JNC TJ 1400 99-045

幌延町開進地区における地下水流動解析研究

（動力炉・核燃料開発事業団　委託研究成果報告書）

1995年3月

国際航業株式会社

JNC TJ 1400 99-045
1 9 9 5 年 3 月

幌延町開進地区における地下水流動解析研究

大島洋志※，西田道夫※
前川統一郎※，平山利晶※
藤原幹之※，嵐　正治※

要　　旨

本研究では、貯蔵工学センター候補地周辺地区の地下水流動状況、及び貯蔵工学センター建設時・建設後の地下水流動の変化をシミュレートするための三次元浸透流解析モデルを作成した。作業に当たっては、水文地質資料、水文資料等の解析を行ない、帯水層区分、水理定数の整理、及び地下水かん養量の推定を行なった。また、既往の地下水位観測結果、地下水水質の分布、及び地表標高より、地下水流動機構の推定を行なった。

モデルは、深地層試験場建設等による広範囲の地下水への影響を予測することを目的とした広域モデルと、地上施設及び縦坑掘削第２段階時の周辺への影響を予測することを目的とする局所モデルの２種類を作成し、応答解析、予測解析を行なった。計算コードには三次元地下水流動を差分法で計算するMODFLOWを使用した。様々な仮定に基づくシミュレーションモデルによる推定結果ではあるが、現在までその全貌が不明であった、広域地下水の流動状況を１つの可能性ある姿として示すことができた。

今後の研究においては以下の調査を優先的に実施することが望ましいと判断された。

① 広域地下水流動の確認

推定された地下水位の分水界において垂直下方の地下水流動が生じていることを確認すること、および天塩川左岸側において垂直上向きの地下水流動が生じていることを確認するため、３地点において深層ボーリングを実施すること。

② 地下水涵養機構の評価

中間流出により、地下に浸透した水が地下水面に達する前に外部に排出される機構を考慮し、降雨の地下浸透量の把握と中間流出過程の把握を行なうこと。

③ モデル構造の再評価

モデルの対象領域を海岸線まで拡大した広域流動系の再現を行ない、次いで中間流動系、局所流動系モデルを構築する試みを行なうこと。

本報告書は、国際航業株式会社が動力炉，核燃料開発事業団の委託により実施した研究の成果である。

契約番号：060D0305
事業団担当部および担当者：環境技術開発推進本部地層科学研究グループ　中司　昇
※：東日本事業本部地質一部

JNC TJ 1400 99-045
M A R C H , 1 9 9 5

Study of the groundwater flow analysis in Kaisin area of Horonobe town

Hirosi Osima*, Michio Nisida*
Touichiro Maekawa*, Toshiaki Hirayama*
Masayuki Fujihara*, Masaharu Arasi*

A b s t r a c t

The objective of the study is to build up a numerical analysis model for the simulation of present groundwater flow in a proposed construction site of the Storage Engineering Center(SEC) and to forecast groundwater flow changes before and after the construction of SEC with an examination of a model's effectiveness.

An aquifer demarcation, an adjustment of aquifer's hydraulic parameter, and an estimation of volume of groundwater recharge for the simulation modeling have been conducted through the analysis of hydrological and hydro-geological data, and they have defined that groundwater flow have three-dimentional movement corresponding to the variation of land surface height.

The model consisted of two components such that one was the wide area model in order to forecast the influence of construction of deep layer laboratory to wide area's groundwater through the simulation of groundwater flow in the proposed construction site and its surroundings of SEC , and the other was the spot area model in order to forecast the influence of construction of land facility and the second stage of shaft drilling to groundwater.

The source code for the model was USGS's MODFLOW that can estimate three dimensional groundwater flow with the finite differece method.

Based on response analysis and predict analysis using the simulation model, entire movement of wide area's groundwater flow which had been unknown, was expressed.

The following study are recommendable to be carried out as priorities.

① Examination of Groundwater Flow Movement in Wide Area

In order to examine vertical down-ward movement of groundwater in divide of the estimated groundwater level and vertical up-ward movement of groundwater in the left bank side of Tesio River, the deep boring in 3 sites are recommendable.

② Evalution of Structure of Groundwater Recharge

It will be desirable to grasp rainfall's penetrative volume to underground and intermediate process of flow, considering the structure which flow out penetrative rainfall before reaching groundwater level because of intermediate process of flow.

③ Re-evaliation of Model's Structure

To build up the model which is expanded to a coastline as a objective area for the expression of wide area's flow movement supposing sea water face , the model of intermediate flow movement and the model of spot area flow movement, will be recommendable.

Work performed by Kokusai Kogyo CO.LTD under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation
P N C liaison : Geosciences Research Program Noboru Nakatuka
※ : Geological Survey Dept.

目　　次

図　目　次

表　目　次

7

写　真　目　次

付　図　目　次

1．　研究概要

1．1　研究委託の名称

「幌延町開進地区における地下水流動解析研究」

1．2　目的

本研究は、

i　三次元浸透流解析によって貯蔵工学センター候補地周辺地区の、現在の地下水流動状況を解明すること

ii　貯蔵工学センター（特に深地層試験場）の建設時・建設後の地下水流動の変化を予測すること

及び、

iii　当地区の水文地質・地下水流動機構解明のための調査を進める上で優先的に実施すべき調査内容、調査地点等を検討すること、

を調査実施の目的とした。

本研究の対象地区は、北海道幌延町開進地区の貯蔵工学センター周辺（図１－１）である。

1．3　研究の背景

北海道幌延町開進地区では、気象、地下水、地質に関わる調査・観測が個々に行なわれているが、総合的な観点から情報が整理・解析されてはいない。そこで、現時点までの情報で地下水流動状況を推定し、そのモデル化を図ることで、貯蔵工学センター候補地周辺地区の解析を進める上での問題点の抽出を図った。

1．4　研究委託の範囲

図１－２には本研究の作業プロセスを示す。主な作業項目は次の通りである。

（１）水文地質構造調査

（２）地下水流動モデルの作成

（３）地下水流動モデルの検証計算

（４）予測解析

（５）調査計画の立案

（６）報告書作成

（７）報告会の実施

１．５　研究期間

平成６年１２月１日　～　平成７年３月１５日（105日間）

１．６　実施担当者

次の人員で、本研究を実施した。

従事者氏名	最終学歴	卒業／入社年時	現職
大島　洋志	九州大学 理工学部 地質学科	昭和40年３月 ／平成５年３月	技術開発部技師長
西田　道夫	早稲田大学 理工学部 資源工学科	昭和43年３月 ／昭和54年12月	地質一部 部長
前川統一郎	早稲田大学大学院 理工学研究科 資源及び金属工学専攻	昭和56年３月 ／昭和56年４月	地質一部 水文グループ課長
平山　利晶	東海大学 海洋学部 海洋資源学科	昭和55年３月 ／昭和55年４月	地質一部 水文グループ主任技師
藤原　幹之	京都大学 理学部 地球物理学科	昭和58年３月 ／昭和58年４月	地質一部 水文グループ課員
嵐　正治	早稲田大学 理工学部 資源工学科	平成３年３月 ／平成３年４月	地質一部 水文グループ課員

作業場所は次の通りである。

国際航業株式会社 地質１部 水文グループ
〒191　東京都 日野市 旭ヶ丘３－６－１ 日野技術所
℡(0425)83-1014　　FAX(0425)86-7128

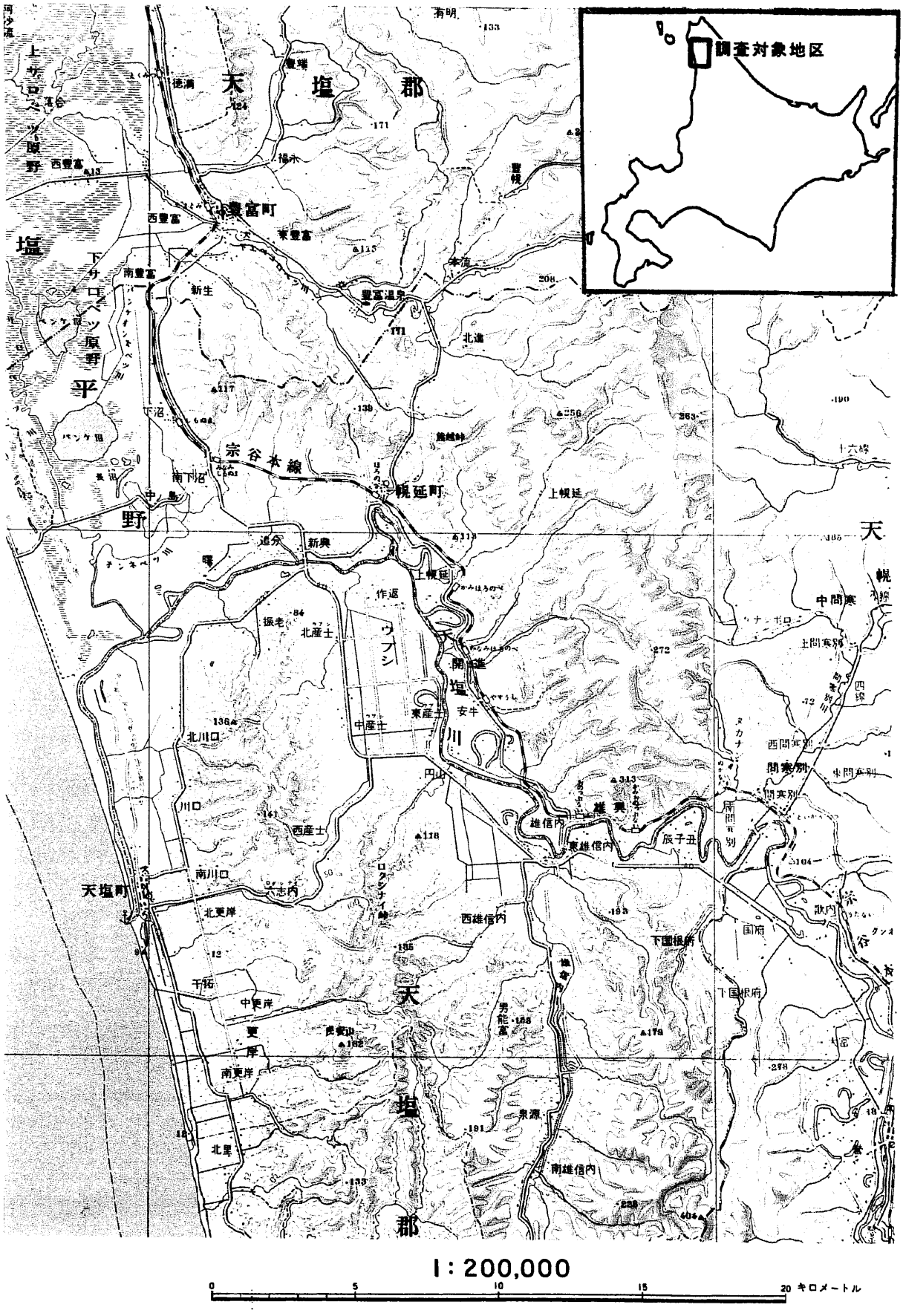


図1－1　調査対象地区（北海道幌延町開進地区）

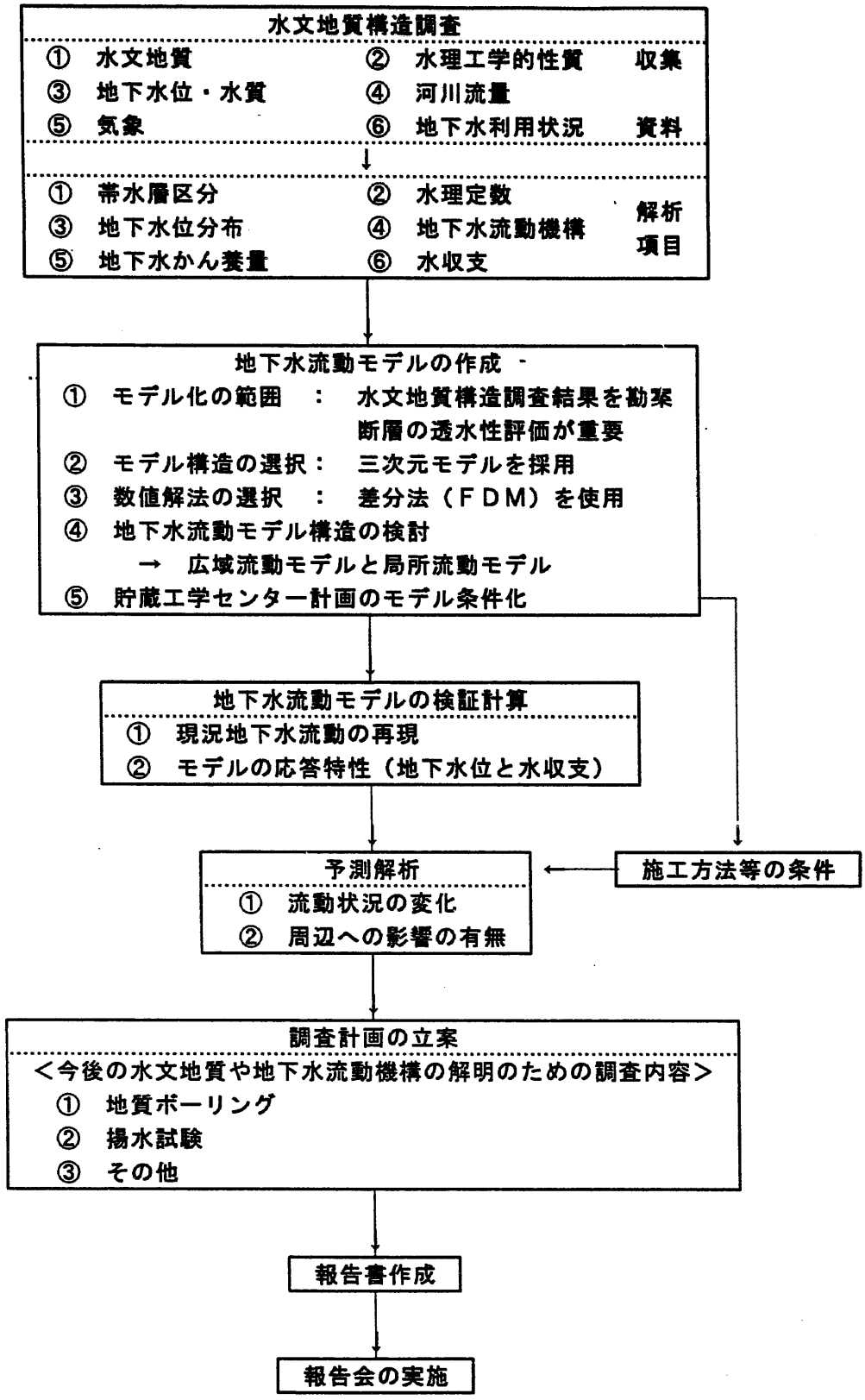


図１－２　幌延町開進地区における地下水流動解析研究の作業プロセス

2．　水文地質構造調査

2．1　資料

水文地質構造を解析するに当たって、基礎資料として、本研究では以下の項目に該当する資料を収集した。

① 水文地質
② 透水係数・間隙率
③ 地下水位・水質
④ 河川流量
⑤ 気象
⑥ 地下水流動解析（数値解析）
⑦ その他

表２－１には収集資料の一覧表を示す。また、整理した資料のうち既存ボーリングデータの諸元を表２－２に、同位置図を図２－１に示す。

表２－１　(1)引用・参考資料一覧表

	① 水文地質	② 水理工学	③ 地下水	④ 表流水	⑤ 気象	⑥ 数値解析	⑦ その他
1) 動力炉・核燃料事業団（ － ）：地質平面図(1:25,000)	○						
2) 動力炉・核燃料事業団（1994）：第２回堆積岩に関する調査委員会添付図集（配布資料２），p1	○						
3) 動力炉・核燃料事業団（ － ）：貯蔵工学センターに関する調査のとりまとめ，p2~7	○						
4) 動力炉・核燃料事業団（ － ）：（ボーリング孔の深度および諸元に関する資料）	○						
5) 動力炉・核燃料事業団（1987）：貯蔵工学センター立地環境調査ー深層ボーリングー報告書，p218~226	○		○				
6) 幌延町(1981)：幌延町地内地質岩盤調査，上山試錐工業株式会社	○		○				
7) 動力炉・核燃料事業団（1987）：貯蔵工学センター立地環境調査ー深層ボーリングー報告書，p24~28，p33~37，p51~101，p183~217	○						
8) 動力炉・核燃料事業団（1987）：貯蔵工学センター立地環境調査ー深層ボーリングー報告書，p106~112，p122~133		○ ○					
9) 日本の地質『北海道地方』編集委員会編（1990）：日本の地質『北海道地方』，共立出版株式会社	△						
10) 地下水ハンドブック編集委員会編（1979）：地下水ハンドブック，p287~293，p297~321，㈱建設産業調査会		○					
11) 土質工学会編（1989）：岩の調査と試験，p275~284，土質工学会		○					
12) 水収支研究グループ編（1993）：地下水資源・環境論，p77，共立出版株式会社		○					
13) 動力炉・核燃料事業団（1993）：幌延地区地下水調査報告書，応用地質株式会社			○	○			
14) 建設省河川局編（1993）：平成３年（第18回）地下水位年表，p101~106，全国鑿井協会			○				
15) 建設省河川局編（1993）：平成３年（第７回）地下水水質年表，p42~45，地下水技術協会			○				
16) 建設省河川局編（1994）：平成４年（第45回）流量年表，p33~39，日本河川協会				○			
17) 動力炉・核燃料事業団（1994）：幌延地区気象調査報告書，財団法人日本気象協会					○		
18) 動力炉・核燃料事業団（1994）：幌延地区気象調査報告書概要版，財団法人日本気象協会					○		
19) 動力炉・核燃料事業団（1991）：深部地下水の地化学特性調査，清水建設株式会社，p36			○				

注　○は引用（データ使用を含む）項目、△は参考項目（特定頁の引用はない）
著者（調査機関）が不明のものは、調査実施者（社）名を［　］で示した
資料名が不明なものは、資料の内容を（　）で示した
資料作成年が不明のものは、－ で示した

表２－１(2)　引用・参考資料一覧表

	① 水文地質	② 水理工学	③ 地下水	④ 表流水	⑤ 気象	⑥ 数値解析	⑦ その他
20) 平山利晶・前川統一郎（1994）：地下水問題この10年とその将来展望，日本地下水学会，p96						○	
21) 鎌田烈（1988）：アーバンクボタvol.27，久保田鉄工株式会社，p18						○	
22) 吉識雅夫・山田嘉昭 監訳（1984）：マトリックス有限要素法，培風館						△	
23) 鷲津久一郎、他（1981）：有限要素法ハンドブック，培風館						△	
24) Kinzelbach W.（1986）：GROUNDWATER MODELLING, DEVELOPMENTS IN WATER SCIENCE 25, ELSEVIER						△	
邦訳は、上田年比古 監訳（1990）：地下水解析，森北出版株式会社						△	
25) 田辺行人 他（1994）：偏微分方程式の差分解法，東京大学出版会						△	
26) Anderson M.P., W.W.Woessner（1992）：APPLIED GROUNDWATER MODELING, Academic Press. Inc.,p20-21						○	
邦訳は、藤縄克之 監訳（1994）：地下水モデル，共立出版株式会社，p13,p41						○	
27) Wang H.F., M.P.Anderson（1982）：INTRODUNCTION TO GROUNDWATER MODELING, W.H.FREEMAN AND COMPANY						○	
28) 動力炉・核燃料事業団（ － ）：（深地層試験場レイアウト）							○
29) McDonald, M.G., A.W. Harbaugh（1988）： A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Groundwater Flow Model, Techniques of Water-Resources Investigations 06-A1, USGS						△	
30) Prickett, T.A., C.G. Lonnquist（1971）：Selected Digital Computer Techniques for Groundwater Resource Evaluation, Illinois State Water Survey, Bulletin 55						△	
31) 松尾新一郎・河野伊一郎（1970）：地下水位低下工法，鹿島出版会，p153		○					
32) 岩井重久・石黒政儀（1970）：応用水文統計学，森北出版株式会社，p278				○			
33) 水収支研究グループ（1976）：地下水盆の管理，東海大学出版会，p242			○				
34) 藤縄克之							

注　○は引用（データ使用を含む）項目、△は参考項目（特定頁の引用はない）
著者（調査機関）が不明のものは、調査実施者（社）名を［　］で示した
資料名が不明なものは、資料の内容を（　）で示した
資料作成年が不明のものは、－ で示した

表2－2　既存ボーリングデータ一覧表
（地下水流動解析の対象範囲内およびその周辺）

番号・名称	場所	実施機関・目的	掘削年月	掘削深度 m	地点標高 標高m	ストレーナ GL-m	掘削時（試験時）地下水位 m	備考・引用資料
D－1	開新地内	動力炉・核燃料開発事業団		1355.41	13.0	143-155 290-300 800-810 1000-1355	GL -5.082 GL +2.162 GL +7.42 GL +27.60	各種試験を実施 資料 7) 8)
B－1	開新地内	動力炉・核燃料開発事業団		20.35	12.5	全ストレーナ	GL -1.83	水位観測継続中，GL-4m付近で閉塞 資料 4)
B－2	開新地内	動力炉・核燃料開発事業団		50.00	20.0	全ストレーナ	GL -10.20	水位観測を継続中 資料 4)
B－5	開新地内	動力炉・核燃料開発事業団		30.00	25.0	全ストレーナ	GL -2.00	水位観測を継続中 資料 4)
B－6	開新地内	動力炉・核燃料開発事業団		30.00	25.0	全ストレーナ	GL -2.15	資料 4)
No.5	Site 5(開新地内)		1981年10月~11月	34.00	26.70	調査ボーリング	GL -0.00	資料 6)
No.6	Site 6(開新地内)		1981年10月	31.00	34.70	調査ボーリング	GL -0.65	資料 6)
No.9	Site 9(間寒別地内)		1981年10月	40.00	16.10	調査ボーリング	GL -1.90	資料 6)
No.14	Site14(間寒別地内)		1981年10月~11月	60.00	38.37	調査ボーリング	GL -1.60	資料 6)
No.15-A	Site15(南沢地内)		1981年10月	40.00	138.74	調査ボーリング	GL -2.80	資料 6)
No.15-B	Site15(南沢地内)		1981年10月	60.00	67.04	調査ボーリング	GL -7.80	資料 6)
No.15-B'	Site15(南沢地内)		1981年10月	60.00	90.04	調査ボーリング	GL -13.00	資料 6)
No.15-C	Site15(南沢地内)		1981年10月	35.00	41.98	調査ボーリング	GL -0.12	資料 6)
上幌延HR-1		石油・ガス試掘井				(増幌層)		資料 5)
北新、R-1		石油・ガス試掘井				(増幌層)		資料 5)
北斗・天北化学-1		石油・ガス試掘井				(坑井破損)		資料 5)
豊富温泉R-1		石油・ガス試掘井		961		(増幌層)		資料 5)
豊富温泉R-2		石油・ガス試掘井		860		(増幌層)		資料 5)
豊富温泉R-3		石油・ガス試掘井		908		(増幌層)		資料 5)
天塩・北川口R-1		石油・ガス試掘井		1,069		(増幌層)		資料 5)
北豊富R-2		石油・ガス試掘井		1,507		(増幌層)		資料 5)

※　引用資料名は、資料番号より表２－１を参照されたい

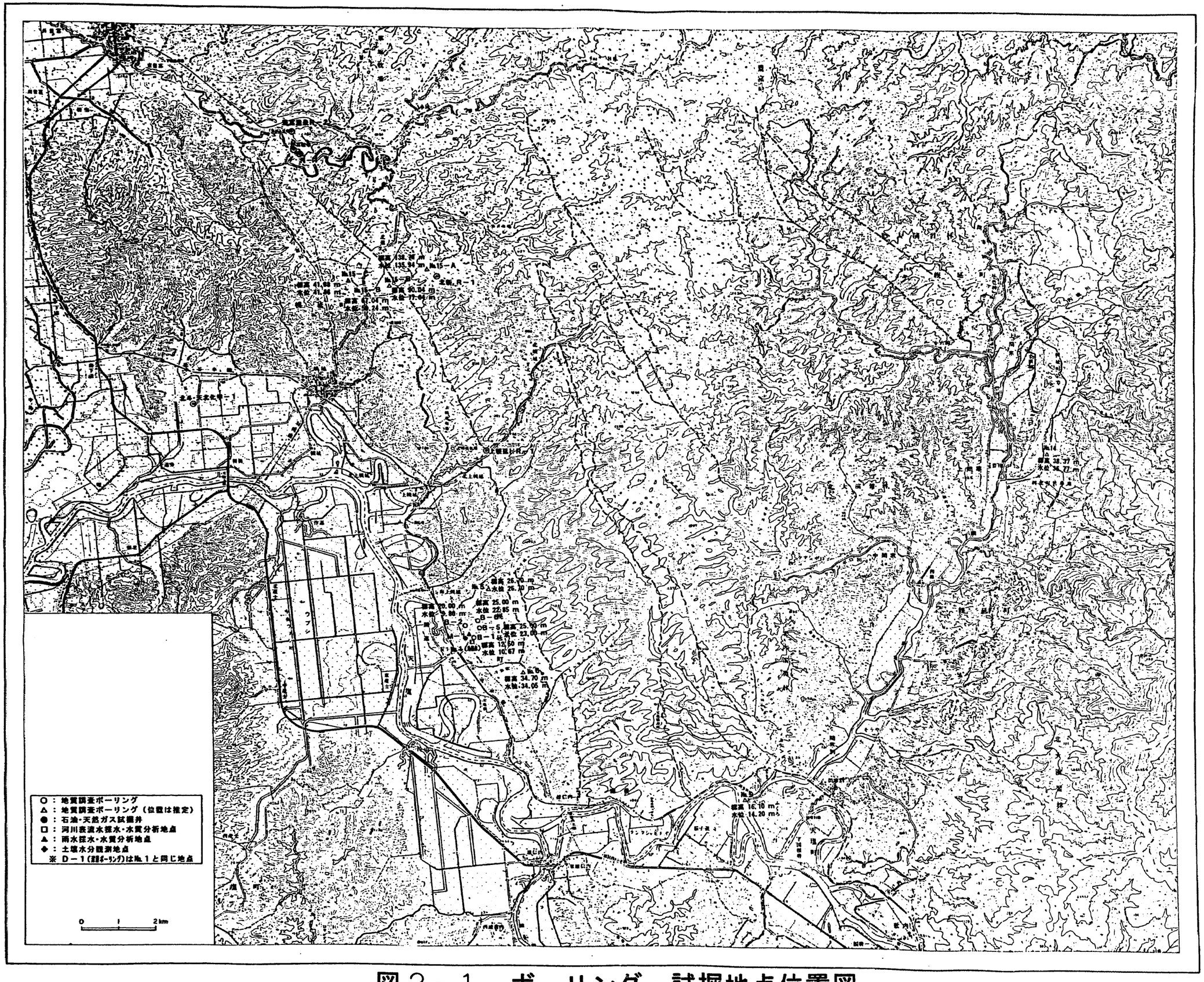


図２－１　ボーリング・試掘地点位置図

2．2　帯水層区分

(1)　要旨

幌延町開新地区の山地部では、恵北層、更別層、勇知層、声問層上部相、声問層主部相、稚内層が分布する。上位の地層ほど砂礫質である。

(2)　水文地質概要

本地域の地質や透水性については、動力炉・核燃料事業団をはじめとする機関により、調査・研究[1)~9)]がなされている。その結果を引用および再整理して、図２－２には地質断面図[1)]を、表２－３には本地域の地質層序[2)~3)]を示す。断面線位置は後述する図３－10を参照されたい。なお、断面図中の横線は地下水流動モデルで適用した層区分の位置であり、その考え方についても第３章で述べる。

本地域は天塩川沿いの沖積平野と山地部に大きく分けられる。山地部を形成する最上位の地層は恵北層（更新世前期）であり、凝灰質シルトと砂礫よりなる（写真１、２）。その下位の更別層（鮮新世後期）も比較的砂礫が優勢な地層である（写真３、４）。砂礫質の層相から見て、恵北層および更別層の透水性は比較的大きいと思われる。

一方、勇知層（鮮新世中期）の層相は礫分が少なくなり、砂が優勢となる（写真５、６）。また、声問層上部相はややシルト質（写真７）であり、その下位の声問層主部相ではさらに泥質となる（写真８、９）。すなわち、本地域の地質は下位になるほど泥質となり、層相から見て透水性は上位で大きく、下位ほど小さくなると思われる。ただし、各地層とも強固結性の岩盤とは言い難く、いずれも、多少の空隙、すなわち透水性を有すると考えられる。

なお、頁岩よりなる稚内層は、上位の声問層主部相よりも硬く、露頭では角礫状に割れることが特徴である（写真10）。揚水試験等のデータはないものの、声問層主部相よりもさらに透水性の低い層相と考えられる。本研究では、各地層を、各々、透水性の異なる帯水層と想定し、地下水流動を解析することとする。

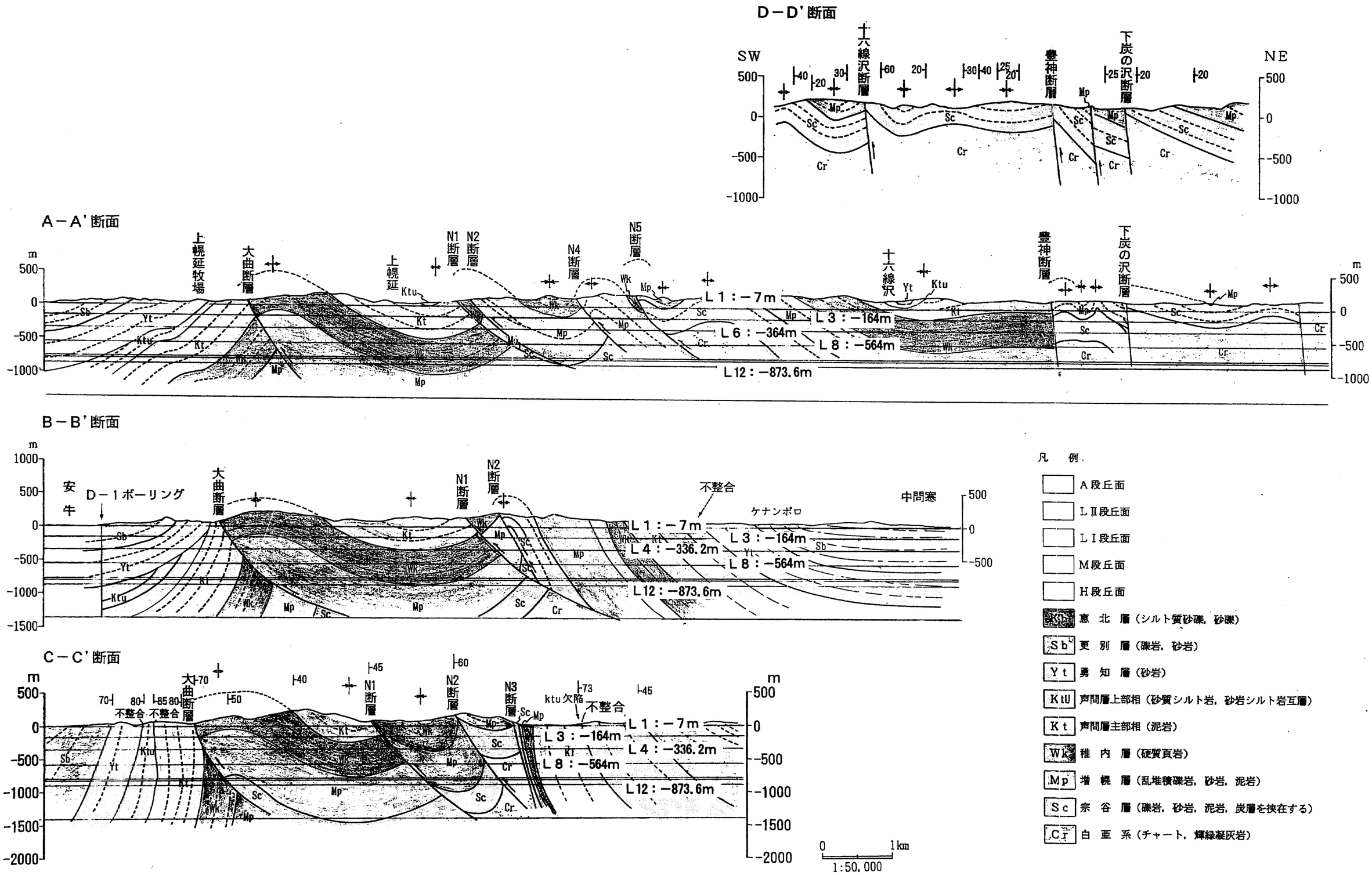
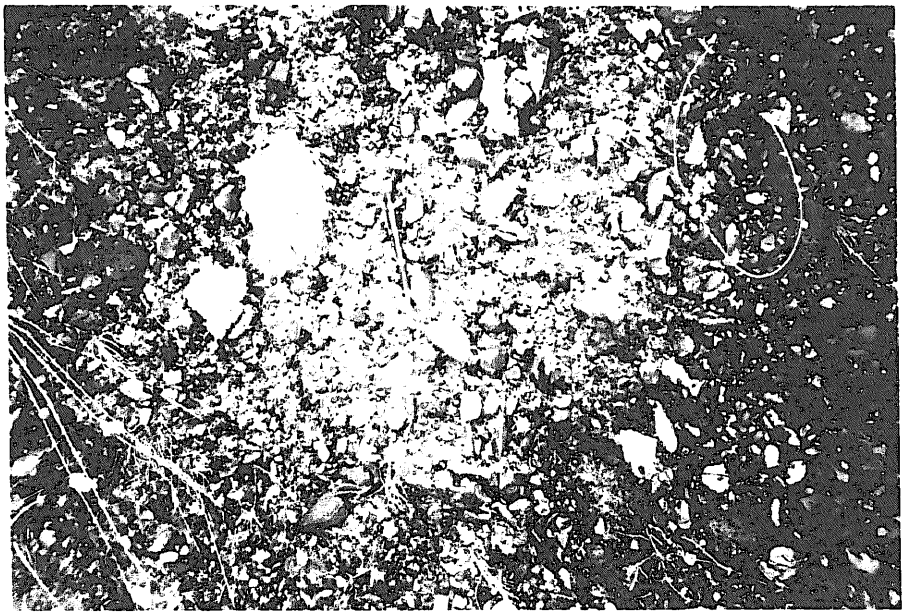


図2－2　地質断面図とモデル層深度

表2-3 地 質 層 序 表

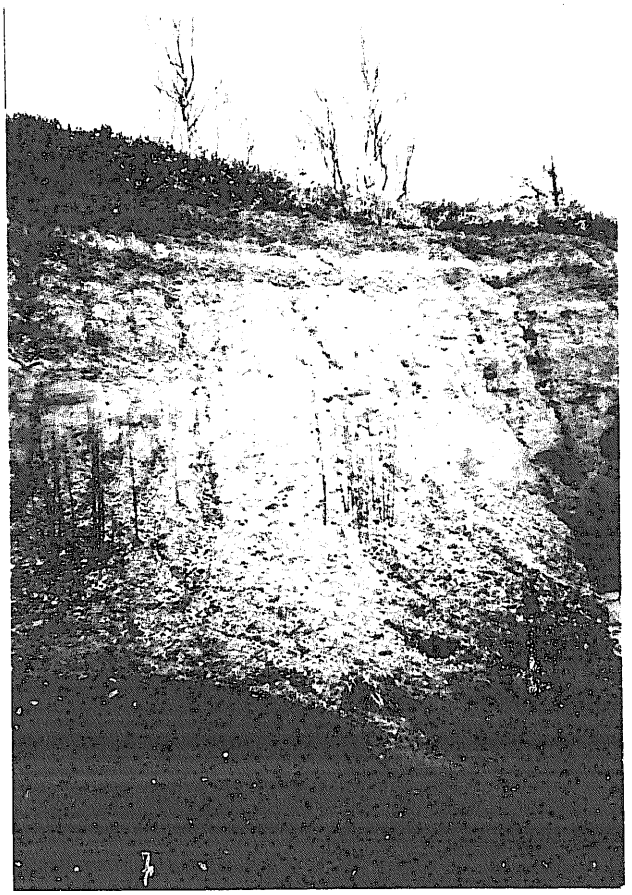
地質時代			地 層 名	層 相
新生代	第四紀	完新世	氾濫源堆積物	礫、砂、粘土、泥炭
		更新世	崖錐堆積物	礫、砂、粘土
			段丘堆積物	礫、砂、粘土
			恵北層	シルト質砂礫、砂礫
	第三紀	鮮新世	更別層	泥岩、シルト岩
				礫岩
				砂岩
			勇知層	泥岩、シルト岩
				細粒砂岩
			声問層上部相	砂質シルト岩、砂岩シルト岩互層
		中新世	声問層主部相	泥岩
			稚内層	硬質頁岩

「貯蔵工学センターに関する調査のとりまとめ（動力炉・核燃料開発事業団）」及び、「第２回堆積岩に関する調査委員会添付図集（動力炉・核燃料開発事業団、平成６年）」をもとに、作成



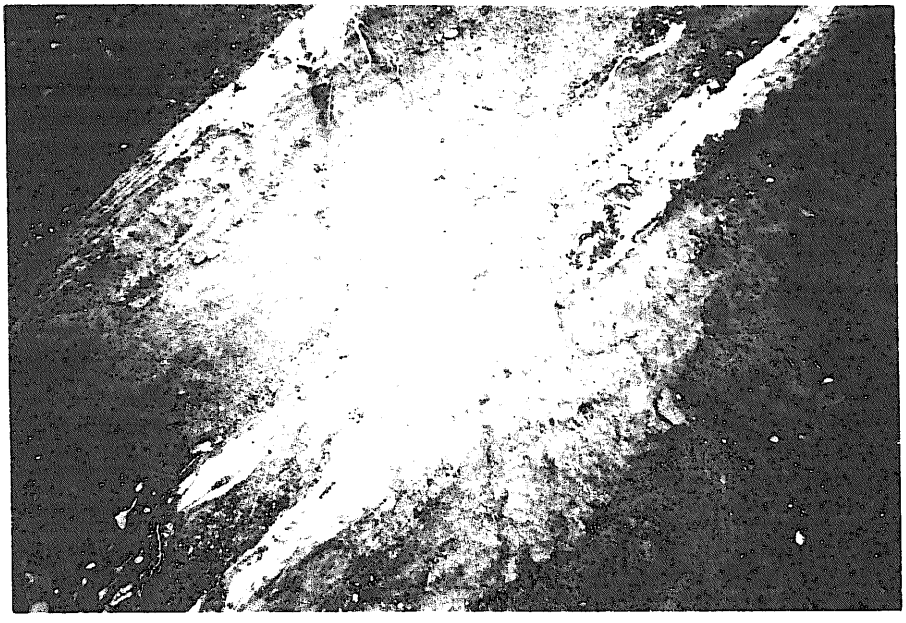
千曲川沿いの恵北層の露頭。礫はφ４cmの亜円礫で、チャート、砂岩、礫岩（非常に硬い）である。

写真１



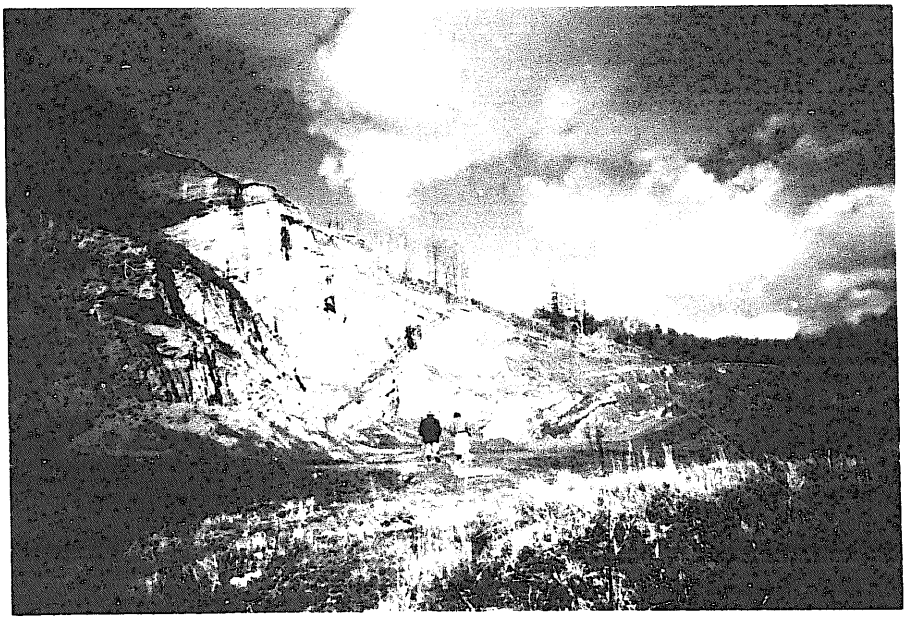
恵北層露頭（写真１）の全景。全体に凝灰質で、シルトの卓越部は角礫状に割れる。上部に白いタフ層が認められる。

写真２



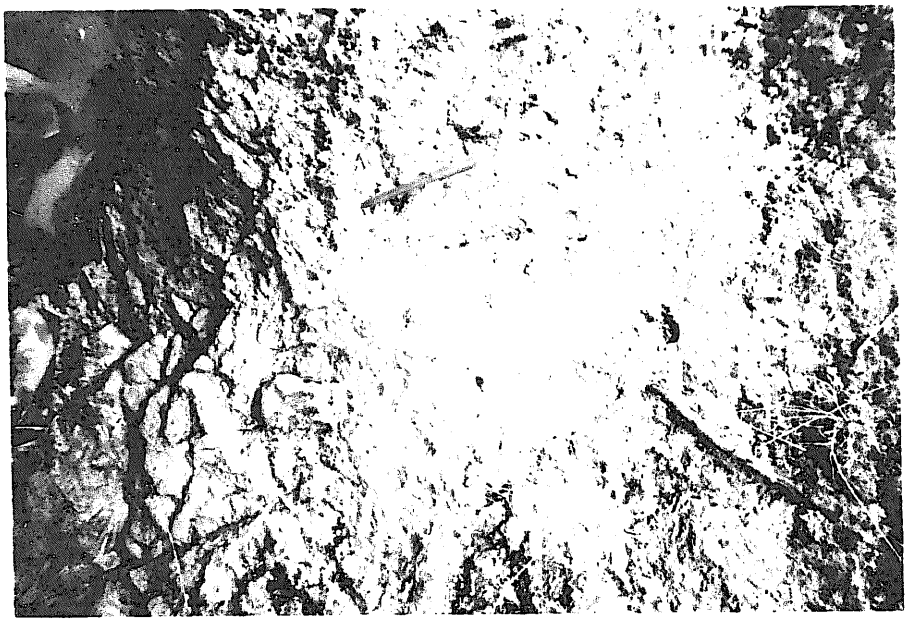
千曲川沿いの更別層の露頭。凝灰質シルト混じり粗砂で、円礫がラミナ状に多数混入。

写真 3



幌延市街地付近の砂の採掘場における更別層の露頭。高さは約 30m。粗砂が主体であり、各所にラミナ状に礫層を挾在する。白色の層は火山灰層である。写真で、右側の傾斜に比べて、左は急であることに注意。これは、三角洲など傾斜のある場で堆積が進行したことを示すと考えられる。右側の傾斜が実際の地層の傾きである。

写真 4

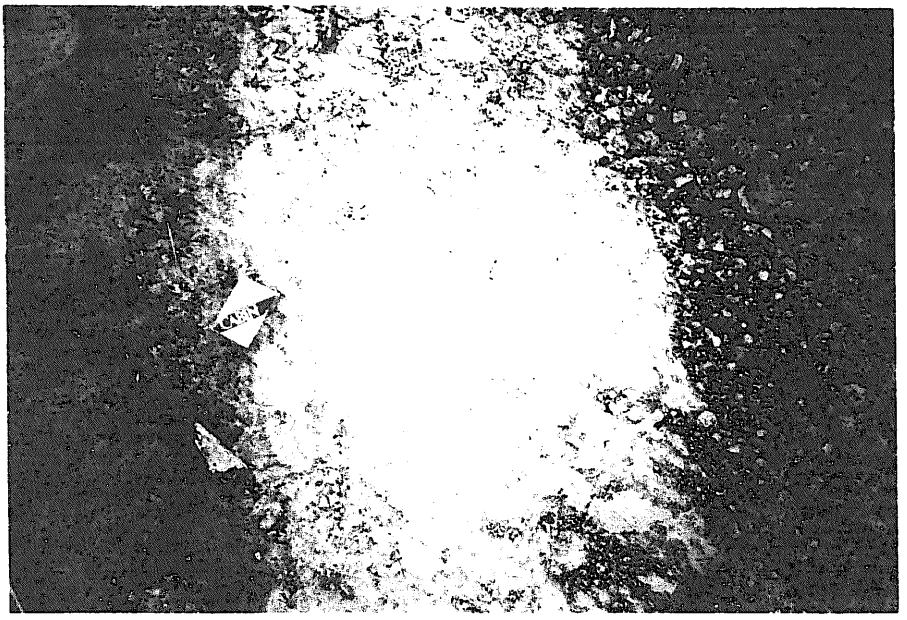


勇知層の層相。礫混じりの砂層であるが更別層よりも泥質。

写真 5

勇知層露頭（写真５）の遠景。

写真 6



パンケオートヌオマップ川とペンケオコッペ川の間の尾根（路面）の、声問層上部相の露頭。層相は砂質（fs）、シルトの偽礫（やや黄褐色）が多数混入する。偽礫はφ数10cm。

写真 7

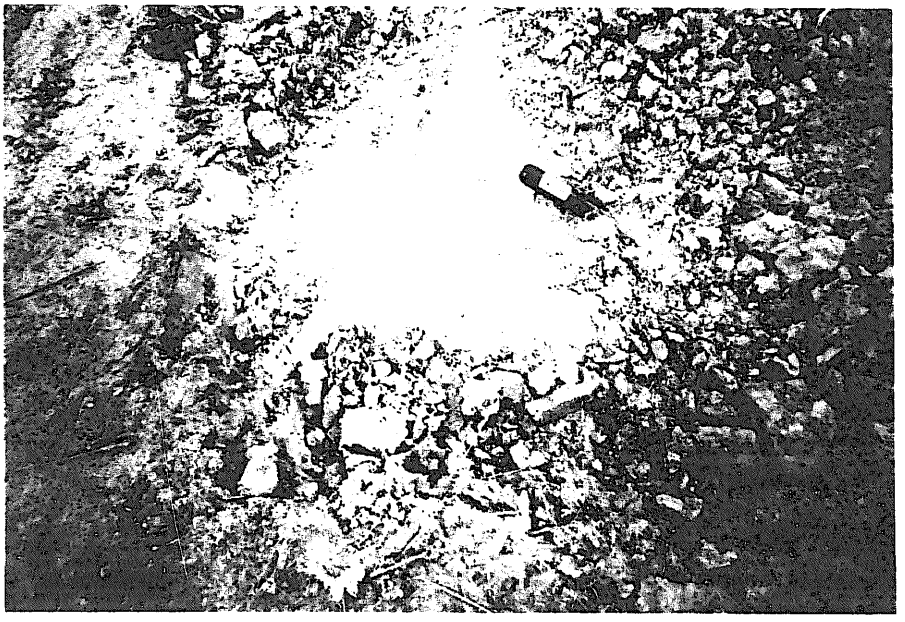
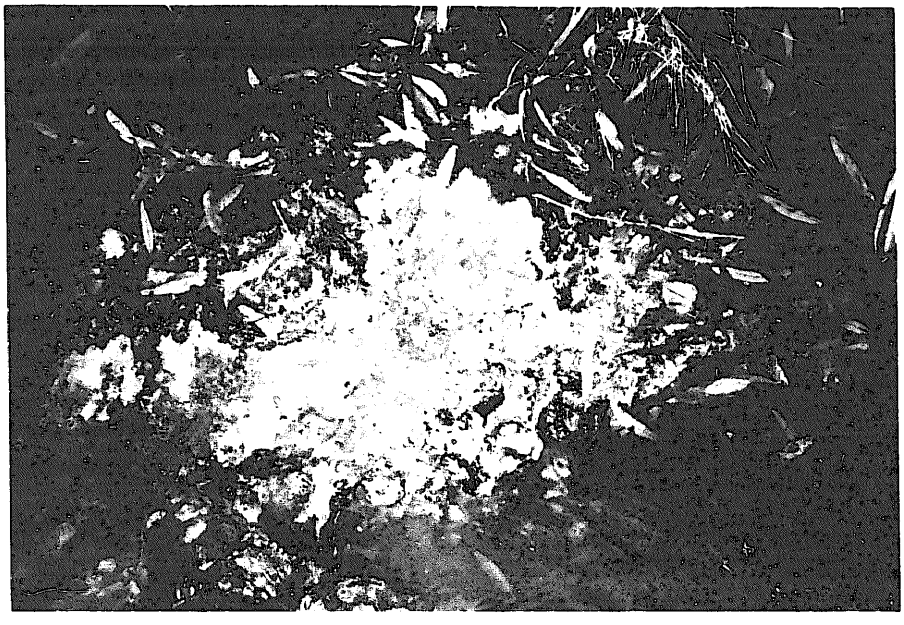


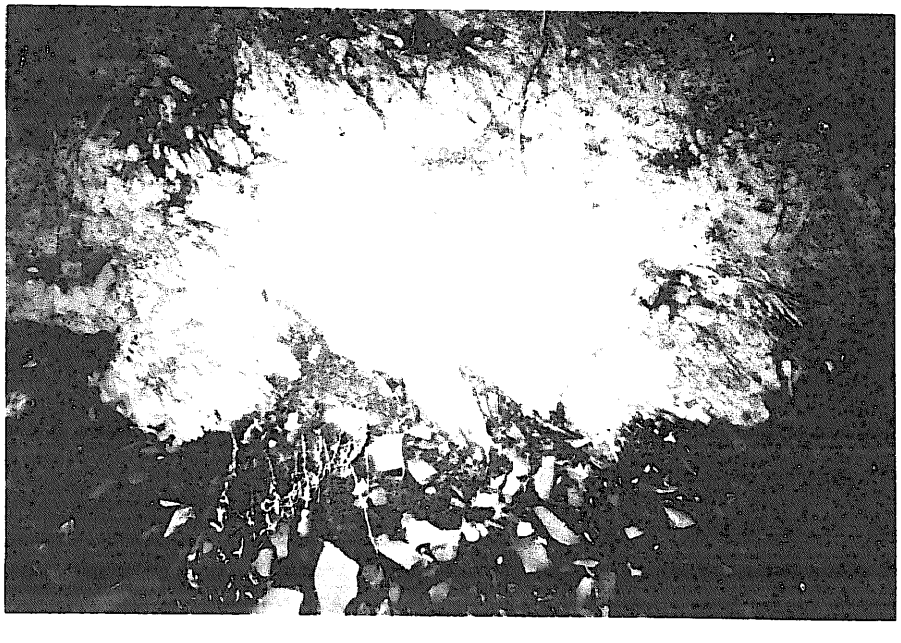
写真７の近傍の声問層主部相。層相は泥質で、明らかに上部相と異なる。

写真 8



ペンケオートヌオマップ川沿いの声問層（主部相）の露頭。固結した粘土で、固結度は軟岩程度。大曲断層付近に当るため、破砕している。青色に変質は油兆。この地点では硫化水素臭がする。

写真 9



稚内層の露頭。硬質チャートであり、角礫状に割れることが特徴。

写真１０

2．3　水理定数

(1)　要旨

深層ボーリング（D－1）調査時の揚水試験記録[8]を再解析を試みた。深層ボーリング調査結果[8]と併せて地層別に評価すると、透水係数は下位の地層ほど小さい傾向が認められた。最上位の更別層上部および同下部の透水係数は 1.0×10^{-4}cm/sec前後の値であった。その下位の勇知層の透水係数は更別層よりも1桁小さく、概ね 1.0×10^{-5}cm/sec前後の値である。試験区間最下部の声問層上部相では透水係数は 5.0×10^{-7}cm/sec前後の値であり、更別層よりも約2桁小さい。また、物理試験結果[7]を整理して得られた地層の平均有効空隙率は 38.8％であった。

(2)　深層ボーリング調査時の揚水試験解析方法

深層ボーリング調査時の揚水試験[8]では、湧水圧試験解析法と呼ばれる下記の式[11]が用いられている。

$$Kh = \frac{2.3\ d^2\times\log(2mL/D)}{8\times L\times(t_2-t_1)}\times\log\frac{h_1}{h_2} \qquad \frac{mL}{D} > 4 \qquad \text{(2-1)式}$$

式で、Kh：透水係数

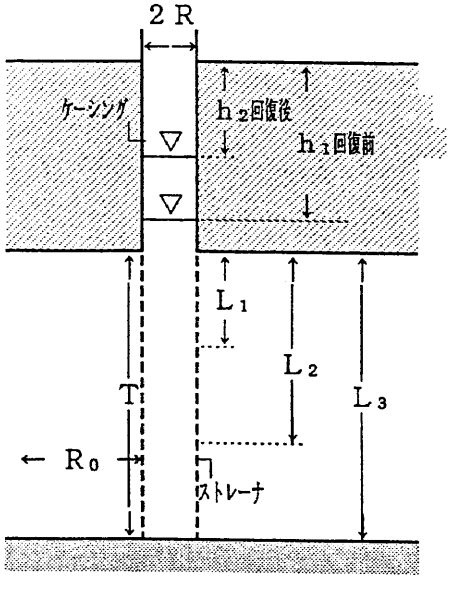
L　：透水層の厚さ　　h_1：時間 t_1における水位

D　：掘進直径　　h_2：時間 t_2における水位

d　：水位測定パイプの直径

m　：透水係数の縦横比（＝1）

(3)　揚水試験再解析



(1) $L_1/T\leqq0.20$ のとき（1.5m以上の深度で適用）

$$k = \frac{\pi R}{Cs\ (t_2-t_1)}\ \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \qquad \text{(2-2)式}$$

・Csは表2－4中の図より求める

(2) $0.2<L_2/T<0.85$ のとき

$$k = \frac{R^2\ \ln(L_2/R)}{2L_2\ (t_2-t_1)}\ \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \qquad \text{(2-3)式}$$

(3) $L_3/T<1.00$ のとき

$$k = \frac{R^2\ \ln(R_0/R)}{2L_3\ (t_2-t_1)}\ \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \qquad \text{(2-4)式}$$

・一般に、$R_0/R=200$と仮定

R_0：水頭が変化しない地点までの距離

T ：帯水層の層厚，$L_{1\sim3}$：ストレーナの相対位置

孔内の水位回復状況より透水係数を推定する方法には、湧水圧試験解析法以外に帯水層および井戸ストレーナの条件より種々の方法が提案されている（表２－４[10]）。このうち、深層ボーリングの条件に合致すると思われる手法として、被圧帯水層内にストレーナを設けた前頁の条件式を用いて、揚水試験記録の再解析を行なった。この解析法は、単孔式現位置透水試験法あるいは現場透水試験法と呼ばれる方法である。

図２－３～７には各揚水試験の解析図（時間と水位変化量の関係図）を示した。

図より、log（水位差）と時間との間には直線関係が認められるが、試験の前半では勾配は大きく（単位時間当たりの水位低下が大きい）、後半では勾配は緩やか（単位時間当たりの水位低下が小さい）となる。各々の勾配を読み取り、前頁の条件式を用いて得た透水係数を表２－５に示す。表中で、log（水位差）と時間の勾配の大きな方を上段に、小さな方を下段に示した。表中の解析法１～３はストレーナの貫入率の違いを意味し、(2-2)～(2-4)式に相当する条件である。

貫入率は、地層全体を帯水層とみなす場合と泥質部を不透水層とみなすかによって異なる。深層ボーリングにおけるストレーナ深度の決定方法に関わる情報は本業務では得られなかったが、目的（水位観測と揚水試験）から、層相観察や電気検層結果より、透水性が高いと思われる区間を選定してストレーナを設けていると想定した。したがって、貫入率が最も大きな解析法３を、再解析方法として採用する。さらに、試験の前半と後半で勾配は異なるが、水位低下速度が安定した、すなわち、log（水位差）と時間直線の継続時間の長い、試験後半の勾配から得た透水係数を、再解析結果とした。なお、声問層の揚水試験では、log（水位差）と時間直線の勾配は徐々に変化しており、試験後半部の勾配も安定しているとは言えない。そのため、log（水位差）と時間の間に、明瞭な直線性が認められる試験前半の勾配から得た透水係数を、声問層の再解析結果とした。

本再解析結果と、揚水試験結果、そして微流速測定結果（既往調査）による透水係数を整理して、表２－６，７に示す。また、図２－８には３種類の解析結果と平均値をもとに、各地層の透水係数の範囲を表した。

透水係数は下位の地層ほど小さい傾向が認められる（図２－８）。

更別層上部（深度 143～155m）は同下部（深度 209～300m）よりもやや透水係数は

劣るが、ともに 1.0×10^{-4}cm/sec前後の値である。その下位の勇知層（深度 800～810 m）の透水係数は更別層よりも１桁小さく、概ね 1.0×10^{-5}cm/sec前後の値である。試験区間最下部の声問層上部相（深度 1,000～1,355m）では透水係数は 5.0×10^{-7}cm/sec前後のオーダーであり、更別層よりも約２桁小さい。一般に、透水係数が２桁以上小さい地層中の地下水流動は相対的に極めて小さく、難透水層に扱うことも可能である。透水係数の値から見て、本試験地点における主要な透水層は、更別層と評価できる。

(4)　透水係数の測定方法

透水係数の測定方法は、一般には次のように大別できる（地下水ハンドブック[10]をもとに整理：詳細は参考文献を参照されたい）。

① 揚水試験※（揚水による水位低下から透水係数を解析）

② 現場透水試験（１本のボーリング孔内の水位変化より透水係数を解析）

③ 湧水圧試験（孔内の地下水位上昇速度より透水係数を解析）

④ 孔内微流速試験（静水時と動水時の流速の差より透水係数を解析）

⑤ トレーサー試験（トレーサーで測定した２点間の流速より透水係数を解析）

⑥ 試験池を用いる方法（池からの浸透速度より透水係数を解析）

動燃による深層ボーリング調査[8]では、②と④の方法を用いて透水係数が得られている。

ところで、表２－５～７および図２－８からも明らかなように、同じ地層であっても試験方法および解析方法（孔内流速測定法、湧水圧試験法と現場透水試験法）で値は異なる。孔内流速測定解析と湧水圧試験法では、透水係数は概ね同等のオーダーの値である。しかし、現場透水試験法と他の方法では、最大で１桁程度の値の差がでる結果となった。とくに、更別層では、本再解析（単孔式原位置透水試験法）による値は10^{-5}cm/secオーダーであり、他の方法の値、10^{-4}cm/secオーダーよりも１桁小さい。一方で、勇知層では、本再解析（現場透水試験法）による値は10^{-5}cm/secオーダーであり、他の方法の10^{-6}cm/secオーダーよりも１桁大きい。この差違は、解析式や試験方法の違いと言える。

どのような試験方法あるいは解析方法を適用するかは、透水層の厚さ、深度別の水位、水理条件（被圧か不圧）、ボーリング孔の構造（ストレーナ位置や井戸孔径等）、水位

変化をさせる方法（ポンプ、エアリフト等）などから、決定する必要がある。しかし、これらの条件を全て明らかにすることは、本調査対象のように深層の固結岩盤では難しい。したがって、適用条件を吟味することは当然としても、１つの方法のみで値を決定せずに、複数の方法から透水係数の幅を推定しておくことも重要である。

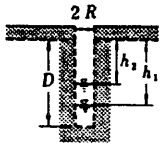
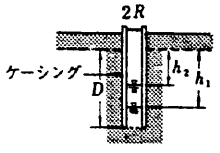
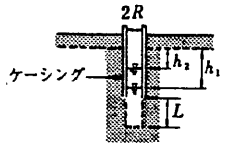
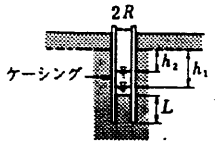
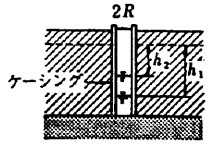
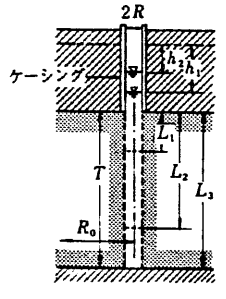
※ 深層ボーリング調査[8]で「揚水試験」としている手法は、エアーリフト等による水位低下後の水位回復状況から透水係数を解析するものであり、前頁の区分では②もしくは③に当たる。整合性を図るために、本報告書でも既往調査による「揚水試験」という表現を用いるが、「現場透水試験」あるいは、採用している解析法から「湧水圧試験」とした方が、正確と思われる。

(5)　有効間隙率

深層ボーリング調査時の物理試験[7]で得られている有効間隙率を、表２－８(1)および図２－９に整理した。なお、物理試験の詳細については、既往資料（動燃[7]）を参照されたい。

総試料数 53より得られた有効間隙率は、上位の更別層で大きく（平均値:46.7％）、下位の地層ほど小さくなる傾向が認められ、声問層上部相の平均値は 35.1％である。ちなみに、砂岩の間隙率は 15％程度、有効間隙率とほぼ同じ値である比浸出量は８％程度と言われている（表２－８(2)[12]）。深層ボーリング調査時の物理試験は、表２－８(2)に示した値よりも、かなり大きい。

表2－4　種々の条件における透水係数の算定式

条件		略図	形状係数	透水係数の算定式	摘要
半無限と見なされる等方性飽和透水層内の試験	(a) ケーシングのない試験孔		$F=16\pi DSR$	$k=\frac{R}{16DS}\times\frac{(h_2-h_1)}{(t_2-t_1)}$ ここで，$\frac{D}{R}<50$	透水係数を求めるにはもっとも簡単な方法 層状の地盤には適用できない。Sは図　　から求める。
	(b) ケーシングのある試験孔 孔底はケーシングの先端と同じ高さ		$F=\frac{11R}{2}$	$k=\frac{2\pi R}{11(t_2-t_1)}\ln(\frac{h_1}{h_2})$ ここで，6 in≦D≦60in 15cm≦D≦150cm	地下水面下の浅い位置での測定に用いる。水位降下を観測する方法は孔底にシルトが沈積するため結果は不良。
	(c) ケーシングのある試験孔 先端に長さLの孔を掘るか穴あきパイプを接続する		$F=\frac{2\pi L}{\ln(L/R)}$	$k=\frac{R^2}{2L(t_2-t_1)}\ln(\frac{L}{R})\ln(\frac{h_1}{h_2})$ ここで，$\frac{L}{R}>8$	地下水面下の深い位置での試験に用いる。
	(d) ケーシングのある試験孔 先端部Lに土がある		$F=\frac{11\pi R^2}{2\pi R+11L}$	$k=\frac{2\pi R+11L}{11(t_2-t_1)}\ln\frac{h_1}{h_2}$	不等方性の地盤の縦方向の透水係数の測定に用いる。
不透水性	(e) ケーシングのある試験孔 ケーシングの先端は週水層の上端		$F=4R$	$k=\frac{\pi R}{4(t_2-t_1)}\ln(\frac{h_1}{h_2})$	不透水性の表層の比較的薄いとき用いる。 水位降下を観測する方法は孔底にシルトが沈積するため結果は不良
表層の下の透水層内の試験	(f) ケーシングのある試験孔 先端に長さLの孔を掘るか穴あきパイプを接続する。 (1) $\frac{L_1}{T}\leq 0.20$ (2) $0.2<\frac{L_2}{T}<0.85$ (3) $\frac{L_3}{T}=1.00$ 注）R_0は水頭が変化しない地点までの距離		(1) $F=C_sR$	$k=\frac{\pi R}{C_s(t_2-t_1)}\ln(\frac{h_1}{h_2})$	1.5m以上の深さの試験に用いる。 C_sは図　　から求める。
			(2) $F=\frac{2\pi L_2}{\ln(L_2/R)}$	$k=\frac{R^2\ln(L_2/R)}{2L_2(t_2-t_1)}\ln(\frac{h_1}{h_2})$ ここで，$\frac{L_2}{R}>8$	深い位置の細粒土の測定に用いる。先端に多孔質のポイントを用いる。
			(3) $F=\frac{2\pi L_3}{\ln(R_0/R)}$	$k=\frac{R^2\ln(R_0/R)}{2L_3(t_2-t_1)}\ln(\frac{h_1}{h_2})$	観測孔などによる実測によってR_0が求められる場合以外は$\frac{R_0}{R}=200$と仮定する。

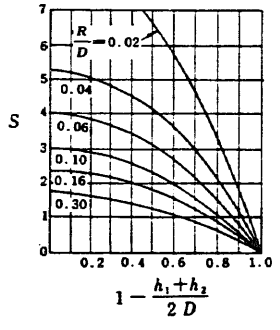


図　　係数Sを求める図

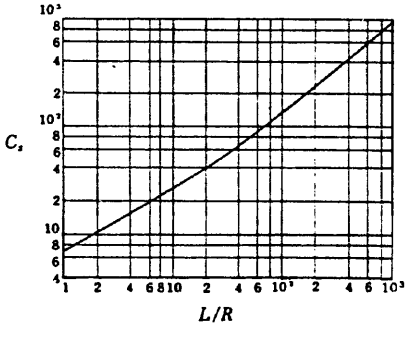
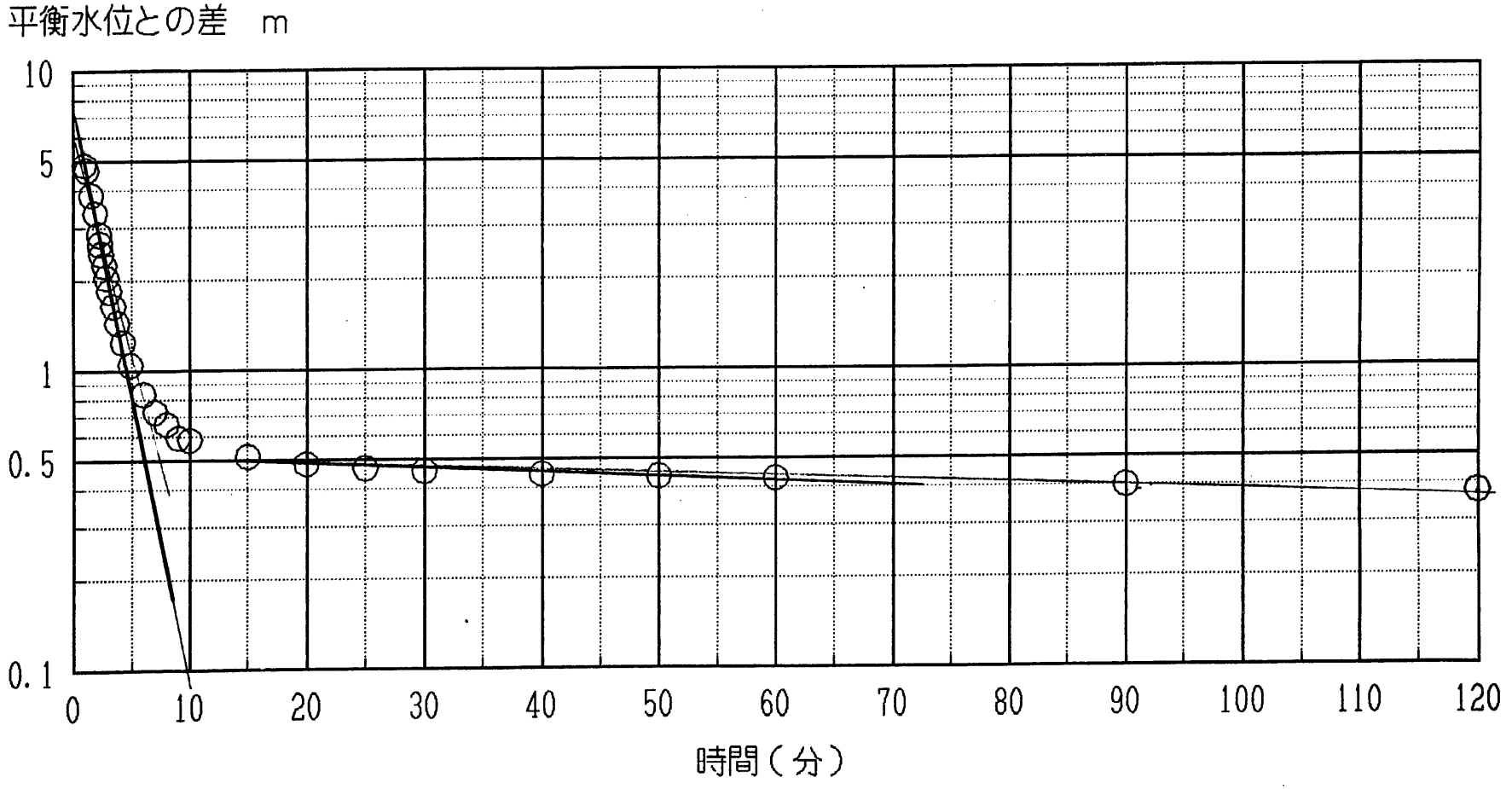


図　　(f)の(1)の係数C_sを求める図

地下水ハンドブック編集委員会編（1979）[10]
：地下水ハンドブック，建設産業調査会、p290

図２－３　揚水試験結果

（GL－１４３～１５５m：更別層）

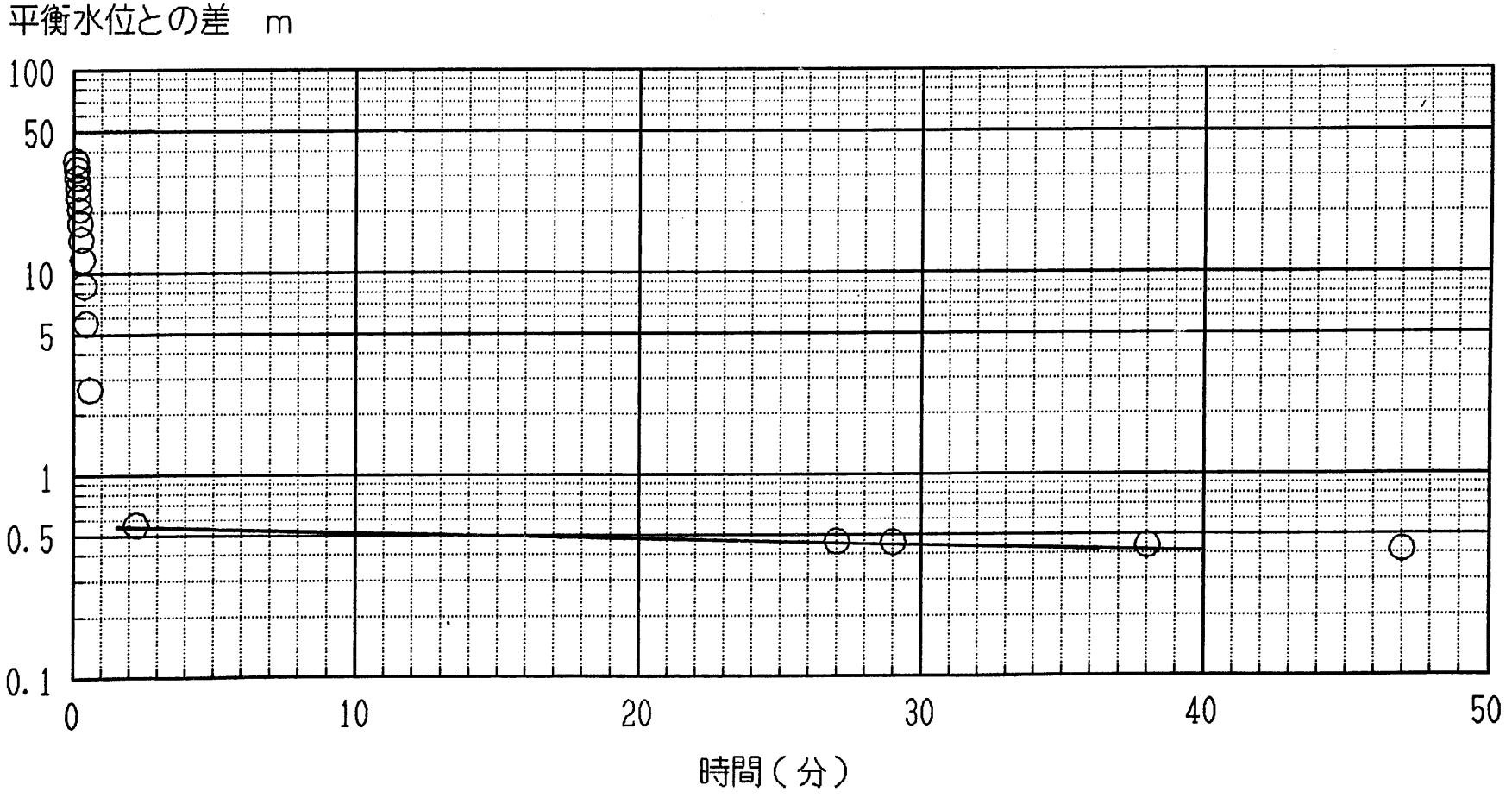


５０mエアーリフト後の回復水位

深層ボーリング調査資料（動燃）[8]中の揚水試験記録を再解析

図２－４　揚水試験結果

（GL－290～300m：更別層）

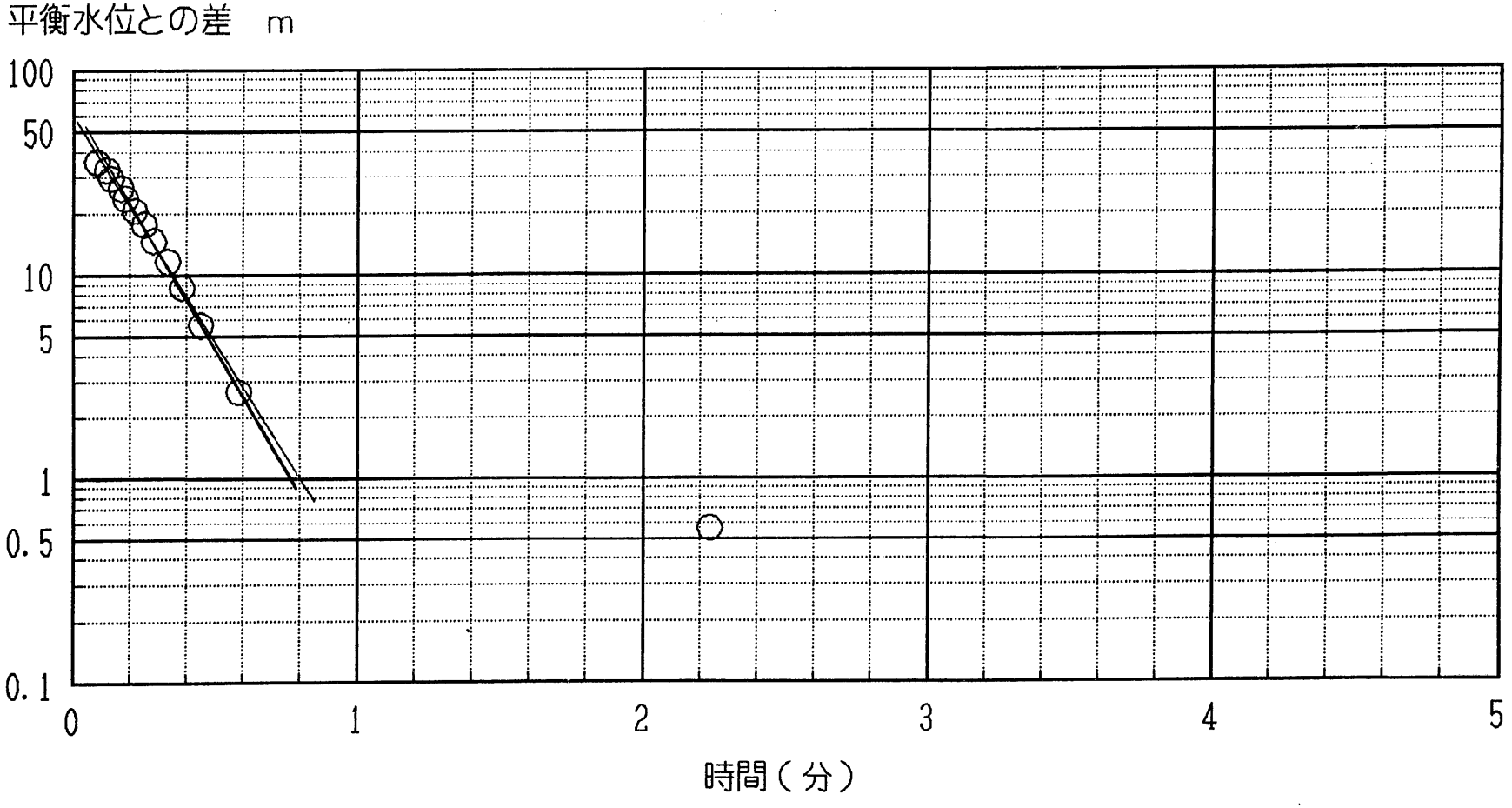


DSTによる回復水位

深層ボーリング調査資料（動燃）[8]中の揚水試験記録を再解析

図 2−5　揚水試験結果

（GL−290〜300m：更別層）

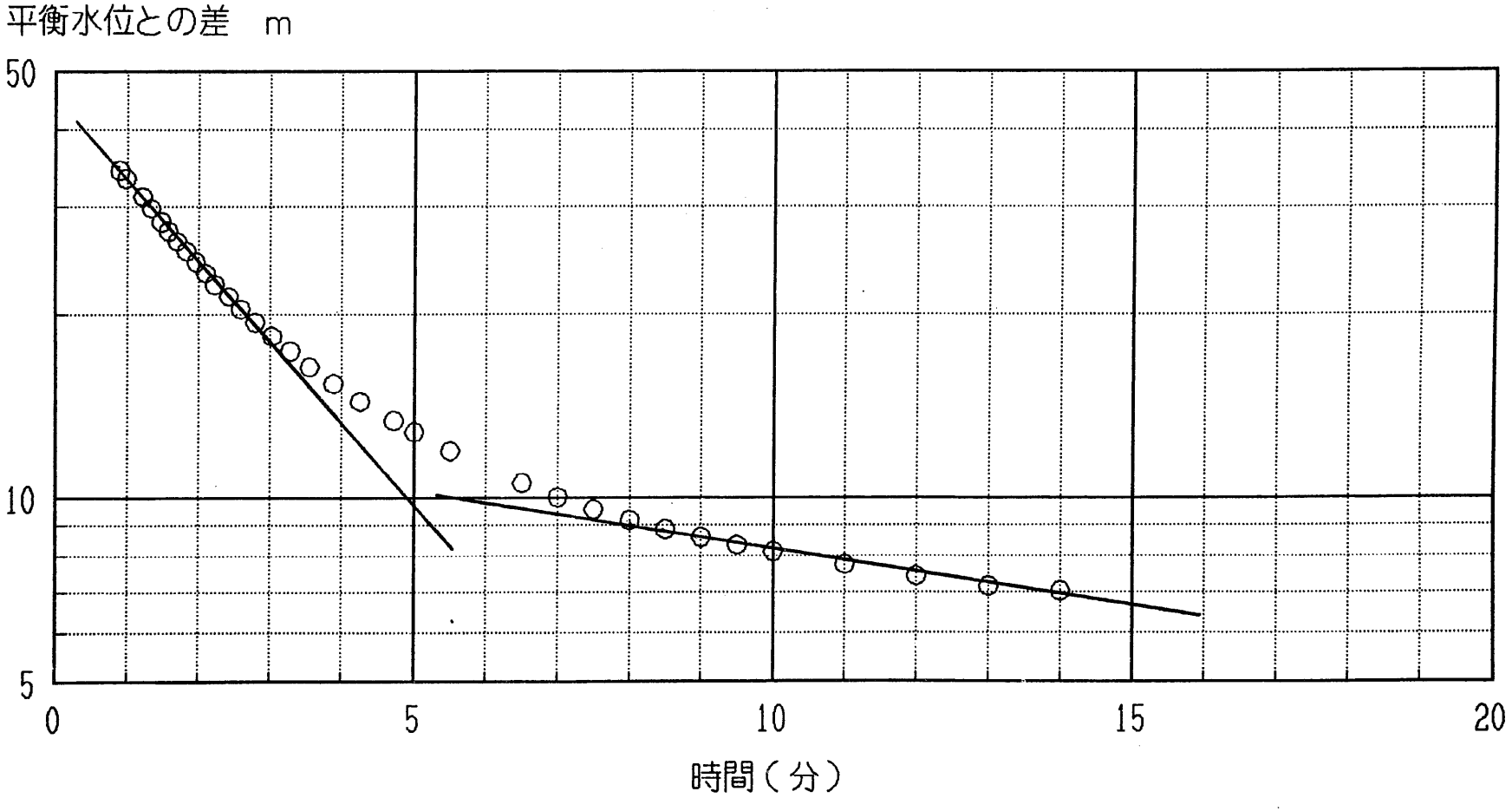


DSTによる回復水位

深層ボーリング調査資料（動燃）[8]中の揚水試験記録を再解析

図２－６　揚水試験結果

（GL－800～810m：勇知層）

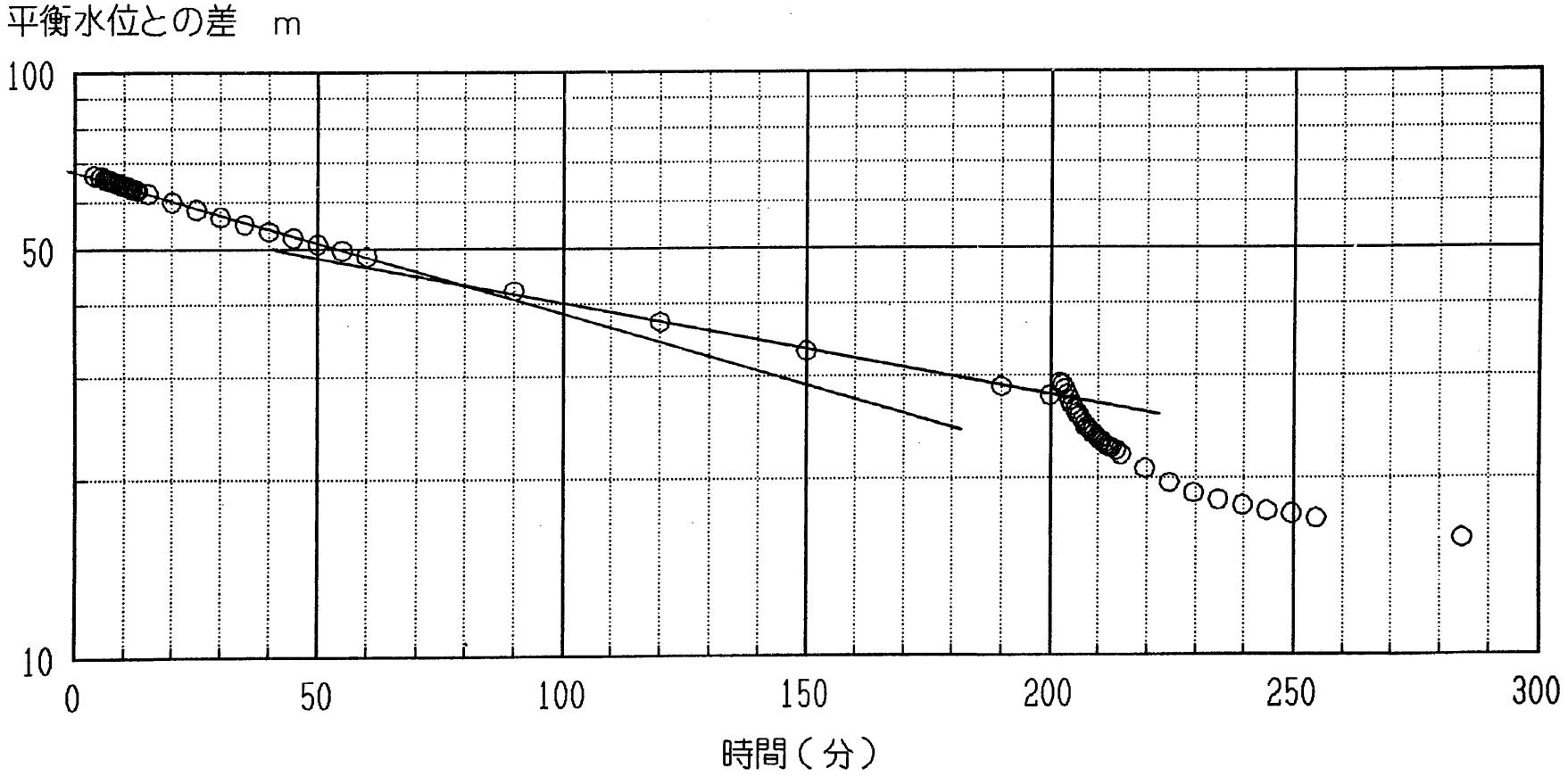


エアリフト揚水後の回復水位

深層ボーリング調査資料（動燃）[8]中の揚水試験記録を再解析

図２－７　揚水試験結果

（GL－１０００～１３５５m：声問層）



エアリフト揚水後の回復水位

２００分までは水位計、以降は圧力計による計測

深層ボーリング調査資料（動燃）[8]中の揚水試験記録を再解析

表 2－5　揚水試験再解析結果

対象地層	対象深度 GL-m		ｽﾄﾚｰﾅ長 m L	井戸半径 mm R	地層厚 m T	L／T	L／R	Cs	経過時間 min t1	経過時間 min t2	水位差 m h1	水位差 m h2	透水係数 解析法1 m/min k1	透水係数 解析法1 cm/sec k1	透水係数 解析法2 m/min k2	透水係数 解析法2 cm/sec k2	透水係数 解析法3 m/min k3	透水係数 解析法3 cm/sec k3
更別層	143	155	12	107.95	349.2	0.03	111.2	150	0.83	6.11	5	0.5	9.86E-04	1.64E-03	9.98E-04	1.66E-03	9.98E-04	1.66E-03
									15	70	0.5	0.4	9.17E-06	1.53E-05	9.28E-06	1.55E-05	9.28E-06	1.55E-05
更別層	290	300	10	79.35	349.2	0.03	126.0	160	0.034	0.48	50	5	8.04E-03	1.34E-02	7.86E-03	1.31E-02	7.86E-03	1.31E-02
									14	40	0.5	0.4	1.34E-05	2.23E-05	1.31E-05	2.18E-05	1.31E-05	2.18E-05
勇知層	800	810	10	62.5	537.4	0.02	160.0	200	0.3	5	40	10	2.90E-04	4.83E-04	2.92E-04	4.87E-04	2.92E-04	4.87E-04
									5.55	14	10	7	4.14E-05	6.91E-05	4.18E-05	6.97E-05	4.18E-05	6.97E-05
声問層	1000	1355	355	50.5	468.4	0.76	7029.7	1000	20	93	60	40	8.81E-07	1.47E-06	1.77E-07	2.95E-07	1.77E-07	2.95E-07
									92	143	40	30	8.95E-07	1.49E-06	1.79E-07	2.99E-07	1.79E-07	2.99E-07

解析法１：不完全貫入（貫入率20％以下）、被圧帯水層
解析法２：不完全貫入（貫入率20～85％）、被圧帯水層
解析法３：帯水層上端にストレーナが無い場合の不完全貫入

※　深層ボーリング調査資料（動燃）[8]中の揚水試験記録を再解析

表2－6　透水係数総括表

単位：cm／sec

	更別層上部	更別層下部	勇知層	声問層
解析値A	1.53E-04	1.38E-04	7.77E-06	1.58E-07
解析値B	1.55E-05	2.18E-05	6.97E-05	2.95E-07
解析値C	2.00E-04	2.70E-04	2.80E-06	6.50E-07
平均	7.80E-05	9.33E-05	1.15E-05	3.12E-07
最大値	2.00E-04	2.70E-04	6.97E-05	6.50E-07
最小値	1.55E-05	2.18E-05	2.80E-06	1.58E-07

	更別層
解析値A	1.45E-04
解析値B	1.84E-05
解析値C	2.32E-04
平均	8.53E-05
最大値	2.32E-04
最小値	1.84E-05

解析値A：深層ボーリング調査（動燃）による揚水試験解析結果[8)]

解析値B：本研究で再解析した値。試験記録は深層ボーリング調査（動燃）[8)]による

解析値C：深層ボーリング調査（動燃）による孔内微流速測定結果[8)]

平　　均：全結果の相乗平均

更別層：更別層上部と下部の相乗平均

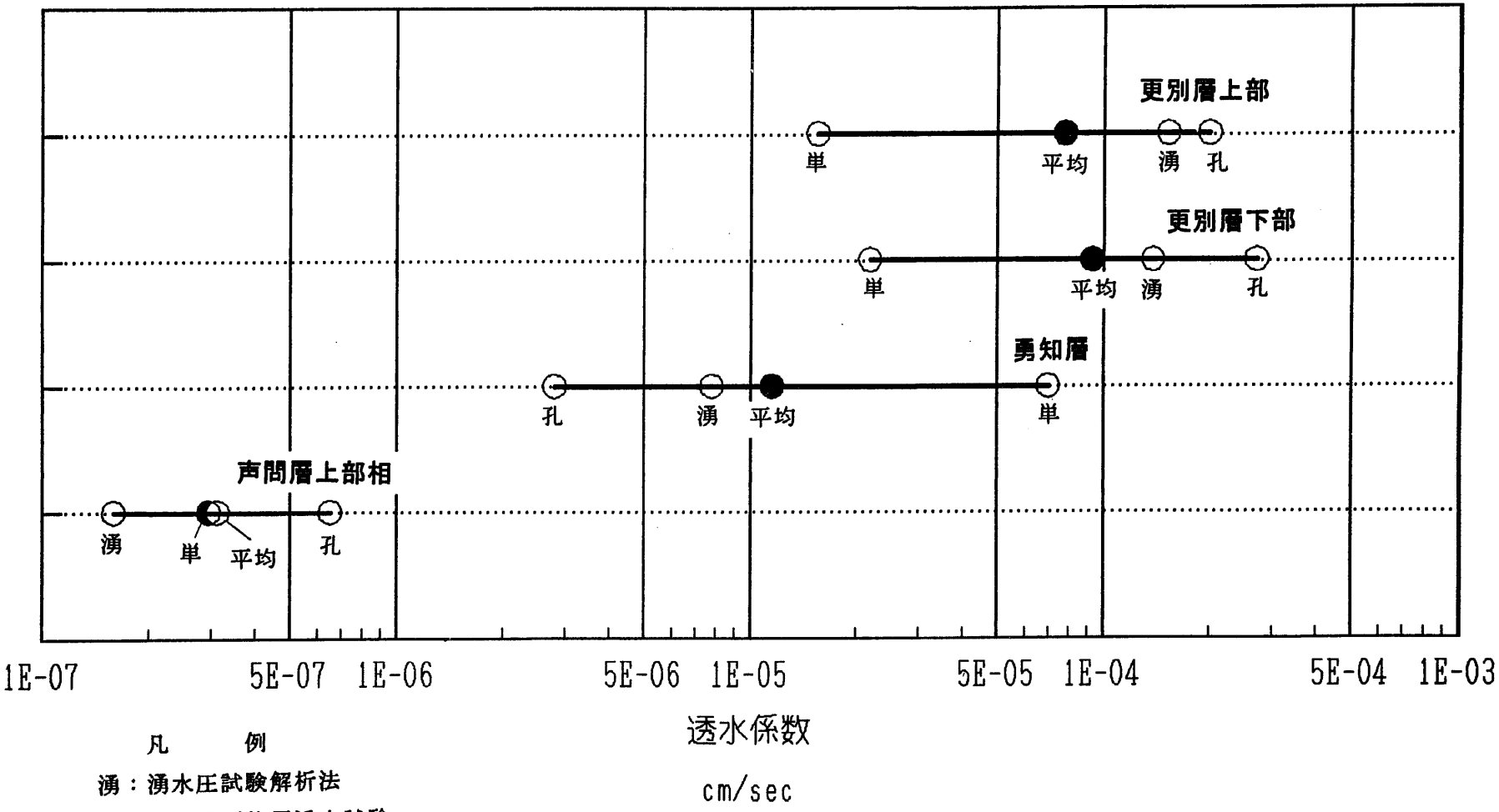
表２－７　透水係数総括表

対象地層	ストレーナ区間　m	試験方法	解析方法	透水係数 cm/sec	備考
更別層上部	143～ 155	揚水試験（エアリフトによる回復試験）	湧水圧試験解析法	1.53×10^{-4}	深層ボーリング調査
	〃	〃	単孔式原位置透水試験（ピエゾメーター法）	1.55×10^{-5}	揚水試験記録の再解析
	〃	孔内流速測定	孔内流速測定の解析（定常状態）	2.0×10^{-4}	深層ボーリング調査
更別層下部	209～ 300	揚水試験（エアリフトによる回復試験）	湧水圧試験解析法	1.38×10^{-4}	深層ボーリング調査
	〃	〃	単孔式原位置透水試験（ピエゾメーター法）	2.18×10^{-5}	揚水試験記録の再解析
	〃	孔内流速測定	孔内流速測定の解析（定常状態）	2.7×10^{-4}	深層ボーリング調査
勇知層	800～ 810	揚水試験（エアリフトによる回復試験）	湧水圧試験解析法	5.69×10^{-6} ～1.06×10^{-5}	深層ボーリング調査
	〃	〃	単孔式原位置透水試験（ピエゾメーター法）	6.97×10^{-5}	揚水試験記録の再解析
	〃	孔内流速測定	孔内流速測定の解析（定常状態）	2.8×10^{-6}	深層ボーリング調査
声問層	1000～1355	揚水試験（エアリフトによる回復試験）	湧水圧試験解析法	1.16×10^{-7} ～2.16×10^{-7}	深層ボーリング調査
	〃	〃	単孔式原位置透水試験（ピエゾメーター法）	2.95×10^{-7}	揚水試験記録の再解析
	〃	孔内流速測定	孔内流速測定の解析（定常状態）	6.5×10^{-7}以下	深層ボーリング調査

湧水圧試験解析法、孔内流速測定解析の結果は、動力炉・核燃料事業団（　－　）：（深層ボーリング調査資料）[8]による

単孔式原位置透水試験解析は、湧水圧試験記録[8]を再解析したものである。

図 2－8　地層別の透水係数



凡　　例

湧：湧水圧試験解析法

単：単孔式原位置透水試験

孔：孔内流速測定の解析

平均：全結果の相乗平均

（試験方法、解析方法により値は異なる）

表2－8(1) 地層別有効間隙率

[%]

		試料数	最大値	最小値	平均
更別層	中粒砂岩	5	46.9	33.8	40.3
	細粒砂岩	-	-	-	-
	砂質泥岩	-	-	-	-
	泥岩	7	56.5	47.2	51.2
	合計	**12**	**56.5**	**33.8**	**46.7**
勇知層	中粒砂岩	4	42.5	38	40.1
	細粒砂岩	18	43.7	34.4	37.3
	砂質泥岩	-	-	-	-
	泥岩	-	-	-	-
	合計	**22**	**43.7**	**34.4**	**37.8**
声問層上部相	中粒砂岩	-	-	-	-
	細粒砂岩	4	38.7	35.5	36.7
	砂質泥岩	12	37.3	30.7	34.5
	泥岩	3	39.4	30	35.5
	合計	**19**	**39.4**	**30**	**35.1**
全体	中粒砂岩	9	46.9	33.8	40.2
	細粒砂岩	22	43.7	34.4	37.2
	砂質泥岩	12	37.3	30.7	34.5
	泥岩	10	56.5	30	46.5
	合計	**53**	**56.5**	**30**	**38.8**

深層ボーリング調査資料（動燃）[7]による

表2－8(2) 一般的な地層の性状

物　　質	n	S_y	透水係数 m/秒(m/日)
粘　　土	45	3	5×10^{-7} (0.04)
砂	35	25	4×10^{-4} (34.5)
礫	25	22	2.5×10^{-3} (216)
砂　　礫	20	16	1.0×10^{-3} (86)
砂　　岩	15	8	3.5×10^{-4} (30)
石灰岩・頁岩	10	2	5×10^{-7} (0.04)
チャート・花こう岩	5	0.5	5×10^{-8} (0.004)

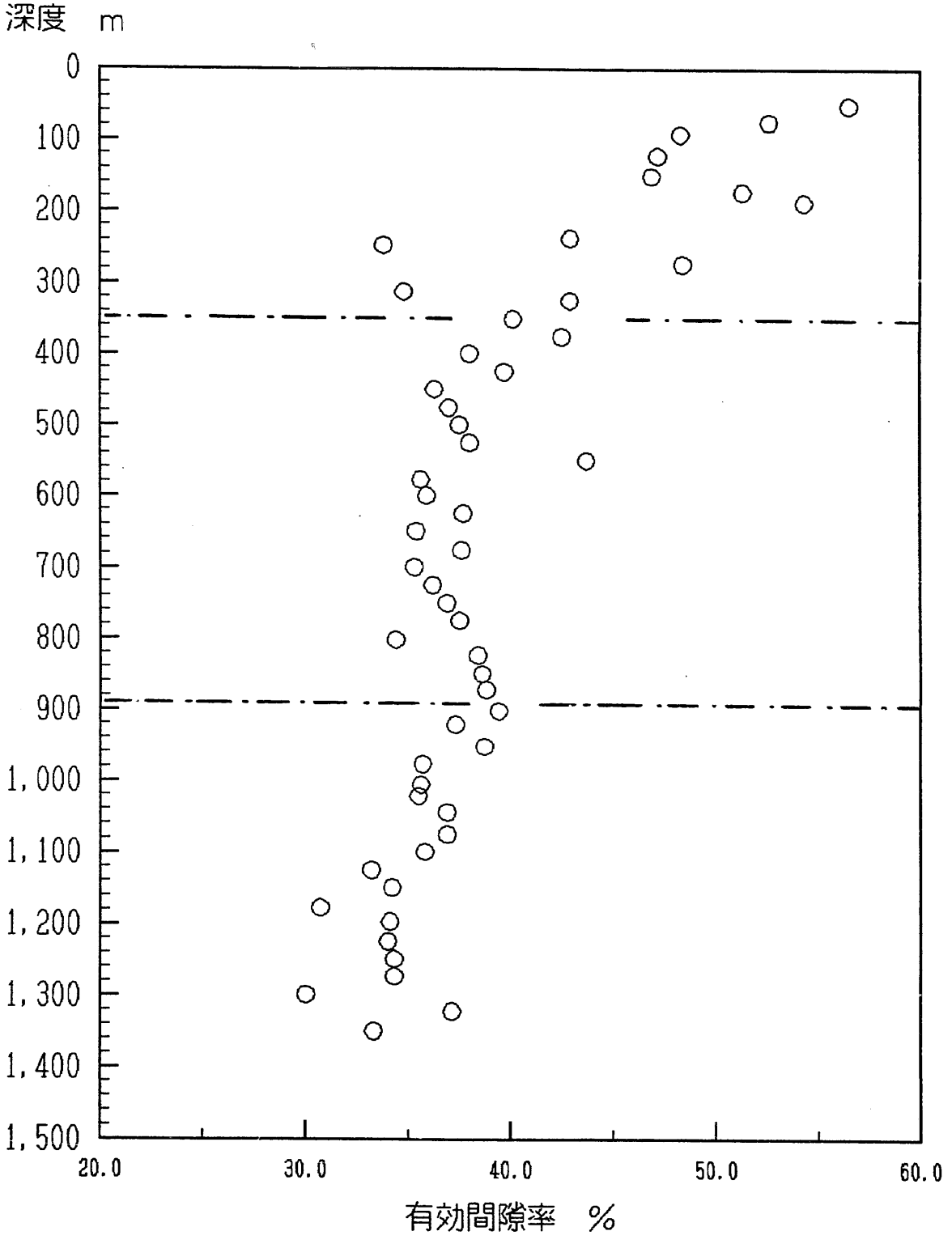
n ：間隙率（%）

S_y：比浸出量（%）

水収支研究グループ（1993）[12]：地下水資源・環境論，共立出版㈱、p77

原典は、Linsley, R.K.・M.A.Kohler・J.L.H.Pauthus (1958) ：Hydrology for Enginerrs, McGraw Hill

図２－９　深度別有効間隙率分布
（深層ボーリング物理試験結果より）



2．4　地下水位分布

(1)　要旨

地形の接谷面図、ボーリング孔内の観測水位より、調査地域の地下水位分布を推定した。その結果より、地下水流動の最上流部は、大曲断層よりもさらに後背部（東側）のＮ２断層付近の地形の尾根に位置すると考えられる。

(2)　接谷面の考え方

地下水面に関わる資料としては、ボーリングに伴う孔内水位（表２－２）が得られているのみで、広域的な水位に関する情報は得られなかった。

経験的には、地下水位は地形に沿って分布し、しかも谷などの低い地形の部分に現われるものが多いことが分かっている（下図）。そこで、調査範囲を500m四方のグリッドに分割し、グリッド内の最も低い地形標高を読み取って、地下水面分布を推定した。

グリッド単位の最低標高をもとに作成する高度分布図を接谷面図（せっこくめんず）と言い、浸食が進んだ場合の地形の推定などにも用いられている。ちなみに、グリッド単位の最高標高をもとに作成する高度分布図は接峰面図（せっぽうめんず）と言い、浸食前の地形を推定する手法として用いられている。

なお、地下水面の分布には、地形だけでなく地層の厚さや層向、透水性などが関わっている。本手法は、データが少ない場合の、いわば簡便法である。正確な地下水面分布を知るには、ボーリング等による地下水位データに基づく必要があることを強調しておく。

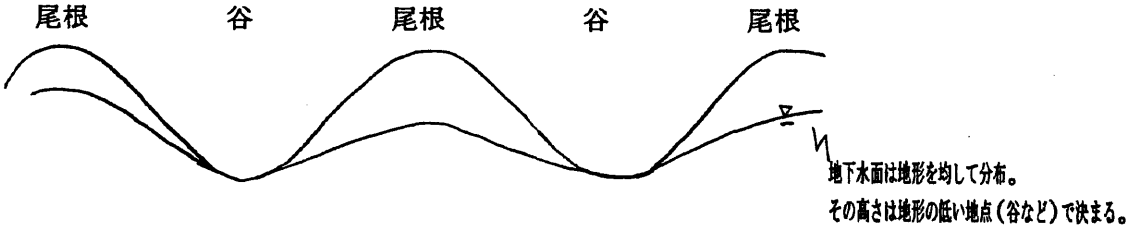


図　接谷面図の考え方

(3)　流域間隔*（接谷面の解析単位）

接谷面の解析では、調査地域を 500m単位のグリッド（格子）に区分した。このグリッドの大きさの根拠は、調査地域の開析谷（川・沢）の間隔である。

試験場に近接し、かつ、主要な尾根を通過する断面として、図２－10に示す２断面線において、開析谷（川・沢）の間隔を地形図（１／50,000）より判読した。その結果は、表２－９に示すとおりである。断面線①は勇知層の分布範囲に位置する。浸食が進行しているため、主要な河川（千曲川など）のみが開析谷として読み取れるのみであり、谷の平均間隔は1,168.8mである。一方、断面線②は稚内層の分布範囲に位置する。硬質な頁岩であるため浸食の進行度合いは小さく、開析谷の平均間隔は 507.4mである。

場所によっても谷の間隔は異なるが、ここでは、断面線②上で読み取った谷の間隔より、500mを接谷面の解析単位、すなわち、グリッドの大きさとした。

＊　ここで言う「流域間隔」とは、上記に述べたように、開析谷（川・沢）の間隔である。言葉の背景として、地下水面分布が地形に大きく影響されていることを念頭に置いている。ただし、「流域間隔」という言葉は、地下水面分布の推定に当たっての本業務における造語であり、論文や辞書において定義付けられたものではないことをお断りしておく。

(4)　接谷面から想定される地下水流動

図２－11には接谷面図を表す。

図では、既往調査（ボーリング地点：図中に示した）の実測水位で、接谷面を補正しており、ボーリング結果および地形より推定した地下水面分布図（正確には最表層の地下水位）に近いものと考える。

接谷面図に流向を加味し、地下水流動範囲を推定した（図２－12）。

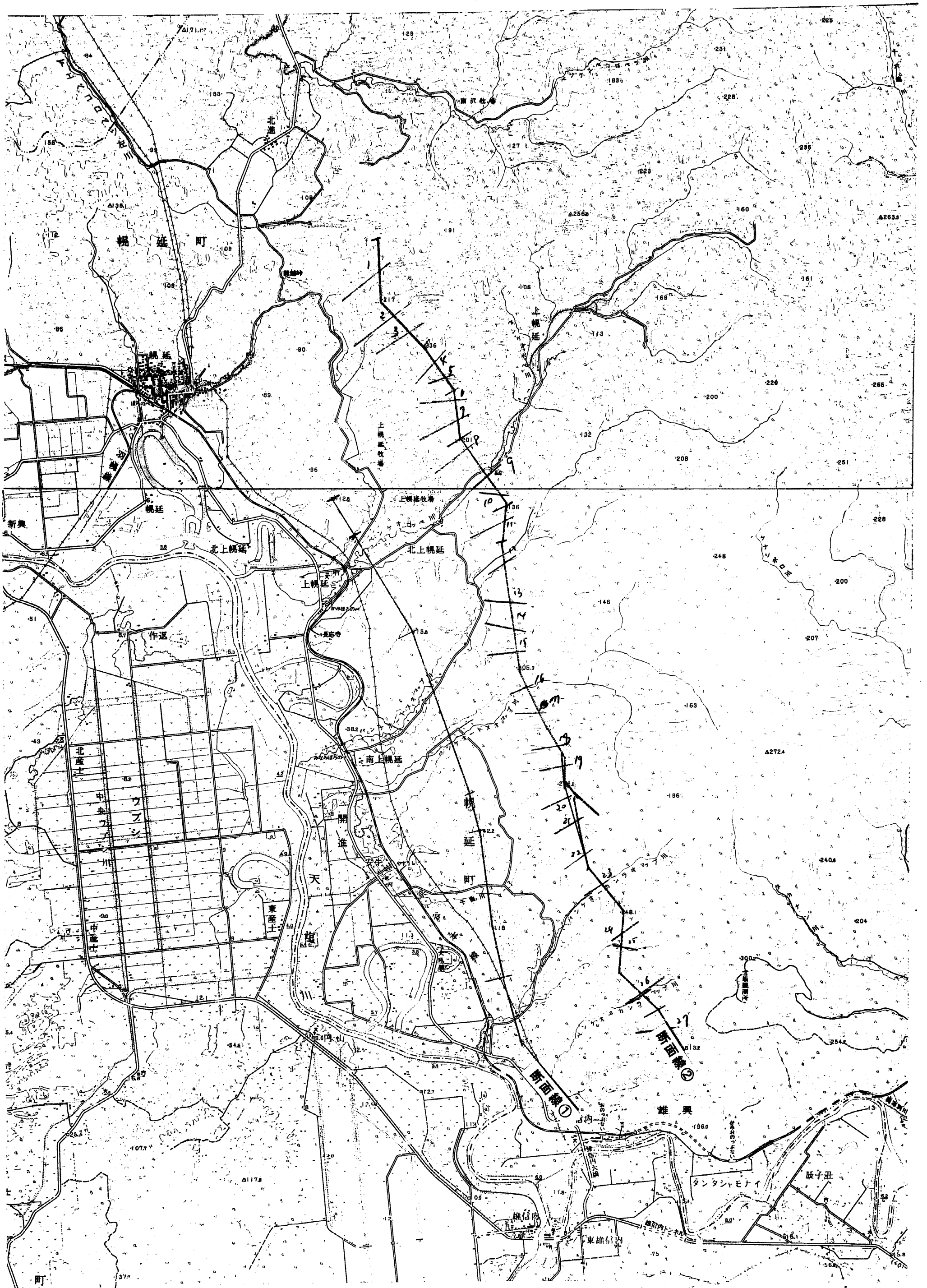


図2－10　流域間隔の解析位置

表２－９(1)　河川・沢の距離（恵北層～勇知層）

番号	名称	読み取り	累積値	距離	区間距離
		cm	cm	m	m
P112.8	（標高112.8m）	0			
1	上幌延牧場流域	1.3	1.3	650	
2	ペンケオコッペ川	1.9	1.9	950	300
3		2.4	2.4	1,200	250
P115.8	（標高115.8m）	4.7	4.7		
4	パンケオートヌオマップ川	1.7	6.4	3,200	2,000
5	ペンケオートヌオマップ川	3.6	8.3	4,150	950
P100	（標高約100m）	5.3	10		
P142.2	（標高142.2m）	1.2	11.2		
6	千曲川	2	13.2	6,600	2,450
P118	（標高118m）	3	14.2		
P100	（標高約100m）	1.5	15.7		
7	パンケオーカンラオマップ川	1.3	17	8,500	1,900
P61.7	（標高61.7m）	2.1	17.8		
8	ペンケオーカンラオマップ川	1.4	19.2	9,600	1,100
9		2.2	20	10,000	400
				平均	1,168.8
				標準偏差	799.2
				分散	638,711
				最大	2,450
				最小	250

注）番号にｐの付かない数字の欄が開析谷（川・沢）を示す。
区間距離はこの開析谷の間隔を図２－10から測定した値。

表２－９(2)　河川・沢の距離（声問層～稚内層）

番号	名称	読み取り	累積値	距離	区間距離
		cm	cm	m	m
P220	（標高約220m）	0			
1		1	1	500	500
P217	（標高217m）	1.9	1.9		
2		0.6	2.5	1,250	750
3		1.3	3.2	1,600	350
P236	（標高236m）	2	3.9		
4		0.6	4.5	2,250	650
5		1.2	5.1	2,550	300
P200	（標高200m）	1.7	5.6		
6		0.3	5.9	2,950	400
7		0.9	6.5	3,250	300
P201	（標高201m）	1.5	7.1		
8		0.4	7.5	3,750	500
9	ペンケオコッペ川	1.45	8.55	4,275	525
10		2.1	9.2	4,600	325
P136	（標高136m）	2.5	9.6		
11		0.5	10.1	5,050	450
P120	（標高120m）	1.1	10.7		
12	パンケオートヌオマップ川	0.7	11.4	5,700	650
13		1.9	12.6	6,300	600
14		2.7	13.4	6,700	400
15		3.4	14.1	7,050	350
P205.9	（標高205.9m）	3.9	14.6		
16	ペンケオートヌオマップ川	0.65	15.25	7,625	575
17		1.5	16.1	8,050	425
18		2.7	17.3	8,650	600
P200	（標高200m）	3	17.6		
19		0.4	18	9,000	350
P256.2	（標高256.2m）	1	18.6		
20		0.4	19	9,500	500
21		1.2	19.8	9,900	400
22		2.3	20.9	10,450	550
P200	（標高200m）	2.7	21.3		
23	パンケオーカンラオマップ川	0.7	22	11,000	550
P248.1	（標高248.1m）	1.7	23		
24		0.7	23.7	11,850	850
25		1.1	24.1	12,050	200
P220	（標高220m）	1.9	24.9		
26	ペンケオーカンラオマップ川	1	25.9	12,950	900
P240	（標高240m）	1.8	26.7		
27		0.7	27.4	13,700	750
P313.2	（標高313.2m）	1.4	28.1		

注）番号にｐの付かない数字の欄が開析谷（川・沢）を示す。
区間距離はこの開析谷の間隔を図２－10から測定した値。

平均	507.4
標準偏差	170.9
分散	29,204.4
最大	900.0
最小	200.0

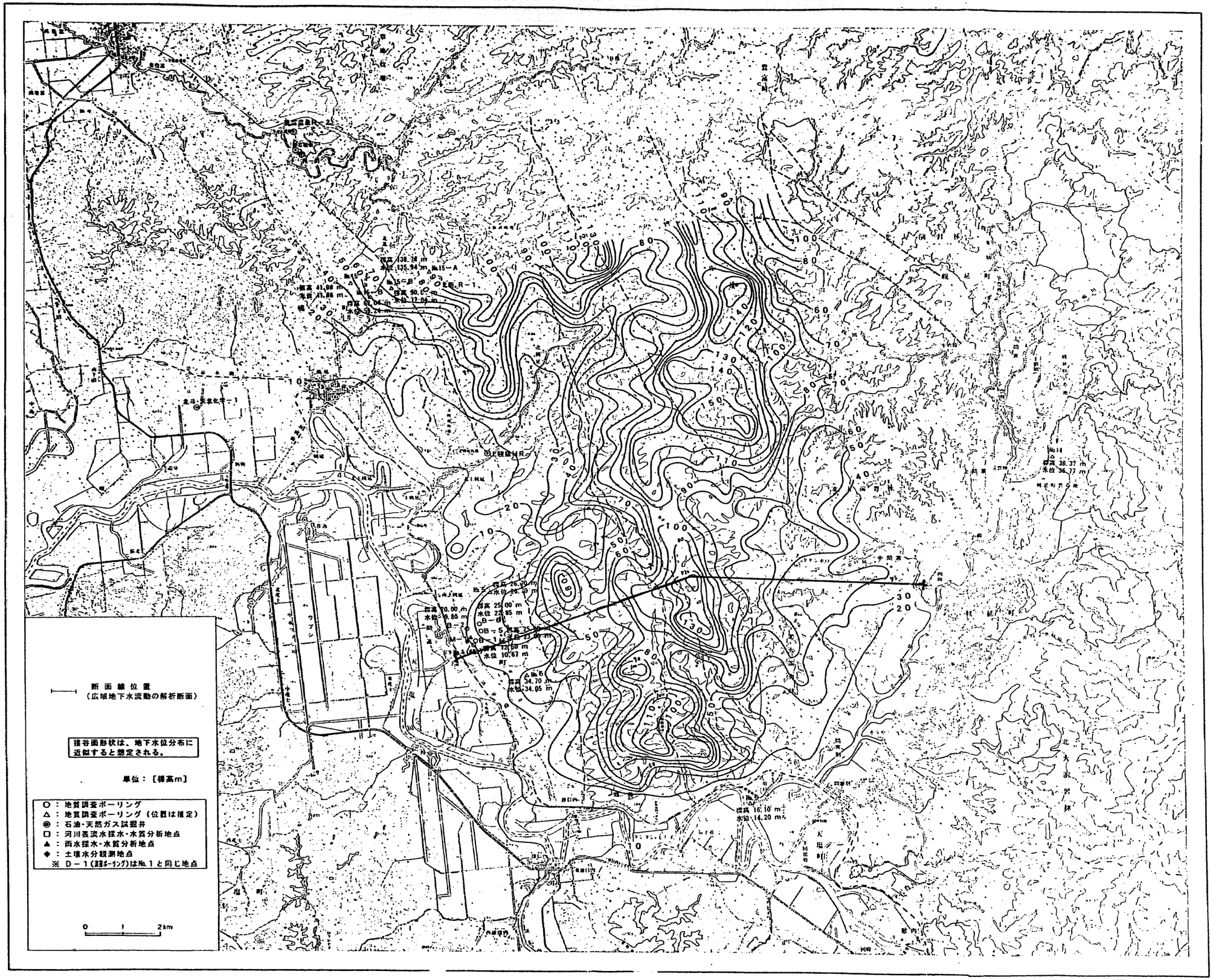

断面線位置
（広域地下水流動の解析断面）
接谷面形状は、地下水位分布に近似すると想定される。
単位：［標高m］
○：地質調査ボーリング
△：地質調査ボーリング（位置は推定）
◎：石油・天然ガス試掘井
□：河川表流水採水・水質分析地点
▲：雨水採水・水質分析地点
◆：土壌水分観測地点
※ D－1（ボーリング）は No.1 と同じ地点
0 1 2km

図2－11 接 谷 面 図

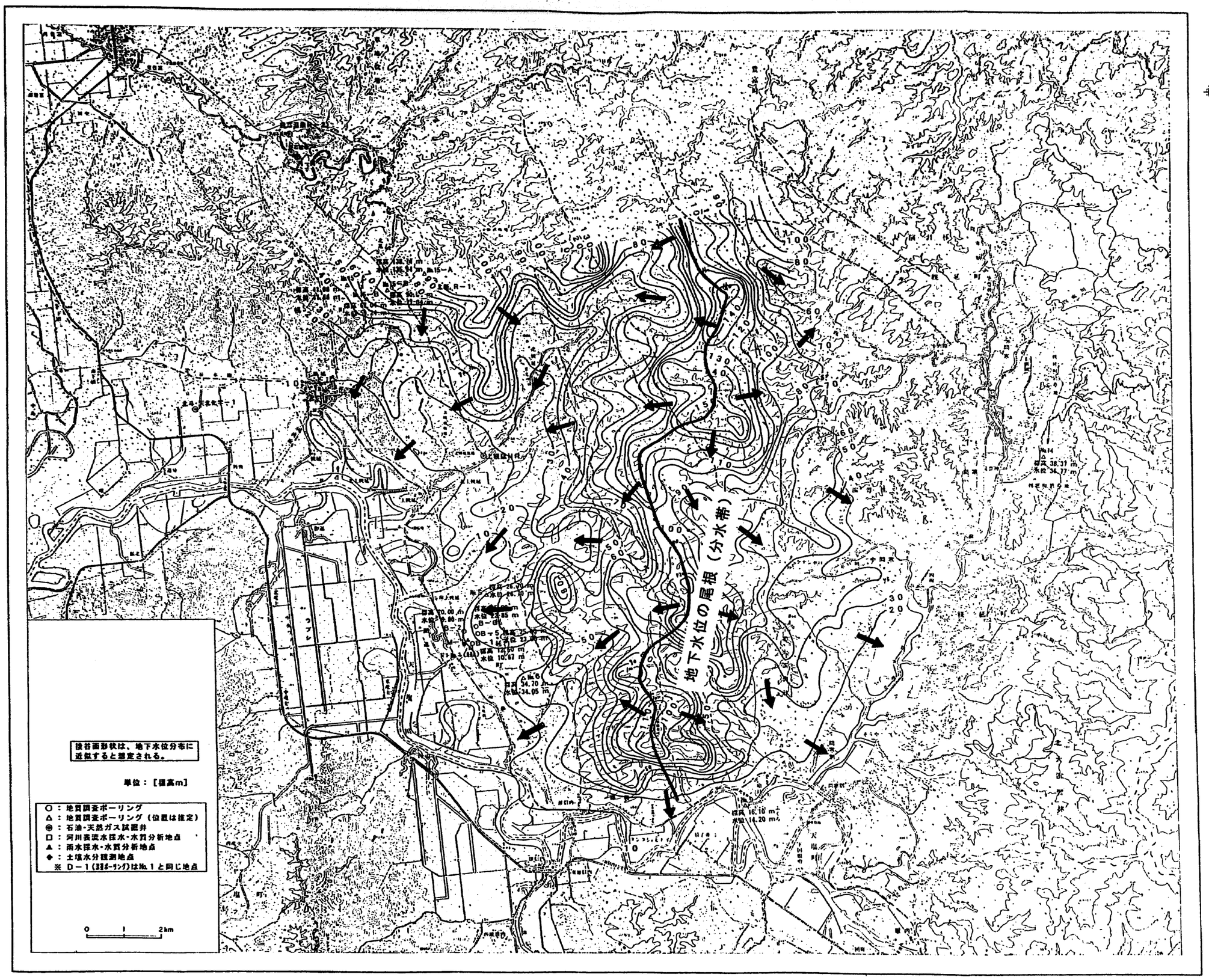


図 2－12　想定地下水流動図

2．5　地下水流動機構

(1)　要旨

接谷面図、ボーリング孔内の観測水位、および水質より、調査地域の地下水位分布と地下水流動状況を推定した。その結果より、大曲断層が遮水帯を形成している可能性は小さいと評価された。地下水流動の最上流部は、大曲断層よりもさらに後背部（東側）のＮ２断層付近の地形の尾根に位置し、この付近で浸透した水は標高-1,000m以深の範囲にまで到達しながら、幌延町西方に流動すると考えられる。

また水質から見て、深度約 300mまでの範囲で地表水が混入すると考えられる。しかし、深度 800m以深では地層起源と思われるNa^+やCl^-などが特徴的に多く、地表水の混入および上流からの地下水流入は、相対的に小さいと思われる。

(2)　水質

表２－10，11には水質データ一覧表を示す。これらの値を用いて、トリリニアダイアグラム（図２－13）におよびヘキサダイアグラム（パターンダイアグラム：図２－14）を作成した。

深層ボーリングで採水された地下水のうち、295m以浅の水質はＢ－１ボーリングの水質に近似しており、浅層地下水が混入していることを示している。一方、800m以深の水質はNaとClが多く、いわゆる滞留性の水質を示すことが特徴である。当然のことながら、ほぼ同深度である石油・天然ガスの試掘井戸の水質と、よく似た水質組成を示す。

以上の結果より、浅層部（深度約 300mまで）では地表水の混入（あるいは地下水流動）が多いのに対し、深層部（深度800m以深）では地表水の混入および上流からの地下水流入は小さいと考えられる。このことは、深部ほど透水係数が小さいこと（２．３節）を裏付けるものと言える。

(3)　鉛直断面等ポテンシャル線の作成方法

図２－15には、接谷面図より推定した鉛直断面における地下水面分布（Ｂ－Ｂ’断面）と、主な地点（深度）における水質を示す。図中にも説明を示したが、ヘキサダイアグラムのスケールは浅層と深層で異なることをお断りしておく。

地下水流動機構の考察の前に、鉛直断面等ポテンシャル線の作成方法について説明し

ておく。なお、詳細については、他の専門書[33]を参照されたい。

① 地形図より、D－1ボーリングを通る線（B－B’線）上の地形を断面図に表す。同様に、接谷面図より、D－1ボーリングを通る線（B－B’線）上の地下水面を断面図に表す。

② 接谷面図より推定した鉛直断面における地下水面分布は、様々な水面標高をとる。例えば、5m間隔でポテンシャルコンターを表すならば、コンターの末端（鉛直断面における地下水面分布との接合部）における水面標高も5m間隔となる。図2－15では、接谷面図と同様、10m間隔のポテンシャルコンターとしたので、接谷面図のコンターと断面線との交点を、鉛直断面における地下水面分布に表した。

③ D－1ボーリングにおける実測水位（4つの深度）を、その観測深度にプロットし、その深度の水圧とする。水位は揚水試験時の値[8]である。また、ストレーナは幅を持つため、ストレーナの中央深度（上端と下端の中央）を水圧の深度とした。

④ D－1ボーリング地点の地下水圧は 7.9～40.6mの範囲にある。10m間隔のポテンシャルコンターを描画するために、10m、20m、30m、40mの水圧に相当する深度を、D－1ボーリング地点上で把握した。

⑤ D－1ボーリング地点上の10m、20m、30m、40mの水圧に相当する深度と、接谷面図より推定した鉛直断面における地下水面分布上の10m、20m、30m、40mの水頭に相当する位置とを結ぶ。この際、浅層部では、透水係数が大きいことを反映し、ポテンシャルコンターの勾配は垂直に近いものとした。深層部では、透水係数が大きいことを反映し、ポテンシャルコンターの勾配を緩やかにした。また、水平方向の地下水の流動は、各深度ともに接谷面図に示す流動方向と同一であると仮定した。

⑥ 接谷面図より推定した鉛直断面における地下水面分布で、60m以上の水圧は、N2断層付近の地形の尾根をはさんで、連続するものとした。ポテンシャルコンターの分布形状に関わる情報は全くなく、ポテンシャルコンターの到達深度等は仮定したものである。

⑦ 接谷面図より推定した鉛直断面における地下水面分布上では、50mの水圧を示す

地点は１ヶ所であり、50mポテンシャルコンターは、本調査地域内では、閉鎖していないものとした。

実測の水圧は、Ｄ－１ボーリングにおける４つの深度の値のみであり、過半のポテンシャルコンターの形状や位置（到達深度）は仮定したものである。

(4)　地下水流動機構

図２－15には、接谷面図より推定した鉛直断面における地下水面分布（図２－11：Ｂ－Ｂ’断面）と、主な地点（深度）における水質を示す。図中にも説明を示したが、ヘキサダイアグラムのスケールは浅層と深層で異なることをお断りしておく。

図より、下記の事項が推定される。

① 地下水面の尾根はＮ２断層付近の地形の尾根に位置する。この付近で浸透した水は、標高-1,000m以深の範囲にまで到達すると考えられる。

② 深地層試験場の後背部、大曲断層西側にも地下水面の尾根は認められるが（平面図参照）、広域的な地下水流動には関わっていないと思われる。

③ Ｄ－１ボーリング地点では、深層ほど水位は高い（水圧が大きい）。このことは、同地点で地下水の圧力が深部方向から伝達する（つまり、深層から浅層方向に地下水が流動する）ことを示している。

④ 水質は浅層部と深層部で明らかに異なる。本地区の地層は堆積岩が主体であり、地層の層相によって水質に差異が生じる可能性は小さい。むしろ、浸透後の経過時間の大小、すなわち、浅層部では短く、深層部では滞留時間の長いことが、水質に現われたと考えられる。

なお、滞留時間が長いことが、地下水流動（流速０）のないことを意味しない。透水係数（すなわち地下水が流動する間隙）と水位勾配があれば、流速の大小はあっても、地下水は流動するとみなすべきである。

⑤ 断層の透水性については不明である。ただし、断層が遮水帯を形成するのならば、水圧分布（とくにＤ－１地点の水位）にも当然、影響すると考えられる。

接谷面図より想定される地下水面分布では、大曲断層付近の水位は標高 30m以下であり、Ｄ－１地点の深層の水圧よりも小さい。同地点の標高 40m以上の水圧は、断層よりも東側の水圧が伝わることで説明は可能となる。

もちろん、接谷面図自体が仮定の水面図であり、図２－１５も仮定の流動機構を示すものである。しかし、断層が遮水帯であるならば、Ｄ－１地点の深層の水圧は、大曲断層以西（範囲が狭い）での地下水流動がある、あるいは、地層中に圧力が封入されている場合であり、さらに多くの仮定を想定することになる。

現時点で得られている情報から仮定した水圧分布から見て、大曲断層が遮水帯を形成している可能性は小さいと思われる。

表 2－10（1） 水質分析結果一覧表

地点名	諸元	引用資料	地盤高 T.P.m	井戸深度 m	ｽﾄﾚｰﾅｰ深度 m	採取深度 m	対象地層	採水年月日	地下水位GL-m	pH	電導度 μS/cm	Na mg/l	K mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	HCO3 mg/l	SO4 mg/l	Cl mg/l	NO3 mg/l	NH4 mg/l	Si mg/l
B－1	ﾎﾞｰﾘﾝｸﾞ孔	資料13	12.5	20.35	0-20.35			H4/8		5.7	159	16.5	1.2	6.6	6.3	59.0	2.0	18.1	0.01未満	0.1未満	42.7
B－1	ﾎﾞｰﾘﾝｸﾞ孔	資料13	12.5	20.35	0-20.35			H4/11		5.8	204	13.2	2.2	11.2	7.1	64.2	8.8	18.2	0.09	0.8	23.3
B－1	ﾎﾞｰﾘﾝｸﾞ孔	資料13	12.5	20.35	0-20.35			H5/2		5.6	154	15.5	1.0	5.7	5.9	53.3	0.2	17.9	0.01未満	0.5	42.2
B－1	ﾎﾞｰﾘﾝｸﾞ孔	資料13	12.5	20.35	0-20.35			H5/5		5.7	172	14.6	1.2	8.4	7.7	68.8	0.2	18.3	0.01未満	0.8	38.4
No. 1	表流水	資料13		-	-	-	表流水	H4/8		6.1	93	13.2	1.0	2.7	2.3	20.2	8.5	15.6	0.05	0.1未満	17.1
No. 1	表流水	資料13		-	-	-	表流水	H4/11		6.2	76	10.4	0.6	1.4	1.5	5.2	10.5	15.1	0.02未満	0.1未満	14.8
No. 1	表流水	資料13		-	-	-	表流水	H5/2		6.1	83	10.6	0.4	1.6	1.8	6.3	5.4	15.7	0.04	0.1未満	14.2
No. 1	表流水	資料13		-	-	-	表流水	H5/5		6.2	68	9.7	0.5	1.6	1.5	10.7	3.3	12.1	0.02	0.2	13.3
開進地区内	雨水	資料13		-	-	-	雨水	H4/8		6.0	11	0.4	0.1	0.2	0.1未満	3.6	1.2	0.4	0.13	0.2	0.1
開進地区内	雨水	資料13		-	-	-	雨水	H4/11		6.1	47	5.3	0.4	0.5	0.6	3.1	3.4	8.6	0.21	0.3	0.1未満
開進地区内	雨水	資料13		-	-	-	雨水	H5/2		6.3	47	4.5	0.2	0.4	0.5	6.5	3.0	7.5	0.18	0.2	0.1
開進地区内	雨水	資料13		-	-	-	雨水	H5/5		6.5	31	2.0	0.3	1.0	0.3	6.3	3.0	3.1	0.32	0.5	0.1
D－1 (W-1)	深層Bor	資料5	13	1,355		149				8.1	382	60	3.4	16.4	4.8	126	27.4	38			34
D－1 (W-2)	深層Bor	資料5	13	1,355		295				7.5	333	54.2	4.2	7.7	4.5	103	6.4	41.6			40
D－1 (W-3)	深層Bor	資料5	13	1,355		805				9.1	1260	294	20.2	8.4	0.6	672	117	37.9			68
D－1 (W-4)	深層Bor	資料5	13	1,355		1050				8.7	9480	2520	109	21.2	5.1	2190	734	2110			38
D－1 (W-5)	深層Bor	資料5	13	1,355		1150				8	8060	2050	111	25.6	6.4	1620	716	1880			33
D－1 (W-6)	深層Bor	資料5	13	1,355		1250				7.2	5930	1430	87.7	15.1	5.6	1070	445	1250			32
D－1 (Yw-1)	深層Bor	資料5	13	1,355		1000-1355				8.2	30,000	8,790	312	118	230	1960	44.5	13,900			12
D－1 (Uw-1)	深層Bor	資料5	13	1,355		800-810				8.4	1,760	419	19.9	4.5	4.1	957	3.6	113			66
D－1 (Uw-2)	深層Bor	資料5	13	1,355		1000-1355				8.1	30,300	8,820	309	106	226	1310	6.8	14,300			5未満
D－1 (0回目)	深層Bor	資料19	13	1,355		1000-1355		H3/5/11		8.7	45,100	10,400	387	30.6	93.9	1483	361.8	22,382	235.7		18.9
D－1 (1回目)	深層Bor	資料19	13	1,355		1000-1355		H3/5/20		8.3	46,000	10,900	378	35.2	86.4	795	61.4	16,397	6		15.9
D－1 (2回目)	深層Bor	資料19	13	1,355		1000-1355		H3/5/29		8.1	45,400	10,900	381	64.4	136	1369	32.5	21,114	4.75		20.9
D－1 (3回目)	深層Bor	資料19	13	1,355		1000-1355		H3/6/8		7.9	45,400	10,600	379	80.6	169	1426	50.6	20,936	3.25		26.4
D－1 (4回目)	深層Bor	資料19	13	1,355		1000-1355		H3/6/14		8	45,500	10,800	380	87.7	184	1581	46.9	21,291	32		29
D－1 (5回目)	深層Bor	資料19	13	1,355		1000-1355		H3/6/16		8	45,500	11,200	379	85.2	184	668	31.7	21,291	3.75		33.7
海水	-	資料5										10,500	380	400	1300	140	2650	19,000			180
豊徳(81-16-001)	観測井戸	資料15	4.94	2.5	1.7-2.4	1.3		H4/2/18	0.63	6.3								58			
豊徳(81-16-001)	観測井戸	資料15	4.94	2.5	1.7-2.4	2		H4/5/19	0.8	6.7								19		0.07	
豊徳(81-16-001)	観測井戸	資料15	4.94	2.5	1.7-2.4	2		H4/7/21	1.07	6.7								17		ND	
豊徳(81-16-001)	観測井戸	資料15	4.94	2.5	1.7-2.4	2		H4/10/14	0.82	7								12		ND	
丸山(81-16-002)	観測井戸	資料15	7.27	1.9	1.1-1.7	1.35		H4/2/18	0.99	7.1								21			
丸山(81-16-002)	観測井戸	資料15	7.27	1.9	1.1-1.7	1.35		H4/5/19	0.7	7.2								18		0.03	
丸山(81-16-002)	観測井戸	資料15	7.27	1.9	1.1-1.7	1.35		H4/7/21	0.87	7.3								17		0.02	
丸山(81-16-002)	観測井戸	資料15	7.27	1.9	1.1-1.7	1.35		H4/10/14	0.7	7.2								13		ND	
下沼(81-16-003)	観測井戸	資料15	2.8	1.8	1.2-1.7	1.3		H4/2/18	0.65	6.8								17			
下沼(81-16-003)	観測井戸	資料15	2.8	1.8	1.2-1.7	1.3		H4/5/19	0.58	6.8								14		ND	
下沼(81-16-003)	観測井戸	資料15	2.8	1.8	1.2-1.7	1.3		H4/7/21	0.76	6.9								9		0.04	
下沼(81-16-003)	観測井戸	資料15	2.8	1.8	1.2-1.7	1.3		H4/10/14	0.65	6.9								9		ND	
浜里(81-16-005)	観測井戸	資料15	65	10	1.9-8.2	2		H4/2/18	0.56	6.4	260							24	ND	0.19	
浜里(81-16-005)	観測井戸	資料15	65	10	1.9-8.2	2		H4/5/19	0.33	6.3	220							22	0.01	0.11	
浜里(81-16-005)	観測井戸	資料15	65	10	1.9-8.2	2		H4/7/21	0.7	6.6	261							22	0.01	0.1	
浜里(81-16-005)	観測井戸	資料15	65	10	1.9-8.2	2		H4/10/14	0.43	6.6	290							28	ND	0.14	

資料5 ： 貯蔵工学センター立地環境調査 － 深層ボーリング 報告書（昭和６２年９月）動力炉・核燃料開発事業団
資料13 ： 幌延地区地下水調査報告書（平成５年７月）動力炉・核燃料開発事業団
資料15 ： 地下水質年表（平成６年３月）建設省河川局編
資料19 ： 深部地下水の地化学特性調査（1991年８月）

表 2－10（2） 水質分析結果一覧表

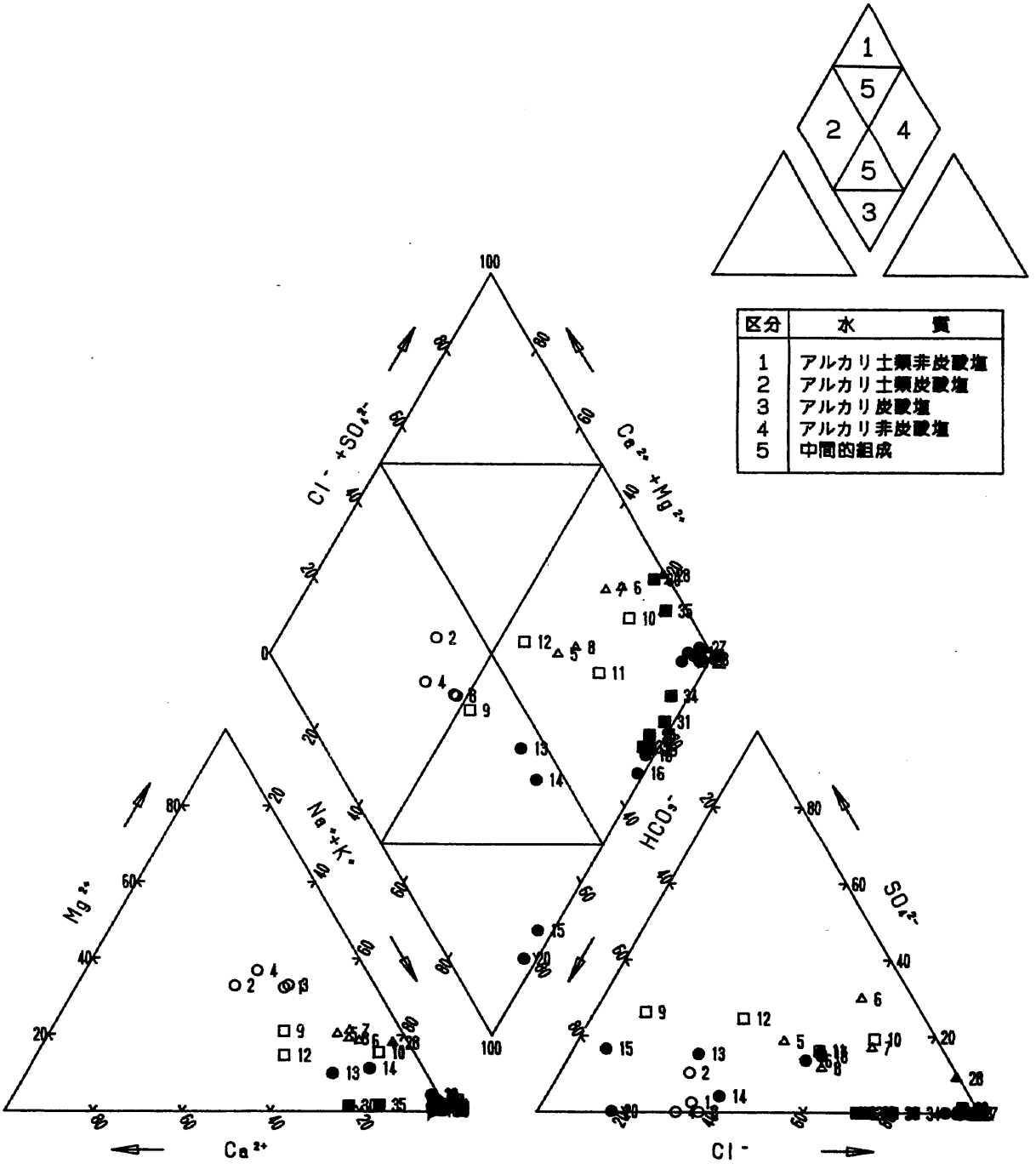
地点名	諸元	引用資料	地盤高 T.P.m	井戸深度 m	ｽﾄﾚｰﾅｰ深度 m	採取深度 m	対象地層	採水年月日	地下水位GL-m	pH	電導度 μS/cm	Na mg/l	K mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	HCO3 mg/l	SO4 mg/l	Cl mg/l	NO3 mg/l	NH4 mg/l	Si mg/l
ｵﾝﾈﾍﾞﾂ(81-16-06)	観測井戸	資料15	65	10	1.9-8.2	2		H4/2/18	0.62	5.9	159							16	ND	0.04	
ｵﾝﾈﾍﾞﾂ(81-16-06)	観測井戸	資料15	65	10	1.9-8.2	2		H4/5/19	0.44	5.6	114							12	ND	0.08	
ｵﾝﾈﾍﾞﾂ(81-16-06)	観測井戸	資料15	65	10	1.9-8.2	2		H4/7/21	0.97	6	220							17	ND	0.1	
ｵﾝﾈﾍﾞﾂ(81-16-06)	観測井戸	資料15	65	10	1.9-8.2	2		H4/10/14	0.55	5.8	179							21	0.01	0.06	
上幌延ＨＲ－１	石油試掘	資料5								7.9		4,060	127.5	28	14	3031.7	0	4927.4			58.8
北進、Ｒ－１	石油試掘	資料5								7.8		3,625	35.7	883	40.8	390	128	6777		12.5	33.3
北斗・天北化学-1	石油試掘	資料5								8.7		7,850	124.2	13.6	74.3	4365	0	10415		20.7	96.3
豊富温泉Ｒ－１	石油試掘	資料5		961		961				7.4		4,810	35	86	35	3514	0	6089		17.6	25.5
豊富温泉Ｒ－２	石油試掘	資料5		860		860				7.3		5,420	41.4	105	42	4165	0	6309		16.2	26.8
豊富温泉Ｒ－８	石油試掘	資料5		908		908				8		4,464	36.5	83.6	48.2	1850	0	6174			24.4
天塩・北川口-2	石油試掘	資料5		1069		1069				7.2		5,220	43.8	791	59.3	791	0	9335			65.7
北豊富Ｒ－２	石油試掘	資料5		1069		1507				7.2		6,700	48.2	113	65.6	4331	0	7621		15	45.8

資料5 ： 貯蔵工学センター立地環境調査 － 深層ボーリング 報告書（昭和６２年９月）動力炉・核燃料開発事業団
資料13 ： 幌延地区地下水調査報告書（平成５年７月）動力炉・核燃料開発事業団
資料15 ： 地下水質年表（平成６年３月）建設省河川局編
資料19 ： 深部地下水の地化学特性調査（1991年８月）

表2－11　水質一覧表

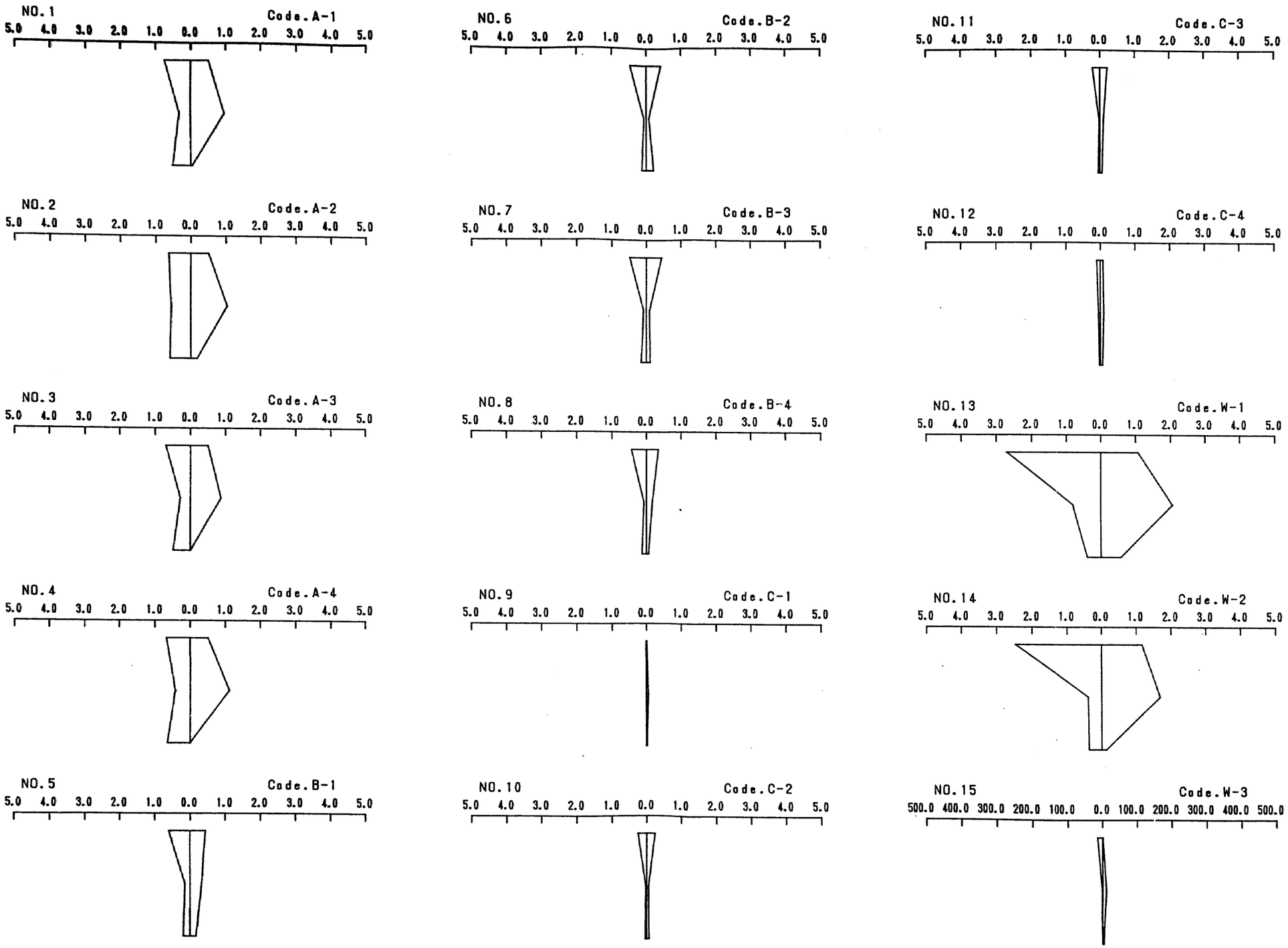
		No.	Code	Mark	Na+	K+	Ca2+	Mg2+	陽イオン計	HCO3-	SO42-	Cl-	N-NO3-	陰イオン計
B－1	ﾎﾞｰﾘﾝｸﾞ孔	1	A-1	○	16.5 0.718	1.20 0.031	6.6 0.329	6.3 0.518	1.596	59.0 0.967	2.0 0.042	18.1 0.511	0.0 0.000	1.520
B－1	ﾎﾞｰﾘﾝｸﾞ孔	2	A-2	○	13.2 0.574	2.20 0.056	11.2 0.559	7.1 0.584	1.773	64.2 1.052	8.8 0.183	18.2 0.513	0.1 0.007	1.755
B－1	ﾎﾞｰﾘﾝｸﾞ孔	3	A-3	○	15.5 0.674	1.00 0.026	5.7 0.284	5.9 0.485	1.469	53.3 0.873	0.2 0.004	17.9 0.505	0.0 0.000	1.382
B－1	ﾎﾞｰﾘﾝｸﾞ孔	4	A-4	○	14.6 0.635	1.20 0.031	8.4 0.419	7.7 0.633	1.718	68.8 1.128	0.2 0.004	18.3 0.516	0.0 0.000	1.648
No.1	表流水	5	B-1	△	13.2 0.574	1.00 0.026	2.7 0.135	2.3 0.189	0.924	20.2 0.331	8.5 0.177	15.6 0.440	0.1 0.007	0.955
No.1	表流水	6	B-2	△	10.4 0.452	0.60 0.015	1.4 0.070	1.5 0.123	0.660	5.2 0.085	10.5 0.219	15.1 0.426	0.0 0.000	0.730
No.1	表流水	7	B-3	△	10.6 0.461	0.40 0.010	1.6 0.080	1.8 0.148	0.699	6.3 0.103	5.4 0.112	15.7 0.443	0.0 0.000	0.658
No.1	表流水	8	B-4	△	9.7 0.422	0.50 0.013	1.6 0.080	1.5 0.123	0.638	10.7 0.175	3.3 0.069	12.1 0.341	0.0 0.000	0.585
開進地区内	雨水	9	C-1	□	0.4 0.017	0.10 0.003	0.2 0.010	0.1 0.008	0.038	3.6 0.059	1.2 0.025	0.4 0.011	0.1 0.007	0.102
開進地区内	雨水	10	C-2	□	5.3 0.231	0.40 0.010	0.5 0.025	0.6 0.049	0.315	3.1 0.051	3.4 0.071	8.6 0.243	0.2 0.014	0.379
開進地区内	雨水	11	C-3	□	4.5 0.196	0.20 0.005	0.4 0.020	0.5 0.041	0.262	6.5 0.107	3.0 0.062	7.5 0.212	0.2 0.014	0.395
開進地区内	雨水	12	C-4	□	2.0 0.087	0.30 0.008	1.0 0.050	0.3 0.025	0.170	6.3 0.103	3.0 0.062	3.1 0.087	0.3 0.021	0.273
D－1(W-1)	深層Bor	13	W-1	●	60.0 2.610	3.40 0.087	16.4 0.818	4.8 0.395	3.910	126.0 2.065	27.4 0.570	38.0 1.072	0.0 0.000	3.707
D－1(W-2)	深層Bor	14	W-2	●	54.2 2.358	4.20 0.107	7.7 0.384	4.5 0.370	3.219	103.0 1.688	6.4 0.133	41.6 1.173	0.0 0.000	2.994
D－1(W-3)	深層Bor	15	W-3	●	294.0 12.788	20.20 0.517	8.4 0.419	0.6 0.049	13.773	672.0 11.013	117.0 2.436	37.9 1.069	0.0 0.000	14.518
D－1(W-4)	深層Bor	16	W-4	●	2520.0 109.613	109.00 2.788	21.2 1.058	5.1 0.419	113.878	2190.0 35.890	734.0 15.282	2110.0 59.520	0.0 0.000	110.692
D－1(W-5)	深層Bor	17	W-5	●	2050.0 89.169	111.00 2.839	25.6 1.277	6.4 0.526	93.811	1620.0 26.549	716.0 14.907	1880.0 53.032	0.0 0.000	94.488
D－1(W-6)	深層Bor	18	W-6	●	1430.0 62.201	87.70 2.243	15.1 0.753	5.6 0.461	65.658	1070.0 17.535	445.0 9.265	1250.0 35.261	0.0 0.000	62.061
D－1(Yw-1)	深層Bor	19	W-7	●	8790.0 382.340	312.00 7.980	118.0 5.888	230.0 18.914	415.122	1960.0 32.121	44.5 0.927	13900.0 392.102	0.0 0.000	425.150
D－1(Uw-1)	深層Bor	20	W-8	●	419.0 18.225	19.90 0.509	4.5 0.225	4.1 0.337	19.296	957.0 15.683	3.6 0.075	113.0 3.188	0.0 0.000	18.946
D－1(Uw-2)	深層Bor	21	W-9	●	8820.0 383.645	309.00 7.903	106.0 5.289	226.0 18.586	415.423	1310.0 21.468	6.8 0.142	14300.0 403.385	0.0 0.000	424.995
D－1(0回目)	深層Bor	22	W-10	●	10400.0 452.371	387.00 9.898	30.6 1.527	93.9 7.722	471.518	1483.0 24.304	361.8 7.533	22382.0 631.368	0.0 0.000	663.205
D－1(1回目)	深層Bor	23	W-11	●	10900.0 474.119	378.00 9.668	35.2 1.756	86.4 7.105	492.648	795.0 13.029	61.4 1.278	16397.0 462.539	0.0 0.000	476.846
D－1(2回目)	深層Bor	24	W-12	●	10900.0 474.119	381.00 9.744	64.4 3.214	136.0 11.184	498.261	1369.0 22.435	32.5 0.677	21114.0 595.599	0.0 0.000	618.711
D－1(3回目)	深層Bor	25	W-13	●	10600.0 461.070	379.00 9.693	80.6 4.022	169.0 13.898	488.683	1426.0 23.369	50.6 1.054	20936.0 590.578	0.0 0.000	615.001
D－1(4回目)	深層Bor	26	W-14	●	10800.0 469.770	380.00 9.719	87.7 4.376	184.0 15.132	498.997	1581.0 25.910	46.9 0.976	21291.0 600.592	0.0 0.000	627.478
D－1(5回目)	深層Bor	27	W-15	●	11200.0 487.168	379.00 9.693	85.2 4.251	184.0 15.132	516.244	668.0 10.947	31.7 0.660	21291.0 600.592	0.0 0.000	612.199
ｵﾝﾈﾍﾞｯ(81-16-06)	観測井戸	28	S-1	▲	10500.0 456.720	380.00 9.719	400.0 19.960	1300.0 106.908	593.307	140.0 2.294	2650.0 55.174	19000.0 535.966	0.0 0.000	593.434
上幌延HR－1	石油試掘	29	O-1	■	4060.0 176.599	127.50 3.261	28.0 1.397	14.0 1.151	182.408	3031.7 49.684	0.0 0.000	4927.4 138.996	0.0 0.000	188.680
北進、R－1	石油試掘	30	O-2	■	3625.0 157.677	35.70 0.913	883.0 44.062	40.8 3.355	206.007	390.0 6.391	128.0 2.665	6777.0 191.171	0.0 0.000	200.227
北斗・天北化学-1	石油試掘	31	O-3	■	7850.0 341.453	124.20 3.176	13.6 0.679	74.3 6.110	351.418	4365.0 71.534	0.0 0.000	10415.0 293.794	0.0 0.000	365.328
豊富温泉R－1	石油試掘	32	O-4	■	4810.0 209.221	35.00 0.895	86.0 4.291	35.0 2.878	217.285	3514.0 57.588	0.0 0.000	6089.0 171.763	0.0 0.000	229.351
豊富温泉R－2	石油試掘	33	O-5	■	5420.0 235.755	41.40 1.059	105.0 5.240	42.0 3.454	245.508	4165.0 68.256	0.0 0.000	6309.0 177.969	0.0 0.000	246.225
豊富温泉R－8	石油試掘	34	O-6	■	4464.0 194.171	36.50 0.934	83.6 4.172	48.2 3.964	203.241	1850.0 30.318	0.0 0.000	6174.0 174.161	0.0 0.000	204.479
天塩・北川口-2	石油試掘	35	O-7	■	5220.0 227.055	43.80 1.120	791.0 39.471	59.3 4.877	272.523	791.0 12.963	0.0 0.000	9335.0 263.329	0.0 0.000	276.292
北豊富R－2	石油試掘	36	O-8	■	6700.0 291.431	48.20 1.233	113.0 5.639	65.6 5.395	303.698	4331.0 70.977	0.0 0.000	7621.0 214.979	0.0 0.000	285.956

単　位　　上段：mg/l
　　下段：meq/l



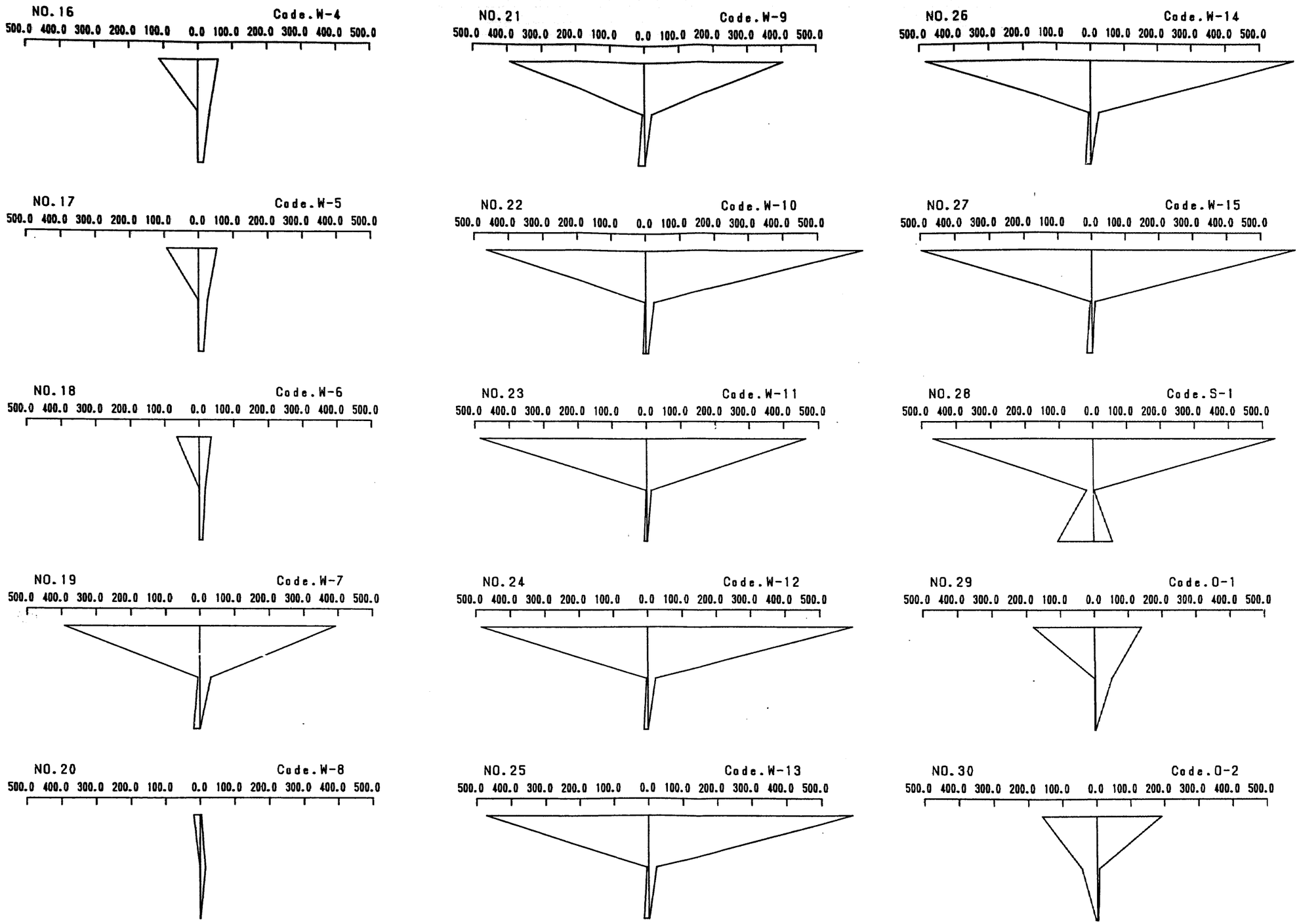
記号および番号は表２－10,11を参照

図２－13 トリリニアダイアグラム



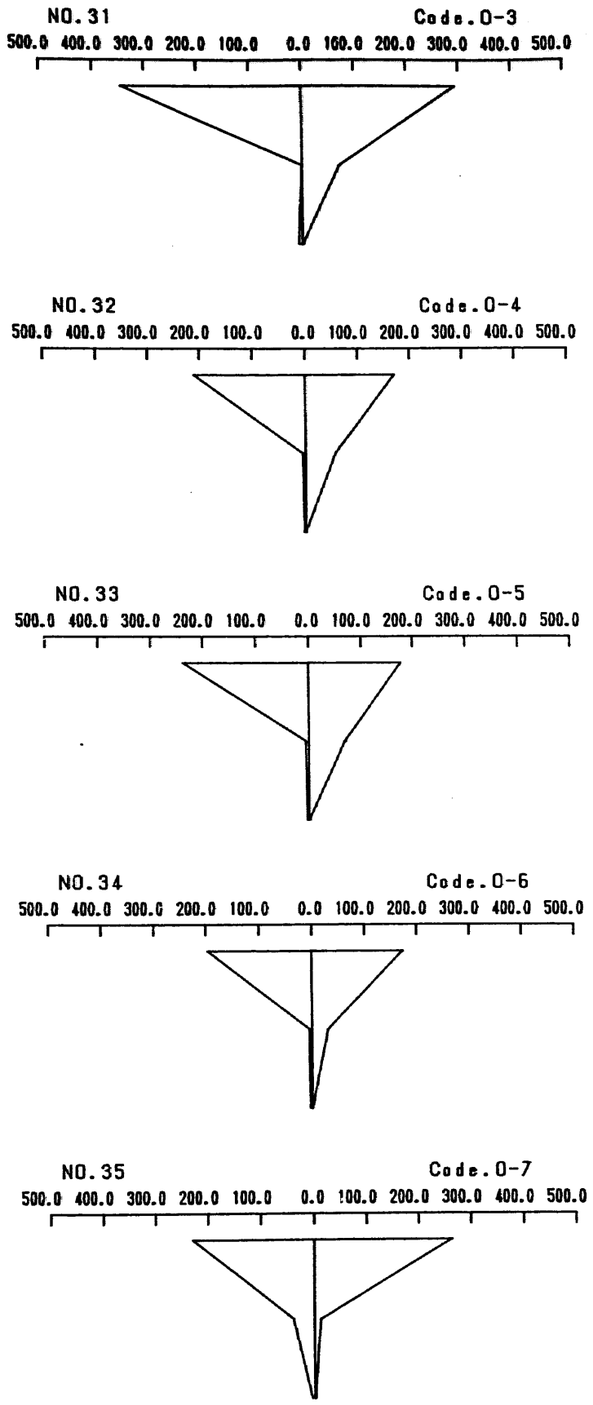
番号は表２－11を参照

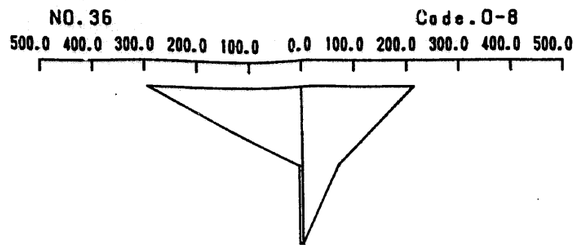
図２－14(1)　水質のヘキサダイアグラム

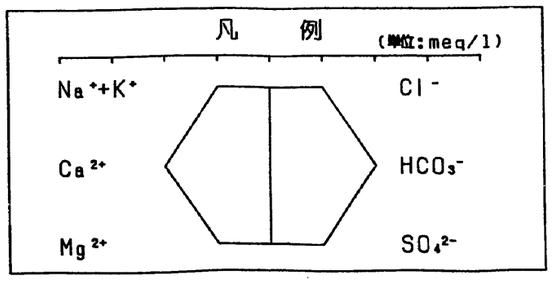


番号は表２－11を参照

図２－14(2)　水質のヘキサダイアグラム

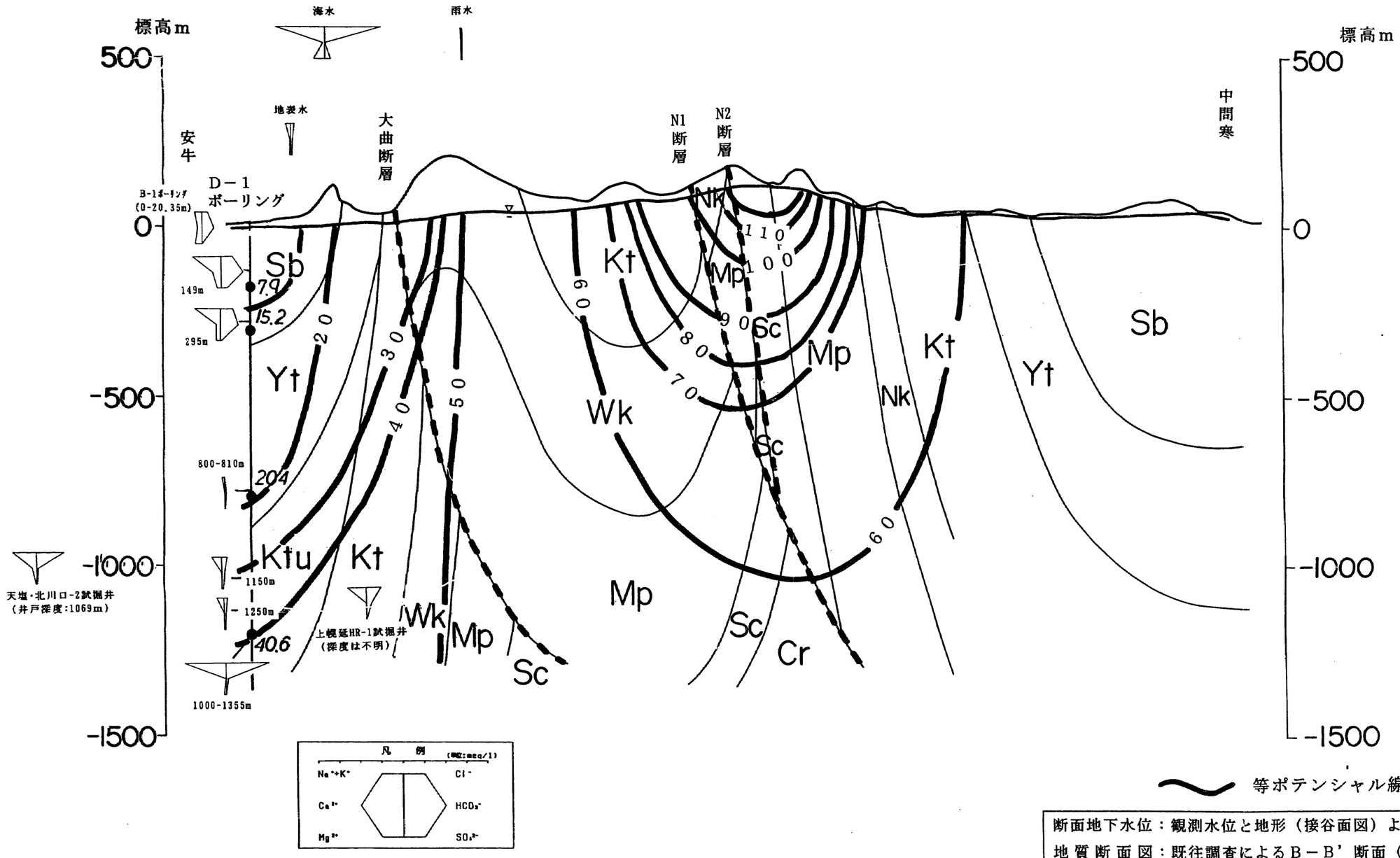






番号は表２－11を参照

図２－14(3) 水質のヘキサダイアグラム



断面地下水位：観測水位と地形（接谷面図）より推定
地質断面図：既往調査によるB－B'断面（動燃）
水質分析結果：深層ボーリング調査および地下水調査（動燃）
石油・天然ガス等試掘井（動燃とりまとめ資料）
ヘキサダイアグラム：深度295mまでと、それ以深でスケールは異なる
詳細はヘキサダイアグラムとりまとめ結果（図2－14）を参照のこと

図2－15　広域の地下水流動

2．6　地下水かん養量

2．6．1　要旨

地下水位変化、流域の水収支から地下水かん養量を推計した。仮定条件によって値はばらつくが、本地域における地下水かん養量（深部の岩盤中の地下水体への付加量）は、0～30mm／年の間にあると推定された。

2．6．2　幌延における観測

（1）気象

幌延町開進地区（幌延観測所）では、気象データとして降水量、蒸発量、気温などの観測が昭和62年以降行われている[13)・17)・18)]。観測記録を整理して、年間降水量と年間蒸発量の推移を図2－16と図2－17に示した。

①降水量

年間降水量は、1021～1384mmの間で推移しており、昭和63年から平成5年までの平均で、年間1188mmとなっている。

②蒸発量

年間蒸発量は、289～362mmの間で推移しており、平成2年から平成5年までの平均で、年間326mmとなっている。

（2）地下水位

幌延町開進地区では、3ヵ所において地下水位の連続観測が実施されている[13)]。観測井の位置を図2－18に示した。また、各観測井の観測水位（日平均水位）の経時変化を、降水量と合わせて、図2－19～21に示した。

観測井	深　度	観測開始日
B－1	20.35m	平成2年3月29日
B－2	50.00	昭和62年9月24日
B－5	30.00	昭和62年9月24日

地下水位の変動を見ると、最も浅いＢ－１観測井が最も降水量に鋭敏な変動を示しており、降水の後地下水位が急上昇し、その後緩やかに低下する傾向が認められる。Ｂ－５観測井についても降水の影響が認められるが、地盤標高（25.0m）を超えると自噴しており、降水量との関係を検討する上では適当ではないと考えられる。また、Ｂ－２観測井は降水時に顕著な水位上昇（ピーク）は認められない。

従って、降水量と地下水位の関係が最も密接な観測井はＢ－１観測井であり、後述する地下水かん養量の推定に当たってはＢ－１観測井の観測水位を用いることとした。

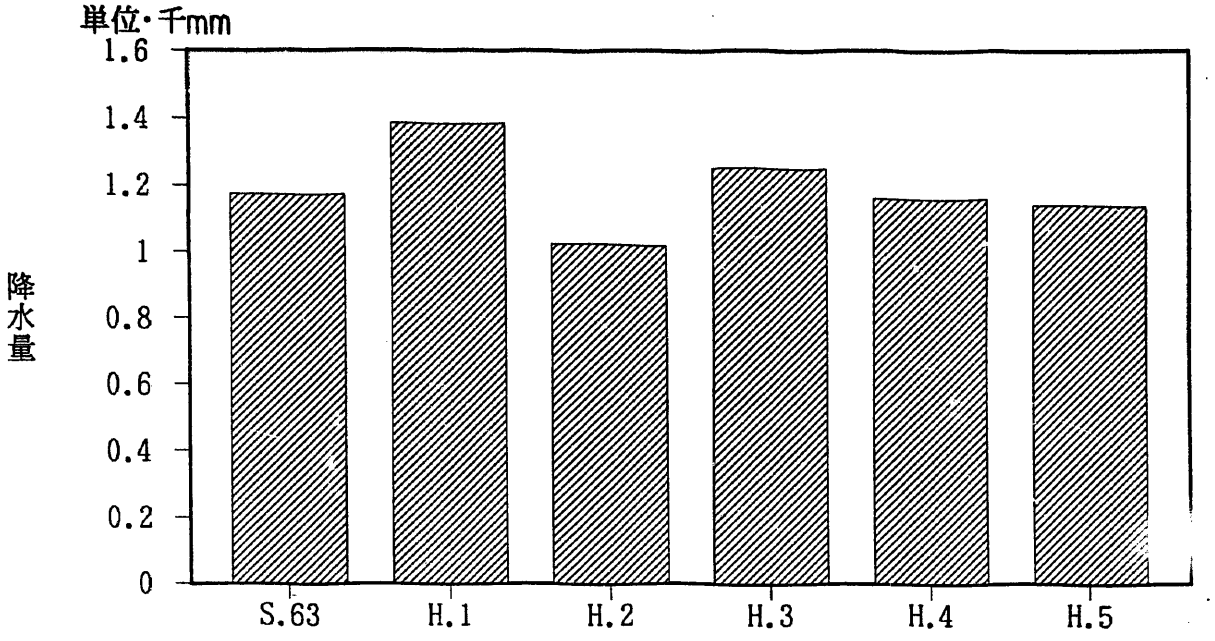


図 2-16　年間降水量経年変化図（幌延観測所）

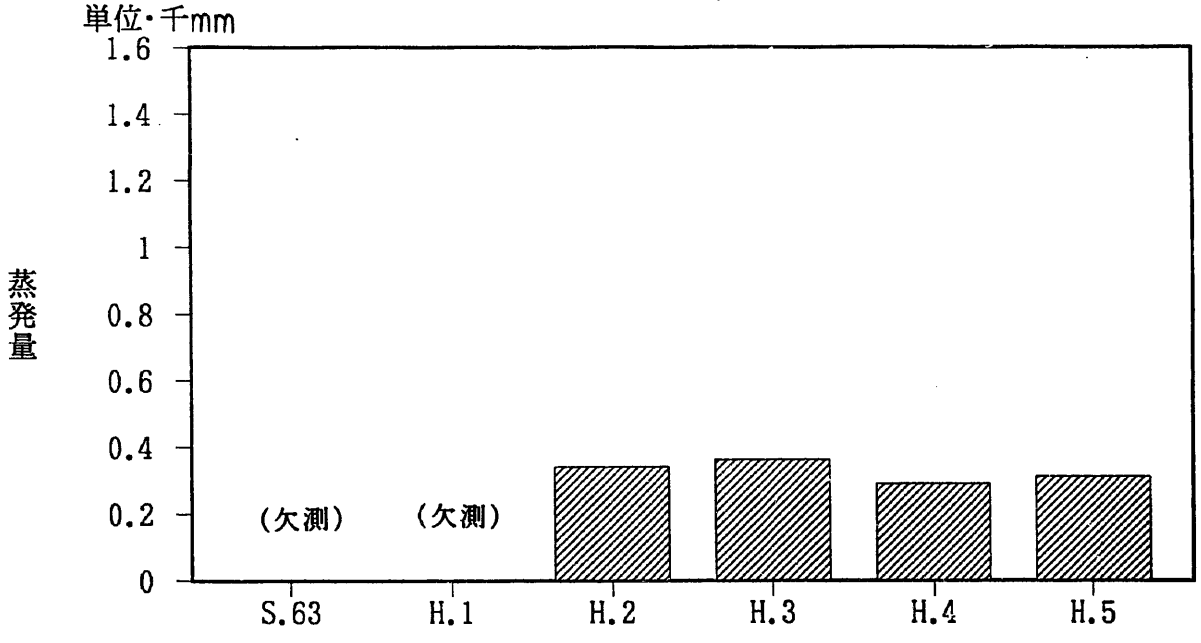


図2-17　年間蒸発量経年変化図（幌延観測所）

図 2-18　地下水位観測井位置図

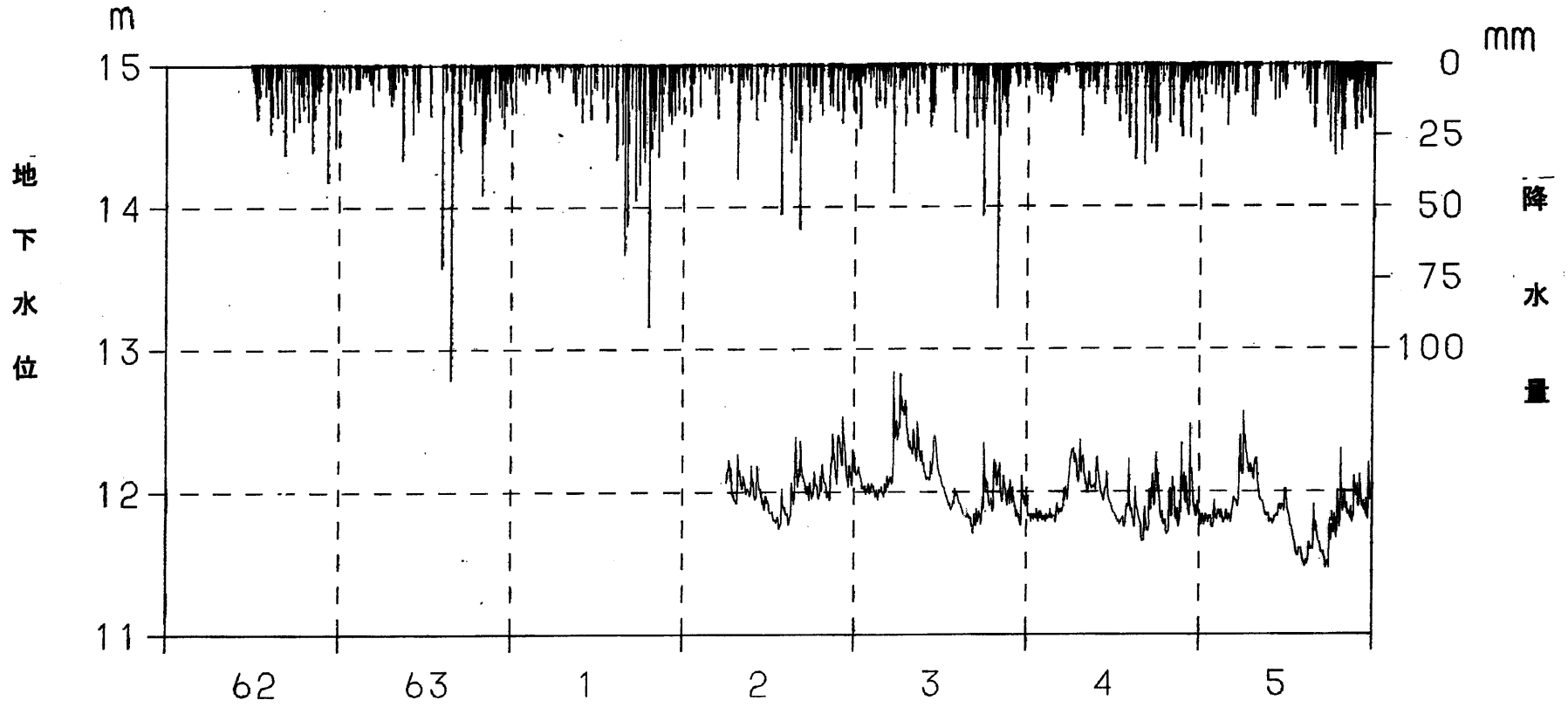


図 2-19　地下水位経時変化図（B－1）

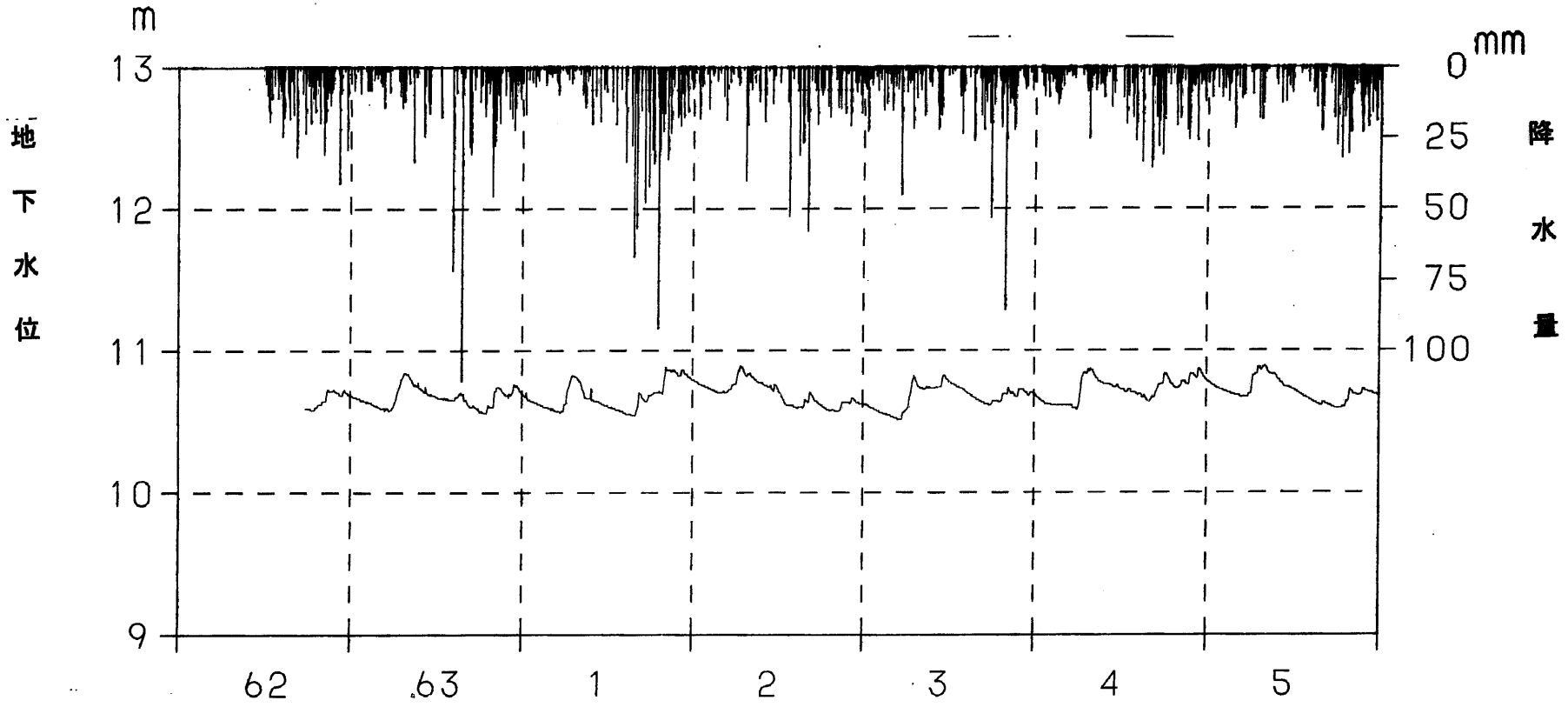


図2-20　地下水位経時変化図（B－2）

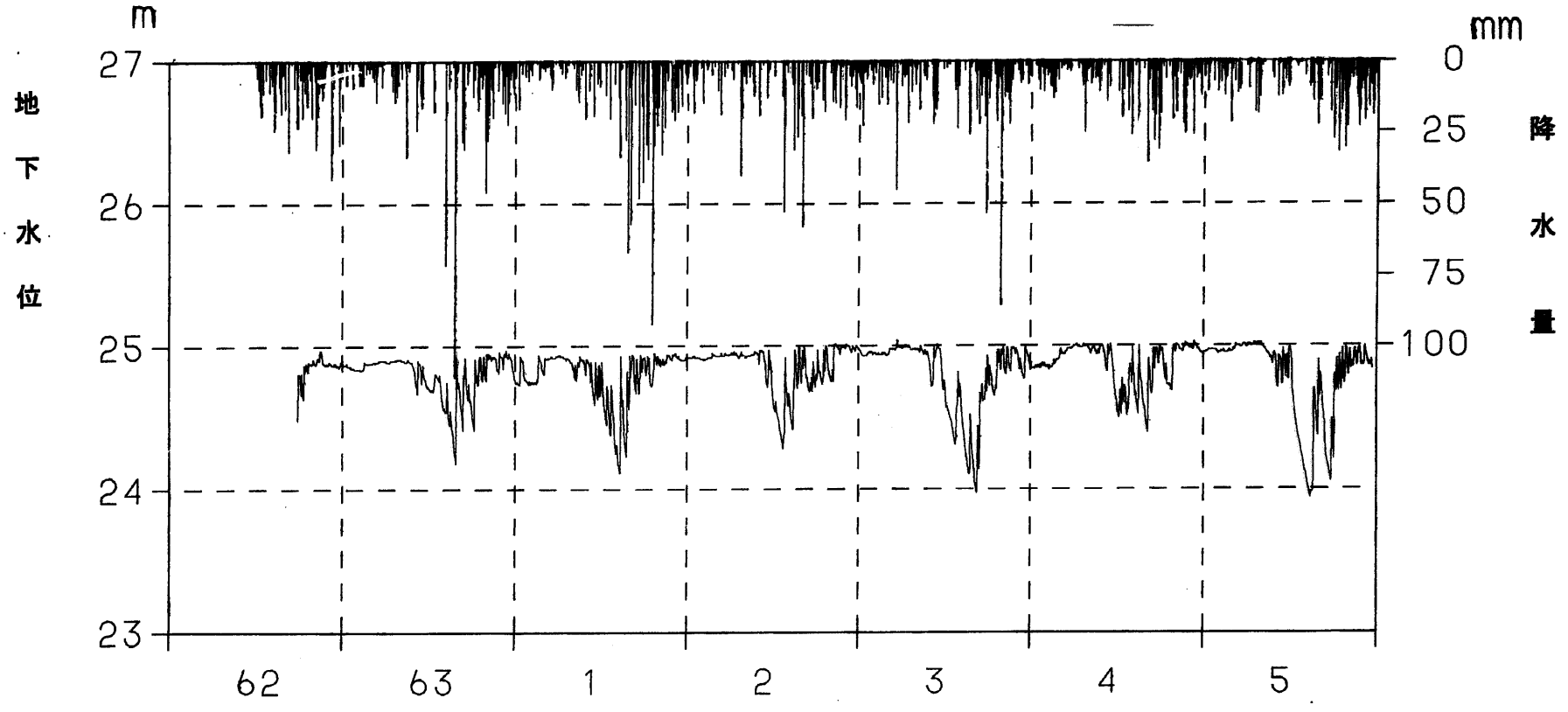


図2-21　地下水位経時変化図（B－5）

2．6．3　地下水かん養量の推定

（1）地下水位と降水量の関係

地下水かん養に寄与すると考えられる5mm以上の降水があった日を対象に、日別降水量とB－1観測井の日水位上昇量との関係を図2－22に示した。

この図によると、概ね降水量が増えるに従って水位上昇量も増加する関係が認められる。林地における浸透能が一般に数百mm程度であることから、今回対象とした降水量は全て地下へ浸透し、地下水体に付加されたと考えられる。

回帰分析の結果によると、次式に示すように降水量1mmに対して地下水位は6．3mm上昇する関係にある（相関係数＝0．58）。

$$H = 6.3P + 0.4 \qquad (2.1)$$

P：降水量

H：地下水位上昇量

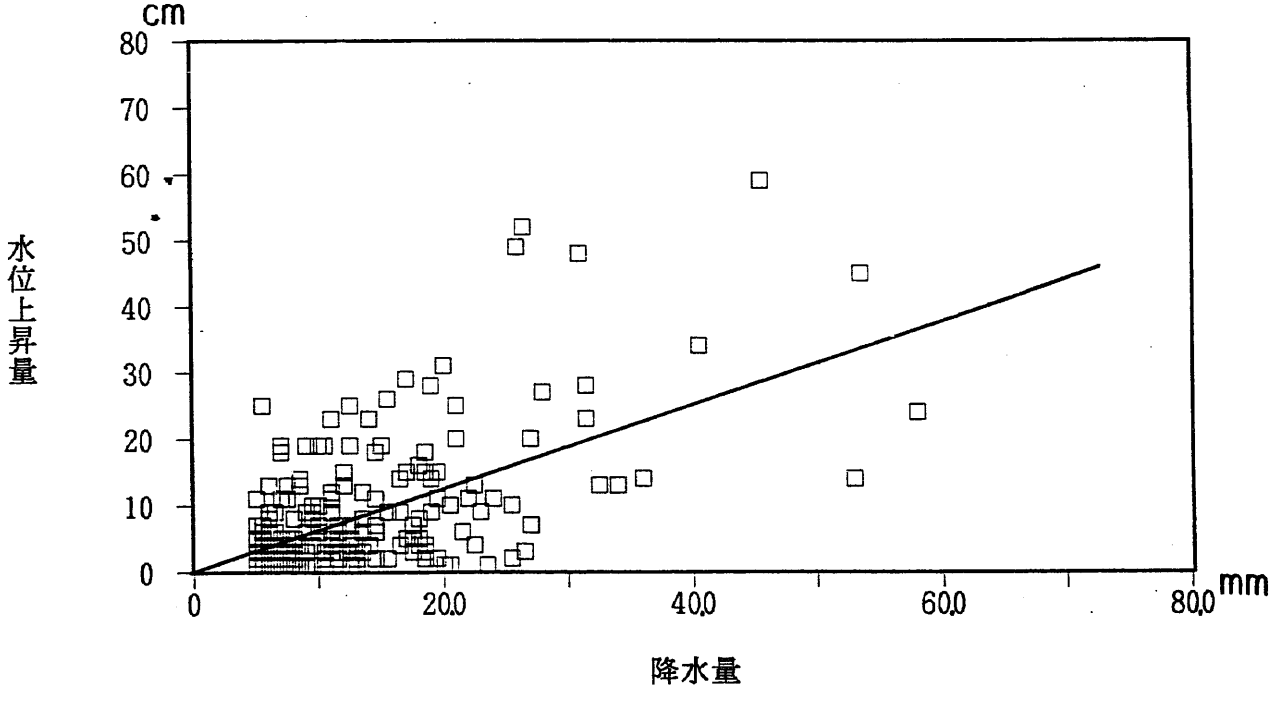


図2-22　降水量と地下水位上昇量の関係（B－1）

（2）地下水かん養量

地下水の貯留量変化（V）と地下水位変化（H）の関係は、有効間隙率（n_e）を用いて次式のように示される。

$$V = n_e \cdot H \qquad (2.2)$$

比浸出量（Sy）は有効間隙率と同義であるが、地層別の比浸出量は表２－11に示す通りである。Ｂ－１観測井の位置する地域は恵北層または更別層に覆われており、表２－11の中では砂岩に相当すると考えられ、比浸出量は８％程度と推定される（２章において整理した有効間隙率測定結果（更別層）は30～60％と極めて大きく、実態を反映していないと考ええられることから、今回の検討では一般的な値を用いることとした）。

降水量（P）のうち地下水へかん養される量（V）の割合をｒとすると、

$$r = V / P = n_e \cdot H / P = S_y \cdot H / P \qquad (2.3)$$

となる。

Ｂ－１観測井における降水量と地下水位上昇量との関係（H／P＝６．３）、および比浸出量の一般値（0.08）を（２．３）式に代入すると、ｒ＝０．５程度と推定される。

従って、地下水かん養量は幌延観測所の平均降水量（1188mm）の約１／２として、年間約600mm程度と推定される。

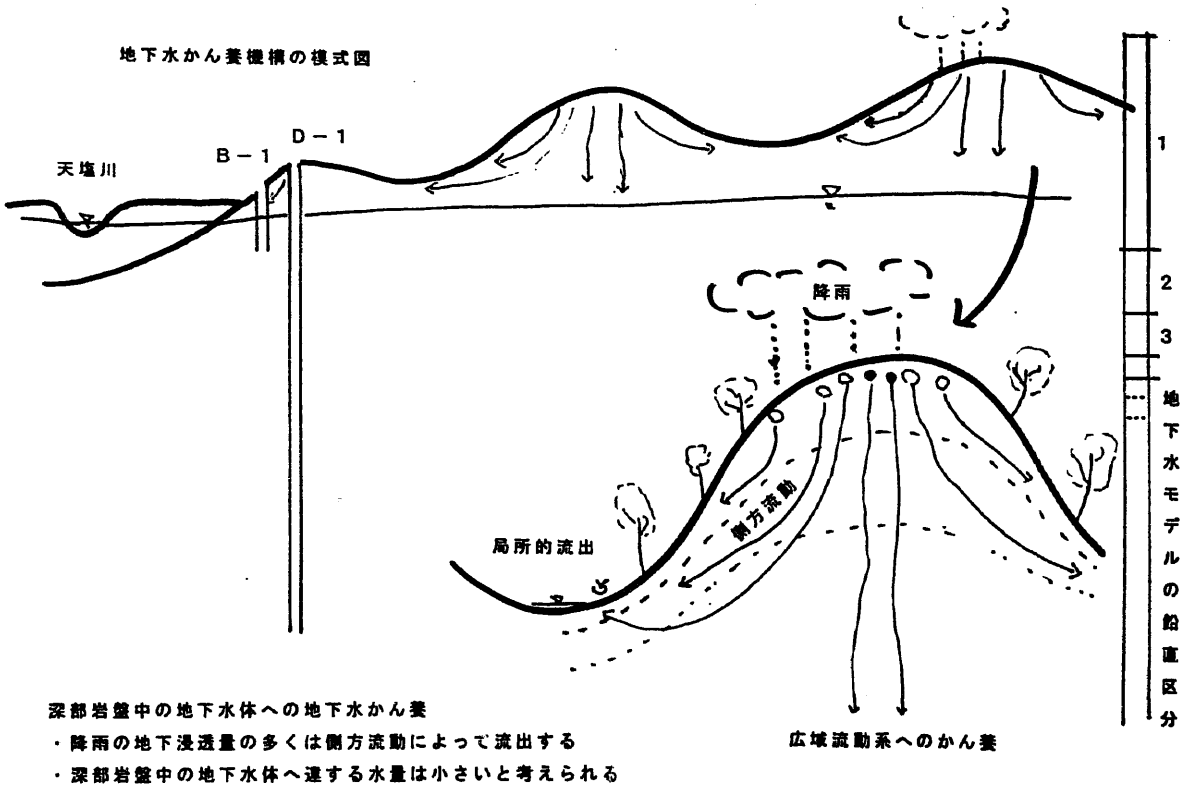
表２－12　地層の比浸出量

（水収支研究グループ[12]による）

物　　質	n	S_y	透水係数 m/秒(m/日)
粘　　土	45	3	5×10^{-7} (0.04)
砂	35	25	4×10^{-4} (34.5)
礫	25	22	2.5×10^{-3} (216)
砂　　礫	20	16	1.0×10^{-3} (86)
砂　　岩	15	8	3.5×10^{-4} (30)
石灰岩・頁岩	10	2	5×10^{-7} (0.04)
チャート・花こう岩	5	0.5	5×10^{-8} (0.004)

ここで算出した地下水かん養量は、地表面から深度20mより浅い地層内に賦存する不圧地下水に対するかん養量である。一般に地表付近の岩盤は風化が進んでおり、深部の新鮮な岩盤に比較して透水性はかなり高いと推定される。従って、このような風化帯中に存在する不圧地下水に対する地表からの浸透量は深部の新鮮な岩盤への浸透量と比較してかなり大きな値をとると推定される。いったん地表から浸透した浸透水の大部分は風化帯のなかを側方に流動し、中間流出などの形態により再び地表に流出すると考えられる。

従って、ここで算出した地下水かん養量が全て深部の岩盤内の地下水体に付加されるのではなく、そのうちのごく一部が深部に浸透していくに過ぎないと考えられる。現在観測されている地下水位観測井は全て浅部の風化帯中の不圧地下水を観測していると考えられることから、深部岩盤中の地下水体への浸透量は観測データからは求めることが困難であり、後述する地下水モデルにおける検証計算の中で同定することとした。



2．6．4　降水量と河川流出からみた水収支

天塩川流域では、建設省により地下水位と河川流量が観測されている[14)・16)]。地下水位観測井は天塩川河口に位置し、本地域から大きく離れているので、ここでは河川流量から水収支的にかん養量を推計する。

調査対象地域を流れる天塩川の河川流量観測所（円山観測所）の流出高はおよそ1,500mm（平成５年）と、幌延地区の降水量を大きく上回っている。

幌延地区より上流側の天塩川流域の降水量および河川流量の観測所（図２－23）の観測結果をみても（図２－24、図２－25）、同様の結果となっており、流出高が降水量を大きく上回っている。これは、上流域の山岳部における降雪量が過小に観測されている結果であると考えられる。

従って、調査対象地域の水収支を考える際には、降水量観測結果は使用せず、一般的な流出率を用いて検討を行うこととした。流出率は地形、植生などによって大きく変化するが（表２－13）、調査対象地域のかん養域は第三紀山地部または急峻な山地と考えられ、その一般的な流出率は、０．７～０．９程度と推定される。

表２－13　　日本河川の流出係数の値[32)]

急峻な山地	0.75～0.90
三紀層山岳	0.70～0.80
起伏のある土地および樹林	0.50～0.75
平坦な耕地	0.45～0.60
かんがい中の水田	0.70～0.80
山地河川	0.75～0.85
平地小河川	0.45～0.75
流域のなかば以上が平地である大河川	0.50～0.75

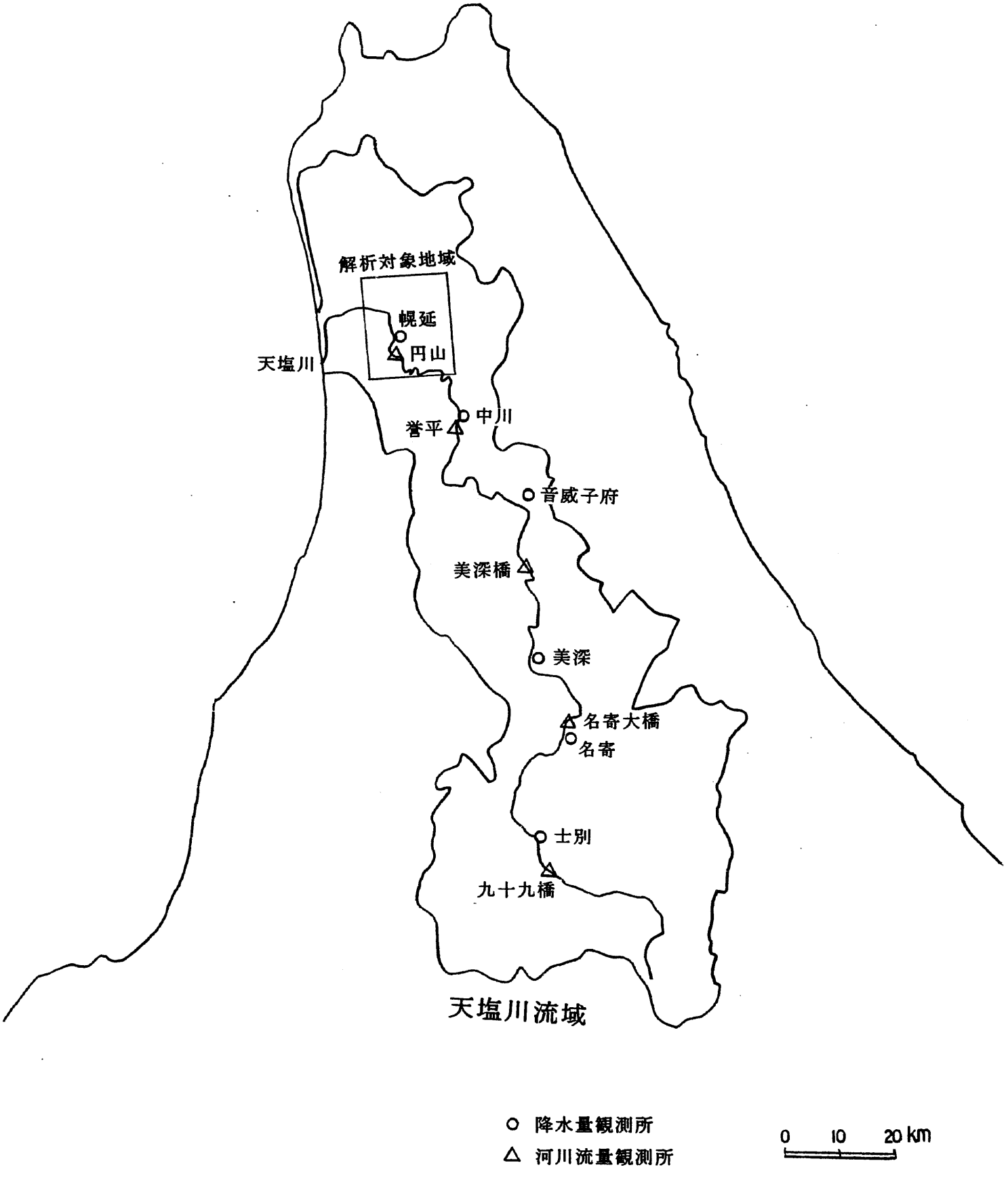


図2-23　観測所位置図（降水量、河川流量）

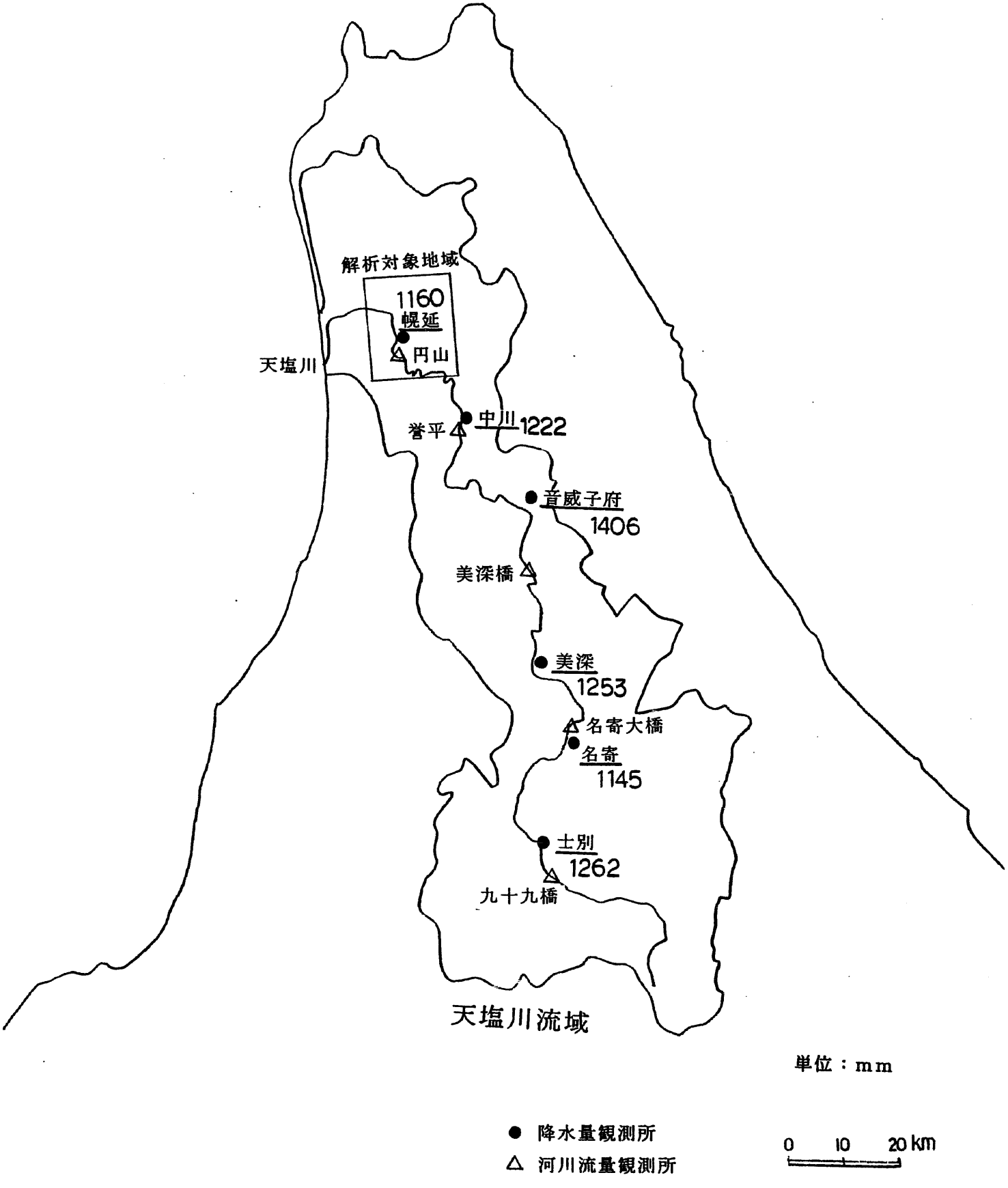


図2-24　降水量分布図（平成４年）

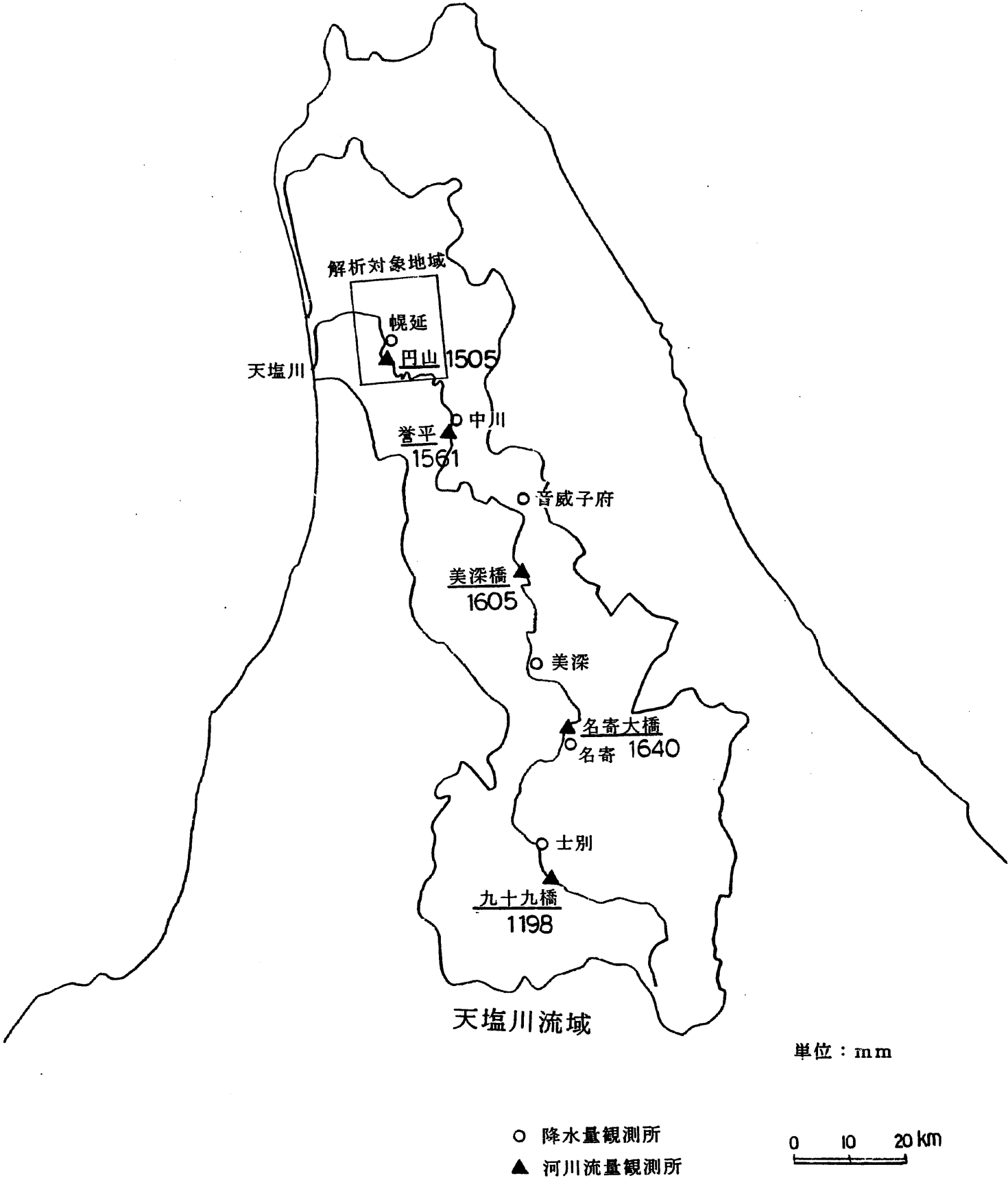


図2-25　河川流出高分布図（平成４年）

（流出高＝年間流量／流域面積）

2．6．5　水収支の概算

一般に水収支は次式のように示される。

$$P-E-D-R=Sg+Ss \qquad (2.4)$$

ここで、P：降水量、E：蒸発量、D：地表流出量（河川流出量）、R：地下水かん養量、Sg：地下水貯留変化量、Ss：地表水貯留変化量である。

年間を通じた水収支を考える場合には、地下水と地表水の貯留変化量はゼロとみなせるため、地下水かん養量は次式のように示される。

$$R=P-E-D \qquad (2.5)$$

ここで、流出率の推定結果より、

$$P=D/0.7 \qquad (2.6)$$

と仮定し、円山観測所の河川流出高（1,505mm）および平均蒸発量（326mm）を代入すると、R＝319mmとなる。また、流出率を0．9と仮定するとかん養量はマイナスとなってしまう。従って、水収支から推定した年間かん養量 319mmを最大値とし、0～319mmの間にあると推定される。

ここで推定した地下水かん養量は先に地下水位と降水量の関係から推定した地下水かん養量（約600mm）と比較するとかなり小さい。これは、水収支から推定した地下水かん養量にはいったん地表面から地下へ浸透した後、再び地表へ流出する成分が除かれているためと考えられる。従って、深部の岩盤中の地下水体への付加量を推定する場合には、水収支から推定された値の方がより的確であると考えられる。

以上の結果から、深部の岩盤中の地下水体への付加量は、0～319mmの間にあると推定される。

3．　地下水流動モデルの作成

3．1　モデルの基本構造

(1)　要旨

広域地下水流動を対象とした広域流動モデルと、浅層部の地下水の対象とした局所流動モデルを作成した。三次元的な地下水流動を解析するため、三次元モデルを採用した。

(2)　モデル化の対象

水文地質構造の解析結果より、幌延町開新地区およびその周辺では、地下水は、後背部（東部）の山地から低地方向に流動していることが明らかである。さらに、地下水の流動深度は約 1,000mにも及ぶと考えられる。地下水流動解析では、このような広域・深深度の地下水の挙動を対象とする必要がある。

一方、調査地域周辺では地下水を取水している可能性がある。また、天塩川流域には沖積粘土層が分布する。貯蔵工学センターや深地層試験場の掘削工事によって、局所的に浅層部の地下水を低下させ、取水量低下や地盤沈下発生の危険性も評価しておくことが必要と考える。

このように、広域・深深度の範囲と、局所・浅深度の範囲を解析するために、次の2種類の地下水流動モデルを作成した。

i　広域流動モデル：後背山地から浸透し、深深度の範囲で流動する広域の地下水流動を対象とする。

ii　局所流動モデル：浅層部（沖積低地や地下水取水対象）における地下水を対象とし、主に、貯蔵工学センターの掘削（20m）や、深地層試験場掘削に伴う局所的な影響を解析対象とする。

(3)　モデル構造の選択

地下水流動を模擬するシミュレーションモデルとしては、表３－１[20]に示すものがある。このうち汎用性が高く、複雑な条件が取り扱えるものは数値モデルである。地下水解析に限らず、理工学あるいは社会分野において用いられるシミュレーションモデル

とは、数値モデルを指すことが多い。

地下水流動モデルには以下の種類[21]がある。

i　平面二次元モデル（非漏水性被圧帯水層系、主に不圧帯水層系を対象）

ii　準三次元モデル（漏水性被圧帯水層系を対象）

iii　断面二次元モデル（主に一定流動軸上の漏水性被圧帯水層系を対象）

iv　三次元モデル（不圧～漏水性被圧帯水層系を対象）

本研究では地下水流動状況を三次元的に表現することができる三次元モデルを採用した。

表３－１　シミュレーションモデルの種類

多孔質体モデル (Porous Medeia Models)	砂箱などに作成した帯水層のミニチュア。 物質の拡散を調べる際には、現在も利用されている。
アナログモデル (Analog Models)	地下水の流動を相似な粘性流体や電気の流れに置き換えてシミュレートするもの。電気アナログモデルがもっとも代表的なものである。現在では、ほとんど利用されていない。
解析モデル (Analytical Model)	理想的な条件のもとで、地下水流動などの物理現象を表す方程式を解析的に解くもので、厳密解が得られる。井戸公式が代表的。解を得るに当たって設定した条件が、適用しようとする水文地質条件に合致するかを判断する必要がある。
数値モデル (Numerical Model) (Digital Computer Model)	地下水流動などの物理現象を表す方程式を数値解法で解く方法。複雑な水文地質条件でも適用可能であり、現在では、もっとも広く用いられている。

平山・前川（1994）[20]、水収支シミュレーション（地下水問題この10年間とその将来展望）：日本地下水学会編、p96

3．2　数値解法の選択

(1)　要旨

計算に関わる作業効率を勘案し、数値解法として差分法を採用した。三次元モデルを差分法で計算可能なコード（プログラム）として、汎用性が高いMODFLOWを用いた。

(2)　地下水流動方程式

地下水流動モデルの計算では以下の地下水流動方程式（偏微分方程式）を解くことになる。

i　支配方程式

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_x \frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_y \frac{\partial h}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_z \frac{\partial h}{\partial z}\right)+Qr-Qd=Ss\frac{\partial h}{\partial t} \qquad (3\text{-}1)式$$

式で、　h　：地下水位（計算値）

x，y，z　：座標　　t　：時間

K_x, K_y, K_z　：透水係数

Ss　：比貯留量

Qr　：地表からの地下水浸透量

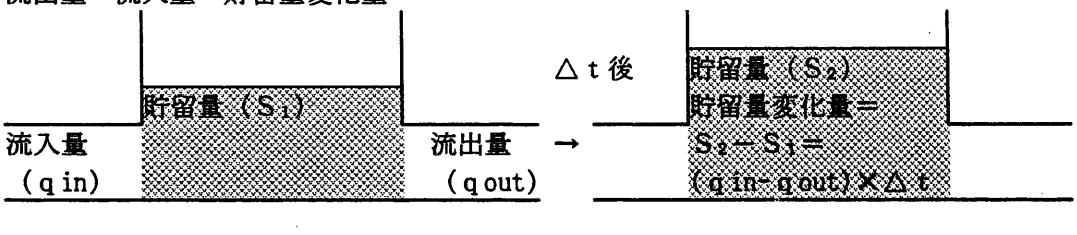
Qd　：揚水量および湧水量

上式は、地下水の水収支式と、ダルシーの法則を組み合わせることで導かれる。

ii　地下水の水収支式

単位体積の微小な立方体に流入（流出）する地下水の流量と、この立方体の中に貯留された地下水の量の変化の間には、以下の水収支式が成り立つ。

流出量－流入量＝貯留量変化量



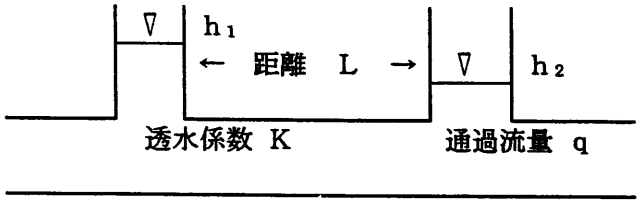
これを数値的に表すと、以下の水収支式が得られる。

$$\frac{\partial qx}{\partial x}+\frac{\partial qy}{\partial y}+\frac{\partial qz}{\partial z}=-Ss\frac{\partial h}{\partial t}+R \qquad (3\text{-}2)$$

R：揚水量と浸透量の合計

iii　ダルシーの法則

ダルシーの法則は、単位面積を通過する地下水の流量が、透水係数と動水勾配に比例することを示したもので、地下水解析の基本式としてよく知られている。



$$q = K \times \frac{h_1 - h_2}{L}$$

ダルシーの法則を三次元で示すと次のようになる。

$$qx = -Kx\frac{\partial h}{\partial x} \qquad qy = -Ky\frac{\partial h}{\partial y} \qquad qz = -Kz\frac{\partial h}{\partial z} \qquad (3\text{-}3)$$

(3-3)式を(3-2)式に代入すると、地下水流動の支配方程式である(3-1)式を得ることができる。

(3)　有限要素法と差分法

(3-1)式は偏微分方程式と呼ばれ、式に所定のデータを入力しても、このままでは直接計算することはできない。偏微分方程式を解くためには、別途数学的な手法を適用する必要がある。地下水流動の分野に限らず、土木工学や構造力学などで、数値的な解析を行なう場合、次のいずれかの手法を採ることが多い。

i　有限要素法[22)~23)]

解析対象範囲を三角形あるいは四角形の要素に分割し、要素内の地下水位の傾きを考慮しながら、各点の地下水位を計算する方法（図３－１(1)）。不規則な形状の範囲をよく近似することができる（図３－２）。数学的な精度は高い反面、計算に係る作業量が極めて大きい。

なお、図３－１(1)は空間方向の有限要素区分（離散化）を意味しているが、時間方向には、有限要素法ではなく差分法を用いることが一般的である。

ii　（有限）差分法[24)~25)]

解析対象範囲をグリッド（格子）に分割し、グリッド内の地下水位は平坦と仮

定して、周囲のグリッドとの水の出し入れを計算する方法（図３－１(2)）。基本的に対象範囲を直交した格子によって分割するため、複雑な形状は表現できない場合が生じる（図３－２）。数学的な精度はやや落ちるが、計算に係る作業量は、有限要素法よりも小さい。

地下水の解析では、両解析方法とも用いられている。理論解との比較など厳密性を要求される場合には有限要素法が、広域流動や掘削部の詳細な流動を検討する場合（計算量が大きい）は差分法が用いられる場合が多い。ただし、このような理由よりも、主な有限要素法と差分法の選択は「解きたい問題や利用者のこのみ(M. Anderson,1994)[26]」によるものであり、必ずしも論理的に使い分けられているわけではない。

本解析では、

i　平面および深度方向の対象領域が広く、広域の地下水流動を取り扱う必要がある

ii　詳細な掘削部形状を考慮する必要がある

ことから、計算量は極めて大きいことが明らかである。計算機容量、計算時間の点で差分法は有限要素法と比べはるかに少なく、効果的である。そこで、本研究では、差分法を解析手法として採用した。

(4)　計算コード

先の地下水流動方程式を差分法を用いて解くプログラム(計算コード)は市販ソフトから自社開発まで多くのものがある。これらは対象地域の特性や目的によって使い分け、あるいは、作成されるが、本研究では、使用する計算コードは実績が高いものであることが望ましいと判断した。

この点に関して見ると、現在、地下水シミュレーションの汎用モデルとして世界的に広く用いられているモデルは、ＭＯＤＦＬＯＷ[29] (McDonald･Harbabugh,1988)と、ＰＬＡＳＭ[30](Prickett･Lonnquist,1971)であり、両者共に差分法が用いられている。近年は、ＭＯＤＦＬＯＷが多く用いられる傾向にある。本研究でも、差分法を用いた三次元解析汎用ソフトである、ＭＯＤＦＬＯＷを用いて解析を実施することとした。

(5)　ＭＯＤＦＬＯＷ

ＭＯＤＦＬＯＷ[29](A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Groundwater Flow Model)は、米国地質調査所のMichael G. McDonaldとArlen W. Harbaughによって開発された三次元差分法地下水シミュレーションモデルである。このモデルは、国際地下水モデルセンター（ＩＧＷＭＣ）を通じてソースコードが公開されており、マニュアル類も完備されている。また、モデルの境界条件の与え方等、入出力の方法についても多くのレポートが発表されており、現時点では世界的に最も広く用いられている地下水シミュレーションモデルである。

ＭＯＤＦＬＯＷは、ブロック中心型の三次元差分法流動モデルである。各地層は、不圧、被圧いずれの場合も取り扱うことができ、被圧から不圧へと（またはその逆）変化する条件を取り扱うこともできる。地下水の涵養あるいは流出機構のモデル化においては、面的な涵養（降水等）、井戸による揚水あるいは注水、河川との水の出入り、排水溝からの地下水の流出、蒸発散による地下水の流去等、一般に考えうるほとんどの条件を考慮できる機能を有している。また、差分法の数値解法には、ＳＩＰ法、ＳＳＯＲ法、ＰＣＧ２法と呼ばれる手法が用意されている。

ＭＯＤＦＬＯＷは、ＦＯＲＴＲＡＮ言語で作成されているが、全体のプログラム構成は、メインルーチンとモジュールと呼ばれるサブルーチン群から構成されている。また、関連したモジュールは、一つのパッケージを構成しているが、適用するモデルの境界条件や数値解法の種類などによってパッケージの使いわけが行なわれている。

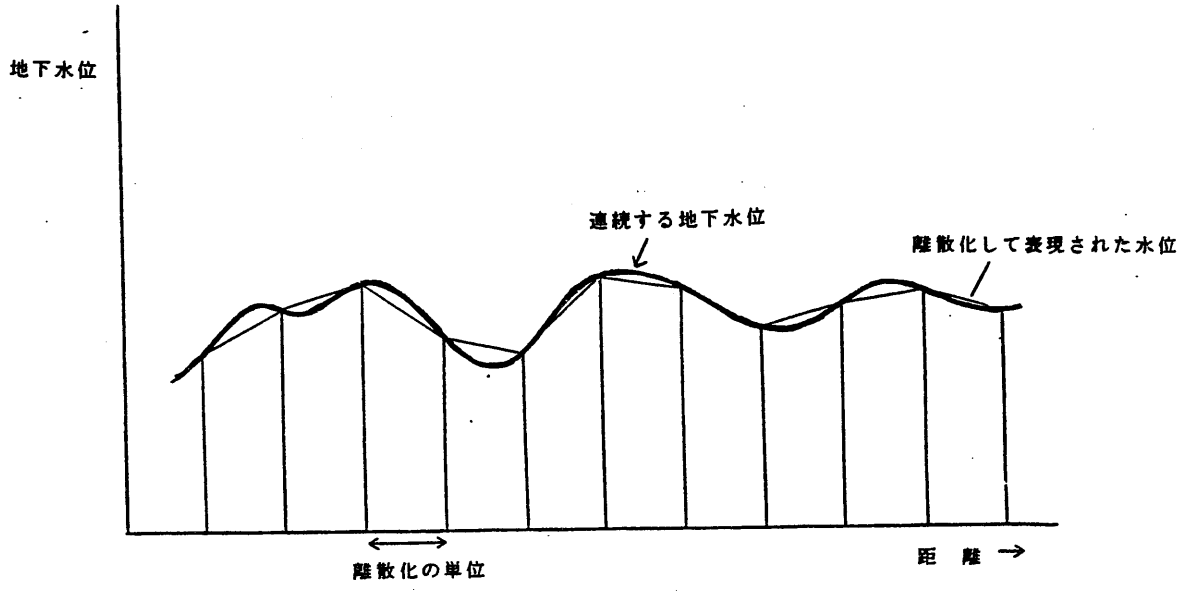


図３－１(1)　水位断面分布の離散化表現（有限要素法）

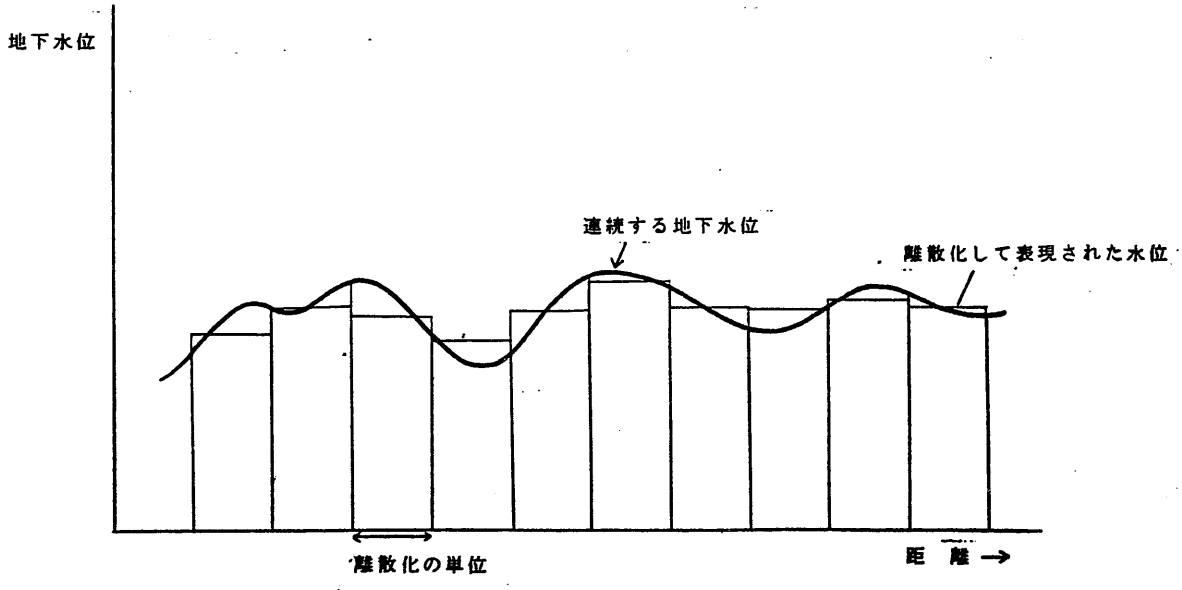
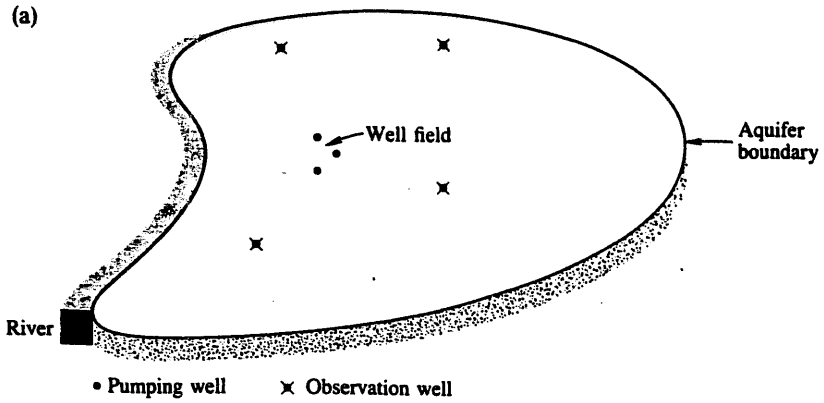
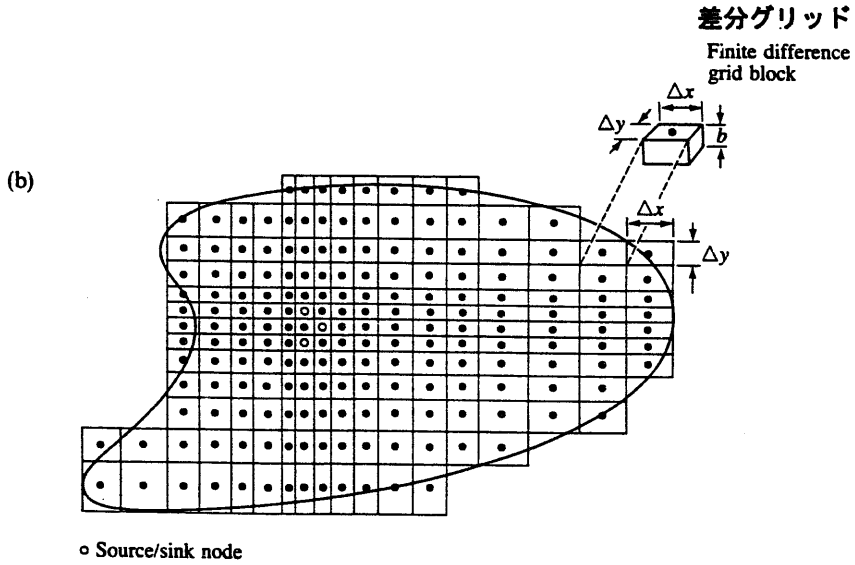


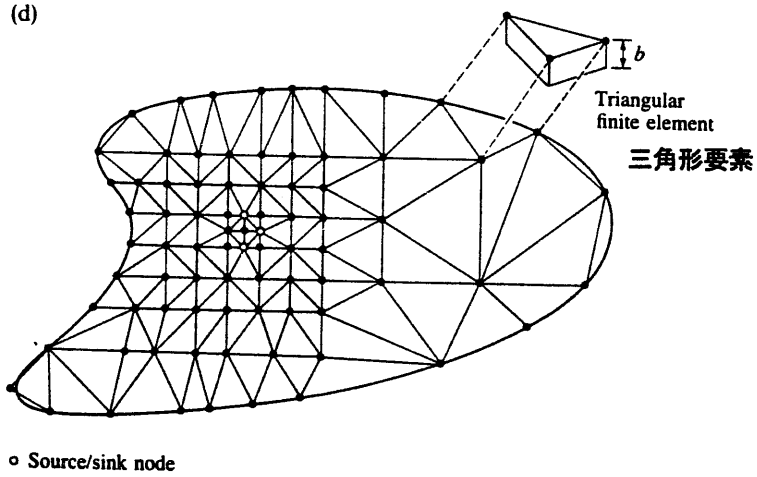
図３－１(2)　水位断面分布の離散化表現（差分法）



(a) 解析の対象範囲



(b) 差分法によるグリッド区分



(c) 有限要素法による要素区分

Wang H.F., M.P.Anderson (1982) [27] : INTRODUNCTION TO GROUNDWATER MODELING, W.H.FREEMAN AND COMPANY

図３－２　平面的な範囲を数値解析する際の区分（離散化）

3．3　広域流動モデル

(1)　要旨

広域流動モデルとして、地形・地質、地下水流動、そして貯蔵工学センターの構造等を勘案し、15km×18.25kmの範囲において39×40個のグリッド（格子）に分割した。鉛直方向には深層ボーリング深度の1,350mまでの範囲を13層に分割した。総グリッド数は 39×40×13＝20,280個である。

(2)　平面的な範囲

想定される地下水位分布より、広域流動モデルの平面的な範囲は次の通りとした（図3－3）。

東側　：　地下水位の尾根（分水界）

西側　：　自然の地下水流動のみでみると天塩川付近（地下水流出部）。
ただし、掘削に伴う浅層部への影響を見るために、西側の山地までを解析対象とする。

南側　：　地下水の流出域である天塩川沿いの低地

北側　：　自然の地下水流動のみで見ると地下水の流出域であるペンケオコッペ川沿いの低地。ただし、水文地質に関する情報が乏しいため、安全をとって、南沢牧場付近までを解析対象とする。

以上のように設定した解析範囲は、15km×18.25kmである。

(3)　解析対象深度

深地層試験場の掘削深度は約 800mである。鉛直断面での試錘孔での水位観測結果と接谷面図から推定した鉛直断面での地下水流動（図2－15）より、約 1,000mの深度までの地下水が 800mの深度に到達すると想定される。本解析では、流動範囲外の可能性はあるが、深層ボーリングの深度、すなわち、地質に関する情報がある 1,350mまでを解析対象深度とした。

(4)　平面的なグリッド形状

差分法で地下水流動を計算するため、図3－3に示す対象範囲を、39×40個のグリッ

ド（格子）に区分した（図３－４）。区分に当たっては、グリッドの形状が、地層境界、断層位置、および貯蔵工学センターの範囲に概ね一致するようにした。

(5)　貯蔵工学センター計画のモデル条件化

ｉ）　深地層試験場

深地層試験場の平面的なレイアウト[28]を図３－５に、垂直方向のレイアウト[28]を図３－６に示す。

差分グリッドは、深地層試験場の横坑位置や縦坑位置がグリッド形状に一致するようにした（図３－７）。付図－５には深地層試験場周辺のグリッド詳細図を示す。なお、後述する局所モデルでも、深地層試験場周辺のグリッド形状は同一である（グリッド番号のみが異なる）。

垂直方向には、深地層試験場の構造および地層境界を考慮して、広域モデルでは深度方向に 13層に分割した（図３－６）。総グリッド数は 39×40×13＝ 20,280 個である。

ii）　貯蔵工学センター

施設レイアウト[28]をもとに図３－７に示す範囲で、地表面より深度20m（標高－７ｍまで）を掘削するものとした。

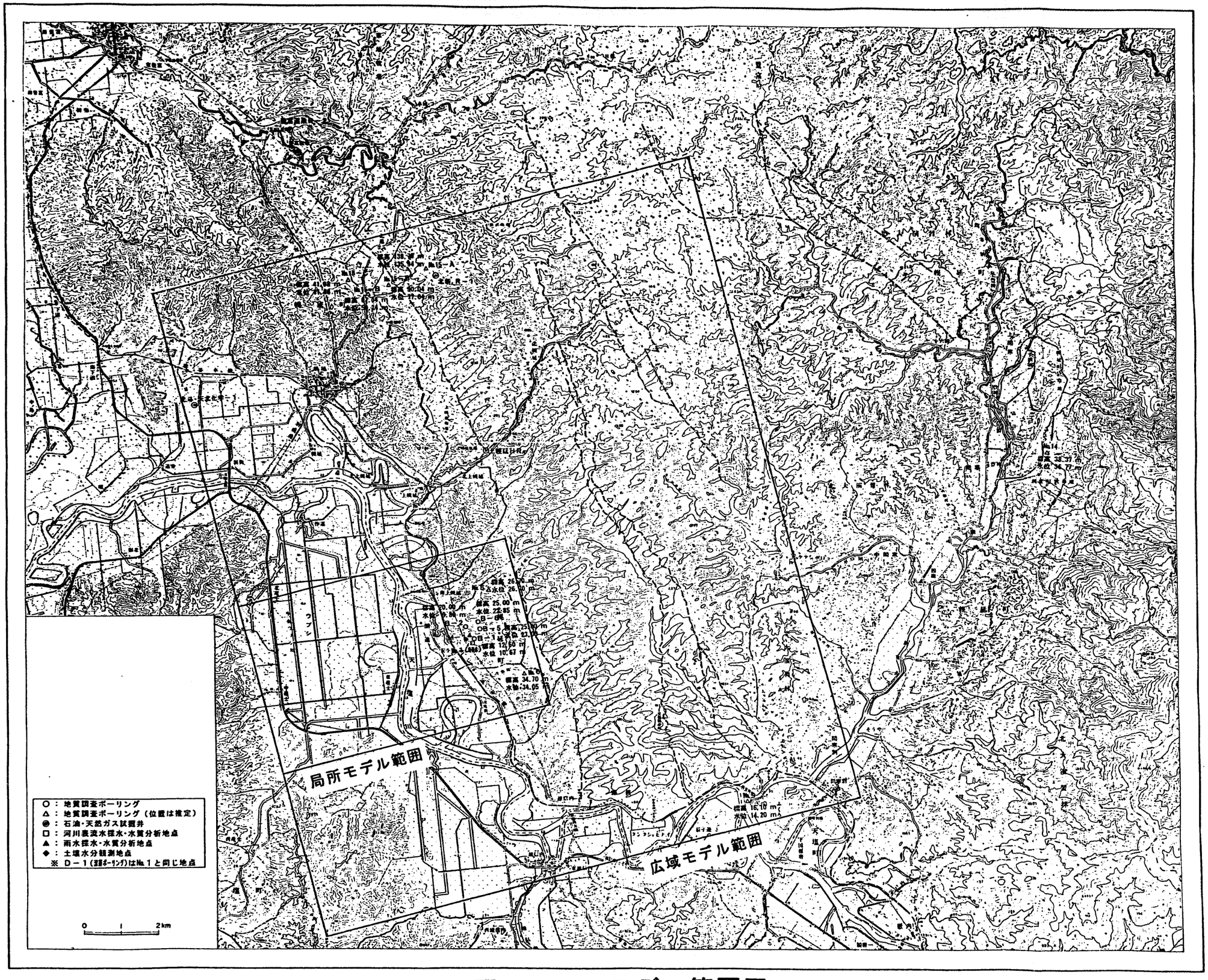

局所モデル範囲
広域モデル範囲
○：地質調査ボーリング
△：地質調査ボーリング（位置は推定）
◉：石油・天然ガス試掘井
□：河川表流水採水・水質分析地点
▲：雨水採水・水質分析地点
◆：土壌水分観測地点
※ D－1（深層ボーリング）はNo.1と同じ地点
0 1 2km

図 3－3　モデル範囲図

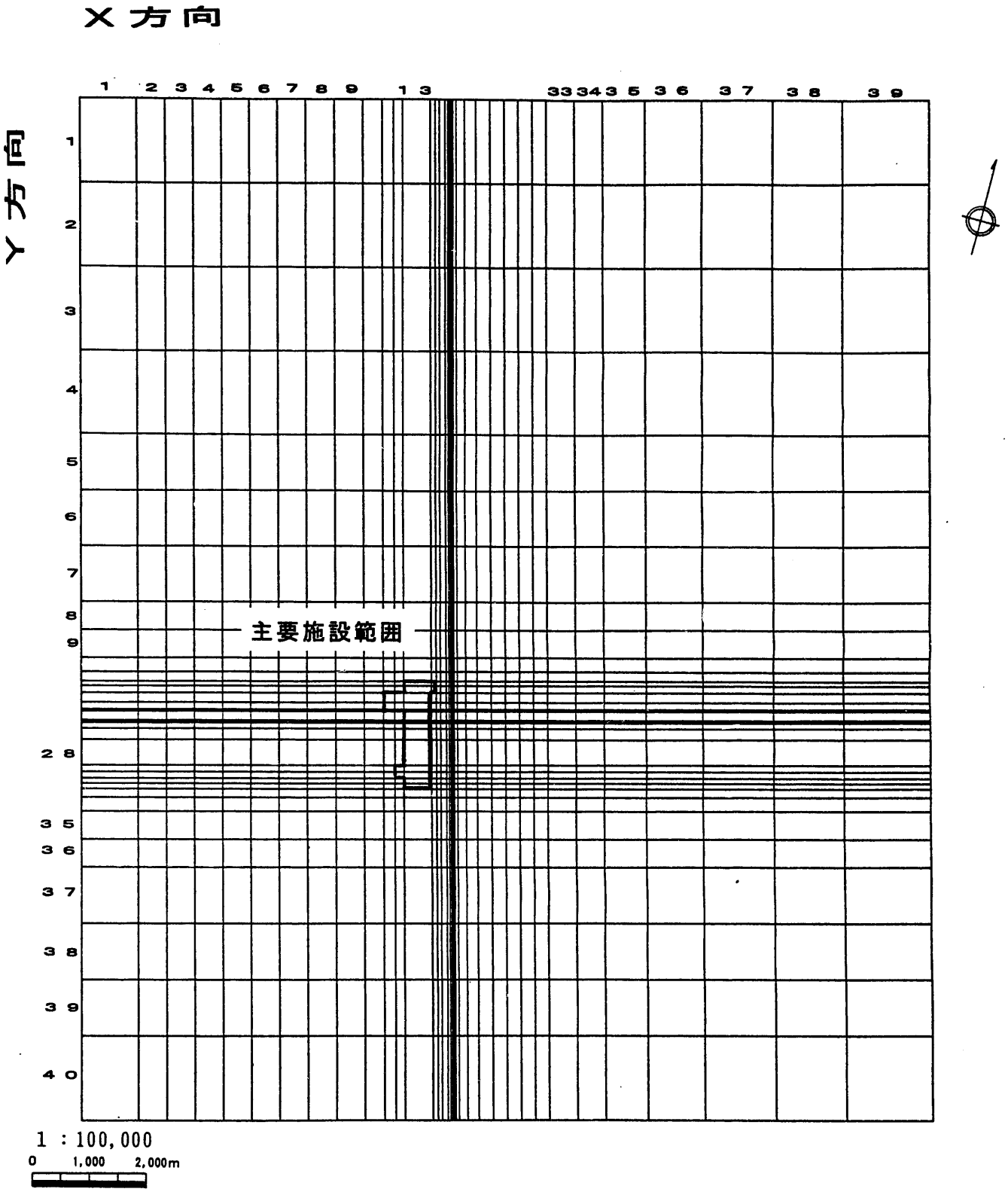


図3－4　広域モデルのグリッド平面図（全体図）

注）数字はグリッド番号を示す

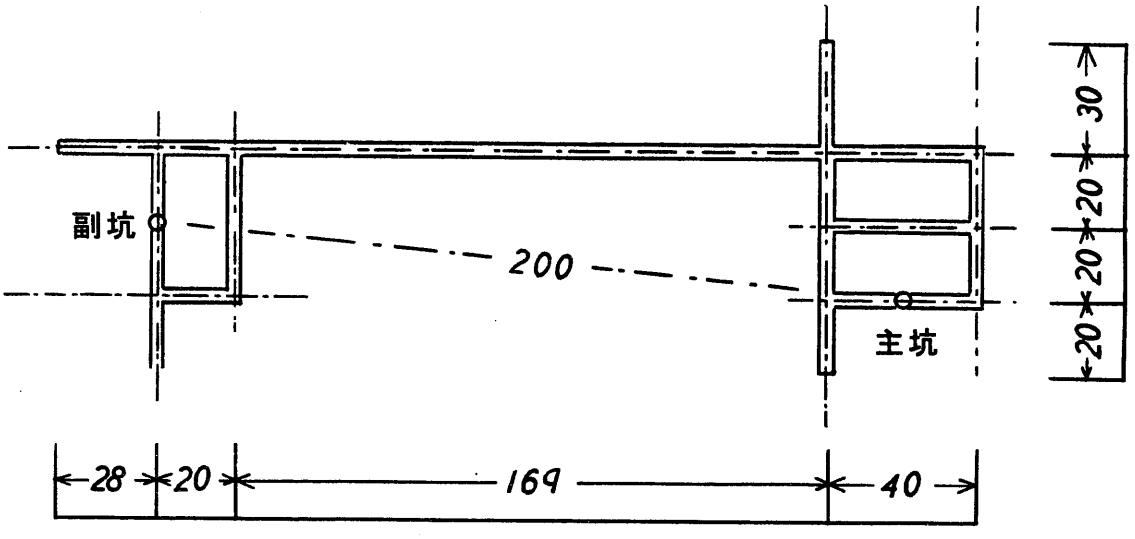


図 3－5　深地層試験場平面レイアウト図

深層ボーリング調査資料（動燃）[8]による

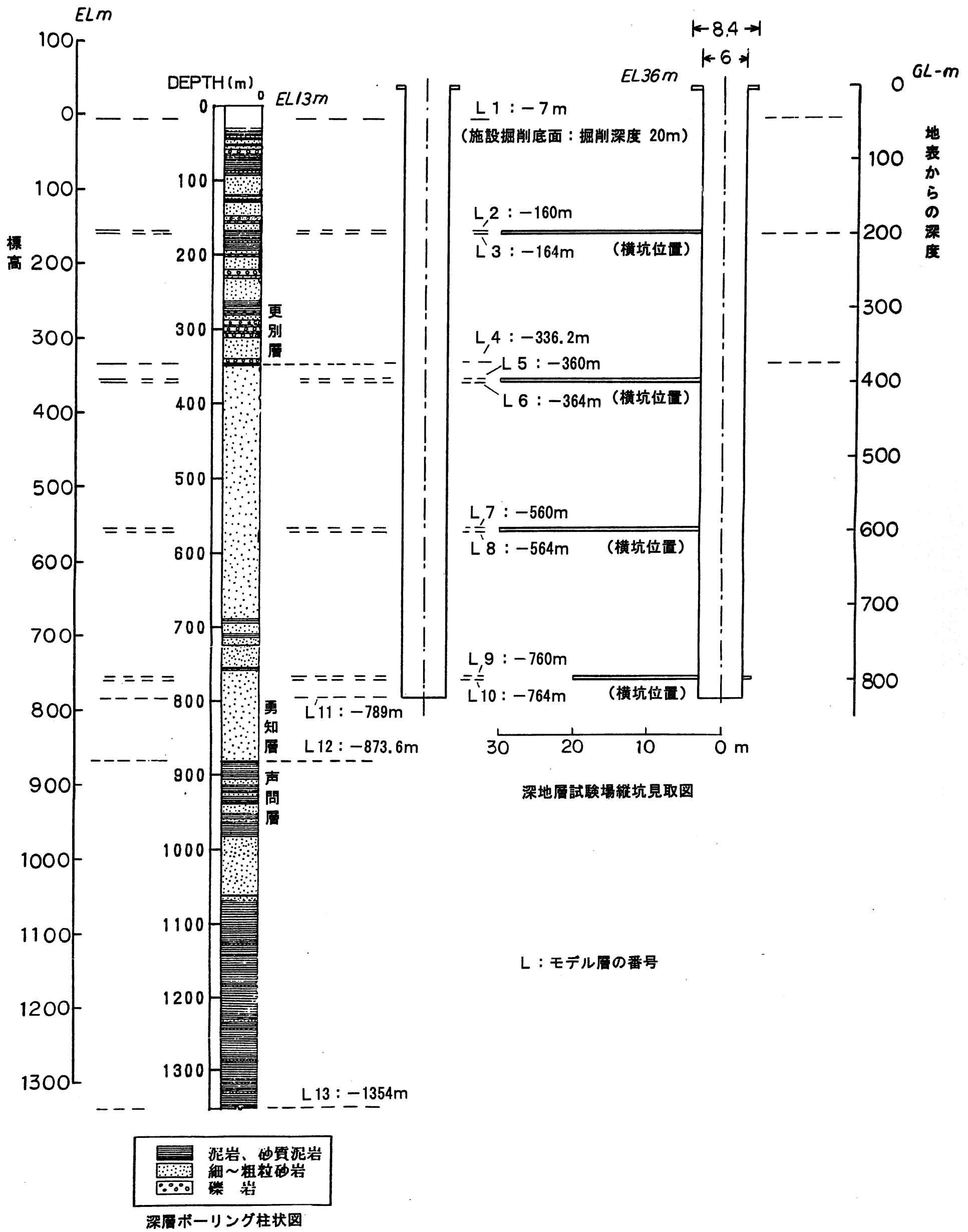


図 3−6　広域地下水流動モデルの深度区分

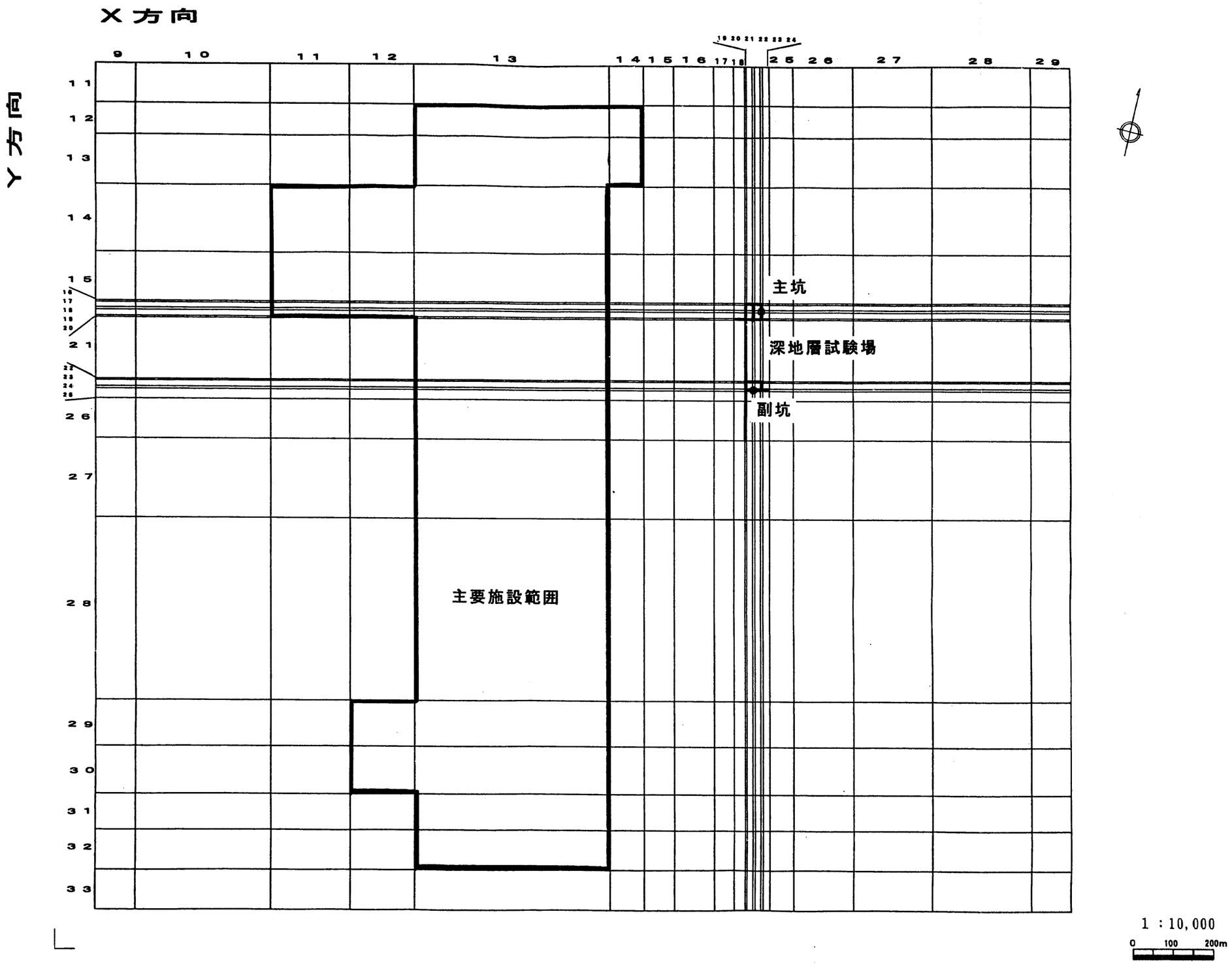


図 3-7 広域モデルのグリッド平面図（拡大図）

注）数字はグリッド番号を示す

3．4　局所流動モデル

(1)　要旨

局所流動モデルとして、地形・地質、地下水流動、そして貯蔵工学センターの構造等を勘案し、7.33km×4.75kmの範囲において30×35個のグリッド（格子）に分割した。垂直方向には更別層の分布範囲の 349.2mまでの深度を11層に分割した。総グリッド数は30×35×11＝11,550個である。

(2)　平面的な範囲

想定される地下水位分布より、局所流動モデルの平面的な範囲は次の通りとした（図3－3）。

東側　：　主要な透水層を透水性が相対的に大きいと思われる声問層主部相の分布範囲（大曲断層まで）

西側　：　掘削に伴う沖積層への影響を検討するために、沖積層が分布する西側の山地際までを解析対象とする。

南側・北側：　掘削による影響範囲は不明であるので、下表に示す揚水井戸の影響範囲を準用し、礫質土の場合の影響半径（1500m）を用いた。貯蔵工学センターから1.5kmの範囲を対象領域とした。

以上のように、設定した解析範囲は、7.33km×4.75kmである。

表　揚水井戸の影響半径[31]

土質 区分	土質 粒径（mm）	影響半径 R(m)
粗レキ	>10	>1500
レキ	2～10	500～1500
粗砂	1～2	400～500
粗砂	0.5～1	200～400
粗砂	0.25～0.5	100～200
細砂	0.10～0.25	50～100
細砂	0.05～0.10	10～50
シルト	0.025～0.05	5～10

(2) 解析対象深度

透水性が大きい更別層の分布範囲として、D－1（深層ボーリング）結果より、深度349.2m（標高 -336.2m）までを解析対象とした。

(3) 平面的なグリッド形状

差分法で地下水流動を計算するため、図3－3に示す対象範囲を 30×35個のグリッド（格子）に区分した（図3－8）。区分に当たっては、グリッドの形状が、地層境界、断層位置、および貯蔵工学センターの範囲に概ね一致するようにした。

(4) 貯蔵工学センター計画のモデル条件化

i） 深地層試験場

差分グリッドは、深地層試験場の横坑位置や縦坑位置[27]がグリッド形状に一致するようにした（図3－9）。深地層試験場周辺のグリッド形状は広域モデルと同一である（グリッド番号のみが異なる）。

垂直方向には、深地層試験場の構造および地層境界を考慮して、広域モデルでは深度方向に 11層に分割した（表3－2）。総グリッド数は 30×35×11＝ 11,550個である。

ii） 貯蔵工学センター

施設レイアウト図をもとに図3－9に示す範囲で、地表面より深度20m（標高－7m まで）を掘削するものとした。

表3－2　局所モデルの深度区分

局所モデル					
LAYER No.	上面標高(TPm)	下面標高(TPm)	区間幅(m)	地層	備考
1	13m以上	-7.0	20m以上	沖積	施設掘削面
2	-7.0	-20.0	13.0	沖積	沖積基底
3	-20.0	-40.0	20.0	沖積	
4	-40.0	-60.0	20.0	更別	
5	-60.0	-110.0	50.0	更別	
6	-110.0	-160.0	50.0	更別	
7	-160.0	-164.0	4.0	更別	横坑1(φ4m)
8	-164.0	-204.0	40.0	更別	
9	-204.0	-244.0	40.0	更別	
10	-244.0	-284.0	40.0	更別	
11	-284.0	-336.2	52.2	更別	

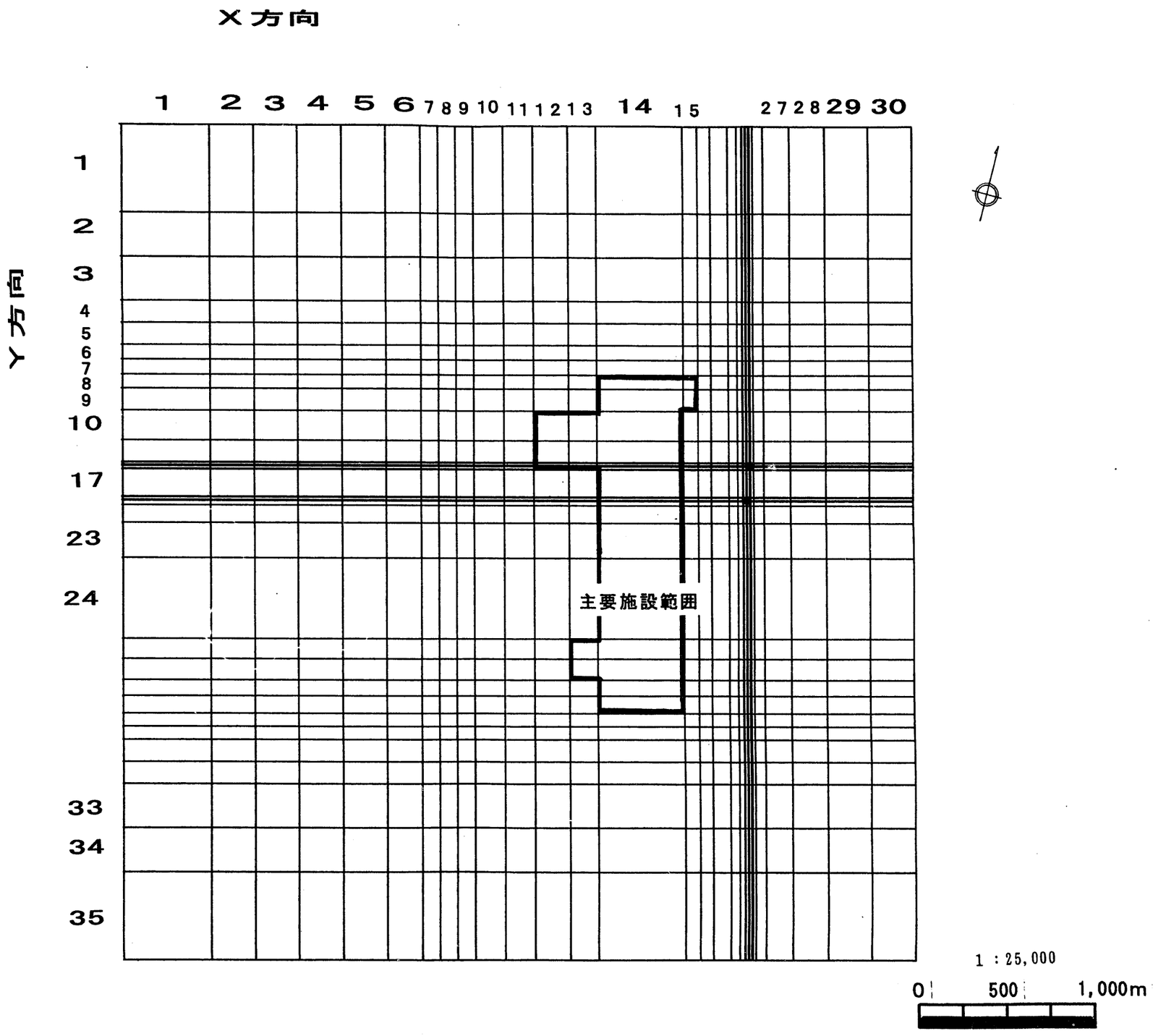


図 3－8 局所モデルのグリッド平面図（全体図）

注）数字はグリッド番号を示す

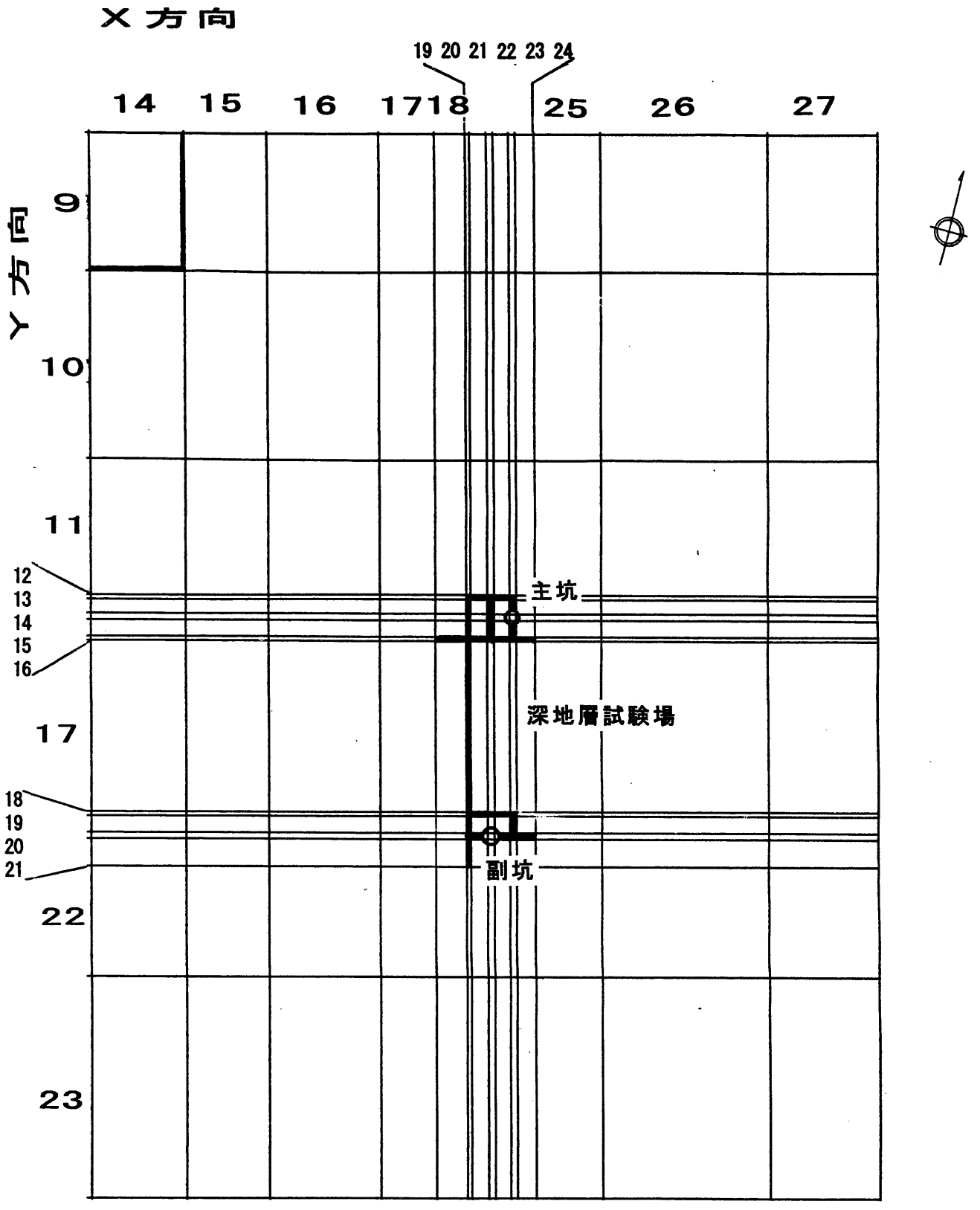


図 3－9 局所モデルのグリッド平面図（拡大図）

1：5,000

0 100 200m

注）数字はグリッド番号を示す

３．５　モデルパラメータ

２章で述べた水文地質構造調査結果をもとに、表３－３に示すパラメータを用いた。図３－10～17には、地質平面図および断面図より推定した深度別地質平面分布図を示す。地下水流動モデルの各グリッドがどの地質区分に該当するかを図より読み取り、表３－３の値を与えた。

8

表3－3　入力パラメーター一覧表

地　層	算出方法	透水係数	有効空隙率	備　考
沖積層	単純平均値	7.80×10^{-5}cm/sec	0.467	透水係数は更別層上部の値 有効空隙率は更別層の値
	上　限　値	2.00×10^{-4}cm/sec	0.565	
	下　限　値	1.55×10^{-5}cm/sec	0.338	
恵北層	単純平均値	7.80×10^{-5}cm/sec	0.467	透水係数は更別層上部の値 有効空隙率は更別層の値
	上　限　値	2.00×10^{-4}cm/sec	0.565	
	下　限　値	1.55×10^{-5}cm/sec	0.338	
更別層	単純平均値	8.53×10^{-5}cm/sec	0.467	透水係数は更別層上部と 下部の相乗平均
	上　限　値	2.32×10^{-4}cm/sec	0.565	
	下　限　値	1.84×10^{-5}cm/sec	0.338	
勇知層	単純平均値	1.15×10^{-5}cm/sec	0.378	
	上　限　値	6.97×10^{-5}cm/sec	0.437	
	下　限　値	2.80×10^{-6}cm/sec	0.344	
声問層	単純平均値	3.12×10^{-7}cm/sec	0.351	
	上　限　値	6.50×10^{-7}cm/sec	0.394	
	下　限　値	1.58×10^{-7}cm/sec	0.300	

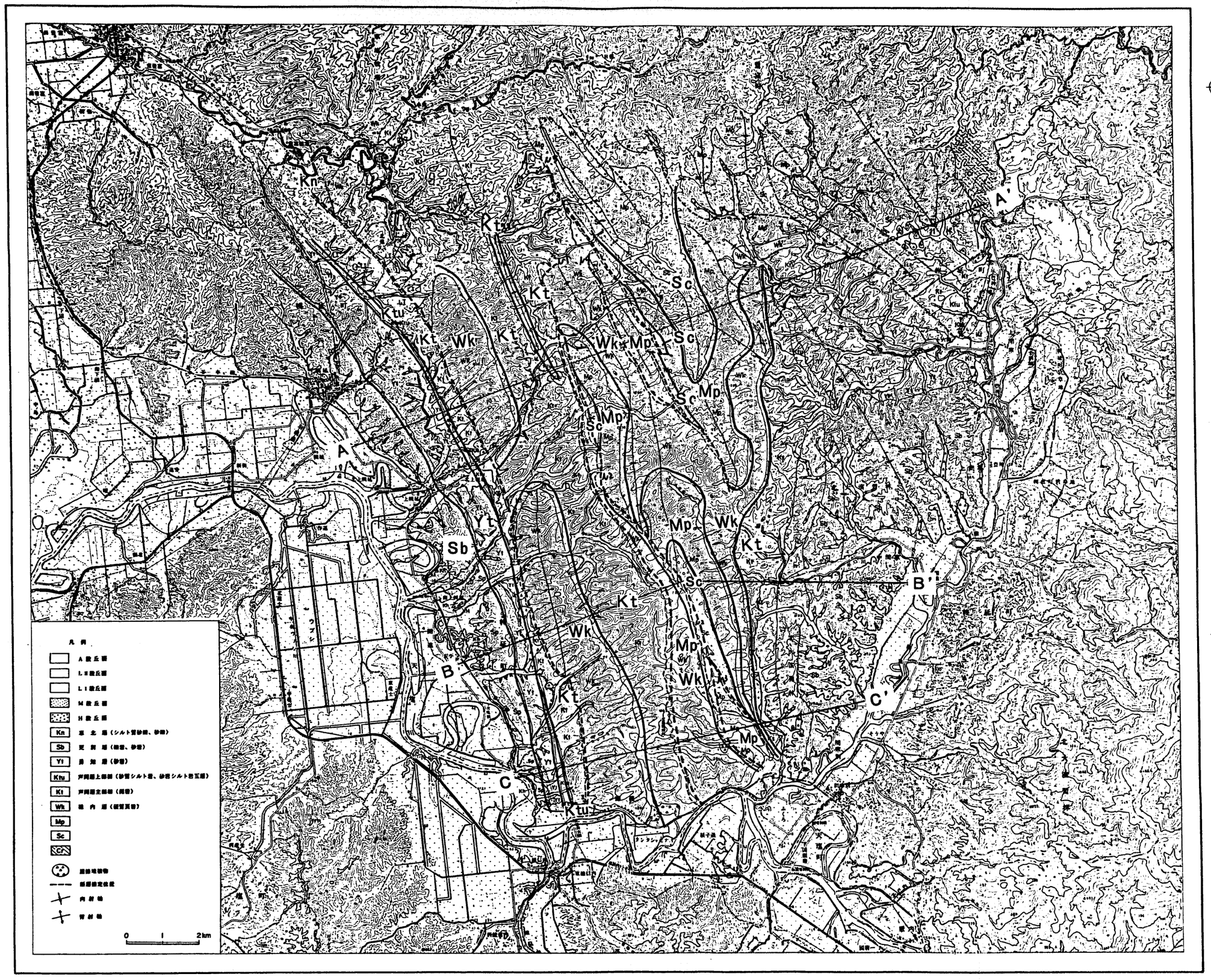


図 3—10　深度別推定地質平面図（—7m）

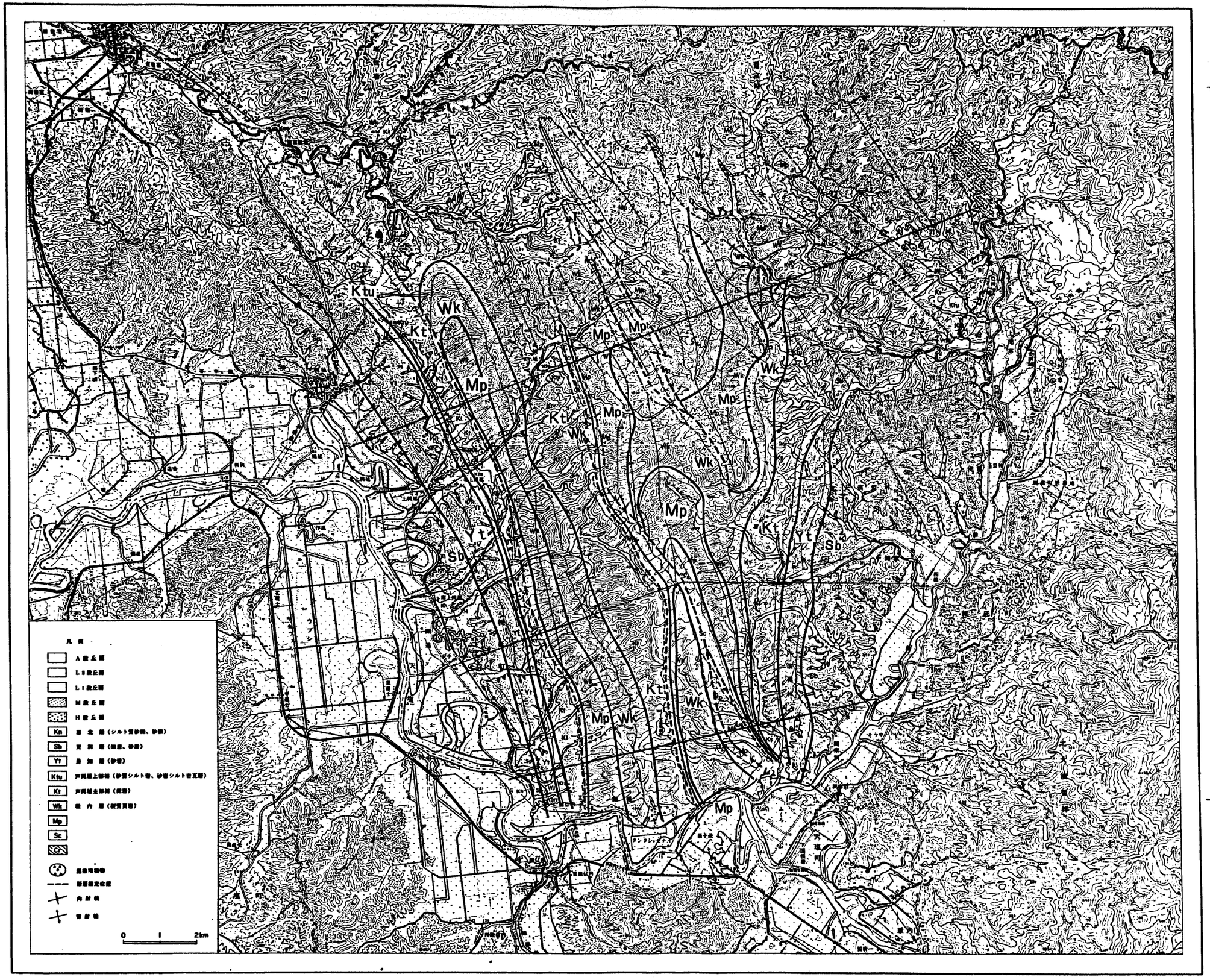


図 3—11 深度別推定地質平面図（—164m）

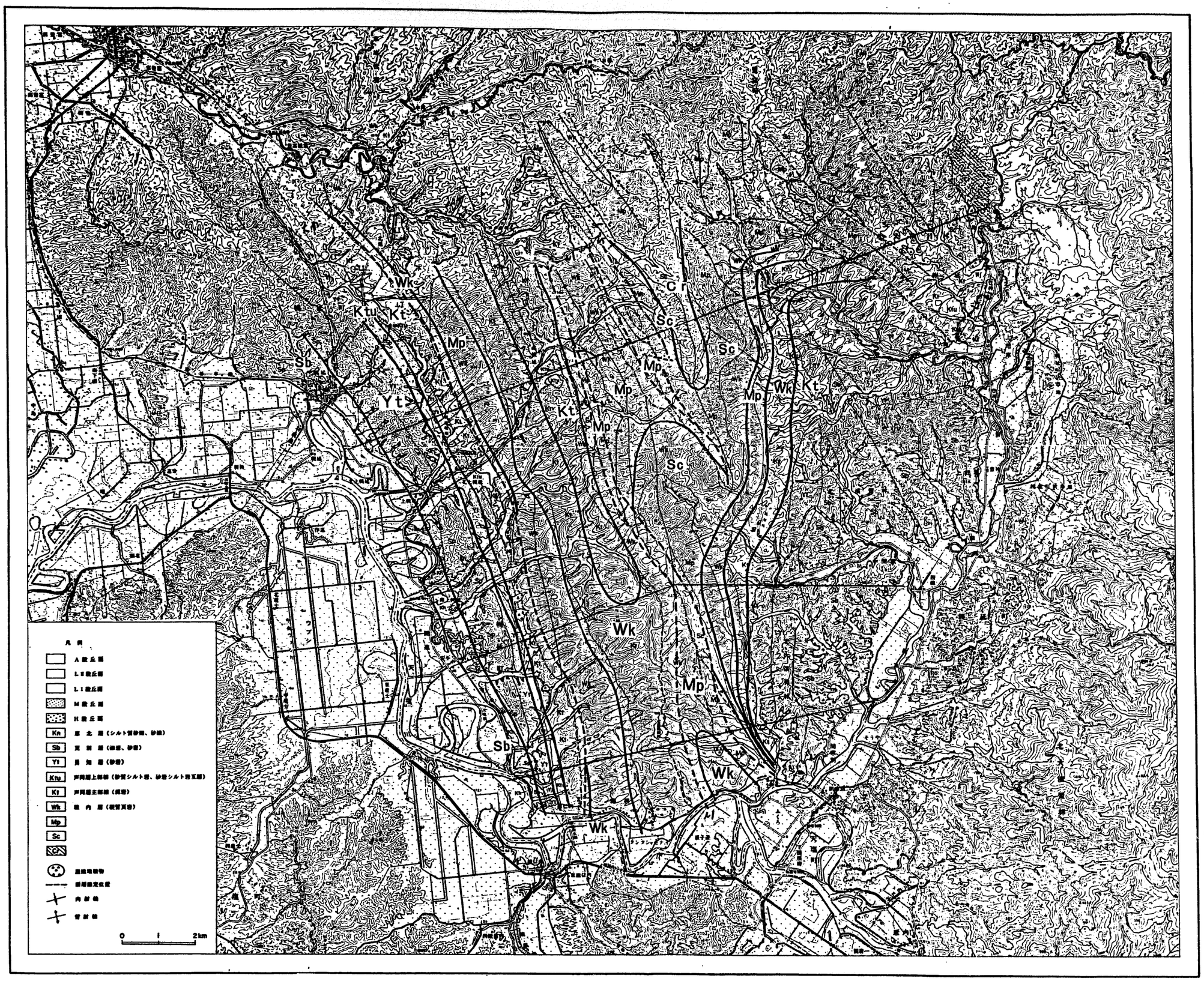


図 3－12 深度別推定地質平面図（－336.2m）

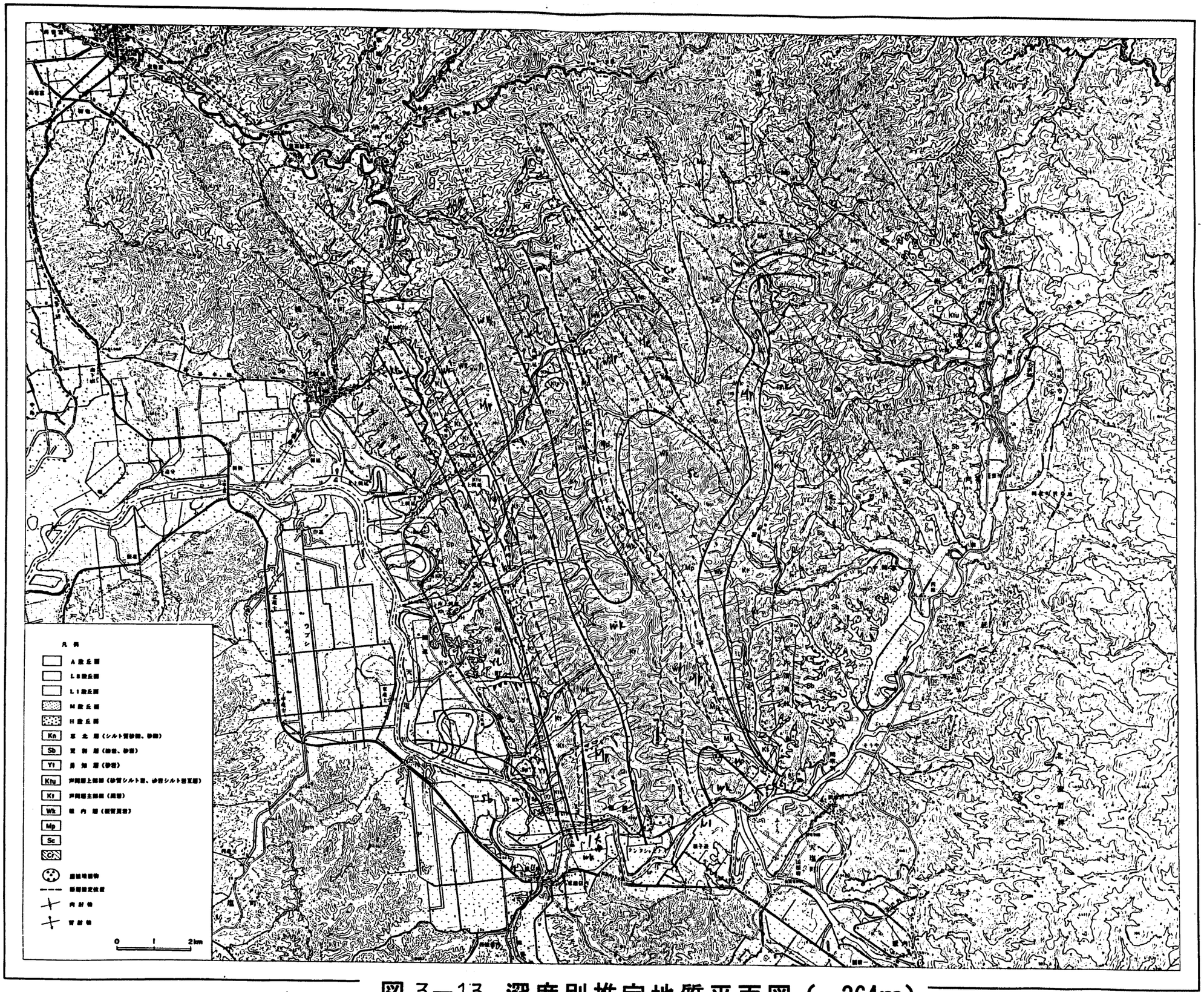


図 3－13 深度別推定地質平面図（－364m）

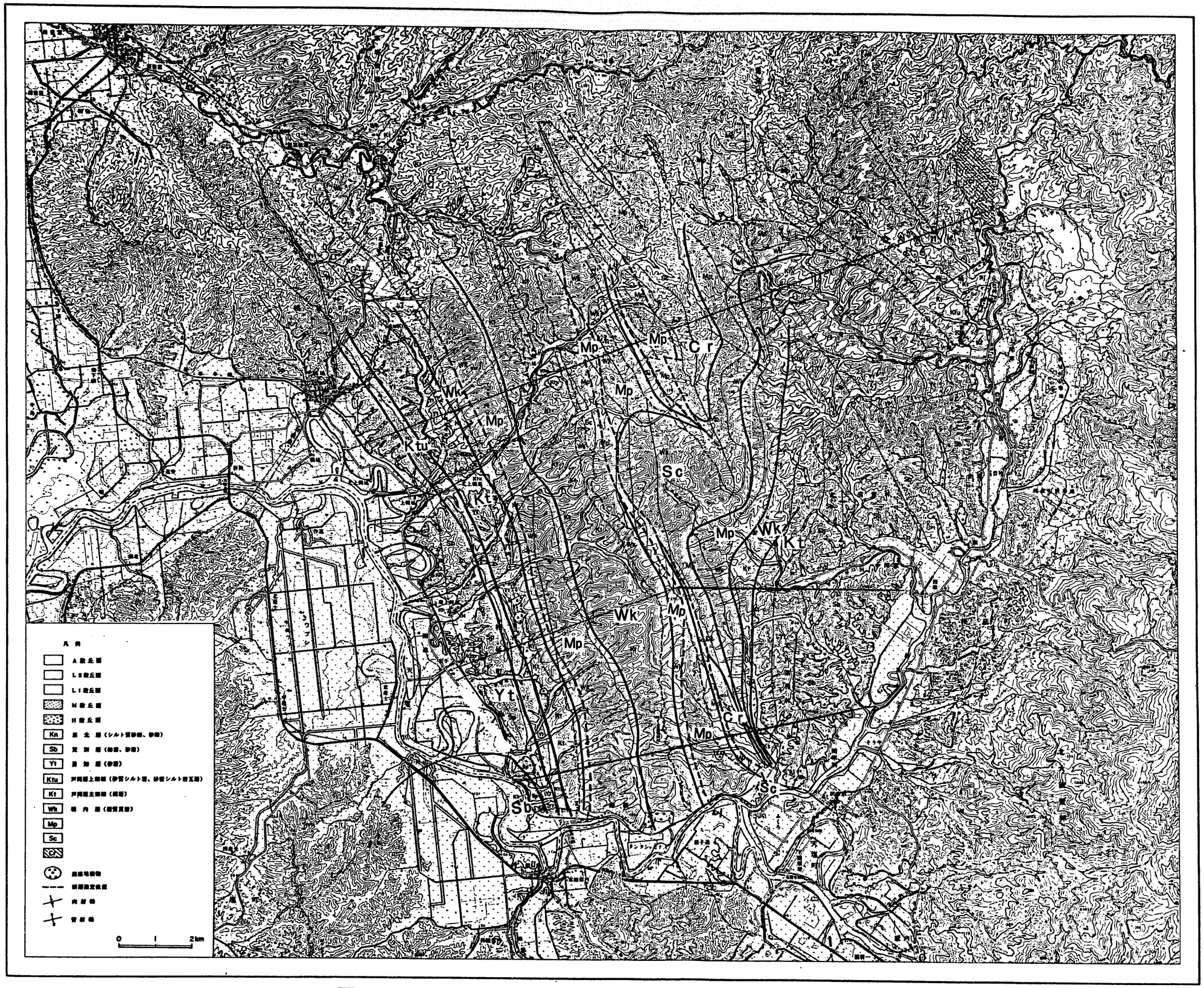


図3－14 深度別推定地質平面図（－564m）

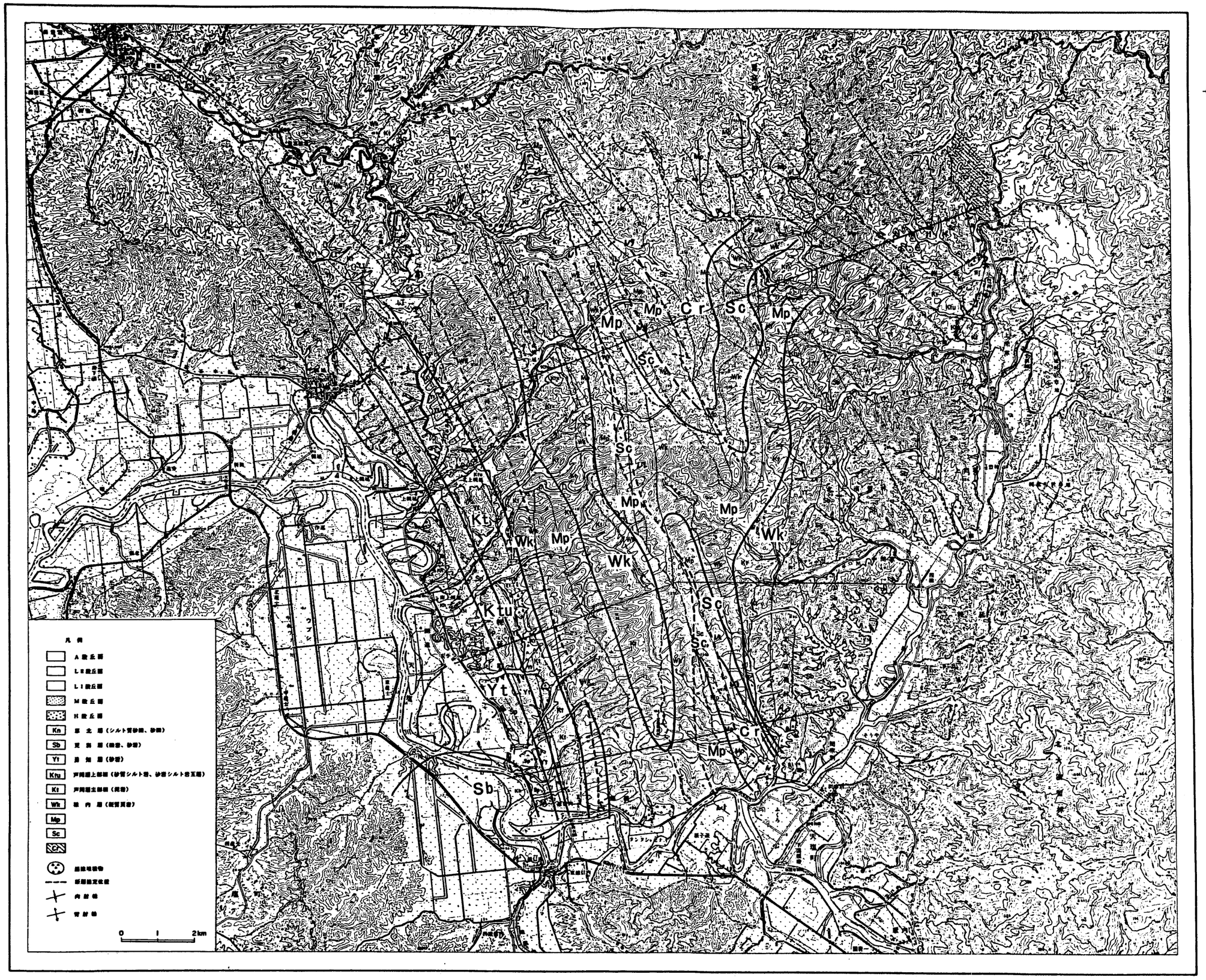


図３－15　深度別推定地質平面図（－764m）

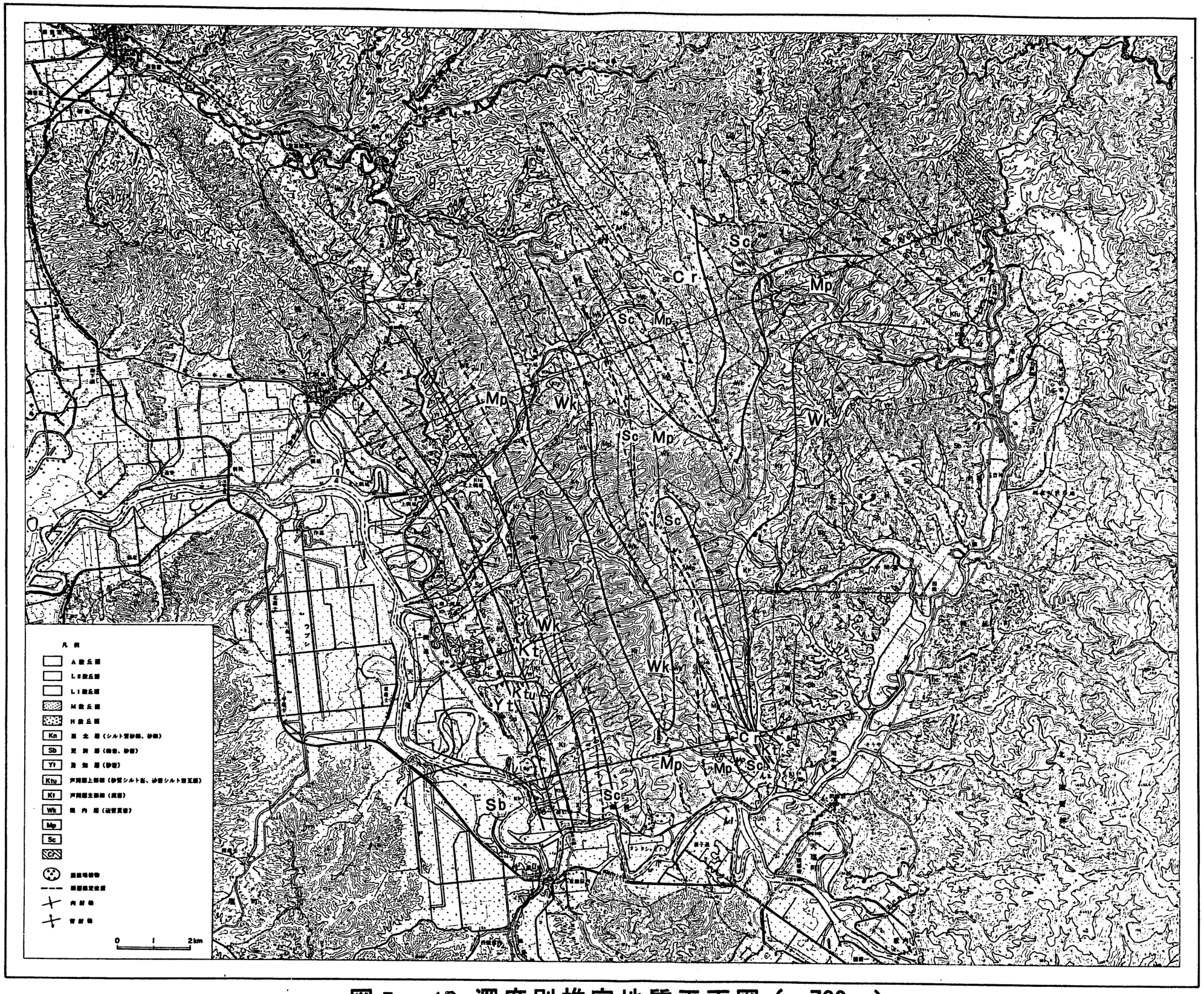


図3－16 深度別推定地質平面図（－789m）

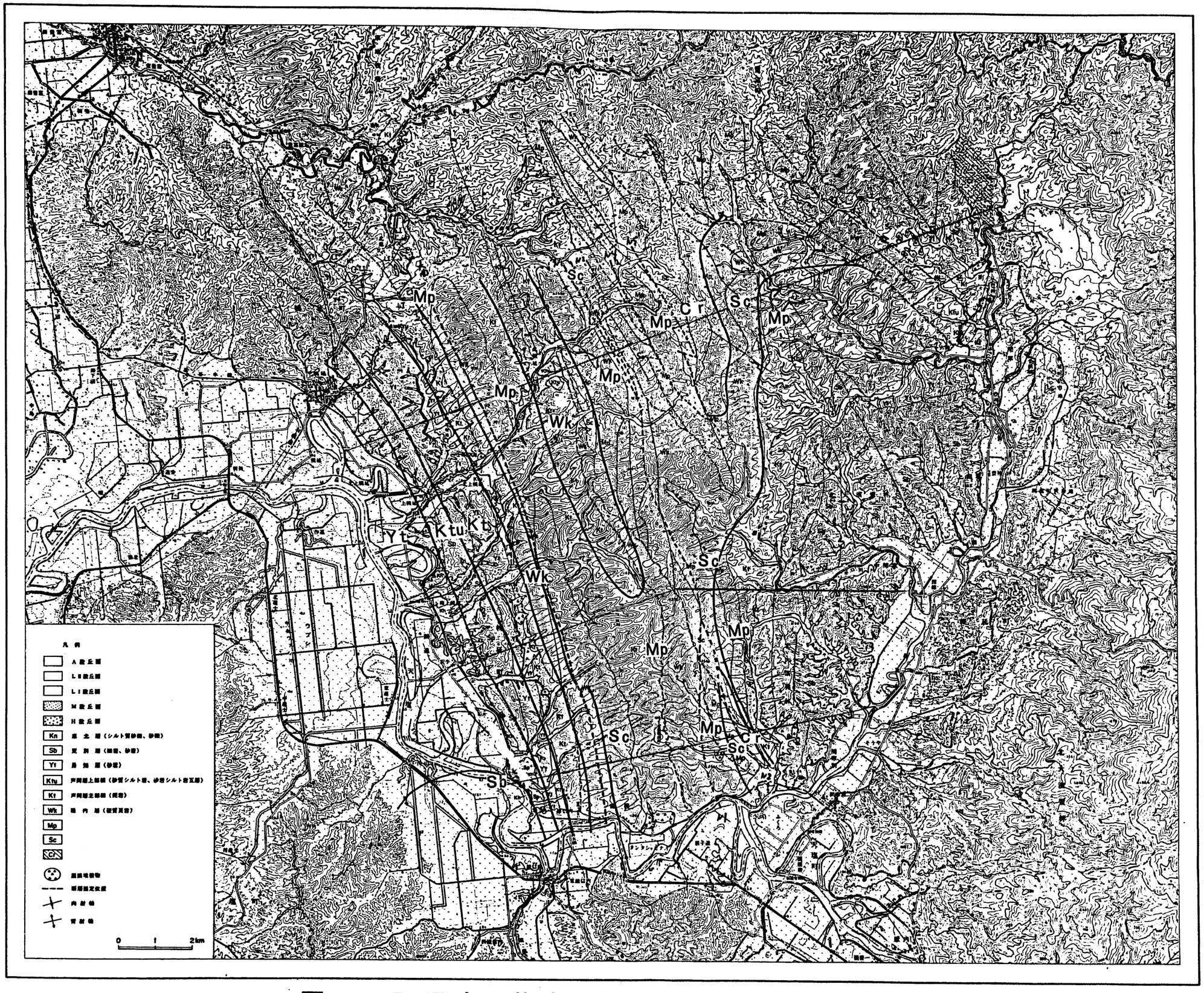


図3－17 深度別推定地質平面図（－873.6m）

4．地下水流動モデルの検証計算

広域流動モデルを用いてモデル入力データを変更し、現況の地下水頭分布を再現できるように検証計算を行なった。変更の対象とした入力データは、地下水かん養量、透水係数、境界条件である。再現にあたって参照した検証資料は、推定された地下水頭の平面分布および断面分布である。また、変更の対象となった入力データを変更することにより地下水頭分布にどのような影響を与えるかについて応答解析を実施した。

なお、局所モデルについては検証された広域モデルの入力データを用いて、現況の地下水頭分布を再現できていることを確認した。

4．1　現況地下水流動の再現

4．1．1　広域流動モデル

図４－１に示すモデル領域のうち広域流動モデル領域（図４－２）を対象に地下水流動モデルの検証計算を行なった。検証計算に当たっては、グリッドの地層区分のように比較的信頼性の高い図面から推定したパラメータについてはその値を変更しなかった。また、地層の透水係数のように実測結果からある範囲を持って推定されたパラメータについてはその範囲内で値を変更した。

その他の信頼性の低いパラメータである、境界条件（境界水頭）や地下水かん養量については、今回の調査において推定された数値を初期値として代入し、検証計算の過程で推定地下水頭分布が再現できるように変更を加えた。

本来であれば、検証資料としては観測井やボーリング調査孔における実測データを用いることが望ましいが、今回利用できる実測データは極めて限られた地点（B-1,B-2,B-5,D-1）しかなく、広域的な地下水流動状況（地下水頭分布）を検証するためには不十分であったため、これらの実測データも踏まえて作成した推定地下水頭分布図を検証資料として用いた。

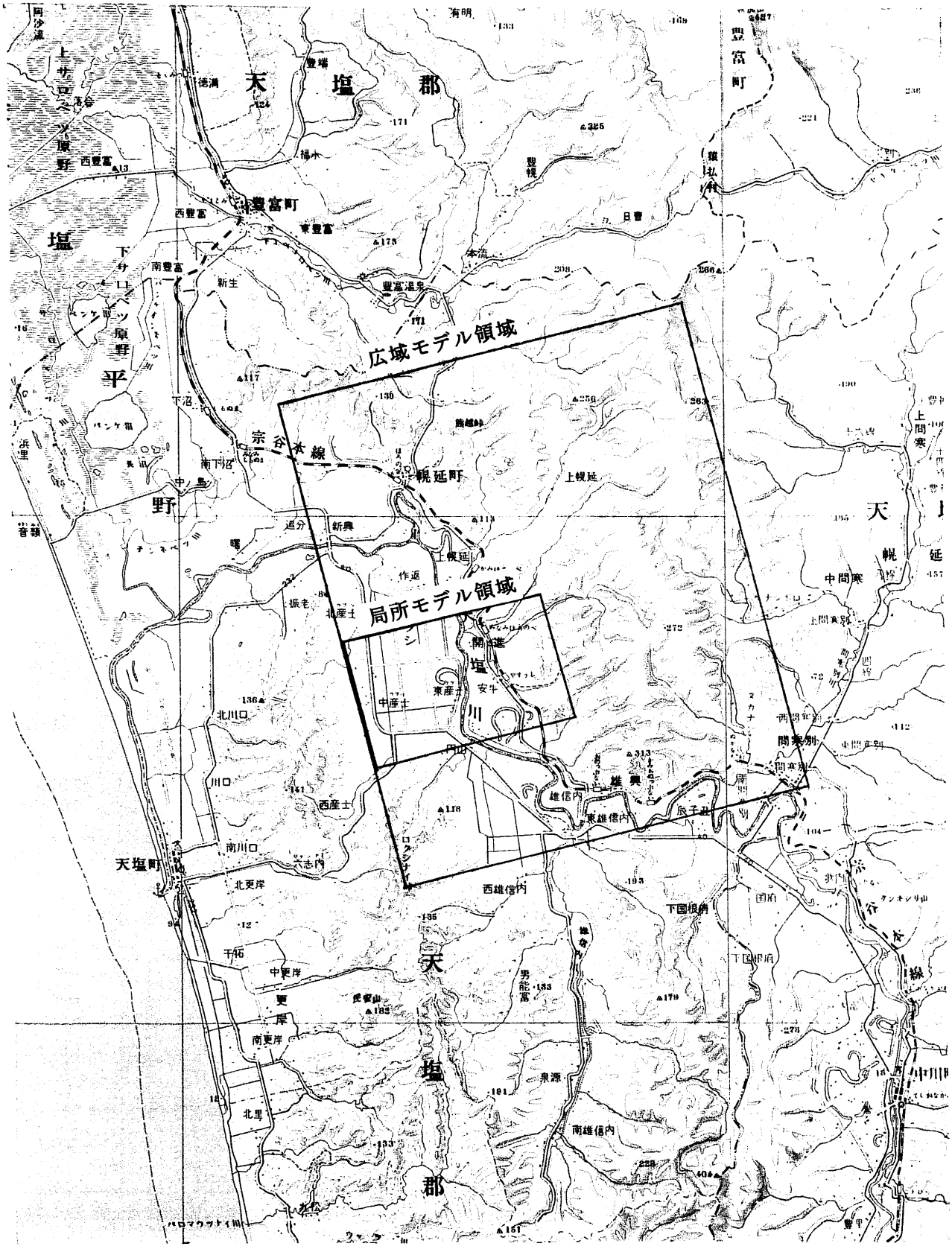

広域モデル領域
局所モデル領域
天塩郡
豊富町
幌延町
天塩町
宗谷本線
上サロベツ原野
下サロベツ原野
サロベツ平野
1:200,000
0
5
10
15
20 キロメートル

図4-1　モデル領域図

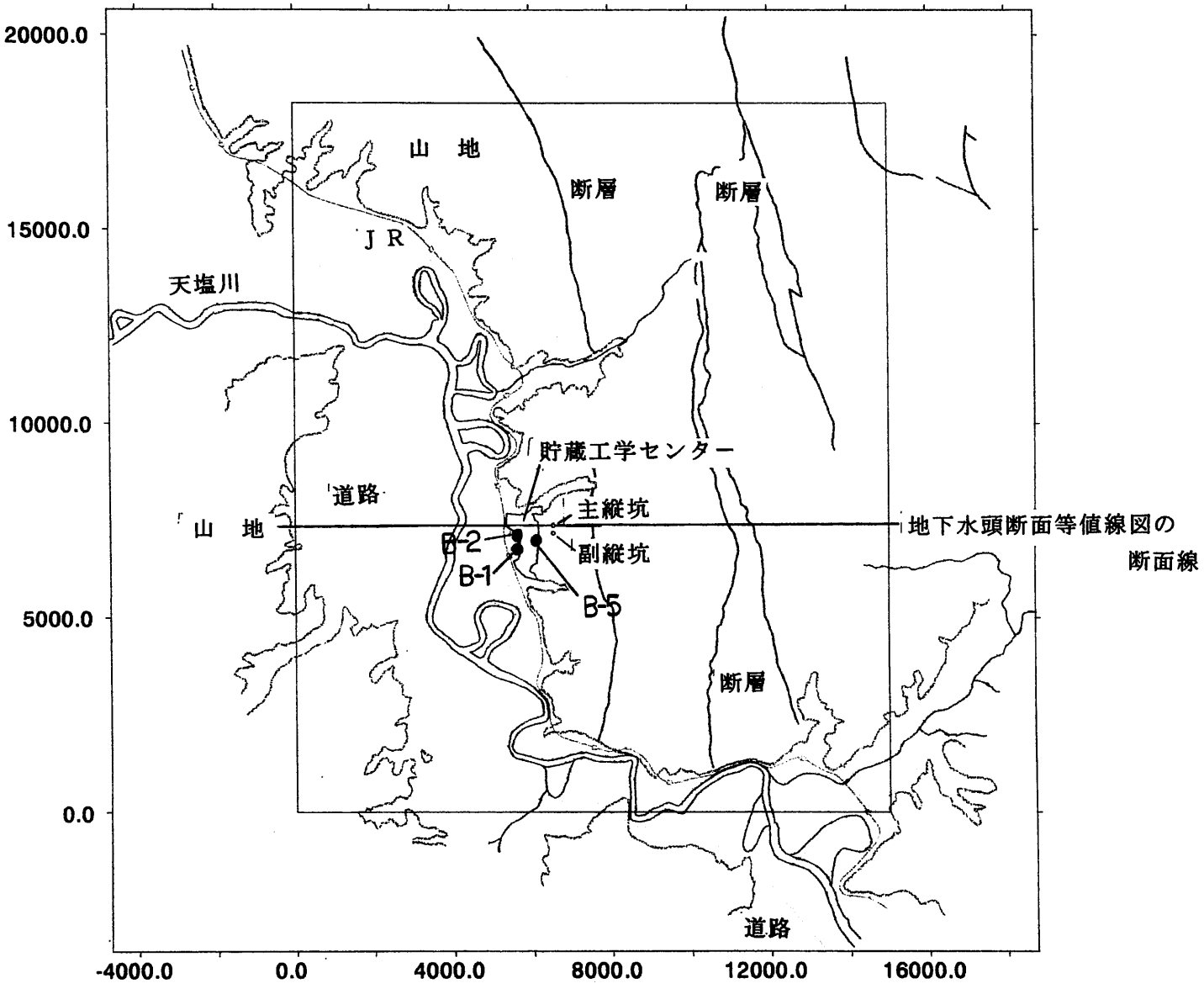


図4-2　　広域モデル領域図

（1）入力データ

①モデル層区分

広域モデルでは深度方向に１３層に区分した。各層の上面標高、下面標高は以下のとおりである。なお、第１層の上面標高には地表高を読み取って入力した。

モデル層区分	上面標高	下面標高	備　　考
1	地表高	-7.0 m	地上施設掘削面
2	-7.0 m	-160.0	
3	-160.0	-164.0	横孔１
4	-164.0	-336.2	
5	-336.2	-360.0	
6	-360.0	-364.0	横孔２
7	-364.0	-560.0	
8	-560.0	-564.0	横孔３
9	-564.0	-760.0	
１０	-760.0	-764.0	深地層試験場
１１	-764.0	-789.0	縦孔下面
１２	-789.0	-873.6	
１３	-873.6	-1354.0	

②地層の区分

地層の区分は、沖積層、恵北層、更別層、勇知層、声問層（声問層より古い地層を含む）の５層に区分した。

広域モデルの各グリッドがどの地層区分に該当するかについては、今回調査において推定した深度別推定地質平面図（図３－８～14）からグリッド毎に読み取った。

③地層の透水係数

判別された各グリッドの地層別に、実測されている透水係数などの水理定数については、初期値として平均値を入力した。声問層よりも古い地層については実測データがないため、声問層と同じと仮定した。

その後、上限値、下限値についても、その応答特性を確認するためにモデルに入力して計算を行った。

④側方境界条件

側方境界条件は以下のとおり設定した（図４－３）。

ｉ）東側境界および西側境界については、閉鎖境界（地下水の出入りがない）の場合と開放境界（固定水頭境界：地下水の出入りがある）の場合について計算を行なった。開放境界の場合において採用した固定水頭を下表に示した。

モデル層区分	上面標高	下面標高	東側境界水頭	西側境界水頭
1	地表高	-7.0 m	１２０m	５m
2	-7.0 m	160.0	１００	５
3	-160.0	-164.0	１００	５
4	-164.0	-336.2	９０	１０
5	-336.2	-360.0	９０	１０
6	-360.0	-364.0	９０	１０
7	-364.0	-560.0	８０	１５
8	-560.0	-564.0	８０	１５
9	-564.0	-760.0	７０	２０
１０	-760.0	-764.0	７０	２０
１１	-764.0	-789.0	７０	２０
１２	-789.0	-873.6	６５	２０
１３	-873.6	-1354.0	６０	２５

ⅱ）推定された地下水位分布によると地下水は大局的に見て、東西方向に流動していると推定された。そこで、今回のモデルでは領域北側と南側は閉鎖境界（地下水の出入りがない条件）としても、広域的な地下水流動状況を再現することは可能であると考えた。

ただし、現実には南北の境界を通じた地下水の出入りは存在するため、その影響も考慮することが必要とも考えられる。その場合には南北境界も開放境界にする必要があり、今回適用したモデル条件における問題点として残る。

⑤上部境界条件

上部境界条件は閉鎖条件とし、かん養量のみ与えることとした。ただし、上面境界において地下水からの地表への浸出が発生する可能性があったが、今回は地表への流出機構などが不明であったため、浸出を考慮しないモデルとした。今回適用したモデル条件ではこの点が問題点として残る。

なお、天塩川の河川水は地下水と連続していると推定されるので、天塩川が位置するグリッドのみ固定水頭境界（＝地表高）とした。

⑥下部境界条件

下部境界条件は流出入のない不透水境界条件とした。

⑦地下水かん養量

今回の調査において水収支から推定された最大かん養量にほぼ等しい年間300ｍｍを初期値として与えた後、検証計算の過程で推定された地下水頭分布を再現できるように変更を行なった。ただし、上部境界において浸出を考慮しなかったため、今回モデルへ与えたかん養量は地表への浸出水を除いた深部岩盤中への浸透量に相当すると考えられる。このため、地表から浸透量としてのかん養量としては非常に小さな値になる可能性があり、上部境界条件の設定方法と合わせて今回適用したモデル条件として問題点が残る。

⑧計算条件

上記の入力条件のもとで定常計算を行ない、安定した状態の地下水頭分布を計算した。

（２）検証資料

検証計算に当たって用いた資料は以下のとおりである。

①想定地下水流動図（図２－12：今回調査において推定）

②広域の地下水流動断面図（図２－15：今回調査において推定）

③地下水位観測井記録（図２－19～21）

特に、広域の地下水流動系を示していると考えられる推定地下水頭断面等値線図（図４－４）を重点的に用いて検証計算を行った。検証計算においては、定常計算により安定した状態での地下水流動を計算し、その結果が検証資料に整合するように、透水係数、地下水かん養量、境界条件などのパラメータを変更した。

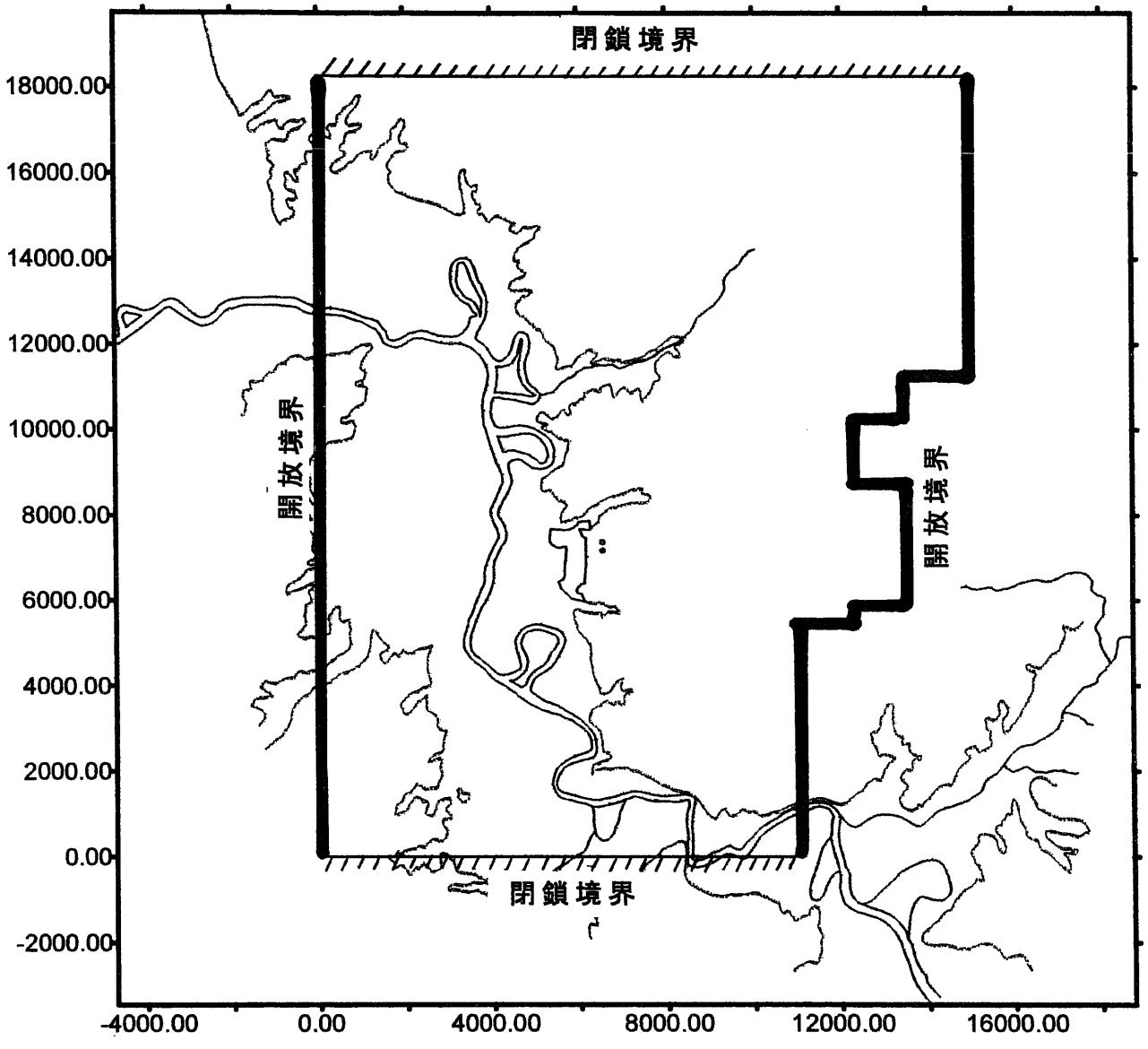

閉鎖境界
開放境界
開放境界
閉鎖境界
18000.00
16000.00
14000.00
12000.00
10000.00
8000.00
6000.00
4000.00
2000.00
0.00
-2000.00
-4000.00
0.00
4000.00
8000.00
12000.00
16000.00

図4-3　　境界条件図

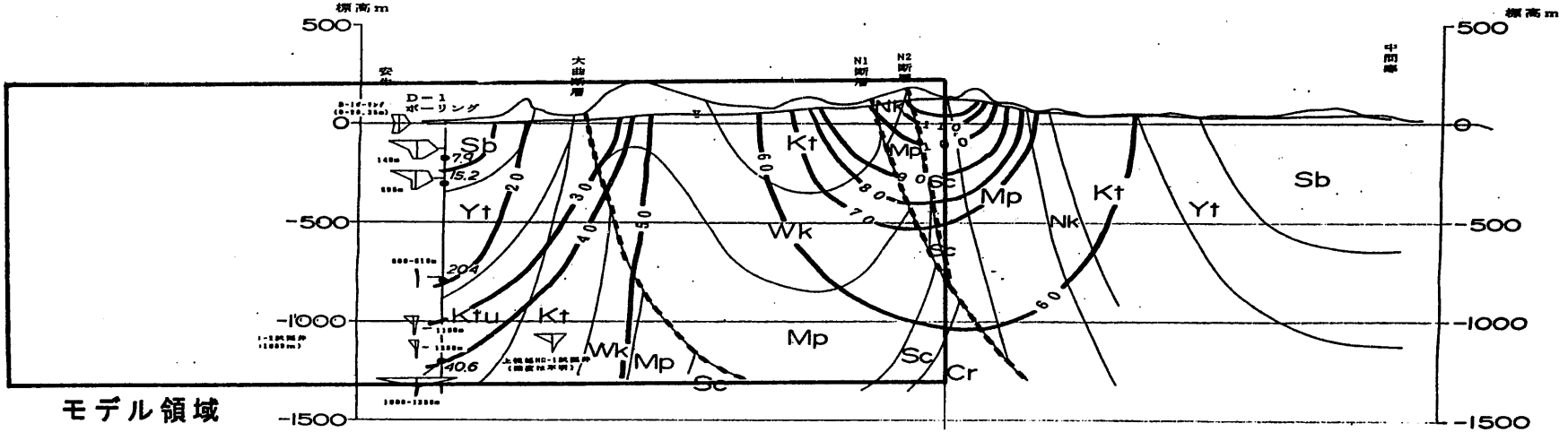


図4-4　推定地下水頭断面等値線図（検証資料）
（図2－15にモデル領域を重ねた図）

（３）検証計算の実施方法

検証計算の実施にあたっては、比較的信頼性の高い図面（図２－２：地質断面図）から推定した地層の区分は変更せず、その他の透水係数、境界条件、地下水かん養量の３種類のデータを検証計算における変更対象とした。これら３種類のデータの中では、地下水位の分布に大きく影響すると考えられる順に、原則として地下水かん養量、境界条件、透水係数の順に変更対象とした。各データの変更方法は以下の通りである。

①地下水かん養量

初期値としては先に推定した地表からの浸透量約300mm／年（日平均かん養量約１mm）を入力することとした。ただし、地下水かん養量は検証計算の過程で変更していくこととした。

②境界条件

計算領域内で地下水流動が閉じているか、さらに大きな地下水流動系（広域流動系）が存在するか不明なため、検証計算では閉鎖境界（地下水流動が閉じている場合）と開放境界（さらに大きな広域流動系が存在する場合）の２ケースについて計算を行なうこととした。

また、上部（地表面）の境界条件は、天塩川（固定水頭＝地表高を与えた）を除いては閉鎖条件とした。

③透水係数

透水係数（水平方向）については実測データを尊重して、表３－１に示した単純平均値、上限値、下限値の３ケースについて検証計算を行なうこととした。

鉛直方向の透水係数については、透水係数の異方性を考慮して、水平方向の透水係数に等しい場合と1/10の場合とについて検証計算を行なった。

（4）検証計算結果

検証計算は以下に示す手順で行なった。

段　　階	変更対象データ	変　　更　　内　　容
第1段階	地下水かん養量	年間かん養量300mm（約1mm/日）が過大で、極端に地下水位が上昇するため、日かん養量を初期値の1/1000の0.001mm/日まで減少させた。
第2段階	透水係数の異方性	水平方向と鉛直方向の透水係数が同じであると山地部から浸透した地下水が平野部において上向きに流動する流動系が再現出来ないため、鉛直方向の透水係数を水平方向の透水係数の1/10とした。
第3段階	境界条件	東西の境界を閉鎖条件にした場合と開放条件にした場合を比較すると、開放条件にした場合の方がより広域の地下水流動系（東側山地部から浸透した地下水が深部を流動した後、平野部において地表に流出する地下水の流れ）をよりよく再現しているため、開放条件とした。
第4段階	透水係数	平均値、上限値、下限値を比較すると、下限値にした場合が、地下水位観測井（B－1，B－2）の観測水位をより正確に再現（標高10～20m）できているため、下限値を採用した。

検証計算の結果入力したパラメータは最終的に以下のように変更した。

①透水係数

各地層とも実測透水係数の下限値（表３－１）を入力した。なお、声問層よりも古い地層については、声問層と同じ値を入力した。また、鉛直方向の透水係数を水平方向の透水係数の１／１０とした。

②境界条件

東側境界は120～60m、西側境界は５～25mの水位固定境界（開放条件）とした。

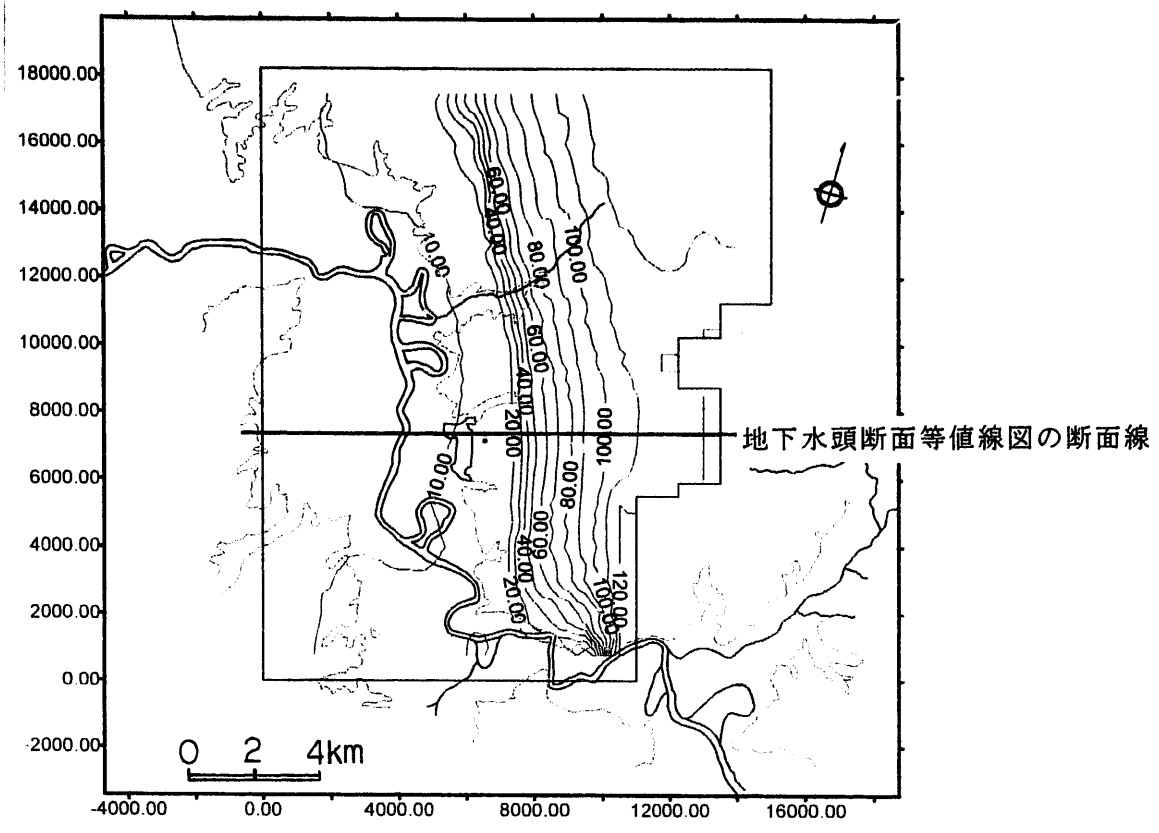
③地下水かん養量

日平均かん養量を0.001mm（年間かん養量0.365mm）とし、全域一律に入力した。

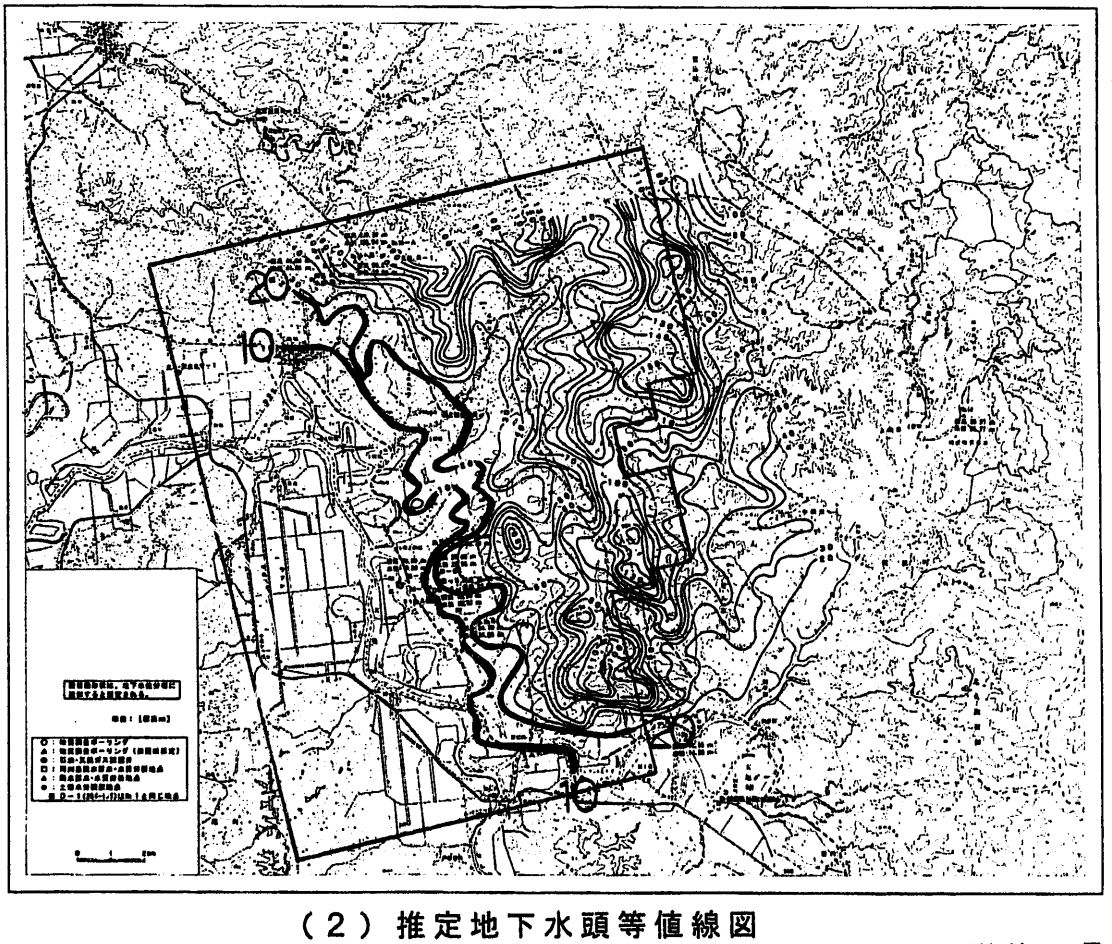
検証計算結果による計算地下水頭等値線図（第１層：地表高～－７m）を図４－５に、計算地下水頭断面等値線図を図４－６に、推定地下水頭等値線図、推定地下水頭断面等値線図と対比して示した。

これらの図によると、既存の地下水位観測井（図４－２：Ｂ－１、Ｂ－２、Ｂ－５）付近で、計算水位は10～20m程度となっており、おおむね観測水位（図２－18～20）と整合する結果となっている。また、地下水位は東から西に向かって低くなっており、地下水が東西方向に流動している様子が再現されている（図４－５）。さらに、地下水頭の断面分布についても東側山地部より浸透した地下水が深層部を経て、平野部（天塩川）に向かって流出している広域の地下水流動が概ね再現できている。

以上の結果、現況の地下水流動がおおむね再現出来たと考え、モデルパラメータを固定した。



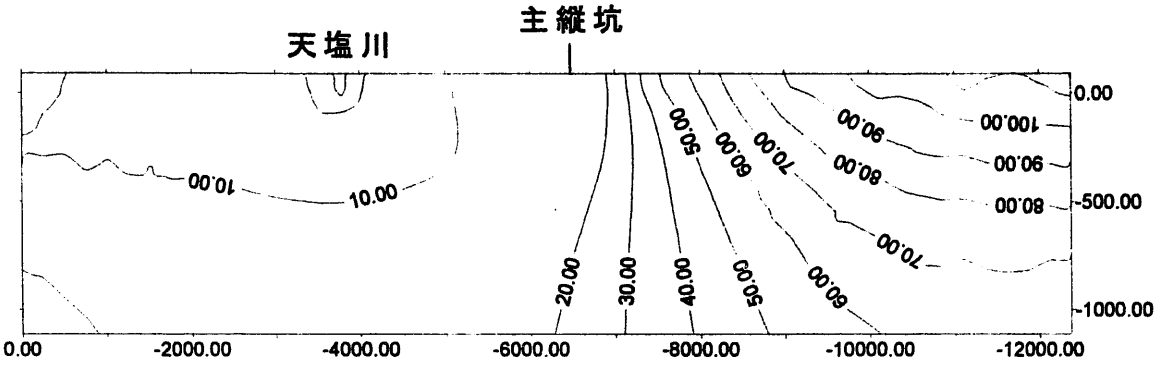
（１）計算地下水頭等値線図　第１層（地表高～－７ｍ）



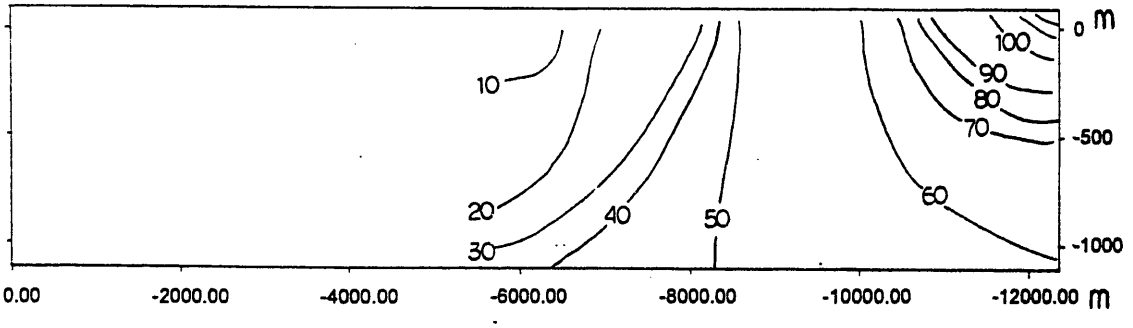
（２）推定地下水頭等値線図

単位：ＥＬｍ

図4-5　検証計算結果（平面分布）



（１）計算地下水頭等値線図



（２）推定地下水頭等値線図

単位：ＥＬｍ

図４－６　検証計算結果（断面分布）

４．１．２　局所モデル

図４－１に示すモデル領域のうち局所モデル領域（図４－７）を対象に地下水流動モデルの検証計算を行なった。検証計算に当たっては、広域モデルの検証結果を基本に以下の方針に基づいて行った。

グリッドの地層区分のように比較的信頼性の高い図面から推定したパラメータについてはその値を変更しなかった。また、地層の透水係数および地下水かん養量については広域モデルでの検証結果をそのまま採用した。さらに、境界条件（境界水頭）については今回調査で推定した地下水流動図（図２－１２、図２－１５）から推定して与え、現況の地下水頭分布が再現できているか検証した。

（１）入力データ

①モデル層区分

局所モデルでは深度方向に１１層に区分した。各層の上面標高、下面標高は以下のとおりである。なお、第１層の上面標高には地表高を読み取って入力した。

モデル層区分	上面標高	下面標高	備　　考
1	地表高	-7.0 m	地上施設掘削面
2	-7.0 m	-20.0	
3	-20.0	-40.0	
4	-40.0	-60.0	
5	-60.0	-110.0	
6	-110.0	-160.0	
7	-160.0	-164.0	横孔1
8	-164.0	-204.0	
9	-204.0	-244.0	
１０	-244.0	-284.0	
１１	-284.0	-336.2	

②地層の区分

地層の区分は、沖積層、恵北層、更別層、勇知層、声問層（声問層より古い地層を含む）の５層に区分した。

局所モデルの各グリッドがどの地層区分に該当するかについては、今回調査において推定した深度別推定地質平面図（図３－８～14）からグリッド毎に読み取った。

③地層の透水係数

判別された各グリッドの地層別に広域モデルにおいて固定された下限値を入力した。

④側方境界条件

側方境界条件は以下のとおり設定した。

ｉ）領域東側および領域西側については固定水頭境界（地下水の出入りがある）とした。東側境界については想定地下水流動図（図２－12）から境界付近の地下水頭を読み取って入力した。西側境界については５～10ｍを入力した。具体的には以下の通り設定した。

境界	標　　高	境界水位
東側境界	地表面　～－１１０ｍ	２０ｍ
	－１１０～－２０４ｍ	２５ｍ
	－２０４～－３３６ｍ	３０ｍ
西側境界	地表面　～－１６４ｍ	５ｍ
	－１６４～－２０４ｍ	１０ｍ

ⅱ）推定された地下水位分布によると地下水は大局的に見て、東西方向に流動していると推定された。そこで、今回のモデルでは領域北側と南側は閉鎖境界（地下水の出入りがない条件）としても、地下水流動状況を再現することは可能であると考えた。

ただし、現実には南北の境界を通じた地下水の出入りは存在するため、その影響も考慮することが必要とも考えられる。その場合には南北境界も開放境界にする必要があり、今回適用したモデル条件における問題点として残る。

⑤上部境界条件

上部境界条件は閉鎖条件とし、かん養量のみ与えることとした。ただし、上面境界において地下水からの地表への浸出が発生する可能性があったが、今回は地表への流出機

構などが不明であったため、浸出を考慮しないモデルとした。今回適用したモデル条件ではこの点が問題点として残る。

なお、天塩川の河川水は地下水と連続していると推定されるので、天塩川が位置するグリッドのみ固定水頭境界（＝地表高）とした。

⑥地下水かん養量

広域モデルにおいて固定された日平均0.001mmのかん養量を与えた。

（２）検証資料

検証計算に当たって用いた検証資料は以下のとおりである。

①地下水位観測記録

②想定地下水流動図（図２－12：今回調査において推定）

検証計算においては、定常計算により安定した地下水位を計算し、その結果が検証資料に整合していることを確認した。なお、透水係数、地下水かん養量については広域モデルにおいて固定された値を用いた。

（３）検証計算結果

検証計算の結果、現況の地下水位分布がおおむね再現出来たと考え、モデルパラメータを固定した。検証計算結果による計算地下水頭等高線図（第１層：地表高～－７ｍ）と推定地下水頭等高線図を対比して図４－８に示した。

この図によると、既存の地下水位観測井（図４－７：Ｂ－１、Ｂ－２、Ｂ－５）付近で、計算水頭は10～15ｍ程度となっており、おおむね観測水位（図２－18～20）と整合する結果となっている。また、地下水頭は東から西に向かって低くなっており、地下水が東西方向に流動している様子が再現されている。

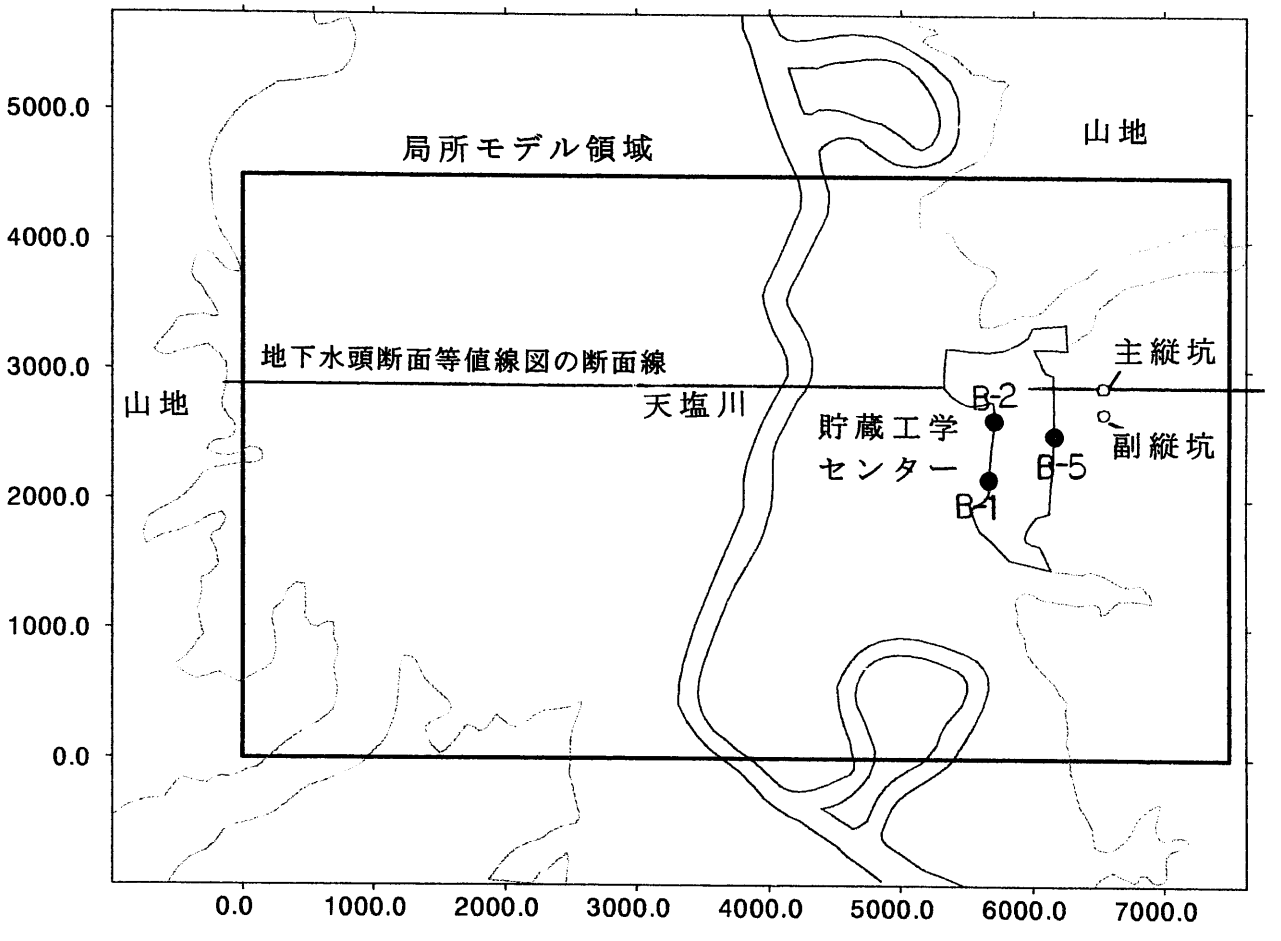
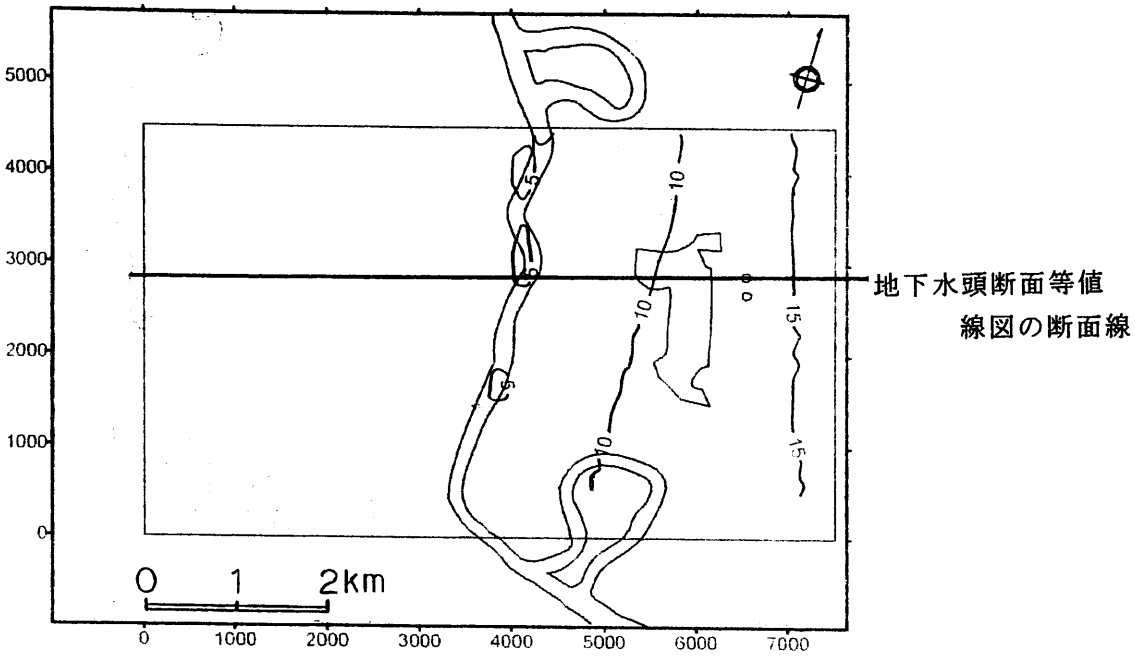
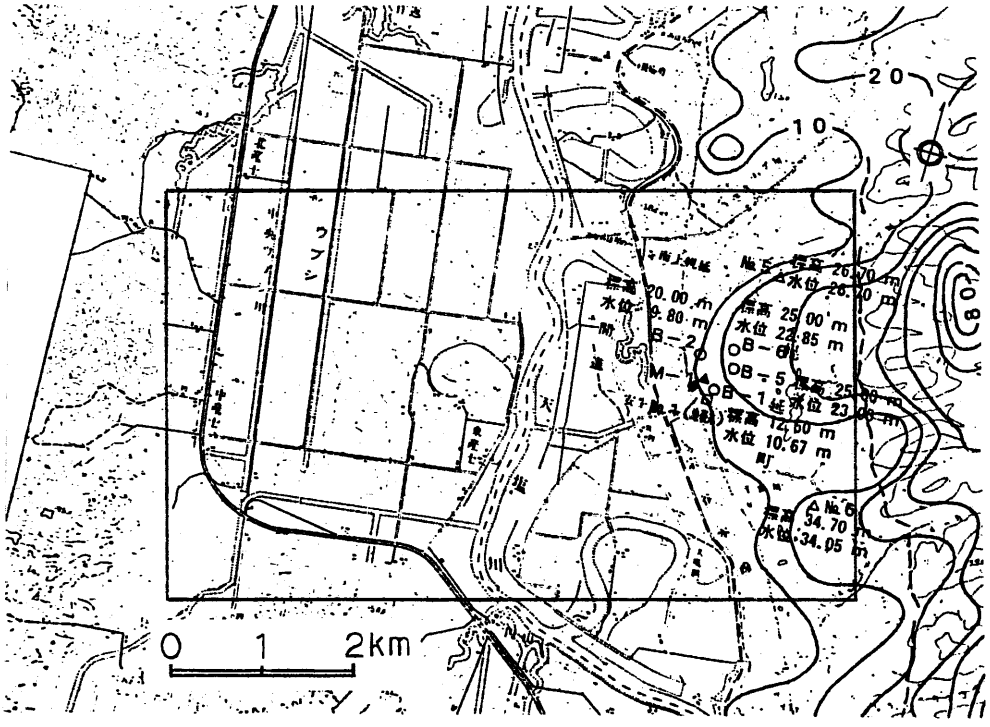


図 4-7, 局所モデル領域図



（１）計算地下水頭等値線図　第１層（地表高～－７ｍ）



（２）推定地下水頭等値線図

単位：ＥＬｍ

図４－８　検証計算結果（平面分布）

４．２　モデルの応答解析

広域モデルを用いて、モデルパラメータの与え方を変化させることにより、モデルの応答（地下水頭分布）がどのように変化するかを解析した。変化させたパラメータは、透水係数、透水係数の異方性、地下水かん養量、境界条件である。この結果、地下水頭の分布に最も影響を与えるパラメータは、地下水かん養量であると推定された。また、透水係数の異方性も地下水頭分布に影響を与えると予想された。さらに、大曲断層の存在は断層の透水係数が低い遮水帯の場合のみ地下水頭分布に大きな影響を与えると予想された。

応答解析を実施するに当たり設定したモデル入力条件は概ね検証計算結果と同一とし、応答解析の対象パラメータ以外は以下の通りとした。

①境界条件

地下水は大局的に見ると、東西方向に流動していると見られるので、領域北側と南側は閉鎖境界（地下水の出入りがない条件）とした。

地下水分水嶺（東側境界）および領域西側境界については、開放境界（固定水頭境界：地下水の出入りがある）とした。

地表部については、天塩川については固定水頭境界（＝地表高）とし、その他の地表面については閉鎖境界とした。

②地下水かん養量

日かん養量＝0.001mmとした。

③透水係数

水平方向の透水係数は地層別に実測データの平均値を入力した。声問層よりも古い地層については実測データがないため、声問層と同じとした。

また、透水係数の異方性を考慮し、鉛直方向の透水方向の透水係数は水平方向の透水係数の１／１０とした。

④大曲断層

大曲断層は考慮していない。

（１）地下水かん養量を変化させた場合

地下水かん養量を、0.0001mm/日、0.001mm/日、0.01mm/日と３段階に変化させた場合について、その結果を比較した（図４－９、10）。なお、その他の入力条件は以下の通りとした。

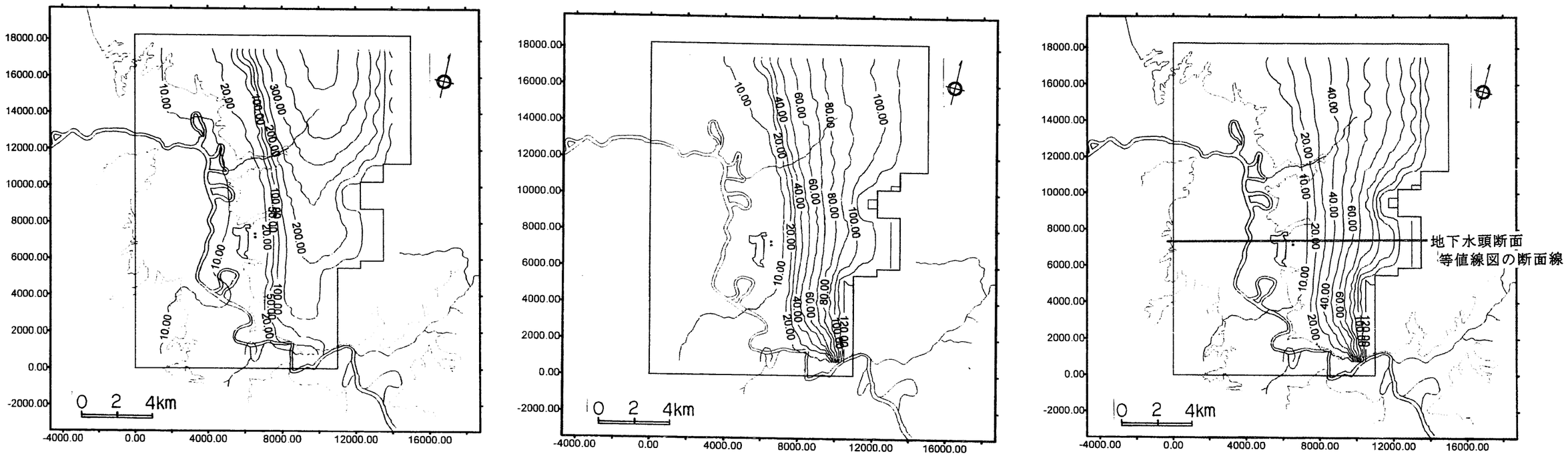
境界条件：北側と南側は閉鎖境界、東側と西側は開放境界、地表部は閉鎖境界

透水係数：平均値（水平方向）

透水係数の異方性：鉛直方向の透水係数は水平方向の１／１０

かん養量0.01mm/日の場合には地下水頭が以上に高くなり最高で400mを越えており、今回のモデル条件ではかん養量が過大である結果となっている。また、逆にかん養量を0.0001mm/日と小さくした場合には、0.001mm/日の場合と大きな変化はない。

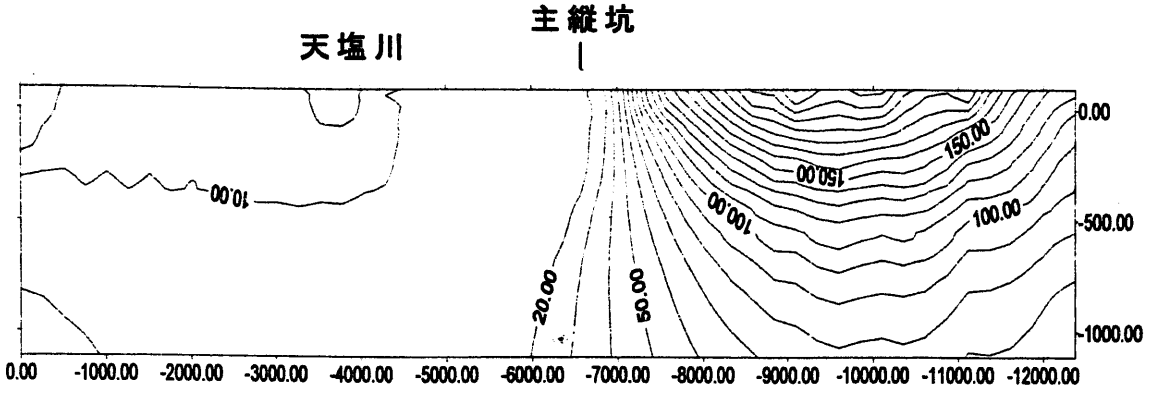
かん養量が0.001mm/日の場合がほぼ妥当な地下水頭分布を示していることから、かん養量が妥当な水準から１オーダー変化する（大きくなる）と、地下水頭分布に対して大きな影響を与えるといえる。



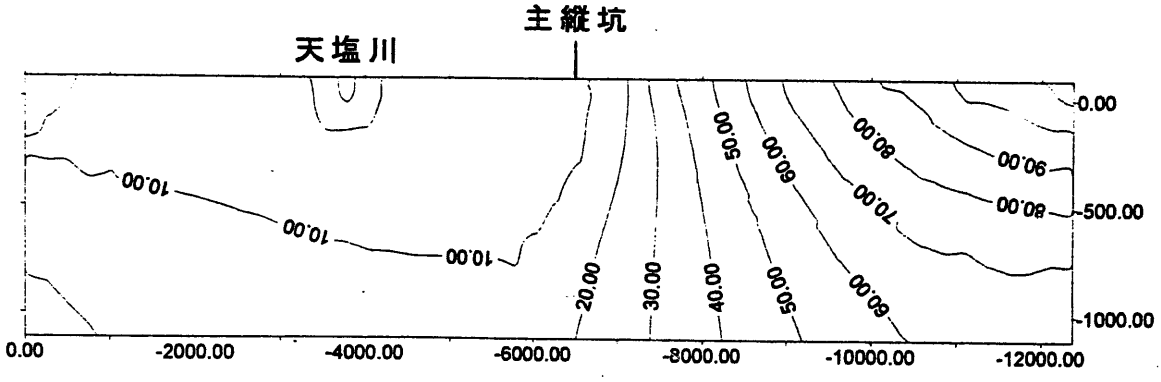
（１）日かん養量＝０．０１mm　（２）日かん養量＝０．００１mm　（３）日かん養量＝０．０００１mm

単位：ＥＬ.m

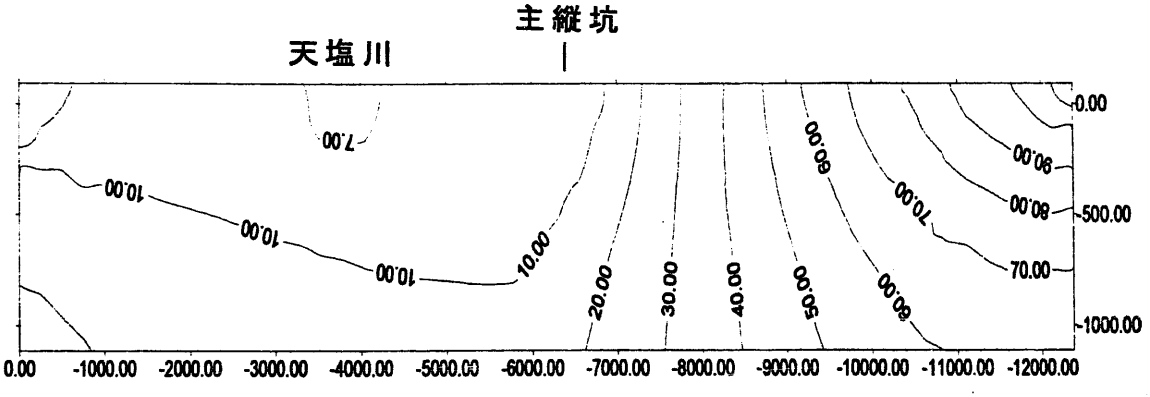
図４－９　計算地下水頭等値線図　第１層（地表高～－７ｍ）
（かん養量を変化させた場合）



（１）日かん養量＝０．０１㎜



（２）日かん養量＝０．００１㎜



（３）日かん養量＝０．０００１㎜

単位：ＥＬｍ

図４－10　　計算地下水頭断面等値線図
（かん養量を変化させた場合）

（２）境界条件を変化させた場合

東側および西側の境界条件を閉鎖条件（地下水の出入りがない）と開放条件（地下水の出入りがある）にした場合について、その結果を比較した（図４－11、12）。なお、その他の入力条件は以下の通りとした。

境界条件：北側と南側は閉鎖境界、地表部は閉鎖境界

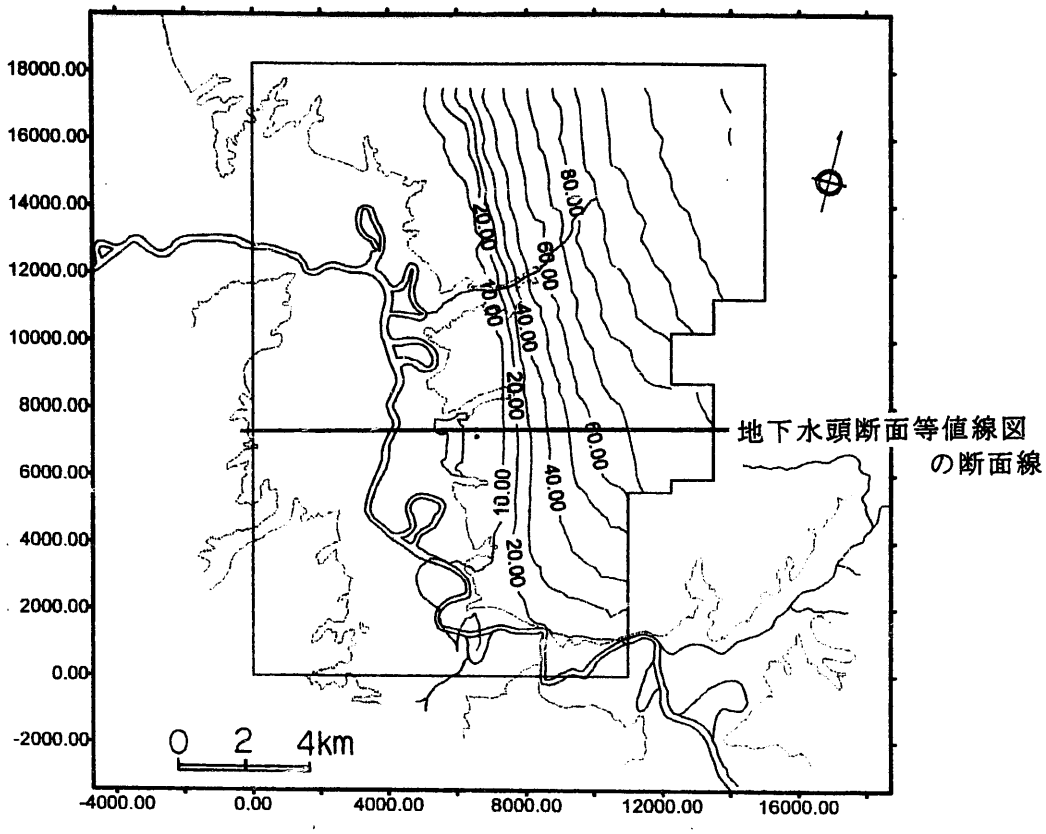
かん養量：0.001mm／日

透水係数：平均値（水平方向）

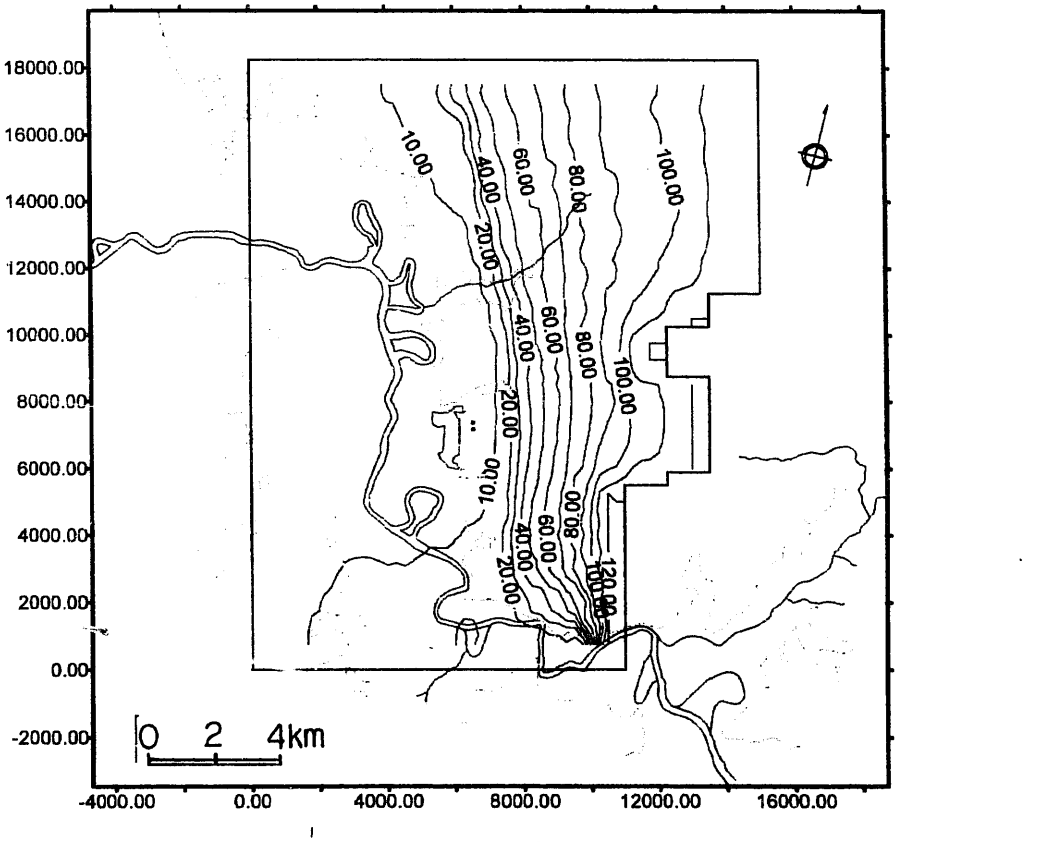
透水係数の異方性：鉛直方向の透水係数は水平方向の１／１０

閉鎖条件と開放条件を比較した場合、閉鎖条件の方が地下水頭の勾配が緩やかとなっている。また、東側山地部からかん養された地下水が平野部へ湧出する地下水頭分布については同じものの、西側山地部からかん養された地下水が天塩川に向かって流出する地下水頭分布は開放条件でのみ認められる。

これらの相違を除けば、全体の地下水頭分布については両者に大きな相違はなく、今回与えた境界条件からは、境界条件が地下水頭の分布に大きな影響を与えているとはいえない。



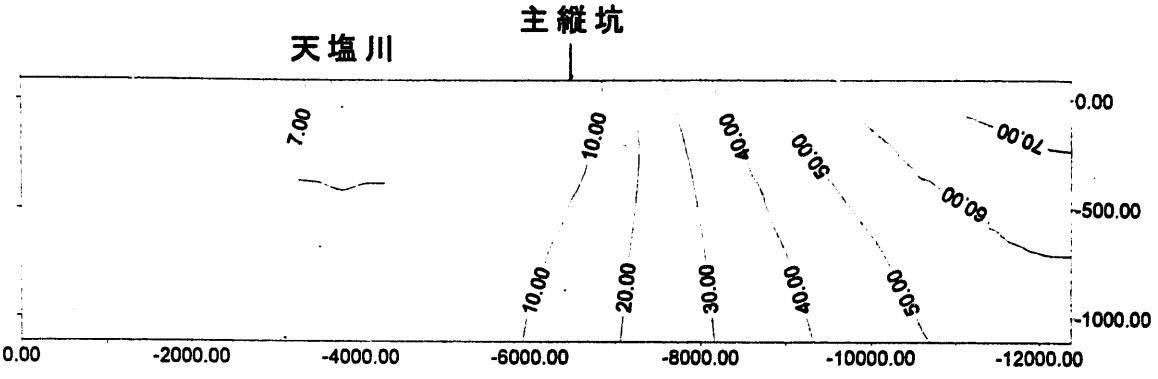
（１）閉鎖境界



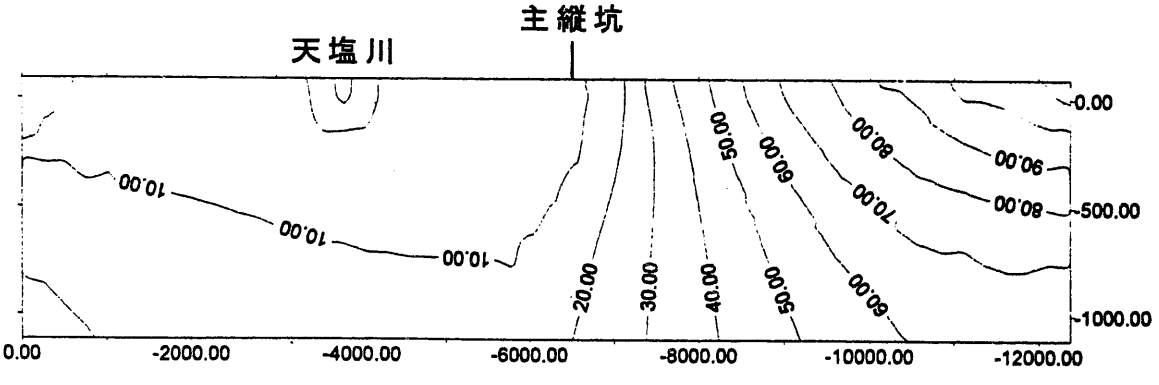
（２）開放境界

単位：ＥＬｍ

図４－11　　計算地下水頭等値線図　第１層（地表高～－７ｍ）
（境界条件を変化させた場合）



（１）閉鎖境界



（２）開放境界

単位：ＥＬｍ

図４－12　　計算地下水頭断面等値線図
（境界条件を変化させた場合）

（３）透水係数の異方性を考慮した場合

地層中の間隙の構造は、その成因すなわち堆積環境などによって決まり、堆積層内の層理面や葉理、割れ目・堆積物の構造に影響される。このような場合には水平方向の透水係数と鉛直方向の透水係数が異なることになり、透水係数の異方性が生じることとなる。[26)]

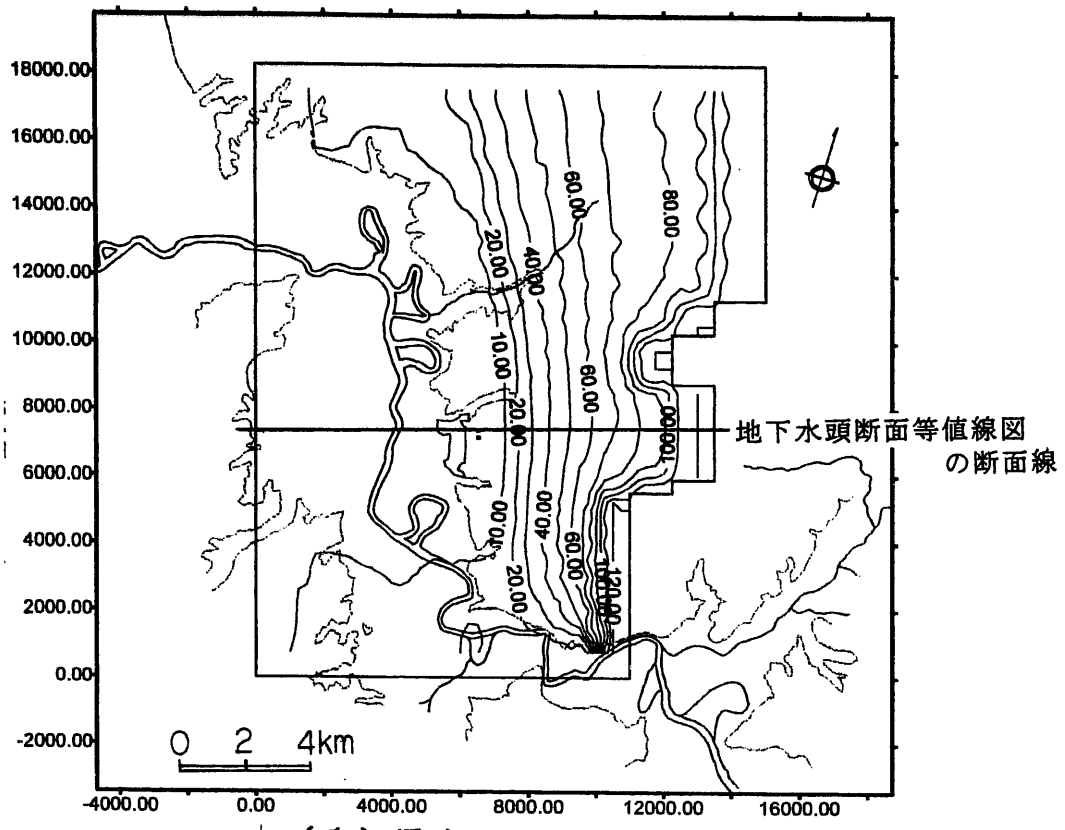
そこで、水平方向の透水係数と鉛直方向の透水係数の比（＝鉛直透水係数／水平透水係数）を１．０にした場合と０．１にした場合についてその結果を比較した（図４－13、14）。なお、その他の入力条件は以下の通りとした。

境界条件：北側と南側は閉鎖境界、東側と西側は開放境界、地表部は閉鎖境界

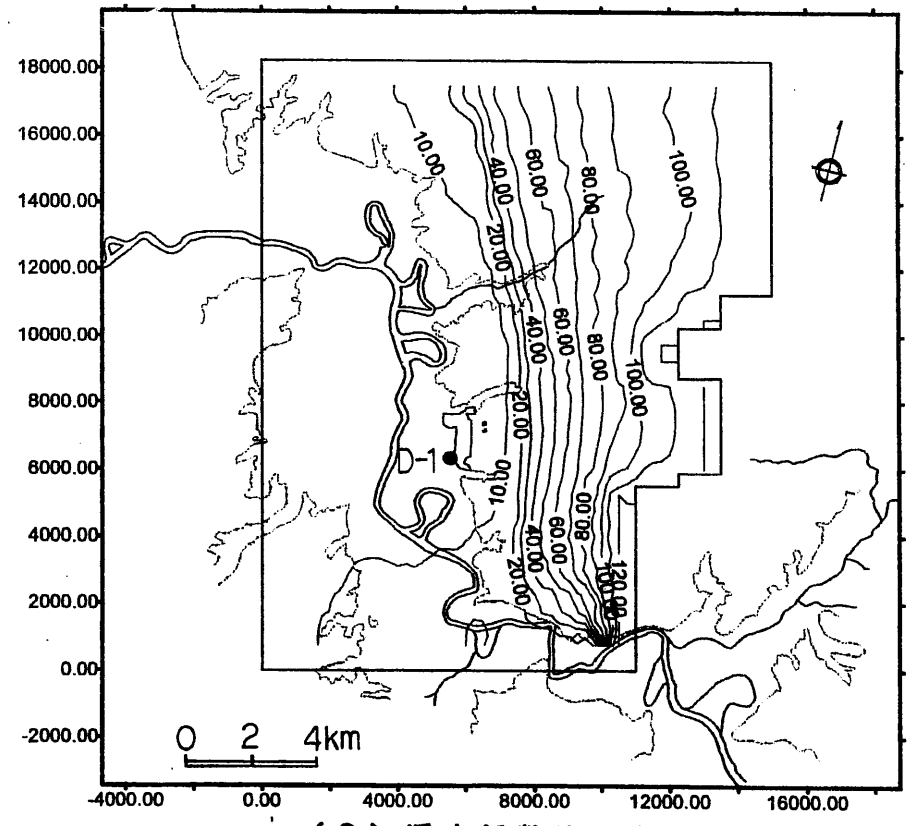
かん養量：0.001mm／日

透水係数：平均値（水平方向）

透水係数の比が１．０の場合には深度方向に大きな水頭変化がなく、地下水はほぼ水平方向に流動する分布となっている。しかし、透水係数の比が０．１の場合には、東部境界付近では地表に近い方が地下水頭が高く、地下水は地表から深部に向かって流動していると考えられる。主縦孔から天塩川にかけての地域では、地表に近い方が地下水頭が低く、地下水は深部から地表に向かって流動していると考えられる。この地下水頭分布は深層ボーリング（Ｄ－１）において実測されている、深部の方が地下水頭が高いという事実に整合しており、地下水の広域流動を裏づける結果と考えられる。このような広域流動を再現できるのは透水係数の比が０．１の場合のみである。従って、透水係数の比は、地下水頭分布に影響を与えているといえる。



（１）透水係数比＝１．０

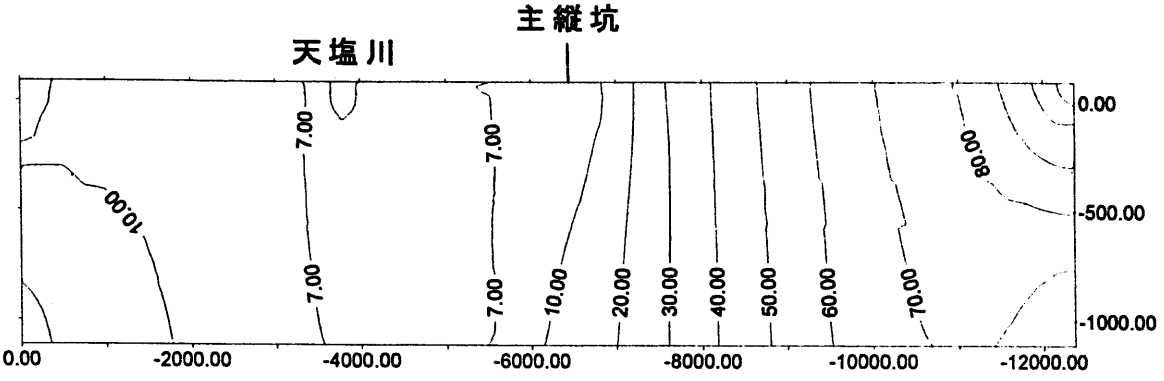


（２）透水係数比＝０．１

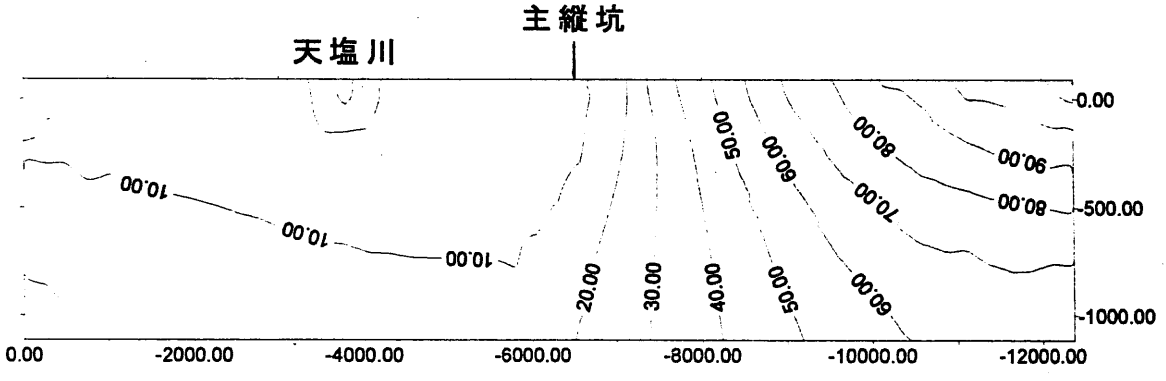
単位：ＥＬｍ

（透水係数比）＝（鉛直透水係数）／（水平透水係数）

図４－13　計算地下水頭等値線図　第１層（地表高～－７ｍ）
（透水係数の異方性を変化させた場合）



（１）透水係数比＝１．０



（２）透水係数比＝０．１

単位：ＥＬｍ

（透水係数比）＝（鉛直透水係数）／（水平透水係数）

図４-14　計算地下水頭断面等値線図
（透水係数の異方性を変化させた場合）

（4）透水係数を変化させた場合

透水係数（水平方向）を実測された値の平均値、上限値、下限値と３段階に変化させて（表４－１）、その結果を比較した（図４－15、16）。なお、その他の入力条件は以下の通りとした。

境界条件：北側と南側は閉鎖境界、東側と西側は開放境界、地表部は閉鎖境界

かん養量：0.001mm／日

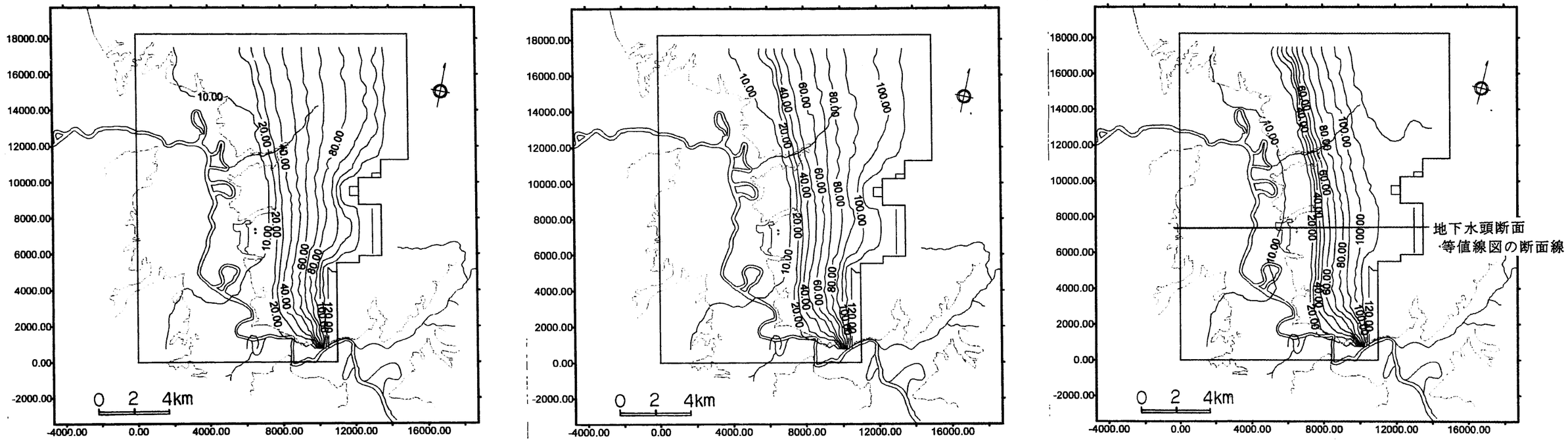
透水係数の異方性：鉛直方向の透水係数は水平方向の１／１０

開放条件の場合には境界部に与えた既知水頭により、モデル領域内の水頭が規定されるため、透水係数の変化が地下水頭分布に対して大きな影響を与えていない。わずかに10mの等高線が下限値の場合に下流側に移動しているのみである。

表４－１　地層別透水係数一覧表

地　層	上限値 cm/sec	平均値 cm/sec	下限値 cm/sec
沖積層	2.00×10^{-4}	7.80×10^{-5}	1.55×10^{-5}
恵北層	2.00×10^{-4}	7.80×10^{-5}	1.55×10^{-5}
更別層	2.32×10^{-4}	8.53×10^{-5}	1.84×10^{-5}
勇知層	6.97×10^{-5}	1.15×10^{-5}	2.80×10^{-6}
声問層	6.50×10^{-7}	3.12×10^{-7}	1.58×10^{-7}

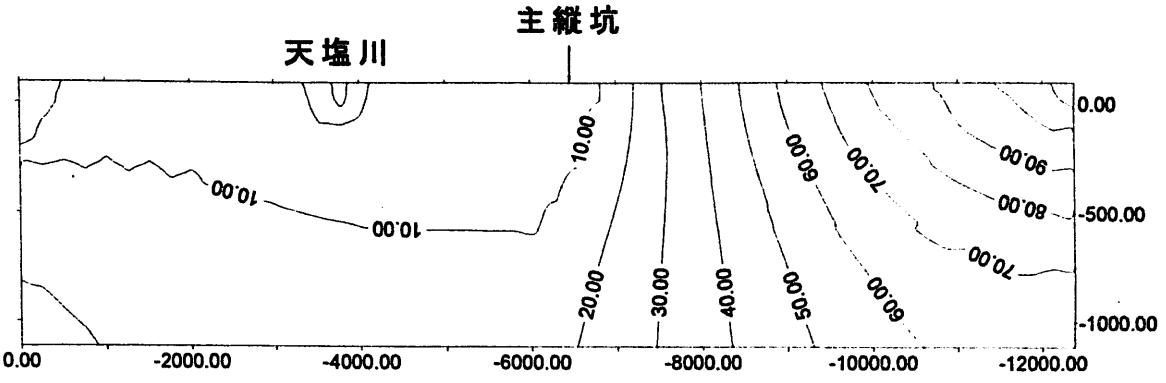
注）声問層より古い地層は声問層と同じとした。



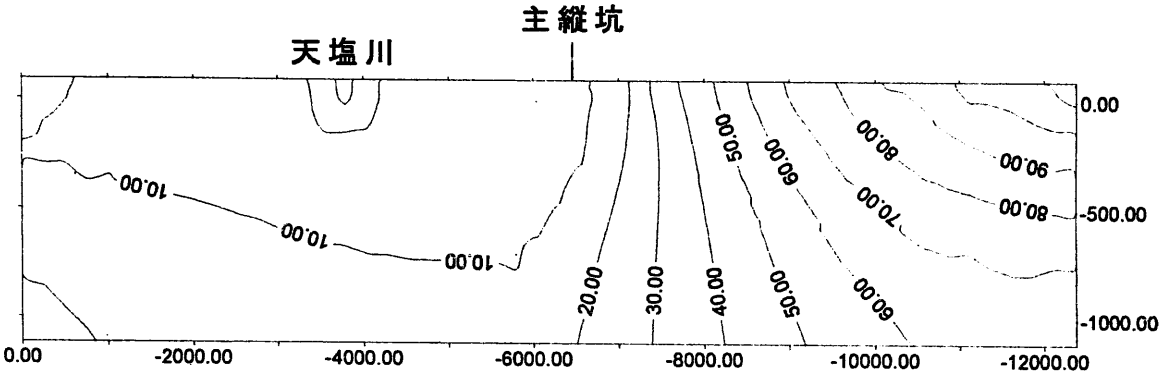
（１）上限値　　（２）平均値　　（３）下限値

単位：ＥＬｍ

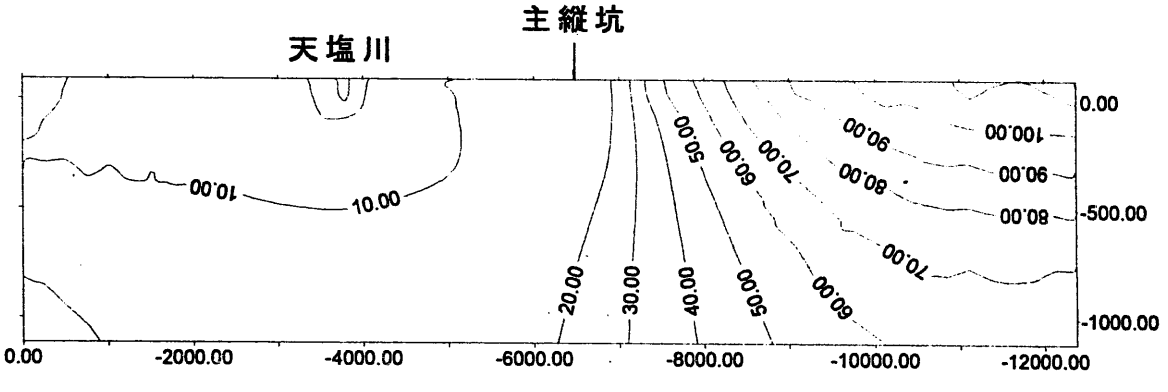
図４－15　　計算地下水頭等値線図　第１層（地表高～－７ｍ）
（透水係数を変化させた場合）



（１）上限値



（２）平均値



（３）下限値

単位：ＥＬｍ

図 4-16　　計算地下水頭断面等値線図
（透水係数を変化させた場合）

（５）大曲断層を考慮した場合

大曲断層（図４－17）を考慮した場合についてその結果を比較した（図４－18、19）。断層の透水係数は、断層が破砕帯（透水ゾーン）の場合として10^{-4}cm/sec、断層が遮水帯の場合として10^{-8}cm/secを与えた。なお、その他の入力条件は以下の通りとした。

境界条件：北側と南側は閉鎖境界、東側と西側は開放境界、地表部は閉鎖境界

かん養量：0.001mm／日

透水係数：平均値（水平方向）

透水係数の異方性：鉛直方向の透水係数は水平方向の１／１０

大曲断層がない場合と比較すると、破砕帯の場合には地下水頭分布に大きな変化は認められないが、遮水帯の場合には大きく変化している。遮水帯の場合には、大曲断層を挟んで地下水頭に極端な勾配が生じている。従って、大曲断層については、透水係数が小さい遮水帯の場合のみ、地下水頭分布に大きく影響を与えるといえる。

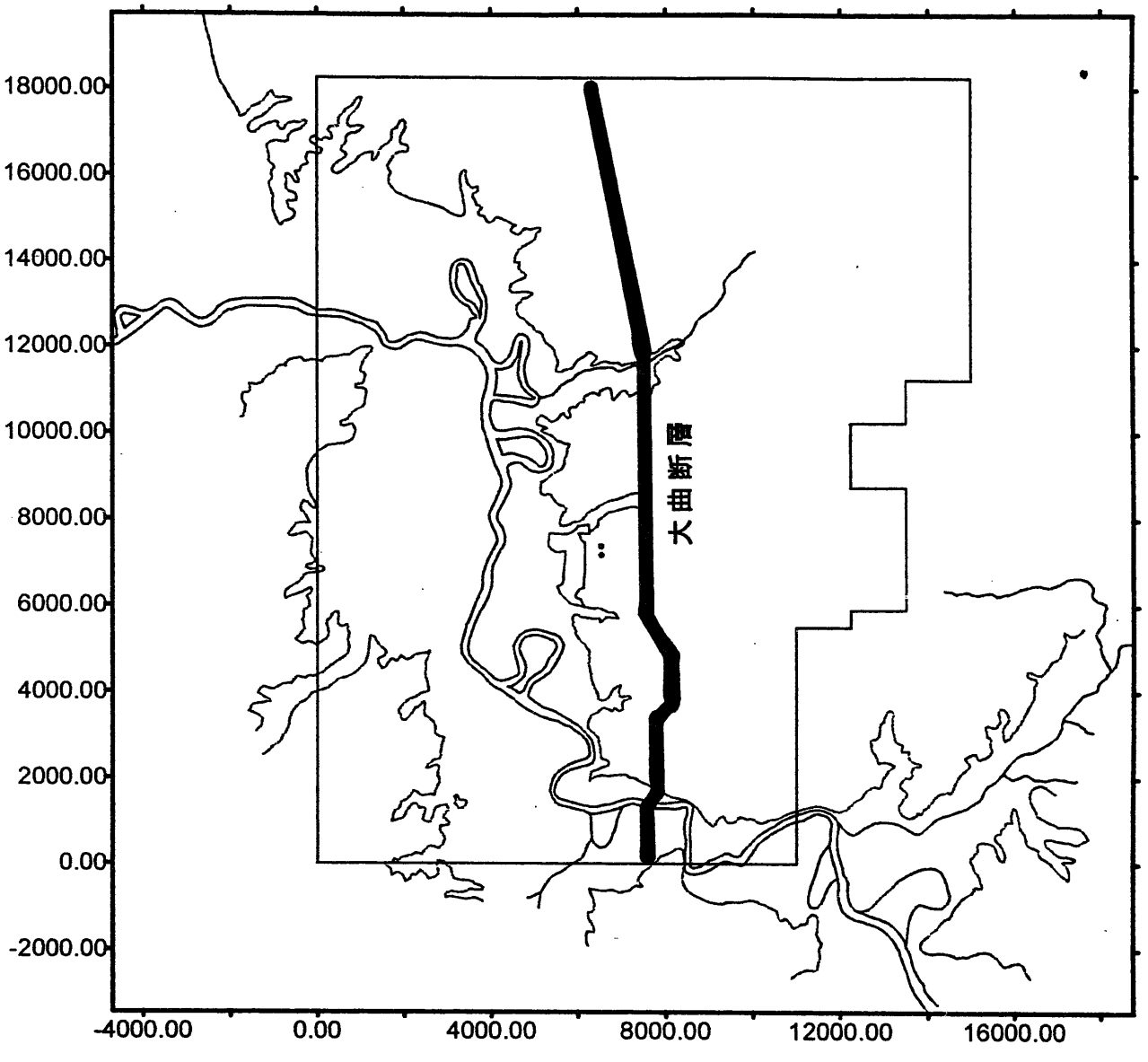
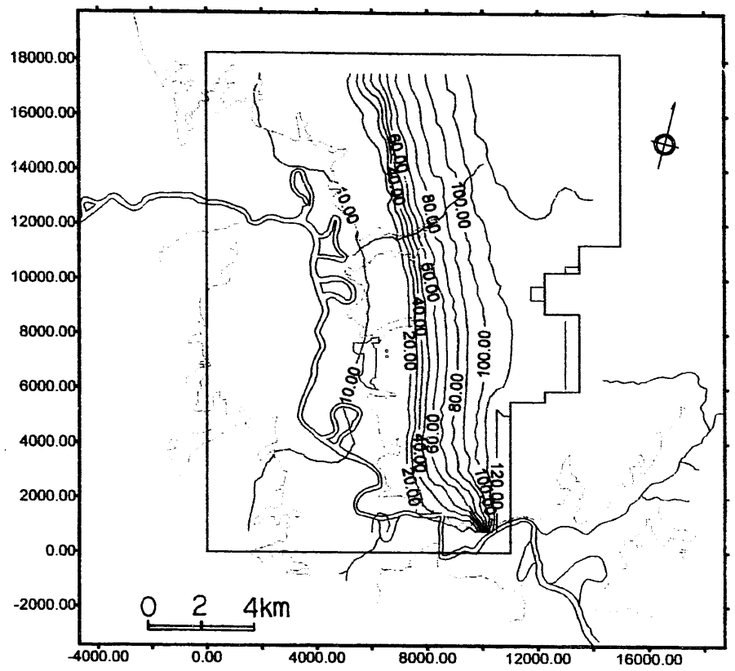
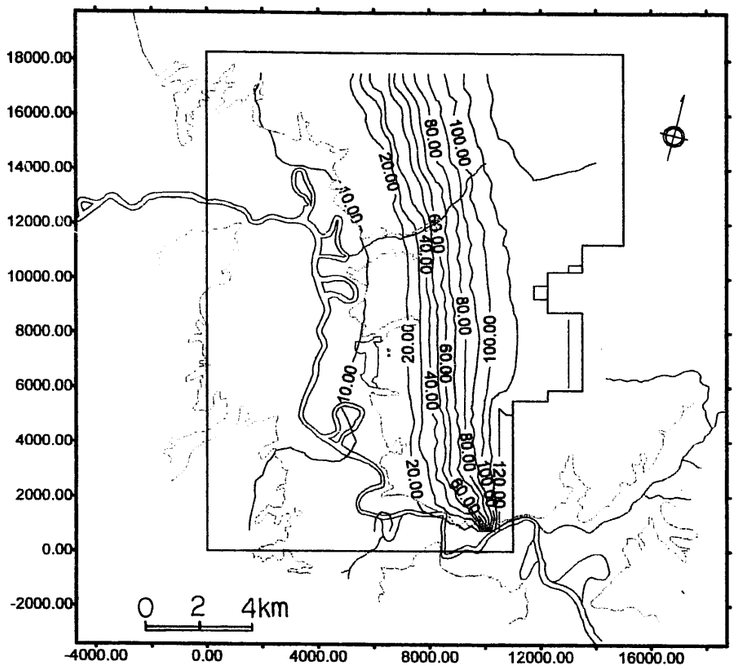


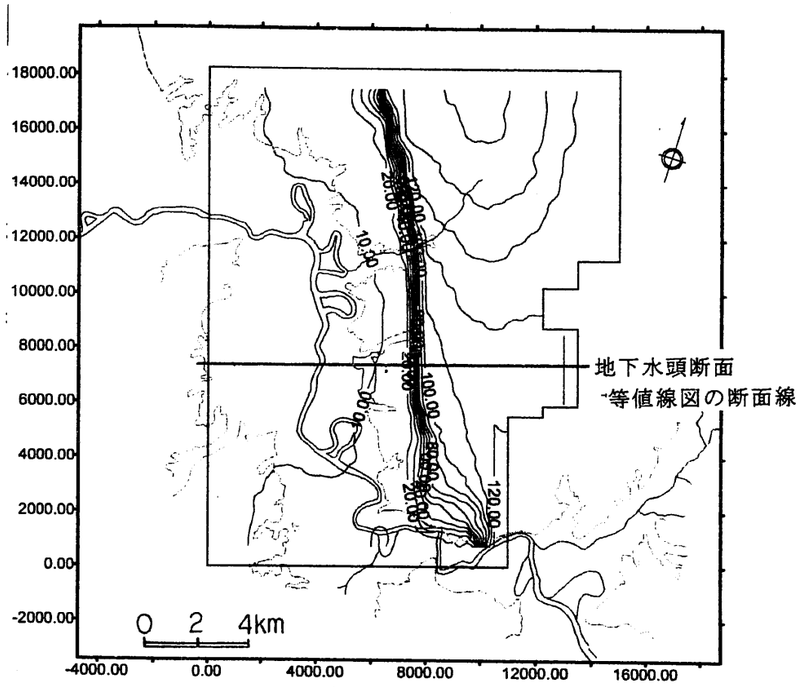
図 4−17　　大曲断層位置図



（１）大曲断層がない場合



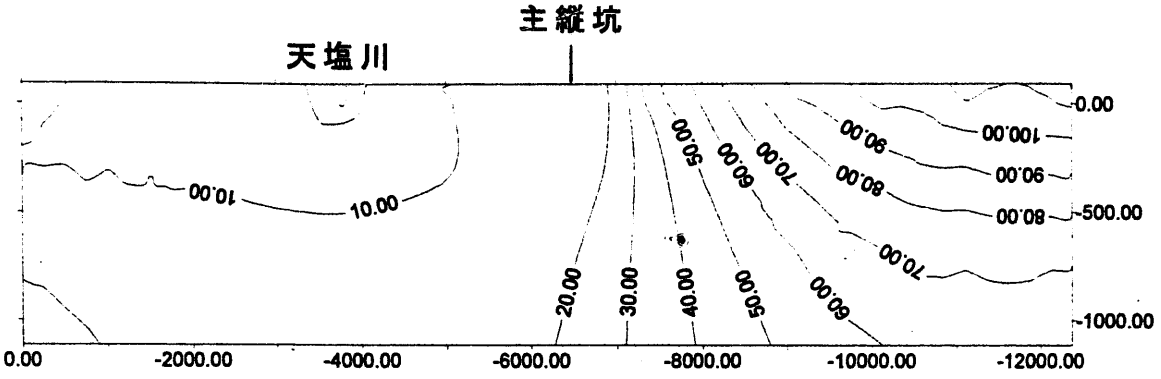
（２）大曲断層が破砕帯の場合
（k＝１０$^{-4}$cm/sec）



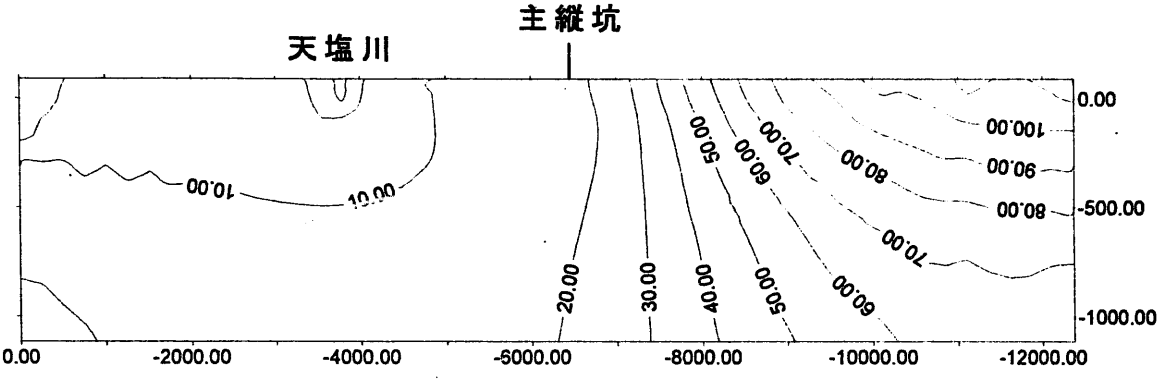
（３）大曲断層が粘土帯の場合
（k＝１０$^{-8}$cm/sec）

単位：ＥＬｍ

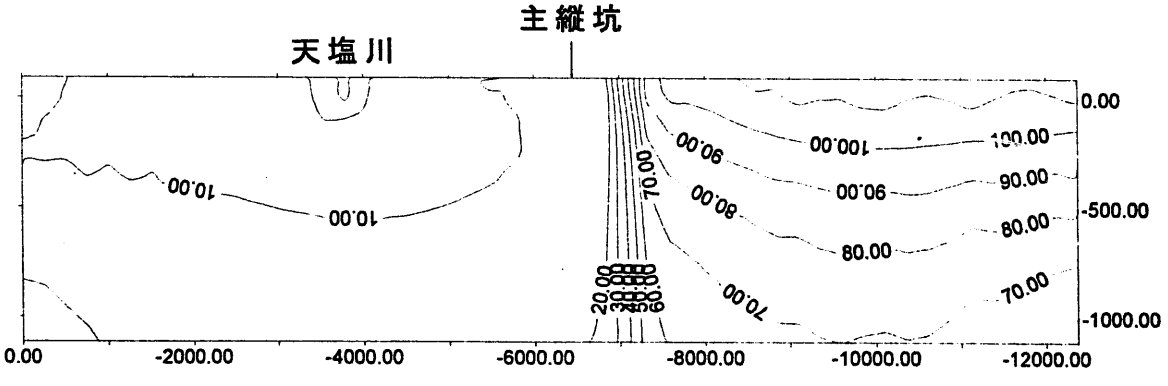
図4-18　計算地下水頭等値線図　第１層（地表高～－７ｍ）
（大曲断層を考慮した場合）



（１）大曲断層がない場合



（２）大曲断層が破砕帯の場合
（h＝１０$^{-4}$cm/sec）



（３）大曲断層が粘土帯の場合
（h＝１０$^{-8}$cm/sec）

単位：ＥＬｍ

図４-19　　計算地下水頭断面等値線図
（大曲断層を考慮した場合）

５．予測解析

検証計算によって、以下に示すようにパラメータを固定したモデルを用いて、貯蔵工学センター建設時における地下掘削、縦坑掘削、深地層試験場の設置など地下構造物の構築が地下水頭に対して与える影響を予測解析した。

①透水係数　：各地層とも実測透水係数の下限値（表３－１）を入力した。また、鉛直方向の透水係数を水平方向の透水係数の１／１０とした。

②境界条件　：東側境界は120～60m、西側境界は５～25mの開放境界（水頭固定条件）とした。南北境界は閉鎖境界とした。上部（地表面）境界は天塩川（固定水位＝地表標高を与えた）を除いて閉鎖境界とした。

③かん養量　：日平均かん養量を0.001mm（年間かん養量0.365mm）とし、全域一律に入力した。

その結果、縦坑の掘削による地下水頭への影響は掘削が深部に進むほど大きくなり、２ｍ以上の低下域で見た場合、最大で東西５ｋｍ程度、南北７ｋｍ程度に拡がると予想された。また、深地層試験場の設置による地下水頭への影響については、年々拡大し、２ｍ以上の低下域で見た場合には最大６ｋｍの範囲まで水頭低下が広がることが予想される。さらに、貯蔵工学センター建設に伴う地下掘削による地下水頭低下は、第１層（地表高～－７ｍ）ではセンター周辺で十数ｍに達し、２ｍ以上地下水頭が低下する範囲は天塩川を超えて下流側に３ｋｍ程度まで拡がると予想された。

５．１　解析条件

解析条件の対象となる地下構造物の掘削・設置は次の３施設がある。

①貯蔵工学センター建設時における地下掘削

②縦坑（主縦坑と副縦坑）の掘削

③深地層試験場の設置

それぞれの解析条件を以下の通り設定した。

（１）貯蔵工学センター建設時における地下掘削

地表部より20ｍ掘削して設置する計画となっているため、貯蔵工学センター敷地は標高－７ｍまで掘削され、敷地内の水は外部に排出されると考えられる。そこで、モデル上ではこの範囲の第１層の地下水頭を標高－７ｍで固定する条件とし、地下水が排水されるようにした。解析は定常解析で実施し、地下水頭が安定した状態における計算結果を示した。

（２）縦坑（主縦坑と副縦坑）の掘削

縦坑（主縦坑と副縦坑）については、次表に示すように４段階に分けて掘削が進行し、８０ヵ月間で掘削が終了する予定となっている。

そこで、モデルにおいては、各段階の最初の８ヵ月間が復工のない固定水頭条件（各段階の掘削底面の標高で地下水頭を固定する）とし、復工後は縦坑の部分が不透水条件になるように設定して、１ヵ月を計算単位時間として非定常計算を進めた。ただし、今回のモデルでは縦坑周壁は自由浸出面とはしていないため、縦坑近傍の地下水流動の詳細な予測には適していない。縦坑近傍における地下水流動を詳細に予測するためには浸出条件を与える必要があり、この点が今回の予測解析における問題点として残る。

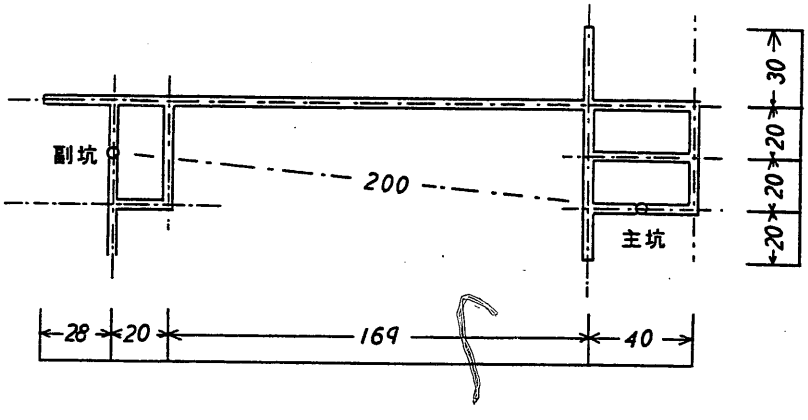
なお、初期条件は「貯蔵工学センター建設時における地下掘削」における定常解析結果を採用した。

段階	掘削開始後の月数	施　工　内　容	モデル上の条件
1	1～　6	掘削（地表～－164m）	固定水頭条件
	7～　8	復工	(EL-164m)
	9～20	試験	不透水条件
2	21～26	掘削（－164m～-364）	固定水頭条件
	27～28	復工	(EL-364m)
	29～40	試験	不透水条件
3	41～46	掘削（-364～－564m）	固定水頭条件
	47～48	復工	(EL-564m)
	49～60	試験	不透水条件
4	61～66	掘削（-564～－789m）	固定水頭条件
	67～68	復工	(EL-789m)
	69～80	試験	不透水条件

（３）深地層試験場の設置

深地層試験場は257ｍ×90ｍの範囲に直径４ｍの横孔を下図に示すように設置される計画となっている。この深地層試験場は縦坑の掘削後に設置されることになる。そのため、縦坑掘削後に設置されたと仮定して、初期条件は縦坑掘削８０ヵ月後の非定常解析結果を採用した。そして、２０年間の非定常解析（計算単位時間は１ヵ月）および定常解析を実施し、掘削後１年後、１０年後、２０年後、およびその後地下水頭が安定した時期（定常解析結果）の地下水頭分布について計算を行った。

モデルにおいては、深地層試験場のグリッドを固定水頭条件（深地層試験場の底面標高＝ＥＬ－７６４ｍで地下水頭を固定する）として計算を行なった。



深地層試験場平面レイアウト図　（m）

5．2　予測される地下水頭の変化

5．2．1　広域モデル

（1）縦坑掘削時

縦坑（主縦坑と副縦坑）の各段階における掘削開始８ヵ月後（復工完了直前：各段階の掘削底面の標高で地下水頭が固定された状態）における第６層（標高-360～-364m）と第10層（標高-760～-764m）の地下水頭低下量の平面等値線図を図５－１～４に、主縦孔を通る東西断面における地下水頭低下量断面等値線図を図５－５に示した。

①第１段階（地表部～-164m掘削時）

第１段階では第６層（標高-360～-364m）における地下水頭低下量等値線図（図５－１(1)）をみると、貯蔵工学センターおよび縦坑（主縦坑と副縦坑）を中心に水頭が低下しており、10m以上の低下域は直径２ｋｍ程度に広がっており、２m以上の低下域は東西に５ｋｍ程度、南北に７ｋｍ程度の範囲に広がっている。また、第10層（標高-760～-764m）の水頭低下（図５－１(2)）は小規模に留まっており、10m以上の低下域は認められない。

地下水頭低下量断面等値線図（図５－５(1)）によると、掘削の進んでいる深度においては100m以上の低下域が棒上に伸びているが、２m以上の低下域を見ると掘削の進んでいる深度より深い深度で低下域が下流側に広がっている。

②第２段階（-164m～-364m掘削時）

第２段階では第６層（標高-360～-364m）が最も水頭低下しており（図５－２(1)）、縦坑（主縦坑と副縦坑）を中心に直径１ｋｍの範囲は50m以上の水頭低下となっている。２m以上の低下域は東西に５ｋｍ程度、南北に７ｋｍ程度の範囲に広がっている。また、第10層（標高-760～-764m）の水頭低下（図５－２(2)）は小規模に留まっており、10m以上の低下域は認められない。

地下水頭低下量断面等値線図（図５－５(2)）によると、掘削の進んでいる深度においては50m以上の低下域が半径数百ｍの円状に広がっており、２m以上の低下域は下流側に広く広がっている。

③第３段階（-364m～-564m掘削時）

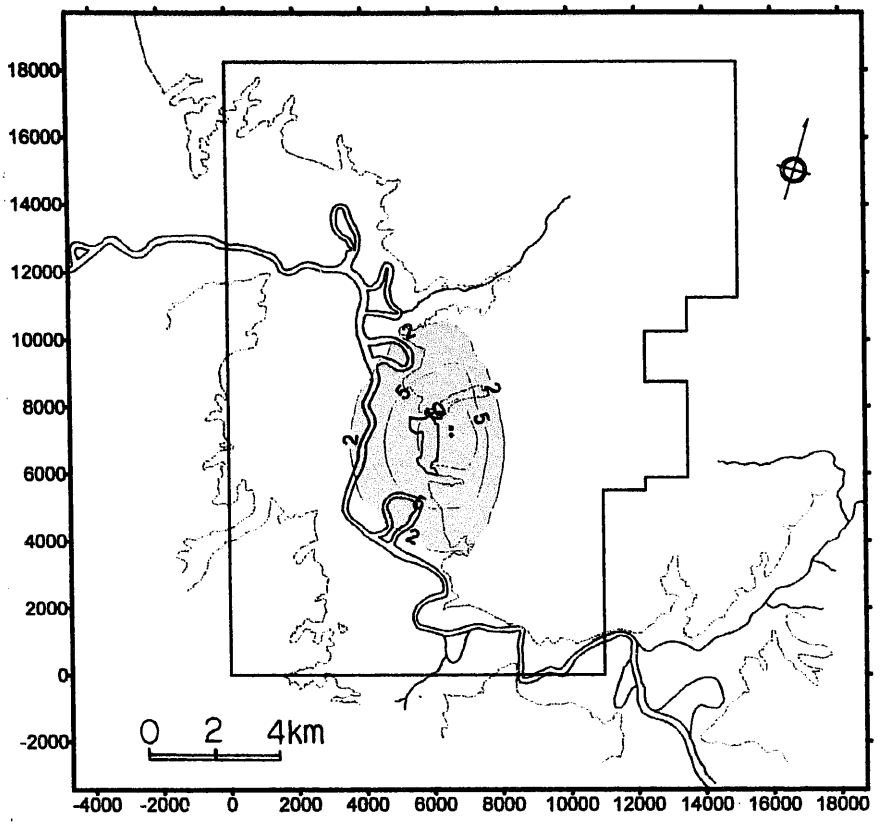
第３段階では第６層（標高-360～-364m）は第２段階とほぼ同程度の水頭低下分布となっている（図５－３(1)）。一方、第10層（標高-760～-764m）では水頭低下が進行しており（図５－３(2)）、最大で20m以上の低下となっており、２m以上の低下域は東西に４ｋm程度、南北に６ｋm程度の範囲に広がっている。

地下水頭低下量断面等値線図（図５－５(3)）によると、掘削の進んでいる深度においては100m以上の低下域が半径数百mの範囲に広がっており、２m以上の低下域は下流側に広く広がっている。

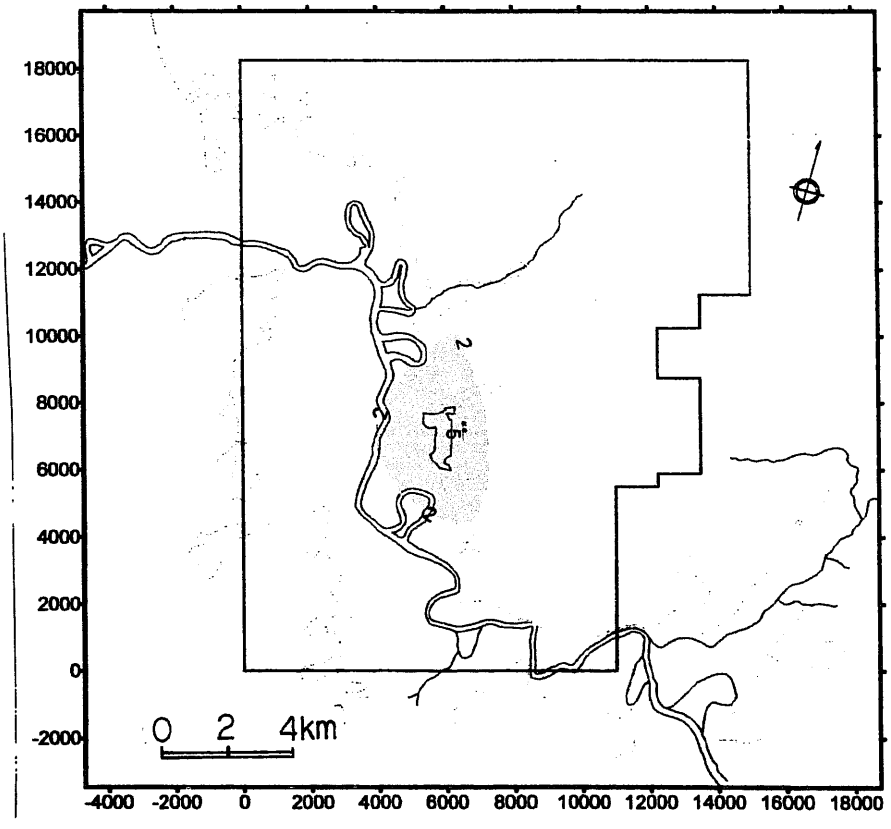
④第４段階（-564m～-789m掘削時）

第４段階になると第６層（標高-360～-364m）の水頭低下量（図５－４(1)）は、最大でも20m以内に留まっており、大きく減少している。しかし、２m以上の低下域は東西に５ｋm程度、南北に７ｋm程度の範囲に広がっており、大きな変化は認められない。また、第10層（標高-760～-764m）の水頭低下（図５－４(2)）は第３段階よりもさらに進んで20m以上の水頭低下域が直径１ｋmの範囲に広がっている。

地下水頭低下量断面等値線図（図５－５(4)）によると、掘削の進んでいる深度においては50m以上の低下域が半径数百mの円状に広がっており、２m以上の低下域は下流側に広く広がっている。



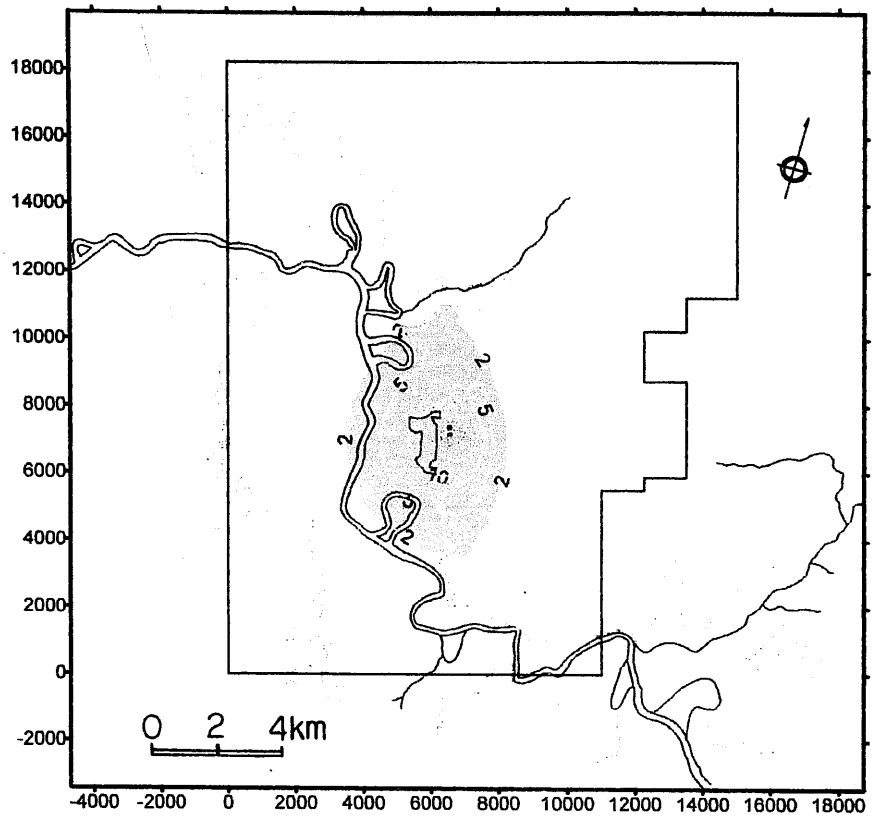
（１）第６層（標高－３６０～－３６４ᵐ）



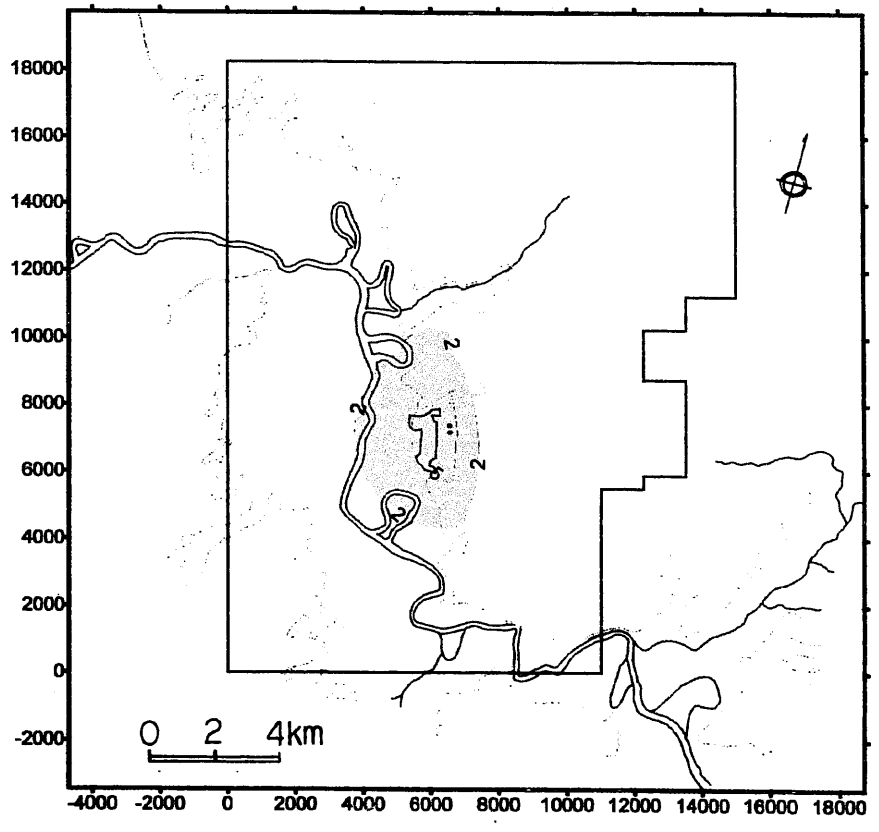
（２）第10層（標高－７６０～－７６４ᵐ）

単位：m

図５－１　地下水頭低下量等値線図（広域モデル）
縦坑掘削第１段階（－１６４ᵐまで掘削）



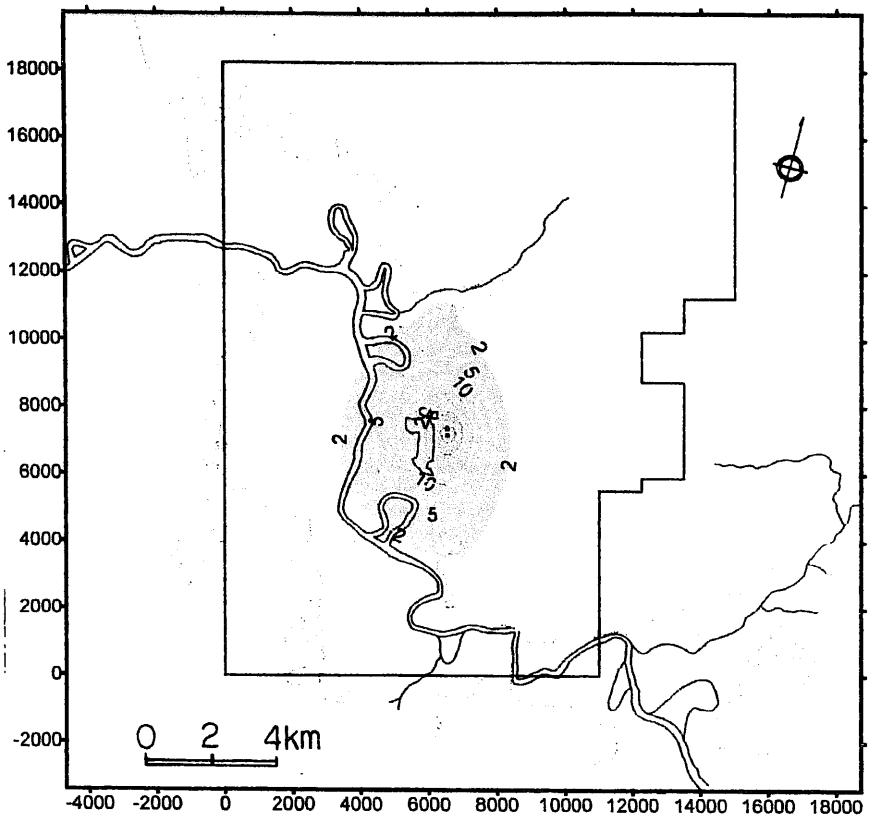
（１）第６層（標高－３６０～－３６４ᵐ）



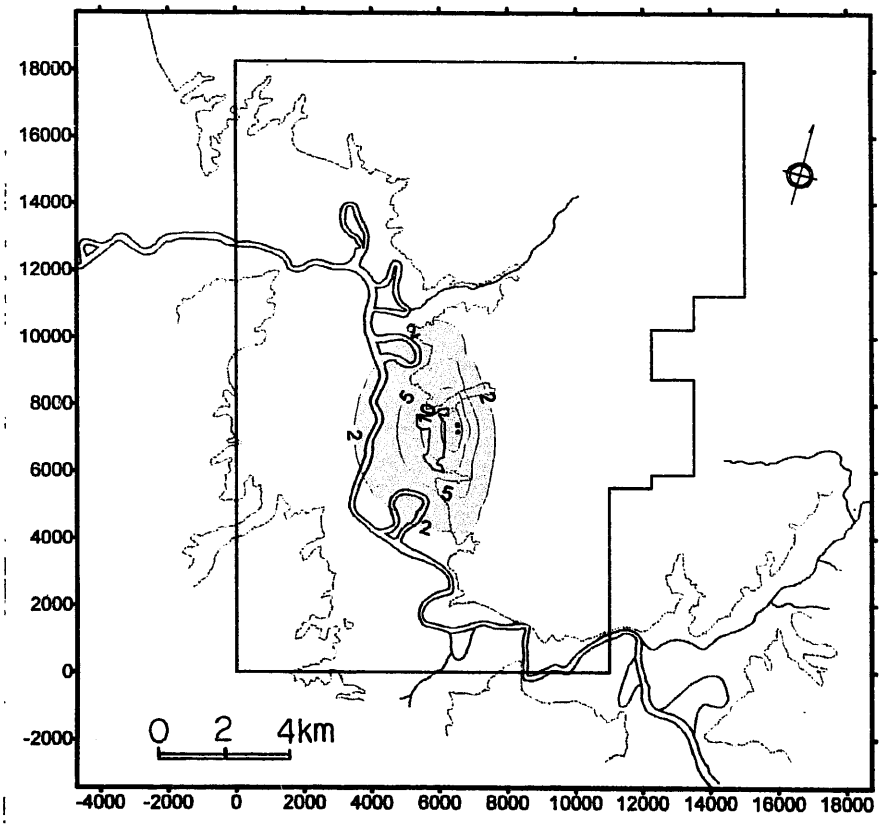
（２）第10層（標高－７６０～－７６４ᵐ）

単位：m

図5－2　地下水頭低下量等値線図（広域モデル）
縦坑掘削第２段階（－３６４ᵐまで掘削）



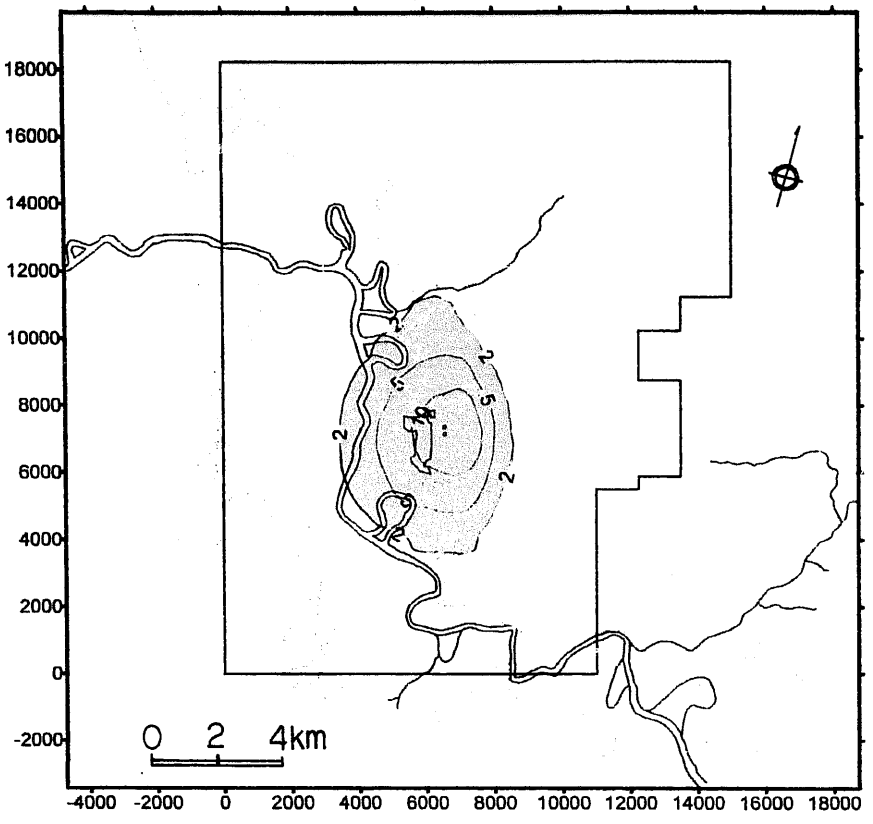
（１）第６層（標高－３６０～－３６４ᵐ）



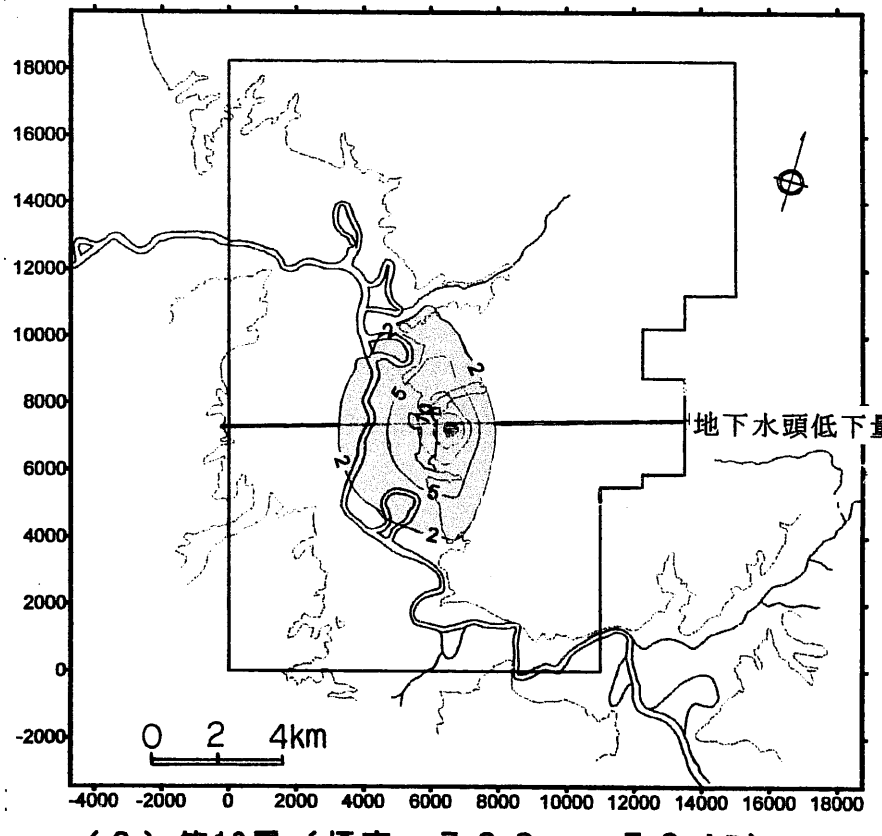
（２）第10層（標高－７６０～－７６４ᵐ）

単位：m

図5－3　地下水頭低下量等値線図（広域モデル）
縦坑掘削第３段階（－５６４ᵐまで掘削）



（１）第６層（標高－３６０～－３６４ᵐ）



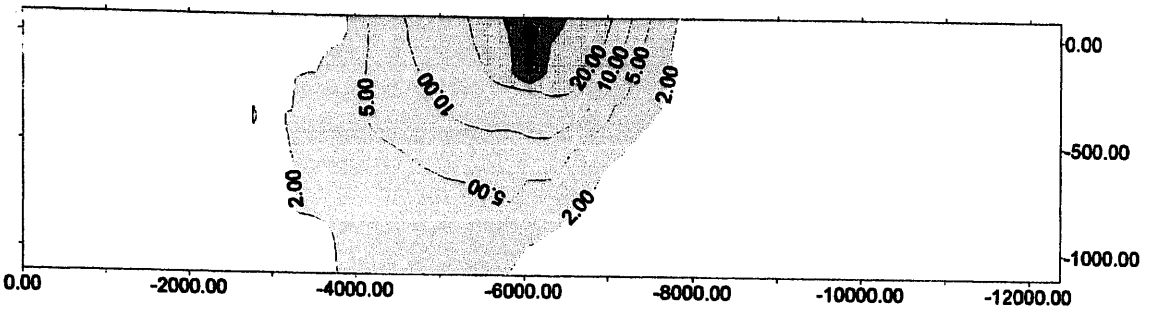
（２）第10層（標高－７６０～－７６４ᵐ）

単位：m

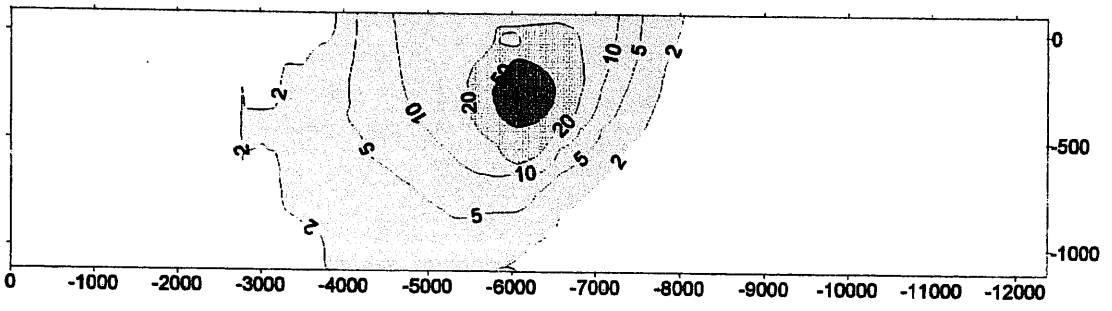
図5－4　地下水頭低下量等値線図（広域モデル）
縦坑掘削第４段階（－７８９ᵐまで掘削）

主縦坑

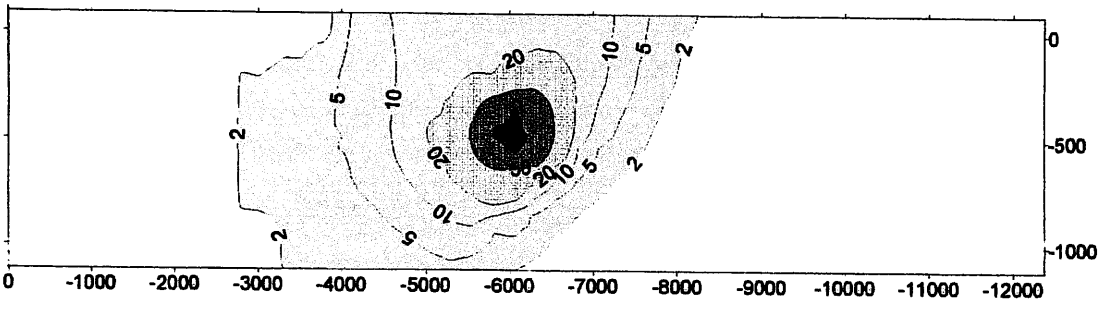
↓



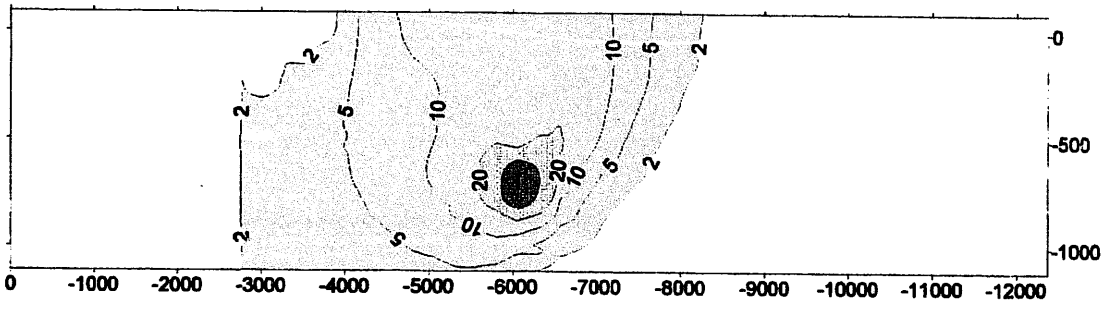
（１）第１段階（－１６４ᵐまで掘削）



（２）第２段階（－３６４ᵐまで掘削）



（３）第３段階（－５６４ᵐまで掘削）



（４）第４段階（－７８９ᵐまで掘削）

単位：m

図5−5　地下水頭低下量断面等値線図
（縦　坑　掘　削　時）

（２）深地層試験場設置後

縦坑の復工が完了し、深地層試験場が設置された後の第６層（標高-360～-364m）と第10層（標高-760～-764m：深地層試験場設置深度）の地下水頭低下量平面等値線図を図５－６～９に、主縦孔を通る東西断面における地下水頭低下量断面等値線図を図５－10に示した。

①１年後（図５－６）

第６層（標高-360～-364m）と第10層（標高-760～-764m）ともに地下水頭は深地層試験場を取り囲むように低下しており、２m低下の範囲は楕円状に広がり、東西５ｋm程度、南北７ｋm程度に広がっている。ただし、第６層では最大20m以内に留まっているが、第10層では数百mの範囲で20mを超える水頭低下が発生している。また、主縦坑を通る東西断面の地下水頭低下量を見ると、深地層試験場の位置する深度を中心に、縦孔掘削時と同様の水頭低下状況となっている。

②１０年後（図５－７）

平面分布で見た場合、地下水頭の低下状況は１年後とほとんど変わらず、２m低下の範囲は楕円状に広がり、東西５ｋm程度、南北７ｋm程度に広がっている。また、主縦坑を通る東西断面の地下水頭低下量を見ると、深地層試験場の位置する深度を中心に、20mを超える水頭低下域が拡大している。しかし、２m以上の低下域などの分布にはほとんど変化が認められない。

③２０年後（図５－８）

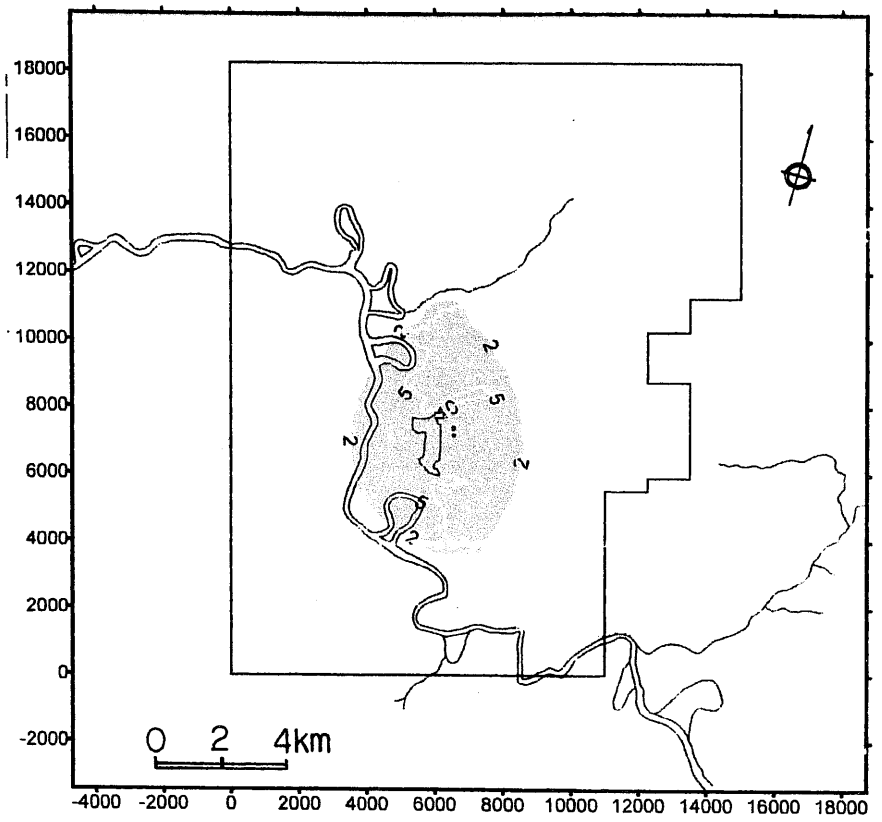
１０年後と比較して２０年後の水頭低下状況に大きな変化は認められない。

平面分布で見た場合、地下水頭の低下状況は１年後とほとんど変わらず、２m低下の範囲は楕円状に広がり、東西５ｋm程度、南北７ｋm程度に広がっている。また、主縦坑を通る東西断面の地下水頭低下量を見ると、深地層試験場の位置する深度を中心に、20mを超える水頭低下域が拡大している。しかし、２m以上の低下域などの分布にはほとんど変化が認められない。

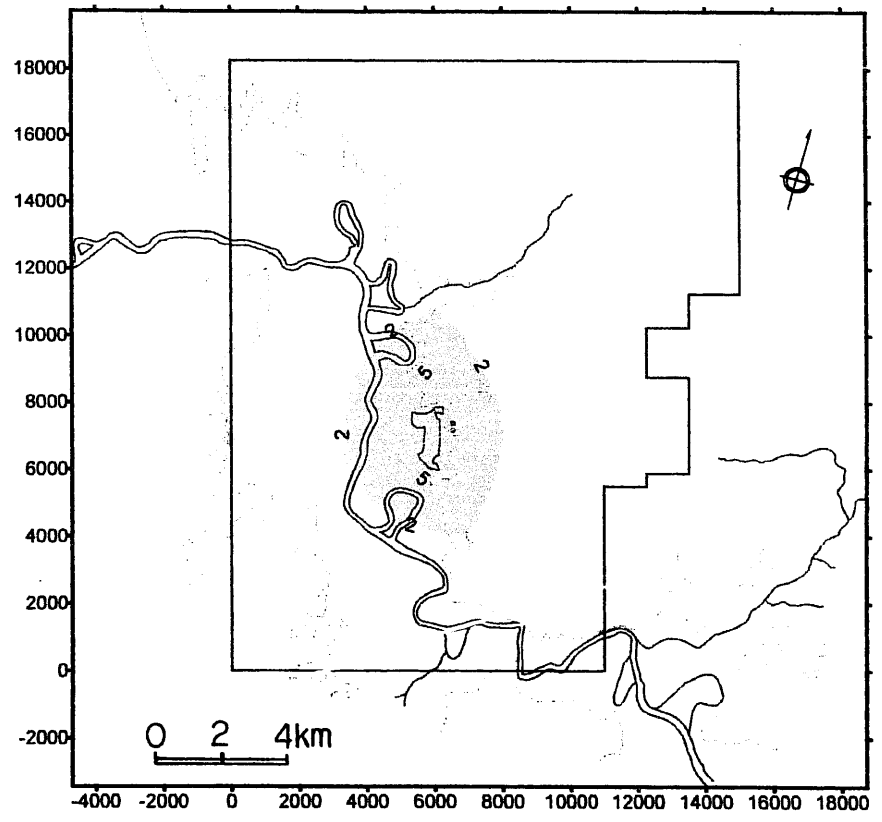
④水頭安定後（図５－９）

平面分布で見た場合、地下水頭低下は深地層試験場を取り囲み、ほぼ円状に広がっており、２m低下の範囲は約６ｋmの範囲に達している。また、主縦坑を通る東西断面の

地下水頭低下量を見ると、深地層試験場の位置する深度を中心にした20m以上の水頭低下域はほとんど変化していないものの、２m以上の低下域が上流側に大きく広がっている。



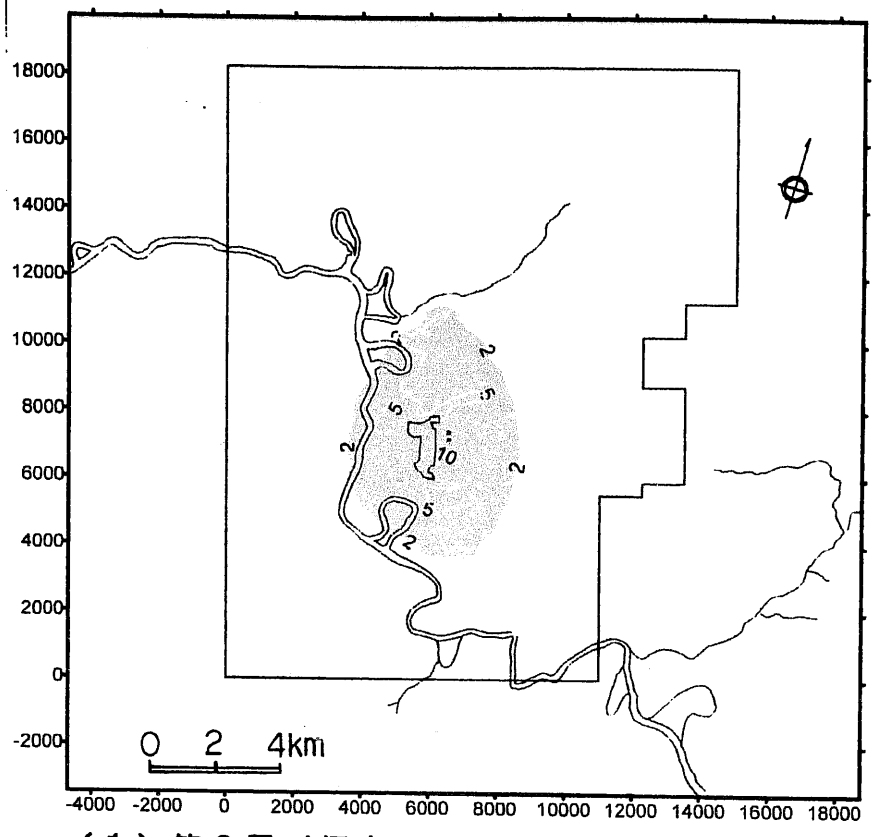
（１）第６層（標高－３６０～－３６４ᵐ）



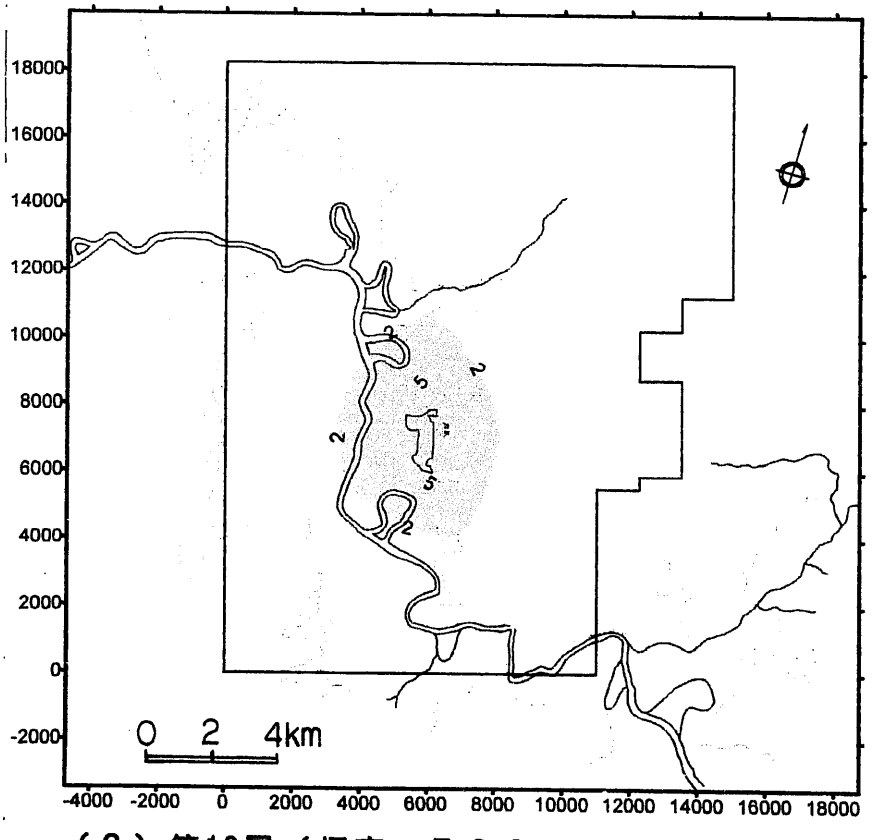
（２）第10層（標高－７６０～－７６４ᵐ）

単位：m

図5-6　地下水頭低下量等値線図（広域モデル）
深地層試験場設置１年後



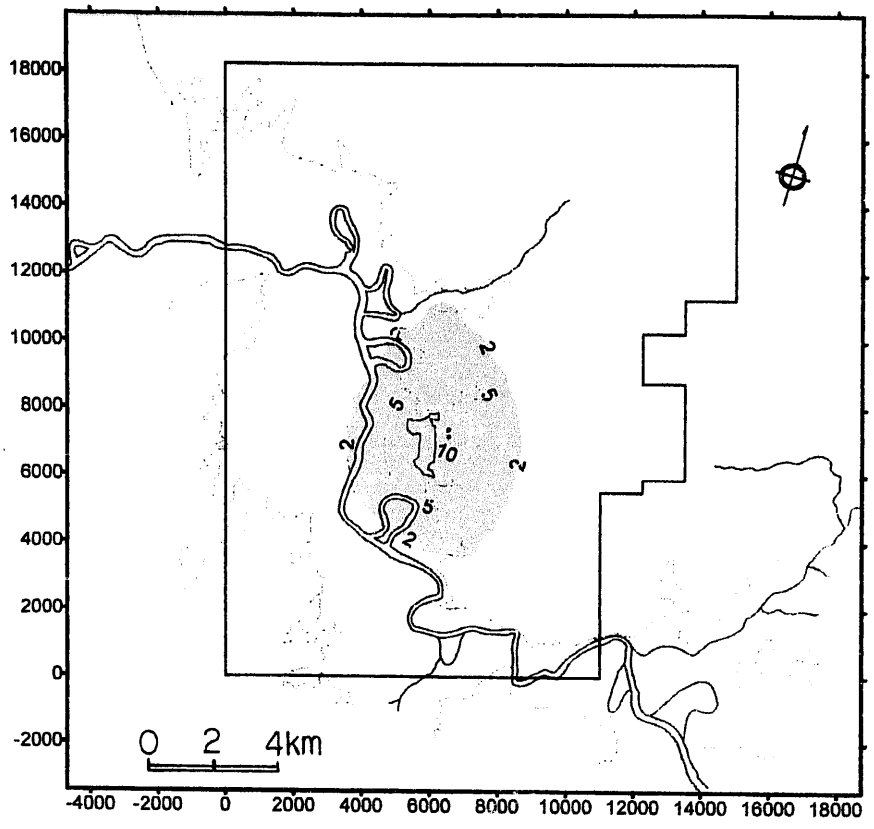
（１）第６層（標高－３６０～－３６４ᵐ）



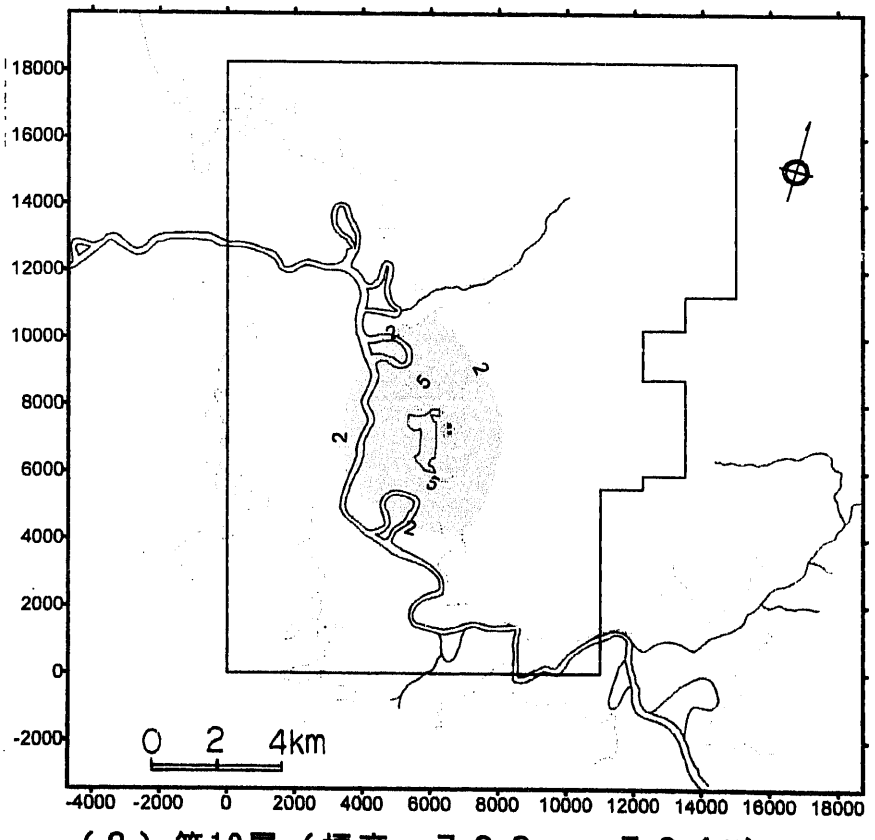
（２）第10層（標高－７６０～－７６４ᵐ）

単位：m

図5－7　地下水頭低下量等値線図（広域モデル）
深地層試験場設置１０年後



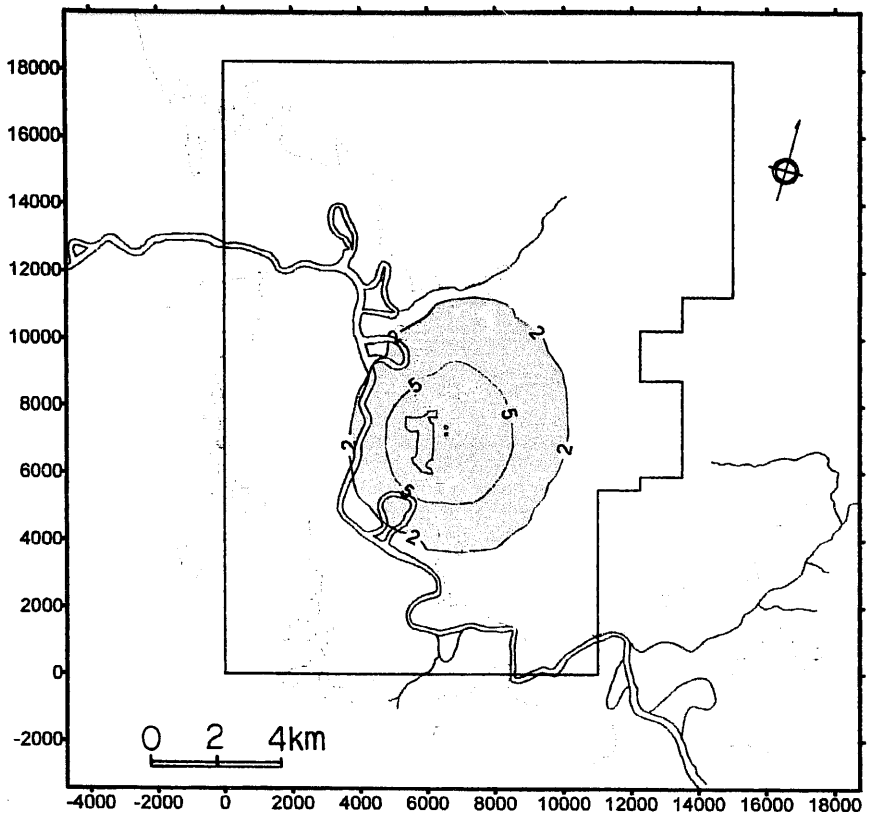
（１）第６層（標高－３６０～－３６４ᵐ）



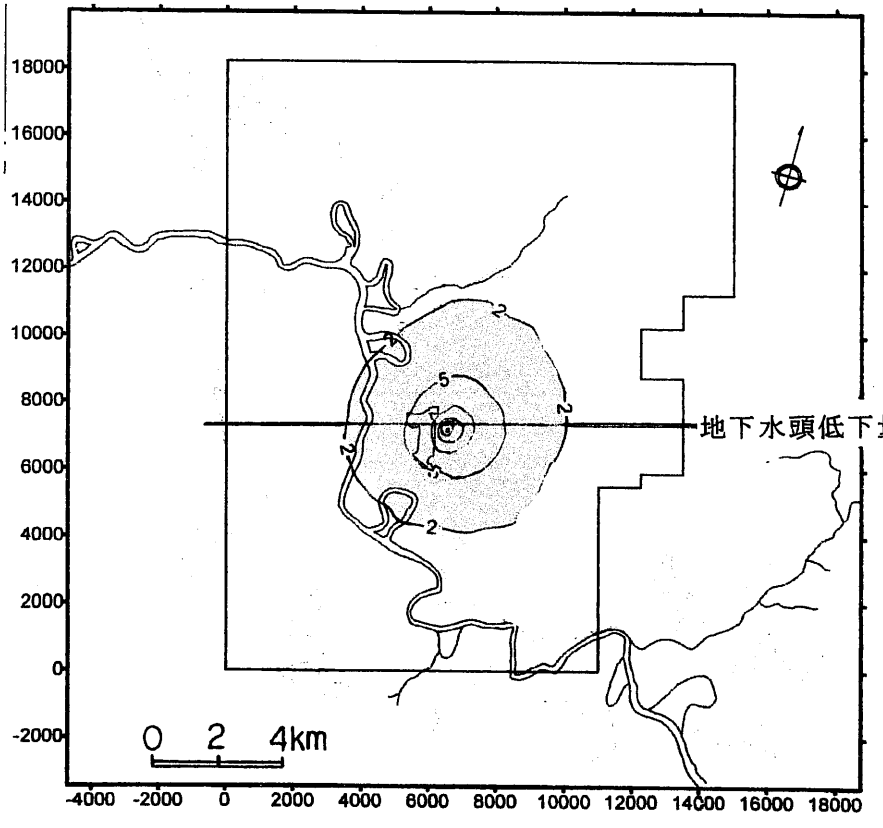
（２）第10層（標高－７６０～－７６４ᵐ）

単位：m

図5－8　地下水頭低下量等値線図（広域モデル）
深地層試験場設置２０年後



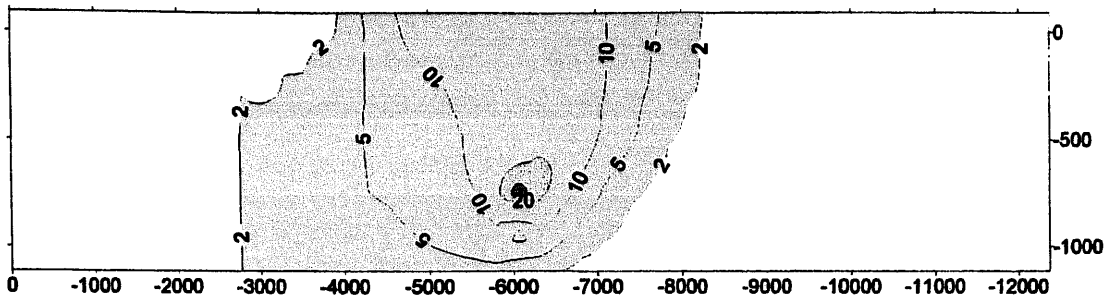
（１）第６層（標高－３６０～－３６４ᵐ）



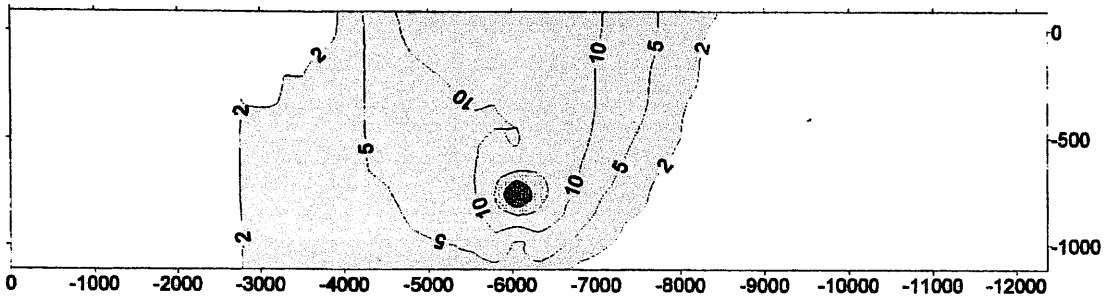
（２）第10層（標高－７６０～－７６４ᵐ）

単位：m

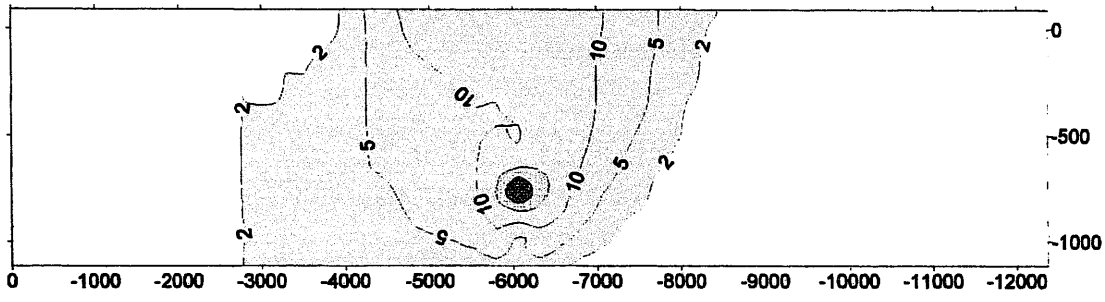
図5－9　地下水頭低下量等値線図（広域モデル）
深地層試験場設置後水頭安定期



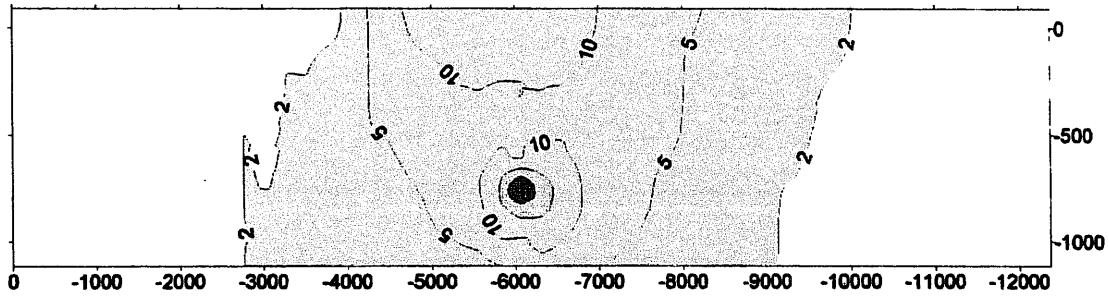
（1）１年後



（2）１０年後



（3）２０年後



（4）水頭安定期

単位：m

図5−10　地下水頭低下量断面等値線図
（深地層試験場設置後）

（３）水収支

予測解析における水収支を、縦坑および深地層試験場を中心に検討した。水収支は次式で表される。

（地下水かん養量）＋（地下水流入量）＋（貯留変化量）＝（地下水流出量）＋（湧出量）

この結果によると、各ケースとも地表からの地下水かん養量は１８２㎥／日程度、境界からの地下水流入量が４００㎥／日前後、境界からの地下水流出量が４５０～５６０㎥／日程度となっている。

縦坑掘削時には掘削の進行に伴って、縦坑へ湧出する水量が５１～３８１㎥／日の間で変化している。また、地下水頭の低下が進行することに伴い、地下水の貯留変化量も増加する傾向となっているが、第４段階ではほぼ収束の傾向にある。

深地層試験場掘削後には、３６㎥／日程度であった、試験場への地下水の湧出量が時間の経過とともに漸減し、地下水頭が完全に安定した後には１１㎥／日で落ち着いている。

表５－１　予測解析における水収支の内訳

単位：㎥／日

掘削対象	掘削段階	地下水かん養量	境界を通じた水平方向の地下水流動量		湧出量	貯留変化量
			流入量	流出量	縦坑 深地層試験場	
掘削前	現　状	１８２	３３８	５２１	―――	０
縦坑掘削	第１段階	１８２	４２６	４５９	２９３	１４４
	第２段階	１８２	３９４	４６９	２７６	１６９
	第３段階	１８２	３９８	４８６	３８１	２８７
	第４段階	１８２	３９７	５３０	５１	３
深地層試験場設置	１年後	１８２	３９４	５４３	３６	４
	１０年後	１８２	３９３	５５２	１１	－１２
	２０年後	１８２	３９３	５５２	１１	－１２
	水位安定後	１８２	３３０	５６０	１１	０

5．2．2　局所モデル

第１層の地下水頭低下量の平面等値線図を図５－11に、地下水頭下量の断面等値線図を図５－12に示した。

（１）貯蔵工学センター建設時における地下掘削時

地表部より20m掘削することとなっているため、貯蔵工学センターは標高－７mまで掘削され、センター内の水は外部に排出されると仮定した。そこで、モデル上ではこの範囲の第１層（地表高～－７m）の地下水頭を標高－７mで固定する条件とした。

地下水頭低下量等値線図によると、貯蔵工学センターの周辺域で地下水頭が10m程度低下している。また、２m以上の水頭低下は天塩川付近まで広がっている。

（２）縦坑掘削時

縦坑（主縦坑と副縦坑）については、４段階に分けて８０ヵ月間で掘削が終了する予定となっている。このうち、局所モデルの解析対象深度（標高－336m）に含まれるのは最初の２段階である。この２段階の掘削計画は下表に示すように４０ヵ月間で掘削が終了する予定となっている。

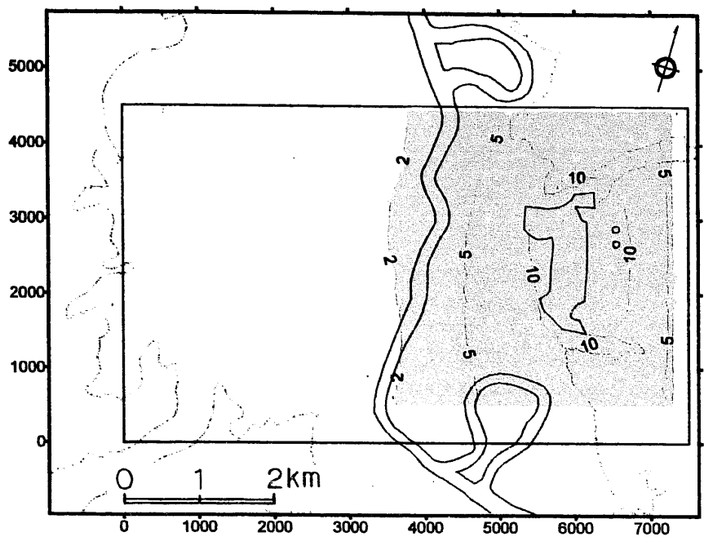
段階	掘削開始後の月数	施　工　内　容	モデル上の条件
1	1～　6	掘削（地表～－164m）	固定水頭条件
	7～　8	復工	(EL-164m)
	9～20	試験	不透水条件
2	21～26	掘削（－164m～-364）	固定水頭条件
	27～28	復工	(EL-164m)
	29～40	試験	不透水条件

第１段階の掘削が終了した時点における地下水頭低下は、貯蔵工学センターに加えて、縦坑（主縦坑と副縦坑）を中心に大幅な水頭低下が生じている。さらに、第２段階の掘削になるとさらに水頭低下の中心は地下深部に移動するものの、第１層においても水頭低下が20mを超える範囲が残っている。なお、水頭低下が２mを超える範囲は天塩川よ

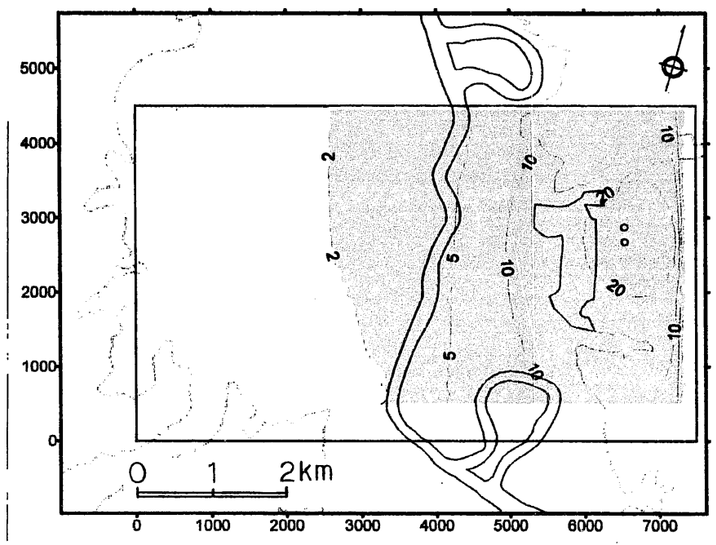
りも西側に広がっている。

（３）縦坑掘削後

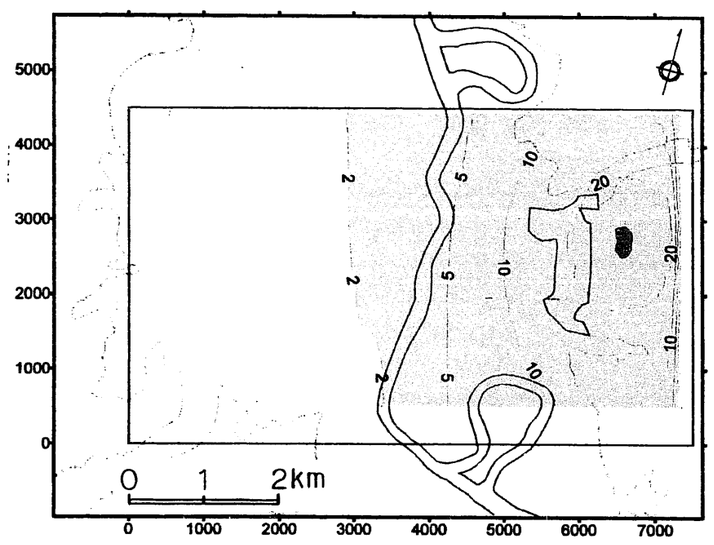
縦坑の掘削が終了し地下水頭が安定した時点においては、貯蔵工学センター建設時における地下掘削時と似通った水頭分布となっている。第１層（地表高～－７ｍ）の地下水頭低下量は地層工学センターの周辺で10ｍをやや上回る程度となっており、水頭低下域は楕円状に広がっている。２ｍ以上の水頭低下域で見ると、下流側に３ｋｍ弱、上流側に１ｋｍ程度の広がりとなっている。



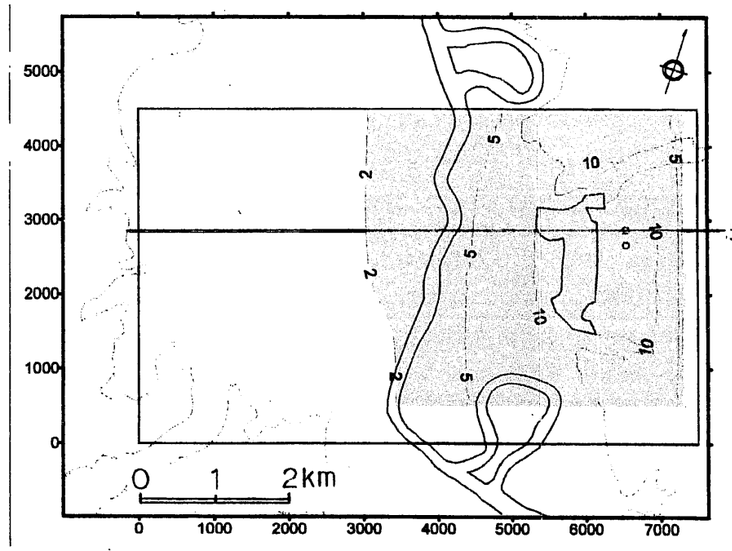
（１）貯蔵工学センター掘削時



（３）縦坑掘削第２段階
（－３６４ｍまで掘削）



（２）縦坑掘削第１段階
（－１６４ｍまで掘削）

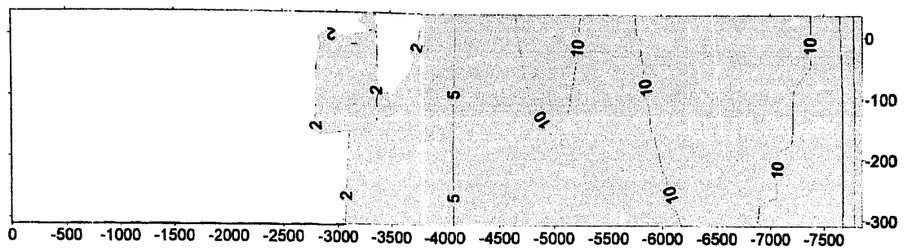


地下水頭低下量断面等値線図の断面線

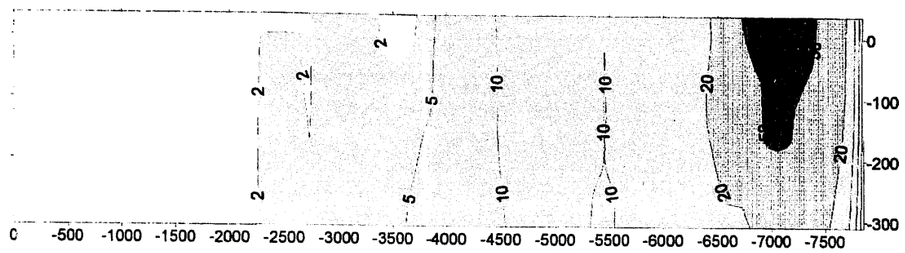
（４）縦坑掘削終了後
水頭安定期

単位：ＥＬｍ

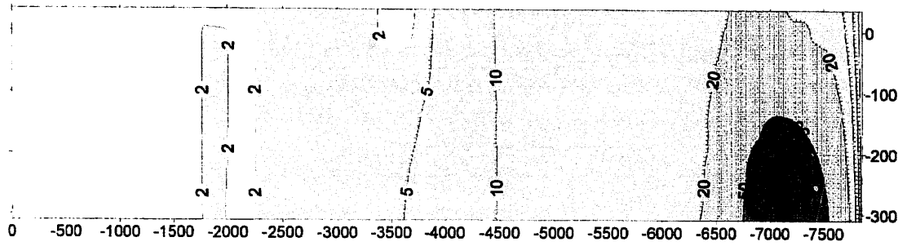
図 5-11　地下水頭低下量等値線図（局所モデル）
第１層（地表面～－７ｍ）の平面分布図



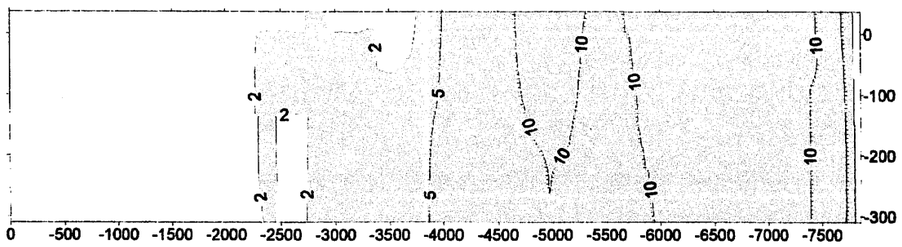
（１）貯蔵工学センター掘削時



（２）縦坑掘削第１段階
（－１６４ｍまで掘削）



（３）縦坑掘削第２段階
（－３６４ｍまで掘削）



（４）縦坑掘削終了後
水頭安定期

単位：ｍ

図5-12　地下水頭低下量等値線図（局所モデル）
（断面分布図）

５．３　予測結果の評価

予測解析の結果から以下の点が明らかとなった。

（１）広域モデル

○縦坑の掘削による地下水頭への影響は掘削が深部に進むほど大きくなるが、掘削工程通りに掘削が進んだ場合には、地下水頭への影響範囲は２ｍ以上の低下域で見た場合、最大で東西５ｋｍ程度、南北７ｋｍ程度に拡がると予想される。また、上流側（東側）よりも下流側（西側）に大きく水頭低下範囲が拡がる。

○深地層試験場の設置による地下水頭への影響については、年々拡大し、完全に地下水頭が安定した状態においては、２ｍ以上の低下域で見た場合には直径６ｋｍの同心円状に水頭低下の影響が広がることが予想される。地下水頭への影響は下流側については天塩川付近までに留まる。

（２）局所モデル

○貯蔵工学センター建設に伴う地表からの地下掘削による地下水頭への影響は、第１層（地表高～－７ｍ）では水頭安定期において楕円状（南北方向が長軸方向）に広がり、センター周辺で十数ｍに達し、２ｍ以上地下水頭が低下する範囲は天塩川を超えて西側に３ｋｍ程度まで拡がると予想される。

6．総合検討

6．1　まとめ

本研究では、貯蔵工学センター候補地周辺地区の地下水流動状況、及び貯蔵工学センター建設時・建設後の地下水流動の変化をシミュレートするための数値解析モデルを作成し、このモデルの有効性を確認するとともに、モデルを用いた予測解析を実施した。

モデルの作成にあたっては、まず、研究対象地区及びその周辺地区における水文地質関連資料、水文資料等の解析を行なうことにより、調査地区の帯水層区分、帯水層の水理定数の整理、及び地下水かん養量の推定を行なった。また、既往の地下水位観測結果、地下水水質の分布、及び地表標高より、地下水流動機構の推定を行なった。

これらの検討により、研究対象地区周辺の帯水層が、更別層上部，更別層下部，勇知総，及び声問層の４つのユニットに区分されること、また、地下水流動が、これらの帯水層の分布に加え、地表の高低差に応じた三次元的な動きを示すことが明らかとなった。

このことから、研究対象地区における地下水流動状況をシミュレートするためには、地下水流動を三次元的に表現することができる数値解析モデルを用いることが適切と判断し、研究対象地区及びその周辺地区をモデル領域とした三次元浸透流解析モデルを作成した。

本研究においては、目的に応じ、以下の２種のモデルを作成した。

○広域モデル

貯蔵工学センター候補地周辺の広い範囲における地下水流動をシミュレートし、深地層試験場建設等による、広範囲の地下水への影響を予測することを目的とする。広域かつ深深度における地下水流動を模擬する必要があるため、地表下1,354mまでをモデル対象領域とし、その間を１３層に区分した。

○局所モデル

地上施設、及び縦坑掘削第２段階時の周辺への影響を予測することを目的とする。浅部への影響が大きいことから、モデル対象領域は地表下336mまでとし、この間を11層に区分した。

作成されたモデルを用いて検討された事項、及びその結果の概要を以下に示す。

表６－１－１　モデル解析結果の概要

解析項目	解析の対象	結　果　の　概　要
モデルの検証計算 パラメーターの同定	地下水涵養量	０．００１mm／日とした。これは、初期値として与えた値である、約０．１mm／日（概略水収支より設定）の約１／１００となる。
	透水係数の異方性	鉛直方向の透水係数を水平方向の１／１０とした。この操作により、鉛直方向の地下水流動を適切に表現することができた。
	透水係数	各地層別に透水試験による実測値の下限値を与えた。 沖積層　1.55×10^{-5}cm／秒 恵北層　1.55×10^{-5}cm／秒 更別層　1.84×10^{-5}cm／秒 勇知層　2.80×10^{-6}cm／秒 声問層　1.58×10^{-7}cm／秒
	境界条件	南北境界は、閉鎖境界(不透水境界)とした。 東西境界は、開放境界(固定水頭境界)とした。
パラメータの応答解析	地下水涵養量	涵養量を0.0001mm/日,0.001mm/日,0.01mm/日と変化させた場合の応答水頭が大きく異なることから、地下水涵養量の設定が、地下水頭の解析結果に大きな影響えることがわかる。
	透水係数の異方性	透水係数の比を1.0とした場合と0.1とした場合では、鉛直方向の地下水流動状況に顕著な変化が見られる。
	透水係数	東西境界を開放境界(固定水頭境界)とした場合は、地下水頭の分布は境界水頭値に規定されるため、透水係数の変化による地下水頭の変化は僅かである。 東西境界を閉鎖境界(不透水境界)とした場合は、透水係数を実測値の上下限の範囲で変化させると、地下水頭には、最大150m程度の変化が生じる。
	境界条件	東西境界を閉鎖境界とした場合と開放境界とした場合の地下水頭分布の差は小さいことから、このモデルの範囲では、境界条件の設定方法が地下水頭の解析結果に与える影響は少ないと見られる。
	大曲断層の評価	断層を透水ゾーンとした場合には、考慮しない場合との変化はほとんど認められない。遮水ゾーンとした場合には、断層を挟んで地下水頭に顕著な変化が生じる。

表６－１－２　モデル解析結果の概要

解析項目	解析の対象	結　果　の　概　要
予測解析	縦坑掘削	縦坑の掘削による地下水頭への影響は掘削が深部に進むほど大きくなるが、掘削工程通り掘削が進んだ場合には地下水頭への影響範囲は２ｍ以上の低下域で見た場合、最大で東西５ｋｍ程度、南北７ｋｍ程度に拡がると予想される。また、上流側（東側）よりも下流側（西側）に大きく水頭低下範囲が拡がる。
	深地層試験場設置	深地層試験場の設置による地下水頭への影響については、年々拡大し、完全に地下水頭が定した状態においては、２ｍ以上の低下域で見た場合には最大６ｋｍの範囲まで水頭低下の影響が広がることが予想される。地下水頭への影響は同心円状に広がり、その範囲は下流側においては天塩川付近までに留まる。
	貯蔵工学センターの建設	地表部に建設される貯蔵工学センター建設に伴う地下掘削による地下水頭への影響は、第１層（地表高～－７ｍ）では水頭安定期において楕円状に広がり、センター周辺で十数ｍに達し、２ｍ以上地下水頭が低下する範囲は天塩川を超えて貯蔵工学センターから西側に３ｋｍ程度まで拡がると予想される。

6．2　調査計画の立案

本研究の実施により、様々な仮定に基づくシミュレーションモデルによる推定結果ではあるが、現在までその全貌が不明であった広域地下水の流動状況を１つの可能性ある姿として示すことができた。

今後の研究においては、これらの研究項目をさらに拡大し、対象地域の地下水流動機構をより正確に再現できるモデルを構築することが必要である。このためには、水文地質調査等、現地の特性を把握するための調査を進めることが肝要であるが、本研究の成果を踏まえると、表６－２に示す各種調査を優先的に実施することが望ましいと判断される。

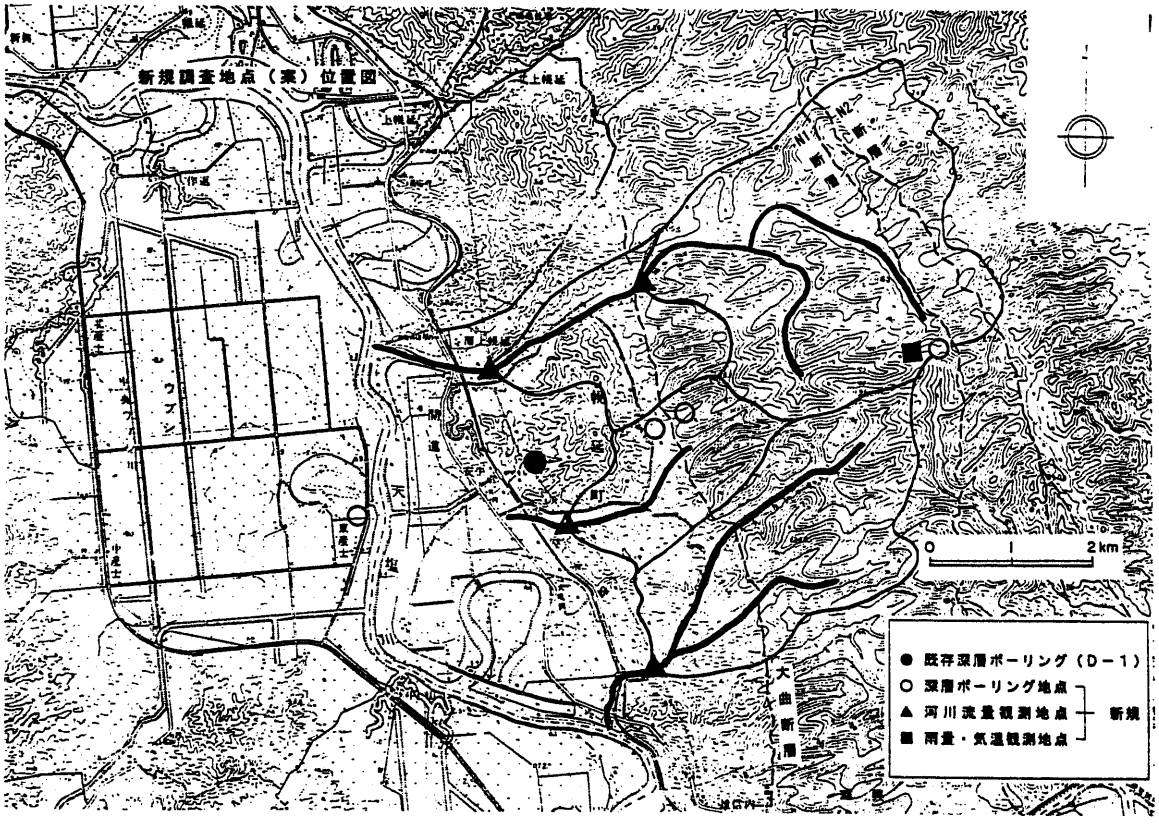


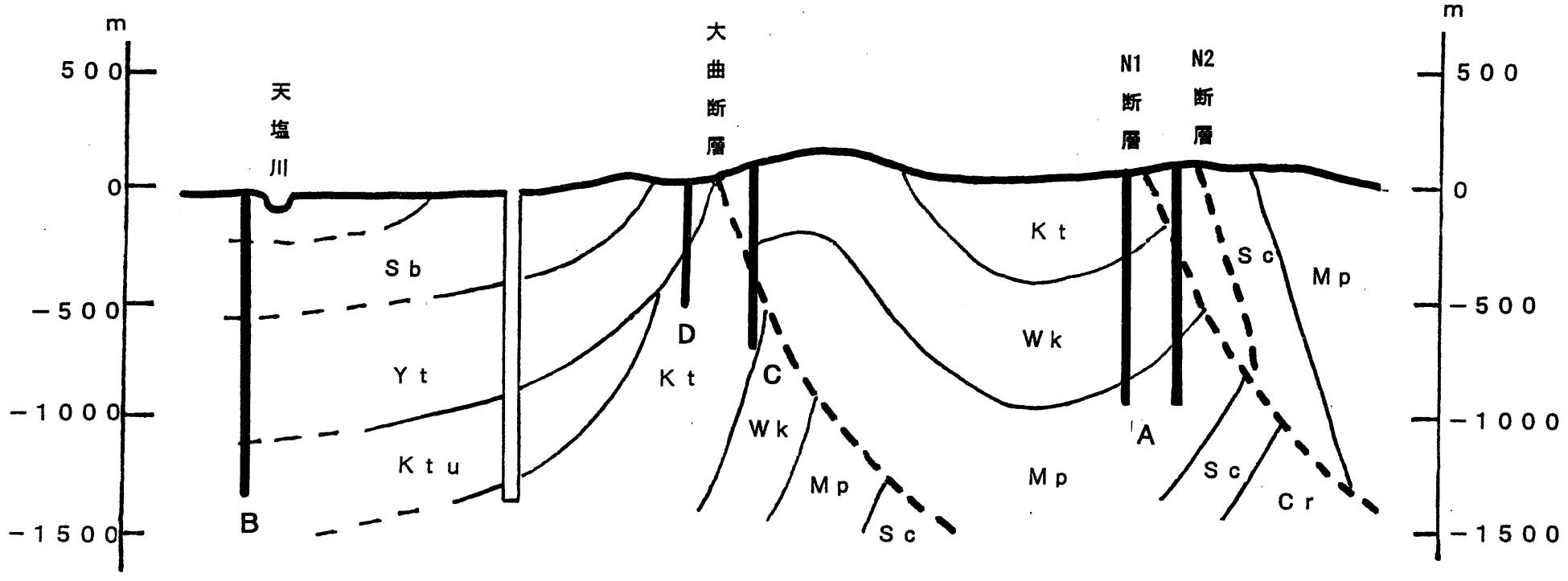
図６－１　新規調査地点（案）位置図

表６－２　調査計画の総括表

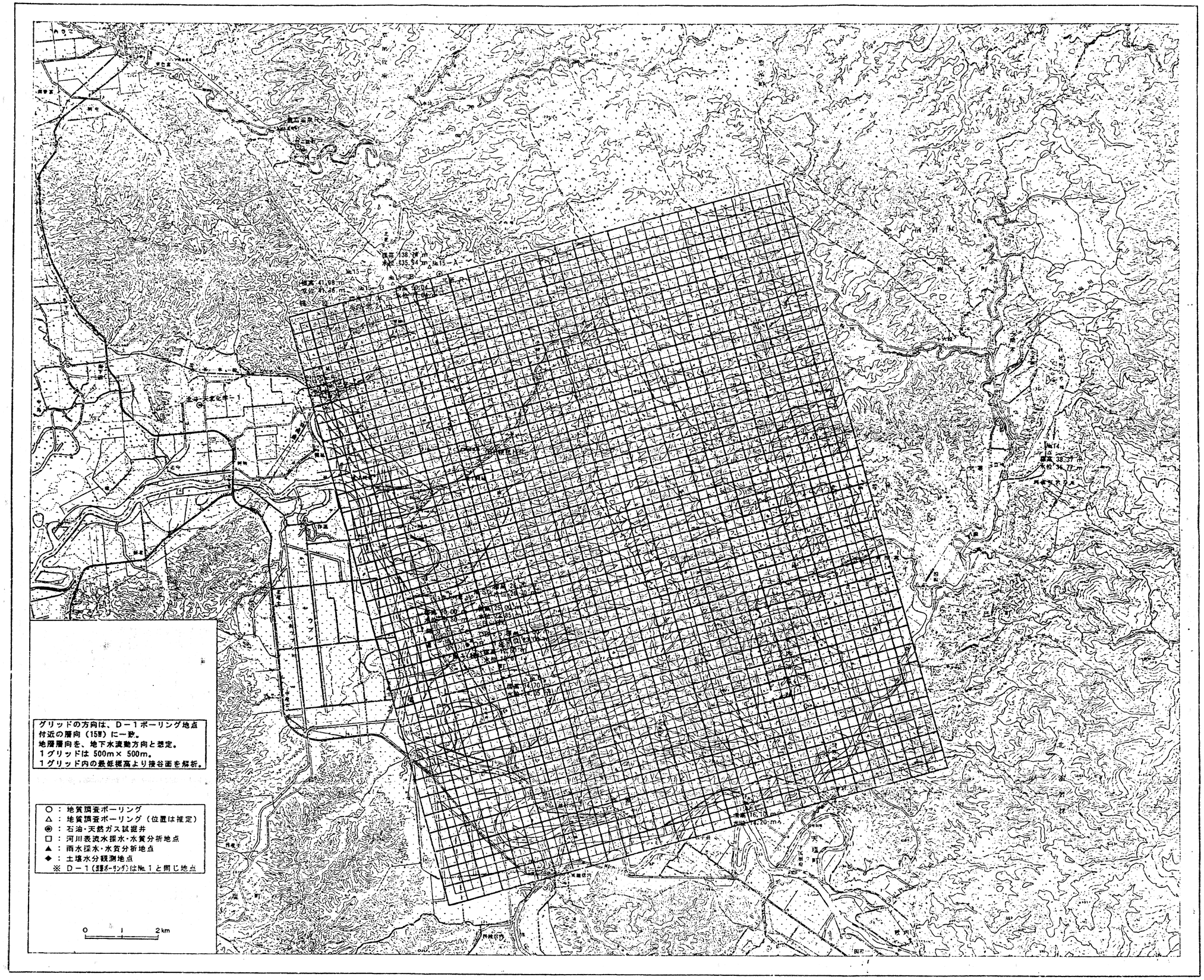
調査が必要な事項	本研究において残された課題	本研究の結果から提案される今後の調査内容	調査実施によって期待される成果	優先度
地下水涵養機構の評価	広域地下水流動モデルに与えた上部境界条件が地表への浸出を考慮していないため、地下水涵養量が過小に評価されている可能性が高い。地下水涵養機構（涵養量）を適正に評価することにより、実態にあった地表水と地下水の関係（浸透、浸出条件）をモデルに組み込む必要がある。	①調査地区近傍の３河川の流量、及び降水量，気温の連続観測を実施し、これらの測定結果を踏まえた低水流出解析により調査地区の水収支の詳細な検討を行なう。 ②降水量，土壌水分，地下水位の連続測定結果（現在実施中）、から、降雨の地下浸透量を推定する。	①と②の調査結果より、降水を地下浸透成分と、地表流出成分、蒸発散量に分離することができ、地下水涵養量を正確に把握することが出来る。浸出条件も含めた地下水涵養機構と地下水涵養量が解析結果に大きく影響することから、これらの調査実施の優先度は高い。	１
広域地下水流動系の評価	広域地下水流動系が、１本の深層ボーリングから得られた情報のみによるものであるため、モデル領域、及び境界条件の考え方の妥当性が十分に立証されていない。 また、本研究では、地下水モデルの領域は、接谷面から推定された地下水流動系を基本としたが、その他の手法により推定される流動系（例えば、対象地域を含む広範囲の流動解析結果に基づき、対象地域の流動系の範囲、すなわちモデル領域を求める）の存在の可能性については考慮されていない（本研究では、施設の建設等による地下水頭の変化を予測することもモデル作成の目的であるため、対象地域周辺のモデル化に主眼が置かれていたため）。	①地下水の分水界として取り扱ったＮ１断層近傍において、深層ボーリングを実施する。断層を挟んで西側と東側の２か所において掘削を行なう。層相から判断して上位の稚内層よりも透水性が高いと推定される増幌層の透水性、地下水頭の把握が必要であるため、掘削深度は１，０００ｍとする。	深度による地下水頭の変化、水質の変化より、掘削地点付近を広域地下水流動の境界（分水界）とすることの妥当性、及び、適切な境界条件の与え方を検討することができる。 既往の深層ボーリング（Ｄ－１）は、地下水の流出域に位置するが、地下水流動系を把握するためには、涵養域に相当する地点における深層ボーリングの実施が特に重要である。	１
		②地下水の流出域として取り扱った沖積低地において、深層ボーリングを実施する。掘削地点は、地下水モデルにおいて排水条件とした天塩川の近傍とする。また、声問層中の地下水流動方向の確認のため、掘削深度は既往ボーリング（Ｄ－１孔）と同じ１，３５０ｍとする。	①のボーリングと同じく、深度による水頭と水質の変化より、天塩川沿いの低地に広域地下水が流出していると考えることの妥当性を評価することができる。	２
		③地下水シミュレーションモデルの解析領域を拡大し、物理境界となる、海岸線やその他の大規模な地表水体、明瞭な不透水層を境界条件とした流動解析を実施し、この結果から、調査地域周辺における地下水流動系の区分を行なう。	広域地下水流動系の推定により、地下水中の物質移動に関する特性を評価しておくことが必要な地域（範囲）を抽出することができる。また、各種の地質条件、境界条件に基づく解析を実施しておくことにより、深層ボーリング実施時に得られた水頭分布や水質分布の解釈に利用することができる。	３
		④蓄積された情報に基づき、地下水シミュレーションモデルの再構築を行なう。	施設の建設による地下水位の変化をより正確に予測することができる。	４
大曲断層の水理特性の評価	本研究では、基本的には大曲断層は他の地盤と同じ水理条件として取り扱ったが、本研究で用いたモデルの設定条件の範囲では、解析結果に不都合が生じることはなかった。しかしながら、この断層を難透水ゾーンとしたモデル解析結果と、断層を考慮しない場合では、水頭分布（とくに断層の上流側）に大きな違いが見られることから、モデルの妥当性を立証するためには、この断層の水理的な機能を評価しておくことが必要である。	①断層を挟んだ上下流において、表流水の流況、地下水の湧出状況を踏査と流量観測により把握する。	断層を挟んだ水の流出状況より、断層が難透水性ゾーンとなっている可能性を評価することができる。	１
		②断層の上流側（東側）において深層ボーリングを実施する。掘削深度は、大曲断層の確認のため、８００ｍとする。	断層部の地質試料、透水試験結果、深度による地下水頭の変化、断層を通過後の水頭の変化等の情報から、断層の水理的性質を推定することができる。	２
		③断層の下流側（西側）において深層ボーリングを実施する。掘削深度は、声問層の確認のため、５００ｍとする。	上流側で実施する深層ボーリングとの水頭の違いから、断層が難透水性ゾーンとなっていることの確認ができる。	３

地点	深　度	目　　的
A	1,000m	地下水の分水界確認
B	1,350m	地下水の分水界確認
C	800m	大曲断層の透水性評価
D	500m	大曲断層の透水性評価

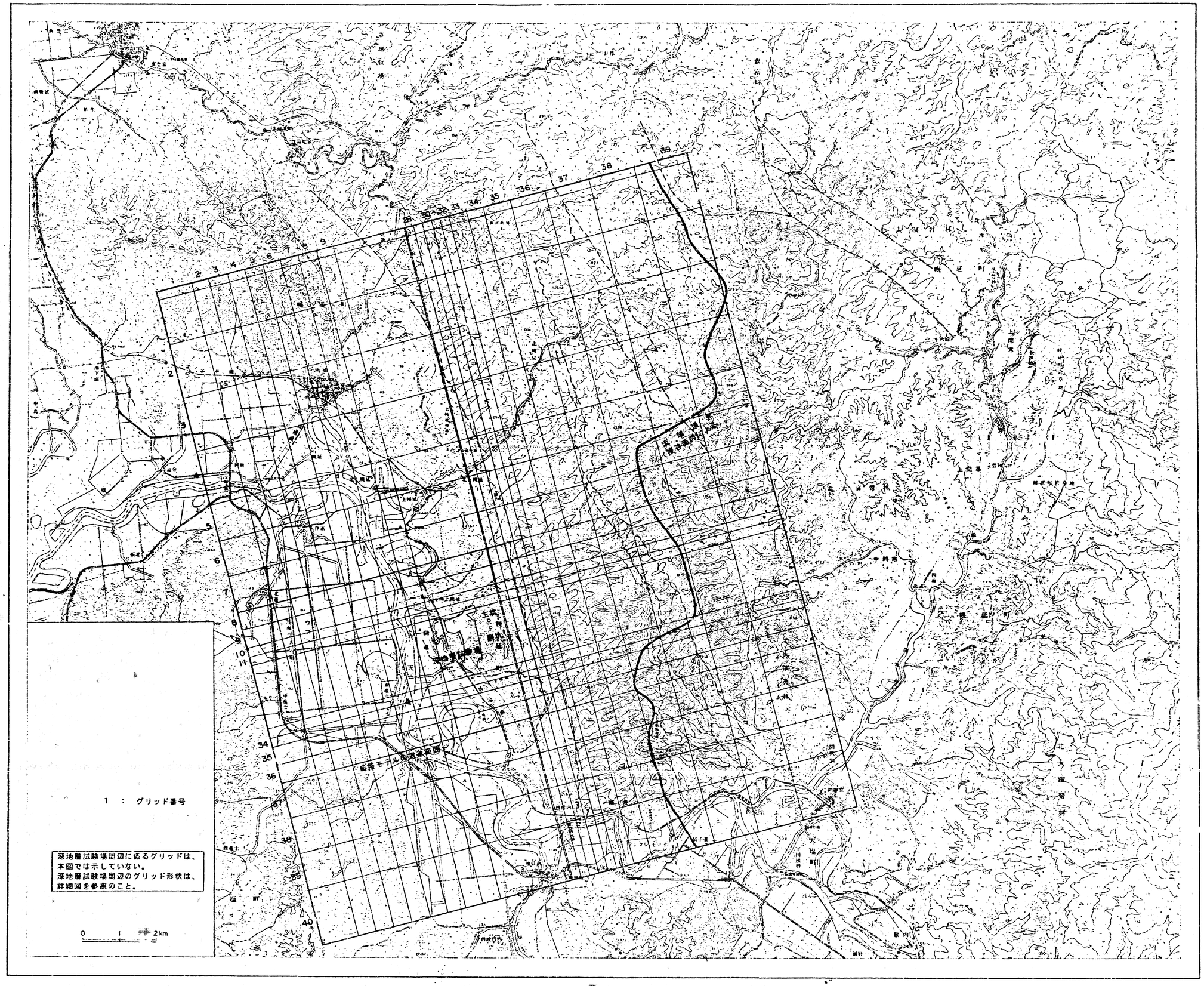
新規深層ボーリング位置図（案）



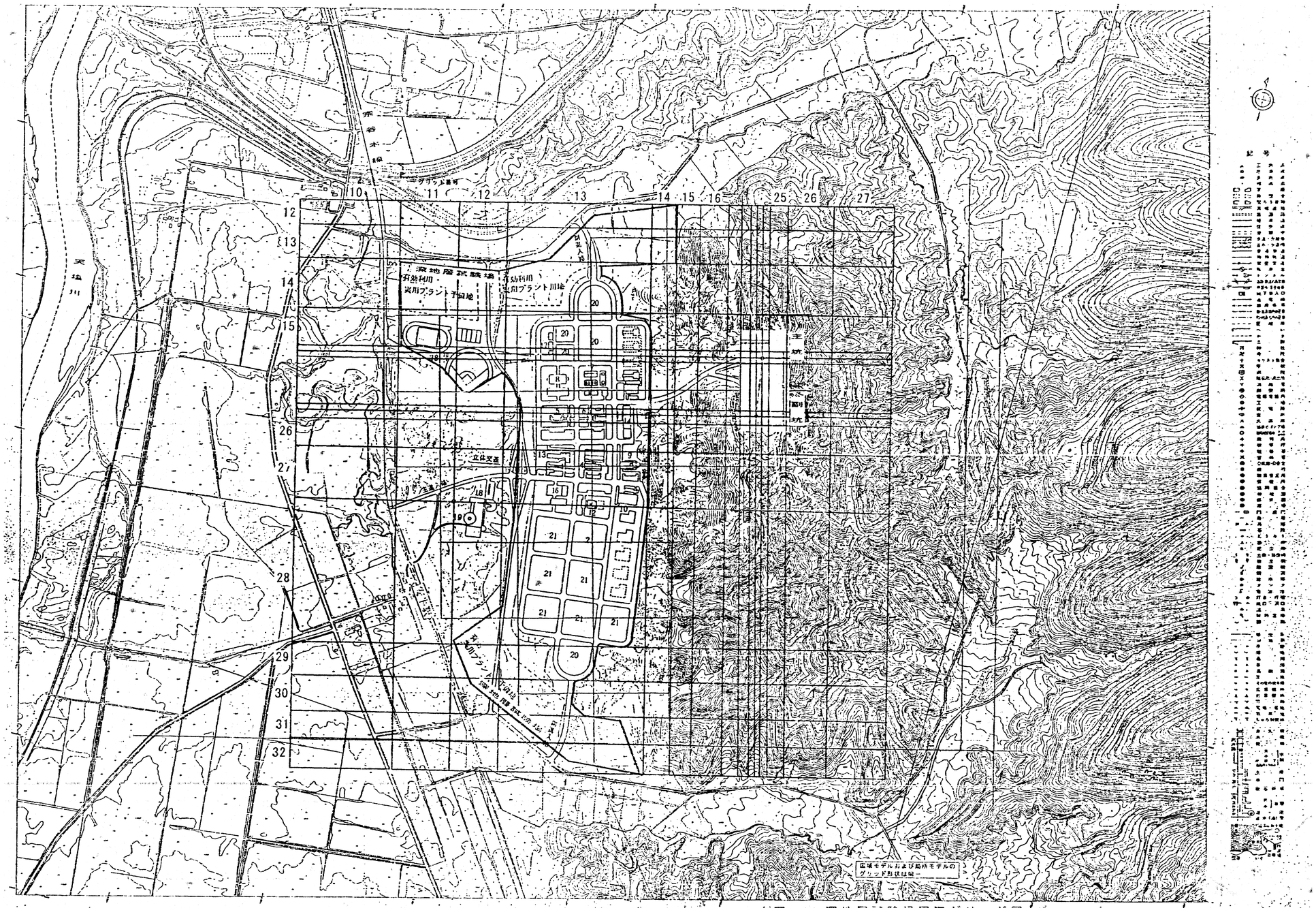
Sb：更別層　Yt：勇知層　ktu：声問層上部相　Kt：声問層主部相　Wk：稚内層　Mp：増幌層　Cr：白亜系



付図—1　接谷面解析グリッド図



付図―2　広域モデルのグリッド図



付図—3　深地層試験場周辺グリッド図