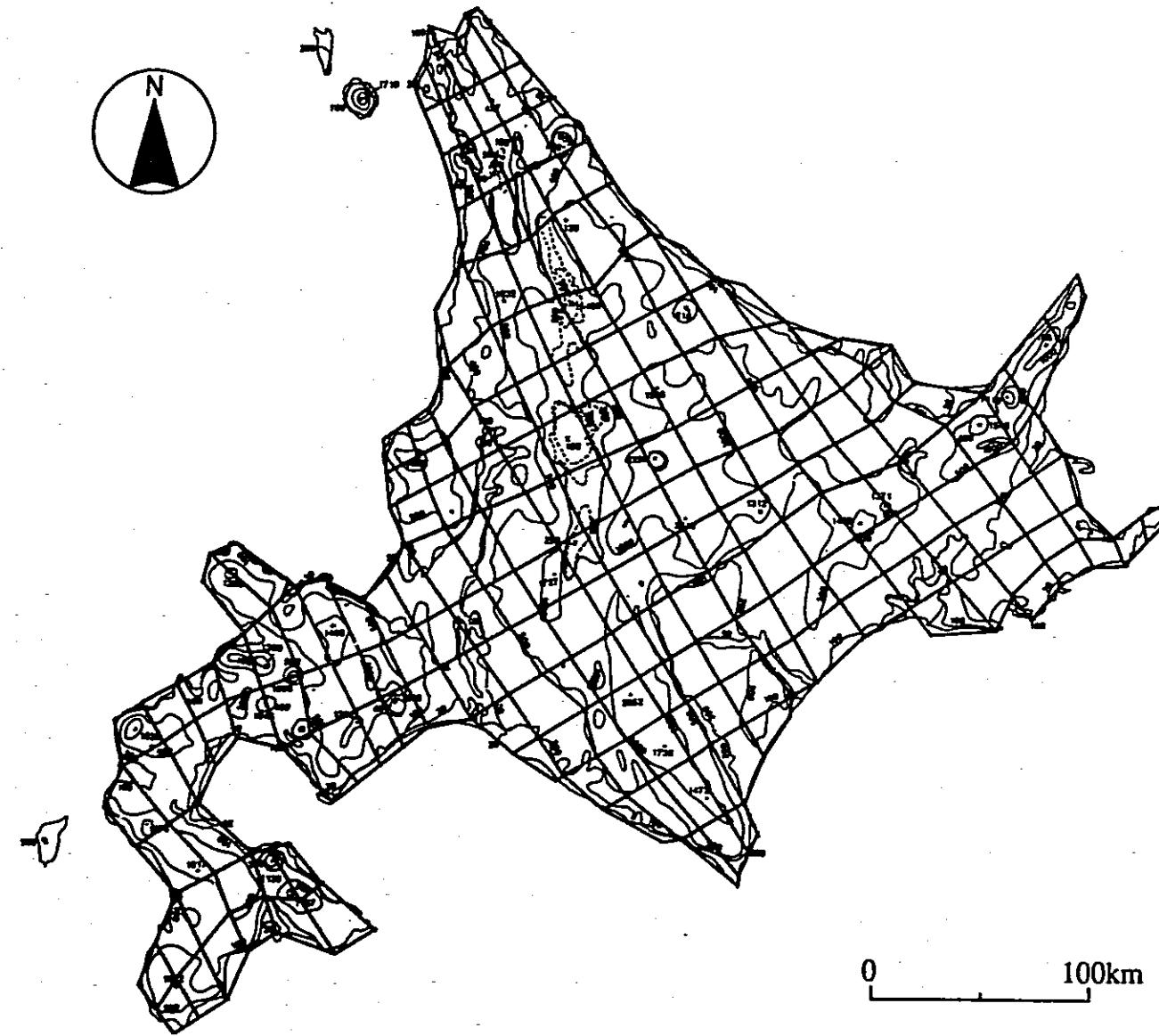


図 3.8 地形モデルの 2 次元要素分割図（水平面）

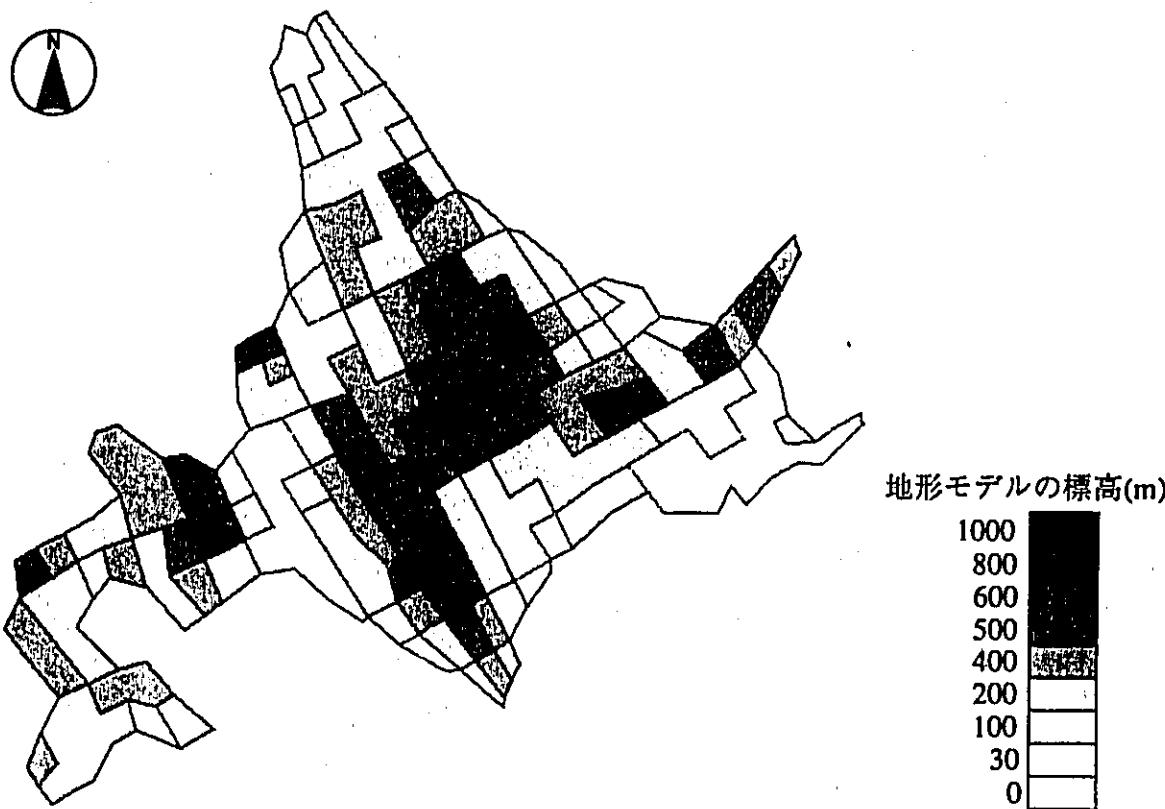


図 3.9 地形モデル

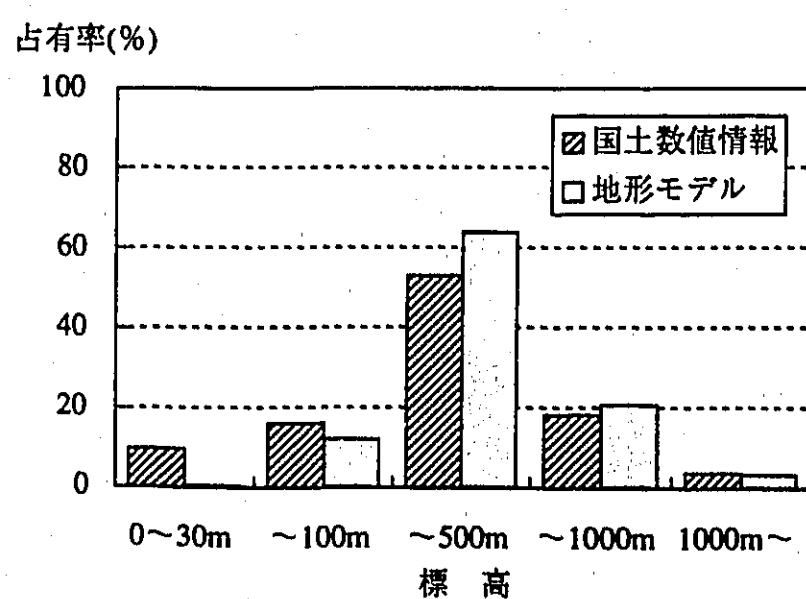


図 3.10 標高の頻度分布
(地形モデルと國土數値情報との比較)

3.4.2 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（地質調査所、1982）および北海道の地質構造に関する文献資料（加藤ほか編、1990）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。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て鉛直に分布しているものと仮定した。
- 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を仮定した。
- 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の分布を仮定した。
- 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を仮定した。
- ⑤ 断層は地質構造を分けるものののみを対象とし、その方向は鉛直と仮定した。

3.4.3 岩盤の透水性の設定

各地質区分における透水性のデータ（透水係数）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など29誌（表3.3）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（梅田ら、1995）。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。図3.12は本研究で対象とする各地質区分の透水係数の頻度分布をまとめたものである。

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、次のように設定した。まず、水分特性曲線によって飽和度と負の圧力水頭（地表面から地下水水面までの距離に相当）との関係を設定した。また、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3.11）。不飽和領域での透水性に関するパラメータは計測例がなく、試験方法自体もまだ確立されていないため、模式的なものであるが、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（地下水ハンドブック、1989：Todd、1980）。

3.4.4 水理地質構造モデルの作成

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3.13、図3.14）。水理地質構造モデルの深さ方向は10kmとした。

このモデルは有限要素モデルとするために六面体8節点要素によって分割した。要素数は2,319、節点数は3,380である。

表3.2 地質区分と解析モデルに設定した透水係数

地質区分	主な構成岩石	透水性	透水係数(cm/sec)
完新統 ↓ 更新統	礫、砂、泥 (未固結～半固結)	中 ↓ 高	1.0×10^{-3}
鮮新統	砂岩、泥岩、礫岩 (未固結～固結)		1.0×10^{-3}
中新統	砂岩、泥岩、礫岩 凝灰岩、火山岩	低	7.0×10^{-5}
第四紀～鮮新世 火　山　岩	安山岩など	中 ↓ 高	2.5×10^{-4}
基盤	先新第三系	低	5.0×10^{-5}
	深成岩	中	1.0×10^{-4}
	変成岩		1.0×10^{-4}

（地質調査所、1982ほかに基づく。透水係数は文献資料のデータによる。）

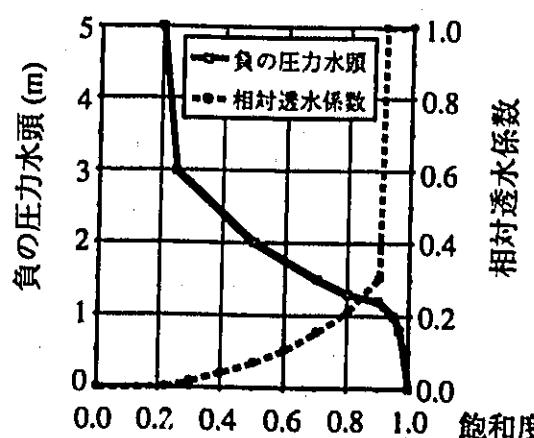


図3.11 不飽和特性
[飽和度と圧力水頭および不飽和透水係数との関係]
(地下水ハンドブック、土壤の物理等を参考に設定)

表 3.3 日本の地盤の透水性に関する調査対象雑誌と収集データ件数一覧

No.	調査対象雑誌	調査対象期間	収集件数
1	電力土木	1976~1990年	91
2	土木施工	1977~1990年	107
3	ダム技術	1983~1990年	60
4	大ダム	1980~1990年	59
5	土木学会誌	1971~1990年	25
6	土木学会論文報告集	1972~1990年	35
7	トンネルと地下	1970~1990年	335
8	日本鉱業会誌	1973~1990年	7
9	応用地質	1970~1990年	52
10	石油技術協会誌	1978~1990年	0
11	地熱	1970~1990年	1
12	地熱エネルギー	1976~1990年	34
13	土木技術	1980~1990年	40
14	土木技術資料	1970~1990年	57
15	地下水技術	1988~1990年	0
	地下水と井戸とポンプ*	1980~1988年	35
16	鉄道技術研究報告	1976~1984年	12
17	鉄道土木	1978~1986年	27
18	土と基礎	1970~1990年	137
19	土質工学会論文報告集	1972~1990年	5
20	基礎工	1973~1990年	192
21	鉱山地質	1970~1990年	0
22	ハイドロロジ	1980~1990年	0
23	地質調査所月報	1970~1990年	21
24	地質と調査	1980~1990年	5
25	月刊ダム日本	1980~1990年	174
26	鉱山	1970~1979年	0
27	天然ガス	1970~1979年	0
28	日本地熱学会誌	1980~1991年	0
29	ダム工事誌		6
合計			1,517

(*「地下水と井戸とポンプ」は、
1988年より「地下水技術」に名称変更した。)

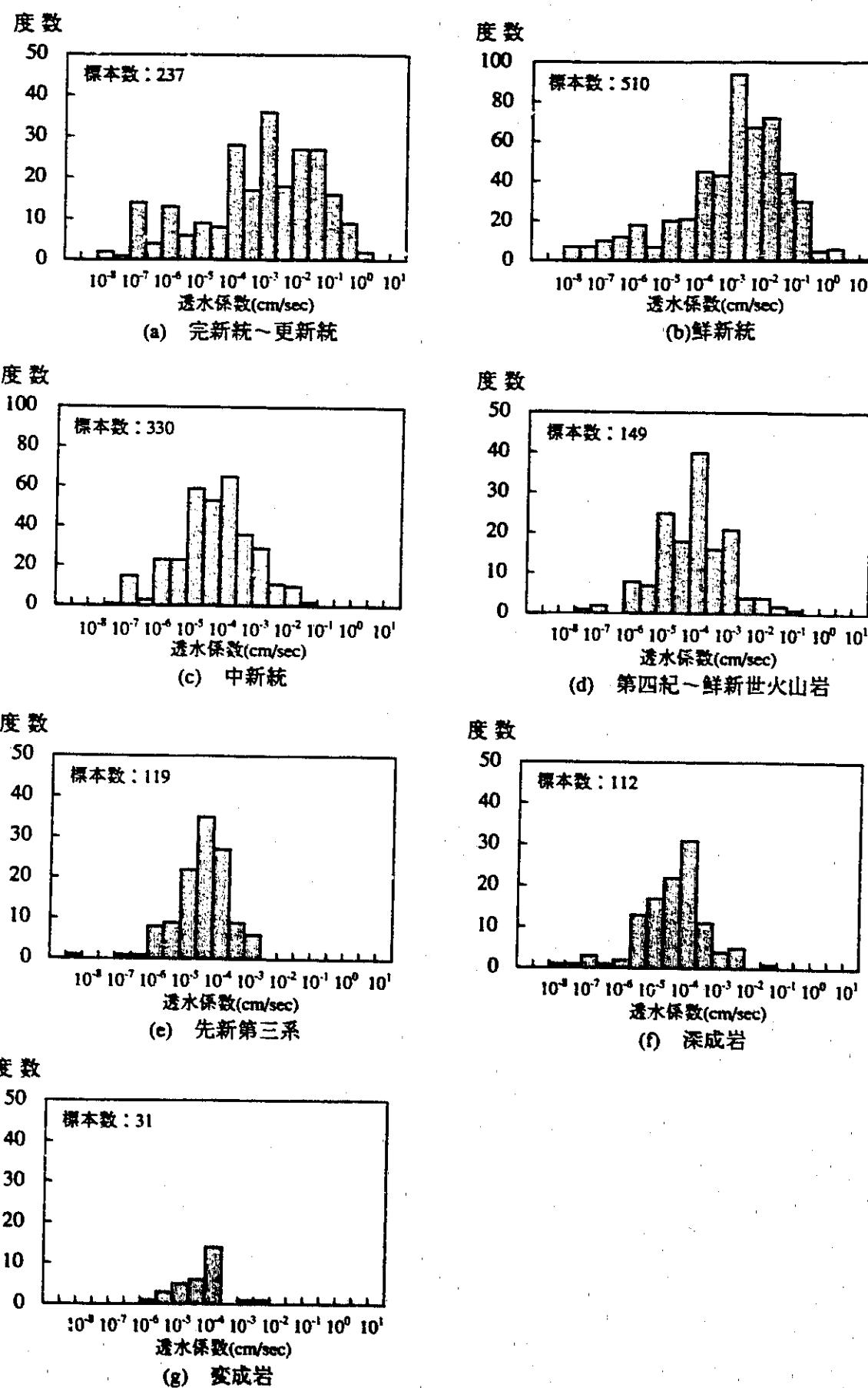


図3.12 北海道の代表的な地質区分における透水係数の頻度分布

表3.4 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	○○○○	1.0×10^{-3}
鮮新統	○○○○	1.0×10^{-3}
中新統	●●●●	7.0×10^{-5}
第四紀～鮮新世の火山岩	▲▲▲▲	2.5×10^{-4}
基盤	先新第三系	5.0×10^{-5}
	深成岩	1.0×10^{-4}
	変成岩	1.0×10^{-4}

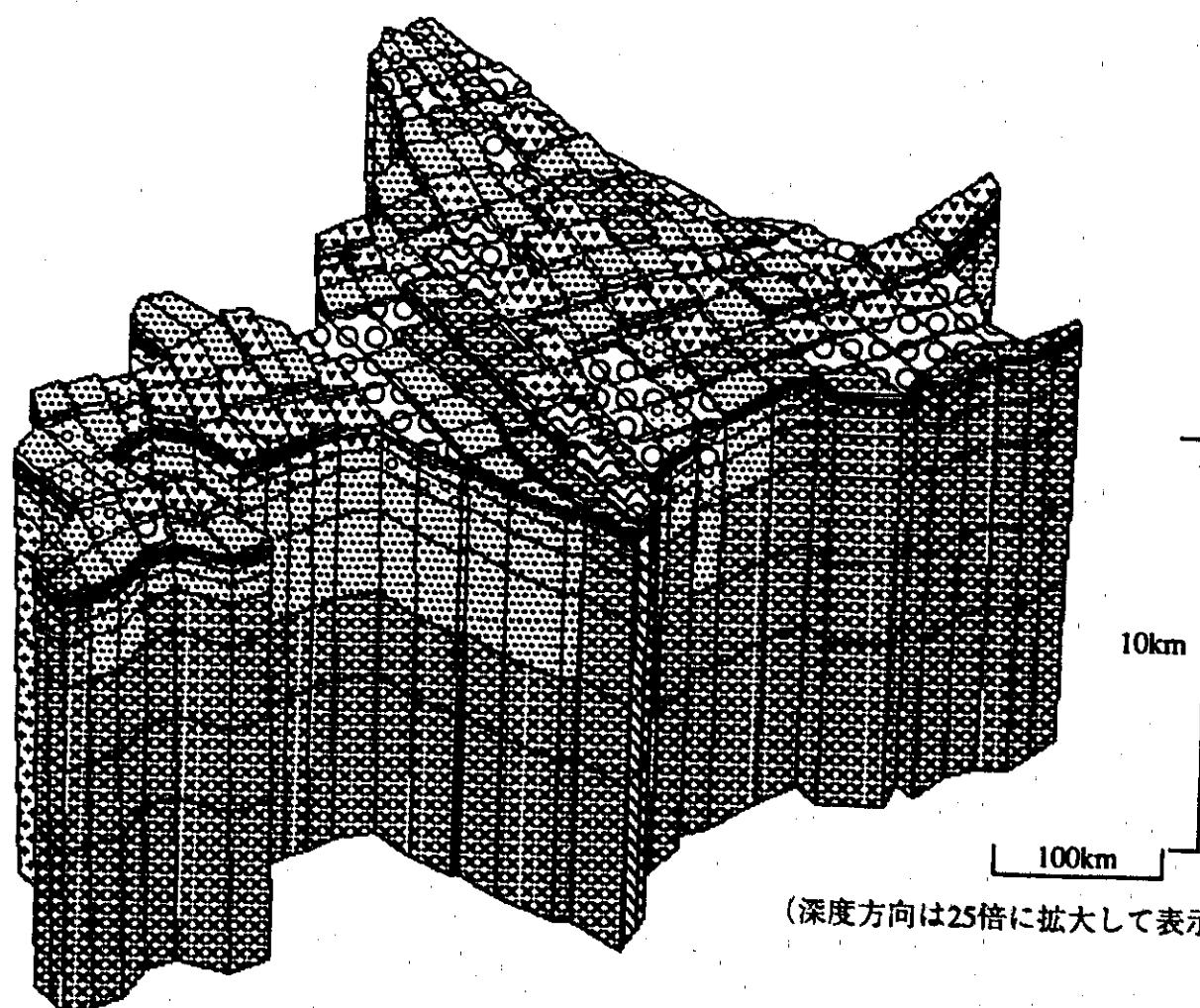
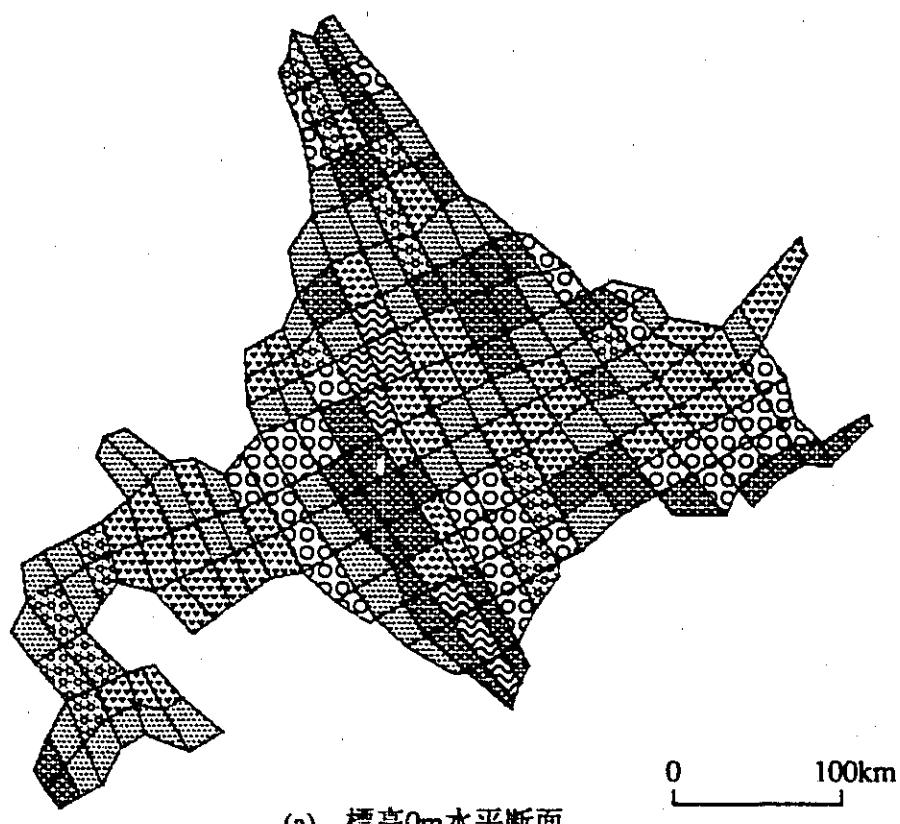
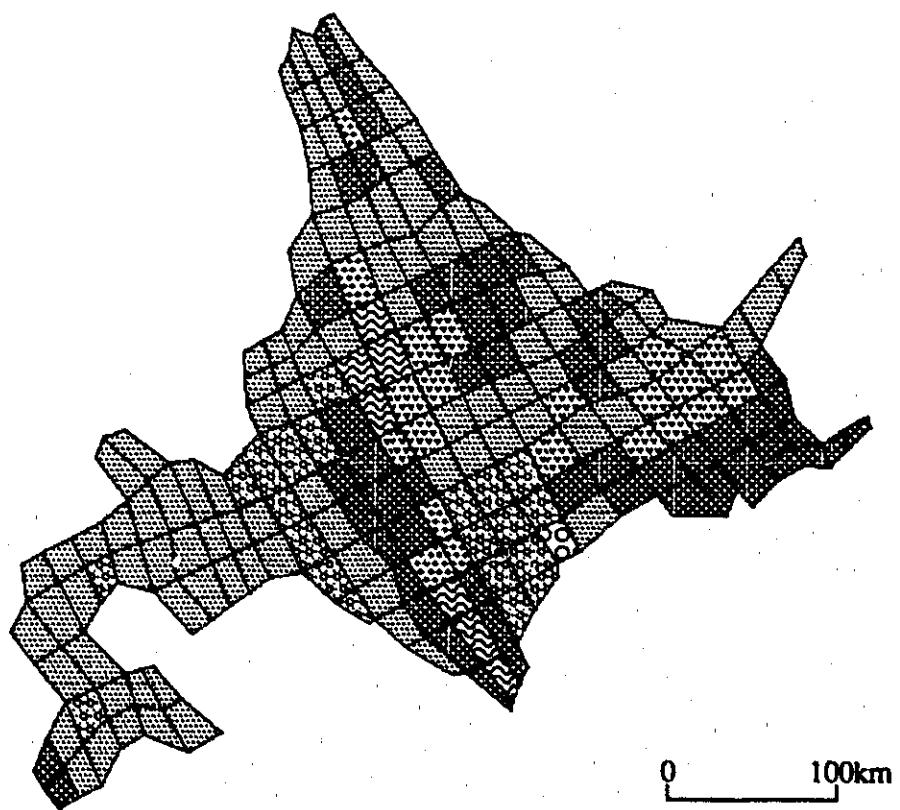


図3.13 北海道の水理地質構造モデル
(凡例は表3.4)



(a) 標高0m水平断面



(b) 標高-1,000m水平断面

図 3.14 北海道の水理地質構造モデル（水平断面）
(凡例は表 3.4)

3.5 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。

本研究では、水理学的境界条件として以下の2点を考慮した。ひとつは、解析領域の外側の周囲に設定する「外側境界条件」である。これは連続している地域から切り放された一部分である解析領域の周囲において、本来存在していると考えられる水理学的な環境を表現したものである。もうひとつは、降雨・降雪や河川・湖沼などによってもたらされる地表から地下への水の供給量（「涵養量」）である。

(1) 外側境界条件の設定

解析領域の外側境界条件は、次のように設定した（図3.15）。

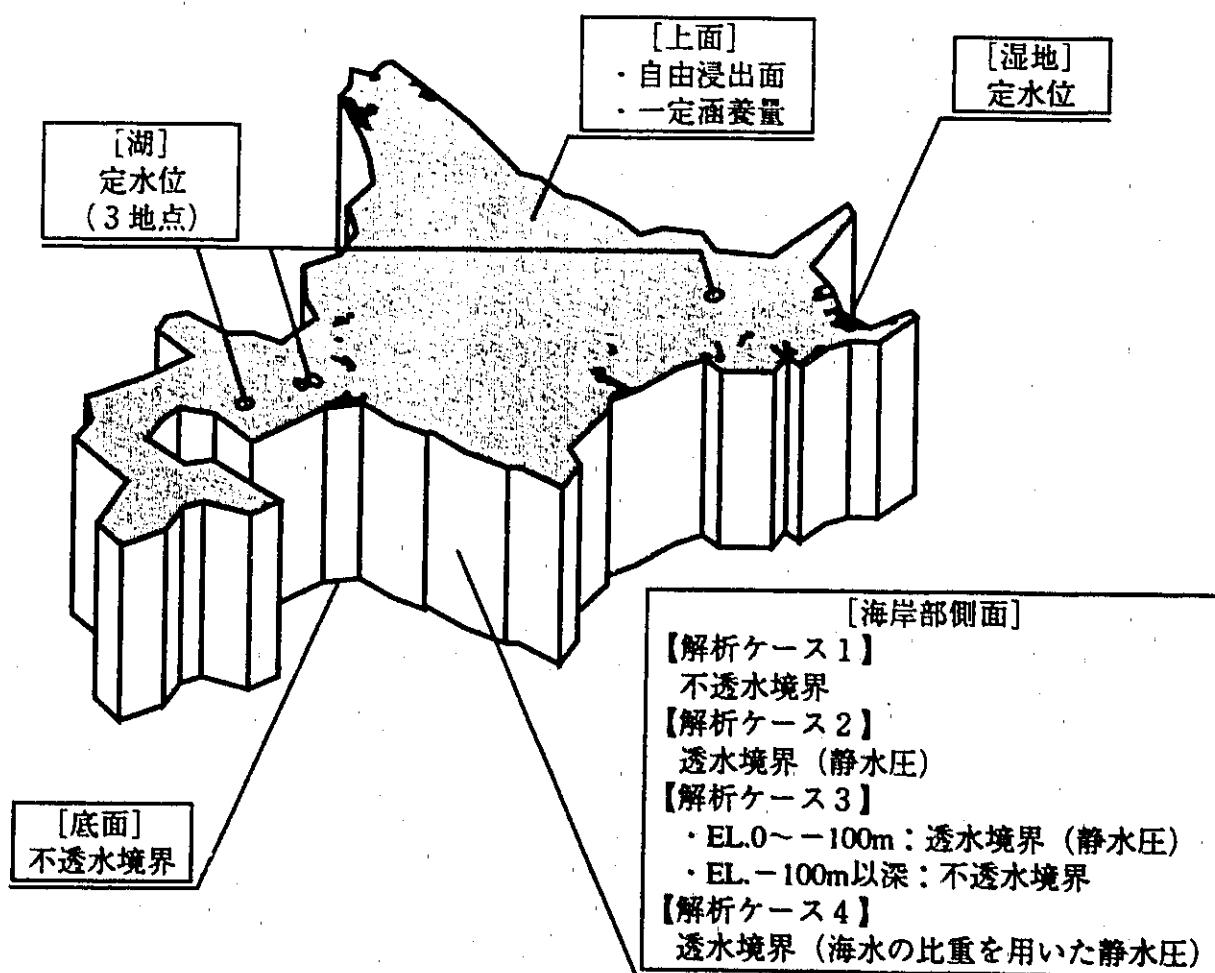


図3.15 解析領域に設定した境界条件

【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。そのうえで、降雨・降雪などとともに地下への水の涵養量を設定した（次項参照）。

【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収支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、以下の通りである。

【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、海岸部の側方を透水境界とした上で、標高0mすなわち海水面で定水位となるような静水圧を仮定した場合を設定した。

上記の二つのケースの他に、本研究では、これまでに検討課題として示されている海岸付近の塩淡境界を考慮した境界条件の設定方法について検討を加えるため、以下の二つのケースを設定した。

【解析ケース3】 海岸部では、地下水よりも海水のほうが比重が大きいことによりガイベン・ヘルツベルグ（Ghyben-Herzberg）の条件が働き、海水がくさび形に進入して地下水の流出を阻止しているので、海岸部側面の境界は完全には開いておらず、現実には地下水は海岸線付近の水深数10m以浅の海底からしか海中へ流出することができないと考えることができる。このような考え方に基づき、海岸部側面の境界条件を海水面下100m以深すなわち標高-100m以深では不透水とし、標高0～-100mの部分には海水面で定水位となるような静水圧を与えた。

【解析ケース4】 海岸部の側面を透水境界とし、海水面（標高0m）で定水位となるように海水の比重を用いた静水圧相当の水頭鉛直分布を与えた。

いずれのケースにおいても、海水と地下水（淡水）の境界は、解析モデル上最も単純に、海岸線を通る鉛直な側面に設定した。

なお、地下深部では、とくに地下の温度が高い場合には地下水の対流が生じることが考えられるが、対流を考慮するためには地下水流动と熱の相互作用を考慮した連成解析が必要となる。連成解析を行う場合には熱伝導や体積変化に関するパラメータが必要になるため、解析における不確定な要素が多くなるものと考えられる。そこで、本解析では、地下水の浸透現象のみを解析の対象とし、熱の影響は考慮していない。したがって、境界条件においても地熱の影響を考慮した条件は設定していない。

(2)涵養量の設定

地下水は、大気・地表・地盤中にわたって循環している水資源の一形態であるため、降水量や河川流出量、蒸発散量などの気象・水文情報は地下水流动特性を把握する上で重要

である。とくに地表から地下深部岩盤への涵養量は、対象領域における地下水の供給源となることから考慮する必要がある。しかし、解析対象領域である北海道の全領域にわたって涵養量を実測することは不可能である。これまでの研究（中部日本、東北日本）では、統計的な水収支の観点から、降水量河川流出量、蒸発散量を用いて涵養量を算定している。その場合の水収支は次式で表される。

$$G = P - E - Q$$

G : 涵養量

P : 降水量

E : 蒸発散量

Q : 河川流出量

蒸発散量については、現地で正確に測定する方法が確立されておらず、また、広範囲な領域にわたる実測が不可能であることから、推定法によって求めることとしている。蒸発散量を推定する方法にはペンマン（Penman）法によって推定した可能蒸発散量（植物で完全におおわれた地表面に水が十分に供給されている場合の蒸発散量）や計器蒸発量に、経験的に決定した係数をかけて実蒸発散量を求める方法があるが、一連の研究では、実蒸発散量と可能蒸発散量の補完関係から直接蒸発散量を求める方法（補完法）によって蒸発散量を算定している。

北海道を対象として解析を行う場合も、同様の方法によって涵養量を算定すべきと考えたが、年間降水量の分布（図3.3）と河川流出高（図3.4）を比較してみると、河川によっては流域の降水量よりも流出高のほうが多いという現象がみられる。水系ごとの降水量、河川流出高、そして前述の水収支の式に基づき算定した涵養量を表3.5にまとめたが、半数の流域で〈流出高〉降水量〉になっており、また、涵養量についてはすべての流域で負になっている。年間を通じてこのような現象が起こるということは考えられず、これは山地の降水量とくに雪の測定の不備が原因で、北海道の真の降水量は公表されている降水量を大きく上回っているものと考えられる。

いずれにしても、北海道においてはこれまでの研究のように解析対象領域の平均涵養量を水収支の式から求めることはもちろん、特定の流域に水収支の式を当てはめて涵養量を算出し、その値をすべての領域に適用するという方法にも不都合がある。したがって、ここでは便宜的に、東北日本において算定された平均涵養量0.15mm／日を解析領域全体に与えることとした。

表 3.5 北海道のおもな水系における涵養量算定結果

水系名	流出高	降水量	蒸発散量	涵養量
天塩川	1,501	1,267	600	-834
留萌川	1,509	1,300		-809
石狩川	1,176	1,267		-509
後志利別川	2,056	1,400		-1,256
鶴川	1,077	1,000		-677
沙流川	1,281	1,200		-681
十勝川	827	1,114		-313
釧路川	914	1,000		-514
網走川	570	600		-570
常呂川	510	800		-310
湧別川	779	800		-579
渚滑川	885	800		-685
平均	1,090	1,237	600	-453

* 涵養量=降水量-蒸発散量-河川流出高

* 数値の単位はすべて mm/年。

* 降水量および河川流出高は、日本気候図（気象庁,1970）、

日本国勢地図帳（建設省国土地理院）などに基づいて算出した。

3.6 地下水流動解析

地下水の挙動を定量的に評価するための代表的な数値解析手法としては、差分法や有限要素法などがある。このうち有限要素法は、差分法に比べて対象領域の不均一性の考慮が容易であり、また、任意形状の境界を取り扱うことができるといった利点を有している。そこで本研究では、地下水流动解析手法として有限要素法を用いることとした。

3.6.1 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Darcy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（Watanabe、1988；西垣、1990；P.S.Huyakornほか、1987他）。

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ K_{ij} k_{nw}(\theta) \frac{\partial h}{\partial x_i} \right\} + q = \left\{ C(\theta) + \alpha S_s \right\} \frac{\partial \psi}{\partial t}$$

h ：ピエゾ水頭

$h = \psi + Z$

ψ ：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

$k_{nw}(\theta)$ ：水の相に対する相対透水係数

θ ：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、水の体積変化は無視しうるものとし、地下水流动場は等価多孔質媒体であると仮定している。

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(今井、1990)を用いて定常状態の地下水流动解析を行った。この解析コードの特徴としては、(1)飽和・不饱和領域にわたる浸透現象のシミュレーションがされること、(2)地下水流动の3次元的な広がりを表現できること、(3)複雑な形状や物性値分布を比較的容易に表現できること、(4)計算のアルゴリズムにPCG法(Preconditioned Conjugate Gradient Method、前処理付共役勾配法)を採用しているため、演算に必要な記憶容量が小さく計算速度が速い、といった点が挙げられる。

3.6.2 解析モデルの設定

本研究では外側境界条件の異なる4つの解析ケースを設定した(3.5(1)参照)。

【解析ケース1】 本研究における基本モデルとなるもので、解析モデルの外側境界のうち海岸部の側面の境界を不透水としたもの。

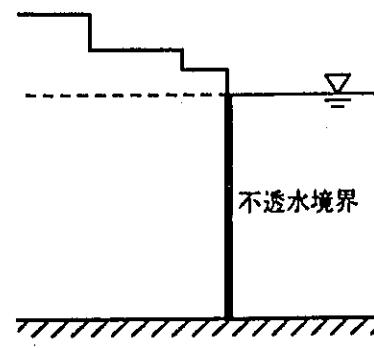
【解析ケース2】 海岸部の側面は透水境界であるとしたうえで、側面に海面で一定水位となるような静水圧を与えた解析モデル。

【解析ケース3】 海水と淡水のガイベン・ヘルツベルグの関係に基づき、地下水は海岸線付近の水深数十m以浅の海底からしか海中へ流出することができないと考え、海岸部側面の境界条件を海面下100m以深すなわち標高-100m以深では不透水、標高0~-100mの部分は透水境界とし、透水境界には海面で定水位となるような静水圧を与えた解析モデル。

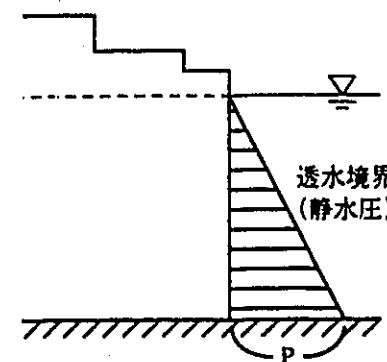
【解析ケース4】 海岸部の側面を透水境界とし、海面(標高0m)で定水位となるように海水の比重を用いた静水圧相当の水頭鉛直分布を与えた。

解析ケース2~4は、海岸部の側面に与える境界条件の違いによって解析結果にどのような差が生じるかを明らかにするために設定したものである。

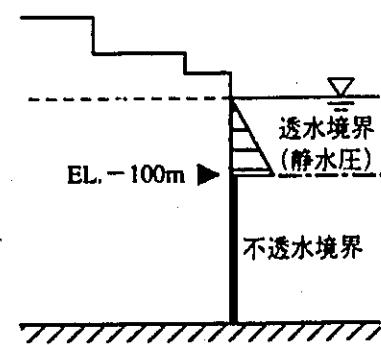
解析ケース1~4における海岸部側面の境界条件を模式的に表したもののが図3.16である。



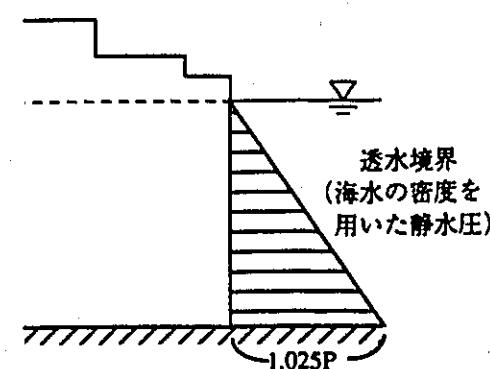
【解析ケース 1】



【解析ケース 2】



【解析ケース 3】



【解析ケース 4】

図 3.16 各解析ケースにおける海岸部側面の境界条件

3.6.3 数値解析結果

解析結果は、ピエゾ水頭（水理ポテンシャル）の分布図とダルシー流速ベクトル図、および水収支（流入・流出量）と浸出点分布としてまとめた。また、地下水流动の指標となる動水勾配（水理ポテンシャルの勾配）について、その占有率を頻度分布として示した。

まず、本研究の基本モデルである解析ケース1の場合についてまとめる。

(1) ピエゾ水頭、ダルシー流速ベクトル

解析領域の各水平断面（標高0m、-500m、-1,000m）におけるピエゾ水頭分布を図3.17 (a)～(c)に、さらに、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3.17 (d)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3.17 (e)に示す。

各水平断面におけるピエゾ水頭分布（図3.17）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、半島部の付け根の部分（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。そして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。この分布形状は、標高の分布（図3.7）とよく一致していることから、地下水流动の傾向が地形を反映していることが分かる。

ダルシー流速ベクトル図（図3.17 (d)）からは、地下深部での地下水の流动が極めて緩慢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动が認められる。

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3.17 (e)）から、深度500m付近までは鉛直方向の地下水流动が見られるが、それ以深では流速は小さくなり、次第に水平方向の流动が支配的になっていくことが分かる。そして、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) 水収支と浸出点分布

解析モデル表面（地表面）からの地下水の流出について、その浸出点の分布を図3.18に示す。また、解析モデル全体の水収支を図3.19に示す。

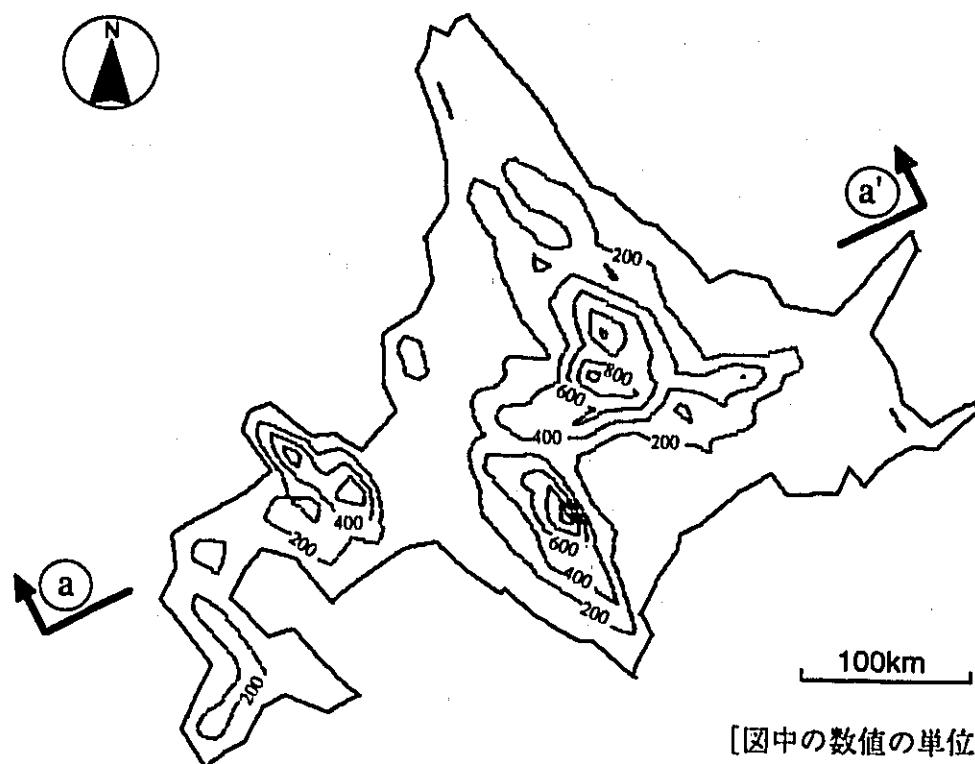
まず、浸出点については、地形的に山地と丘陵地、丘陵地と台地、あるいは台地と平地との境界、つまり地形分類の境界に位置するものが大半である（浸出点の分布図には、解析モデルを真上から見たときの輪郭を重ねて示してある。言いかえれば、図中の直線は解析モデルの地表面の段差を示している）。そして、流量の大きい浸出点は、平地と台地あるいは丘陵地との境界に多く分布しており、また、湿地の部分（図3.15参照）にも流量の

大きい浸出点が存在する。

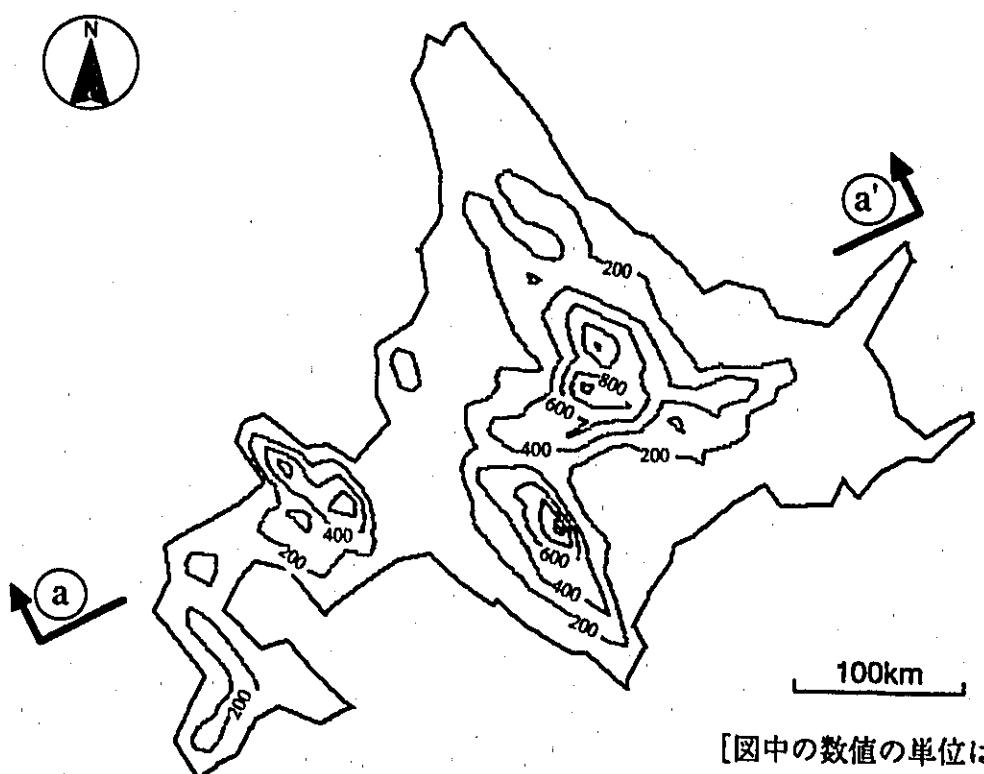
水収支については、流入量は $12.09 \times 10^6 \text{m}^3/\text{日}$ 、地表面からの流出量は $12.06 \times 10^6 \text{m}^3/\text{日}$ で、湖からの湧水は $0.07 \times 10^6 \text{m}^3/\text{日}$ と算出された。

(3) 動水勾配の占有率（頻度分布）

深度0～100m、0～500m、0～1,000m および深度500～1,000m と深度500m 以深での動水勾配の占有率を図3.20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、動水勾配の占有率は、深度とともに変化し、深部ほど動水勾配は小さくなる傾向が認められた。そして、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 以下であることが明らかとなった。

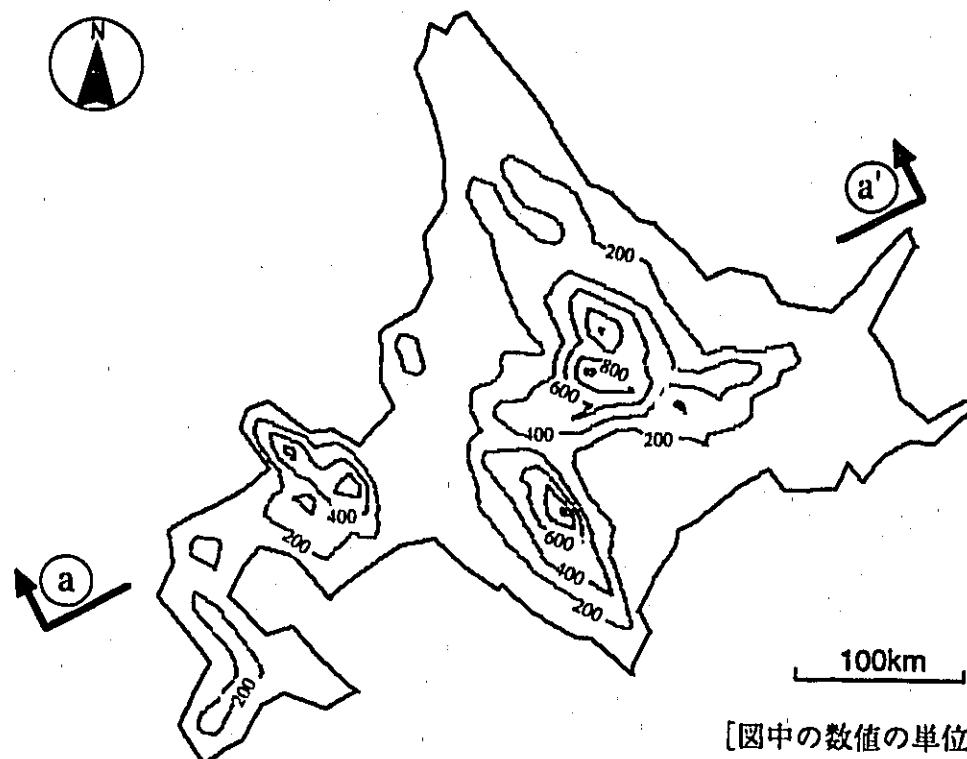


(a) 標高0mにおけるピエゾ水頭分布

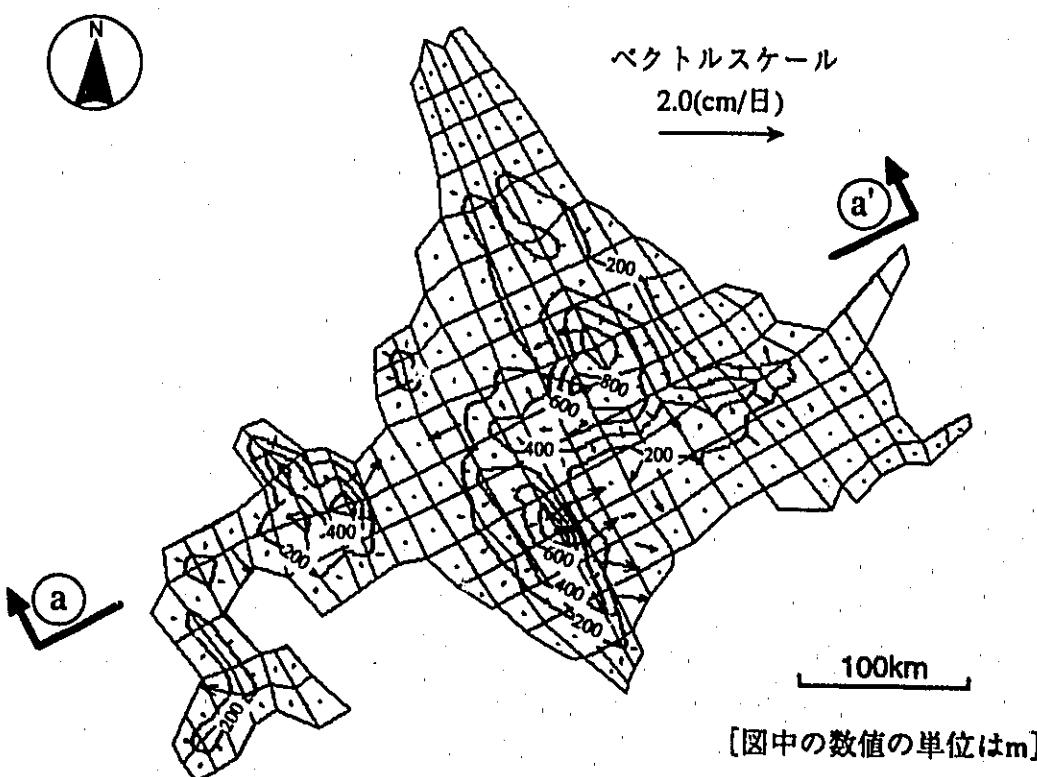


(b) 標高-500mにおけるピエゾ水頭分布

図 3.17 地下水流動解析結果 [解析ケース 1]

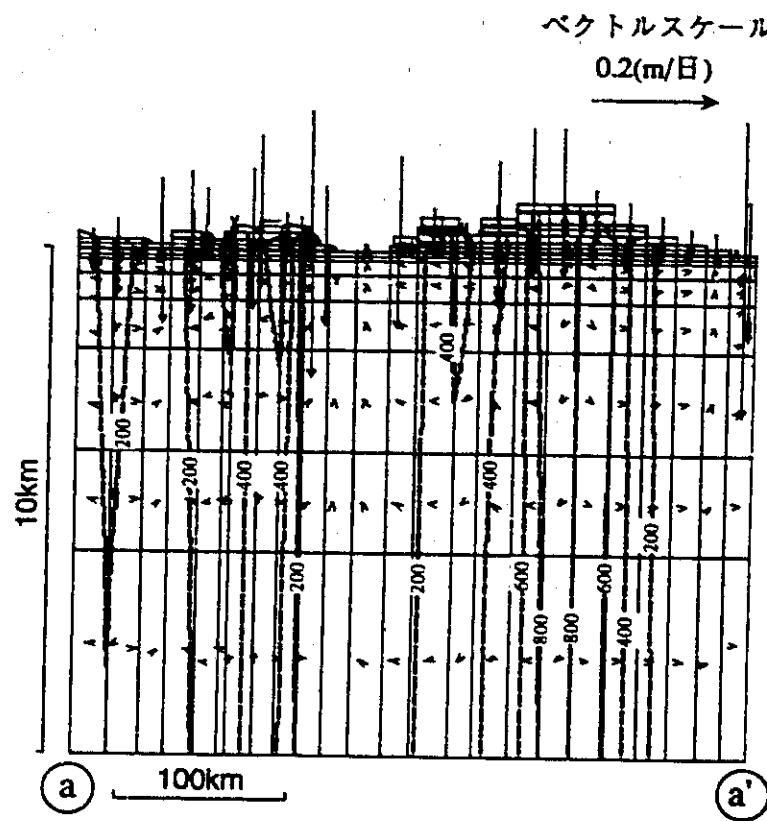


(c) 標高-1,000mにおけるピエゾ水頭分布



(d) 標高-1,000mにおけるピエゾ水頭とダルシー流速ベクトル

図 3.17 地下水流動解析結果 [解析ケース 1]



[図中の数値の単位はm]

(e) 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

図 3.17 地下水流動解析結果 [解析ケース 1]

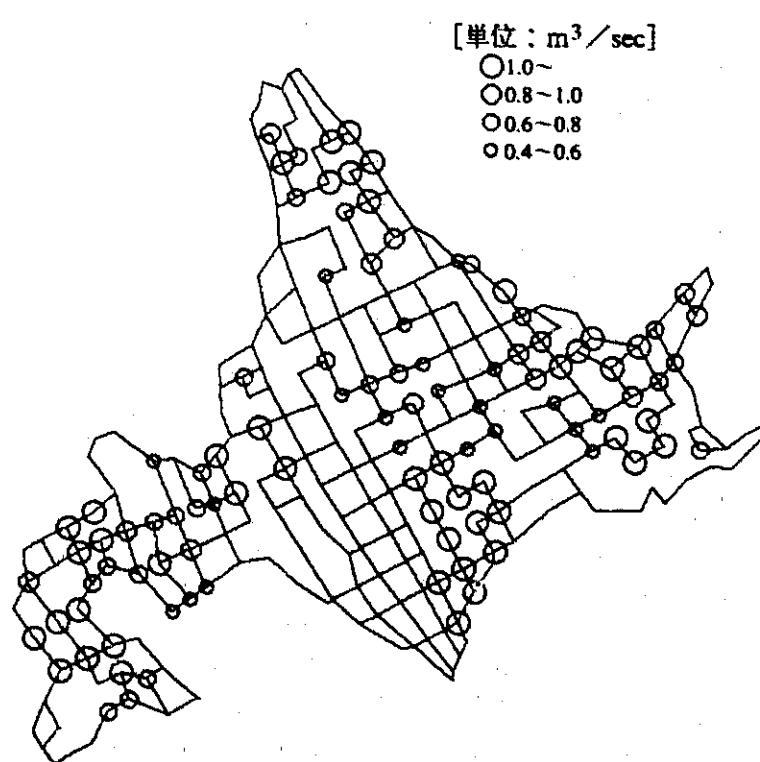


図 3.18 漏出点の分布 [解析ケース 1]

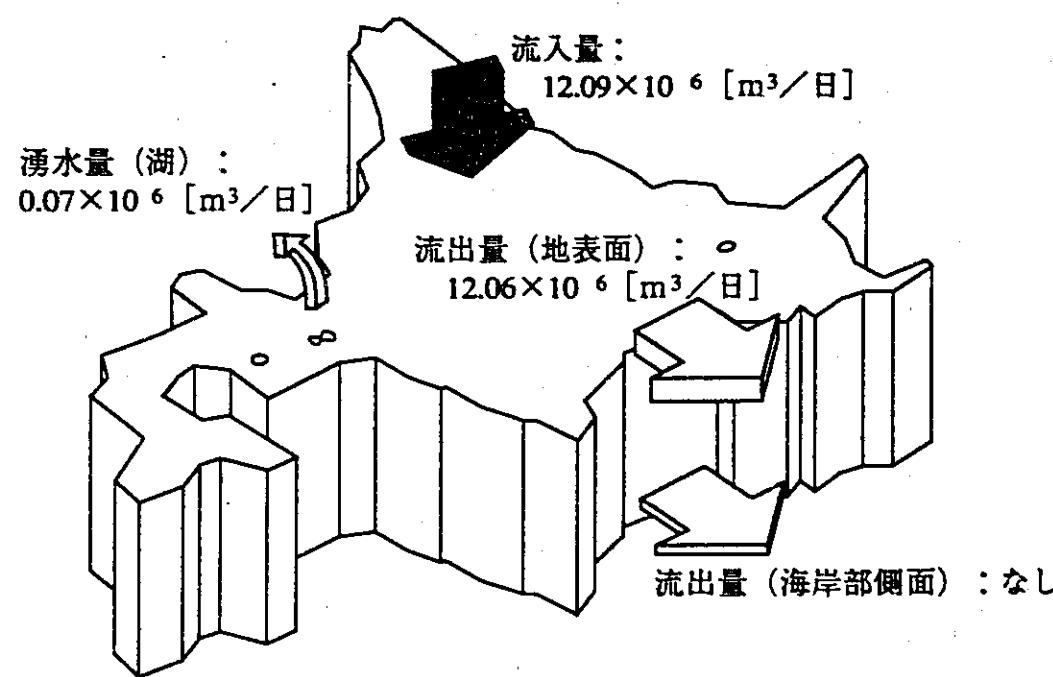
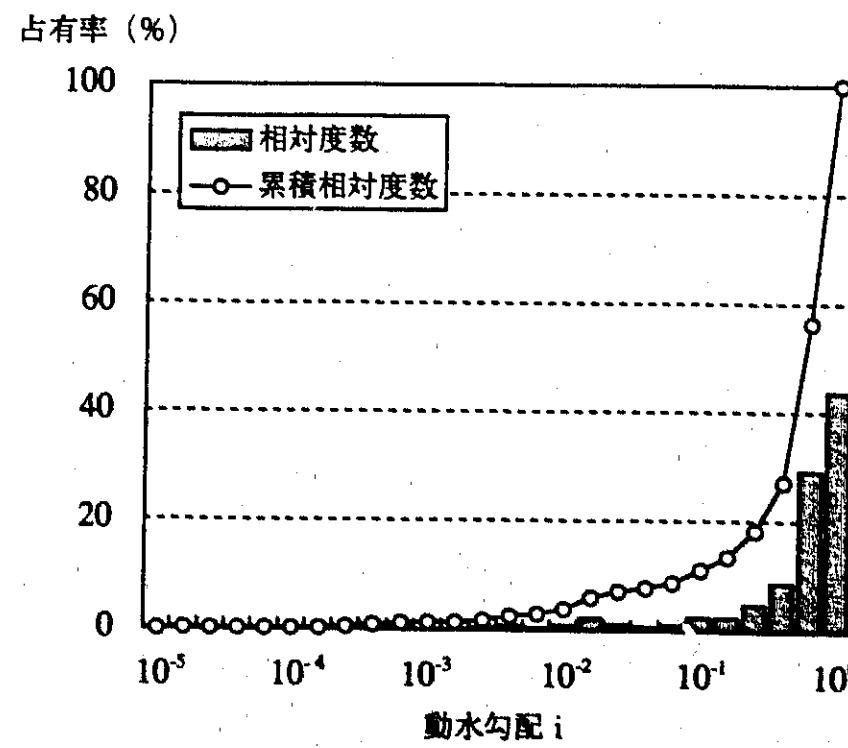


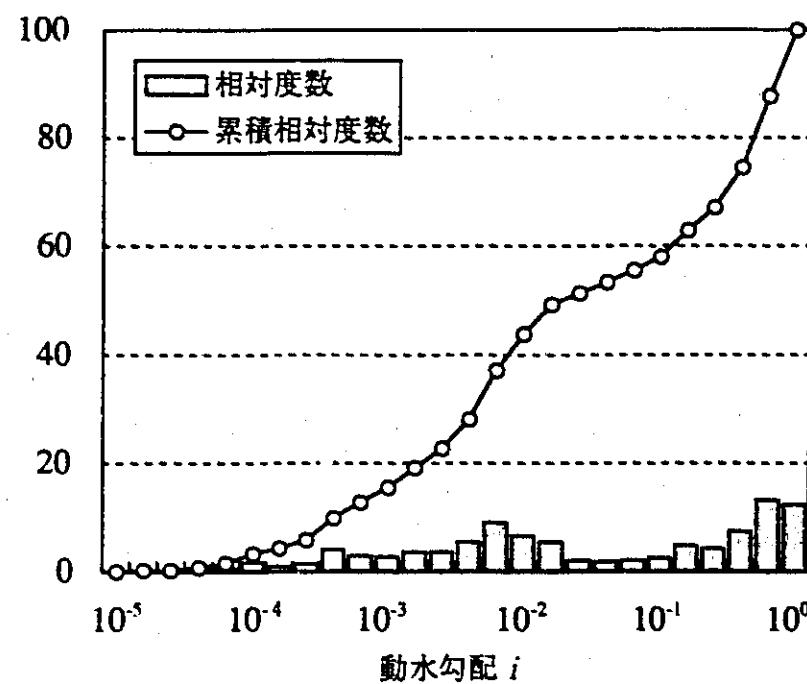
図 3.19 解析領域全体における水収支の計算結果 [解析ケース 1]



(a) 深度0~100m

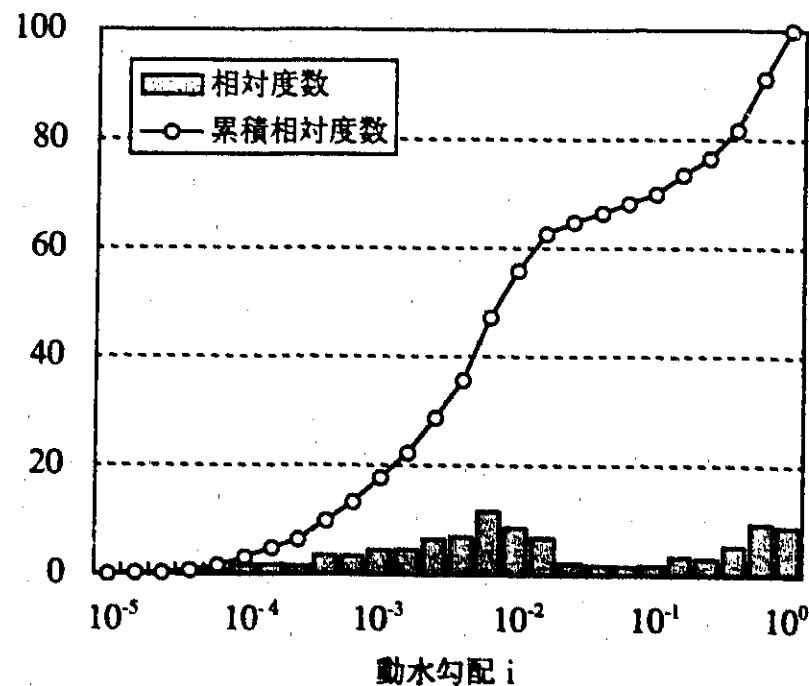
図 3.20 各深度における動水勾配の占有率 [解析ケース 1]

占有率 (%)



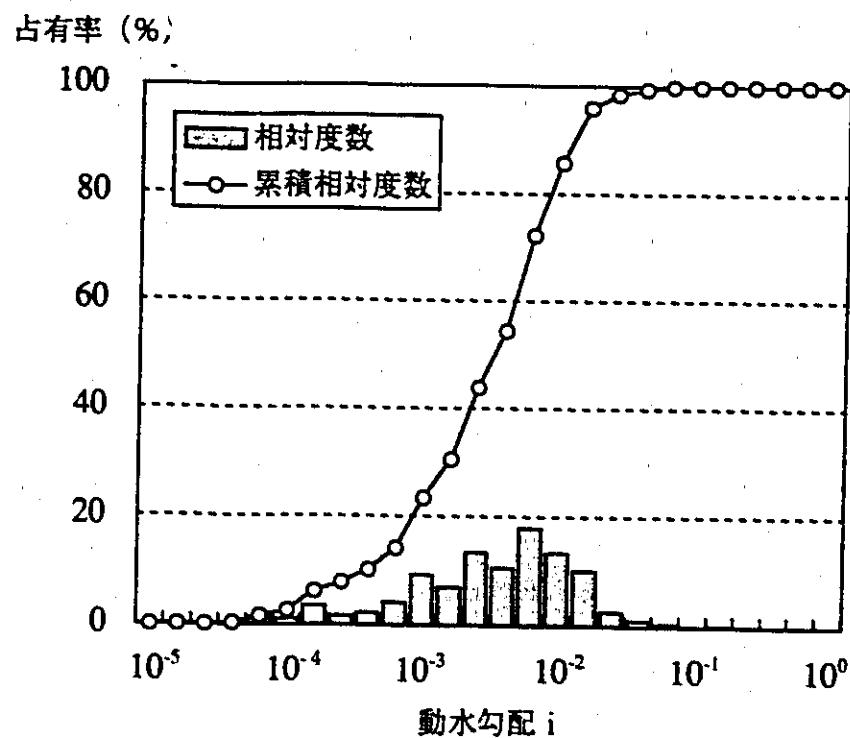
(b) 深度0~500m

占有率 (%)

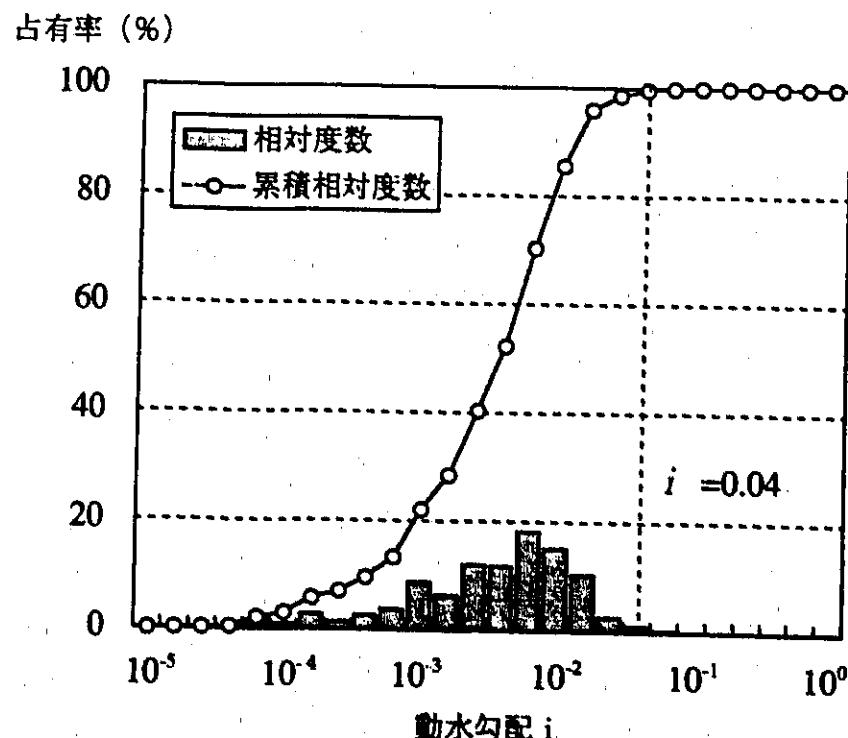


(c) 深度0~1,000m

図 3.20 各深度における動水勾配の占有率 [解析ケース 1]



(d) 深度500 ~ 1,000m



(e) 深度500m 以深

図 3.20 各深度における動水勾配の占有率 [解析ケース 1]

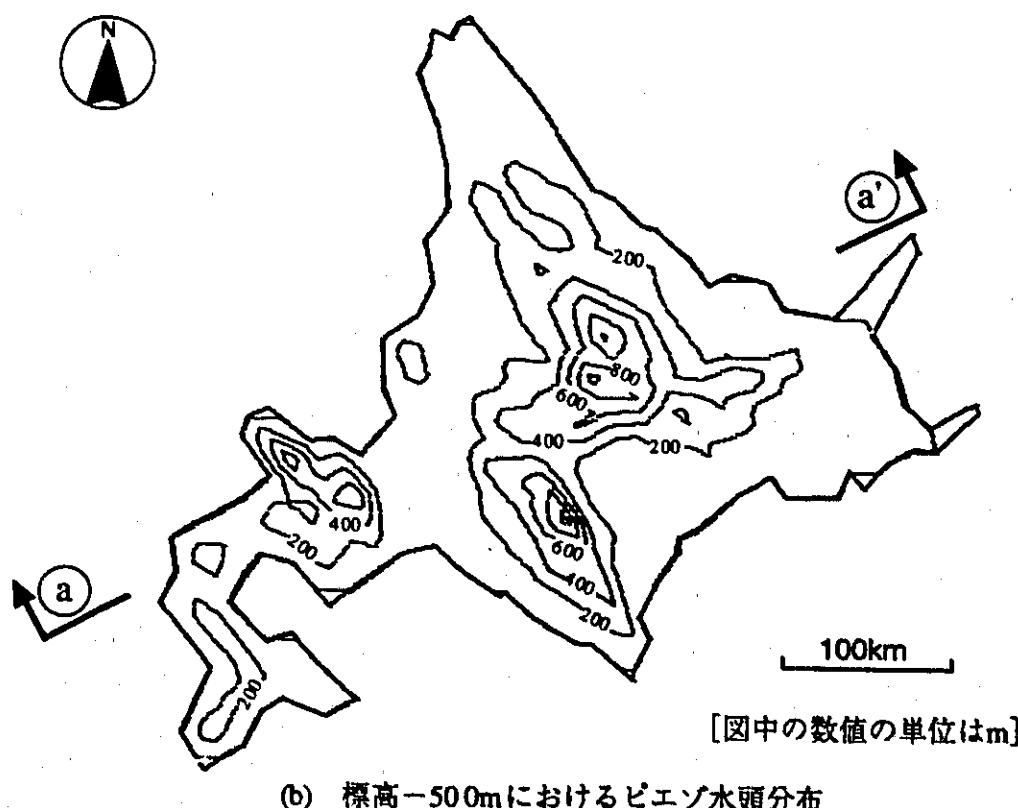
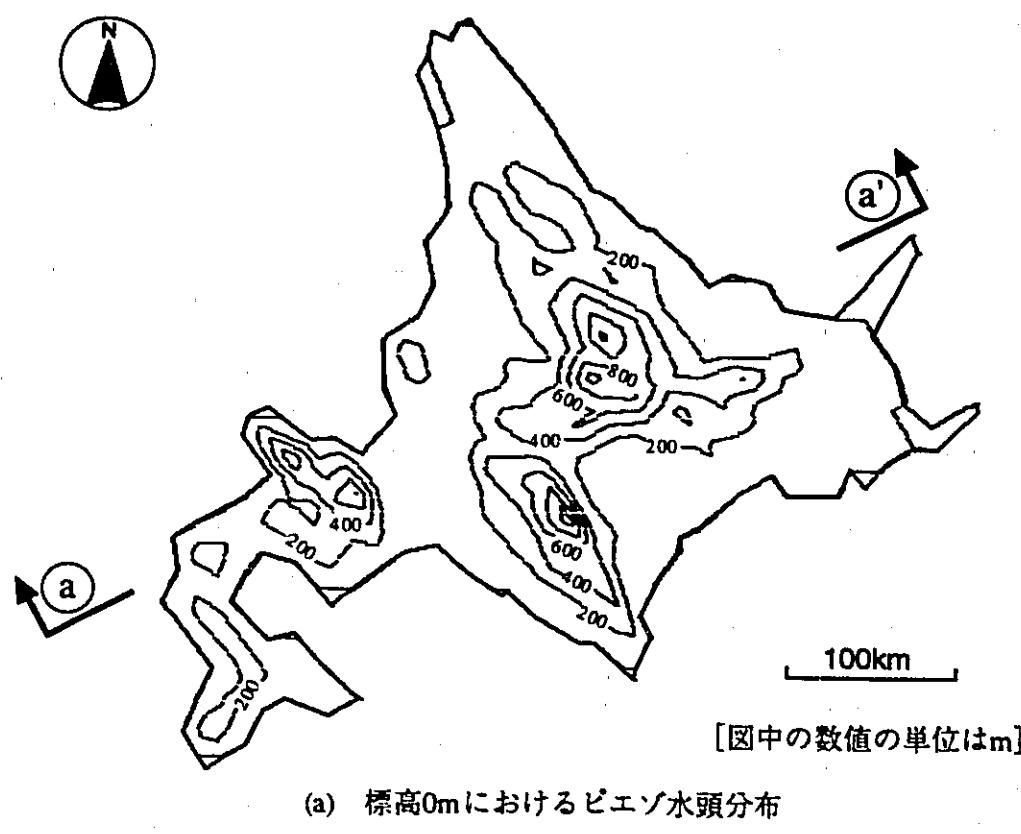
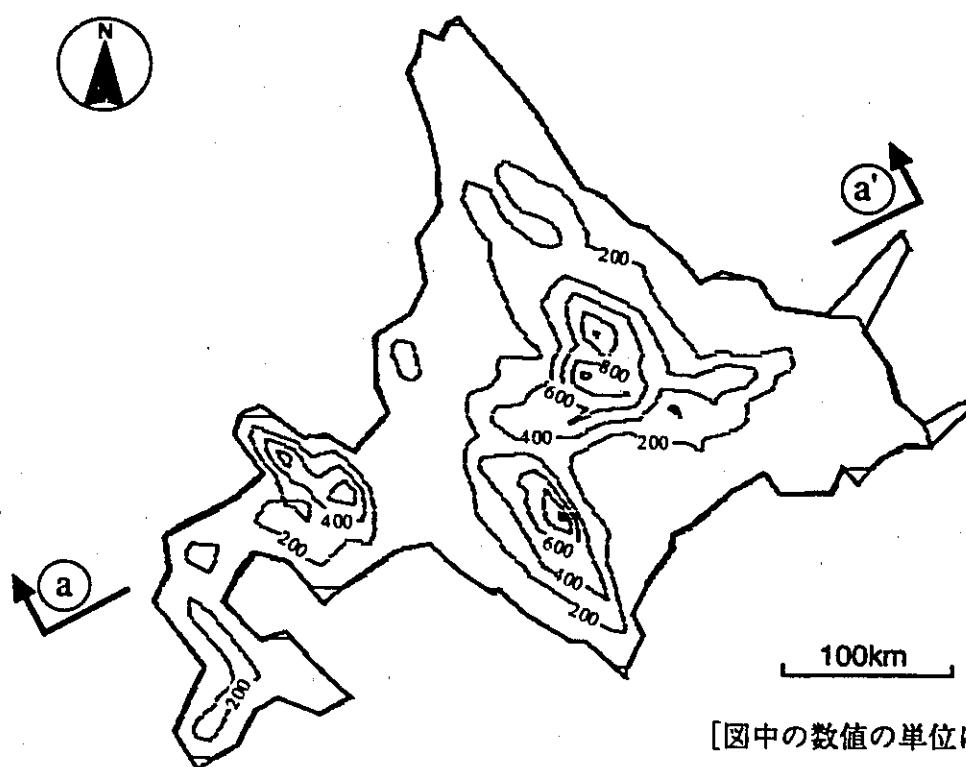
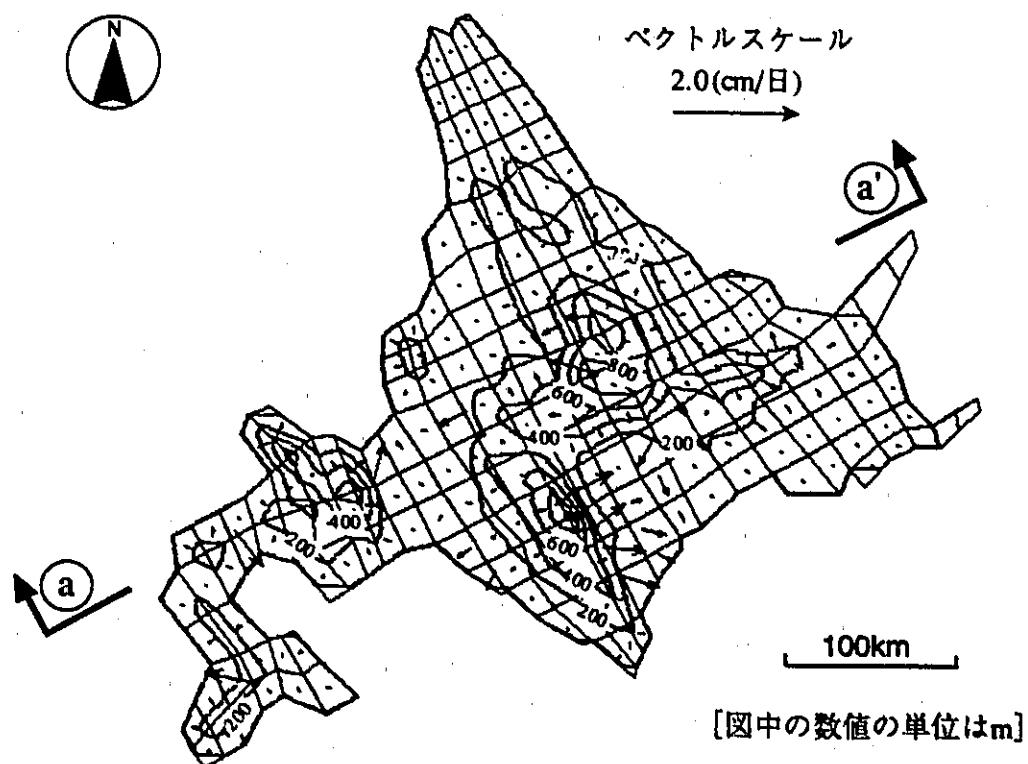


図 3.21 地下水流動解析結果 [解析ケース 2]

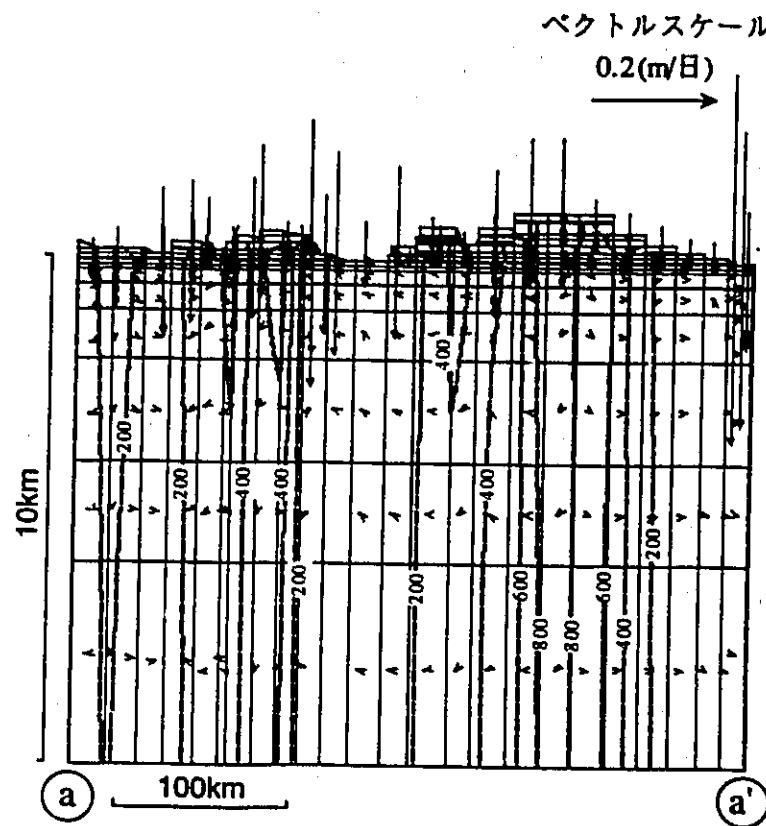


(c) 標高-1,000mにおけるピエゾ水頭分布



(d) 標高-1,000mにおけるピエゾ水頭とダルシー流速ベクトル

図 3.21 地下水流動解析結果 [解析ケース 2]



(e) 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

図 3.21 地下水流動解析結果 [解析ケース 2]

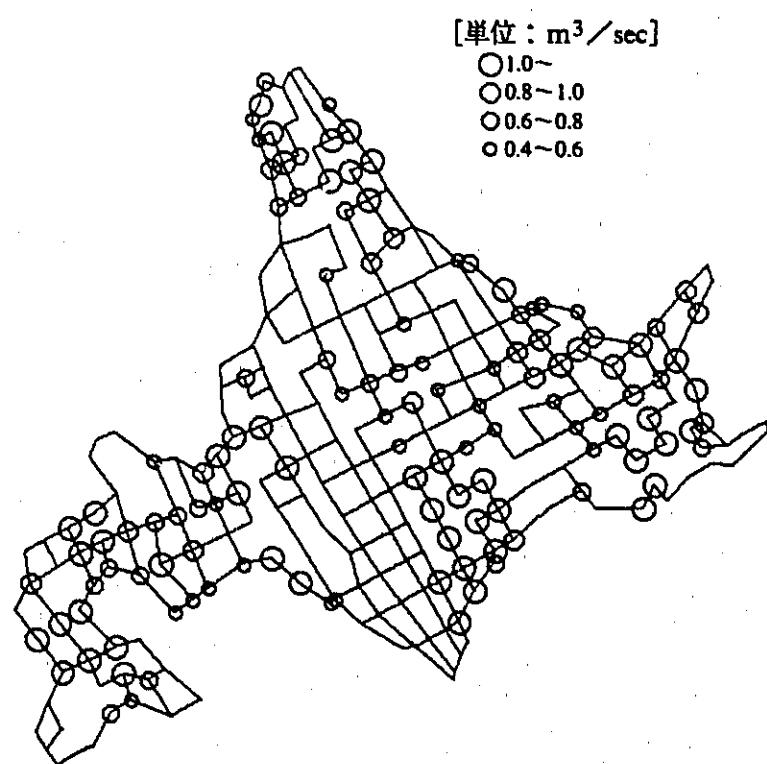


図 3.22 浸出点の分布 [解析ケース 2]

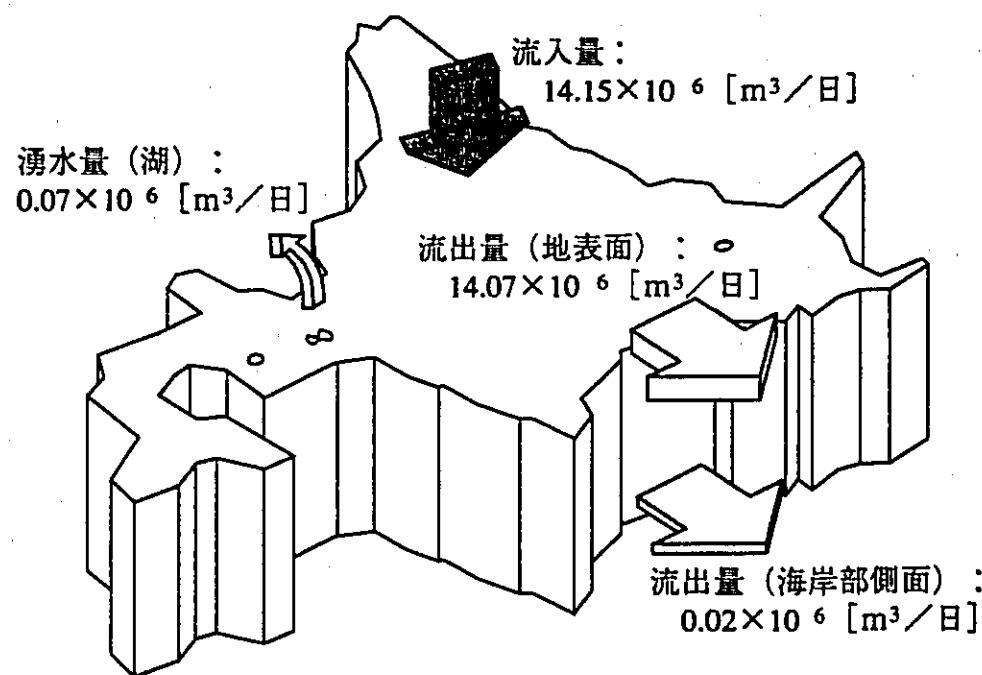
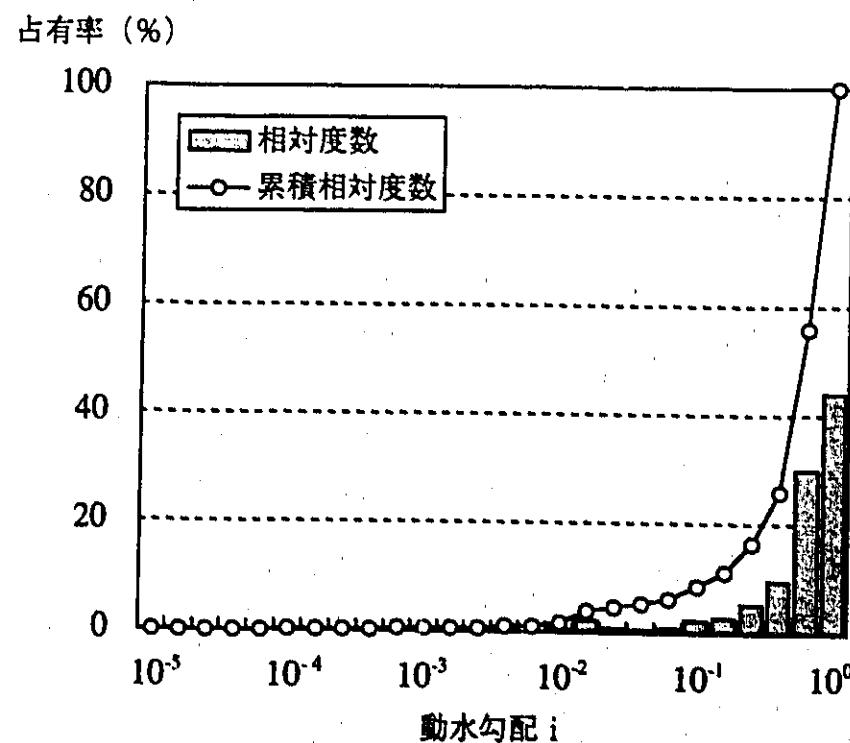


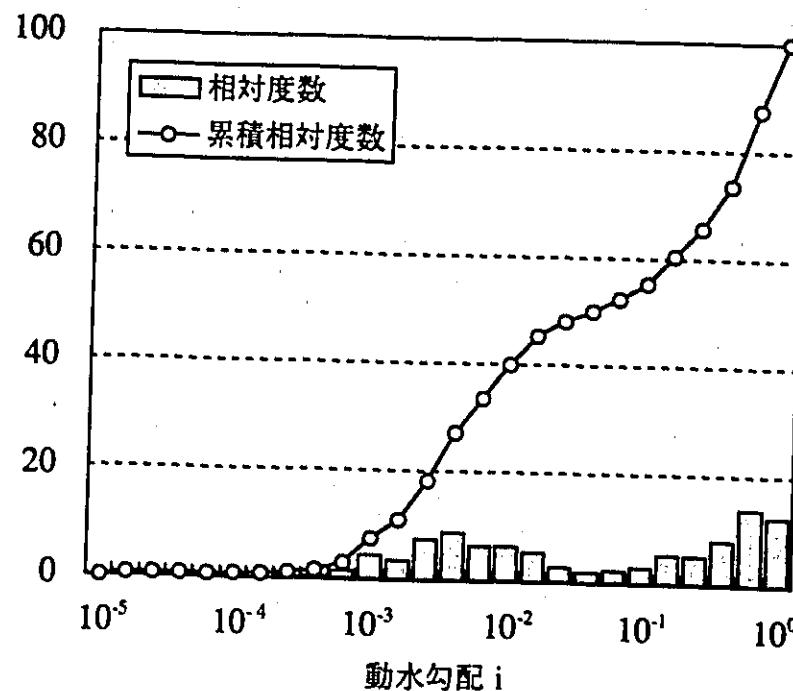
図 3.23 解析領域全体における水收支の計算結果 [解析ケース 2]



(a) 深度0~100m

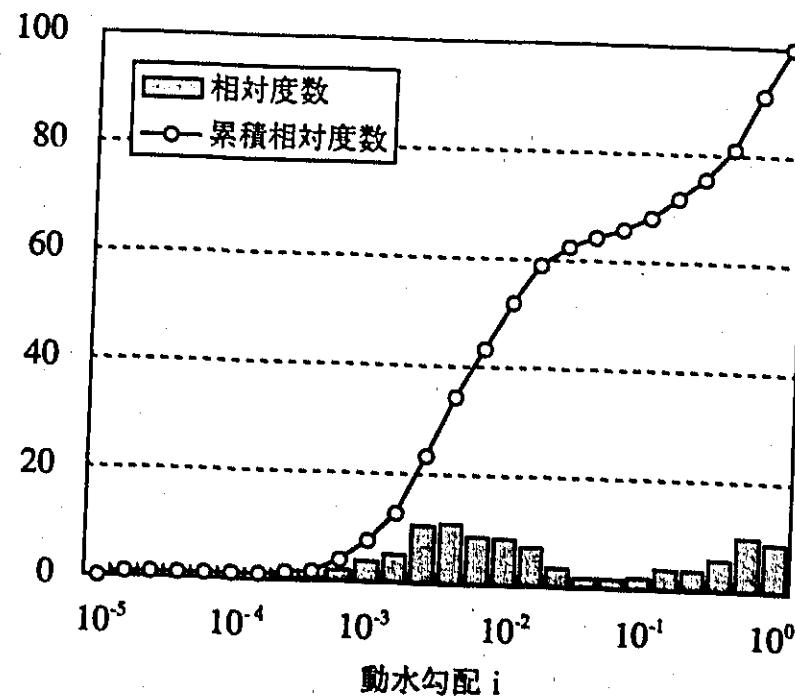
図 3.24 各深度における動水勾配の占有率 [解析ケース 2]

占有率 (%)



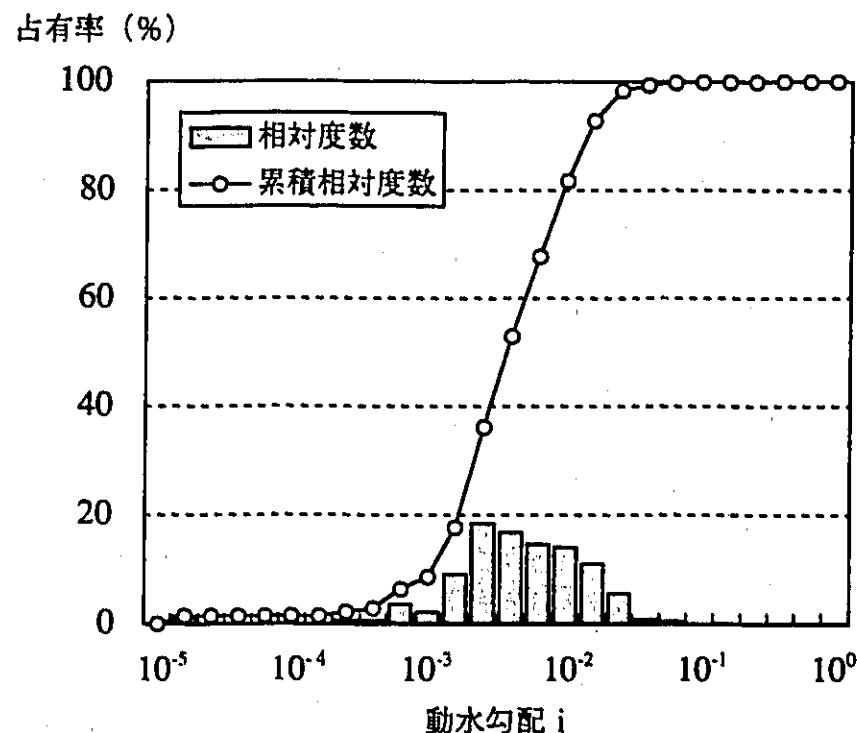
(b) 深度0~500m

占有率 (%)

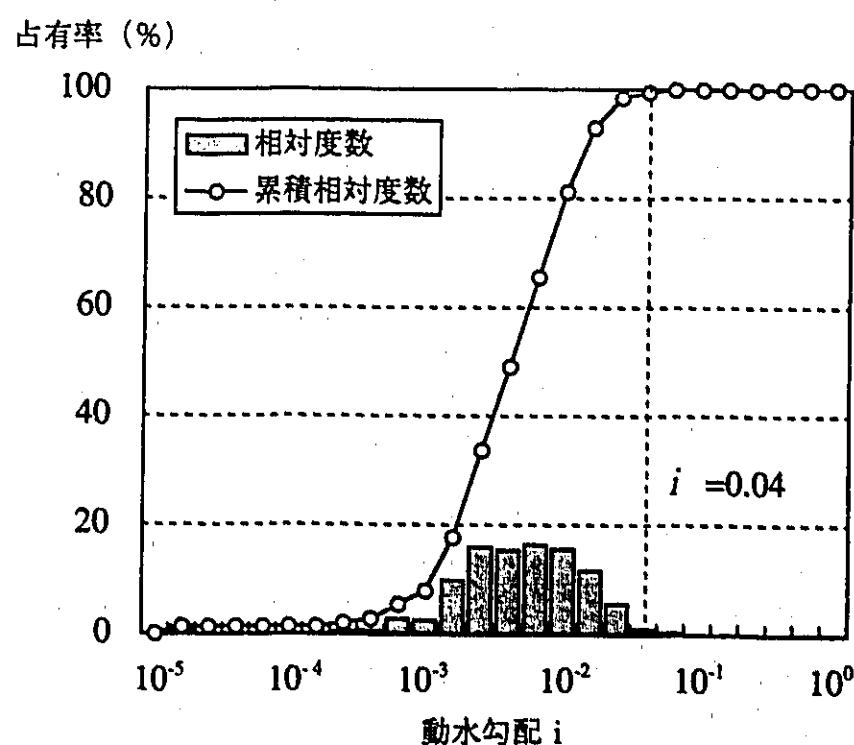


(c) 深度0~1,000m

図 3.24 各深度における動水勾配の占有率 [解析ケース 2]

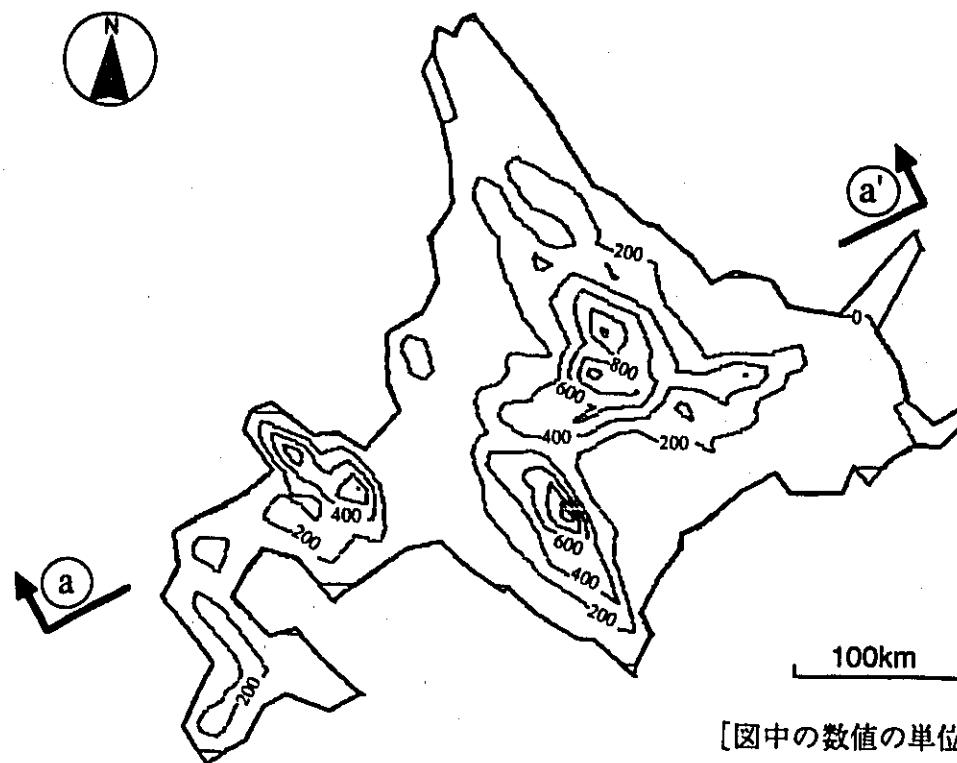


(d) 深度500 ~ 1,000m



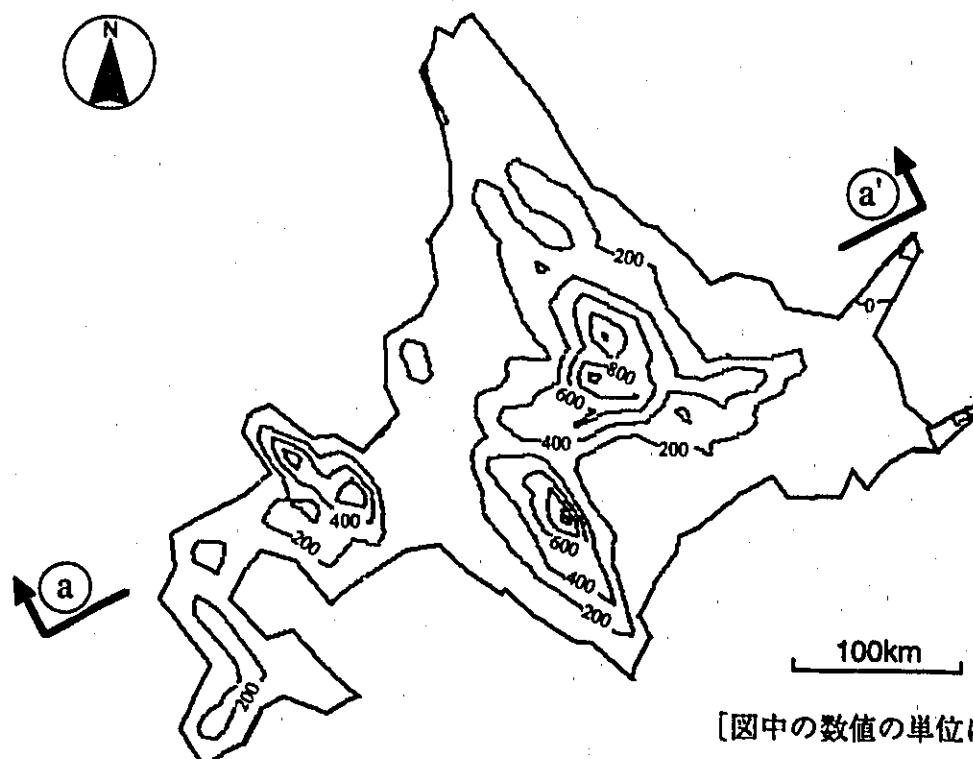
(e) 深度500m 以深

図 3.24 各深度における動水勾配の占有率 [解析ケース 2]



[図中の数値の単位はm]

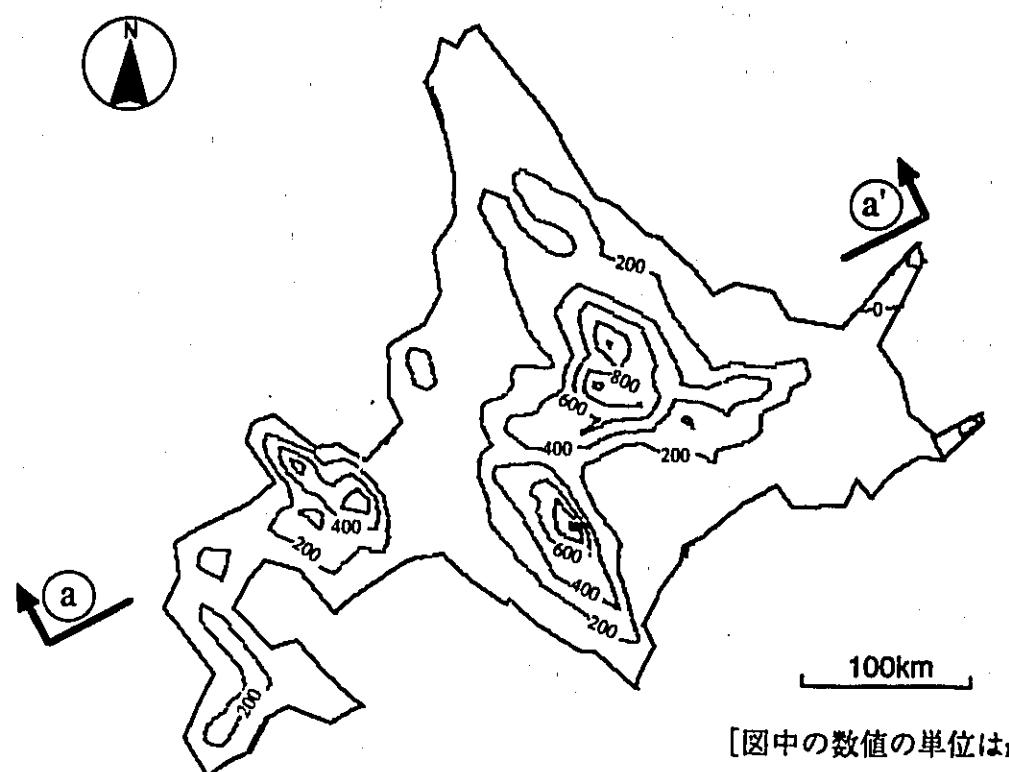
(a) 標高0mにおけるピエゾ水頭分布



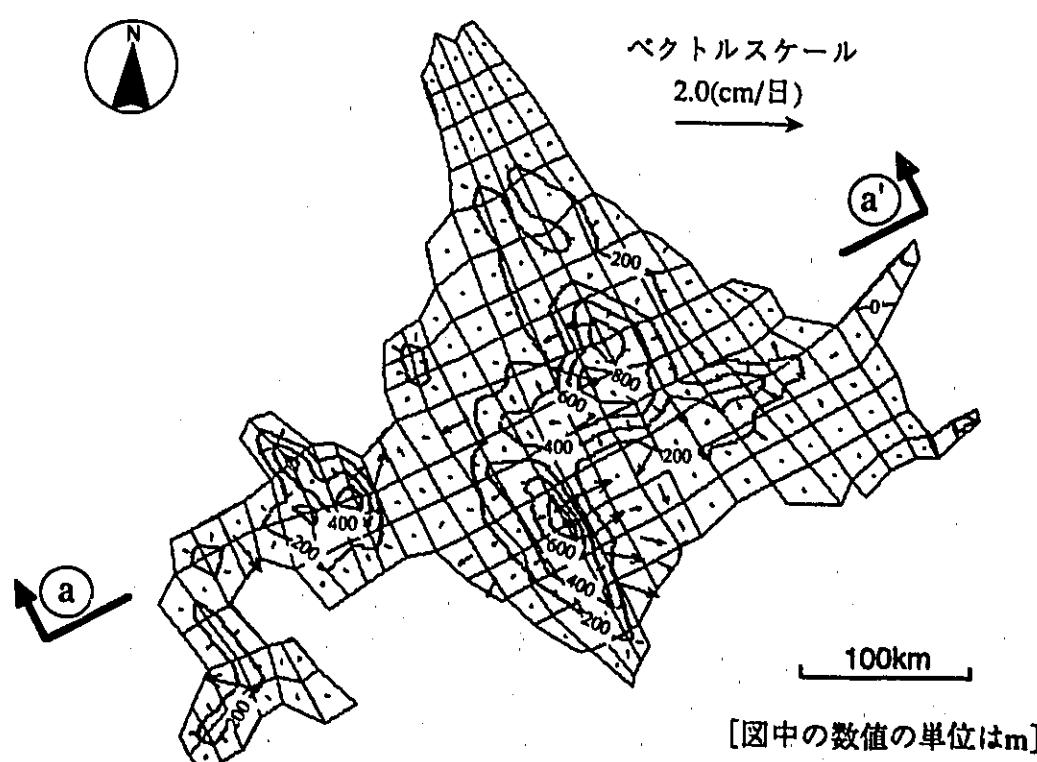
[図中の数値の単位はm]

(b) 標高-500mにおけるピエゾ水頭分布

図 3.25 地下水流動解析結果 [解析ケース 3]

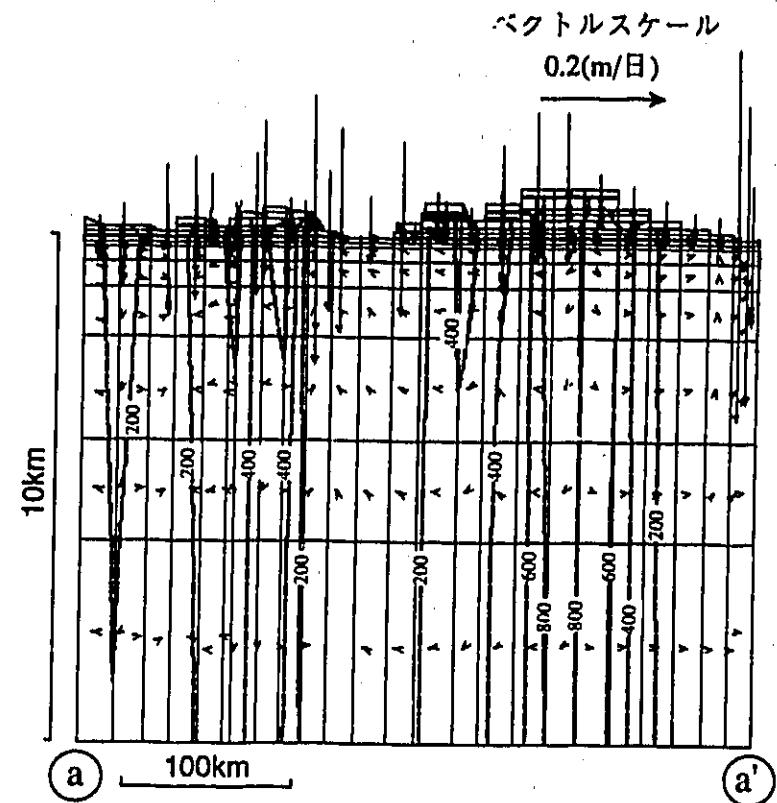


(c) 標高-1,000mにおけるピエゾ水頭分布



(d) 標高-1,000mにおけるピエゾ水頭とダルシー流速ベクトル

図 3.25 地下水流動解析結果 [解析ケース 3]



[図中の数値の単位はm]

(e) 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

図 3.25 地下水流動解析結果 [解析ケース 3]

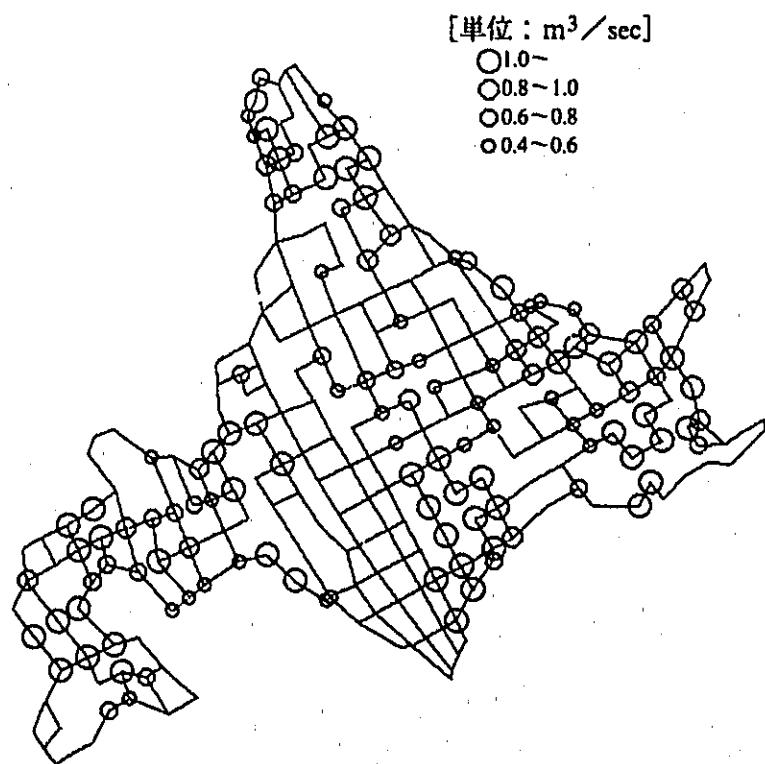


図 3.26 浸出点の分布 [解析ケース 3]

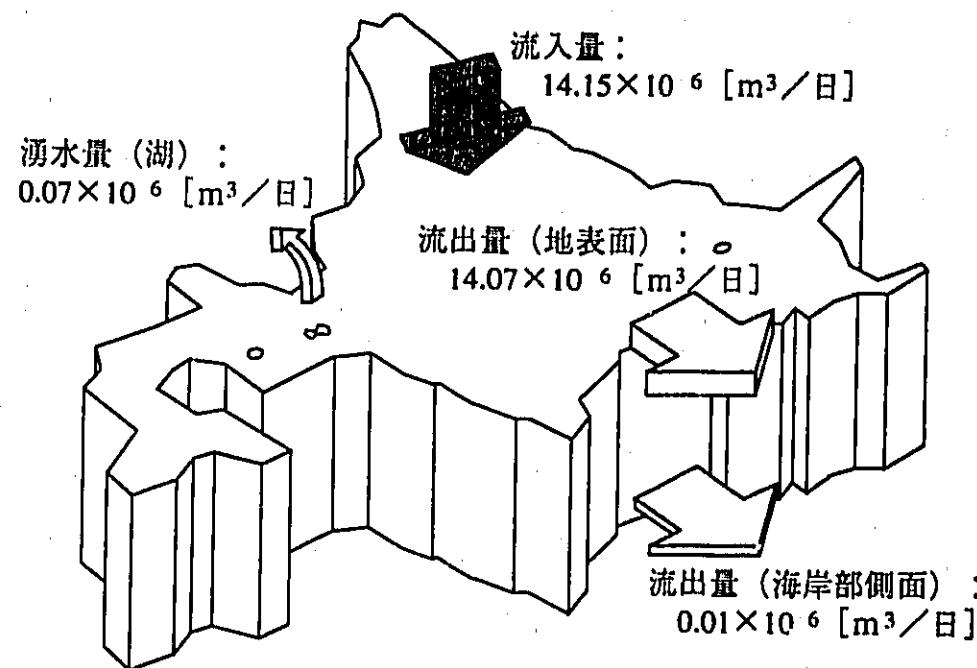
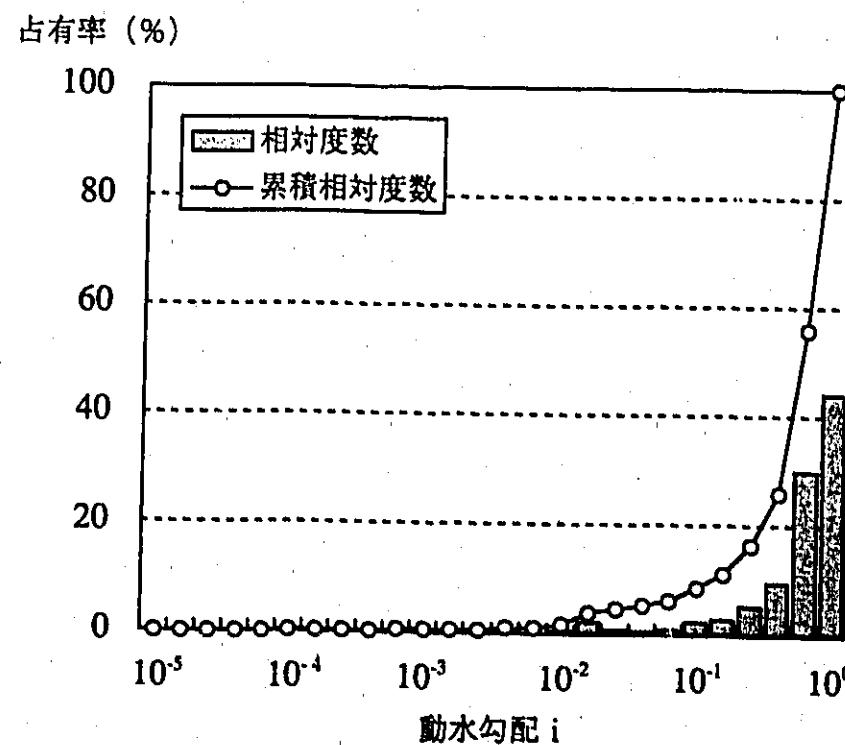


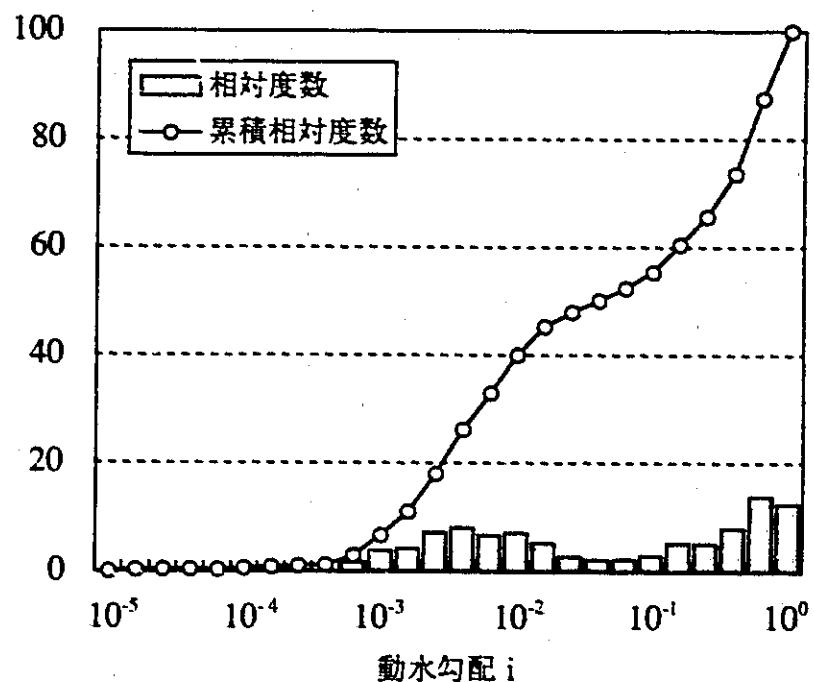
図 3.27 解析領域全体における水収支の計算結果 [解析ケース 3]



(a) 深度0~100m

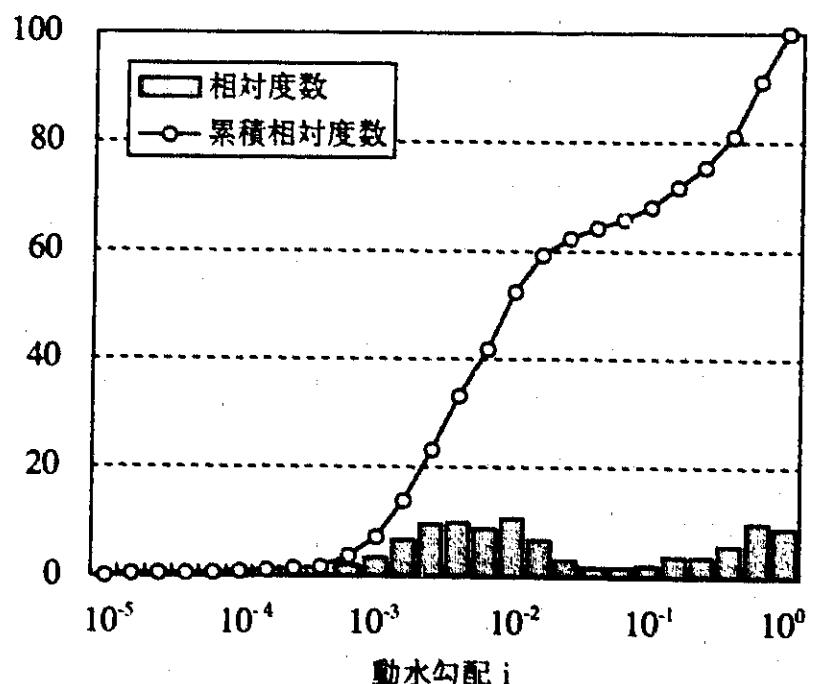
図 3.28 各深度における動水勾配の占有率 [解析ケース 3]

占有率 (%)



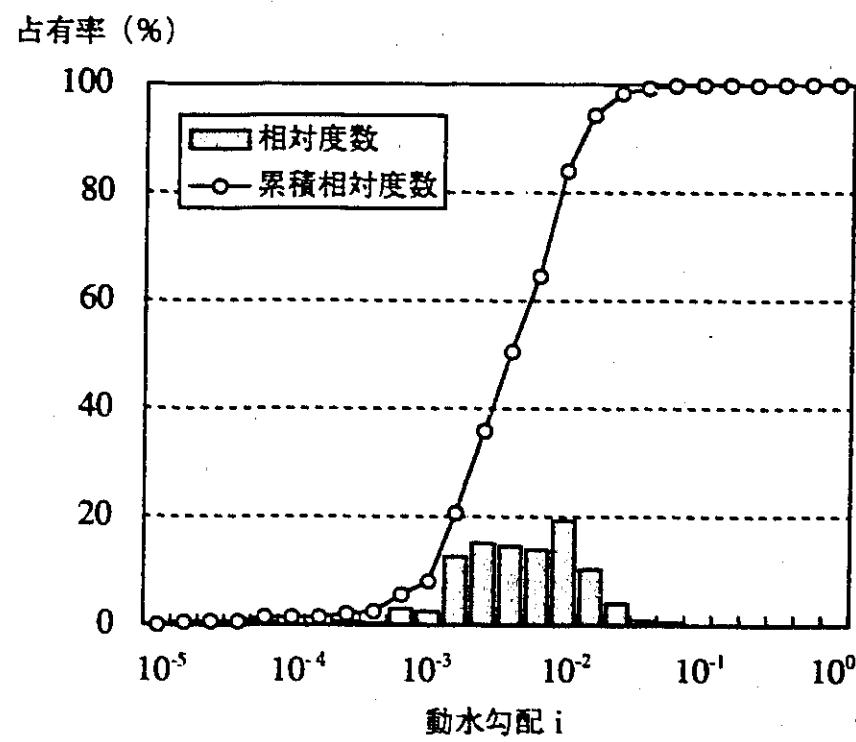
(b) 深度0~500m

占有率 (%)

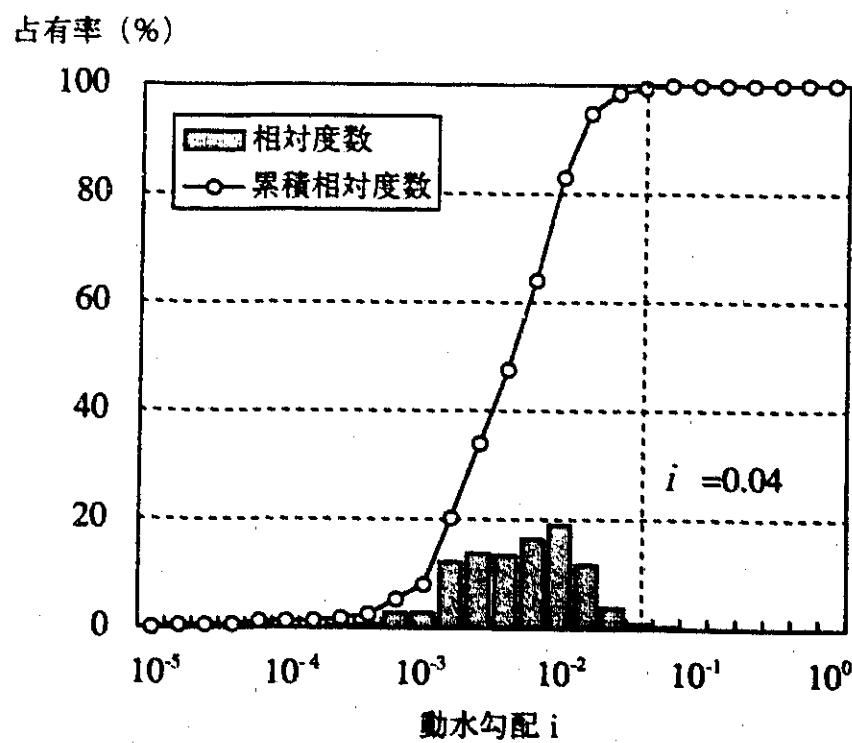


(c) 深度0~1,000m

図 3.28 各深度における動水勾配の占有率 [解析ケース 3]

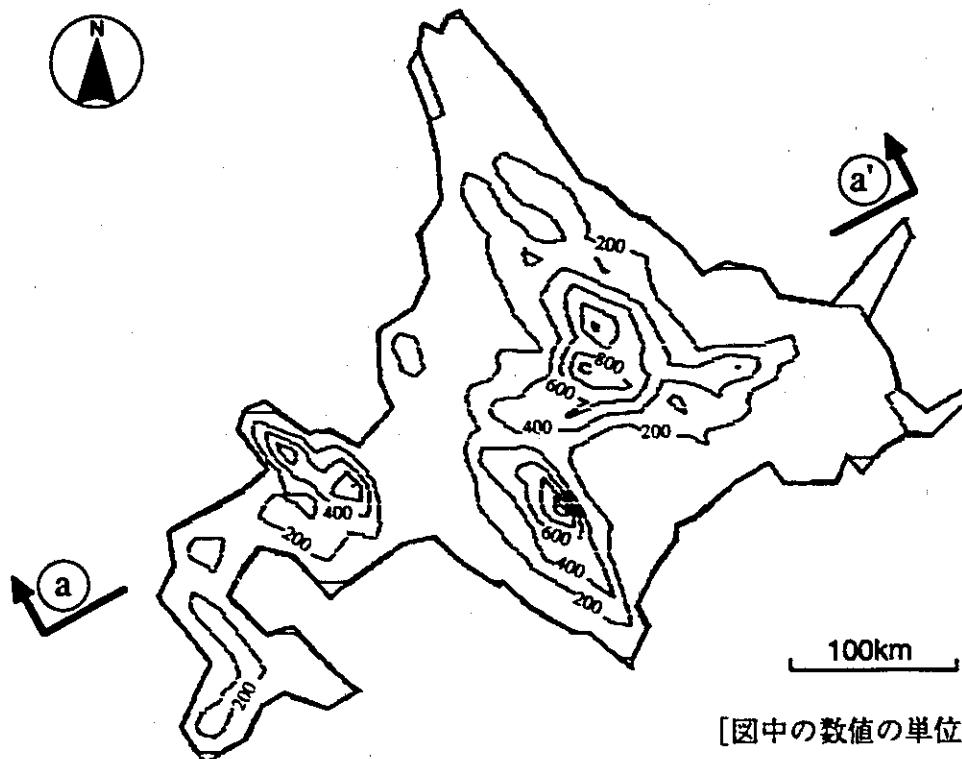


(d) 深度500 ~ 1,000m



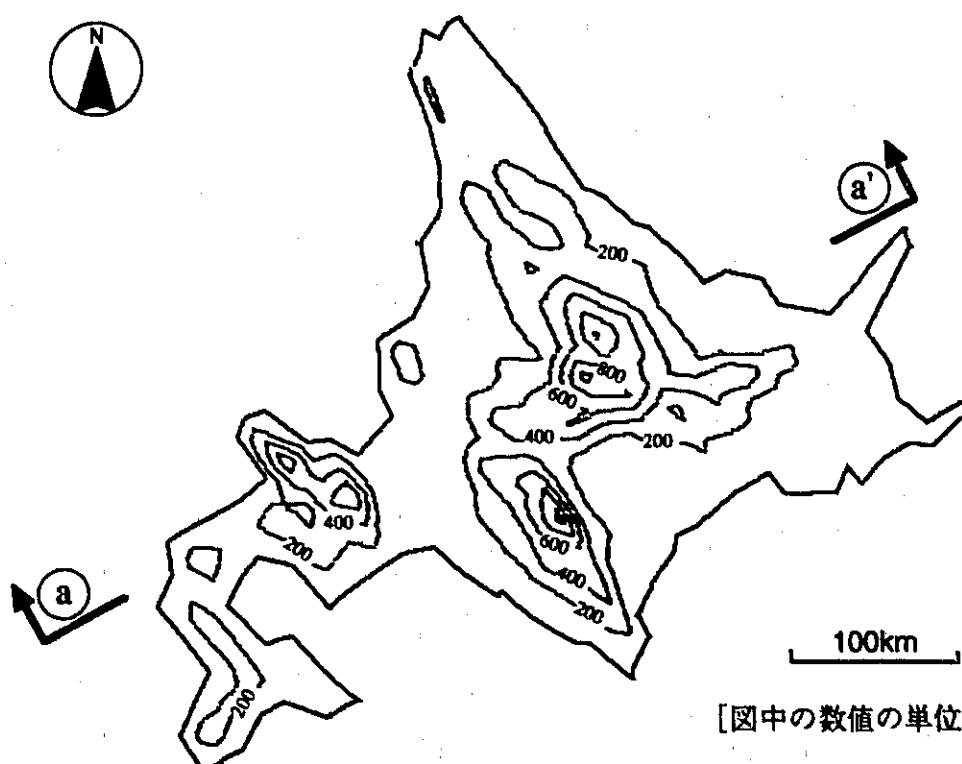
(e) 深度500m 以深

図 3.28 各深度における動水勾配の占有率 [解析ケース 3]



[図中の数値の単位はm]

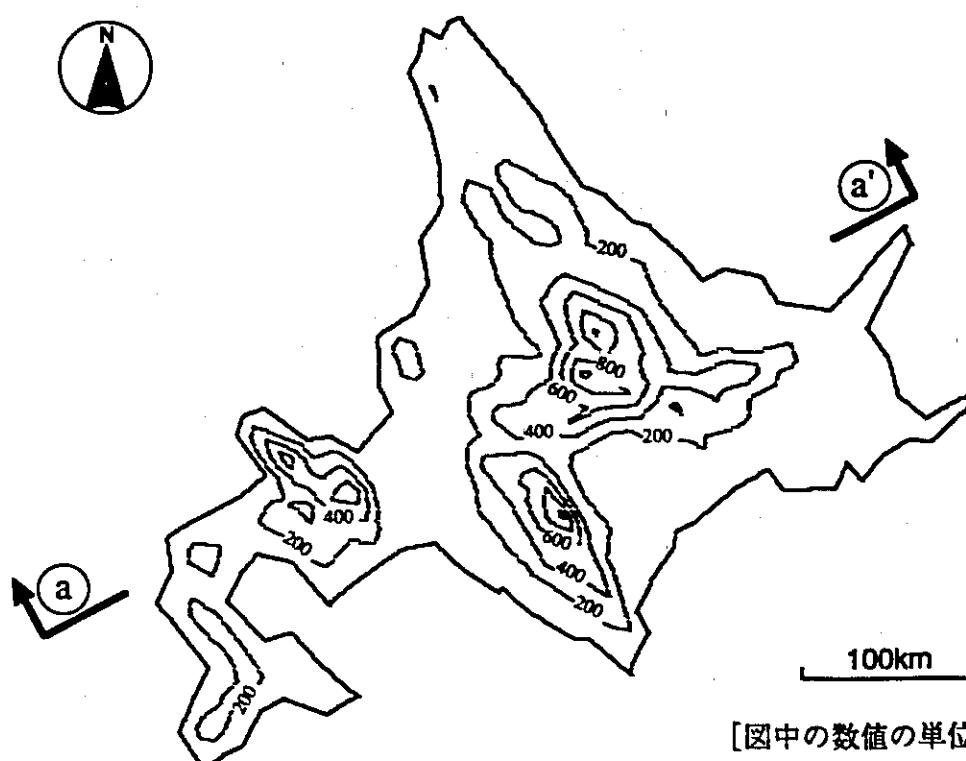
(a) 標高0mにおけるピエゾ水頭分布



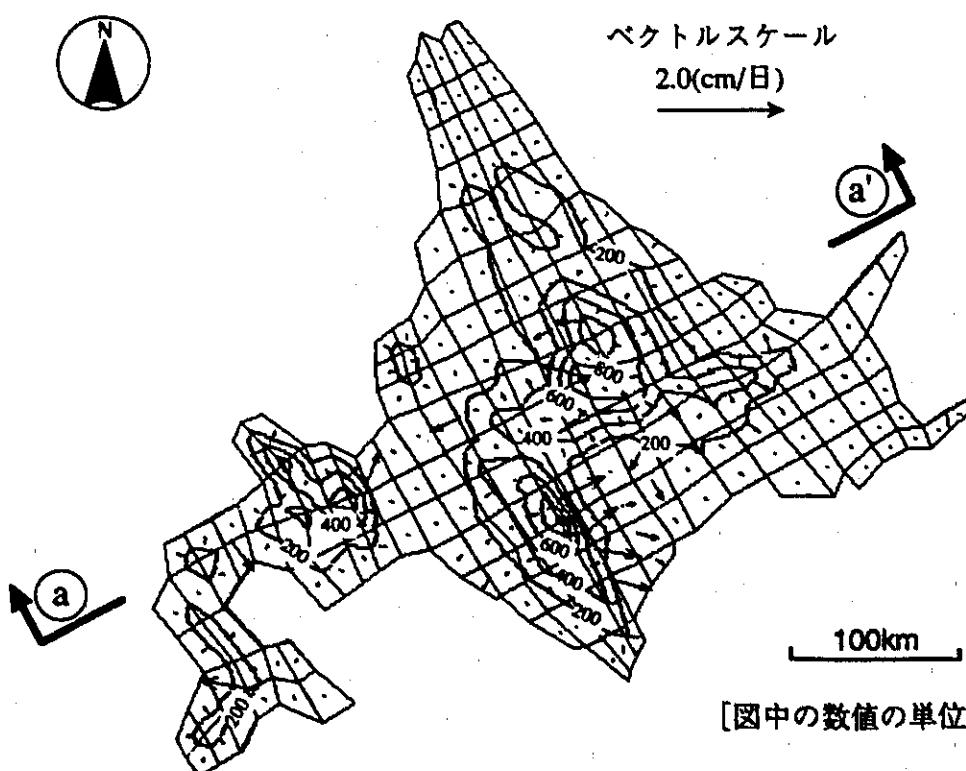
[図中の数値の単位はm]

(b) 標高-500mにおけるピエゾ水頭分布

図 3.29 地下水流動解析結果 [解析ケース 4]

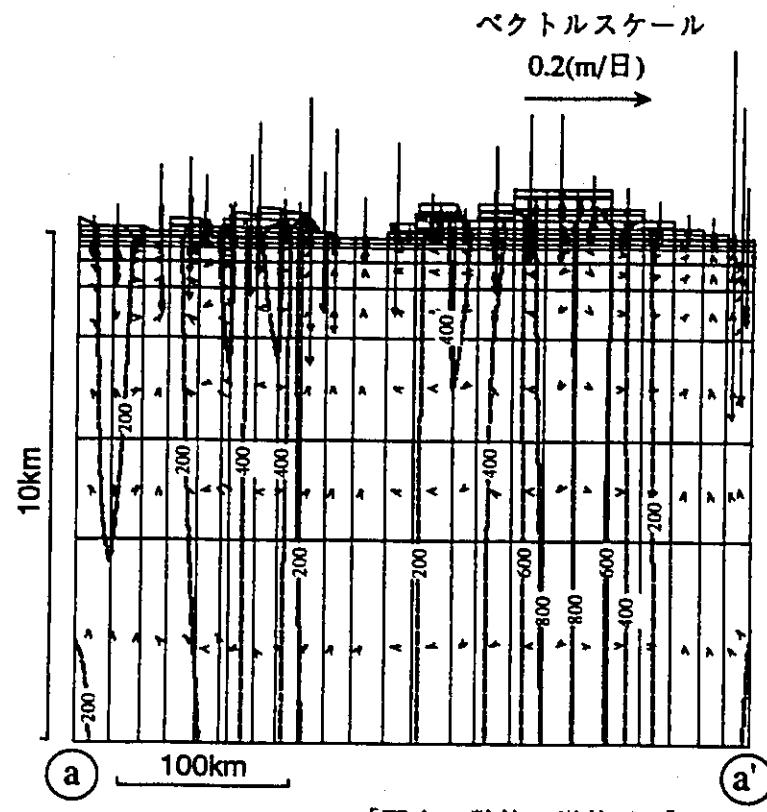


(c) 標高-1,000mにおけるピエゾ水頭分布



(d) 標高-1,000mにおけるピエゾ水頭とダルシー流速ベクトル

図 3.29 地下水流動解析結果 [解析ケース 4]



[図中の数値の単位はm]

(e) 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

図 3.29 地下水流動解析結果 [解析ケース 4]

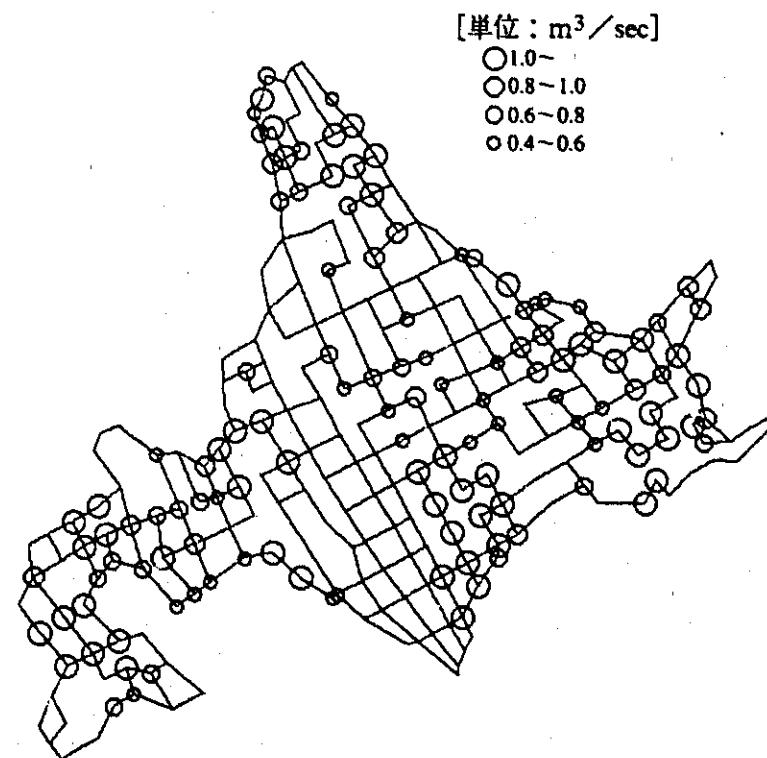


図 3.30 浸出点の分布 [解析ケース 4]

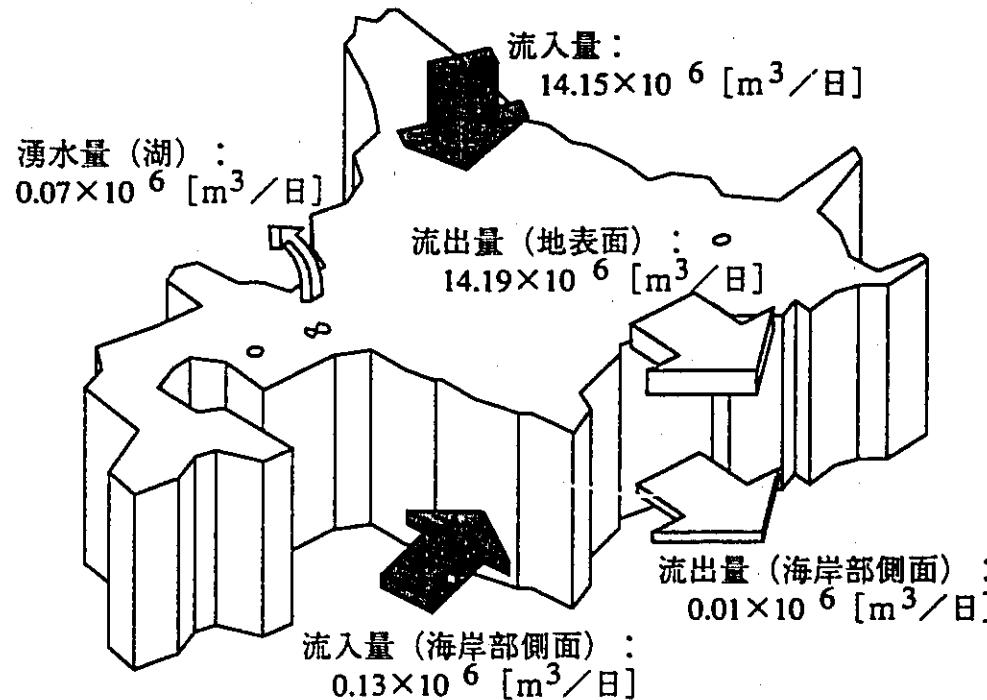
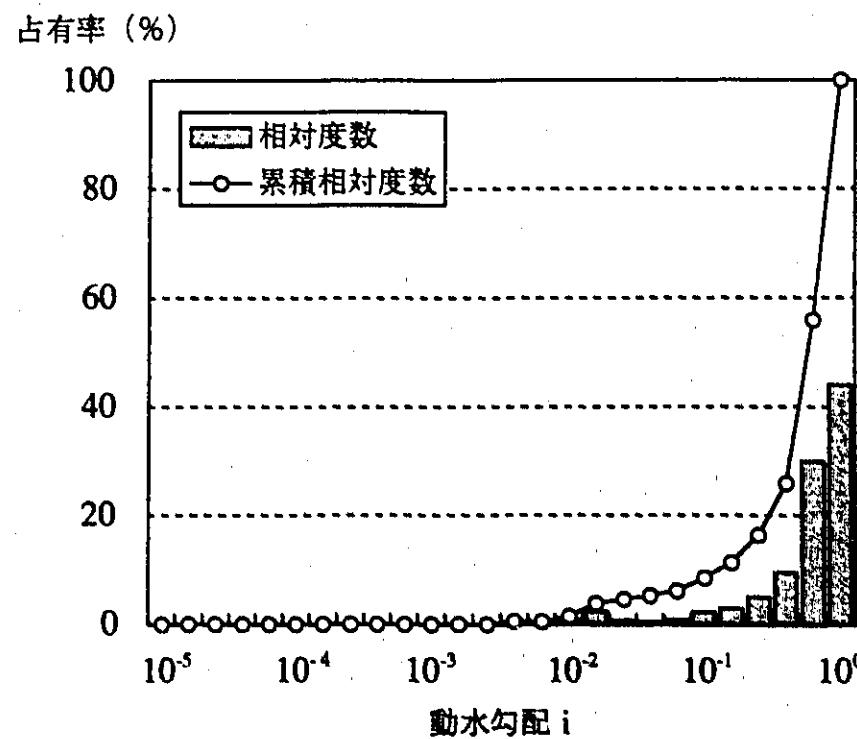


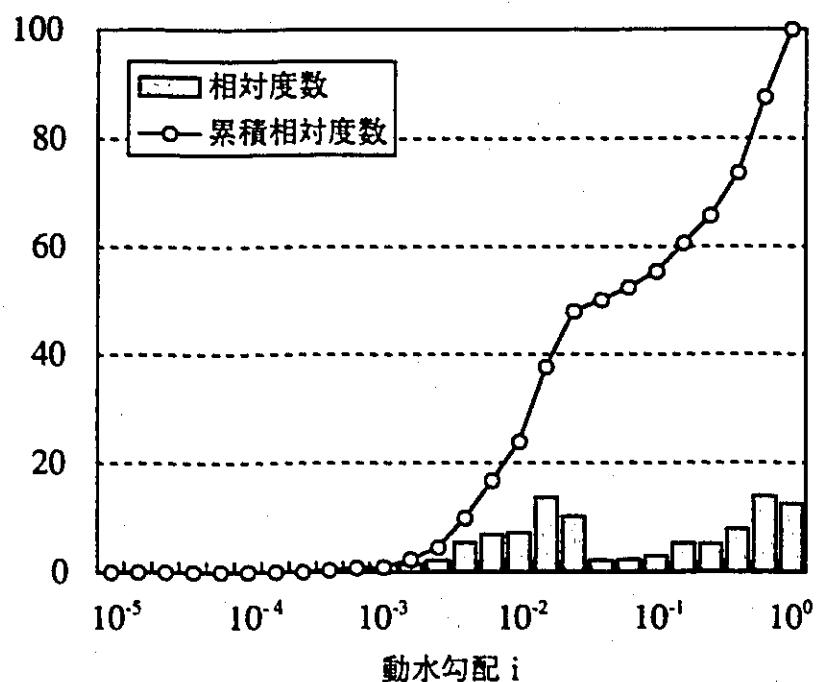
図 3.31 解析領域全体における水収支の計算結果 [解析ケース 4]



(a) 深度0~100m

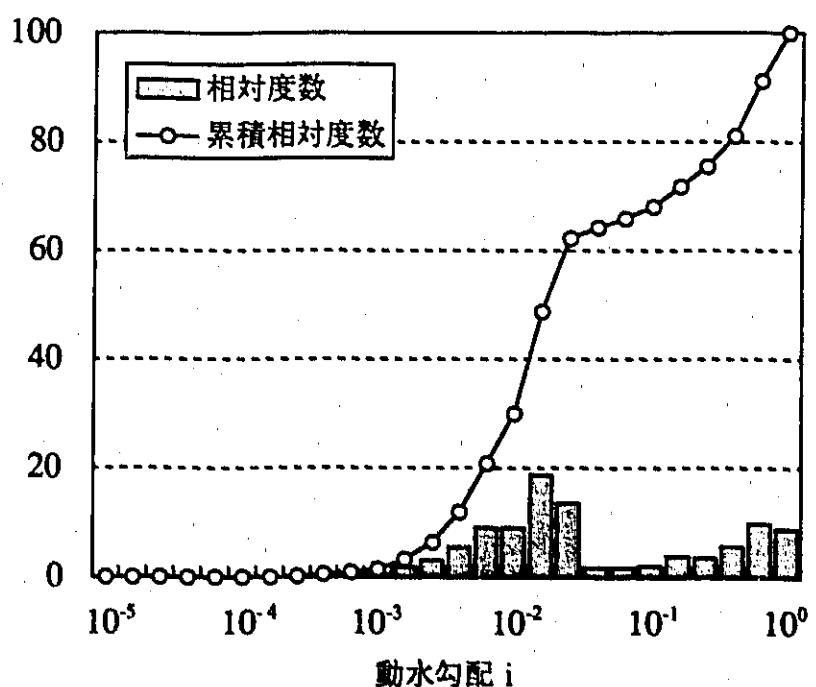
図 3.32 各深度における動水勾配の占有率 [解析ケース 4]

占有率 (%)



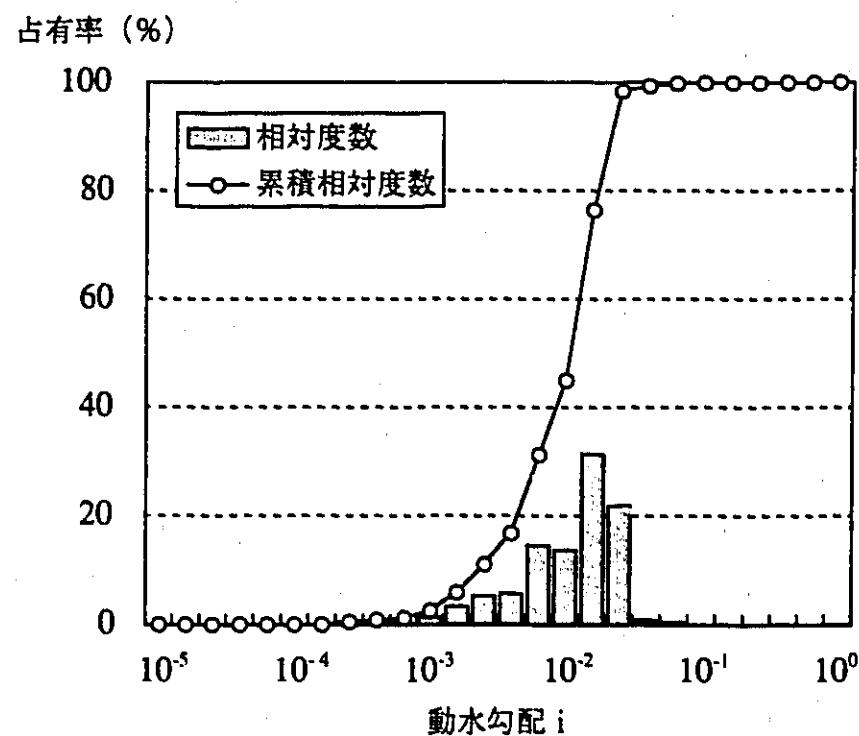
(b) 深度0~500m

占有率 (%)

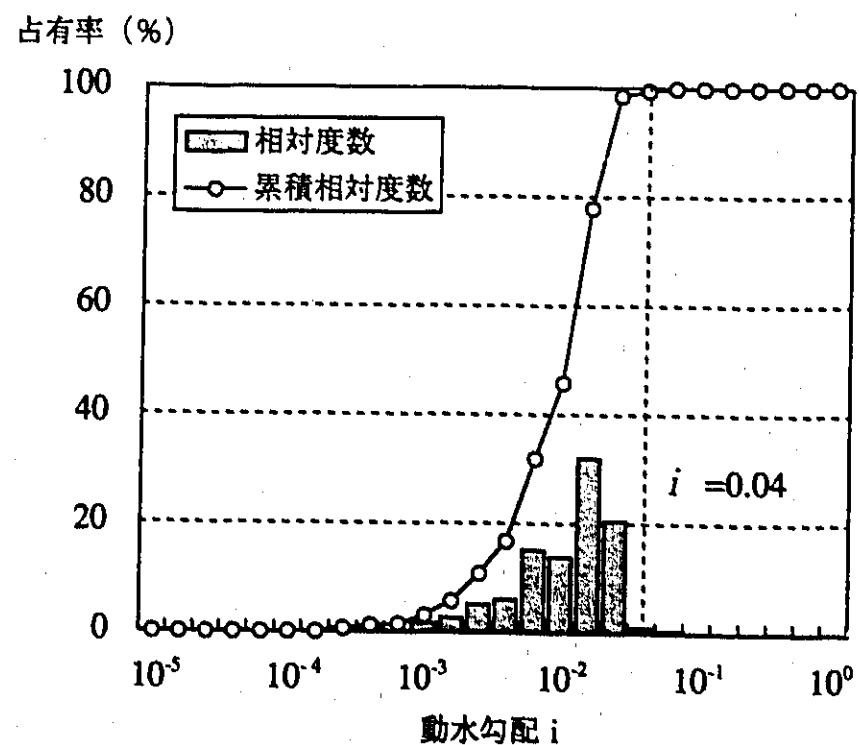


(c) 深度0~1,000m

図 3.32 各深度における動水勾配の占有率 [解析ケース 4]



(d) 深度500 ~ 1,000m



(e) 深度500m 以深

図 3.32 各深度における動水勾配の占有率 [解析ケース 4]

(4) 境界条件の違いによる解析結果への影響について

次に、解析ケース1（基本ケース）とは海岸部側面の境界条件の設定方法が異なる解析ケース2～4（3.6.2 参照）の解析結果を解析ケース1の場合と比較する。

【解析ケース2】

ピエゾ水頭分布（図3.21(a)～(e)）では、定水位の条件として海岸部の側面に設定したピエゾ水頭0mの等高線が見られる以外は解析ケース1との違いはほとんど見られない。浸出点の位置（図3.22）についても大きな違いは見られない。解析領域全体における水収支（図3.23）は、海岸部側面からの流出が生じており、流入量、および流出量の絶対量は解析ケース1の場合に比べ約2割程度大きくなっている。動水勾配の占有率（図3.24(a)～(e)）についても、解析ケース1とほぼ同様の傾向を示している。

【解析ケース3】

ピエゾ水頭分布（図3.25(a)～(e)）では、解析ケース2の場合と同様に、定水位の条件として海岸部の側面に設定したピエゾ水頭0mの等高線が見られる以外は解析ケース1との違いはほとんど見られない。浸出点の位置（図3.26）についても大きな違いは見られない。解析領域全体における水収支（図3.27）は、海岸部側面からの流出が生じているが、その流出量は解析ケース2の場合の約半分である。流入量、および流出量の絶対量は解析ケース1の場合に比べ約2割程度大きくなっている。動水勾配の占有率（図3.28(a)～(e)）についても、解析ケース1とほぼ同様の傾向を示している。

【解析ケース4】

ピエゾ水頭分布（図3.29(a)～(e)）では、定水位の条件として海岸部の側面に設定したピエゾ水頭0mの等高線が見られる以外は解析ケース1との違いはほとんど見られない。浸出点の位置（図3.30）についても大きな違いは見られない。解析領域全体における水収支（図3.31）については、海岸部側面から $0.01 \times 10^6 m^3/\text{日}$ の流出に対し $0.13 \times 10^6 m^3/\text{日}$ の流入が生じている点が解析ケース1および解析ケース2、3と異なる。流入量、および流出量の絶対量が解析ケース1の場合に比べ約2割程度大きくなっているのは、解析ケース2、3と同様の傾向である。動水勾配の占有率（図3.32(a)～(e)）については、深度500m以深で $10^{-1.6} \sim 10^{-1.8}$ の動水勾配を示す部分が若干多くなっているが、全体としては解析ケース1とほぼ同様の傾向を示している。

4.まとめ

以下に、本研究の解析結果をまとめる。

- (1) 今回の解析によって、北海道の広域的な地下水水流動の方向は、石狩山地、夕張山地、日高山脈などの中央部の山地から山間部の盆地、あるいは周辺の平野部へ向かうものであるという結果が得られた。そして、ピエゾ水頭分布やダルシー流速ベクトルから、広域的な地下水水流動の方向が大局的な地形に支配されるということが確認された。
- (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以深では深度によるピエゾ水頭の変化は小さくほぼ静水圧分布を示した。
- (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以下であった。
- (4) 解析の結果得られた地下水の浸出点の大半は、山地と丘陵地の境界など地形の境界部分に位置する。
- (5) 海岸部分の境界条件の与えかたの違いによって、解析領域全体での流入量、流出量の絶対量に若干の差が生じた以外は、解析結果に顕著な差は現れなかった。

5. 今後の課題

本研究では、我が国の地下深部の水理学的特性を把握するための研究の一環として、北海道の概略的な水理学的特性を明らかにするために数値解析を実施した。本章では、今後このような広範な領域を対象とした地下水流动解析を行う上で検討すべき課題についてまとめた。

(1) 水理地質構造モデルについて

① 地形、地質構造のモデル化の精度

地形、および地質構造をモデル化する際に用いるデータの質と量によって、解析対象領域の規模とその表現の細かさは規制されるため、要求する解析の精度に応じたモデル化の精度を検討する必要がある。

地質構造については、今後より現実的な解析を行うために、試錐孔などを利用した深度方向のデータを収集するとともに、地質図などを用いて深度方向の地質構造をより詳細に推定し、精度の高い地質構造のモデル化方法を検討する必要がある。

② 断層などの不連続な地質構造のモデル化

地質構造のモデル化に関して、断層が水理学的な境界になり得ると考えられることから、その表現方法を検討する必要がある。

③ 透水係数の設定

本研究では、解析に用いる透水係数は既存の地質や土木に関する文献資料に基づいて設定した。しかし、既存の文献資料にまとめられている調査結果がそれぞれの目的に応じた状況（土木工事では工学的に軟弱な部分など）を対象として調査されたものであることを考えると、本研究で設定した各地質区分における透水係数として十分な精度でないことも考えられる。解析結果の精度を向上させるためには、精度の高い透水係数データを収集するとともに、収集した透水係数データが、対象とする地層を代表する値であるかどうかを検討した上で設定することが必要である。

④ 不飽和領域における水理パラメータの把握

不飽和領域における水理パラメータについては、その測定方法の確立とともに、実測に基づいた精度の高いデーターの把握が必要である。

(2) 解析条件の設定について

① 信頼性の高い涵養量の把握

北海道を対象とした本研究の場合、降水量（とくに降雪量）のデータの信頼性が低いことから、精度の高い涵養量の設定が行えなかった。今後、信頼性の高い涵養量の把握が課題となる。

② 外側境界条件としての深度方向の間隙水圧の把握

解析結果の信頼性の向上には、入力データの精度を高めることが必要不可欠である。

涵養量や、外側境界条件は地下水の供給量に関係するため、できるだけ忠実に解析に反映させることが必要である。

③ 河川部分の境界条件の設定

本研究では、湖沼については定水位の条件を設定したが、河川については水理学的な境界としての取り扱いはしていない。しかし、河川は地下水表面の一部をなし、水理学的境界になりうるものと考えられることから、解析上考慮する必要があると考えられる。

④ 海岸部分の境界条件の設定

本研究では、海岸部分の境界は海岸線を通る鉛直な側面に設定した（図3.15）。海岸付近の淡水と塩水の境界は、実際には海岸付近の地下にくさび状に存在するものと考えられており（Ghyben-Herzbergの法則）、本研究ではそれを考慮した境界条件の設定を行い、境界条件の違いによる解析結果への影響を検討したが、海岸部分のモデル化については、その形状などを含めさらに検討を行う必要がある。

(3) 地下水流動解析（数値解析）手法について

地下深部では熱や地圧の影響により、岩盤中の地下水の透水性や流動特性は変化するものと考えられる。そのため、地下水流动と熱や地圧との相互作用を考慮した連成解析が必要な場合が考えられる。

(4) 解析結果の妥当性の検証について

本研究のように、解析対象が広範囲な領域におよぶ場合には、解析上必要なデータだけでなく、解析結果を検証するためのデータも、質・量ともに少ないというのが現状である。たとえ1,000m級のボーリング孔を数本設けて間隙水圧のモニタリングを行ったとしても、その観測データが、北海道全体の概括的な地下水流动を把握するために行った解析結果の検証にどの程度有効であるかは疑問である。これまでには、地盤沈下などの問題に対して取水制限が行われた時期での地下水の総取水量と湧出量の比較を検証に用いた例（柳澤ほか、1992）もあるが、今後、降水量、河川流量の観測データと湧水量を比較するというような、解析結果を検証する方法を検討する必要がある。

— 技術レポートリスト —

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

PNC TN7410 89-029

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

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

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

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

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

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

TR/GE 89-08 柳澤孝一：広域地下水流动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/GB 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ーログ研究（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/GB 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/GB 90-04 柳澤孝一・今井久・斎藤章・大澤英昭・中島誠：立坑掘削影響試験における地下水流动影響予測解析， PNC TN7410 91-013

TR/GB 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/GB 91-01 H. Yoshida, M. Yui and T. Shibutani :A Study of Influence Factor on
Uranium Fixation in the Tono Uranium Deposit, Japan,
PNC TN7410 91-061

TR/GB 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/GB 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/GB 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/GB 91-05 仙波毅・尾方伸久・長谷川健・岩崎浩・渡辺邦夫：ボアホールレーダーによる
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/GB 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 濱尾俊弘・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

TR/GE 92-04 柳澤孝一・今井久・古屋和夫・若松尚則・梅田浩司：我が国を対象と
した地下水流动解析－その1 中部日本を対象にした地下
水流動解析－, PNC TN7410 92-019

TR/GE 92-05 柳澤孝一・若松尚則・梅田浩司・今井久・古屋和夫：我が国における
水理地質学的特性に関する調査・研究, PNC TN7410 92-012

TR/GE 92-06 松井裕哉・杉原弘造・佐藤稔紀・吉岡尚也：堆積岩地山における立坑
周りの力学的・水理学的な特性変化, PNC TN7410 92-046

TR/GE 92-07 佐藤稔紀・松井裕哉・杉原浩弘・吉岡尚也：立坑掘削影響試験－地中
変位計測に基づく掘削影響評価－, PNC TN7410 92-051

TR/GE 92-08 湯佐泰久：立坑掘削影響試験ワークショップ—発表論文集—,
PNC TN7410 92-052

TR/GE 93-01 H. Yoshida, T. Seo, T. Nohara, K. Ota, K. Hama, K. Kodama, T. Iwatsuki : Data
Compilation of Geoscientific Studies of Tono Uranium
Deposits, Central Japan, PNC TN7410 94-015

TR/GE 94-01 前川恵輔・梅田浩司・小出馨・今井久・柳澤孝一：我が国を対象とし
た地下水流动解析－その2 東北日本を対象とした地下
水流動解析－, PNC TN7410 94-029

TR/GE 94-02 杉原弘造・大石清隆・榎 利博・石島文代：機械による掘削影響試験
の事前調査・解析—平成5年度実施分—, PNC TN7410 94-
049

TR/GE 95-01 横 利博：ボーリング孔からの湧水および遮水パッカーの効果に関する予備解析，PNC TN7410 95-002