

JNC TJ-5400 2003-009

幌延深地層研究計画における  
地下水流动に関する研究

(核燃料サイクル開発機構 委託研究成果報告書)

2004年2月

株式会社 間 組

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

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49  
核燃料サイクル開発機構  
技術展開部 技術協力課  
電話：029-282-1122（代表）  
ファックス：029-282-7980  
電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:  
Technical Cooperation Section,  
Technology Management Division,  
Japan Nuclear Cycle Development Institute  
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184  
Japan

© 核燃料サイクル開発機構  
(Japan Nuclear Cycle Development Institute)  
2004

# 幌延深地層研究計画における 地下水流动に関する研究

(核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書)

2004年2月

株式会社 間組

2004年2月

## 幌延深地層研究計画における地下水流动に関する研究

(核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書)

今井久<sup>\*</sup>, 福留和人<sup>\*</sup>, 薄川幸司<sup>\*</sup>, 佐々木肇<sup>\*</sup>  
千々松正和<sup>\*</sup>, 茂呂吉司<sup>\*</sup>

### 要 旨

幌延深地層研究計画における調査対象地域の深部地質環境を理解するため、水理地質構造モデルの構築および地下施設建設に伴う深部地質環境への影響の予測を目的に

- 1) 解析領域の設定および解析メッシュの作成
- 2) これまでの調査データを用いた広域地下水流动系の説明
- 3) 立坑掘削に伴う地下水流动系への影響の予測

を実施した。

解析領域の設定および解析メッシュの作成では、広域を対象とした領域（広域スケール）と地下施設周辺に着目した領域（施設スケール）の設定および解析メッシュデータを作成した。これまでの調査データを用いた広域地下水流动系の評価では、広域スケールの解析メッシュデータを利用した地下水流动解析を実施し、解析結果と今までに得られた調査データの対比から塩分濃度やポテンシャル分布に与える透水係数の影響が把握された。また、採水された深部地下水は1000年～100万年オーダーの地下水年代を有することが示され、地下施設付近の地下水は南西方向に流れることが示された。立坑掘削に伴う地下水流动系への影響の予測では、立坑掘削後10～20年を対象に、立坑内への湧水量、立坑内の塩分濃度変化、周辺の水位変化等を予測した。湧水量や周辺の水位変化は透水係数の値に強く依存することが示され、塩分濃度は余り変化しないことが示された。さらにこれら解析、予測結果から今後必要な調査、解析評価について言及した。

---

本報告書は、株式会社間組が核燃料サイクル開発機構との委託研究契約により実施した研究成果に関するものである。

機構担当部課室：幌延深地層研究センター 深地層研究グループ

※株式会社間組

FEBRUARY 2004

## Study on Groundwater Flow Characteristics in Horonobe Underground Research Laboratory Project

(Japan Nuclear Cycle Development Institute,  
Document Prepared by Other Organization, Based on the Contract)

Hisashi Imai \* Kazuto Fukudome \* Koji Kayukawa \* Hajime Sasaki \*  
Masakazu Chijimatsu \* and Yoshiji Moro\*

### Abstract

To understand the deep underground geological environment around the Horonobe Underground Research Laboratory, and to predict the underground facility construction effect on the geological environment, the following items were carried out:

- 1) Setting of two analytical regions and Build up of two numerical simulation datasets
- 2) Description of regional groundwater flow characteristics at Horonobe Project site using the results of the numerical simulation and obtained field data
- 3) Estimation of underground facility excavation effect on the groundwater flow

By the region setting, the two analytical regions were set, one is for the regional scale, and another is for the facility scale focusing on the area surrounding the underground facility. And two numerical simulation datasets corresponding to the regions were built up. The description of characteristics of regional groundwater flow showed that the distribution of chlorine content and that of the potentials of groundwater were sensitive to the hydraulic conductivity. The groundwater age of sampled pore water was estimated to be in the range of thousand years to million years. The direction of groundwater flow at the underground facility was estimated to be in the southwest direction. The predictive simulations of underground facility excavation effects on transient groundwater flow for ten or twenty years were carried out, and the results showed that the quantity of inflow to the underground facility and the change of hydraulic heads around the underground facility were strongly influenced by the hydraulic conductivity settings, and that the chlorine content of groundwater were not changed so much. From the descriptions of the hydro geological characteristics and the simulations, desirable investigations and further simulation approaches were proposed.

---

This work was performed by HAZAMA CORPORATION under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute.

JNC Liaison: Horonobe Underground Research Center Geotechnical Science and Engineering Group

\* HAZAMA CORPORATION

和文要旨

英文要旨

## 目 次

表・図目次

本文

1. はじめに	2
2. 解析領域の設定および解析メッシュの作成	2
2.1 解析領域の設定	3
2.1.1 広域スケールの解析領域設定	3
2.1.2 施設スケール領域の設定	9
2.2 広域スケールモデルのメッシュ作成	17
2.3 立坑近傍モデルのメッシュ作成	41
3. これまでの調査データを用いた広域地下水流动系の評価	57
3.1 調査結果とそれに基づく概念モデルの構築	57
3.1.1 調査結果	57
3.1.2 概念モデル	74
3.2 解析の概要	79
3.3 地下水流動解析	80
3.3.1 基本となる解析条件設定	80
3.3.2 解析結果	86
3.3.3 考察	120
3.4 塩分を考慮した密度流解析	125
3.4.1 解析モデル・解析条件	125
3.4.2 解析結果	129
3.4.3 考察	145
3.5 まとめ	147
4. 立坑掘削に伴う地下水流动系への影響の予測	149
4.1 概要	149
4.2 MODFLOW による立坑形状を模擬した解析	149
4.2.1 解析モデル	150

4.2.2 解析結果	154
4.2.3 考察	162
4.3 広域スケールモデルでの解析	163
4.3.1 解析モデル	164
4.3.2 解析結果	166
4.3.3 考察	174
4.4 施設スケールモデルでの解析	175
4.4.1 解析モデルの概要	176
4.4.2 解析結果	182
4.4.3 考察	202
4.5 立坑掘削影響予測結果のまとめ	203
 5. おわりに	205
5.1 モデル作成、解析結果のまとめ	205
5.2 調査計画への提案	207
謝辞	208
 参考文献	209

## 図目次

図 2.1-1 解析領域の変遷	2
図 2.1.1-1 流域分割図	4
図 2.1.1-2 解析領域案①	5
図 2.1.1-3 解析領域案②	6
図 2.1.1-4 解析領域案③	7
図 2.1.1-5 設定した解析領域	8
図 2.1.2-1 立坑イメージ図	9
図 2.1.2-2 水平坑道平面図	10
図 2.1.2-3 水平坑道詳細図	11
図 2.1.2-4 非定常式での影響半径	14
図 2.1.2-5 透水係数、貯留係数と影響半径	14
図 2.1.2-6 施設スケール領域	15
図 2.1.2-7 広域スケールモデル内の立坑周辺領域	16
図 2.2-1 モデル作成のフロー	17
図 2.2-2 モデル作成過程の9断面の設定	18
図 2.2-3 地質平面図	20
図 2.2-4 参考とした地質平面図（北海道立地下資源調査所, 1960）	21
図 2.2-5 参考とした地質平面図（J N C 地質平面図）	22
図 2.2-6(1) 作成した地質断面図	23
図 2.2-6(2) 作成した地質断面図	24
図 2.2-6(3) 作成した地質断面図	25
図 2.2-7 参考にした地質断面図	26
図 2.2-8 参考にした断層位置図（岡, 199x）	27
図 2.2-9 地震探査による地質構造断面図（小椋ら, 1992）	28
図 2.2-10 モデル化のブロック設定	29
図 2.2-11(1) メッシュ分割における地質構造	30
図 2.2-11(2) メッシュ分割における地質構造	31
図 2.2-12 解析領域と座標	33
図 2.2-13 解析モデル節点と河川、設定流域	33
図 2.2-14 解析モデル節点と河川、設定流域	34
図 2.2-15 解析モデル節点と河川、設定流域の研究地区中心部拡大図	34
図 2.2-16 メッシュ分割平面図	35
図 2.2-17 表層部直下でのモデルでの水理地質区分	35
図 2.2-18 解析モデルの鳥瞰図	36
図 2.2-19 解析モデルを透視した鳥瞰図	36
図 2.2-20 表層を剥がした状態の解析モデル鳥瞰図	36

図 2.2-21	更別層を抽出した鳥瞰図	37
図 2.2-22	勇知層を抽出した鳥瞰図	37
図 2.2-23	声問層を抽出した鳥瞰図	37
図 2.2-24	稚内層を抽出した鳥瞰図	38
図 2.2-25	増幌層を抽出した鳥瞰図	38
図 2.2-26	鬼志別層他の基盤部（増幌層より古い）を抽出した鳥瞰図	38
図 2.2-27	断層を抽出した鳥瞰図	39
図 2.2-28	解析モデルとデジタル標高データの地形コンタの比較	40
図 2.3-1	地下施設のモデル化概要	42
図 2.3-2	GL-250m, 500m 坑道平面の平面図, 立坑の側面図	43
図 2.3-3	立坑, 坑道に該当するモデル節点	44
図 2.3-4	広域スケールモデルと施設スケールモデルの表層節点位置	45
図 2.3-5	広域スケールモデルと施設スケールモデルの表層節点位	46
図 2.3-6	広域スケールモデルと施設スケールモデルの表層節点位	46
図 2.3-7	広域スケールモデル内の立坑周辺領域	47
図 2.3-8	施設スケールモデル底面と広域スケールモデル該当面の標高分布	48
図 2.3-9	解析モデル表層のメッシュ平面図	50
図 2.3-10	水理地質区分	51
図 2.3-11	水理地質区分	52
図 2.3-12	水理地質区分	53
図 2.3-13	水理地質区分	54
図 2.3-14	水理地質区分	55
図 2.3-15	モデル表面の標高分布とデジタル標高データの標高分布	56
図 3.1-1	試錐調査位置図	57
図 3.1-2	HDB-1 孔地質柱状図（核燃料サイクル開発機構, 2002）	58
図 3.1-3	HDB-1 物理検層柱状図（核燃料サイクル開発機構, 2002）	59
図 3.1-4	HDB-2 孔地質柱状図（核燃料サイクル開発機構, 2002）	60
図 3.1-5	HDB-2 物理検層柱状図（核燃料サイクル開発機構, 2002）	61
図 3.1-6	HDB-3 地質柱状図と物理検層柱状図（核燃料サイクル開発機構, 2003a）	62
図 3.1-7	HDB-4 地質柱状図と物理検層柱状図（核燃料サイクル開発機構, 2003a）	63
図 3.1-8	HDB-5 地質柱状図と物理検層柱状図（核燃料サイクル開発機構, 2003a）	64
図 3.1-9	表層水理の調査流域と河川流量の測定位置（核燃料サイクル開発機構, 2003a）	65
図 3.1-10	河川流量・電気伝導度・気象観測結果（核燃料サイクル開発機構, 2003a）	65
図 3.1-11	試錐孔における水理試験結果および室内透水試験結果（速報値）	66
図 3.1-12(1)	試錐孔における水圧測定結果	68
図 3.1-12(2)	試錐孔における水圧測定結果（速報値）	68
図 3.1-13	地層水および間隙水の化学分析結果（核燃料サイクル開発機構, 2003b）	70

図 3.1-14	Cl 濃度を海水の Cl 濃度で正規化した濃度分布	70
図 3.1-15	深度別の塩分濃度の推定結果（平面図）	71
図 3.1-16	地上物理探査（電磁探査）比抵抗断面図（核燃料サイクル開発機構, 2002）	72
図 3.1-17	酸素・水素同位体比の深度分布	73
図 3.1-18	酸素同位体比と水素同位体比との関係	74
図 3.1-19	地下水流动の概念モデル（矢印は流动方向を示す。）	76
図 3.1-20	地下水流动の概念モデル（東西方向鉛直断面内, 矢印は流动方向を示す。）	77
図 3.3.1-1	水分特性曲線	81
図 3.3.1-2	相対透水係数	81
図 3.3.1-3	境界条件設定	82
図 3.3.1-4	側方境界条件のタイプ	83
図 3.3.1-5	解析領域内の湖沼・河川位置, 表層部解析モデル節点	84
図 3.3.1-6	run1 の流出点, 流入点	84
図 3.3.1-7	run2 の流出点, 流入点	85
図 3.3.1-8	run3 の流出点, 流入点	85
図 3.3.1-9	run4 の流出点, 流入点	85
図 3.3.2-1	case1 のポテンシャル分布	87
図 3.3.2-2	case2 のポテンシャル分布	88
図 3.3.2-3	case3 のポテンシャル分布	89
図 3.3.2-4	case4 のポテンシャル分布	90
図 3.3.2-5	case5 のポテンシャル分布	91
図 3.3.2-6	ポテンシャルと圧力水頭の凡例	92
図 3.3.2-7	case1 の地下施設付近の拡大図	93
図 3.3.2-8	case2 の地下施設付近の拡大図	94
図 3.3.2-9	case3 の地下施設付近の拡大図	95
図 3.3.2-10	case4 の地下施設付近の拡大図	96
図 3.3.2-11	case5 の地下施設付近の拡大図	97
図 3.3.2-12	調査流域内の流入出点の分布 case1	99
図 3.3.2-13	調査流域内の流入出点の分布 case1( $r=0.1\text{mm/day}$ )	99
図 3.3.2-14	調査流域内の流入出点の分布 case1( $r=2\text{mm/day}$ )	100
図 3.3.2-15	調査流域内の流入出点の分布 case2	100
図 3.3.2-16	調査流域内の流入出点の分布 case3	101
図 3.3.2-17	調査流域内の流入出点の分布 case4	101
図 3.3.2-18	調査流域内の流入出点の分布 case5	102
図 3.3.2-19	HDB 孔からの逆方向の粒子追跡線 (case1)	105
図 3.3.2-20	HDB 孔からの逆方向の粒子追跡線 (case2)	106
図 3.3.2-21	HDB 孔からの逆方向の粒子追跡線 (case3)	107

図 3.3.2-22	HDB 孔からの逆方向の粒子追跡線 (case4)	108
図 3.3.2-23	HDB 孔からの逆方向の粒子追跡線 (case5)	109
図 3.3.2-24	地下施設からの粒子追跡線 (case1)	111
図 3.3.2-25	地下施設からの粒子追跡線 (case2)	112
図 3.3.2-26	地下施設からの粒子追跡線 (case3)	113
図 3.3.2-27	地下施設からの粒子追跡線 (case4)	114
図 3.3.2-28	地下施設からの粒子追跡線 (case5)	115
図 3.3.2-29	換気立坑 EL-500m 地点からの流動経路 (case1～case5 の比較)	116
図 3.3.2-30	試錐孔内ポテンシャル分布の解析値, 計測値の比較(1)	118
図 3.3.2-31	試錐孔内ポテンシャル分布の解析値, 計測値の比較(2)	119
図 3.4.1-1	3 次元メッシュから切り出した 2 次元断面モデル位置	125
図 3.4.1-2	各断面のモデル形状・物性区分図	126
図 3.4.1-3	透水係数深度依存性の物性区分図	126
図 3.4.1-4	濃度初期条件	127
図 3.4.1-5	水理境界条件	128
図 3.4.1-6	濃度境界条件	128
図 3.4.2-1	コンタ図の凡例	129
図 3.4.2-2	HDB-3,5 該当断面内の塩分分布, ポテンシャル分布 (case1)	130
図 3.4.2-3	HDB-3,5 該当断面内の塩分分布, ポテンシャル分布 (case2)	131
図 3.4.2-4	HDB-3,5 該当断面内の塩分分布, ポテンシャル分布 (case3)	132
図 3.4.2-5	HDB-3,5 該当断面内の塩分分布, ポテンシャル分布 (case4)	133
図 3.4.2-6	HDB-3,5 該当断面内の塩分分布, ポテンシャル分布 (case5)	134
図 3.4.2-7	HDB-1 該当断面内の塩分分布, ポテンシャル分布 (case1)	135
図 3.4.2-8	HDB-4 該当断面内の塩分分布, ポテンシャル分布 (case1)	136
図 3.4.2-9	地下施設付近の塩分分布, ポテンシャル分布拡大図 (case1)	137
図 3.4.2-10	地下施設付近の塩分分布, ポテンシャル分布拡大図 (case2)	138
図 3.4.2-11	地下施設付近の塩分分布, ポテンシャル分布拡大図 (case3)	139
図 3.4.2-12	地下施設付近の塩分分布, ポテンシャル分布拡大図 (case4)	140
図 3.4.2-13	地下施設付近の塩分分布, ポテンシャル分布拡大図 (case5)	141
図 3.4.2-9	塩分濃度分布	143
図 3.4.2-10	ポテンシャル分布	144
図 4.2.1-1	立坑, 水平坑道のモデル鳥瞰図－1	150
図 4.2.1-2	水平坑道周辺平面図	150
図 4.2.1-3	立坑, 水平坑道のモデル鳥瞰図－2	151
図 4.2.1-4	解析領域平面図	151
図 4.2.1-5	境界条件設定	152
図 4.2.1-6	境界条件設定	153

図 4.2.2-1 立坑近傍でのポテンシャル・流向分布	154
図 4.2.2-1 立坑近傍でのポテンシャル・流向分布	155
図 4.2.2-2 立坑近傍でのポテンシャル分布	156
図 4.2.2-3 ポテンシャル低下量の分布	157
図 4.2.2-3 ポテンシャル低下量の分布	158
図 4.2.2-4 塩分濃度コンタ	159
図 4.2.2-5 塩分濃度コンタ	160
図 4.2.2-6 塩分濃度経時変化	161
図 4.3-1 広域スケール解析モデルと地下施設該当部	163
図 4.3.1-1 立坑部のモデル化	164
図 4.3.1-2 境界条件設定概要	165
図 4.3.2-1 10年経過時点の鉛直断面内ポテンシャル分布	167
図 4.3.2-1 10年経過時点の水平断面内（EL-400m）ポテンシャル分布	168
図 4.3.2-3 湧水量の経時変化	169
図 4.3.2-4 湧水量の深度方向分布（1年経過時）	170
図 4.3.2-5 HDB-3, HDB-6, HDB-8 孔内のポテンシャル変化予測	171
図 4.3.2-6 case1 での各試錐孔内ポテンシャル変化予測	172
図 4.3.2-7 case4 での各試錐孔内ポテンシャル変化予測	173
図 4.4.1-1 広域スケールモデル内の立坑周辺領域（図 3.3-7 再掲）	176
図 4.4.1-2 施設スケールモデル透視図	177
図 4.4.1-3 施設スケールモデルの座標, HDB 孔との関係	177
図 4.4.1-3 地下水解析の境界条件概要	178
図 4.4.1-4 初期ポテンシャル分布	179
図 4.4.1-5 初期塩分濃度分布	180
図 4.4.2-1 立坑部を通る鉛直断面内のポテンシャル分布（20年経過時点）	182
図 4.4.2-2(1) 立坑部を通る鉛直断面内のポテンシャル分布	183
図 4.4.2-2(2) 立坑部を通る鉛直断面内のポテンシャル分布	184
図 4.4.2-2(3) 立坑部を通る鉛直断面内のポテンシャル分布	185
図 4.4.2-2(4) 立坑部を通る鉛直断面内のポテンシャル分布	186
図 4.4.2-3 EL-180m 水平面内（GL-250m 坑道相当）のポテンシャル分布	187
図 4.4.2-4 EL-430m 水平面内（GL-500m 坑道相当）のポテンシャル分布	188
図 4.4.2-5 立坑・坑道への総湧水量の経時変化	190
図 4.4.2-6 立坑内の湧水量分布	190
図 4.4.2-7 坑道部節点湧水量（図中の数値は代表点の湧水量[m <sup>3</sup> /day]）	191
図 4.4.2-8(1) HDB 孔でのポテンシャルの経時変化	192
図 4.4.2-8(2) HDB 孔でのポテンシャルの経時変化	193
図 4.4.2-9 立坑を含む鉛直断面の塩分濃度分布	194

図 4.4.2-10 立坑を含む鉛直断面の立坑近傍の塩分濃度分布	195
図 4.4.2-11 EL-180m 水平面内の塩分濃度分布	196
図 4.4.2-12 EL-400m 水平面内の塩分濃度分布	197
図 4.4.2-13 立坑・坑道湧水の濃度変化	198
図 4.4.2-14 HDB 孔内の Cl 濃度分布の経時変化	199
図 4.4.2-15 HDB 孔内の Cl 濃度分布の経時変化	200
図 4.4.2-15 HDB 孔内 Cl 濃度の経時変化	201

## 表目次

表 2.1.2-1 影響半径を算定する実験式（地盤工学会, 1994)	12
表 2.1.2-2 定常式での影響半径	13
表 2.1.2-3 非定常式での影響半径	13
表 2.1.2-4 透水係数, 貯留係数と影響半径	14
表 2.2-1 地質区分	19
表 3.1-1 HDB-1 孔で採取した岩芯の物理化学特性（佐藤（2003）から抜粋）	67
表 3.3.1-1 透水係数の設定	80
表 3.3.1-2 間隙率, 比貯留係数	81
表 3.3.1-3 飽和度と相対透水係数、負圧の関係	81
表 3.3.1-4 境界条件の設定一覧	82
表 3.3.1-5 表面流入出量 (m <sup>3</sup> /year)	83
表 3.3.2-1 各流域の流入出量(m <sup>3</sup> /day)	98
表 3.3.2-2 各流域の単位面積当たり流入出量(mm/day)	98
表 3.3.2-3 各流域の単位面積当たり水収支(mm/day)	98
表 3.3.2-4 各地点のモデル内座標と算定された地下水年代	104
表 3.3.2-5 各地点のモデル内座標と算定された地下水下時間	110
表 3.3.2-6 各地点のモデル内地質区分	117
表 3.4.1-1 物質移行の物性	127
表 3.4.2-1 タイムステップ	129
表 4.2.1-1 設定した物性値	153
表 4.2.2-2 湧水量	158
表 4.3.1-1 透水係数の設定（表 4.3.1-1 再掲）	165
表 4.3.2-1 湧水量の経時変化データ	169
表 4.3.2-2 湧水量の深度方向分布データ（1年経過時）	170
表 4.4.1-1 物質移行に関わるパラメータ	181
表 4.4.1-2 タイムステップ設定	181
表 4.5-1 各モデルでの湧水量	203

## 1. はじめに

幌延深地層研究計画において、第一段階では、研究対象となる場の地質環境特性の把握を通じた体系的調査技術の確立およびその結果を踏まえた地下施設建設に伴う地質環境の変化の予測が最終目的になっている。ここでの研究の基本スタンスは、調査→モデル化→評価→計画の繰り返しの過程から、対象地域の地質環境特性への理解を深めると共に、信頼性の高い調査技術、モデル化技術、予測技術を確立していくものである。

本研究は、地質環境特性のうち、水理地質特性、地下水流動特性について、上記研究の基本スタンスを踏まえ、調査・解析技術の確立および地下施設建設に伴う地下水流動特性の予測および予測技術の確立を目的として実施するものである。

水理地質特性、地下水流動特性についての研究は、地下研究施設建設地点決定前の時点（2001年度、2002年度）から実施されている。これら研究では実際の現地で取得されたデータが少なく、研究対象領域も十分絞りきれない時点であるため、既往の文献調査を中心に、研究対象領域を広く捉え、広域スケールの地下水流動特性に与える透水係数や涵養量の影響を感度解析的に評価し、また地下深部で確認された塩分を含む地下水の成因に関する検討がなされてきた。地下研究施設建設地点決定後の本研究は、対象流域をより建設予定地点中心に絞り込み、より詳細なモデル化を行い、原位置での実測データも蓄積されつつあるため、解析結果と実測値の対比から地下水流動特性の記述や具体的地下施設形状を反映させたモデルでの地下施設建設に伴う影響の予測を実施している。

地下施設建設の影響として広域の地下水流動に与える影響の把握、地下施設近傍のより詳細な地下水流動への影響の把握と地下施設内への湧水量等の把握を目的に、広域を対象とした広域スケールの解析領域と立坑周辺に着目した施設スケールの解析領域、2種類の解析領域を設定し解析検討を実施した。この2種類の解析領域はモデル形状等、地質構造など整合性を有する設定をしている。

解析検討では、今までに得られた現地調査による透水係数などのパラメータのばらつきを考慮して、異なるパラメータ設定の解析ケースに対して、地下水流動と地下水に含まれる塩分濃度に着目した解析を実施した。解析結果としては間隙水圧分布、塩分の濃度分布、地下水の流動経路、地下水の滞留時間、地下施設への湧水量などが示された。また、試錐調査等で得られている間隙水圧や塩分濃度との比較を実施し、対象地域の地下水流動特性やモデル化、パラメータ設定の影響を検討した。地下施設の建設を考慮した解析結果からは、周辺地下水流動への影響や地下施設への第一段階としての予測結果を示した。

さらに、上記解析結果等を踏まえ、幌延深地層研究計画において検討すべき研究課題を整理するとともに、研究課題の解決方法について検討した。本報告書は以上の検討結果を取りまとめたものである。

## 2. 解析領域の設定および解析メッシュの作成

設定した解析領域を過去2回（今井ほか2001, 今井ほか2002）の解析領域と共に図2.1-1に示す。2001, 2002の地下水解析は地下施設建設予定地の確定していない段階で実施されたもので、広域的地下水流动を把握し、地下施設建設予定地の選定に際しての必要な知見を提供する目的も有し広めの領域設定となっている。2002では当地域深部地下水に含まれる塩分の起源に関する検討を実施したため海洋部も解析領域に含め地下水流动特性を評価している。本検討（2004）では、地下施設建設地が確定しているため地下施設を中心とした解析領域設定としている。この領域設定の詳細はその設定過程も含め示す。

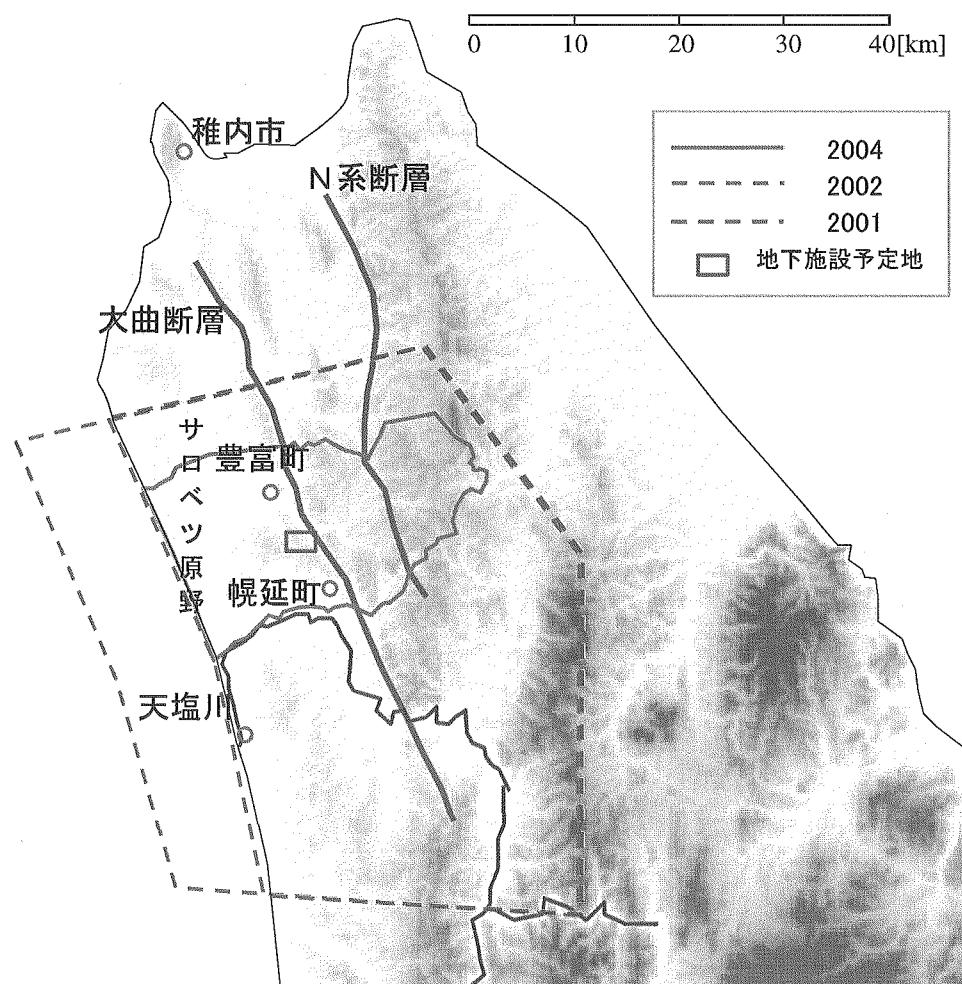


図2.1-1 解析領域の変遷

## 2.1 解析領域の設定

### 2.1.1 広域スケールの解析領域設定

#### (1) 解析領域設定要件

広域スケールの解析領域は、下記要件を考慮して設定する。

- ①P-1～P-3, P-1' 流域（P-1～P-3 流域は 2003 年現在河川流量調査実施箇所。P-1'は 2004 年以降調査予定箇所）の水収支を算定→流域を含む（図 2.1.1-1）
- ②豊富温泉への影響評価→豊富温泉を含む
- ③立坑掘削影響を評価
- ④HDB-1,3～-8 孔を含む

#### (2) 解析領域設定案

上記要件を満たし、地形状況から想定される境界設定位置の案として三案を検討した。

図 2.1.1-2～図 2.1.1-4 に各領域設定を図示する。各案は以下のことを検討して設定した。

##### ①案：余裕を持った設定

- ・地形からの水理境界設定を考慮
- ・平野部に定水位境界設定を想定／高標高部からの側部境界からの流出を考慮

##### ②案：不透水境界で絞り込んだ設定

- ・領域の絞り込みを優先
- ・外周を不透水境界に設定

##### ③案：②案に加え、下流端での流出境界を組み込んだ設定

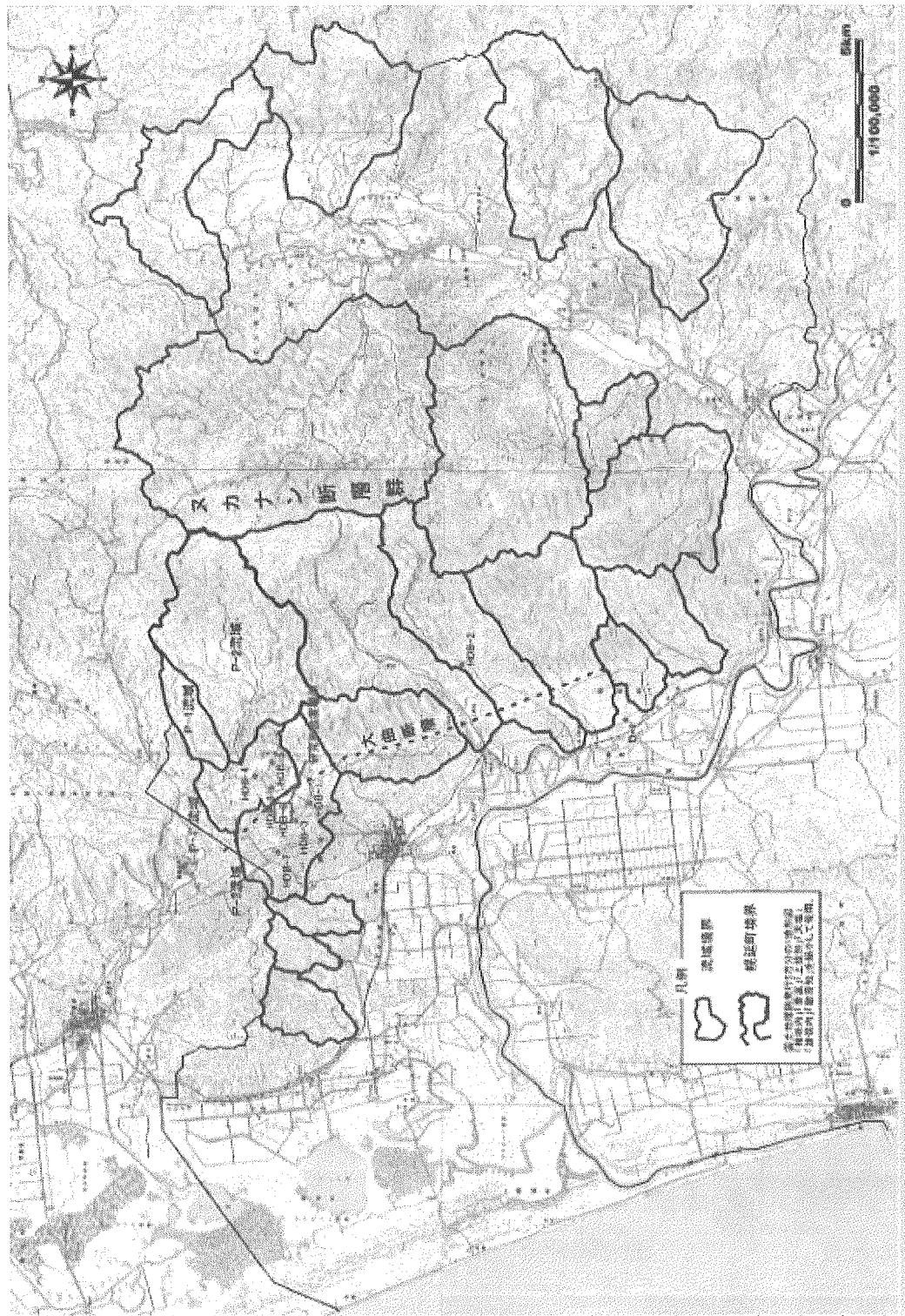
#### (3) 解析領域の設定

上記三種類の解析領域案と外部専門家の意見を反映し、最終的に図 2.1-5 に示す領域を広域スケールの解析領域に設定した。設定に際しての要件としては、

- ① 境界線の設定理由が明確なこと
- ② 地下施設建設に伴う影響検討等で領域設定による影響がないこと
- ③ 施設スケールと広域スケールの 2 種類の解析用域の違いが明確なこと

などを考慮した。このため、広域スケールではある程度余裕を持たせた領域設定として、地形形状（谷、尾根）、河川、海岸線、などを境界線とした領域設定とした。

図 2.1.1-1 流域分割図



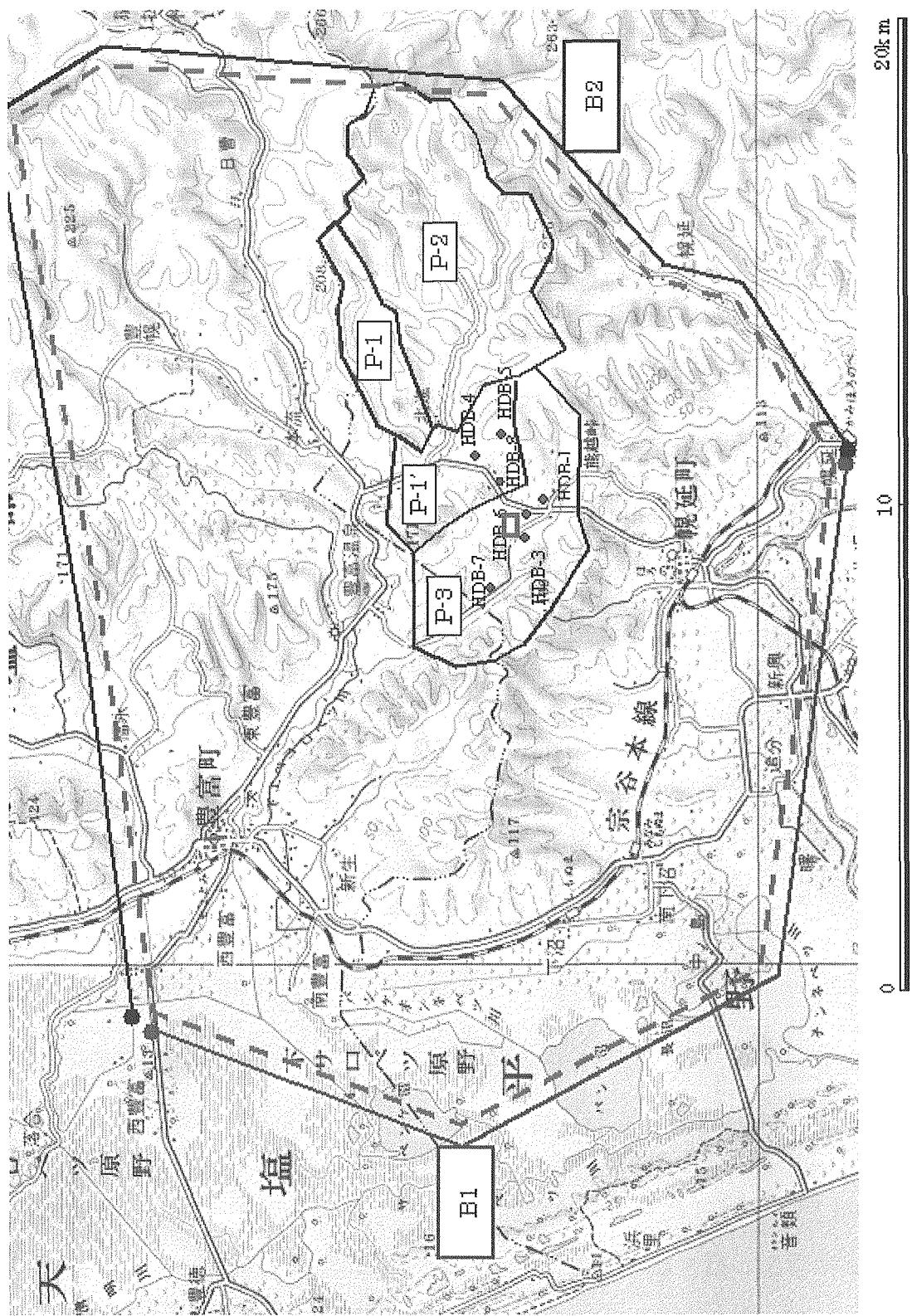


図 2.1.1-2 解析領域案①

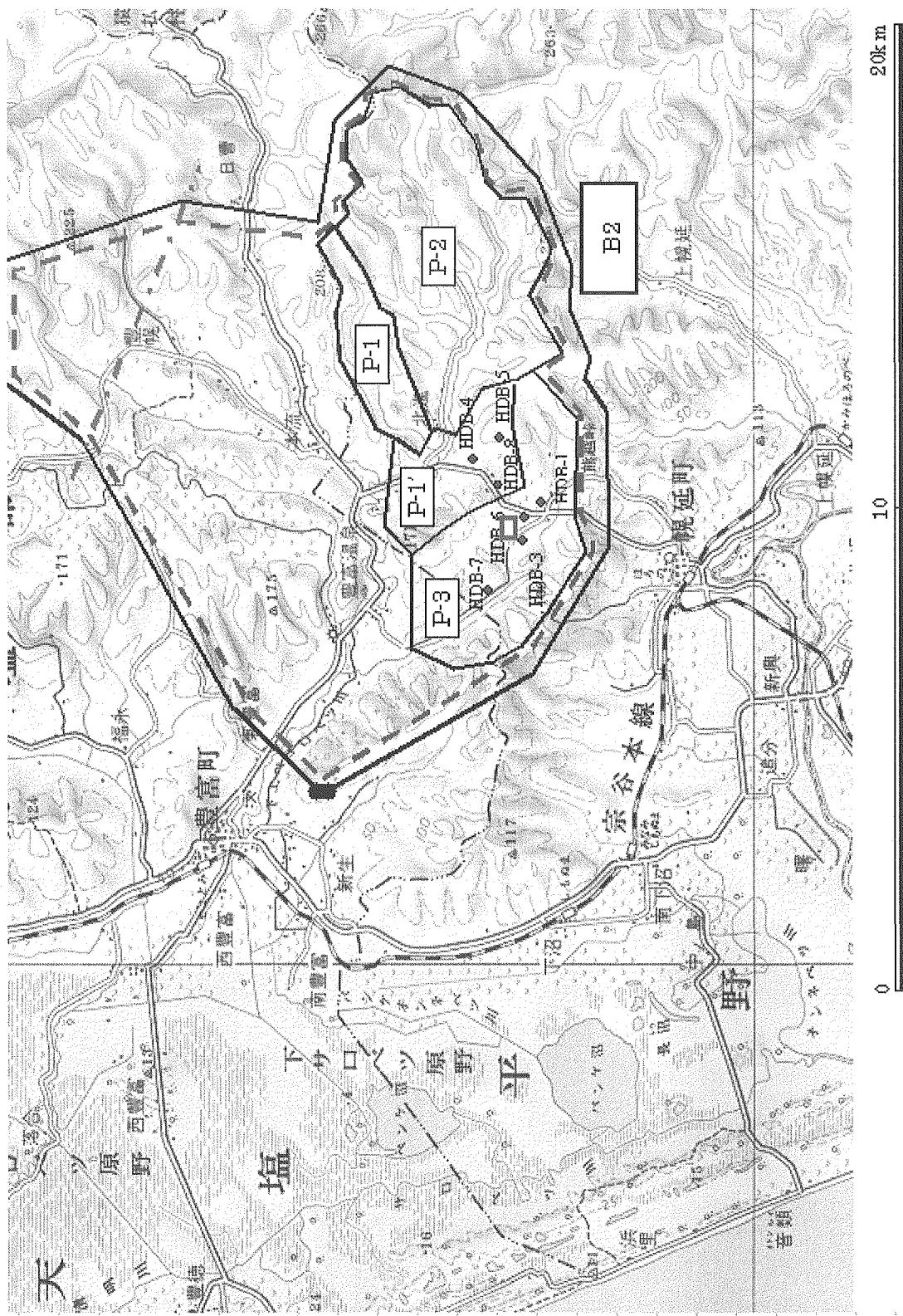


図 2.1.1-3 解析領域素②

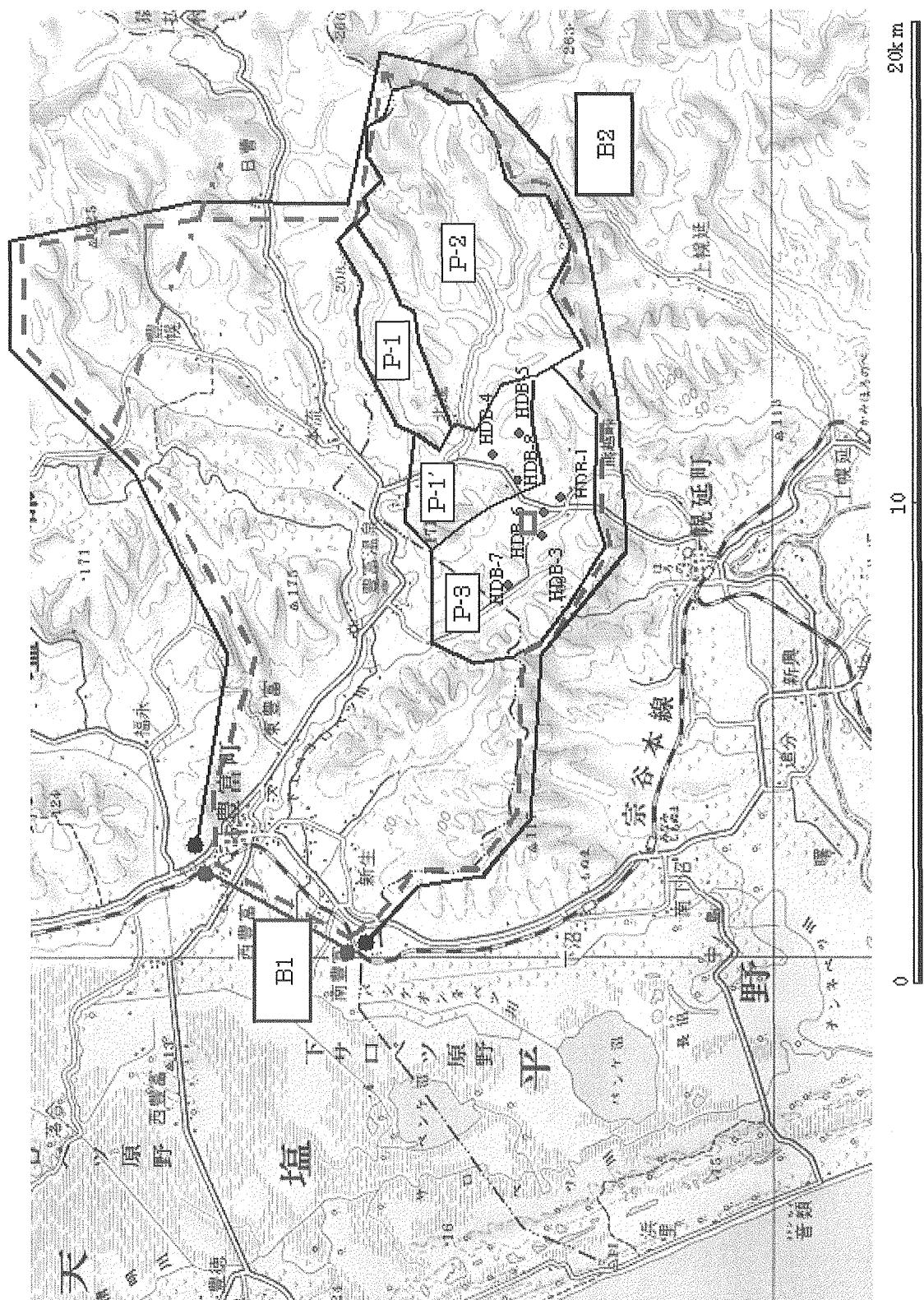
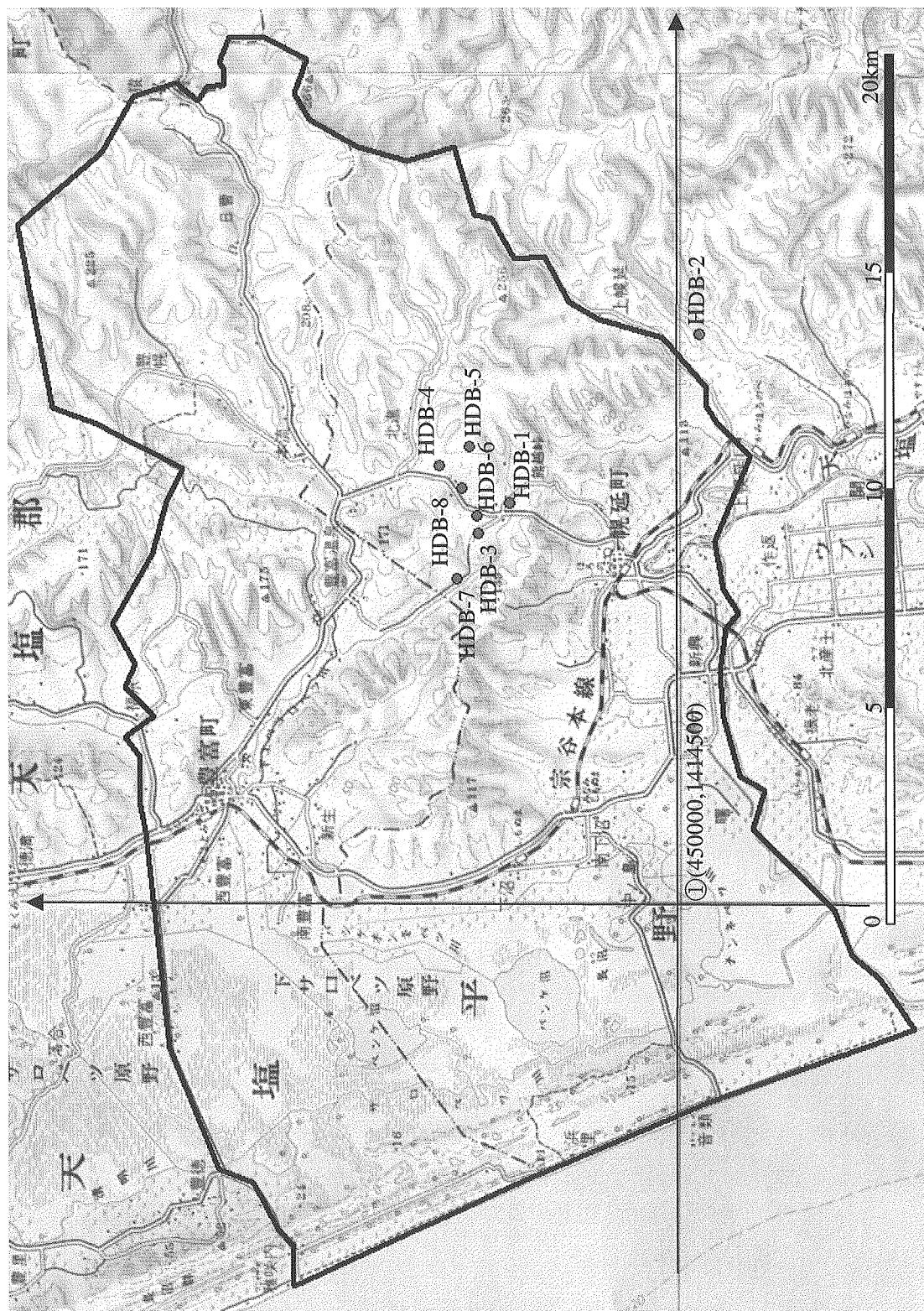


図 2.1.1-4 解析領域案③



## 2.1.2 施設スケール領域の設定

### (1) 解析領域設定要件

施設スケールの解析領域は、下記要件を考慮して設定した。

①3本の立坑、250m、500m水平坑道をモデル化

(図2.1.2-1に立坑イメージ図、図2.1.2-2に水平坑道平面図、図2.1.2-3に水平坑道詳細図)

②約20年間の掘削影響を含む

③広域スケールとの整合性を有する

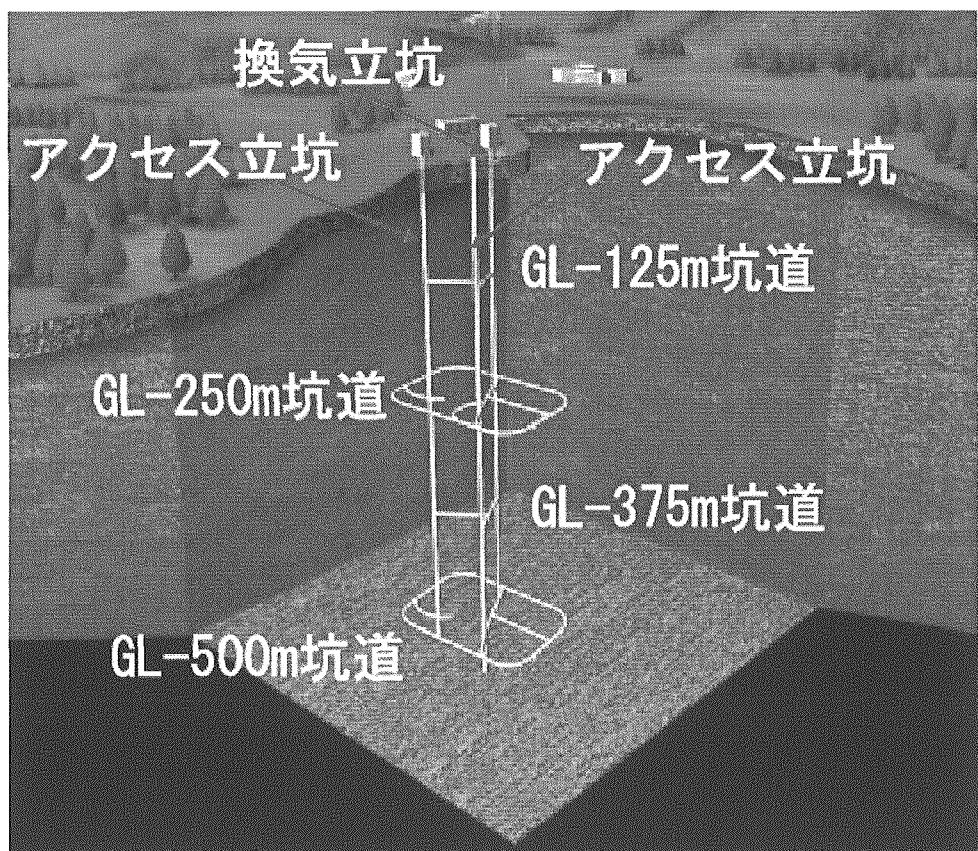


図2.1.2-1 立坑イメージ図

<<http://www.jnc.go.jp/zhoronobe/foram/03/pdf/H15kn9kcq.pdf>>に加筆

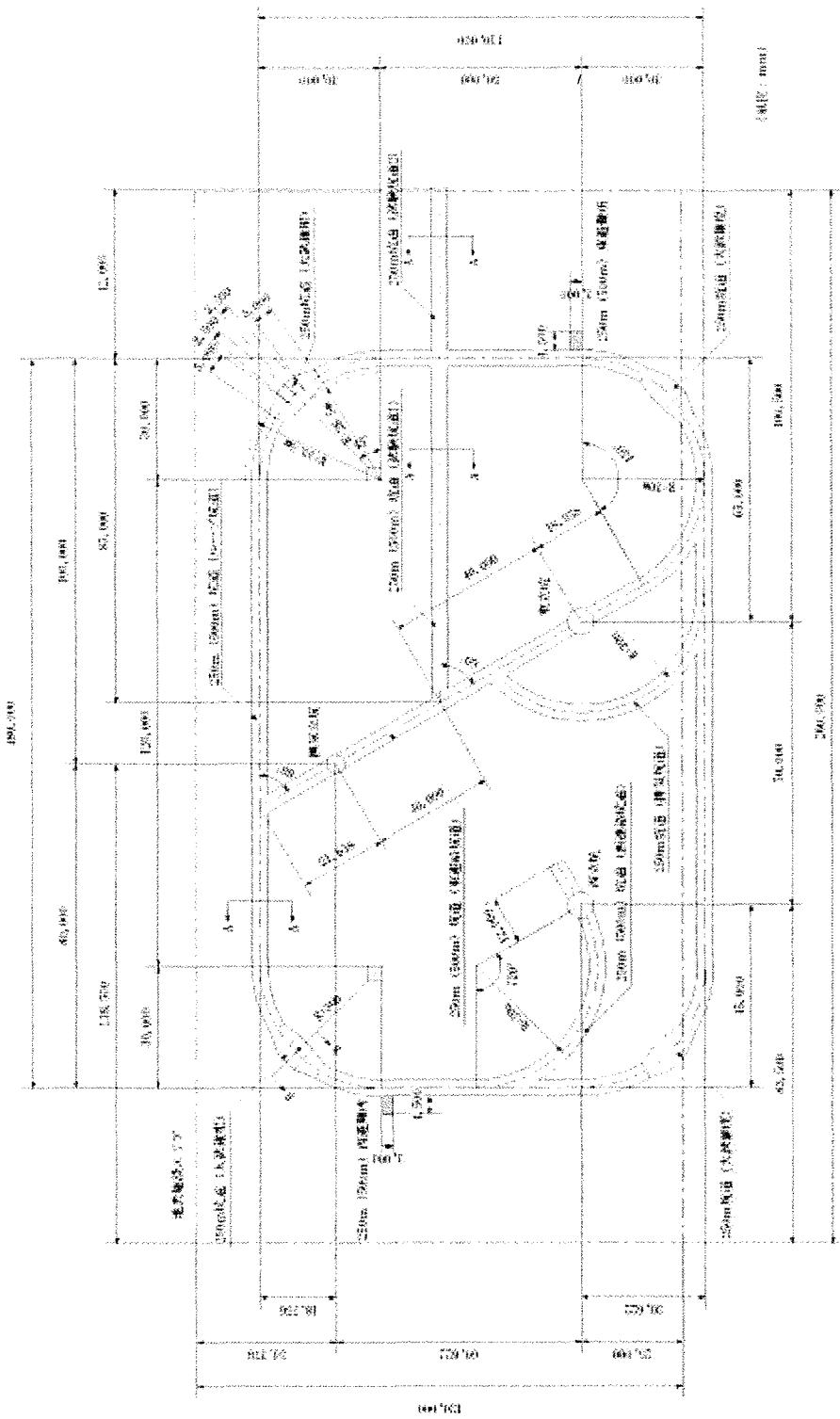
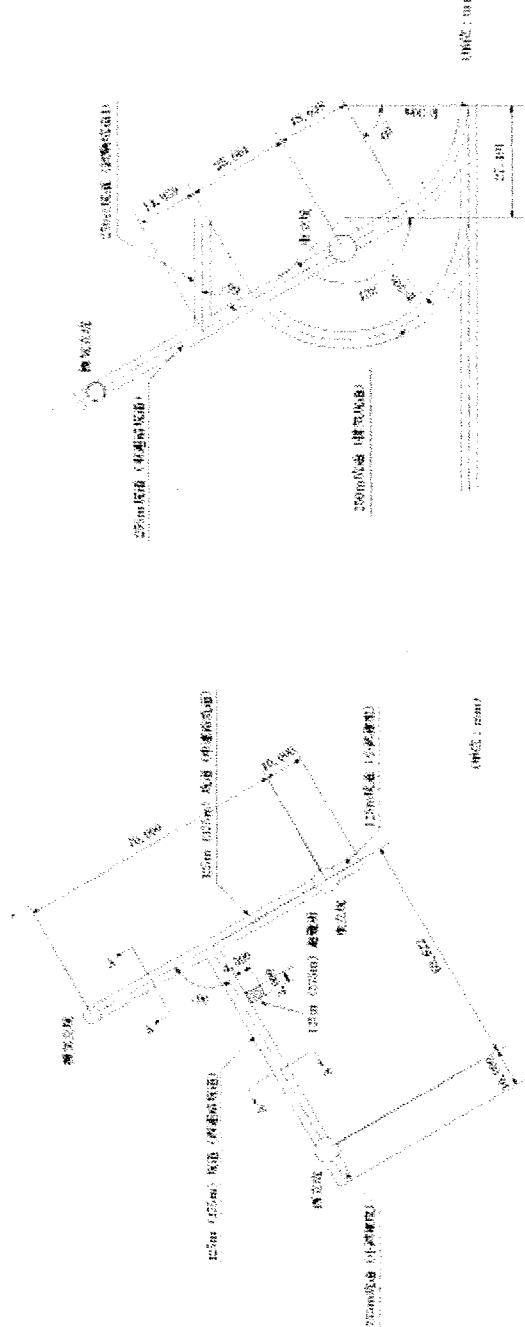
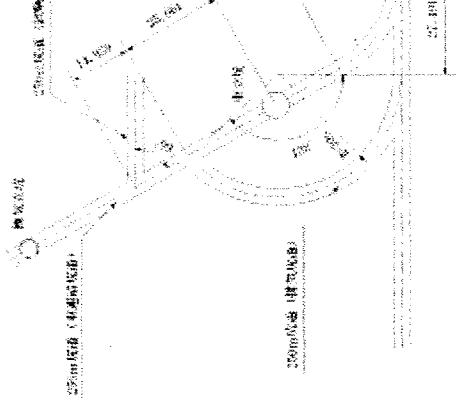


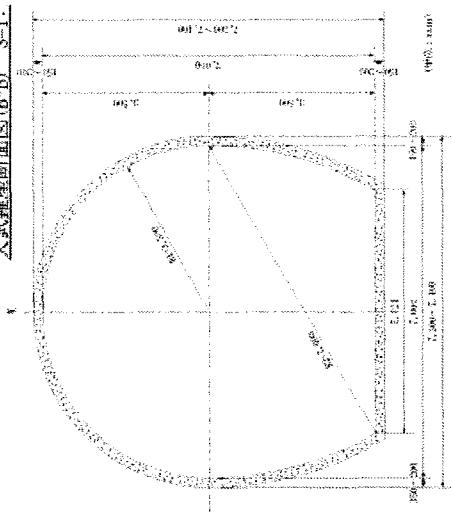
図 2.1.2-2 水平坑道平面図



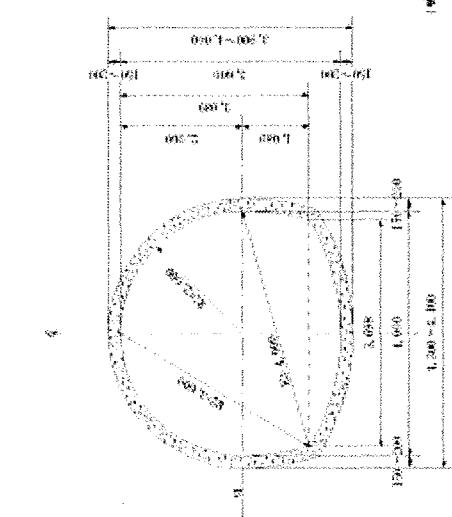
(a)平面基本計画図



(b)排気坑道詳細図



(c)水平坑道断面図



(d)大試験基礎断面図

图 2.1-2-3 水平坑道詳細図

## (2) 掘削影響範囲の検討

掘削影響範囲を文献に示される実験式を利用して推定した。表 2.1.2-1 に影響半径を算定する実験式を示す。式が示すように、影響半径は透水係数、水位低下量が大きいほどその影響半径は大きく、比貯留係数が小さいほど影響半径は大きくなる。想定される水位低下量、透水係数、層厚、比貯留係数を代入して求めた定常式での影響範囲を表 2.1.2-2 に、非定常式での影響範囲を表 2.1.2-3、表 2.1.2-4 に示す。図 2.1.2-4 は、表 2.1.2-3 の結果をグラフ化したものであり、図 2.1.2-5 は表 2.1.2-4 の結果をグラフ化したものである。

地下施設は主に声間層に設置され、声間層の透水係数は後述するように  $10^{-7} \sim 10^{-10} \text{ m/s}$  のオーダーにあると考えられる。また水位低下量は立坑掘削深度からおよそ 500m と考えられる。比貯留係数は一般に岩盤等で想定される値  $0.0001 \text{ m}^{-1}$  程度を想定する。各算定式により計算された表・図中の影響半径を俯瞰して、30 年間での影響半径はやや大きめに評価しておよそ 1000~1500m 程度と推定される。

表 2.1.2-1 影響半径を算定する実験式（地盤工学会 1994）

条件	影響圏半径の式	提唱者
定常浸透	$R = 575 s \sqrt{Dk}$ (3.60)	Kusakin <sup>26)</sup> (クサキン)
	$R = 3000 s \sqrt{k}$ (3.61)	Seichardt <sup>25)</sup> (ジハルト)
非定常浸透	$R = \alpha \sqrt{\frac{Tt}{S}}$ $\alpha = 1.5$ (3.62)	
	$R = \alpha \sqrt{\frac{Hkt}{S_y}}$ $\alpha = 1.5$ (3.63)	

ここで、 $R$  は影響圏半径(m),  $s$  は水位低下量(m),  $D$  は帶水層厚(m),  $H$  は不圧帶水層厚(m),  $k$  は透水係数(m/s),  $T$  は透水量係数(m<sup>2</sup>/s),  $S$  は貯留係数,  $t$  は揚水時間(s), また,  $S_y$  は有効間隙率である。

表 2.1.2-2 定常式での影響半径

	水位低下量 s m	透水係数 k m/s	層厚 D m	影響半径 Re m
Kusakin $Re=575s\sqrt{Dk}$	250	1.0E-10	500	32
	250	1.0E-09	500	102
	250	1.0E-08	500	321
	250	1.0E-07	500	1016
Seichert $Re=3000s\sqrt{k}$	250	1.0E-10	-	8
	250	1.0E-09	-	24
	250	1.0E-08	-	75
	250	1.0E-07	-	237
Kusakin $Re=575s\sqrt{Dk}$	500	1.0E-10	500	64
	500	1.0E-09	500	203
	500	1.0E-08	500	643
	500	1.0E-07	500	2033
Seichert $Re=3000s\sqrt{k}$	500	1.0E-10	-	15
	500	1.0E-09	-	47
	500	1.0E-08	-	150
	500	1.0E-07	-	474

表 2.1.2-3 非定常式での影響半径

透水係数 k m/s	比貯留係数 Ss m-1	経過時間 t year	影響半径 Re m
1.0E-10	1.0E-04	1.0	8
		2.0	12
		5.0	19
		10.0	27
		20.0	38
		30.0	46
1.0E-10	1.0E-05	1.0	27
		2.0	38
		5.0	60
		10.0	84
		20.0	119
		30.0	146

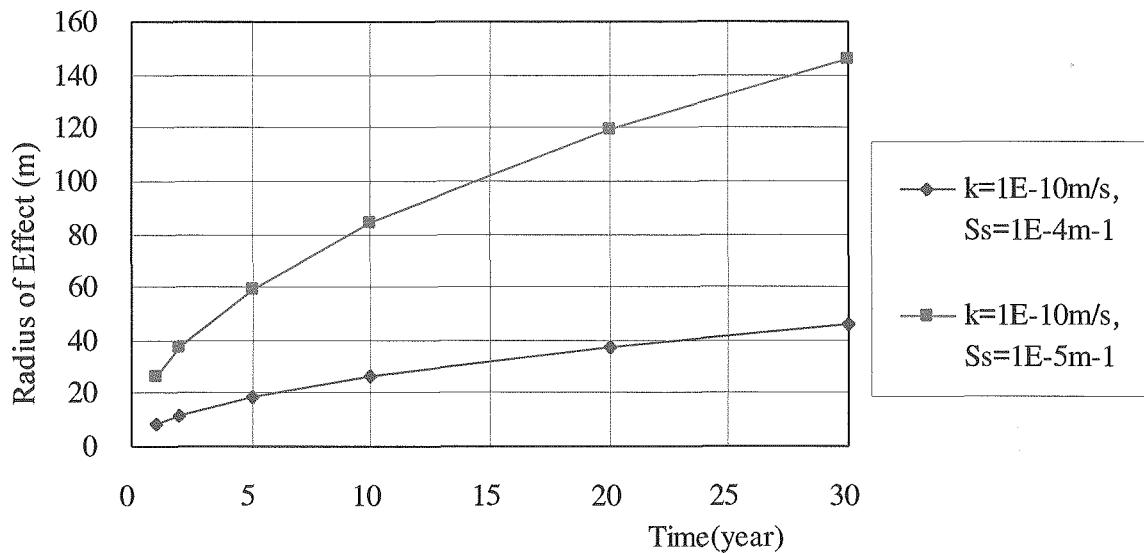


図 2.1.2-4 非定常式での影響半径

表 2.1.2-4 透水係数、貯留係数と影響半径

透水係数/比貯留係数 $k/Ss$ $s^{-1}$	透水係数 $k$ ( $Ss=1E-4$ ) m/s	経過時間 $t$ year	影響半径 $Re$ m
0.000001	1.0E-10	30	46
0.00001	1.0E-09	30	146
0.0001	1.0E-08	30	462
0.001	1.0E-07	30	1459
0.01	1.0E-06	30	4615

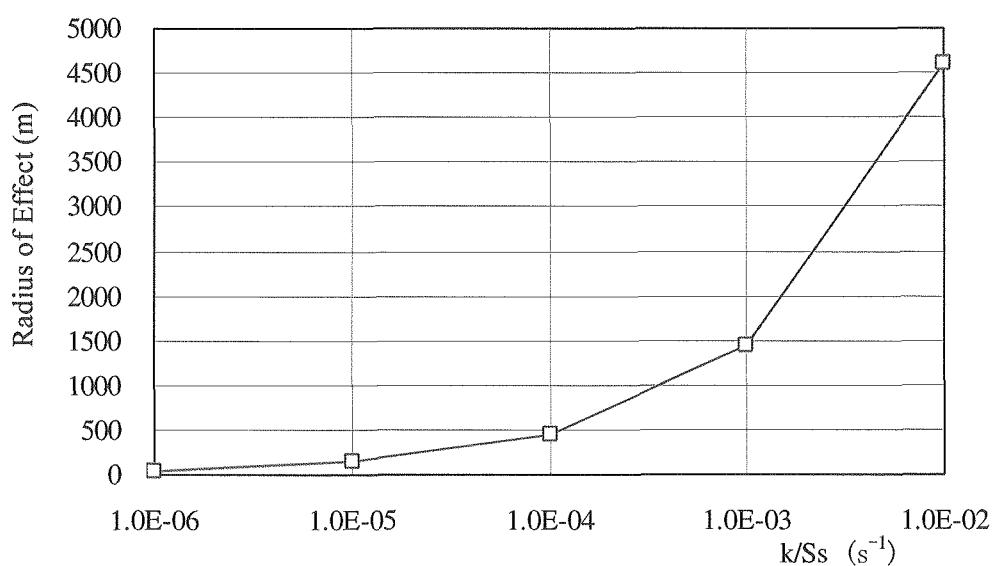


図 2.1.2-5 透水係数、貯留係数と影響半径

### (3) 解析領域設定案

図 2.1.2-6 に領域設定案①, ②を示す。

①案：掘削影響領域を含み地形形状からの水理境界を考慮した領域設定

②案：モデル化精度・要素分割を考慮した領域設定 (1~1.5km 四方程度)

- 具体的な境界位置は広域領域の要素分割から 1~1.5km 程度の範囲を切り出す

(広域領域の要素分割に際して立坑周辺領域を意識する)

- 境界条件は広域領域から設定

- 境界が掘削影響圏内になる場合も想定される

### (4) 解析領域設定

最終的には上記①, ②案と広域スケール解析メッシュ（図 2.1.2-7）を参考に図 2.1.2-6 の領域に設定した。本領域は 3 次元的に広域メッシュに沿ったモデル形状となる。

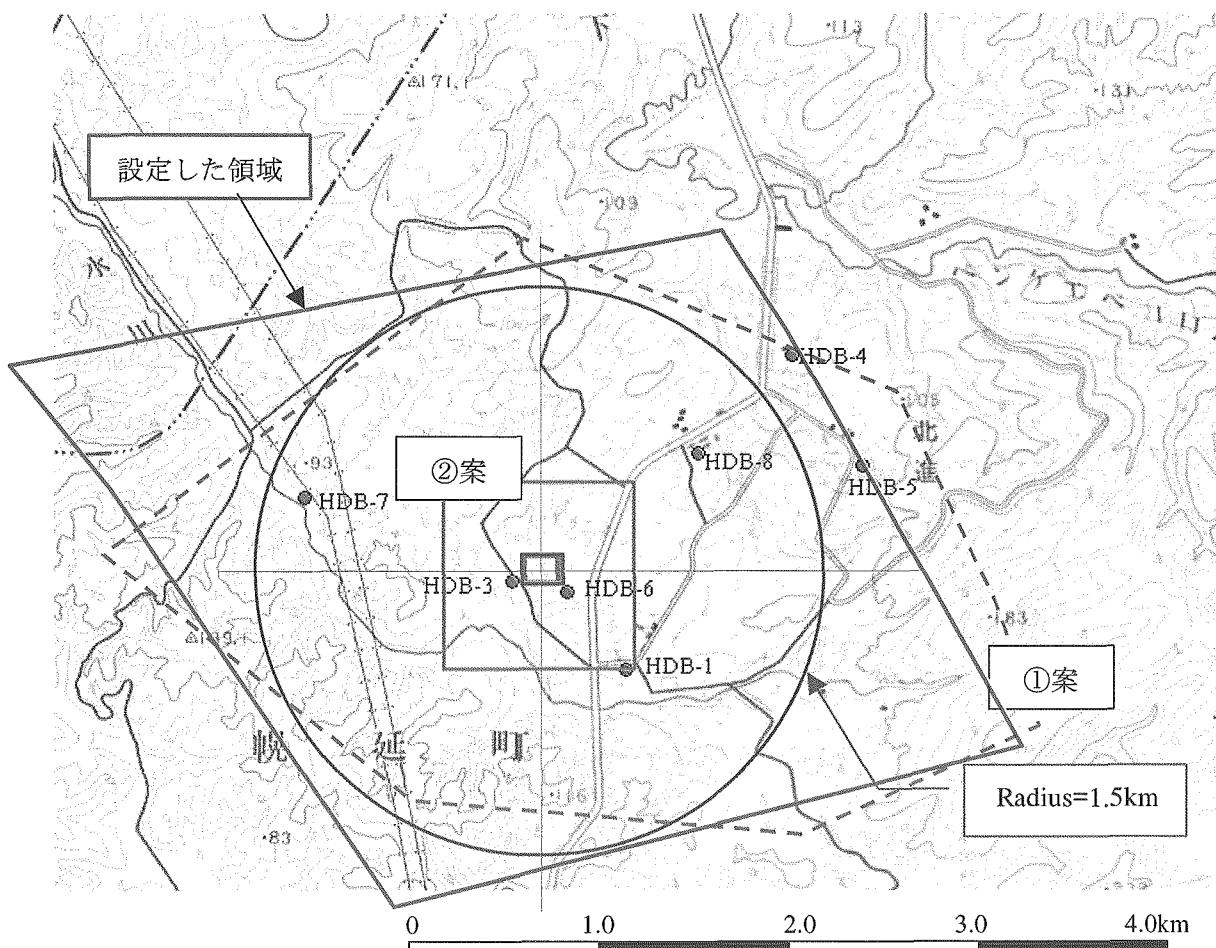


図 2.1.2-6 施設スケール領域

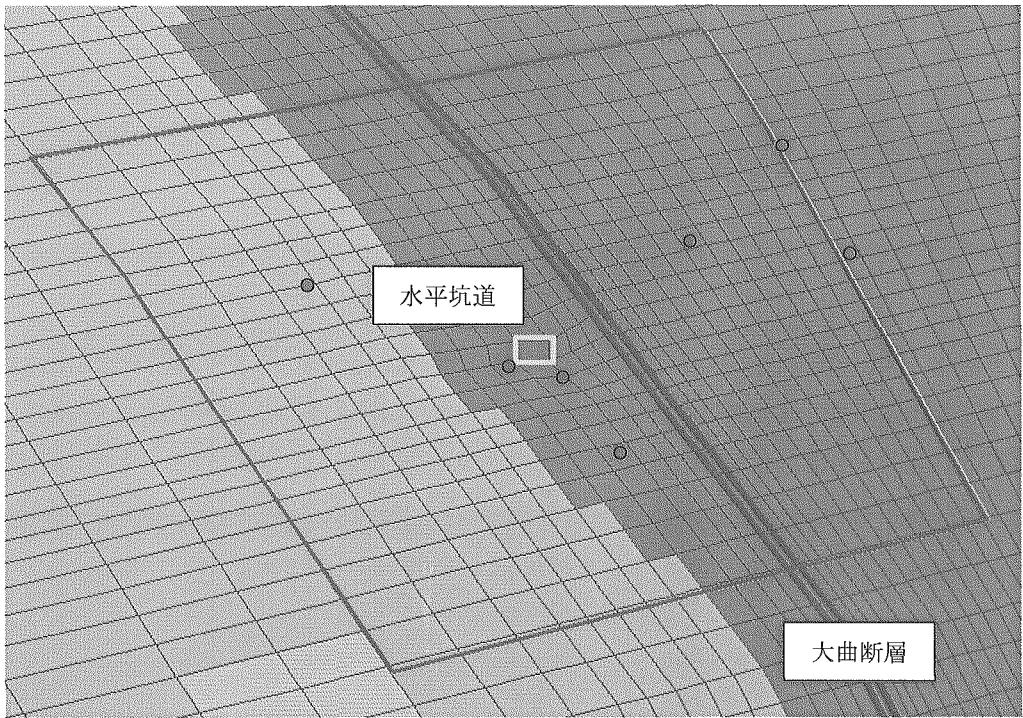


図 2.1.2-7 広域スケールモデル内の立坑周辺領域

## 2.2 広域スケールモデルのメッシュ作成

### (1) モデル作成のフロー

モデル作成のフローを図 2.2-1 に示す。モデル化に際しては 3 次元的な地質構造を反映できるようにした。モデル化の手順としては、図 2.2-2 に示すように九つの鉛直断面を作成し、各面を連結して 3 次元モデルを作成した。

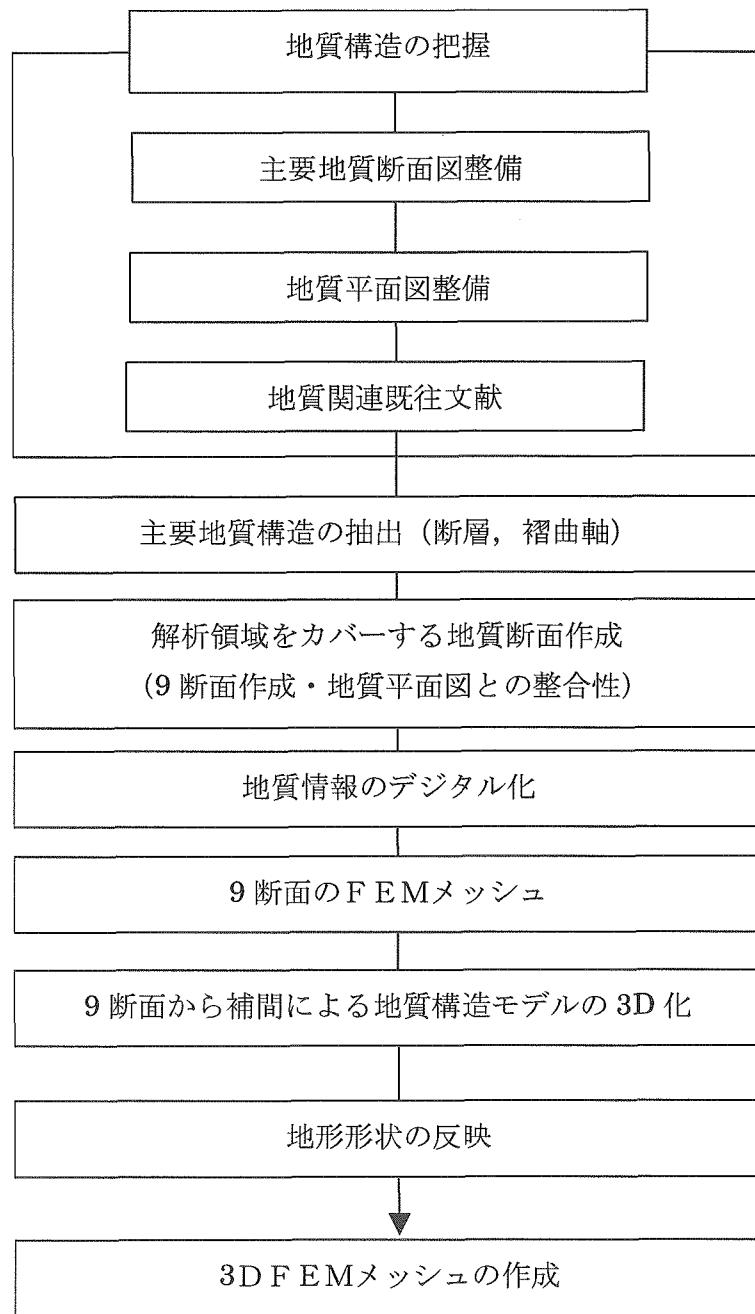


図 2.2-1 モデル作成のフロー

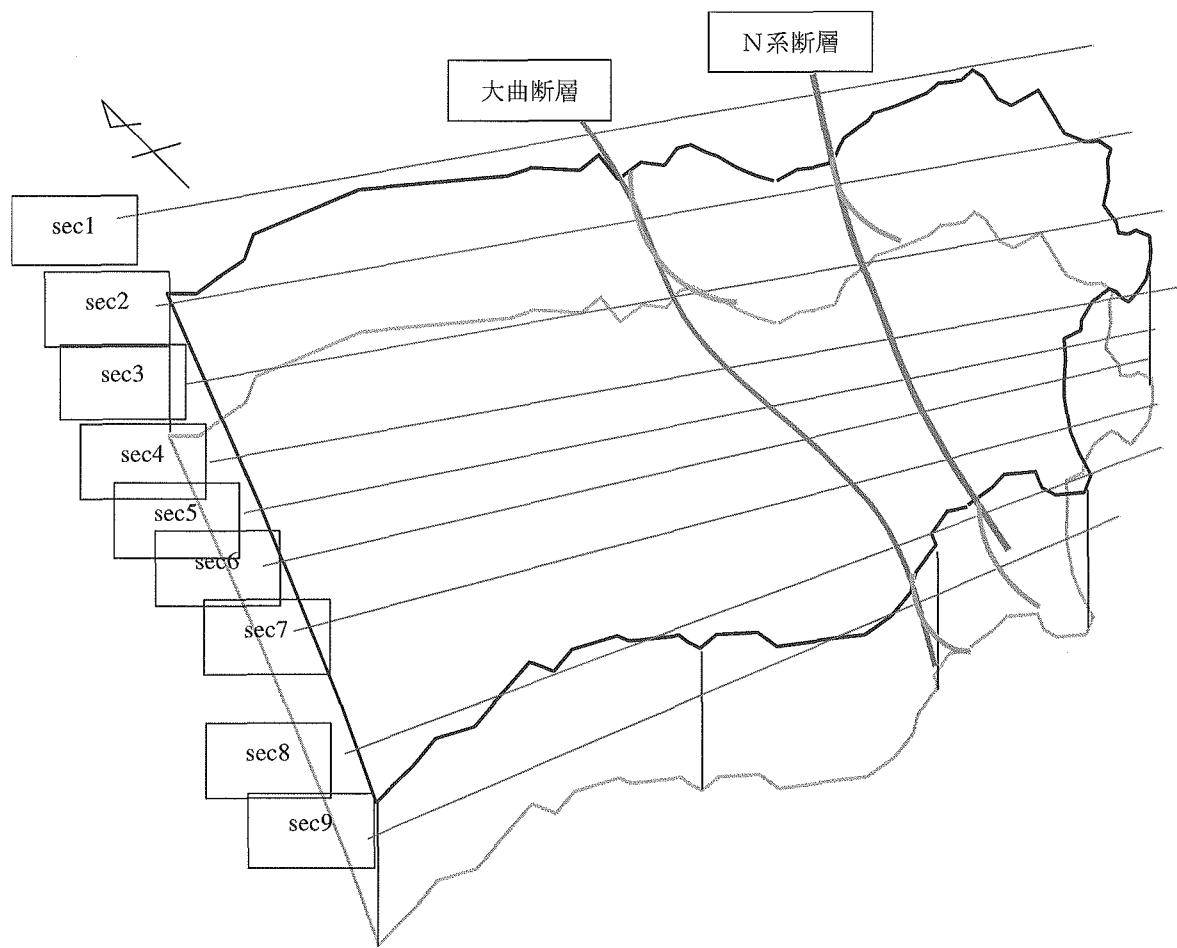


図 2.2-2 モデル作成過程の9断面の設定

## (2) 地質構造のモデル化

モデル作成に使用した地質断面図（1-9section）は、主に以下の地質構造を把握し作成した。

- ①断層の平面形状
- ②主要背斜・向斜軸の平面的分布
- ③地表地質分布
- ④断層、主要背斜・向斜軸の深度方向形状
- ⑤既存ボーリング調査による地層区分

図 2.2-3 に作成した地質平面図を示す。この地質平面図は、対象領域の異なる①JNC 地質平面図（図 2.2-5）、②北海道立地下資源調査書（1960）（図 2.2-4）を主に参考とした。また断層位置に関しては岡（2000）の示した断層位置（図 2.2-8）、小椋ら（1992）の地震探査による地質構造断面図（図 2.2-9）、サイクル機構による断層位置（図 2.2-7）を参考に、断層の傾斜は深部ほど低角度となるよう設定した。サイクル機構による断層位置や形状（図 2.2-7）の見直しも逐次なされているが、過度に低角度な断層形状は除外することとした。小椋ら（1992）によると本領域内には天塩川断層の存在も示されている。しかし、その形状をモデル化する十分な資料のないこと、主調査対象領域内ではないことから、天塩川断層はモデル化しないこととした。

図 2.2-6 には作成した 9 断面の地質断面図を示す。図中、x-軸は海岸線からの距離、y-軸は標高を示す。図 2.2-6(6)section6 に示すようにボーリング調査により地質境界の把握されている付近の断面ではボーリング調査を反映した地質区分としている。図 2.2-6 に示すように褶曲軸は深くなるに連れて東方に移動する設定とした。

地質区分は基本的には 2001,2002 で作成されたモデルと同じで、今回新たに No.7 で示す N 系断層東部の浅部に存在する古い地層を加えている。また、今回のモデルでは図 2.2.6 に示す各地層の褶曲形状を曲面として可能な限りモデル形状に反映させている。

表 2.2-1 地質区分

No.	地層	岩種など
1	増幌層より下位の鬼志別層他の古い地層	砂岩・泥岩
2	増幌層	泥岩
3	稚内層	硬質頁岩
4	声問層	泥岩、シルト岩
5	勇知層	細粒砂岩
6	更別層	細粒砂岩
7	N 系断層東部の浅部に存在する古い地層	砂岩・泥岩
8	表層（第四紀他）	砂礫・粘土層、礫層 (表層 20m を対象)
9	大曲断層コア部	透水性小と推定
10	大曲断層側部	透水性大と推定
11	N 系断層コア部	透水性小と推定
12	N 系断層側部	透水性大と推定

図 2.2-3 地質平面図



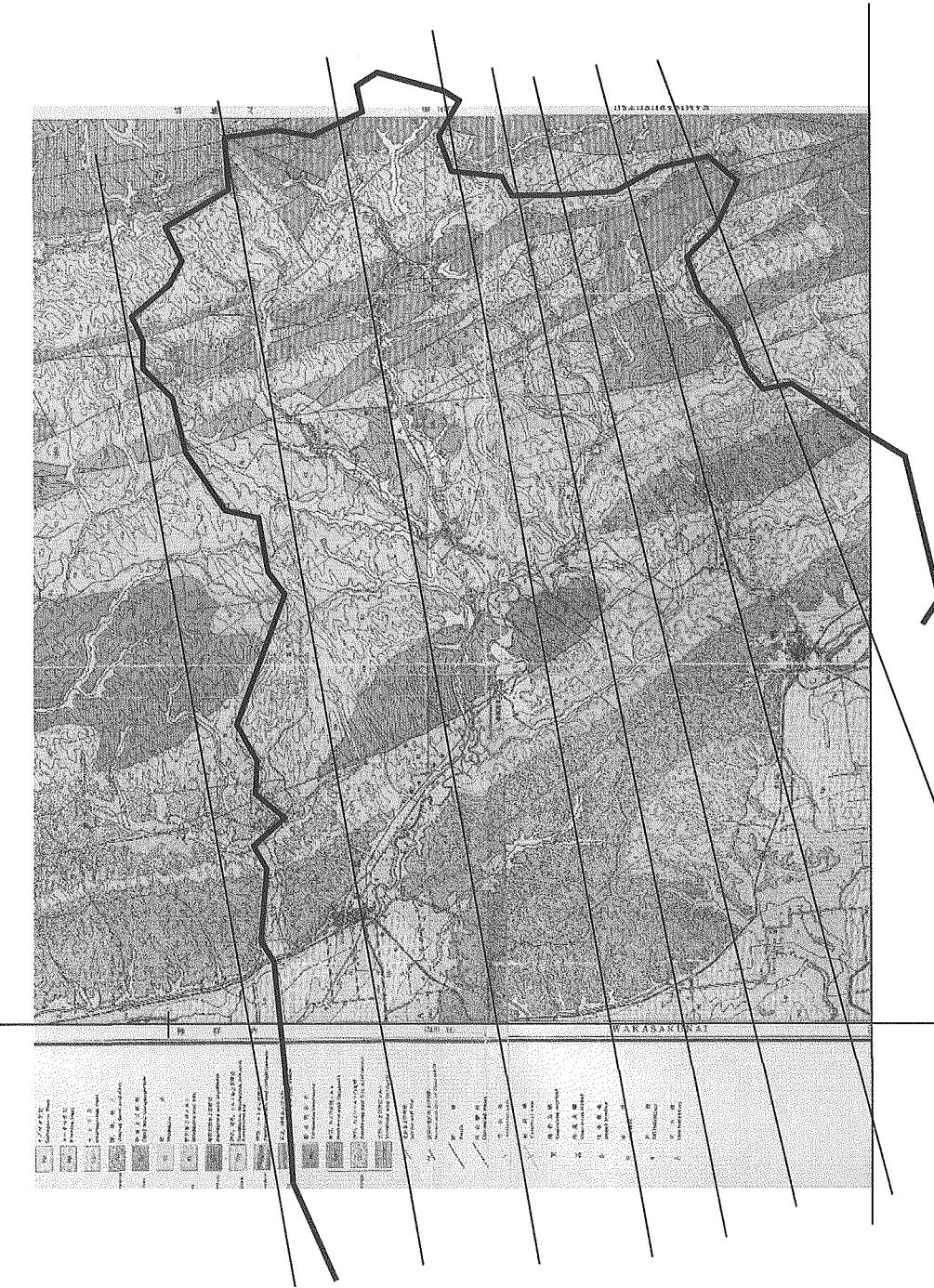
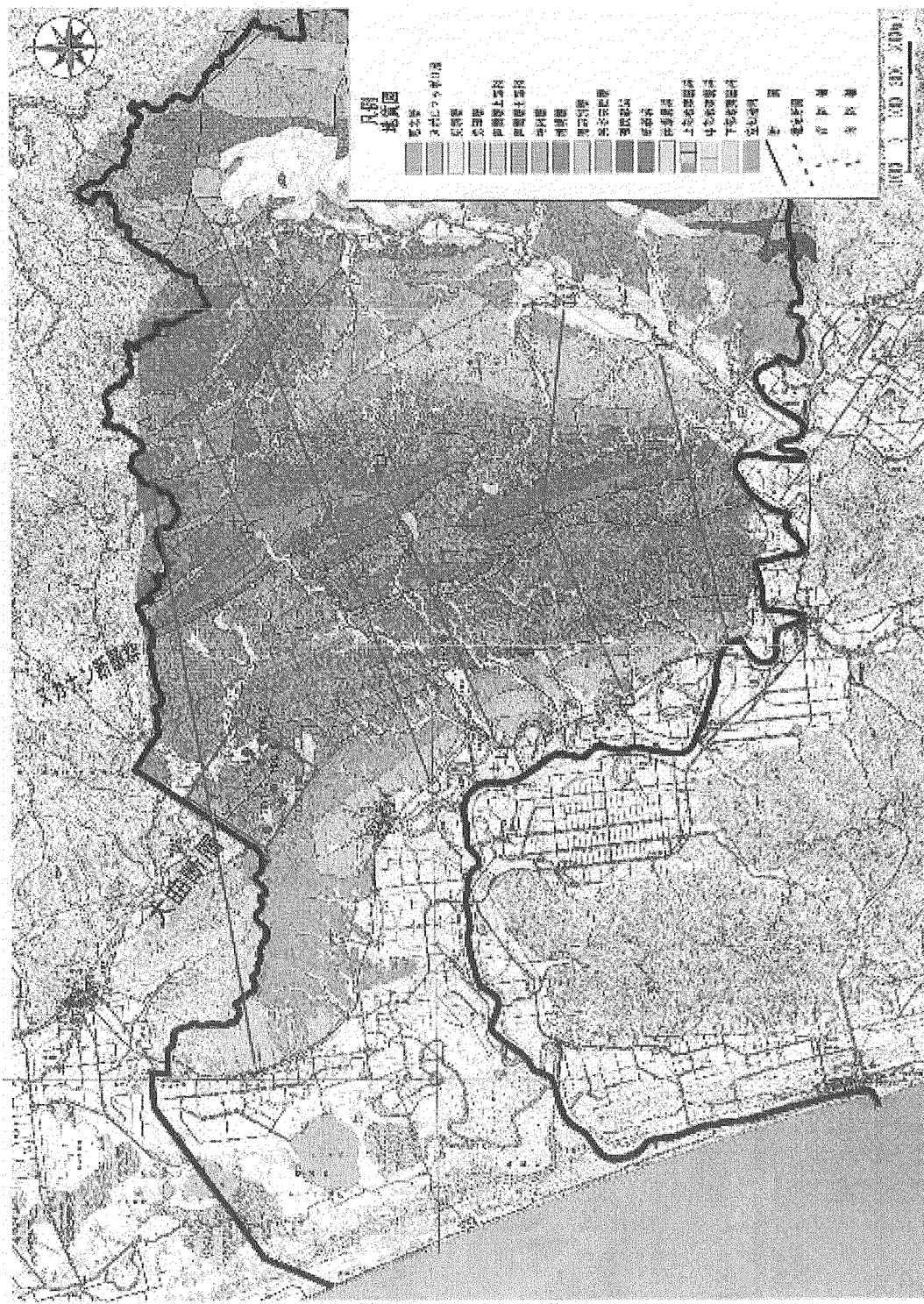


図 2.2-4 参考とした地質平面図（北海道立地下資源調査書，1960）

図 2.2-5 参考とした地質平面図（JNC 地質平面図）



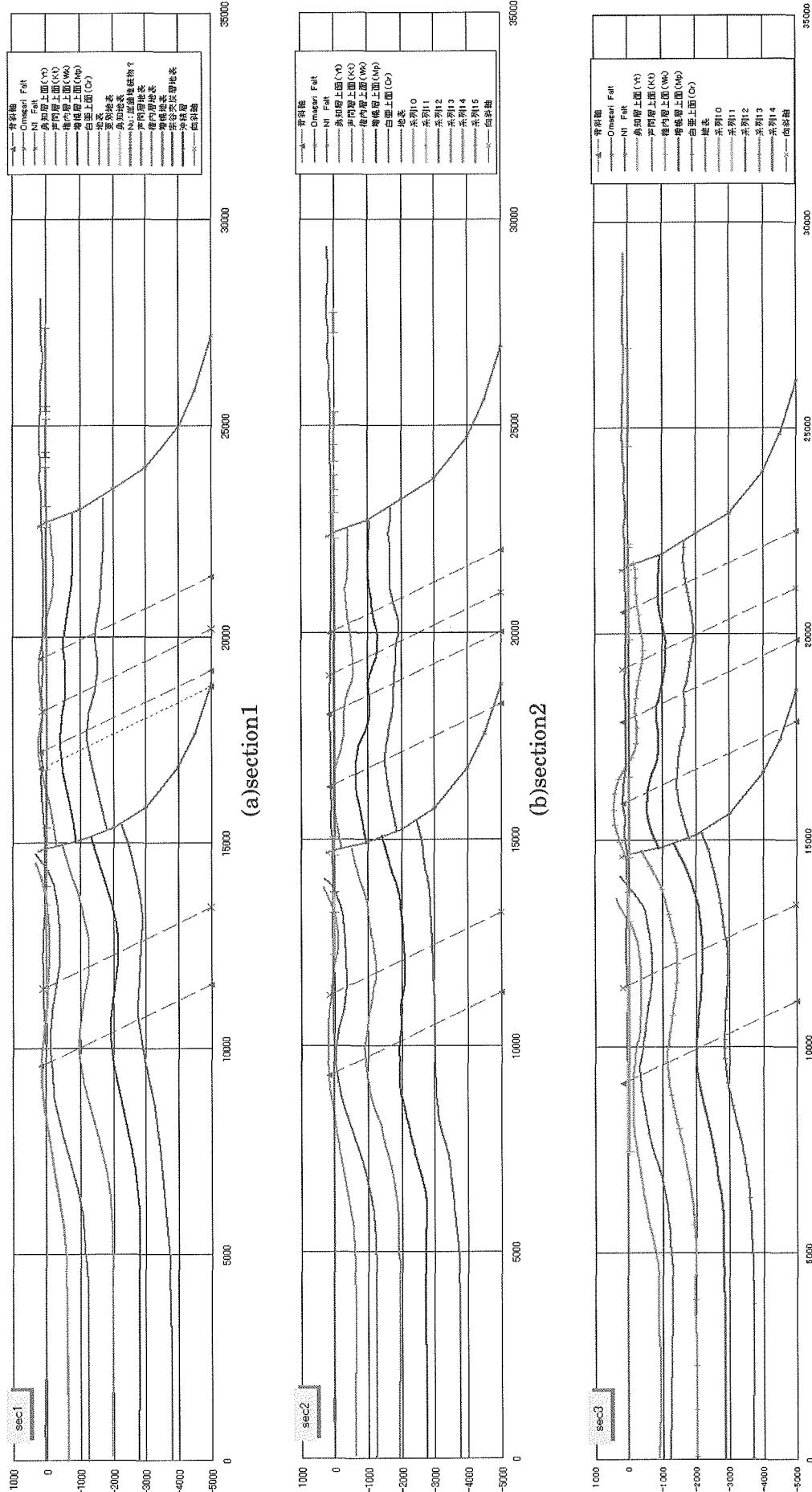


図 2.2-6(1) 作成した地質断面図

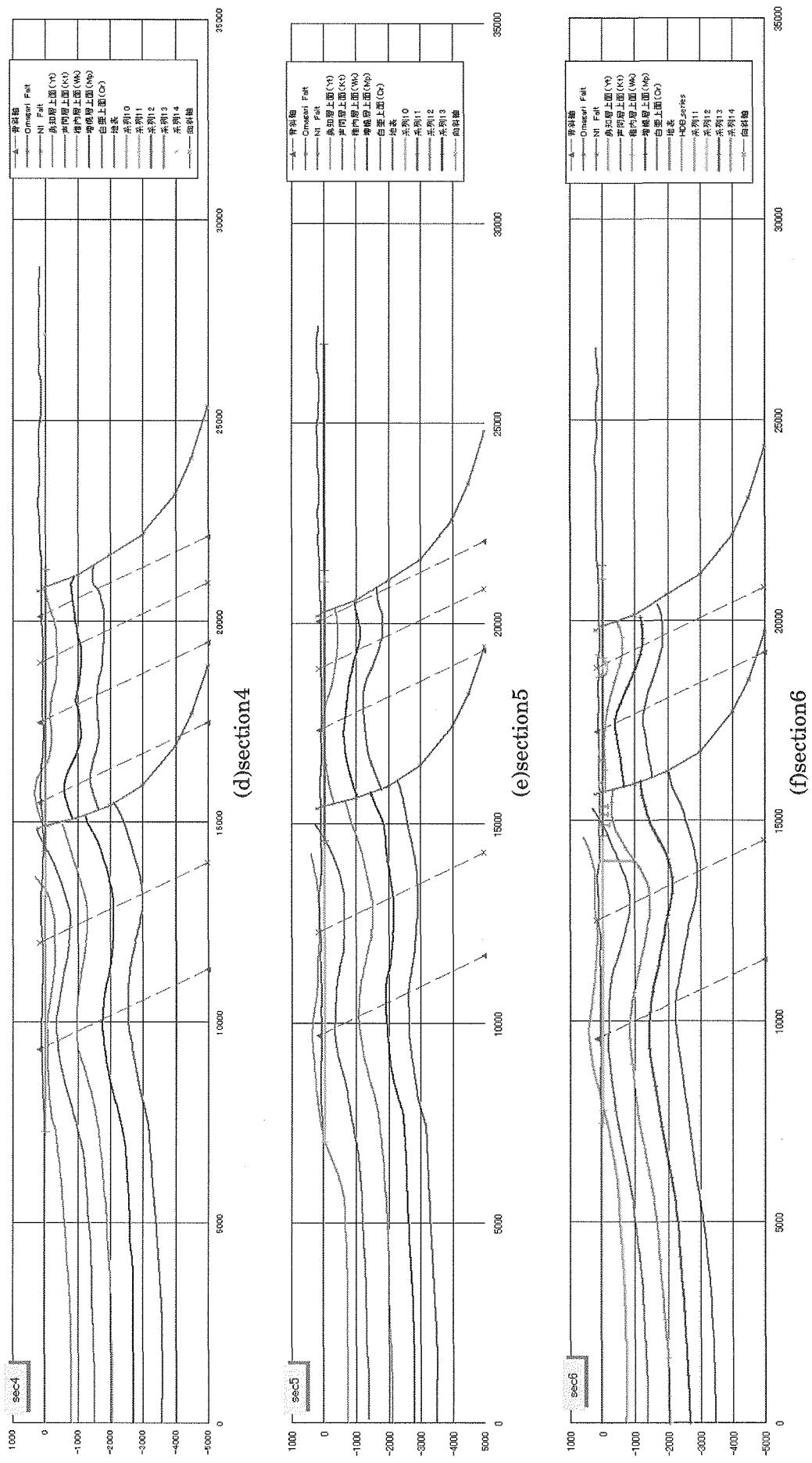


図 2.2-6(2) 作成した地質断面図

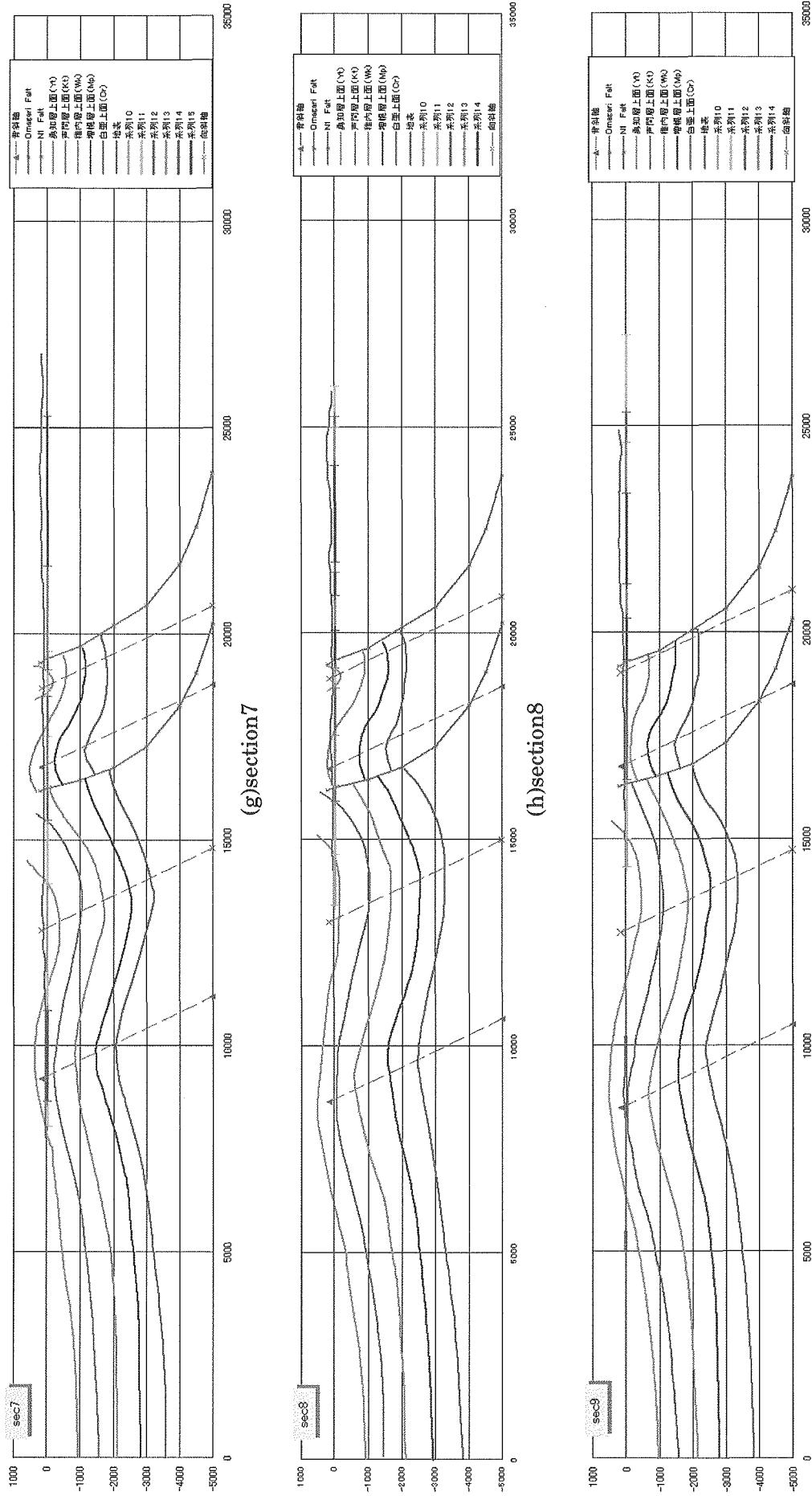
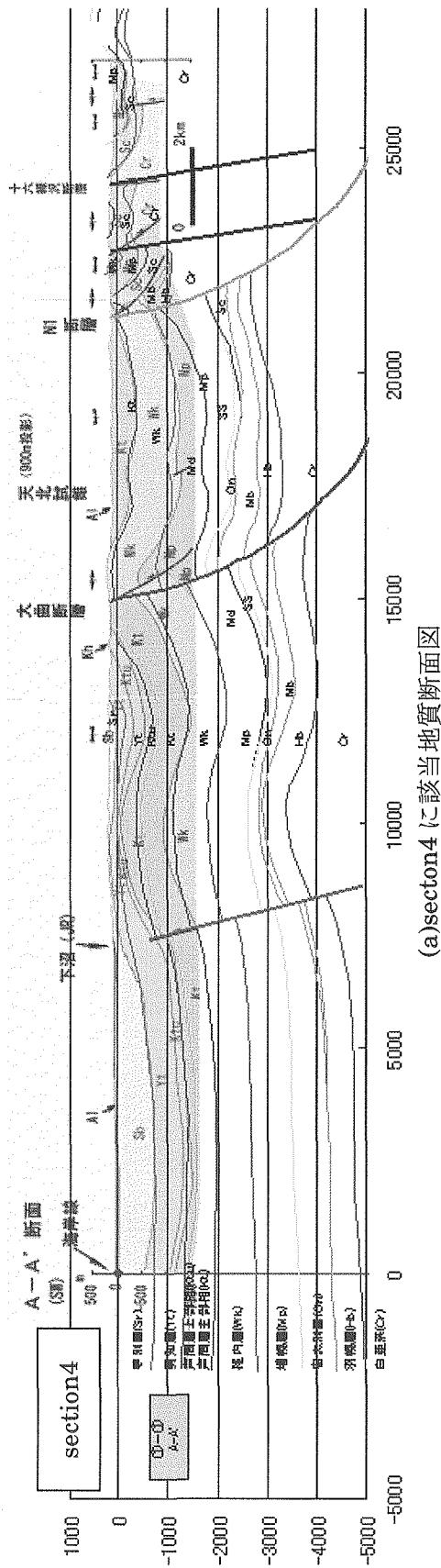
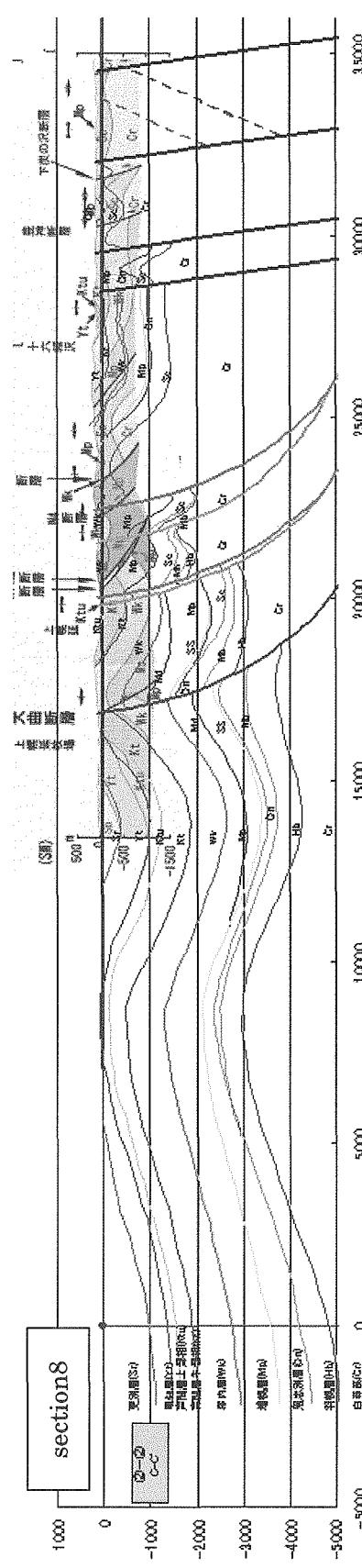


図 2. 2-6(3) 作成した地質断面図

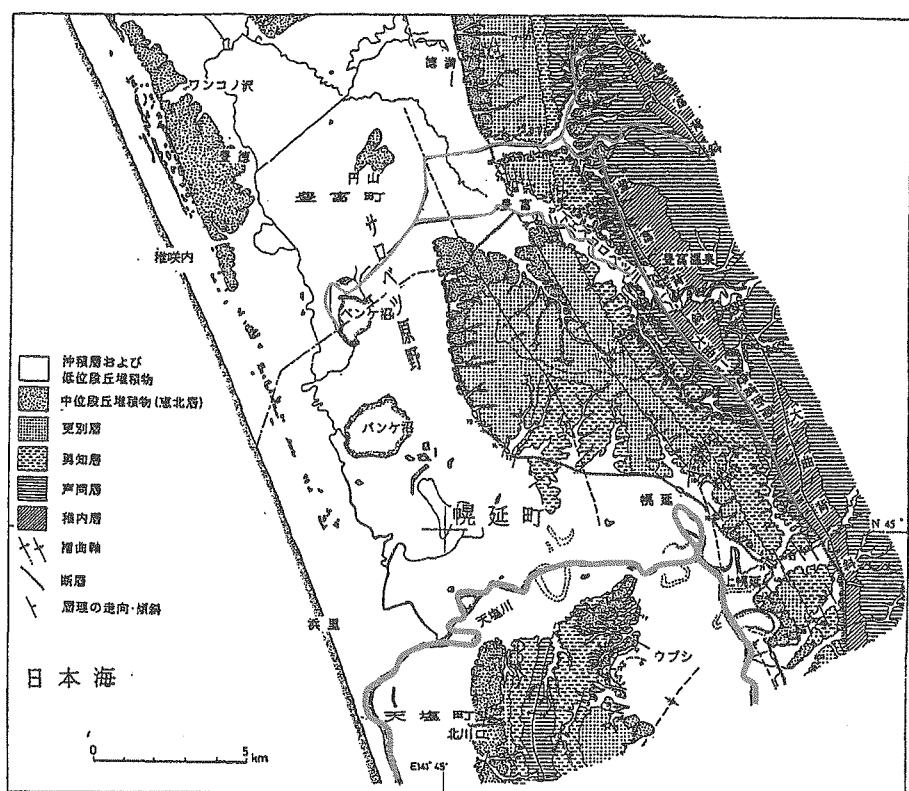


(a) section 4 に該当地質断面図

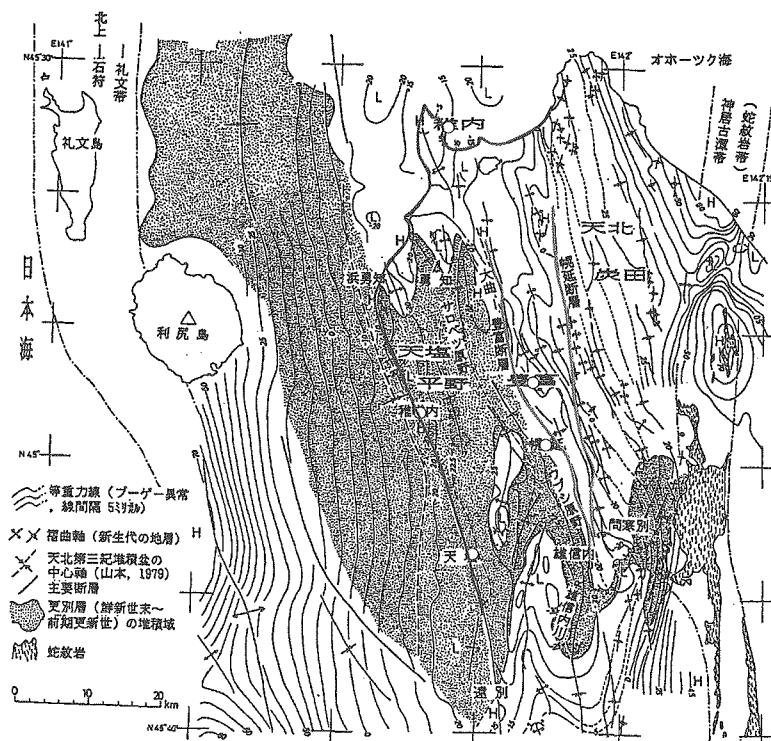


(b) section 8 に該当地質断面図

図 2.2-7 参考にした地質断面図



(a)地質平面図



(b)重力異常図

図 2.2-8 参考にした断層位置図 (岡, 2000)

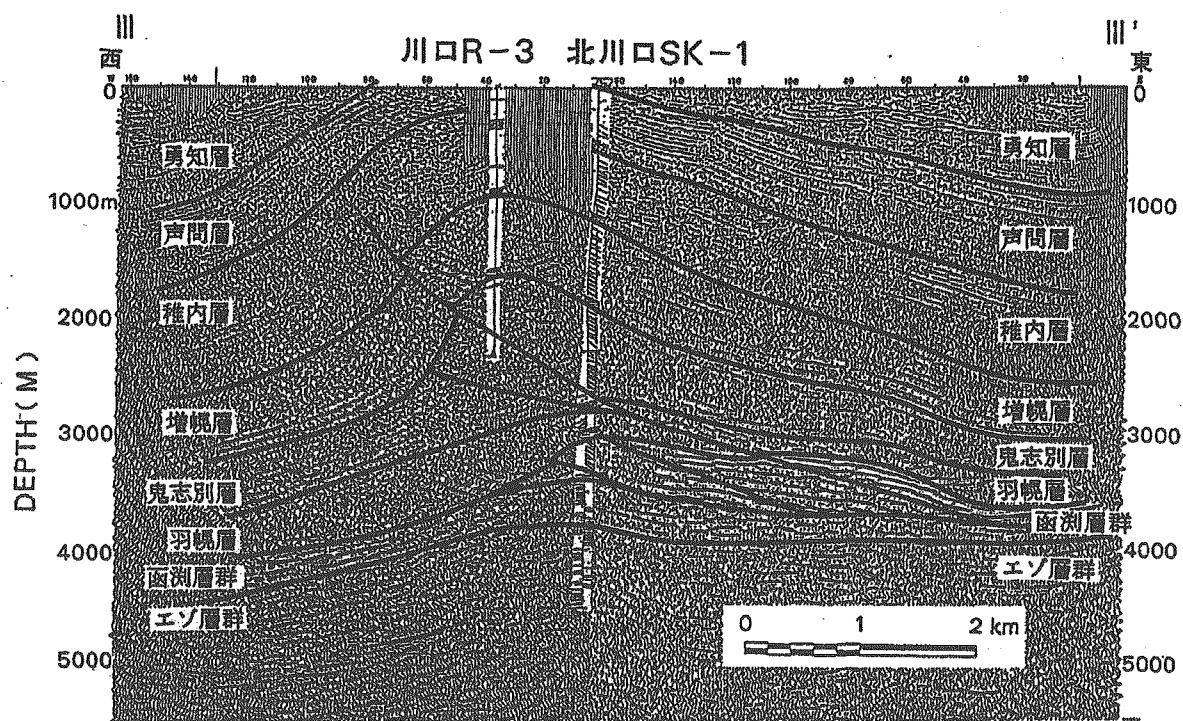


図 2.2-9 地震探査による地質構造断面図（小椋ら, 1992）

### (3) 鉛直2次元メッシュの作成

地質をモデル化する9断面に対してメッシュ分割を実施した。メッシュ分割は図2.2-6に示す地質構造断面を参考に、表2.2-1の12の地質区分でモデル化した。

モデル化は、断層、向斜軸を境界として領域を6ブロックに分割しそれぞれメッシュ分割をした。二つの断層に関しては、どちらも三層構造として、全層厚は断層直交方向に100m、三層の中央部（コア部）層厚を20mとしている。

地層構造をできるだけ忠実に、かつ効率的なモデル化を実施するためBlock-1,-2に関しては稚内層上面をそのままトレースするよう設定し、それよりも浅部は、図2.2-6の断面図を基に別途作成した地質区分のデータベースを参照して該当するメッシュに対応する地質区分を振り分けるように設定した。Block-4に関しては増幌層上面をそのままトレースするよう設定し、それよりも浅部は、Block-1,-2同様に地質区分のデータベースを参照して該当するメッシュに対応する地質区分を振り分けるように設定した。また表層は全領域に対し一律に、深さ20mとしている。

図2.2-10には南側から見た、9断面のメッシュ分割と地質構造を示す。各断面の節点・要素連結メッシュ構造は同じ構造（モデルは図2.2-10で、x方向に66要素67節点、z方向に20要素21節点から成る格子上の構造、要素数：1320、節点数：1407）としてあり、各断面を連結して3次元のモデル化が容易になるよう設定している。

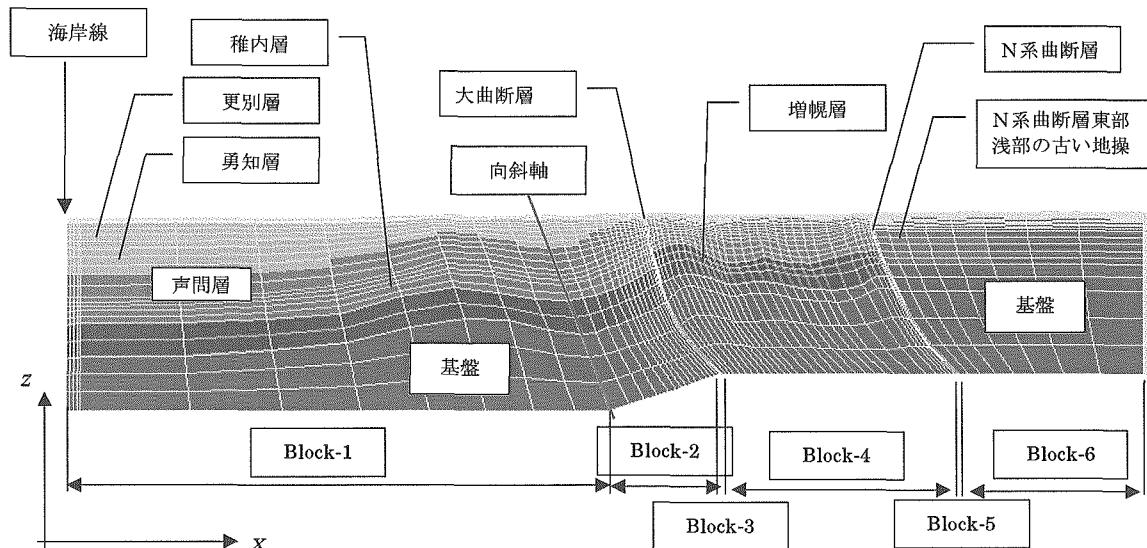
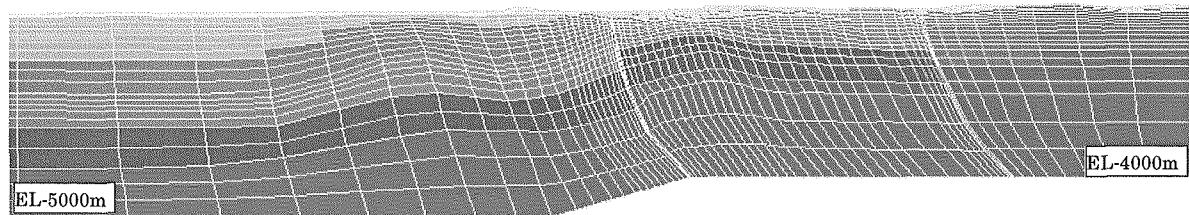
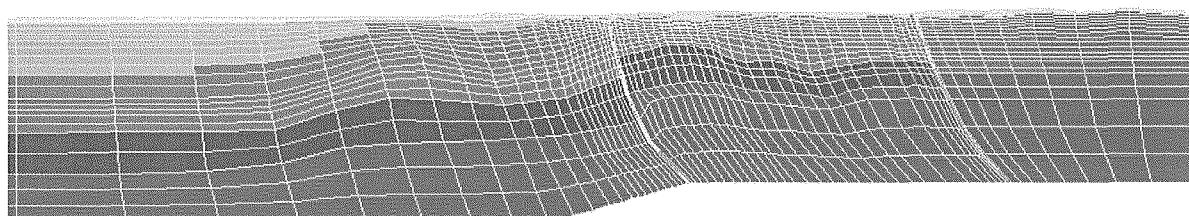


図2.2-10 モデル化のブロック設定

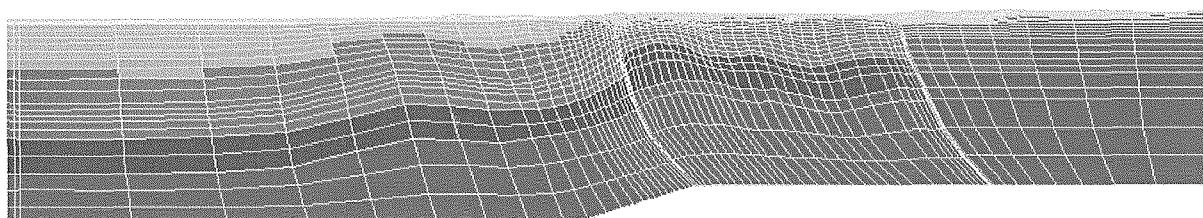
海岸



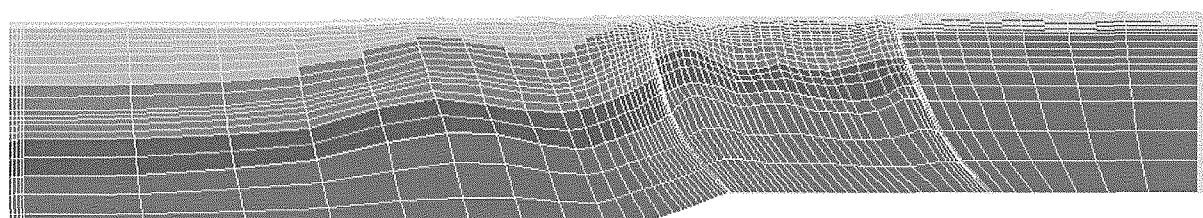
sec1



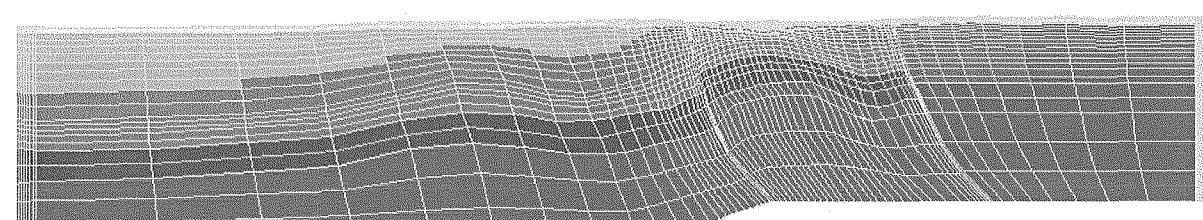
sec2



sec3



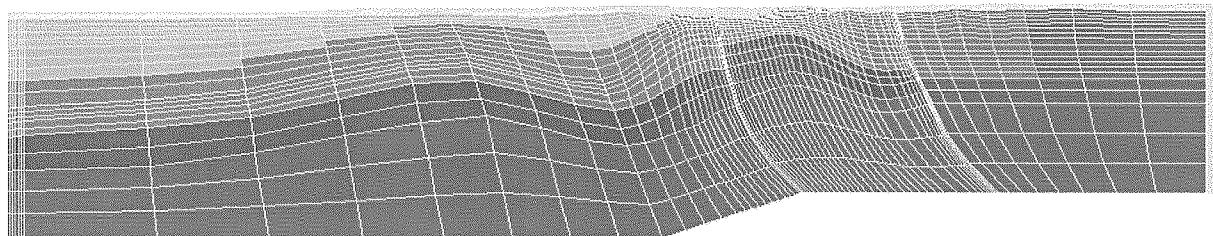
sec4



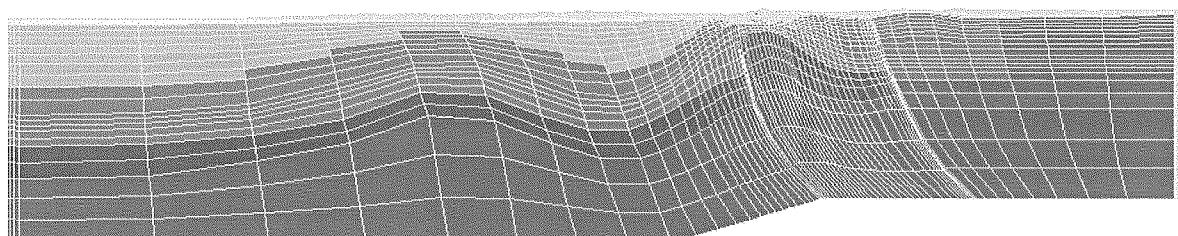
sec5

図 2.2-11(1) メッシュ分割における地質構造

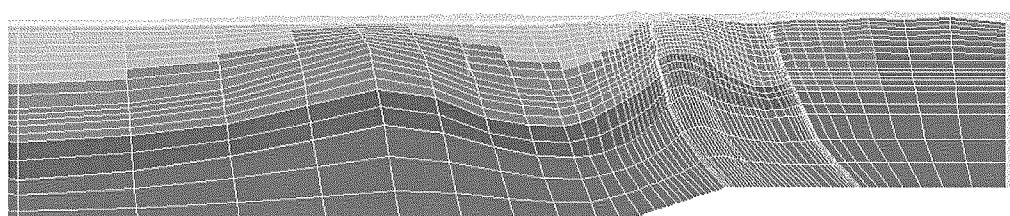
海岸



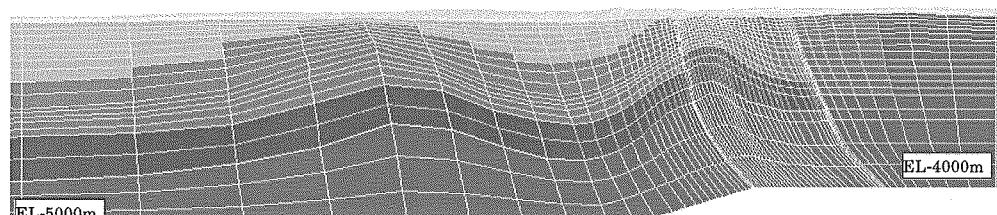
sec6



sec7



sec8



sec9

図 2.2-11(2) メッシュ分割における地質構造

#### (4) 3次元モデルメッシュの作成

3次元モデルは図2.2-12に示す座標系で設定している。座標原点は国土地理院地形図（5万分の1）「豊富」の左下隅の座標（旧測地系で北緯45度00分00秒、東経141度45分00秒、世界測地系UTM座標：x（東方向）=558806.807 y（北方向）=4983470.465）とした。この原点に基づくモデルは直交座標系で表現され、世界測地系UTM座標と整合するようしている。図2.2-12には断層、9断面の位置を合わせて示す。

3次元モデルは先の9断面を上記3次元座標系にて定義し、各断面を接続、断面間は、地下施設建設予定付近は細かく、解析領域外周部は分割を粗く分割して作成した。この後、地表面標高デジタルデータを参照し地表面形状、一部地層厚を調整し、3次元メッシュ形状を設定した。

モデルは総要素数72600、総節点数78792である。要素形状（節点間隔）は20m～500m程度となっている。

地質区分は、先述の断面図を基に別途作成した地質区分のデータベースを参照して設定した。図2.2-13に、この地質区分データベースの地質情報を図化した結果を示す。

図2.2-14、図2.2-15に解析モデル節点と河川・湖沼、設定流域を合わせて示す。

図2.2-16にはメッシュ分割平面図を示す。図中示すように、水平坑道に相当する位置の要素を水平坑道の形状に合わせ、広域スケール領域モデルで掘削影響を評価できるようなメッシュ分割としている。

図2.2-17～図2.2-27にはモデルにおける水理地質構造の設定を、平面図と鳥瞰図で示す。

図2.2-28にはモデル表面の地形標高コンタと地表面標高デジタルデータから直接作成した地形標高コンタを示す。解析モデルでは標高デジタルデータに比べデータ密度が低く地形標高コンタの詳細さに欠けるものの地形概要是調和的で、地形のモデル化の妥当性が確認される。

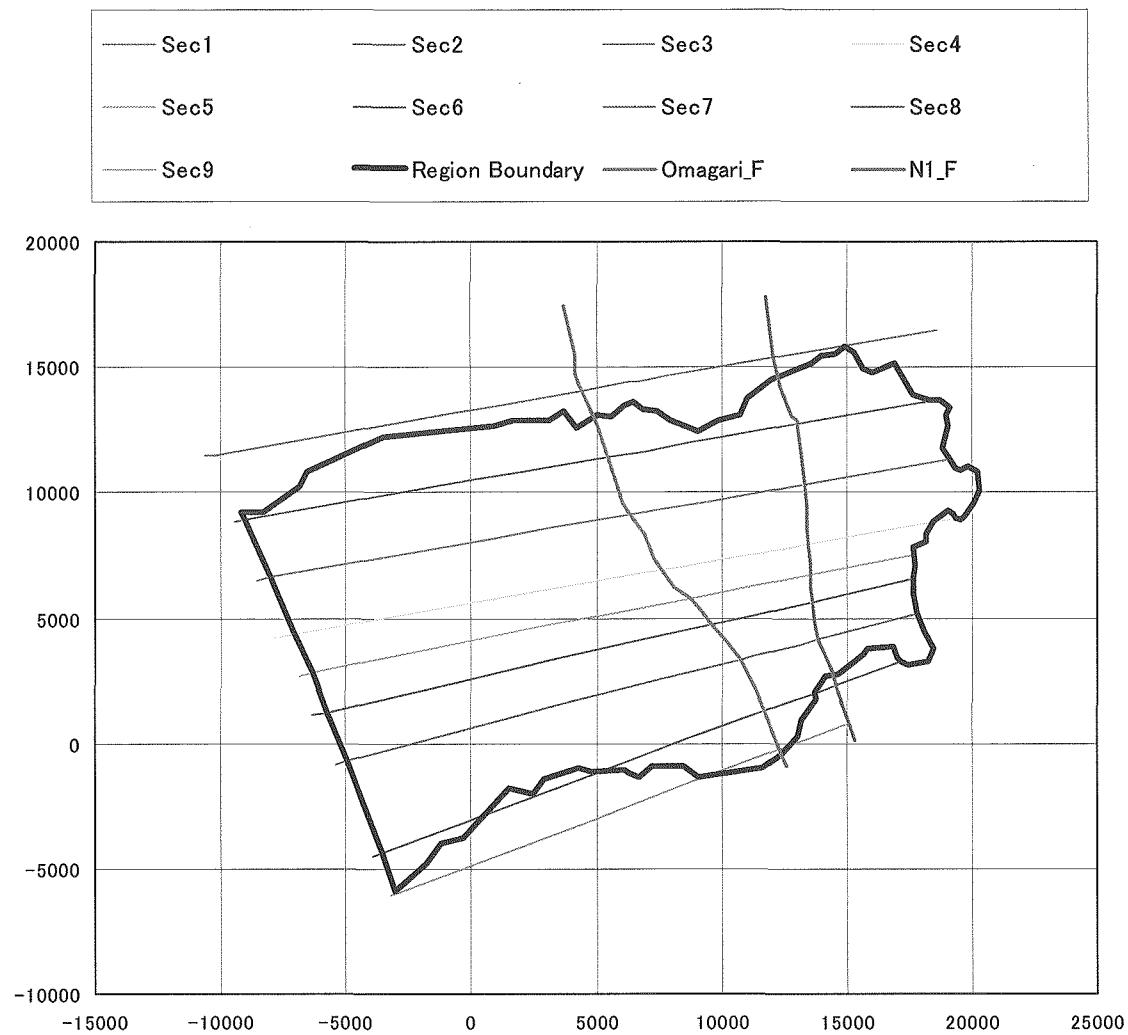


図 2.2-12 解析領域と座標

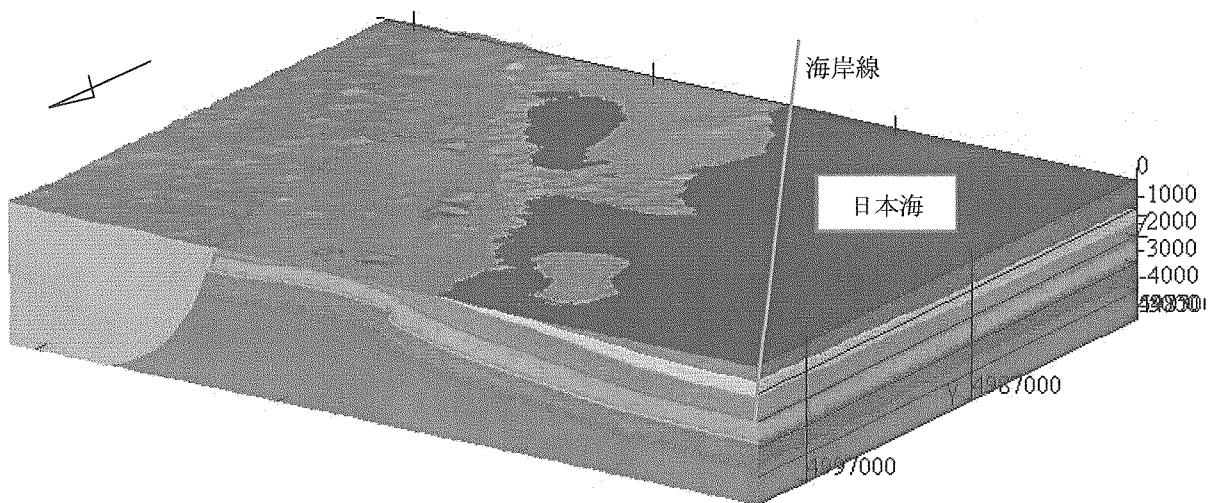


図 2.2-13 解析モデル節点と河川, 設定流域



図 2.2-14 解析モデル節点と河川, 設定流域

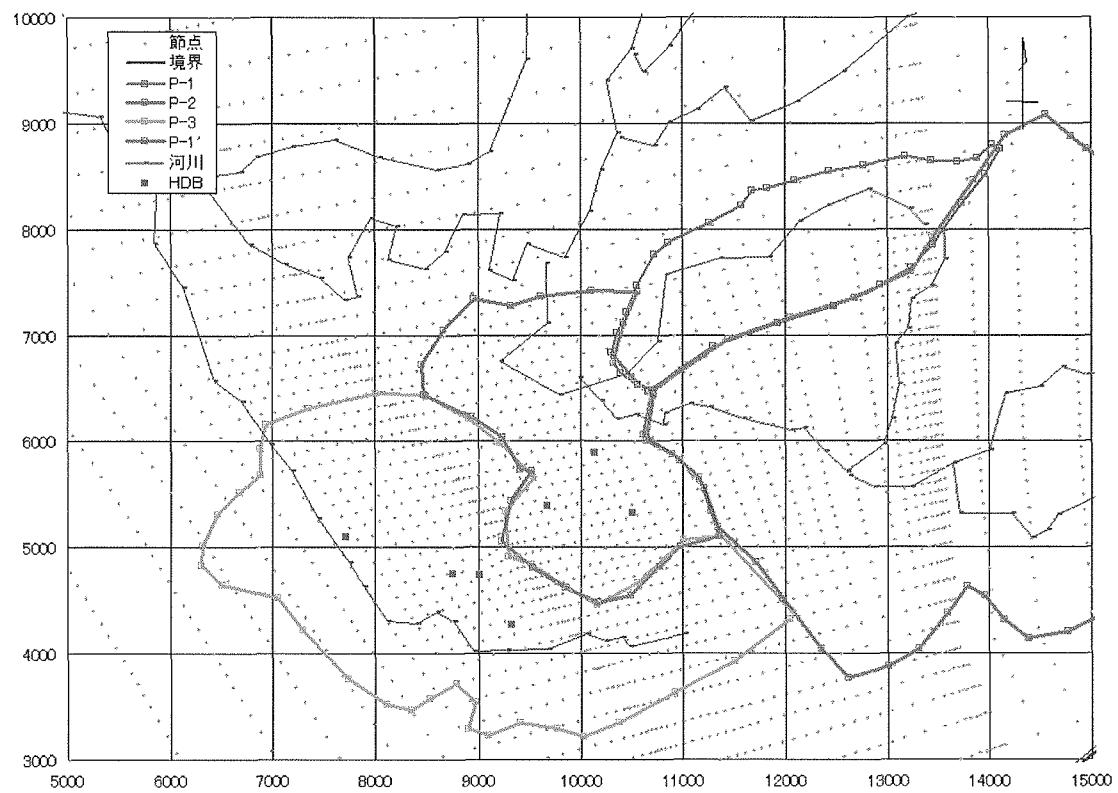


図 2.2-15 解析モデル節点と河川, 設定流域の研究地区中心部拡大図

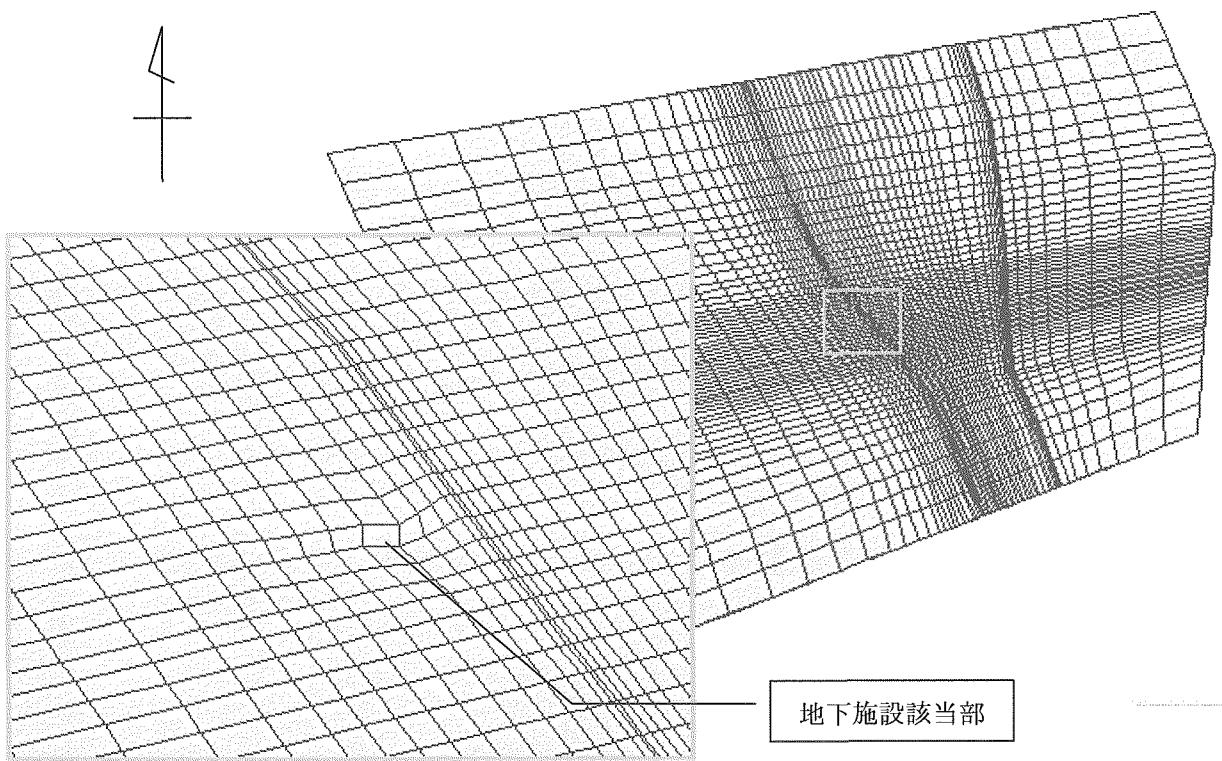


図 2.2-16 メッシュ分割平面図

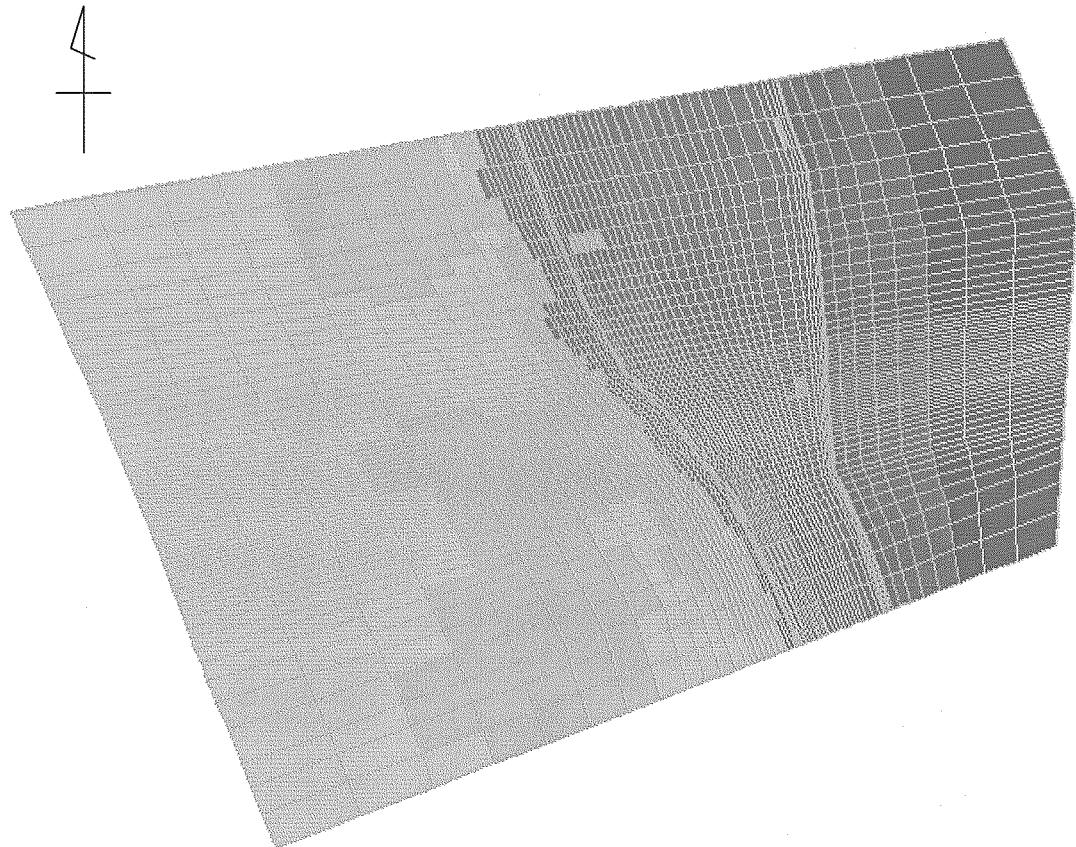


図 2.2-17 表層部直下でのモデルでの水理地質区分

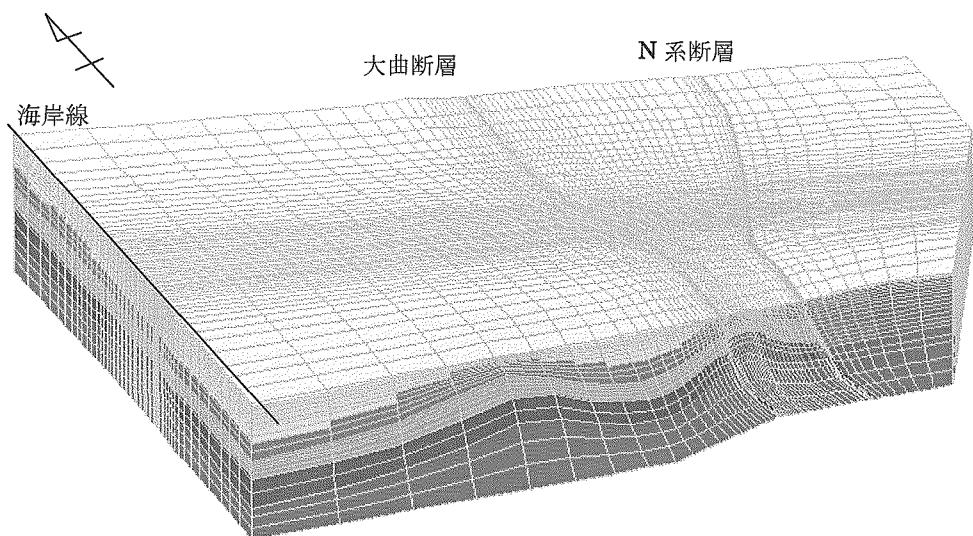


図 2.2-18 解析モデルの鳥瞰図

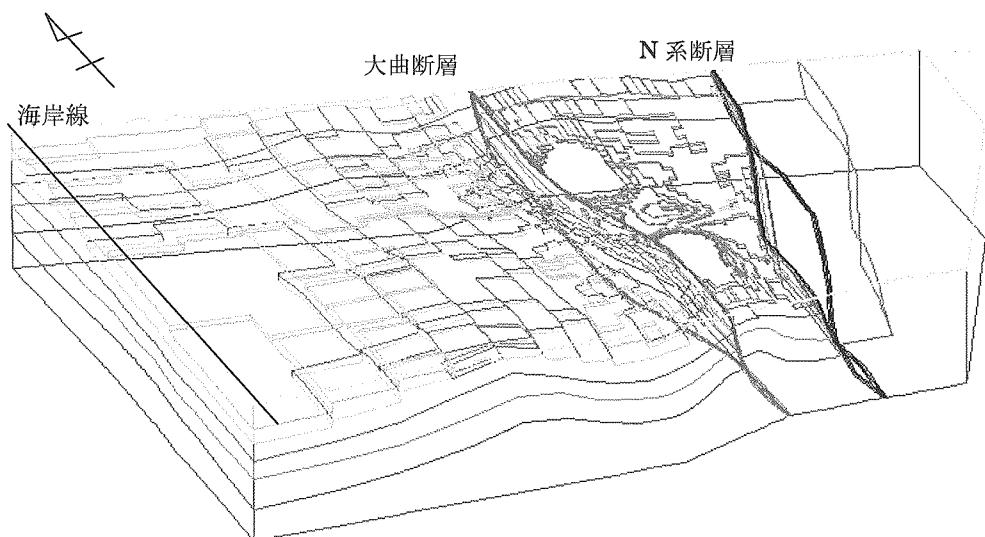


図 2.2-19 解析モデルを透視した鳥瞰図

(図中の線は水理地質区分の線を示す。)

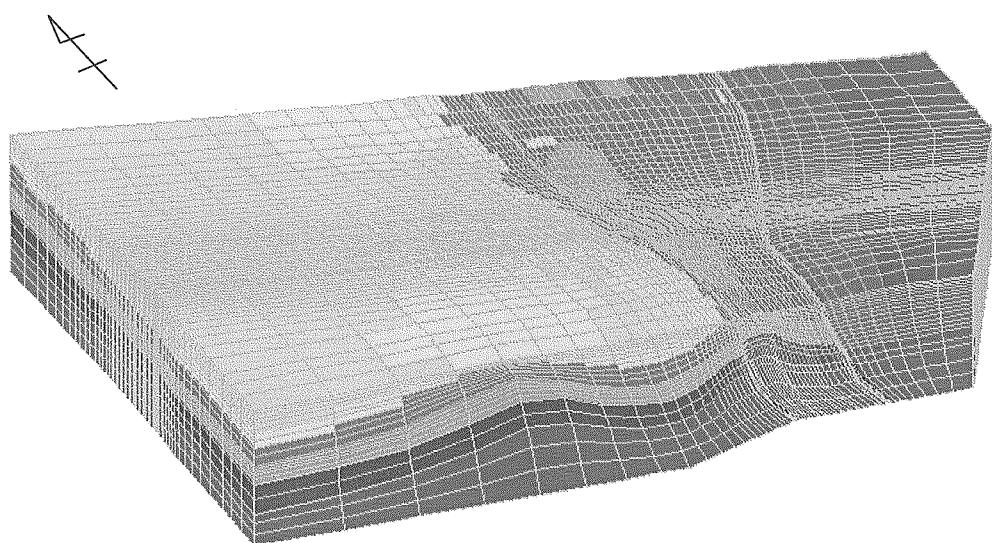


図 2.2-20 表層を剥がした状態の解析モデル鳥瞰図

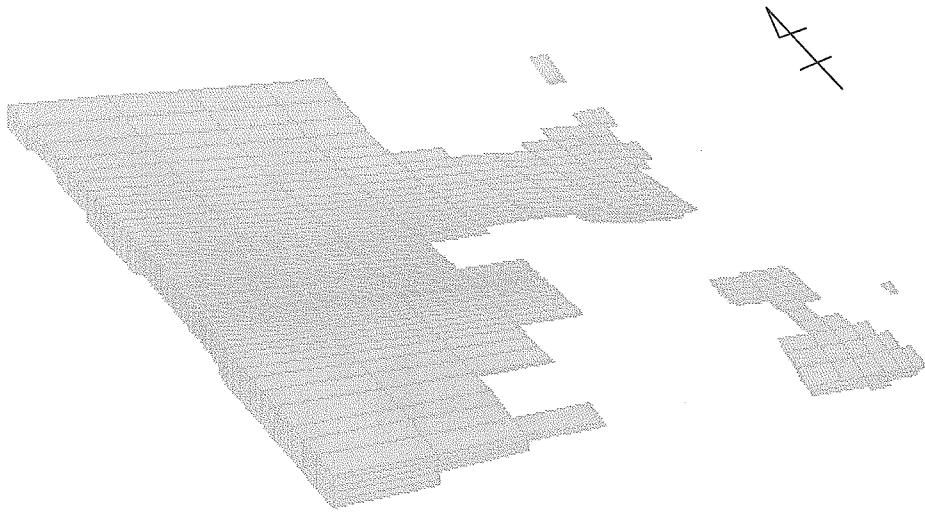


図 2.2-21 更別層を抽出した鳥瞰図

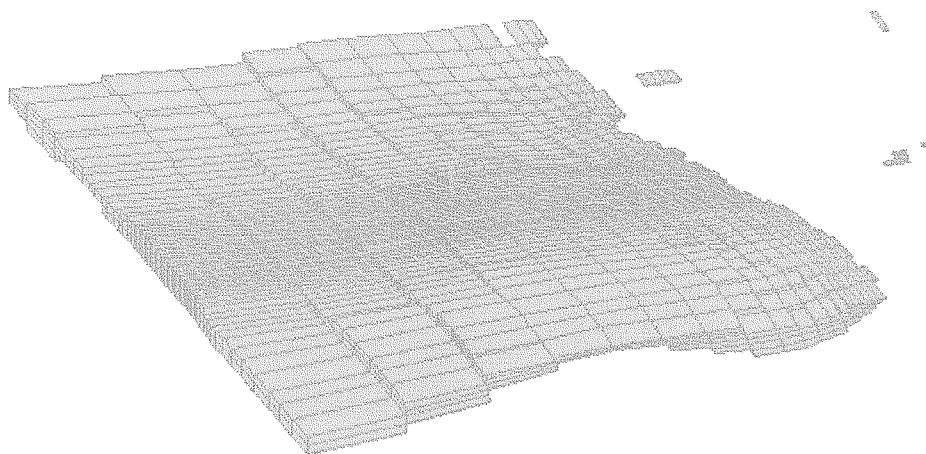


図 2.2-22 勇知層を抽出した鳥瞰図

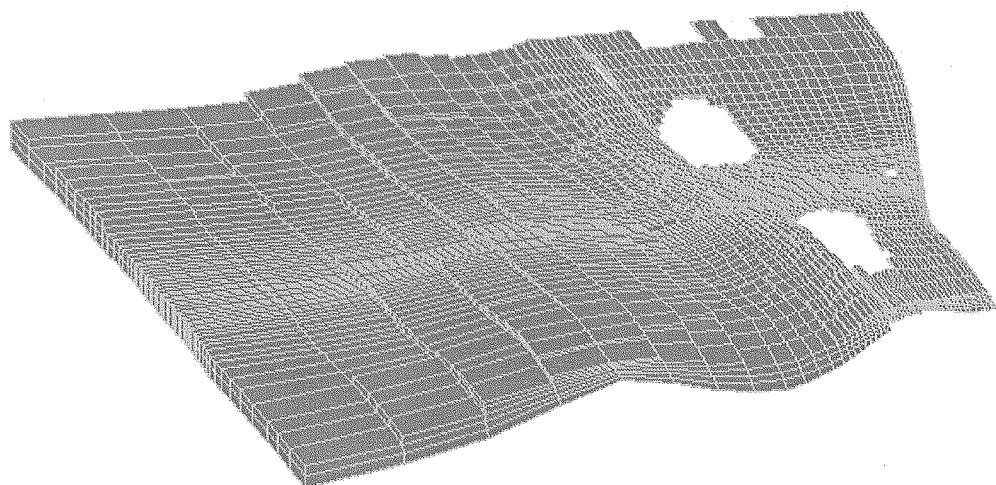


図 2.2-23 声問層を抽出した鳥瞰図

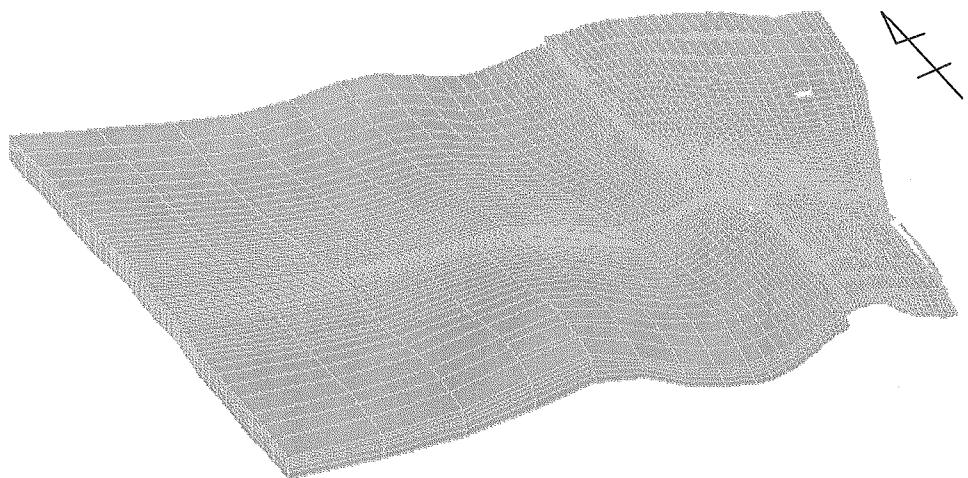


図 2.2-24 稚内層を抽出した鳥瞰図

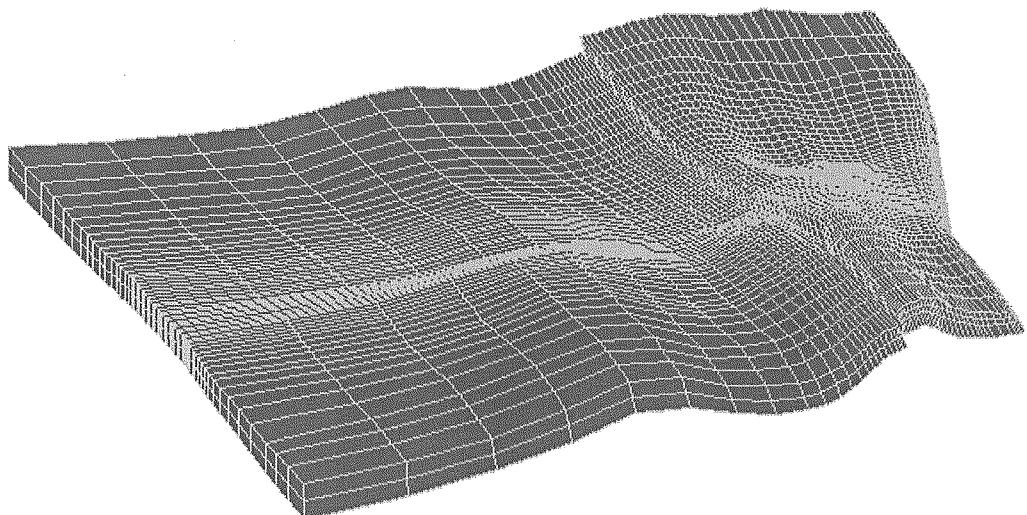


図 2.2-25 増幌層を抽出した鳥瞰図

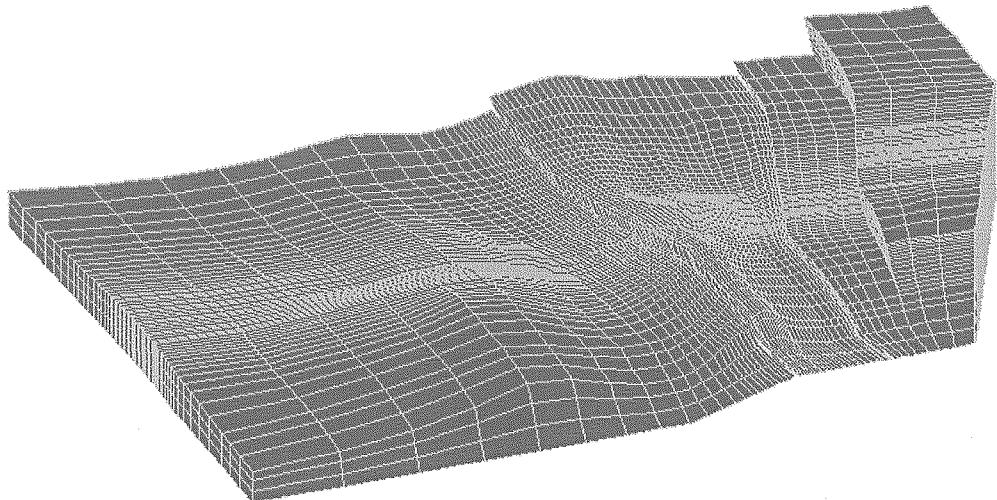


図 2.2-26 鬼志別層他の基盤部（増幌層より古い）を抽出した鳥瞰図

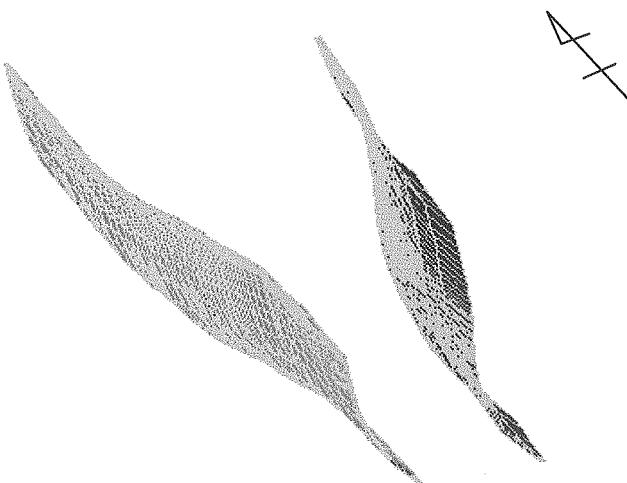
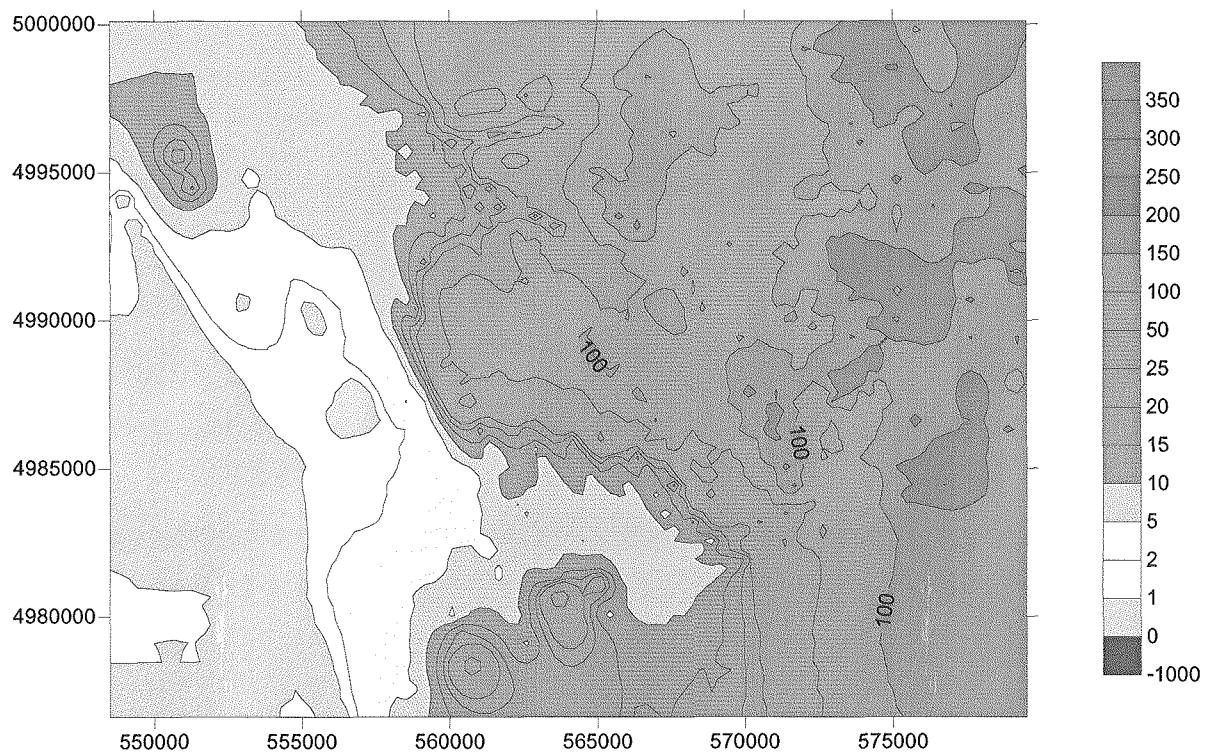
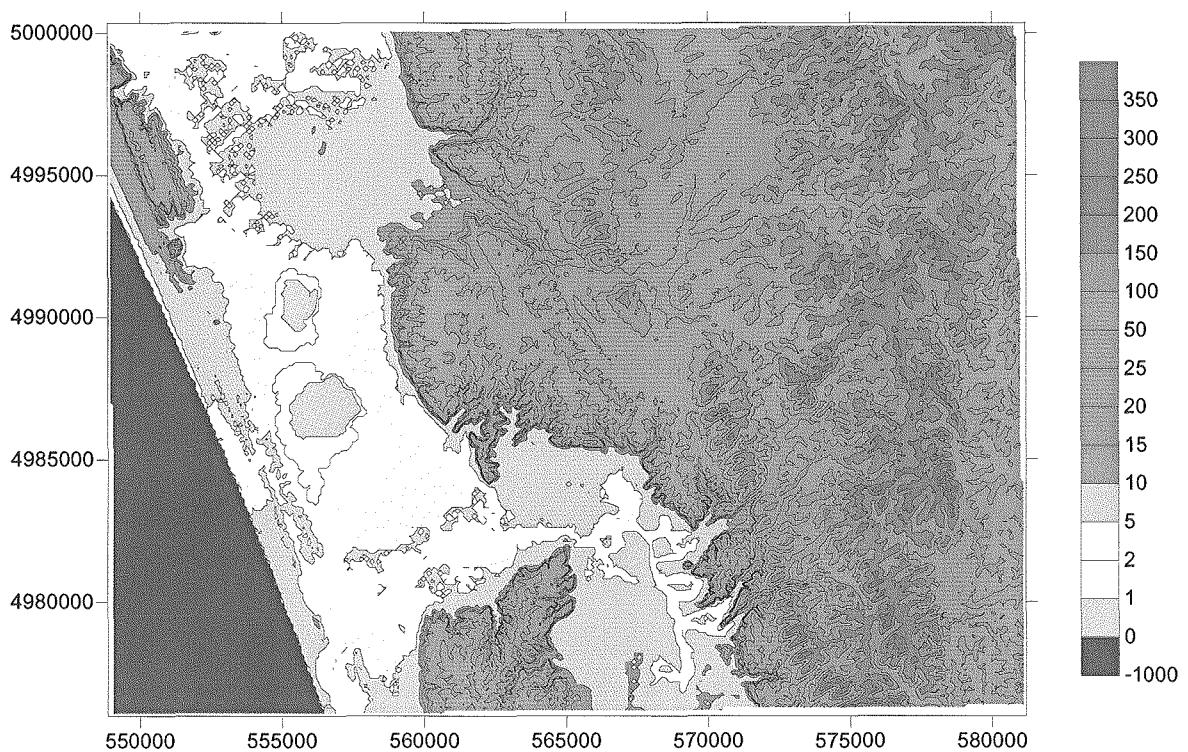


図 2.2-27 断層を抽出した鳥瞰図



(a) 解析モデル表面の標高値から作成した地形コンタ



(b) デジタル標高データから作成した地形コンタ

図 2.2-28 解析モデルとデジタル標高データの地形コンタの比較

## 2.3 立坑近傍モデルのメッシュ作成

### (1) 地下施設のモデル化

地下施設は、図 2.3-1 に示すように、主構造物として

①換気立坑

②アクセス立坑（西立坑、東立坑）

③水平坑道（GL-125m 坑道、GL-250m 坑道、GL-375m 坑道、GL-500m 坑道）

から構成される。この中で 3 本の立坑（換気立坑、西立坑、東立坑）と主坑道として GL-250m 坑道、GL-500m 坑道をモデル化対象とした。GL-125m 坑道、GL-375m 坑道は立坑間を繋ぐもので、水理的な影響はあまりないと考えられるため、モデル化から除外した。図 2.3-2 にモデル化した GL-250m、500m 坑道平面の平面図と立坑の側面図を示す。

図 2.3-3 に立坑、坑道に該当するモデル節点の位置、メッシュ図を示す。

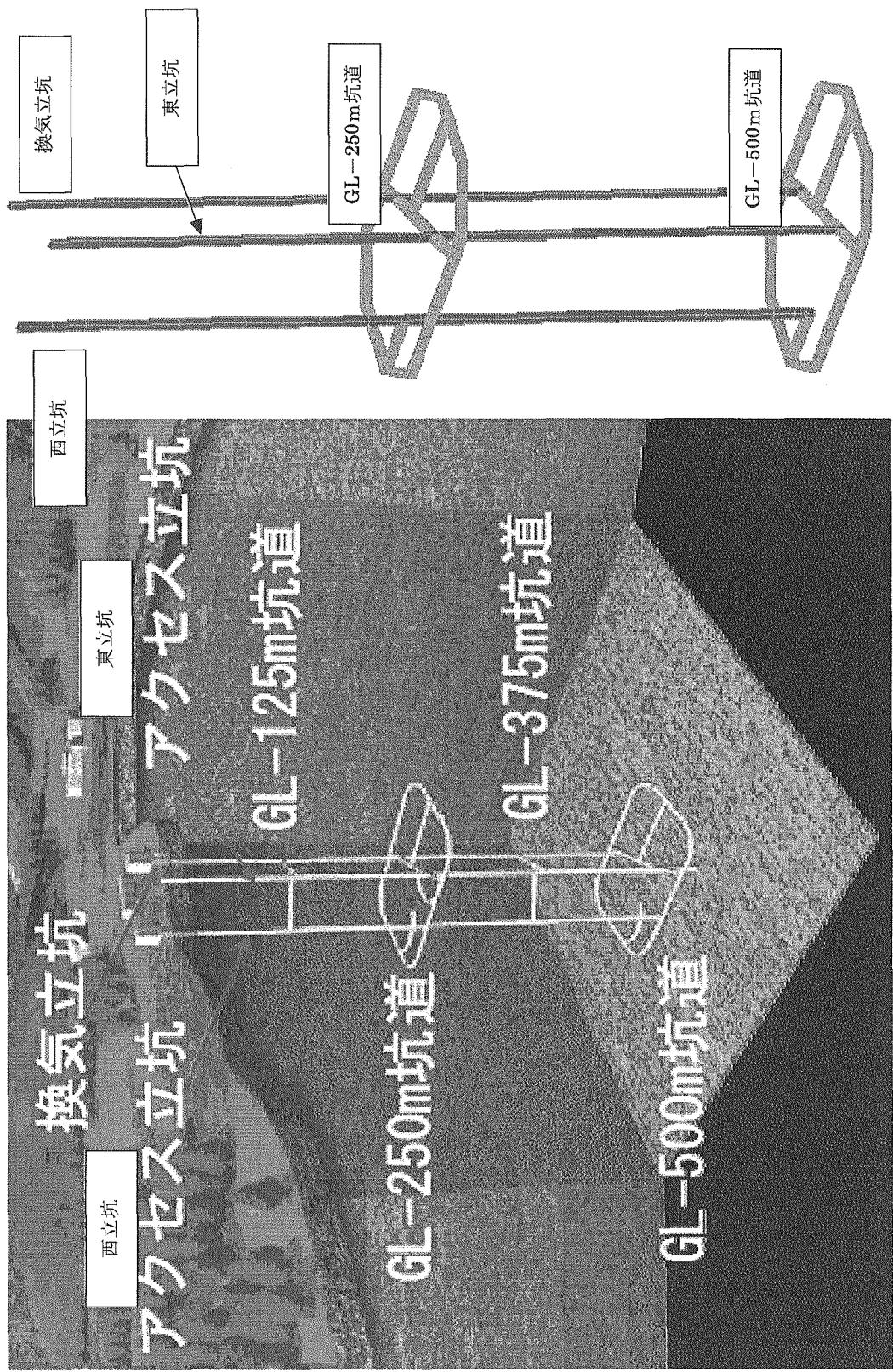
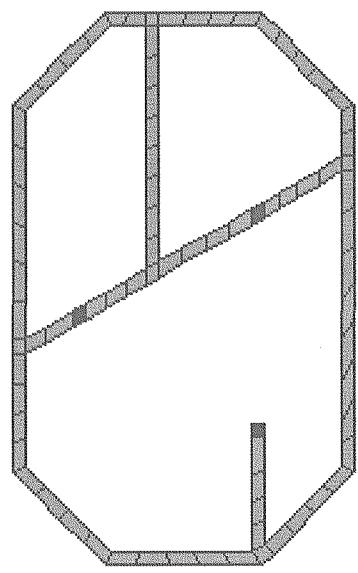
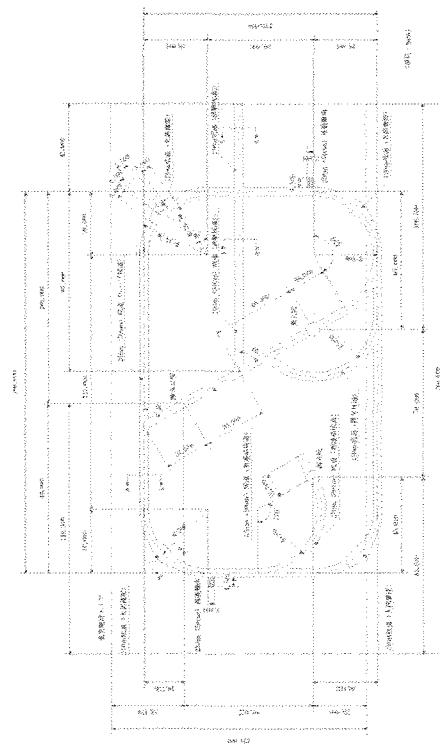


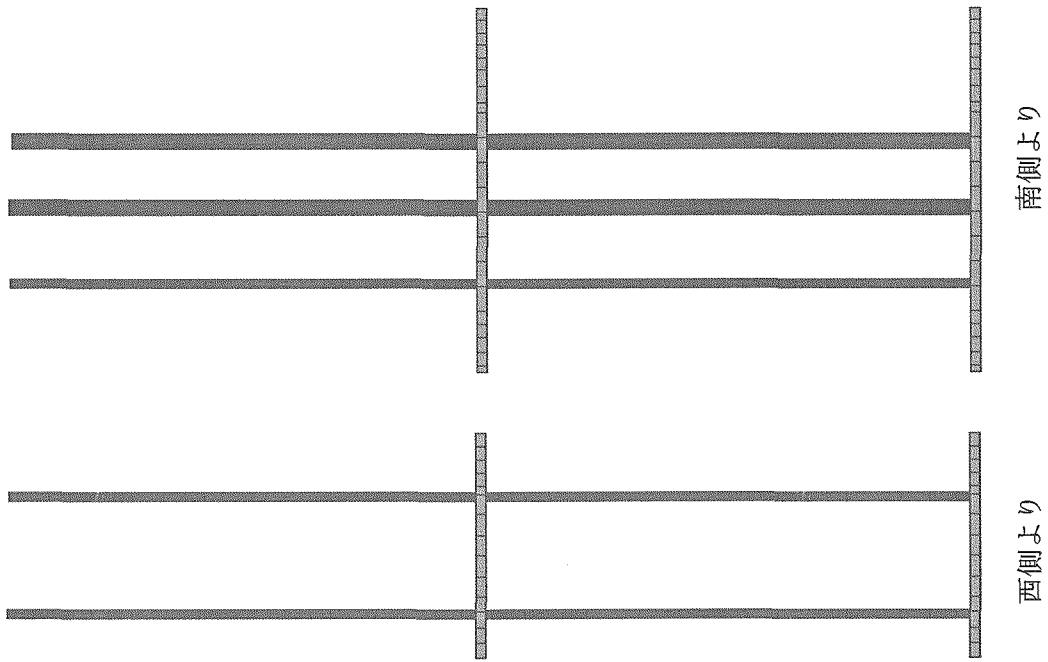
図 2.3-1 地下施設のモデル化概要



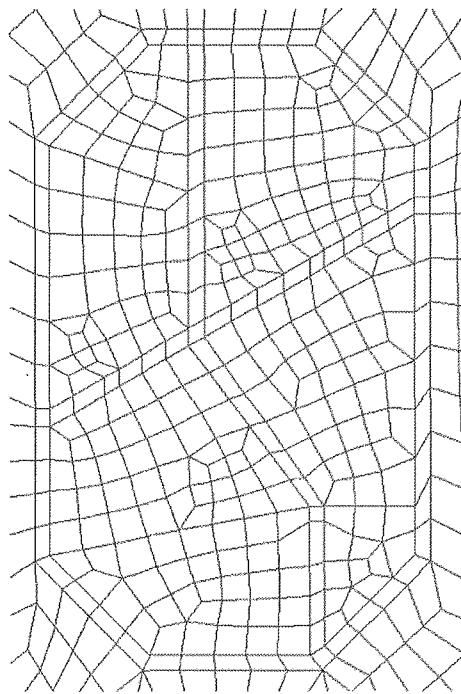
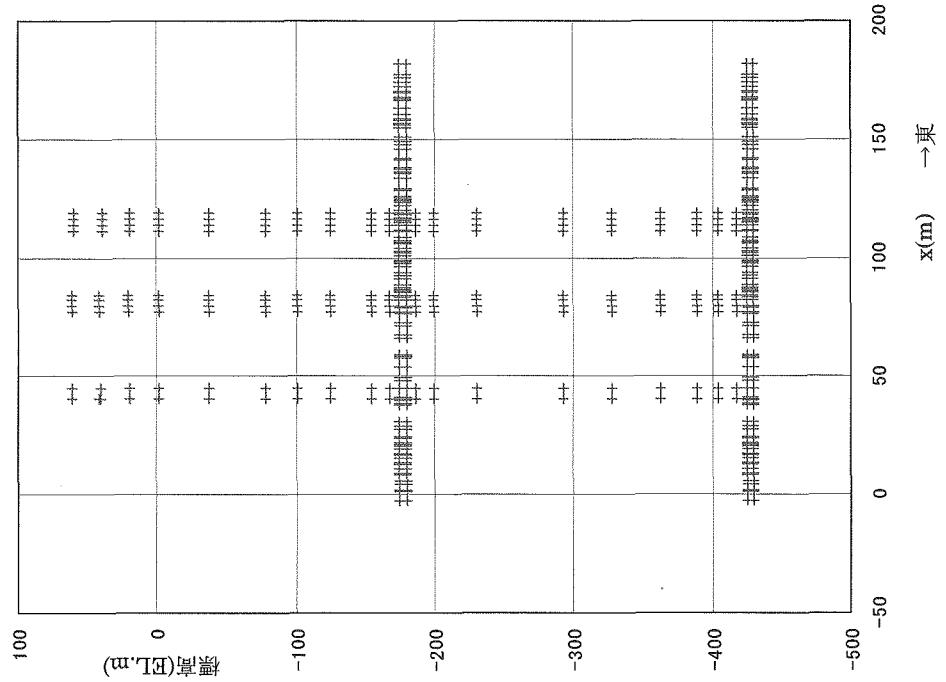
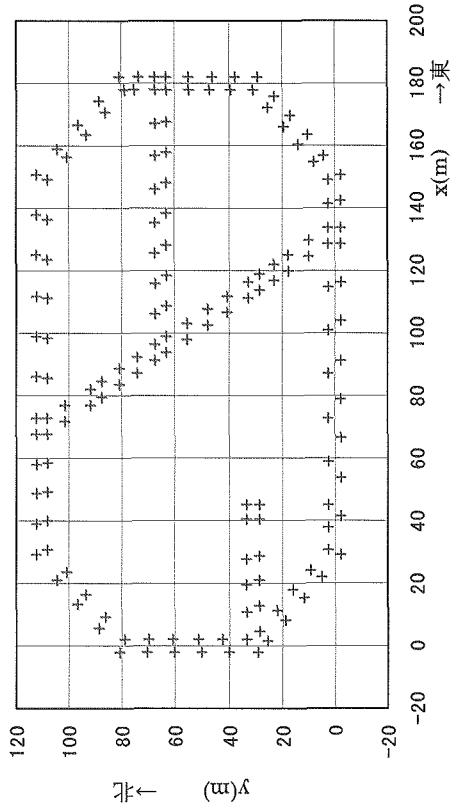
GL-250m, 500m 坑道モデル平面



GL-250m, 500m 坑道平面



GL-250m, 500m 坑道平面の平面図, 立坑の側面図



(b)水平坑道部メッシュ  
(c)立坑・坑道節点位置鉛直断面  
図 2.3-3 立坑、坑道に該当するモデル節点

## (2) 広域スケールとの整合性

広域スケールモデルと、施設スケールモデルとの整合性を地表面節点位置にて示す。図 2.3-4, 図 2.3-5, 図 2.3-6 は、それぞれ広域スケールモデルの表層節点、施設スケールモデルの表層節点のプロット図である。施設スケールモデルの外周は広域スケールモデルの外周と一致している。また、断層部の形状は広域スケールモデルの断層形状をそのまま反映し、広域スケールモデル節点間の施設スケールモデルの節点は広域スケールモデル節点の内分点となっている。広域スケールのメッシュ作成の説明時にも示したように、図 2.3-6 に示す坑道四隅に広域スケールの節点を配している。

図 2.3-7 には水理地質区分との関連を示す。図 2.3-7(a)は領域設定に際して示した図の再掲である。図 2.3-7(b)は広域スケールモデルにおける地下施設に該当する鉛直断面での施設スケールモデルの領域を示す。施設スケールモデルの領域は広域スケールモデルのメッシュ分割に沿って設定している。大曲断層より西側では施設スケールモデルの底面は増幌層上面に位置し、大曲断層東側では増幌層の内部に位置する。

底面標高の広域スケールモデルと施設スケールモデルの整合性を確認するために、図 2.3-8 に広域スケールモデル、施設スケールモデルそれぞれの標高分布を示す。

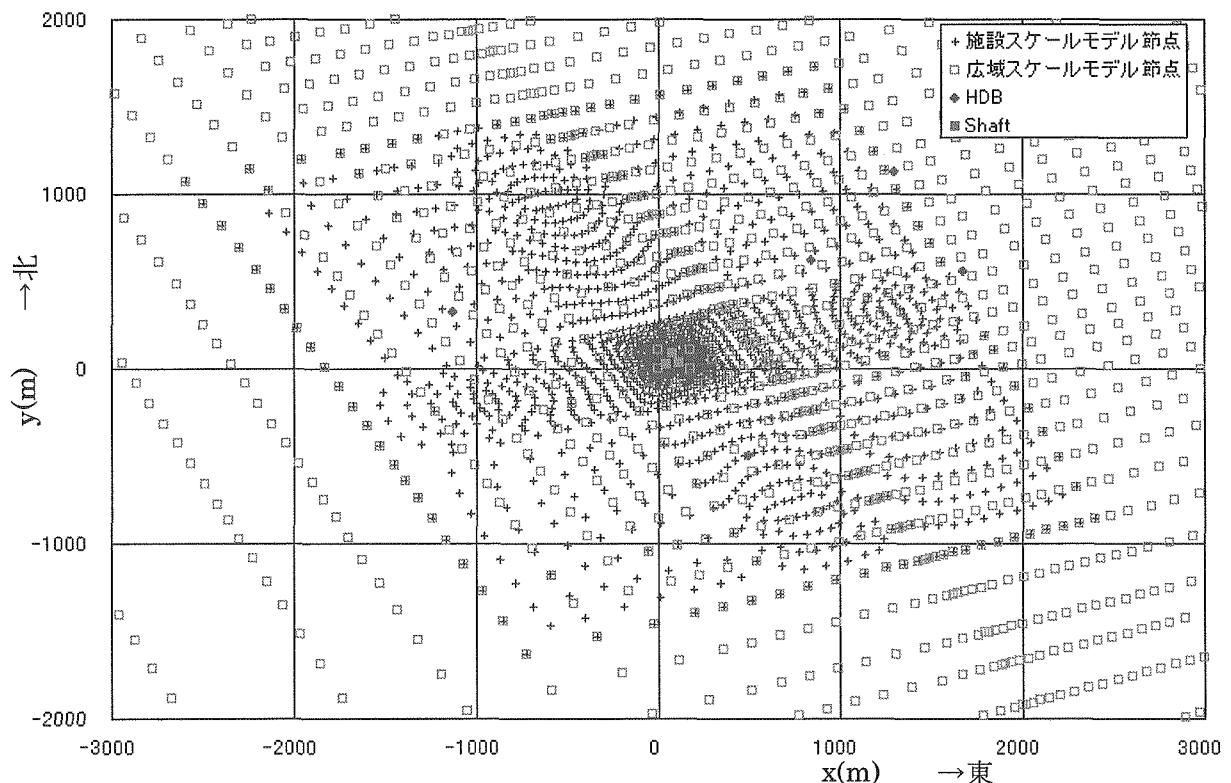


図 2.3-4 広域スケールモデルと施設スケールモデルの表層節点位置

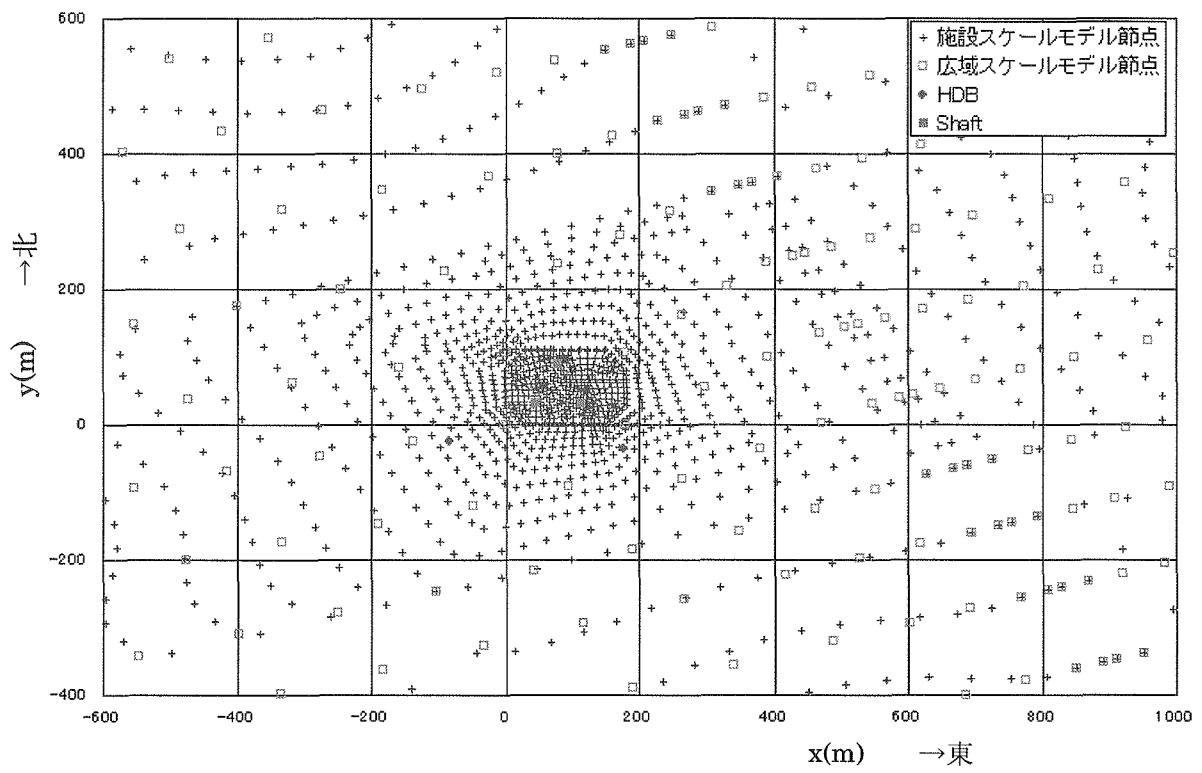


図 2.3-5 広域スケールモデルと施設スケールモデルの表層節点位

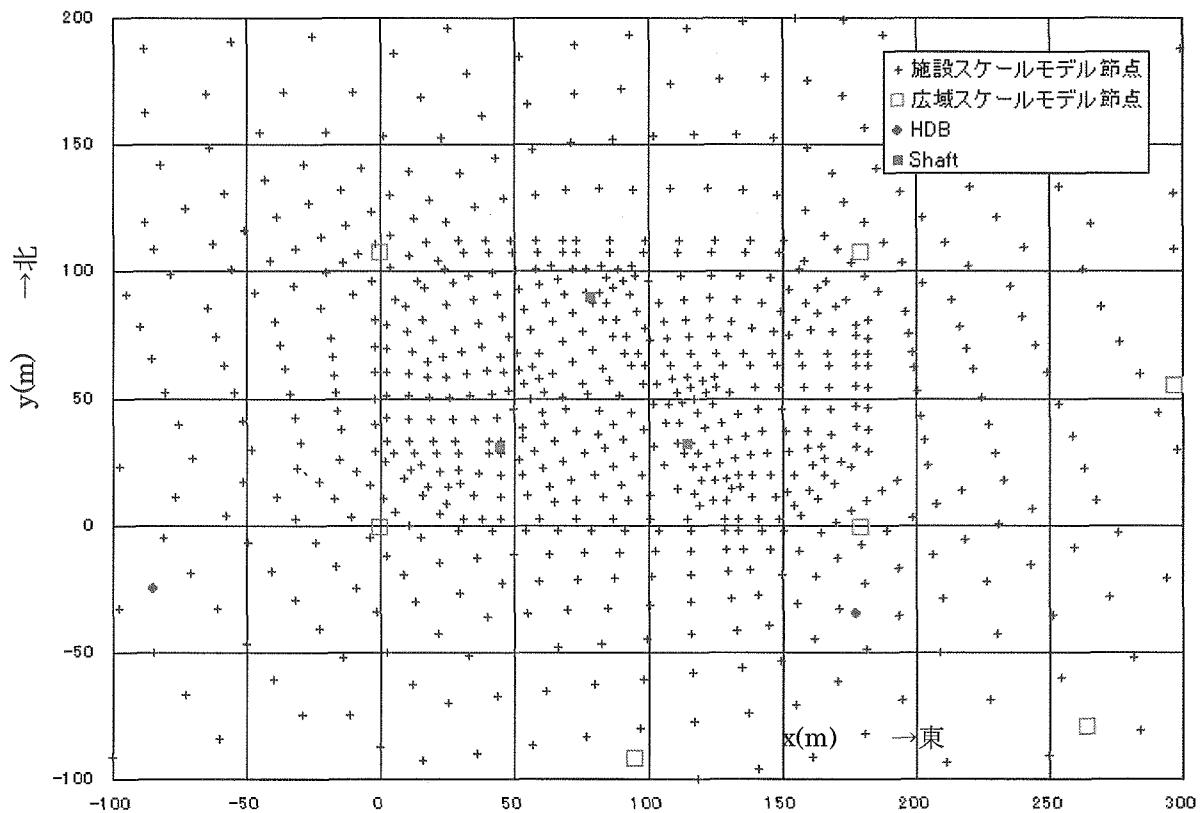
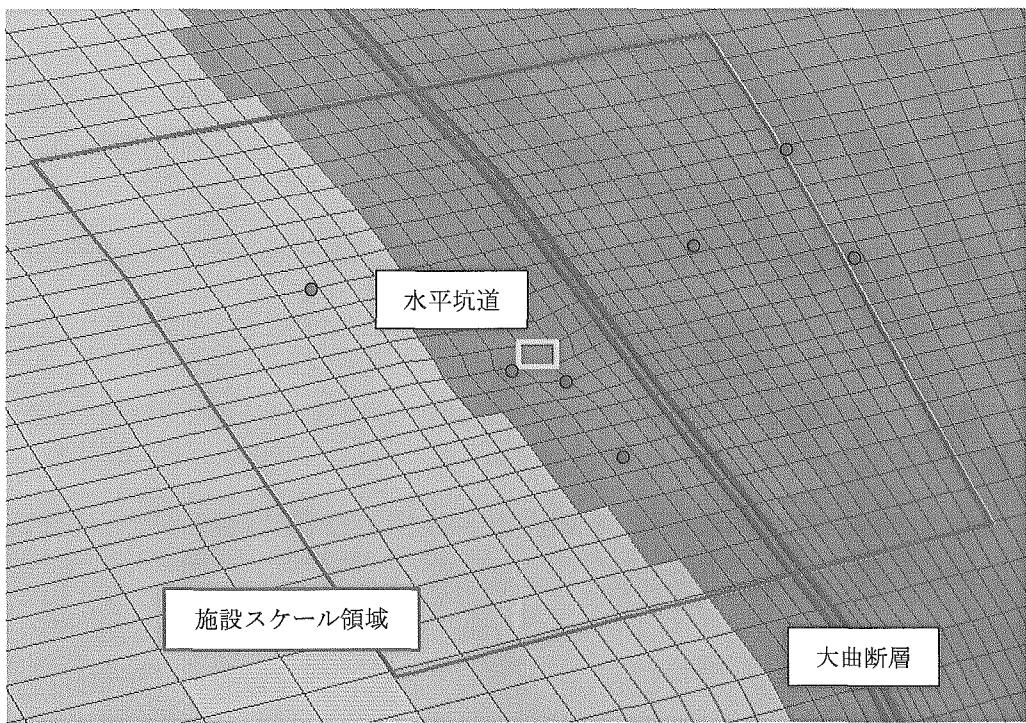
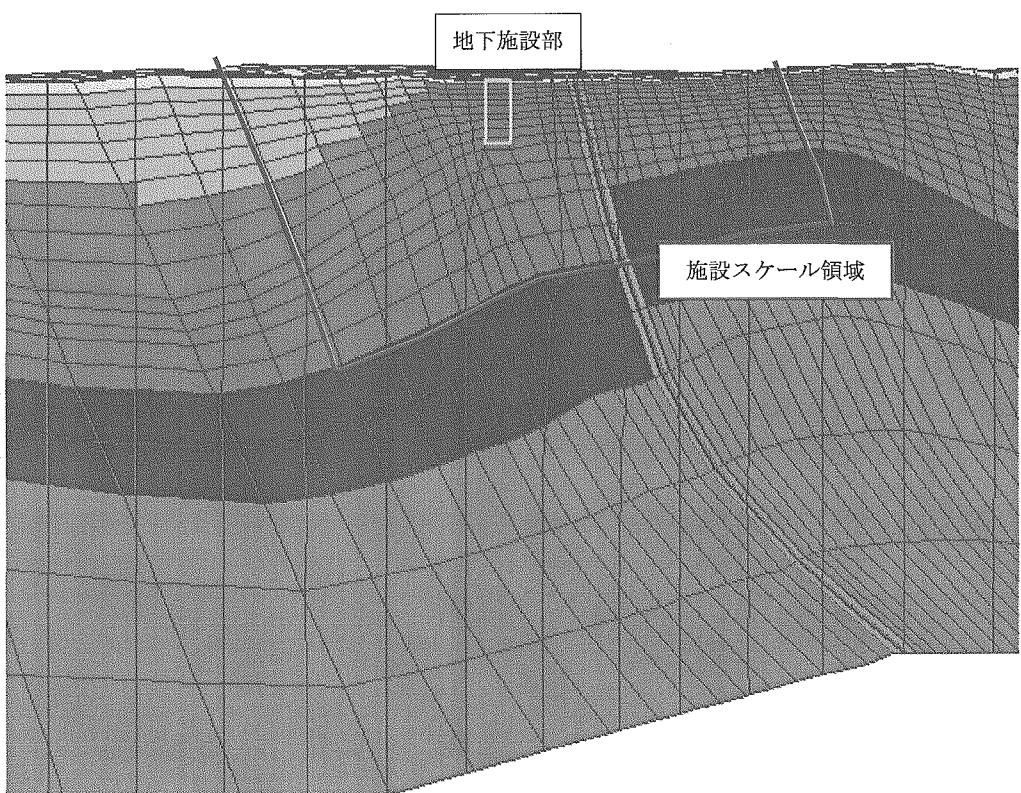


図 2.3-6 広域スケールモデルと施設スケールモデルの表層節点位

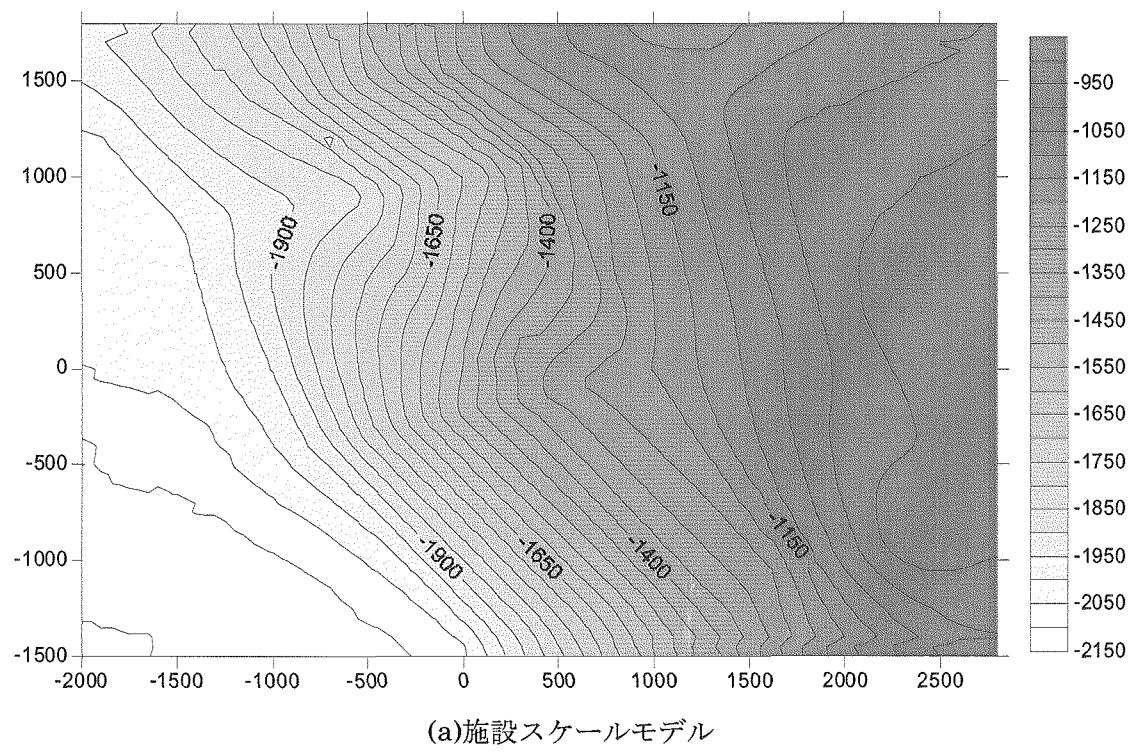


(a)平面 (図 2.1.2-7 の再掲)

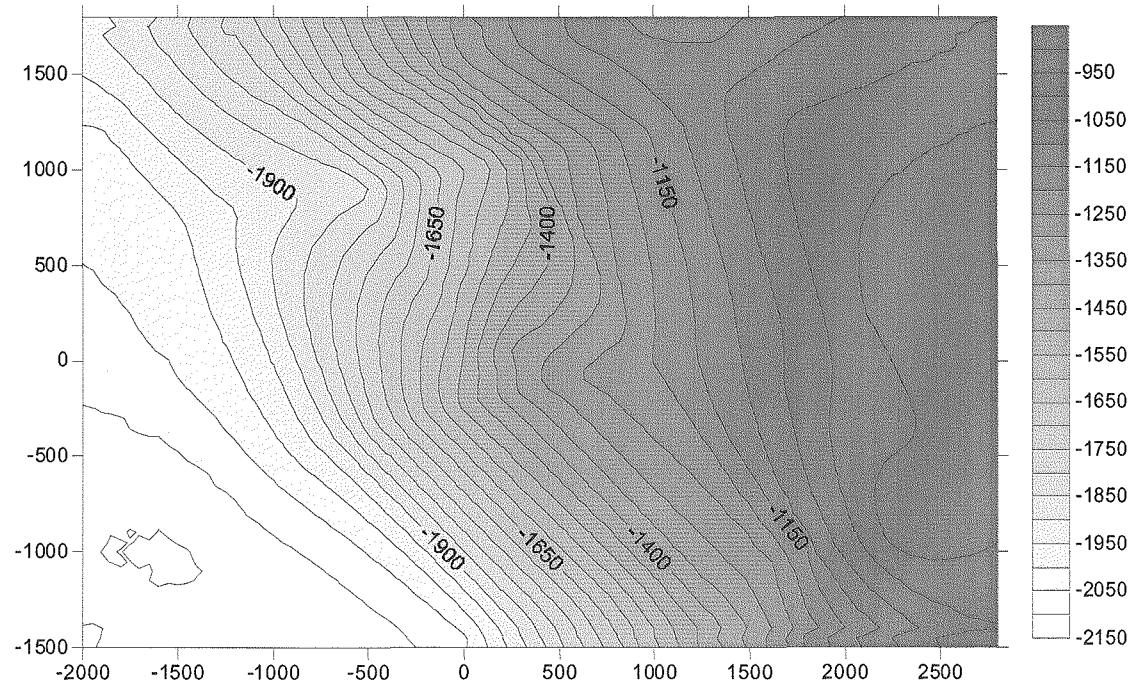


(b)鉛直断面

図 2.3-7 広域スケールモデル内の立坑周辺領域



(a)施設スケールモデル



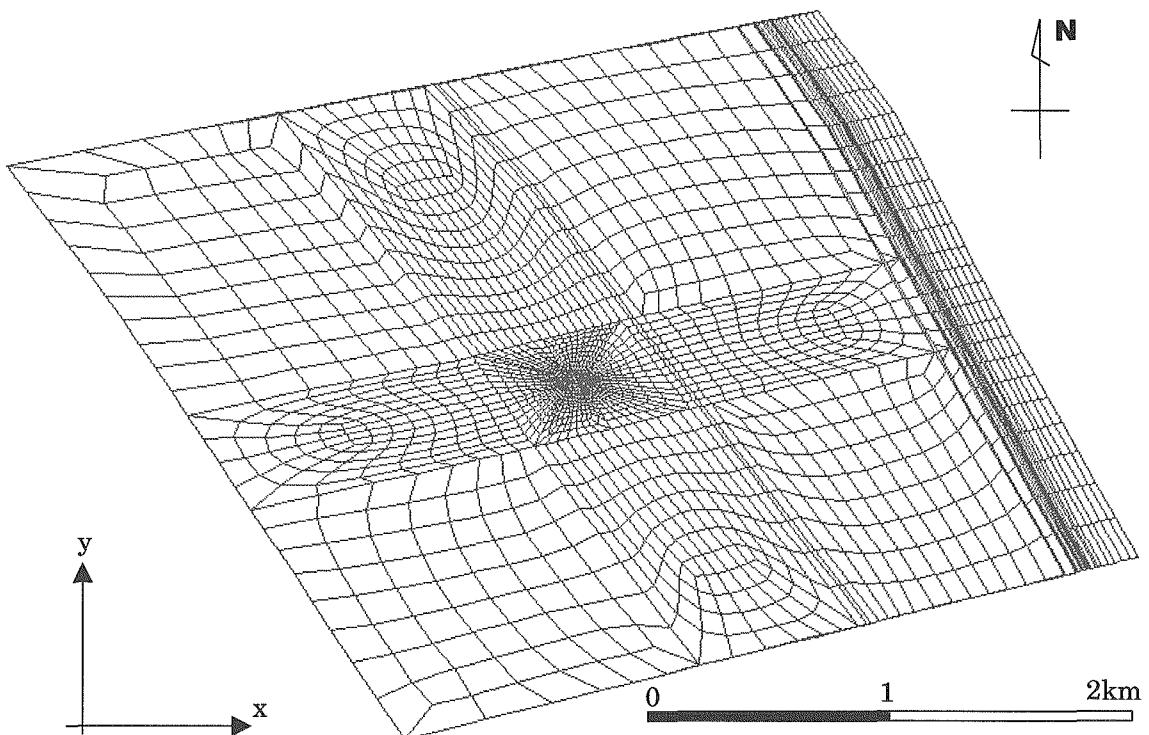
(b)広域スケールモデル

図 2.3-8 施設スケールモデル底面と広域スケールモデル該当面の標高分布

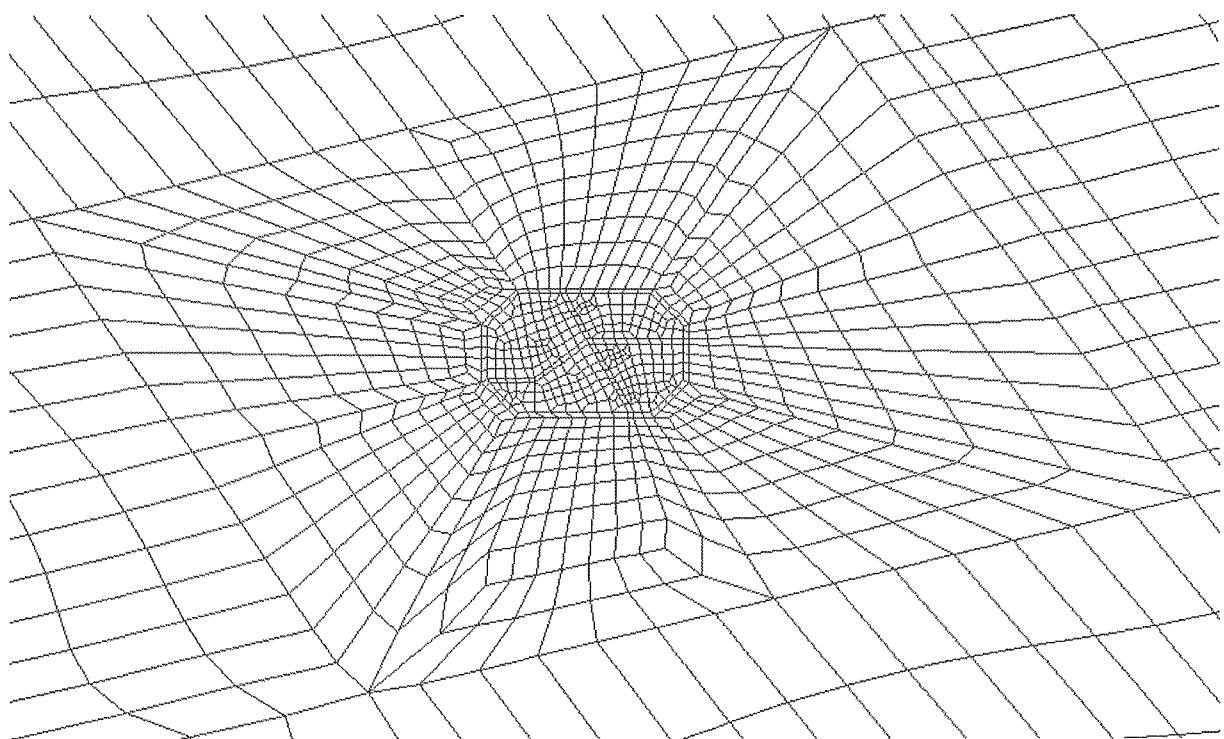
### (3) 施設スケールのモデル概要

モデル概要として、図 2.3-9 に解析モデル表層のメッシュ平面図を示す。図 2.3-10 以降には、水理地質構造モデルから抽出した地質区分を異なる視点から鳥瞰した際の形状を示す。

図 2.3-15 にはモデル表面の標高コンタ図を示す。(a)がモデル表面節点の標高値から作成した標高コンタ図、(b)がデジタル標高データからの標高コンタ図である。モデル表面の標高コンタは接点間隔が広いためやや標高分布がなだらかになっているが、ほぼ同様な地形形状や標高値を示している。また、図中に示される HDB の標高値と比較しても近い標高値を示し地表面標高の設定の妥当性が示される。

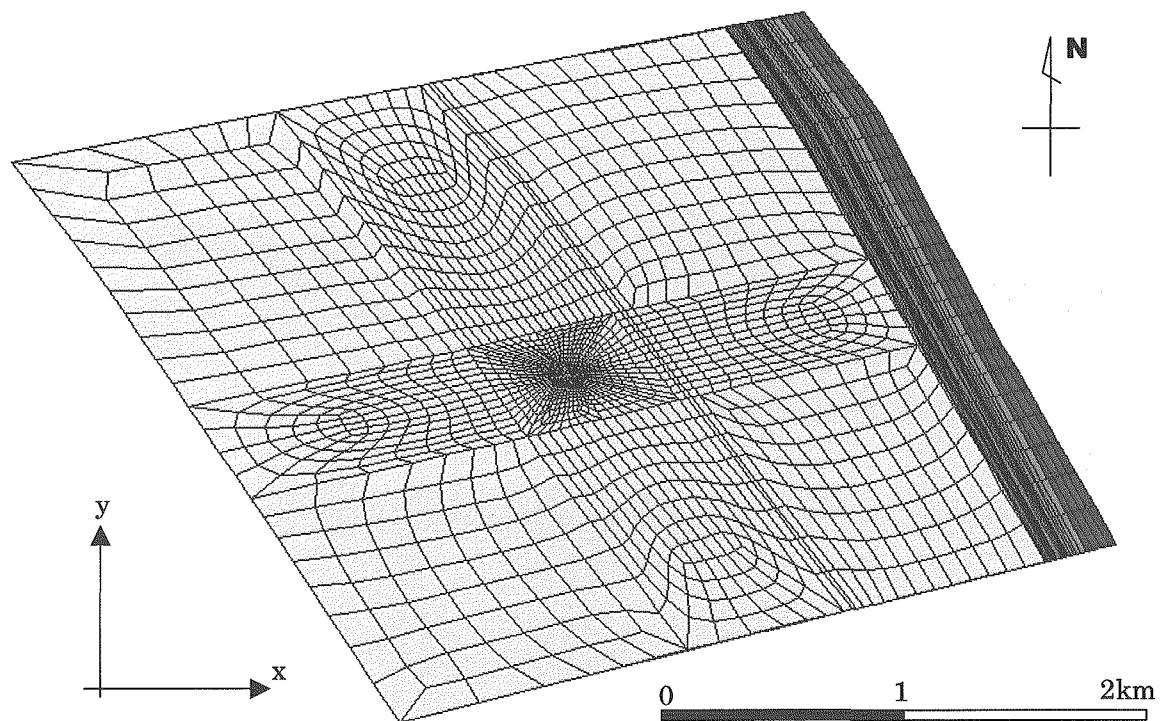


(a)全体

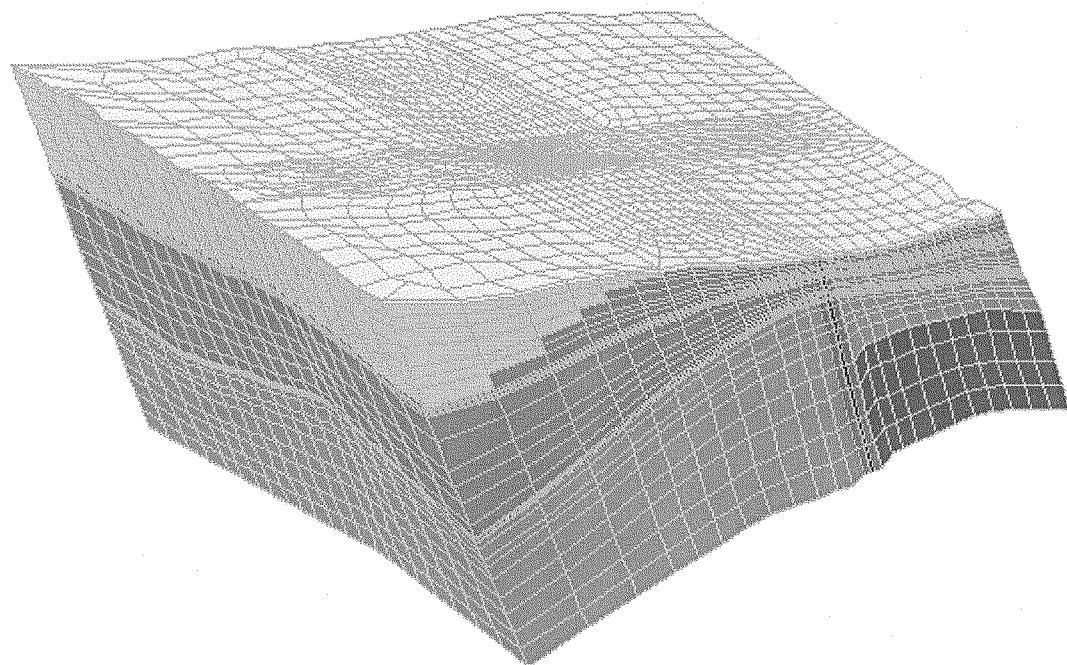


(b)拡大

図 2.3-9 解析モデル表層のメッシュ平面図

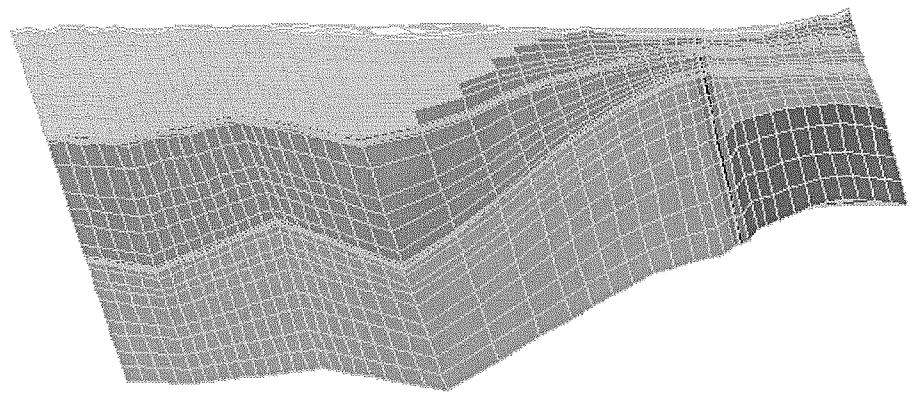


(a)真上より望む

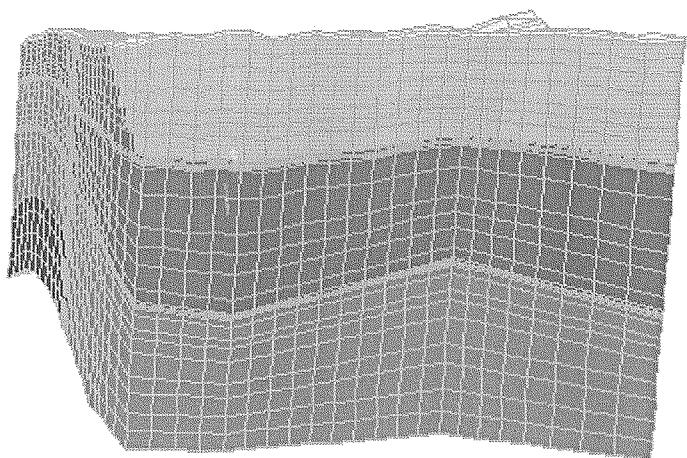


(b)南上方より望む

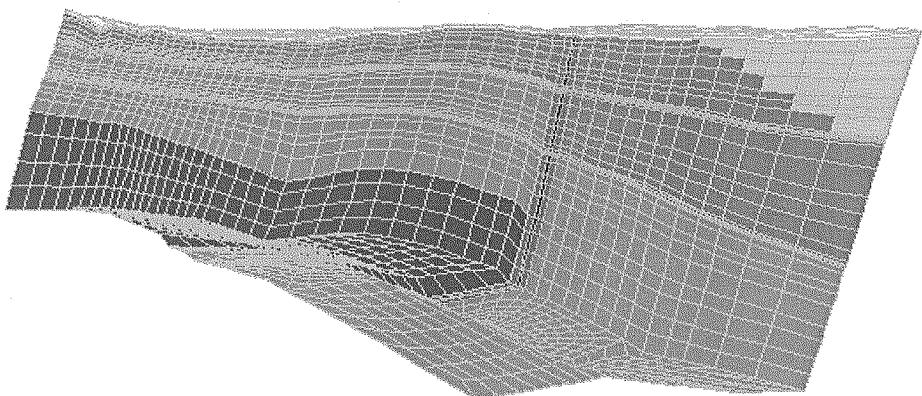
図 2.3-10 水理地質区分



(a)南より望む

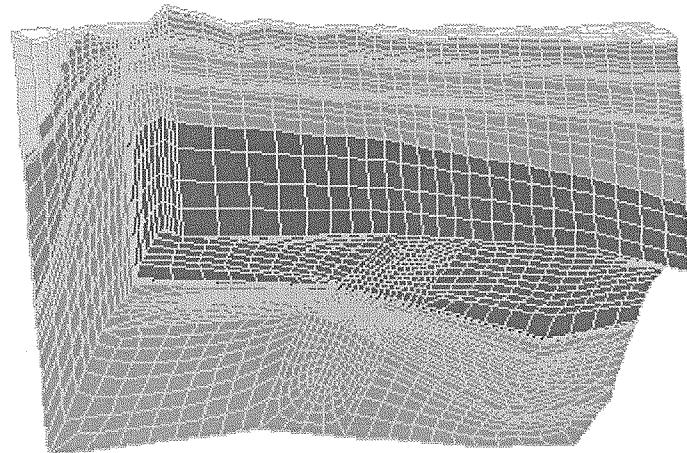


(b)西より望む

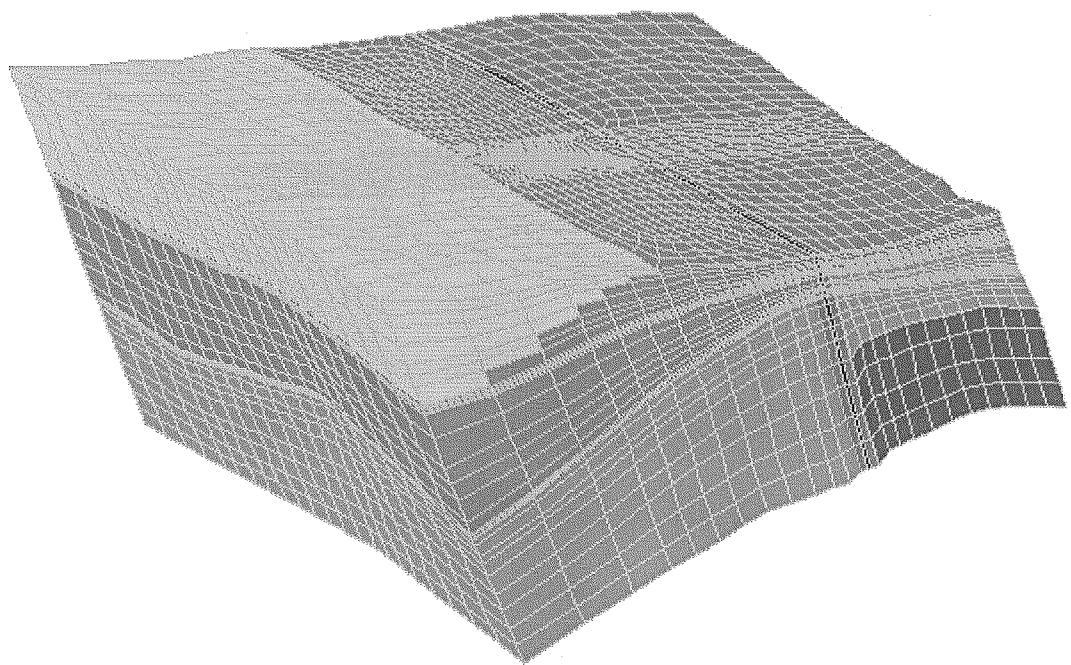


(c)北より望む

図 2.3-11 水理地質区分

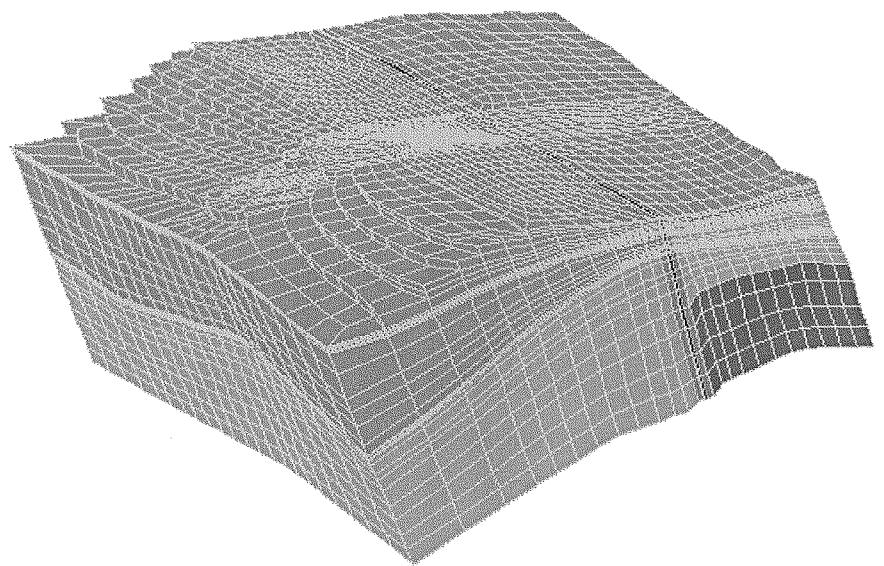


(a) 東より望む

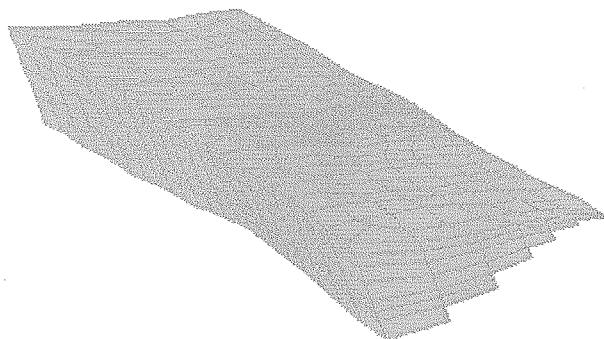


(b) 表層を剥がした状態（南上方より望む）

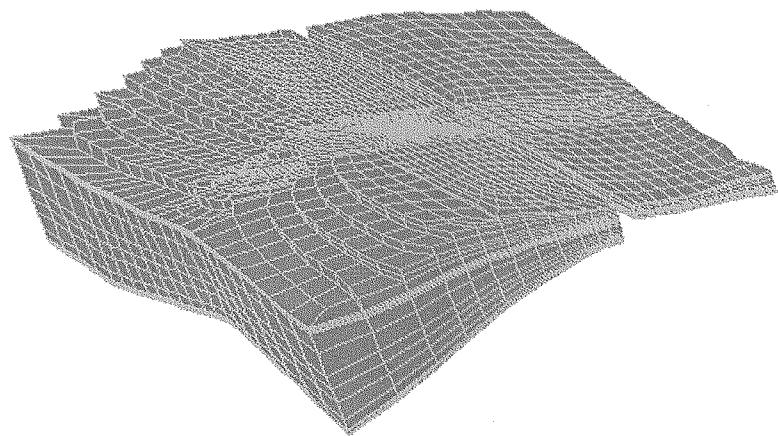
図 2.3-12 水理地質区分



(a)表層、勇知層を剥がした状態（南上方より望む）

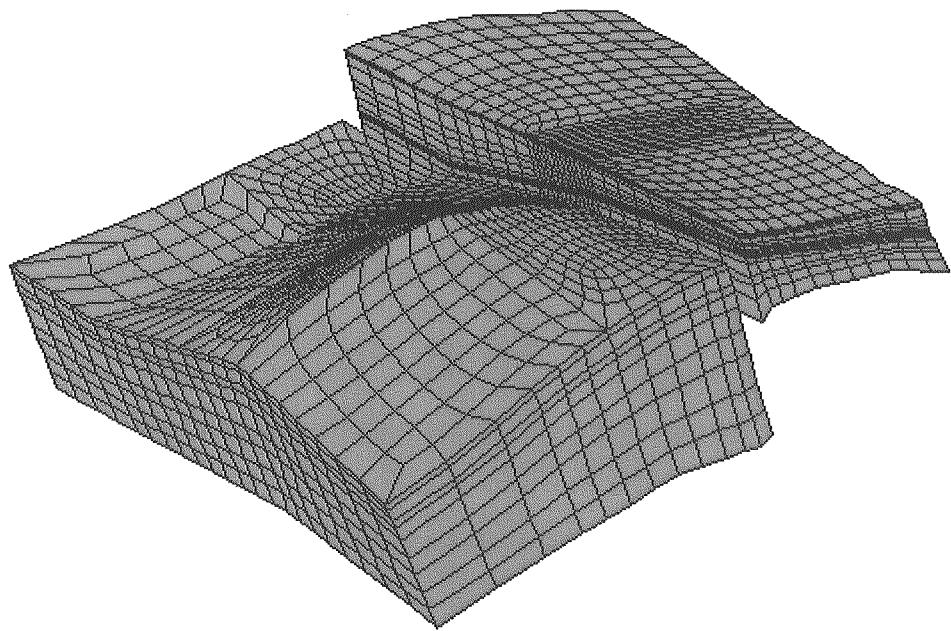


(b)声問層を抽出（南上方より望む）

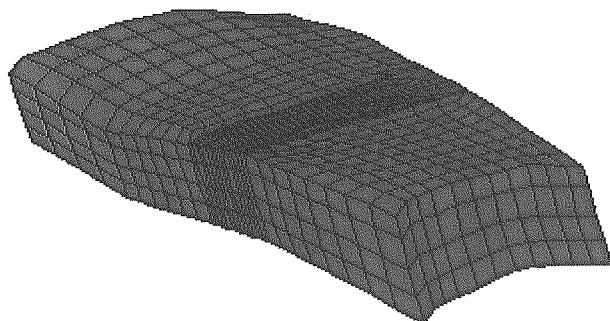


(c)声問層を抽出（南上方より望む）

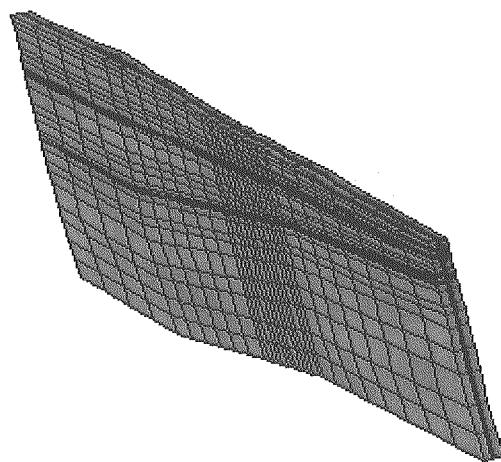
図 2.3-13 水理地質区分



(a)稚内層を抽出（南上方より望む）

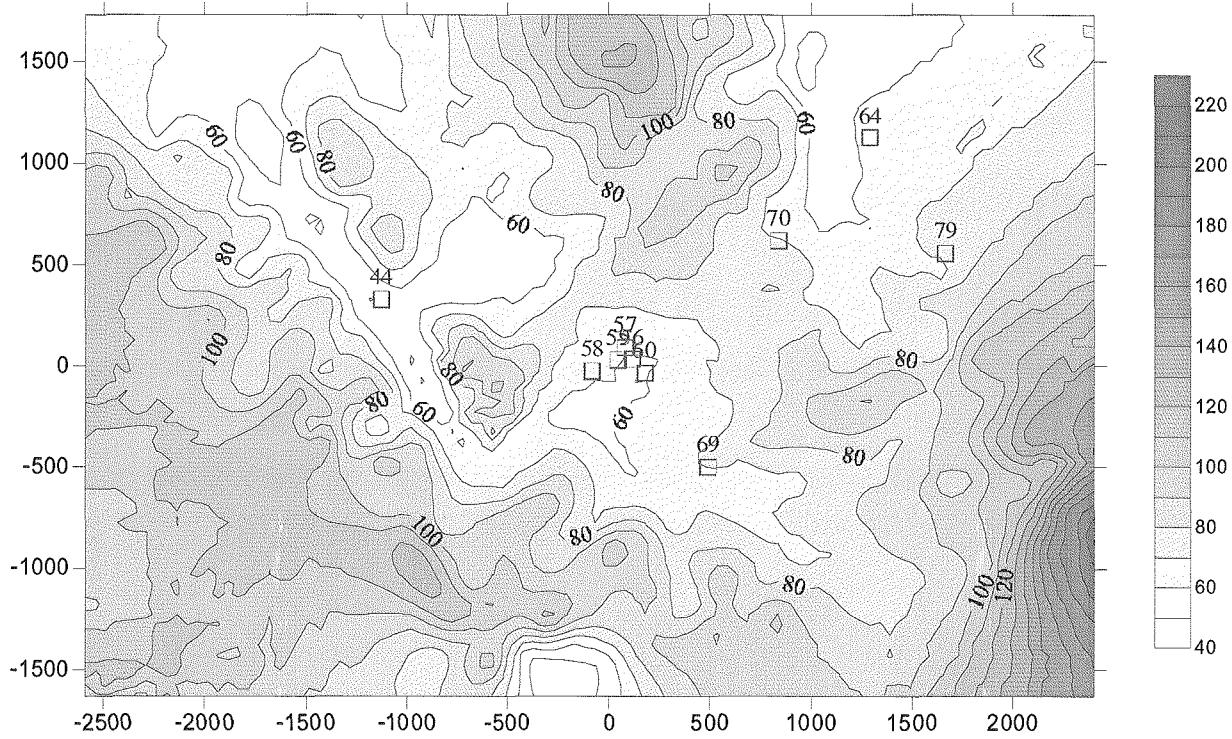


(b)稚内層を抽出（南上方より望む）

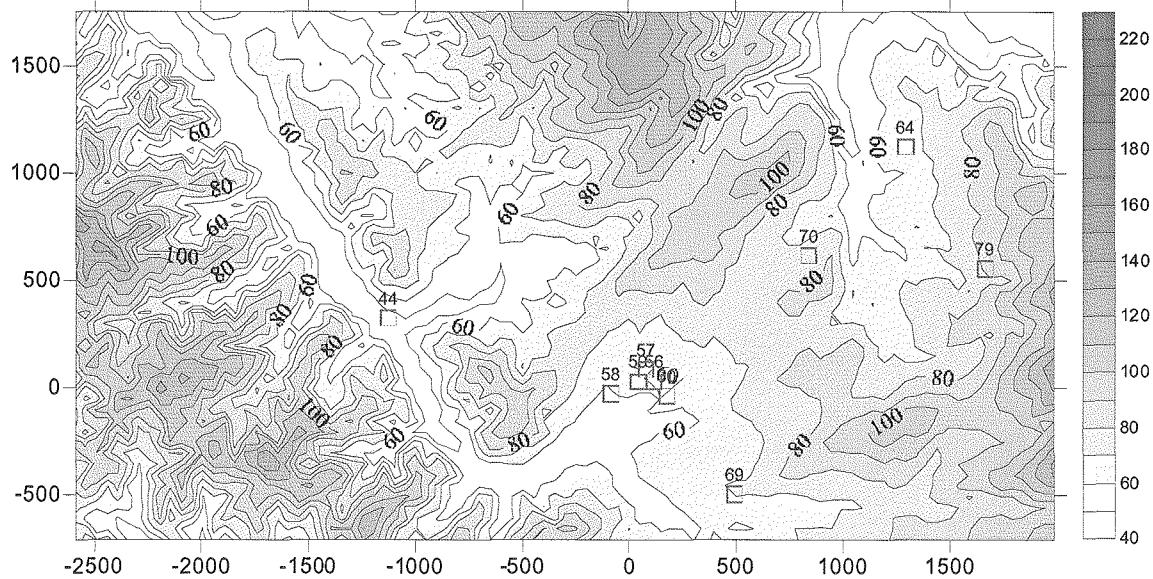


(c)大曲断層を抽出（南上方より望む）

図 2.3-14 水理地質区分



(a)施設領域スケールモデル表面から作成した標高コンタ



(b) デジタル標高データから作成した標高コンタ

図 2.3-15 モデル表面の標高分布とデジタル標高データの標高分布

### 3. これまでの調査データを用いた広域地下水流动系の評価

本章では、研究所設置地区を含む広域スケールの地下水流动系を理解するために、これまでに得られている透水係数などの水理学的なデータや塩素イオンに代表される水質調査結果に基づいた概念モデルの構築を行う。さらに、地下水流动解析結果と調査により得られている水圧や水質などを比較することで、解析の信頼性の検討および水理地質環境の説明を行う。

まず、3.1章において解析に用いる調査結果およびその知見を取り入れた概念モデルについて記述する。3.2章では解析の全体概要について述べ、3.3章では地下水流动解析モデルによる解析の内容と実測値との比較結果を、3.4章では、塩分を考慮した密度流解析の内容と実測値との比較結果について記述する。

#### 3.1 調査結果とそれに基づく概念モデルの構築

##### 3.1.1 調査結果

今回の解析領域における地下水流动場を評価する上で参考にすべき調査データとしては、HDB-1～HDB-8 の試錐孔による調査データ、地上からの物理探査結果、表層水理調査結果がある。ただし、現時点ではすべての調査データが公開されていないことから、本報告書では一部の未公開データに関しては速報値を使用した。

図 3.1-1 に HDB-1～HDB-8 の試錐孔の位置と地質柱状図を示し、図 3.1-2～図 3.1-8 に各試錐孔における物理検層等を含めた調査結果を示す。これらの調査により、地下水流动に関する下記の情報およびデータが取得されている。

- ①地質柱状図
- ②物理検層柱状図
- ③試錐孔における原位置透水試験結果
- ④岩芯の室内透水試験結果
- ⑤水理試験時の間隙水圧および長期モニタリングシステムによる間隙水圧
- ⑥地下水水質分析結果
- ⑦地上物理探査（電磁探査）比抵抗断面図
- ⑧気象データ、河川流量
- ⑨試錐孔から採取した岩芯の物理化学特性

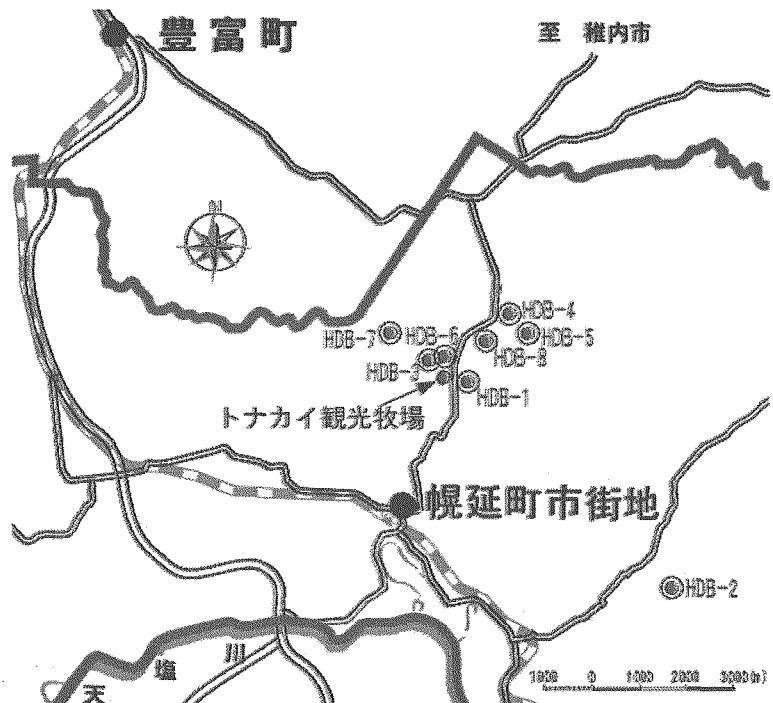


図 3.1-1 試錐調査位置図

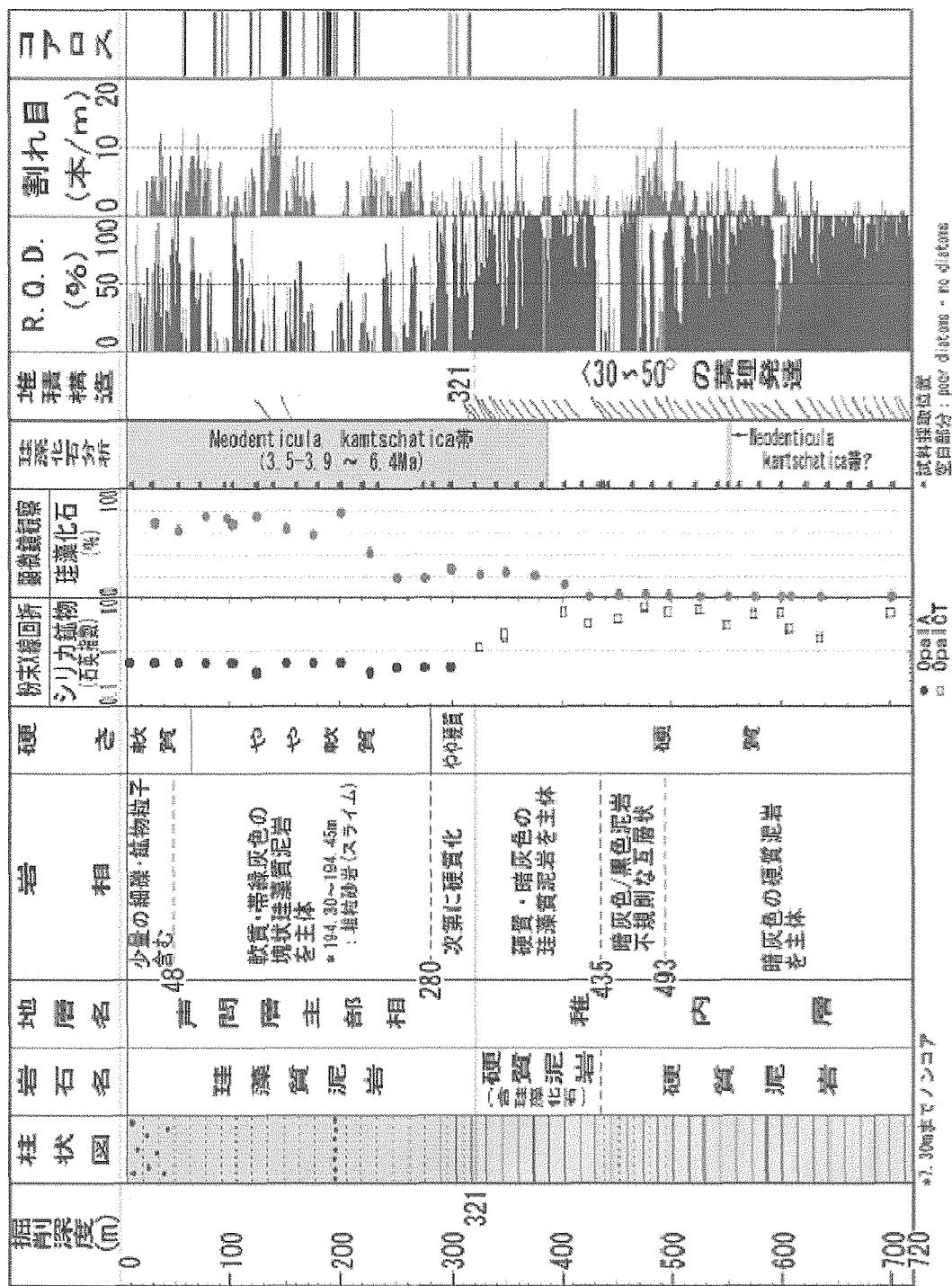


図 3.1-2 HDB-1 孔地質柱状図（核燃料サイクル開発機構、2002）

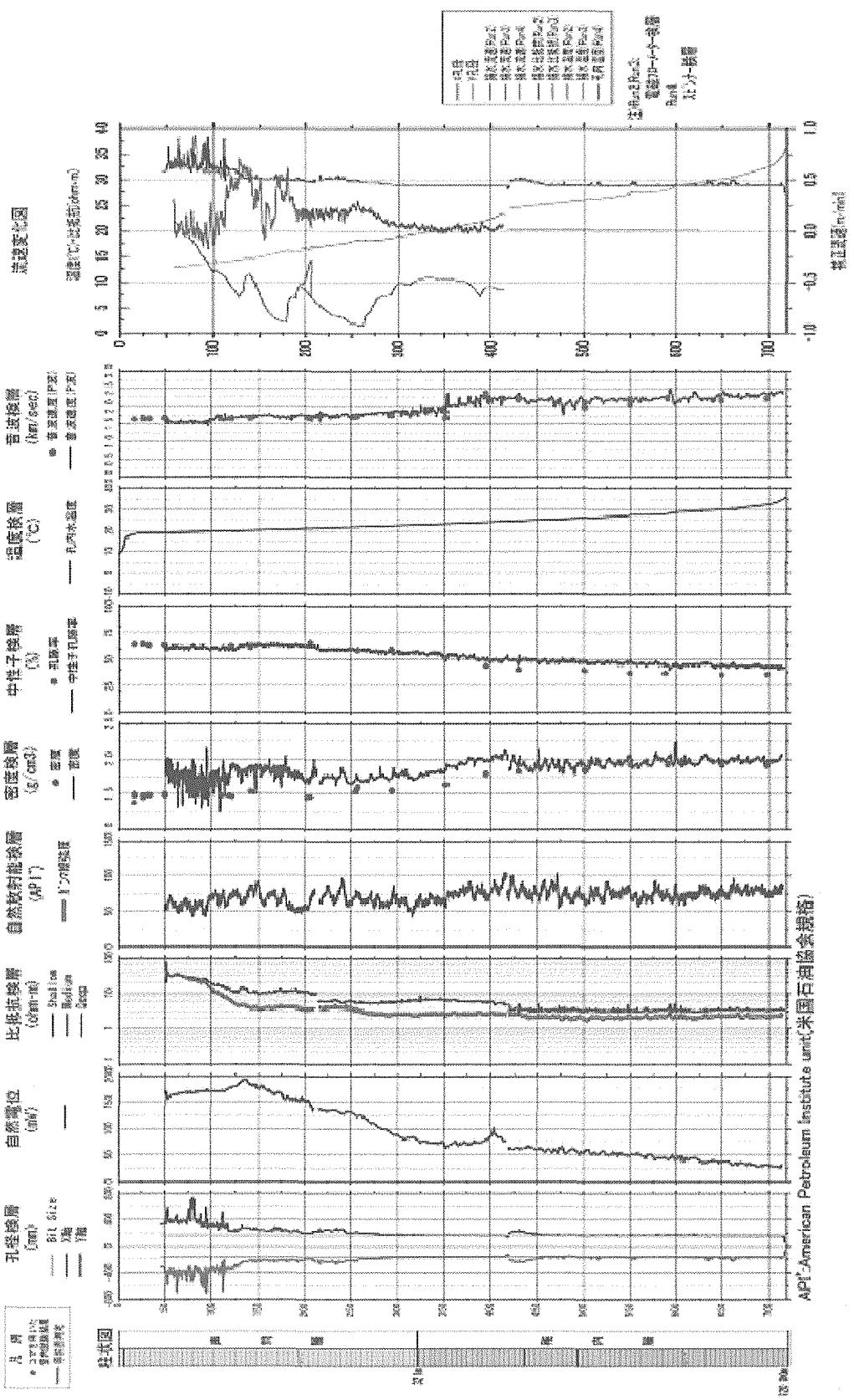


図 3.1-3 HDB-1 物理検層柱状図（核燃料サイクル開発機構、2002）

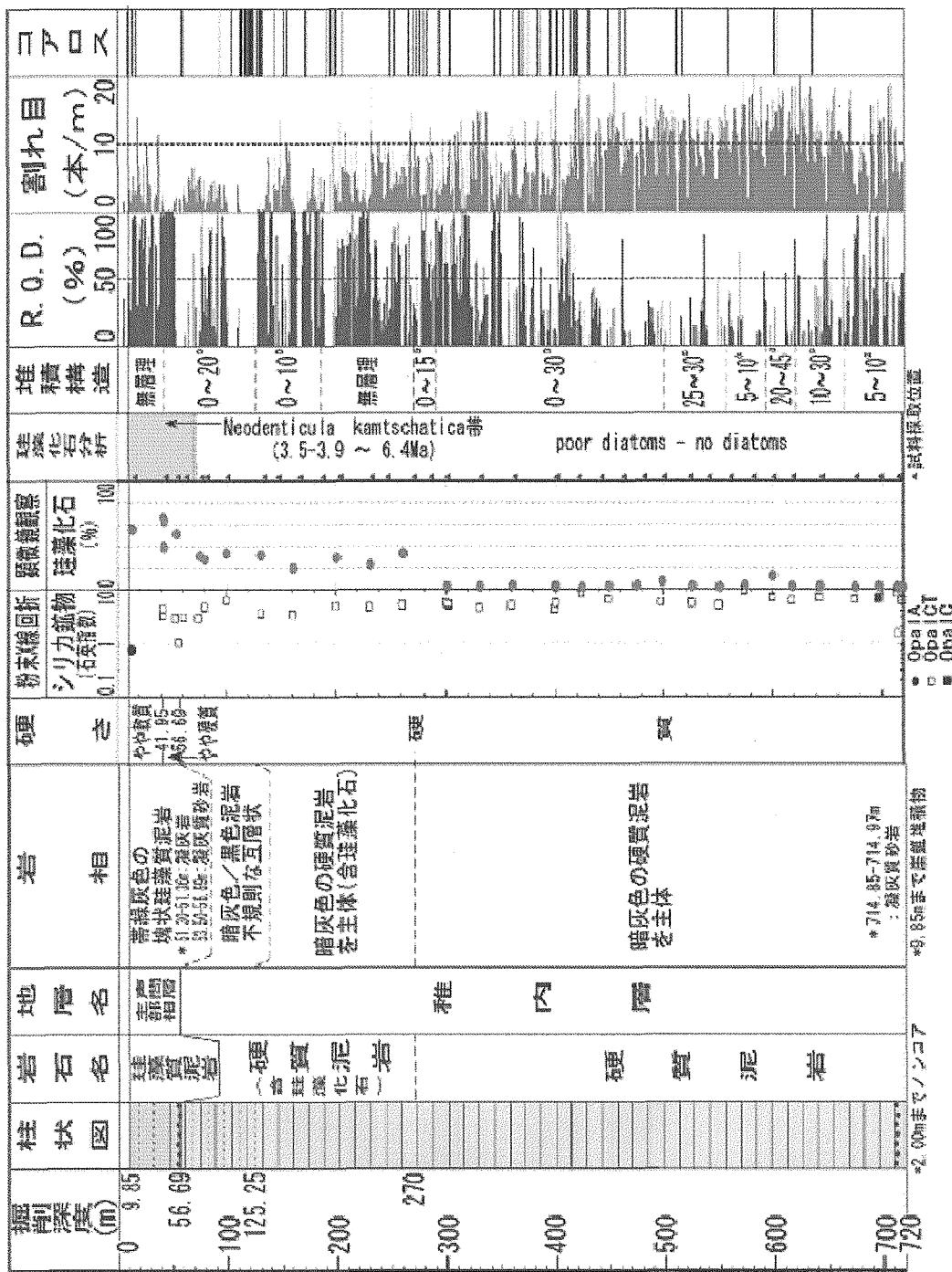


図 3.1-4 HDB-2 孔地質柱状図（核燃料サイクル開発機構, 2002）

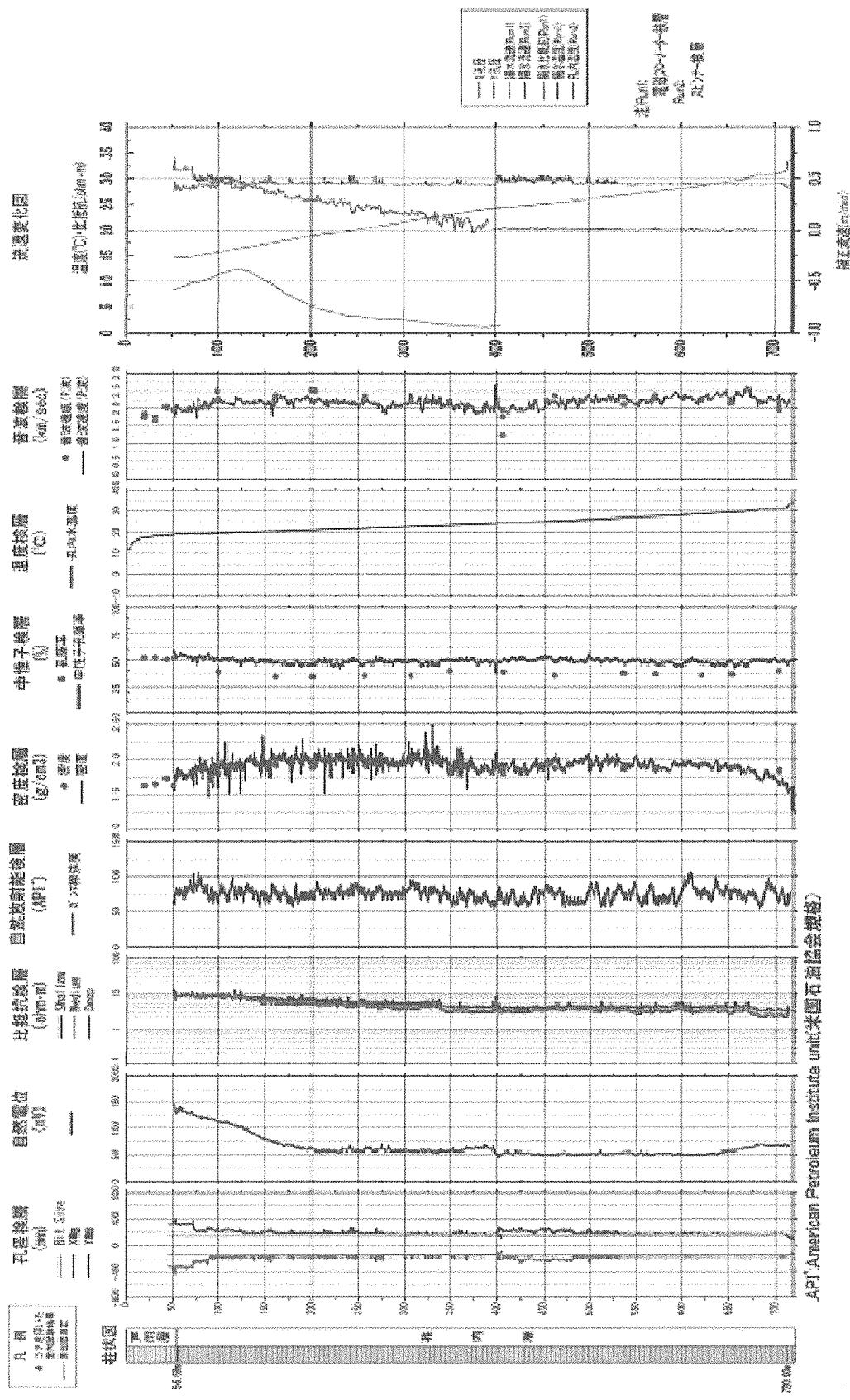


図 3.1-5 HDB-2 物理検層柱状図（核燃料サイクル開発機構、2002）

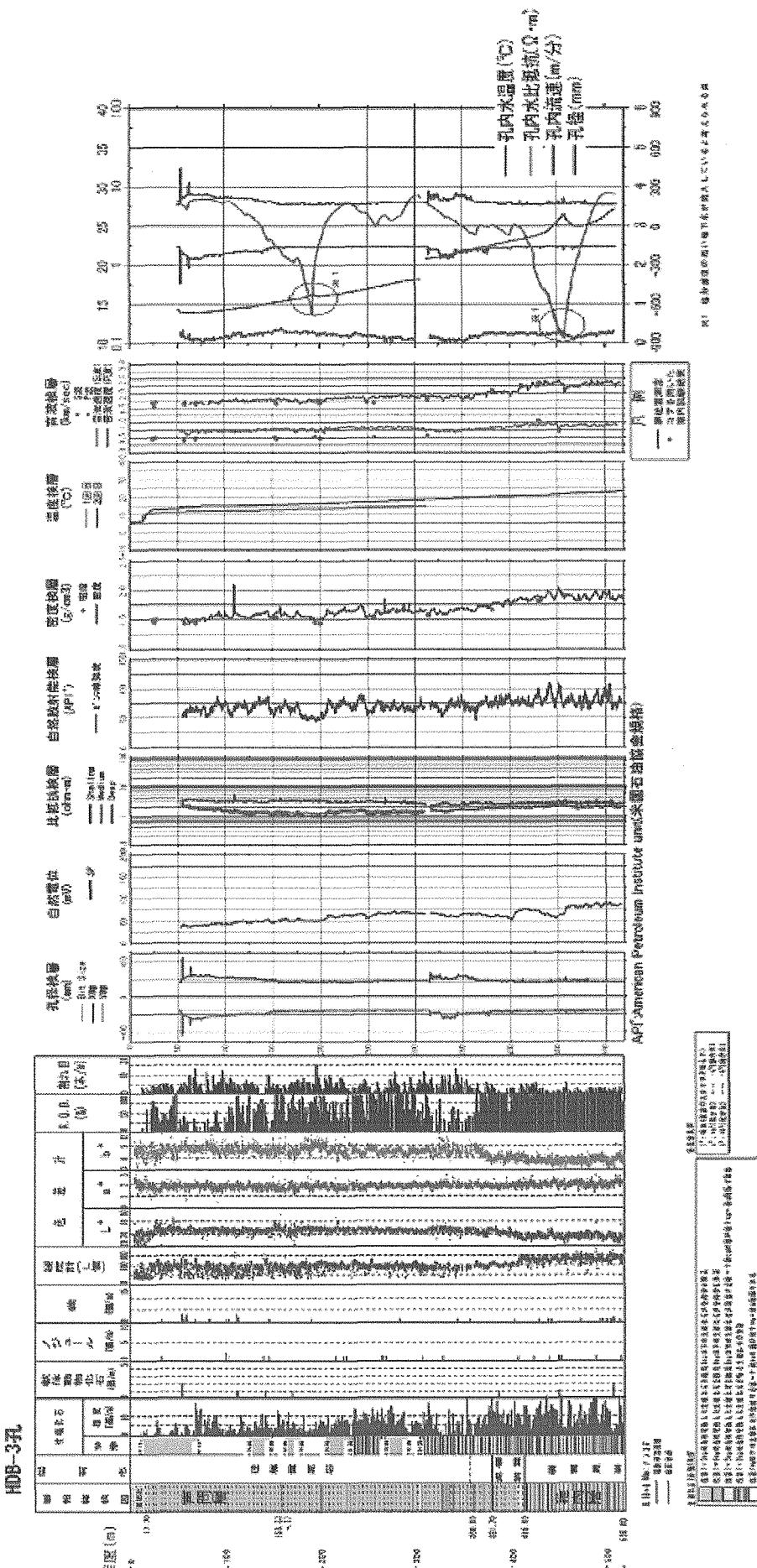


図3.1-6 HDB-3 地質柱状図と物理検層柱状図（核燃料サイクル開発機構, 2003a）

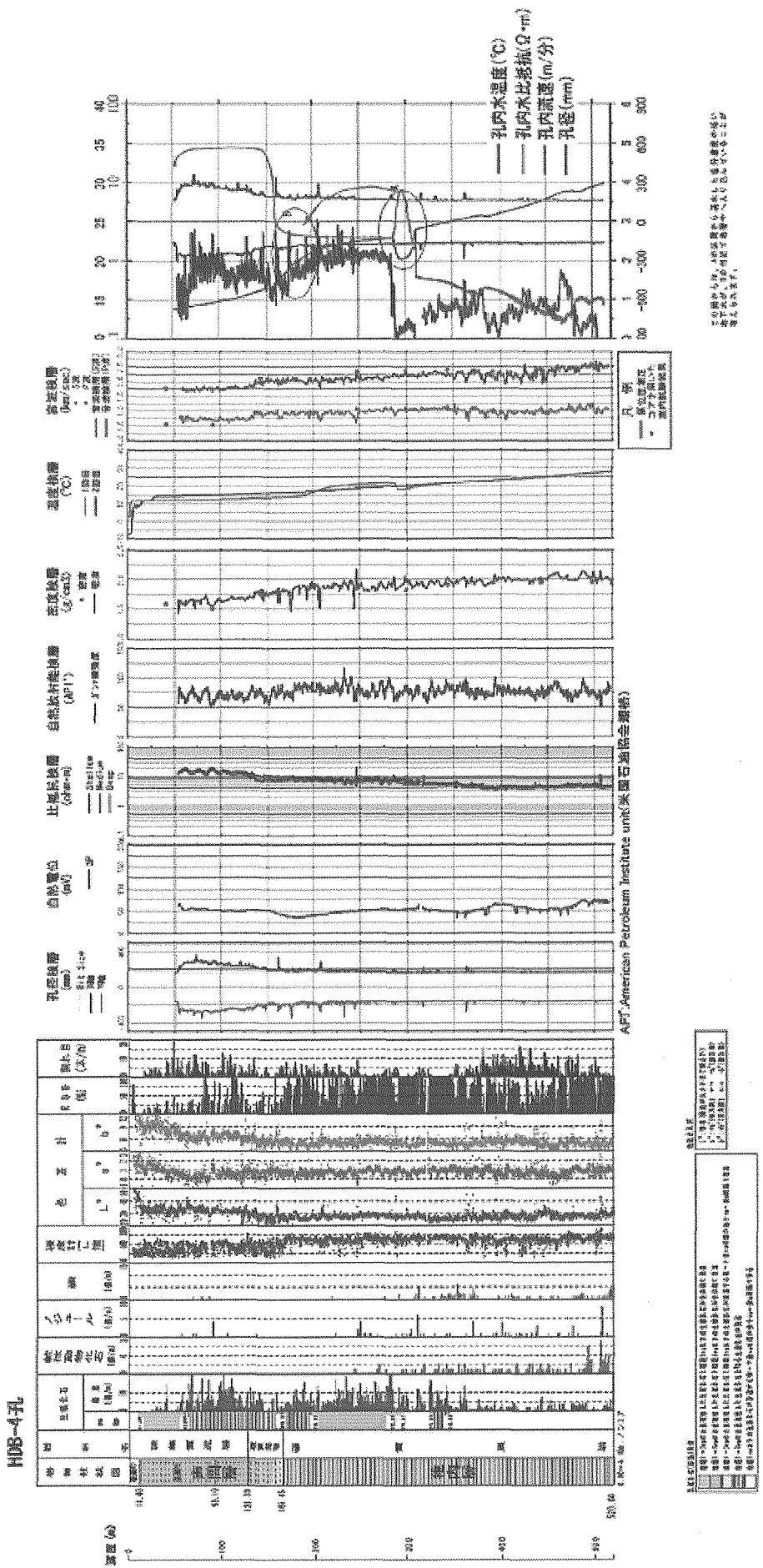


図 3.1-7 HDB-4 地質柱状図と物理検層柱状図（核燃料サイクル開発機構, 2003a)

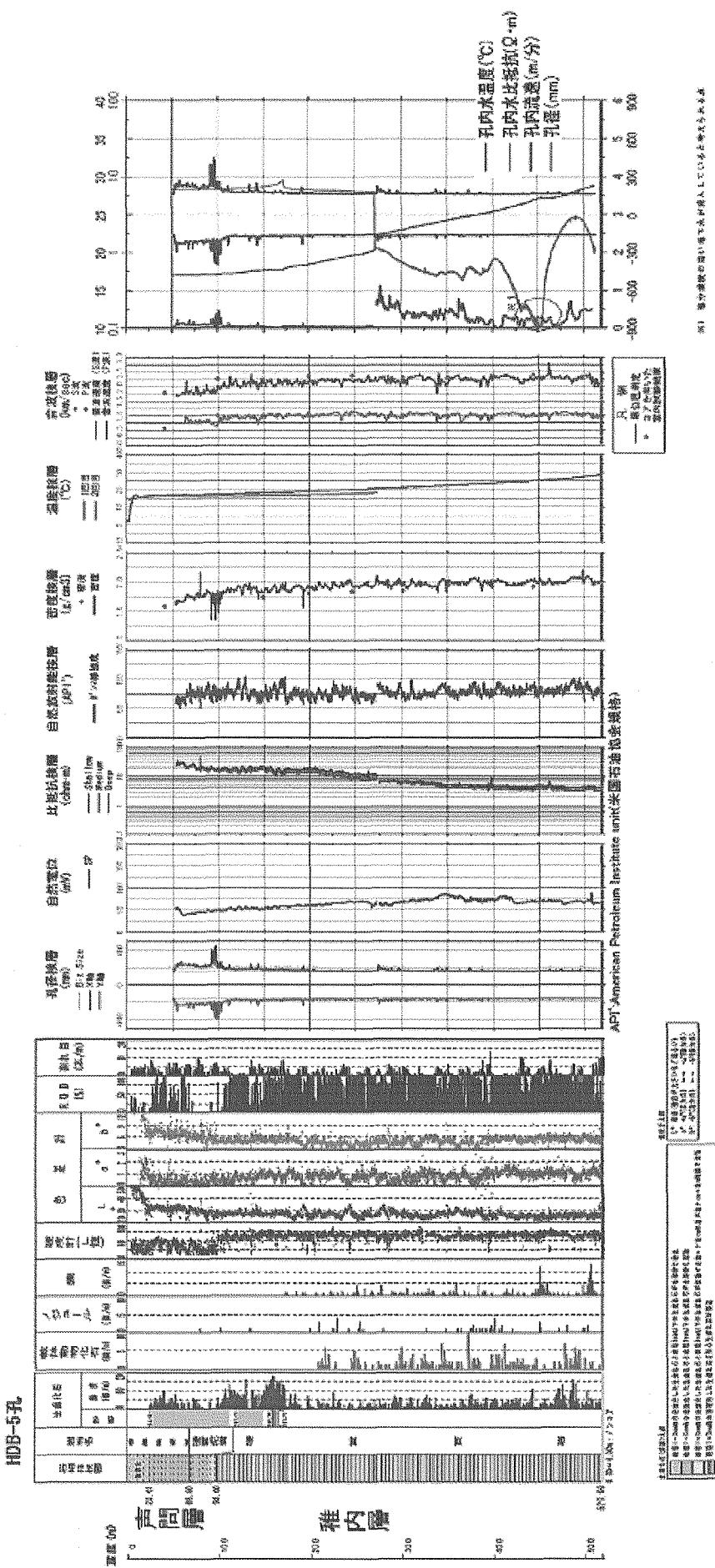


図 3.1-8 HDB-5 地質柱状図と物理検層柱状図（核燃料サイクル開発機構, 2003a）

## (1) 地質情報

図 3.1-2～図 3.1-8 に示す試錐孔による地質調査から、声問層と稚内層の境界深度および声問層の珪藻質泥岩から稚内層の硬質頁岩へは漸移的に移行すること等が確認されている。

## (2) 表層水理

地下水流动解析の重要なパラメータである涵養量を推定するには、気象データや河川流量を使った水収支を評価することが必要になる。本地域では、P-1, P-2, P-3 の 3 地点において河川流量等の測定を開始している(図 3.1-9 に各流域を示す)。図 3.1-10 に 2003 年度の調査結果を示す。今後、降水量、蒸発散量、表層水理に係わるデータを蓄積しながら涵養量の評価を含めた水収支の解析を進め、それらの結果を地下水流动の評価モデルに反映させることが必要になる。

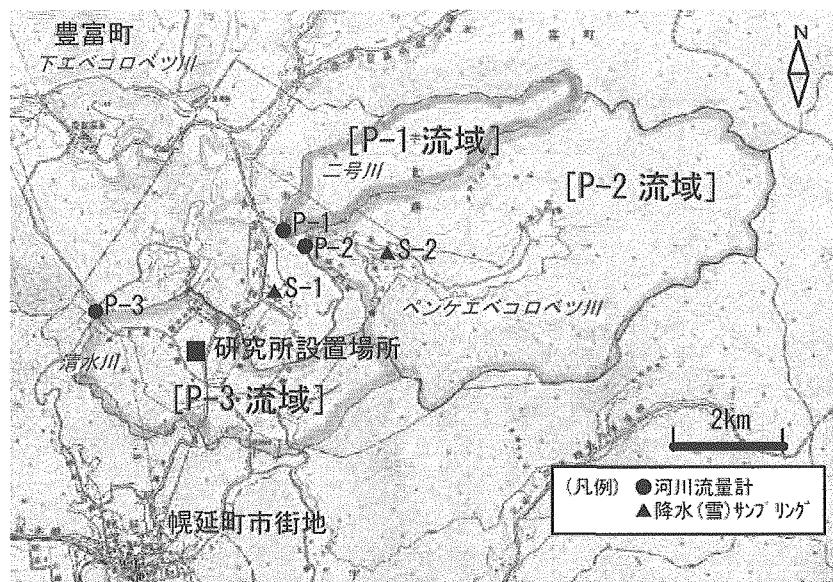


図 3.1-9 表層水理の調査流域と河川流量の測定位置 (核燃料サイクル開発機構, 2003a)

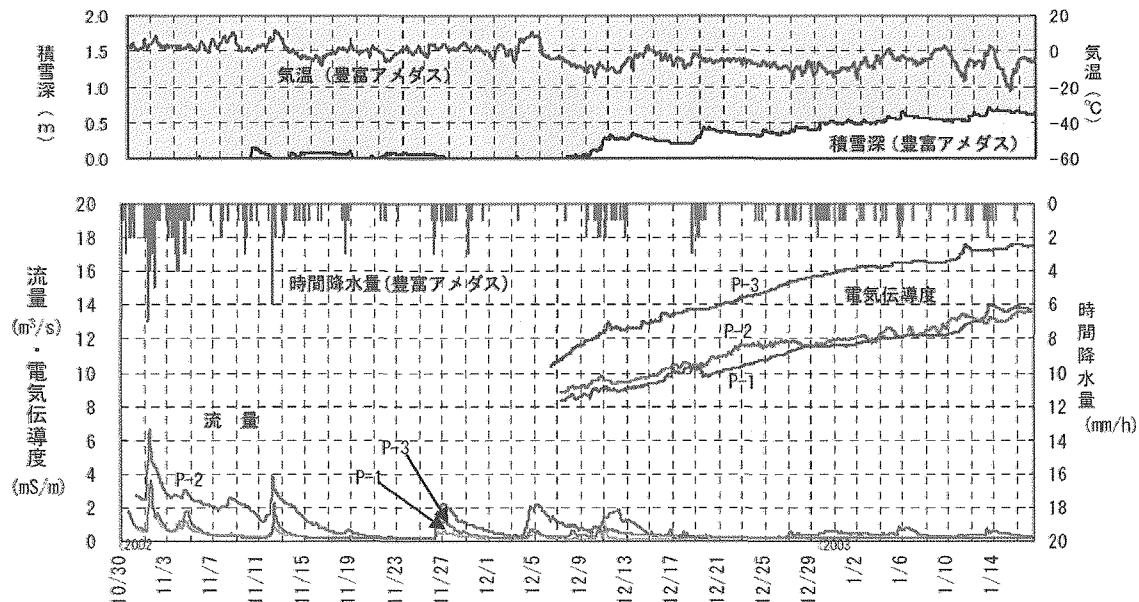


図 3.1-10 河川流量・電気伝導度・気象観測結果 (核燃料サイクル開発機構, 2003a)

### (3) 水理特性等

試錐孔における原位置透水試験結果から、透水係数として下記の値が得られている。

HDB-1 孔 :  $10^{-10} \sim 10^{-9}$ m/s オーダー (核燃料サイクル開発機構, 2002)

HDB-2 孔 :  $10^{-12} \sim 10^{-9}$ m/s オーダー (核燃料サイクル開発機構, 2002)

HDB-3 孔 :  $10^{-9} \sim 10^{-8}$ m/s オーダー (核燃料サイクル開発機構, 2003a)

HDB-4 孔 :  $10^{-8} \sim 10^{-5}$ m/s オーダー (核燃料サイクル開発機構, 2003a)

HDB-5 孔 :  $10^{-8} \sim 10^{-6}$ m/s オーダー (核燃料サイクル開発機構, 2003a)

原位置透水試験および室内透水試験による透水試験結果と深度との関係を対象地層毎に整理した結果（速報値）を図 3.1-11 に示す。これより、勇知層、声問層、稚内層とも透水係数には深度依存性が認められ、深部ほど透水係数が小さくなる傾向があることがわかる。声問層は健岩部にも割れ目帯にも際立った低透水性部や高透水性部は存在しない岩盤であるが、稚内層は健岩部からなる低透水性部と割れ目帯からなる高透水性部が存在する岩盤であるといえる。

なお、HDB-1 孔のみのデータではあるが、表 3.1-1 に示すような岩芯の物理化学特性試験結果から、深度が増すに伴い稚内層の微細構造がより緻密になる様子が観察されること、核種拡散移行問題や透水問題などを取り扱う場合は、微細構造の有無や程度を考慮する必要があることが報告されている（佐藤, 2003）。

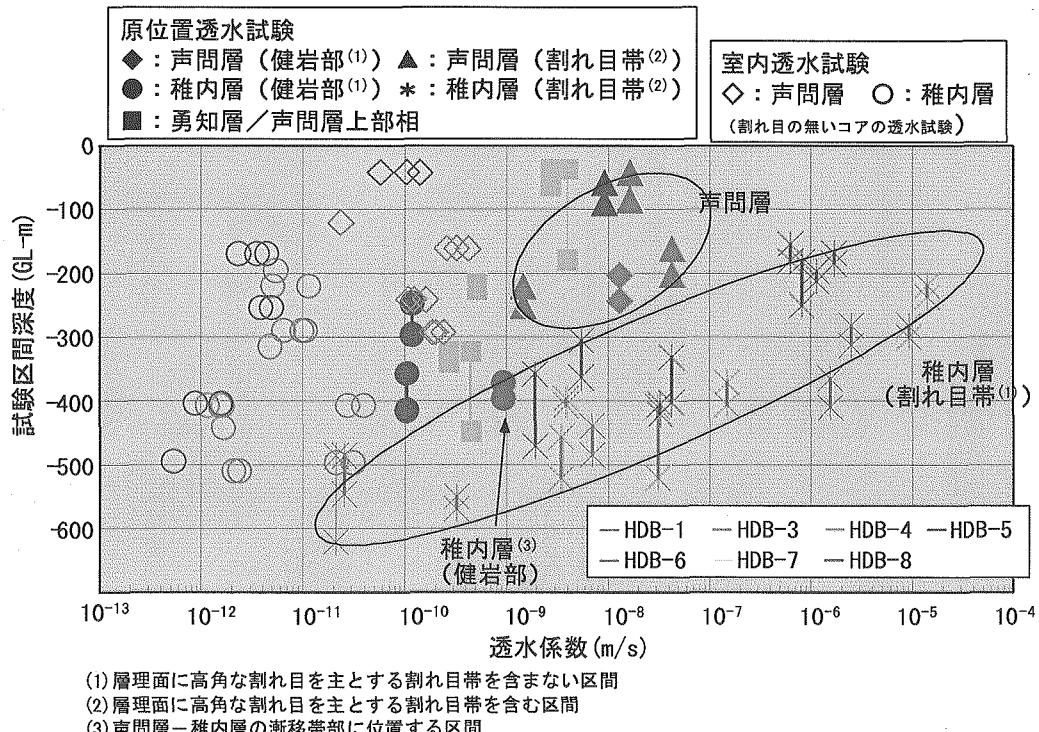


図 3.1-11 試錐孔における水理試験結果および室内透水試験結果（速報値）

表 3.1-1 HDB-1 孔で採取した岩芯の物理化学特性（佐藤（2003）から抜粋）

	声間層部	稚内層部
乾燥嵩密度	0.9～1.0 Mg/m <sup>3</sup> 程度	1.4～1.7 Mg/m <sup>3</sup> 程度
間隙率	60%程度	35～45% 深度の増加に伴って減少
真密度	2.4 Mg/m <sup>3</sup>	2.5 Mg/m <sup>3</sup>
細孔内比表面積	21～26 m <sup>2</sup> /g	50～80 m <sup>2</sup> /g
平均細孔径	90 nm	13 nm
交換性陽イオンの総和	10～35 meq/100g 深度の増加に伴い増加	30～40 meq/100g とほぼ一定 (クニゲル V1 の交換性陽イオンは 52.4 meq/100g。稚内層部は陽イオンの保持能力が潜在的に高い。)

#### (4) ポテンシャル分布

図 3.1-12 は、水理試験時に測定された間隙水圧およびMPシステムによる間隙水圧の測定結果（速報値）をポテンシャルとして測定地点の標高に対してプロットしたものである。HDB-1 孔と HDB-5 孔を除けば深部ほどポテンシャルが高い傾向が見られ、これらの試錐孔の近傍では深部からの地表面に向かう地下水流れが示唆される。

HDB-5 孔のポテンシャルは他の試錐孔よりも高く、深部ほどポテンシャルが低くなる傾向にある。HDB-5 孔は最も山側に位置する試錐孔であり、高い標高位置で涵養された地下水が HDB-5 孔付近では海側に向かって流動していることが示唆される。

HDB-1 孔では、標高-600m 付近でポテンシャルが低い箇所が確認されている。ただし、この深度は健岩部であり、計測の問題または掘削時の人工的な搅乱が残留している可能性がある。

今後、長期の水圧データを蓄積した上で、地質構造、透水性分布、水質分布、地下水中のガスによる影響等を考慮しながらこれらのポテンシャル分布を評価することが重要である。

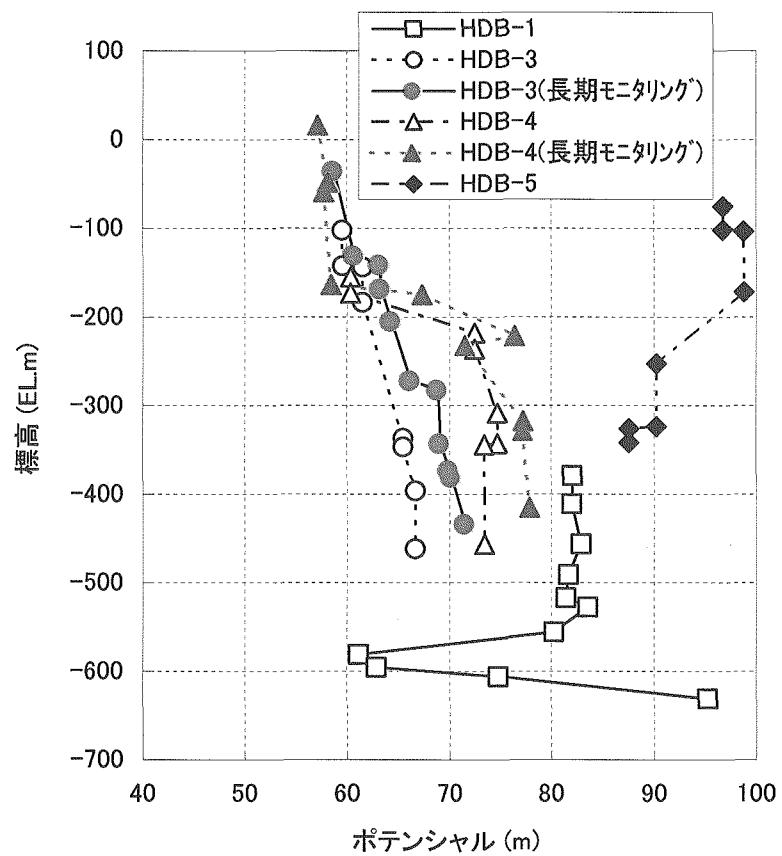


図 3.1-12(1) 試錐孔における水圧測定結果

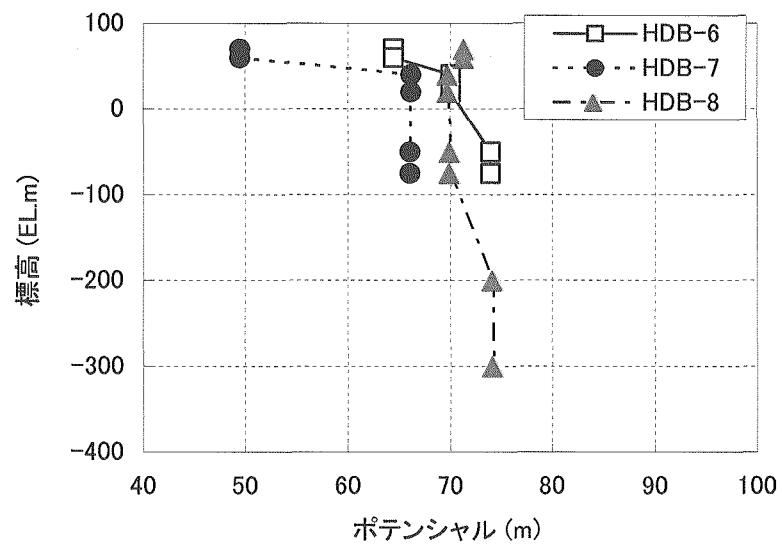


図 3.1-12(2) 試錐孔における水圧測定結果（速報値）

## (5) 地球化学特性

### ①イオン濃度

HDB-3, HDB-4, HDB-5 孔から採取した地層水および岩芯から抽出した間隙水の水質分析結果（國丸ほか, 2003; 核燃料サイクル開発機構, 2003b）を図 3.1-13 に示す。また, HDB-1, HDB-3, HDB-4, HDB-5 孔の Cl 濃度を海水中の Cl 濃度 (19g/l) で正規化した値（以下、塩分濃度と呼ぶ）の深度分布を図 3.1-14 に示す。これより得られる知見を以下に示す。

- HDB-1 孔では EL-400m まで塩分濃度が徐々に増加し, EL-400m より深部では塩分濃度 0.5 程度でほぼ一定となる傾向が見られる。
- HDB-3 孔では EL-100m まで濃度が増加し, EL-100m より深部では塩分濃度 0.6 程度でほぼ一定となる傾向が見られる。
- HDB-4 孔では EL-200m から濃度が増加し, EL-400m より深部では塩分濃度 0.25 程度で濃度増加の収束傾向が見られる。
- HDB-5 孔では EL-150m から濃度が増加し, EL-400m より深部では塩分濃度 0.25 程度で濃度増加の収束傾向が見られる。
- HDB-4 孔と HDB-5 孔の深度方向の水質分布は全体的としては類似している。しかし、深度 500m においても塩素イオン濃度は HDB-3 孔の 1/2 以下であり, HDB-3 孔と HDB-4, HDB-5 孔とは地球化学特性が異なる。

上記傾向から、4 孔を通じると EL-100m, EL-200m, EL-400m で塩分濃度分布傾向が区分される。各深度における塩分濃度の平面分布をクリギングにより推定した結果を図 3.1-15 に示す。

これらの深度方向および平面的な水質分布の変化は、地表水の侵入による影響が大きいと考えられる。ただし、佐藤（2003）は、深度方向の珪藻の種類の変化から、声問層の上部に当たる部分（深度 47.28m 以浅）では比較的陸域に近い浅海域で堆積し、声問層部の主相部に相当する部分（深度 193.92m 以深）ではより海洋域で堆積したと考えられることを指摘している。したがって、このような堆積環境が水質組成に影響を及ぼしていることも否定できない。

現状では、限られた数の調査結果から塩分濃度分布をクリギング等により推定せざるを得ない。塩分濃度分布をより正確に推定するためには、地質形成プロセスも反映させた塩分濃度に着目した解析などを実施して、この解析結果と現時点での調査結果を合わせて評価し、現時点での塩分濃度分布の評価に反映させていく必要性があると考えられる。

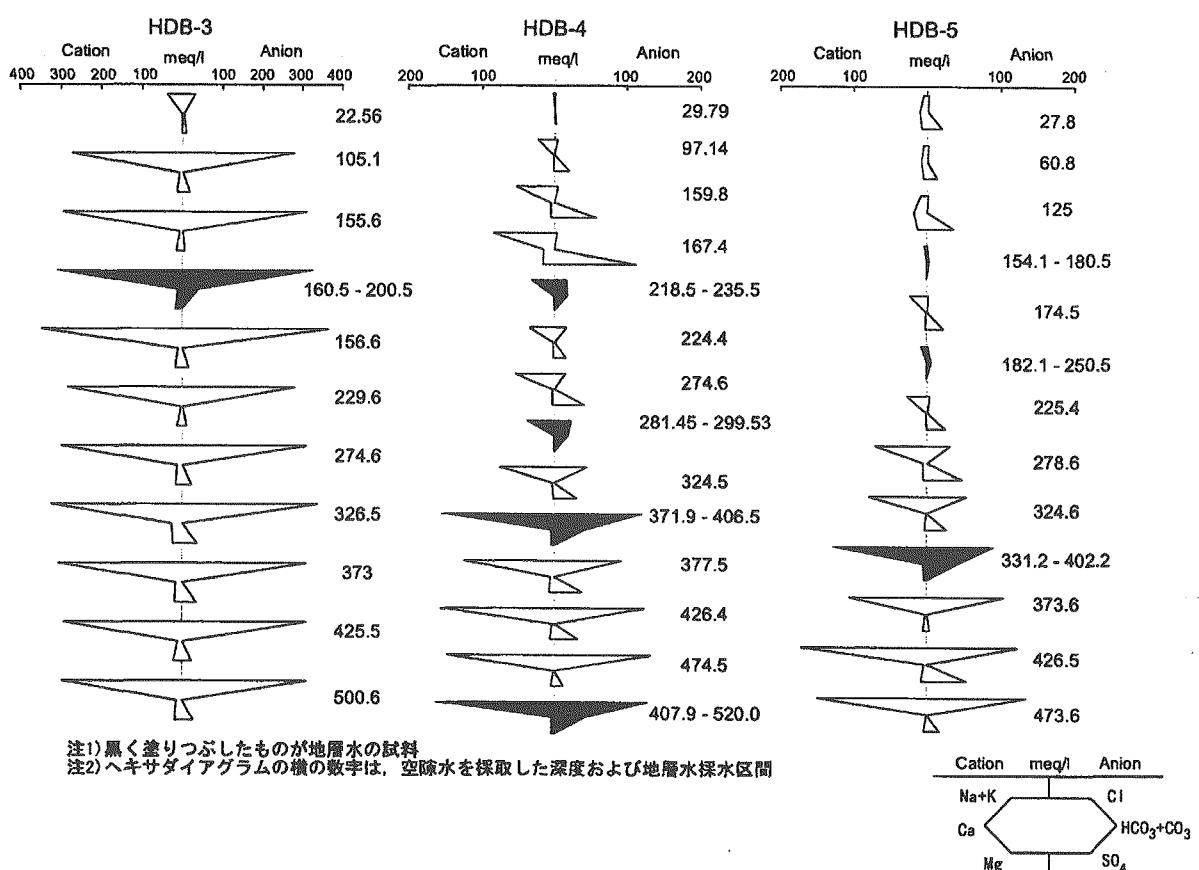


図 3.1-13 地層水および間隙水の化学分析結果（核燃料サイクル開発機構, 2003b）

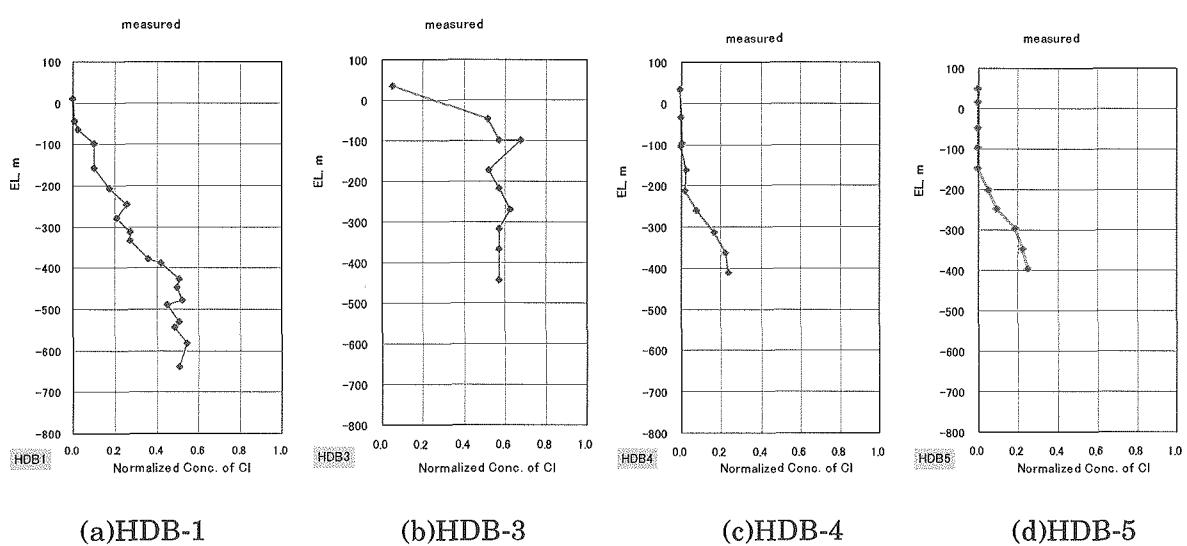
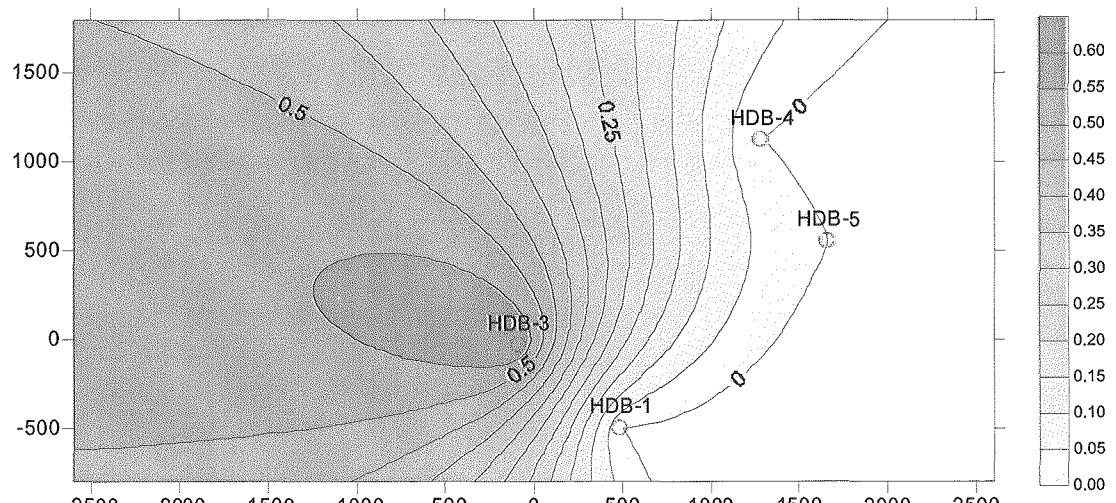
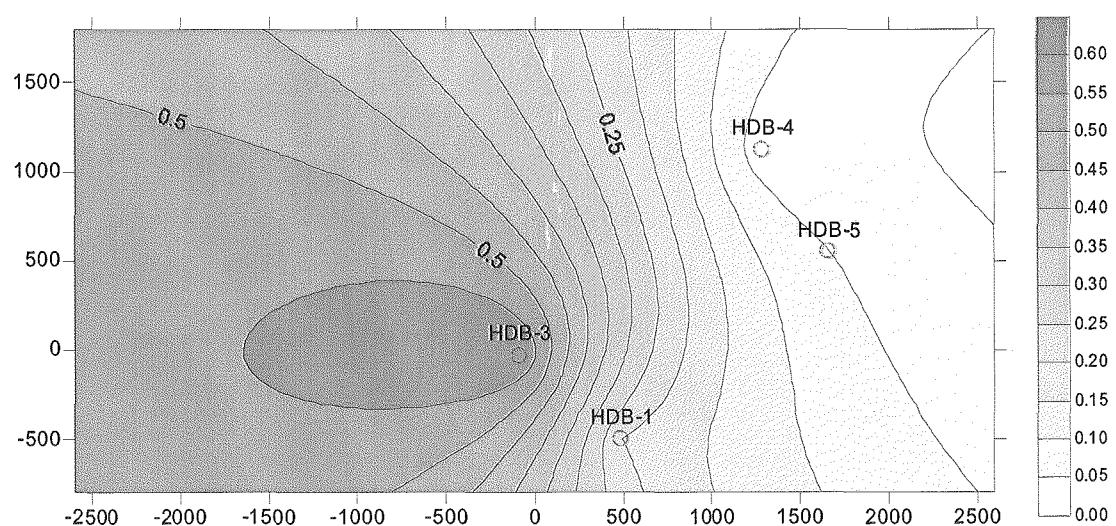


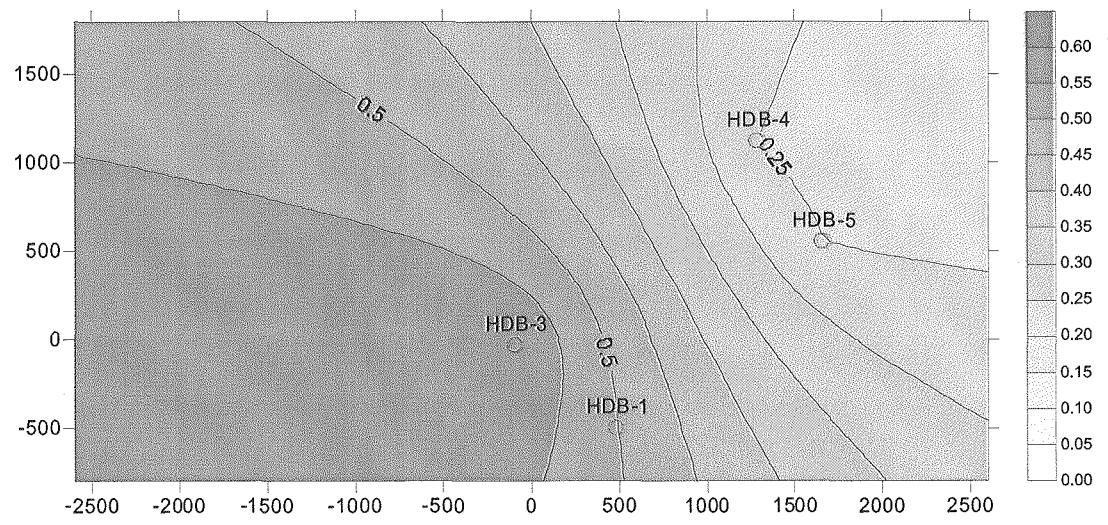
図 3.1-14 Cl 濃度を海水の Cl 濃度で正規化した濃度分布



(a)EL-100m



(b)EL-200m



(c)EL-400m

図 3.1-15 深度別の塩分濃度の推定結果（平面図）

## ②地上物理探査

図 3.1-16 に示す電磁探査結果から、低比抵抗分布と声問層の形状が類似し、比抵抗分布と地質構造の間にある程度の関連性が認められる。地質を構成している鉱物の影響も考えられるが、地下水に含まれる塩分濃度を反映した結果である可能性も大きい。

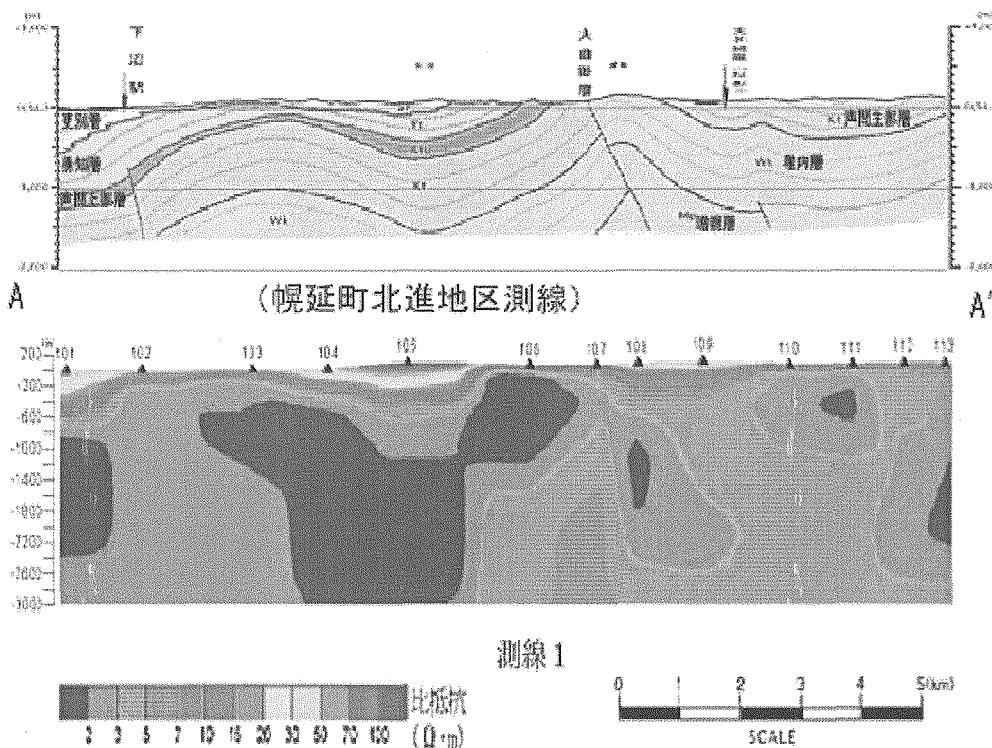


図 3.1-16 地上物理探査（電磁探査）比抵抗断面図（核燃料サイクル開発機構, 2002）

## ③酸素・水素同位体比

HDB-1, HDB-3, HDB-4, HDB-5 孔から採取した地層水および岩芯から抽出した間隙水の酸素同位体比 ( $\delta^{18}\text{O}$ ) と水素同位体比 ( $\delta\text{D}$ ) と深度との関係を図 3.1-17 に示す。これより、得られる知見を以下に示す。

- ・酸素・水素の同位体比は、全体として浅部で小さく、深部になるほど大きくなる傾向にある。
- ・HDB-1 孔では EL-60m 付近までは地表水レベルの同位体比であるが、EL-450m まで徐々に増加し、それより深部ではほぼ一定となる傾向が見られる。
- ・HDB-3 孔では EL-100m まで同位体比が増加し、EL-100m より深部ではほぼ一定となる傾向が見られる。
- ・HDB-4 孔では EL-200m から同位体比が増加し、EL-400m より深部では収束傾向が見られる。
- ・HDB-5 孔では EL-150m から濃度が増加し、EL-350m より深部では収束傾向が見られる。
- ・同位体比の結果から、HDB-4 孔 > HDB-5 孔 > HDB-1 孔 > HDB-3 孔の順で、地表水の影響をより深い深度まで受けているといえる。

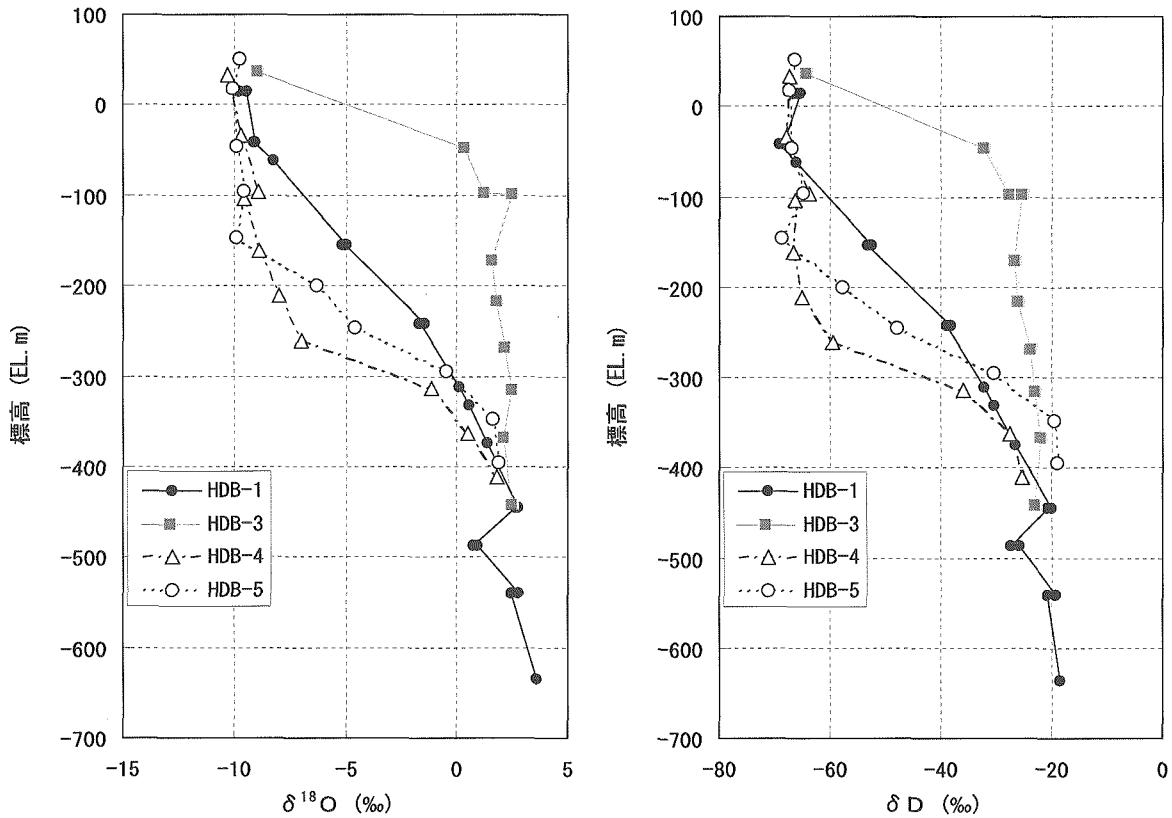


図 3.1-17 酸素・水素同位体比の深度分布

図 3.1-18 は、酸素同位体比 ( $\delta^{18}\text{O}$ ) と水素同位体比 ( $\delta\text{D}$ ) との関係を示したものである。これより、得られる知見を以下に示す。

- ・図 3.1-18(a)に示すように、Cl 濃度が低い地下水（正規化した Cl 濃度が 0.05 以下）は、天水線の近傍にプロットされ、地表面から浅部に存在する天水起源の地下水である。
- ・HDB-3 孔のデータは、地表面に最も近いデータを除けば標準平均海水 (Standard Mean Ocean Water : SMOW) の同位体比および天水線から離れた位置にプロットされる。したがって、これらの地下水は、現在の海水や最近の降水起源の地下水ではないことがわかる。
- ・図 3.1-18(b)では、全体として Cl 濃度の高い地下水ほど酸素・水素の同位体比が大きくなる傾向が示されている。声間層、稚内層は海成の堆積岩であり (佐藤, 2003), Cl 濃度が高く酸素・水素の同位体比が大きい地下水は、地層が堆積する過程で取り込まれた古海水を多く含む地下水である。海水の酸素同位体比は、氷期に大きくなり、間氷期に小さくなる (町田ほか, 2003)。この古海水起源と考えられる地下水の酸素同位体比は SMOW より大きいことから、現在より寒冷な気候条件下における海水を起源としていることがわかる。
- ・HDB-1, HDB-3, HDB-4, HDB-5 孔の地下水は、上述の浅部地下水と酸素・水素の同位体比が大きい地下水との間に直線的にプロットされる。したがって、これらの地下水は最近の降水起源の地下水と古海水の 2 種類の異なる起源を持つ地下水が混合したものであり、その混合比によって酸素・水素の同位体比が異なっているものと考えられる。

酸素・水素の同位体比だけでは具体的な地下水の年代に関する情報を得ることは困難である。本地域における地下水の起源や流動形態を明らかにするには、例えば $^{36}\text{Cl}$ のような長期の地下水年代の指標となる物質を利用した調査も有効であると考えられる。

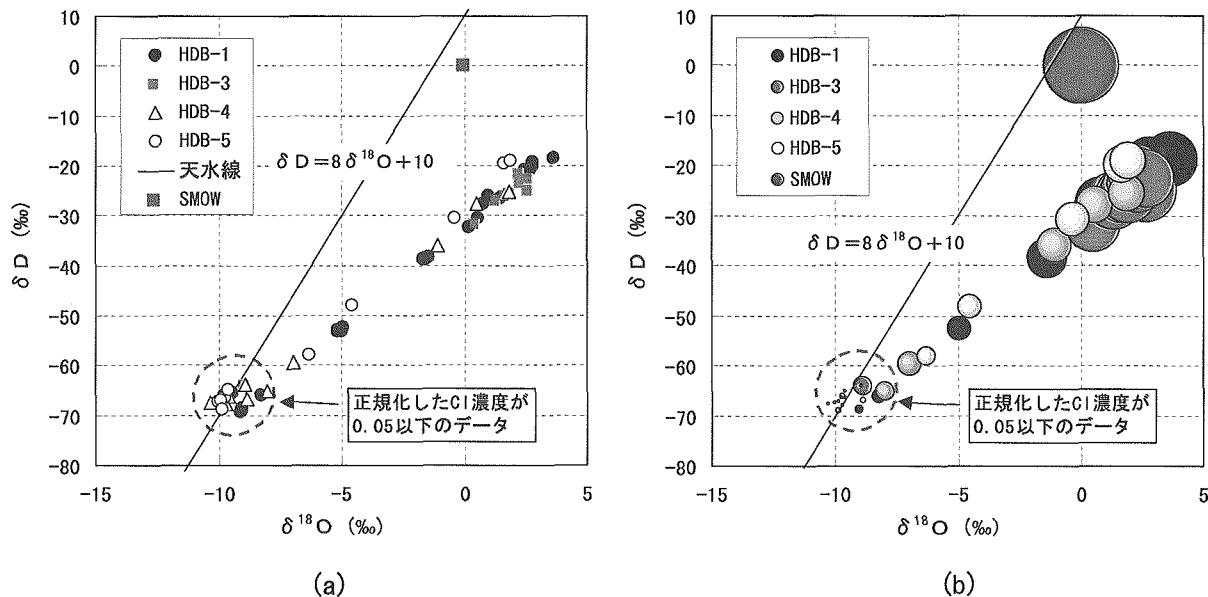


図 3.1-18 酸素同位体比と水素同位体比との関係

((b) の円面積は SMOW=1.0 として正規化した Cl 濃度を示す。)

### 3.1.2 概念モデル

以上の調査結果に基づき、地下水流动場の概念モデルについて検討した。地下水流动場の概念モデル検討に先立ち、図 3.1-12 に示した HDB-1～HDB-8 孔のポテンシャルデータをもとにポテンシャルのコンタ図とポテンシャル分布から推定される動水勾配ベクトルを作成した。図 3.1-19 は、EL-200m 平面でのポテンシャルのコンタ図と動水勾配ベクトル分布である。図 3.1-20 は、本地域における地下水流动は大局的には東の山側から西の海側に向かう流れと想定されることから、HDB-1～HDB-8 孔の試錐孔のデータを東西方向の 2 次元断面に投影し、ポテンシャルのコンタ図と動水勾配ベクトル分布を作成したものである。ポテンシャルコンタは Radial Basis Function 法（大多数のデータの最も良い包括的な解釈を与えるとされる補完法）でデータ補間を行い作成した。ただし、計測の問題または掘削時の人工的な搅乱が残留している可能性がある HDB-1 孔の標高-580m 以深のデータは除外した。

図 3.1-19、図 3.1-20 には、ポテンシャルのコンタ図と動水勾配ベクトル分布に加え、大曲断層の推定位置、水質調査結果からの知見、透水試験結果からの知見を記述した。ここでの知見は統一した地下水流动の概念を示すものではなく、得られた調査結果から想定される地下水流动の可能性に関して示す。

①HDB-4 孔、HDB-5 孔の近傍では、ポテンシャル勾配が大きく、浅部から EL.-350m 深度までの稚内層の割れ目帯を主体とする高い透水性領域を地下水が流动している。流动している地下水の起源は HDB-5 孔より東側の高標高部であると推定される。

- ②HDB-1 孔近傍は大曲断層の推定位置に近く、断層の影響を受けた透水性の高い領域が存在し、3次元的な複雑な流動場になっている可能性が高く、そのために水質が EL-400m の深部まで地表水の影響を受けているものと考えられる。HDB-1 孔の東側ではポテンシャル分布から上昇流が想定され、これは大曲断層による割れ目帯に沿った流れである可能性がある。ただし、HDB-1 孔での同位体や Cl 濃度の深度方向の分布を見ると比較的深い箇所まで天水の影響がおよび、一概に上昇流があると結論付けるのは難しい。
- ③HDB-3 孔の透水性は HDB-4, 5 孔よりも低く、そのため地表水の影響は最大でも EL-100m までとなっている。それより深部には、地層が堆積する過程で取り込まれた高濃度の海水が残っていると考えられる。また、HDB-3 孔周辺は上昇流となり深部から塩分を含んだ地下水が湧き上がり、比較的浅い箇所でも塩分濃度が高く、また同位体などのデータが示すように天水の影響が深部まで影響していない可能性が考えられる。
- ④HDB-3 孔と HDB-7 孔の間の領域は、ポテンシャル勾配から流速が非常に遅いと考えられ、流動方向は上向きとなっている。したがって、この領域では地表水の影響は地表面近傍に限定されている可能性が高い。また、比較的浅い箇所でも塩分濃度が高いと考えられる。
- ⑤地上電磁探査からの比抵抗分布を見ると、地形的な凸部で比抵抗が大きく、凹部で比抵抗が小さい傾向がある。探査結果の比抵抗は地下水に含まれる塩分を反映したものであるとすると、間隙に取り込まれた海水が洗い出され、涵養部の凸部で淡水化して比抵抗が大きく、凹部では深部からの塩分を含んだ地下水が湧出し、比抵抗が小さくなっていると解釈される。
- ⑥EL-200m 平面内のポテンシャル分布からは南東から北西への地下水流动が想定される。一方、⑤に示す塩分分布の成因の仮定に基づいて塩分濃度分布と地下水流动を関係付けて考えると、塩分濃度の低い箇所から淡水が供給され、塩分濃度の高い方へ地下水が流れていると考えられ、図 3.1-15 に示す塩分濃度分布からは、図 3.1-19 に示すような南西方向への流れが考えられる。

以上示したように、ポテンシャル分布から想定される地下水流动と、同位体や Cl 濃度から想定される地下水流动傾向は整合しない点も見られる。これらは、限られた測点からの推定であること、3次元的な評価でないこと、割れ目帯などの不均質性の影響を評価していないこと、百万年オーダーの地質環境変化の一断面しか見ていないこと、などが原因として考えられる。上記は現時点での調査の限界と考えられる。より確かな地下水流动概念モデル構築するためには、今後の調査の継続とデータ蓄積、解析的アプローチによる時間軸と3次元空間を考慮した調査データの補間による地下水流动概念の把握と検証が必要と考えられる。

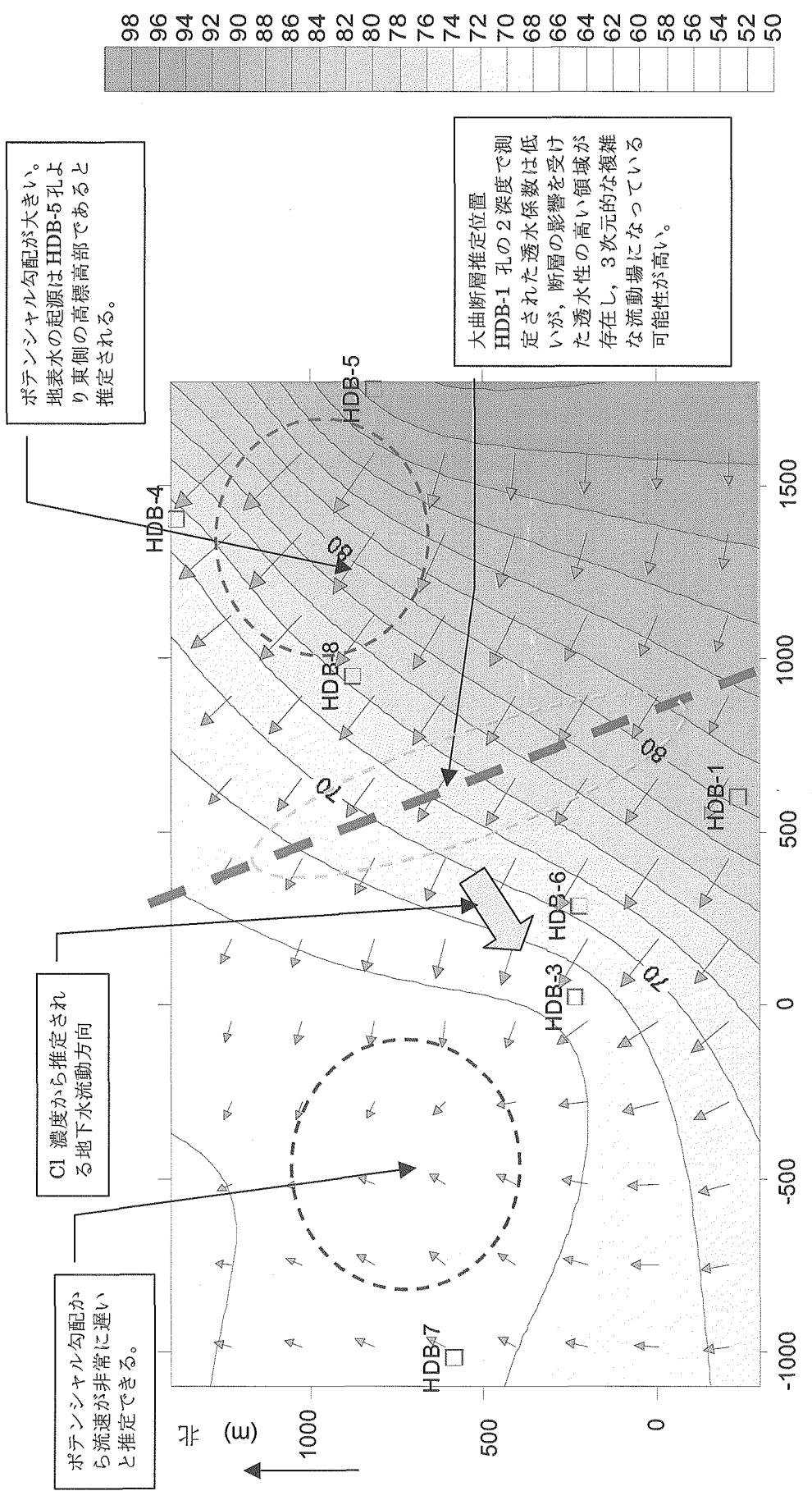


図 3.1-19 地下水流動の概念モデル (EL-200m 水平面内, 矢印は流動方向を示す。)

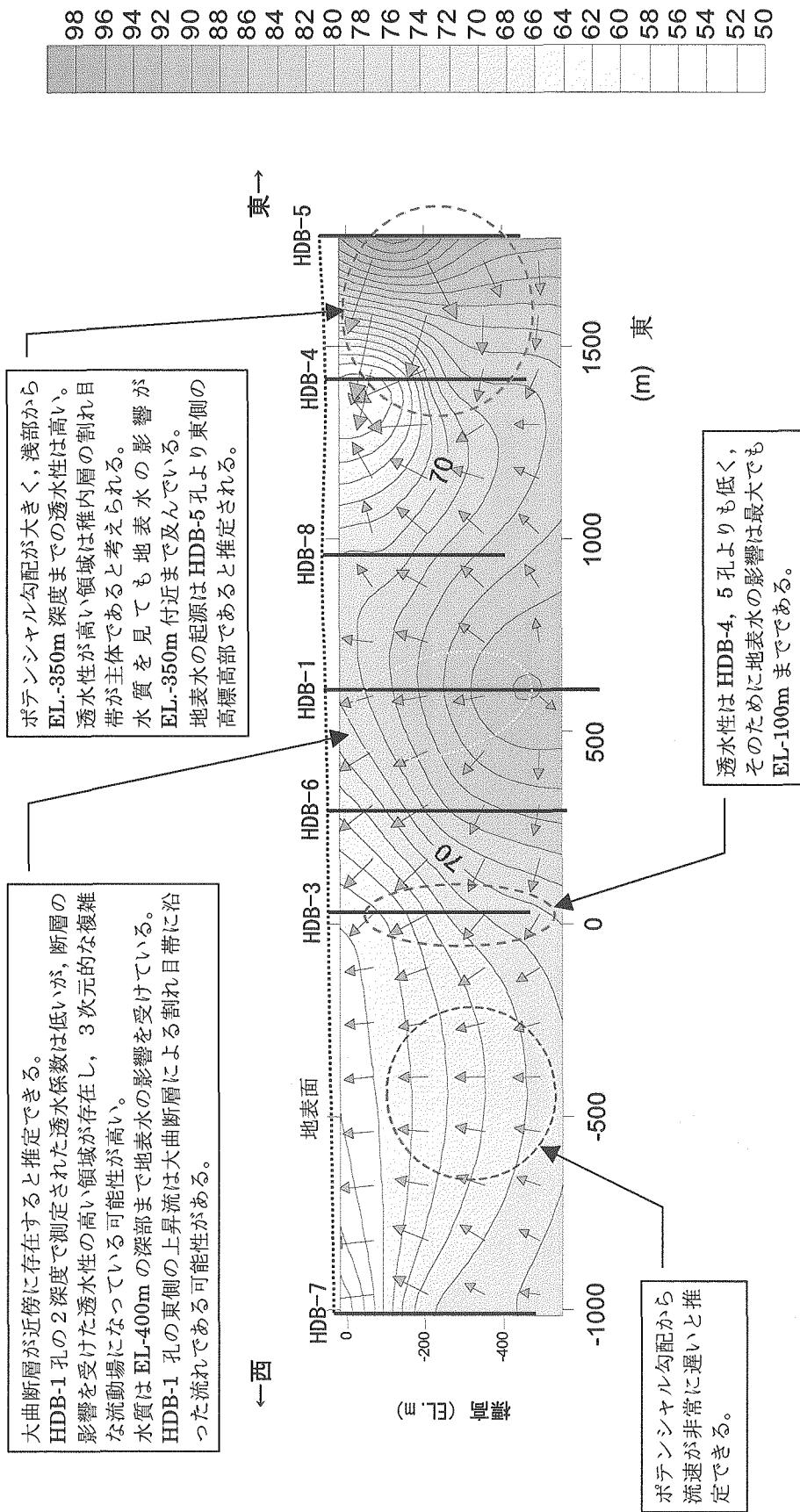


図 3.1-20 地下水流動の概念モデル（東西方向鉛直断面内、矢印は流動方向を示す。）



### 3.2 解析の概要

広域スケールの地下水流动解析として、地下水流动の全体的倾向を把握するための定常・3次元地下水流动解析と HDB-1 孔, HDB-3 孔, HDB-4 孔, HDB-5 孔で確認されている地下水に含まれる塩分に着目した塩分濃度・密度を考慮して非定常・鉛直2次元の地下水流动解析を実施した。定常・3次元地下水流动解析では、2.2 で示したメッシュを使用し、非定常・鉛直2次元の解析では、解析の収束性、解析時間を考慮し、2.2 で示したメッシュより HDB-1 孔, HDB-3 孔, HDB-4 孔, HDB-5 孔に該当する海岸より山地部までの東西方向の鉛直2次元断面を切り出した鉛直2次元メッシュを用いた解析をした。塩分濃度・密度を考慮した非定常・3次元の地下水流动解析では非常な計算時間を要し所定の期間内に解析結果を得ることができないと判断したため、水理地質構造の3次元性のポテンシャル分布への影響を把握する目的で地下水だけを対象とした定常・3次元地下水流动解析を実施した。塩分濃度に関しては全体的地形形状から東西方向の地下水流动が想定されることから、3次元的地質構造の影響は無視した塩分濃度・密度を考慮した非定常・鉛直2次元の地下水流动解析を実施した。

解析には FEM 地下水流動解析用プログラム Dtransu-3D·EL を使用した。

Dtransu-3D·EL は、岡山大学 西垣 誠教授、三菱マテリアル（株）、ダイヤコンサルタント（株）の三者共同で開発されたプログラムである。本プログラムのソースコードは公開され、自由に利用できる。Dtransu-3D·EL に関する講習会等も開かれ、国内で広く使用されている。

Dtransu-3D·EL は3次元モデルにおける、密度勾配を考慮した飽和・不飽和浸透流及び移流・分散問題を対象とした解析コードで、移流・分散解析においてオイラリアン・ラグランジアン手法を用い、高ペクレ数から低ペクレ数の問題に対して安定した解析が可能である。塩淡境界の解析には適しているものと考えられる。

密度依存を考慮した飽和・不飽和非定常浸透流方程式は次式（菱谷、1999）で示される。

$$\rho_f \theta \gamma \frac{\partial c}{\partial t} + \rho \{ \beta Ss + Cs(\theta) \} \frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \{ \rho K_{ij}^s K_r(\theta) \frac{\partial \phi}{\partial x_j} + \rho K_{r3}^s K_r(\theta) \rho_r \} \quad (3.2-1)$$

ここで、 $\phi$ ：圧力水頭、 $\theta$ ：体積含水率、 $Ss$ ：比貯留係数、 $Cs(\theta)$ ：比水分容量、 $K_{ij}^s$ ：飽和透水テンソル、 $K_r(\theta)$ ：比透水係数、 $C$ ：濃度 ( $0 \leq c \leq 1$ 、飽和濃度を 1 として正規化)、 $t$ ：時間、 $\rho_f$ ：溶媒の密度、 $\rho$ ：流体の密度、 $\rho_r$ ：溶媒の密度に対する流体の密度比 ( $\rho/\rho_f$ )、 $\beta = 1$ ：飽和領域、 $0$ ：不飽和領域、 $\gamma$ ：溶質の密度比（一般に海水で  $\gamma = 0.025$  程度）

物質移行の方程式は次式で示される。

$$R \theta \rho \frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \theta \rho D_{ij} \frac{\partial c}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (\theta \rho V_i c) - \theta \rho \lambda R c - Q_c \quad (3.2-2)$$

ここで、 $R$ ：遅延係数、 $Q_c$ ：源泉項、 $D_{ij}$ ：分散テンソル、 $\lambda$ ：減衰定数、 $V_i$ ：実流速

### 3.3 地下水流動解析

#### 3.3.1 基本となる解析条件設定

##### (1) 透水係数の設定

透水係数は、既往の解析における設定値（今井ほか, 2001; 2002）および3.1(3)で示した透水試験結果を反映し、表3.3.1-1にcase1として示す透水係数を各地層の基本ケースとして与えた。

透水係数に対する解析ケースとして、稚内層の健岩部と割れ目部で透水係数のばらつきが大きいことから（図3.1-11参照）、稚内層の透水係数の大きいケース(case2)、稚内層の透水係数の小さいケース(case3)を設定した。また、透水係数に深度依存性が認められるため、稚内層、声問層に深度依存性を設定したケース(case4)を設定した。さらに大曲断層の影響を見るために、大曲断層の透水係数を2オーダー小さくしたケース(case5)を設定した。

表3.3.1-1 透水係数の設定

No.	記号	地質	case1	case2	case3	case4	case5
			基本ケース k(m/s)	稚内・大 k(m/s)	稚内・小 k(m/s)	深度依存性 k(m/s)	大曲・小 k(m/s)
1	Cr	鬼志別他基盤岩	1.0E-11	1.0E-11	1.0E-11	1.0E-11	1.0E-11
2	Mp	増幌	5.0E-10	5.0E-10	5.0E-10	5.0E-10	5.0E-10
3	Wk1	稚内 下位層				5.0E-11	
4	Wk2	稚内 ↓				1.1E-09	
5	Wk3	稚内 ↓	1.0E-08	1.0E-07	1.0E-09	1.0E-08	1.0E-08
6	Wk4	稚内 ↓				8.7E-08	
7	Wk5	稚内 上位相				2.0E-06	
8	Kt1	声問 下位層				3.5E-09	
9	Kt2	声問 ↓	1.0E-08	1.0E-08	1.0E-08	1.0E-08	1.0E-08
10	Kt3	声問 上位相				2.8E-08	
11	Yt	勇知	8.0E-10	8.0E-10	8.0E-10	8.0E-10	8.0E-10
12	Sa	更別	1.0E-06	1.0E-06	1.0E-06	1.0E-06	1.0E-06
13	East_upper	鬼志別他	1.0E-10	1.0E-10	1.0E-10	1.0E-10	1.0E-10
14	Surface	表層	1.0E-06	1.0E-06	1.0E-06	1.0E-06	1.0E-06
15	OmF_core	大曲断層コア部	1.0E-08	1.0E-08	1.0E-08	1.0E-08	1.0E-10
16	OmF_side	大曲断層側部	1.0E-08	1.0E-08	1.0E-08	1.0E-08	1.0E-10
17	N1F_core	N系断層コア部	1.0E-08	1.0E-08	1.0E-08	1.0E-08	1.0E-08
18	N1F_side	N系断層側部	1.0E-08	1.0E-08	1.0E-08	1.0E-08	1.0E-08

##### (2) 間隙率、比貯留係数

間隙率、比貯留係数は全ての地質区分共通とし、表3.3.1-2に示す設定とした。間隙率、比貯留係数は非定常計算や粒子追跡法での計算結果に影響するが、モデル化に反映する十分でデータの無いこと、解析結果の解釈を容易にする観点から全地質区分共通とした。また、ここで対象としている堆積岩は、地質学的な時間スケールでは、圧密過程にあると考えられる。従って過去においては間隙率が現時点より大きく、また透水係数も（割れ目帶の発生を除外すると）大きいと推定される。物質移行に関しては間隙率が大きいことと、透水係数の大きいことは相反する条件

であり間隙率、比貯留係数は変化させないこととした。

表 3.3-1-2 間隙率、比貯留係数

間隙率	比貯留係数( $m^{-1}$ )
0.5	0.0001

### (3) 不飽和透水係数

不飽和を考慮したケースにおいては、全ての地質区分について以下の図表に示す不飽和特性を用いた。不飽和特性は実データに基づいたものではなく、計算時の収束性を重視し、ある程度の不飽和領域や地下水表面の表現が可能な設定とした。

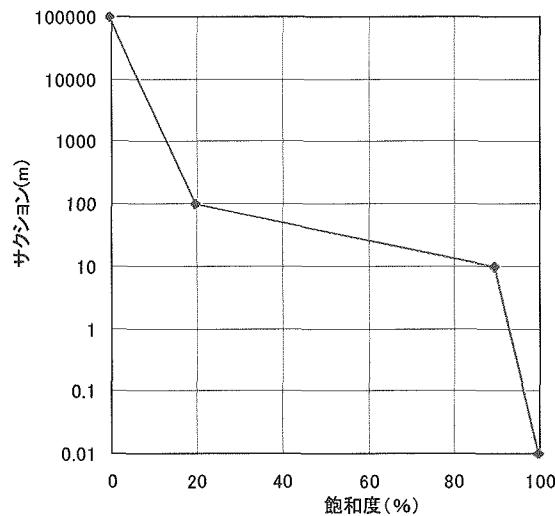


図 3.3.1-1 水分特性曲線

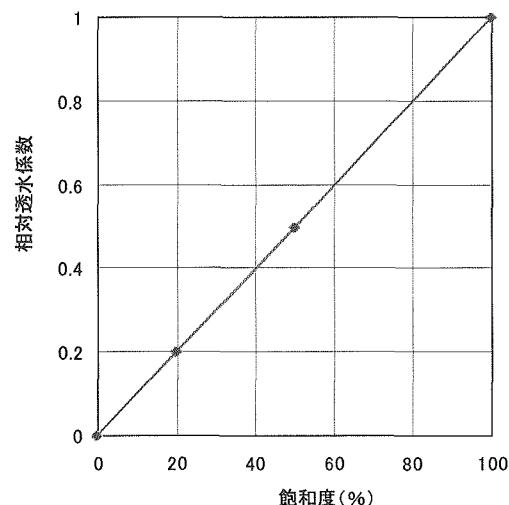


図 3.3.1-2 相対透水係数

表 3.3.1-3 飽和度と相対透水係数、負圧の関係

飽和度(%)	サクション(mH <sub>2</sub> O)	飽和度(%)	相対透水係数
0	99999.00	0	0
20	100.00	20	0.2
90	10.00	50	0.5
100	0.01	100	1

#### (4) 境界条件

解析に用いる境界条件を整理した表を次に示す。

表 3.3.1-4 には側方境界条件として 4 種類のタイプを示している。今回の解析では内陸部の解析領域の境界に図 3.3.1-4(a) のタイプ、海底部には図 3.3.1-4 (b) を適用した (図 3.3.1-3)。

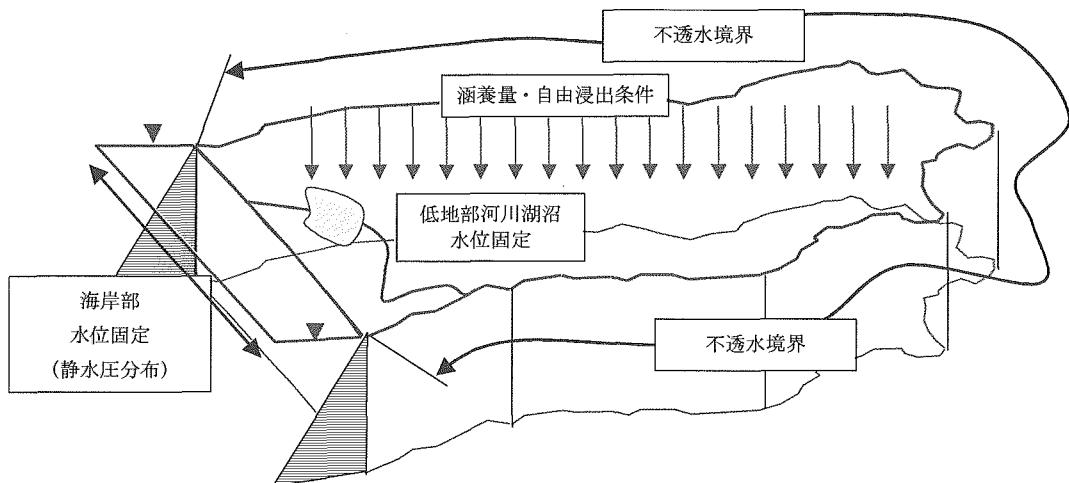


図 3.3.1-3 境界条件設定

表 3.3.1-4 境界条件の設定一覧

地表境界条件 (図 3.3.1-4 参照)	降雨の一部が解析領域で一様に地面に浸透するとして、1日あたり 1mm の降雨強度を与えた。 ただしこの結果、水位が節点の標高より上になった場合は、地表面に水位がある状態であると判断し、その節点を水位固定とした。また、河川等の水位設定については予察的解析から、海側の低地部の河川・湖沼に該当する節点（標高 1m 未満の点）に関して水位固定とした。
下部境界条件	地下 5000m までを解析領域としており、深度 5000m では透水性も小さく、動水勾配も小さいと予想され、不透水状態にあると考えられる。 したがって、不透水境界条件とした。
側方境界条件 (海岸沿い)	外岸戦に相当する側部を、静水位分布の水位固定とした。 (図 3.3.1-4(b)参照)
側方境界条件 (海岸沿い以外)	境界は、そのほとんどが、尾根や谷部に沿って設定されており、不透水境界条件と考えた。(図 3.3.1-4(a)参照) 一部の谷部に相当する境界では、表面に水位固定を設定している場合も存在する。

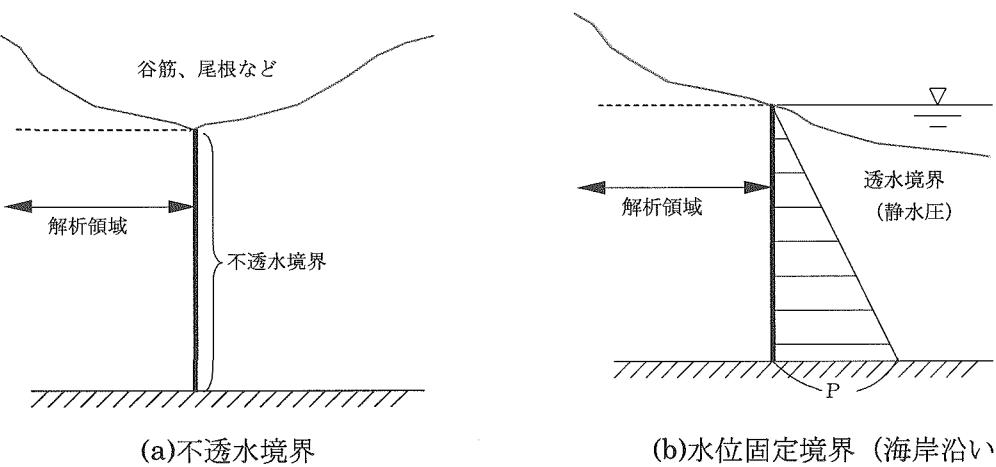


図 3.3.1-4 側方境界条件のタイプ

### (5) 河川水位設定に関する予察的解析

河川水位の設定に関して予察的解析検討を実施した。目的は河川部への境界条件の設定方法を把握することにある。図 3.3.1-5 に示すように河川は低地部、山地部に存在する。解析モデルで山地部河川相当部を水位固定とすると、流入境界となる可能性があり実際の状況と異なることが予想される。特に河川位置を水位固定としなくても、自由浸出の条件で結果的に河川位置が流出点として解析プログラムにより自動設定される可能性も考えられる。このため表 3.3.1-5 に示すように、run1 から run4 の表面水位固定条件の異なる 4 ケースを比較し、河川部の境界条件設定に関して検討した。run3 と run4 は河川位置から水位固定境界とする節点の選択条件の異なるケースで、run4 はより多くの節点を水位固定条件として選択するケースである。

図 3.3.1-6～図 3.3.1-9 に山地部における各ケースの流入点、流出点位置を示す。また、run3, run4 では水位固定点位置も示す。表 3.3.1-5 では各ケースの総流入量、流出量を示している。

run1 は、全面水位固定のため流量が他のケースの 3 倍程度と多く、高標高部からの流入量が多い結果になる。run3, run4 をみると河川部水位固定箇所でも流入点となっている箇所が見られる。run2 では河川部に水位固定はしていないが、自由浸出の判定により河川付近で流出点となることが示されている。run4 は run3 よりも水位固定点が多いケースで、総流入量・流出量が多くなっていることから水位固定による過剰な流入が生じていることが想定される。

以上のことから山地部河川に関しては特に水位設定する必要がないと考えられる。

表 3.3.1-5 表面流入出量 (m<sup>3</sup>/year)

		Q_in	Q_out
run1	表面水位固定	6.616	-6.582
run2	低標高部河川水位固定	1.924	-1.908
run3	山地部河川水位固定 1	1.954	-1.950
run4	山地部河川水位固定 2	2.257	-2.252

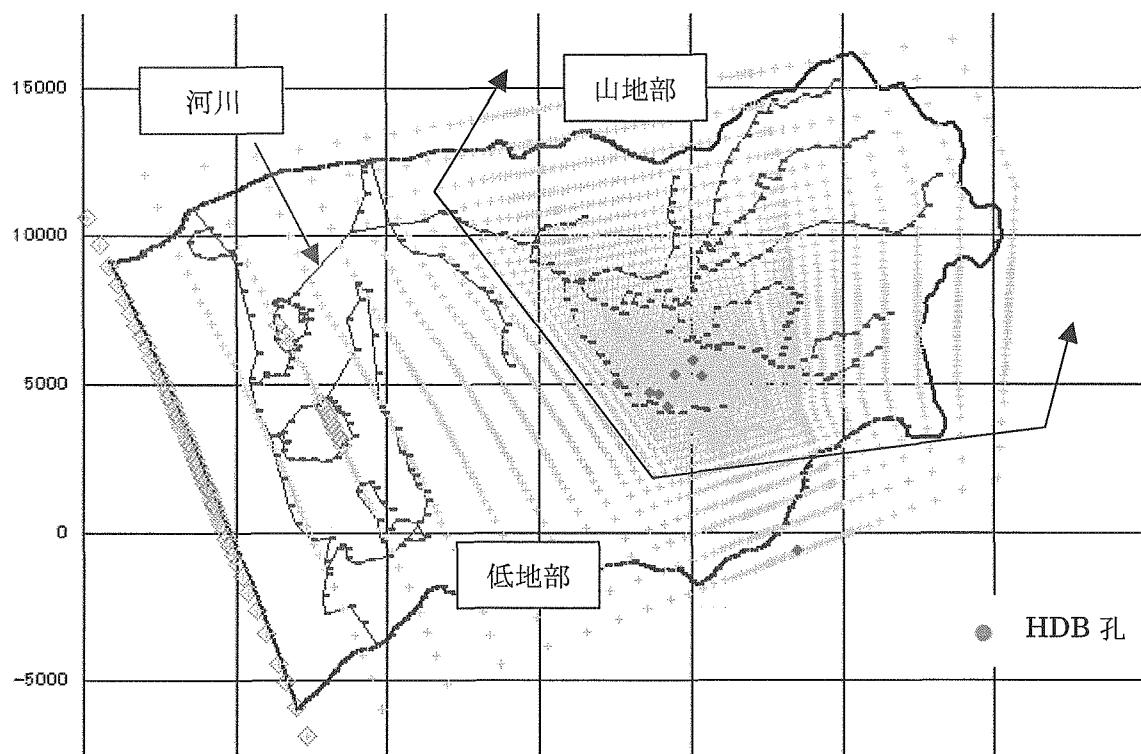


図 3.3.1-5 解析領域内の湖沼・河川位置、表層部解析モデル節点

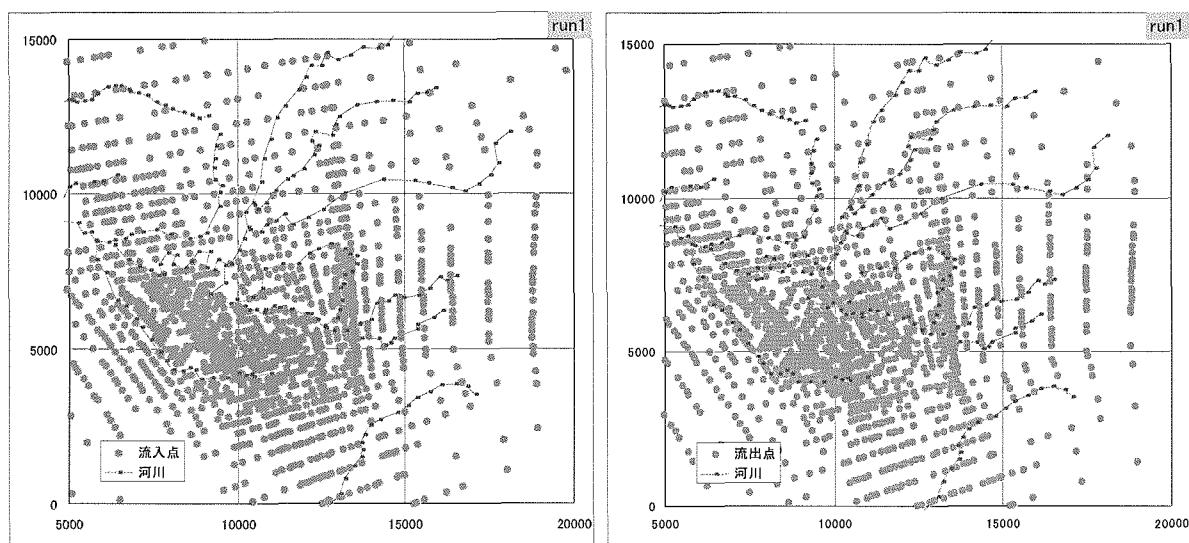


図 3.3.1-6 run1 の流出点、流入点

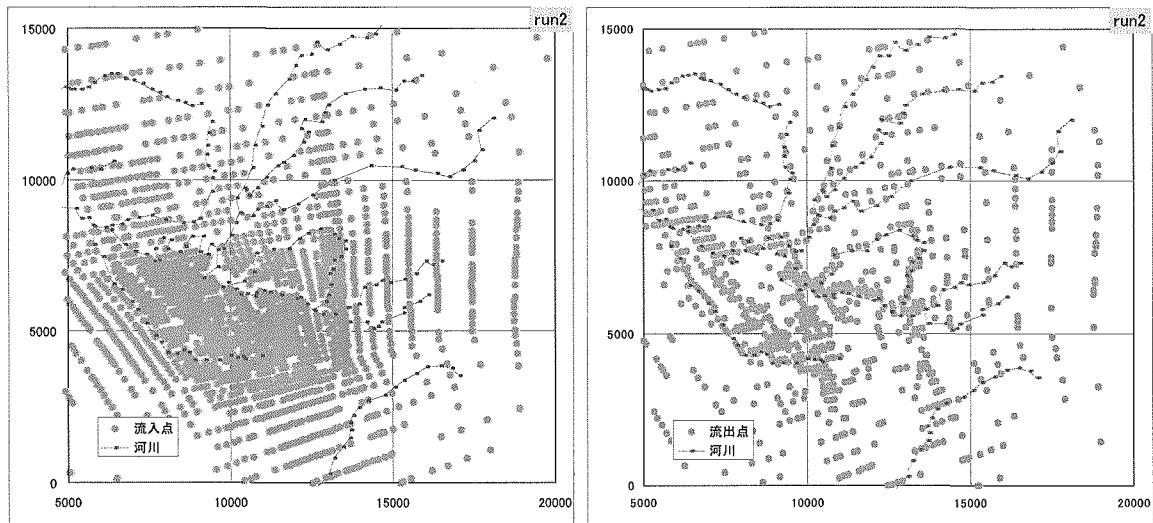


図 3.3.1-7 run2 の流出点, 流入点

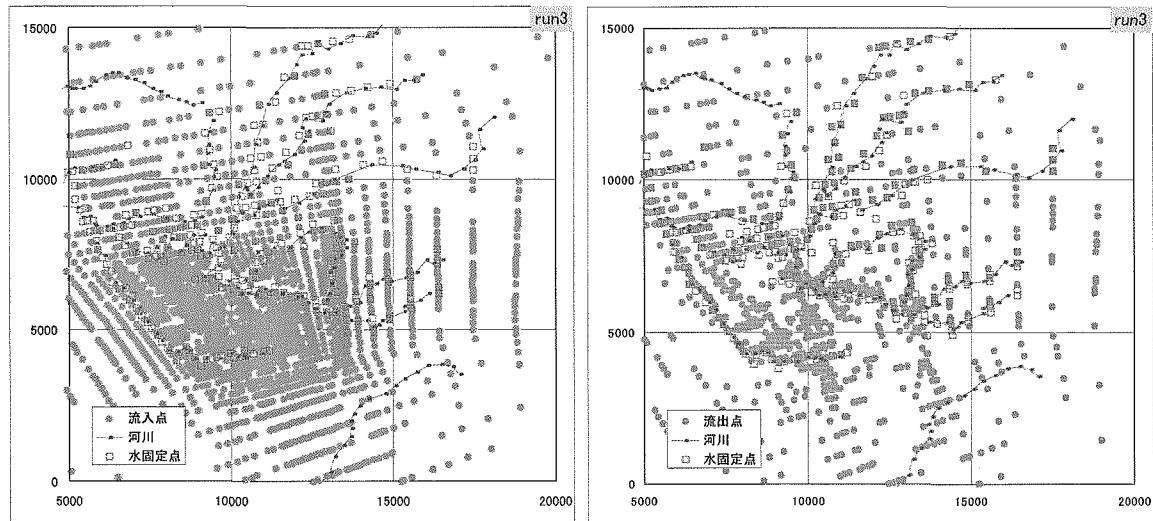


図 3.3.1-8 run3 の流出点, 流入点

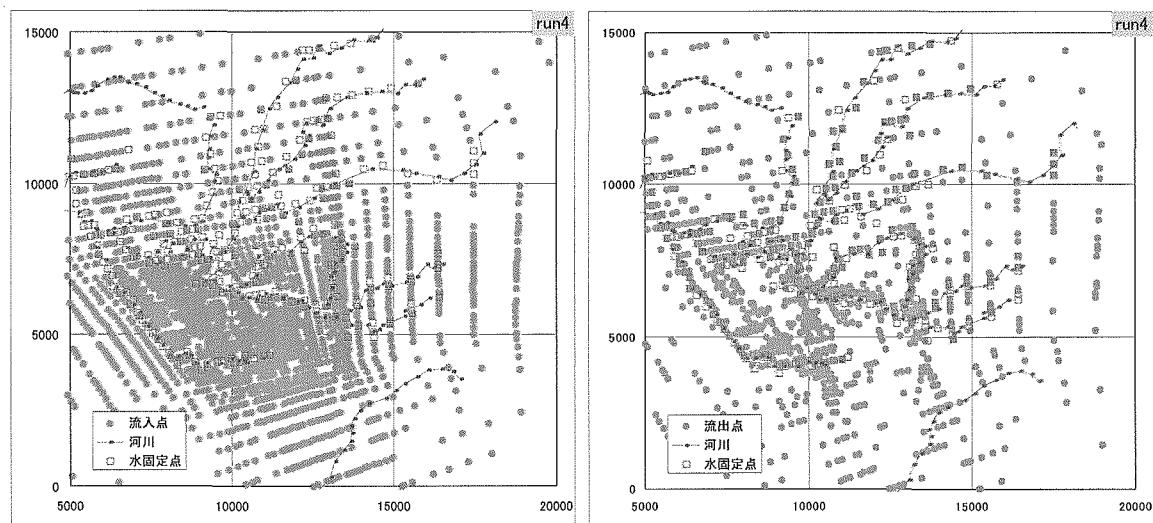


図 3.3.1-9 run4 の流出点, 流入点

### 3.3.2 解析結果

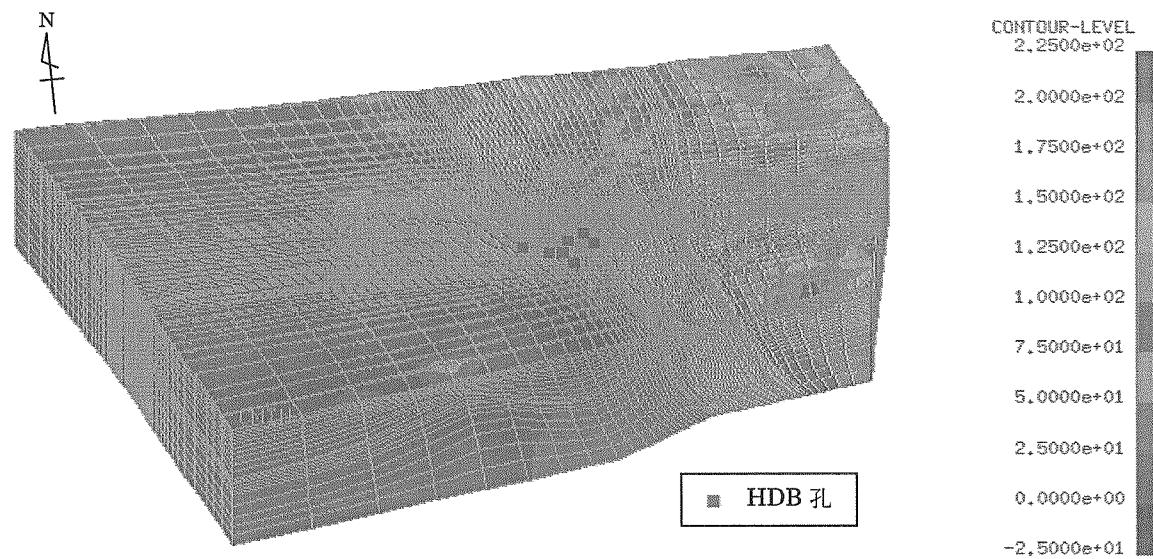
透水係数設定の異なる5ケースに関して実施した地下水流动解析結果を示す。解析結果としては、

- ①ポテンシャル分布
- ②流速ベクトル・圧力分布
- ③水収支観測流域P-1, P-2, P-3, P-1'における流入出点と流入出量
- ④HDB孔への地下水起源を推定する逆方向の粒子追跡解析結果
- ⑤地下施設からの地下水流动経路を示す粒子追跡解析結果
- ⑥HDB孔該当箇所等でのポテンシャル分布

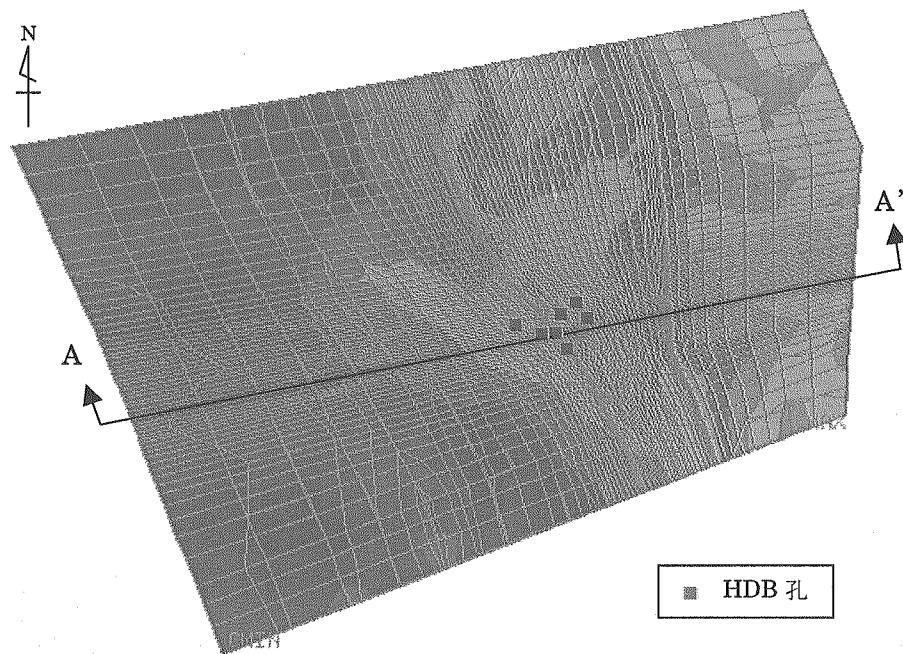
を示す。

#### (1) ポテンシャル分布

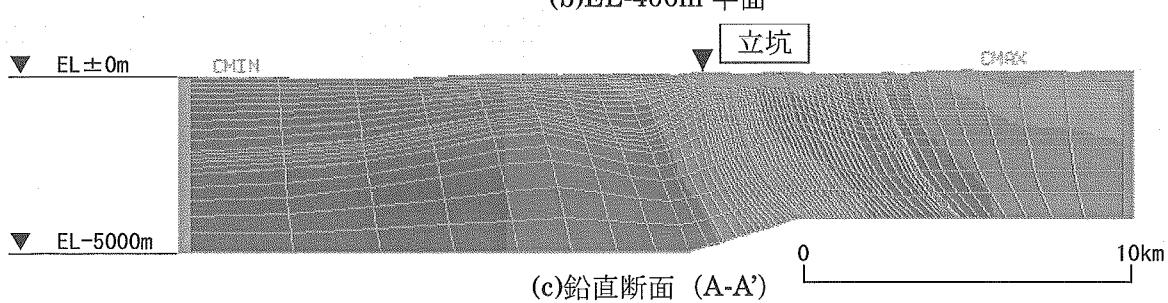
ポテンシャル分布として、①全体鳥瞰図、②EL-400m平面図、③地下施設を含む東西方向の鉛直断面図を図3.3.2-1～図3.3.2-5示す。



(a)鳥瞰図

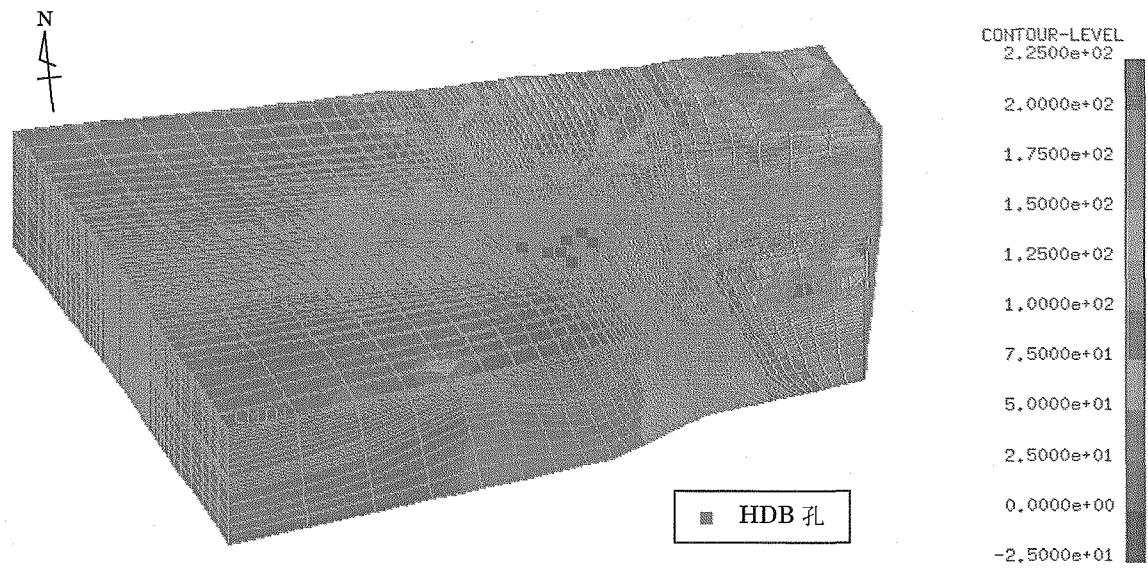


(b)EL-400m 平面

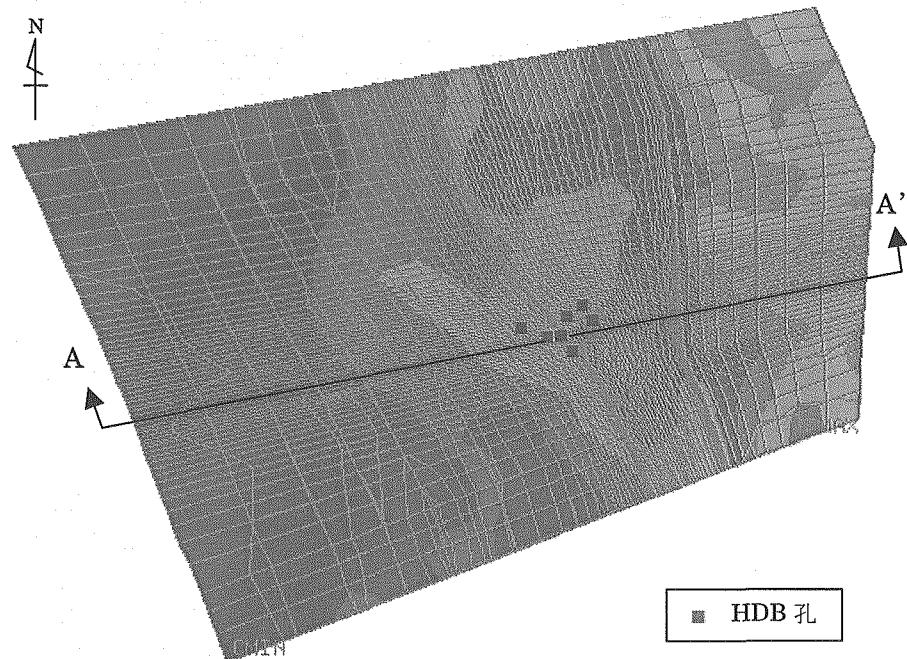


(c)鉛直断面 (A-A')

図 3.3.2-1 case1 のポテンシャル分布



(a)鳥瞰図



(b)EL-400m 平面

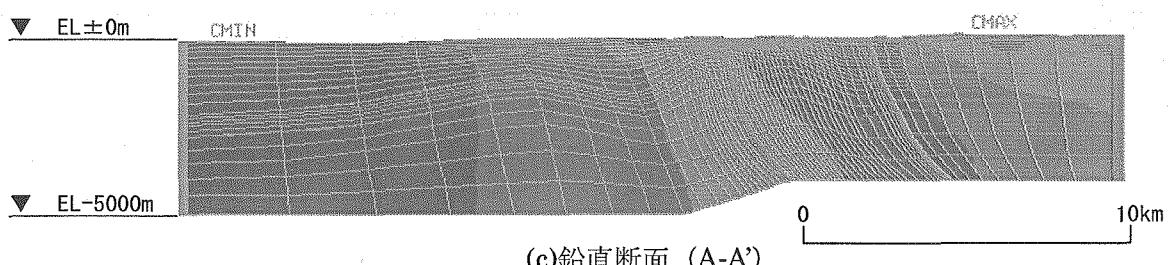
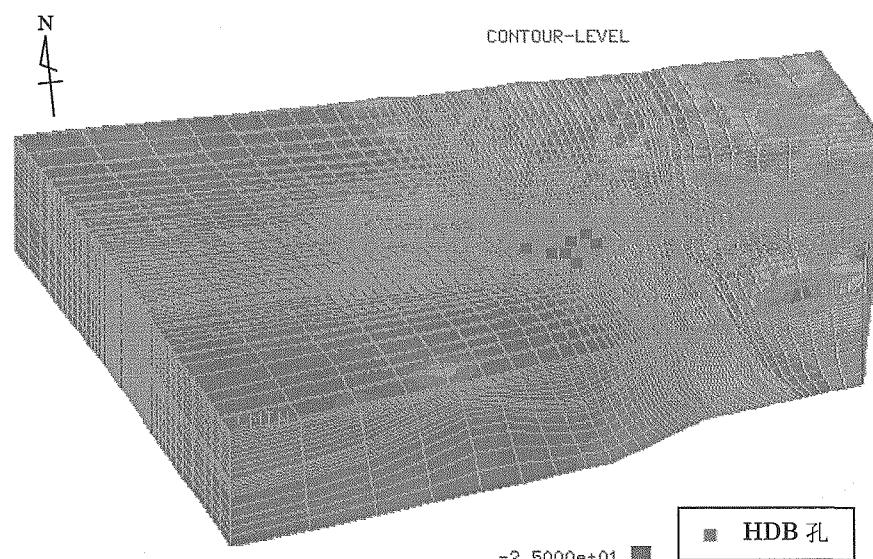
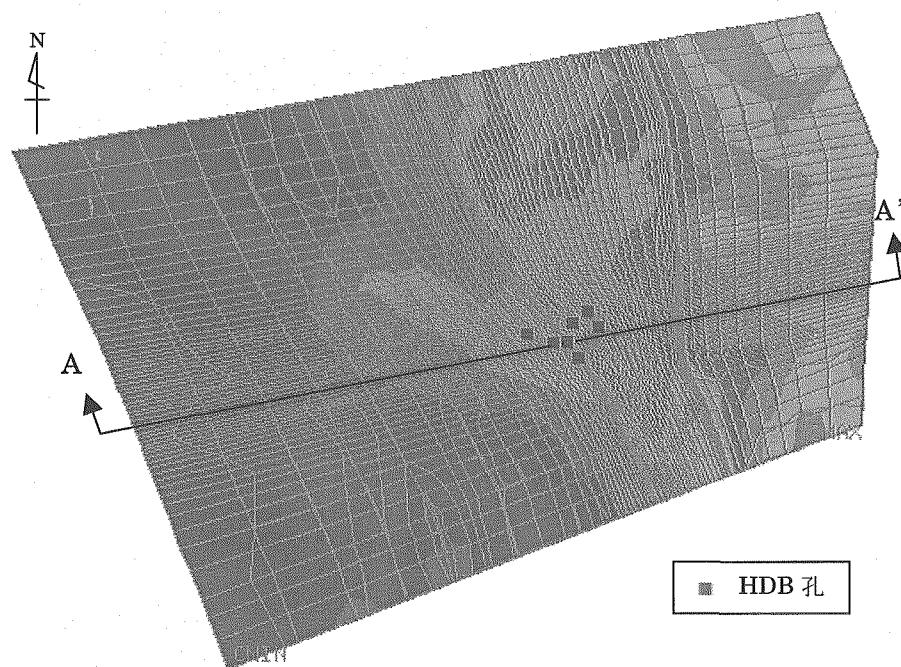


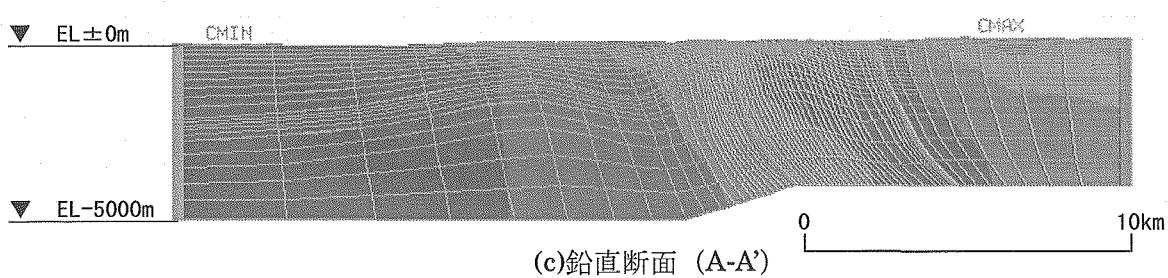
図 3.3.2-2 case2 のポテンシャル分布



(a)鳥瞰図

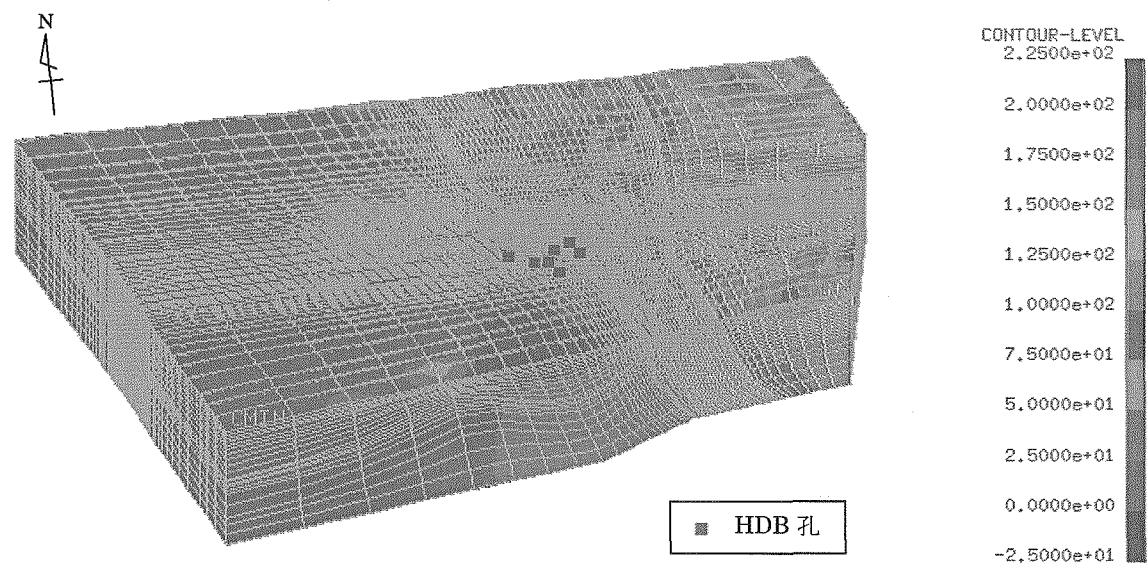


(b)EL-400m 平面

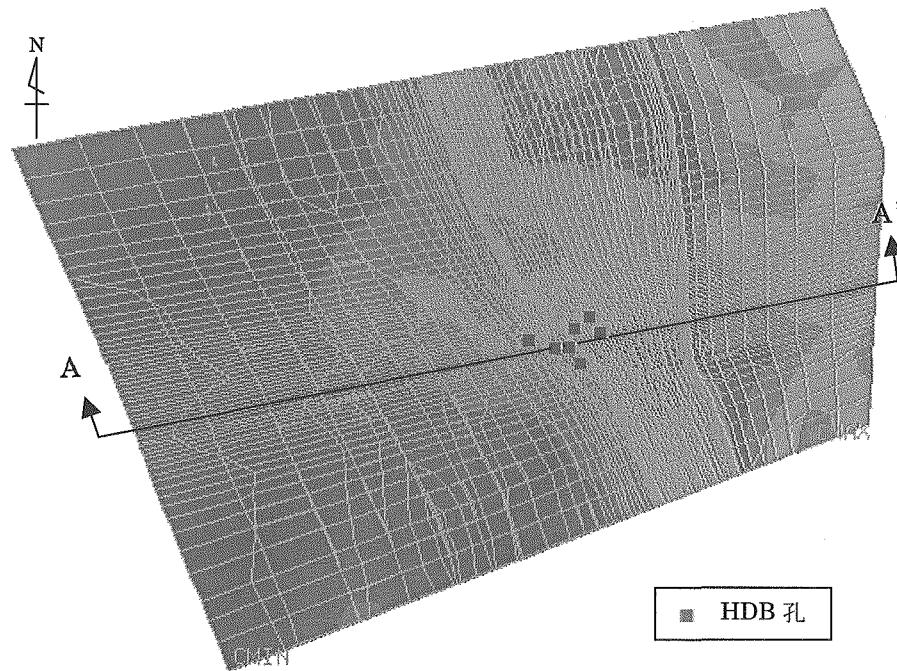


(c)鉛直断面 (A-A')

図 3.3.2-3 case3 のポテンシャル分布



(a)鳥瞰図



(b)EL-400m 平面

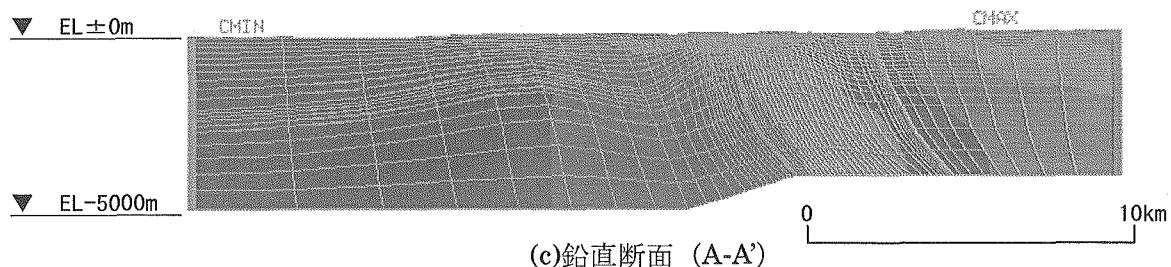
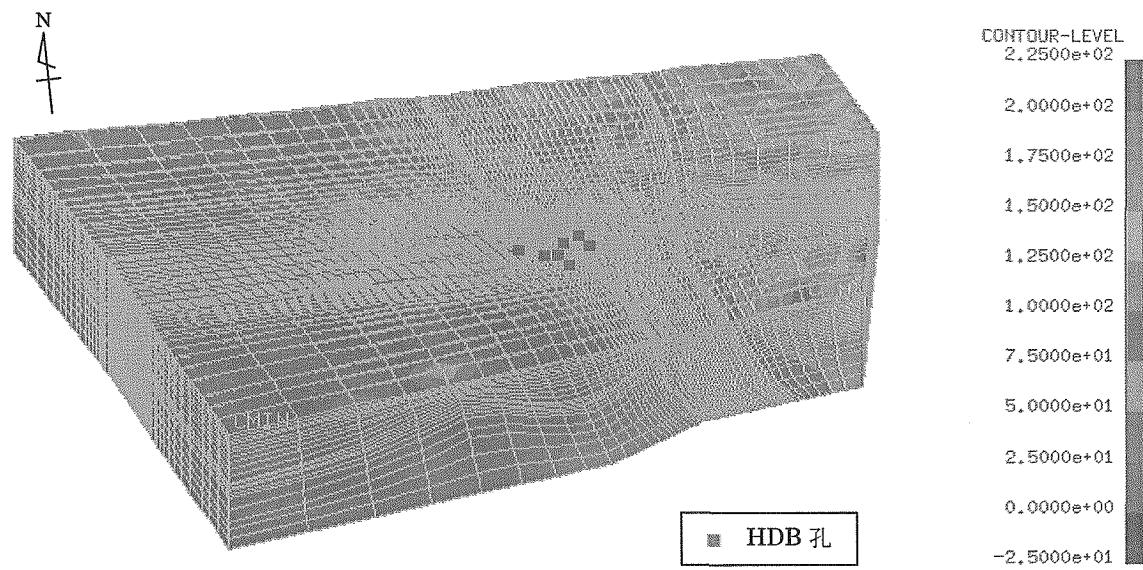
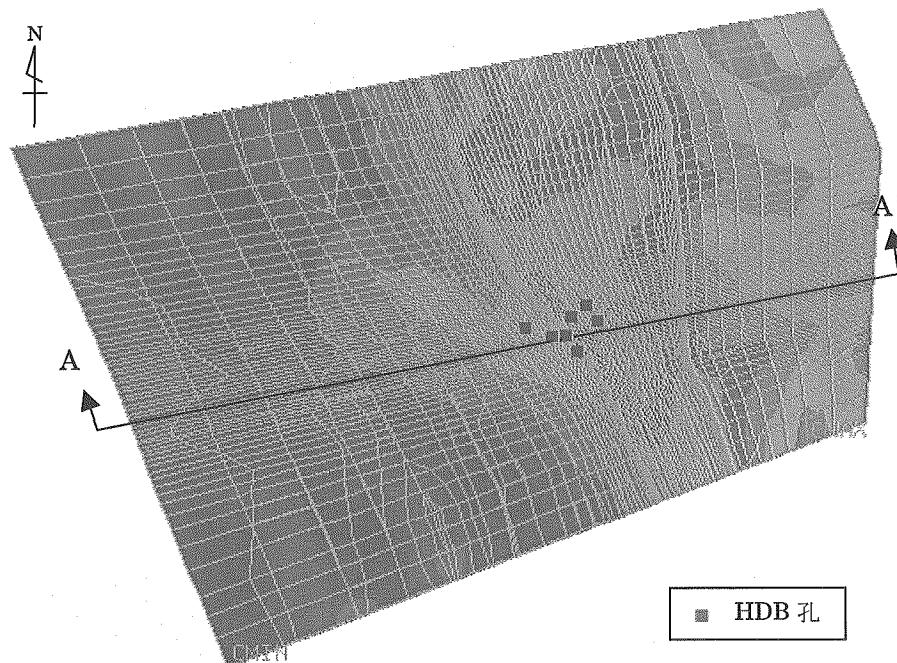


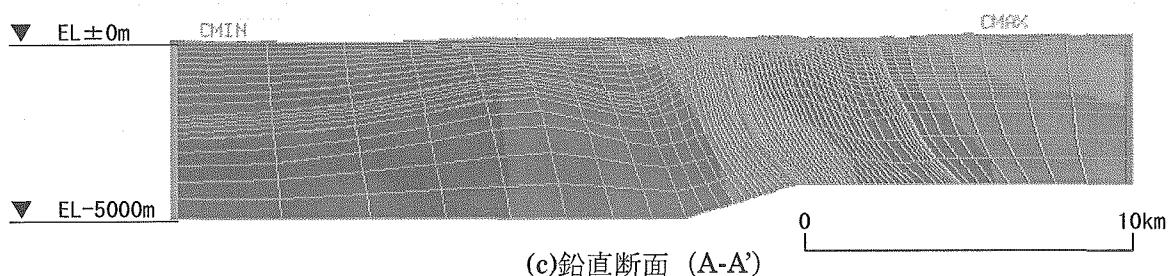
図 3.3.2-4 case4 のポテンシャル分布



(a)鳥瞰図



(b)EL-400m 平面

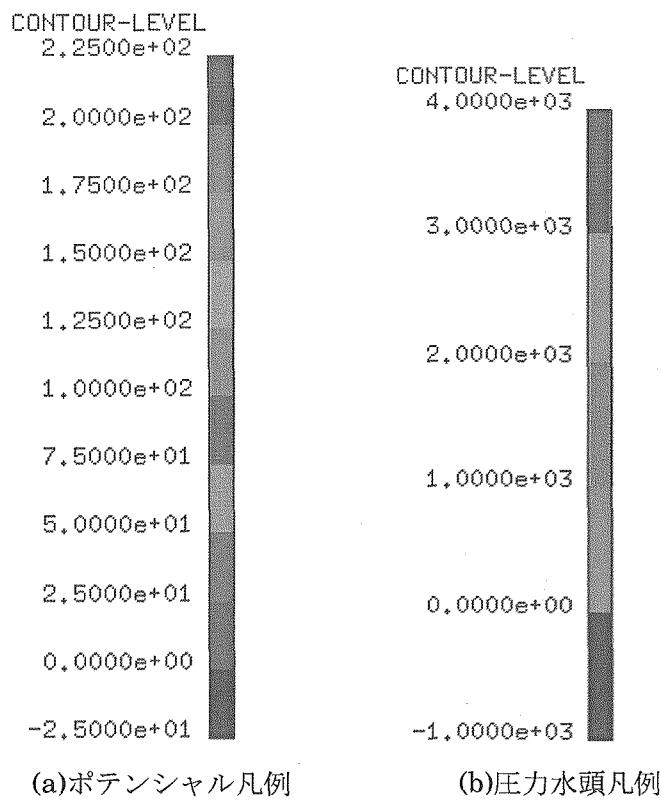


(c)鉛直断面 (A-A')

図 3.3.2-5 case5 のポテンシャル分布

## (2) 流速ベクトル・圧力分布

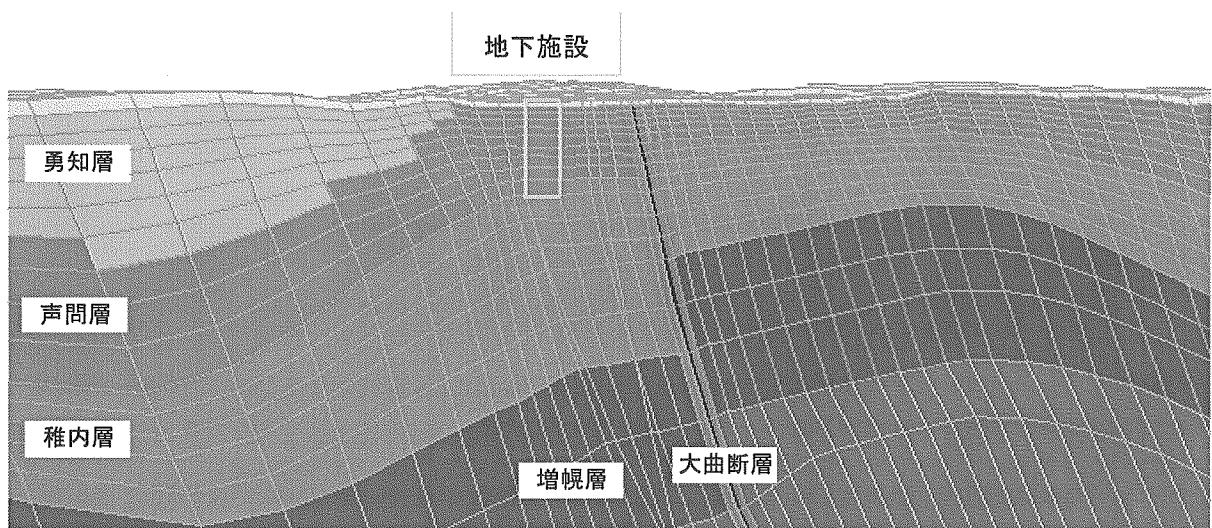
地下施設を含む東西鉛直断面内の、(a)地質構造、(b)ポテンシャル・流速ベクトル分布図、(c)圧力分布図を case1 から case5 に対し、図 3.3.2-6～図 3.3.2-11 に示す。(a)地質構造は case1 から case5 に対し同じ図を示している。流速ベクトルは流向だけを示し、流速の大きさは示していない。圧力分布図で値が 0.0 に該当する圧力水頭コンタ区分は地下水面上に該当する。



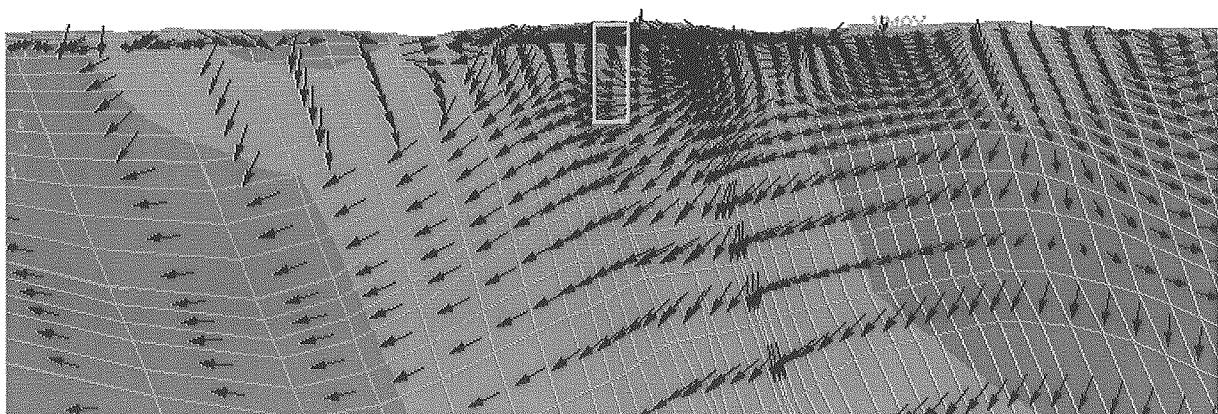
(a)ポテンシャル凡例

(b)圧力水頭凡例

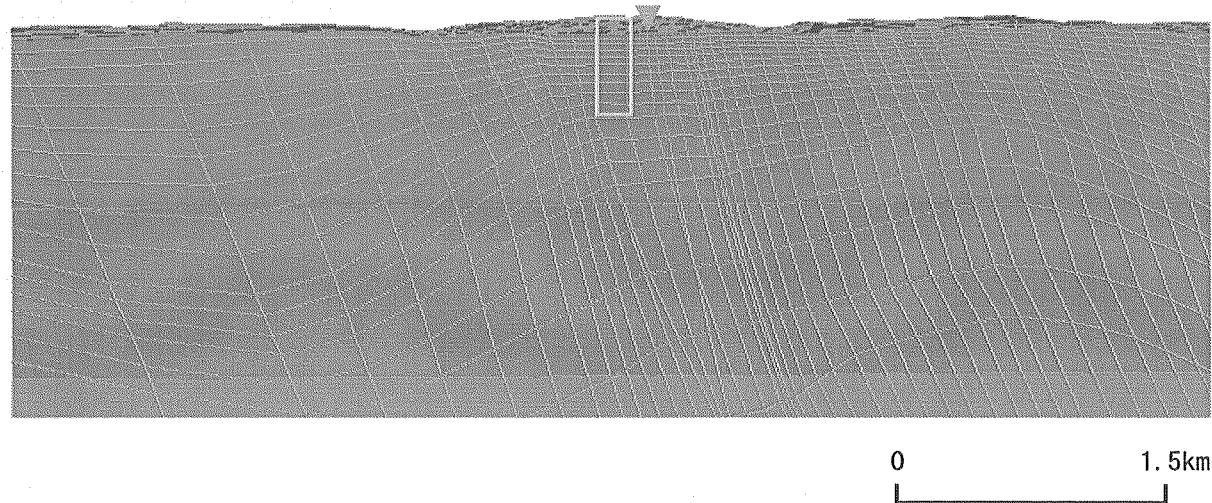
図 3.3.2-6 ポテンシャルと圧力水頭の凡例



(a) 地質区分

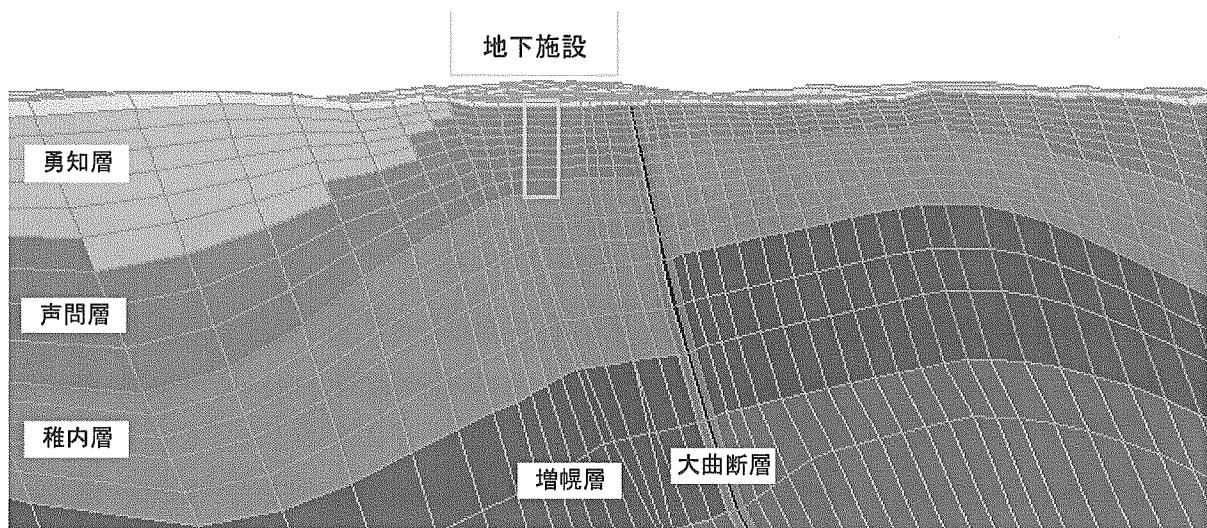


(b) ポテンシャルコンタ・流速ベクトル

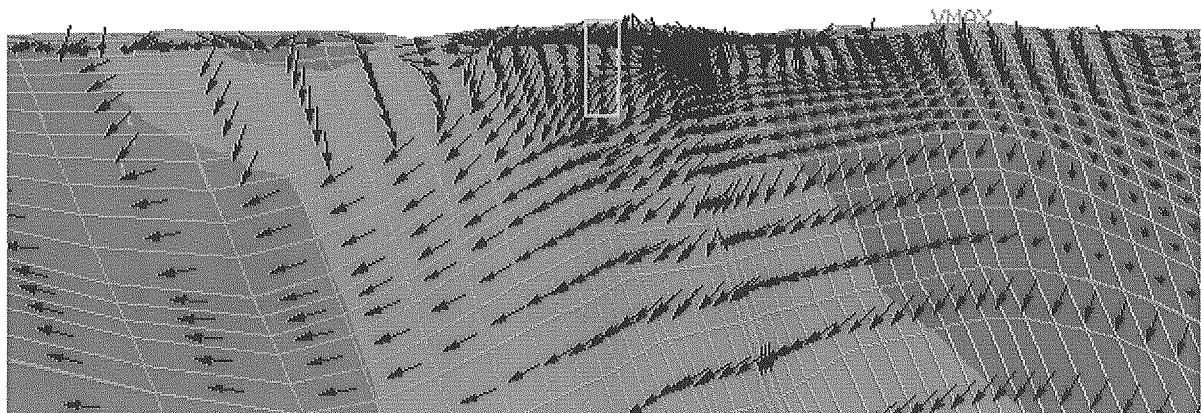


(c) 壓力水頭コンタ

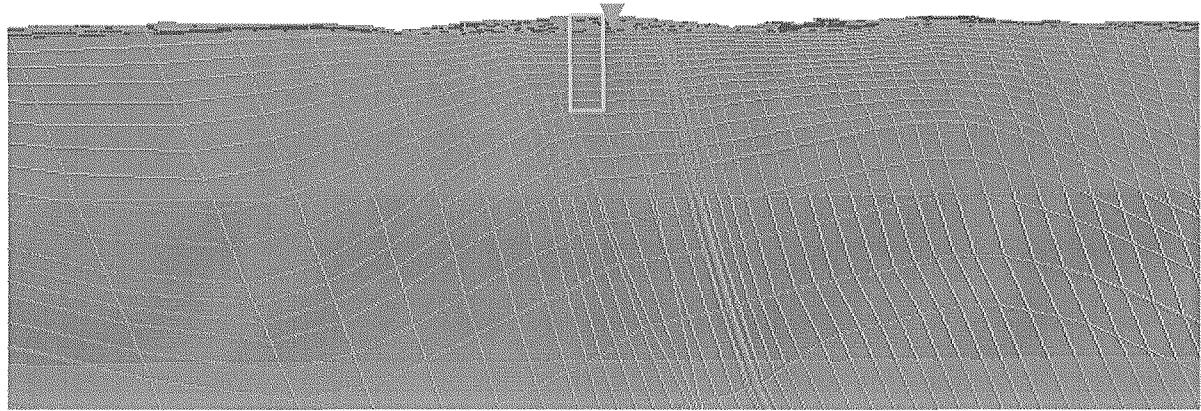
図 3.3.2-7 case1 の地下施設付近の拡大図



(a) 地質区分



(b) ポテンシャルコンタ・流速ベクトル



0 1.5km

(c) 圧力水頭コンタ

図 3.3.2-8 case2 の地下施設付近の拡大図

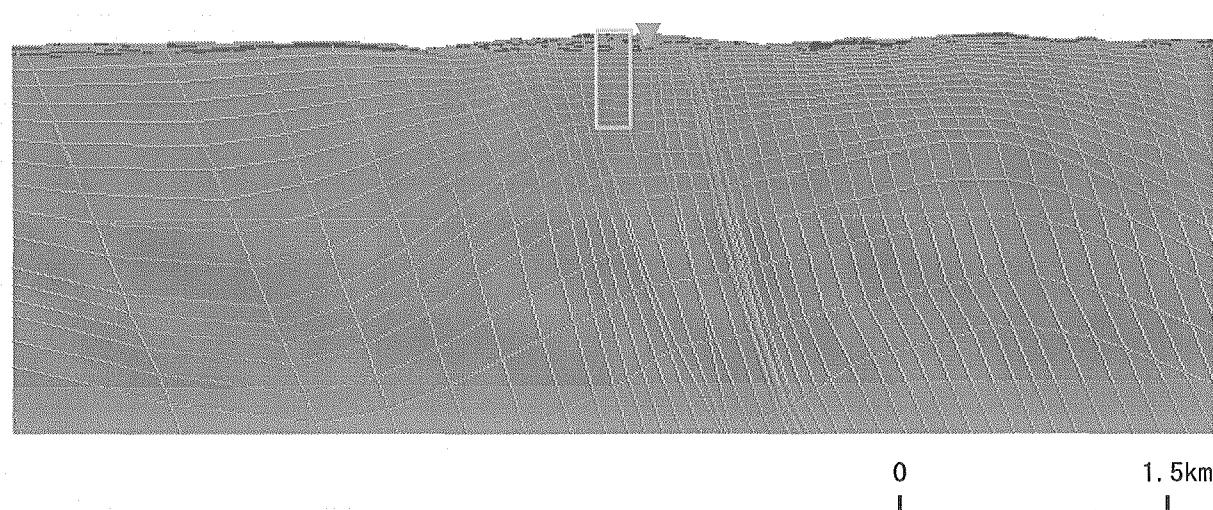
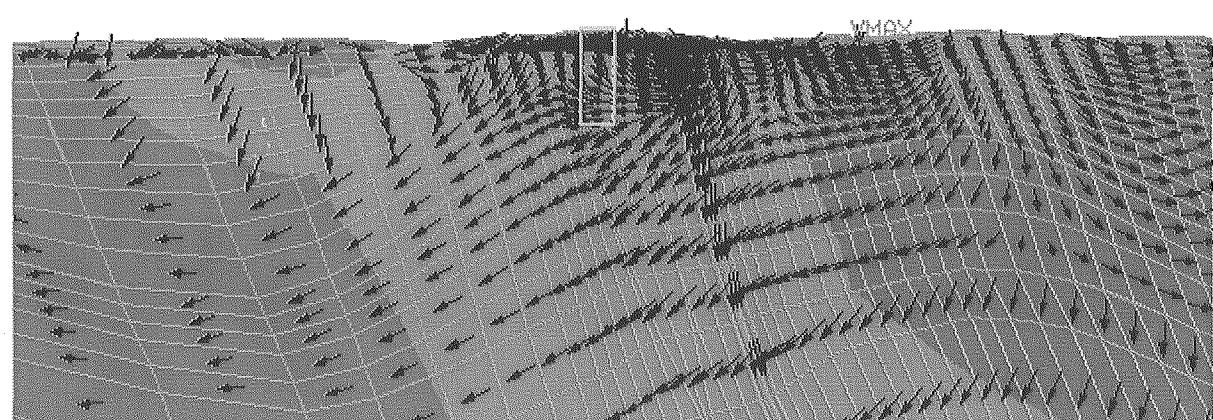
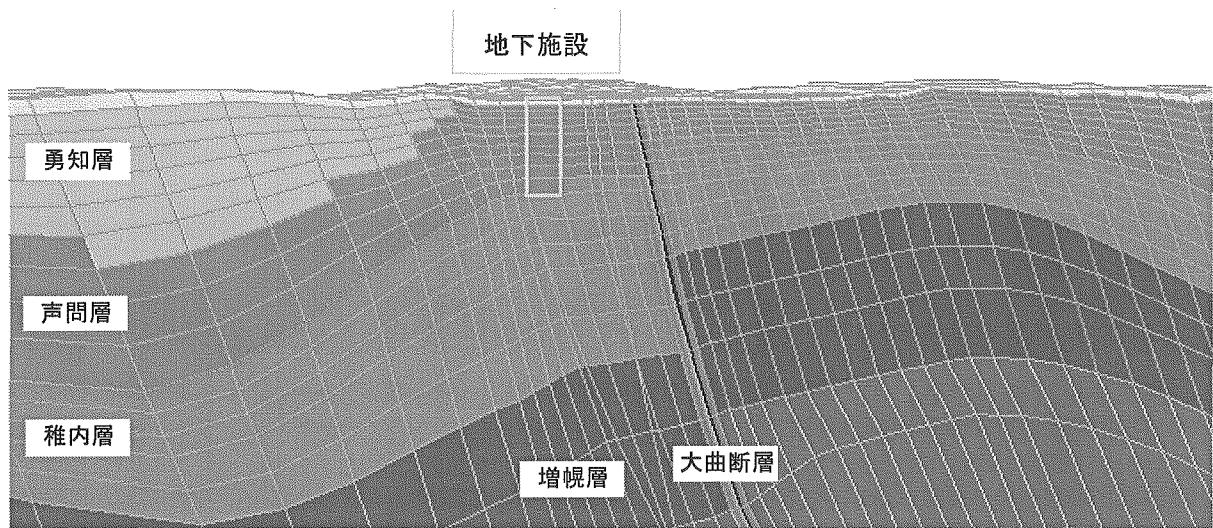


図 3.3.2-9 case3 の地下施設付近の拡大図

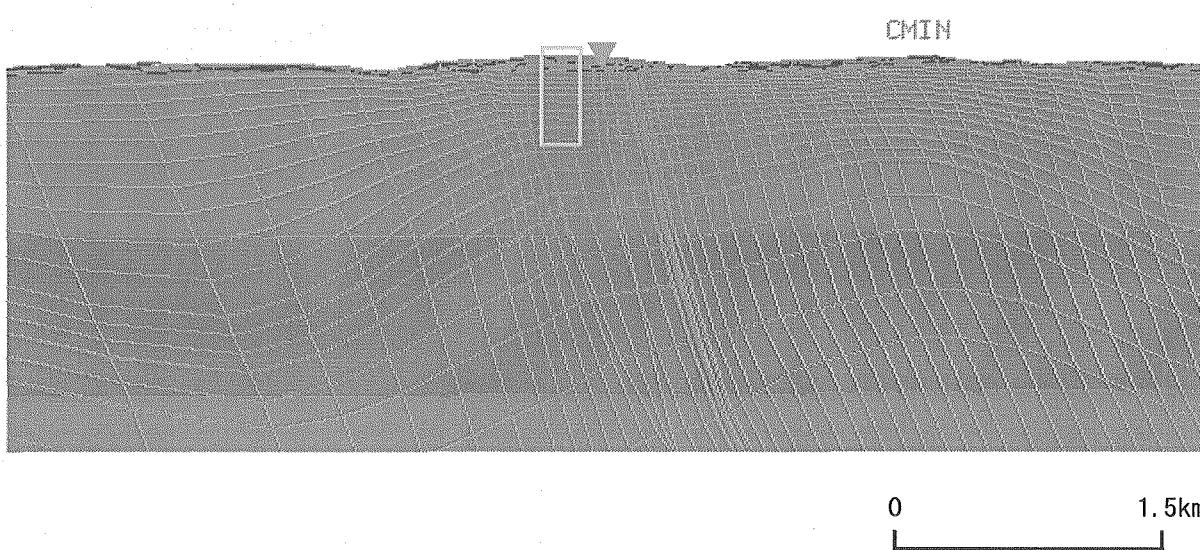
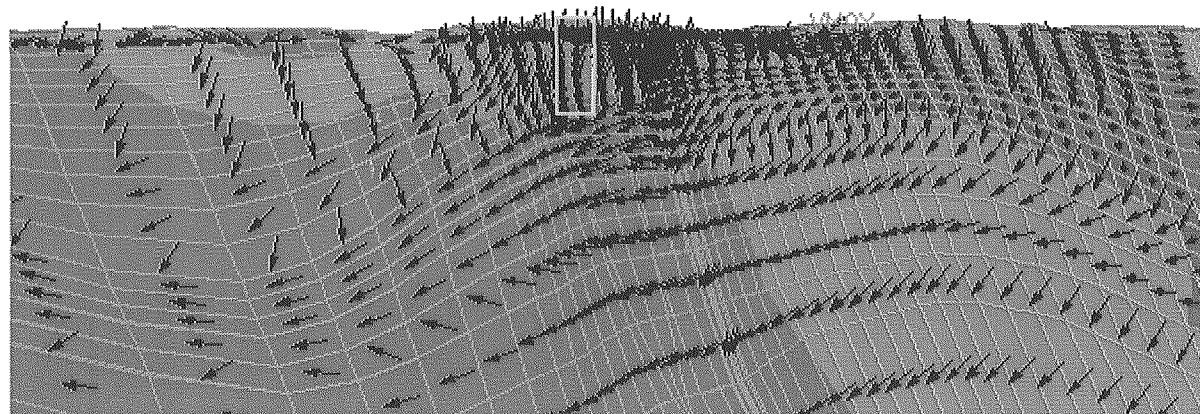
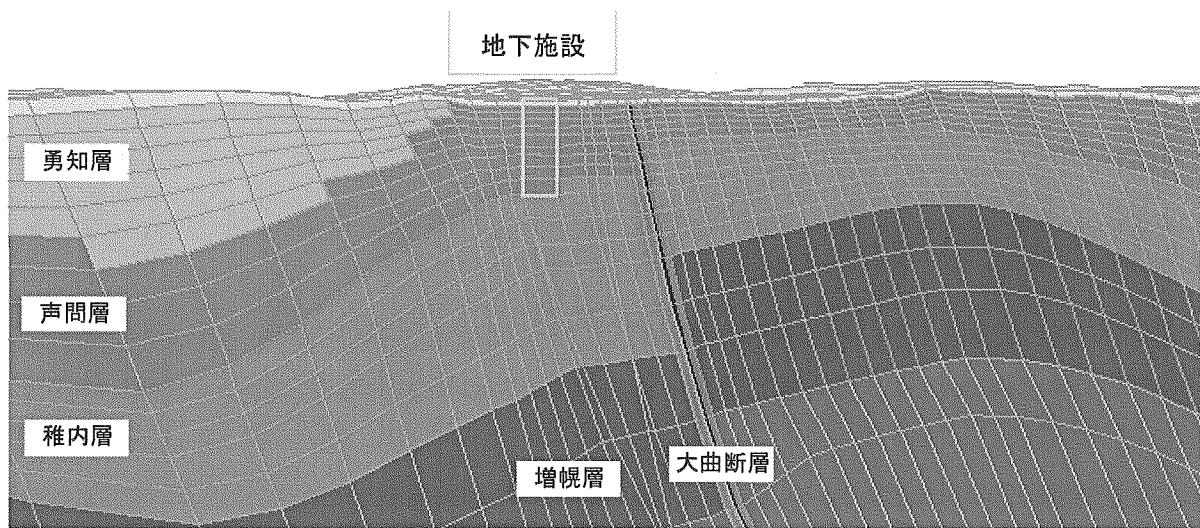
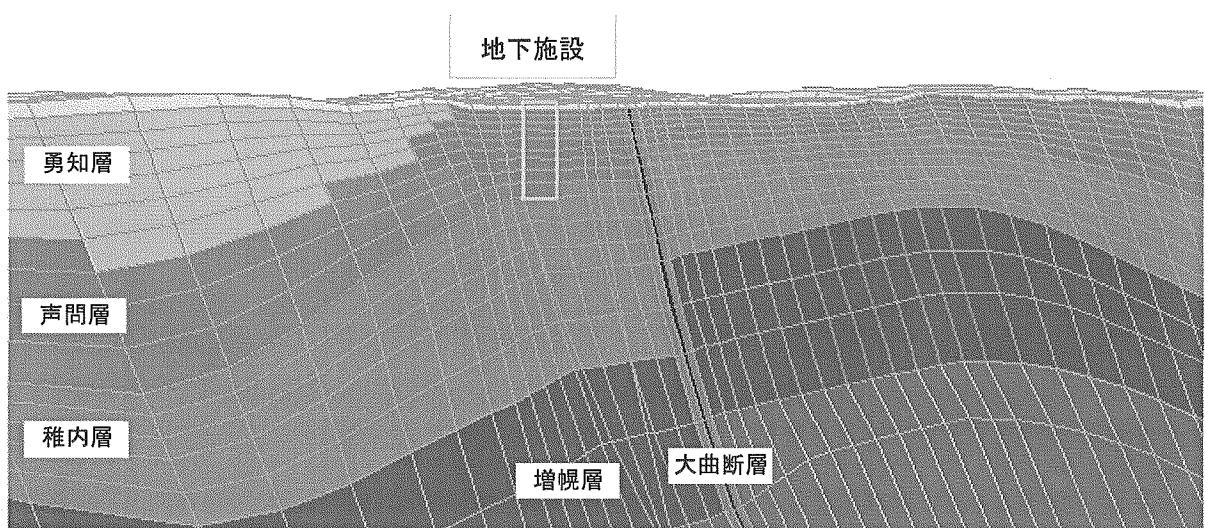
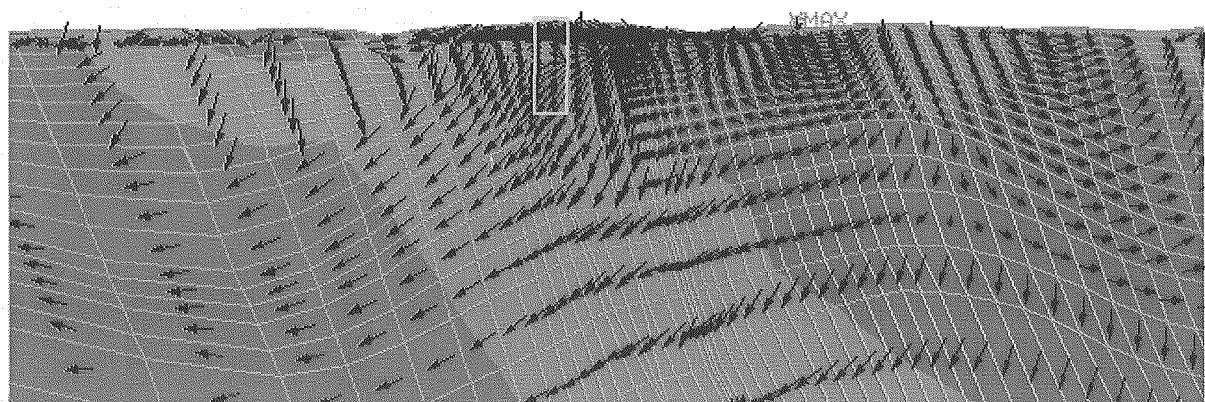


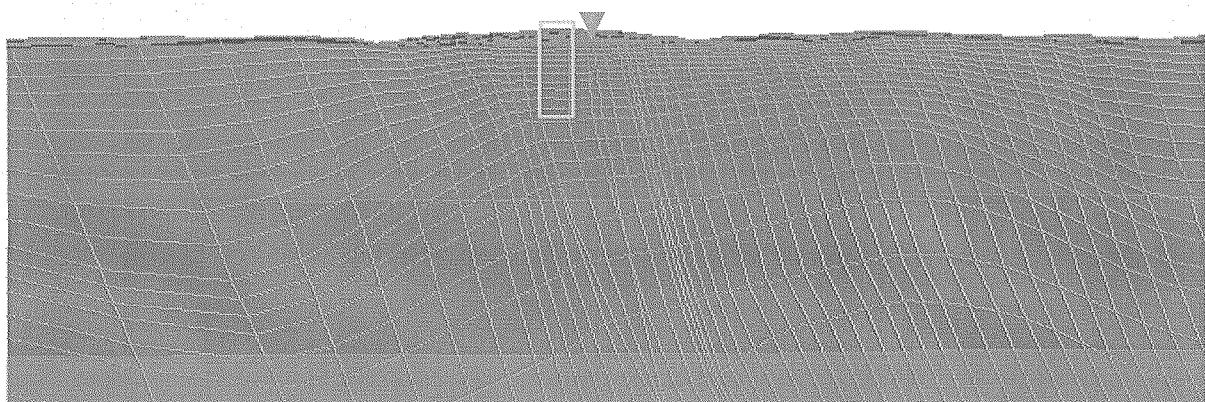
図 3.3.2-10 case4 の地下施設付近の拡大図



(a) 地質区分



(b) ポテンシャルコンタ・流速ベクトル



0                    1.5km

(c) 圧力水頭コンタ

図 3.3.2-11 case5 の地下施設付近の拡大図

(3) 水収支観測流域 P-1, P-2, P-3, P-1'における流入出点と流入出量

水収支観測流域の流入出量解析結果のまとめとして、表 3.3.2-1 に各流域の流入出量、表 3.3.2-2 には各流域の単位面積当たりの流入出量、表 3.3.2-3 には各流域の単位面積当たりの水収支（+ 値は涵養量相当）を示す。また、各流域の流入点、流出点の分布を図 3.3.2-12～図 3.3.2-18 に示す。水収支には境界条件として設定する涵養量の影響が大きいと考えられるため case1 に対して  $r=0.1\text{mm/day}$  と  $r=2.0\text{mm/day}$  の解析ケースを追加している。

表 3.3.2-1 各流域の流入出量 ( $\text{m}^3/\text{day}$ )

	area(km <sup>2</sup> )	case1 reference	case2 wk=1e-7	case3 wk=1e-9	case4 depth	case5 omF=1e-10	case1(r=0.1) r=0.1mm/day	case1(r=2) r=2.0mm/day
P-1	3.89	In	2615	2616	2614	2650	2615	363
		Out	-2389	-2348	-2406	-2241	-2389	-158
P-2	20.91	In	14620	14626	14618	14731	14620	2038
		Out	-13383	-13375	-13379	-13038	-13384	-1489
P-1'	4.80	In	2429	2440	2421	2619	2421	389
		Out	-2769	-2694	-2767	-2323	-2785	-428
P-3	9.84	In	6396	6544	6382	7059	6400	952
		Out	-4770	-4646	-4801	-4124	-4759	-265
								-8425

表 3.3.2-2 各流域の単位面積当たり流入出量 ( $\text{mm/day}$ )

	area(km <sup>2</sup> )	case1 reference	case2 wk=1e-7	case3 wk=1e-9	case4 depth	case5 omF=1e-10	case1(r=0.1) r=0.1mm/day	case1(r=2) r=2.0mm/day
P-1	3.89	In	0.67	0.67	0.67	0.68	0.67	0.09
		Out	-0.61	-0.60	-0.62	-0.58	-0.61	-0.04
P-2	20.91	In	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.10
		Out	-0.64	-0.64	-0.64	-0.62	-0.64	-0.07
P-1'	4.80	In	0.51	0.51	0.50	0.55	0.50	0.08
		Out	-0.58	-0.56	-0.58	-0.48	-0.58	-0.09
P-3	9.84	In	0.65	0.67	0.65	0.72	0.65	0.10
		Out	-0.48	-0.47	-0.49	-0.42	-0.48	-0.03
								-0.86

表 3.3.2-3 各流域の単位面積当たり水収支 ( $\text{mm/day}$ )

	area(km <sup>2</sup> )	case1 reference	case2 wk=1e-7	case3 wk=1e-9	case4 depth	case5 omF=1e-10	case1(r=0.1) r=0.1mm/day	case1(r=2) r=2.0mm/day
P-1	3.89		0.06	0.07	0.05	0.11	0.06	0.05
P-2	20.91		0.06	0.06	0.06	0.08	0.06	0.03
P-1'	4.80		-0.07	-0.05	-0.07	0.06	-0.08	-0.01
P-3	9.84		0.17	0.19	0.16	0.30	0.17	0.07
								0.19

+ 値は流入（涵養流域）、- 値は流出（流出流域）

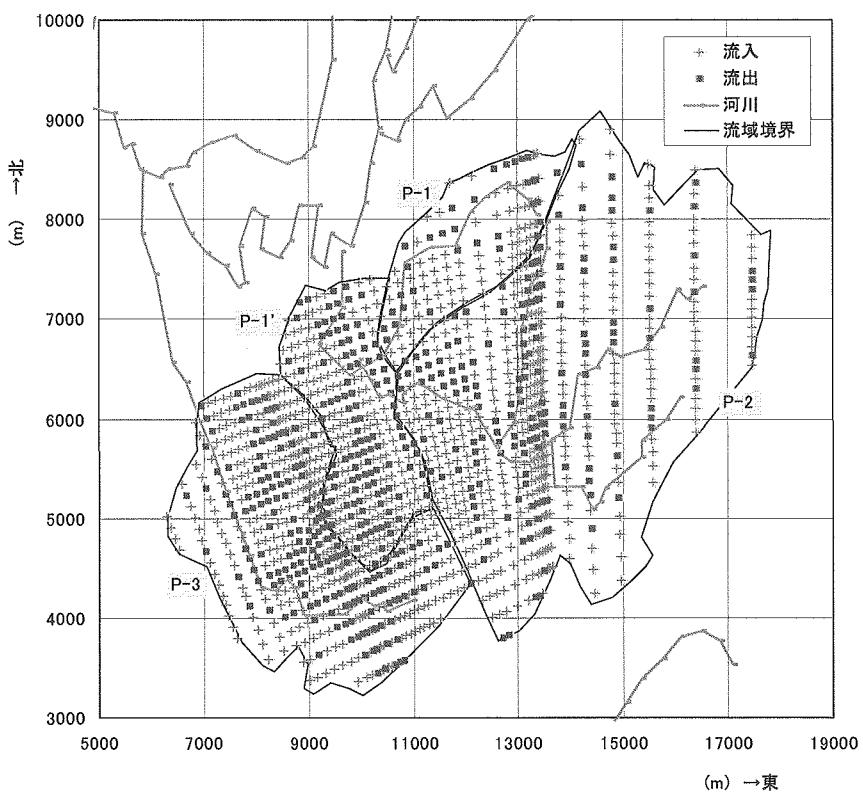


図 3.3.2-12 調査流域内の流入出点の分布 case1

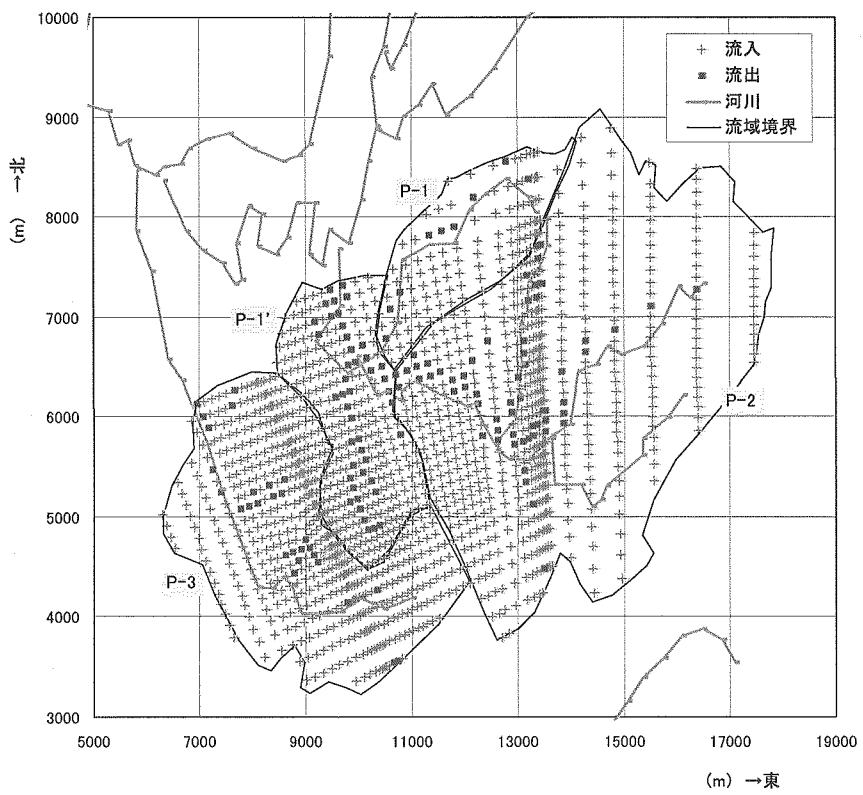


図 3.3.2-13 調査流域内の流入出点の分布 case1 ( $r=0.1\text{mm/day}$ )

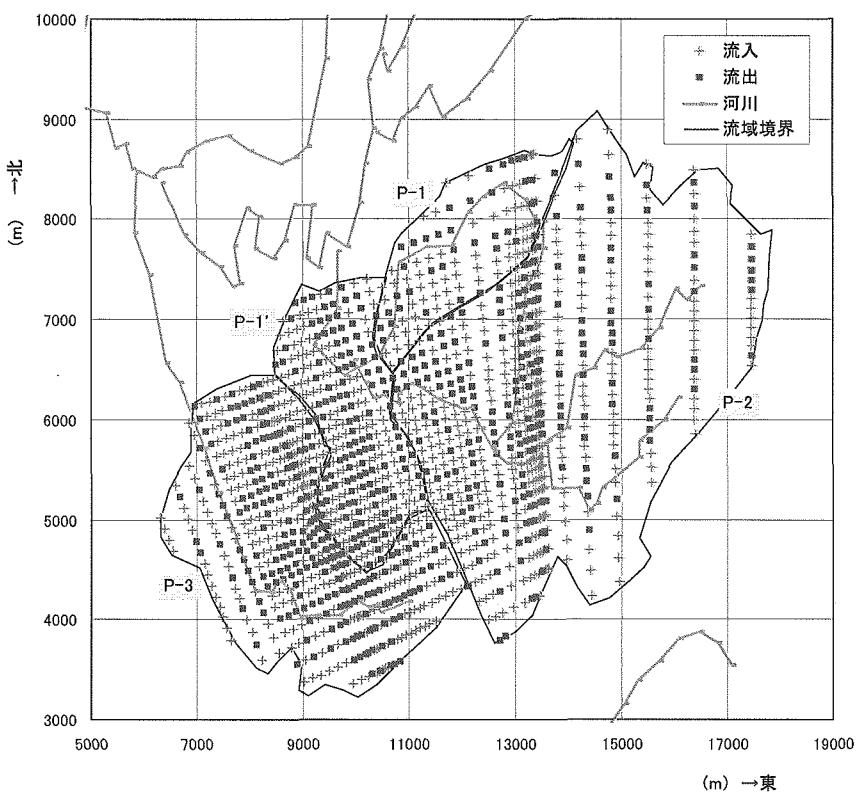


図 3.3.2-14 調査流域内の流入出点の分布 case1 ( $r=2\text{mm/day}$ )

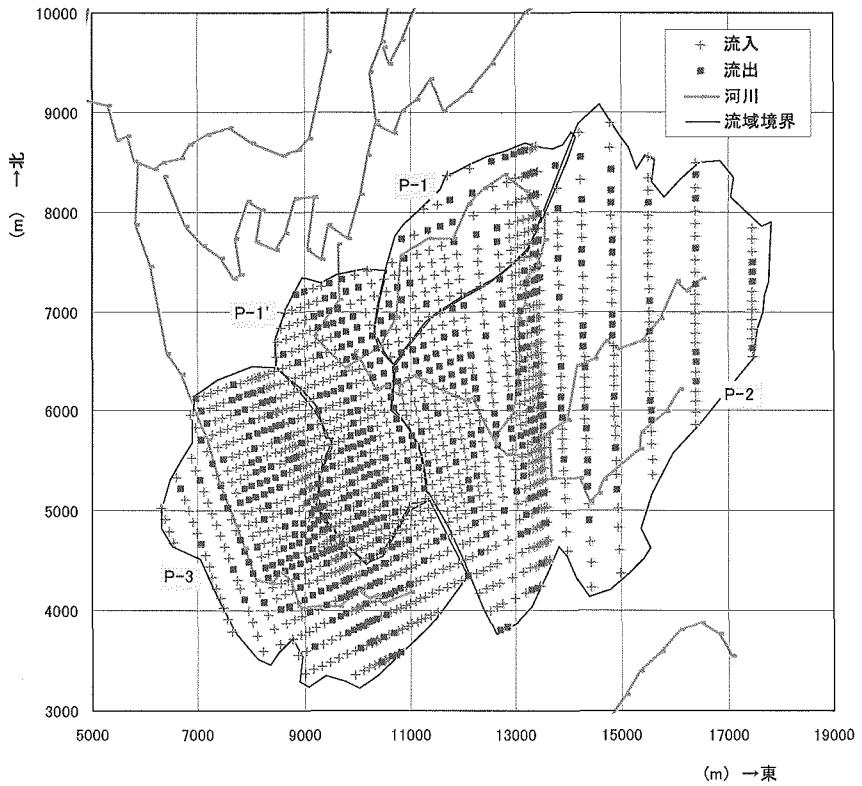


図 3.3.2-15 調査流域内の流入出点の分布 case2

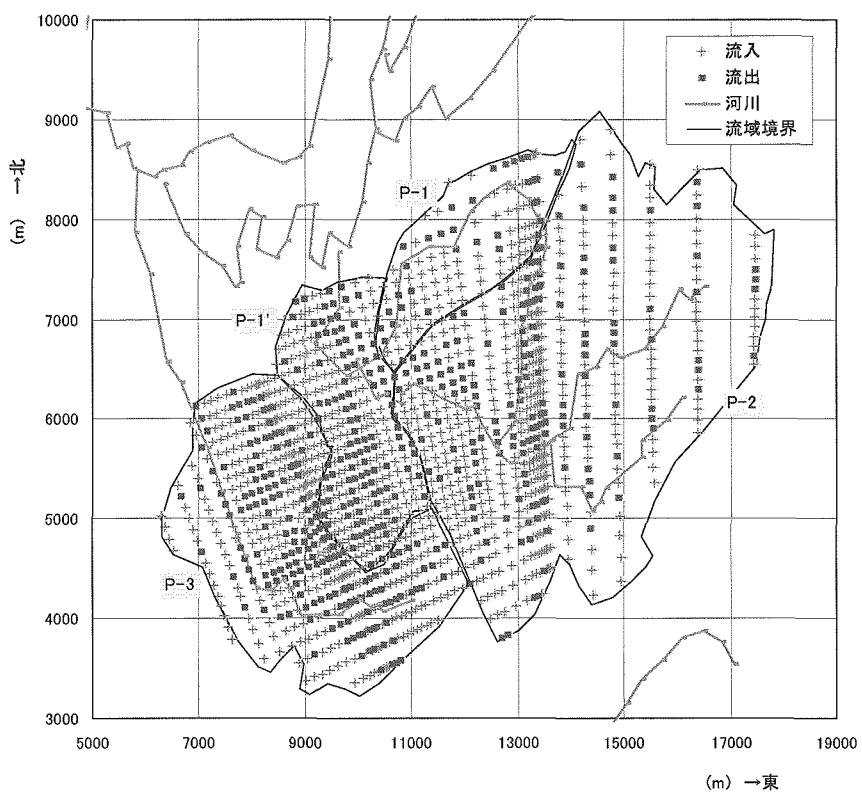


図 3.3.2-16 調査流域内の流入出点の分布 case3

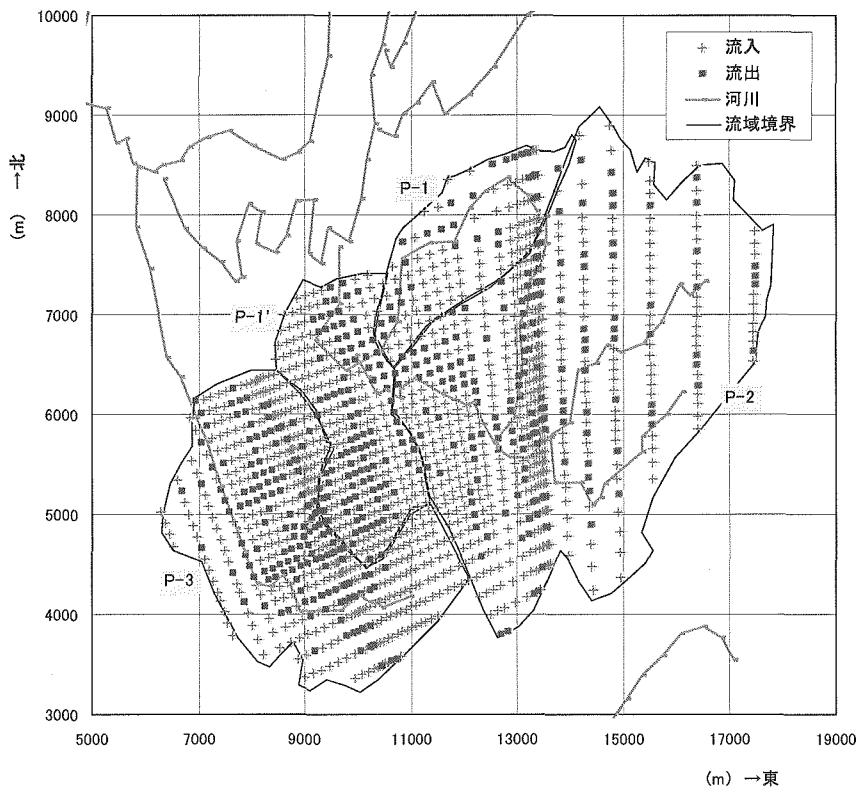


図 3.3.2-17 調査流域内の流入出点の分布 case4

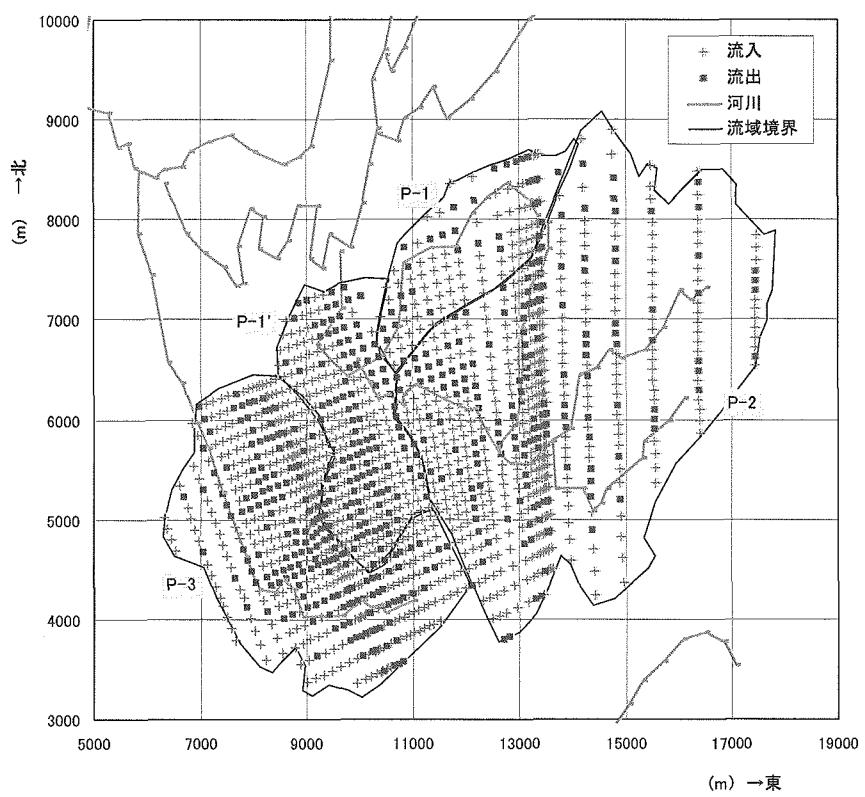


図 3.3.2-18 調査流域内の流入出点の分布 case5

#### (4) HDB 孔への地下水起源を推定する逆方向の粒子追跡解析結果

解析領域内に存在する HDB1, HDB3, HDB4, HDB5, HDB6, HDB7, HDB8 孔や豊富温泉で得られる地下水の起源やその地下水年代を推定する目的で、調査等に該当する各地点を視点とした、地下水流动を遡る逆方向の粒子追跡解析を実施した。

粒子追跡解析では、評価点（粒子追跡解析の起点）の含まれる要素中心でのダルシーフlow速（解析結果として得られている）を参照し、ダルシーフlow速を間隙率で除して実flow速を算定する。モデルスケール、要素寸法を考慮した適切な移行距離となるステップ時間を設定し、評価点からの移行ベクトルを算定する。この移行ベクトル成分を評価点の座標成分に加算し、時ステップの評価点座標を得る。この繰り返しである評価点からの地下水の移行経路、移行に要する時間を算定する。以下、その結果を示す。

表 3.3.2-2 に各地点のモデル内座標と算定された地下水年代を示す。図 3.3.2-19～図 3.3.2-23 に case1 から case5 での粒子の軌跡（地下水流动系路）を示す。

表 3.3.2-2 各地点のモデル内座標と算定された地下水年代

	投入点			case1	case2	case3	case4	case5
	x(m)	y(m)	EL(m)	year	year	year	year	year
HDB-1	9334	4276	0	52262	28193	52262	6512	26143
HDB-1	9334	4276	-100	89953	55985	90886	7396	36904
HDB-1	9334	4276	-200	122649	69636	121283	13251	60382
HDB-1	9334	4276	-300	133942	86627	128932	17078	83954
HDB-1	9334	4276	-500	172292	46899	893394	8767	130307
HDB-3	8756	4748	0	130386	169089	142380	20456	81439
HDB-3	8756	4748	-100	189318	125495	196734	14092	118092
HDB-3	8756	4748	-200	186841	123089	191012	19799	99240
HDB-3	8756	4748	-300	208411	148647	220009	26684	144747
HDB-3	8756	4748	-500	267813	151807	894717	12285	174170
HDB-4	10136	5900	0	102244	38296	186933	14407	109050
HDB-4	10136	5900	-100	142201	31973	813820	3640	148763
HDB-4	10136	5900	-200	166416	31136	1420427	7264	186192
HDB-4	10136	5900	-300	233368	33015	2070197	57069	277647
HDB-4	10136	5900	-500	257310	39556	2895638	1101833	323809
HDB-5	10510	5330	0	36464	26754	42877	10462	36569
HDB-5	10510	5330	-100	49643	11706	302319	1820	53024
HDB-5	10510	5330	-200	59328	14965	366926	2537	60604
HDB-5	10510	5330	-300	64831	15674	488054	89694	71448
HDB-5	10510	5330	-500	104043	22526	773705	1548461	107873
HDB-6	9019	4738	0	183903	124279	258218	25806	159590
HDB-6	9019	4738	-100	194964	136725	525317	13220	122483
HDB-6	9019	4738	-200	211722	141046	531236	19363	137916
HDB-6	9019	4738	-300	227075	150852	587624	22450	140341
HDB-6	9019	4738	-500	251149	61344	1677538	7798	187509
HDB-7	7717	5101	0	1549633	907555	1194024	338889	711913
HDB-7	7717	5101	-100	1210659	1297708	1219452	466291	1432188
HDB-7	7717	5101	-200	1962312	2411863	2002545	449728	1529265
HDB-7	7717	5101	-300	913283	732234	869462	347621	633619
HDB-7	7717	5101	-500	667949	633602	634978	78222	479962
HDB-8	9683	5392	0	53723	55051	61934	8318	101813
HDB-8	9683	5392	-100	82268	156493	86830	29569	130435
HDB-8	9683	5392	-200	103586	47281	354181	2758	167963
HDB-8	9683	5392	-300	164589	40966	874427	3666	335488
HDB-8	9683	5392	-500	462291	40354	2236404	178655	1443852
TOYOTOMI	7250	7850	0	173158	35631	577811	38677	221634
TOYOTOMI	7250	7850	-100	291425	46959	2907310	52157	894519
TOYOTOMI	7250	7850	-200	267770	43638	3207278	37403	367090
TOYOTOMI	7250	7850	-300	279154	40136	3590839	33972	708634
TOYOTOMI	7250	7850	-500	295191	145275	5977138	184326	8381789
TOYOTOMI	7250	7850	-800	2740654	3558382	5068524	100473447	10857552
TOYOTOMI	7250	7850	-1000	2631071	2419032	12387846	73712730	4609838
TOYOTOMI	7250	7850	-1200	5016759	564085	11259757	545914147	4092699

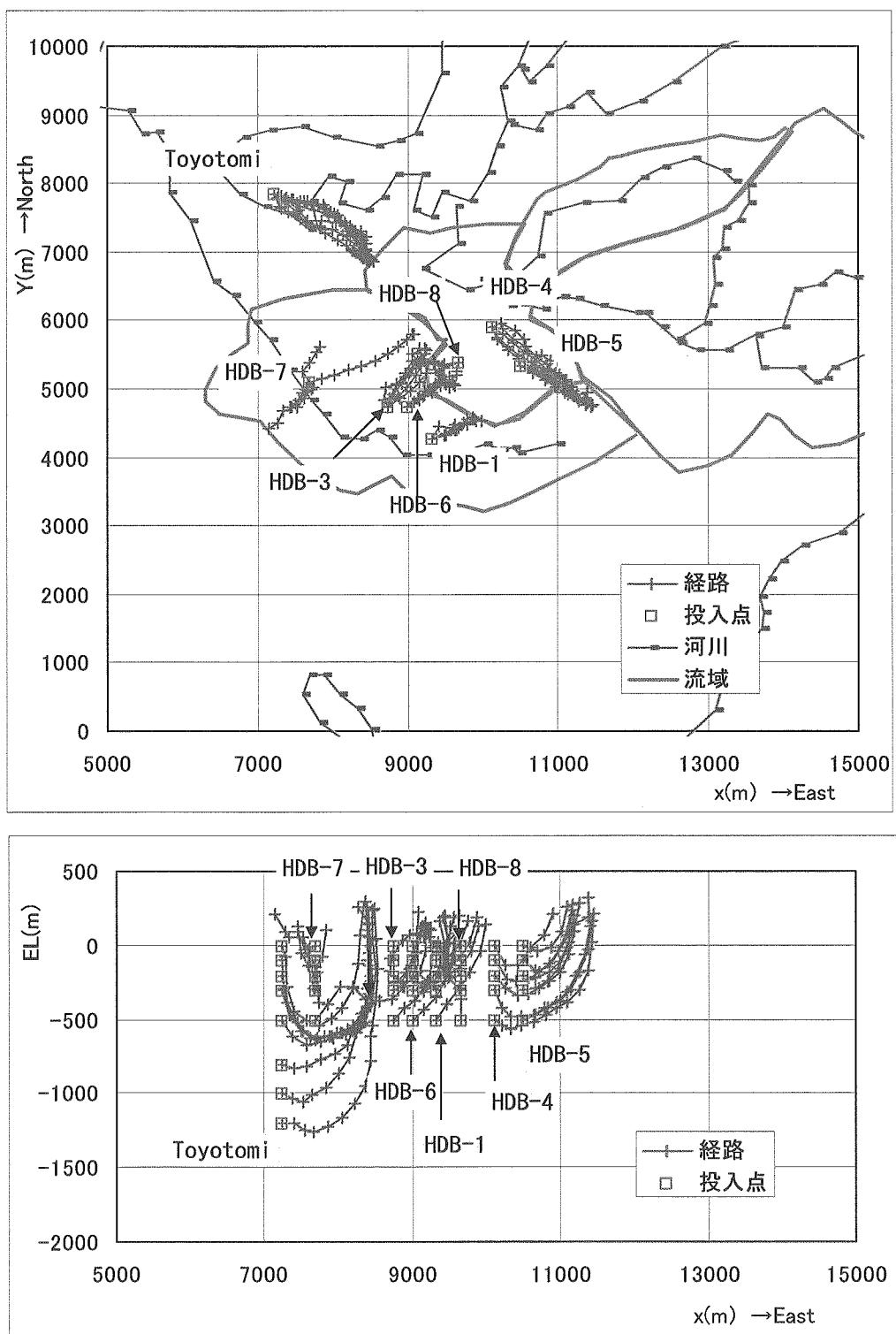


図 3.3.2-19 HDB 孔からの逆方向の粒子追跡線 (case1)

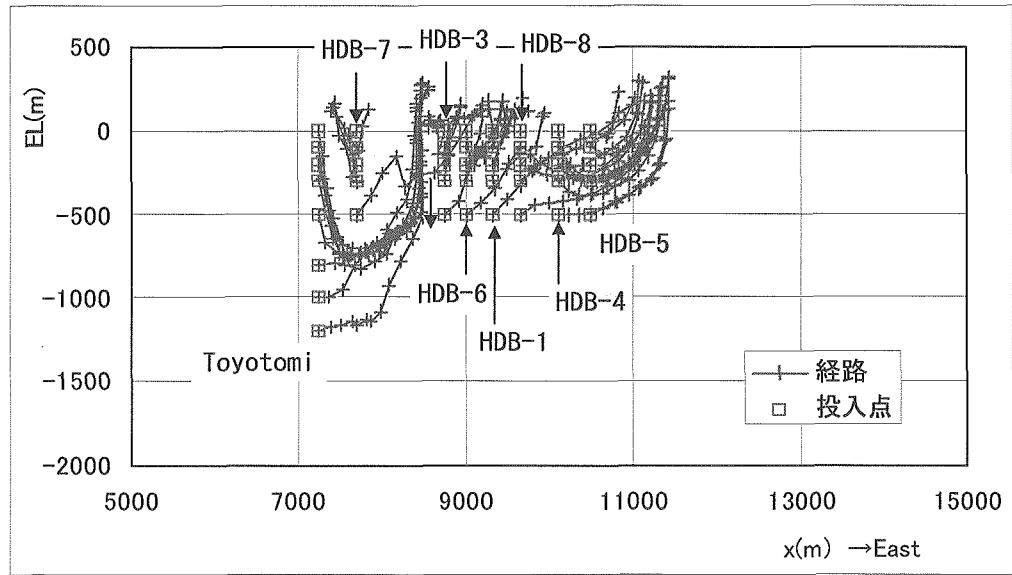
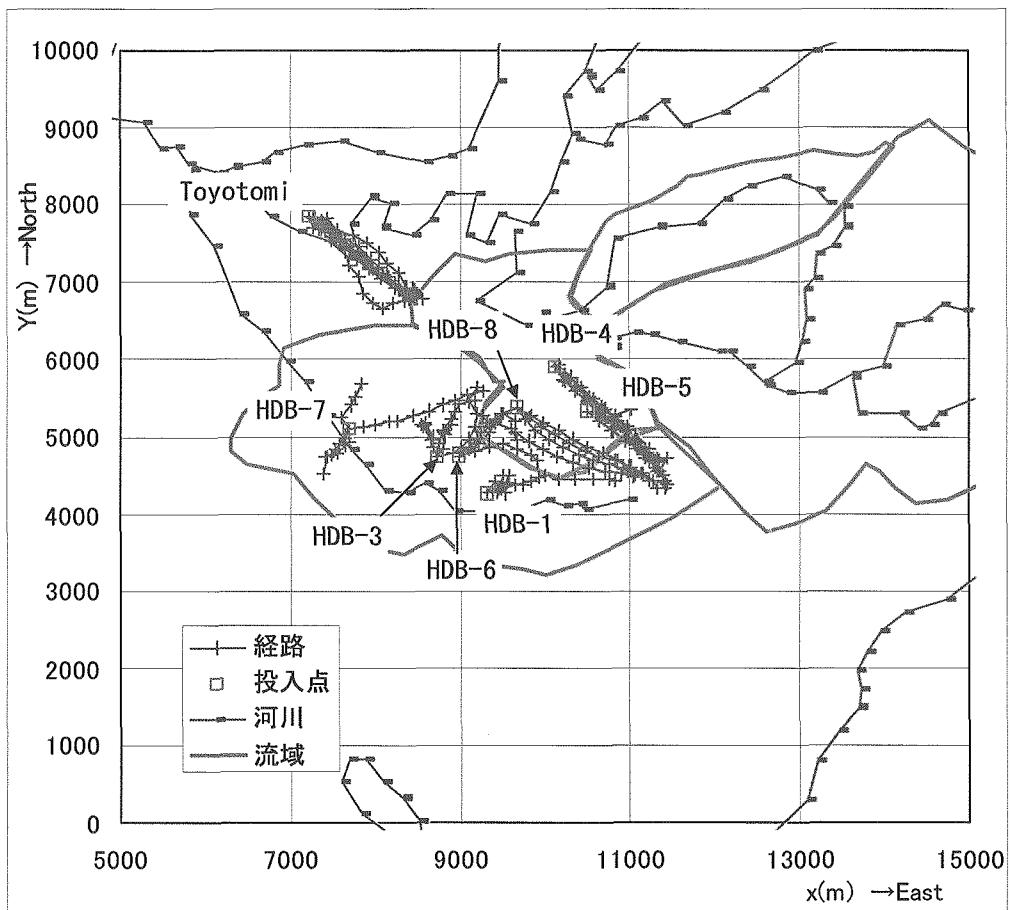


図 3.3.2-20 HDB 孔からの逆方向の粒子追跡線 (case2)

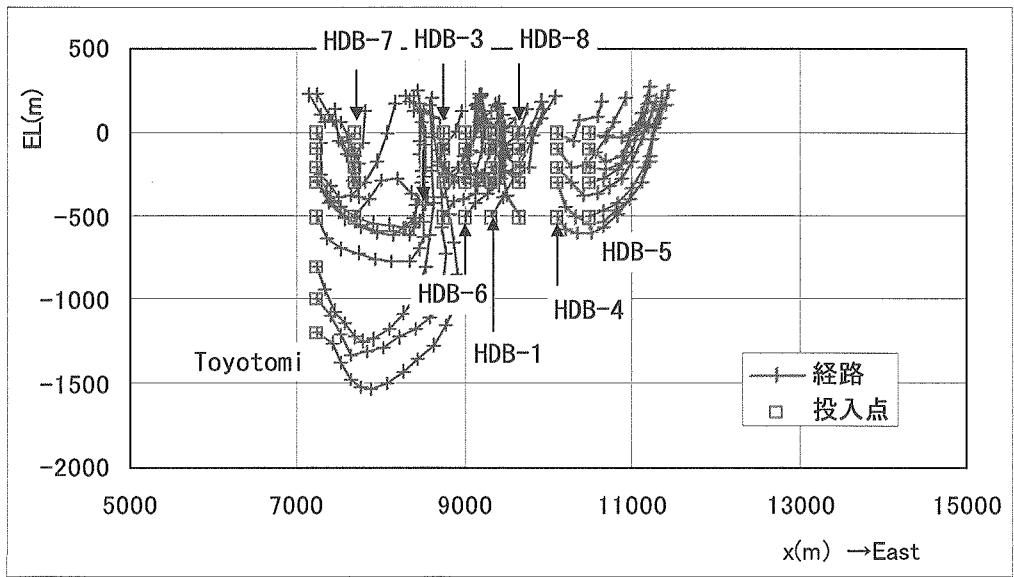
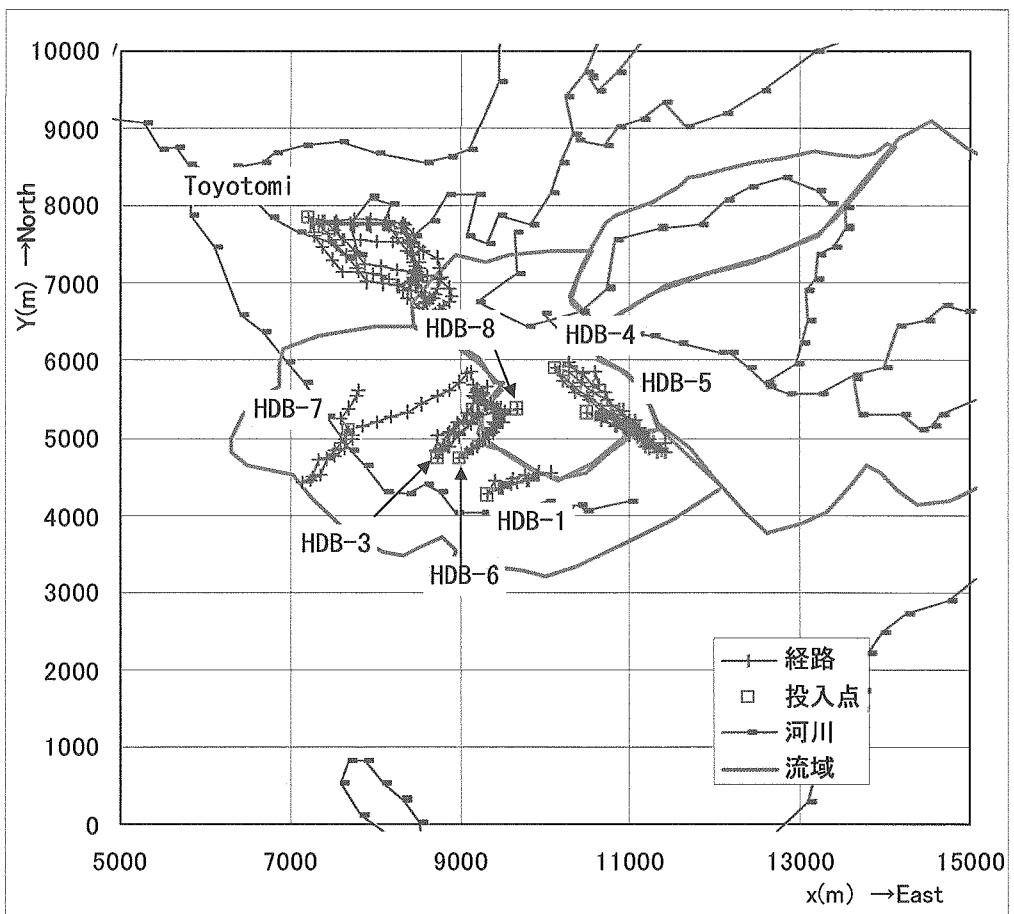


図 3.3.2-21 HDB 孔からの逆方向の粒子追跡線 (case3)

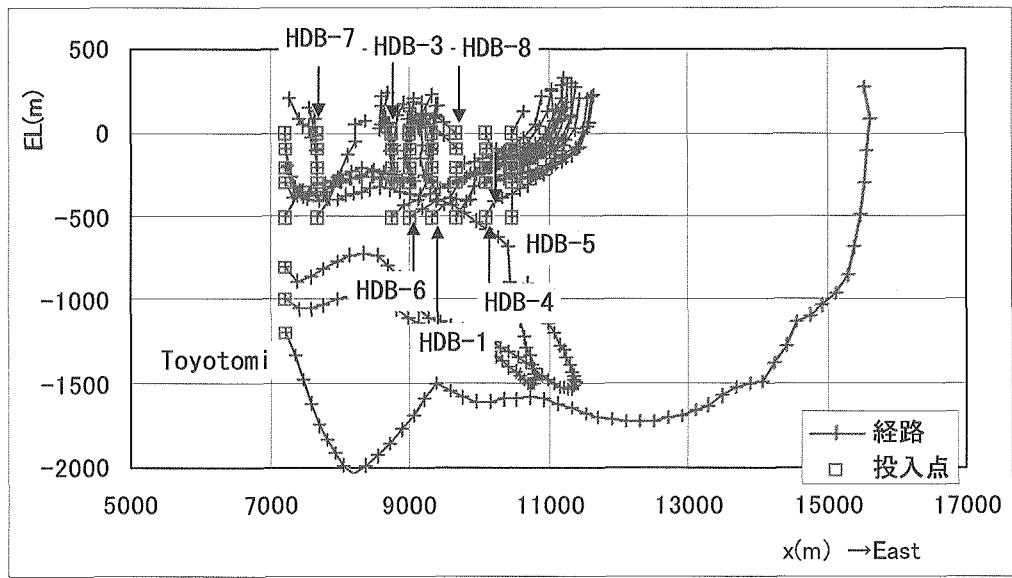
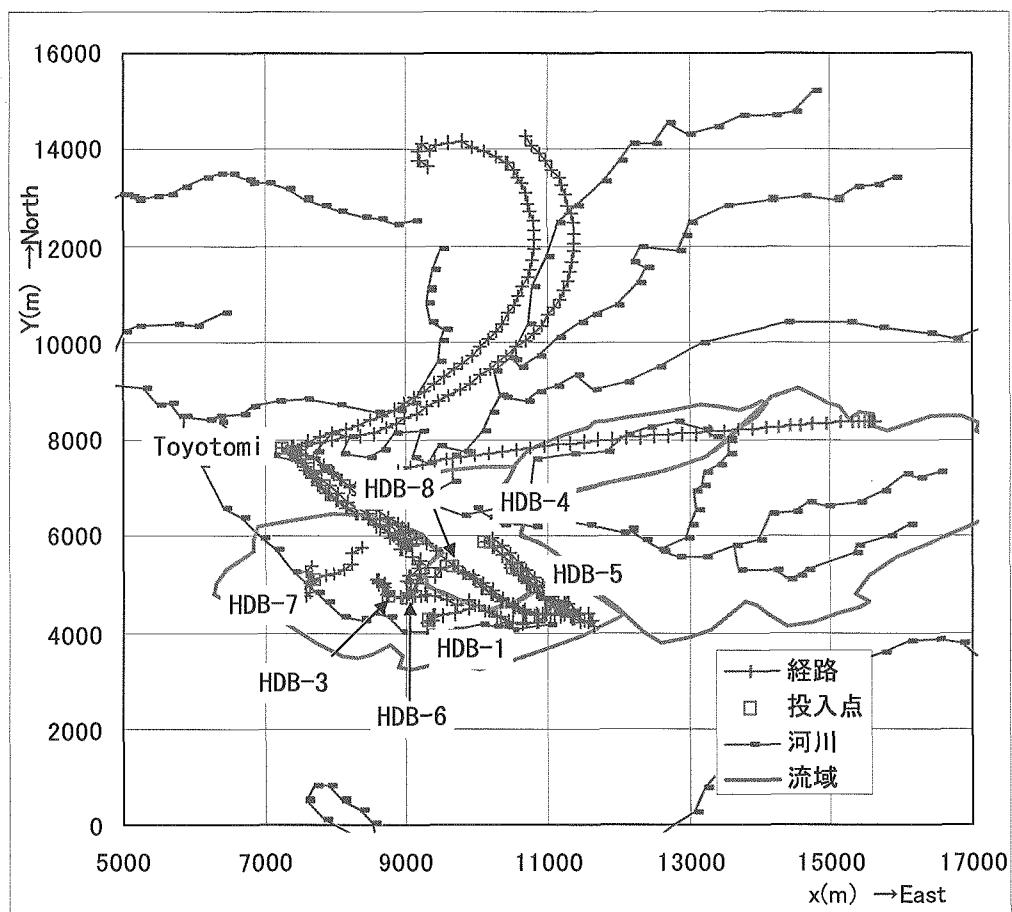


図 3.3.2-22 HDB 孔からの逆方向の粒子追跡線 (case4)

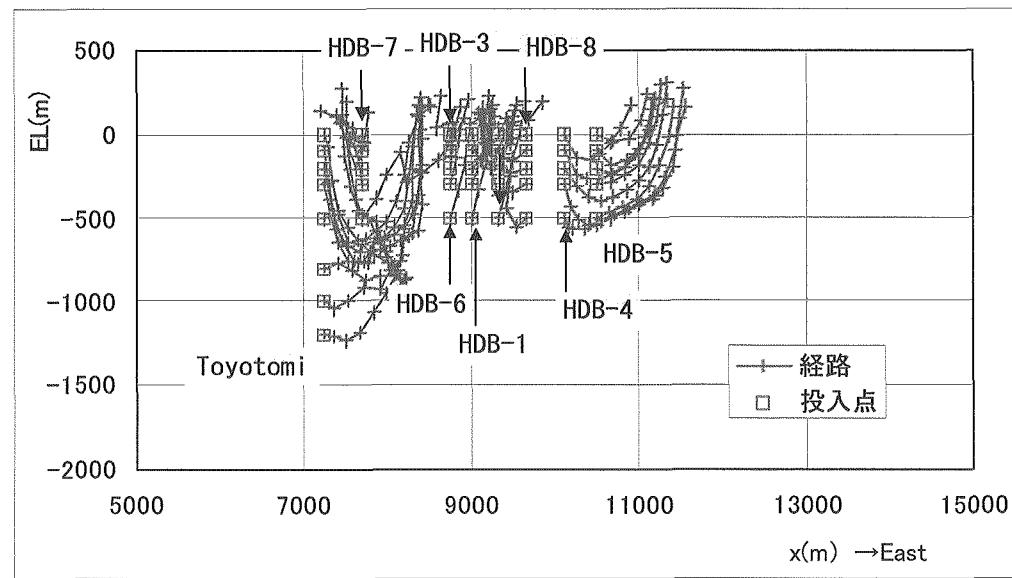
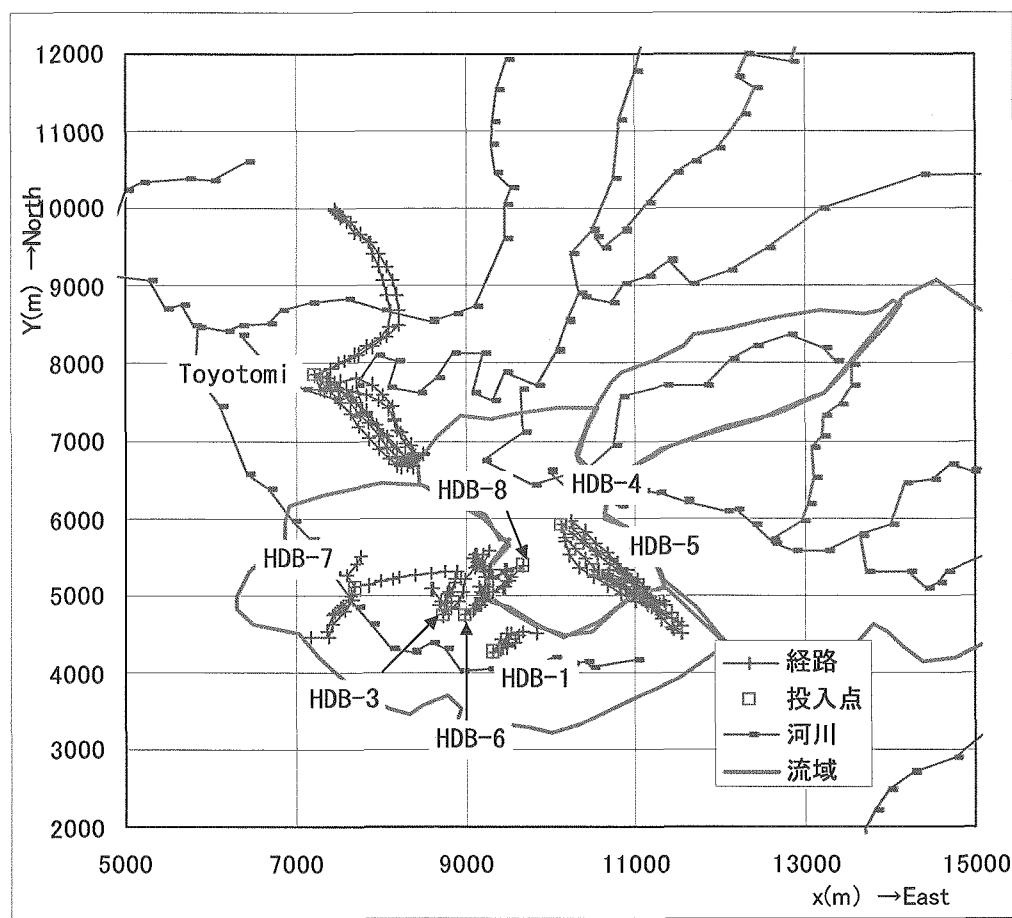


図 3.3.2-23 HDB 孔からの逆方向の粒子追跡線 (case5)

### (5) 地下施設からの地下水流动経路を示す粒子追跡解析結果

地下施設付近からの地下水流动系路を把握し、その流下時間を把握するため、地下施設からの粒子追跡解析を実施した。表 3.3.2-3 に地下施設付近着目点のモデル内座標と算定された地下水流下時間を示す。図 3.3.2-24～図 3.3.2-28 に、解析ケース case1～case5 における地下水の流下経路を示す。図 3.3.2-29 には case1～case5 の代表点（換気立坑 EL-500m）の比較図を示す。

表 3.3.2-3 各地点のモデル内座標と算定された地下水流下時間

	投入点			case1	case2	case3	case4	case5
	x(m)	y(m)	EL(m)	year	year	year	year	year
East_Shaft	8956	4804	0	15887	18590	15489	7514043	20525
East_Shaft	8956	4804	-250	2453651	1051683	3190628	4609973	3482541
East_Shaft	8956	4804	-500	2993963	2130630	4050724	349392	4092401
West_Shaft	8886	4803	0	15887	18590	15489	72273	20525
West_Shaft	8886	4803	-250	3978427	1064843	3234646	11098989	3364909
West_Shaft	8886	4803	-500	201696	926506	4845606	6562180	4001869
Venti_Shaft	8920	4862	0	15887	18590	15489	7192999	20525
Venti_Shaft	8920	4862	-250	2448376	1038930	2854406	6998529	3482179
Venti_Shaft	8920	4862	-500	2997010	2940163	6267340	12119428	4097514

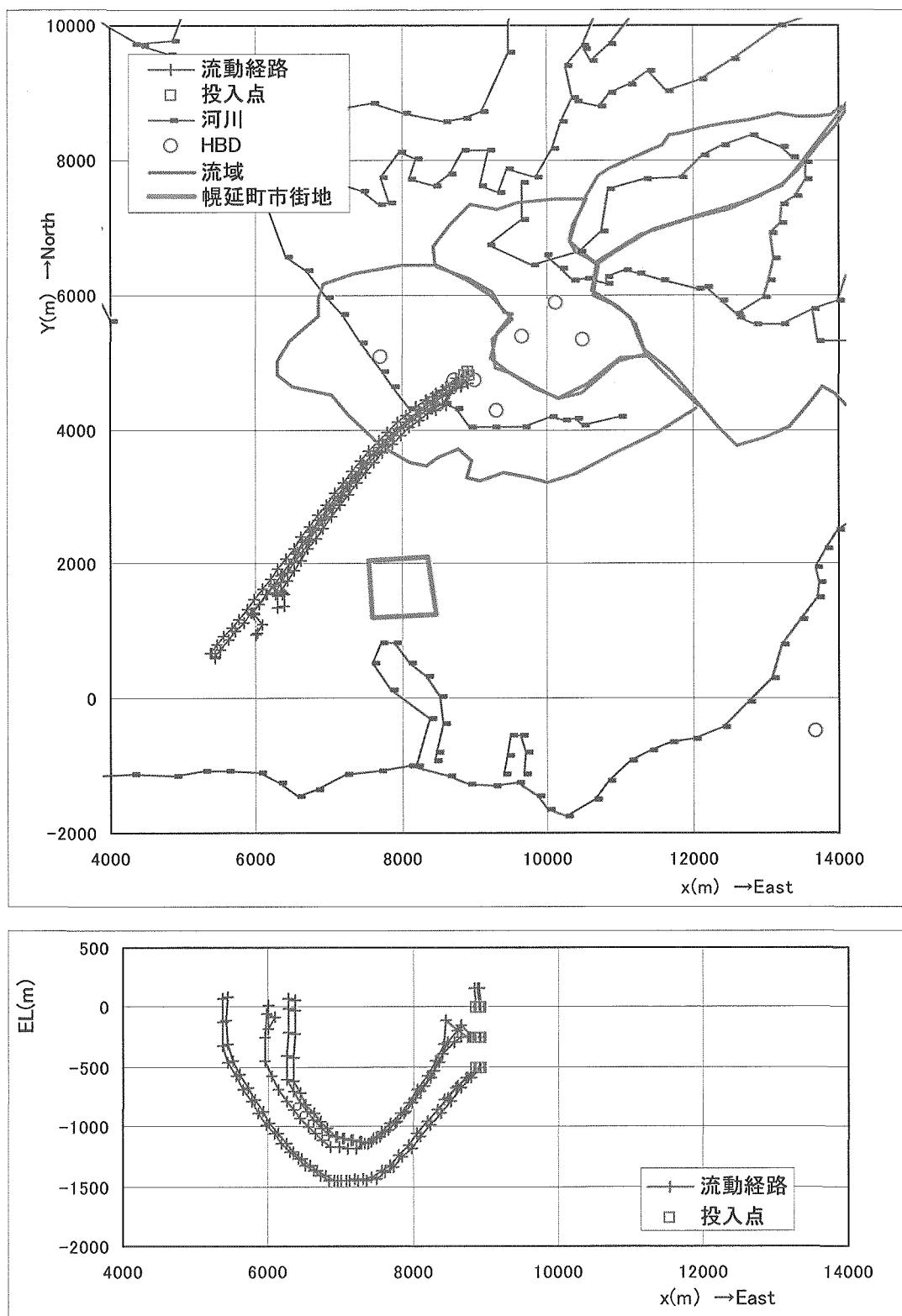


図 3.3.2-24 地下施設からの粒子追跡線 (case1)

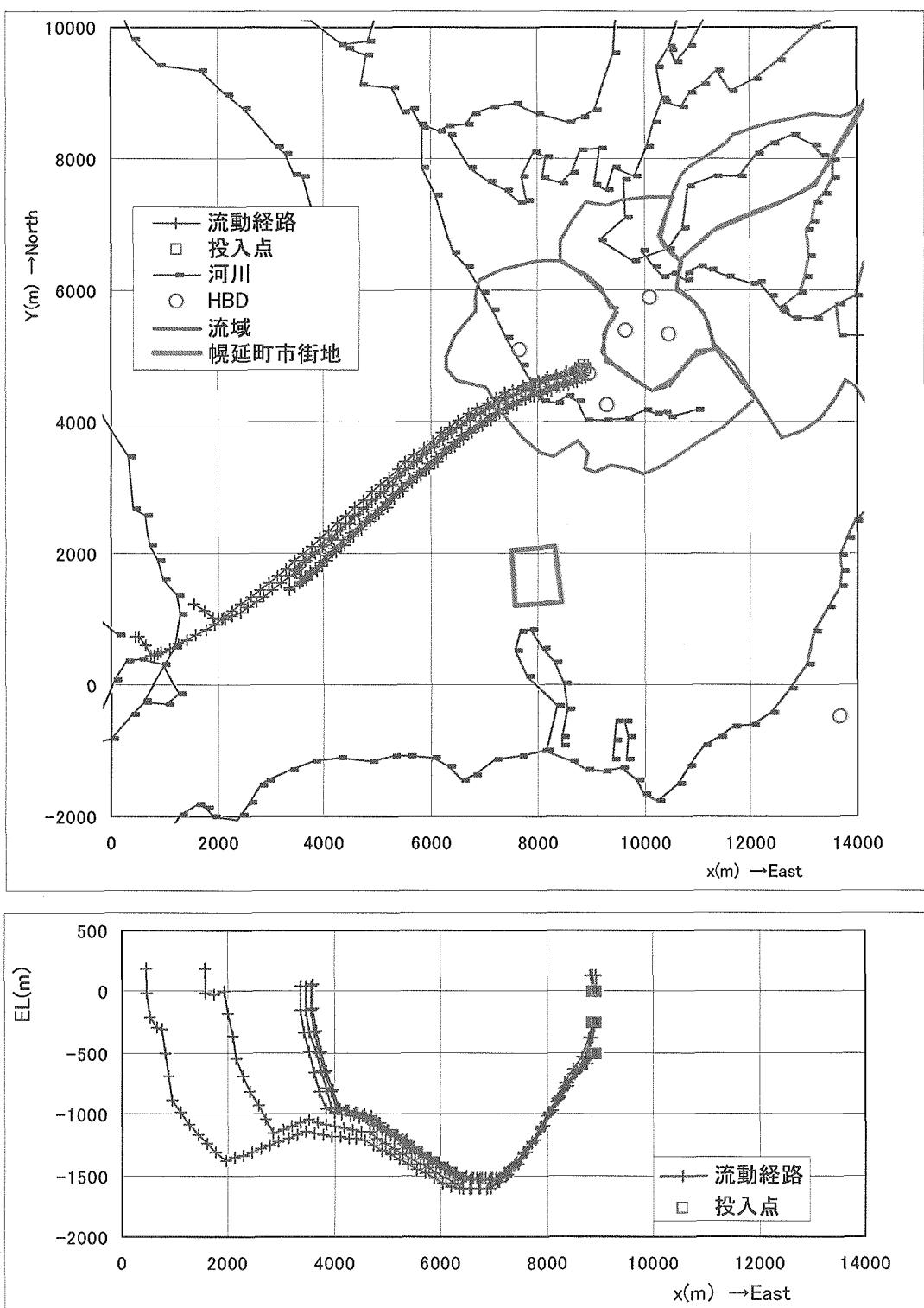


図 3.3.2-25 地下施設からの粒子追跡線 (case2)

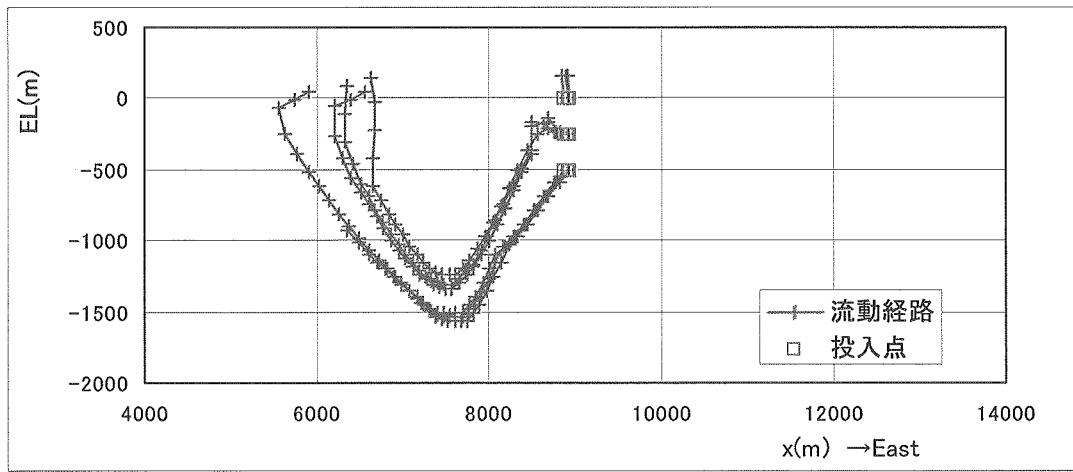
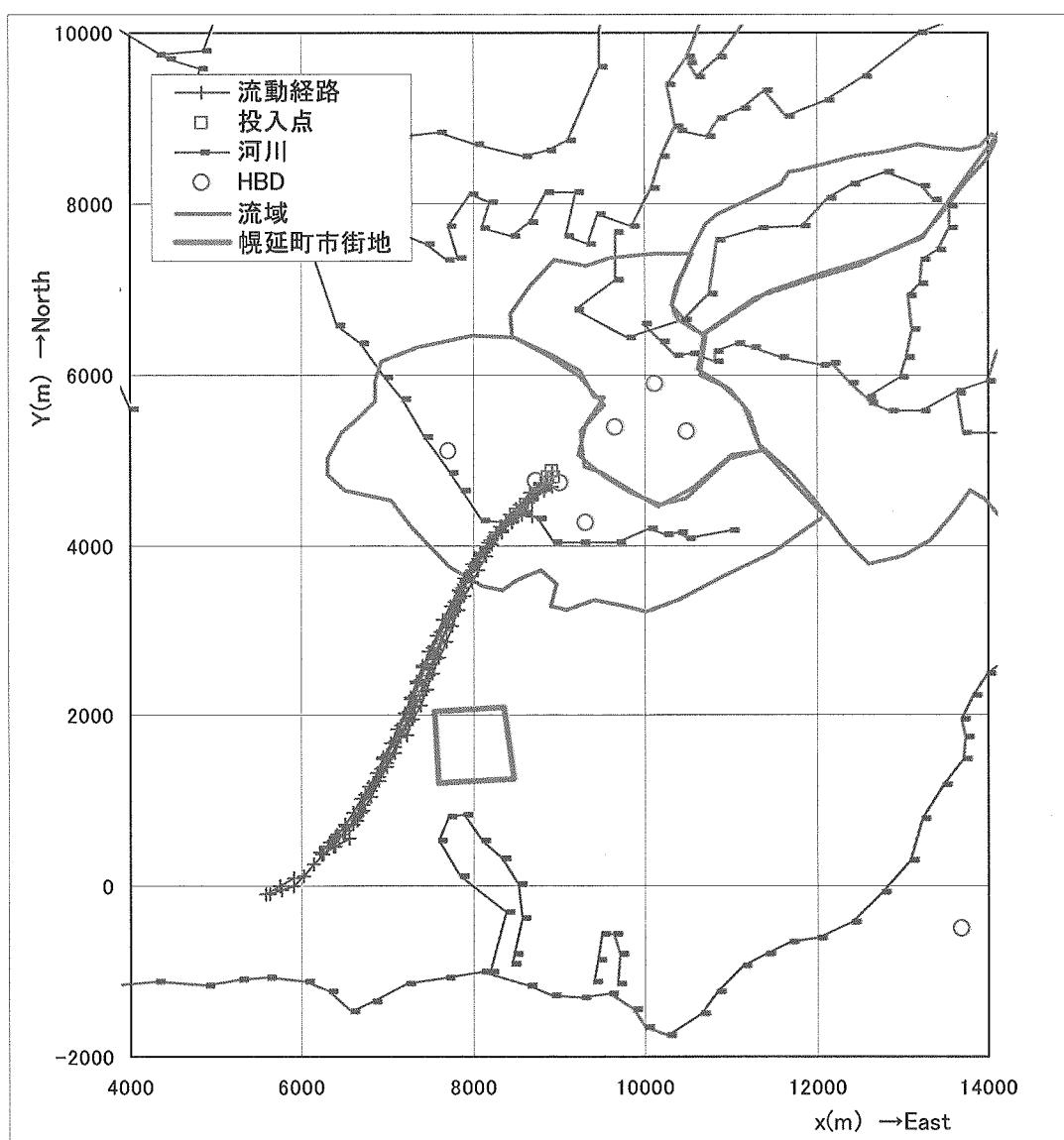


図 3.3.2-26 地下施設からの粒子追跡線 (case3)

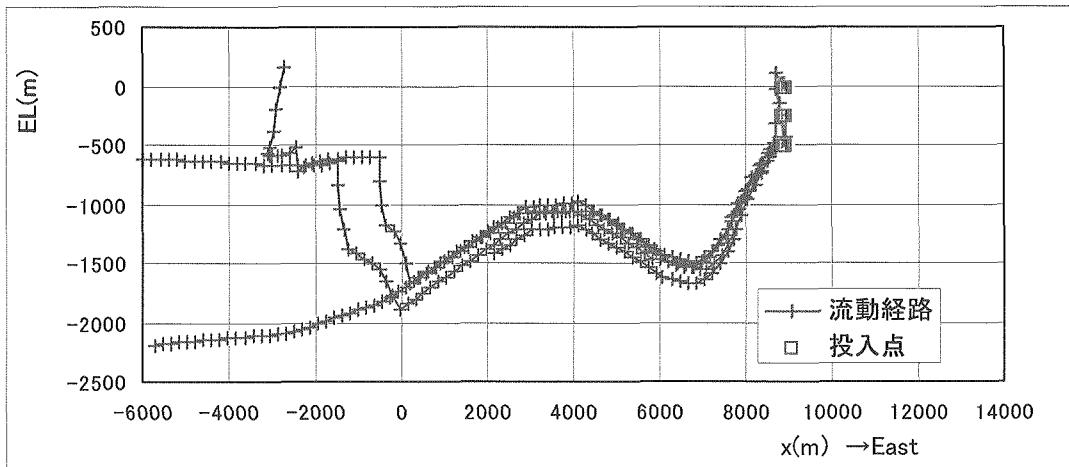
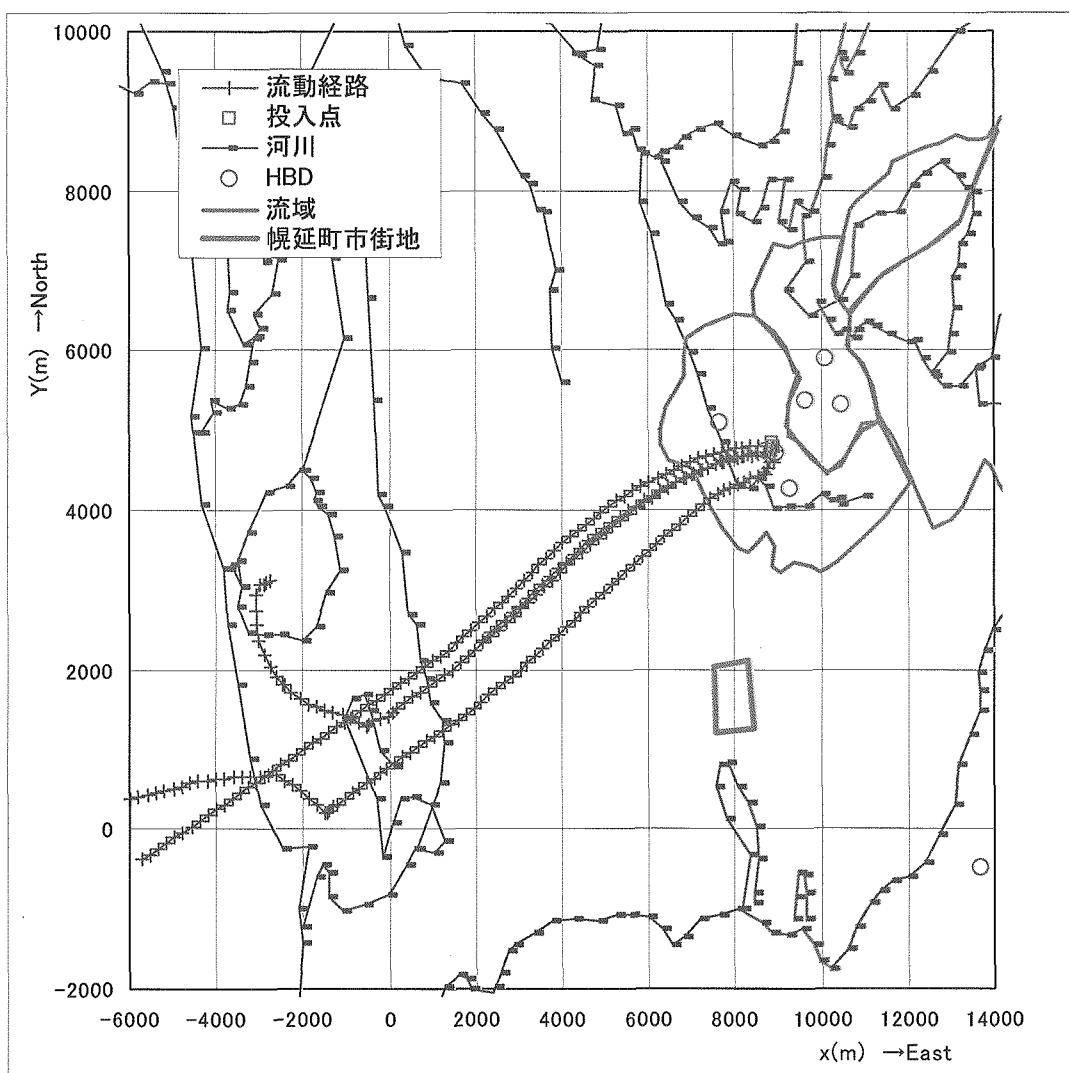


図 3.3.2-27 地下施設からの粒子追跡線 (case4)

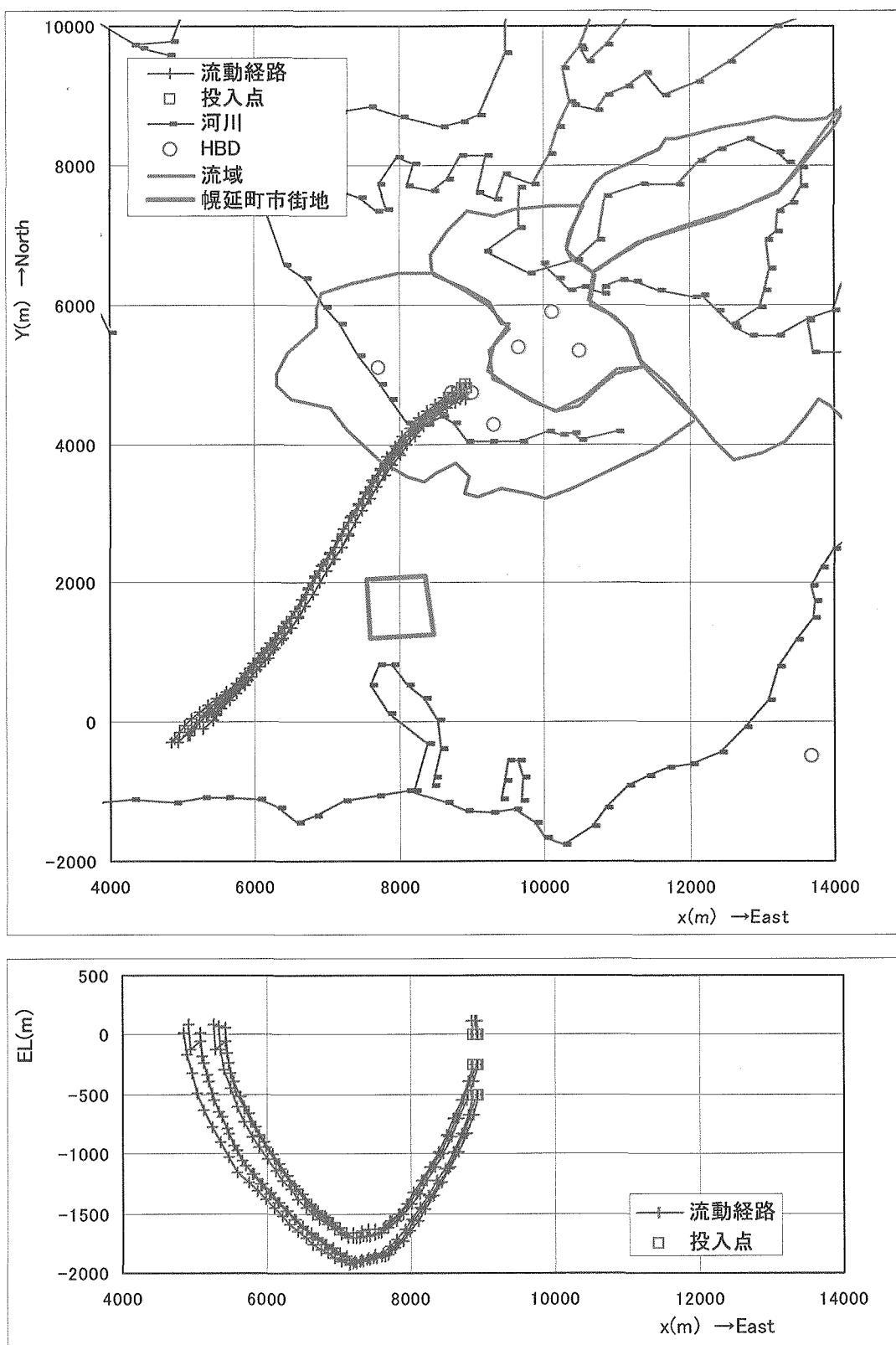


図 3.3.2-28 地下施設からの粒子追跡線 (case5)

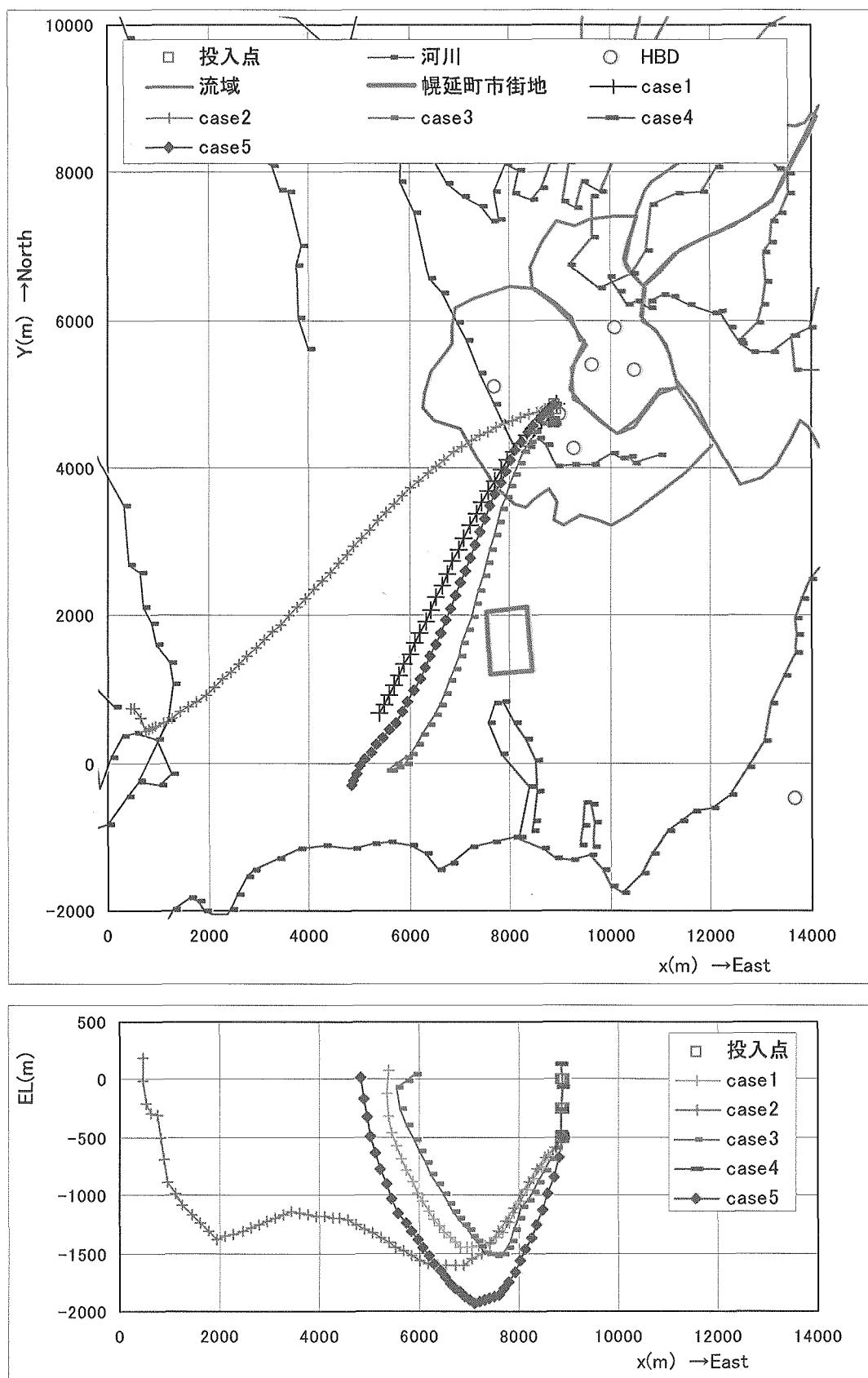


図 3.3.2-29 換気立坑 EL-500m 地点からの流動経路 (case1～case5 の比較)

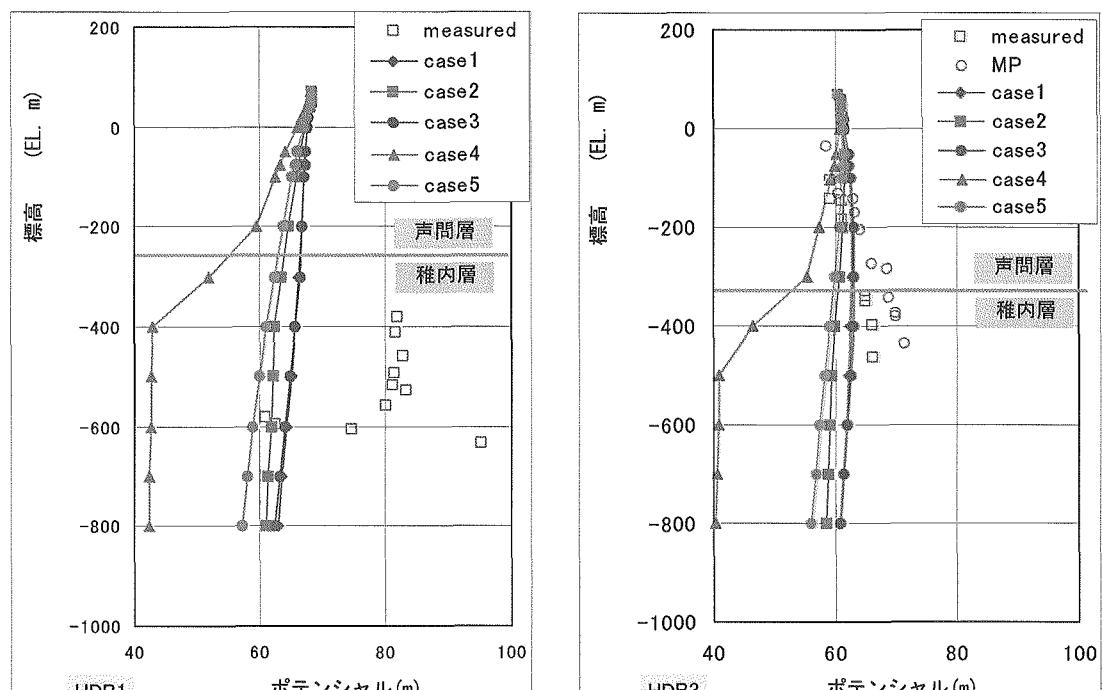
#### (6) HDB 孔内のポテンシャル分布

HDB 孔内で計測された間隙水圧から求めた孔内のポテンシャルと解析によるポテンシャルの対比を図 3.3.2-30, 図 3.3.2-31 に示す。表 3.3.2-4 には各地点のモデル内地質区分を示す。

表 3.3.2-4 各地点のモデル内地質区分

標高 EL.m	HDB-1 地質区分	HDB-3 地質区分	HDB-4 地質区分	HDB-5 地質区分	HDB-6 地質区分
70	8 表層				
60	8 表層				
50	8 表層	8 表層	8 表層	4 声問層	8 表層
40	4 声問層	8 表層	4 声問層	4 声問層	8 表層
20	4 声問層				
0	4 声問層				
-50	4 声問層	4 声問層	3 稚内層	4 声問層	4 声問層
-75	4 声問層	4 声問層	3 稚内層	3 稚内層	4 声問層
-100	4 声問層	4 声問層	3 稚内層	3 稚内層	4 声問層
-200	4 声問層	4 声問層	3 稚内層	3 稚内層	4 声問層
-300	4 声問層	4 声問層	3 稚内層	3 稚内層	4 声問層
-400	3 稚内層	4 声問層	3 稚内層	3 稚内層	3 稚内層
-500	3 稚内層				
-600	3 稚内層	3 稚内層	3 稚内層	2 増幌層	3 稚内層
-700	3 稚内層	3 稚内層	2 増幌層	2 増幌層	3 稚内層
-800	3 稚内層	3 稚内層	2 增幌層	2 増幌層	3 稚内層

標高 EL.m	HDB-7 地質区分	HDB-8 地質区分	標高 EL.m	豊富温泉	
70	8 表層	8 表層	20	8	表層
60	8 表層	8 表層	0	3	稚内層
50	8 表層	8 表層	-50	3	稚内層
40	8 表層	4 声問層	-75	3	稚内層
20	8 表層	4 声問層	-100	3	稚内層
0	8 表層	4 声問層	-200	3	稚内層
-50	5 勇知層	4 声問層	-300	3	稚内層
-75	5 勇知層	4 声問層	-400	3	稚内層
-100	5 勇知層	4 声問層	-500	10	大曲断層側部
-200	5 勇知層	3 稚内層	-600	10	大曲断層側部
-300	5 勇知層	3 稚内層	-700	9	大曲断層コア部
-400	5 勇知層	3 稚内層	-800	10	大曲断層側部
-500	4 声問層	3 稚内層	-1000	3	稚内層
-600	4 声問層	3 稚内層	-1200	3	稚内層
-700	4 声問層	3 稚内層			
-800	4 声問層	2 増幌層			



(a)HDB-1

(b) HDB-3

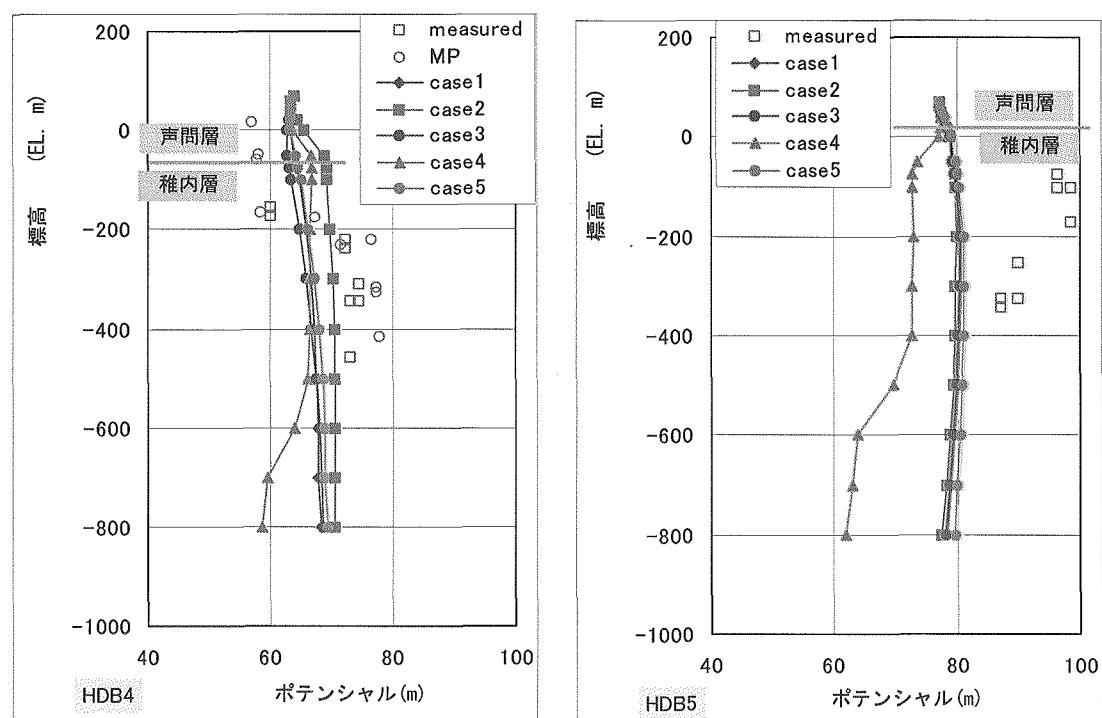
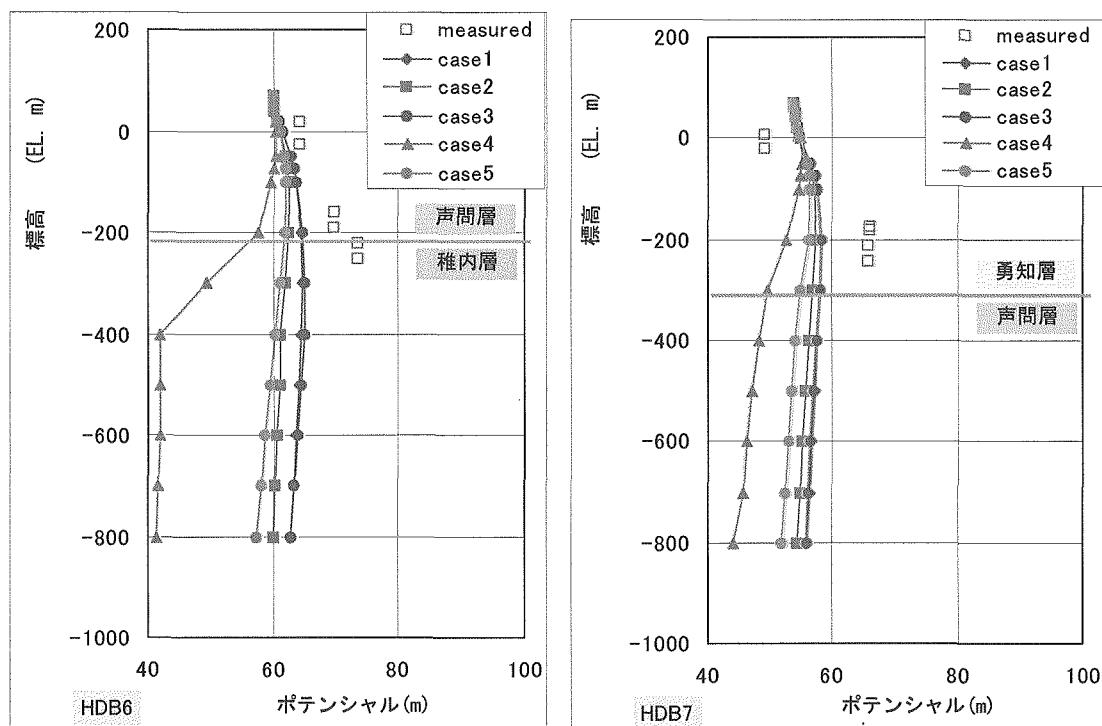
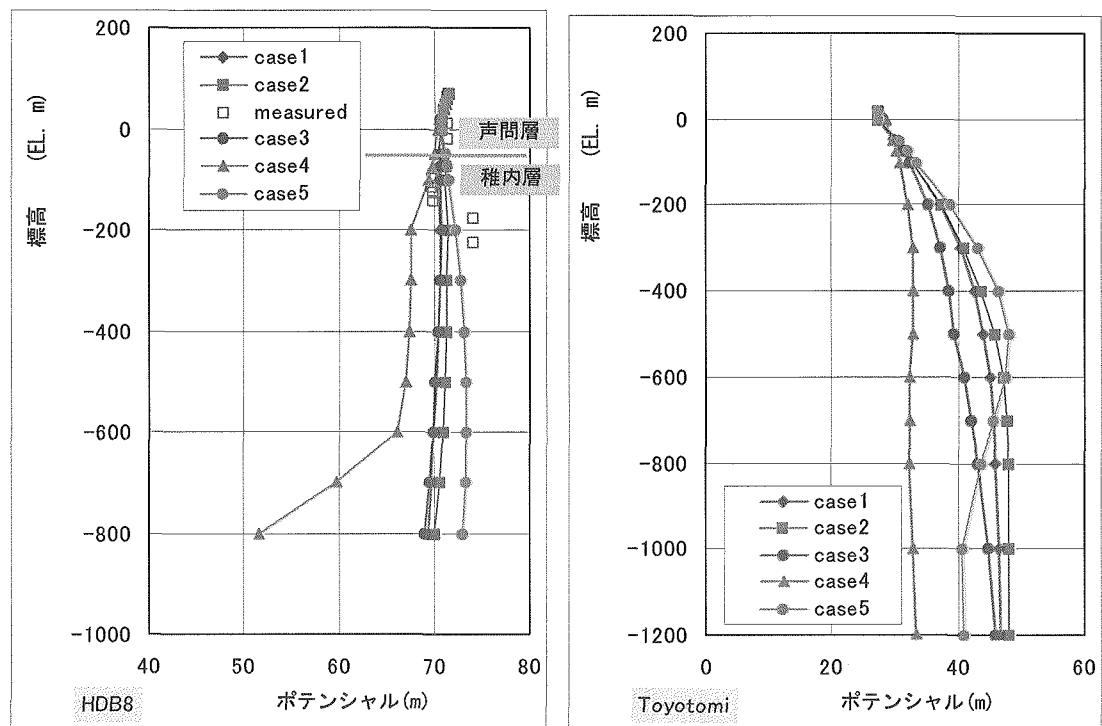


図 3.3.2-30 試錐孔内ポテンシャル分布の解析値、計測値の比較(1)



(a) HDB-6

(b) HDB-7



(c) HDB-8

(d) 豊富温泉

図 3.3.2-31 試錐孔内ポテンシャル分布の解析値、計測値の比較(2)

### 3.3.3 考察

上記解析結果から示されること、考えられることを以下に示す。

#### (1) ポテンシャル分布

図 3.3.2-1～図 3.3.2-5 に示されるポテンシャルの分布から以下のことが示される。

- case1 から case5 まで全体的なポテンシャル分布は類似している。山地部の標高の高い箇所でポテンシャル値は大きく低地部でポテンシャル値は小さい。これは、一般的に考えられている地下水流动が地形形状に支配される傾向を示した結果となっている。
- case1 ( $k=1 \times 10^{-8} \text{m/s}$ ) , case2 ( $k=1 \times 10^{-7} \text{m/s}$ ) , case3 ( $k=1 \times 10^{-9} \text{m/s}$ ) から稚内層の透水係数の違いを比較できる。図 3.3.2-1～図 3.3.2-3 からは顕著な違いは認められないが、鉛直断面図から、稚内層の透水係数が大きいケースほどポテンシャルの大きな領域が広くなっている傾向が見られる。しかし、図 3.3.2-30, 図 3.3.2-31 に示すポテンシャルの鉛直分布を見ると、稚内層の透水係数が大きい case2 では、case1, case3 よりもポテンシャルが大きい箇所 (HDB-4, 8, 豊富温泉) と小さい箇所 (HDB-1, 3, 6, 7) があり、稚内層の透水係数設定の大小でポテンシャルへの影響を単純に評価することはできないことを示唆している。
- case4 は声問層、稚内層に透水係数の深度依存性を与えたケースである。case1 と比較し顕著な違いは認められないが、case4 ではポテンシャル値の小さい領域が広くなる。流入量は case1, case4 でほぼ同じとすると、case4 ではポテンシャルが小さく、動水勾配が小さいと考えられるため、全体として透水係数の大きな設定となっていることを示している。
- case5 は大曲断層の透水係数を小さくしたケースである。case1 との比較に関して、case2, case3, case4 よりも違いが認め難い。大曲断層より海側でポテンシャル値の小さい領域が広くなり、山側でややポテンシャル値が大きくなっている。これは山地部で涵養された地下水を断層部が堰き止めている効果と考えられる。

#### (2) 流速ベクトル・圧力分布

図 3.3.2-7 ～図 3.3.2-11 に示される流速ベクトル、圧力分布から、以下のことが示される。

- 建設予定の地下施設部は、浅部では上昇流、深部では下降流の傾向が見られなど、地下水の流动方向が複雑に変化している箇所に該当している。
- case1～case4 の断層部では下方への流れが生じている。これは、断層の地表部は相対的な高標高部に位置し、涵養部になっていること、断層部の透水係数が周囲の透水係数より大きく、地下水の流动経路になっているためと考えられる。
- case1, 2, 5 の断層より西側の声問層・稚内層内では、層方向に沿った地下水流向が見られる。これは、声問層・稚内層が上層の勇知層、下層の増幌層よりも透水係数値であるため、選択的な地下水経路になっていることが原因と考えられる。
- 圧力水頭分布で示される地下水表面（圧力水頭区分 0.0m 相当）の地表からの深度は、山地で深く、谷部で浅くなっている。

### (3) 水収支観測流域の流入量・流出量

表 3.3.2-1～表 3.3.2-3、図 3.3.2-12～図 3.3.2-18 に示される水収支観測流域の流入量・流出量解析結果から以下のことが示される。

- ・表 3.3.2-3 の水収支集計結果から、case4 を除き、流域平均として P-1, P-2, P-3 は涵養域、P-1'は流出域となっている。case4 では P-1, P-2, P-3, P-1'すべての流域で涵養となっている。
- ・case1 の涵養量を変えた 3 ケースを比較すると、表 3.3.2-2 に示される単位面積当たりの流入量は涵養量に応じて流入量、流出量は変化している。ただし、設定した涵養量 (0.1mm/day, 1mm/day, 2mm/day) の小さいケースのほうが、設定した涵養量に対する流入出量の比率は大きくなっている。これは、設定した涵養量が小さいと、表面が飽和する箇所が少なく、設定値をそのまま反映した固定流量条件とした境界条件設定になっていることを示した結果と考えられる。これは、図 3.3.2-12、図 3.3.2-13、図 3.3.2-14 を比較すると涵養量の多いケースほど流出点となっている節点が多くなっていることからも確認される。表 3.3.2-3 に示される水収支では、設定した涵養量に対する違いは見られず、設定した涵養量の異なる各ケースともほぼ同じ値を示している。
- ・case1 から case5 の表 3.3.2-3 に示される水収支の比較では、設定した透水係数の大きいケースほど流入量が大きくなる傾向が見られる。P-1'に関しては、case4 以外のケースで流出になっているが case4 で流入となっている。これらは case4 で声間層上部など透水係数を大きく設定している影響で与えた涵養量が表面流出することなく深部へ涵養されたことを示している結果と考えられる。
- ・流入出点の分布では設定した涵養量の小さい case1( $r=0.1\text{mm/day}$ )で流出点が少なく、case1( $r=2.0\text{mm/day}$ )で流出点が多くなっている。これは先述の、設定した涵養量が小さいと、表面が飽和する箇所が少なく、設定値をそのまま反映した固定流量条件とした境界条件設定になっていることを示した結果と考えられる。
- ・各ケースとも河川相当部で流出点が多く、谷部で流出が生じることが確認される。これは、地形形状のモデル化の妥当性を示唆した結果であると考えられる。
- ・透水係数設定の異なる case1 から case5 での流入出点分布の顕著な違いは認められない。これは表層の透水係数は各ケース同じ値となっていること、ケース間の違いは各節点での流量に出ているため、と考えられる。

### (4) HDB 孔への地下水起源を推定する逆方向の粒子追跡解析

表 3.3.2-2 に示される、各地点のモデル内座標・地下水年代（逆方向の粒子追跡解析による滞留時間＝調査地点の地下水が、地表にて供給され調査地点に達するまでの時間）、図 3.3.2-19～図 3.3.2-23 より以下のが示される。

- ・表 3.3.2-2 に示される各点の地下水年代は全般的に深い点ほど地下水年代の古い傾向が示される。
- ・HDB 孔の地下水年代は、1000 年オーダーから 100 万年オーダーの範囲にある。
- ・case4 の深度依存性を与えたケースでは他のケースと比べ著しく地下水流动経路が異なる。特に豊富温泉などで顕著である。

- ・稚内層の透水係数を大きくした case2 でも、case4 ほど顕著ではないが HDB-8 など地下水流动経路が異なる。稚内層の透水係数を大きくしたことにより地下水の流入が増加し、地下水流动経路に与える影響が大きくなるものと考えられる。
- ・P-3 上流部を起源とする点 (HDB-4,5,8 など) が多く見られる。これらは地形の地下水流动への影響が透水係数の設定以上に影響している結果と考えられる。

#### (5) 地下施設からの地下水流动経路を示す粒子追跡解析

表 3.3.2-3 に示される地下施設（換気立坑、西・東立坑）からの地下水流动時間、図 3.3.2-24～図 3.3.2-29 に示される地下施設からの地下水流动経路から以下のことが示される。

- ・表 3.3.2-3 の地下水流动時間から、EL0m からは多くのケースで 2 万年未満のオーダで地表に到り、EL-250m, EL-500m では地表に到るまで 100 万年オーダの流下時間を要するケースが多い。
- ・西立坑では EL-250m のほうが EL-500m より流下時間の長いケースが見られる。
- ・各ケースとも EL-0m からは上方へ流动する傾向が見られる。このことから、地下施設の浅部は局所的地形の影響により湧出域に相当することが推察される。これは、図 3.3.2-12～図 3.3.2-18 の流入出点の分布とも整合する。
- ・EL-250m, EL-500m からの流动方向は各ケースとも南西方向に向かう傾向が見られる。
- ・case4 では地表に到らず海側の境界へ出していくケースも見られる。このような場合、海岸部で淡水が湧出することとなる。また、case4 では EL-500m から上方へ向かう地点も存在する。
- ・case4 以外では EL-250m, EL-500m からの地下水は幌延町市街地から南西方向、天塩川より北側で地表に湧出する。
- ・図 3.3.2-29 に示す換気立坑 EL-500m 地点からの case1～case5 流動経路の比較では、case1, case3, case5 は類似した経路を示すが case2 はやや西よりの経路、case4 ではほぼ上方へ向かうことが示され、透水係数の設定により地下水流动系路は大きな影響を受けることが示唆される。

#### (6) HDB 孔内のポテンシャル分布

図 3.3.2-30、図 3.3.2-31 に HDB 孔内のポテンシャル分布を示す。また実測のポテンシャルも併記している。表 3.3.2-4 には参考情報として各地点の各深度における解析モデルでの地質区分を示す。これらから以下のことが示される。

- ・深度依存性を設定した case4 は、他のケースと比べポテンシャル分布が最も異なる。case4 は他のケースより深部でポテンシャルが小さい傾向がある。
- ・case4 で設定した深度依存性は稚内層、声問層内それぞれで下位層ほど透水係数を小さく設定している。地下水は透水係数の大きいところへ集まる傾向を有し、このため case4 のポテンシャル分布に見られるように、透水係数の大きい部分（稚内層、声問層内それぞれの上位層）のポテンシャルが小さくなる傾向を示していると考えられる。
- ・case5 の大曲断層の透水係数を小さく設定した場合、断層よりも海側の HDB 孔でポテンシャルが小さく山側でポテンシャルが大きくなる傾向が示され、これは断層の遮水効果の影響

と想定される。

- ・実測値と解析結果の比較における全般的傾向として、解析に対し実測値の深度方向の変化が大きいことが挙げられる。この原因としては、解析モデルでは実際の地盤の有する不均質性を十分反映できていないこと、実測値は非定常過程のデータであることなどが考えられる。また、不均質性に関して、実際の地層にはモデルに反映されない破碎帶や割れ目系なども存在していることも一因と考えられる。
- ・実測値と解析結果の比較では HDB-1, HDB-5, HDB-6 で全般に実測ポテンシャル値が大きくなっている。これは、境界条件や透水係数設定の影響、解析に反映されていない塩水系地下水の密度の影響、対象地層が長期的時間スケールでの圧密過程にある影響などが考えられる。



### 3.4 塩分を考慮した密度流解析

地質形成過程の調査や、D1 孔で確認された塩分を含む地下水の成因に関する解析的検討（今井ほか、2002）で、地下水に含まれる塩分分布から、広域的な地下水流动特性を把握しうる可能性が示されている。このため、海底で堆積し、間隙に含まれた塩分を有する間隙水が長い年月の間に天水により洗い出されたと仮定する塩分に着目した解析を実施した。この解析結果と HDB1, HDB3, HDB4, HDB5 孔で確認された塩分分布と対比することにより調査対象地域の広域的な地下水流动特性に関して検討した。

#### 3.4.1 解析モデル・解析条件

##### (1) 解析モデル

解析モデルは、HDB1, HDB3, HDB4, HDB5 孔に該当する鉛直断面 2 次元モデルを対象とした。図 3.4.1-1 に 3 次元メッシュから切り出した 2 次元断面モデル位置を示す。HDB3 孔と HDB5 孔は同一断面とした。

図 3.4.1-2 には各断面のモデル形状・物性区分図を示す。

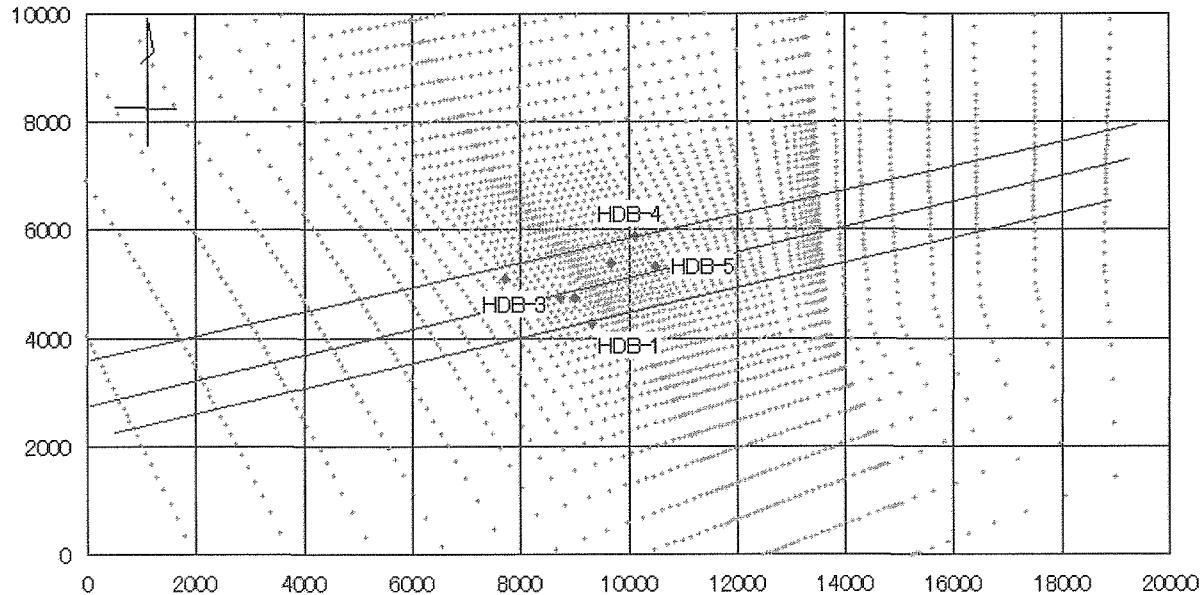
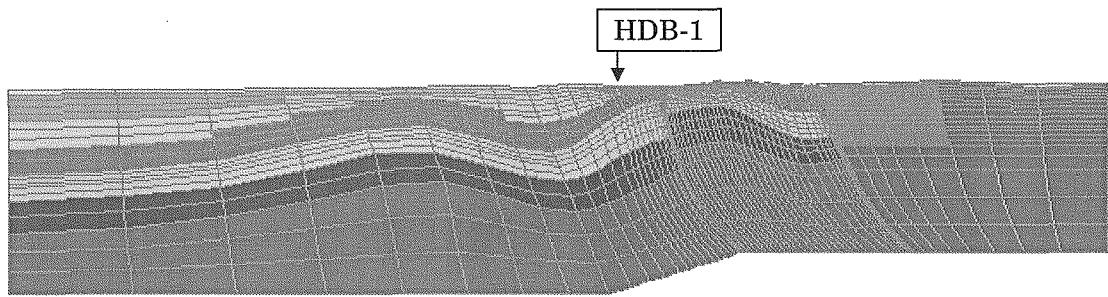
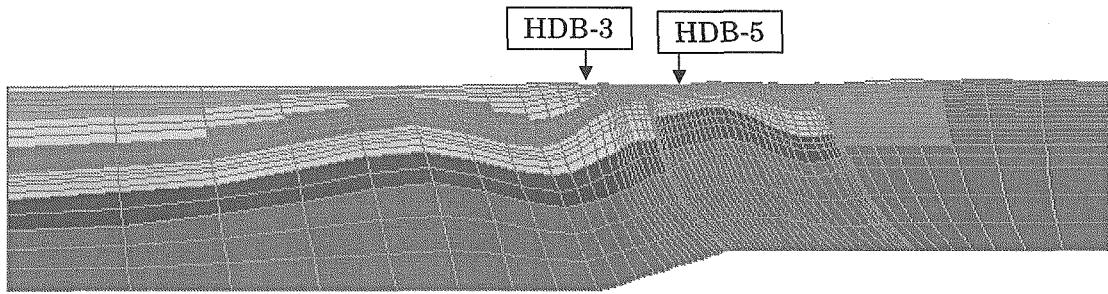


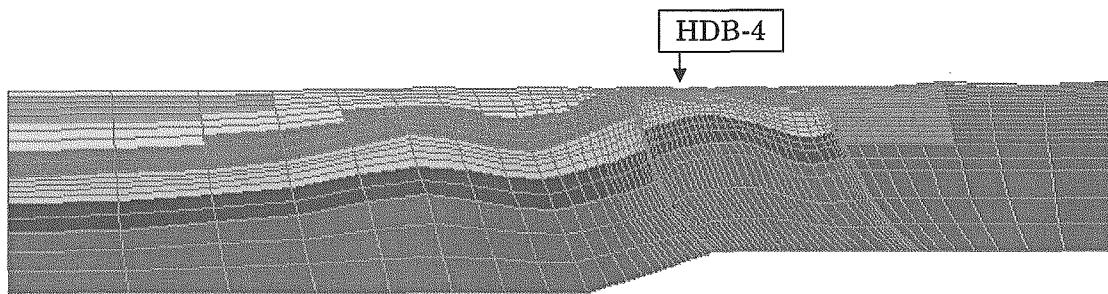
図 3.4.1-1 3 次元メッシュから切り出した 2 次元断面モデル位置



(a) HDB-1 モデル



(a) HDB-3, HDB-5 モデル



(a) HDB-4 モデル

図 3.4.1-2 各断面のモデル形状・物性区分図

## (2) 解析ケース

解析ケースは 3.3 地下水流動解析と同じ透水係数設定の異なる 5 ケースを実施した。

図 3.4.1-3 に透水係数深度依存性のケース (case4) の物性区分図を示す。

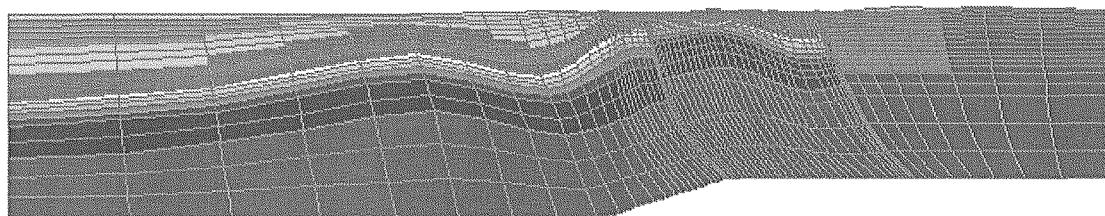


図 3.4.1-3 透水係数深度依存性の物性区分図

### (3) 物性値

透水係数等地下水流動に関する物性値は3.3 地下水流動解析と同じである。物質移行に関する物性は、以下の物性を用いた。分散テンソル  $D_{ij}$  は拡散係数も含めた流速に依存する次式を使用、式中の縦方向分散長、横方向分散長は解析スケールを考慮し、表3.4.1-1に示す値を用いた。

$$D_{ij} = \alpha_T \|V\| \delta_{ij} + (\alpha_L - \alpha_T) \frac{V_i V_j}{\|V\|} + \alpha_m \tau \delta_{ij} \quad (3.4.1-1)$$

ここで、 $V_i$ ：実流速ベクトル、 $\|V\|$ ：実流速の絶対値、 $\alpha_m$ ：分子拡散係数、 $\tau$ ：屈曲率、 $\delta_{ij}$ ：クロネッカのデルタ。

表 3.4.1-1 物質移行の物性

物性	値	
縦方向分散長： $\alpha_L$	100 m	解析規模から想定。
横方向分散長： $\alpha_T$	20 m	縦方向分散の1/5を仮定
遅延係数	1.0	塩分の吸着がないと仮定。
塩水密度	1.023	

### (4) 初期条件

#### ①初期水位

塩分を考慮しない地下水解析の定常解析結果を初期水位として設定した。

#### ②初期濃度

初期濃度は海水侵入解析では図3.4.1-4の濃度初期条件(a)に示す海岸部から海側で濃度1.0（相対濃度、海水濃度に等しい）とし、陸部は淡水（濃度=0）とした。洗い出し解析では全領域一様に濃度1.0（相対濃度、海水濃度に等しい）とした。解析では、海水の塩分濃度を基準とした相対的な濃度値を求めた。

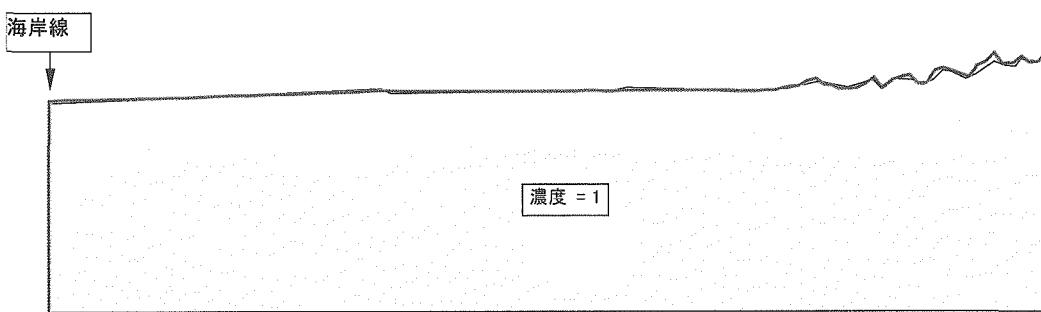


図 3.4.1-4 濃度初期条件

## (5) 境界条件

設定した水理境界条件を図 3.4.1-5 に示す。図 3.4.1-6 には濃度境界条件を示す。

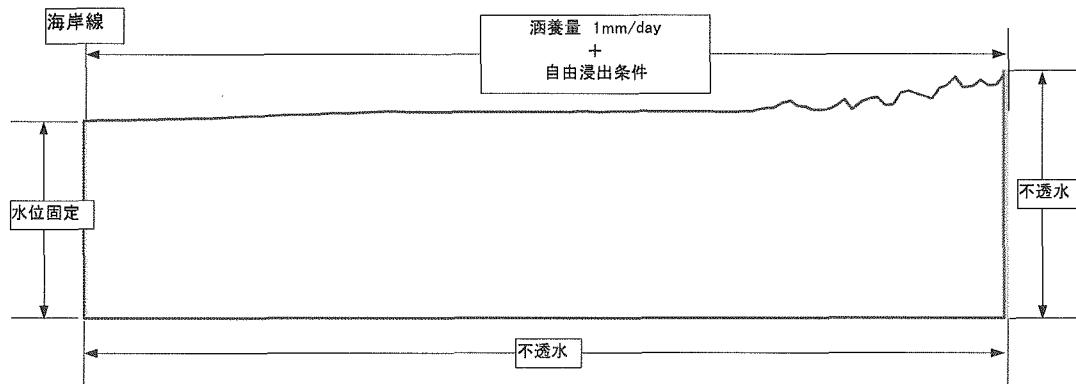


図 3.4.1-5 水理境界条件

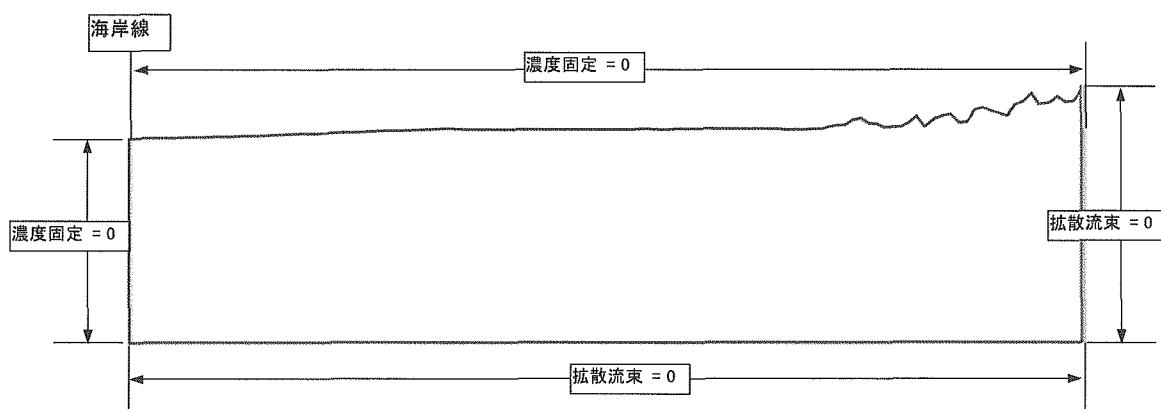


図 3.4.1-6 濃度境界条件

### 3.4.2 解析結果

#### (1) 塩分濃度コンタ・ポテンシャルコンタ

塩分濃度コンタ・ポテンシャルコンタは表 3.4.2-1 に示すタイムステップとして掲載した。ここで示すポテンシャルは、式 3.4.2-1 で示す塩水の密度を考慮したポテンシャル値を示している。

$$\phi = \frac{P}{\rho_w \cdot g} + \frac{\rho}{\rho_w} \cdot z = \frac{P}{\rho_w \cdot g} + \frac{C \cdot (\rho_{sea} - \rho_w) + \rho_w}{\rho_w} \cdot z \quad (3.4.2-1)$$

ここで、 $P$ ：圧力、 $g$ ：重力加速度、 $\rho$ ：地下水の密度、 $\rho_w$ ：淡水の密度、 $\rho_{sea}$ ：海水の密度、 $C$ ：相対濃度 ( $= (\rho - \rho_w) / (\rho_{sea} - \rho_w)$ )、 $z$ ：基準点からの標高

塩分濃度コンタ・ポテンシャルコンタの凡例を図 3.4.2-1 に示す。HDB-3,5 に該当する断面での塩分濃度コンタ・ポテンシャルコンタは case1 から case5 に対して示す。HDB-1 と HDB-4 に該当する断面での塩分濃度コンタ・ポテンシャルコンタは case1 に対して示す。

表 3.4.2-1 タイムステップ

Time Step	year
1	0.2
2	2
3	20
4	200
5	2000
6	20000
7	50000
8	150000
9	500000
10	1000000
11	1500000
12	2000000
13	3000000

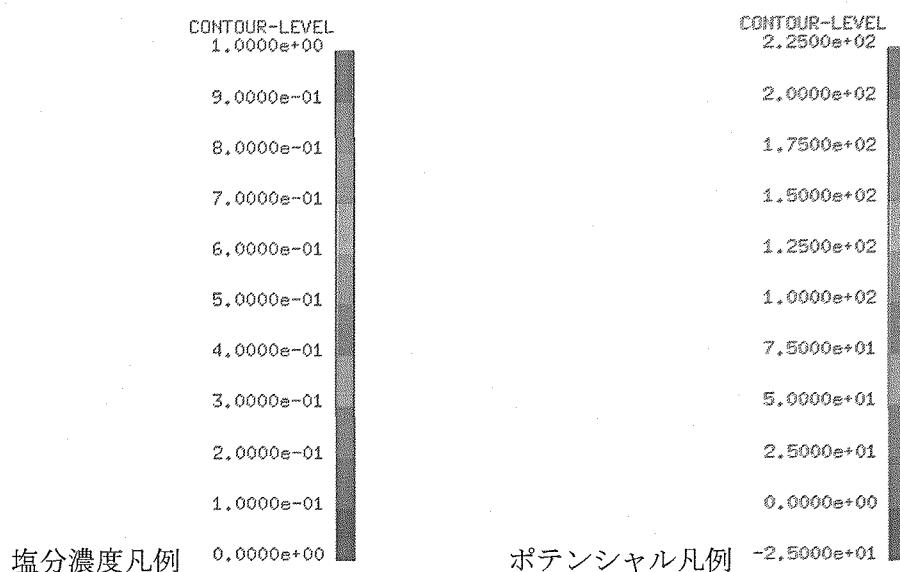


図 3.4.2-1 コンタ図の凡例

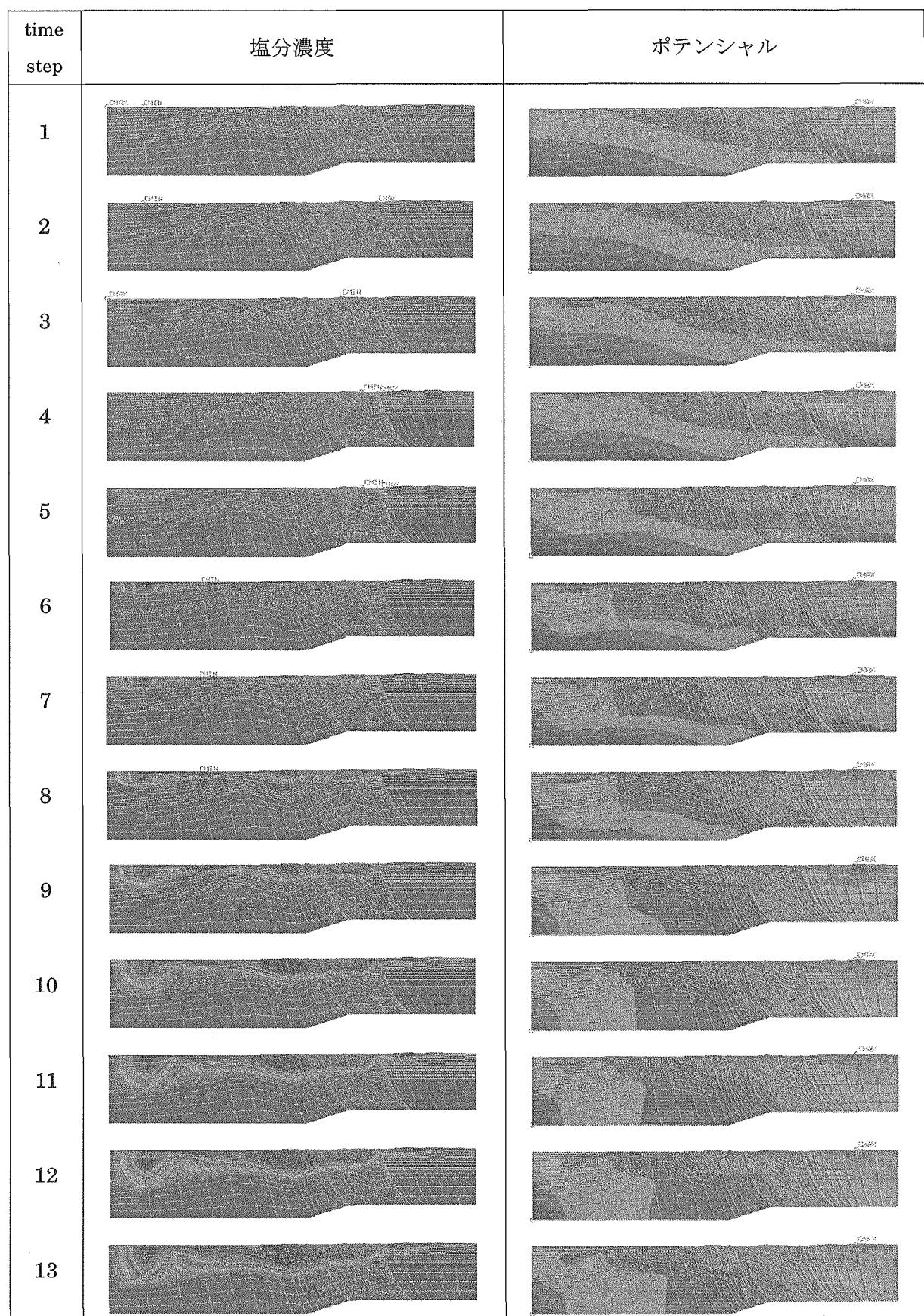


図 3.4.2-2 HDB-3, 5 該当断面内の塩分分布, ポテンシャル分布 (case1)

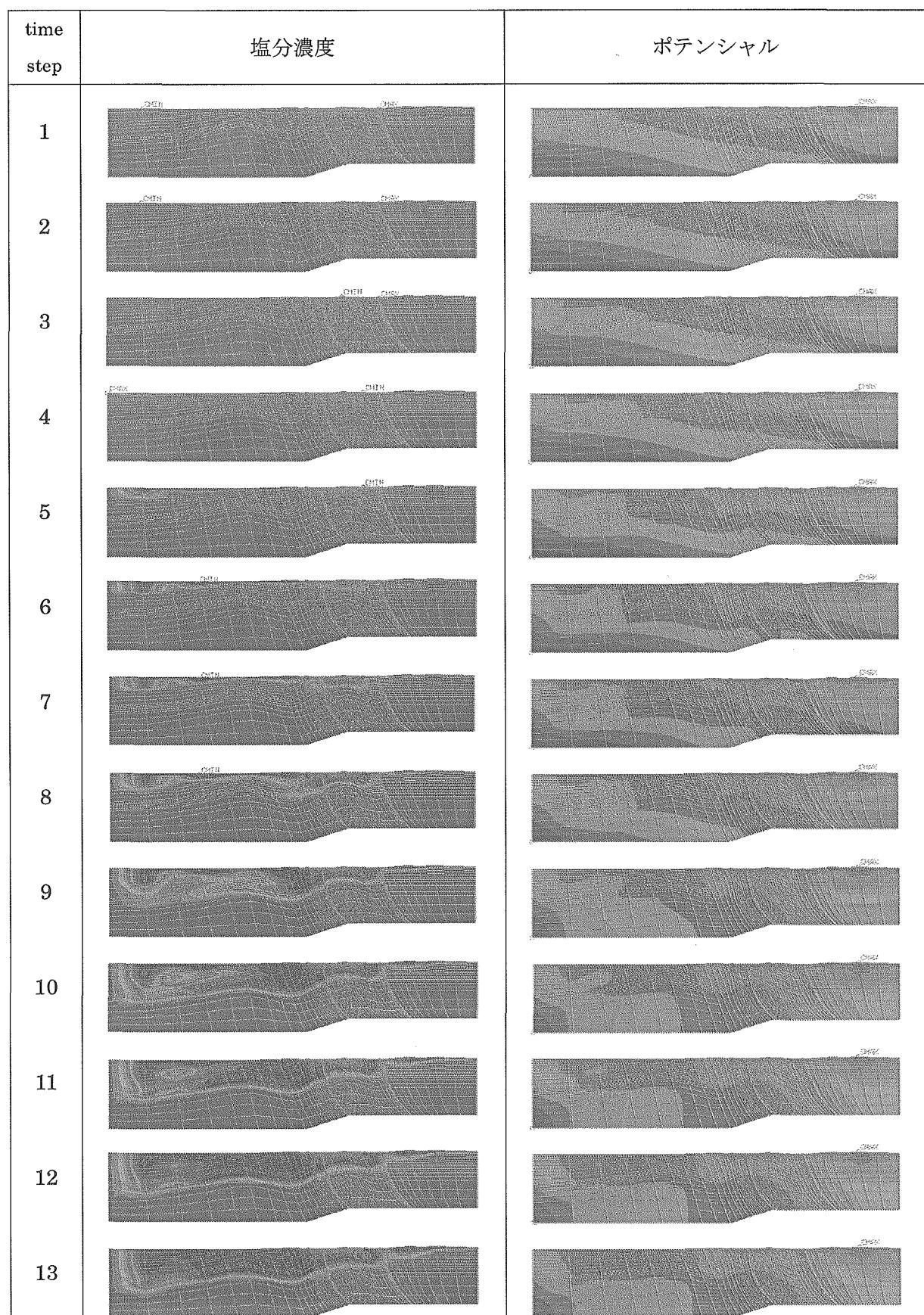


図 3.4.2-3 HDB-3, 5 該当断面内の塩分分布, ポテンシャル分布 (case2)

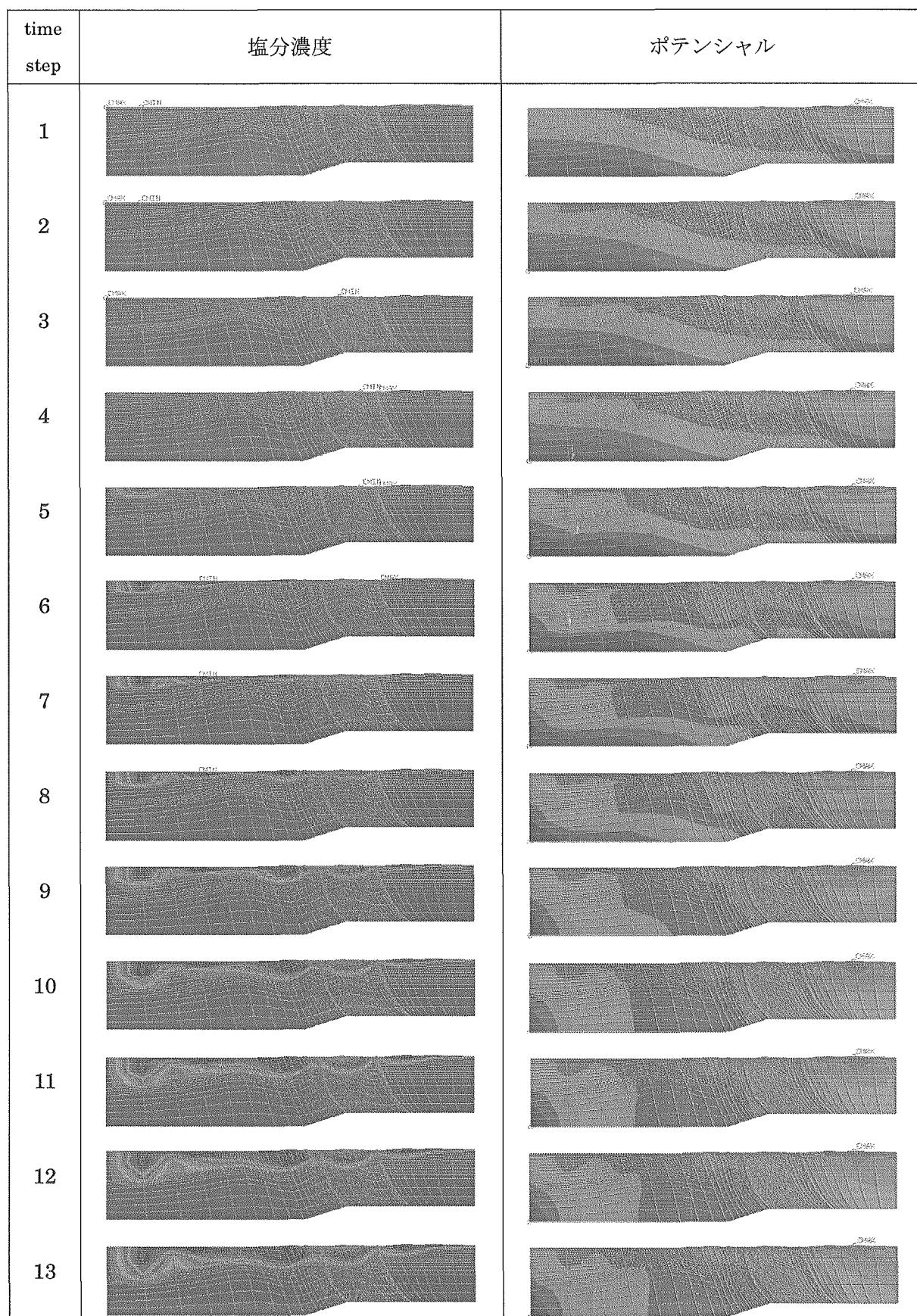


図 3.4.2-4 HDB-3, 5 該当断面内の塩分分布, ポテンシャル分布 (case3)

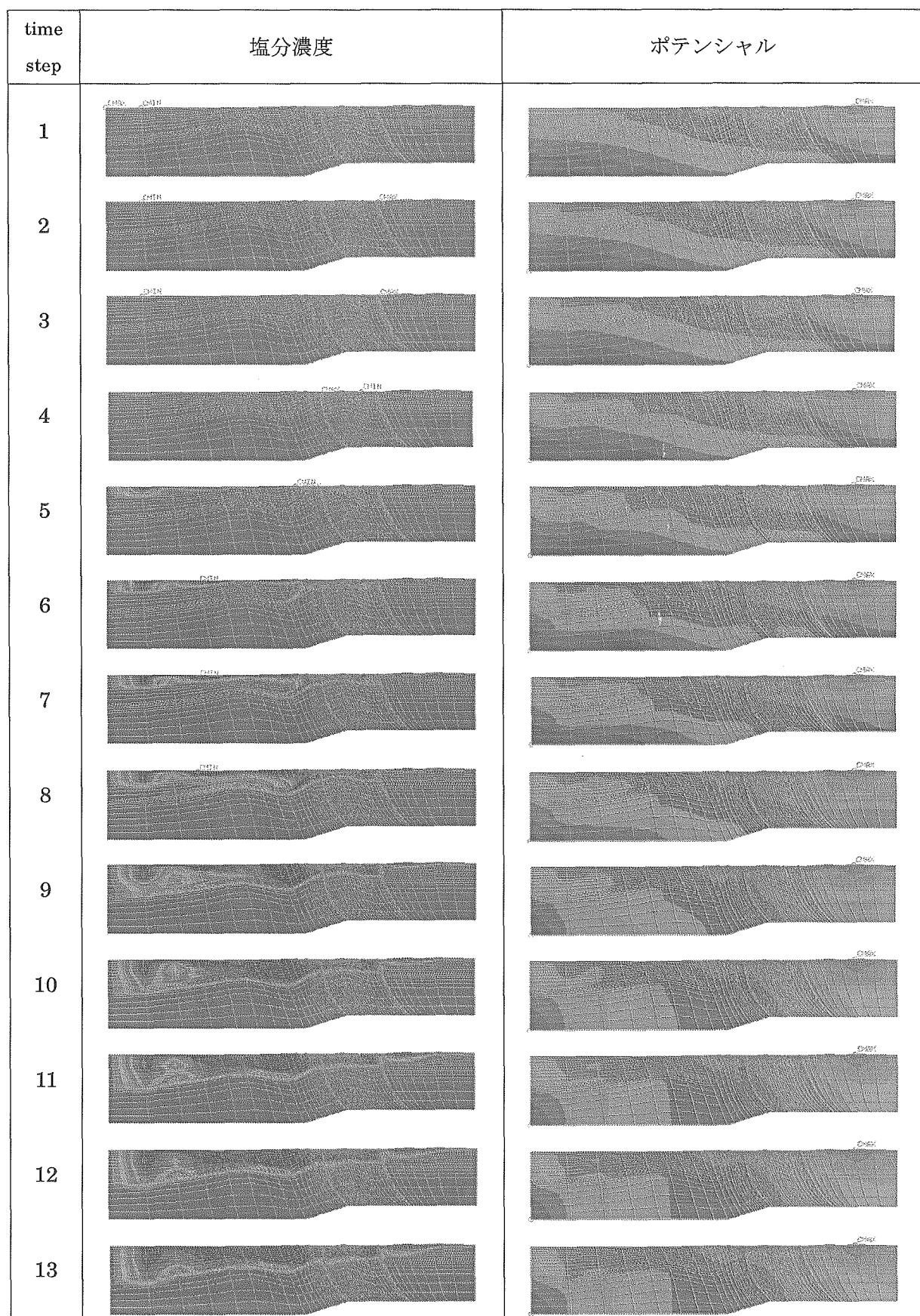


図 3.4.2-5 HDB-3, 5 該当断面内の塩分分布, ポテンシャル分布 (case4)

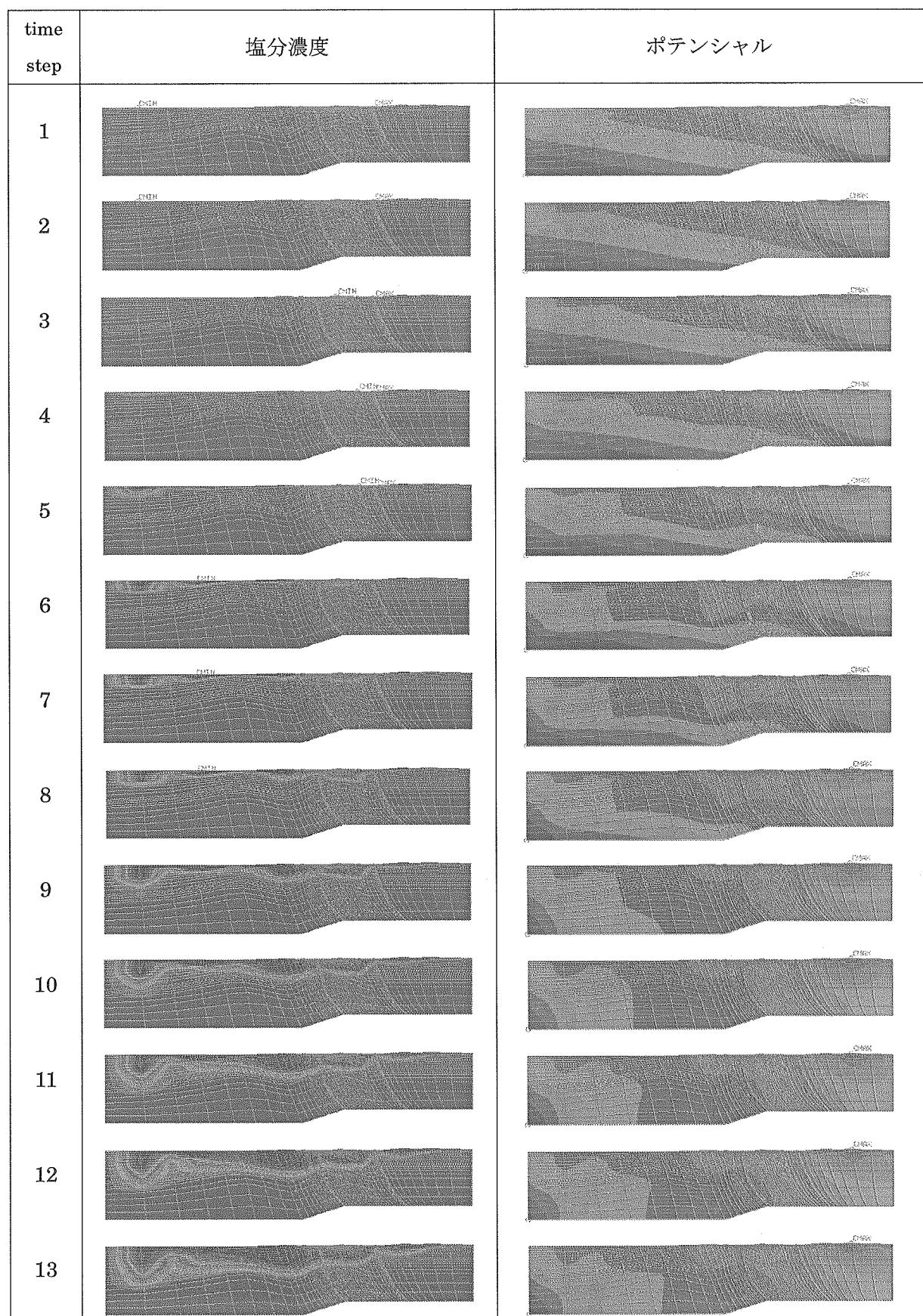


図 3.4.2-6 HDB-3, 5 該当断面内の塩分分布, ポテンシャル分布 (case5)

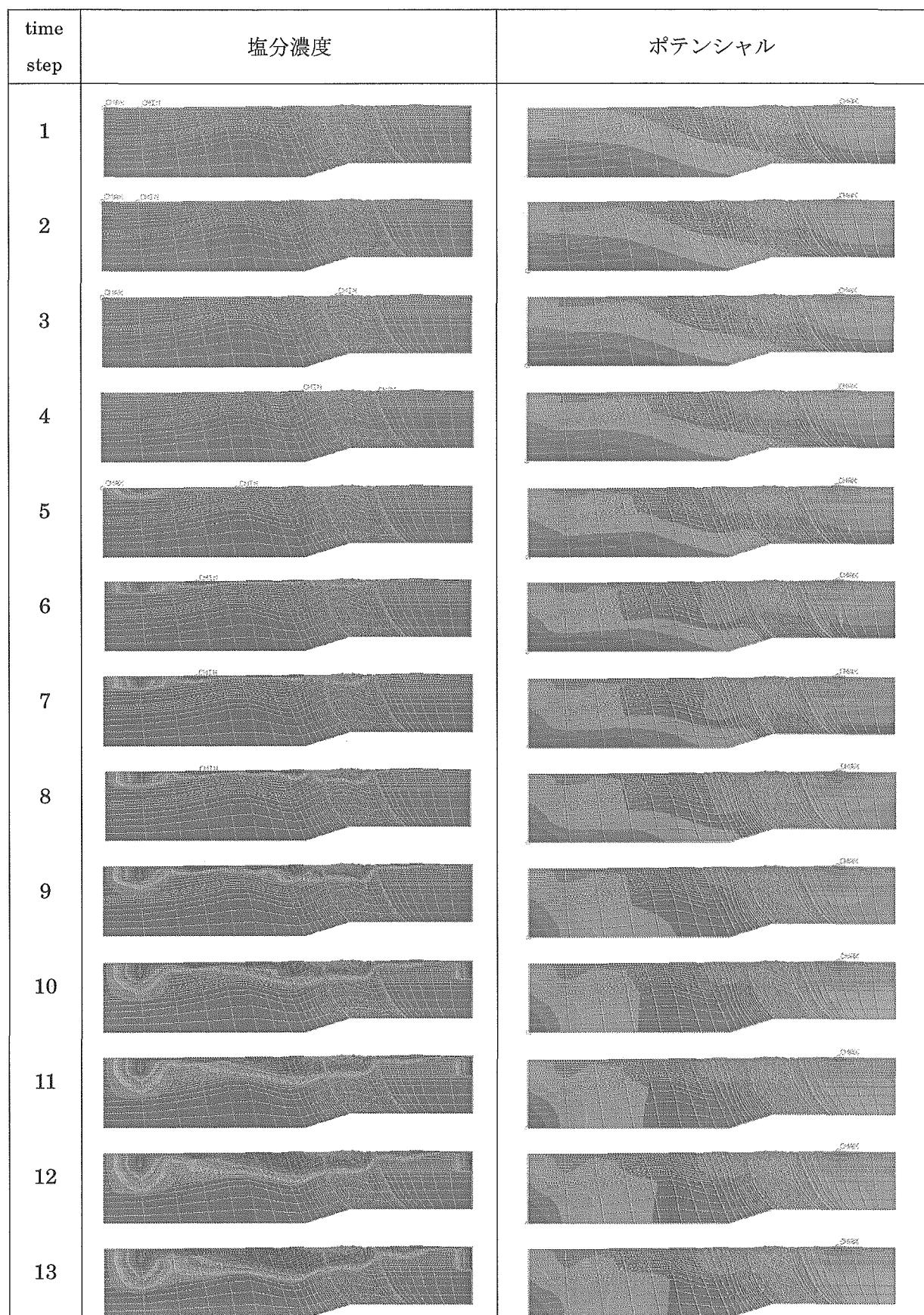


図 3.4.2-7 HDB-1 該当断面内の塩分分布, ポテンシャル分布 (case1)

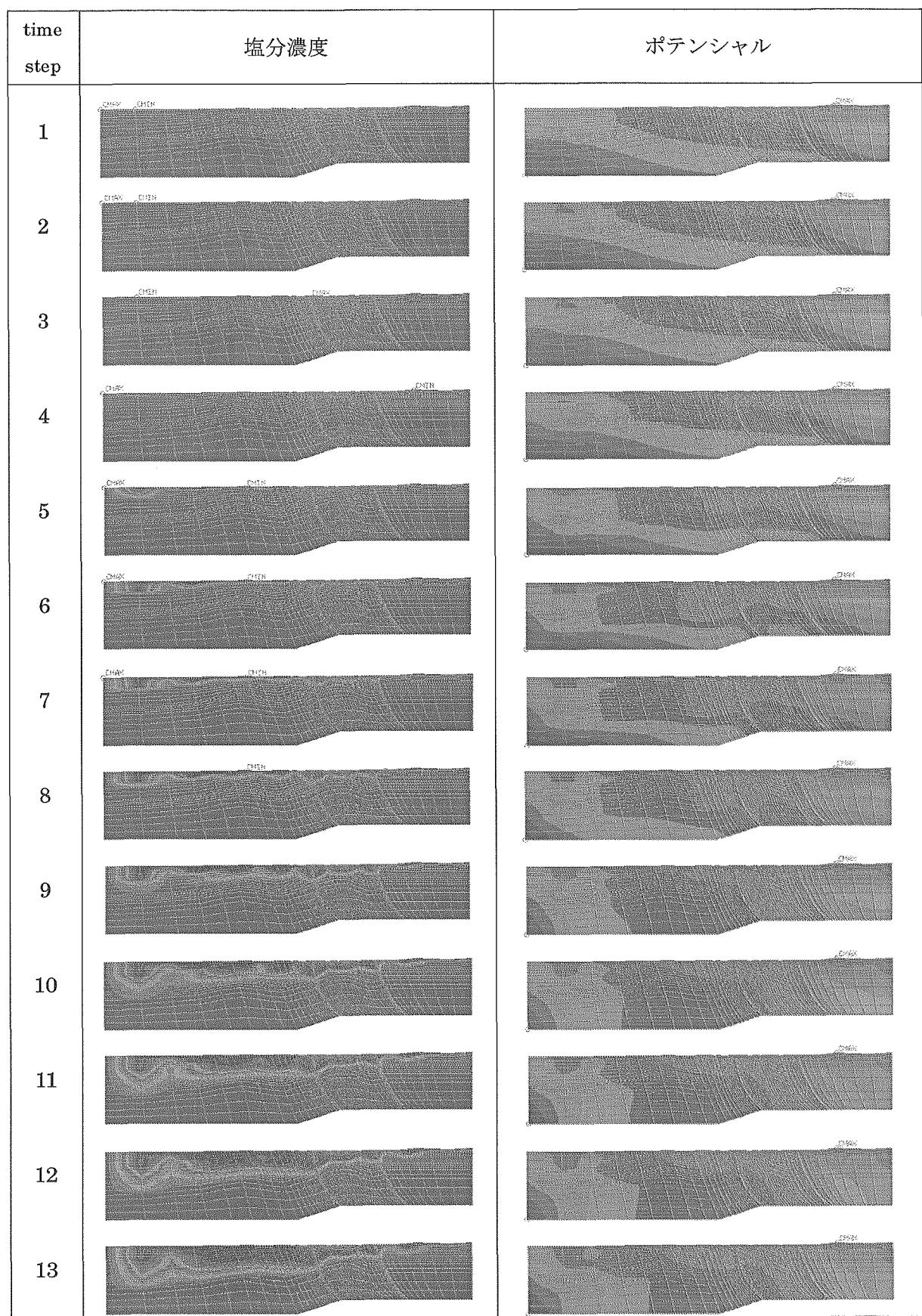
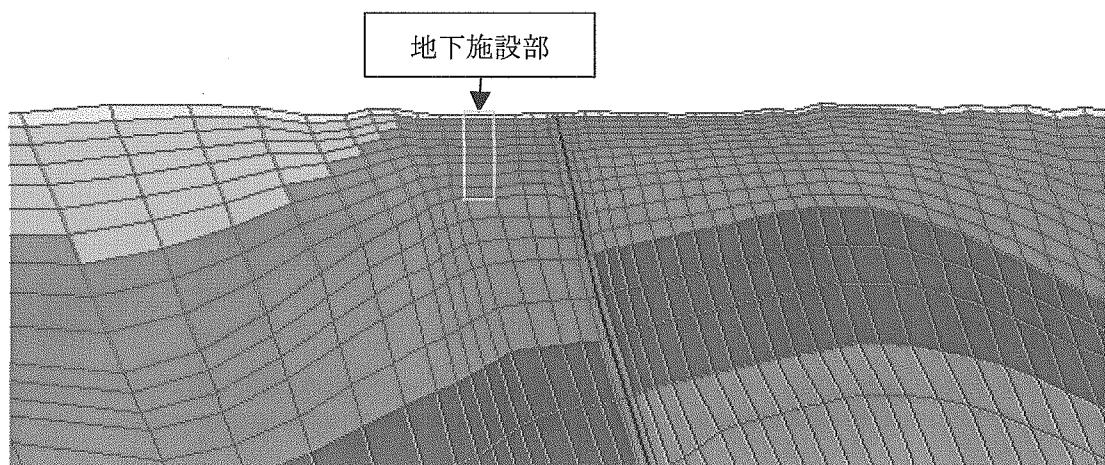
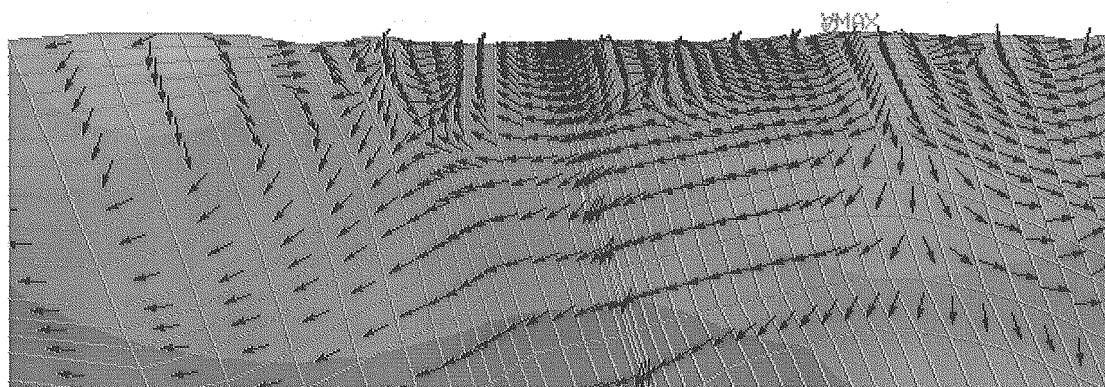


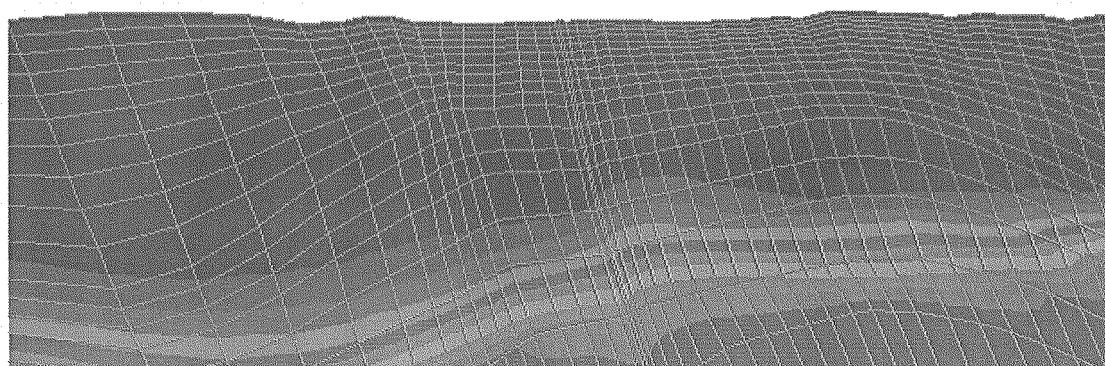
図 3.4.2-8 HDB-4 該当断面内の塩分分布, ポテンシャル分布 (case1)



(a)地質区分



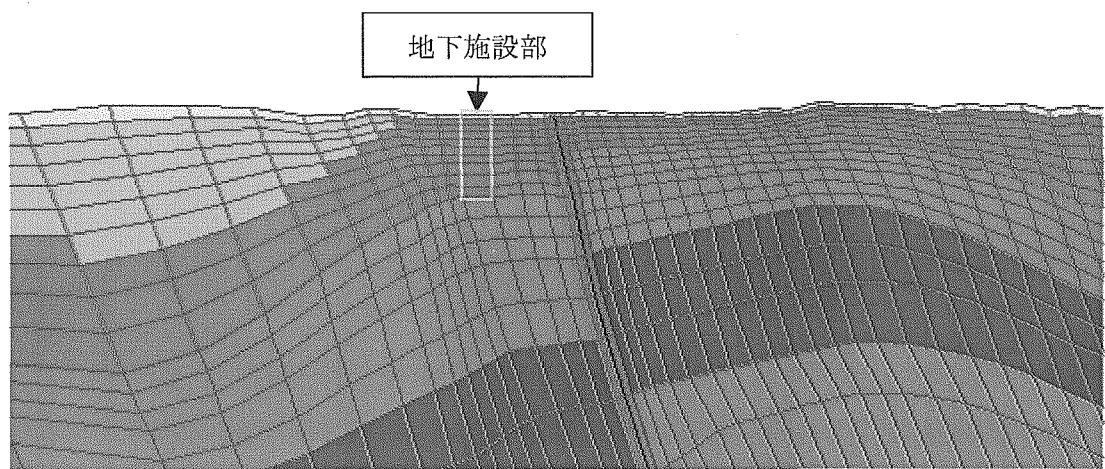
(b)密度を考慮したポテンシャル・流速分布



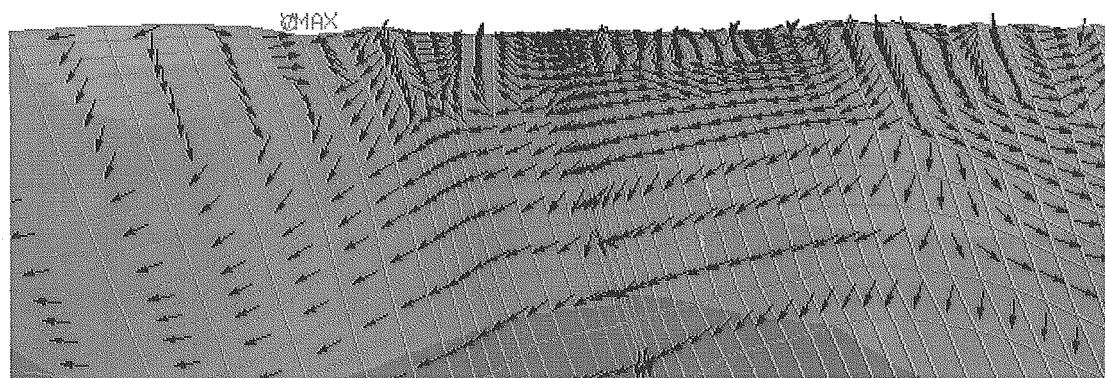
0 1.5km

(c) 塩分分布

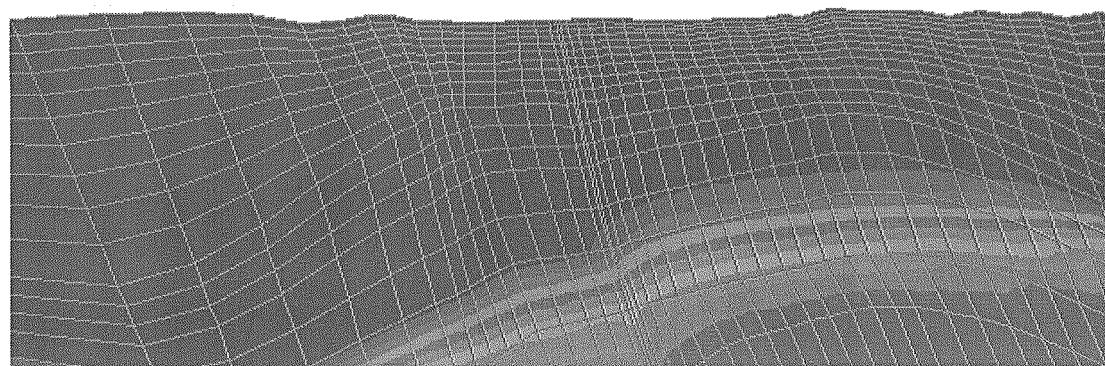
図 3.4.2-9 地下施設付近の塩分分布, ポテンシャル分布拡大図 (case1)



(a)地質区分



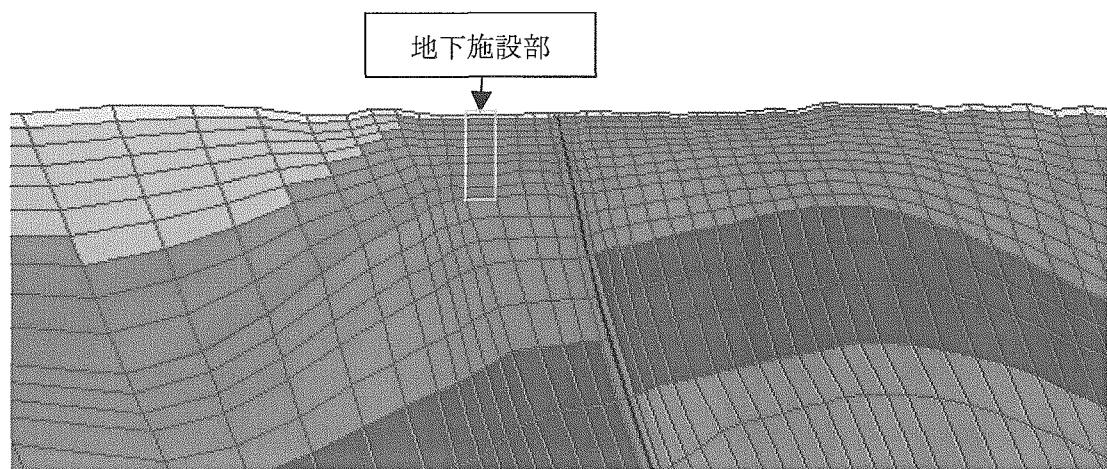
(b)密度を考慮したポテンシャル・流速分布



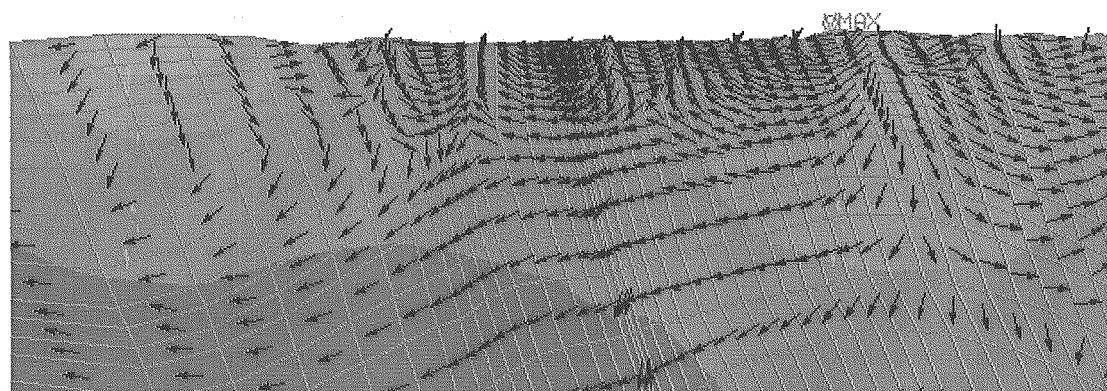
0 1.5km

(c) 塩分分布

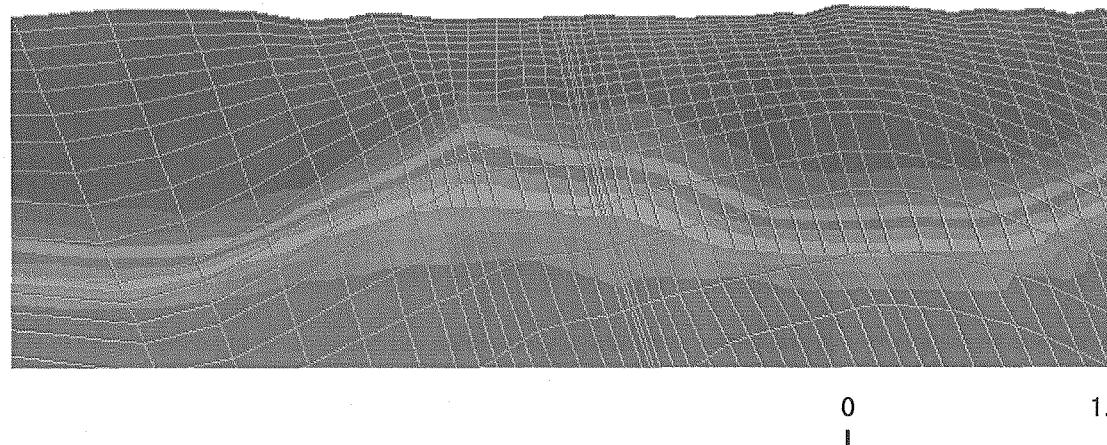
図 3.4.2-10 地下施設付近の塩分分布, ポテンシャル分布拡大図 (case2)



(a)地質区分

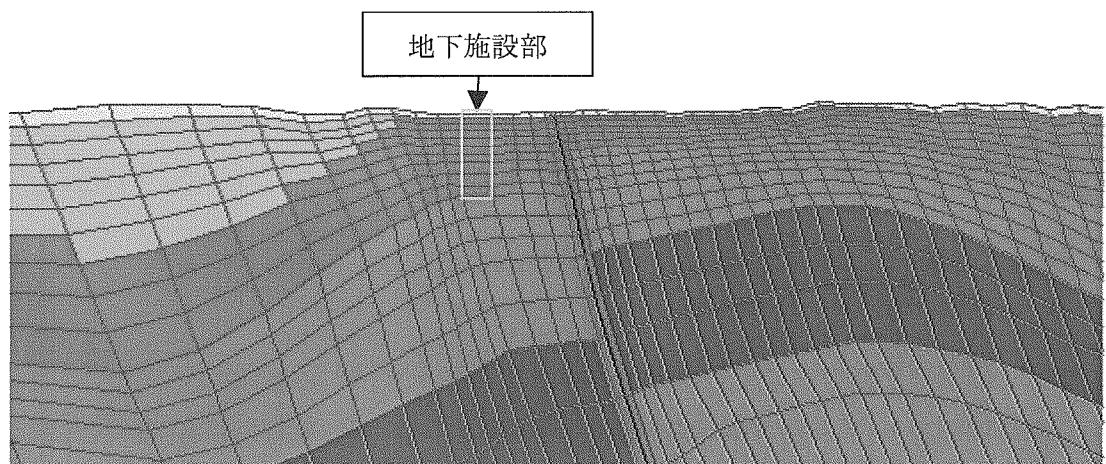


(b)密度を考慮したポテンシャル・流速分布

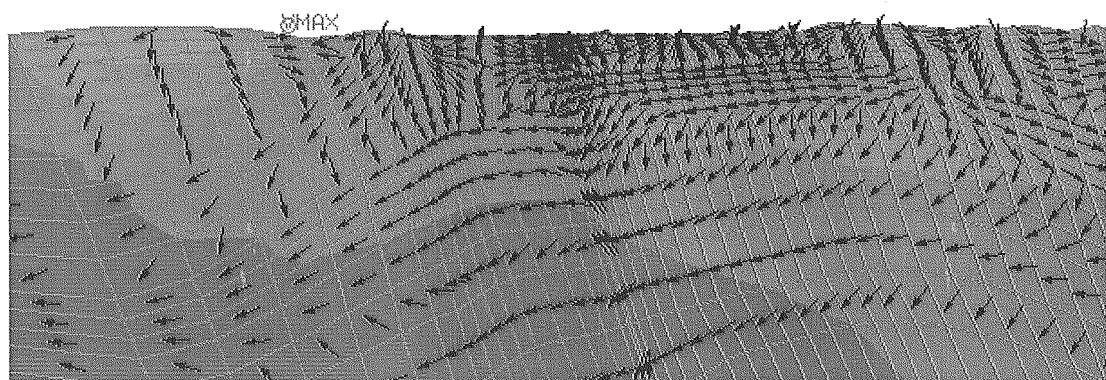


(c) 塩分分布

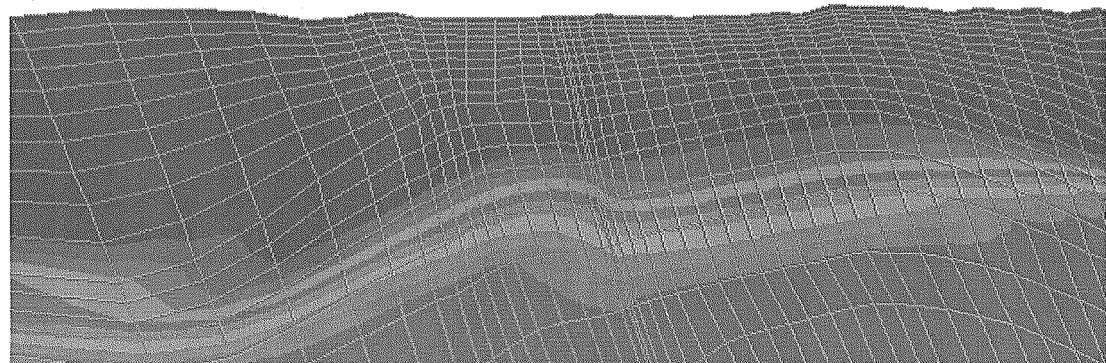
図 3.4.2-11 地下施設付近の塩分分布, ポテンシャル分布拡大図 (case3)



(a)地質区分



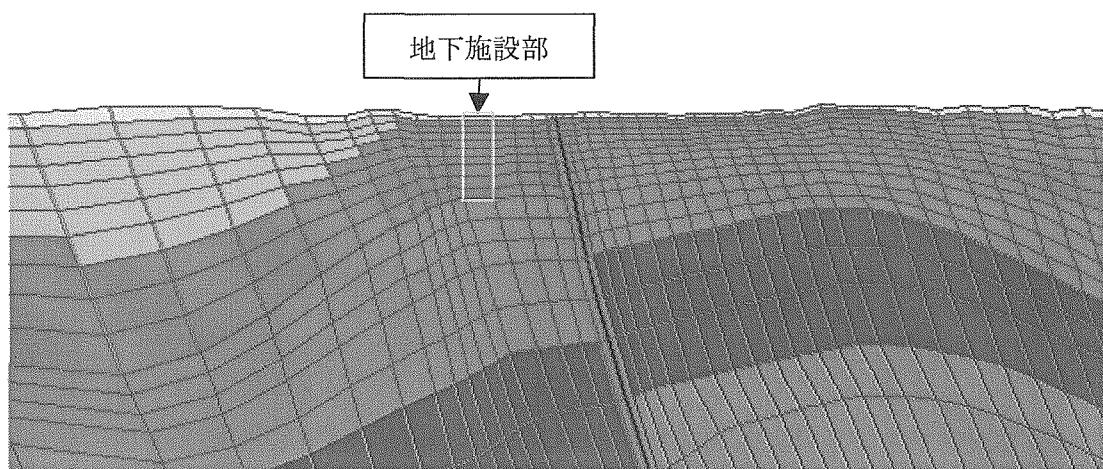
(b)密度を考慮したポテンシャル・流速分布



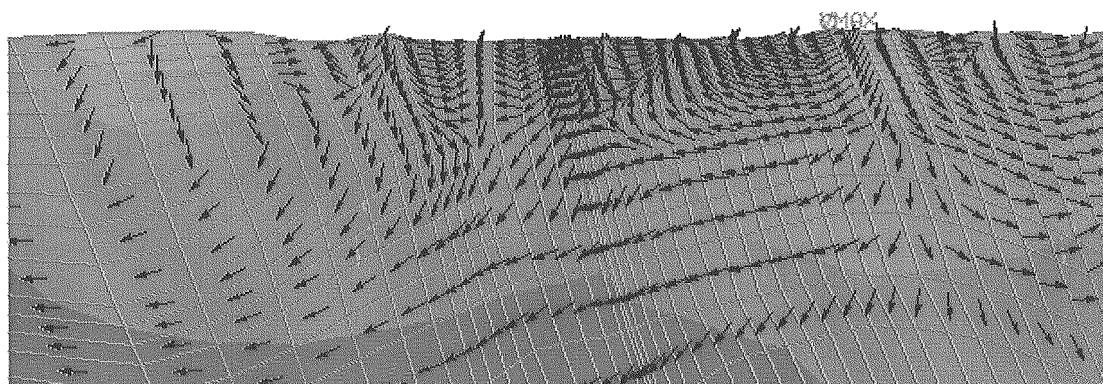
0 1.5km

(c) 塩分分布

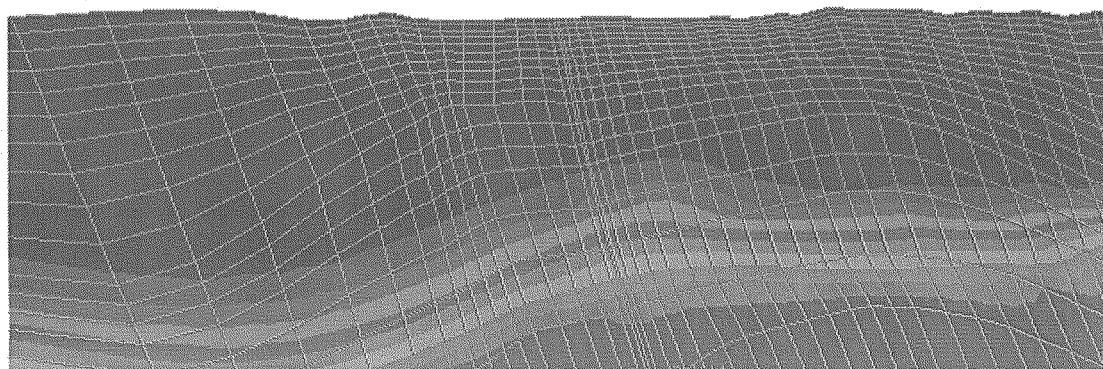
図 3.4.2-12 地下施設付近の塩分分布, ポテンシャル分布拡大図 (case4)



(a)地質区分



(b)密度を考慮したポテンシャル・流速分布



0 1.5km

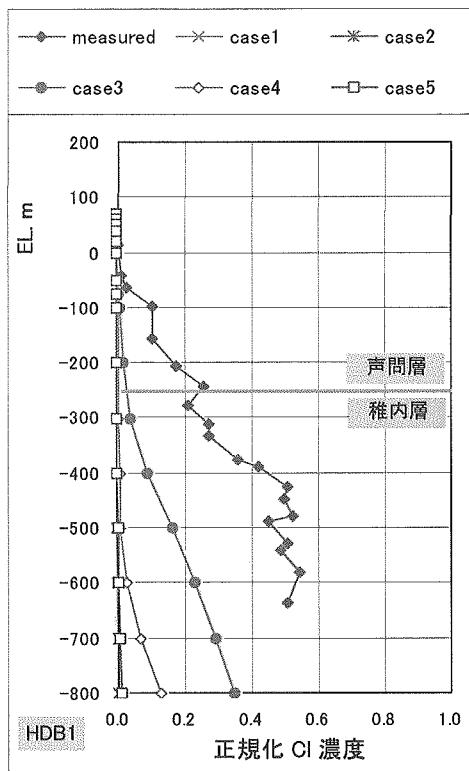
(c) 塩分分布

図 3.4.2-13 地下施設付近の塩分分布, ポテンシャル分布拡大図 (case5)

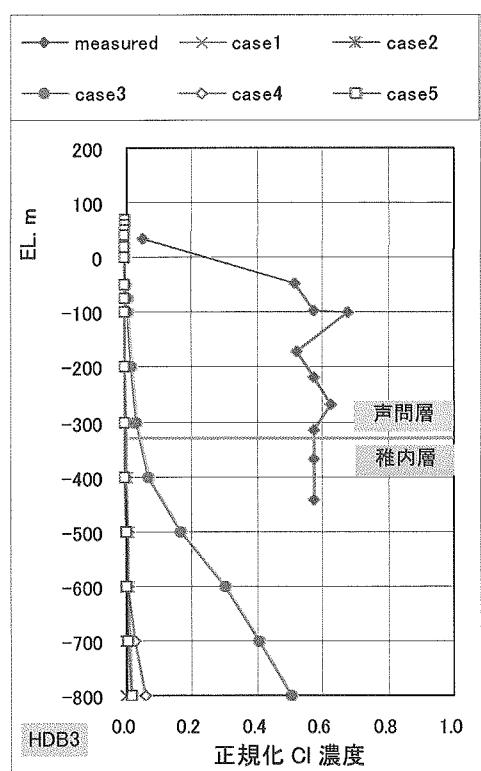
(2) 試錐孔での塩分濃度、ポテンシャル分布

試錐孔 HDB-1, HDB-3, HDB-4, HDB-5 孔で計測された塩分濃度、ポテンシャル分布と解析結果の対比を図 3.4.2-14, 図 3.4.2-15 に示す。

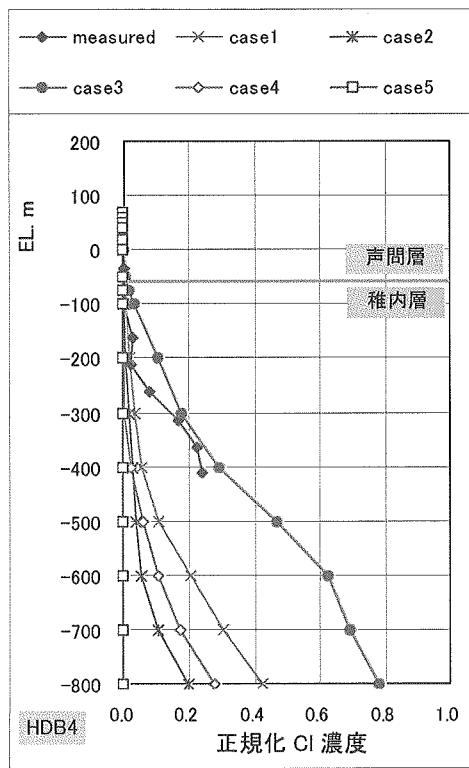
計測値、解析値とも、塩分濃度は海水の塩素濃度を 19g/l を 1.0 として正規化した濃度で示す。



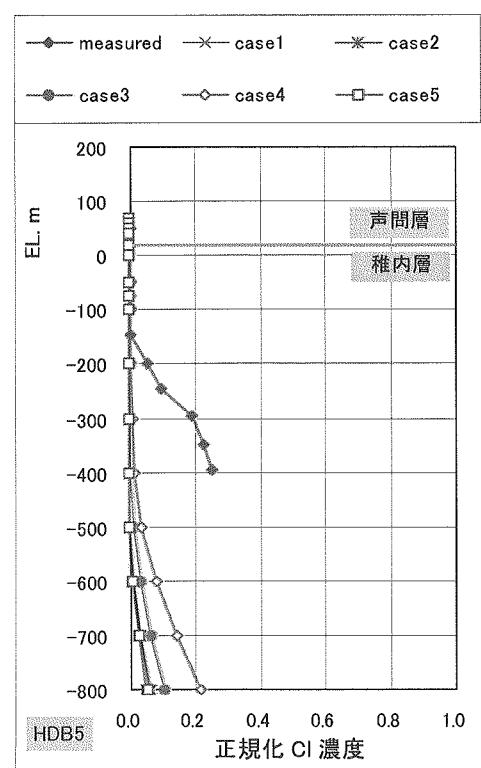
(a)HDB-1



(b) HDB-3

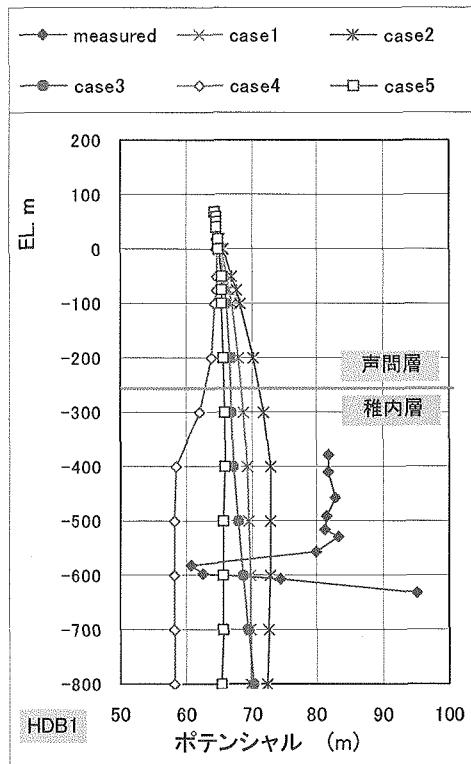


(c)HDB-4

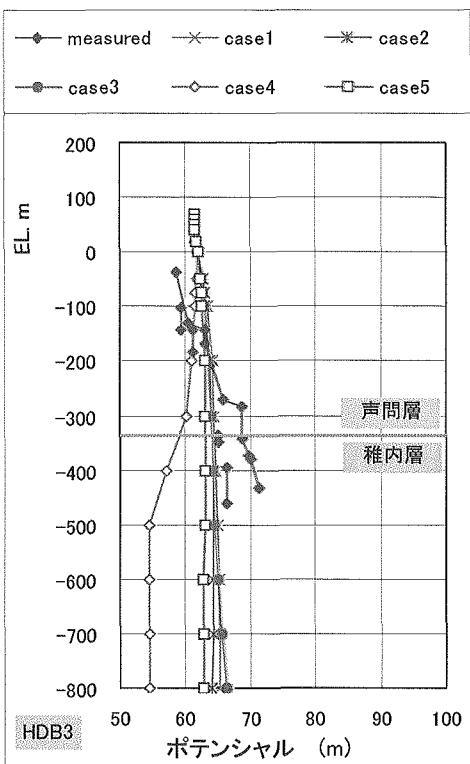


(d) HDB-5

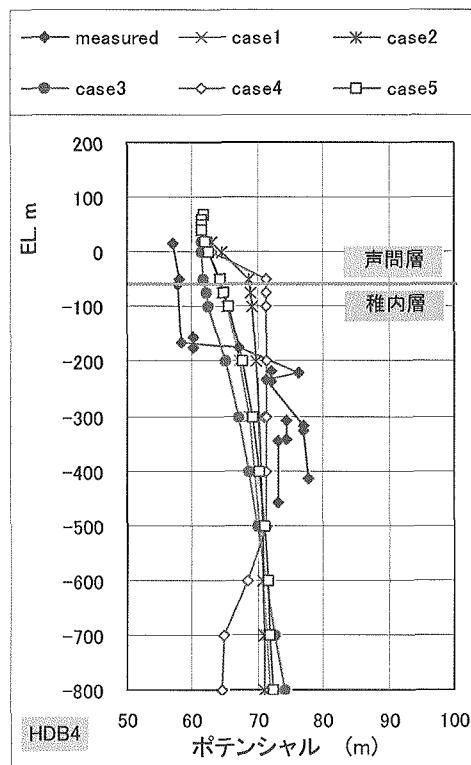
図 3.4.2-14 塩分濃度分布



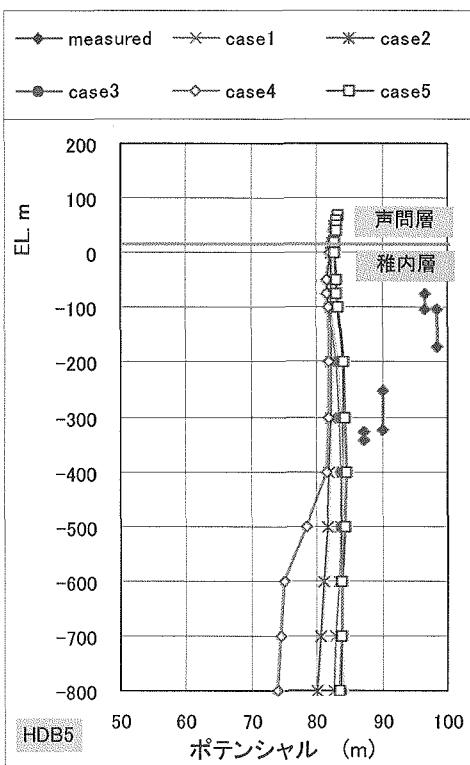
(a)HDB-1



(b) HDB-3



(c)HDB-4



(d) HDB-5

図 3.4.2-15 ポテンシャル分布

### 3.4.3 考察

上記解析結果から示されること、考えられることを以下に示す。

#### (1) 塩分濃度・密度を考慮したポテンシャル分布

図 3.4.2-2～図 3.4.2-13 に示される塩分濃度・密度を考慮したポテンシャル分布から以下のことが示される。

- ・塩分濃度を有する地下水は、涵養量として地表から与えた濃度 0 の水により押し出され、希釈され徐々に淡水化する部分が存在する。
- ・淡水化する部分は、山地部など地形的に凸部で深くなっている。これは涵養された淡水が深部まで潜り込むことによる。
- ・case2, case4 に見られるように、構成する地層の中間に透水性の高い層が存在する場合、透水性の高い部分を淡水が多く流れるため塩分濃度の希釈速度が速く、この透水性の高い箇所から先に淡水化する。この結果は、ボーリング調査した際など途中で塩分濃度の低い箇所が見られた場合、その箇所の透水係数が上下層と比較し相対的に透水係数が大きい層である可能性を示唆している。
- ・case1, case2, case3 の比較は稚内層の透水係数の影響を示すが、塩分濃度をみると、透水係数の高い case2 が最も深部まで淡水化し、case3 の透水係数の小さいケースは淡水化部が浅くなっている。地下水の塩分濃度分布を把握することは、透水係数を評価する際の一つの手がかりとなることを示した結果と解釈される。
- ・case5 の断層の透水係数を小さく設定した影響は図 3.4.2-6 の全領域を対象とした図からは確認されないが、図 3.4.2-13 のポテンシャルのコンタ図で断層の左右でポテンシャル値の段差が確認される。

#### (2) 試錐孔での塩分濃度、ポテンシャル分布

図 3.4.2-14, 図 3.4.2-15 に示す HDB 孔内の正規化された Cl 濃度分布とポテンシャル分布の解析、実測値から以下のことが示される。ここに示す解析結果は非定常計算の 300 万年時点に相当する。300 万年は対象とする地層の生成年代から想定した経過時間に相当する。

- ・Cl 濃度分布に関して、実測値は HDB-4 の解析結果 case3 を除き解析結果より高い濃度を示す。この原因として、解析での設定に対して、実際の涵養量がより小さい可能性、実際の透水係数がより小さい可能性、実際の間隙率がより大きい可能性などが想定される。また 300 万年と非常な長期であり、その間に生じた地形形状の変遷などの影響等も一因として挙げられる。
- ・case3 は塩分濃度が他のケースより高くなっている。これは稚内層の透水係数を小さく設定している影響である。稚内層の透水係数が小さいため天水起源の淡水の侵入量が少なく、塩分の洗い出しが進まず塩分が残ったためと考えられる。実測の塩分濃度分布を再現できるよう、透水係数に関して設定を変え、塩分濃度を再現する透水係数設定に関して検討することも今後必要と考えられる。
- ・ポテンシャル分布の解析と実測の対比では、4.2 で示したように実測は解析に対して深度方

向の変化が大きくなっている。今後、割れ目帯のモデル化など、より大きな不均質性を有するモデル化が必要と考えられる。

- 特に HDB-1 での EL-600m 付近, HDB-3 での EL-150m, EL-280m 付近, HDB-4 の EL-200m 付近, HDB-5 の EL-200m 付近に関しては地質柱状図など再度確認し、地下水のモデル化に必要な地質構造の不均質性や割れ目帯の存在についての検討が必要と思われる。

### 3.5 まとめ

広域スケールを対象として、定常・3次元地下水流动解析、HDB 孔該当断面での塩分濃度に着目した非定常・2次元密度流解析を実施した。この結果得られた知見を以下に示す。

定常・3次元地下水流动解析結果からは、以下のことが示された。

- ・ポテンシャルは地形の影響を受け、地形の高いところでは高いポテンシャル値、地形の低いところでは低いポテンシャル値を示す。
- ・P-1, P-2, P-3 は涵養域、P-1'は流出域となっている。
- ・地下水年代は全般的に深い点ほど地下水年代の古い傾向で、1000 年オーダから 100 万年オーダの範囲にある。
- ・地下施設該当部の浅部では上昇流、深部では下降流となり、上昇流・下降流の分界位置は声間層、稚内層の透水係数に依存する。
- ・深部で下降した地下水はいずれの透水係数設定でも南西方向に向かい、天塩川よりも北側で地表面に出てくる。

この結果から 3.1.2 の概念モデルで、ポテンシャル分布から想定する地下水流动方向と、塩分濃度から推定する地下水流动は整合しないことを指摘したが、解析からは塩分濃度から推定される地下水流动方向と同じ南西方向に流れることが示された。

塩分濃度に着目した密度流の影響を考慮した非定常・2次元密度流解析結果からは以下のことが示された。

- ・塩分濃度は山地部など地形的凸部からの涵養により深部まで天水起源の淡水が侵入し塩分濃度は深部まで低く、地形的凹部では湧出により浅部でも塩分濃度が高くなる傾向が示された。
- ・上記結果から、地形的凸部では深部でも地下水年代が若く、逆に凹部では浅部でも地下水年代が古いことが示唆された。
- ・透水係数の高い層は、淡水の供給路となり塩分濃度が低くなる傾向が示された。

以上のことから、3.1.2 で塩分濃度に関して想定した洗い出しによる塩分濃度からの地下水流动の想定は解析的にも整合する結果が得られた。ただし、Cl 濃度の実測値との比較からは、解析で設定したパラメータに対して解析と実測値の整合性の観点から

- ・実際の涵養量がより小さい可能性
- ・実際の透水係数がより小さい可能性
- ・実際の間隙率がより大きい可能性

などが想定された。

また、対象とする時間スパンは 300 万年と非常な長期であり、より精度良い検討ではその間に生じた地形形状の変遷、古気候変動なども考慮する必要性が示唆された。



## 4. 立坑掘削に伴う地下水流动系への影響の予測

### 4.1 概要

立坑掘削に伴う地下水流动系への影響の予測として、以下に示す三種類のモデルによる検討を行った。①は予察的検討、②は立坑掘削に伴う広域的な影響を把握する意味での解析、③はより詳細に立坑掘削の影響を把握する目的での解析である。③の解析が 2.3 で示した解析モデルに該当する。いずれの解析も掘削工程は考慮せず、立坑設置状態での解析としている。

- ①MODFLOW による立坑形状を模擬した解析
- ②広域スケールモデルでの解析
- ③広域スケールと整合性を有する立坑形状を反映させた施設スケールでの解析

### 4.2 MODFLOW による立坑形状を模擬した解析

MODFLOW(MODular three-dimensional finite-difference ground-water FLOW model)は、米国地質調査所において開発された公開プログラムである。MODFLOW を核として、データ作成プログラムと結果表示プログラムをつけ加えてパッケージとした商用バージョンがある。公開されて以来、多くの地下水理技術者によって利用されており、非常に信頼性の高い解析プログラムである。

MODFLOW は、ダルシーの法則を仮定した水の質量保存則を有限差分法に基づいて、数値的に解く手法を採用している。MODFLOW は基本的に 3 次元解析のプログラムであり、対象地盤の地層構造を 3 次元的にモデル化することが可能である。また、種々の境界条件を扱うことができるなどの特徴を有している。ユーザインターフェースが使い易く、モデルの作成が容易であるため予察的解析、概要把握に適している。そのため MODFLOW 用い、立坑形状をモデル化し、湧水量、水位低下、掘削に伴う塩分の立坑への流入に関して予察的解析として掘削影響の概要を把握した。

ここでは以下に示す三段階の解析を実施した。

- ステップ①：立坑掘削前の状態での地下水定常解析
- ステップ②：ステップ①と同条件で、3 本の立坑（換気立坑、西立坑、東立坑）と水平坑道（GL-250m, GL-500m 坑道）が設定された条件での地下水定常解析
- ステップ③：②での流速分布を適用した塩分濃度を対象として物質移行解析

③の物質移行解析は GL-500m 坑道下方に水平に、一様に単位濃度 ( $C=1.0$ ) を有する塩水系地下水を想定、地下水中の濃度変化や坑道・立坑内への湧水濃度の変化を計算するものである。密度の効果は考慮していない。

#### 4.2.1 解析モデル

##### (1) 立坑と水平坑道のモデル形状

モデル化した立坑・坑道の鳥瞰図、平面図を図 4.2.1-1～図 4.2.1-4 に示す。

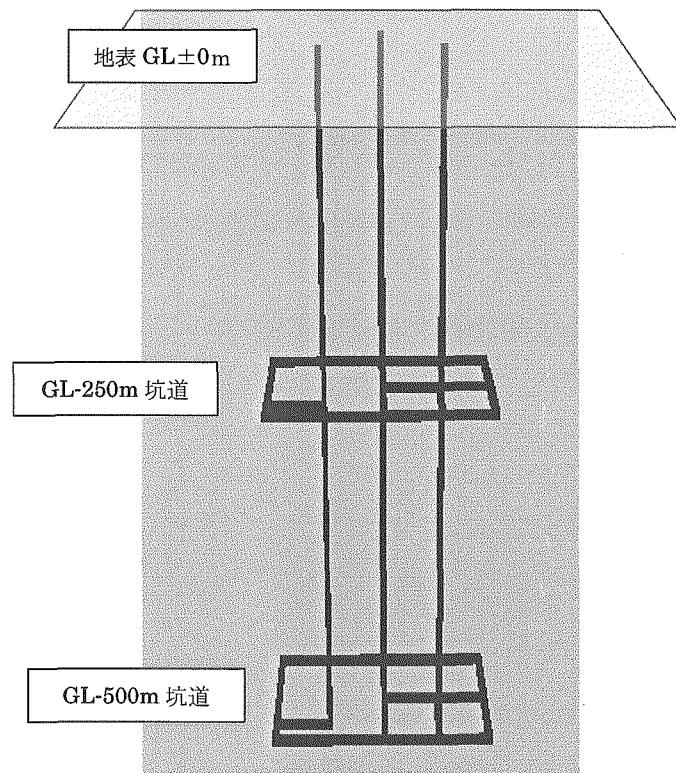


図 4.2.1-1 立坑、水平坑道のモデル鳥瞰図－1

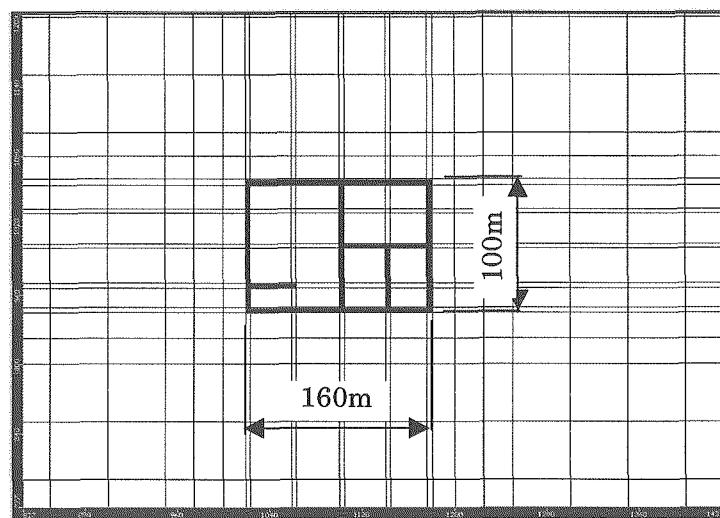


図 4.2.1-2 水平坑道周辺平面図

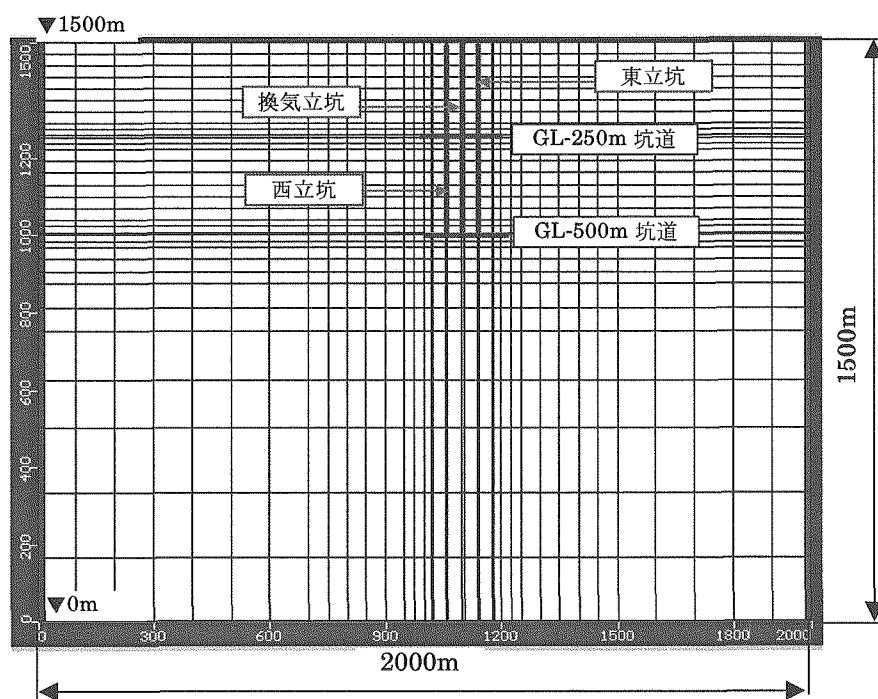


図 4.2.1-3 立坑、水平坑道のモデル鳥瞰図－2

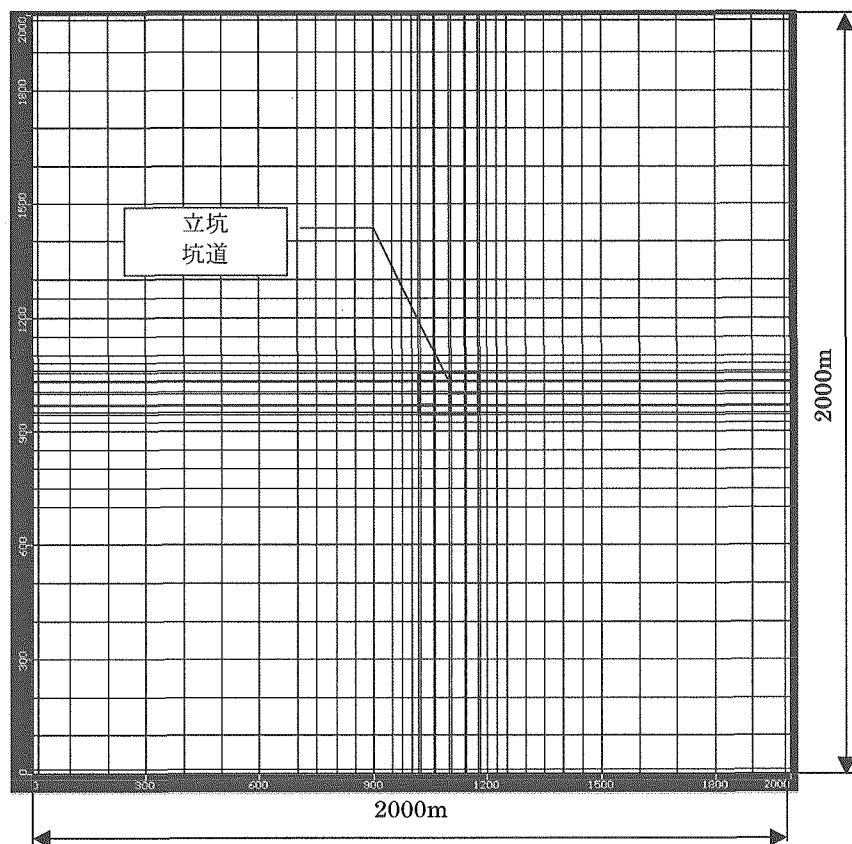
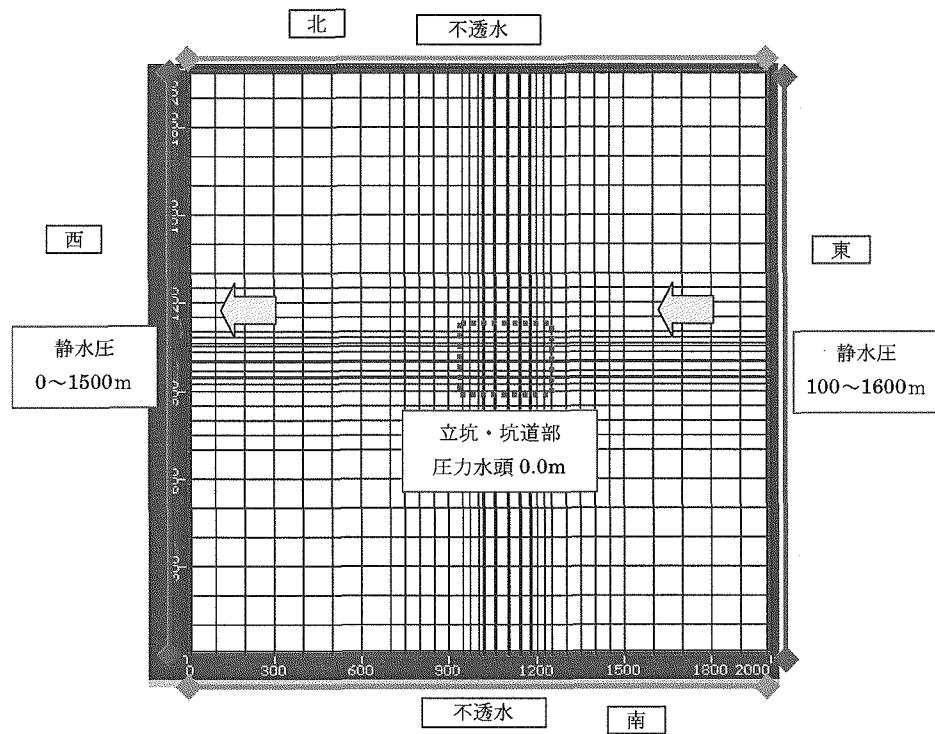


図 4.2.1-4 解析領域平面図

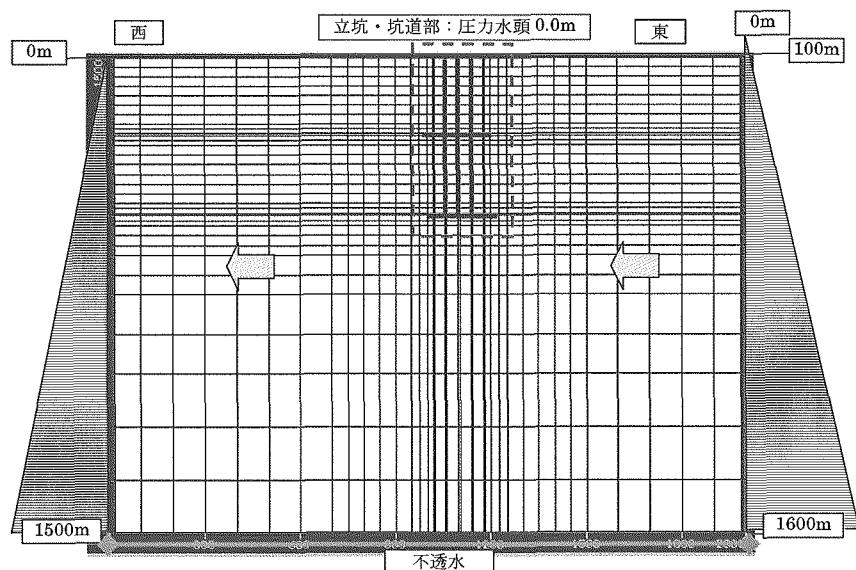
## (2) 境界条件・初期条件

### (a) 地下水流動解析の境界条件

境界条件の設定を図 4.2.1-5 に示す。南北側面は不透水境界、東西側面はポテンシャル一定条件（静水圧分布）で、東側は西側より 100m 高いポテンシャル設定としている。立坑・坑道は圧力水頭 0m（ポテンシャルはその地点標高値に等しい）としている。



(a) 平面図



(b) 鉛直断面図

図 4.2.1-5 境界条件設定

### (b)物質移行解析の境界条件、初期条件

物質移行の境界条件は、特に指定していない。このため初期に与えた塩分は地下水流れとともに、立坑・坑道や地下水流出境界から解析領域外に排出されることになる。

初期条件は図 4.2.1-6 に示すように全領域一様に GL-531.5m 以深を濃度 1.0 とした。

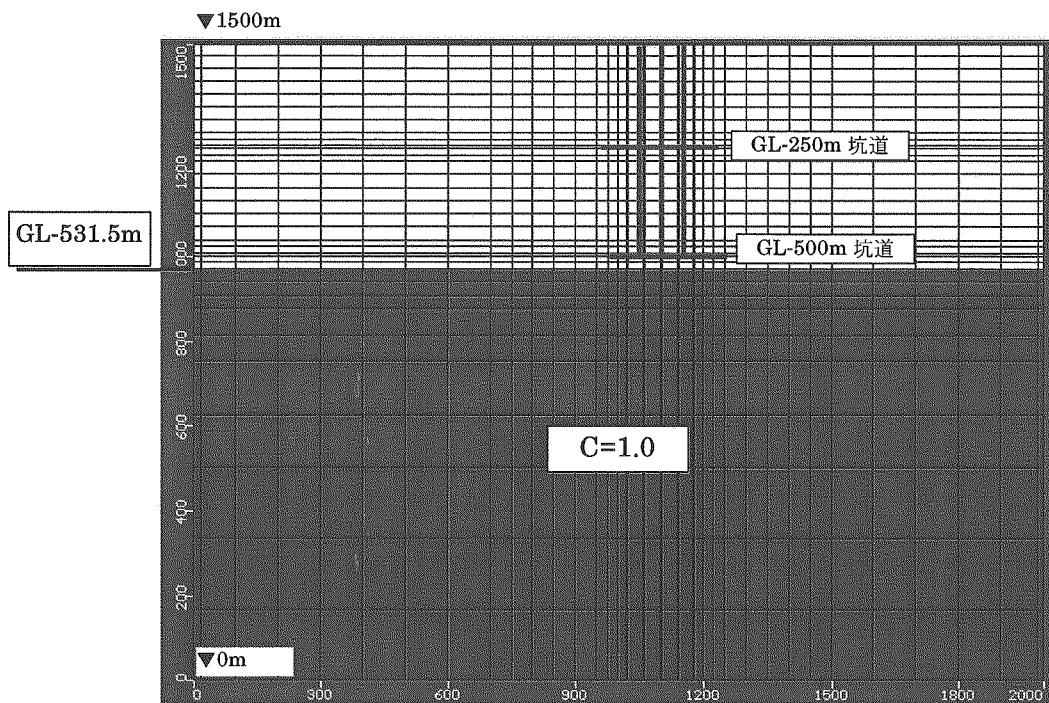


図 4.2.1-6 境界条件設定

### (3) 物性値

設定した物性値を表 4.2.1-1 に示す。

表 4.2.1-1 設定した物性値

パラメータ	値	備考
透水係数 $k$ (m/s)	$1 \times 10^{-8}$	均一、声間層相当
有効間隙率 $n$ (-)	0.4	均一
比貯留係数 $S_s$ (1/m)	$1 \times 10^{-4}$	均一
比産出率 $S_y$ (-)	0.1	均一
縦分散長 $\alpha_L$ (m)	10	均一

#### 4.2.2 解析結果

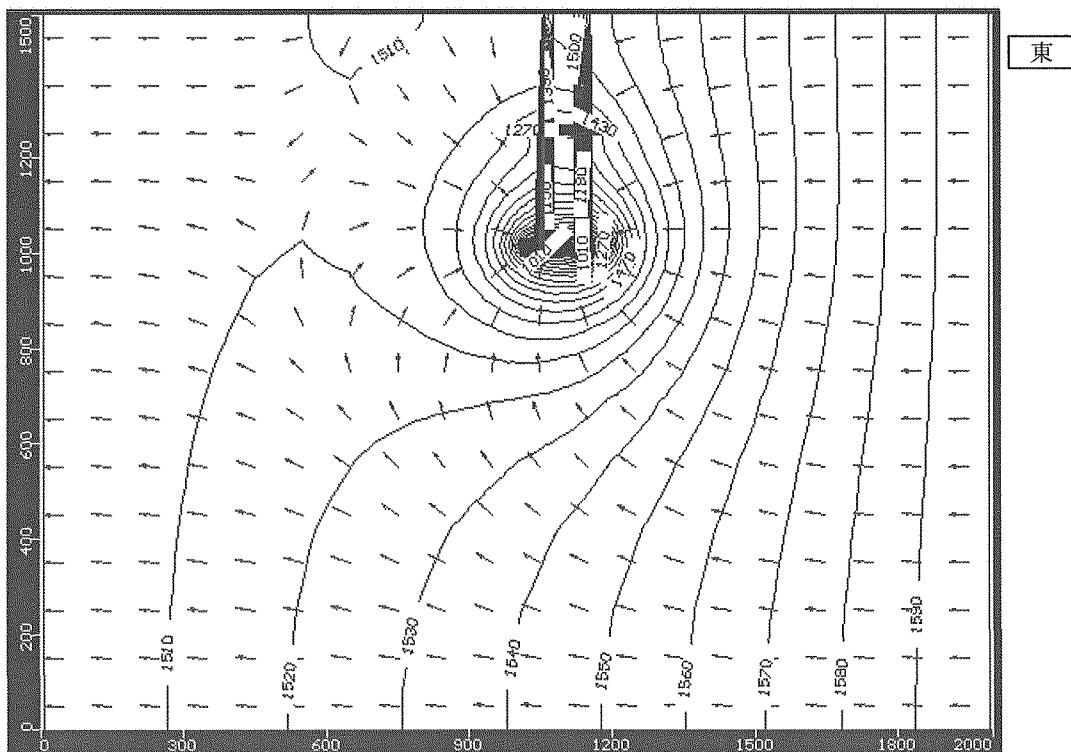
解析結果として、

- ・3本の立坑（換気立坑、西立坑、東立坑）と水平坑道（GL-250m、GL-500m 坑道）が設定された条件での地下水定常解析でのポテンシャル・流速分布
- ・立坑、水平坑道を設置したことによるポテンシャル低下量、
- ・立坑、坑道への湧水量
- ・塩分濃度の変化

を示す。

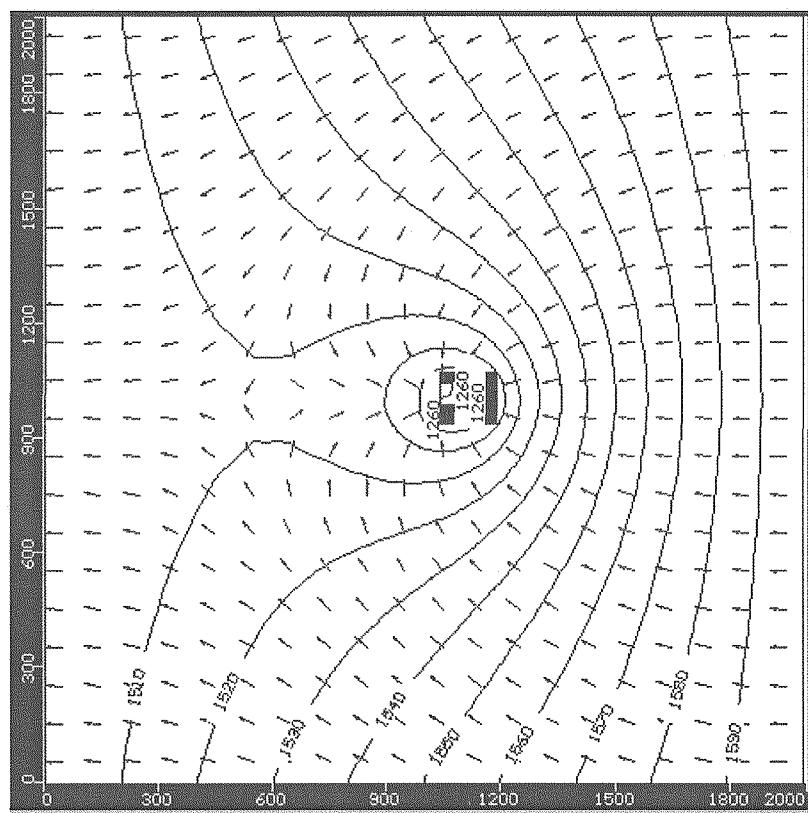
##### (1) ポテンシャル、流速分布

ポテンシャル、流速分布として、(a)立坑を含む東西鉛直断面、(b)GL-250m 坑道を含む水平断面、(c)GL-250m 坑道を含む水平断面での分布を図 4.2.2-1 に示す。図中の流速は流向のみを表している。また、ポテンシャル分布および立坑・坑道形状との関係を鳥瞰図として図 4.2.2-2 に示す。

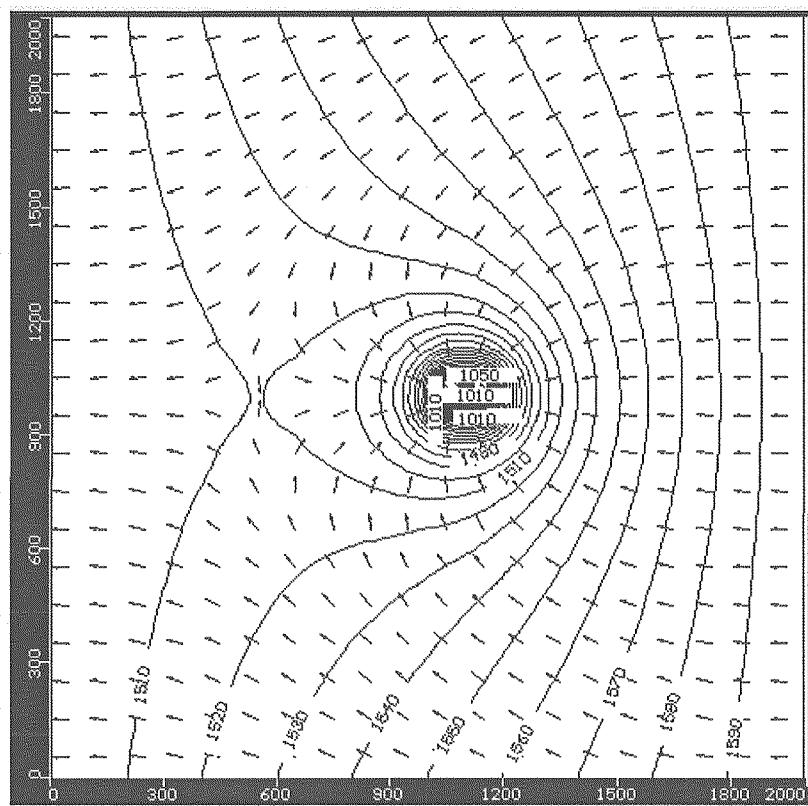


(a) 立坑を含む東西鉛直断面

図 4.2.2-1 立坑近傍でのポテンシャル・流向分布

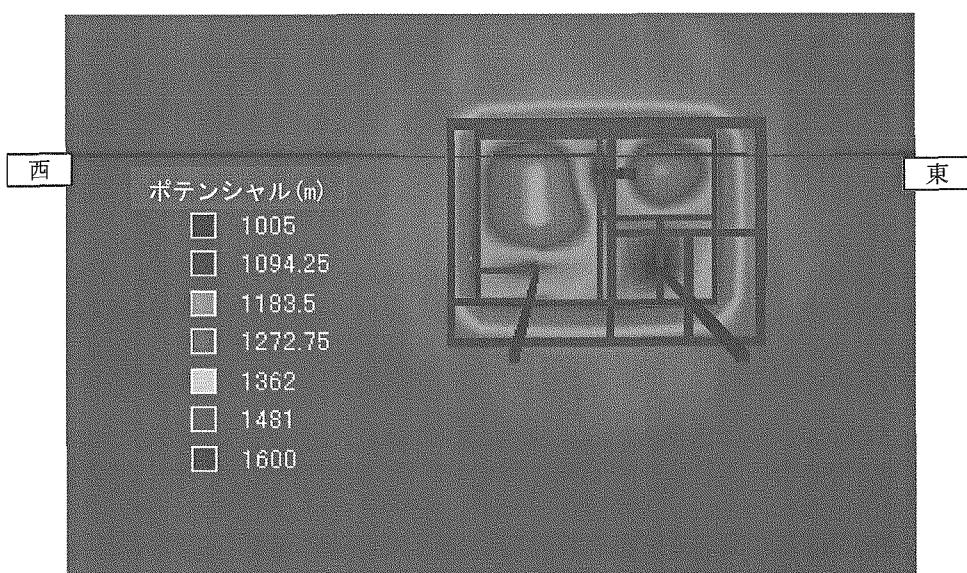


(b) GL-250m 坑道を含む水平断面

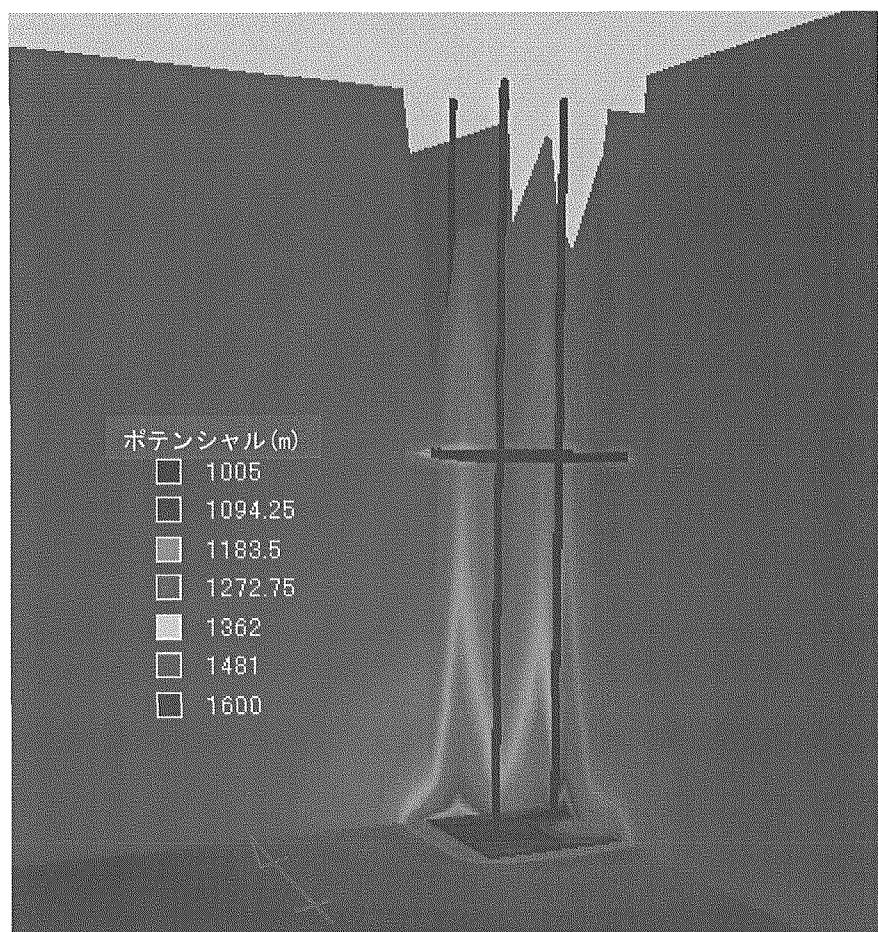


(c) GL-500m 坑道を含む水平断面

図 4.2.2-1 立坑近傍でのポテンシャル・流向分布



(a) 上方より

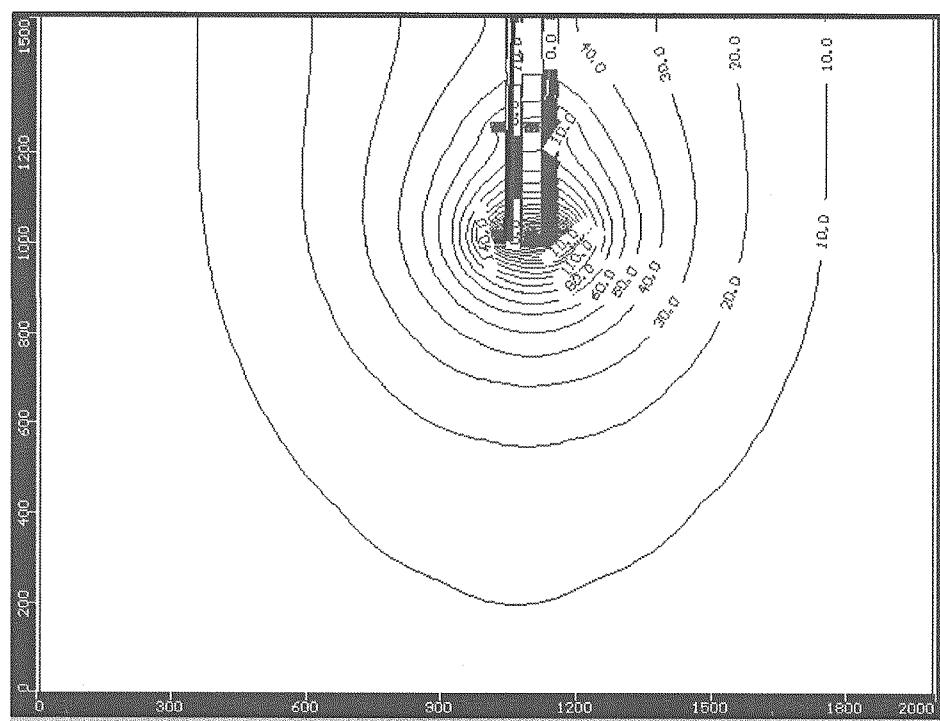


(b)南東側より

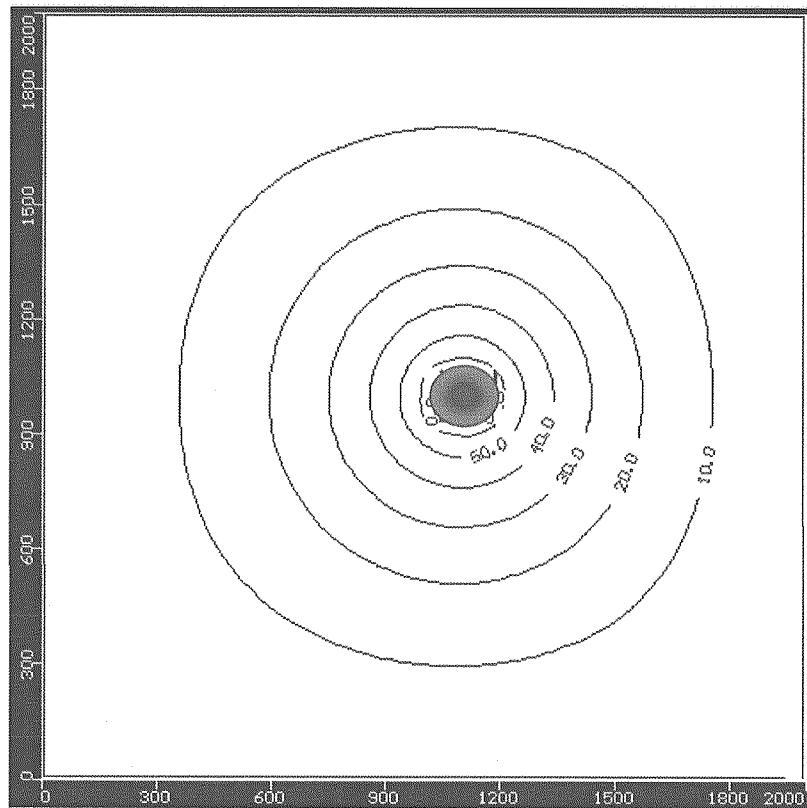
図 4.2.2-2 立坑近傍でのボテンシャル分布

## (2) ポテンシャル低下量

ポテンシャル低下量の分布を図 4.2.2-3 に示す。

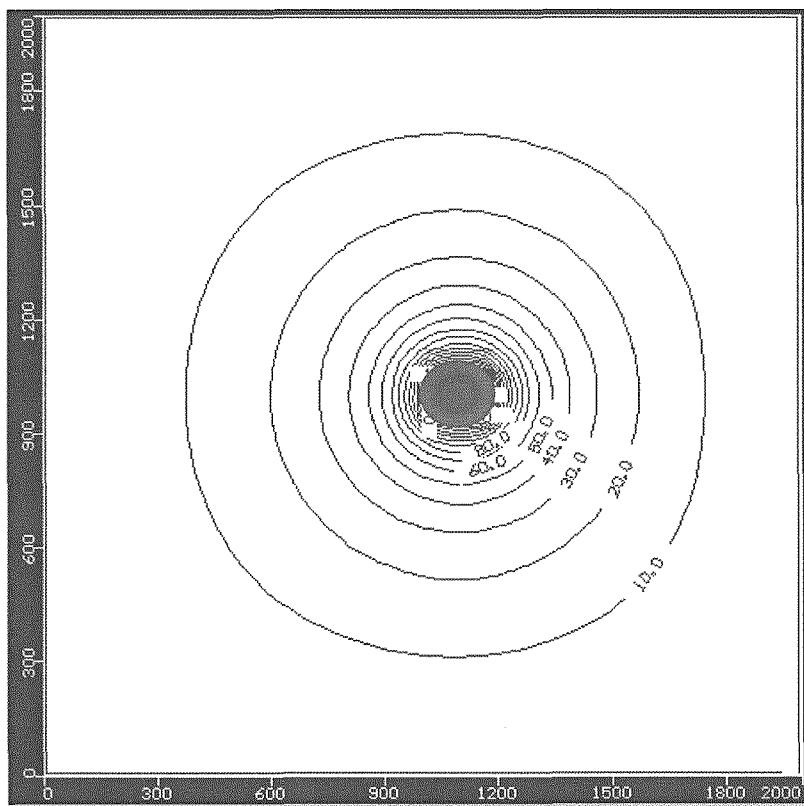


(a) 立坑を含む東西鉛直断面



(b) GL-250m 坑道を含む水平断面

図 4.2.2-3 ポテンシャル低下量コンタ



(c) GL-500m 坑道を含む水平断面  
図 4.2.2-3 ポテンシャル低下量の分布

### (3) 湧水量

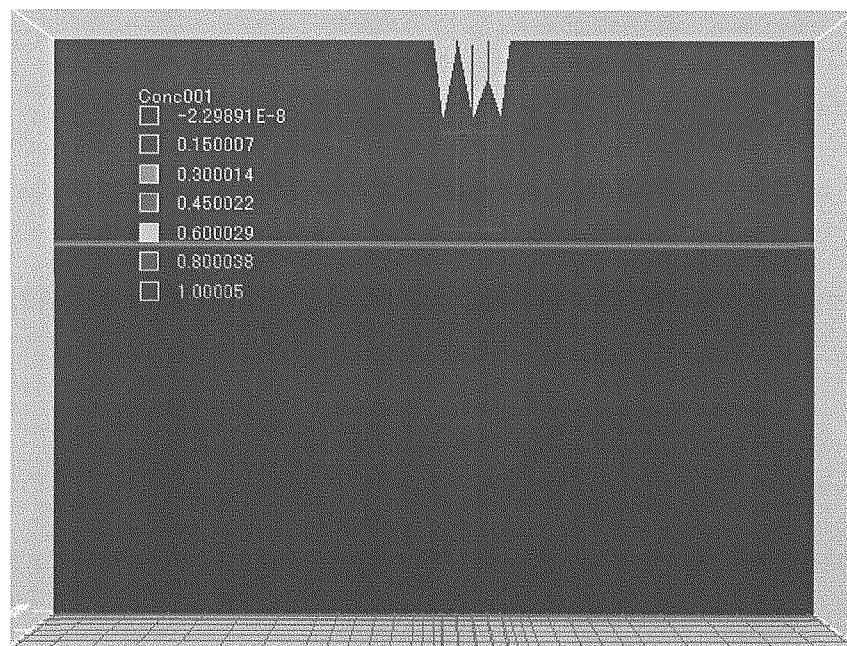
各立坑、坑道への湧水量の計算結果を表 4.2.2-2 に示す。

表 4.2.2-2 湧水量

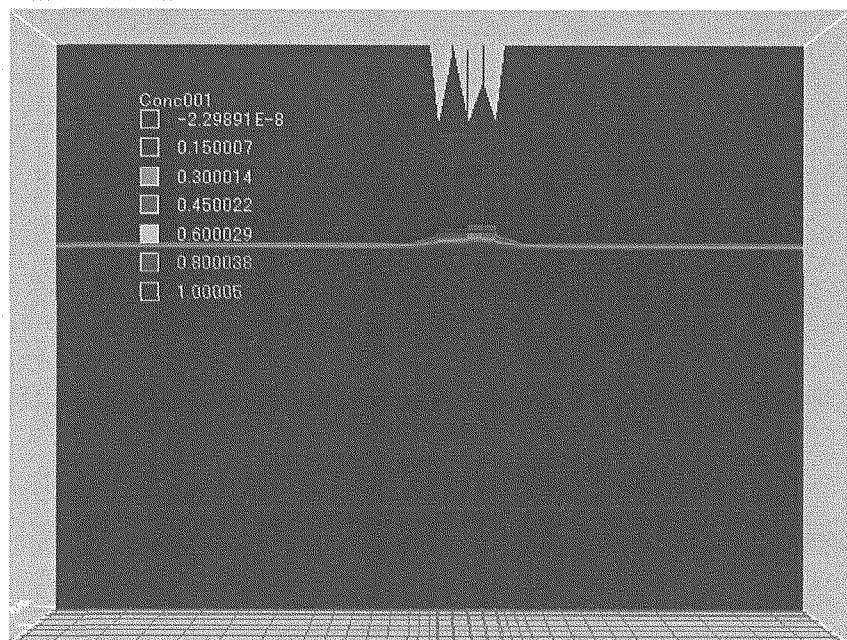
換気立坑	$\text{m}^3/\text{day}$	3.7
西立坑	$\text{m}^3/\text{day}$	3.8
東立坑	$\text{m}^3/\text{day}$	3.8
GL-250m坑道	$\text{m}^3/\text{day}$	12.3
GL-500m坑道	$\text{m}^3/\text{day}$	120.3
合計	$\text{m}^3/\text{day}$	143.9

#### (4) 深部塩分の移行特性

深部地下水に含まれる塩分がどのような挙動を示すかを確認するために, GL-500m 水平坑道より約 30m 下方 (初期分布 GL-531.5m より下方) に相対濃度 1.0 の塩分を想定し, 濃度の時間変化を解析した。解析では, 掘削完了時の地下水流动の定常解析結果を用い, 移流分散解析 8000 日間の濃度変化を対象とした。濃度分布図, 水平坑道四隅における濃度の経時変化を以下に示す。

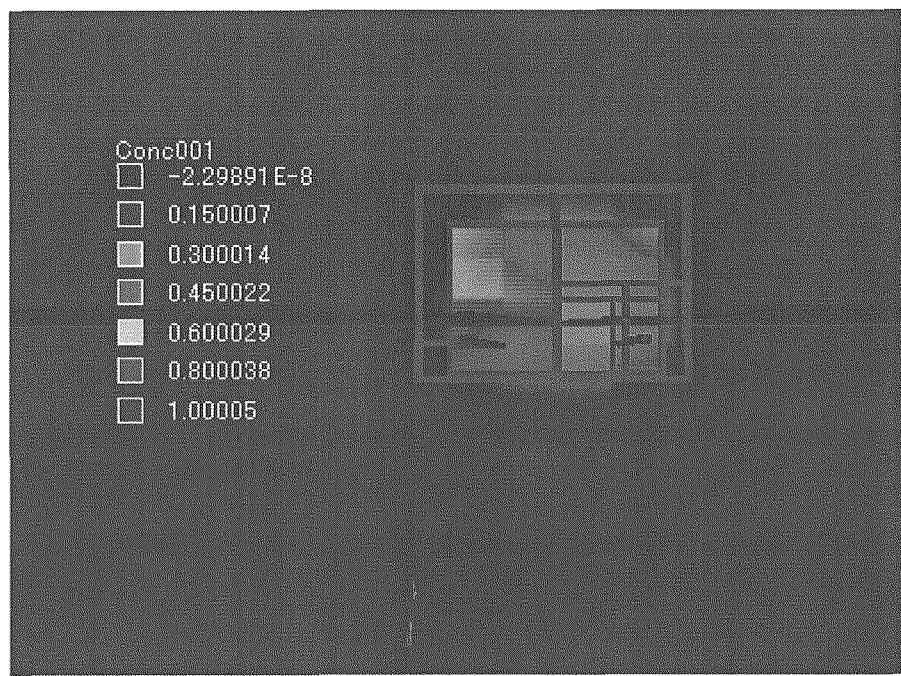


(a) 初期分布 (塩分分布上面 GL-531.5m)

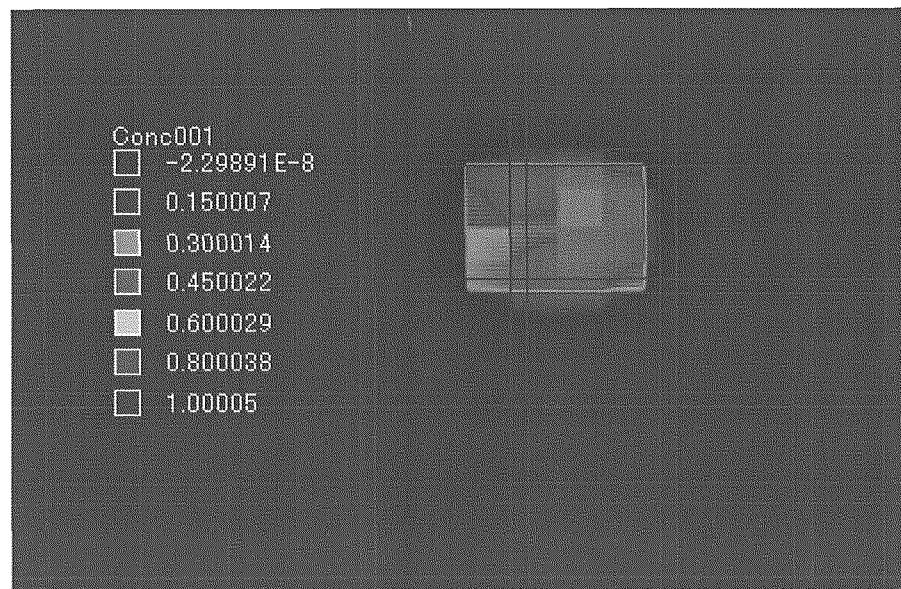


(b) 8000 日後の分布

図 4.2.2-4 塩分濃度コンタ

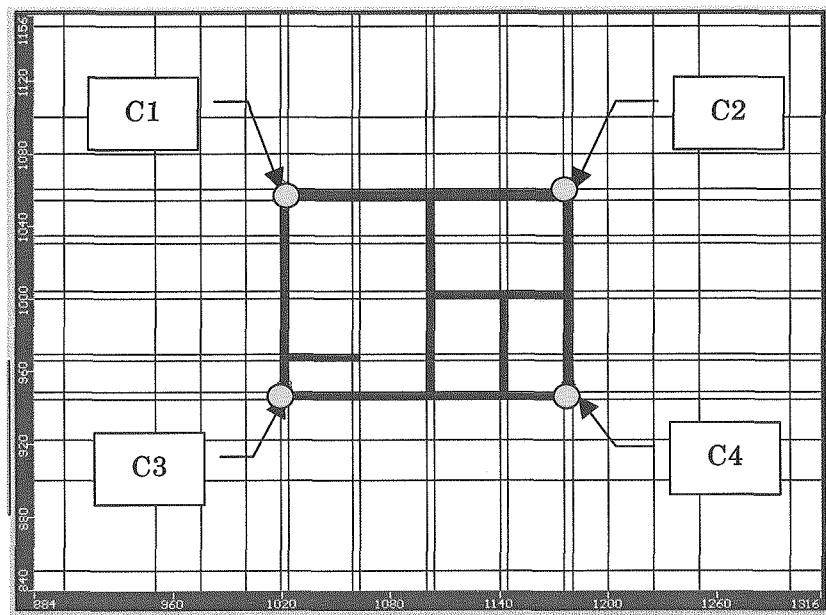


(a) 上方より望む

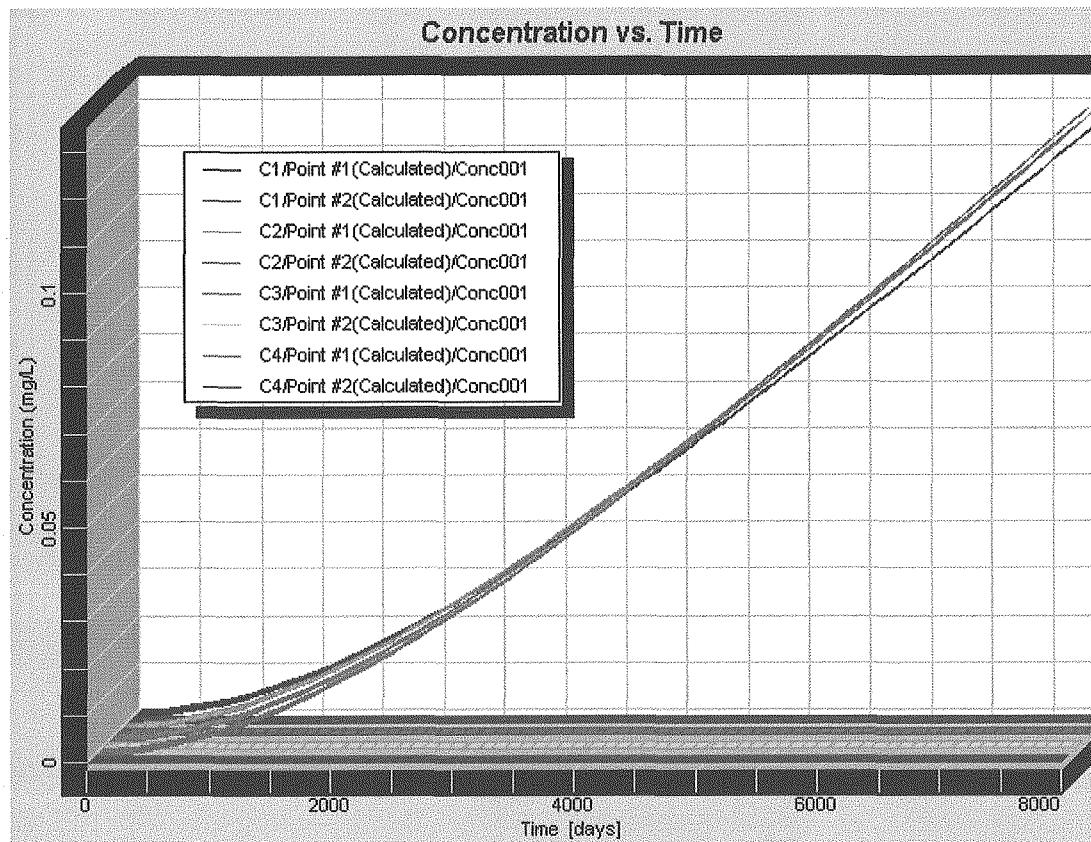


(b) 底部から望む

図 4.2.2-5 塩分濃度コンタ



(a) 観測点位置図 (深度はそれぞれ GL-250m, GL-500m)



(b) 塩分濃度経時変化

図 4.2.2-6 塩分濃度経時変化

#### 4.2.3 考察

上記結果より示されること、考えられることを以下に示す。

- ・掘削によるポテンシャルの低下は地下施設を中心とした同心円状に広がる。
- ・立坑・坑道内への定常状態での総湧水量は約  $150\text{m}^3/\text{day}$  と想定される。
- ・立坑・坑道への湧水により、周囲の塩分を有する地下水を集める効果が見られ、湧水として塩分を含んだ地下水が混入する。湧水の塩分濃度を把握するためには立坑・坑道周辺の地下水に含まれる塩分濃度を把握する必要がある。

#### 4.3 広域スケールモデルでの解析

立坑掘削に伴う広域的な影響を把握する意味で、2.3 で作成した広域スケールモデルを使用した解析を実施した。図 4.3-1 に示すように、広域スケールモデル中央部に立坑建設位置が該当し、その 1 要素が GL-250m, GL-500m 坑道形状に相当している。この要素を構成する節点に掘削により壁面が大気圧となる条件を設定し、掘削影響解析を実施した。

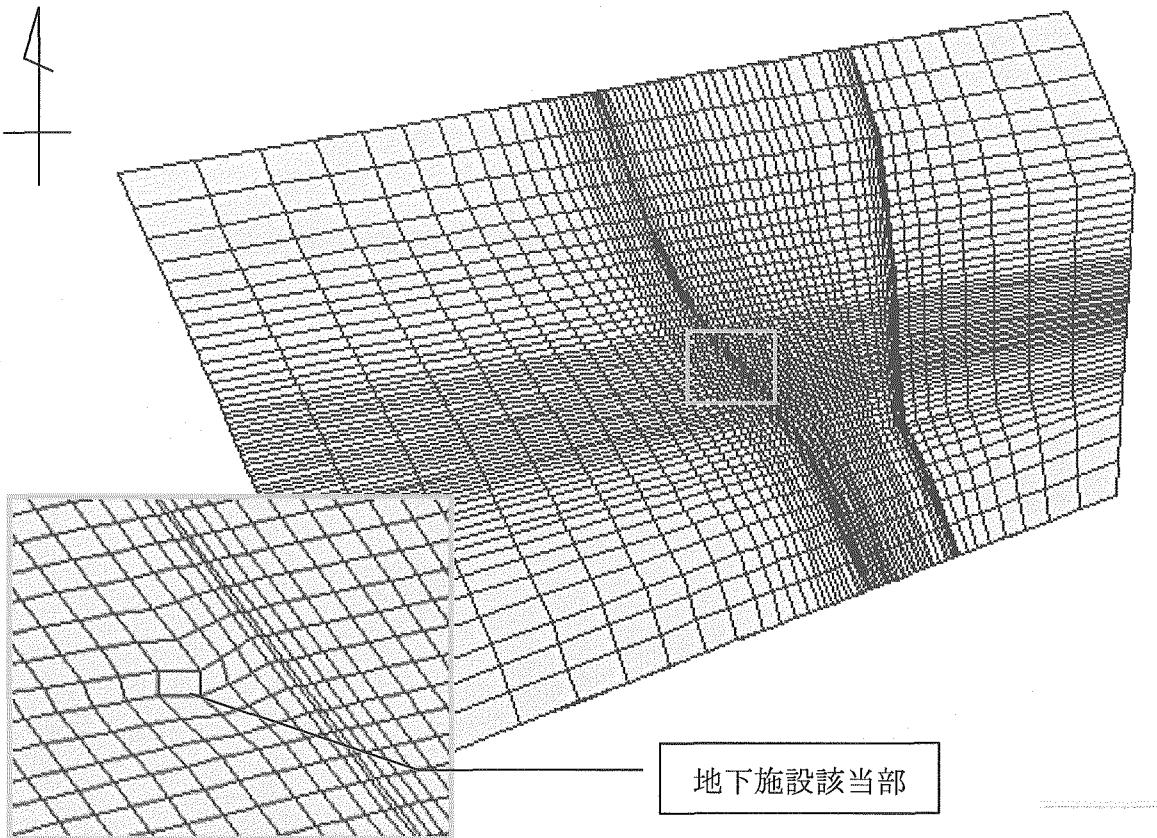
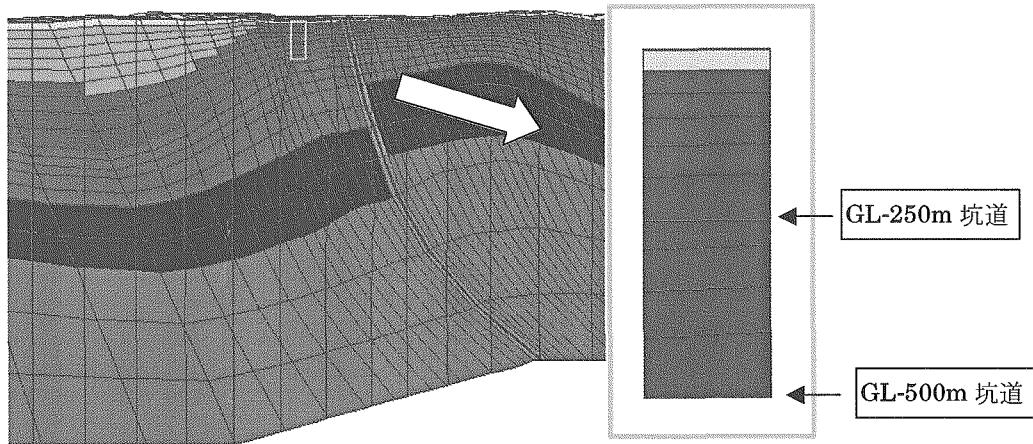


図 4.3-1 広域スケール解析モデルと地下施設該当部

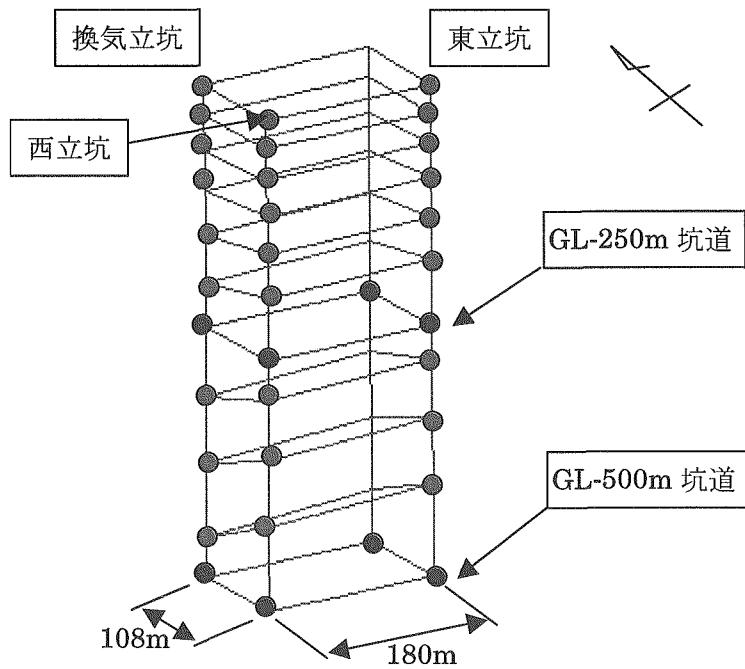
#### 4.3.1 解析モデル

##### (1) 立坑部のモデル化

広域スケールモデル内の立坑部のモデル化に関して図 4.3.1-1 に示す。立坑部は 10 層の要素が積み重なった部分で、GL-250m, GL-500m 坑道外形に近い大きさとしている。換気立坑、西立坑、東立坑に見立てた節点は鉛直方向にそれぞれ 11 節点配置し、その節点境界条件を設定している。GL-250m, GL-500m 坑道該当部は四隅の節点に境界条件を設定している。



(a) 広域スケールモデル内の立坑部



(b) 立坑部詳細要素形状と境界条件設定節点

図 4.3.1-1 立坑部のモデル化

## (2) 境界条件・初期条件

### (a)境界条件

境界条件は、4.3に示す地下水流动解析の境界条件に加え、図4.3.1-1(b)に示す、立坑、坑道該当節点を自由浸出条件として設定した。図4.3.1-2に境界条件設定の概要を図示する。

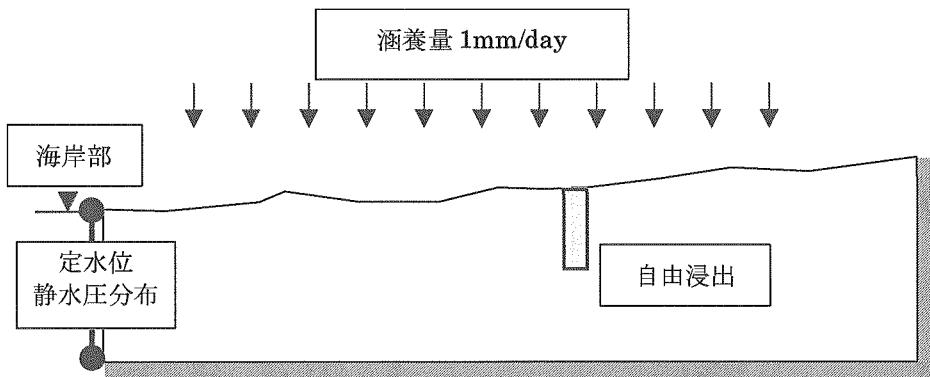


図4.3.1-2 境界条件設定概要

### (b)初期条件

初期条件は、4.3に示す解析結果を適用した。

## (3) 物性値・解析ケース

物性値、解析ケースは4.3地下水流动解析と同じである。透水係数設定値、解析ケースを表4.3.1-1に再掲する。

表4.3.1-1 透水係数の設定（表4.3.1-1再掲）

No.	記号	地質	case1		case2		case3		case4		case5	
			基本ケース k(m/s)	稚内・大 k(m/s)	稚内・小 k(m/s)	深度依存性 k(m/s)	大曲・小 k(m/s)	大曲・小 k(m/s)	深度依存性 k(m/s)	大曲・小 k(m/s)	大曲・小 k(m/s)	深度依存性 k(m/s)
1	Cr	鬼志別他基盤岩	1.0E-11	1.0E-11	1.0E-11	1.0E-11	1.0E-11	1.0E-11	1.0E-11	1.0E-11	1.0E-11	1.0E-11
2	Mp	増幌	5.0E-10	5.0E-10	5.0E-10	5.0E-10	5.0E-10	5.0E-10	5.0E-10	5.0E-10	5.0E-10	5.0E-10
3	Wk1	稚内	下位層									5.0E-11
4	Wk2	稚内	↓									1.1E-09
5	Wk3	稚内	↓	1.0E-08	1.0E-07	1.0E-09	1.0E-08	1.0E-08	1.0E-08	1.0E-08	1.0E-08	1.0E-08
6	Wk4	稚内	↓									8.7E-08
7	Wk5	稚内	上位相									2.0E-06
8	Kt1	声問	下位層									3.5E-09
9	Kt2	声問	↓	1.0E-08	1.0E-08	1.0E-08	1.0E-08	1.0E-08	1.0E-08	1.0E-08	1.0E-08	1.0E-08
10	Kt3	声問	上位相									2.8E-08
11	Yt	勇知		8.0E-10	8.0E-10	8.0E-10	8.0E-10	8.0E-10	8.0E-10	8.0E-10	8.0E-10	8.0E-10
12	Sa	更別		1.0E-06	1.0E-06	1.0E-06	1.0E-06	1.0E-06	1.0E-06	1.0E-06	1.0E-06	1.0E-06
13	East_upper	鬼志別他		1.0E-10	1.0E-10	1.0E-10	1.0E-10	1.0E-10	1.0E-10	1.0E-10	1.0E-10	1.0E-10
14	Surface	表層		1.0E-06	1.0E-06	1.0E-06	1.0E-06	1.0E-06	1.0E-06	1.0E-06	1.0E-06	1.0E-06
15	OmF_core	大曲断層コア部		1.0E-08	1.0E-08	1.0E-08	1.0E-08	1.0E-08	1.0E-08	1.0E-08	1.0E-08	1.0E-10
16	OmF_side	大曲断層側部		1.0E-08	1.0E-08	1.0E-08	1.0E-08	1.0E-08	1.0E-08	1.0E-08	1.0E-08	1.0E-10
17	N1F_core	N系断層コア部		1.0E-08	1.0E-08	1.0E-08	1.0E-08	1.0E-08	1.0E-08	1.0E-08	1.0E-08	1.0E-08
18	N1F_side	N系断層側部		1.0E-08	1.0E-08	1.0E-08	1.0E-08	1.0E-08	1.0E-08	1.0E-08	1.0E-08	1.0E-08

#### 4.3.2 解析結果

解析は表4.3.1-1に示す5ケースの透水係数設定に対する2.3で示した定常解析結果を初期条件とし、立坑・坑道該当節点を自由浸出条件として10年間の非定常解析を実施した。実際には地表より逐次掘削し、解析初期から瞬時に立坑上部から底部まで自由浸出条件となることはないので、初期湧水量は実際の量より多く見積られる。また、掘削影響によるポテンシャルの低下量に対しても、実際の工程に沿った条件よりは大きめの影響を与える。

解析結果として、立坑近傍のポテンシャル分布、立坑・坑道部への総湧水量の経時変化、HDB孔におけるポテンシャル変化予測を示す。

##### (1) ポテンシャル分布

立坑を含む鉛直断面内の10年経過時点のポテンシャル分布を、case1からcase5について図4.3.2-1に示す。また、EL-400m水平断面内の10年経過時点のポテンシャル分布を図4.3.2-2に示す。

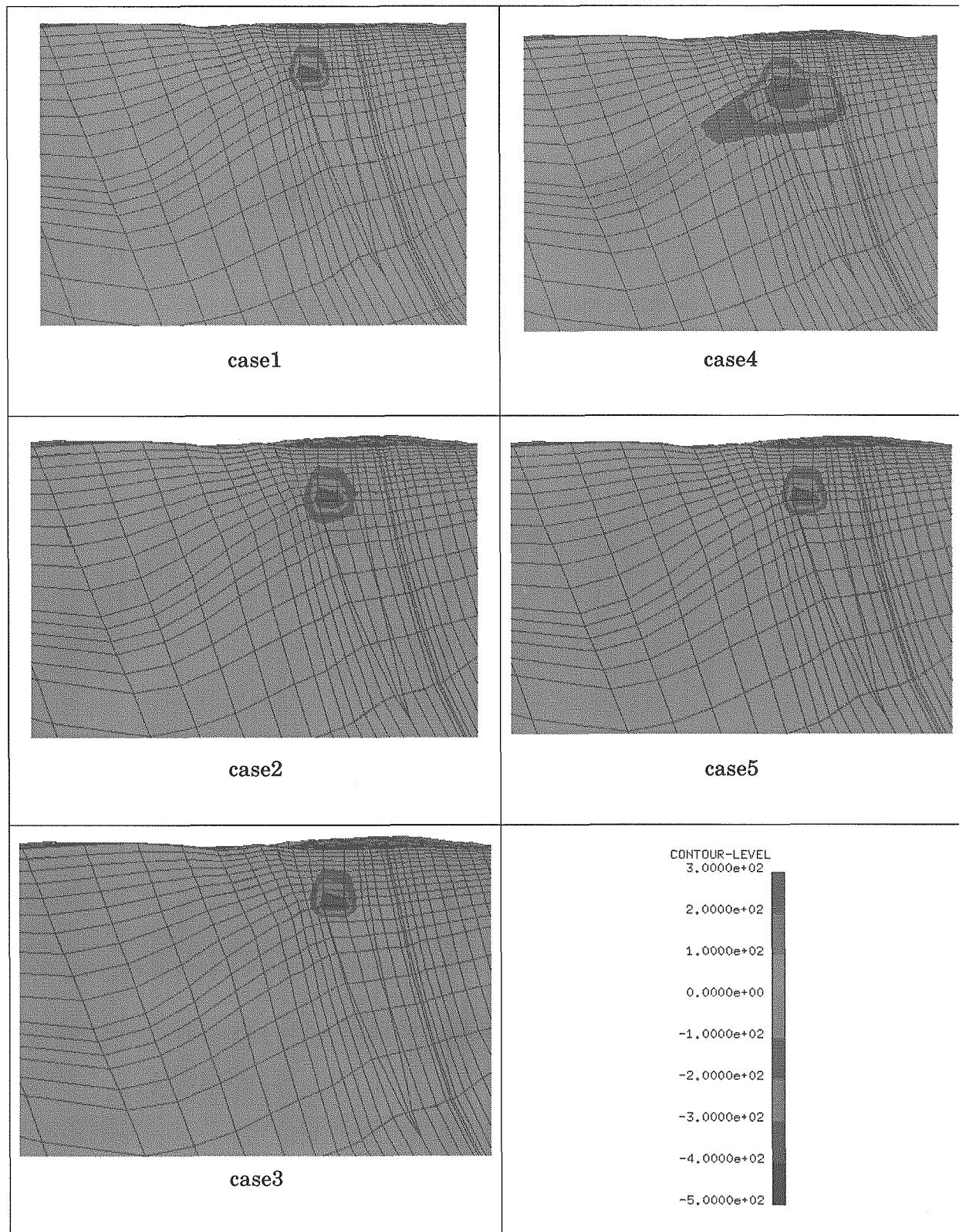


図 4.3.2-1 10 年経過時点の鉛直断面内ポテンシャル分布

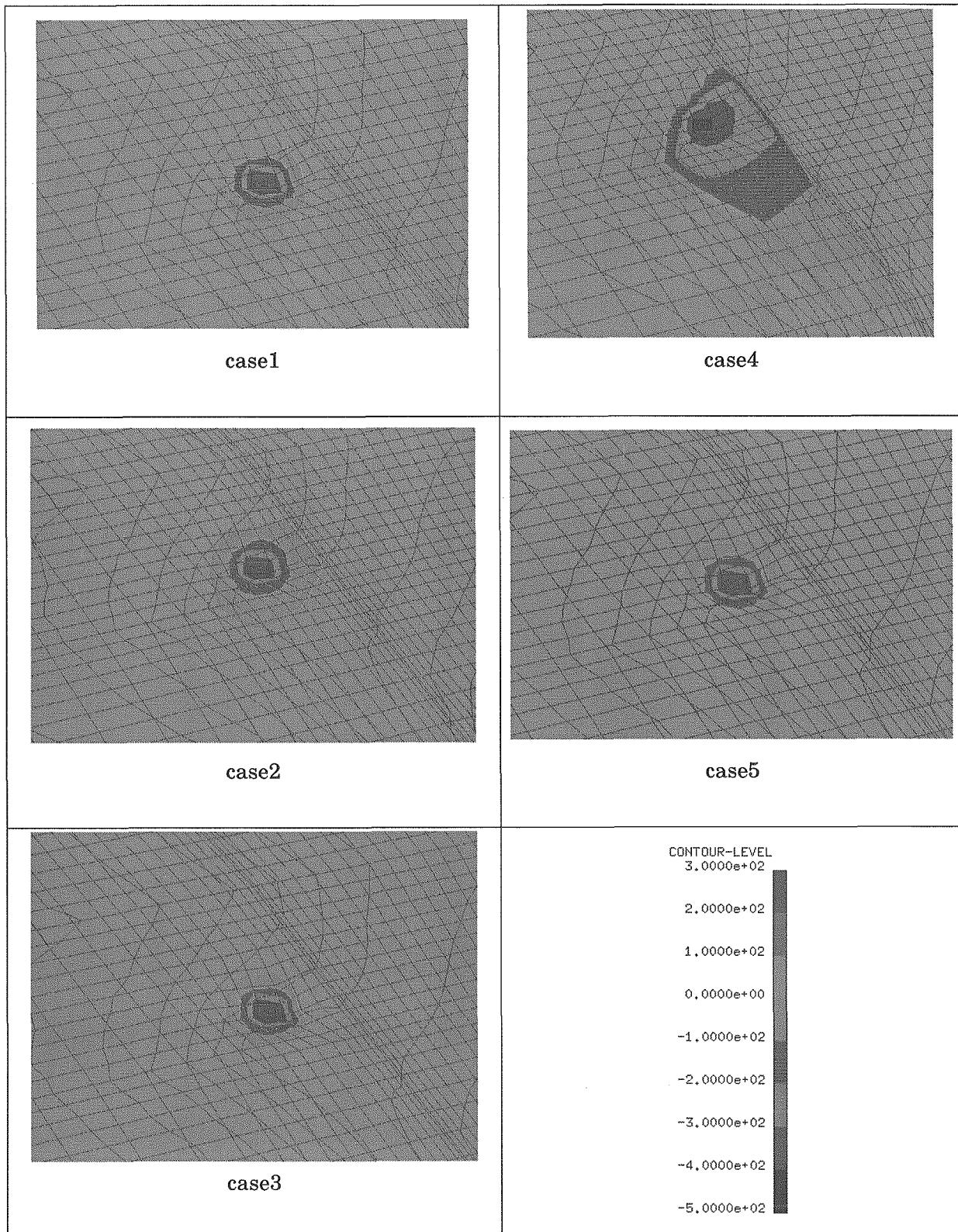


図 4.3.2-2 10 年経過時点の水平断面内 (EL-400m) ポテンシャル分布

## (2) 湧水量

湧水量に関する解析結果として表 4.3.2-1 に湧水量の経時変化データ、そのグラフを図 4.3.2-3 に示す。表 4.3.2-2 には 1 年経過時点での湧水量の深度方向分布データ、そのグラフを図 4.3.2-4 に示す。

表 4.3.2-1 湧水量の経時変化データ

year	case1	case2	case3	case4	case5
0.001	4245	8069	3860	83098	4233
0.005	4035	7835	3650	76782	4023
0.010	3803	7574	3419	71181	3791
0.020	3468	7184	3085	63963	3456
0.050	2853	6426	2473	53437	2840
0.100	2364	5753	1990	45899	2352
0.5	1705	4484	1362	32351	1693
1.0	1555	4096	1238	27737	1544
2.0	1404	3770	1114	23969	1394
3.0	1318	3601	1042	22127	1309
4.0	1263	3494	995	21000	1254
5.0	1224	3418	963	20232	1215
6.0	1195	3361	938	19655	1186
8.0	1155	3281	905	18826	1146
9.0	1140	3251	893	18504	1131
10.0	1128	3226	883	18226	1119

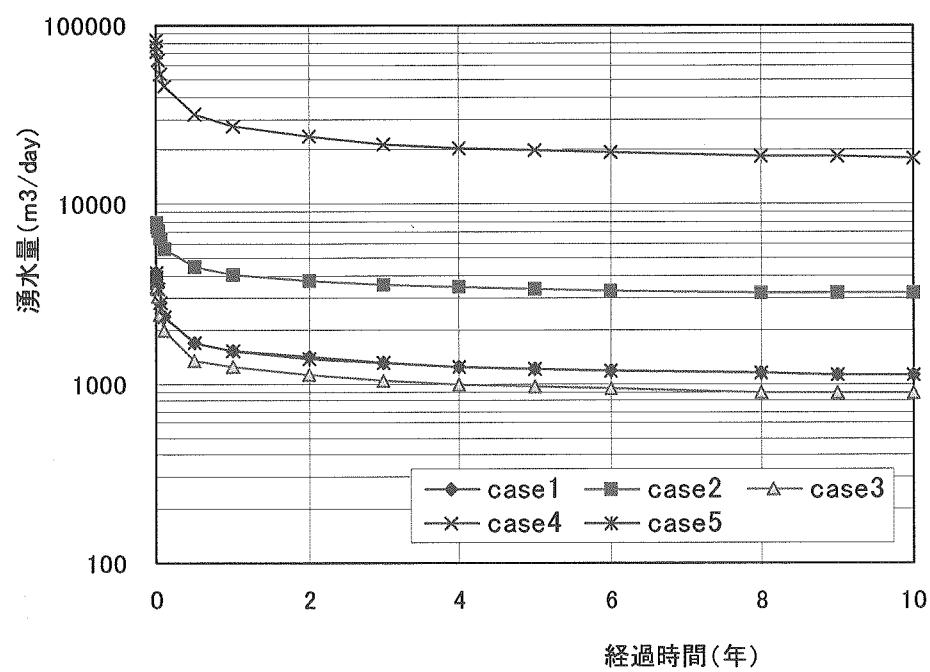


図 4.3.2-3 湧水量の経時変化

表 4.3.2-2 湧水量の深度方向分布データ（1年経過時）

EL.m	case1	case2	case3	case4	case5
60	-51	-51	-51	-51	-51
32	392	388	392	211	391
0	9	8	9	17	9
-35	14	13	14	29	13
-74	20	18	20	43	20
-118	29	26	29	63	28
-180	79	70	82	177	78
-220	50	44	51	118	49
-280	80	69	82	146	79
-346	109	130	104	-326	108
-430	398	2509	152	17799	395

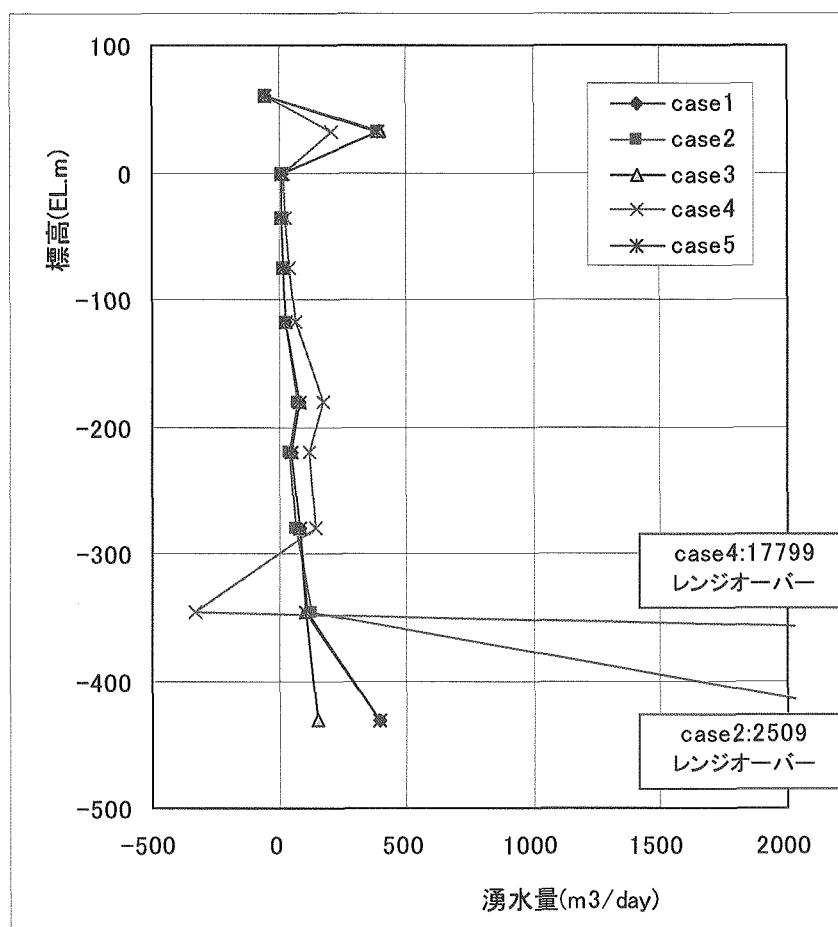


図 4.3.2-4 湧水量の深度方向分布（1年経過時）

### (3) HDB 孔におけるポテンシャル変化予測

HDB 孔におけるポテンシャル変化予測として、図 4.3.2-5 に HDB-3, HDB-6, HDB-8 孔内の case1 から case5 のポテンシャル変化予測を示す。また、図 4.3.2-6, 図 4.3.2-7 に case1, case4 での各 HDB 孔、豊富温泉相当箇所でのポテンシャル変化予測を示す。case1 は透水係数設定の基本ケースとして、case4 は図 4.3.2-5 よりポテンシャル変化が大きいため図を掲載した。

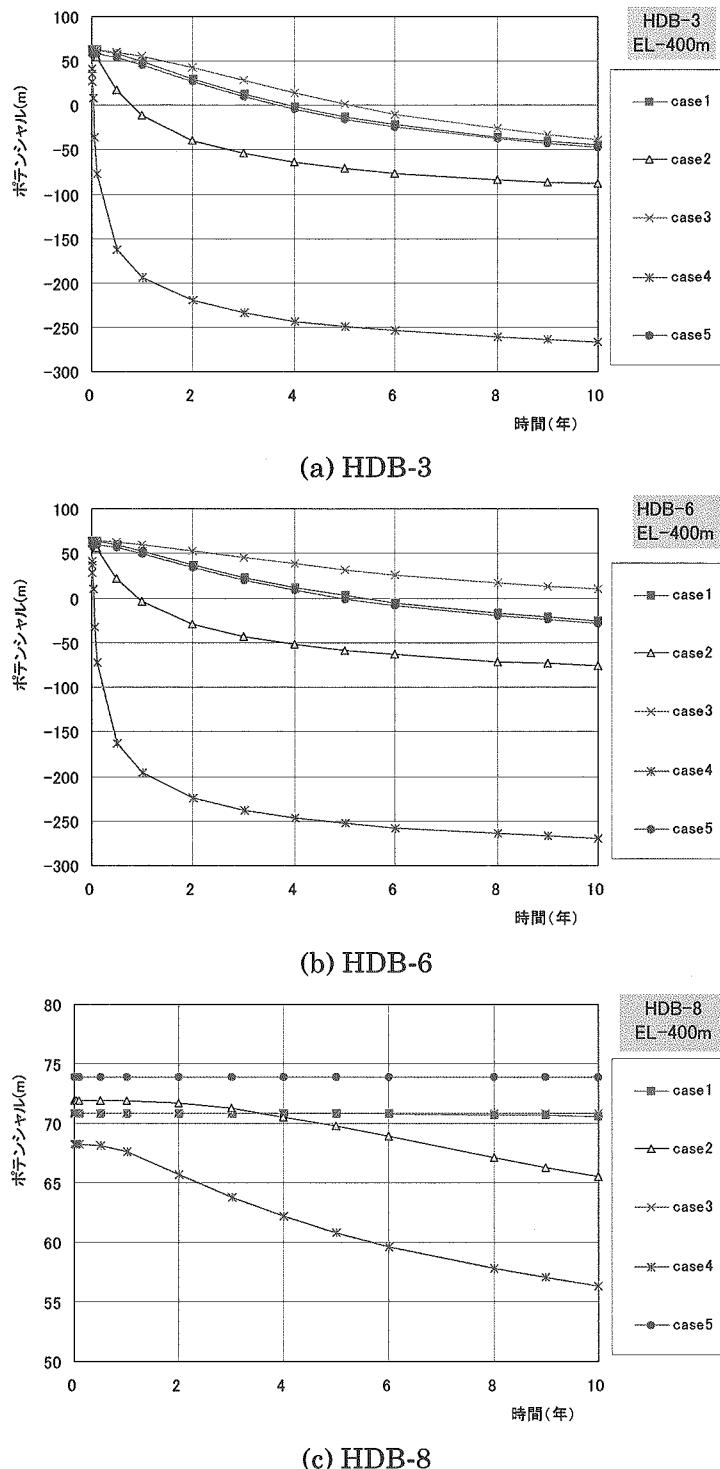


図 4.3.2-5 HDB-3, HDB-6, HDB-8 孔内のポテンシャル変化予測

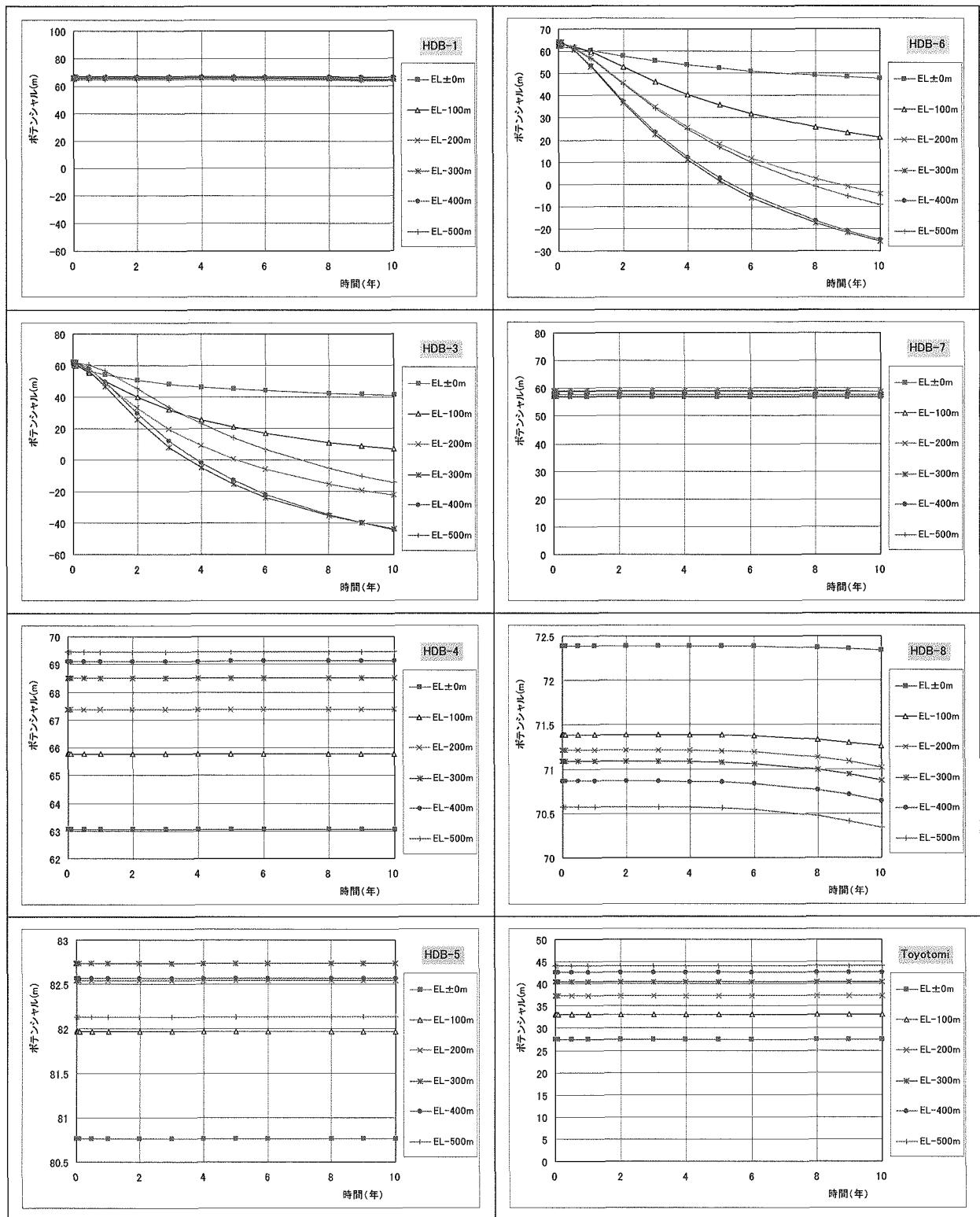


図 4.3.2-6 case1 での各試錐孔内ポテンシャル変化予測

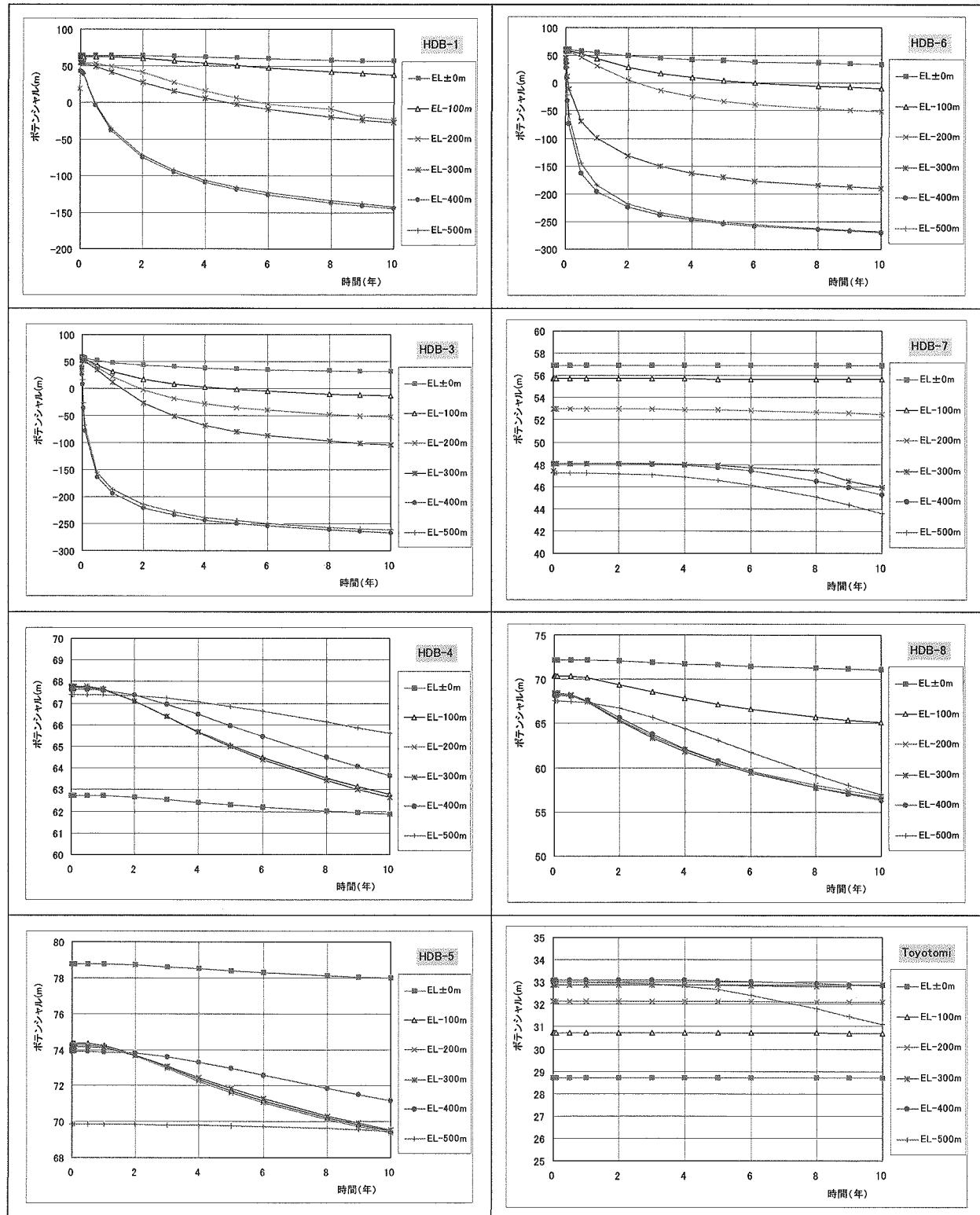


図 4.3.2-7 case4 での各試験孔内ボテンシャル変化予測

#### 4.3.3 考察

上記解析結果から示される事項、考えられることを以下に示す。

- ・図 4.3.2-1, 図 4.3.2-2 のポテンシャル分布から、地下施設設置後 10 年経過時点の掘削影響範囲は地下施設から 500m 程度と想定される。ただし、透水係数の大きな層などがあると透水係数の高い部分での掘削影響範囲は広くなる傾向があり、今回設定したケースでは 3000m 程度まで影響範囲が伝搬することが想定される。
- ・広域スケールのモデルでの湧水量は 10 年経過時点で 900~18,000m<sup>3</sup>/day にあると想定される。この湧水量算定結果の違いは透水係数設定に依存する。確度の高い湧水量の推定には、より正確な透水係数の情報を収集、反映させることが必要である。
- ・表 4.3.2-2, 図 4.3.2-4 の各ケースでの深度方向節点の湧水量分布を見ると透水係数の大きな箇所で湧水量が大きくなり、上記同様、湧水量予測には透水係数の設定が非常に重要となる。
- ・ポテンシャルの経時変化予測図（図 4.3.2-5～図 4.3.2-7）より、地下施設に近い地点ほどポテンシャルの変化量が大きく、HDB-1, HDB-7, HDB-4, HDB-5、豊富温泉ではほとんどポテンシャル変化のないことが示される。

#### 4.4 施設スケールモデルでの解析

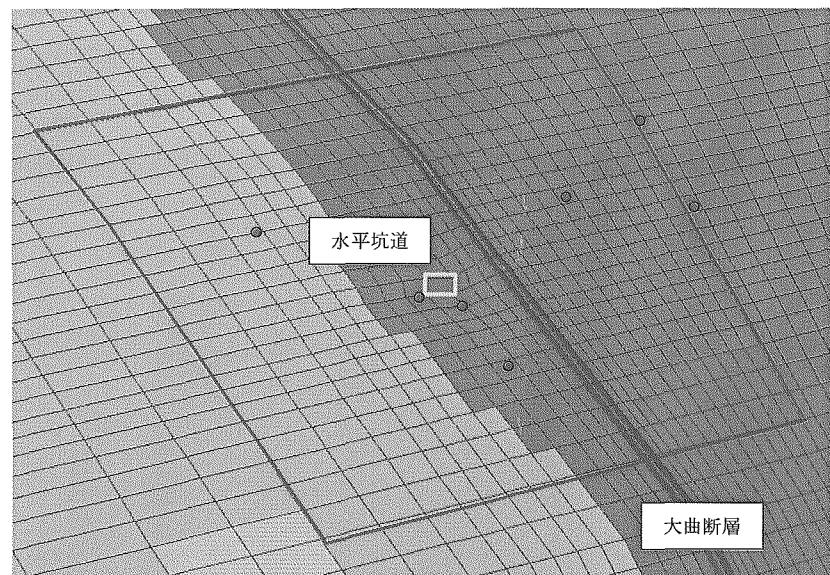
広域スケールと整合性を有する建設予定の地下施設形状を反映させた施設スケールモデルを用い、地下施設建設にともなう、地下施設周辺への水位低下等の影響、地下施設への湧水量、周辺調査試錐孔への水位応答などの予測解析を実施した。

解析は広域スケールの地下水流动結果を境界条件として施設スケールモデル外周部に設定し、立坑が設置された条件で非定常の地下水流动解析を実施した。また、HDB-1 孔、HDB-3 孔、HDB-4 孔、HDB-5 孔の調査から得られた塩分濃度分布を基にモデル内の塩分分布を想定し、立坑が存在する条件での地下水流れの定常場における塩分挙動の非定常解析を実施した。

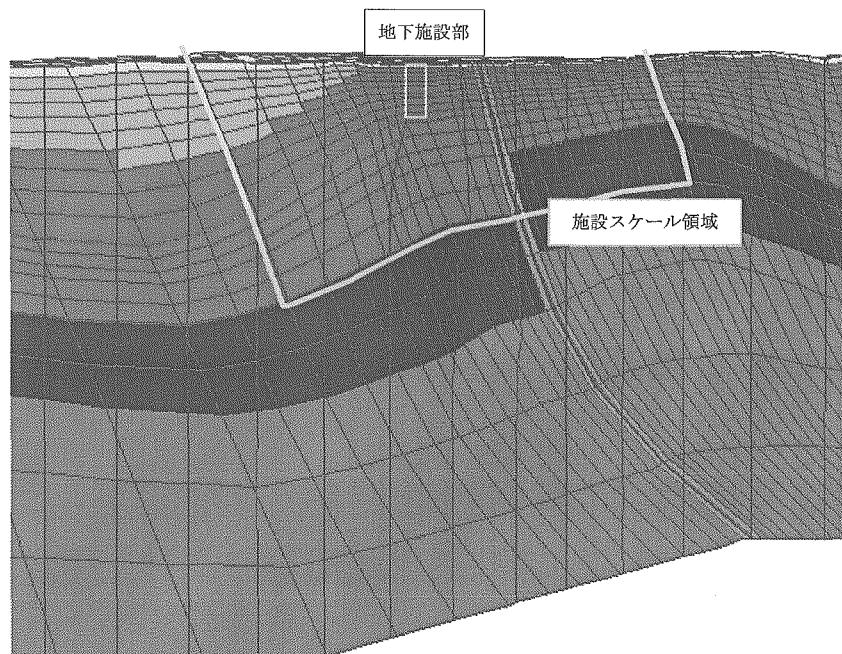
#### 4.4.1 解析モデルの概要

##### (1) 解析モデル

解析に使用する施設スケールメッシュの作成については 2.3 にて示したが、ここで簡単にモデル概要を示す。施設スケールメッシュは広域スケールモデルと整合するようその外形、断層位置等が設定されている。その平面形、断面形状を図 4.4.1-1 にて示す。モデルの規模は平面的には約 3km 四方で、深度方向では深い部分で約 2000m、浅い部分で約 900m のモデルである。図 4.4.1-2 に施設スケールモデル透視図を示すように、モデル内に立坑・坑道形状をモデル化している。



(a)平面



(b)鉛直断面

図 4.4.1-1 広域スケールモデル内の立坑周辺領域（図 3.3-7 再掲）

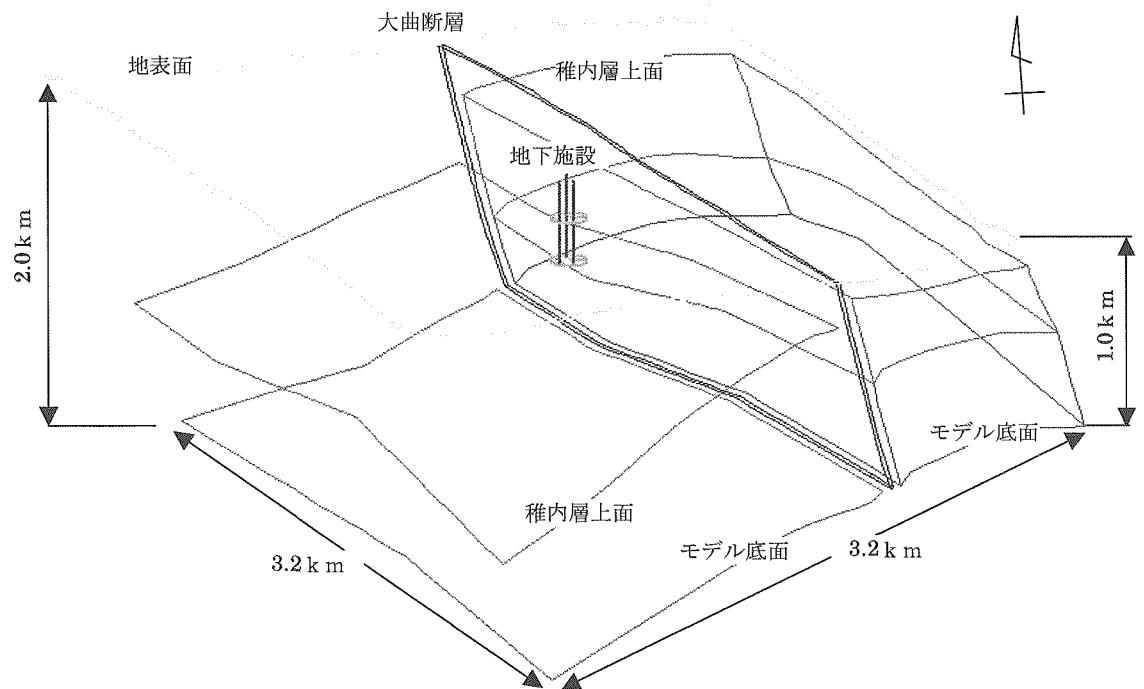


図 4.4.1-2 施設スケールモデル透視図

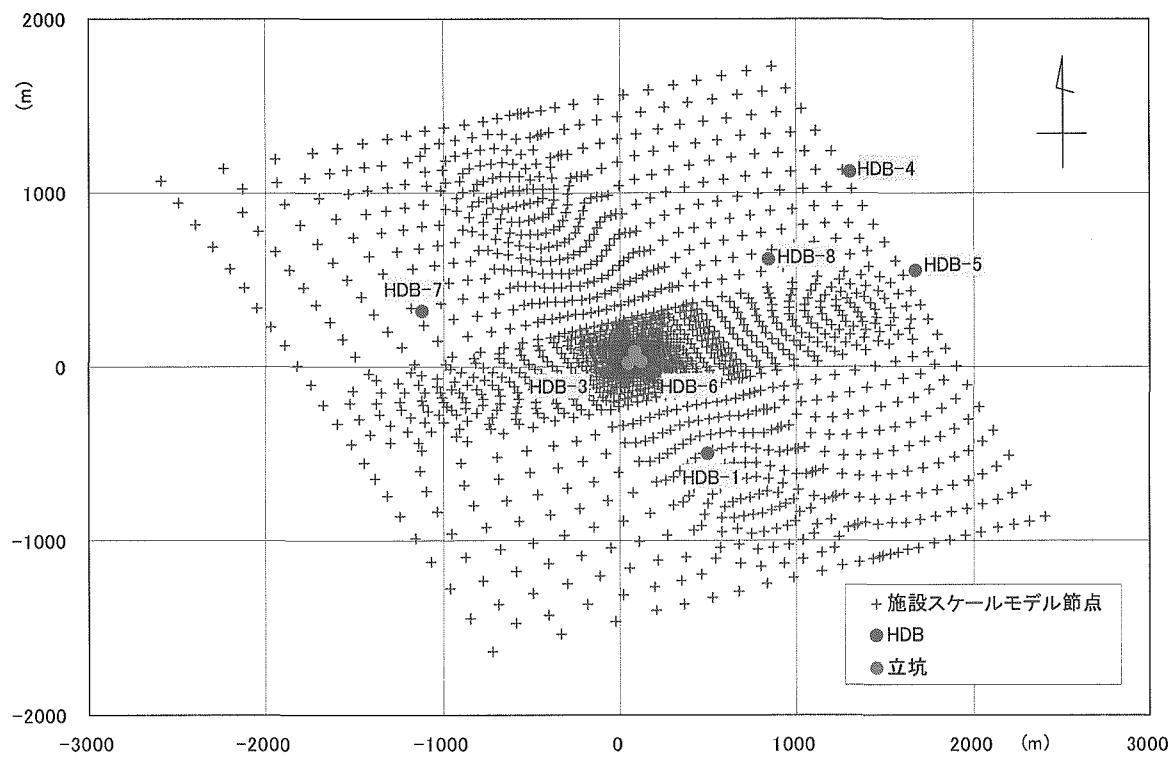


図 4.4.1-3 施設スケールモデルの座標, HDB 孔との関係

## (2) 境界条件と初期条件

### (a) 地下水流動境界条件

地下水解析の境界条件の概要を図 4.4.1-3 に示す。

外周に設定したポテンシャルは、3.3 で実施した広域スケールの地下水流動定常解析結果の、施設スケール境界節点に該当する節点の値を引用している。

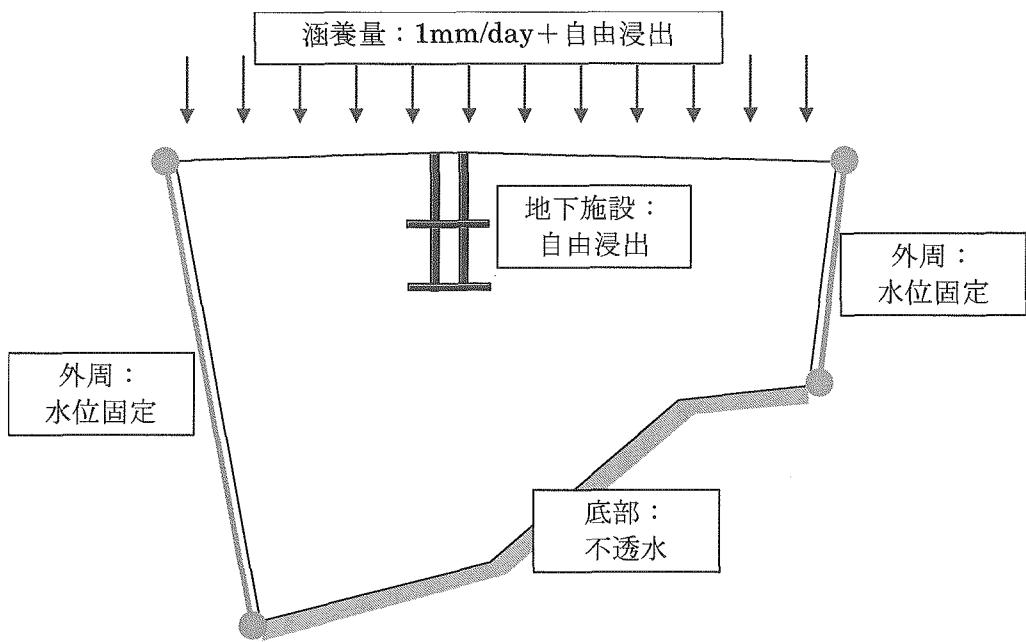


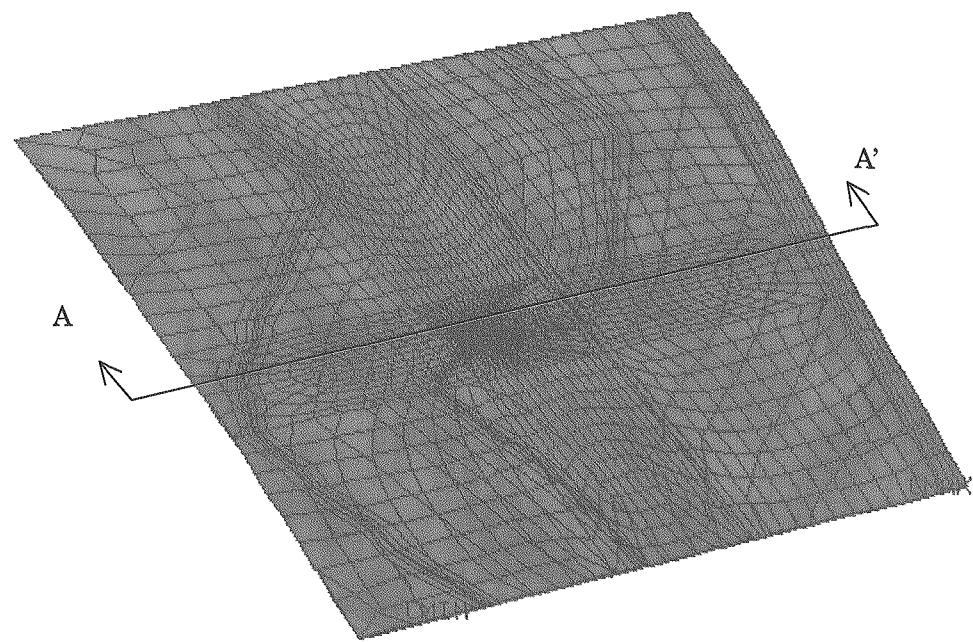
図 4.4.1-3 地下水解析の境界条件概要

### (b) 物質移行解析境界条件

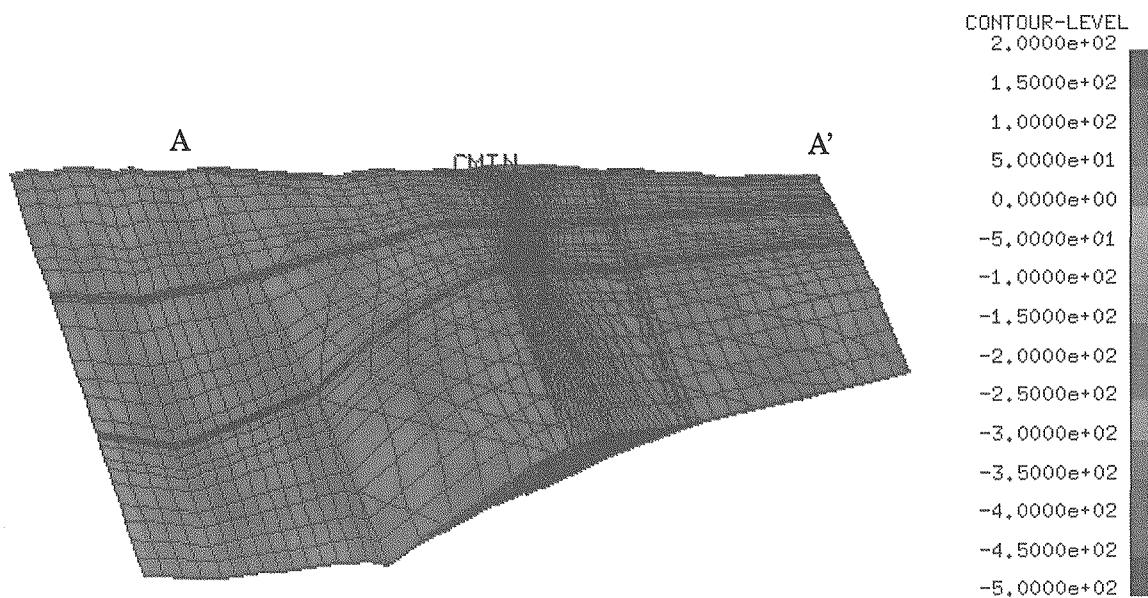
物質移行の境界条件としては、地下水解析で涵養量を設定しているモデル表面に降雨濃度を 0 と想定し、濃度 0 の固定値を設定した。厳密には流出箇所では濃度を有した地下水の湧出も想定されるが、設定した初期濃度分布から濃度を有した湧出の可能性が小さいこと、計算の収束性を確保する観点からこの境界条件とした。他の境界部に関しては特に境界条件を設置していない。

### (c) 地下水解析初期条件

地下水解析の初期条件は図 4.4.1-3 の境界条件から地下施設の自由浸出条件を除いた状態で定常解析を実施し、この結果を初期条件とした。図 4.4.1-4 に初期条件として設定したポテンシャル分布を示す。



(a) EL-400m 水平面内



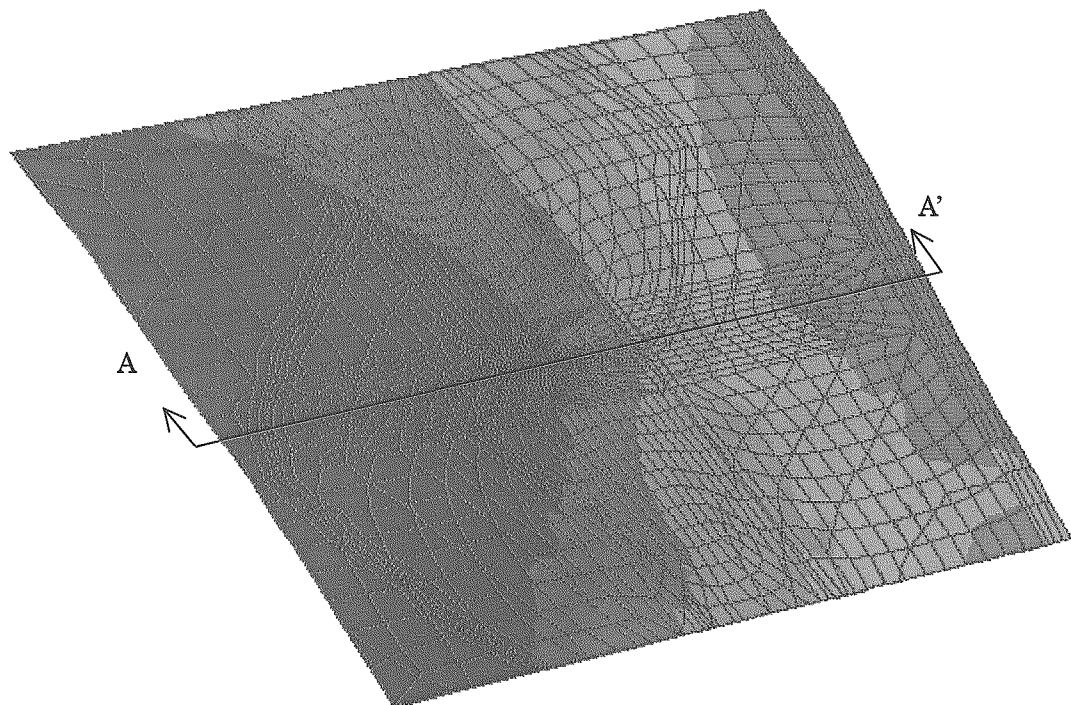
(b) A-A'断面内

図 4.4.1-4 初期ポテンシャル分布

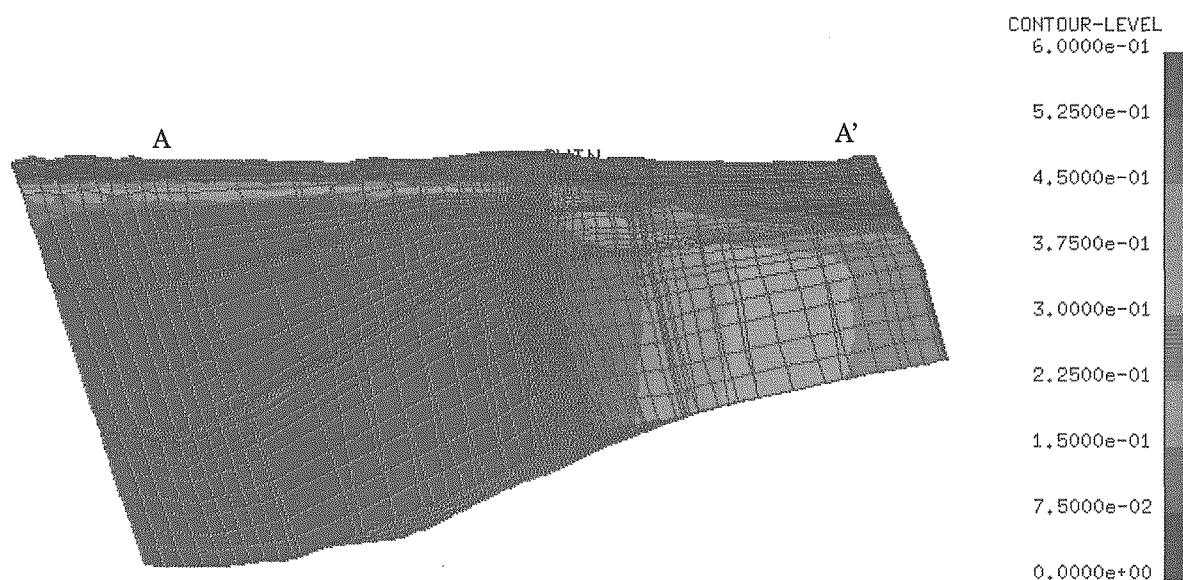
#### (d) 物質移行初期条件

地下水に含まれる塩分を物質移行解析の対象とし、HDB-1, HDB-3, HDB-4, HDB-5 孔で確認された塩分濃度（Cl 濃度を海水の Cl 濃度を基準に正規化）をもとに設定した。設定方法は、HDB-1, HDB-3, HDB-4, HDB-5 孔での塩分濃度計測値から、深度方向に塩分濃度の大きな EL-100m, EL-200m, EL-400m を対象に、各水平面でのクリギングにより塩分濃度分布を作成し、さらに深度方向の補間等により 3 次元的な塩分濃度分布を設定した。図 4.4.1-5 に初

期濃度分布を示す。



(a) EL-400m 水平面内



(b) A-A'断面内

図 4.4.1-5 初期塩分濃度分布

### (3) 物性値

解析に使用した透水係数は、表 4.3.1-1 に示す case1 (基本ケース) の値を適用した。物質移行に関わる、分散長、有効間隙率は下記の数値を使用した。

表 4.4.1-1 物質移行に関するパラメータ

物性	値	
縦方向分散長	100 m	解析規模から想定。
横方向分散長	20 m	縦方向分散の 1 / 5 を仮定
遅延係数	1.0	塩分の吸着はないと仮定。

### (4) 解析時間

解析時間は下記のように設定した。対象期間は 20 年とした。

表 4.4.1-2 タイムステップ設定

time step	経過時間	
	year	day
1	0.001	0.4
2	0.005	1.8
3	0.010	3.7
4	0.020	7.3
5	0.050	18.3
6	0.100	36.5
7	0.500	182.5
8	1.000	365.0
9	2.000	730.0
10	3.000	1095.0
11	4.000	1460.0
12	5.000	1825.0
13	6.000	2190.0
14	8.000	2920.0
15	9.000	3285.0
16	10.000	3650.0
17	12.000	4380.0
18	14.000	5110.0
19	16.000	5840.0
20	18.000	6570.0
21	20.000	7300.0

#### 4.4.2 解析結果

解析結果として、立坑部を通る鉛直断面や水平坑道を通る水平面内などの主要タイムステップにおけるポテンシャル分布図、塩分濃度分布、周辺試錐孔における水位挙動、立坑への流水量、湧水の塩分濃度を示す。

##### (1) ポテンシャル分布

図 4.4.2-1 に立坑部を通る鉛直断面内のポテンシャル分布（20 年経過時点）を示す。この結果から、立坑掘削による影響が広範囲に及んでいないと推定できることから、図 4.4.2-2 に立坑近傍鉛直断面内のポテンシャル分布の拡大コンタを主なタイムステップに対して示す。図 4.4.2-3 には GL-250m 坑道を含む水平面内の、図 4.4.2-4 には GL-500m 坑道を含む水平面内のポテンシャル分布の拡大コンタを主なタイムステップに対して示す。

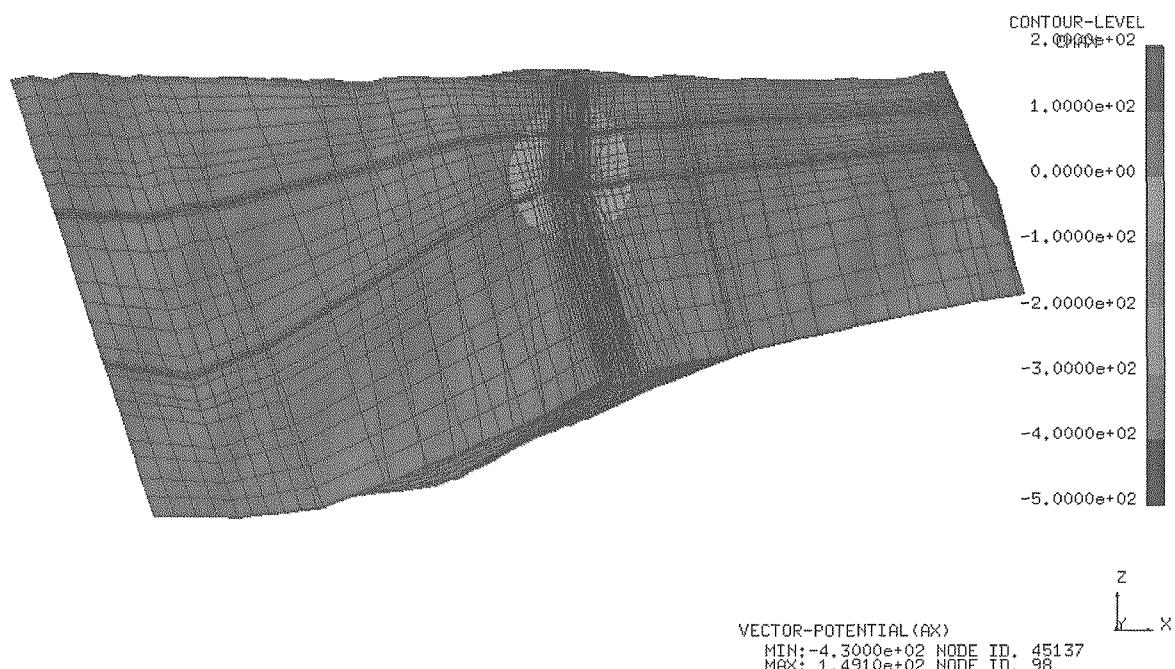


図 4.4.2-1 立坑部を通る鉛直断面内のポテンシャル分布（20 年経過時点）

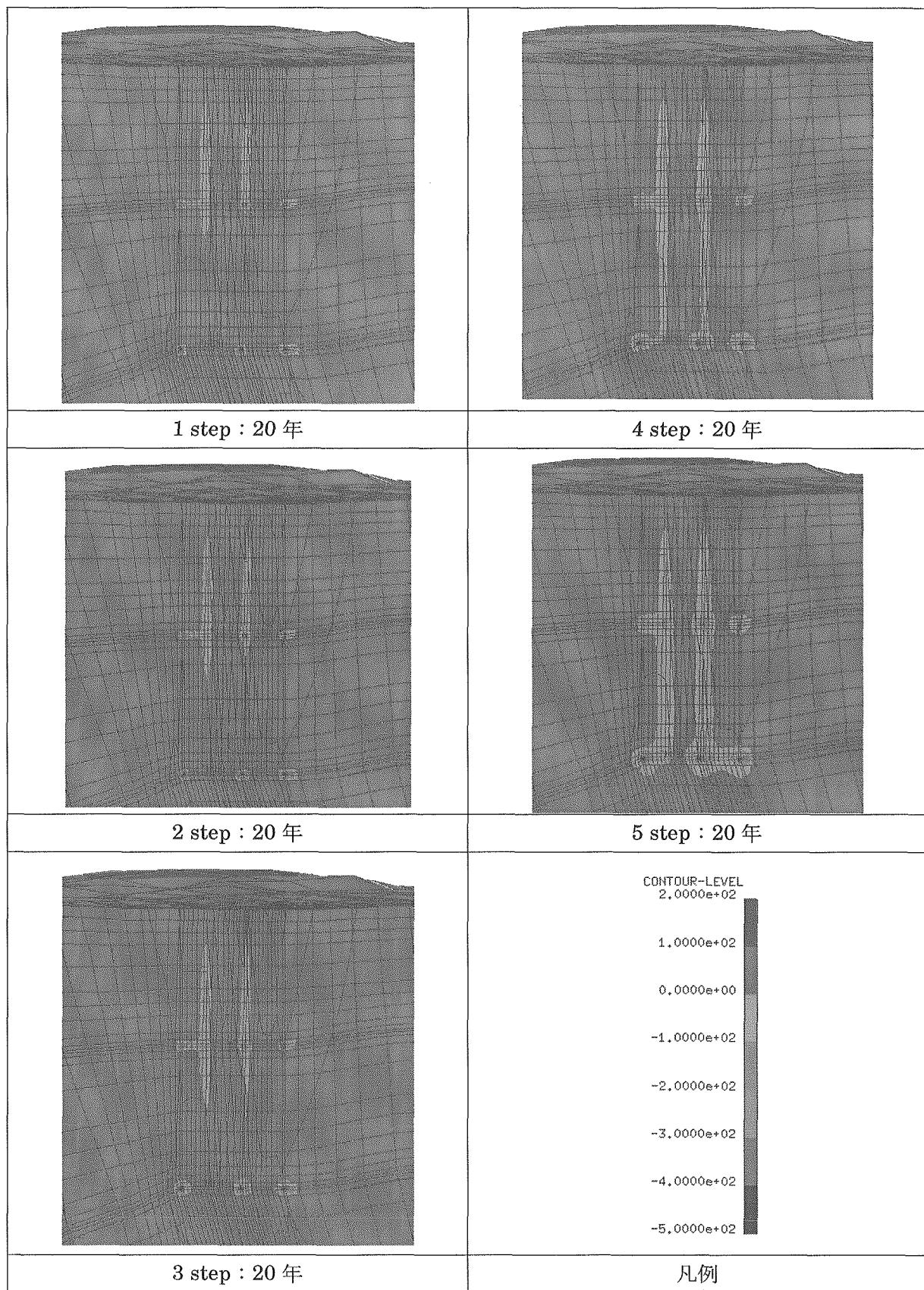


図 4.4.2-2(1) 立坑部を通る鉛直断面内のポテンシャル分布

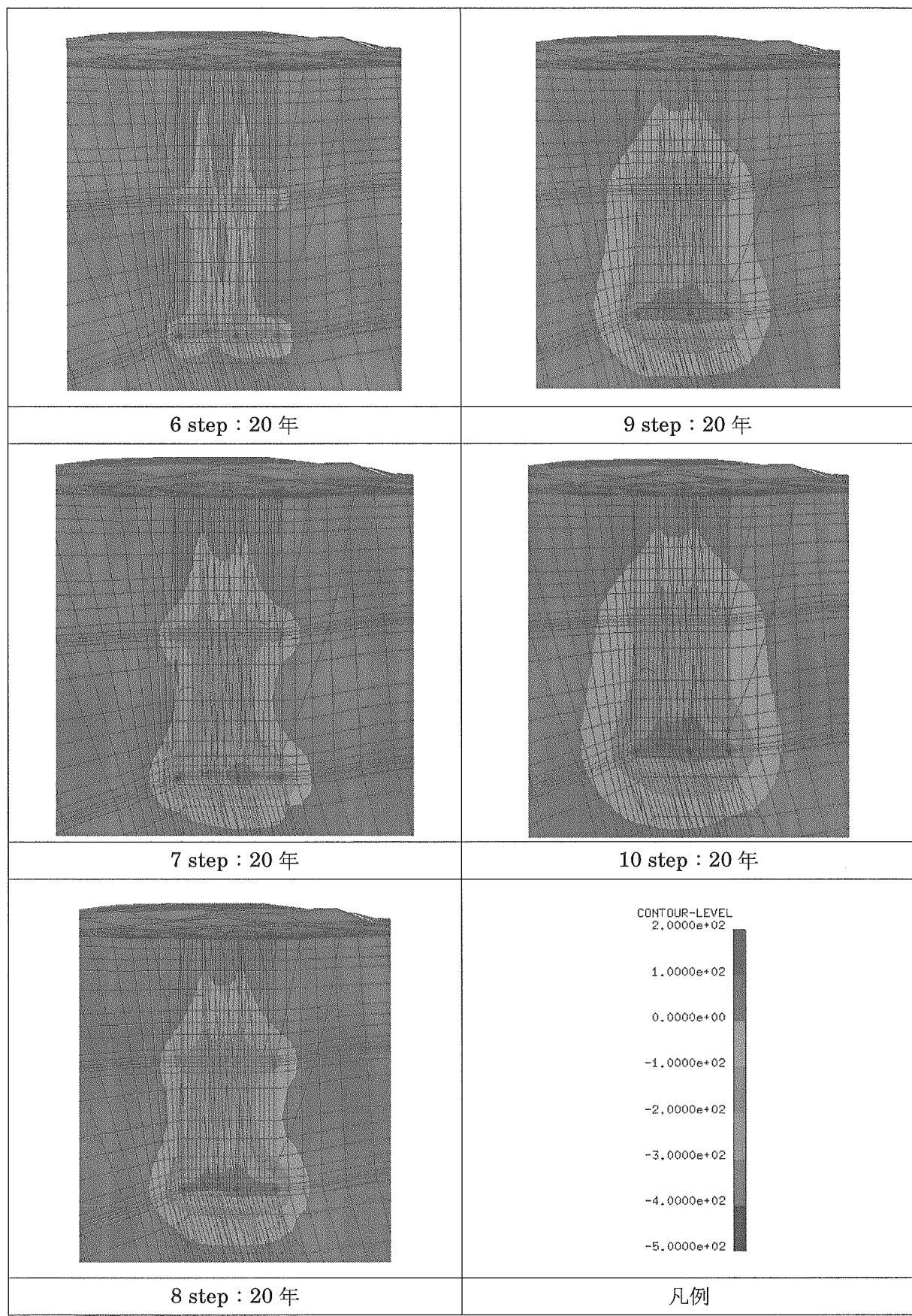


図 4.4.2-2(2) 立坑部を通る鉛直断面内のポテンシャル分布

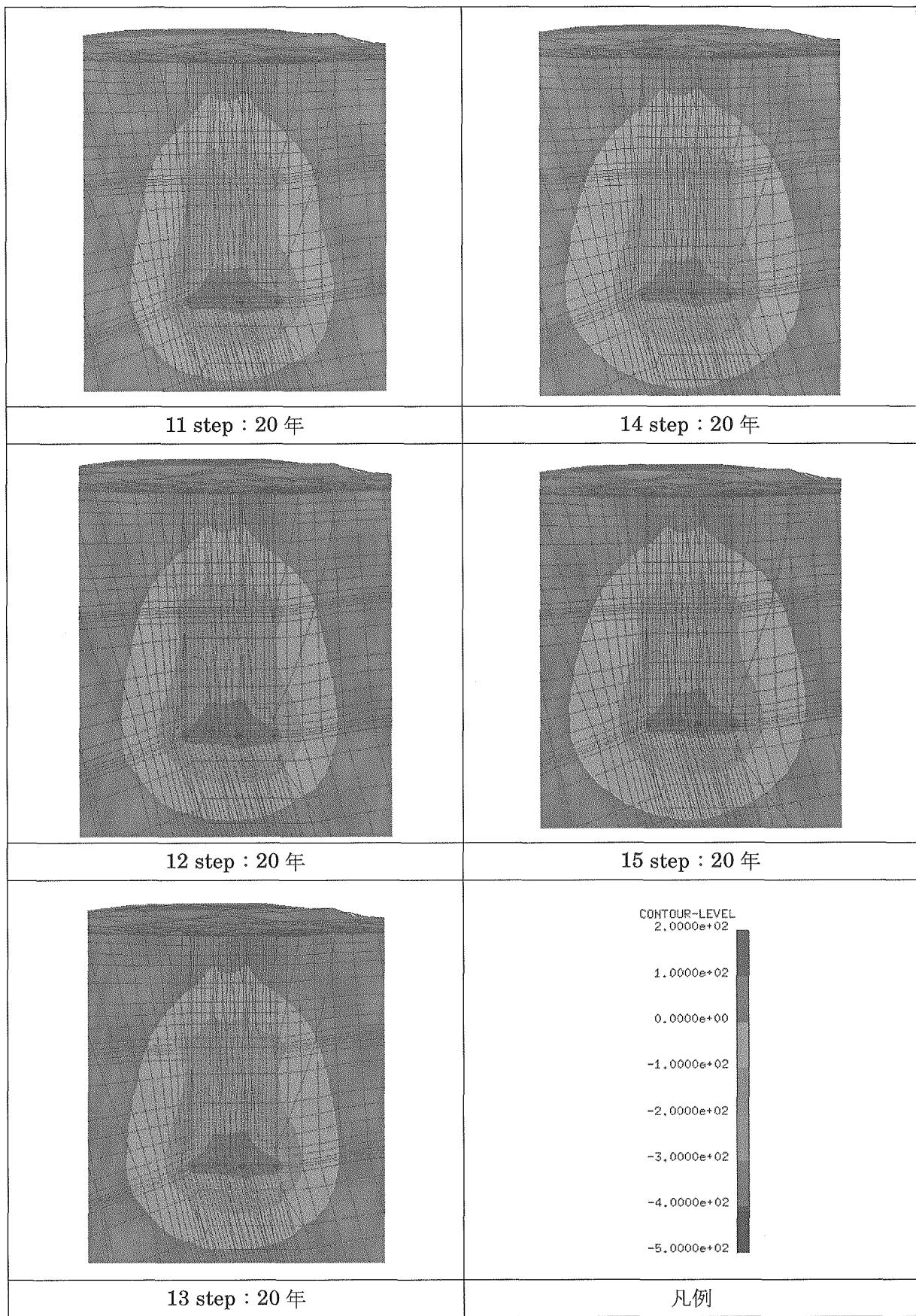


図 4.4.2-2(3) 立坑部を通る鉛直断面内のポテンシャル分布

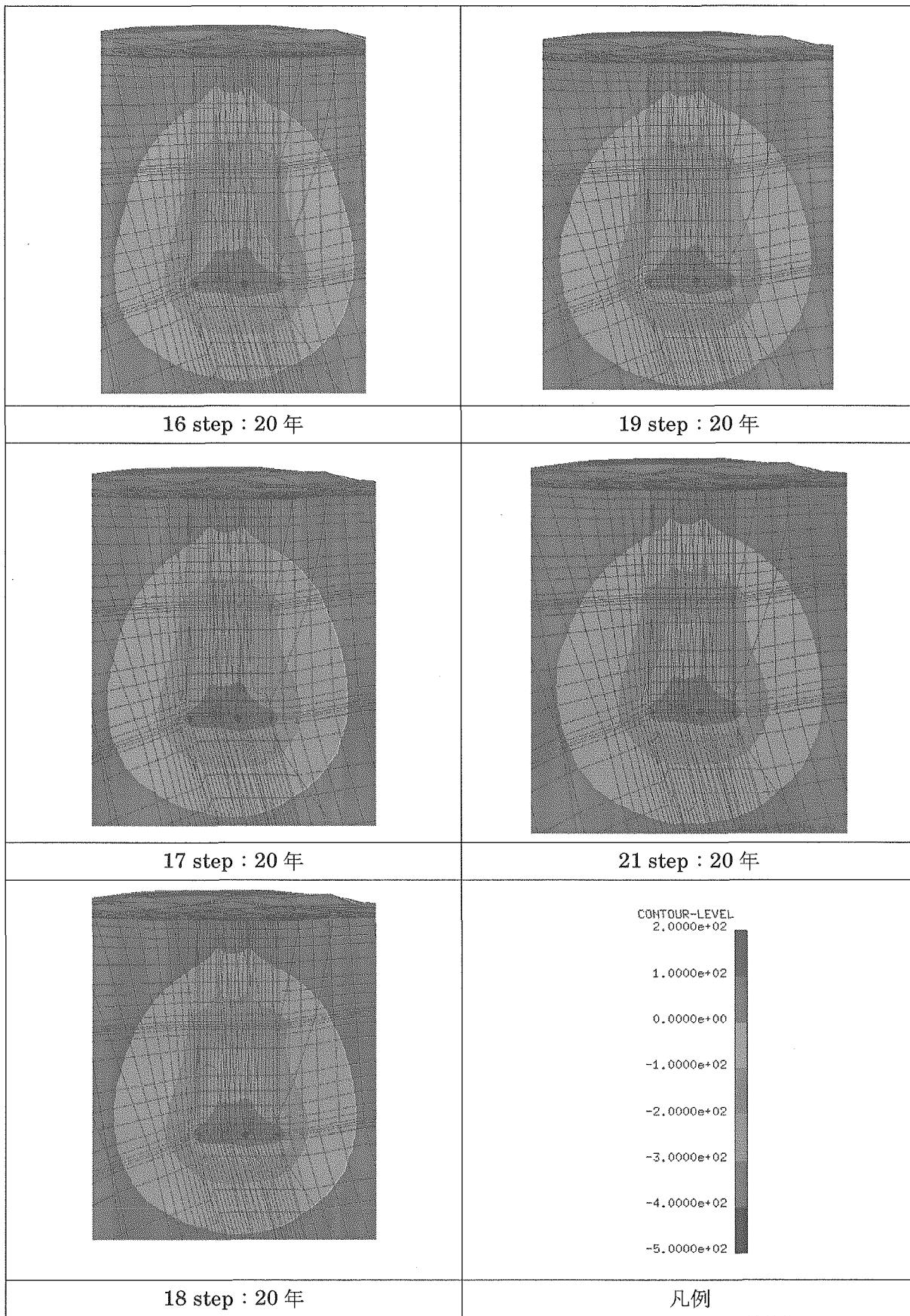


図 4.4.2-2(4) 立坑部を通る鉛直断面内のポテンシャル分布

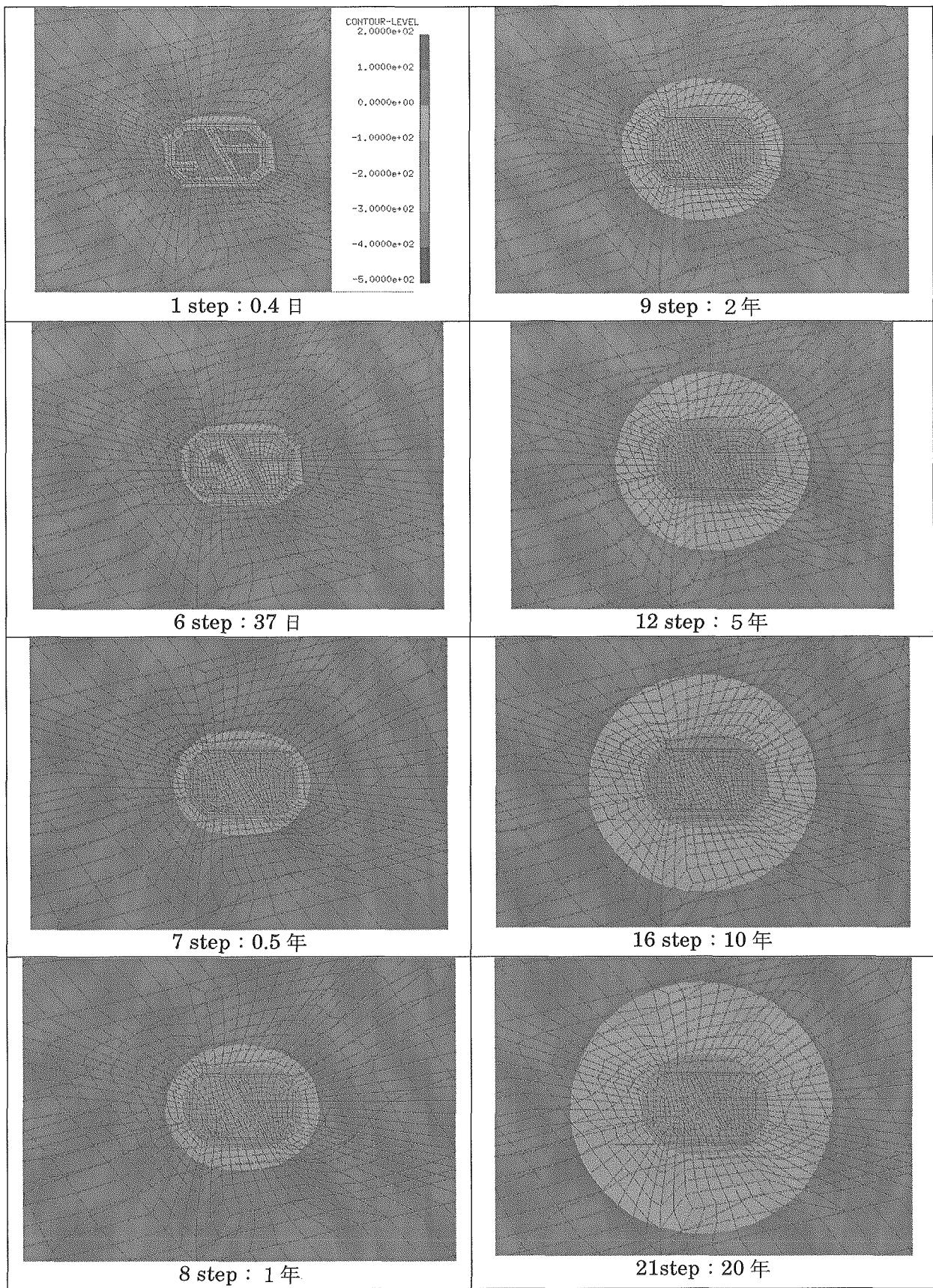


図 4.4.2-3 EL-180m 水平面内 (GL-250m 坑道相当) のポテンシャル分布

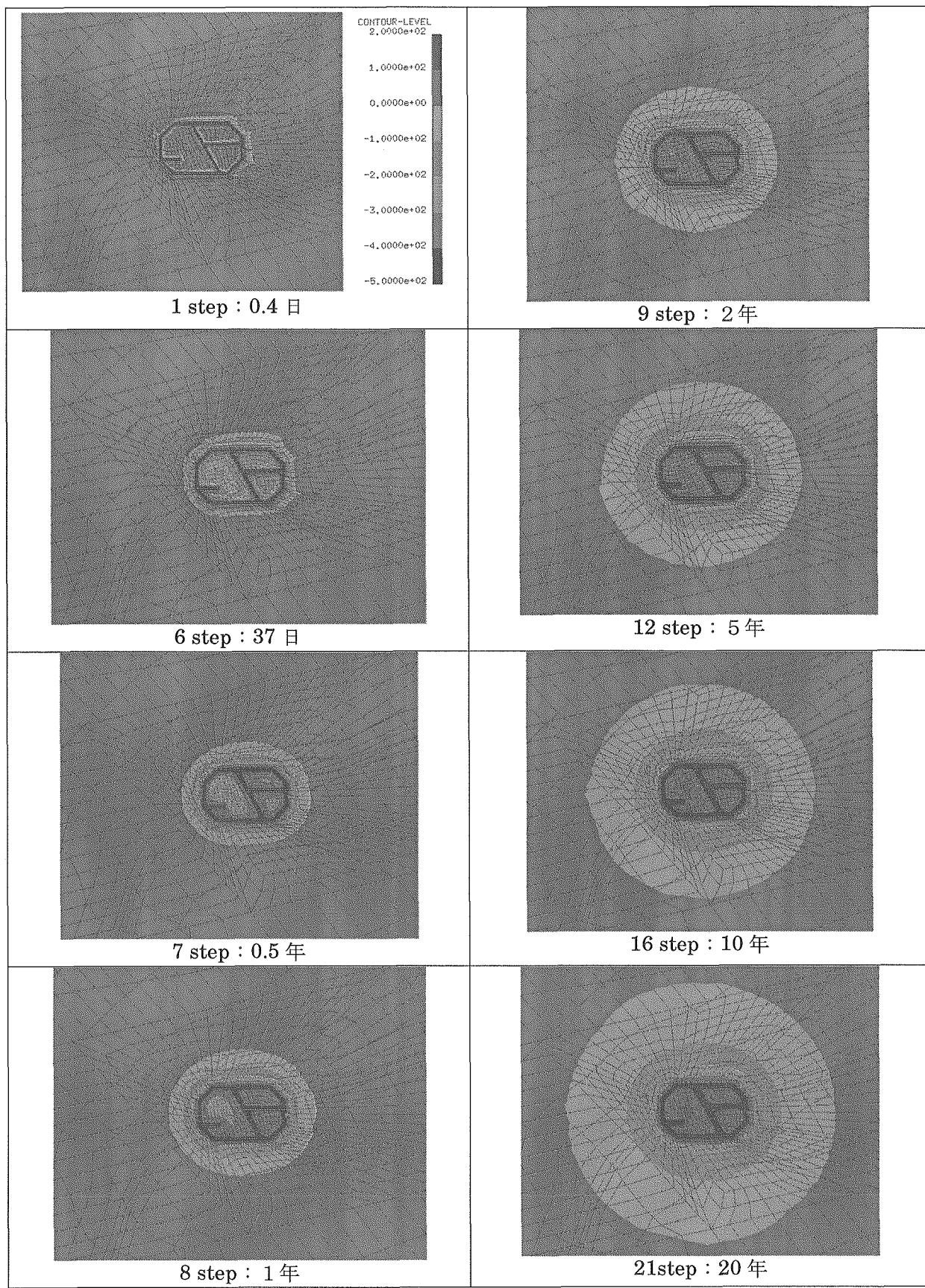


図 4.4.2-4 EL-430m 水平面内 (GL-500m 坑道相当) のポテンシャル分布

## (2) 湧水量

立坑・坑道への総湧水量の経時変化を図 4.4.2-5 に示し、立坑内湧水量（1 年経過時点）の深度方向分布を図 4.4.2-6 に示す。図 4.4.2-7 には坑道部での湧水量分布として、節点湧水量（図中の付図に示す坑道の左右壁面でそれぞれ上下にある 2 節点の和）を示す。

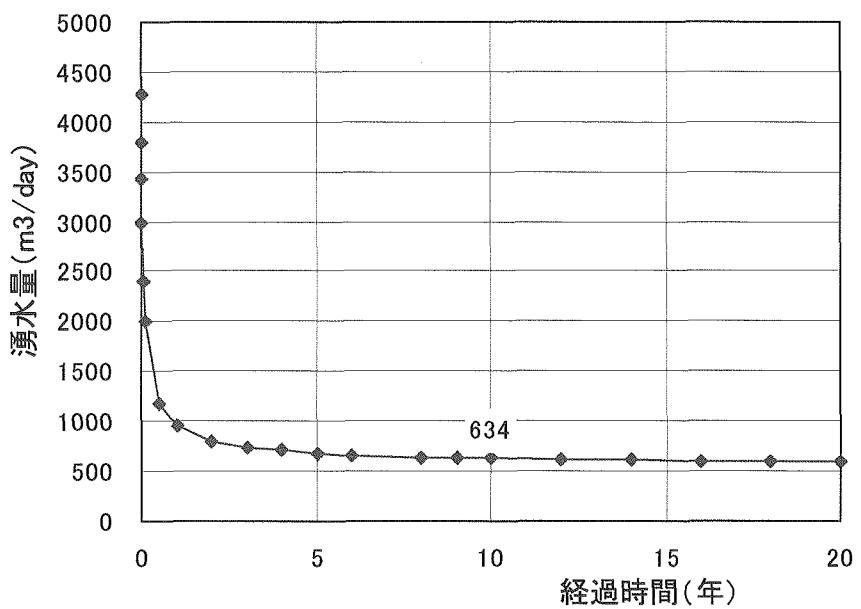


図 4.4.2-5 立坑・坑道への総湧水量の経時変化

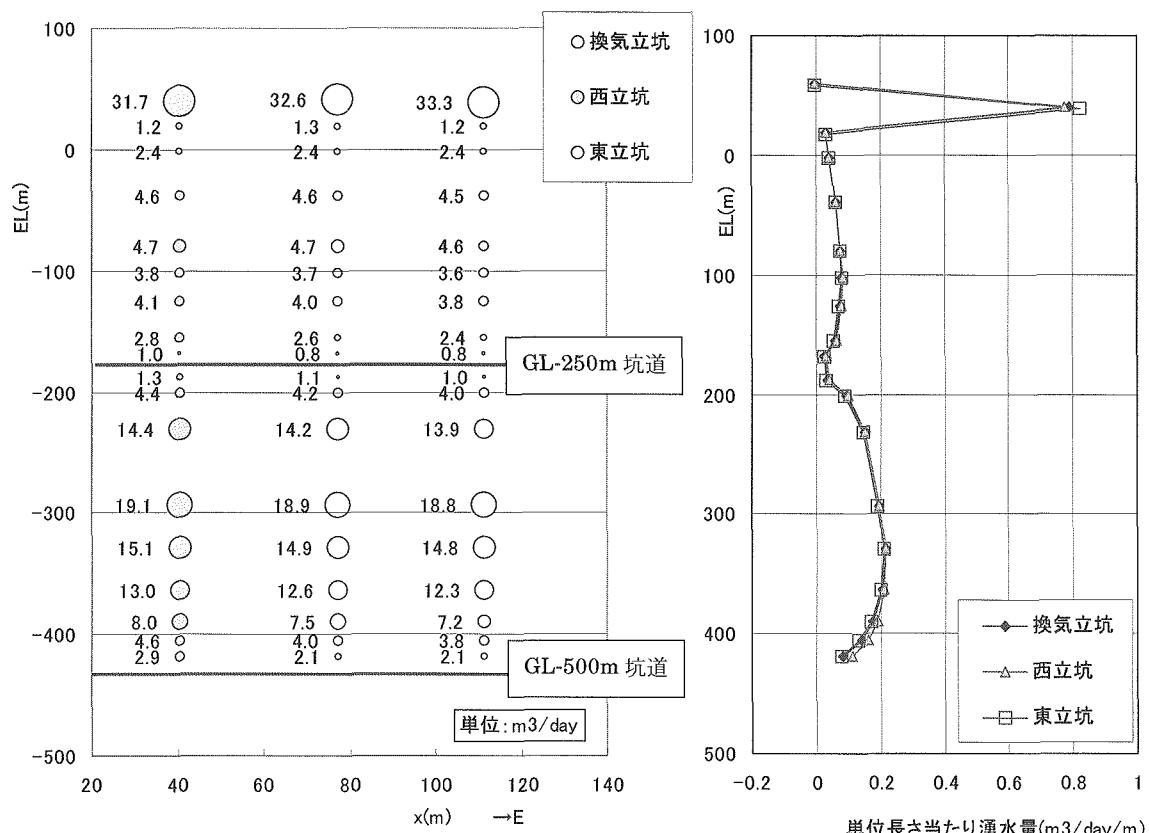
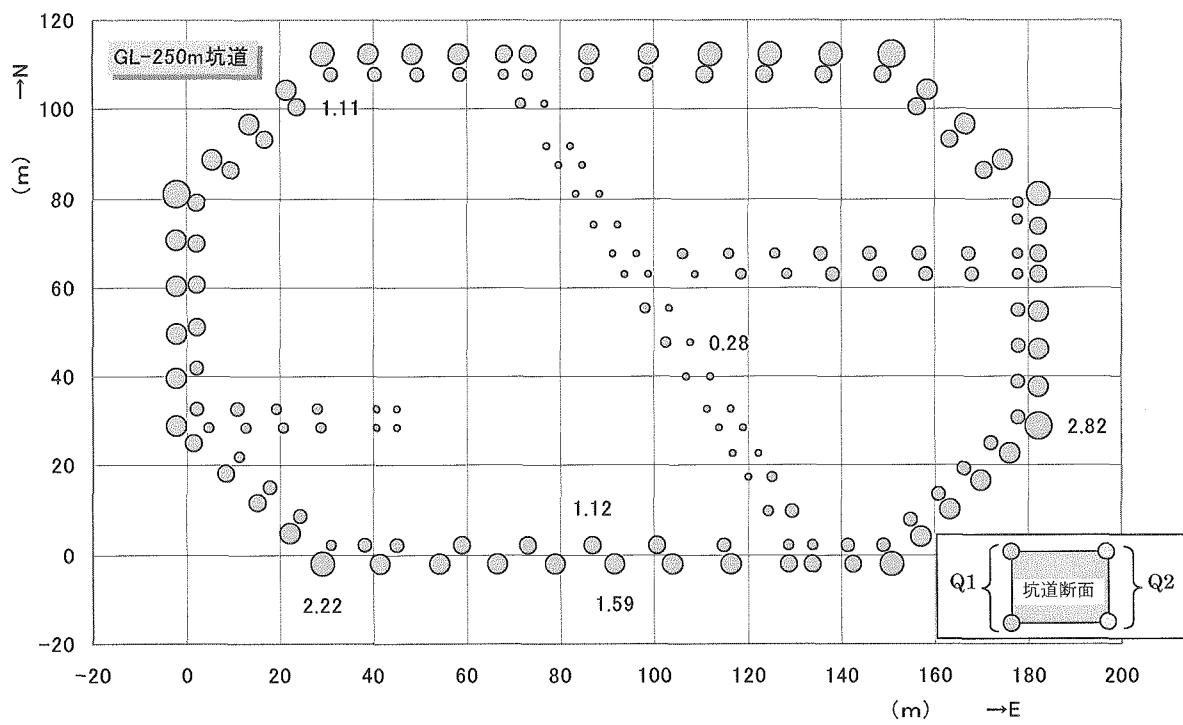
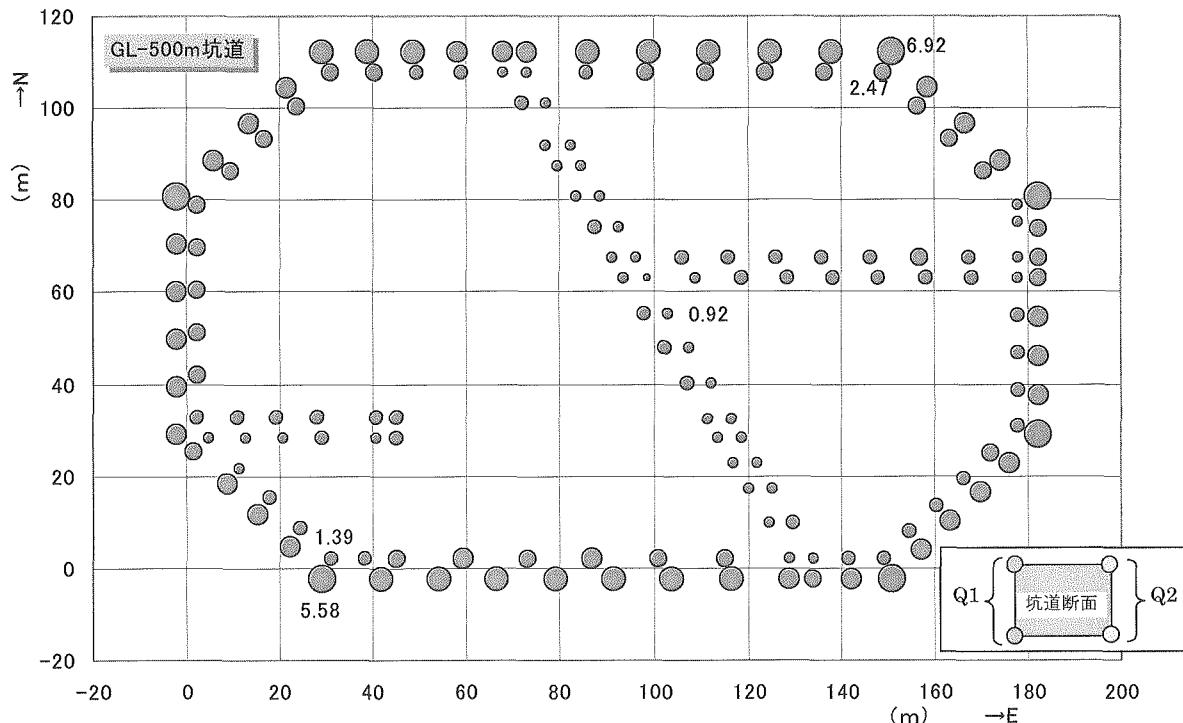


図 4.4.2-6 立坑内の湧水量分布



(a)GL-250m 坑道

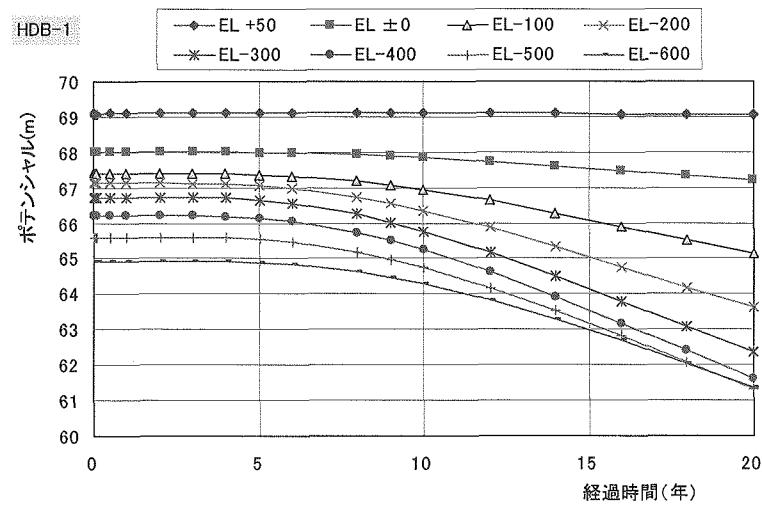


(b)GL-500m 坑道

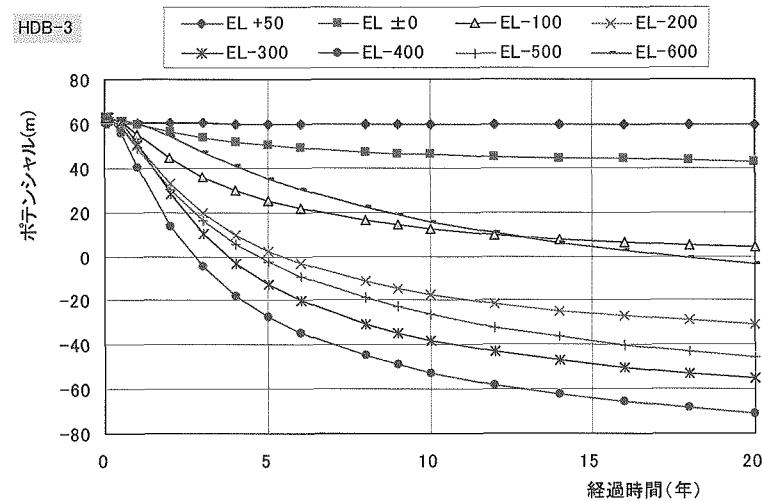
図 4.4.2-7 坑道部節点湧水量（図中の数値は代表点の湧水量 [ $m^3/day$ ]）

### (3) HDB 孔でのポテンシャルの変化

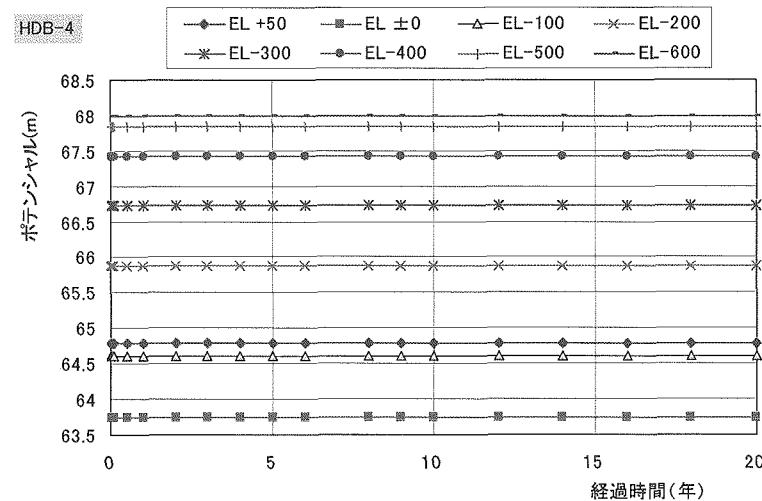
HDB 孔でのポテンシャルの変化を図 4.4.2-8 に示す。



(a)HDB-1

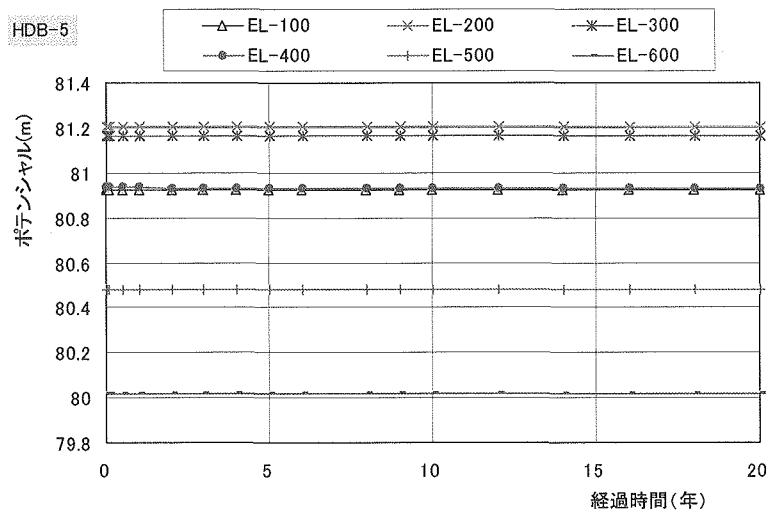


(b)HDB-3

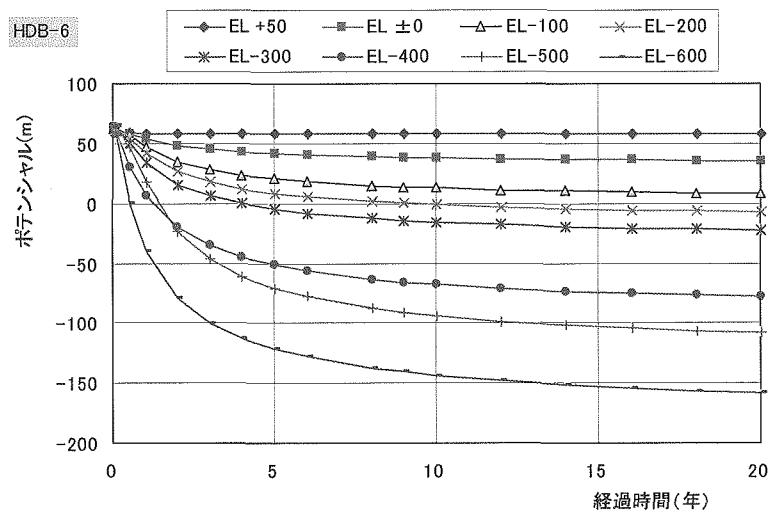


(c)HDB-4

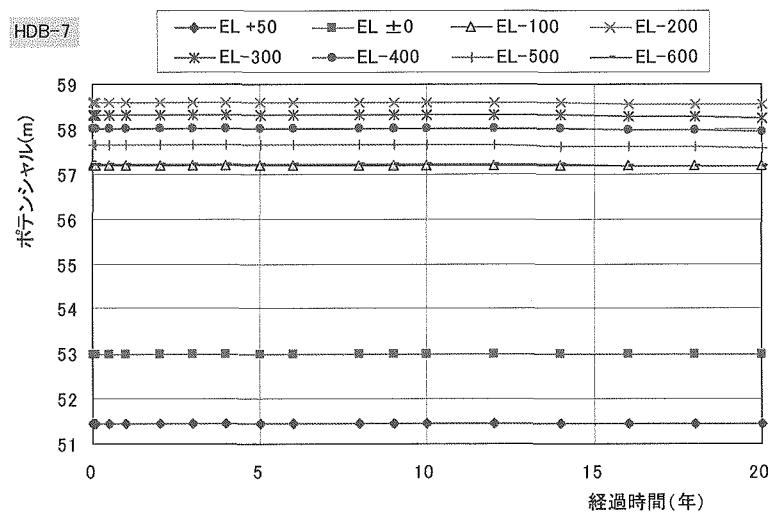
図 4.4.2-8(1) HDB 孔でのポテンシャルの経時変化



(a)HDB-5



(b)HDB-6



(c)HDB-7

図 4.4.2-8(2) HDB 孔でのポテンシャルの経時変化

#### (4) 塩分濃度分布

塩分濃度分布として、立坑を含む鉛直断面内の塩分濃度分布の全景を図 4.4.2-9 に、その立坑近傍の拡大を図 4.4.2-10 に示す。また、図 4.4.2-11、図 4.4.2-12 には EL-180m 水平面、EL-400m 水平面内の立坑近傍の塩分濃度分布を示す。

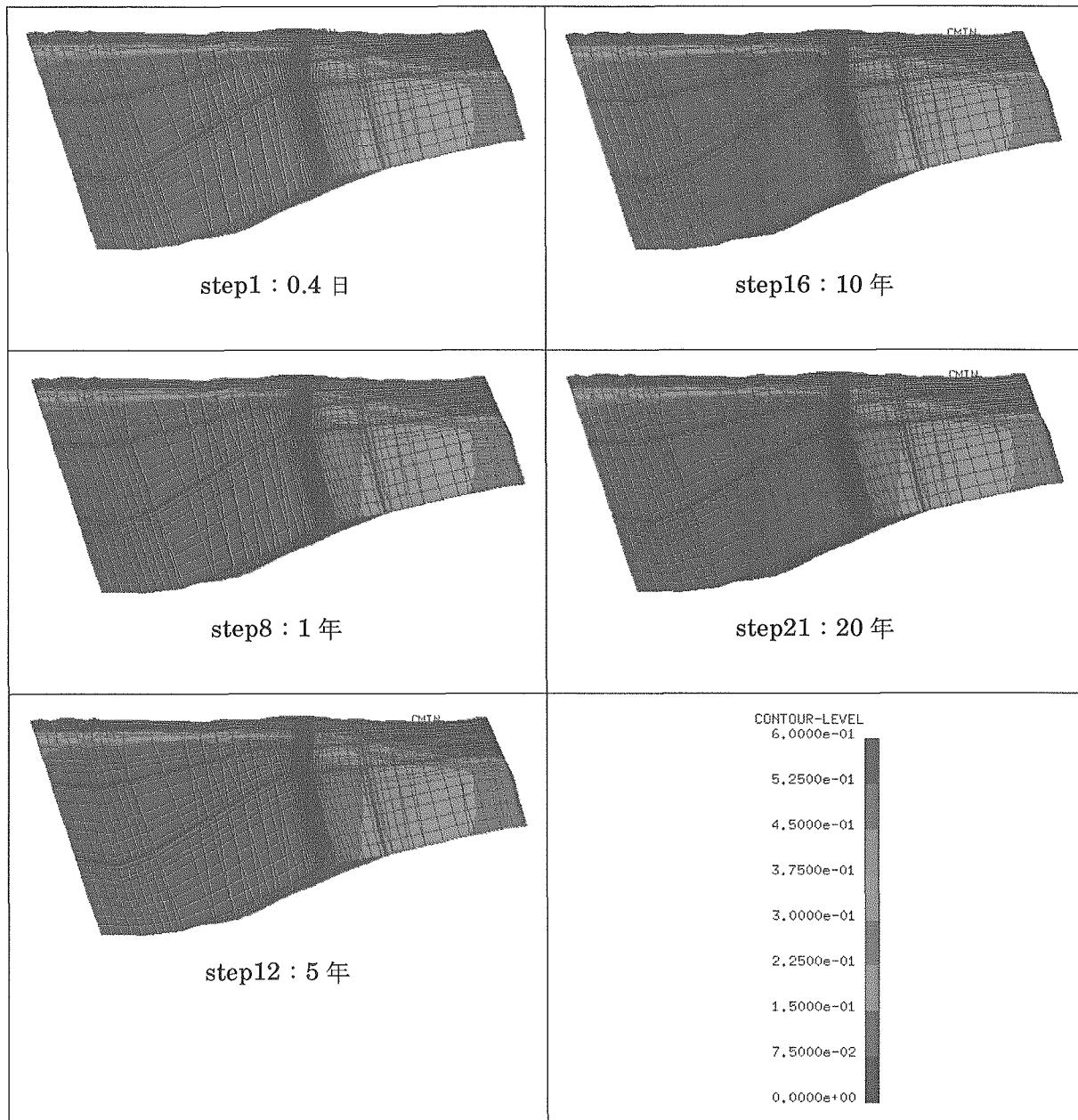


図 4.4.2-9 立坑を含む鉛直断面の塩分濃度分布

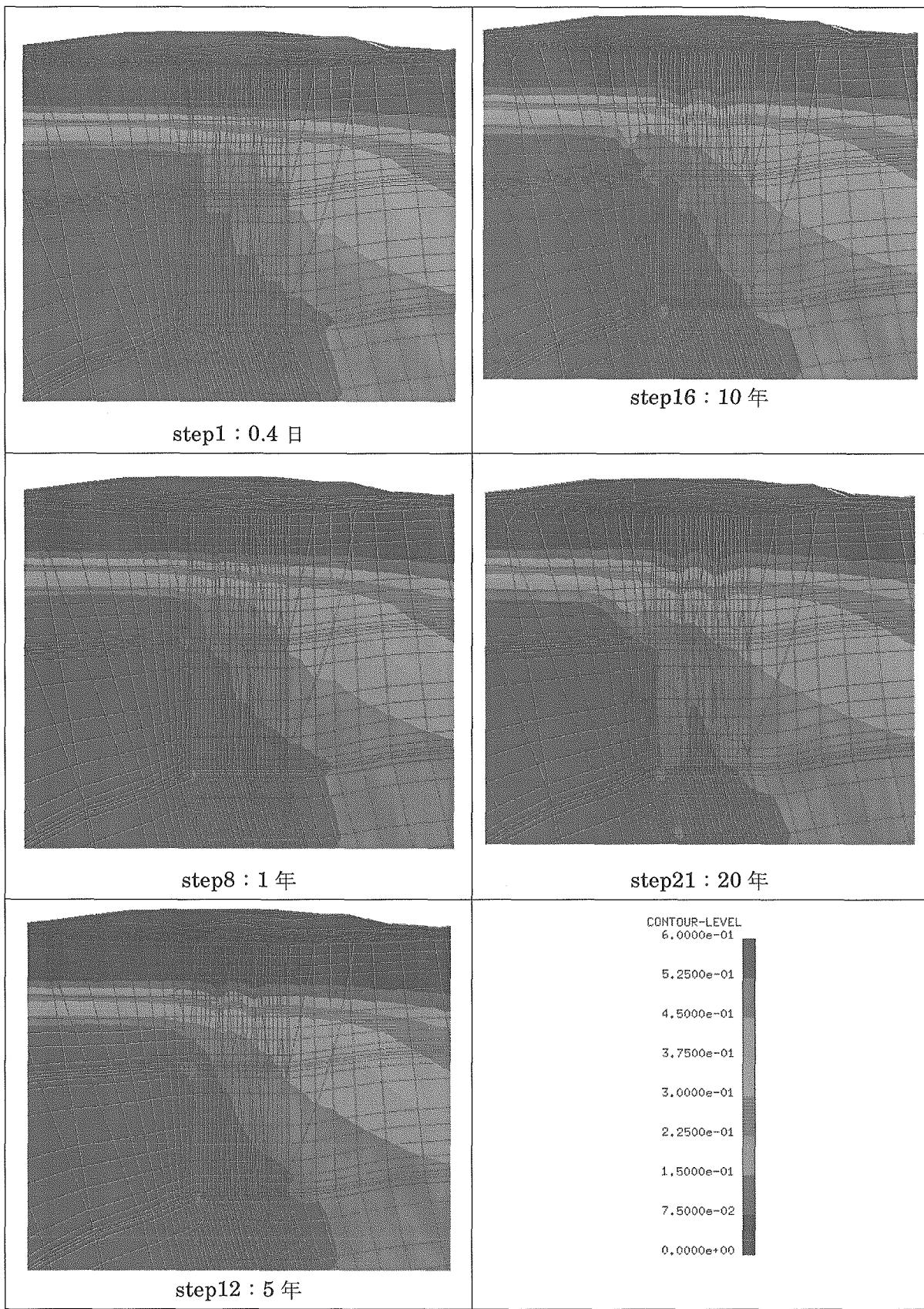


図 4.4.2-10 立坑を含む鉛直断面の立坑近傍の塩分濃度分布

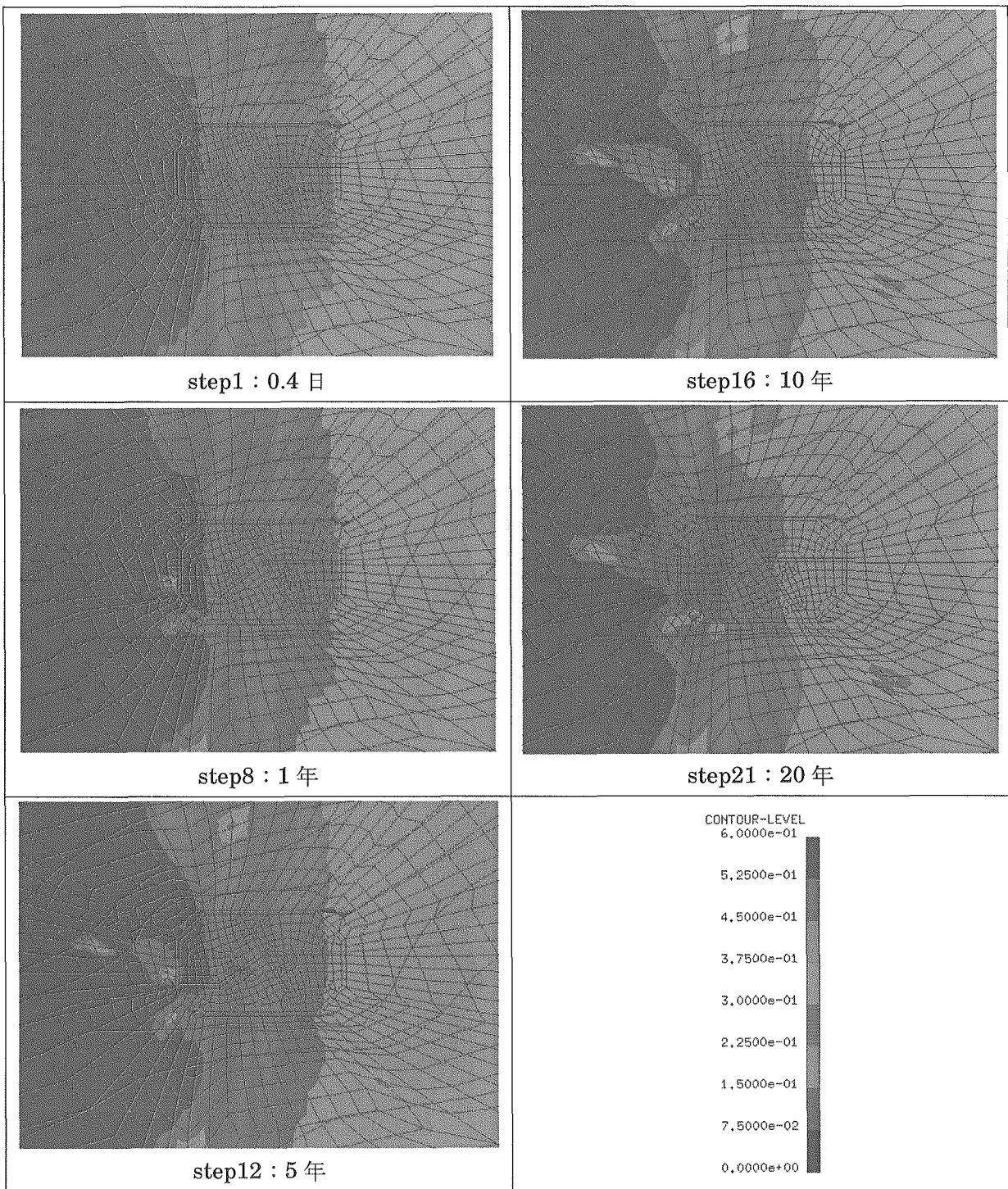


図 4.4.2-11 EL-180m 水平面内の塩分濃度分布

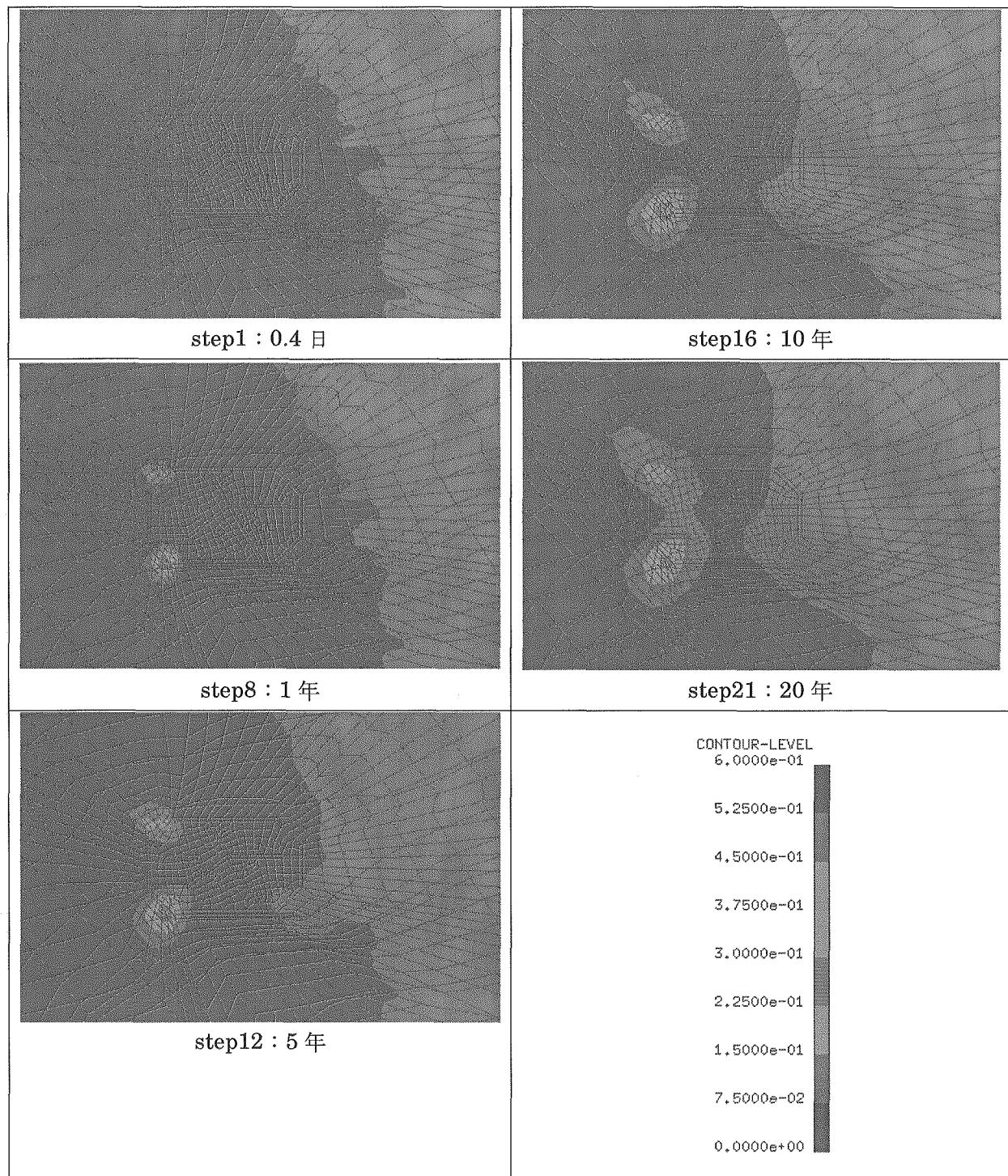
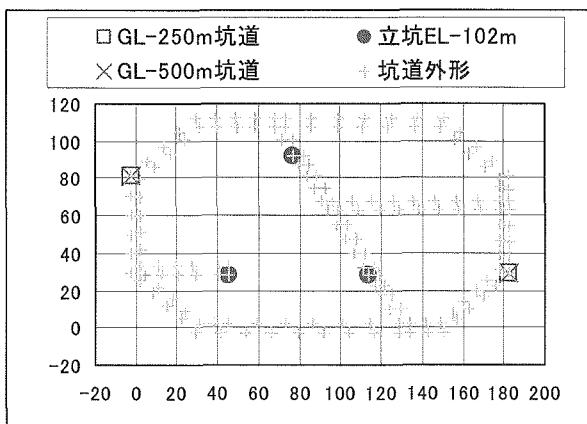
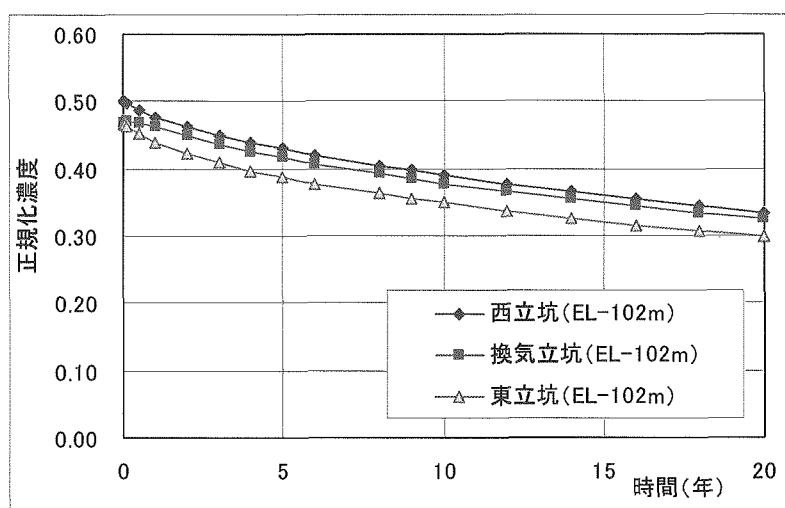


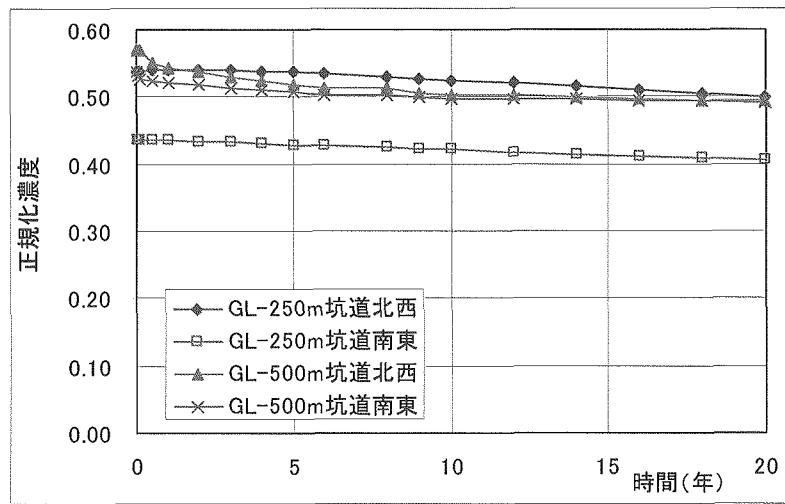
図 4.4.2-12 EL-400m 水平面内の塩分濃度分布



(a) 湧水の位置



(c) 立坑への湧水



(c) 坑道への湧水

図 4.4.2-13 立坑・坑道湧水の濃度変化

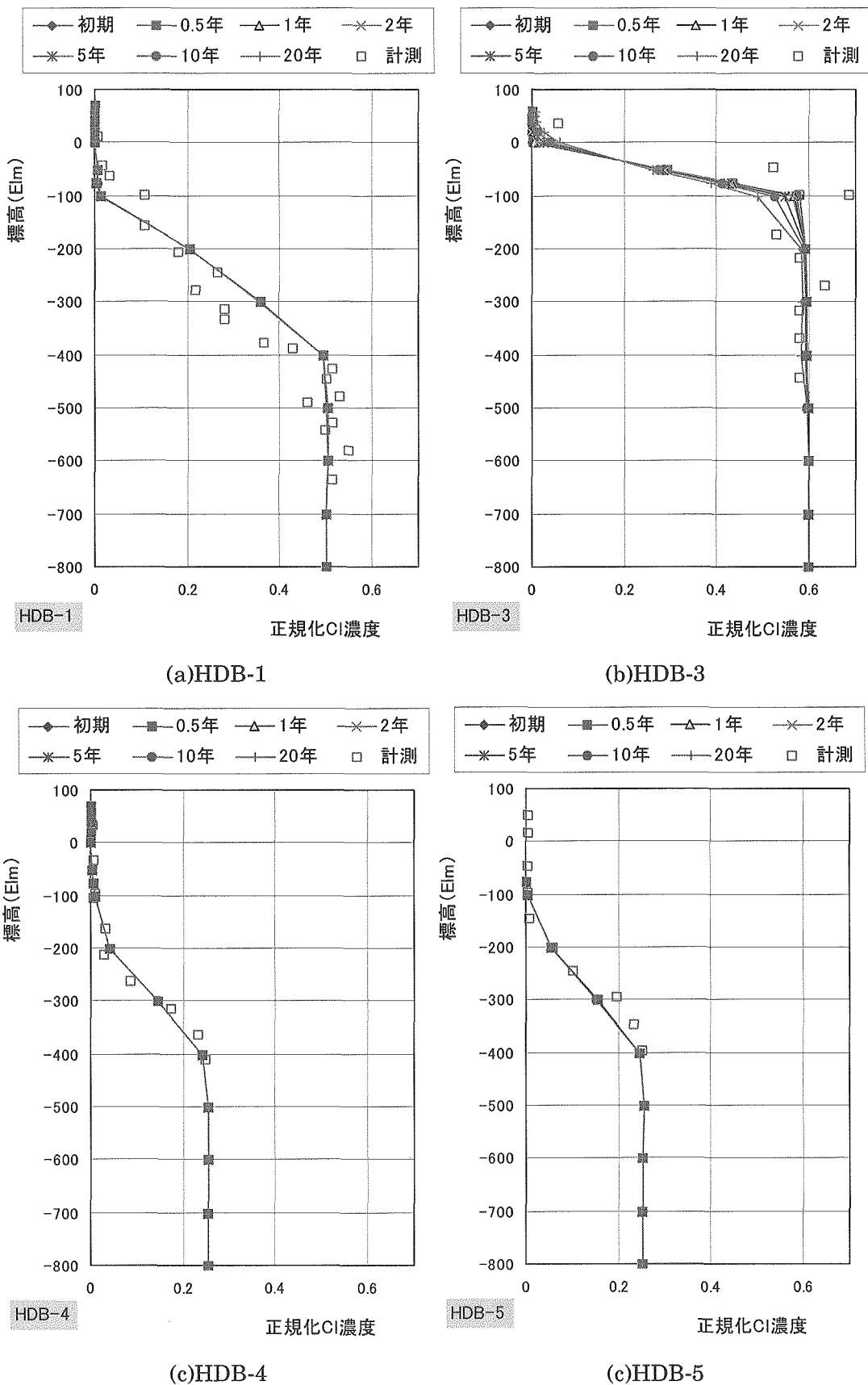
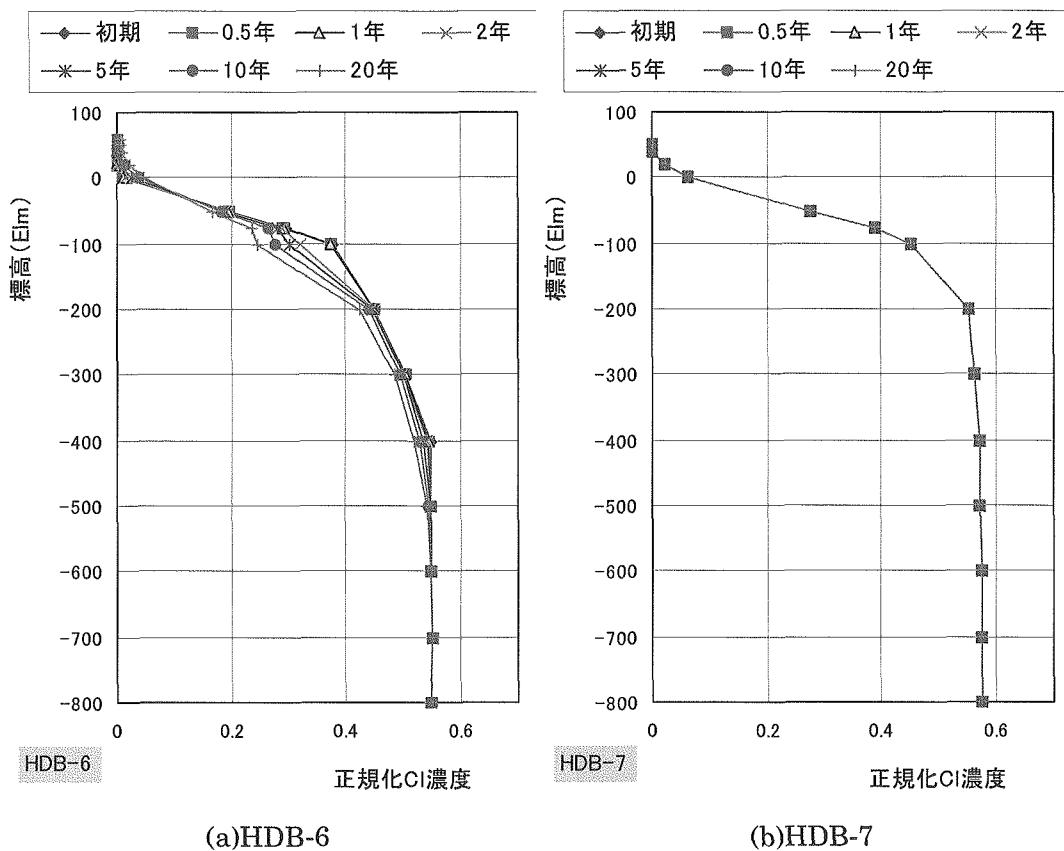
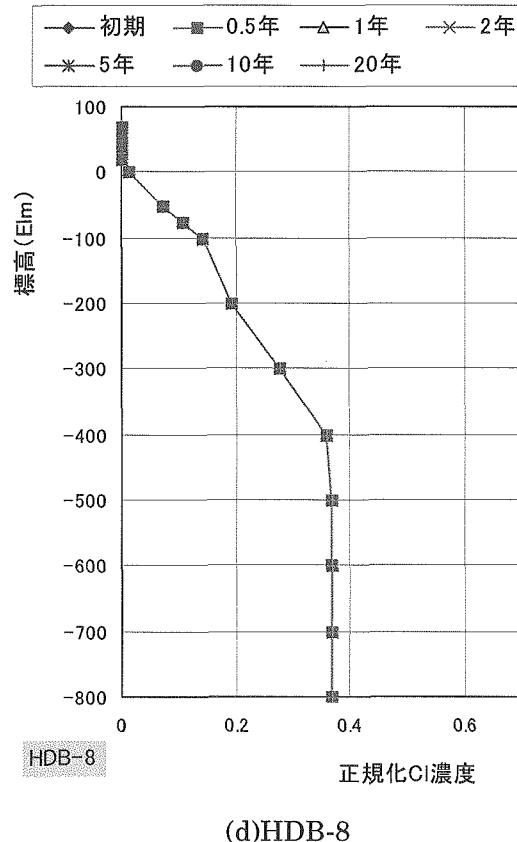


図 4.4.2-14 HDB 孔内の CI 濃度分布の経時変化



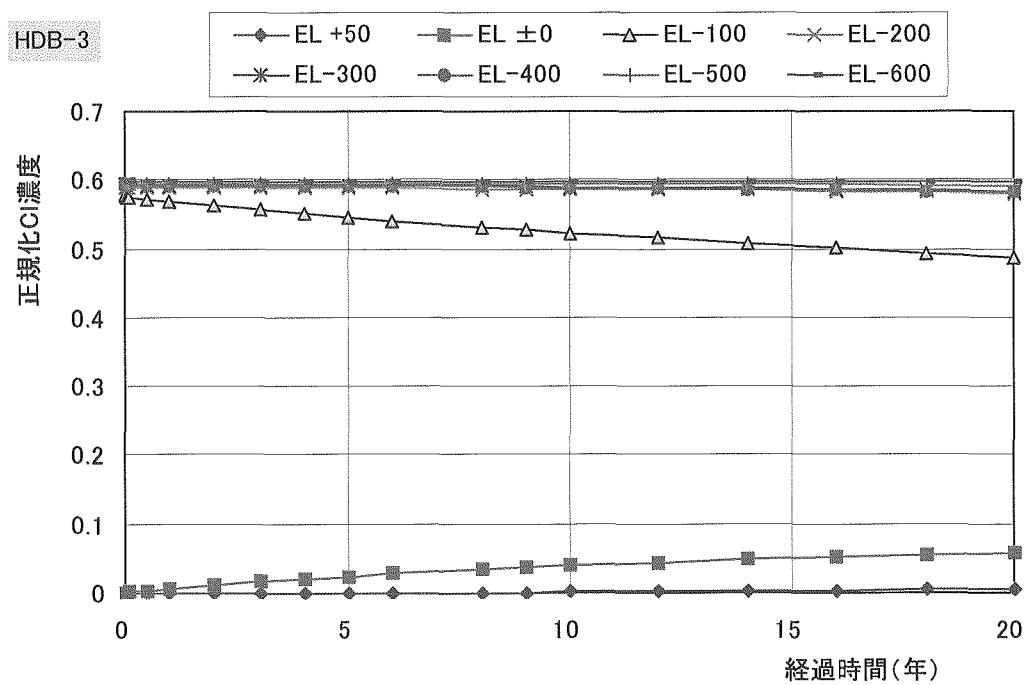
(a)HDB-6

(b)HDB-7

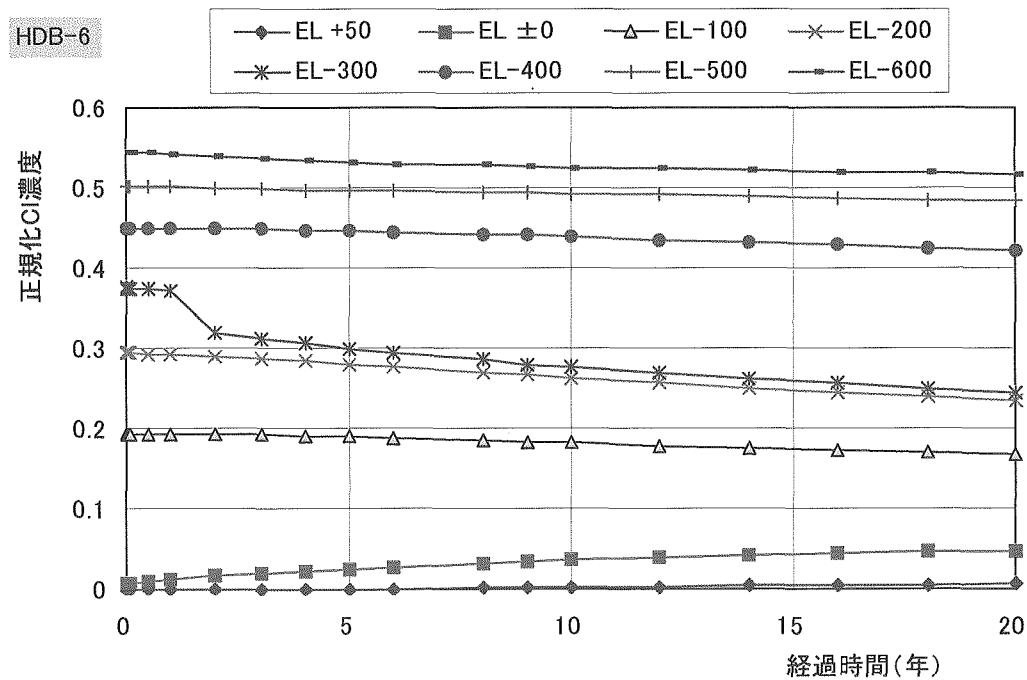


(c)HDB-8

図 4.4.2-15 HDB 孔内の Cl<sup>-</sup>濃度分布の経時変化



(a)HDB-3



(b)HDB-6

図 4.4.2-15 HDB 孔内 Cl<sup>-</sup>濃度の経時変化

#### 4.4.3 考察

上記解析結果から示される事項、考えられることを以下に示す。

##### (1)ポテンシャルコンタ

- ・ポテンシャルのコンタ図（図 4.4.2-1～図 4.4.2-4）から、地下施設設置初期は、地下施設形状に沿ったポテンシャル低下部であるが、時間の経過と共にポテンシャルは地下施設を中心とした同心円状の変化を示し、井戸と類似したポテンシャルへの影響を示す。

##### (2)湧水量

- ・湧水量は時間の経過（図 4.4.2-5）と共に低下し、10 年以降ほぼ定常となり、そのときの湧水量は  $634\text{m}^3/\text{day}$  である。
- ・湧水量の分布を見ると、深部で湧水量が大きく（図 4.4.2-6）、また GL-250 坑道、GL-500m 坑道（図 4.4.2-7）部では外周での湧水量が大きくなることが示される。これは外周部から地下水を集水するためと想定される。

##### (3)HDB 孔におけるポテンシャル（図 4.4.2-8）

- ・HDB 孔におけるポテンシャルは地下施設に近い箇所ほどポテンシャル低下開始時点が早い。HDB-6 孔ではほとんど初期からポテンシャルの低下を示すが、HDB-1 では 10 年経過以降ポテンシャルの低下が見られる。
- ・揚水試験などの一般的傾向であるが、水位変化を与える井戸から近いほど、水位応答・水位変化量が大きい。また透水係数が大きいほど、水位応答・水位変化量が大きく、透水係数が小さいほど水位応答・水位変化量が小さい。本解析でもこの傾向は認められる。

##### (4)塩分濃度分布

図 4.4.2-9～図 4.4.2-15 に示す塩分濃度を海水濃度で正規化した濃度のコンタ図、経時変化図から以下のことが示される。

- ・坑道を含む水平面内の濃度コンタ図（図 4.4.2-11、図 4.4.2-12）で、時間の変化とともに坑道周辺の濃度が低下する傾向が見られる。図 4.4.2-12 の坑道コーナー部では目玉状に濃度の低い部分が見られるが、この部分は計算上の誤差と考えられる。
- ・坑道への湧水の塩分濃度の経時変化（図 4.4.2-13）は、時間の経過と共に濃度の低下する傾向が示される。これは濃度コンタ図からの示されるように坑道周辺の塩分濃度が低下してきているために、湧水の塩分濃度も低下していると考えられる。初期塩分濃度として、坑道から少し離れた箇所に高濃度部が存在し、この箇所から坑道への地下水流動が生じる場合、湧水の塩分濃度が増加することも想定され、湧水の塩分濃度は地下施設周辺の現時点の塩分濃度分布に影響される想定される。
- ・HDB 孔内での塩分濃度は HDB-3、HDB-6 という比較的地下施設に近い箇所で濃度の変化のあることを示している。ただしその変化量はあまり大きくない。

## 4.5 立坑掘削影響予測結果のまとめ

立坑掘削影響として以下に示す3種類のモデルによる予測解析を実施した。

①MODFLOWによる立坑形状を模擬した解析

②広域スケールモデルでの解析

③広域スケールと整合性を有する立坑形状を反映させた施設スケールでの解析

ここで③が最も地下施設形状の忠実なモデルである。これら検討から示された事項を以下に示す。

### (1)湧水量

湧水量は上記①, ②, ③のモデル化でそれぞれ異なる値を示した。以下に各モデルでの総湧水量と主な解析条件を示す。

モデル、透水係数設定により湧水量が大きく異なることが示される。①と③は共に立坑、坑道の形状を具体的にモデル化し、②では立坑や坑道など単なる節点としてモデル化している。②の場合立坑間隔も広く評価しているため、実際よりも大きな地下施設を設置したモデル化になっていると考えられる。

①の場合、差分モデルであり立坑など見かけ上矩形断面となっているが数値計算上はセル重心点でポテンシャルを評価し、セルのコーナーにある節点で評価する有限要素法による解析と比べ動水勾配を小さく評価する可能性が想定され、湧水量の違いには数値解析手法の違いがある程度影響している可能性が想定される。したがって、下記3モデルでは③のモデルが最も実際の状況に近い結果を示していると考えられる。

表 4.5-1 各モデルでの湧水量

モデル	流量 (m <sup>3</sup> /day)		備考
①MODFLOW モデル	144		定常, $k = 1 \times 10^{-8} \text{ m/s}$
②広域スケールモデル	case1	1,128	非定常 10 年, 声間, 稚内= $1 \times 10^{-8} \text{ m/s}$
	case2	3,226	非定常 10 年, 声間= $1 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ , ※1
	case3	883	非定常 10 年, 声間= $1 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ , ※2
	case4	18,226	非定常 10 年, ※3
	case5	1,119	非定常 10 年, 声間, 稚内= $1 \times 10^{-8} \text{ m/s}$
③施設スケールモデル	634		非定常 10 年, 声間, 稚内= $1 \times 10^{-8} \text{ m/s}$

※1 : GL-500m 坑道底部に該当する稚内層の透水係数は  $k = 1 \times 10^{-7} \text{ m/s}$

※2 : GL-500m 坑道底部に該当する稚内層の透水係数は  $k = 1 \times 10^{-9} \text{ m/s}$

※3 : 稚内層、声間層の透水係数には深度依存性を設定

### (2)ポテンシャル変化

地下施設設置に伴うポテンシャルの変化として、一般的傾向として

- 地下施設に近い箇所ほどポテンシャル低下開始時点が早い。

- ・地下施設設置初期は、地下施設形状に沿ってポテンシャルが低下するが、時間の経過と共にポテンシャルは地下施設を中心とした同心円状の変化を示す。
- ・透水性の高い部分はポテンシャル低下が広い範囲まで及ぶことが解析結果から示され、割れ目部など透水性の高い部分に沿ったポテンシャルの低下範囲の広がりが想定される。

### (3) 塩分濃度

- ・坑道への湧水の塩分濃度の経時変化は、時間の経過と共に濃度が低下する傾向が示される。これは坑道周辺の塩分濃度が低下してきているため、坑道から少し離れた箇所に高濃度部が存在し、この箇所から坑道への地下水流动が生じる場合、湧水の塩分濃度が増加することも想定され、湧水の塩分濃度は地下施設周辺の現時点の塩分濃度分布に影響される。
- ・HDB 孔内での塩分濃度は HDB-3, HDB-6 という比較的地下施設に近い箇所において濃度変化が生じるが、その変化量は小さい。

## 5. おわりに

### 5.1 モデル作成、解析結果のまとめ

本研究は、地下施設建設予定地周辺の地下水流动状況の把握、地下施設建設の影響として広域の地下水流动に与える影響の把握、地下施設近傍のより詳細な地下水流动への影響の把握と地下施設内への湧水量等の把握を目的に、広域を対象とした広域スケールの解析領域と立坑周辺に着目した施設スケールの解析領域、2種類の解析領域を設定し、それぞれに対応する解析モデルを作成、解析検討を実施した。この2種類の解析モデルは、モデル形状、地質構造など整合性を有する設定としている。

解析検討では、今までに得られた現地調査による透水係数などのパラメータのばらつきを考慮して、異なるパラメータ設定の解析ケースに対して、地下水流动と地下水に含まれる塩分濃度に着目した解析を実施した。解析結果としては間隙水圧分布、塩分の濃度分布、地下水の流动経路、地下水の滞留時間、地下施設への湧水量などが示された。また、試錐調査等で得られている間隙水圧や塩分濃度との比較を実施し、対象地域の地下水流动特性やモデル化、パラメータ設定の影響を検討した。地下施設の建設を考慮した解析結果からは、周辺地下水流动への影響や地下施設への第一段階としての予測結果を示した。

以下に主な成果を示す。

- (1) 上記検討に必要な2種類の解析領域を設定、地質構造等を整理し広域スケール、施設スケールの解析用メッシュデータを作成した。
- (2) 今までに実施された調査、既往の文献を調査、整理し現時点における地下水流动概念モデルを作成した。その要点を以下に示す。
  - ①HDB-4孔、HDB-5孔の近傍では、ポテンシャル勾配が大きく、浅部からEL.-350m深度までの稚内層の割れ目帯を主体とする高い透水性領域を地下水が流动している。流动している地下水の起源はHDB-5孔より東側の高標高部であると推定される。
  - ②HDB-1孔近傍は大曲断層の推定位置に近く、断層の影響を受けた透水性の高い領域が存在し、3次元的な複雑な流动場になっている可能性が高く、そのためには水質がEL-400mの深部まで地表水の影響を受けているものと考えられる。HDB-1孔の東側ではポテンシャル分布から上昇流が認められ、これは大曲断層による割れ目帯に沿った流れである可能性がある。
  - ③HDB-3孔の透水性はHDB-4、5孔よりも低く、そのためには地表水の影響は最大でもEL-100mまでとなっている。それより深部には、地層が堆積する過程で取り込まれた高濃度の海水が残っている。
  - ④HDB-3孔とHDB-7孔の間の領域は、ポテンシャル勾配から流速が非常に遅いと考えられ、流动方向は上向きとなっている。したがって、この領域では地表水の影響は地表面近傍に限定されている可能性が高い。

(3) 広域スケールを対象として、定常・3次元地下水流动解析、HDB孔該当断面での塩分濃度に着目した非定常・2次元密度流解析を実施した。この結果得られた知見を以下に示す。

- ①case1からcase5まで全体的なポテンシャル分布は類似している。山地部の標高の高い箇所でポテンシャル値は大きく低地部でポテンシャル値は小さい。このことからポテンシャル分布は地形の影響を反映していることが理解される。
- ②流域平均としてP-1, P-2, P-3は涵養域、P-1'は流出域となっている。
- ③透水係数設定が同じ場合、設定した涵養量に関わらず涵養量、流出量はほぼ同じ値を示している。
- ④地下水年代は全般的に深い点ほど地下水年代の古い傾向が示される。
- ⑤HDB孔の地下水年代は1000年オーダーから100万年オーダーの範囲にある。
- ⑥地下施設該当部(EL-250m, EL-500m)からの地下水流动は、各ケースとも南西方向に向かう傾向が見られる。
- ⑦実測値と解析結果の比較における全般的傾向として解析に対し実測値の深度方向の変化が大きいことが挙げられる。この原因としては解析モデルでは実際の地盤の有する不均質性を反映していないこと、実測値は非定常過程のデータであることなどが考えられる。また、不均質性に関して、実際の地層にはモデルに反映されない破碎帯や割れ目系なども存在していることも一因と考えられる。
- ⑧淡水化する部分は、山地部など地形的に凸部で深くなっている。これは涵養された淡水が深部まで潜り込むことによる。
- ⑨中間に透水性の高い層が存在する場合、透水性の高い部分を淡水が多く流れるため塩分濃度の希釈速度が速く、この透水性の高い箇所から先に淡水化する。この結果は、ボーリング調査した際など途中で塩分濃度の低い箇所が見られた場合、その箇所の透水係数が上下層と比較し相対的に透水係数が大きい層である可能性を示唆している。

## 5.2 調査計画への提案

5.1 で示したモデル化、解析と実測値の対比より今後の計画に反映すべき事項を以下に示す。

- ①HDB 孔で観測されたポテンシャル分布は解析結果よりも大きな変化を示す。大きな変化箇所では割れ目などの不均質構造の存在が想定される。ポテンシャル分布の変化を理解するため、ポテンシャル変化の大きな箇所のコア、物理試験結果等を詳細に検討すると共に、近接する箇所に追加の試錐孔を設け孔間水理試験を実施するなどして不均質構造の水理特性を把握することが必要である。
- ②地下施設への湧水量の推定には透水係数の把握が重要である。現時点までの水理地質モデルは地層構造を基準に作成された。今後は、地下施設近傍にある高透水部を把握し、その広がりを評価した水理調査結果に基づくモデル作りが必要となる。
- ③地下施設への湧水の塩分濃度を予測するためには、地下施設周辺地下水の塩分濃度分布把握が重要となることが解析により示された。このため、孔内水の分析結果と共に物理検層結果や物理探査結果等を利用し精度の高い塩分濃度の把握が必要と考えられる。
- ④現時点では広域スケールモデル、施設スケールモデル間では広域スケールモデルから施設スケールモデルへの境界条件の提供程度関与であり、ほとんど独立して解析を実施している。今後は両者を非定常にリンクされた解析手法の開発が必要と思われる。
- ⑤地下水流动解析の粒子追跡法により地下水の流动経路、地下水起源が想定された。これらを参考に代表的な地下水流动系路を抽出し、<sup>14</sup>C、<sup>36</sup>Clなどを用いた地下水年代との対比によるモデルの妥当性確認等が必要と考えられる。
- ⑥透水係数の大きな箇所では、塩分濃度の小さい可能性が示唆された。この結果に対して原位置試験結果、コアの物性等からの検証が必要と考えられる。
- ⑦解析ケースの一つとして声問層・稚内層の透水係数の深度依存性を考慮した。このケースで設定した深度依存性は、声問層・稚内層で得られた透水係数のばらつきを深度方向の変化として深度依存性をモデル化した。実際には、得られた透水係数のばらつき、透水係数の深度方向の変化度合いを評価して深度依存性のモデル化が必要と考えられる。したがって今後の検討として深度依存性の観点から得られた透水係数を整理し、深度をパラメータとした透水係数のモデル化とその解析モデルへの適用が必要と思われる。
- ⑧上記は透水係数に関する深度依存性であるが、実際には間隙率などのパラメータも深度依存性を有している。特に対象領域の堆積岩は圧密過程の堆積岩であり、間隙率などの深度依存性を考慮した物質移行解析により塩分分布への影響を評価する必要性も考えられる。
- ⑨実測と解析の対比、その乖離から不均質構造のモデルへの反映が指摘されている。ボーリング調査等から得られた想定される割れ目帯等をモデルに反映させ、その影響を見ておく必要がある。また、ポテンシャルや Cl 濃度分布の実測と解析を合わせるための解析検討を実施し、どのような不均質構造やパラメータ設定が実測と解析の乖離を小さくするのかを探る水理地質構造推定のアプローチも考えられる。最終的に両者を合わせた、現地調査と解析で整合性のある水理地質モデルの構築が必要と考えられる。
- ⑩建設予定の地下施設への湧水量、湧水の塩分濃度の予測には透水係数設定、地下施設周辺の

塩分濃度設定が大きく影響する。湧水量、湧水の塩分濃度の予測精度を上げるためにより詳細な透水係数設定や初期塩分濃度の設定が必要である。透水係数設定に関しては⑧で示した透水係数の深度依存性の考慮など、地質区分にとらわれない透水係数設定が必要と思われる。また初期塩分濃度の設定に関しては⑨に示す実測と解析の対比を通じた解析からの3次元的塩分濃度分布設定による初期塩分濃度設定が必要と思われる。この際、計算時間短縮の観点からモデルの簡素化、密度を考慮しないなど、現実的対応とその妥当性・許容性の確認が必要と思われる。

#### 謝辞

本研究を実施するに際して、東京大学大学院工学研究科登坂博行先生には解析領域の設定、解析結果の評価などに関して有益なご指導を頂いた。末筆ながら謝意を申し上げる。

## 【参考文献】

### 2.

#### 2.2

岡孝雄：幌延町の地質，新幌延町史，pp. 9–36 (2000)

小椋伸幸・掃部満：天北・羽幌地域の石油地質，石油技術協会誌，Vol.57, No.1, pp.32-44 (1992)

### 3.

#### 3.1

國丸貴紀，竹内竜史，瀬尾昭治：幌延深地層研究計画における地下水の地球化学特性について，日本地下水学会 2003 年秋季講演会講演要旨，pp.36-39 (2003)

佐藤治夫：堆積岩系岩盤マトリクス中のイオンの拡散移行過程に関する研究：幌延泥岩の物理化学特性評価（研究報告），JNC TN1400 2003-003, (2003)

核燃料サイクル開発機構 幌延深地層研究センター：幌延深地層研究計画 平成 13 年度調査研究成果報告，JNC TN1400 2002-004, (2002)

核燃料サイクル開発機構 幌延深地層研究センター：幌延深地層研究計画 平成 14 年度調査研究成果報告，JNC TN5400 2003-001, (2003a)

核燃料サイクル開発機構 東濃地科学センター：平成 15 年度地層科学研究情報・意見交換会一要旨集一，JNC TN7410 2003-002, (2003b)

町田洋，大場忠道，小野昭，山崎晴雄，河村善也，百原新：第四紀学，朝倉書店，p.117 (2003)

#### 3.2

菱谷智幸，西垣誠，橋本学：物質移動を伴う密度依存地下水流の 3 次元数値解析手法に関する研究，土木学会論文集，No.638／III-49, pp.59-69 (1999)

今井久，山下亮，雨宮清，塩崎功：堆積岩地域における広域地下水流动解析に関する検討（核燃料サイクル開発機構 委託研究成果報告書），JNC TJ1410 2001-002, (2001)

今井久，前田信行，塩崎功，雨宮清，千々松正和：幌延深地層研究計画における地下水流动解析に関する検討（核燃料サイクル開発機構 委託研究成果報告書），JNC TJ1410 2002-004, (2002)

#### 3.3

今井久，前田信行，塩崎功，雨宮清，千々松正和：幌延深地層研究計画における地下水流动解析に関する検討（核燃料サイクル開発機構 委託研究成果報告書），JNC TJ1410 2002-004, (2002)