

幌延深地層研究計画における 不確実性を考慮した安全評価手法の検討 (委託研究)

Development of Safety Assessment Method
under Uncertainty for Horonobe URL Project
(Contract Research)

高瀬 博康* 稲垣 学* 野口 俊英* 島岡 晶子*

Andrew MARTIN* 若松 尚則* 高瀬 今日子* 田原 道子*
松井 裕哉

Hiroyasu TAKASE*, Manabu INAGAKI*, Toshihide NOGUCHI*, Akiko SHIMAOKA*
Andrew MARTIN*, Hisanori WAKAMATSU*, Kyoko TAKASE*, Michiko TABARA*
and Hiroya MATSUI.

地層処分研究開発部門
堆積岩工学技術開発グループ

Sedimentary Environment Engineering Group
Geological Isolation Research and Development Directorate

August 2007

JAEA-Research

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaca.go.jp/index.shtml>)
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター*では実費による複写頒布を行つております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

* 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4 日本原子力研究開発機構内

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920

幌延深地層研究計画における
不確実性を考慮した安全評価手法の検討
(委託研究)

日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門
幌延深地層研究ユニット

高瀬 博康*,

稻垣 学*, 野口 俊英*, 島岡 晶子*, Andrew MARTIN*,
若松 尚則*, 高瀬 今日子*, 田原 道子*,
松井 裕哉

(2007年6月27日 受理)

深部地質環境の空間的不均質性に起因する不確実性の存在を前提として、安全評価の信頼性を向上するための手法構築を行い、種々の証拠によって最尤と考えられる選択肢のみではなく、可能性は低いが否定することの出来ない選択肢についても明示的に検討に含めることにより、各調査段階で残されている不確実性の種類や大きさを顕在化することが可能となった。また、このような選択肢を網羅的に抽出し、複数の証拠を用いて包括的に評価を行うための体系的な方法論を明らかにした。さらに、過去数カ年にわたって実施した地下水流动解析や物質移動解析等の関連する研究成果を統合することにより、幌延の地質環境を事例とした不確実性を考慮した安全評価手法を具体的に示した。

本報告書は、株式会社クインテッサジャパンが旧核燃料サイクル開発機構（現・日本原子力研究開発機構）との契約により平成17年度に実施した業務成果に関するものである。

核燃料サイクル工学研究所（駐在）：〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4-33

* 株式会社クインテッサジャパン

Development of Safety Assessment Method under Uncertainty for Horonobe URL Project (Contract Research)

Hiroyasu TAKASE*

Manabu INAGAKI*, Toshihide NOGUCHI *, Akiko SHIMAOKA*, Andrew MARTIN*,
Hisanori WAKAMATSU *, Kyoko TAKASE*, Michiko TABARA* and
Hiroya MATSUI

Horonobe Underground Research Unit
Geological Isolation Research and Development Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received June 27,2007)

In this study a systematic approach to explicitly address type and size of uncertainties associated with safety assessment due mainly to incomplete knowledge on a spatially heterogeneous geological environment was developed. In this approach a wide range of model variations including the ones with relatively low plausibility are taken into account so that ambiguity remaining in the knowledge is illustrated, which is a distinctive feature of the approach compared with the conventional methodology where only a limited number of best plausible model variations are considered. The study also proposed an approach to assessing plausibility of each model variation based on multiple pieces of evidence by using evidential support logic (ESL). Furthermore the approach was applied to Horonobe area to demonstrate its applicability to the similar class of geological environment as an example.

Keywords: Safety Assessment, Uncertainty, Geological Environment, ESL, Horonobe

This work was performed by Quintessa Japan under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute (Japan Atomic Energy Agency)

* Quintessa Japan

目次

1.はじめに.....	1
2.不確実性を考慮した安全評価手法の体系化.....	1
2.1. 地質環境モデルに関するバリエーションの網羅的抽出.....	1
2.2. 異なる地質環境モデルバリエーションの安全評価上の取り扱い.....	2
2.2.1. 感度解析の方法.....	2
2.2.2. 地質環境モデルバリエーションの確からしさの評価.....	3
2.2.3. 次段階の調査・研究計画立案の支援.....	9
3.幌延地域の地質環境を事例とした堆積岩地域における不確実性を考慮した安全評価手法の具体例.....	11
3.1. 核種移行に関する感度構造の理解.....	11
3.1.1. 人工バリア仕様の変動幅及び地質環境条件の不確実性を考慮した統計的核種移行解析.....	11
3.1.2. 人工バリアに求められる性能及び地質環境調査の課題の重要度.....	18
3.2. 不確実性を考慮した地質環境モデルのバリエーションの構築.....	19
3.2.1. 評価目的及び評価対象.....	19
3.2.2. 評価対象に対する影響因子の抽出.....	19
3.2.3. 各影響因子に関する地質環境の差別化.....	22
3.2.4. 各構成要素に対するモデルオプションの抽出.....	22
3.2.5. 概念モデルオプション派生機構の体系化.....	28
3.3. 安全評価モデルの構築及び解析の実施.....	30
3.3.1. 地下水流動解析モデルの構築.....	30
3.3.2. 地下水流動解析.....	82
3.3.3. 物質移行解析.....	126
3.4. 安全評価の信頼性の評価.....	152
3.4.1. 水理地質構造モデルバリエーションに関する信頼性の評価.....	152
3.4.2. 稚内層中の物質移動モデルに関する信頼性の評価.....	157
3.5. 次段階の調査・研究における課題の抽出と重要度分類.....	160
3.5.1. ダイポール型原位置トレーサ試験についての予察解析.....	160
3.5.2. ダイポール型原位置トレーサ試験についての再解析.....	167
3.5.3. 単一孔試験についての予察解析.....	181
4.幌延地域における予備的セーフティーケースの構築.....	195
4.1. セーフティーケース構築の方法論.....	195
4.1.1. セーフティーケース構築の目的.....	195
4.1.2. セーフティーケース構築の方法論.....	197
4.1.3. 階層プロセスモデルによるセーフティーケースの論理構造の表現及び ESL による信頼性の評価.....	200
4.1.4. セーフティーケースの品質管理.....	200
4.1.5. セーフティーケースの信頼性向上のための課題の重要度分類.....	200
4.2. 幌延地域を事例としたセーフティーケース構築方法の適用.....	202
4.2.1. 地下水移行シナリオにおいて予想される「生物圏への核種移行率が十分小さい」ことについての階層プロセスモデル.....	202
4.2.2. 「安全性」の確からしさに関する ESL による評価.....	204
4.3. 提案したセーフティーケース構築の方法論の適用性.....	213
5.まとめ及び今後の課題	213
参考文献	214

Contents

1.	Introduction	1
2.	Systematic approach to explicitly address types and magnitudes of uncertainties associated with safety assessment	1
2.1.	Comprehensive abstraction of the variability associated with models of the geological environment	1
2.2.	Treatment of the variability in geological models in safety assessment	2
2.2.1.	Methods of sensitivity analysis	2
2.2.2.	Evaluation of the confidence in geological model variability	3
2.2.3.	Output to support the next phase of R&D	9
3.	A specific example of a systematic approach for explicitly addressing the types and sizes of uncertainties associated with safety assessment, based on the geological environment at Horonobe	11
3.1.	Understanding the sensitivity of solute transport	11
3.1.1.	Statistical radionuclide transport analysis taking into account uncertainties in the geological environment and variability in the engineered barrier system	11
3.1.2.	Importance of issues connected with investigating the geological environment and the required performance of the engineered barrier system	18
3.2.	Model development taking into account uncertainties in the geological environment	19
3.2.1.	Target of investigation and aims	19
3.2.2.	Abstraction of factors influencing the target of the evaluation	19
3.2.3.	Distinguishing features of the geological environment related to each influencing factor	22
3.2.4.	Abstracting model options corresponding to features of the geological environment	22
3.2.5.	Systematic derivation of conceptual models	28
3.3.	Safety assessment model development and analysis	30
3.3.1.	Development of ground water flow model	30
3.3.2.	Ground water flow analysis	82
3.3.3.	Solute transport analysis	126
3.4.	Evaluation of confidence in the safety analysis	152
3.4.1.	Evaluation of confidence in the variability of the hydrogeological model	152
3.4.2.	Evaluation of confidence in the model of solute transport in the Wakkanai formation	157
3.5.	Abstraction of issues for future investigations and research, and classification of the issues according to their importance	160
3.5.1.	Preliminary analysis of the in-situ cross-hole tracer tests	160
3.5.2.	Re-analysis of the in-situ cross-hole tracer tests	167
3.5.3.	Preliminary analysis for the in-situ single-hole tracer tests	181
4.	An exercise in preliminary safety case development based on the geological environment at Horonobe	195
4.1.	Methodology for developing the safety case	195
4.1.1.	Purpose of developing the safety case	195
4.1.2.	Method for developing the safety case	197
4.1.3.	Representation of the safety case using a hierarchical process model and estimation of confidence in the developed safety case by ESL	200
4.1.4.	Quality assurance of the safety case	200
4.1.5.	Classification of issues according to their importance for enhancing confidence in the safety case	200
4.2.	Case study on the application of the safety case development methodology, based on the geological environment at Horonobe	202
4.2.1.	Hierarchical process model evaluating the hypothesis that there is "Very	

little possibility of solutes reaching the biosphere" expected in the solute transport by ground water scenario.....	202
4.2.2. Evaluation by ESL of the confidence in safety	204
4.3. Applicability of the developed methodology for developing a safety case	213
5. Concluding remarks and future topics	213
References.....	214

表目次

表 3.1.1・1	人工バリアからの核種移行に関する統計的解析の条件	12
表 3.2.3・1	各影響因子に着目した幌延地域における概念モデル構成要素の抽出.....	22
表 3.3.1・1	作成した解析モデルの一覧	30
表 3.3.1・2	透水係数深度依存性	31
表 3.3.1・3	HDB・1～8 孔における割れ目帯の情報.....	33
表 3.3.1・4	割れ目帯に関する統計的情報.....	35
表 3.3.3・1	ダルシーフローに基づく地表までの移行時間のまとめ.....	130
表 3.3.3・2	割れ目に関するデータ	131
表 3.3.3・3	坑道及び人工バリアの仕様	132
表 3.3.3・4	三次元核種移行解析の条件	147
表 3.3.3・5	1 次元マルチチャンネル解析条件	151
表 3.4.1・1	HDB・1 孔の各深度における降水系地下水年代	155
表 3.4.1・2	HDB・3 孔の各深度における降水系地下水年代	155
表 3.4.1・3	HDB・4 孔の各深度における降水系地下水年代	155
表 3.4.1・4	HDB・5 孔の各深度における降水系地下水年代	155
表 3.4.1・5	HDB・6 孔の各深度における降水系地下水年代	156
表 3.4.1・6	HDB・8 孔の各深度における降水系地下水年代	156
表 3.5.1・1	非吸着性トレーサについての 3 次元物質移行解析の条件	162
表 4.1.1・1	セーフティーケースの信頼性に関する重要な論点.....	196
表 4.2.2・1	情報の有無と確からしさの入力結果(1)	204
表 4.2.2・2	情報の有無と確からしさの入力結果(2)	205
表 4.2.2・3	情報の有無と確からしさの入力結果(3)	205
表 4.2.2・4	情報の有無と確からしさの入力結果(4)	206
表 4.2.2・5	情報の有無と確からしさの入力結果(5)	206
表 4.2.2・6	情報の有無と確からしさの入力結果(6)	207
表 4.2.2・7	情報の有無と確からしさの入力結果(7)	207
表 4.2.2・8	情報の有無と確からしさの入力結果(8)	208
表 4.2.2・9	情報の有無と確からしさの入力結果(9)	208
表 4.2.2・10	情報の有無と確からしさの入力結果(10)	209
表 4.2.2・11	情報の有無と確からしさの入力結果(11)	209
表 4.2.2・12	情報の有無と確からしさの入力結果(12)	209

図目次

図 2.2.1-1	SI 法による感度解析の例	3
図 2.2.2-1	不確実性を有する主命題の信頼性の判断に関する階層プロセスモデルの例	4
図 2.2.2-2	各証拠に基づく末端の補助命題の確信の程度（主観確率）の入力例	4
図 2.2.2-3	下位の補助命題あるいは証拠の上位命題の信頼性への寄与についての十分性及び重複性の入力例	4
図 2.2.2-4	主命題の信頼性の評価例	4
図 2.2.2-5	古典的な確率論（左）と区間確率理論（右）の比較	5
図 2.2.2-6	古典的な確率論（左）と区間確率理論（右）の比較（続き）	5
図 2.2.2-7	ESL 演算規則の図形的表現	6
図 2.2.2-8	各命題の信頼性の ratio plot による表示例	8
図 2.2.3-1	Tornado plot による感度解析結果の例	9
図 2.2.3-2	地質環境モデルに付随する不確実性を考慮した安全評価の手順	10
図 3.1.1-1	統計的解析に用いた核種移行解析モデルの概念図	11
図 3.1.1-2	最大線量当量率とその出現時刻（深井戸／平野／農作業）	13
図 3.1.1-3	目標線量当量率を $300 \mu \text{Sv/y}$ とした場合の SI 法による感度曲線（深度 250m からの核種移行解析）（1/3）	14
図 3.1.1-4	目標線量当量率を $300 \mu \text{Sv/y}$ とした場合の SI 法による感度曲線（深度 250m からの核種移行解析）（2/3）	14
図 3.1.1-5	目標線量当量率を $300 \mu \text{Sv/y}$ とした場合の SI 法による感度曲線（深度 250m からの核種移行解析）（3/3）	15
図 3.1.1-6	目標線量当量率を $10 \mu \text{Sv/y}$ とした場合の SI 法による感度曲線（深度 500 m からの核種移行解析）（1/3）	15
図 3.1.1-7	目標線量当量率を $10 \mu \text{Sv/y}$ とした場合の SI 法による感度曲線（深度 500 m からの核種移行解析）（2/3）	16
図 3.1.1-8	目標線量当量率を $10 \mu \text{Sv/y}$ とした場合の SI 法による感度曲線（深度 500 m からの核種移行解析）（3/3）	16
図 3.1.1-9	深度 500m のケースで最大線量当量率 $10 \mu \text{Sv/y}$ に対する各パラメータの感度（各パラメータ変動範囲の上下限での SI 値の差）	17
図 3.1.1-10	最大線量当量率が $300 \mu \text{Sv/y}$ 以上となるケースに関する各パラメータのカイ二乗検定結果	17
図 3.2.1-1	対象領域（平成 15 年度時点）	19
図 3.2.2-1	局所的な支配的移行経路のマルチスケールな階層構造の概念	20
図 3.2.2-2	地下水流速及び地下水移行時間に対する主な影響因子	21
図 3.2.2-3	核種移行遅延効果に対する主な影響因子	21
図 3.2.4-1	タイプ 1 及びタイプ 2 割れ目の比較	23
図 3.2.4-2	各ボーリング孔におけるタイプ 1 及びタイプ 2 割れ目の頻度と方向の分布	24
図 3.2.4-3	既往の透水試験結果のまとめ（HDB-1, 3, 4, 5, 6, 8 孔）	25
図 3.2.4-4	割れ目帯透水係数に対する回帰式と実測値の比較	27
図 3.2.5-1	稚内層中の割れ目帯に関する概念モデルオプションの派生	28
図 3.2.5-2	稚内層中の個別割れ目に関する概念モデルオプションの派生	29
図 3.2.5-3	稚内層中の核種移行に関する概念モデルオプションの派生	29
図 3.2.5-4	大曲断層に関する概念モデルオプションの派生	29
図 3.3.1-1	割れ目帯以外の水理地質構造の 3 次元モデル	31
図 3.3.1-2	割れ目帯の幅と走向の相関	34
図 3.3.1-3	割れ目帯の幅と傾斜の相関	34
図 3.3.1-4	標高 0 m の水平断面における割れ目帯分布	36
図 3.3.1-5	HDB-1 孔を通る x - z 断面における割れ目帯分布	37
図 3.3.1-6	HDB-3 孔を通る x - z 断面における割れ目帯分布	37
図 3.3.1-7	HDB-4 孔を通る x - z 断面における割れ目帯分布	38
図 3.3.1-8	HDB-5 孔を通る x - z 断面における割れ目帯分布	38
図 3.3.1-9	HDB-6 孔を通る x - z 断面における割れ目帯分布	39
図 3.3.1-10	HDB-8 孔を通る x - z 断面における割れ目帯分布	39
図 3.3.1-11	透水係数分布（水平断面：深度 400m、モデル 1-A）	40
図 3.3.1-12	透水係数分布（地下施設位置を通る xz 鉛直断面、モデル 1-A）	41

図 3.3.1-13	透水係数分布 (地下施設位置を通る yz 鉛直断面、モデル 1-A)	42
図 3.3.1-14	透水係数分布 (水平断面: 深度 400m、モデル 1-B)	43
図 3.3.1-15	透水係数分布 (地下施設位置を通る xz 鉛直断面、モデル 1-B)	44
図 3.3.1-16	透水係数分布 (地下施設位置を通る yz 鉛直断面、モデル 1-B)	45
図 3.3.1-17	透水係数分布 (水平断面: 深度 400m、モデル 2-A)	46
図 3.3.1-18	透水係数分布 (地下施設位置を通る xz 鉛直断面、モデル 2-A)	47
図 3.3.1-19	透水係数分布 (地下施設位置を通る yz 鉛直断面、モデル 2-A)	48
図 3.3.1-20	透水係数分布 (水平断面: 深度 400m、モデル 2-B)	49
図 3.3.1-21	透水係数分布 (地下施設位置を通る xz 鉛直断面、モデル 2-B)	50
図 3.3.1-22	透水係数分布 (地下施設位置を通る yz 鉛直断面、モデル 2-B)	51
図 3.3.1-23	透水係数分布 (水平断面: 深度 400m、モデル 3-A)	52
図 3.3.1-24	透水係数分布 (地下施設位置を通る xz 鉛直断面、モデル 3-A)	53
図 3.3.1-25	透水係数分布 (地下施設位置を通る yz 鉛直断面、モデル 3-A)	54
図 3.3.1-26	透水係数分布 (水平断面: 深度 400m、モデル 3-B)	55
図 3.3.1-27	透水係数分布 (地下施設位置を通る xz 鉛直断面、モデル 3-B)	56
図 3.3.1-28	透水係数分布 (地下施設位置を通る yz 鉛直断面、モデル 3-B)	57
図 3.3.1-29	透水係数分布 (水平断面: 深度 400m、モデル 4-A)	58
図 3.3.1-30	透水係数分布 (地下施設位置を通る xz 鉛直断面、モデル 4-A)	59
図 3.3.1-31	透水係数分布 (地下施設位置を通る yz 鉛直断面、モデル 4-A)	60
図 3.3.1-32	透水係数分布 (水平断面: 深度 400m、モデル 4-B)	61
図 3.3.1-33	透水係数分布 (地下施設位置を通る xz 鉛直断面、モデル 4-B)	62
図 3.3.1-34	透水係数分布 (地下施設位置を通る yz 鉛直断面、モデル 4-B)	63
図 3.3.1-35	透水係数分布 (水平断面: 深度 400m、モデル 5-A)	64
図 3.3.1-36	透水係数分布 (地下施設位置を通る xz 鉛直断面、モデル 5-A)	65
図 3.3.1-37	透水係数分布 (地下施設位置を通る yz 鉛直断面、モデル 5-A)	66
図 3.3.1-38	透水係数分布 (水平断面: 深度 400m、モデル 5-B)	67
図 3.3.1-39	透水係数分布 (地下施設位置を通る xz 鉛直断面、モデル 5-B)	68
図 3.3.1-40	透水係数分布 (地下施設位置を通る yz 鉛直断面、モデル 5-B)	69
図 3.3.1-41	透水係数分布 (水平断面: 深度 400m、モデル 6-A)	70
図 3.3.1-42	透水係数分布 (地下施設位置を通る xz 鉛直断面、モデル 6-A)	71
図 3.3.1-43	透水係数分布 (地下施設位置を通る yz 鉛直断面、モデル 6-A)	72
図 3.3.1-44	透水係数分布 (水平断面: 深度 400m、モデル 6-B)	73
図 3.3.1-45	透水係数分布 (地下施設位置を通る xz 鉛直断面、モデル 6-B)	74
図 3.3.1-46	透水係数分布 (地下施設位置を通る yz 鉛直断面、モデル 6-B)	75
図 3.3.1-47	透水係数分布 (水平断面: 深度 400m、モデル 7-A)	76
図 3.3.1-48	透水係数分布 (地下施設位置を通る xz 鉛直断面、モデル 7-A)	77
図 3.3.1-49	透水係数分布 (地下施設位置を通る yz 鉛直断面、モデル 7-A)	78
図 3.3.1-50	透水係数分布 (水平断面: 深度 400m、モデル 7-B)	79
図 3.3.1-51	透水係数分布 (地下施設位置を通る xz 鉛直断面、モデル 7-B)	80
図 3.3.1-52	透水係数分布 (地下施設位置を通る yz 鉛直断面、モデル 7-B)	81
図 3.3.2-1	地表地質図	82
図 3.3.2-2	地質断面図	82
図 3.3.2-3	地下施設からの粒子追跡線 (case1)	83
図 3.3.2-4	圧力水頭及び流速ベクトル分布 (水平断面: 深度 400m、モデル 1-A)	84
図 3.3.2-5	圧力水頭及び流速ベクトル分布 (地下施設位置を通る xz 鉛直断面、モデル 1-A)	85
図 3.3.2-6	圧力水頭及び流速ベクトル分布 (地下施設位置を通る yz 鉛直断面、モデル 1-A)	86
図 3.3.2-7	圧力水頭及び流速ベクトル分布 (水平断面: 深度 400m、モデル 1-B)	87
図 3.3.2-8	圧力水頭及び流速ベクトル分布 (地下施設位置を通る xz 鉛直断面、モデル 1-B)	88
図 3.3.2-9	圧力水頭及び流速ベクトル分布 (地下施設位置を通る yz 鉛直断面、モデル 1-B)	89
図 3.3.2-10	圧力水頭及び流速ベクトル分布 (水平断面: 深度 400m、モデル 2-A)	90
図 3.3.2-11	圧力水頭及び流速ベクトル分布 (地下施設位置を通る xz 鉛直断面、モデル 2-A)	91
図 3.3.2-12	圧力水頭及び流速ベクトル分布 (地下施設位置を通る yz 鉛直断面、モ	

図 3.3.2-13	モデル 2-A) 圧力水頭及び流速ベクトル分布 (水平断面: 深度 400m、モデル 2-B)	92
		93
図 3.3.2-14	圧力水頭及び流速ベクトル分布 (地下施設位置を通る xz 鉛直断面、モデル 2-B)	94
図 3.3.2-15	圧力水頭及び流速ベクトル分布 (地下施設位置を通る yz 鉛直断面、モデル 2-B)	95
図 3.3.2-16	圧力水頭及び流速ベクトル分布 (水平断面: 深度 400m、モデル 3-A)	96
図 3.3.2-17	圧力水頭及び流速ベクトル分布 (地下施設位置を通る xz 鉛直断面、モデル 3-A)	97
図 3.3.2-18	圧力水頭及び流速ベクトル分布 (地下施設位置を通る yz 鉛直断面、モデル 3-A)	98
図 3.3.2-19	圧力水頭及び流速ベクトル分布 (水平断面: 深度 400m、モデル 3-B)	99
図 3.3.2-20	圧力水頭及び流速ベクトル分布 (地下施設位置を通る xz 鉛直断面、モデル 3-B)	100
図 3.3.2-21	圧力水頭及び流速ベクトル分布 (地下施設位置を通る yz 鉛直断面、モデル 3-B)	101
図 3.3.2-22	圧力水頭及び流速ベクトル分布 (水平断面: 深度 400m、モデル 4-A)	102
図 3.3.2-23	圧力水頭及び流速ベクトル分布 (地下施設位置を通る xz 鉛直断面、モデル 4-A)	103
図 3.3.2-24	圧力水頭及び流速ベクトル分布 (地下施設位置を通る yz 鉛直断面、モデル 4-A)	104
図 3.3.2-25	圧力水頭及び流速ベクトル分布 (水平断面: 深度 400m、モデル 4-B)	105
図 3.3.2-26	圧力水頭及び流速ベクトル分布 (地下施設位置を通る xz 鉛直断面、モデル 4-B)	106
図 3.3.2-27	圧力水頭及び流速ベクトル分布 (地下施設位置を通る yz 鉛直断面、モデル 4-B)	107
図 3.3.2-28	圧力水頭及び流速ベクトル分布 (水平断面: 深度 400m、モデル 5-A)	108
図 3.3.2-29	圧力水頭及び流速ベクトル分布 (地下施設位置を通る xz 鉛直断面、モデル 5-A)	109
図 3.3.2-30	圧力水頭及び流速ベクトル分布 (地下施設位置を通る yz 鉛直断面、モデル 5-A)	110
図 3.3.2-31	圧力水頭及び流速ベクトル分布 (水平断面: 深度 400m、モデル 5-B)	111
図 3.3.2-32	圧力水頭及び流速ベクトル分布 (地下施設位置を通る xz 鉛直断面、モデル 5-B)	112
図 3.3.2-33	圧力水頭及び流速ベクトル分布 (地下施設位置を通る yz 鉛直断面、モデル 5-B)	113
図 3.3.2-34	圧力水頭及び流速ベクトル分布 (水平断面: 深度 400m、モデル 6-A)	114
図 3.3.2-35	圧力水頭及び流速ベクトル分布 (地下施設位置を通る xz 鉛直断面、モデル 6-A)	115
図 3.3.2-36	圧力水頭及び流速ベクトル分布 (地下施設位置を通る yz 鉛直断面、モデル 6-A)	116
図 3.3.2-37	圧力水頭及び流速ベクトル分布 (水平断面: 深度 400m、モデル 6-B)	117
図 3.3.2-38	圧力水頭及び流速ベクトル分布 (地下施設位置を通る xz 鉛直断面、モデル 6-B)	118
図 3.3.2-39	圧力水頭及び流速ベクトル分布 (地下施設位置を通る yz 鉛直断面、モデル 6-B)	119
図 3.3.2-40	圧力水頭及び流速ベクトル分布 (水平断面: 深度 400m、モデル 7-A)	120
図 3.3.2-41	圧力水頭及び流速ベクトル分布 (地下施設位置を通る xz 鉛直断面、モ	

図 3.3.2-42	モデル 7-A) 圧力水頭及び流速ベクトル分布 (地下施設位置を通る yz 鉛直断面、モデル 7-A)	121
図 3.3.2-43	圧力水頭及び流速ベクトル分布 (水平断面: 深度 400m、モデル 7-B)	122
図 3.3.2-44	圧力水頭及び流速ベクトル分布 (地下施設位置を通る xz 鉛直断面、モデル 7-B)	123
図 3.3.2-45	圧力水頭及び流速ベクトル分布 (地下施設位置を通る yz 鉛直断面、モデル 7-B)	124
図 3.3.3-1	モデル 1 についてのパーティクルトラッキング結果 (地下施設位置を通る yz 鉛直断面)	125
図 3.3.3-2	モデル 2 についてのパーティクルトラッキング結果 (地下施設位置を通る yz 鉛直断面)	126
図 3.3.3-3	モデル 3 についてのパーティクルトラッキング結果 (地下施設位置を通る yz 鉛直断面)	127
図 3.3.3-4	モデル 4 についてのパーティクルトラッキング結果 (地下施設位置を通る yz 鉛直断面)	128
図 3.3.3-5	モデル 5 についてのパーティクルトラッキング結果 (地下施設位置を通る yz 鉛直断面)	128
図 3.3.3-6	モデル 6 についてのパーティクルトラッキング結果 (地下施設位置を通る yz 鉛直断面)	129
図 3.3.3-7	モデル 7 についてのパーティクルトラッキング結果 (地下施設位置を通る yz 鉛直断面)	129
図 3.3.3-8	解析で設定した人工バリア	132
図 3.3.3-9	破碎帯を含む場合の透水係数分布	132
図 3.3.3-10	破碎帯を含む場合の透水係数分布 (X=50m の断面)	133
図 3.3.3-11	破碎帯を含む場合の透水係数分布 (Y=50m の断面)	133
図 3.3.3-12	破碎帯を含む場合の透水係数分布 (Y=50m の断面 (拡大))	134
図 3.3.3-13	破碎帯を含む場合の透水係数分布 (Z= 50m の断面)	134
図 3.3.3-14	健岩部のみの場合の透水係数分布	135
図 3.3.3-15	健岩部のみの場合の透水係数分布 (X=50m の断面)	135
図 3.3.3-16	健岩部のみの場合の透水係数分布 (Y=50m の断面)	136
図 3.3.3-17	健岩部のみの場合の透水係数分布 (Y= 50m の断面 (拡大))	136
図 3.3.3-18	健岩部のみの場合の透水係数分布 (Z=50m の断面)	137
図 3.3.3-19	破碎帯を含む場合の圧力水頭分布	138
図 3.3.3-20	破碎帯を含む場合の圧力水頭分布 (X=50m の断面)	138
図 3.3.3-21	破碎帯を含む場合の圧力水頭分布 (Y=50m の断面)	139
図 3.3.3-22	破碎帯を含む場合の圧力水頭分布 (Z=50m の断面)	139
図 3.3.3-23	健岩部のみの場合の圧力水頭分布	140
図 3.3.3-24	健岩部のみの場合の圧力水頭分布 (X=50m の断面)	140
図 3.3.3-25	健岩部のみの場合の圧力水頭分布 (Y=50m の断面)	141
図 3.3.3-26	健岩部のみの場合の圧力水頭分布 (Z=50m の断面)	141
図 3.3.3-27	破碎帯を含む場合の流速分布	142
図 3.3.3-28	破碎帯を含む場合の流速分布 (X=50m の断面)	142
図 3.3.3-29	破碎帯を含む場合の流速分布 (Y=50m の断面)	143
図 3.3.3-30	破碎帯を含む場合の流速分布 (Y=50m の断面 (拡大))	143
図 3.3.3-31	破碎帯を含む場合の流速分布 (Z=50m の断面)	144
図 3.3.3-32	健岩部のみの場合の流速分布	144
図 3.3.3-33	健岩部のみの場合の流速分布 (X= 50m の断面)	145
図 3.3.3-34	健岩部のみの場合の流速分布 (Y=50m の断面)	145
図 3.3.3-35	健岩部のみの場合の流速分布 (Y=50m の断面 (拡大))	146
図 3.3.3-36	健岩部のみの場合の流速分布 (Z=50m の断面)	146
図 3.3.3-37	ランダムウォーク法による物質移動解析の概念	147
図 3.3.3-38	破碎帯を含む場合の粒子軌跡の一例 (マトリクス拡散深さ=0.1 m)	148
図 3.3.3-39	破碎帯を含む場合の粒子軌跡の一例 (マトリクス拡散深さ制限なし)	148
図 3.3.3-40	健岩部のみの場合の粒子軌跡の一例 (マトリクス拡散深さ=0.1 m)	149
図 3.3.3-41	健岩部のみの場合の粒子軌跡の一例 (マトリクス拡散深さ制限なし)	149
図 3.3.3-42	三次元核種移行解析による破過曲線及びマルチチャンネルモデルによ	

図 3.3.3-43	るフィッティング結果（健岩部；マトリクス拡散深さ 0.1m）	150
図 3.3.3-44	三次元核種移行解析による破過曲線及びマルチチャンネルモデルによるフィッティング結果（健岩部；マトリクス拡散深さ制限なし）	150
図 3.3.3-45	三次元核種移行解析による破過曲線及びマルチチャンネルモデルによるフィッティング結果（破碎帶；マトリクス拡散深さ=0.1 m）	150
図 3.3.3-46	三次元核種移行解析による破過曲線及びマルチチャンネルモデルによるフィッティング結果（破碎帶；マトリクス拡散深さ=0.1 m）	150
図 3.4.1-1	一次元マルチチャンネルモデルによる Cs-135 被ばく線量算出結果（深井戸／平野／農作業シナリオ）	151
図 3.4.1-2	原位置透水試験結果のまとめ（JNC TN5400 2004-005 ⁵⁾ を修正・加筆）	152
図 3.4.1-3	各ボーリング孔における深度方向の塩分濃度測定結果	153
図 3.4.1-4	モデル 1A における地表から HDB-1 孔までの地下水移行経路	154
図 3.4.1-5	モデル 1A における地表から HDB-3 孔までの地下水移行経路	154
図 3.4.1-6	モデル 1A における地表から HDB-4 孔までの地下水移行経路	154
図 3.4.1-7	モデル 1A における地表から HDB-5 孔までの地下水移行経路	154
図 3.4.1-8	モデル 1A における地表から HDB-6 孔までの地下水移行経路	155
図 3.4.1-9	モデル 1A における地表から HDB-8 孔までの地下水移行経路	155
図 3.4.2-1	水理地質モデル 1 の確からしさについての ESL 評価結果	156
図 3.4.2-2	亀裂を含む稚内層のコアサンプルを用いたトレーサ試験の模式図	157
図 3.4.2-3	单一の平行平板亀裂問題における Partridge の検証計算結果の例	157
図 3.4.2-4	亀裂及びマトリクス部の物質移行メカニズムについての ESL 評価結果	159
図 3.4.2-5	亀裂開口幅と透水量係数の関係についての ESL 評価結果	159
図 3.4.2-6	マトリクス拡散深さの制限についての ESL 評価結果	159
図 3.5.1-1	マトリクス拡散深さの制限に関するモデルバリエーションの信頼性に対する種々の証拠の感度（トルネードプロット）	160
図 3.5.1-2	水頭分布（x y 水平断面）	161
図 3.5.1-3	水頭分布（x z 断面）	161
図 3.5.1-4	ダルシ一流速分布（x y 水平断面）	161
図 3.5.1-5	ダルシ一流速分布（x z 断面）	161
図 3.5.1-6	注入孔のパッカ区間から流入した粒子の一部（40 個）の軌跡の例	163
図 3.5.1-7	吸水孔に到達した粒子の軌跡の例	164
図 3.5.1-8	ダイポール型トレーサ試験における非吸着性トレーサの破過曲線	165
図 3.5.1-9	ボーリング孔間を結ぶ直線上の圧力水頭分布	165
図 3.5.1-10	ボーリング孔間を結ぶ直線上の圧力水頭勾配分布	165
図 3.5.1-11	非吸着性トレーサパルス入力についての 3 次元物質移行解析結果（青）に対するマルチチャンネルモデルによる近似結果（桃色）	166
図 3.5.1-12	種々の透水量係数のチャンネルへのトレーサの流入割合	166
図 3.5.2-1	再解析で用いた透水係数場のリアライゼーション（割れ目帯あり）	167
図 3.5.2-2	水頭分布（ダイポール試験：割れ目帯あり：xz 平面）	168
図 3.5.2-3	ダルシ一流速分布（ダイポール試験：割れ目帯あり：xz 平面拡大図）	168
図 3.5.2-4	粒子の軌跡の例（ダイポール試験：割れ目帯：マトリクス拡散深さ 10 cm）	170
図 3.5.2-5	粒子の軌跡の例（ダイポール試験：割れ目帯：マトリクス拡散深さ制限なし）	171
図 3.5.2-6	破過曲線（ダイポール試験：割れ目帯）	172
図 3.5.2-7	累積フラックス（回収率）の時間変化（割れ目帯）	172
図 3.5.2-8	マルチチャンネルモデルによるフィッティング結果（割れ目帯）	173
図 3.5.2-9	吸着性トレーサについての解析結果（破過曲線）	173
図 3.5.2-10	再解析で用いた透水係数場のリアライゼーション（健岩部）	174
図 3.5.2-11	水頭分布（ダイポール試験：健岩部：xz 平面拡大図）	175
図 3.5.2-12	ダルシ一流速分布（ダイポール試験：健岩部：xz 平面拡大図）	175
図 3.5.2-13	粒子の軌跡の例（ダイポール試験：健岩部：マトリクス拡散深さ 10 cm）	177
図 3.5.2-14	粒子の軌跡の例（ダイポール試験：健岩部：マトリクス拡散深さ制限なし）	178
図 3.5.2-15	破過曲線（ダイポール試験：健岩部）	179

図 3.5.2-16 累積ブラックス（回収率）の時間変化（健岩部）	179
図 3.5.2-17 マルチチャンネルモデルによるフィッティング結果（割れ目帯）	180
図 3.5.2-18 吸着性トレーサについての解析結果（破過曲線）	180
図 3.5.3-1 水頭分布（単一孔試験：割れ目帯あり：xz 平面拡大図）	181
図 3.5.3-2 ダルシ一流速分布（単一孔試験：割れ目帯あり：xy 平面）	182
図 3.5.3-3 ダルシ一流速分布（単一孔試験：割れ目帯あり：xz 平面拡大図）	182
図 3.5.3-4 粒子の軌跡の例（単一孔試験：割れ目帯あり：マトリクス拡散深さ 10 cm）	184
図 3.5.3-5 粒子の軌跡の例（単一孔試験：割れ目帯あり：マトリクス拡散深さ制限なし）	185
図 3.5.3-6 濃度分布（マトリクス拡散深さ 10cm：割れ目帯：1 日後）	186
図 3.5.3-7 濃度分布（マトリクス拡散深さ 10cm：割れ目帯：10 日後）	186
図 3.5.3-8 濃度分布（マトリクス拡散深さ 10cm：割れ目帯：50 日後）	186
図 3.5.3-9 50 日後の濃度分布（マトリクス拡散深さ 10cm：割れ目帯）	186
図 3.5.3-10 濃度分布（マトリクス拡散深さ制限なし：割れ目帯：1 日後）	187
図 3.5.3-11 濃度分布（マトリクス拡散深さ制限なし：割れ目帯：10 日後）	187
図 3.5.3-12 濃度分布（マトリクス拡散深さ制限なし：割れ目帯：50 日後）	187
図 3.5.3-13 50 日後の濃度分布（マトリクス拡散深さ制限なし：割れ目帯）	187
図 3.5.3-14 水頭分布（単一孔試験：健岩部：xz 平面拡大図）	188
図 3.5.3-15 ダルシ一流速分布（単一孔試験：健岩部：xz 平面）	189
図 3.5.3-16 粒子の軌跡の例（単一孔試験：健岩部：マトリクス拡散深さ 10 cm）	191
図 3.5.3-17 粒子の軌跡の例（単一孔試験：健岩部：マトリクス拡散深さ制限なし）	192
図 3.5.3-18 濃度分布（マトリクス拡散深さ 10cm：健岩部：1 日後）	193
図 3.5.3-19 濃度分布（マトリクス拡散深さ 10cm：健岩部：10 日後）	193
図 3.5.3-20 濃度分布（マトリクス拡散深さ 10cm：健岩部：50 日後）	193
図 3.5.3-21 50 日後の濃度分布（マトリクス拡散深さ 10cm：健岩部）	193
図 3.5.3-22 濃度分布（マトリクス拡散深さ制限なし：健岩部：1 日後）	194
図 3.5.3-23 濃度分布（マトリクス拡散深さ制限なし：健岩部：10 日後）	194
図 3.5.3-24 濃度分布（マトリクス拡散深さ制限なし：健岩部：50 日後）	194
図 3.5.3-25 50 日後の濃度分布（マトリクス拡散深さ制限なし：健岩部）	194
図 4.1.2-1 安全性に関する主張の現実性と信頼性のトレードオフ及びその時間的変遷	198
図 4.1.2-2 セーフティーケース構築のための反復的プロセスの全体的流れ	199
図 4.1.5-1 セーフティーケースに含まれる個々の論拠の信頼性についての 階層プロセスモデルの例	201
図 4.2.1-1 地下水移行シナリオに基づく「生物圏への核種移行率が十分小さい」という命題に関する階層プロセスモデル	203
図 4.2.2-1 「生物圏への核種移行率が十分小さい」についての ESL 評価結果	210
図 4.2.2-2 「生物圏への ESL 評価結果の Ratio plot	211
図 4.2.2-3 不確実性低減のための新たな証拠の感度	212

1. はじめに

幌延深地層研究所計画では、地表からの調査により取得された地下深部までの地質環境データを用いて地質環境モデルを構築するとともに、これに基づき処分技術及び安全評価手法の信頼性向上のための研究を実施することとしている。本研究はこのうち、深部地質環境の空間的不均質性に起因する不確実性の存在を前提として、安全評価の信頼性を向上するための手法を構築することを目標として実施したものである。また、これに加えて、過去数カ年にわたって実施した地下水流动解析や物質移動解析等の関連する研究成果を統合することにより、堆積岩地域における上述の安全評価手法の適用性の評価を行った。

2. 不確実性を考慮した安全評価手法の体系化

2.1. 地質環境モデルに関するバリエーションの網羅的抽出

深部の地質環境は、一般に、空間的不均質性を呈するのに対して、実際に入手することのできる情報は、限られた地点における直接的なデータやあるいは広範囲を網羅しながらも間接的な物理探査データ等に基づくものとならざるを得ない。このため、これらの情報に基づいて構築される地質環境モデルには不確実性が含まれざるを得ず、そして、それは安全評価にも影響を及ぼすものとなることが想定される。このような状況において、特に地質環境モデルの観点から、安全評価手法の信頼性向上を図るためにまず、上述した調査データの制約に起因する不確実性を否定できない地質環境モデルのバリエーションとして明示的に表現することが必要と考えられる。そして、このような各調査段階で否定することのできない地質環境モデルのバリエーションのそれぞれについて安全評価を行い、結果を比較することによって、初めて、地質環境モデルの不確実性が安全評価結果にどのような影響を及ぼすのかを定量的に把握することが可能となる。ここで注意すべき点は、各段階で入手されている情報に基づき否定できないモデルバリエーションを網羅的に抽出することであり、このようなアプローチは、専門家が最尤と考える選択肢に集中して調査や評価を行う決定論的な手法とは大きく異なるものと考えられる。

否定できないモデルバリエーションを網羅的に抽出するという目標を達成するためには、モデル構築の手順を体系的に組み立てることが必要であり、以下に示す手順に従い、恣意性を極力排除するとともに、論理的な明確さを確保することとなる。

- ① 評価目的の設定；物質移行解析などの評価目的によって、何をどの程度の精度でモデル化する必要があるかは異なり、このため、モデル構築にあたって、まず、目的を明確にすることが必要となる。
- ② 評価対象の特定；上記の評価目的に対応して、ある領域での地下水流动等の現象を評価対象とし、このため、流量、移行時間などの指標に着目することが必要であり、これがモデル構築の重要な前提条件となる。
- ③ 評価対象に対する影響因子の抽出；評価対象領域の地質環境は多様な構成要素や特性を有し、また、要素を区分する考え方も一意には定まらない。そこで、上記の評価目的に応じて、評価対象とする地下水流量や移行時間などに影響を及ぼすと考えられる亀裂透水量係数、頻度などの因子を特定することがモデル構築の準備段階として重要である。なお、このような影響因子の抽出は、対象とする現象についての一般的な（サイトジェネリックな）理解に基づき実施することが可能と考えられる。
- ④ 各影響因子に関する地質環境の差別化（概念モデル構成要素の抽出）；③で抽出した影響因子の観点から他とは異なる部分として、断層、健岩部の亀裂などを差別化し、概念モデルの構成要素として具体化する。この段階では、対象とする地質環境のサイトスペシフィックな情報を考慮することが必要である。
- ⑤ 上記の概念要素を記載する際の選択肢の抽出；概念モデルの構成要素が決まっても、それを表現する方法は必ずしも一意には決まらず、従って、例えば、後述する声間層を多孔質媒体としてモデル化する、亀裂性媒体としてモデル化する、あるいは複合（ハイブリッド）媒体としてモデル化するといった記載上の選択肢を選ぶことが必要となる。
- ⑥ 概念モデルオプション派生機構の体系化；個々の概念モデル構成要素についてのモデル化上の選択肢を明らかにした後、全体としての地質環境モデルを構築するためには、これら

を組み合わせることが必要となる。ここでは、排他的な選択肢の組み合わせ等を考慮して、概念モデルの派生機構を論理的に整理することが必要となり、具体的には、ロジックツリー等を作成することとなる。

既往の研究¹⁾では、合理的なサイト特性調査を行う上では、初めに重要な項目を主観的に選択するが、この選択が合理的であるかどうかを示す必要があることが述べられている。このような合理性を確保するためにも、ここで示すような論理的な明確さをもったモデル構築の手順は重要となる。

2.2. 異なる地質環境モデルバリエーションの安全評価上の取り扱い

考慮すべきあるいは否定できない地質環境モデルバリエーションを抽出した後にこれらに基づき安全評価を行う際には、以下の二点に留意することが必要と考えられる。

① 地質環境モデルバリエーションの安全評価結果への感度

異なる地質環境モデルバリエーションに基づく安全評価の結果が必ずしも顕著に異なるとは限らない。このことは、着目する地質環境特性や想定するバリエーションの種類によって、安全評価結果への感度が異なり得ることを示唆している。このような状況においては、安全評価への影響の大きい地質環境モデルバリエーション間の差異に着目し、これらの高いものに優先順位を与えることが適切である。

② 地質環境モデルバリエーションの確からしさ

複数想定される地質環境モデルバリエーションの全てが同じように確からしいものであるとは限らず、これらの中には、関連する分野の専門家のほとんどが該当すると考えているような蓋然性の高いものから、否定はできないものの可能性は低いというようなものまでが含まれることとなる。そして、確からしさの異なる地質環境モデルバリエーションに基づく安全評価結果が顕著に異なる場合、その結果の確からしさも前提となる地質環境モデルバリエーションの確からしさを反映して異なるものと考えられる。このことは、安全評価結果を広義のリスクとして解釈するためにも、基盤情報である地質環境モデルバリエーションの確からしさを把握することが必要であることを示唆するものである。

2.2.1. 感度解析の方法

上記のうち①について本手法では、統計的核種移行解析により予め考慮すべき地質環境特性の感度を把握しておくことを提案している。統計的核種移行解析は、一次元等の比較的簡単な核種移行モデルを用いて想定する地質環境条件や特性を幅広く変動させて多数の解析を行いこれに対応する安全評価結果の変動範囲を求めるとともに、感度解析によって各地質環境特性についての不確実性がどの程度影響されるかを定量的に把握するものである。ここで、核種移行解析結果が多成分の非線形な感度構造を有しており、かつ、着目すべきは所謂全体的な感度ではなく、安全基準のような目安となる影響レベル周辺での詳細な感度構造の把握であることから、本研究では感度解析の方法として SI 法²⁾を用いている。

各入力パラメータの変動範囲について、ある制約条件を課した場合、このことによって評価結果が安全目標を満足する可能性が変化することとなる。特に、長期的な安全性が向上する方向の条件を設定した場合には、安全目標を満足する可能性が向上することとなる。このような「安全目標を満足する可能性」は、当該条件の十分性を示すものであり、具体的には、多数の統計的シミュレーションケースのうち条件 1 を満足するものが N_1 個あったとして、このうち、安全目標を満足するものが n_1 個あるとすると、 n_1/N_1 として定義される。統計的核種移行において各パラメータ値の変動範囲のみを指定して確率分布を定義していない場合には、 n_1/N_1 は厳密な意味で確率と呼べるものではない。そこで、これは、SI (Sufficiency Index : 十分条件としての強さ)と呼ばれる。勿論、各パラメータの入力値に関して確率密度関数が定義できる場合には、SI は確率と一致することとなる。SI を用いた感度解析は、あるパラメータに着目して、そのパラメータの変動範囲を変えた場合に、安全目標を満足する可能性（即ち SI）がどの程度変化するかを計算するものである。

図 2.2.1-1 は、SI 法による感度分析の例を示したものである。同図は、着目するパラメータ（この例では亀裂を含む透水係数の対数）を p^* 以上にした場合に SI(縦軸) がどのように変化するか（青線）、そして同様に、 p^* 以下にした場合に SI(縦軸) がどのように変化するか（赤線）

を同時に表示しており、青線及び赤線がいずれも水平である場合には、当該パラメータの感度は無視でき、いずれかあるいは両方の線の傾きが顕著であればそれぞれの方向での感度が大きいということになる。この例では、亀裂を含む透水係数の対数を好ましいもの (-8.5 近傍) とすることができた場合には SI は 55%程度から 85%程度にまで上昇し、逆に好ましくないもの (たとえば -5.0 近傍) とせざるを得なくなつた場合には 30%程度にまで低下することとなり、大きな感度を有するものと判断される。

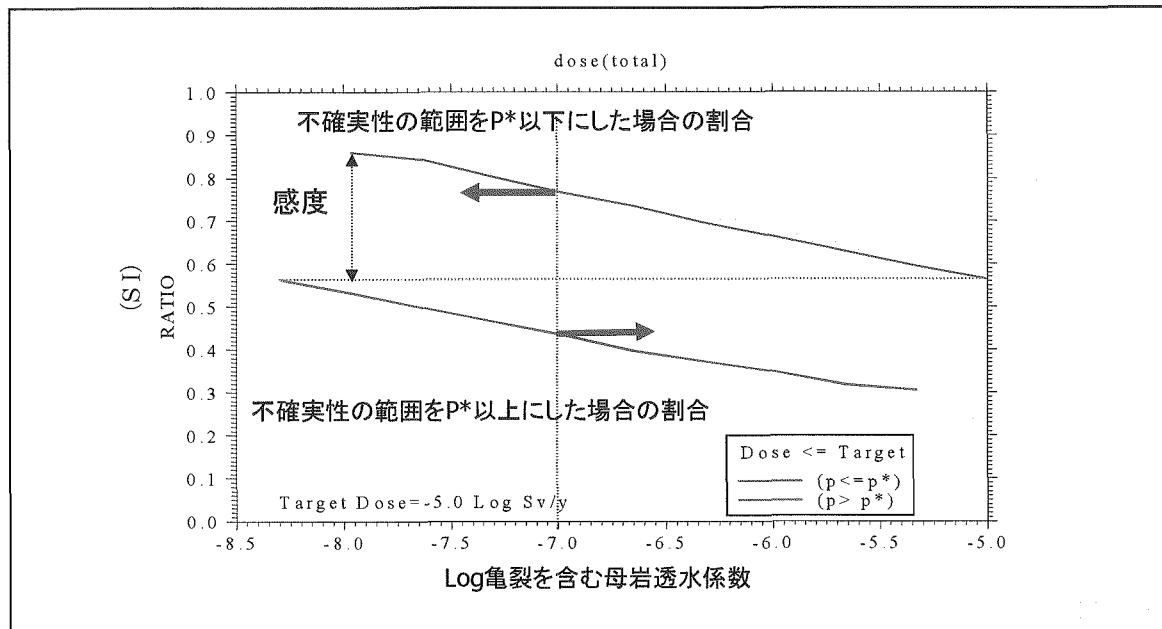


図 2.2.1-1 SI 法による感度解析の例

2.2.2. 地質環境モデルバリエーションの確からしさの評価

一般に、調査によって得られる地質環境データや情報は多面的なものであり、これらの中には誤差を顕著に含むものや相互に矛盾するものなどが介在する。そして、このような誤差の範囲や矛盾するデータに基づき構成される競合の存在が、地質環境モデルバリエーションが派生する原因と考えられる。ここで、各モデルバリエーションの確からしさを評価するためには、それぞれのバリエーションを導出する際に着目した情報（これらは当該モデルバリエーションを支持する証拠となる）のみならず、他のバリエーションを支持するような情報（これらは当該モデルバリエーションを否定する証拠となる）にも注目し、また、併せてこれらの証拠自体に含まれる不確実性も適切に考慮することが必要である。本手法では、このような要件を満足する評価方法として、Evidential Support Logic (ESL)を用いることを提案する。

ESL は次のような手順で適用される。

- i) 検討対象とする不確実な命題を、その真偽に影響を及ぼすような複数の補助命題に逐次細分化し、それぞれの補助命題の成立性についての確信の程度を判断するに参照する証拠 (Evidence) と対応付けられるレベルまで継続する。この作業によって、命題の真偽についての信頼性を判断するプロセスが樹形図として整理されることとなる（図 2.2.2-1 参照）。
- ii) 樹形図の末端に位置する補助命題が真であることの確信の程度を、主観確率として、それに対応する証拠に基づき入力する（図 2.2.2-2 参照）。
- iii) 樹形図の中の全ての分岐点において、個々の下位命題あるいは証拠についての確信の程度が上位の命題の信頼性に与える寄与の程度を、「十分性」、「重複性」および「必要性」の三つの指標（後述）に基づき設定する（図 2.2.2-3 参照）。
- iv) ii) 及び iii) の入力に基づき、条件付き区間確率についての演算規則（後述）を適用することにより、上位の命題についての確信の程度を順次算出していく（図 2.2.2-4 参照）。

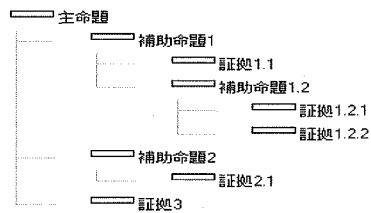


図 2.2.2-1 不確実性を有する主命題の信頼性の判断に関する階層プロセスモデルの例

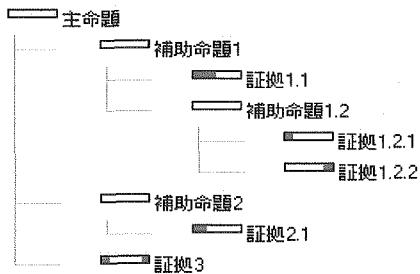


図 2.2.2-2 各証拠に基づく末端の補助命題の確信の程度（主観確率）の入力例

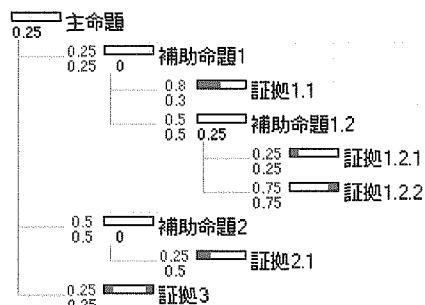


図 2.2.2-3 下位の補助命題あるいは証拠の上位命題の信頼性への寄与についての十分性及び重複性の入力例

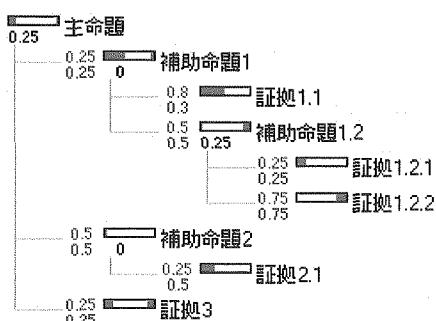


図 2.2.2-4 主命題の信頼性の評価例

図 2.2.2-4 における主観確率は、区間確率として定義される。区間確率理論は、古典的な確率論とは異なり、主観確率を区間推定として与えるために、その和が 1 となる必要はない。例えば、ある命題の真偽に関する主観確率を古典的な確率論と区間確率理論のそれぞれで定義した場合、例えば図 2.2.2-5 のような結果が得られることとなる。

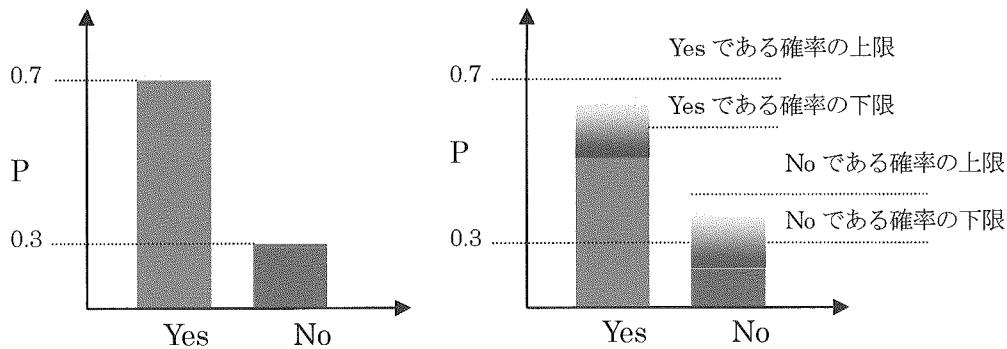


図 2.2.2-5 古典的な確率論（左）と区間確率理論（右）の比較

古典的な確率論では、支持（yes）と否定（no）の和が 1 でなくてはならないのに対して、区間確率では、「どちらとも言えない」という不確実な領域が残ることとなる（図 2.2.2-6 参照）。

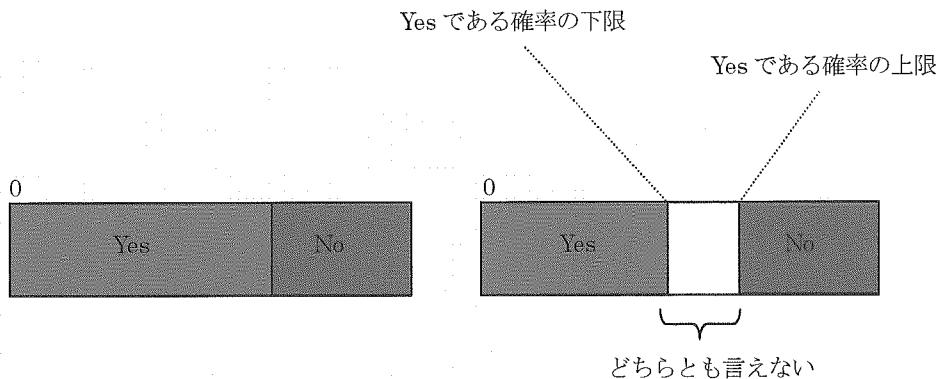


図 2.2.2-6 古典的な確率論（左）と区間確率理論（右）の比較（続き）

区間確率において、支持とも否定とも断定することのできない領域が残されることとは、ファジー理論におけるメンバーシップ関数や possibility 理論とも共通した性質であり、これは、人間の主観的判断に含まれる曖昧さを表現するための自由度であるとみなすことができる（Ross, et.al., 2002）。実際、検討の初期において関連する情報が少ない状況では、各補助命題に対して「どちらとも言えない」局面が多く、このような状況で敢えて支持あるいは否定に意見を振り分けることは恣意的な検討結果につながる可能性が否定できない。

上記の手順のうち、ii)～iv)における区間確率に対する演算の内容は以下の通りである。

簡単のため、上位の命題が二つの証拠（あるいは補助命題。以下の例では証拠として説明を進めるが、補助命題についても全く同じ演算規則が適用される）に対応付けられた状況を考え、証拠 1 が命題を支持する程度（主観確率）を $P(y_1)$ 、証拠 2 が支持する程度の主観確率を $P(y_2)$ とする。この時、上位の命題が真である確率 $P(Y)$ の下限は次式によって算出される。

$$P(Y) \geq P(Y|y_1)P(y_1) + P(Y|y_2)P(y_2) - P(Y|y_1 \cap y_2) \quad (2.2.2-1)$$

ここで、 $P(Y|y_1)$ 及び $P(Y|y_2)$ は、それぞれ証拠 1 及び 2 が上位命題を 100% 支持している場合に上位の命題が真であることの条件付き確率である。ESL では、この条件付確率をこれらの証拠の「上位命題が真であること」に対する十分性を示すものとみなす。実際、ある証拠が上位の命題に対して極めて直接的な関連を有している場合には、その証拠が支持している場合に実際に上位命題が真であることの確率は極めて高いものとなり、関連が間接的であったり曖昧であったりする場合にはその条件付確率は低いものと推定される。また、(2.2.2-1)式は、模式的にはベン図によって表現することができる（図 2.2.2-7 参照）。求める確率 $P(Y)$ は、同図に

おける 0 の面積で表されるが、その面積を見積もるために証拠 1 及び証拠 2 によって支持される領域を用いるということが ESL の図形的な理解である。この図からもわかる通り、互いにあまり重複しないような多くの証拠で $P(Y)$ を覆うことがその確信の程度を向上するためには求められることとなる。また、 $P(y_1)$ 及び $P(y_2)$ はそれぞれ①及び③の面積に対応しており、これに対して、条件付確率 $P(Y|y_1)$ 及び $P(Y|y_2)$ は、それぞれ、②の面積の①に対する割合及び④の面積の③に対する割合であり、従って、右辺の $P(Y|y_1)P(y_1) + P(Y|y_2)P(y_2)$ は、②と④の面積の和を示すものと言うことができる。この時、明らかに、②と④の面積の和は、⑤の面積を二重に足し合わせていることとなる。そこで、(2.2.2-1)式の右辺第三項にあるように $P(Y|y_1 \cap y_2)$ つまり⑤の面積を除すことが必要となる。

さて、右辺第三項である $P(Y|y_1 \cap y_2)$ は、二つの証拠が独立なものであっても存在し、その値は、積 $P(Y|y_1)P(y_1)P(Y|y_2)P(y_2)$ となり最小値をとる。他方、これは、二つの証拠が完全に従属の場合に最大となり、この場合には証拠 1 あるいは 2 のどちらか一方が他を包含することとなるため、 $\text{Min}[P(Y|y_1)P(y_1), P(Y|y_2)P(y_2)]$ となる。つまり、 $P(Y|y_1 \cap y_2)$ の大きさは二つの証拠の包含関係によって変動することとなり、以下の不等式が成立する。

$$P(Y|y_1)P(y_1)P(Y|y_2)P(y_2) \leq P(Y|y_1 \cap y_2) \leq \text{Min}[P(Y|y_1)P(y_1), P(Y|y_2)P(y_2)] \quad (2.2.2-2)$$

そこで、 $P(Y|y_1 \cap y_2)$ を次のように書き換えることとする。

$$\begin{aligned} P(Y|y_1 \cap y_2) &= \rho \text{Min}[P(Y|y_1)P(y_1), P(Y|y_2)P(y_2)] \\ \rho &\equiv \frac{P(Y|y_1 \cap y_2)}{\text{Min}[P(Y|y_1)P(y_1), P(Y|y_2)P(y_2)]} \end{aligned} \quad (2.2.2-3)$$

凡例

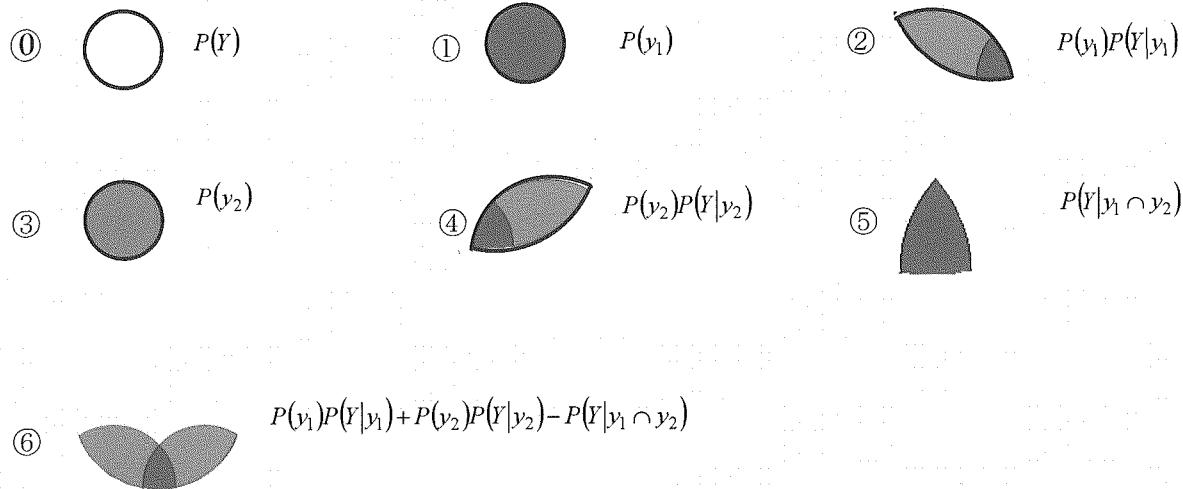


図 2.2.2-7 ESL 演算規則の図形的表現

すると、明らかに $\text{Max}[P(Y|y_1)P(y_1), P(Y|y_2)P(y_2)] \leq \rho \leq 1$ が成立するため、さらに、

$$\rho = \lambda_{12} + \text{Max}[P(Y|y_1)P(y_1), P(Y|y_2)P(y_2)][1 - \lambda_{12}] \quad (2.2.2-4)$$

と書き換えることができる。つまり λ_{12} は証拠 1 及び 2 の重複の程度をあらわすパラメータ（以下、重複性と呼ぶ）であり、完全に独立な場合に 0、完全に従属な場合に 1 をとる。

以上から、前出の式は次のように書き換えることができる。

$$\begin{aligned} P(Y) &= \mu_1 P(y_1) + \mu_2 P(y_2) \\ &\quad - \{\lambda_{12} + \text{Max}[\mu_1 P(y_1), \mu_2 P(y_2)][1 - \lambda_{12}]\} \text{Min}[\mu_1 P(y_1), \mu_2 P(y_2)] \end{aligned} \quad (2.2.2-5)$$

但し、 $\mu_i, i = 1, 2$ は証拠 i の上位の命題に対する十分性であり、 λ_{12} は二つの証拠の重複性を示す。

上式を、補助命題 i が真である確率の下限 $P(\underline{y}_i)$ 、及び上限 $P(\bar{y}_i)$ にそれぞれ適用することによって、上位命題が真であることの確率の上下限 $P(\underline{Y})$ 及び $P(\bar{Y})$ は以下のように算出される。

$$\begin{aligned} P(\underline{Y}) &= \mu_1 P(\underline{y}_1) + \mu_2 P(\underline{y}_2) \\ &\quad - \{\lambda_{12} + \text{Max}[\mu_1 P(\underline{y}_1), \mu_2 P(\underline{y}_2)][1 - \lambda_{12}]\} \text{Min}[\mu_1 P(\underline{y}_1), \mu_2 P(\underline{y}_2)] \\ P(\bar{Y}) &= 1 - \{\mu_1(1 - P(\bar{y}_1)) + \mu_2(1 - P(\bar{y}_2)) \\ &\quad - \{\lambda_{12} + \text{Max}[\mu_1(1 - P(\bar{y}_1)), \mu_2(1 - P(\bar{y}_2))][1 - \lambda_{12}]\} \text{Min}[\mu_1(1 - P(\bar{y}_1)), \mu_2(1 - P(\bar{y}_2))]\} \end{aligned} \quad (2.2.2-6)$$

なお、この式は補助命題が 3 つ以上存在する場合に対しても容易に拡張することができる。また、必要性は、証拠あるいは補助命題のうちのいくつかが、それが真でなければ上位命題が真ではない、つまり必要条件となっている場合の特例に対する措置である。この規則は、必要条件となっている証拠あるいは補助命題が真であることの確率の上下限が、算出された上位命題が真であることの上下限を下回る場合、必要条件となっている補助命題が真であることの確率の上下限によって置き換えることが必要となることを意味するものである。

ESL の解析を通じて算出される各命題（特に主命題）の信頼性は、図 2.2.2-8 に示す ratio plot として表現することができる。Ratio plot は、「支持」、「否定」及び「不確実」の主観確率の値に基づき、各命題についての評価結果を、（支持の確率） / （否定の確率）を縦軸（一般にログスケールが用いられる）の座標に、また、（不確実性の程度）を横軸の座標とした二次元座標上の点として表現したものである。Ratio plot において横軸よりも上の領域は各命題が対応する証拠によってどちらかといえば支持されていることを、また、逆に、横軸よりも下の領域は各命題が対応する証拠によってどちらかといえば否定されていることをそれぞれ表す。また、縦軸よりも右の領域は不確実性が存在していることを表し、左の領域は支持と否定の和が 1 を上回っており評価結果に自己矛盾が発生していることを表す。このような自己矛盾が生じている場合には、階層構造や諸パラメータの入力値を見直すことが必要である。

Ratio plot の右側の領域は 4 つの小領域に区分されている。例えば、濃い緑と薄い緑の領域の境界線は、（支持の確率） - （否定の確率） = （不確実性の程度）となる部分であり、濃い緑の領域では（支持の確率） - （否定の確率） > （不確実性の程度）が成立しており、この領域

に含まれる命題は不確実性と比較して顕著に証拠によって支持されているものと考えられる。他方、薄い緑の領域では（支持の確率） - （否定の確率） < (不確実性の程度) であり、どちらかといえば支持されているがその判断には大きな不確実性が含まれることを意味する。同様に、濃い赤及び薄い赤の領域についても、それぞれ、そこに含まれる命題は、「不確実性と比較して顕著に証拠によって否定されている」及び「どちらかといえば否定されているがその判断には大きな不確実性が含まれる」ものと考えられる。

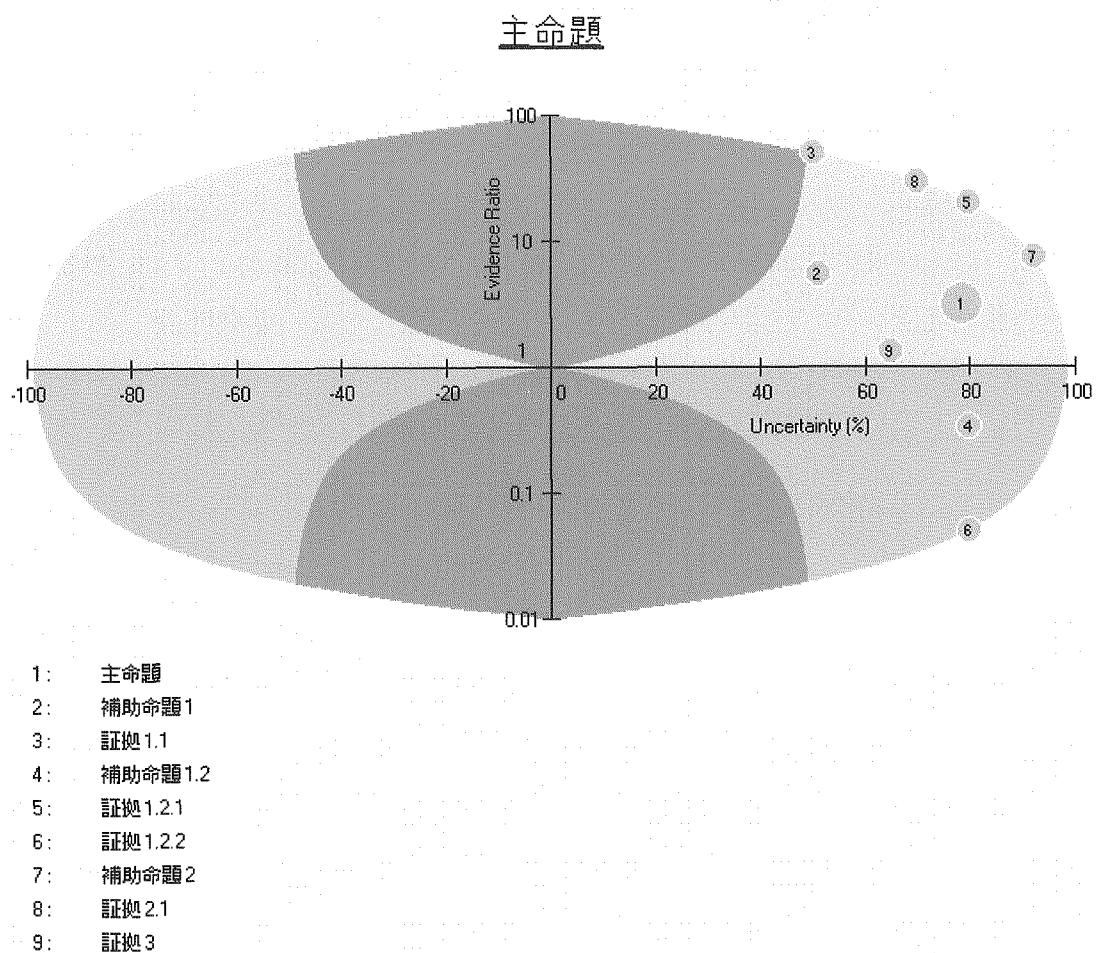


図 2.2.2-8 各命題の信頼性の ratio plot による表示例

2.2.3. 次段階の調査・研究計画立案の支援

安全評価は、地質環境調査の進展に伴い、反復的に実施すべきものであり、このような反復の各段階において安全評価結果に影響を及ぼすような地質環境モデルバリエーションの範囲を絞り込む（不確実性を低減する）ことが、安全評価の信頼性向上を図る上で極めて重要である。前述した ESL を用いて各モデルバリエーションの確からしさの評価を行う場合、それぞれの評価結果に含まれる不確実性の大きさは、主命題についての評価結果の区間確率に含まれる不確実性（図中の白い区間）として表現されることとなる。従って、前述したモデルバリエーションの絞込みとは、安全評価結果への感度と言う観点から重要なモデルバリエーションの中で、より確からしい選択肢についての ESL 評価結果に含まれる不確実性が多様な証拠による支持という形で解消され、他方、より確からしくない選択肢についての ESL 評価結果に含まれる不確実性が多様な証拠による否定という形で解消されることにより、安全評価がいずれの選択肢に立脚すべきかについての曖昧さが低減されることを意味する。

以上のような観点から、次段階における調査・研究計画立案の支援としては、現段階での不確実性をより効果的に低減することの可能な新たな証拠入手できる可能性のある調査・研究項目に優先順位を与えることが必要となる。この目的のためには、図 2.2.3-1 に例示する tornado plot を用いることができる。Tornado plot は、末端に位置する各証拠についての判断結果に含まれる不確実性（特に、未入手の証拠については 100% 不確実なものとみなされる）を単位量（例えば 1%）減らすことができたとすると、最上位の主命題の評価結果に含まれる不確実性がどの程度低減されるかを比として表したものである。

検討の初期段階では多くの証拠は未入手であり、ESL の評価結果もほとんど不確実性が支配するような場合が多い。しかしながら、そのような状況でも、十分性や必要性といった（未入手の）証拠の本来的な特徴が把握できれば Tornado plot による感度解析を行うことは可能であり、この結果に基づき、次段階の調査・研究計画の優先順位付けをすることができる。ここで注意すべき点は、Tornado plot は、各証拠の不確実性が低減できた場合の効果を評価するものであり、不確実性低減そのものの難易度や可能性については何ら考慮されていないことである。このため、調査・研究計画の優先順位付けを行うためには、Tornado plot によって表現される不確実性低減への感度（効果）と、各調査・研究項目の実施上の難易度や経費等を併せて考慮に含めることが重要となる。

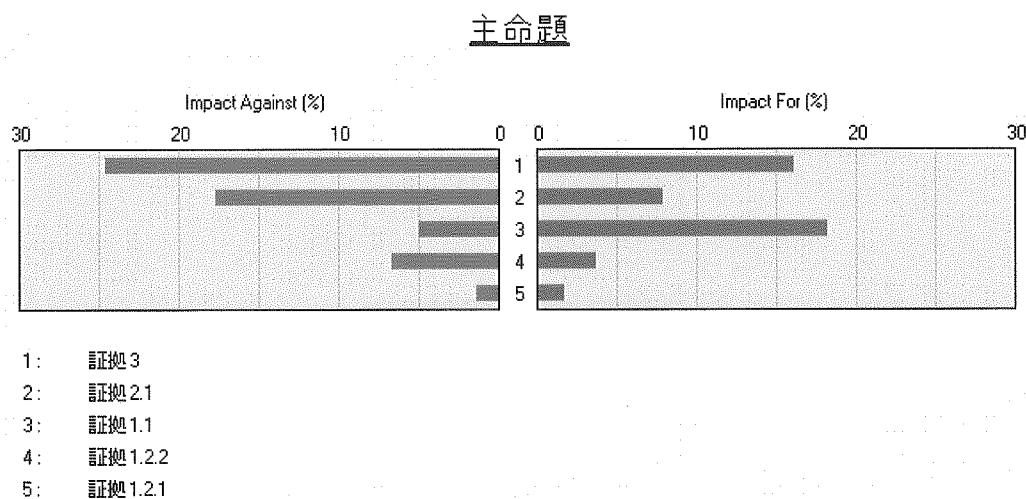
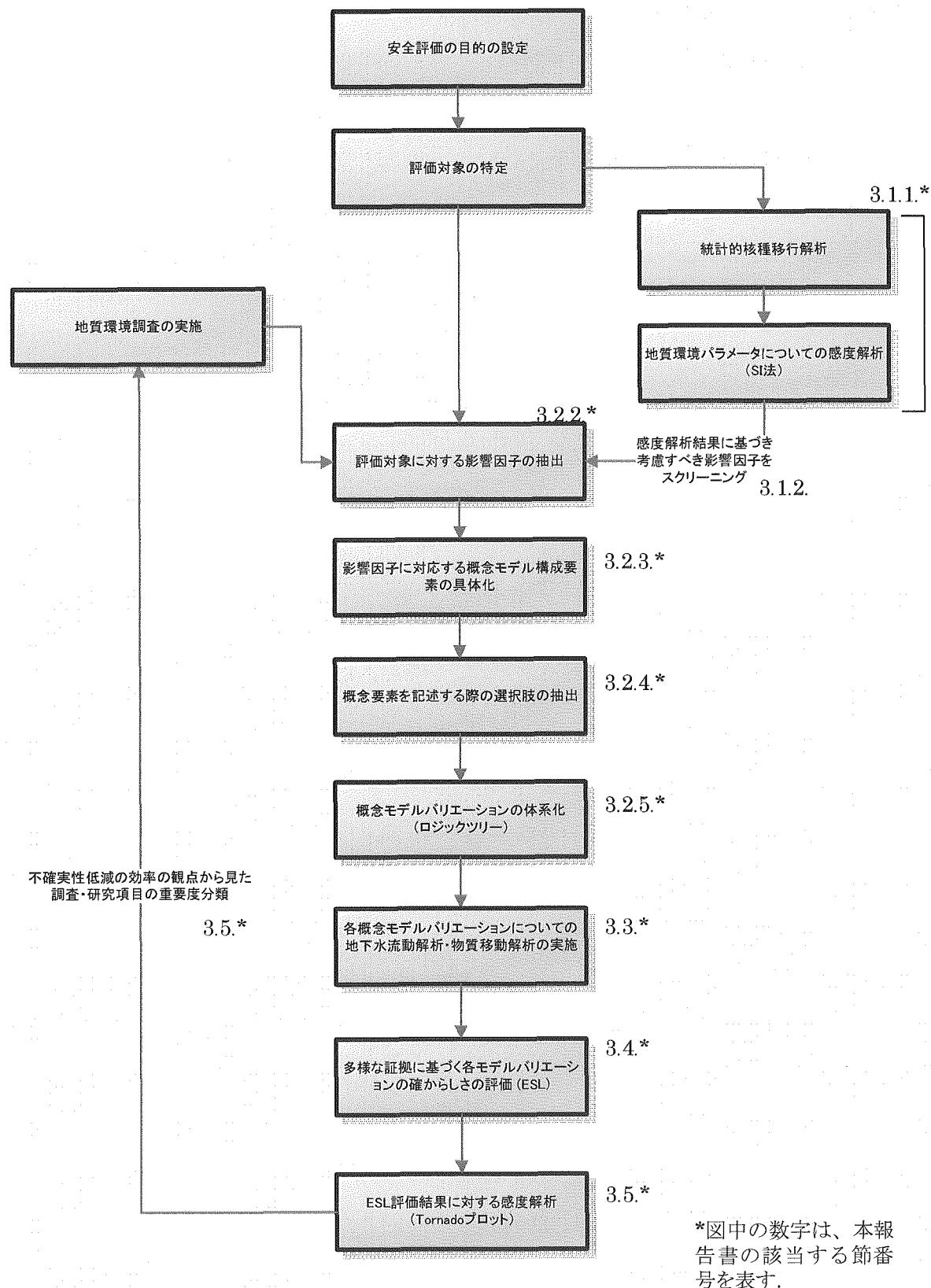


図 2.2.3-1 Tornado plot による感度解析結果の例

（主命題の支持の確率増大のためには証拠 3 と証拠 1.1 を、また、主命題の否定の確率増大のためには証拠 3 と証拠 2.1 を入手することが有効であることを示す）

以上をまとめた本研究で提案する不確実性を考慮した安全評価の手順は、図 2.2.3-2 に示すものとなる。提案した安全評価の一連の流れをより具体的に示すために実施した、幌延の地質環境を事例とした検討の概要を 3 章以降に述べる。



*図中の数字は、本報告書の該当する節番号を表す。

図 2.2.3-2 地質環境モデルに付随する不確実性を考慮した安全評価の手順

3. 幌延地域の地質環境を事例とした 堆積岩地域における不確実性を考慮した安全評価手法の具体例

3.1. 核種移行に関する感度構造の理解

3.1.1. 人工バリア仕様の変動幅及び地質環境条件の不確実性を考慮した統計的核種移行解析

(1) 解析モデル及び入力データの設定

地質環境中での核種移行の不確実性に加えて人工バリアの性能の不確実性を考慮した解析を行い、人工バリアに求められる性能の検討を行った。人工バリアと天然バリアの両方をモデル化した一次元核種移行解析コード OZONE (図 3.1.1-1) を用い、表 3.1.1-1 に示す人工バリアに関するパラメータの変動（主として第 2 次とりまとめで設定された変動幅）と天然バリアでの核種移行特性の変動（上記の地下水流动・核種移行解析の結果に基づく）の組み合わせ³⁾によるケースの解析を実施した。

人工バリアに関するパラメータは基本的に第 2 次とりまとめのリファレンスケースの値を用い、海水系地下水を含む範囲を与えた。緩衝材の厚さは 0~0.7m（厚さ 0.1m 以下は緩衝材がないものとみなす）とした。天然バリアに関するパラメータのうち、移行距離は、深度 250m からの解析では $L=250\sim500\text{m}$ 、深度 500m からの解析では $L=500\sim1,000\text{m}$ の範囲で与えた。なお、生物圏モデルとしては、第 2 次取りまとめ⁴⁾に示されている「深井戸／平野／農作業」での換算係数を用いた。

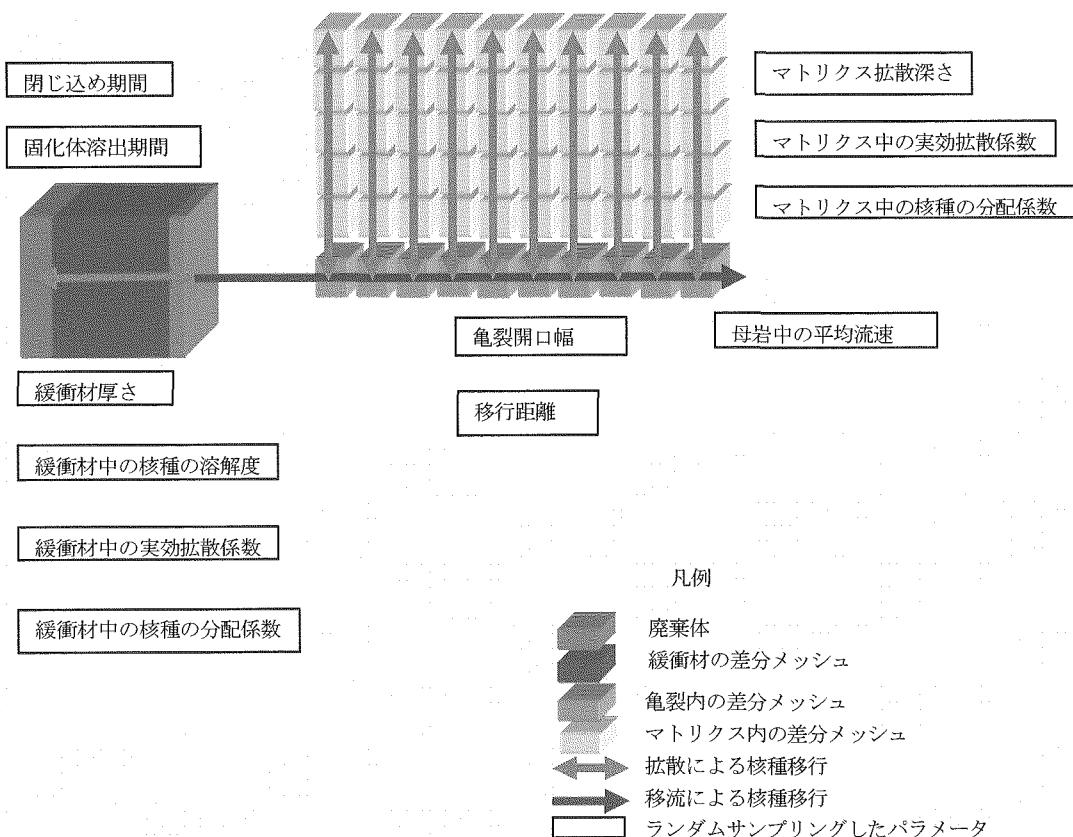


図 3.1.1-1 統計的解析に用いた核種移行解析モデルの概念図

表 3.1.1-1 人工バリアからの核種移行に関する統計的解析の条件

	パラメータ	分布	最小値	最大値	備考
人工 バリア のパ ラメ ータ	オーバーパック破損時刻[y]	対数均一 分布	100	10000	H12
	ガラス固化体溶出期間[y]	対数均一 分布	7000	700000	H12
	緩衝材の厚み[m]	均一分布	0.0	0.7	0.1m以下の場合は移流も考慮す る
	緩衝材中の Cs の実効拡散係数 [m ² /s]	対数均一 分布	3E-10	1E-9	H12 (海水系地下水を含む範囲)
	緩衝材中の Cs 以外の元素の実効拡散係数 [m ² /s]	対数均一 分布	3E-10	8E-10	H12 (海水系地下水を含む範囲)
	緩衝材中の Cs の分配係数 [m ³ /kg]	対数均一 分布	0.001	0.01	H12 (海水系地下水を含む範囲)
	緩衝材中の Np の溶解度 [mol/L]	対数均一 分布	3E-9	2E-8	H12 (海水系地下水を含む範囲)
	緩衝材中の U の溶解度 [mol/L]	対数均一 分布	2E-9	8E-9	H12 (海水系地下水を含む範囲)
	緩衝材中の Th の溶解度 [mol/L]	対数均一 分布	9E-8	5E-6	H12 (海水系地下水を含む範囲)
天然 バリア のパ ラメ ータ	核種移行距離[m]	均一分布	250 500	500 1000	深度・250m 深度・500m (JNC TJ5400 2003-006)
	母岩中の平均ダルシー流速[m/y]	対数均一 分布	1E-3 5E-5	2E-2 2E-3	深度・250m 深度・500m (JNC TJ5400 2003-006)
	マトリクス拡散深さ[m]	均一分布	0.1	1.0	H12
	亀裂開口幅[m]	対数均一 分布	1E-5	2E-4	H12 経験則と三乗則を含む範囲
	マトリクス中の実効拡散係数 [m ² /s]	対数均一 分布	1E-11	1E-10	H12 (海水系地下水を含む範囲)
	マトリクス中の Cs の分配係数 [m ³ /kg]	対数均一 分布	0.01	0.1	H12 (海水系地下水を含む範囲)

H12 : 第2次取りまとめ⁴⁾で用いられた値

(2) 統計的核種移行解析の結果

前項に述べたように、人工バリア仕様として想定される変動範囲と本研究で構築した地質環境モデルに含まれる不確実性を網羅して行った約4,000ケースの統計的な核種移行解析の結果を図3.1.1-2に示す。深度250m及び500mからのいずれの核種移行解析においても、最大線量当量率とその出現時刻の分布は、2つのクラスターに分割されており、これらはそれぞれCs-135及びNp-237系列（線量に対して最も寄与の大きい核種はTh-229）に対応するものとなっている。なお、ここでは、深井戸を通じて深部の地下水が大きく希釈されることなく採水され、灌漑等により人間に放射線学的影響を与えるという生物圏モデルを仮定している。

深度250mの場合には、ICRPの勧告Publication 81 (ICRP, 1999)における線量拘束値である $300\mu\text{Sv/y}$ を上回るケースの割合は70%程度に達したが、深度500mの場合にはこれは1.2%に過ぎず、深度を増すことによる天然バリア性能向上の効果は顕著と考えられる。仮に $10\mu\text{Sv/y}$ という極めて低い線量を目安とした場合にも、深度500mでは70%以上の解析ケースがこれを下回るものとなった。このような形で種々のパラメータが前項で述べた範囲を変動した場合の線量変化に対する感度を、前出のSI法により分析した。感度の高いパラメータについての感度曲線を図3.1.1-3～図3.1.1-8に示す。各パラメータを平均よりも好ましい方向に変動させた場合の上記指標の増大をまとめた結果が図3.1.1-9である。

最も感度が大きいと判断されたパラメータは母岩中の平均流速であり、これが前項に述べた範囲の下限付近となった場合、深度500mにおいて指標は約25%増大し、ほとんど全ての解析ケースが $10\mu\text{Sv/y}$ を下回ることとなった。また、これ以外に、マトリクス拡散深さや核種移行距離といった天然バリアの不確実性要因に対応するパラメータの変動が大きな感度を持っており、人工バリアに関連するパラメータの感度はこれらの陰に隠れる結果となっている。

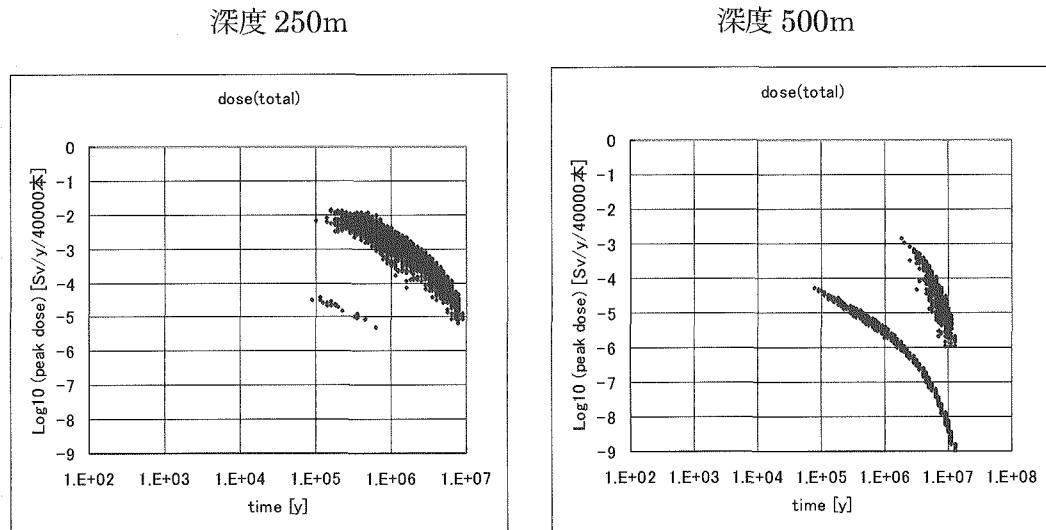


図3.1.1-2 最大線量当量率とその出現時刻（深井戸／平野／農作業）

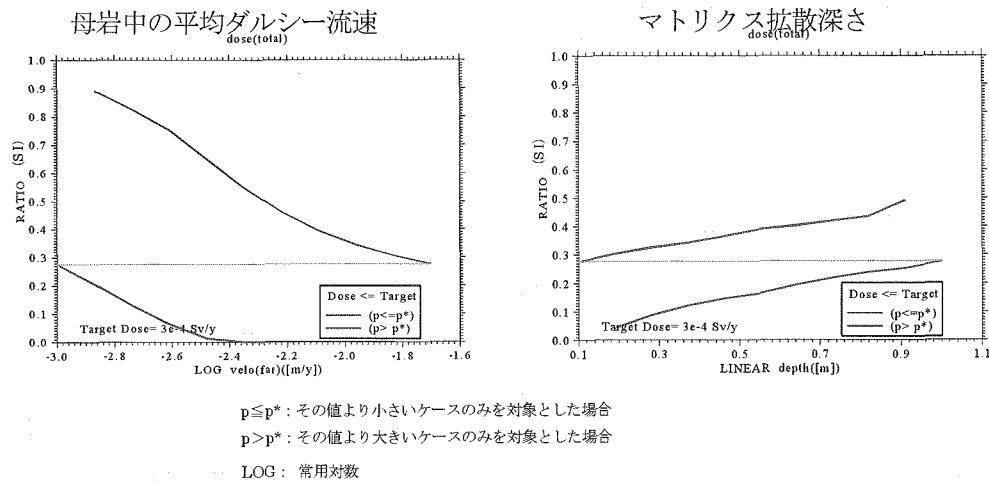


図 3.1.1-3 目標線量当量率を $300 \mu\text{Sv}/\text{y}$ とした場合の SI 法による感度曲線
(深度 250mからの核種移行解析) (1/3)

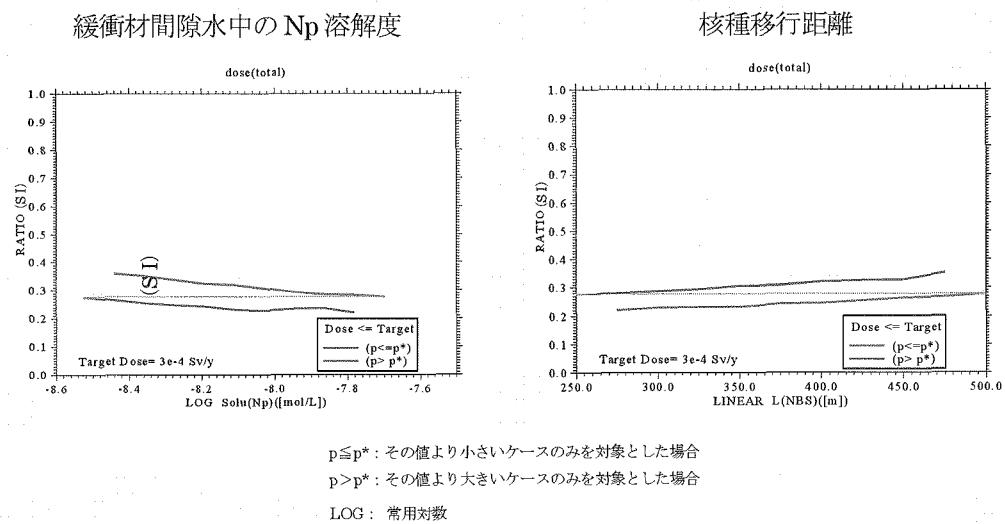


図 3.1.1-4 目標線量当量率を $300 \mu\text{Sv}/\text{y}$ とした場合の SI 法による感度曲線
(深度 250mからの核種移行解析) (2/3)

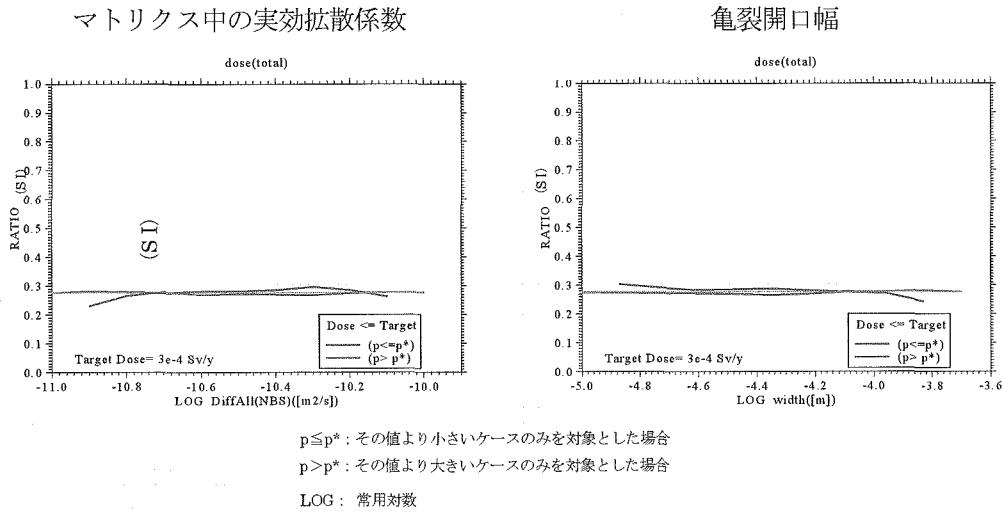


図 3.1.1-5 目標線量当量率を $300 \mu\text{Sv}/\text{y}$ とした場合の SI 法による感度曲線
(深度 250mからの核種移行解析) (3/3)

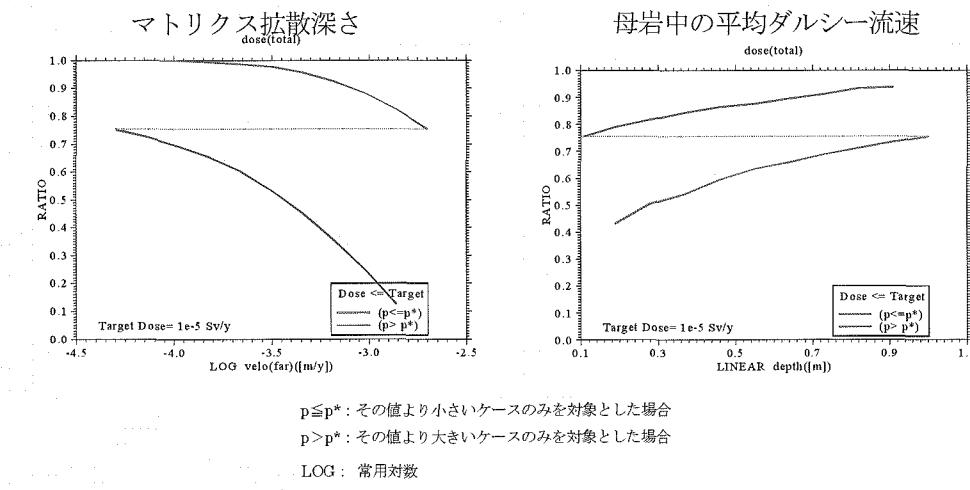


図 3.1.1-6 目標線量当量率を $10 \mu\text{Sv}/\text{y}$ とした場合の SI 法による感度曲線
(深度 500mからの核種移行解析) (1/3)

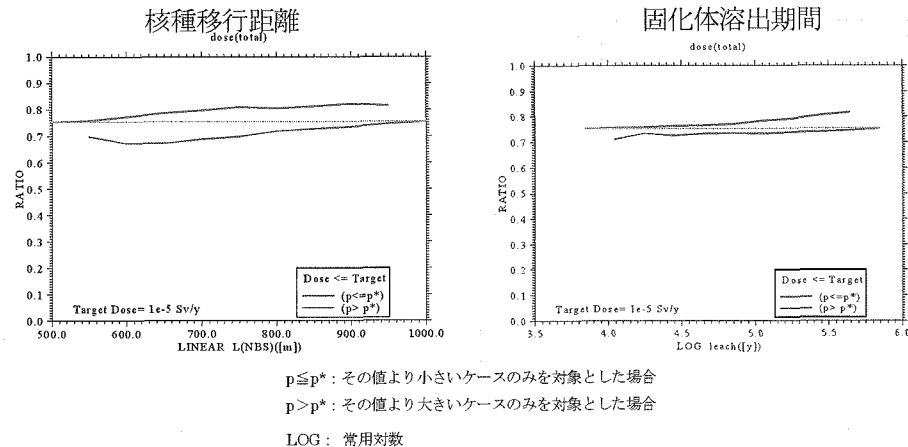


図 3.1.1-7 目標線量当量率を $10 \mu\text{Sv/y}$ とした場合の SI 法による感度曲線
(深度 500m からの核種移行解析) (2/3)

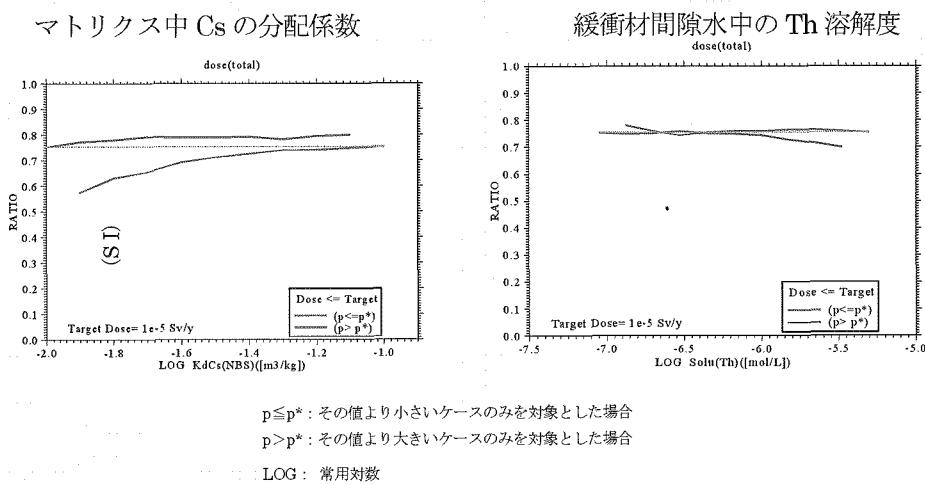


図 3.1.1-8 目標線量当量率を $10 \mu\text{Sv/y}$ とした場合の SI 法による感度曲線
(深度 500m からの核種移行解析) (3/3)

深度 500m の場合に、線量拘束値を上回るような例外的に大きな影響が生じた解析ケースは 42 個あり、これらが特異な傾向を示した原因を調べるために、カイ二乗検定を行った結果が図 3.1.1-10 である。最大線量当量率が $300 \mu\text{Sv/y}$ 以上となるケースは全体で 42 ケースあり、均一分布を仮定した場合に統計的に望ましい頻度 (≥ 5) が出現するように最大線量当量率のサンプリング範囲を等間隔に 8 区間に分割し、各区間にに入る頻度を調べて、自由度 7 のカイ二乗分布により検定した。自由度 7 のカイ二乗分布の 5 % 点は 14.07、1 % 点は 18.48 である。従って、「緩衝材中の Np の溶解度」、「核種移行距離」、「母岩中の平均ダルシ一流速」および「マトリクス拡散深さ」は、最大線量当量率が $300 \mu\text{Sv/y}$ 以上となる条件では、5 % の有意水準で帰無仮説を否定することが可能であり、つまり、これらが例外的な数値を探ることによって大きな被ばく線量が生じたと言うことができる。また、42 ケース全てが、「マトリクス拡散深さ」は約 0.35m 以下、「母岩中の平均ダルシ一流速」は約 $1\text{E}\cdot3\text{m/y}$ 以上であった。

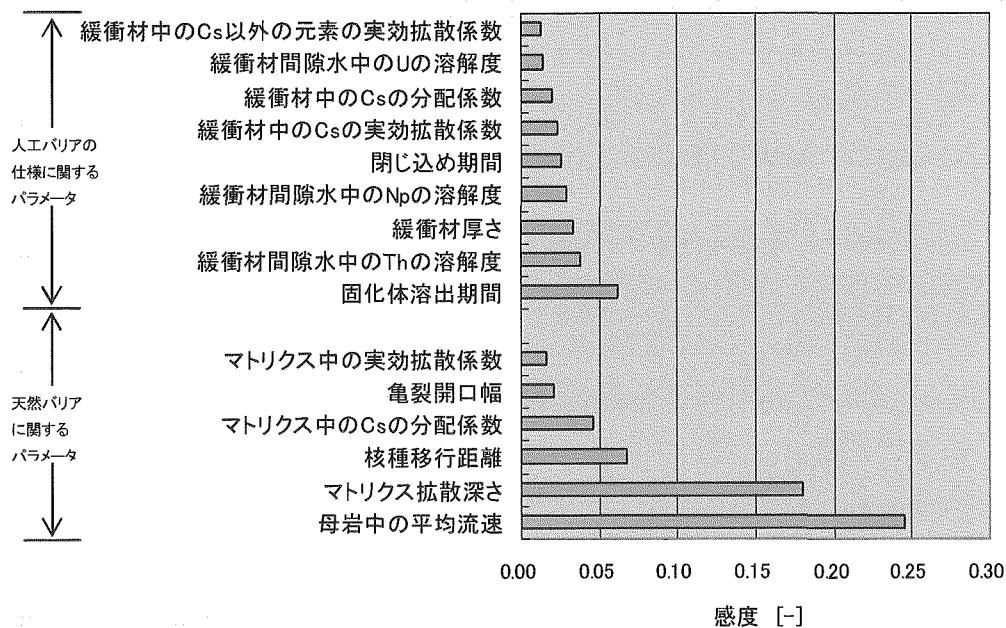


図 3.1.1-9 深度 500m のケースで最大線量当量率 $10 \mu\text{Sv}/\text{y}$ に対する各パラメータの感度
(各パラメータ変動範囲の上下限での SI 値の差)

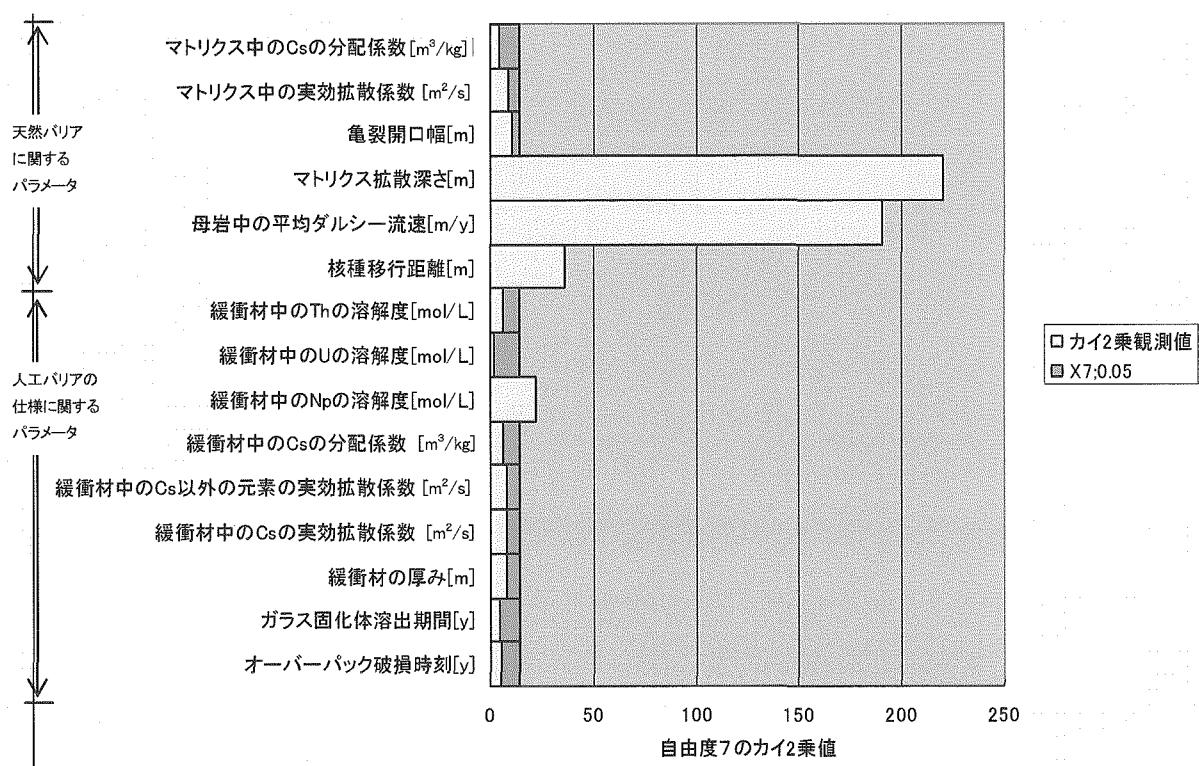


図 3.1.1-10 最大線量当量率が $300 \mu\text{Sv}/\text{y}$ 以上となるケースに関する各パラメータのカイ二乗検定結果

3.1.2. 人工バリアに求められる性能及び地質環境調査の課題の重要度

前項に述べた結果は、核種移行解析の観点からは、現状で考えられる範囲の人工バリア仕様及びこれと対応した性能の変動範囲において結果への感度は顕著ではなく、むしろ、現時点で残されている地質環境条件の不確実性を低減することの重要性が高いことを示唆している。しかしながらこの結果では、比較的低透水性の母岩の存在のために、緩衝材の性能が顕在化していないだけであり、このことのみから、緩衝材に関する検討の重要性が低いと判断することは不適切である。これは、緩衝材の性能には、止水性、拡散抵抗及び核種吸着という核種移行に関するもの以外にも、応力緩衝性やコロイドろ過性といった安全性能が求められているためである。ただし、本研究で対象とした地質環境条件の不確実性の範囲内においては、核種移行に関する人工バリア性能への要求が必ずしも最優先のものではないと考えることは可能であり、この場合には、応力緩衝性やコロイドろ過性という点においてベントナイト系材料に代わり得るより合理的な材料の検討等の有用性を指摘することができる。

他方、天然バリアに関連したパラメータの感度解析結果では、

- ・ 母岩中平均流速
- ・ マトリクス拡散深さ

が突出した感度を示しており、今回事例としてとりあげた幌延の地質環境でいえば、母岩中の平均流速に直接関係する

- ・ 稚内層の平均透水係数
- ・ 平均的な動水勾配

の重要性が特に高いものと考えられる。また、マトリクス拡散深さについては、顕著な感度が見られるものの、亀裂開口幅や亀裂頻度という亀裂形状の詳細情報は、母岩の平均的な透水係数が把握できるという前提の下では顕著な感度を有していない。しかしながら、母岩の平均透水係数を算定する手段として、亀裂の頻度や透水量係数分布に着目しこれらを積算することが必要であると判断される場合には、これらのパラメータは依然として高い重要性を持つものと考えられる。

3.2. 不確実性を考慮した地質環境モデルのバリエーションの構築

3.2.1. 評価目的及び評価対象

評価対象として幌延深地層研究計画で提示された研究所設置地区の稚内層中にある深部の低透水部における核種移行挙動を選択し、性能評価研究の一環として不均一場における地下水流动特性を考慮した核種移行挙動の予測評価手法を確立することを評価目的とする。具体的な評価指標としては、長寿命の核分裂生成物やアクチニド元素等の高レベル放射性廃棄物地層処分における長期安全確保の観点から重要な放射性核種の移行フラックスを例としてとりあげる。図 3.2.1-1 に対象領域を示す。

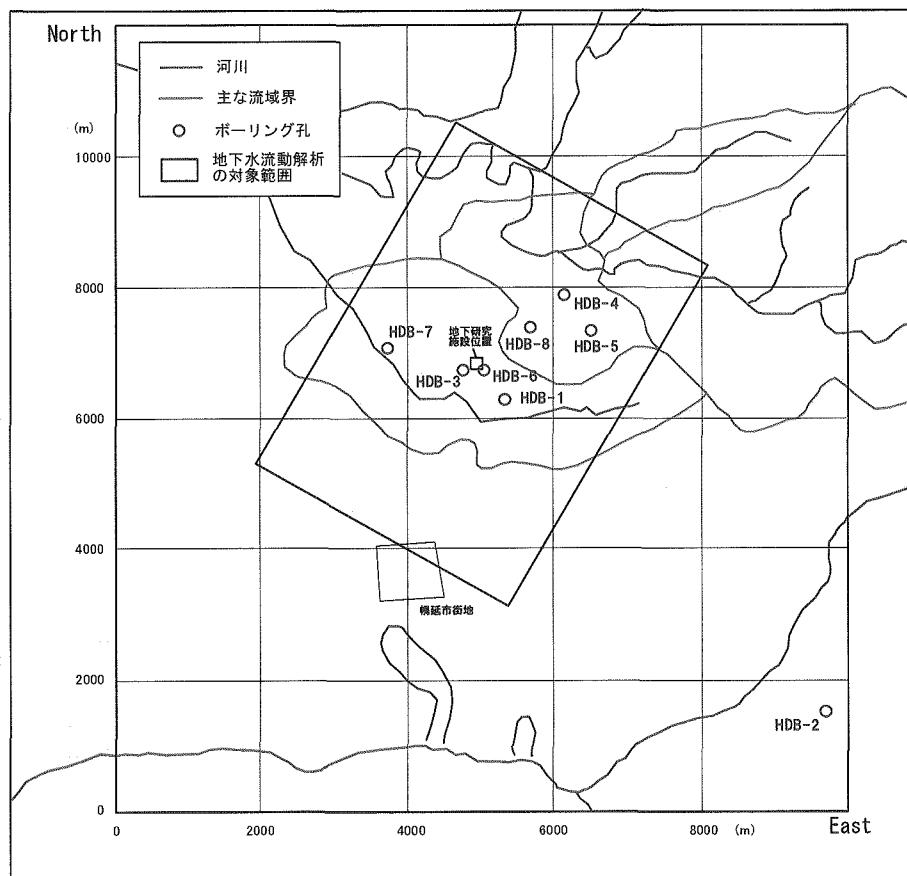


図 3.2.1-1 対象領域（平成 15 年度時点）

3.2.2. 評価対象に対する影響因子の抽出

評価対象とする現象に関する着目する指標についての評価を、目的に照らして十分な精度で行うためには、その現象に支配的な影響を及ぼす考慮すべき影響因子をトップダウン的に抽出することが必要である。ここでは、地下水流动及び核種移行に対する支配方程式の構成と、不均一場においては、大小様々な局所的な支配的移行経路（近傍の他の移行経路に比して顕著に大きな地下水流速の生ずる部分）が図 3.2.2-1 に例示するようなマルチスケールの階層構造を示すことが一般的であることを考慮して、影響因子の抽出及び因子間の相関関係の体系化を行った。結果を図 3.2.2-2, 図 3.2.2-3 にまとめる。

一般に地下水流动は、ある領域における平均的な動水勾配（あるいは各境界上での水頭の分布）と領域内の透水係数分布によって決定される。しかし、図 3.2.2-1 に例示するようなマルチスケールの階層構造を有する移行経路網の存在を前提とすれば、各位置における地下水流速は、その点の直近にどの程度のスケールの移行経路が分布しているかによって（例えば、大規模で高透水性の断層上の A 点と、周囲の高透水部から離れた B 点とでは）大きく異なる。また、例えば、B 点を通過した地下水は、その後、近傍の高透水性の経路に進入し、次に、より大き

なスケールの高透水性経路に進入する、というように徐々に大きなスケールのより高透水性の経路に乗り換ながら領域の境界に達することとなる。このため全体としての地下水の移行時間は、各スケールの支配的移行経路を通じて次のより高透水性の経路にいたるまでの時間の総和として与えられる。

他方、核種の移行は、一般に地下水の移行よりも遅延される。遅延に寄与する主な現象としては、割れ目内を移行する核種が流速の遅い（多くの場合は無視することのできる）マトリクス部へ移行し、さらに、そこで鉱物に吸着されることが考えられる。また、割れ目内に粘土等の充填鉱物が分布している場合には、これに対する吸着も付加的な遅延プロセスとして機能することとなる。これらのプロセスに対する影響因子は、マトリクス拡散に関して、マトリクス拡散係数（マトリクス内の流速が拡散に比して無視できない場合には、横方向分散）、割れ目表面からのマトリクス拡散の到達する範囲（マトリクス拡散深さ）、及びマトリクス拡散に有効な割れ目表面積の割合（チャンネリング等の割れ目内部での地下水流れの偏在）が挙げられる。そして、吸着に関しては、マトリクス及び割れ目内充填鉱物のそれぞれについての核種吸着性（一般的には kd 等）や密度及び空隙率が挙げられる。

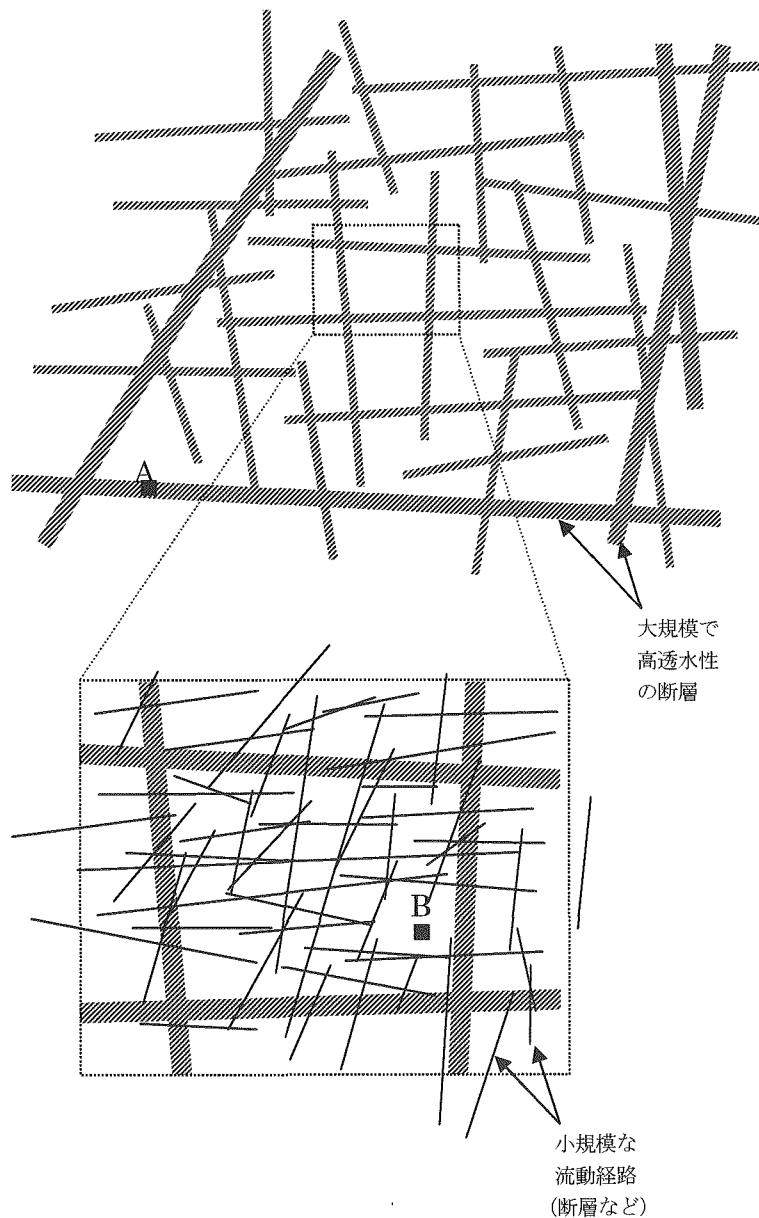


図 3.2.2-1 局所的な支配的移行経路のマルチスケールな階層構造の概念

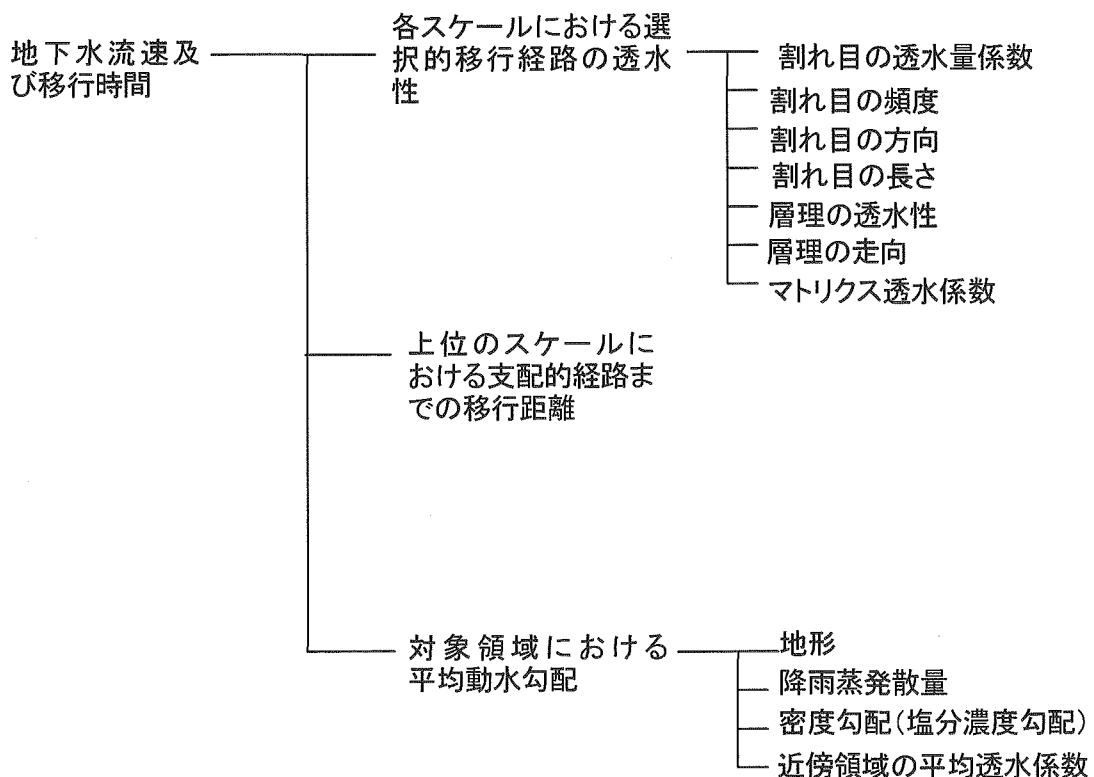


図 3.2.2-2 地下水流速及び地下水移行時間に対する主な影響因子

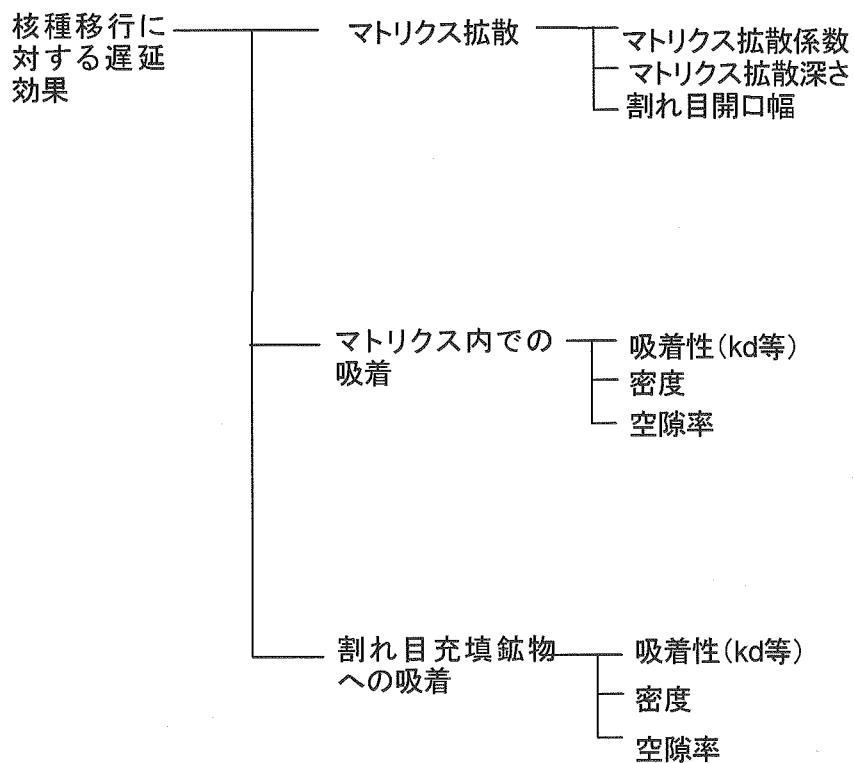


図 3.2.2-3 核種移行遅延効果に対する主な影響因子

3.2.3. 各影響因子に関する地質環境の差別化

次に、対象領域の地質環境を各影響因子に関して顕著な（説明可能な）差異を有する複数の要素に区分することにより、概念モデルの構成要素を抽出する。抽出された概念モデル構成要素を表 3.2.3-1 に示す。なお、同表中に記載した内容は、これまでに得られた知見に基づくものであるが、その確からしさの程度は個々に異なる。また、表中で空欄とした部分は、平成 16 年度時点で明確な知見が得られていないものと判断した。

表 3.2.3-1 各影響因子に着目した幌延地域における概念モデル構成要素の抽出

			割れ目頻度	割れ目方向	割れ目長さ	空隙率	透水性	拡散係数	吸着性
第四紀層			軟質であるため、割れ目の有無が 透水性に与える影響は小さい			$1e^{-9} \sim 1e^{-7}$ m/s 程度	高		
声問層							低		
稚内層	大きなスケール での区分	割れ目帯	高				高		
		健岩部	低				低		
	小さなスケール での区分	割れ目	タイプ1		層理に対し て高角		高		
			タイプ2		層理に対し て低角		低		
		マトリクス				大 (30%以上)	低	大 ($1e-12m^2/s$ 程度)	
断層							高または低		

3.2.4. 各構成要素に対するモデルオプションの抽出

ここでは、前節で抽出した各構成要素に対して、モデルオプションを具体化する。

(1) 第四紀層及び声問層に関するモデルオプション

第四紀層及び声問層の特徴は、割れ目に加えてマトリクス部を通過する流れが有意なものとなり得ることである。このような場での飽和定常地下水流动モデルとしては、

- 連続体モデル
- 割れ目とマトリクスから成る複合（ハイブリッド）モデル

が考えられ、それについて、

- 均一モデル
- 不均一モデル

が候補となる。ここで、これらの岩盤中の物質移行解析のために流动場を詳細に理解することを目的とするのであれば、不均一なハイブリッドモデルが適切と考えられる。しかし、本検討における第四紀層及び声問層での解析の目標は、深部に位置する稚内層における境界条件を

設定することであるため、平均的な透水性が等価な連続体として設定されれば良い。この意味からは、均一な連続体モデルを用いることで必要な結果が得られると考えられる。

(2) 稚内層に関するモデルオプション

(i) 流動場のモデル

稚内層は、大きなスケールでは割れ目帯と健岩部から、また、小さなスケールでは割れ目と低透水性のマトリクスから成るものであり、これまでに得られている知見に基づけば、地下水の流動は割れ目によって支配されるものと考えられる。また、稚内層は後述する物質移行解析の対象領域であることから、詳細な地下水流动場の理解が必要である。このため物質移行を考慮する際には等価な均質連続体モデルを用いることは不適切であると考えられる。候補となる流动場のモデルとしては、前出のハイブリッドモデルが基本となり、割れ目の取り扱い方の違いにより、

- ・亀裂ネットワークモデル
- ・亀裂階層構造モデル

が考えられる。ここでいう亀裂階層構造モデルは、大きなスケールにおける特徴である割れ目帯の分布に加えて、割れ目帯及び健岩部のそれぞれにおいて異なる頻度で含まれる個別の割れ目を同時に考慮したモデルを指す。

既存のボーリング孔データ（図 3.2.4-1）における高透水性を示すタイプ1割れ目の平均頻度（0.58 本/m）と研究所設置領域の広がり（4 km × 6 km × 1.2 km）を考えれば、透水性割れ目の数は膨大になり、亀裂ネットワークモデルで取り扱うことは計算負荷の観点から困難であるため、以下の検討では、

- ・大きなスケールの地下水流动解析においては割れ目帯及び健岩部をそれぞれ等価な透水性を有する連続体として表現した連続体モデル
- ・核種移行解析を実施する小領域（100m 立方程度）においては亀裂階層構造モデル

を用いることとする。

(ii) 個別割れ目

透水性割れ目

ボーリング孔における割れ目方向性の分類と各系統の割れ目本数と水理試験結果との相関分析から、タイプ1に区分されたせん断性のものが透水性に最も寄与しているものと考えられる。これに対して、タイプ2の割れ目は、層理面と平行したものであり、連続性が乏しいことから、透水性に顕著に寄与するものとは考えられていない。したがって、以降の検討ではタイプ1の割れ目のみに着目している。

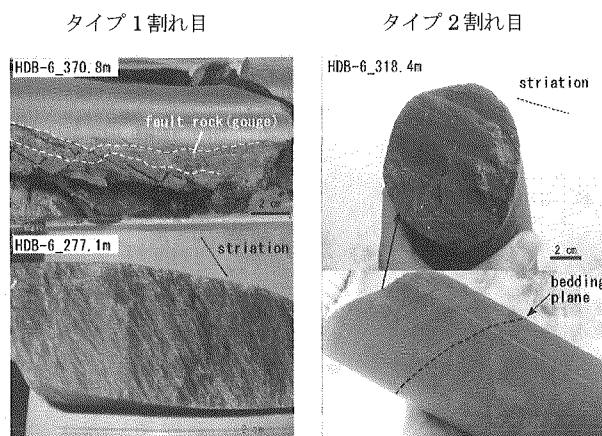


図 3.2.4-1 タイプ1及びタイプ2割れ目の比較⁵⁾

割れ目の方向分布

割れ目方向の分布に関しては、正規分布の単位球面への射影に対応する Fisher 分布あるいは Bingham 分布が用いられる場合が多い⁶⁾。しかしながら、標本数の限られている状況では、分布の両端に相当する低確率のテールに関してこの分布系の妥当性を保証することが困難である。そこで、このような場合には、実際に観察された割れ目の走向と傾斜を繰り返しランダムにサンプリングする Boot strapping モデルが用いられることがある。

- Fisher 分布
- Bingham 分布
- Boot strapping モデル

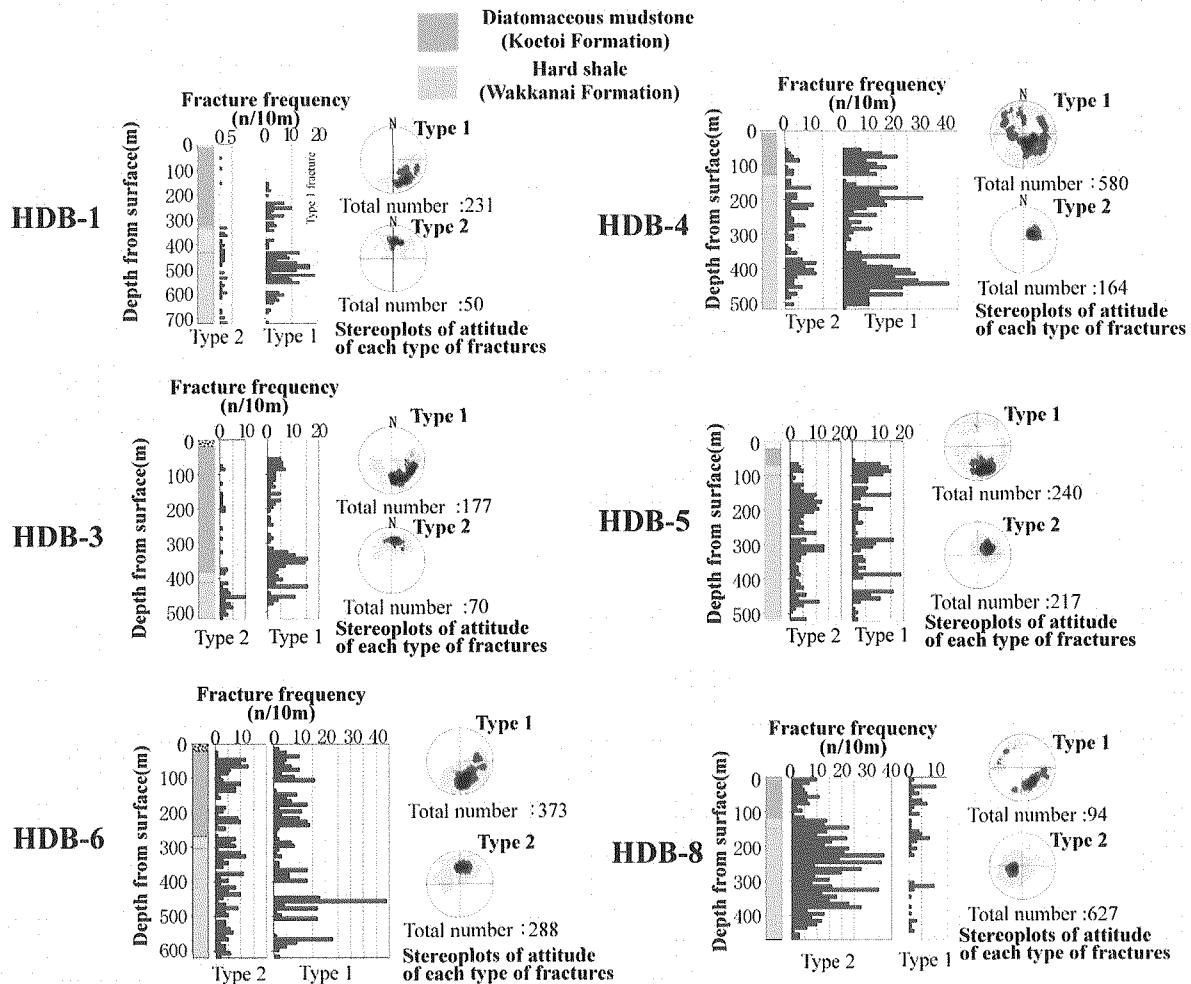


図 3.2.4-2 各ボーリング孔におけるタイプ1及びタイプ2割れ目の頻度と方向の分布⁵⁾

割れ目の形状

割れ目の3次元的形状についての情報は極めて限られており、単純化された面要素として取り扱われることが多い。候補となる面要素の例としては、

- 円板
- 長方形

が挙げられる。

割れ目の長さ分布

割れ目の長さについては、一定のスケール（例えば、露頭あるいは坑壁面）での観察結果は

対数正規分布として整理され、また、複数のスケールでの観察データを集積した結果は、べき乗型の累積確率分布（フラクタルモデル）として整理されることが多い⁴⁾。そこで、これらがモデルの候補として考えられる。

- ・ フラクタルモデル
- ・ 対数正規分布

割れ目の透水量係数分布

割れ目の透水量係数分布としては、ほぼ例外なく対数正規分布が用いられており、既存の試錐調査データもこれを否定する材料はないことから、対数正規分布のみを候補として考えることする。

連続体として表現する際の透水係数深度依存性

既往の透水試験結果を図 3.2.4-3 にまとめる。ただし、図中の両対数回帰曲線は、割れ目帶の割れ目頻度を考慮せず、透水試験結果である透水係数と深度の対数を最小 2 乗法でフィッティングした結果である。

ここで、稚内層の割れ目帶以外の部分（健岩部）については、データ数が限られており、かつ、それらが深度 400m 近傍に集中しているため、深度依存性や割れ目の影響が必ずしも明確ではない。そこで、健岩部は割れ目帶と同様の深度依存性を考慮するモデルと深度依存性を考慮せず深度 400m における透水係数測定値を他の深度においても固定する一様モデルの 2つを想定することにより不確実性の影響を把握することを目指す。なお、健岩部についての深度 400m 近傍での透水係数測定結果が $1E\cdot9$ [m/s] を中心に上下 1 衍程度ばらついていることから、深度依存性を考慮する場合は、後述する割れ目帶の透水性を与える回帰式で右辺第 1 項の定数項を深度 400m で $1E\cdot9$ [m/s]、 $1E\cdot8$ [m/s]、 $1E\cdot10$ [m/s] となるように変えた 3 ケースを考慮し、深度依存性なしの場合には一様に $1E\cdot9$ [m/s]、 $1E\cdot8$ [m/s]、 $1E\cdot10$ [m/s] と仮定した 3 ケースをそれぞれ想定するものとする。

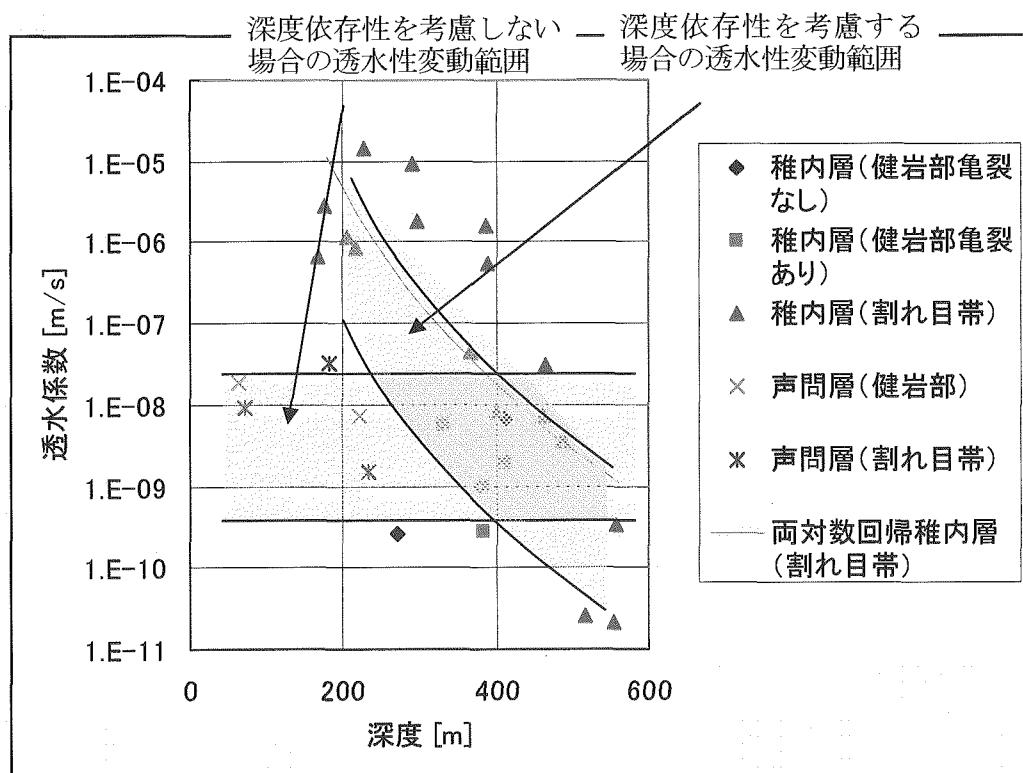


図 3.2.4-3 既往の透水試験結果のまとめ (HDB-1, 3, 4, 5, 6, 8 孔)

(iii) 割れ目帯

割れ目帯の有無

ボーリング孔の透水性割れ目（タイプ1）頻度分布は密集部と疎な部分の存在を示しており（図3.2.4-2参照）、割れ目帯は存在するというオプションのみを考えることとする。

割れ目帯の方向分布

割れ目帯全体としての方向についての情報は限られているが、割れ目の形成過程を考えれば、個別割れ目と整合的であることを仮定したオプションの蓋然性が高いと考えられる。

割れ目帯の形状

割れ目帯の形状についても個別割れ目と同様に情報が限られており、また、これに加えて、割れ目帯の幅という新たな不確実性要因が含まれる。そこで、現状の知見に基づけば、

- 厚さ一定の円板
- 厚さ一定の長方形

という二つのオプションが挙げられる。なお、厚さは個々のボーリング孔で見られる割れ目帯の幅の情報（図3.3.1-2）に基づき(3)に述べる方法で推定する。

割れ目帯の長さ分布

割れ目帯の長さについてはこれを評価できる直接的なデータがないため、幅と長さの相関式に基づき推定することとする（3)参照)。

割れ目帯の透水量係数分布及び深度依存性

割れ目帯の透水量係数は、そこに含まれる透水性割れ目本数に依存することが想定される。これを表現できるモデルの具体例として、

- 相関モデル：割れ目帯に含まれるタイプ1の割れ目本数と深度及び透水量係数の相関回帰式に基づくモデル
- ブーツストラッピングモデル：既知の割れ目帯の透水量係数を繰り返しランダムにサンプリングするモデル

という二つのオプションが考えられる。

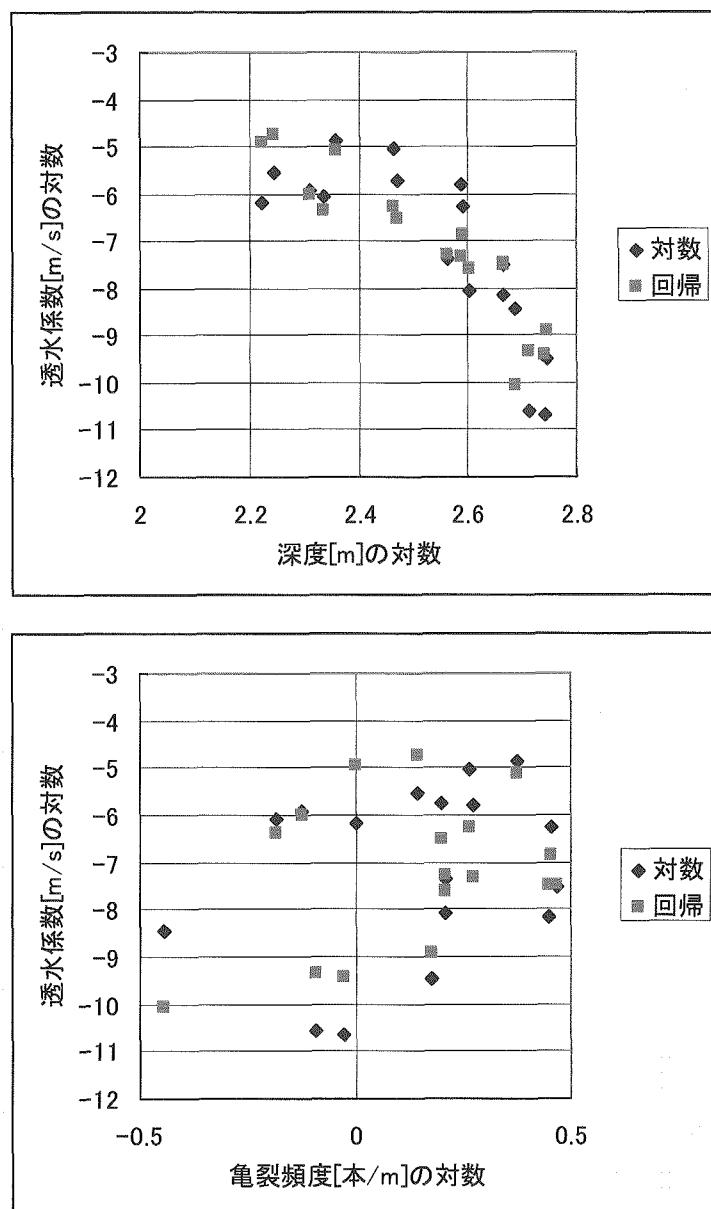
一方、図3.2.4-3に示した稚内層の割れ目帯に関する透水試験結果には明確な深度依存性も見られる。これらを考慮し深度及び亀裂頻度と透水係数に対して両対数での線形回帰を行った結果、以下の回帰式を得た。

$$\log_{10} K = 13.935 - 8.487 \log_{10} D + 2.620 \log_{10} n, \text{ただし } 10^{-11} \leq K \leq 10^{-5}$$

ここで、 K は稚内層の割れ目帯の透水係数[m/s]、 D は深度[m]、 n は割れ目頻度[本/m]である。

上記の回帰式による各割れ目帯の透水係数推定値と実測値を比較したものが図3.2.4-4である。図中の濃い青印は、試験結果である透水係数の対数を表し、赤印は、回帰モデルの結果である。上図は、深度を横軸として比較した結果であり、下図は亀裂頻度を横軸として比較した結果である。割れ目頻度を基軸とした場合の透水係数の実測値及び推定値はいずれもばらつきが大きく、影響因子として深度のほうが相対的な重要性が高いことを示唆するものと考えられる。

なお、ブーツストラッピングモデルにおいても、上記の回帰式中の深度依存性を仮定し、ボーリング孔と割れ目帯の交差部における水理試験結果を用いて試験区間より上部と下部の透水性を深度の関数として推定するものとする。



$$\text{回帰式: } \log_{10} K = 13.935 - 8.487 \log_{10} D + 2.620 \log_{10} n, \text{ ただし } 10^{-11} \leq K \leq 10^{-5}$$

図 3.2.4-4 割れ目帶透水係数に対する回帰式と実測値の比較

(iv) 核種移行モデル

移行モデル

既往のトレーサ試験の結果、核種移行のメカニズムとして割れ目内の移流及びマトリクス内の拡散が支配的であることが示されていることから、二重空隙媒体モデルのみを想定する。

マトリクス拡散深さ

稚内層は、空隙率の大きい堆積岩であり、空隙率数%未満の花崗岩のように、割れ目表面からマトリクス拡散の及ぶ範囲（マトリクス拡散深さ）に上限があると想定することの蓋然性は必ずしも高くない。そこで、ここでは、第2次取りまとめにおける結晶質岩を想定したリファレンスケースと同様に有限のマトリクス拡散深さを想定するオプションと、割れ目間に存在するマトリクスの全体が拡散に寄与することを仮定したモデルオプションの両者を想定するこ

ととする。

吸着モデル

性能評価上考慮すべき長期の時間スケールにおける核種の吸着は、主としてマトリクスにおいて生じるものと考えられる。また、マトリクス中の移動メカニズムが上述したように拡散支配であることから、吸着は瞬時局所平衡を達成するものと仮定することが妥当である。なお、吸着平衡の取り扱いについては、通常の線形モデル (Henry 則) に加えて、吸着サイトの有限性を考慮した Langmuir 型等の非線形モデルをオプションとして考慮するものとする。

(3) 大曲断層に関するモデルオプション

断層の数

大曲断層は、単一のせん断面のみから成るものではなく、付随あるいは派生する断層を伴う可能性がある。ただし、これらについては、位置及び形状についての情報が現状では限られているため、ここでは、大曲断層は単一の断層・破碎帯であると仮定する。

幅及び長さ

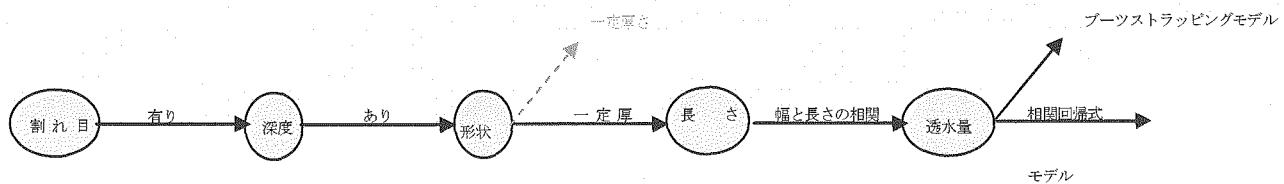
大曲断層の長さについては、研究所設置地区に対して十分に長いというオプションのみを想定することとする。また、幅についても情報が得られていないため、ここでは、後述する解析モデルの空間的離散化において单一のメッシュ内に含まれる程度のものであることを想定する。

透水性

大曲断層の透水性についても情報は得られていないことから、ここでは、透水性の場合と遮水性の場合の二通りを想定するものとする。

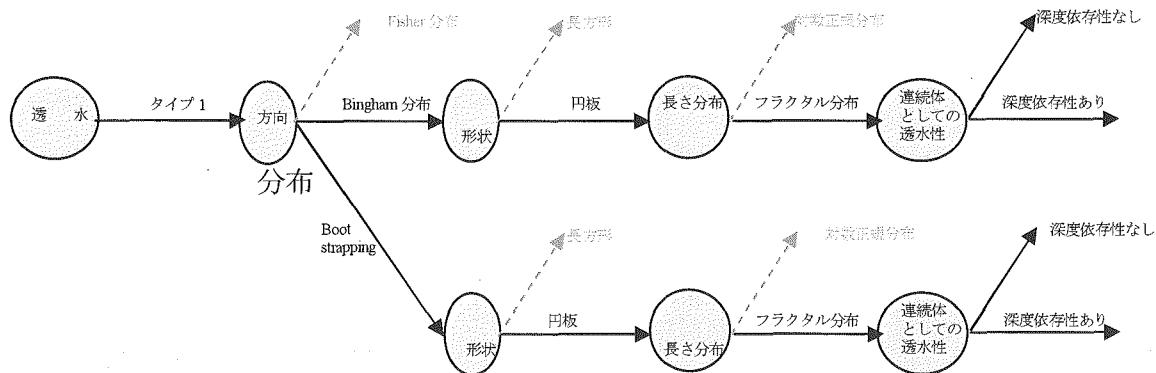
3.2.5. 概念モデルオプション派生機構の体系化

個別の概念モデル構成要素についてのオプションを組み合わせることにより、全体としての概念モデルが構築される。稚内層の個別割れ目及び割れ目帯についての水理地質モデルオプションの組み合わせをそれぞれ図 3.2.5-1 及び図 3.2.5-2 にまとめる。また、稚内層の個別割れ目及び割れ目帯についての共通の核種移行についてのモデルオプションを図 3.2.5-3 に、大曲断層についてのモデルオプションを図 3.2.5-4 示す。ここで、各項目についてのオプションは組み合わせることが可能であり（ただし、割れ目帯なしのオプションについては下流側の項目は関係しない）、割れ目帯について 8 通り、個別割れ目について 24 通りの水理地質概念モデルが派生し、核種移行に関しては 4 通りのモデルオプションが派生することとなるが、これまで述べた既存の地質環境に関する知見から最も信頼度が高いと思われる 1 つの組み合わせを中心として表示した。



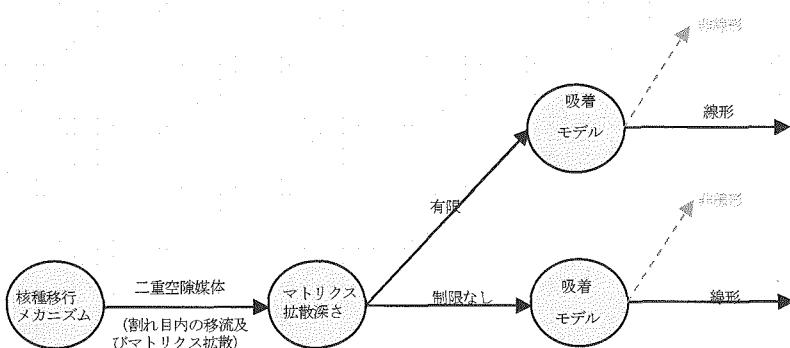
破線矢印の部分はオプションとしての可能性を必ずしも否定できないが、今回の解析では対象としていないものを示す。

図 3.2.5-1 稚内層中の割れ目帯に関する概念モデルオプションの派生



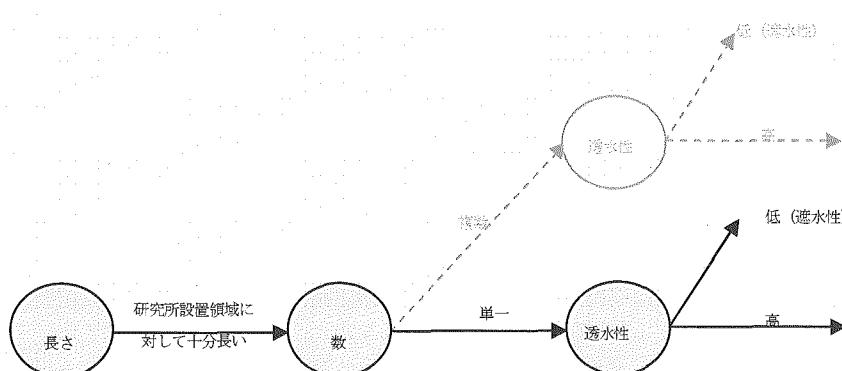
破線矢印の部分はオプションとしての可能性を必ずしも否定できないが、今回の解析では対象としていないものを示す。

図 3.2.5-2 稚内層中の個別割れ目に関する概念モデルオプションの派生



破線矢印の部分はオプションとしての可能性を必ずしも否定できないが、今回の解析では対象としていないものを示す。

図 3.2.5-3 稚内層中の核種移行に関する概念モデルオプションの派生



破線矢印の部分はオプションとしての可能性を必ずしも否定できないが、今回の解析では対象としていないものを示す。

図 3.2.5-4 大曲断層に関する概念モデルオプションの派生

3.3. 安全評価モデルの構築及び解析の実施

3.3.1. 地下水流動解析モデルの構築

(1) 解析ケースの設定

前節までに述べた、概念モデルを構成する各要素についてのオプションの組み合わせのうち、これまでに入手されている情報に基づき定量的な解析モデルを構築可能と考えられる代表的な例について不均質透水係数場のモデルを作成した。作成したモデルの一覧を表 3.3.1-1 にまとめる。3.2.4 で述べたように、更別層、勇知層及び声問層の透水性はいずれのケースでも一定とし、昨年度の研究と同一の透水係数値を設定した。また、大曲断層についても、昨年度と同様、透水性の場合には $1E-6 \text{ m/s}$ とし遮水性の場合には $1E-11 \text{ m/s}$ と仮定した。

なお、割れ目帯については、後述する Conditioned Boolean Simulation の手法によって統計的に作成することとした。割れ目帯の透水係数は、前項までに述べた水理試験結果に基づく透水係数と深度及び割れ目頻度の間の相関回帰式を用いる場合と、既存のボーリング孔と交差する割れ目帯の透水性を繰り返しランダムにサンプリングするブーツストラッピングの手法とを用いることとした。

表 3.3.1-1 作成した解析モデルの一覧

モデル		稚内層健岩部		割れ目帯		大曲断層	
		深度 400m における 透水係数 (m/s)	透水係数 深度依存性	透水係数の設定方法	リアライゼーション数	個数	透水係数 (m/s)
1	A	1E-9	あり	ブーツストラッピング	各 1	1	1E-6
	B			相関回帰式			(透水性)
2	A	1E-8	あり	ブーツストラッピング	各 1	1	1E-6
	B			相関回帰式			(透水性)
3	A	1E-10	あり	ブーツストラッピング	各 1	1	1E-6
	B			相関回帰式			(透水性)
4	A	1E-9	なし	ブーツストラッピング	各 1	1	1E-6
	B			相関回帰式			(透水性)
5	A	1E-8	なし	ブーツストラッピング	各 1	1	1E-6
	B			相関回帰式			(透水性)
6	A	1E-10	なし	ブーツストラッピング	各 1	1	1E-6
	B			相関回帰式			(透水性)
7	A	1E-9	あり	ブーツストラッピング	各 1	1	1E-11
	B			相関回帰式			(遮水性)

各ケース共通の条件

	更別層	勇知層	声問層
透水係数 (m/s)	1 E-6	1 E-9	1 E-8

表 3.3.1-2 透水係数深度依存性

	透水係数 ($\log_{10}K$)	コメント
割れ目帯	$13.935 - 8.487 \cdot \log_{10}D$ $+ 2.62 \cdot \log_{10}N$	D:深度[m] N:平均亀裂頻度[本/m]
稚内層 (健岩部)	$A - 8.487 \cdot \log_{10}D$ $+ 2.62 \cdot \log_{10}N$	深度依存性ありのケースでは、左式の A は -9, -8, -10 の 3通りで設定 D:深度[m] N:平均亀裂頻度 0.188[本/m]で固定 深度依存性がない場合は健岩部の透水係数は 1E-8, 1E-9, 1E-10 m/s で固定

(2) 割れ目帯以外の水理地質構造

割れ目帯以外の水理地質構造として、更別層、声問層、稚内層及び勇知層間の層境界と大曲断層の位置については、平成 15 年度の研究⁸⁾で作成した 3 次元地質構造モデルを踏襲することとした（図 3.3.1-1 参照）。

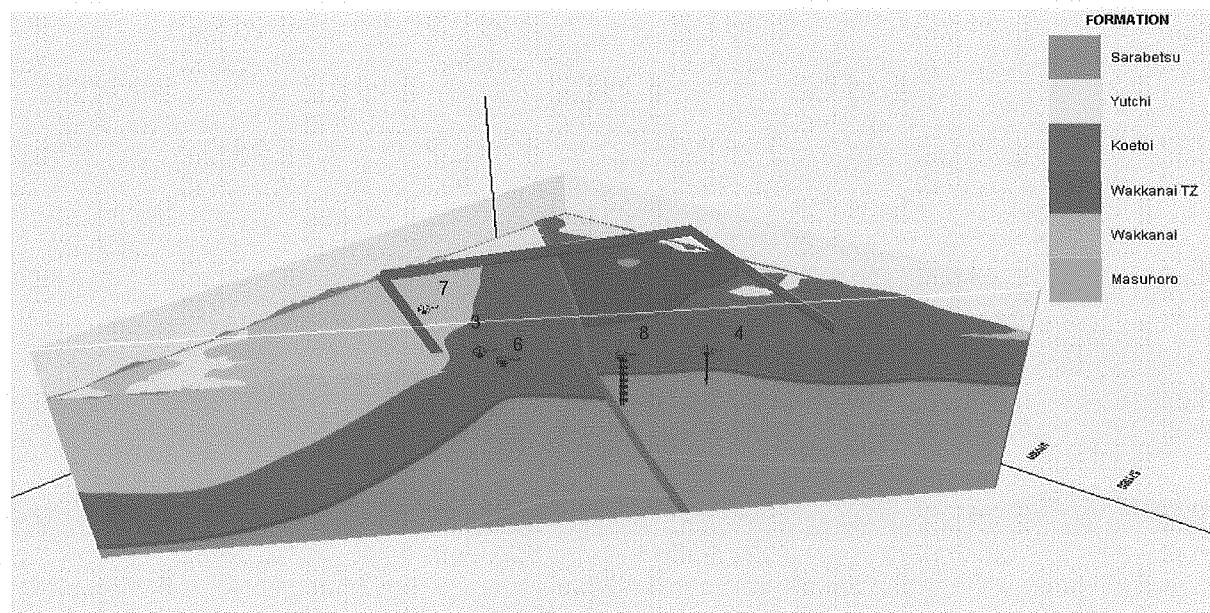


図 3.3.1-1 割れ目帯以外の水理地質構造の 3 次元モデル

(3) CBSによる3次元割れ目帯分布の再現

研究所周辺における割れ目帯の3次元分布を推定するために、HDB-1~8孔における既知の割れ目帯の位置、幅、及び向きの情報を用いて、ボーリング孔以外の部分を含めた割れ目帯の3次元分布を前処理付きBool型シミュレーション(Conditioned Boolean Simulation; CBS)を用いた解析により構築した。

(i) CBS

CBSは、空間内を2つの領域（オブジェクトとバックグラウンド）に分離するシミュレーション手法である。今回のケースでは、オブジェクトを割れ目帯に、バックグラウンドを健岩部に対応させる。

まず、オブジェクトとバックグラウンドのいずれかに属するかが分かっている点を代表点として与える。今回は、HDB-1~8孔における割れ目帯の位置が分かっていることから、HDB-1~8孔の各点が割れ目帯に属するか否かを判断して、それらすべてを代表点とする。

CBSでは、多数のオブジェクトをランダムに発生し、重ねあわせることで、空間全体のオブジェクトの分布をシミュレーションする。このとき、代表点がオブジェクトないしはバックグラウンドに正しく対応するようなオブジェクトの集合を用いて、空間をオブジェクトの領域とバックグラウンド領域に分離する。ここでオブジェクトは円や矩形など任意の形状として表現することが出来るが、今回は各オブジェクトの形状には厚さを有する平面を用いた。

(ii) 割れ目帯の情報

今回のシミュレーションでは、HDB-1~8孔を含む $4000\text{m}(x) \times 6000\text{m}(y) \times 2000\text{m}(z)$ を対象領域とし、 $50\text{m}(x) \times 50\text{m}(y) \times 40\text{m}(z)$ の大きさのセルで離散化している。HDB-1~8孔における割れ目帯の情報は、表 3.3.1-3 に示す通りである。なお、この情報では、平成 17 年に実施された割れ目関連データの見直しに伴い、平成 16 年度の研究において用いたものに比して走向が時計回りに約 22 度回転している。シミュレーションにあたっては、これらのボーリング孔に沿って割れ目帯のある部分についてはオブジェクトを、それ以外の部分についてはバックグラウンドを代表点として定義する。そして、この代表点の配置がシミュレーションの拘束条件となる。

表 3.3.1-3 HDB-1~8 孔における割れ目帯の情報

ボーリング孔	割れ目帯上側標高(m)	割れ目帯下側標高(m)	見かけの割れ目帯幅(m)	走向(度)	傾斜(度)
HDB-1	160.90	-230.90	70.00	96	63
	-360.90	-490.90	130.00	124	64
	-520.90	-570.90	50.00	48	64
HDB-3	8.19	-131.81	140.00	108	58
	-261.81	-371.81	110.00	74	60
	-391.81	-411.81	20.00	34	60
HDB-4	13.61	-66.39	80.00	86	78
	-86.39	-256.39	170.00	310	61
	-266.39	-316.39	50.00	88	56
	-316.39	-446.39	130.00	30	49
HDB-5	16.77	-43.23	60.00	116	74
	-53.23	-93.23	40.00	124	64
	-103.23	-123.23	20.00	107	71
	-153.23	-163.23	10.00	121	52
	-203.23	-243.23	40.00	275	77
	-253.23	-323.23	70.00	80	75
	-353.23	-393.23	40.00	102	58
HDB-6	40.21	-49.79	90.00	107	24
	-79.79	-179.79	100.00	95	67
	-219.79	-239.79	20.00	57	83
	-299.79	-339.79	40.00	107	67
	-379.79	-449.79	70.00	101	60
	-499.79	-539.79	40.00	99	55
HDB-8	50.05	-9.95	60.00	61	46
	-29.95	-39.95	10.00	70	65
	-79.95	-139.95	60.00	102	49
	-239.95	-249.95	10.00	125	56

*走向・傾斜： 割れ目帯内に含まれる代表的な割れ目の走向・傾斜で代表させている。

*走向は、面上の最大傾斜ベクトルの水平投影方向を北から右回りに見た偏角で表している。

(iii) オブジェクト(割れ目帯)の特性

割れ目帯の長さについては、割れ目帯の幅と長さの関係式 $Width = 0.032 \times length$ (Vermilye and Scholtz, 1998)を用いて表 3.3.1-3 中の割れ目帯の幅から算出した。割れ目帯の形状は円盤、割れ目帯の長さの値は円盤の直径として用いた。また、幅と方向(走向及び傾斜)については、下図のように明瞭な相関は見られないことから、独立にランダムサンプリングすることとした。

なお、サンプリングにあたっては、幅、方向いずれについても既知の 27 個の割れ目帯の特性を繰り返しランダムにサンプリングする Boot strapping の手法を用いることとした。

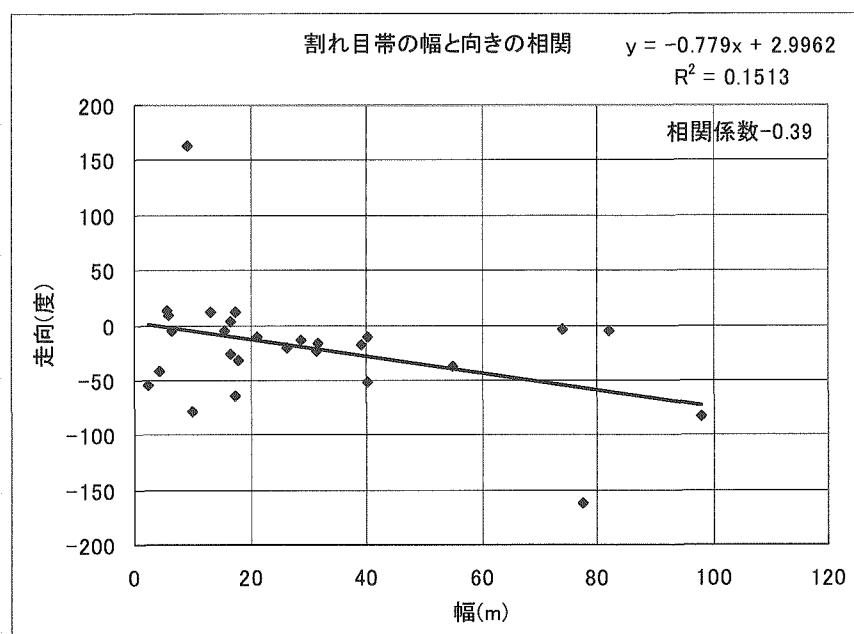


図 3.3.1-2 割れ目帯の幅と走向の相関

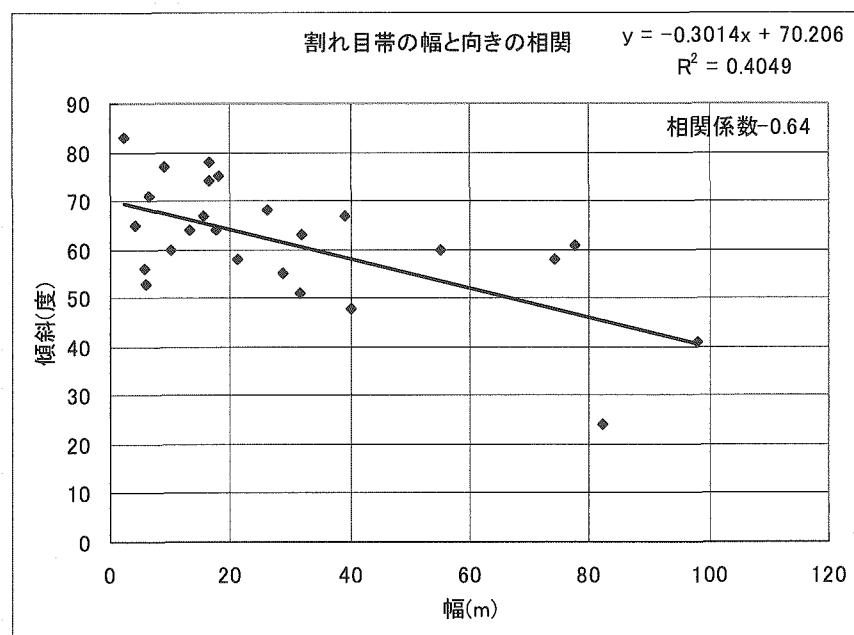


図 3.3.1-3 割れ目帯の幅と傾斜の相関

表 3.3.1-4 割れ目帯に関する統計的情報

オブジェクトの中心位置	解析領域内の一様分布
オブジェクトの法線ベクトル	観測された 27 割れ目帯の法線ベクトルの値の一つを一様ランダムに抽出 (Boot strapping)
オブジェクトの幅	観測された 27 割れ目帯の幅の値の一つを一様ランダムに抽出 (Boot strapping)
長さ	Width = $0.032 \times \text{length}$ と幅の値から算出

(iv) CBS によるシミュレーションの手順

CBS によるシミュレーションの具体的な手順は以下の通りである。

- ① [割れ目帯の領域全体に占める割合を設定] あらかじめ、基準となるオブジェクト（割れ目帯）が全体に占める体積の割合 λ_1 を決める。ここでは、HDB-1~8 孔全体の長さと割れ目帯の長さの比から、 $(1540\text{m} / 3440\text{m}) = 0.45$ を用いる。
- ② [代表点の設定] HDB-1~8 孔内の各点を、オブジェクト（割れ目帯）であるか、バックグラウンドであるか判定し、代表点とする。また初期状態では、全空間がバックグラウンドであるとする。このためすべての代表点がバックグラウンドに属している。
- ③ [オブジェクトの初期配置] 以下の手順によって、代表点が正しくオブジェクトもしくはバックグラウンドに割り当てられるようにオブジェクト ϕ を配置していく。
 - ③.1. ランダムにオブジェクトを発生させる。ここでオブジェクトは十分に大きな平面であるとする。
 - ③.2. オブジェクトが、バックグラウンドに割り当てた代表点を含んでいるとき、③.1 のオブジェクトを棄却する。
 - ③.3. オブジェクトが、オブジェクトに割り当てるべき代表点で、これまでに採用されたどのオブジェクトにも含まれていない点を含むとき、③.1 のオブジェクトを採用する。
 - ③.4. いずれにも該当しないとき、③.1 のオブジェクトを棄却する。
 - ③.5. オブジェクトの代表点の中に、これまでに採用されたどのオブジェクトにも含まれていない代表点が残っていれば、③.1 に戻る。
- ④ [オブジェクトの再配置] 以下のルールでオブジェクトの追加・削除を行う。
 - ④.1. 0 から 1 までの一様乱数 r を発生させて、その値によって、④.2 もしくは④.3 のいずれかを実行する。
 - ④.2. $\frac{\lambda_1}{\lambda_1 + |\phi|}$ の割合でランダムに新規オブジェクトを発生する。このオブジェクトが追加しても、代表点の割り当てが無矛盾なオブジェクトならば追加する。ここで $|\phi|$ は既存のオブジェクトが全体に占める体積の割合である。
 - ④.3. $\frac{|\phi|}{\lambda_1 + |\phi|}$ の割合でランダムに既存オブジェクトの一つを選択する。このオブジェクトを削除しても無矛盾な場合、このオブジェクトを削除する。
 - ④.5. オブジェクトの体積割合 $|\phi|$ が基準となる体積割合 λ_1 に近くなれば終了する。不十分な場合は、④へ戻って再度反復する。

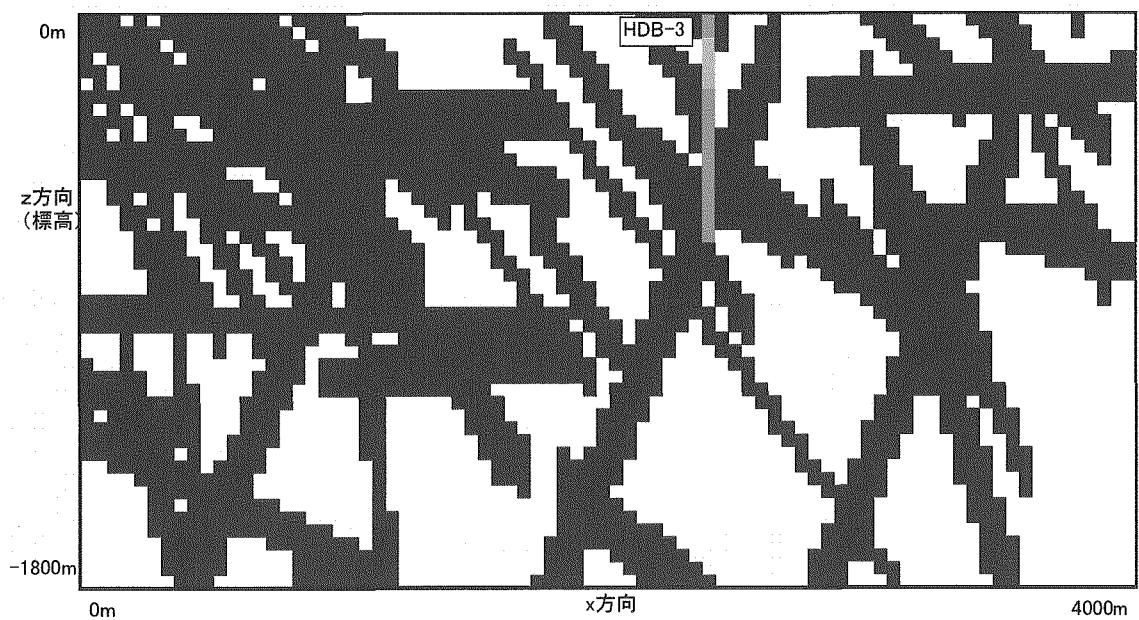
(v) CBS による割れ目帯 3 次元分布の推定

CBS により、HDB-1～8 孔の情報に基づき推定した割れ目帯 3 次元分布を以下に示す。なお、図 3.3.1-4 に示す割れ目帯分布は確率論的に発生させたものであり、前論で示した条件を満たす 1 つのケースを表わしているものである。

□ 健岩部（バックグラウンド）
■ 割れ目帯（オブジェクト）



図 3.3.1-4 標高 0 m の水平断面における割れ目帯分布

図 3.3.1-5 HDB-1 孔を通る $x - z$ 断面における割れ目帯分布図 3.3.1-6 HDB-3 孔を通る $x - z$ 断面における割れ目帯分布

ボーリング孔位置での明青色は割れ目帯、ピンクは健岩部であることを表す。なお、メッシュ分割により割れ目帯の連續性が損なわれることがないように設定したため、ボーリング孔位置では実測データよりも割れ目帯が多めの分布を示すものもある。

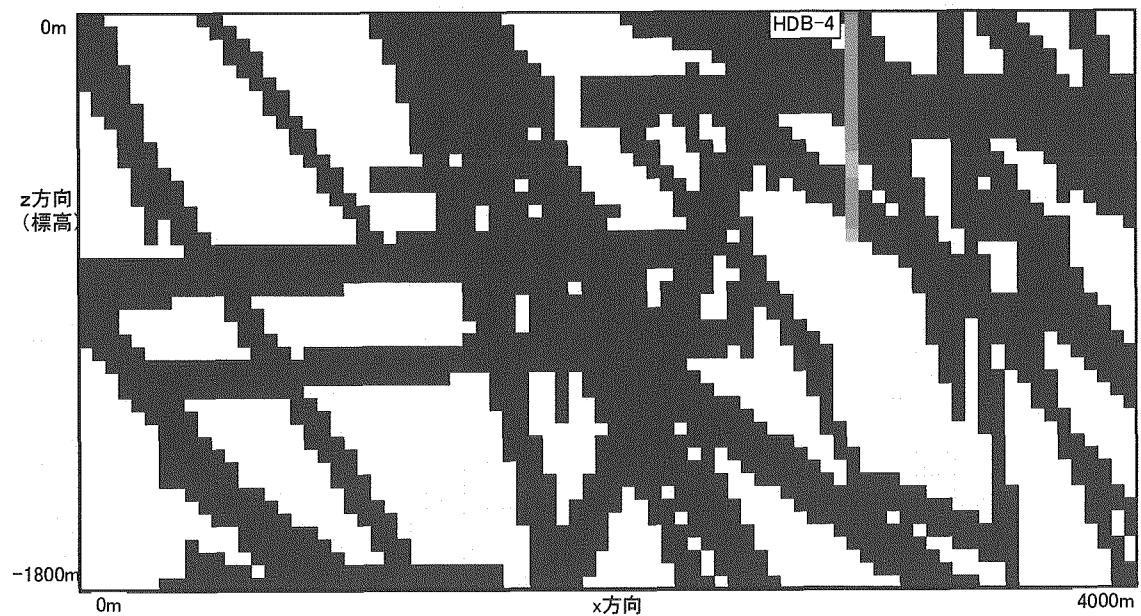


図 3.3.1-7 HDB-4 孔を通る $x - z$ 断面における割れ目帯分布

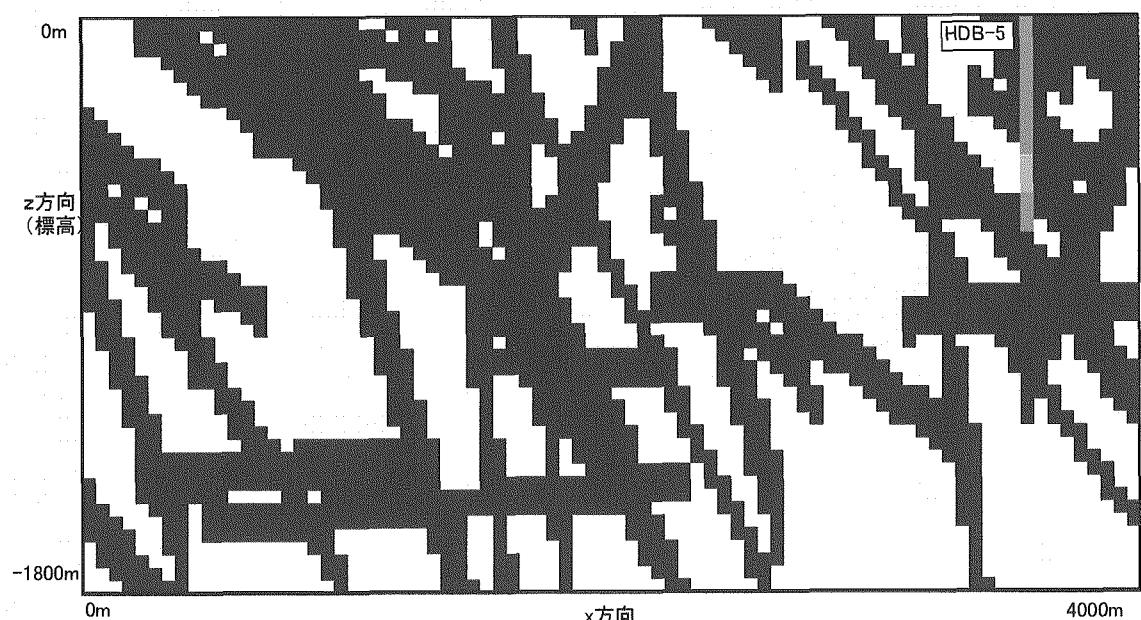


図 3.3.1-8 HDB-5 孔を通る $x - z$ 断面における割れ目帯分布

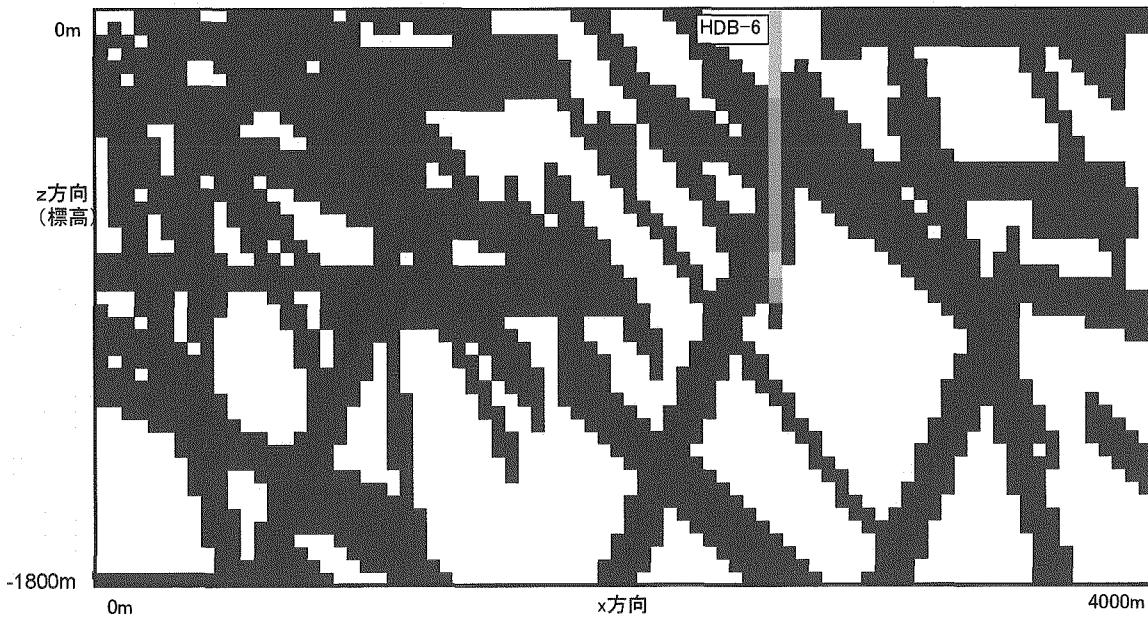


図 3.3.1-9 HDB-6 孔を通る $x - z$ 断面における割れ目帯分布

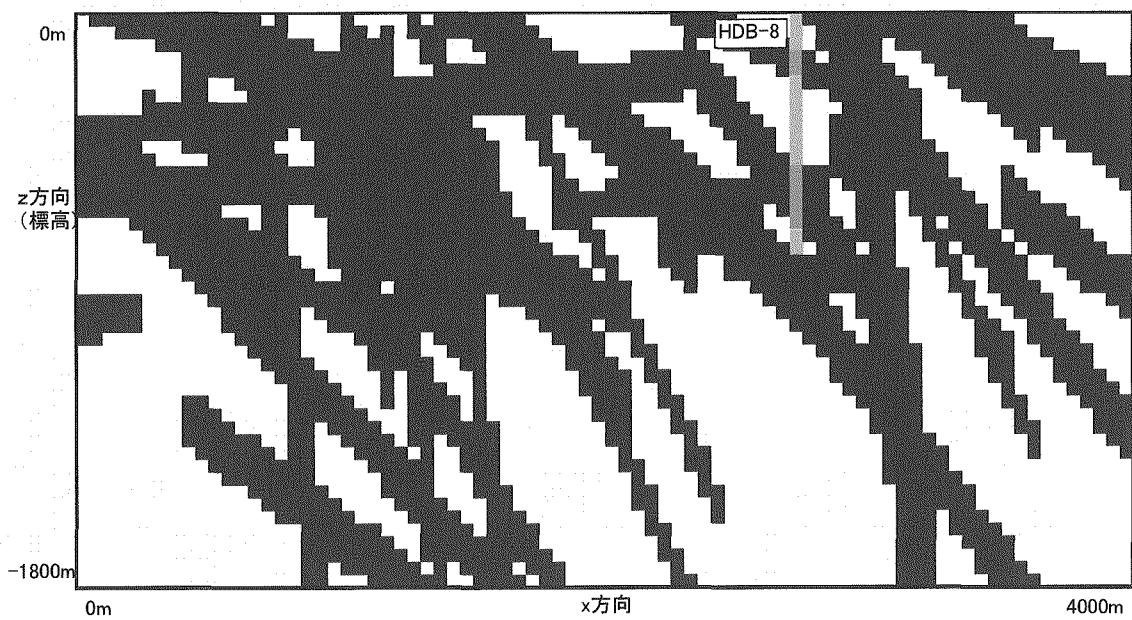


図 3.3.1-10 HDB-8 孔を通る $x - z$ 断面における割れ目帯分布

(4) 不均質透水係数場モデルの作成

(i) モデル 1

前節までに述べた水理地質構造に対して、稚内層の深度依存性を考慮して透水係数を割り当て、さらに図 3.3.1-4～図 3.3.1-10 に示した割れ目帯分布を加えることによって研究所設置領域の不均質透水係数場のモデルを作成した。結果を図 3.3.1-11～図 3.3.1-16 に示す。

深度 400m の水平断面を横断する黄色の曲線は大曲断層に対応しており、これに加えて、明緑色の直線的なオブジェクトとして表現された割れ目帯が高透水性領域として分布している。また、この断面の中央部分を横断する明緑色の帯は声間層である。

x-z 及び y-z 鉛直断面においては、稚内層健岩部の透水性が深度依存性を示しているが、深度約 700m において $1\text{E}-11\text{m/s}$ 程度となり、数値解析上はこれよりも深い位置では一定値としている。また、割れ目帯についても深度約 900m において $1\text{E}-11\text{m/s}$ 程度となり、数値解析上はこれよりも深い位置では一定値としているため、これよりも深い部分では健岩部と割れ目帯との間の透水性の差は見られない。

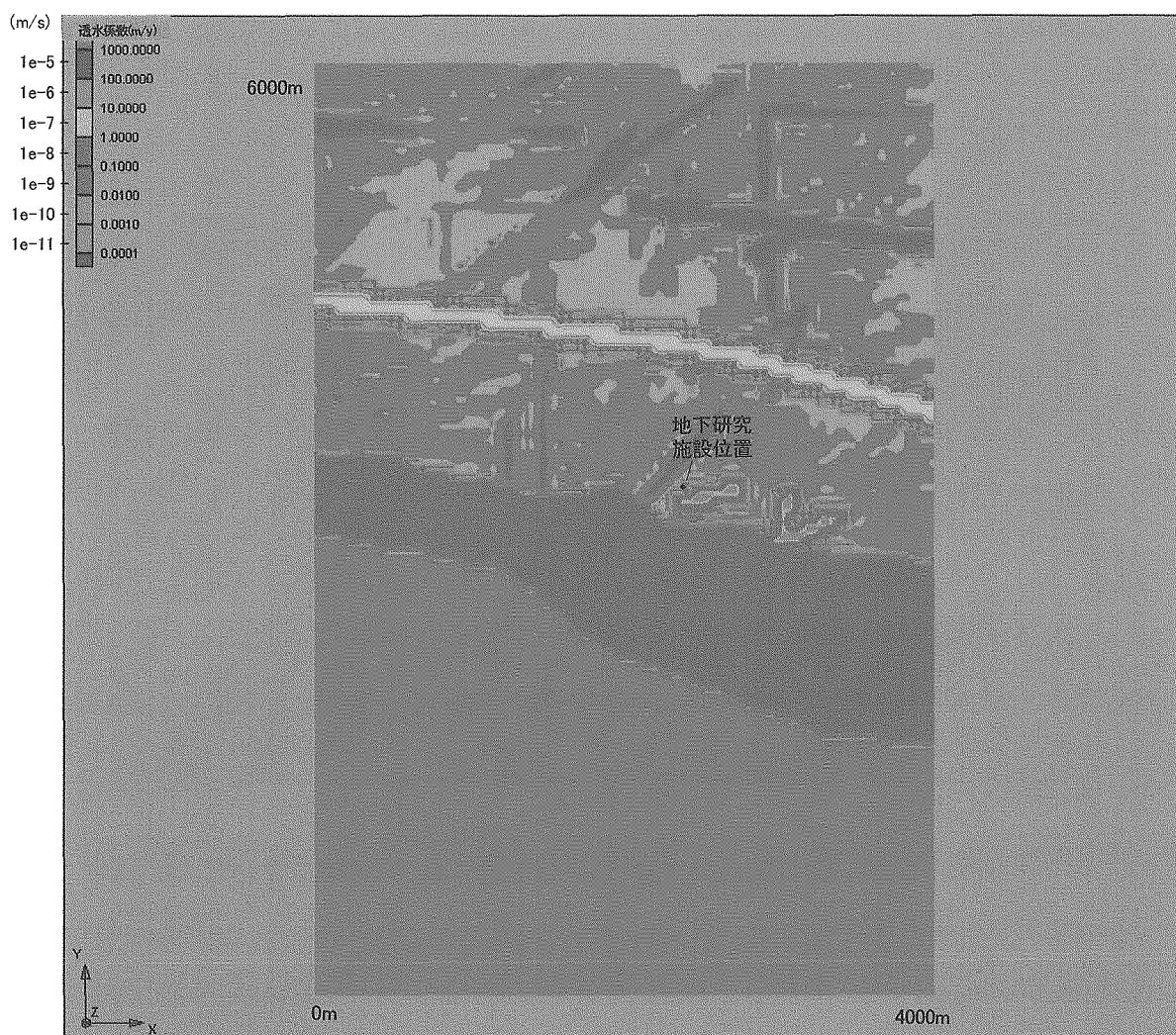


図 3.3.1-11 透水係数分布（水平断面：深度 400m、モデル 1-A）

モデル 1-A 稚内層健岩部 : $K=1\text{E}-9\text{m/s}$ 、深度依存性あり
割れ目帯の透水係数の設定法：ブーストランピング
大曲断層 : $K=1\text{E}-6\text{m/s}$

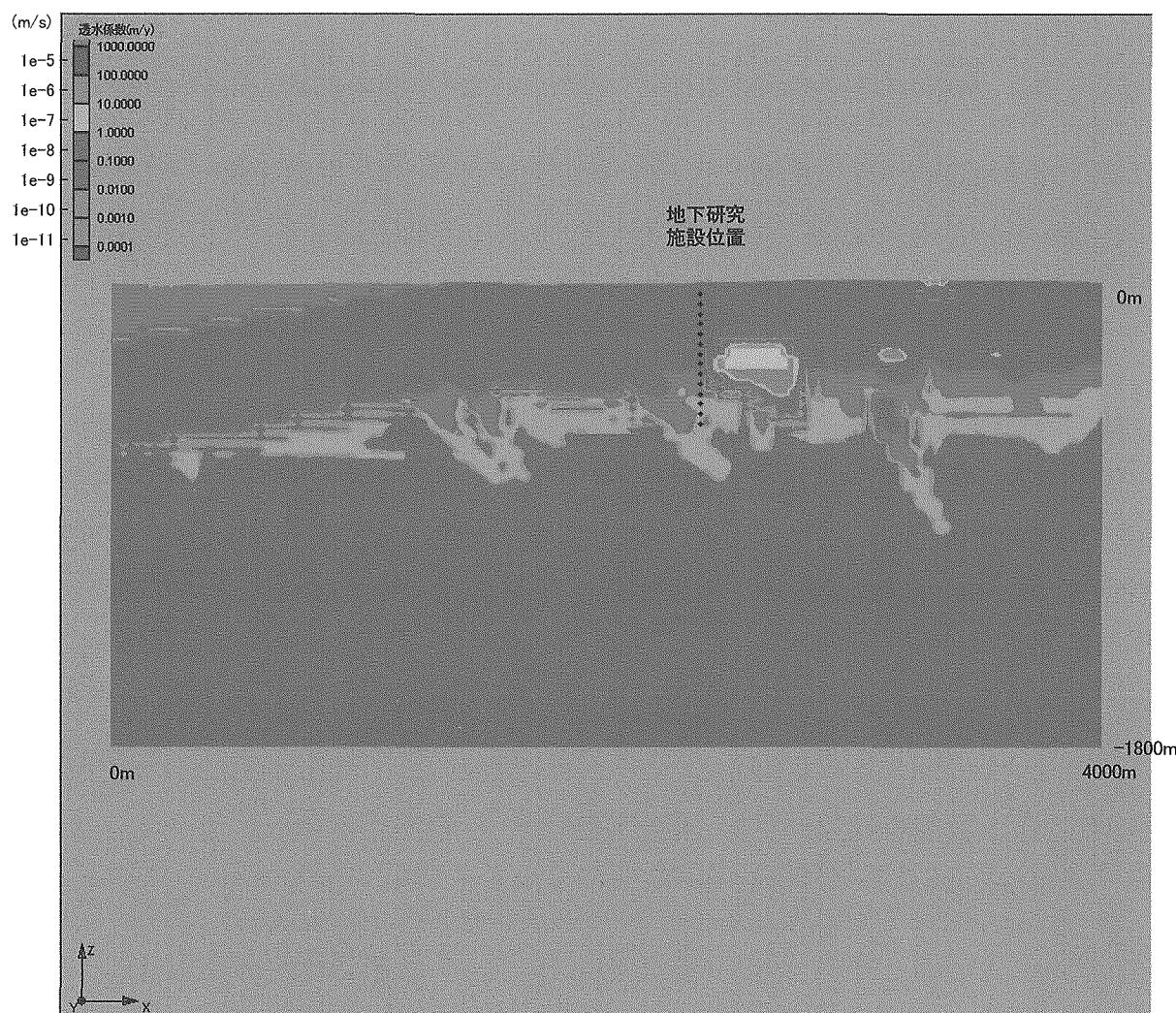


図 3.3.1-12 透水係数分布（地下施設位置を通る xz 鉛直断面、モデル 1-A）

モデル 1-A 稚内層健岩部 : $K=1E-9\text{m/s}$ 、深度依存性あり
割れ目帯の透水係数の設定法：ブーツストラッピング
大曲断層 : $K=1E-6\text{m/s}$

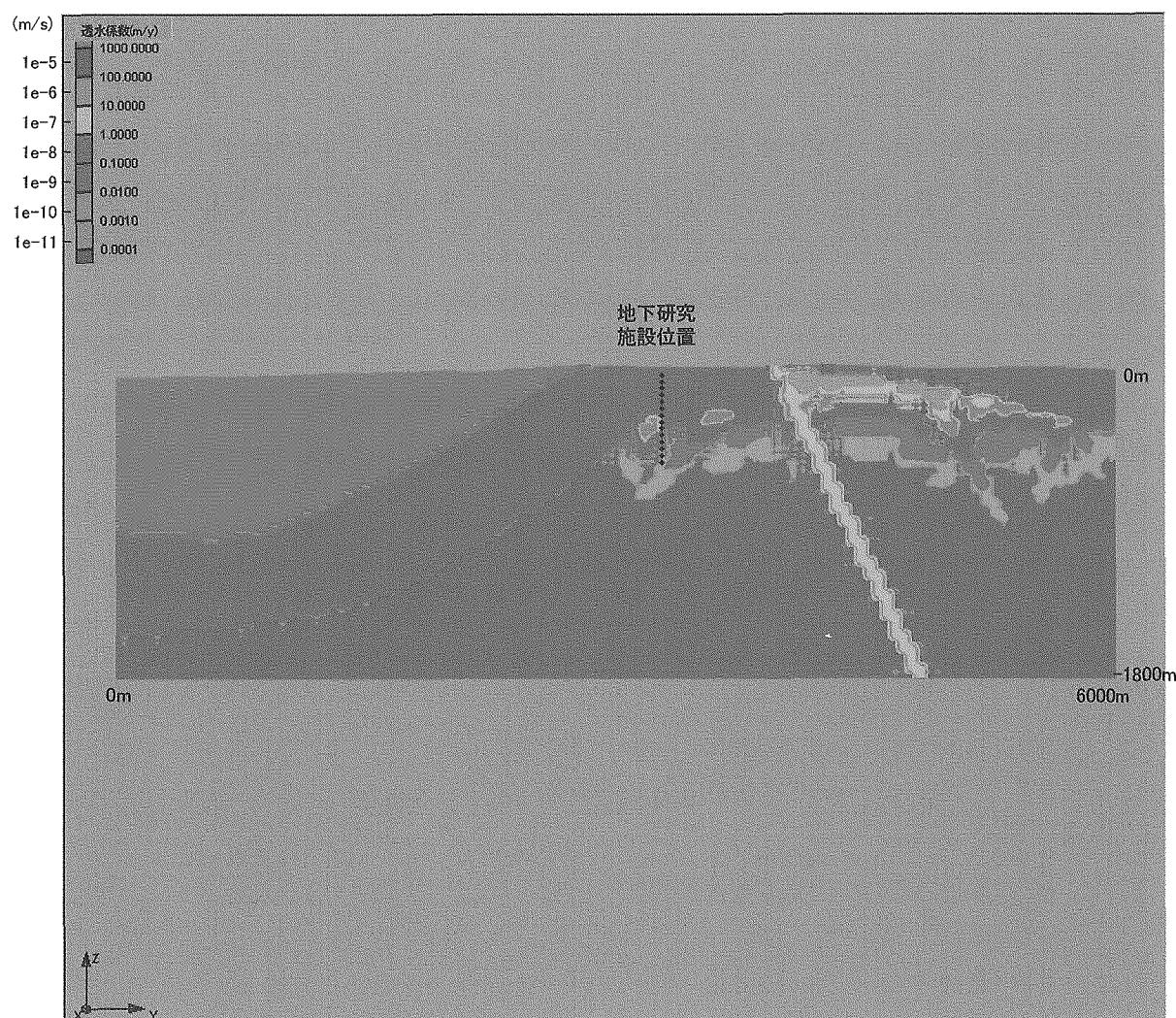


図 3.3.1-13 透水係数分布（地下施設位置を通る yz 鉛直断面、モデル 1-A）

モデル 1-A 稚内層健岩部 : $K=1E-9\text{m/s}$ 、深度依存性あり
割れ目帶の透水係数の設定法：ブーツストラッピング
大曲断層 : $K=1E-6\text{m/s}$

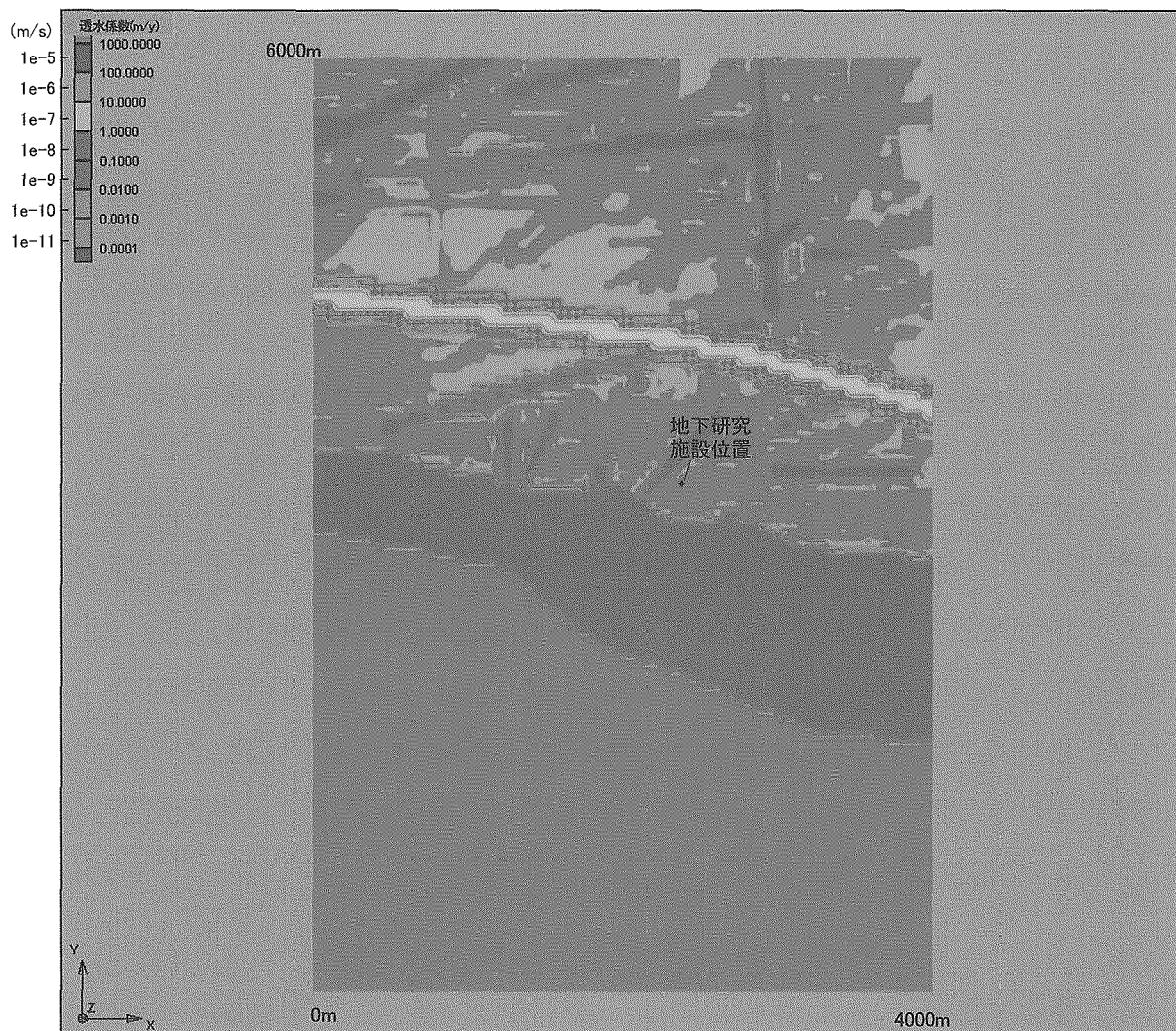


図 3.3.1-14 透水係数分布（水平断面：深度 400m、モデル 1-B）

モデル 1-B 稚内層健岩部： $K=1E-9\text{m/s}$ 、深度依存性あり
割れ目帶の透水係数の設定法： 相関回帰式
大曲断層： $K=1E-6\text{m/s}$

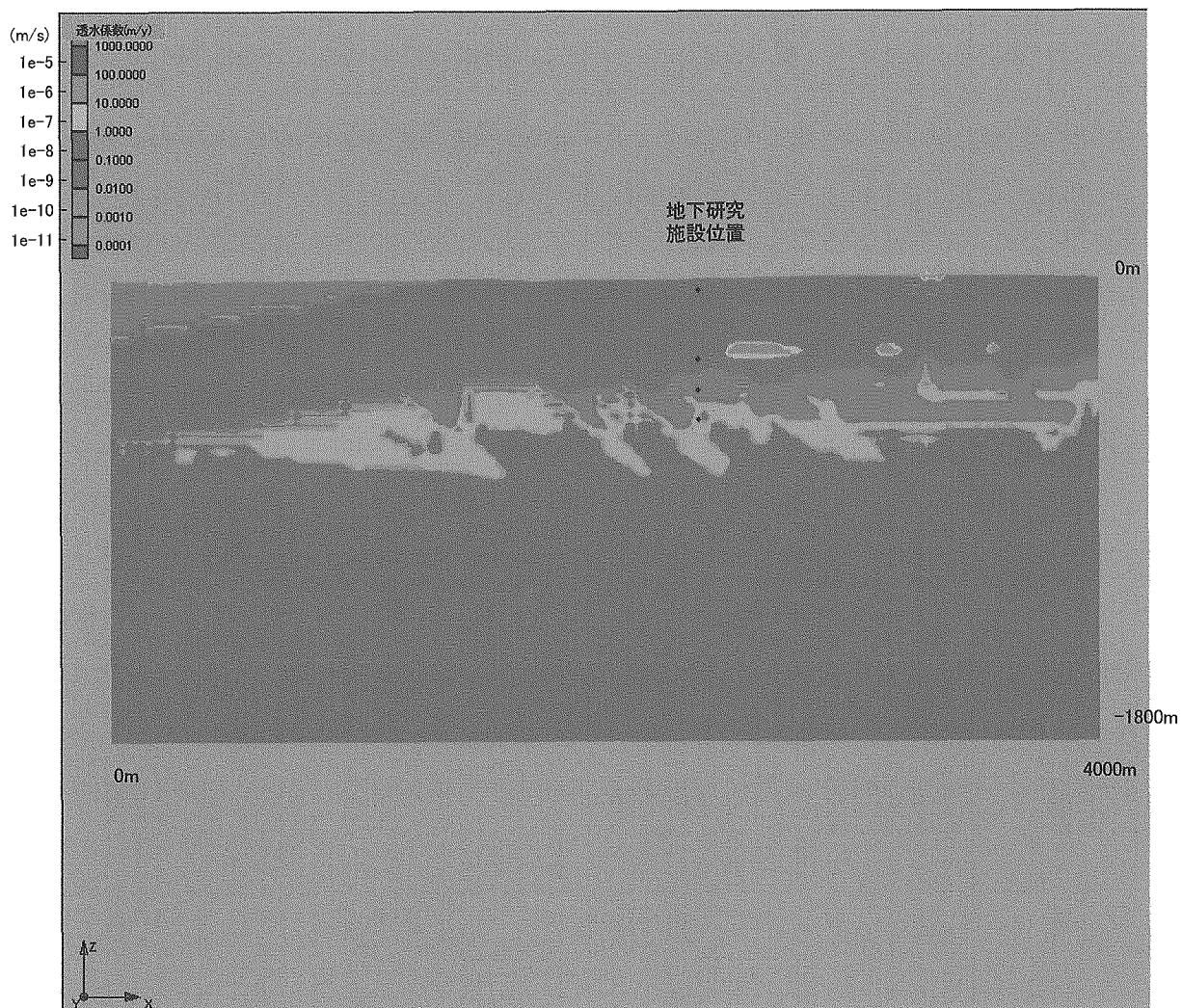


図 3.3.1-15 透水係数分布（地下施設位置を通る xz 鉛直断面、モデル 1-B）

モデル 1-B 稚内層健岩部： $K=1E-9\text{m/s}$ 、深度依存性あり
 割れ目帯の透水係数の設定法： 相関回帰式
 大曲断層： $K=1E-6\text{m/s}$

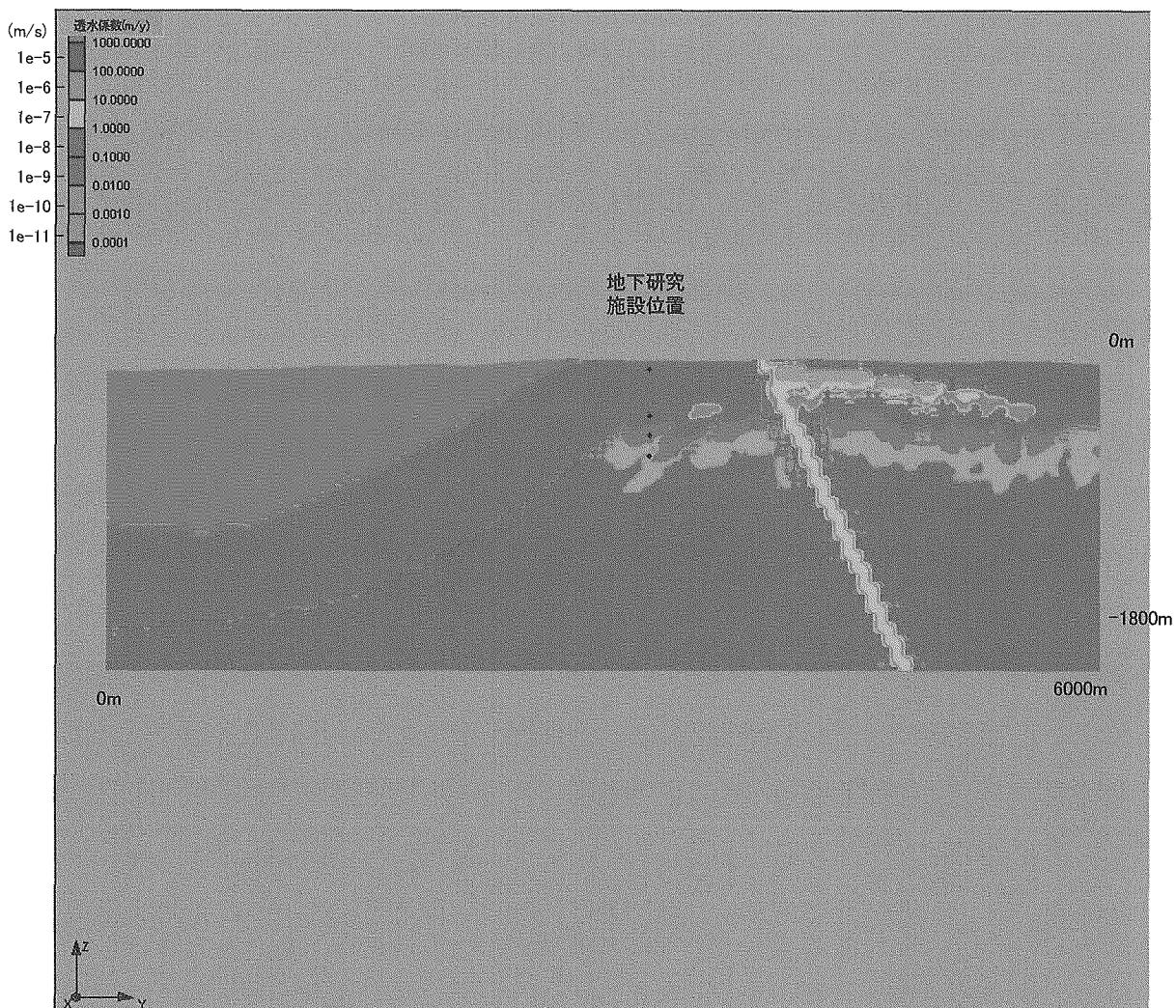


図 3.3.1-16 透水係数分布（地下施設位置を通る yz 鉛直断面、モデル 1-B）

モデル 1-B 稚内層健岩部 : $K=1E-9\text{m/s}$ 、深度依存性あり
 割れ目帯の透水係数の設定法 : 相関回帰式
 大曲断層 : $K=1E-6\text{m/s}$

(ii) モデル 2

前節までに述べた水理地質構造に対して、稚内層の深度依存性を考慮して透水係数を割り当て、さらに図 3.3.1-4～図 3.3.1-10 に示した割れ目帯分布を加えることによって研究所設置領域の不均質透水係数場のモデルを作成した。結果を図 3.3.1-17～図 3.3.1-22 に示す。

深度 400m の水平断面を横断する黄色の曲線は大曲断層に対応しており、これに加えて、明緑色の直線的なオブジェクトとして表現された割れ目帯が高透水性領域として分布している。また、この断面の中央部分を横断する明緑色の帯は声間層である。

モデル 2 では、割れ目帯及び健岩部のそれぞれについて深度依存性を考慮した透水性の間に差がほとんどないため、稚内層中ではいずれの深度においても透水性はほぼ均一である。なお、健岩部及び割れ目帯の透水係数は、深度約 900m において $1\text{E}-11\text{m/s}$ 程度となり、数値解析上はこれよりも深い位置では一定値としている。

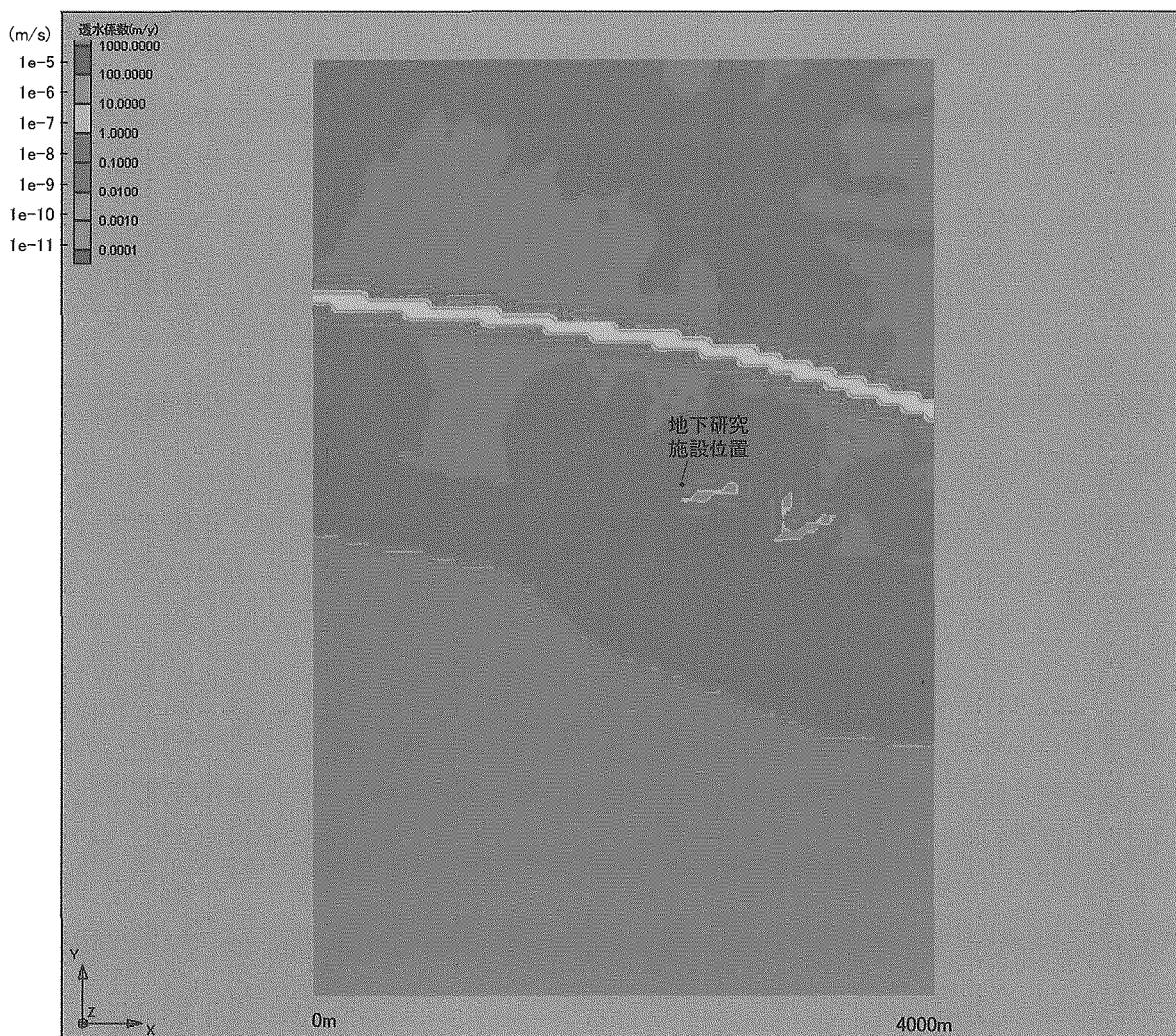


図 3.3.1-17 透水係数分布（水平断面：深度 400m、モデル 2-A）

モデル 2-A 稚内層健岩部 : $K=1\text{E}-8\text{m/s}$ 、深度依存性あり
 割れ目帯の透水係数の設定法 : ブーツストラッピング
 大曲断層 : $K=1\text{E}-6\text{m/s}$

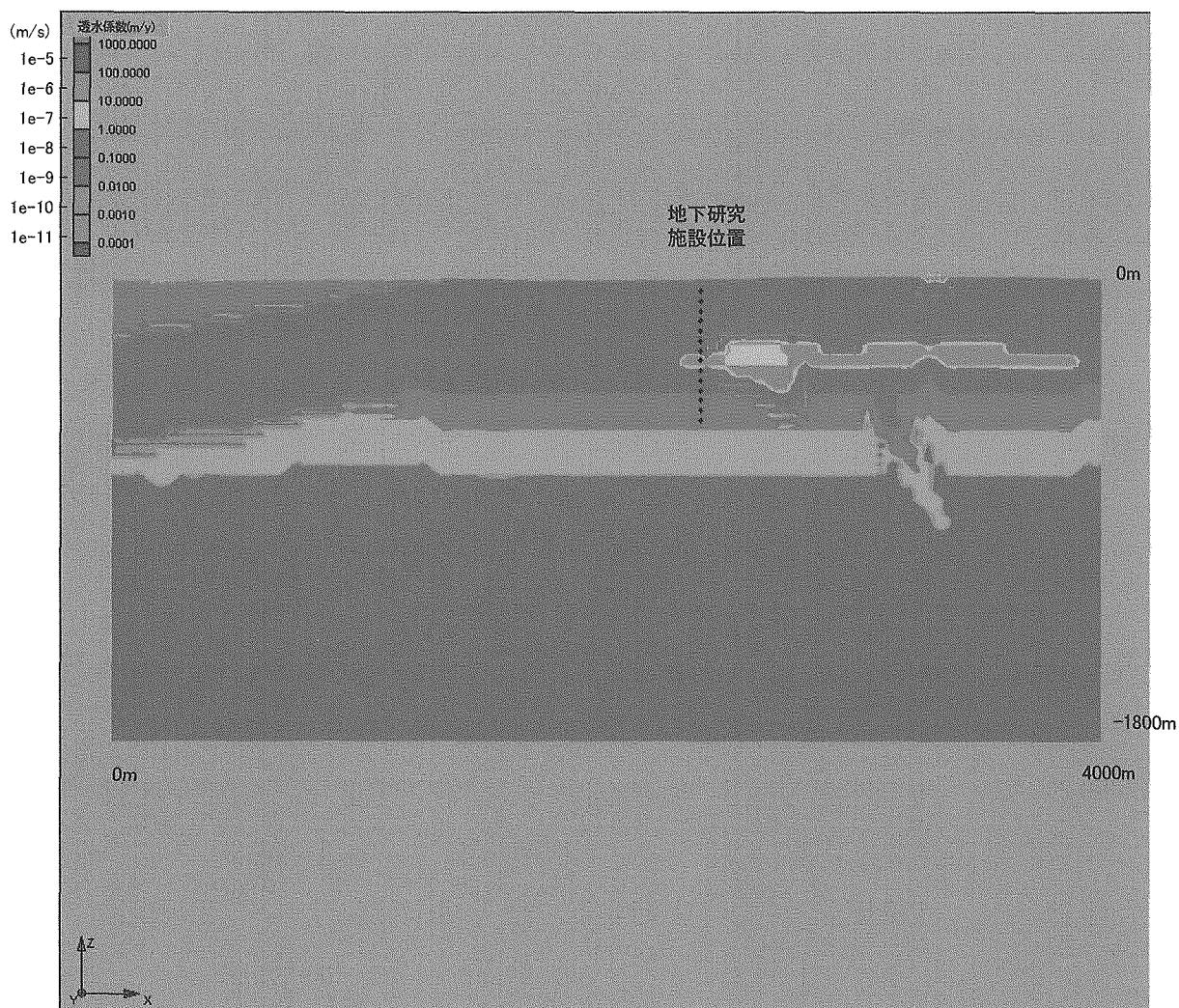


図 3.3.1-18 透水係数分布（地下施設位置を通る xz 鉛直断面、モデル 2-A）

モデル 2-A 稚内層健岩部 : $K=1E-8\text{m/s}$ 、深度依存性あり
 割れ目帯の透水係数の設定法 : ブーツストラッピング
 大曲断層 : $K=1E-6\text{m/s}$

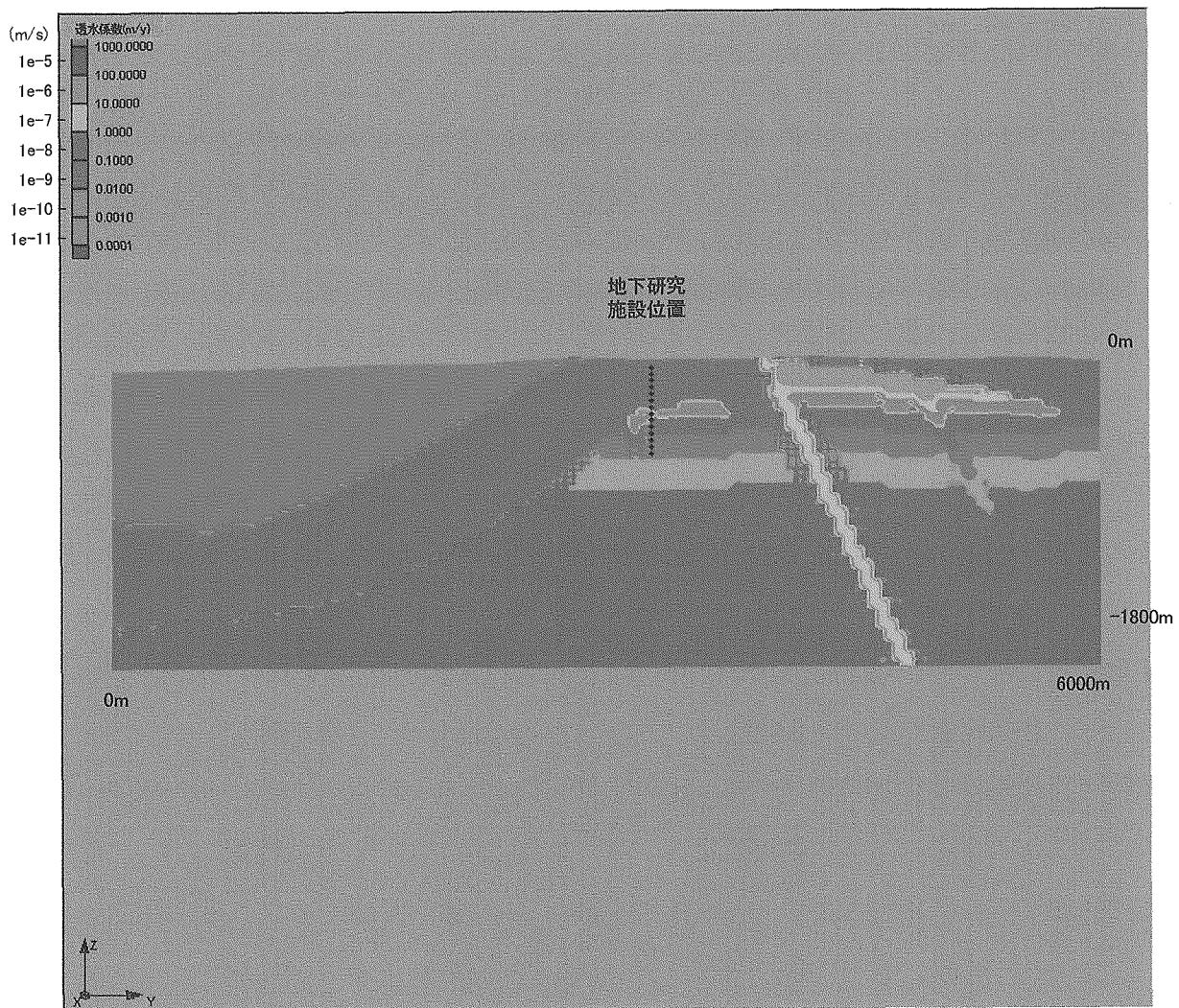


図 3.3.1-19 透水係数分布（地下施設位置を通る yz 鉛直断面、モデル 2-A）

モデル 2-A 稚内層健岩部 : $K=1E-8\text{m/s}$ 、深度依存性あり
 割れ目帯の透水係数の設定法 : ブーツストラッピング
 大曲断層 : $K=1E-6\text{m/s}$

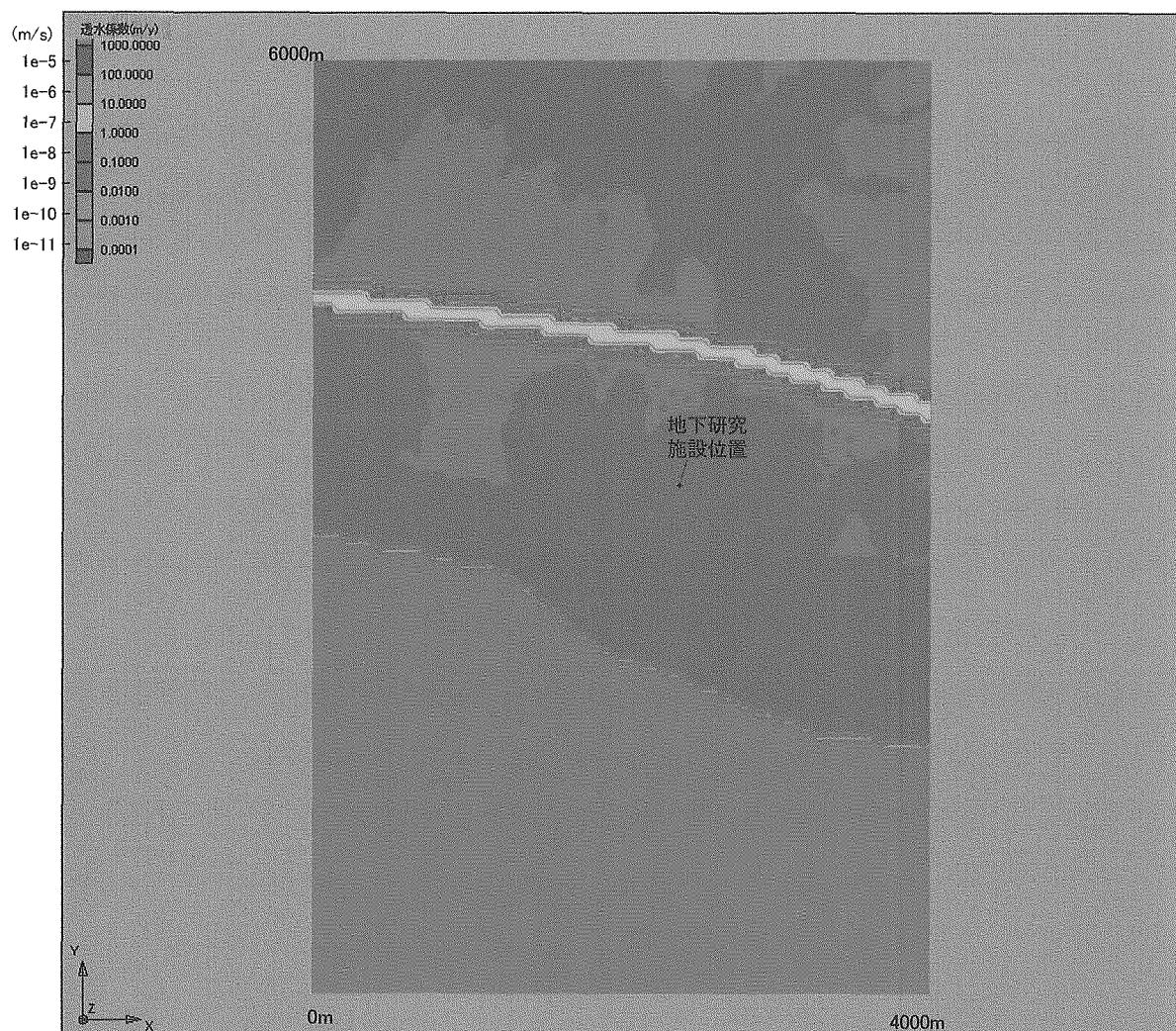


図 3.3.1-20 透水係数分布（水平断面：深度 400m、モデル 2-B）

モデル 2-B 稚内層健岩部 : $K=1E-8\text{m/s}$ 、深度依存性あり
割れ目帶の透水係数の設定法 : 相関回帰式
大曲断層 : $K=1E-6\text{m/s}$

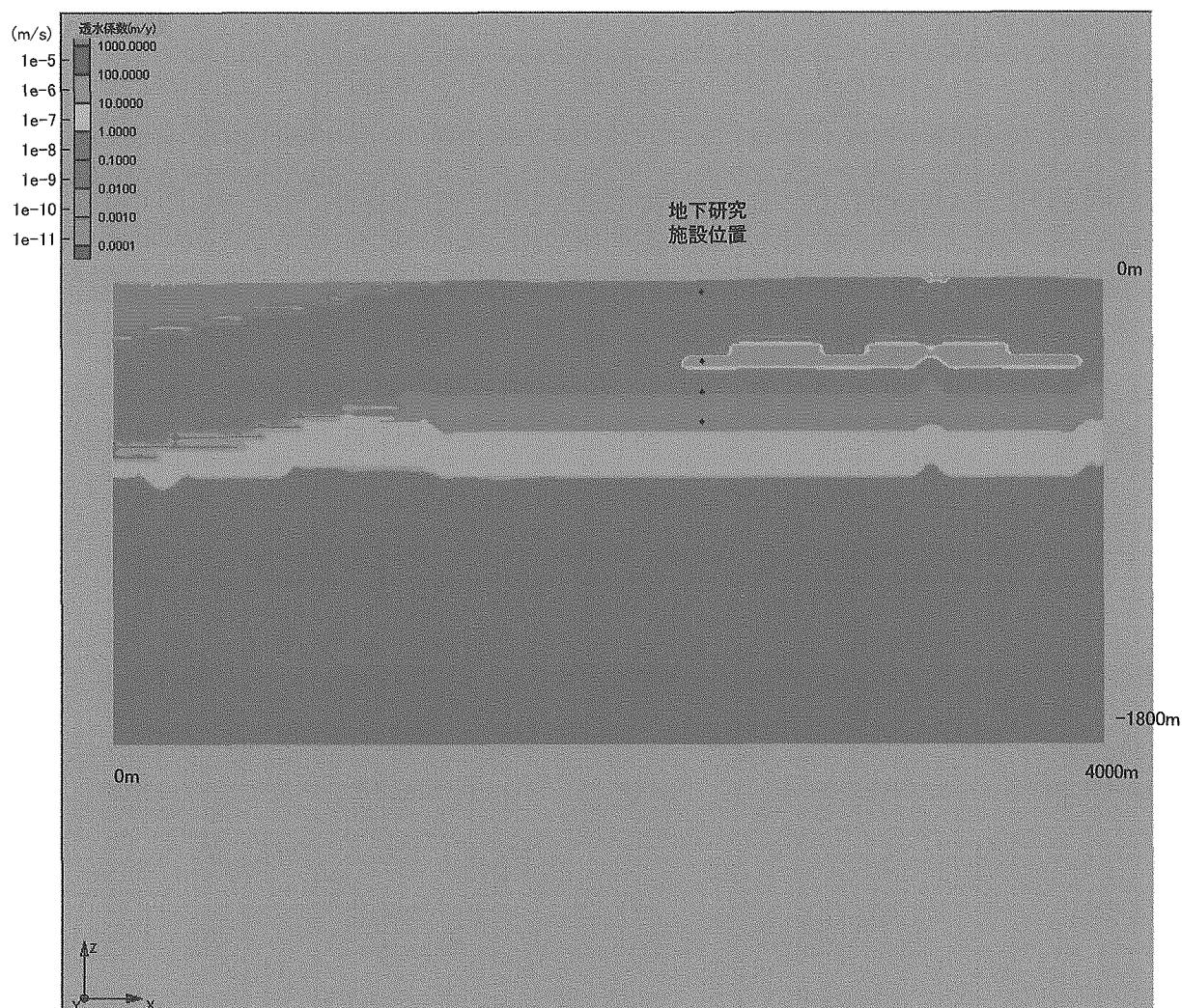


図 3.3.1-21 透水係数分布（地下施設位置を通る xz 鉛直断面、モデル 2-B）

モデル 2-B 稚内層健岩部： $K=1E-8\text{m/s}$ 、深度依存性あり
 割れ目帯の透水係数の設定法： 相関回帰式
 大曲断層： $K=1E-6\text{m/s}$

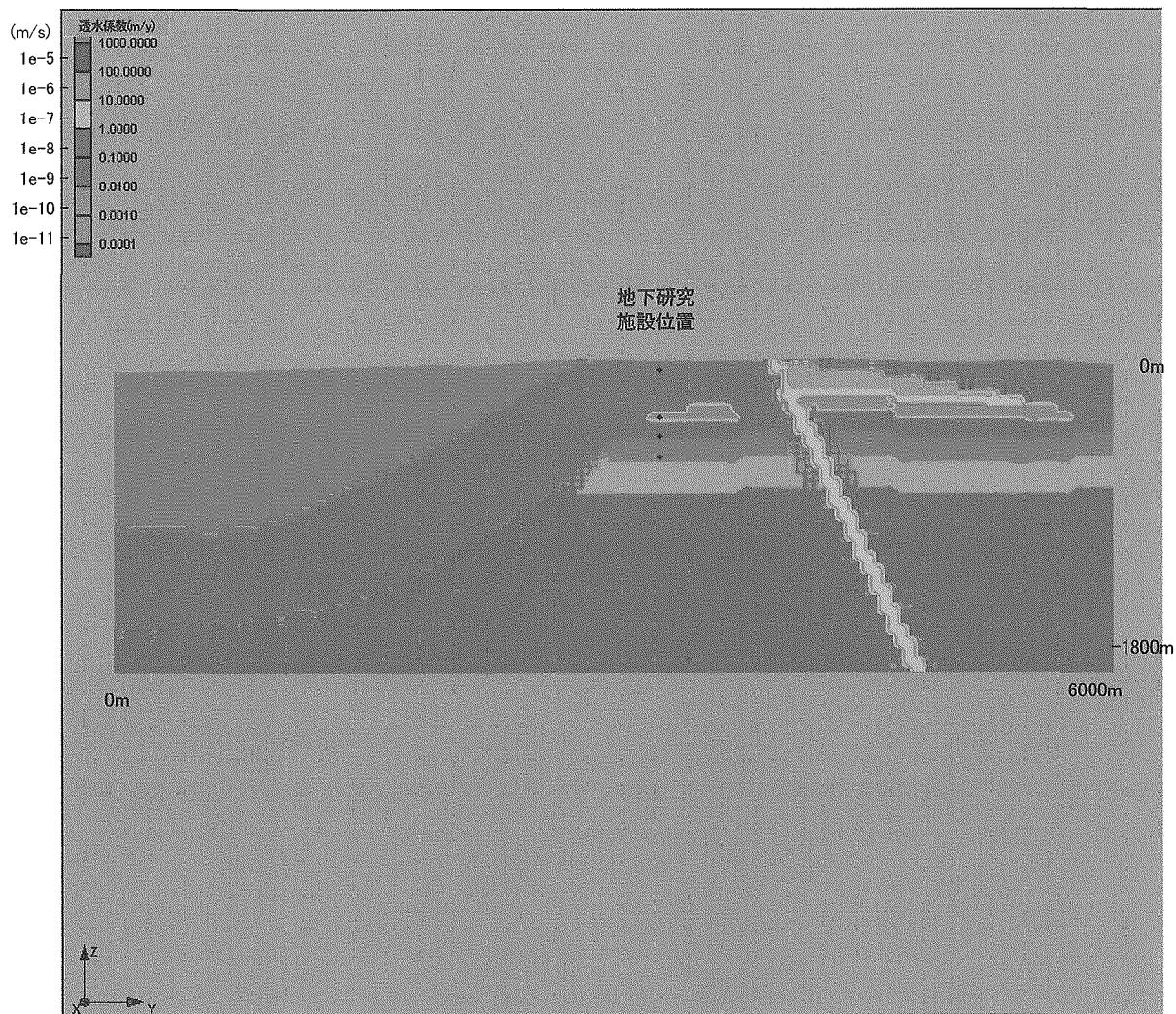


図 3.3.1-22 透水係数分布（地下施設位置を通るyz 鉛直断面、モデル 2-B）

モデル 2-B 稚内層健岩部 : $K=1E-8\text{m/s}$ 、深度依存性あり
 割れ目帯の透水係数の設定法 : 相関回帰式
 大曲断層 : $K=1E-6\text{m/s}$

(iii) モデル 3

前節までに述べた水理地質構造に対して、稚内層の深度依存性を考慮して透水係数を割り当て、さらに図 3.3.1-4～図 3.3.1-10 に示した割れ目帯分布を加えることによって研究所設置領域の不均質透水係数場のモデルを作成した。結果を図 3.3.1-23～図 3.3.1-28 に示す。

深度 400m の水平断面を横断する黄色の曲線は大曲断層に対応しており、これに加えて、明緑色の直線的なオブジェクトとして表現された割れ目帯が高透水性領域として分布している。また、この断面の中央部分を横断する明緑色の帯は声間層である。なお、稚内層健岩部の透水性はモデル 1 の場合よりも 1 衡低いために、この深度における割れ目帯と健岩部との間の透水性のコントラストは大きい。

x-z 及び y-z 鉛直断面においては、稚内層健岩部の透水性が深度依存性を示しているが、モデル 3 では、深度約 500m において $1\text{e-}11\text{m/s}$ 程度となり、数値解析上はこれよりも深い位置では一定値としている。また、割れ目帯については深度約 900m において $1\text{e-}11\text{m/s}$ 程度となっているため、これよりも深い部分では健岩部と割れ目帯との間の透水性の差は見られない。

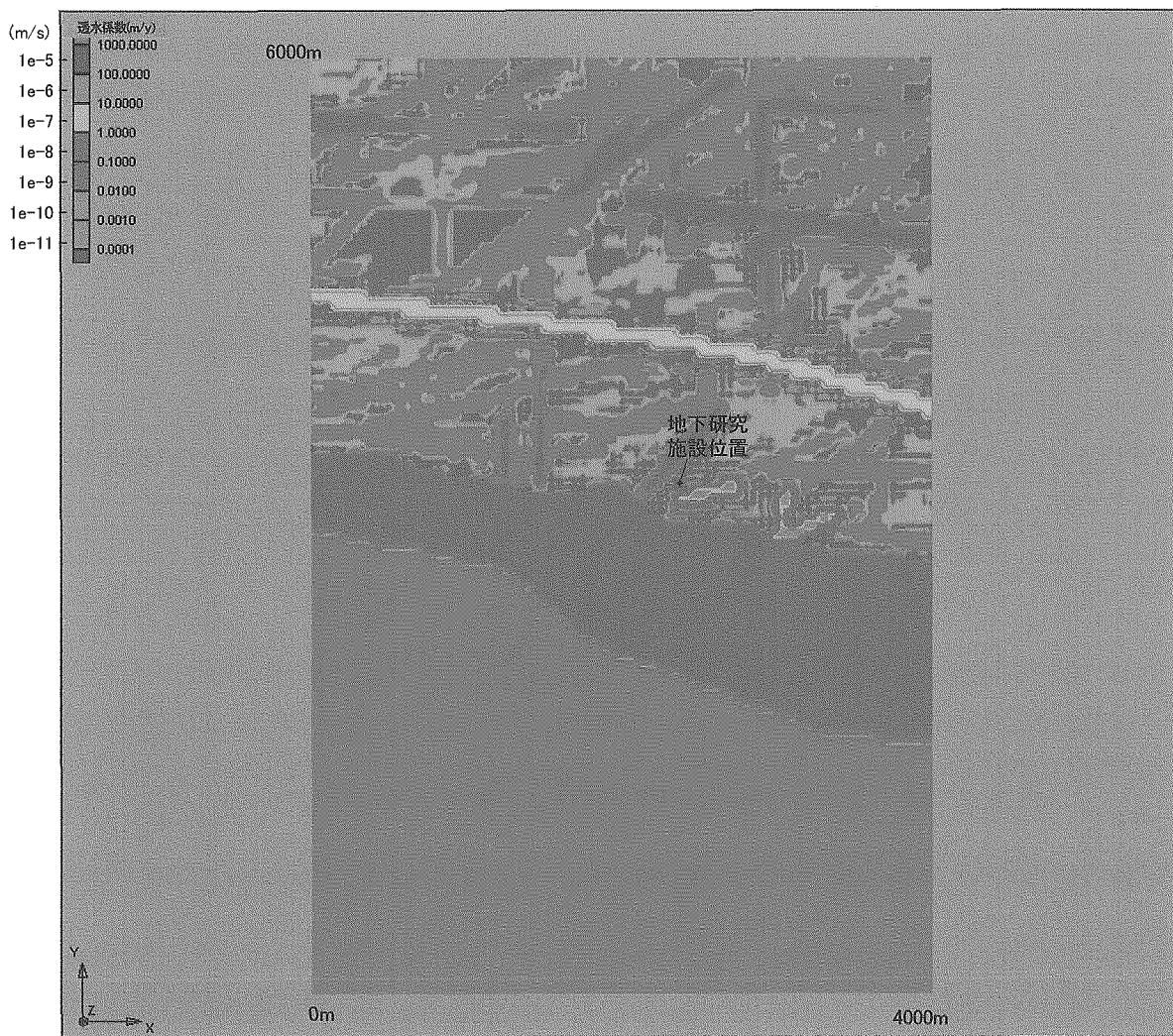


図 3.3.1-23 透水係数分布（水平断面：深度 400m、モデル 3-A）

モデル 3-A 稚内層健岩部： $K=1\text{E-}10\text{m/s}$ 、深度依存性あり
割れ目帯の透水係数の設定法： ブーストトラッピング
大曲断層： $K=1\text{E-}6\text{m/s}$

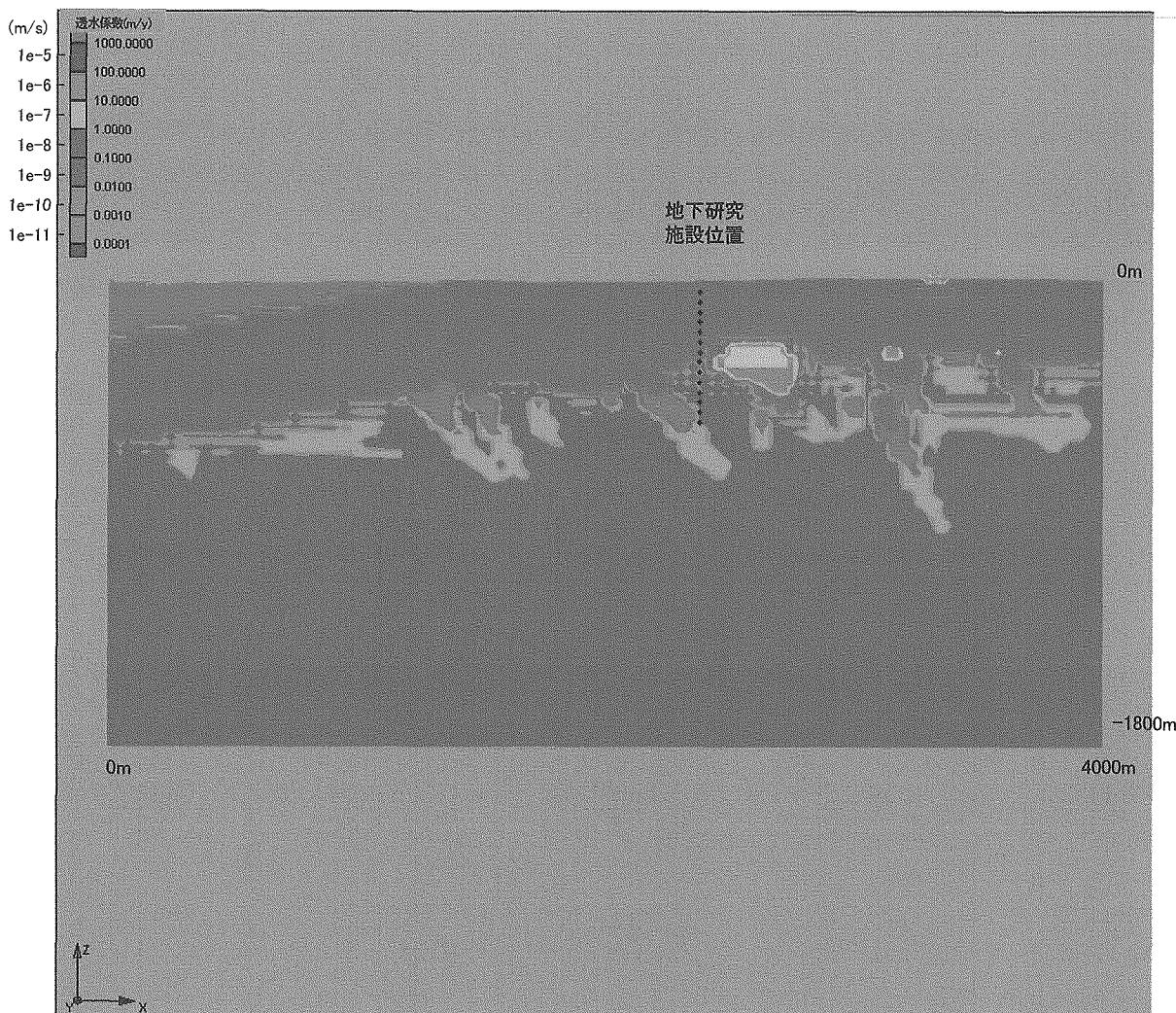


図 3.3.1-24 透水係数分布（地下施設位置を通る xz 鉛直断面、モデル 3-A）

モデル 3-A 稚内層健岩部 : $K=1E-10\text{m/s}$ 、深度依存性あり
 割れ目帯の透水係数の設定法 : ブーツストラッピング
 大曲断層 : $K=1E-6\text{m/s}$

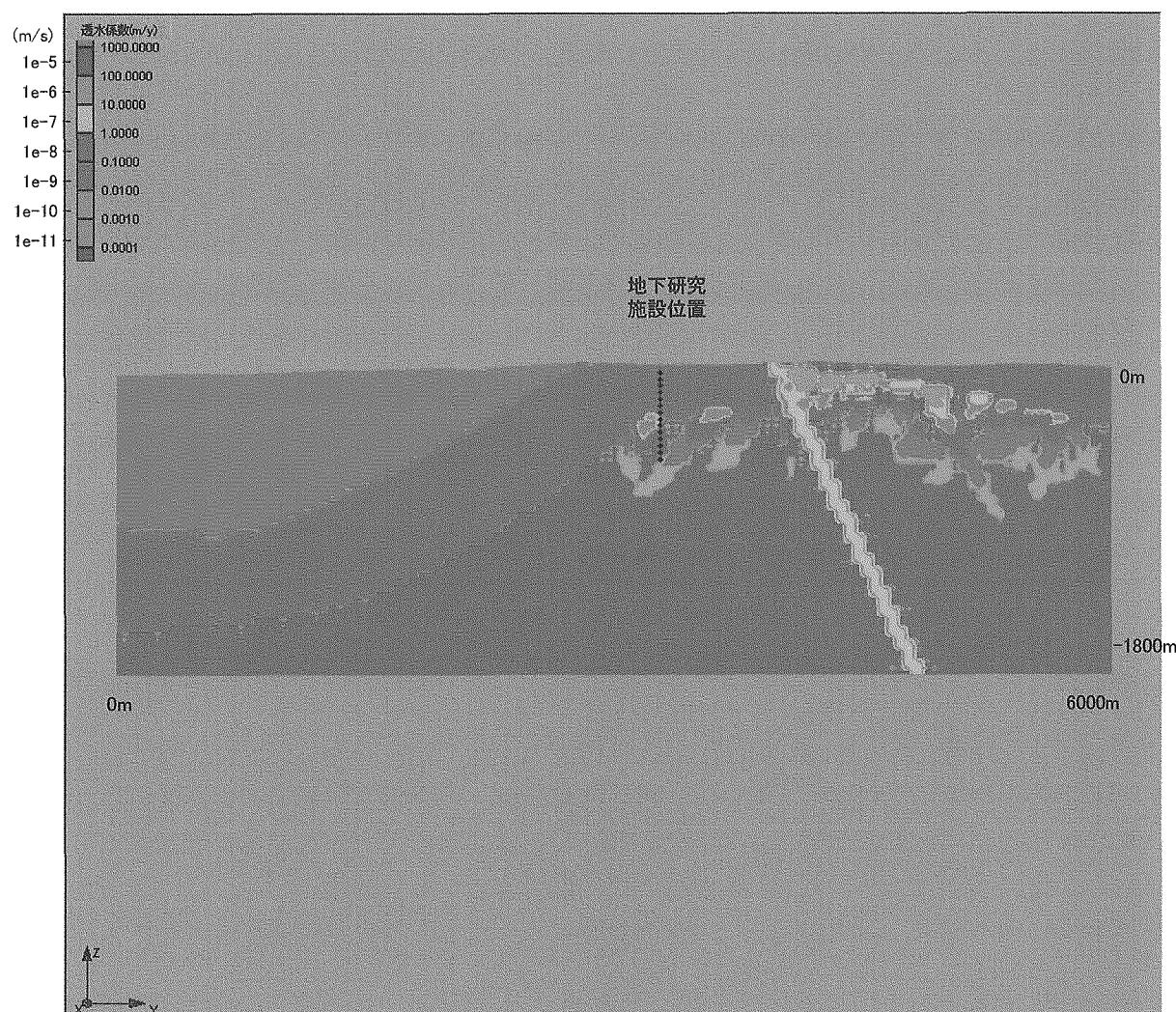


図 3.3.1-25 透水係数分布（地下施設位置を通る yz 鉛直断面、モデル 3-A）

モデル 3-A 稚内層健岩部 : $K=1E-10\text{m/s}$ 、深度依存性あり
 割れ目帯の透水係数の設定法 : ブーツストラッピング
 大曲断層 : $K=1E-6\text{m/s}$

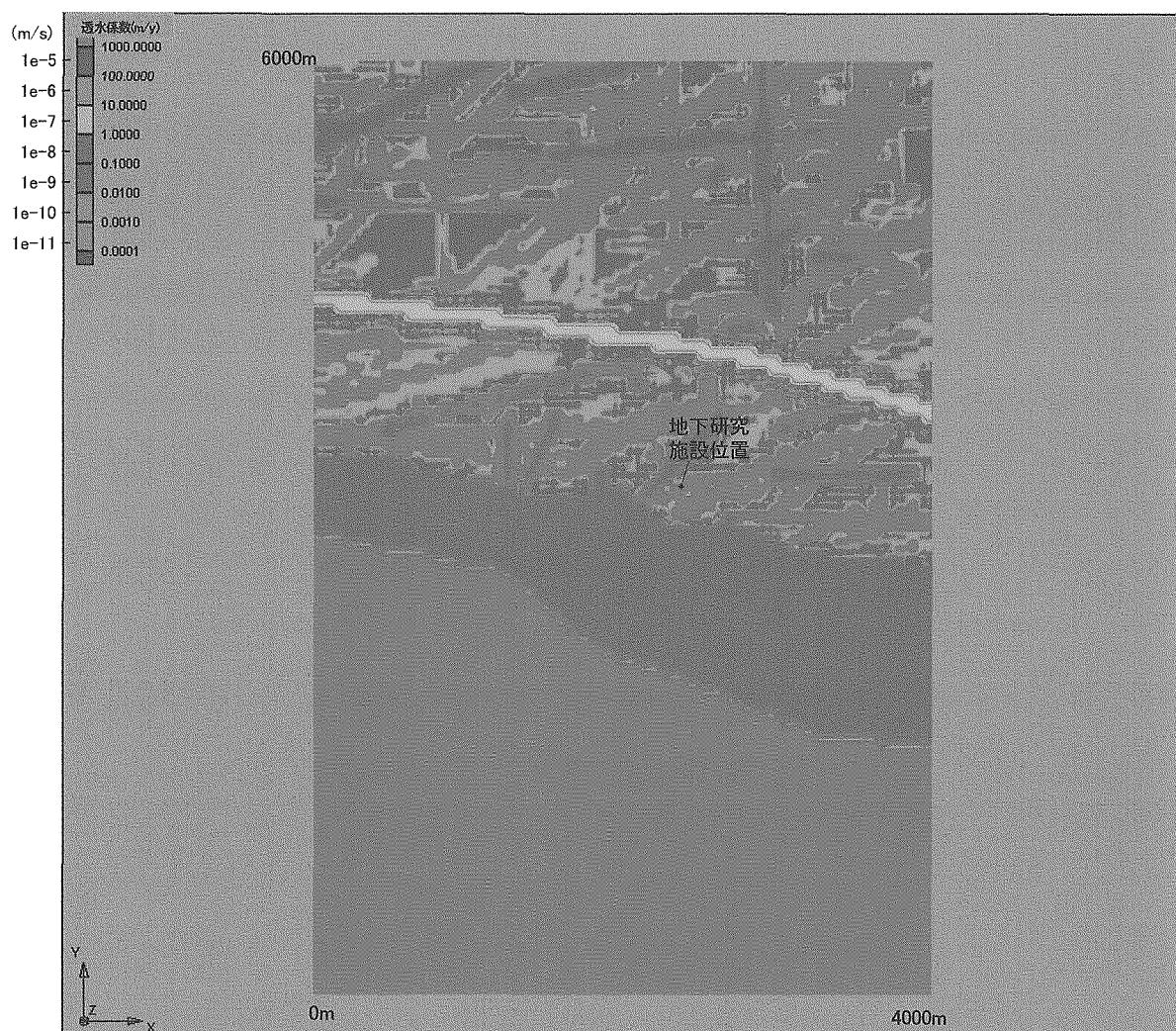


図 3.3.1-26 透水係数分布（水平断面：深度 400m、モデル 3-B）

モデル 3-B 稚内層健岩部 : $K=1E-10\text{m/s}$ 、深度依存性あり
割れ目帯の透水係数の設定法 : 相関回帰式
大曲断層 : $K=1E-6\text{m/s}$

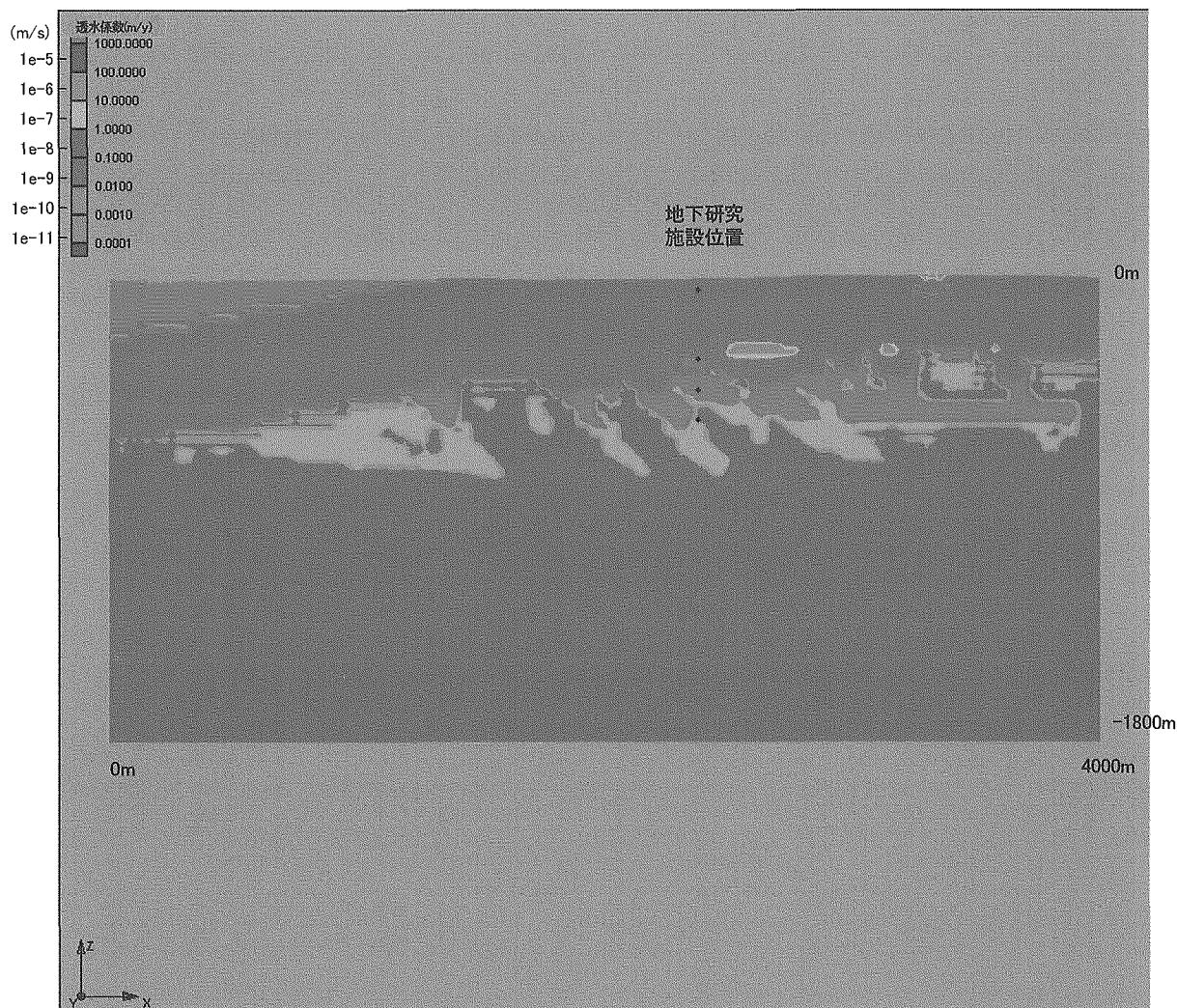


図 3.3.1-27 透水係数分布（地下施設位置を通る xz 鉛直断面、モデル 3-B）

モデル 3-B 稚内層健岩部 : $K=1E-10\text{m/s}$ 、深度依存性あり
 割れ目帯の透水係数の設定法 : 相関回帰式
 大曲断層 : $K=1E-6\text{m/s}$

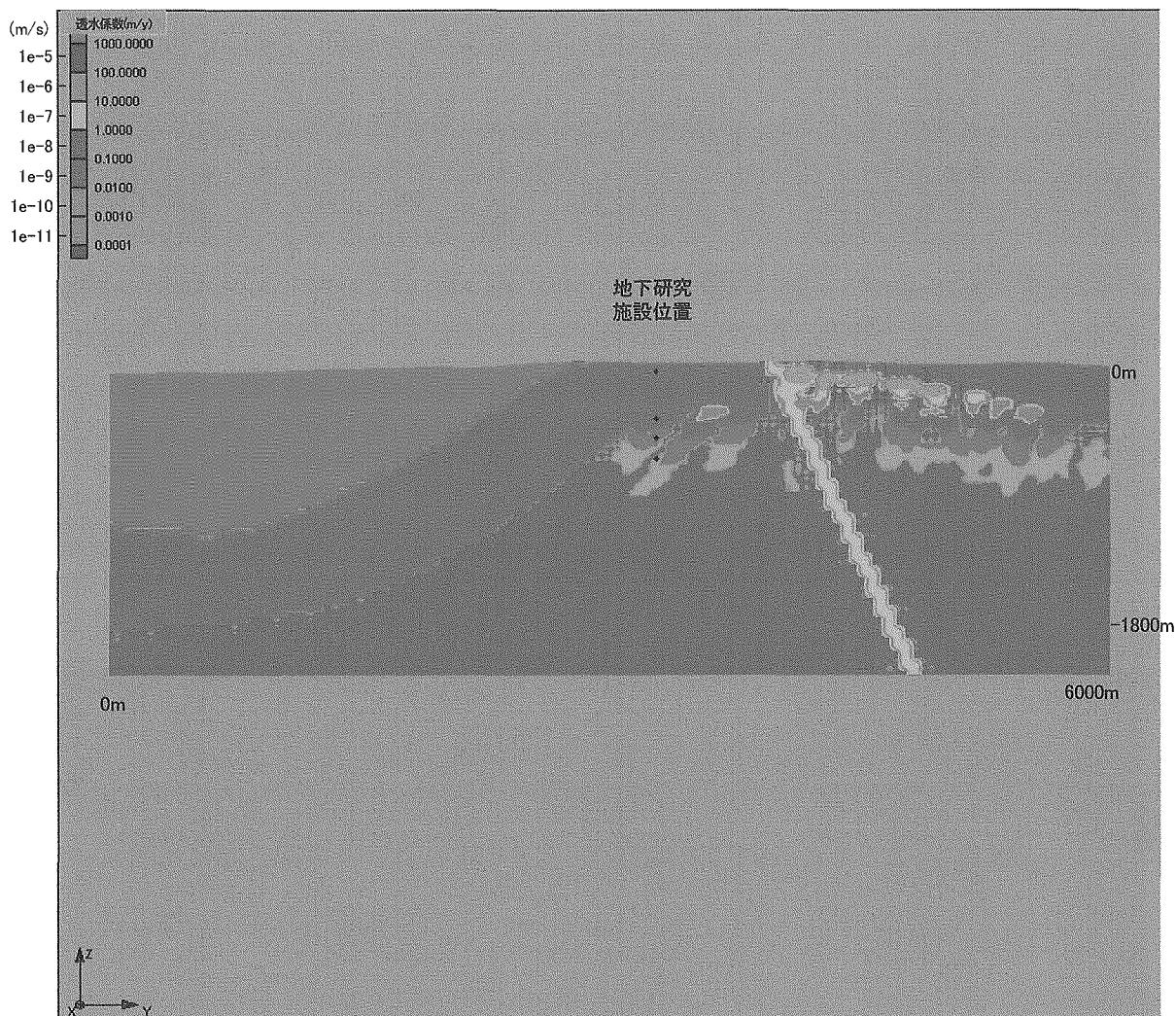


図 3.3.1-28 透水係数分布（地下施設位置を通る yz 鉛直断面、モデル 3-B）

モデル 3-B 稚内層健岩部 : $K=1E-10\text{m/s}$ 、深度依存性あり
 割れ目帯の透水係数の設定法 : 相関回帰式
 大曲断層 : $K=1E-6\text{m/s}$

(iv) モデル 4

前節までに述べた水理地質構造に対して、稚内層の透水性を深度によらず一定 ($1\text{E}-9\text{m/s}$) として設定し、これに対して図 3.3.1-4～図 3.3.1-10 に示した割れ目帯分布を加えることによって研究所設置領域の不均質透水係数場のモデルを作成した。結果を図 3.3.1-29～図 3.3.1-34 に示す。

深度 400m の水平断面を横断する黄色の曲線は大曲断層に対応しており、これに加えて、明緑色の直線的なオブジェクトとして表現された割れ目帯が高透水性領域として分布している。また、この断面の中央部分を横断する明緑色の帯は声間層である。

モデル 4 では、稚内層健岩部の透水性が $1\text{E}-9\text{m/s}$ で一定であるのに対して、割れ目帯の透水性は深度とともに減少するため、500m 程度以深では割れ目帯と健岩部との間の差異はほとんど見られない。なお、深度依存性のモデルをそのまま適用した場合、健岩部よりも割れ目帯のほうが透水性が低くなると言う逆転現象が生じるが、本解析では、常に割れ目帯の透水性は健岩部と同等かそれ以上と仮定した。



図 3.3.1-29 透水係数分布（水平断面：深度 400m、モデル 4-A）

モデル 4-A 稚内層健岩部： $K=1\text{E}-9\text{m/s}$ 、深度依存性なし
 割れ目帯の透水係数の設定法： ブーストトラッピング
 大曲断層： $K=1\text{E}-6\text{m/s}$

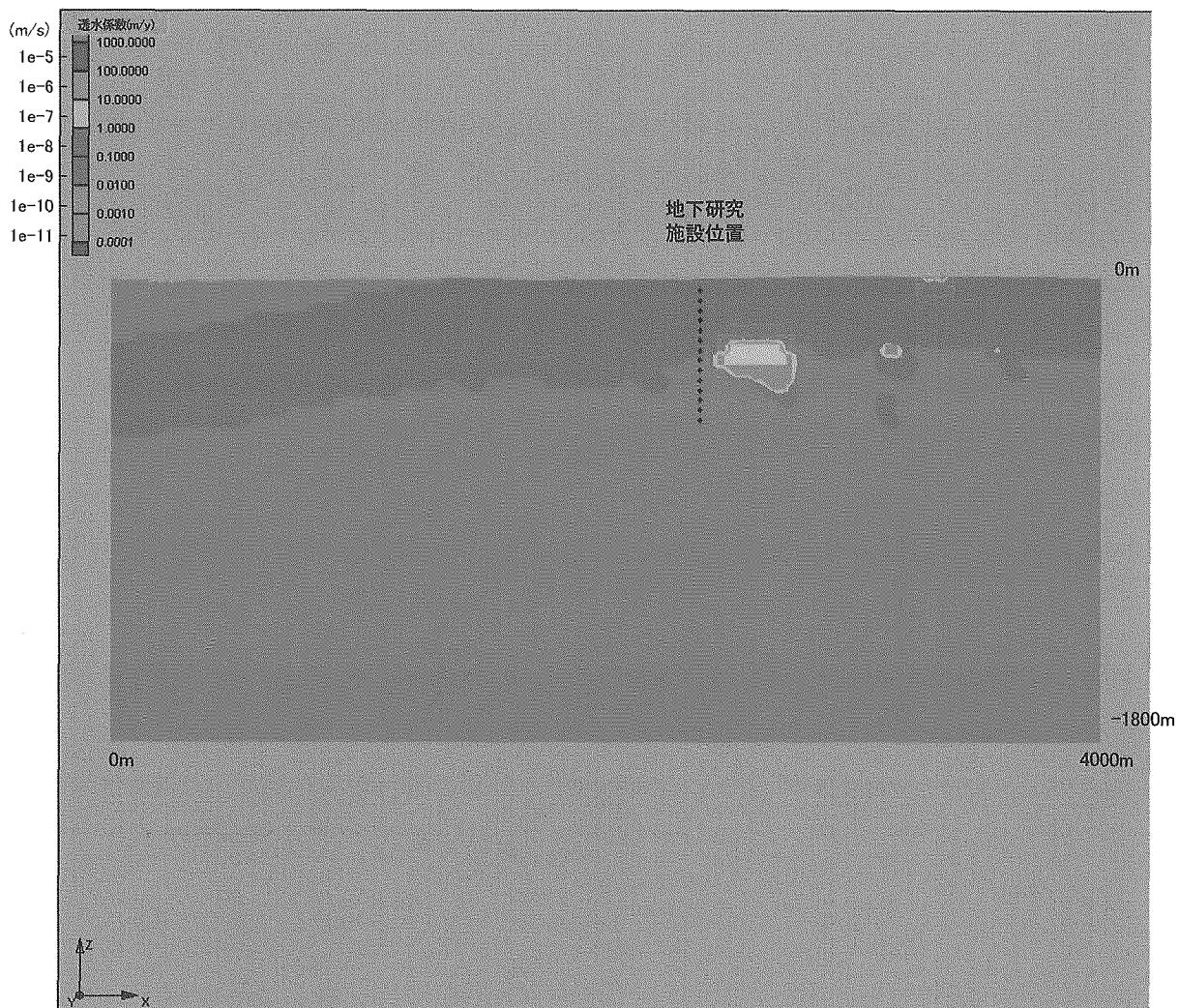


図 3.3.1-30 透水係数分布（地下施設位置を通る xz 鉛直断面、モデル 4-A）

モデル 4-A 稚内層健岩部 : $K=1E-9\text{m/s}$ 、深度依存性なし
 割れ目帯の透水係数の設定法 : ブーツストラッピング
 大曲断層 : $K=1E-6\text{m/s}$

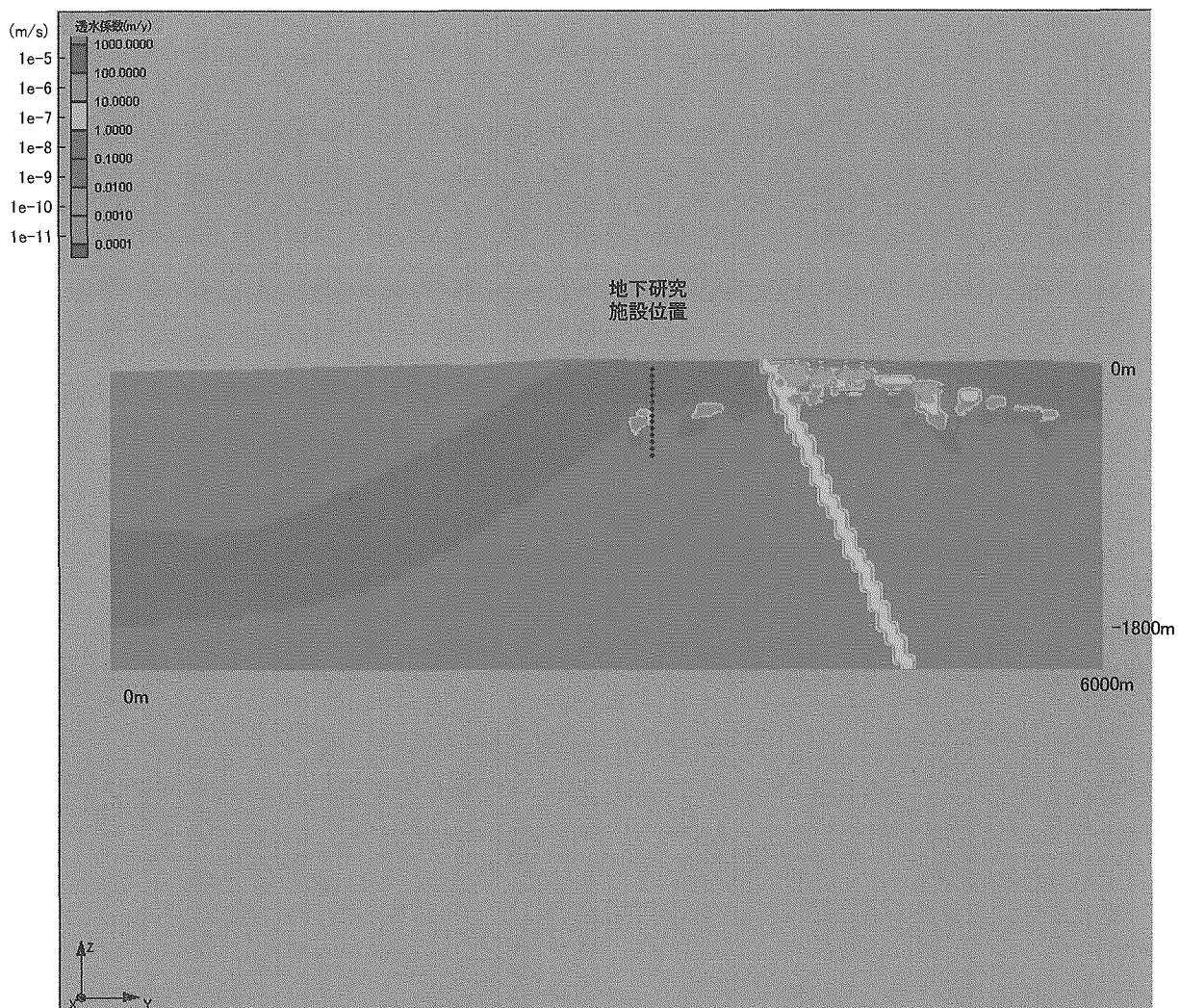


図 3.3.1-31 透水係数分布（地下施設位置を通る yz 鉛直断面、モデル 4-A）

モデル 4-A 稚内層健岩部 : $K=1E-9\text{m/s}$ 、深度依存性なし
 割れ目帯の透水係数の設定法 : ブーツストラッピング
 大曲断層 : $K=1E-6\text{m/s}$

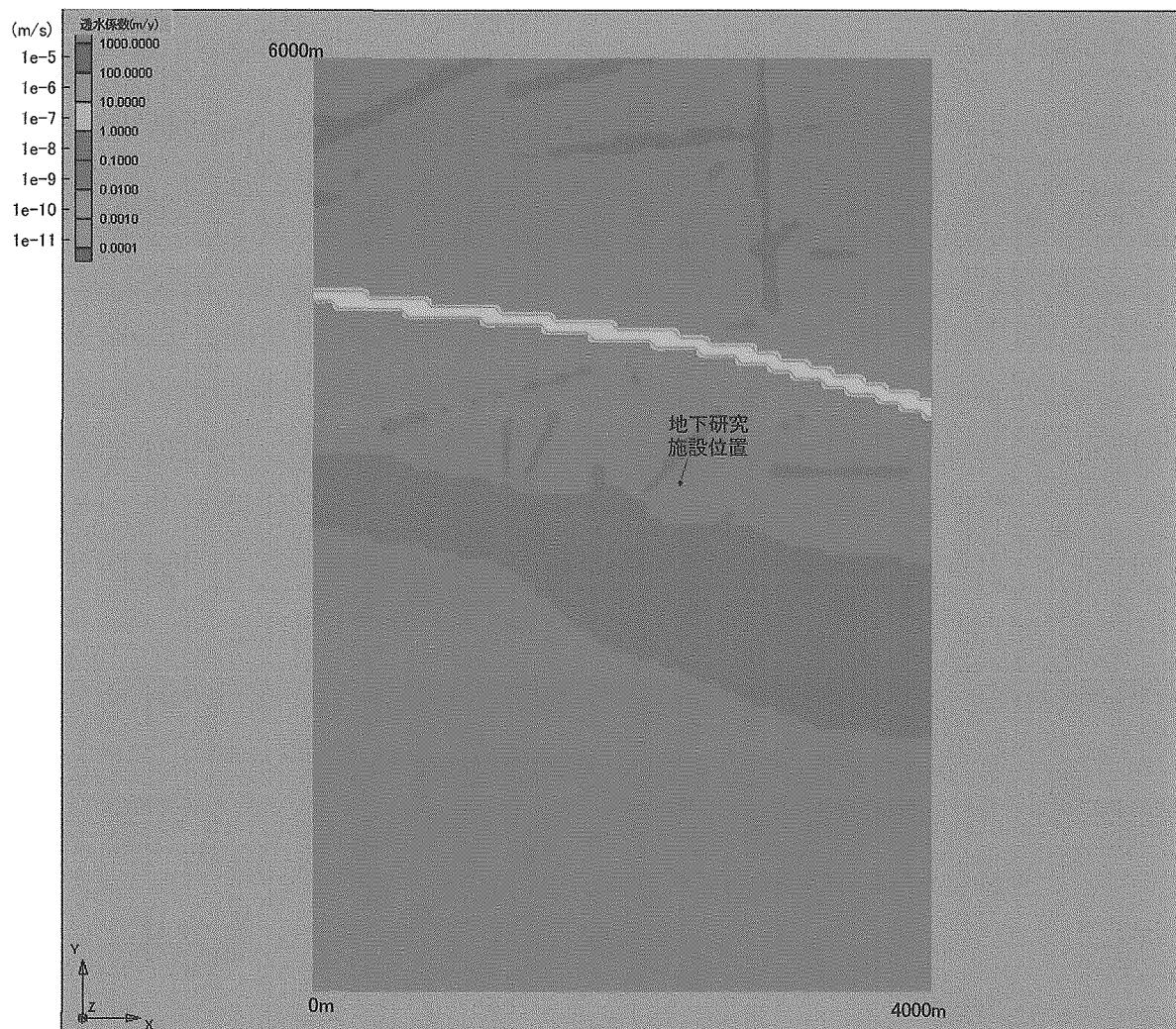


図 3.3.1-32 透水係数分布（水平断面：深度 400m、モデル 4-B）

モデル 4-B 稚内層健岩部 : $K=1E-9\text{m/s}$ 、深度依存性なし
 割れ目帯の透水係数の設定法 : 相関回帰式
 大曲断層 : $K=1E-6\text{m/s}$

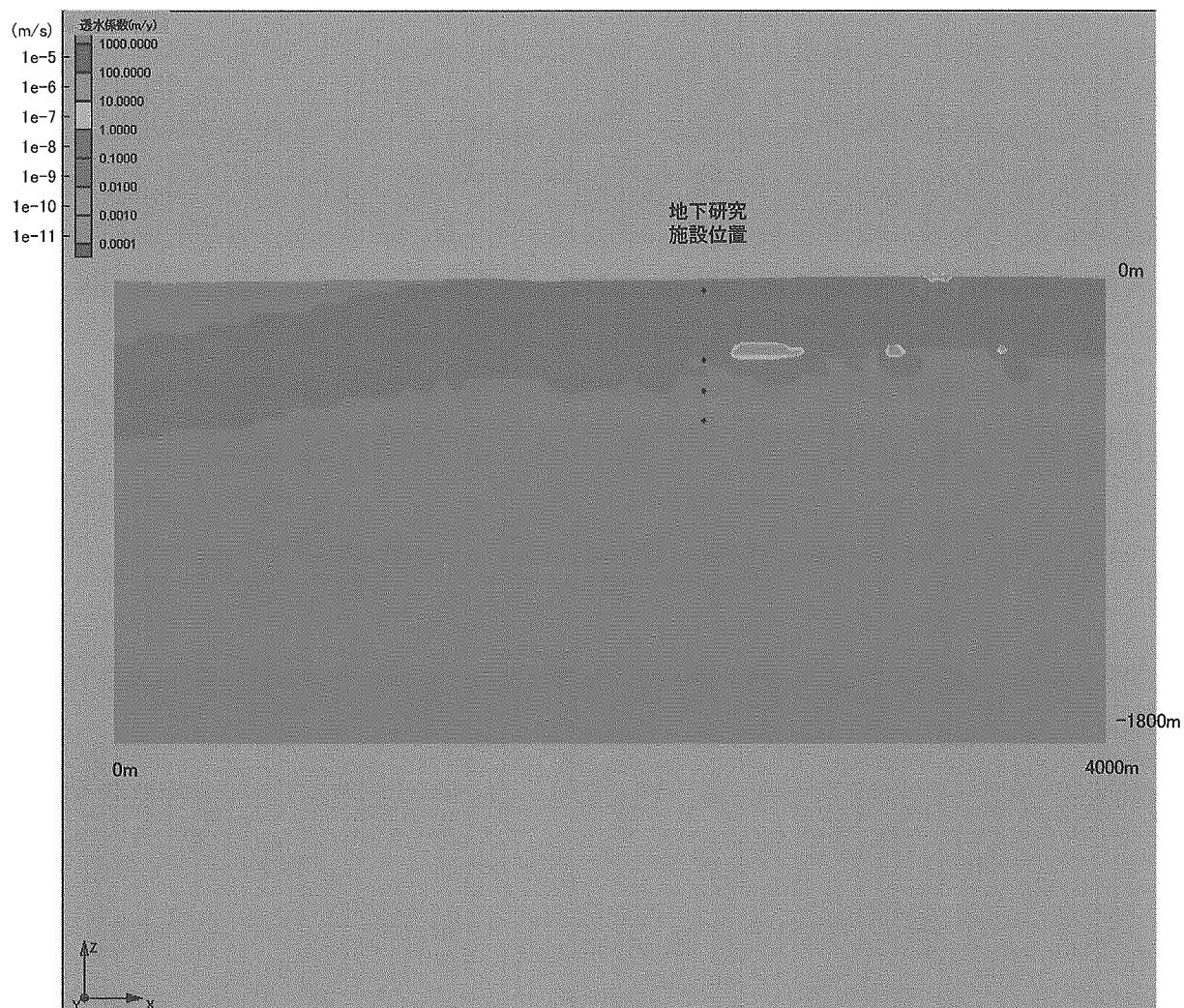


図 3.3.1-33 透水係数分布（地下施設位置を通る xz 鉛直断面、モデル 4-B）

モデル 4-B 稚内層健岩部 : $K=1E-9\text{m/s}$ 、深度依存性なし
 割れ目帯の透水係数の設定法 : 相関回帰式
 大曲断層 : $K=1E-6\text{m/s}$

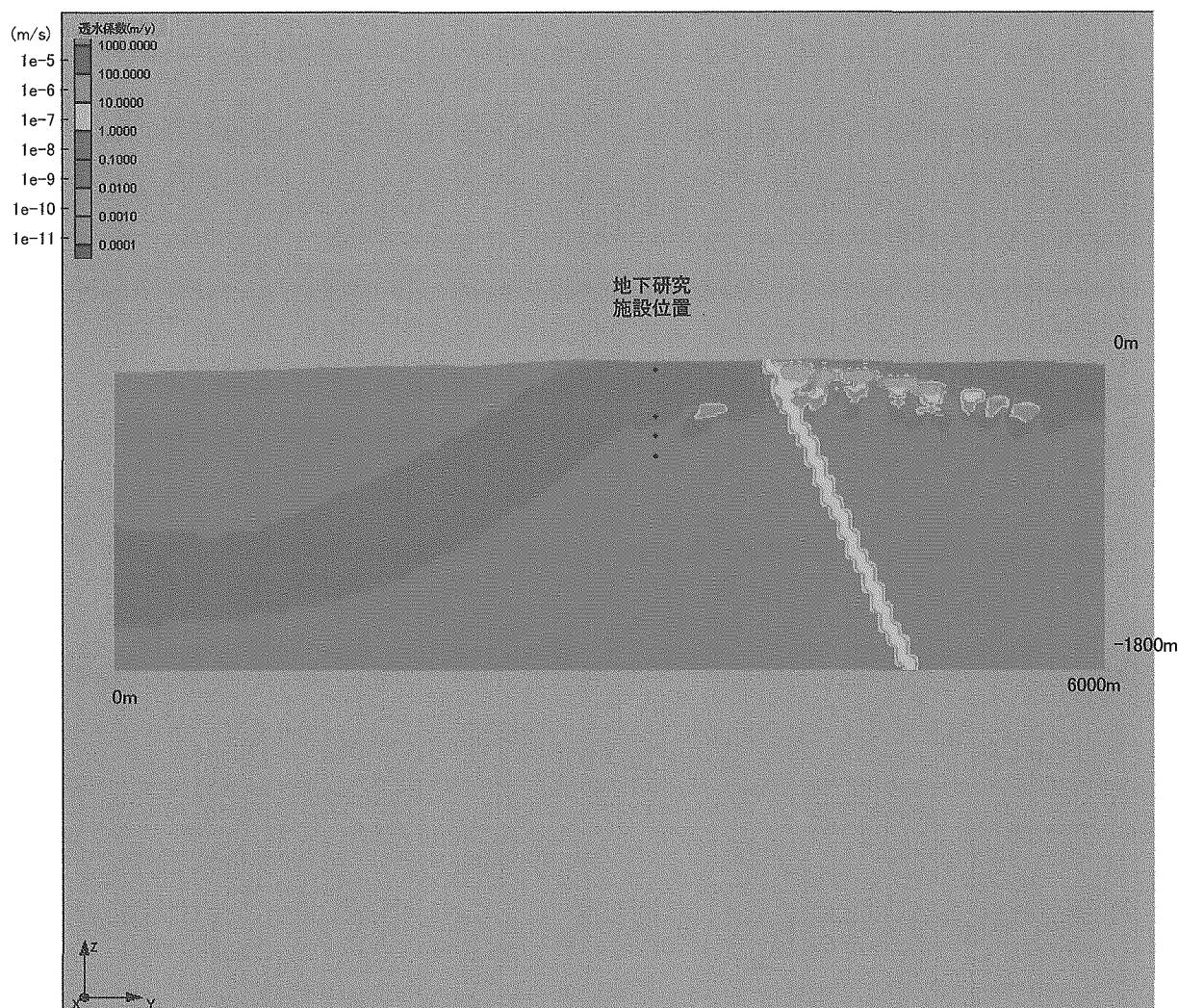


図 3.3.1-34 透水係数分布（地下施設位置を通る yz 鉛直断面、モデル 4-B）

モデル 4-B 稚内層健岩部 : $K=1E-9\text{m/s}$ 、深度依存性なし
 割れ目帯の透水係数の設定法 : 相関回帰式
 大曲断層 : $K=1E-6\text{m/s}$

(v) モデル 5

前節までに述べた水理地質構造に対して、稚内層の透水性を深度によらず一定 ($1\text{E}-8\text{m/s}$) として設定し、これに対して図 3.3.1-4～図 3.3.1-10 に示した割れ目帯分布を加えることによって研究所設置領域の不均質透水係数場のモデルを作成した。結果を図 3.3.1-35～図 3.3.1-40 に示す。

深度 400m の水平断面を横断する黄色の曲線は大曲断層に対応している。ただし、稚内層健岩部の透水性が声問層や割れ目帯とほぼ同程度であることから、これらを識別することは出来ない。また、鉛直断面においても割れ目帯の透水性は稚内層健岩部や声問層とほぼ同程度である。なお、深度依存性のモデルをそのまま適用した場合、健岩部よりも割れ目帯のほうが透水性が低くなると言う逆転現象が生じるが、本解析では、常に割れ目帯の透水性は健岩部と同等かそれ以上と仮定した。

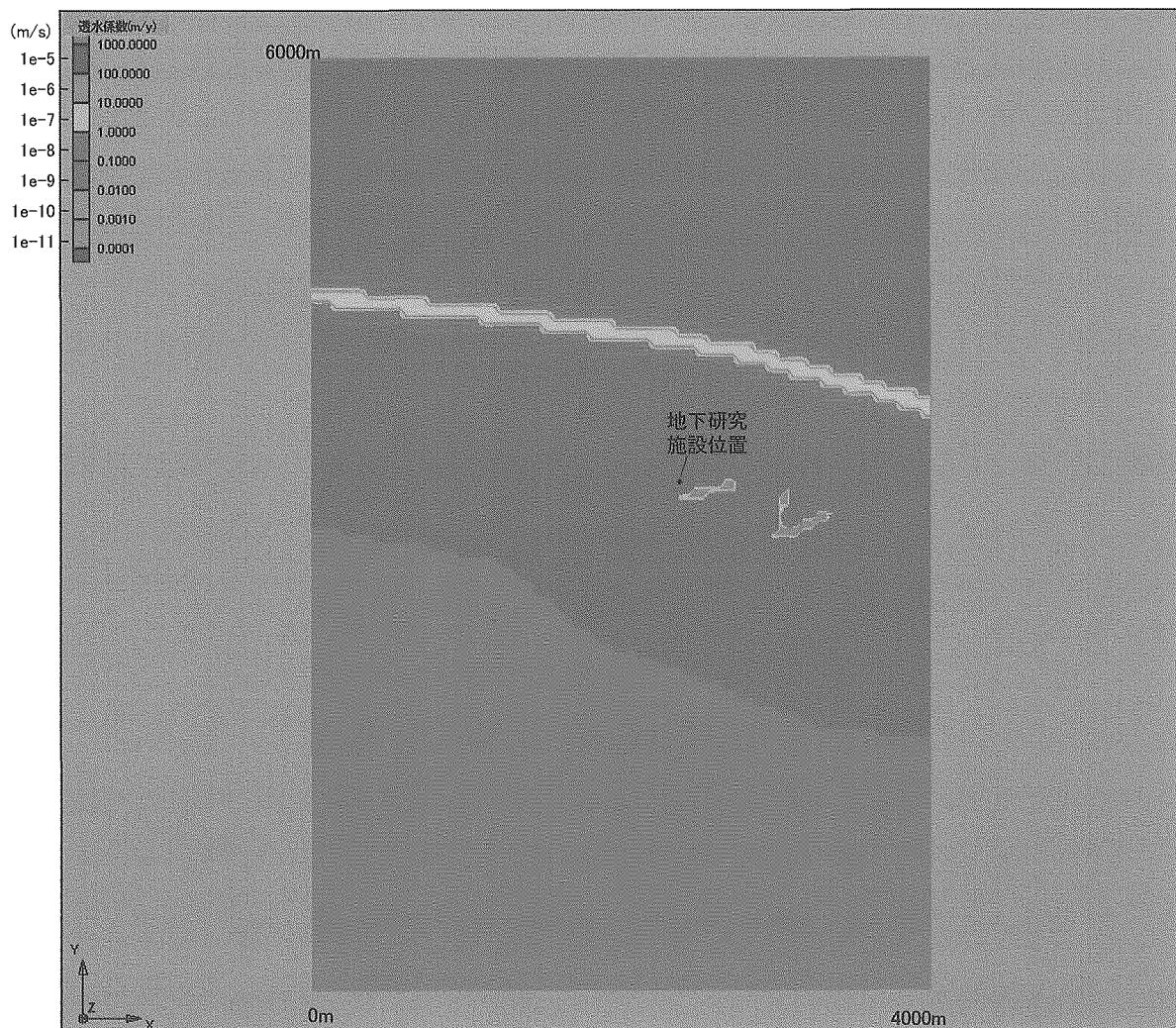


図 3.3.1-35 透水係数分布（水平断面：深度 400m、モデル 5-A）

モデル 5-A 稚内層健岩部 : $K=1\text{E}-8\text{m/s}$ 、深度依存性なし
割れ目帯の透水係数の設定法 : ブーツストラッピング
大曲断層 : $K=1\text{E}-6\text{m/s}$

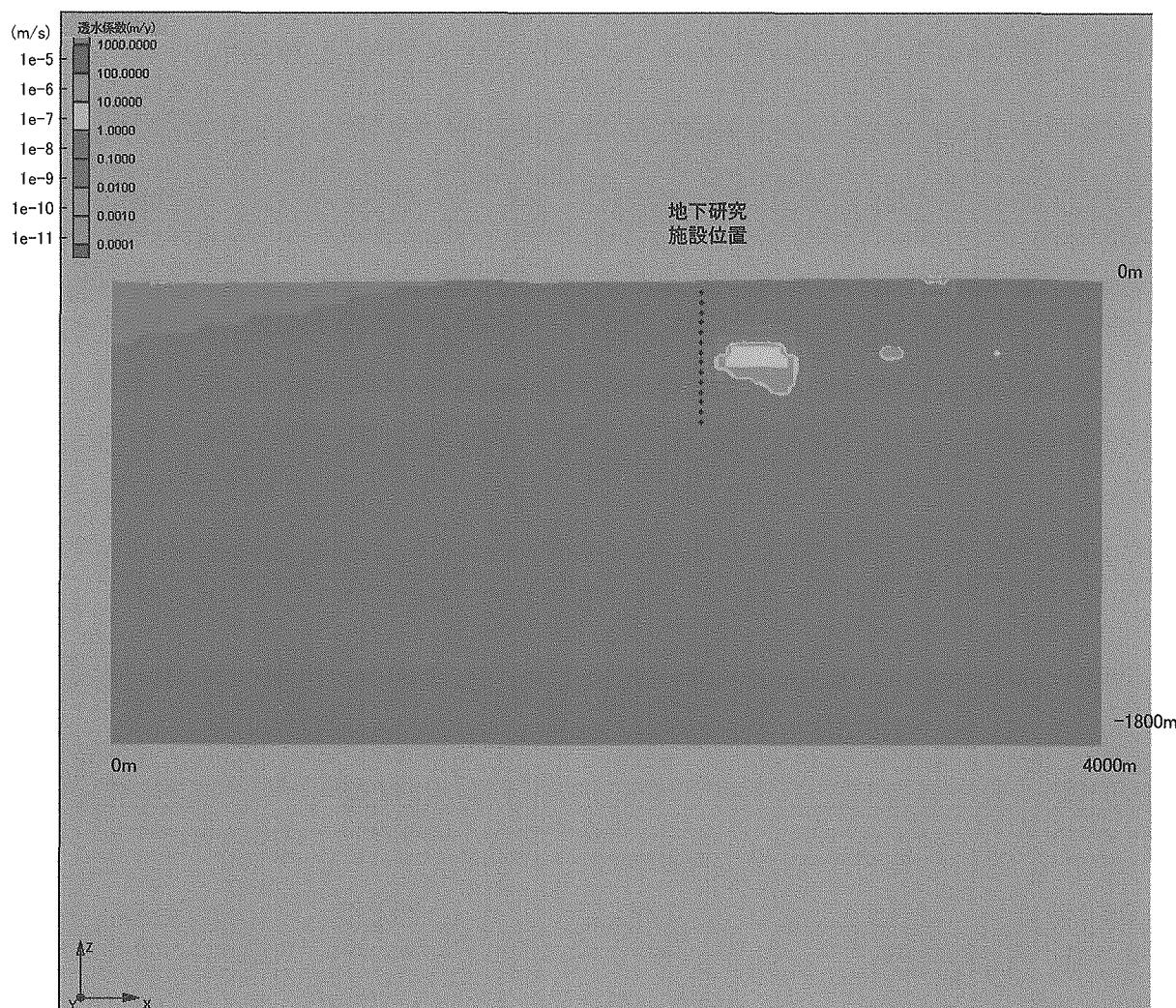


図 3.3.1-36 透水係数分布（地下施設位置を通る xz 鉛直断面、モデル 5-A）

モデル 5-A 稚内層健岩部 : $K=1E-8\text{m/s}$ 、深度依存性なし
 割れ目帯の透水係数の設定法 : ブーツストラッピング
 大曲断層 : $K=1E-6\text{m/s}$

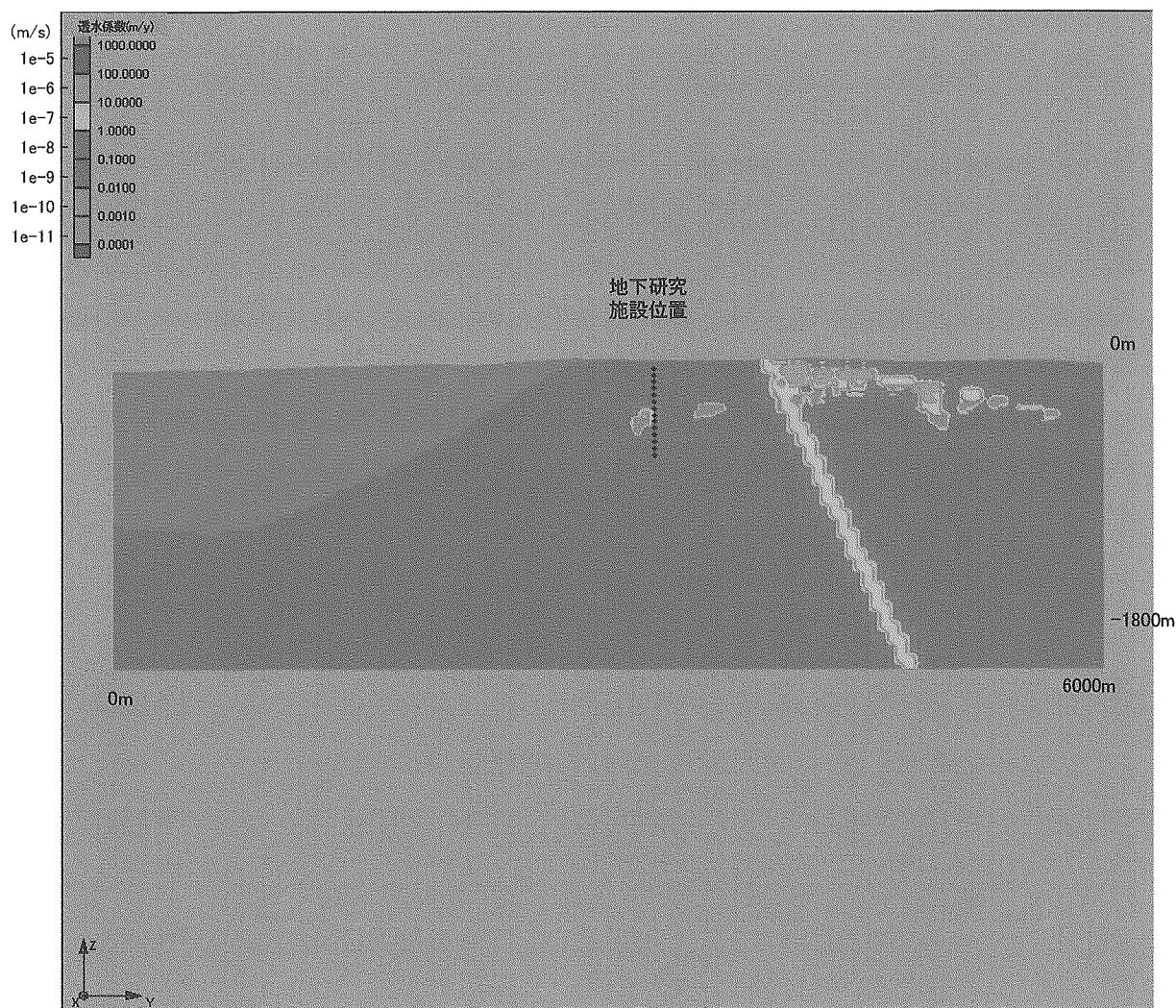


図 3.3.1-37 透水係数分布（地下施設位置を通る yz 鉛直断面、モデル 5-A）

モデル 5-A 稚内層健岩部 : $K=1E-8\text{m/s}$ 、深度依存性なし
 割れ目帯の透水係数の設定法 : ブーツストラッピング
 大曲断層 : $K=1E-6\text{m/s}$

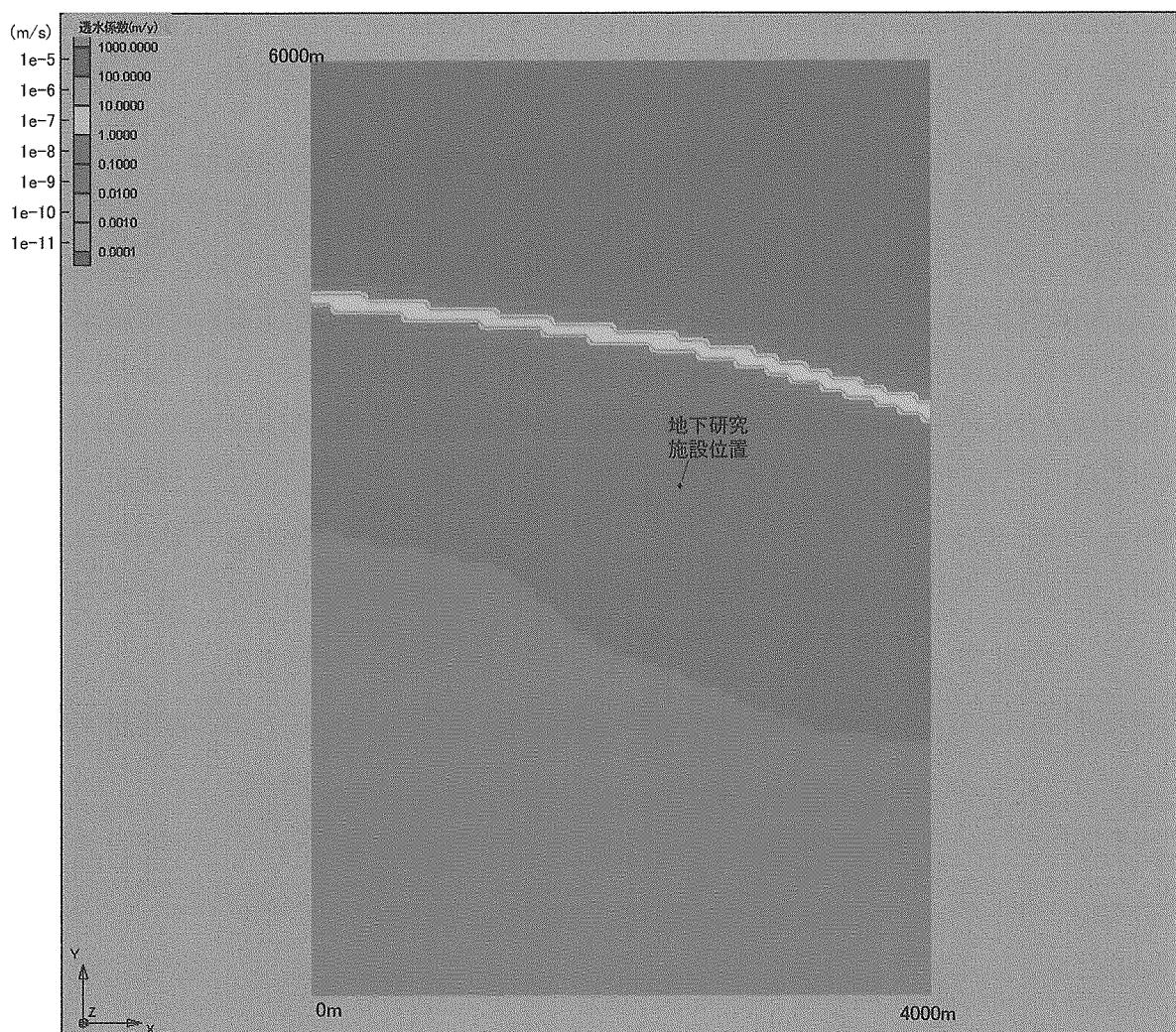


図 3.3.1-38 透水係数分布（水平断面：深度 400m、モデル 5-B）

モデル 5-B 稚内層健岩部 : $K=1E-8\text{m/s}$ 、深度依存性なし
割れ目帯の透水係数の設定法 : 相関回帰式
大曲断層 : $K=1E-6\text{m/s}$

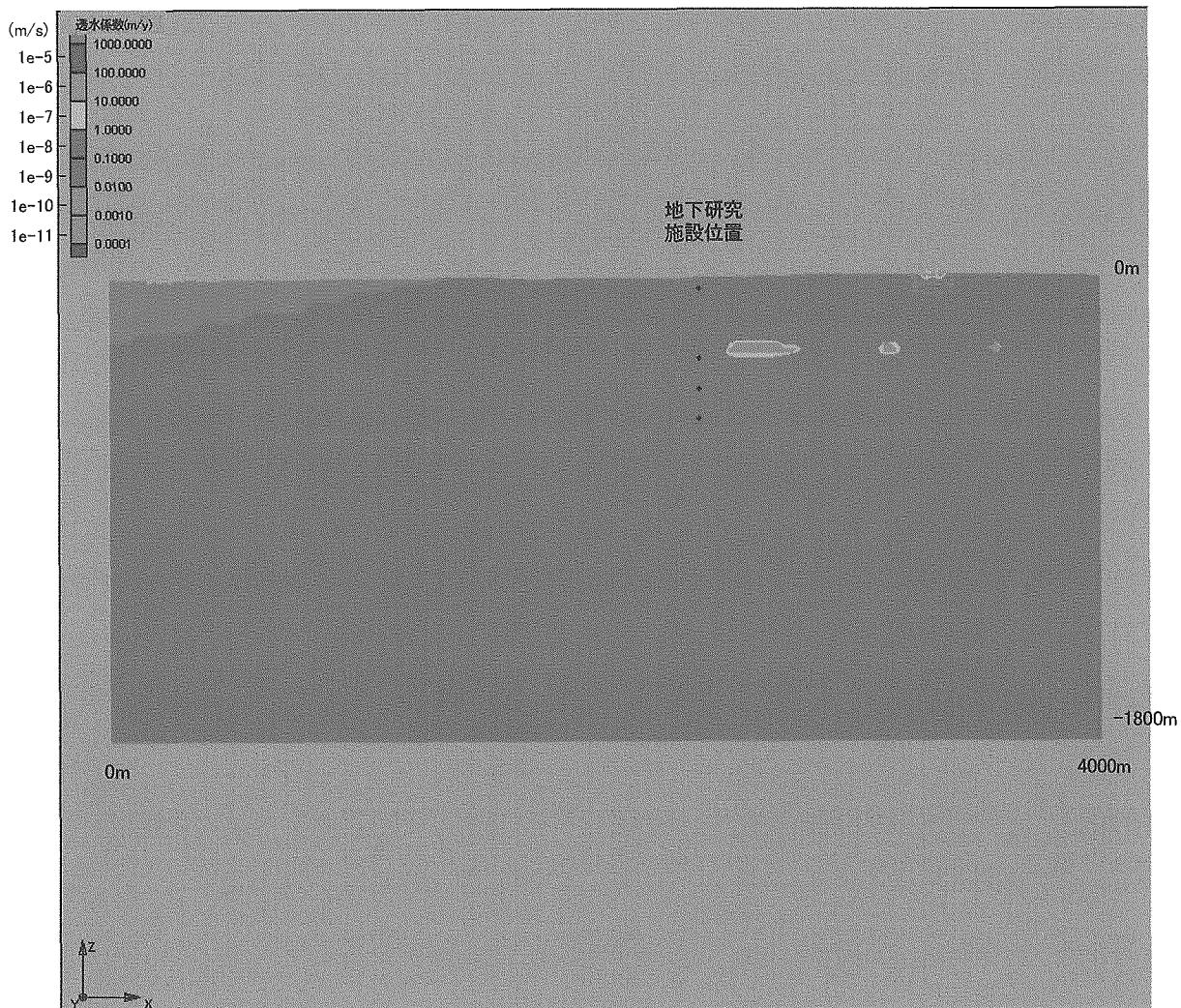


図 3.3.1-39 透水係数分布（地下施設位置を通る xz 鉛直断面、モデル 5-B）

モデル 5-B 稚内層健岩部 : $K=1E-8\text{m/s}$ 、深度依存性なし
 割れ目帯の透水係数の設定法 : 相関回帰式
 大曲断層 : $K=1E-6\text{m/s}$

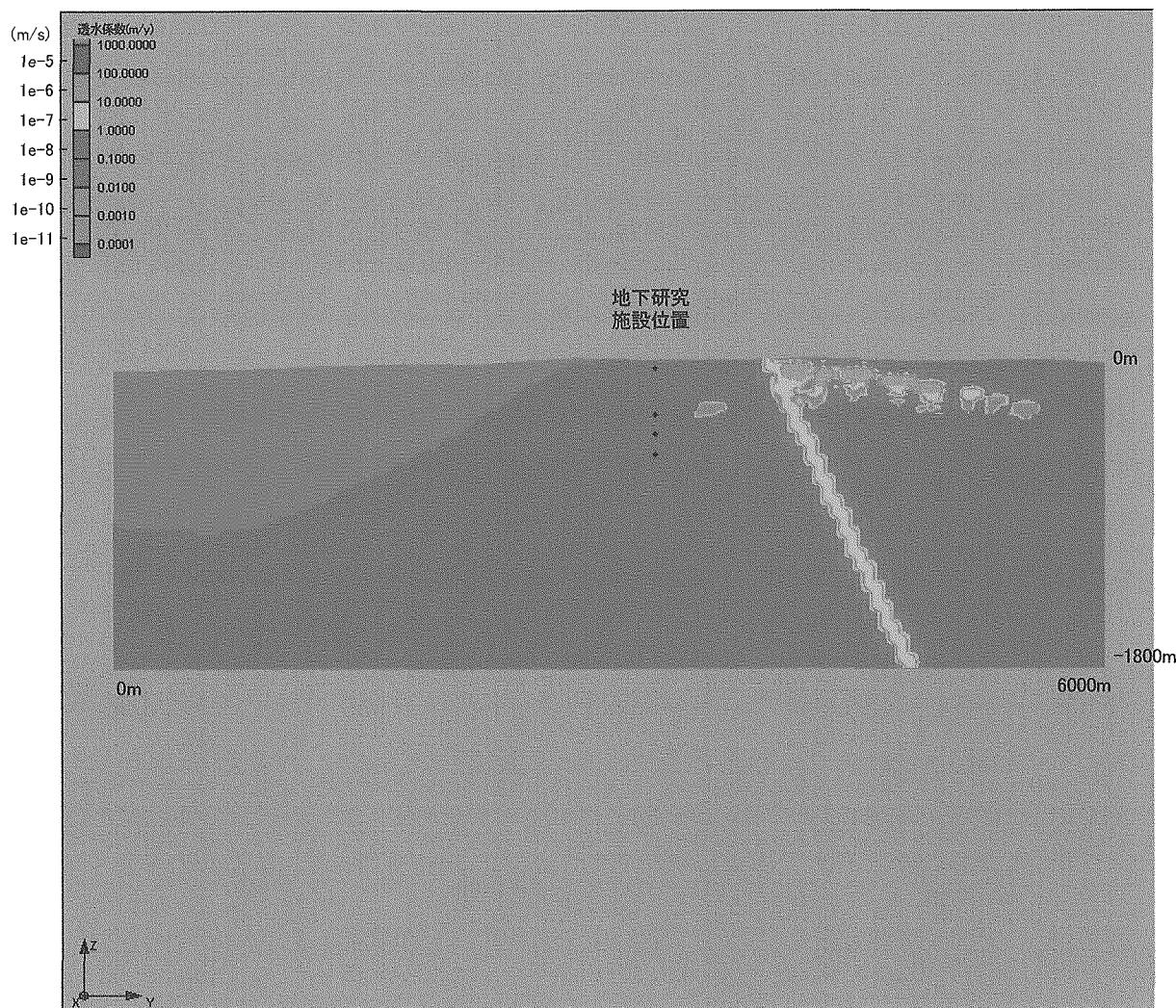


図 3.3.1-40 透水係数分布（地下施設位置を通るyz 鉛直断面、モデル 5-B）

モデル 5-B 稚内層健岩部 : $K=1E-8\text{m/s}$ 、深度依存性なし
 割れ目帯の透水係数の設定法 : 相関回帰式
 大曲断層 : $K=1E-6\text{m/s}$

(vi) モデル 6

前節までに述べた水理地質構造に対して、稚内層の透水性を深度によらず一定 ($1E-10 \text{ m/s}$) として設定し、これに対して図 3.3.1-4～図 3.3.1-10 に示した割れ目帯分布を加えることによって研究所設置領域の不均質透水係数場のモデルを作成した。当該モデルの透水係数分布を図 3.3.1-41～図 3.3.1-46 に示す。

深度 400m の水平断面を横断する黄色の曲線は大曲断層に対応しており、これに加えて、明緑色の直線的なオブジェクトとして表現された割れ目帯が高透水性領域として分布している。また、この断面の中央部分を横断する明緑色の帯は声間層である。

モデル 6 では、稚内層健岩部の透水性が $1E-10 \text{ m/s}$ で一定であるのに対して、割れ目帯の透水性は深度とともに減少するため、深部では割れ目帯と健岩部との間の差異はほとんど見られない。なお、深度依存性のモデルをそのまま適用した場合、健岩部よりも割れ目帯のほうが透水性が低くなると言う逆転現象が生じるが、本解析では、常に割れ目帯の透水性は健岩部と同等かそれ以上と仮定した。

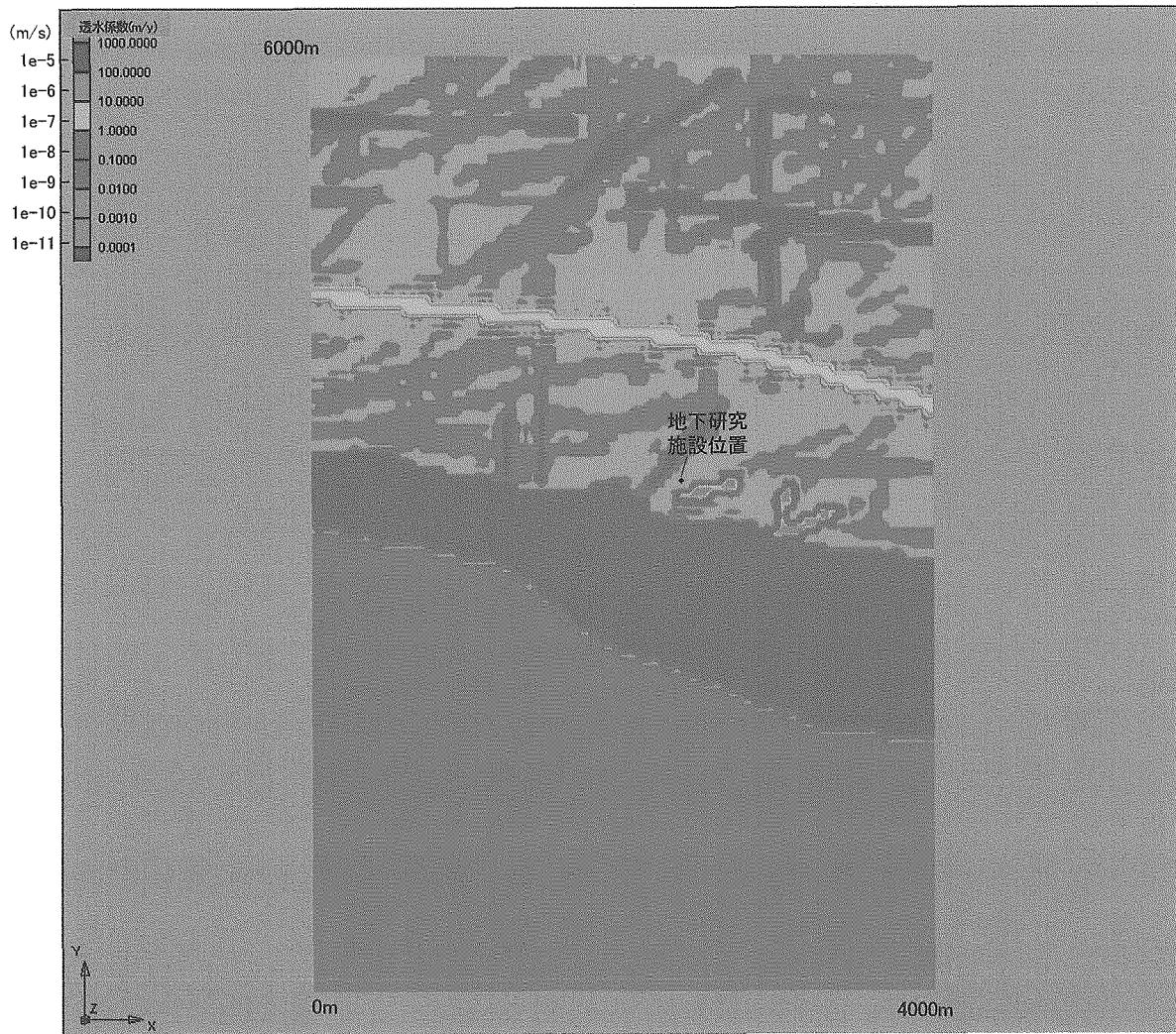


図 3.3.1-41 透水係数分布（水平断面：深度 400m、モデル 6-A）

モデル 6-A 稚内層健岩部 : $K=1E-10 \text{ m/s}$ 、深度依存性なし
割れ目帯の透水係数の設定法 : ブーツストラッピング
大曲断層 : $K=1E-6 \text{ m/s}$

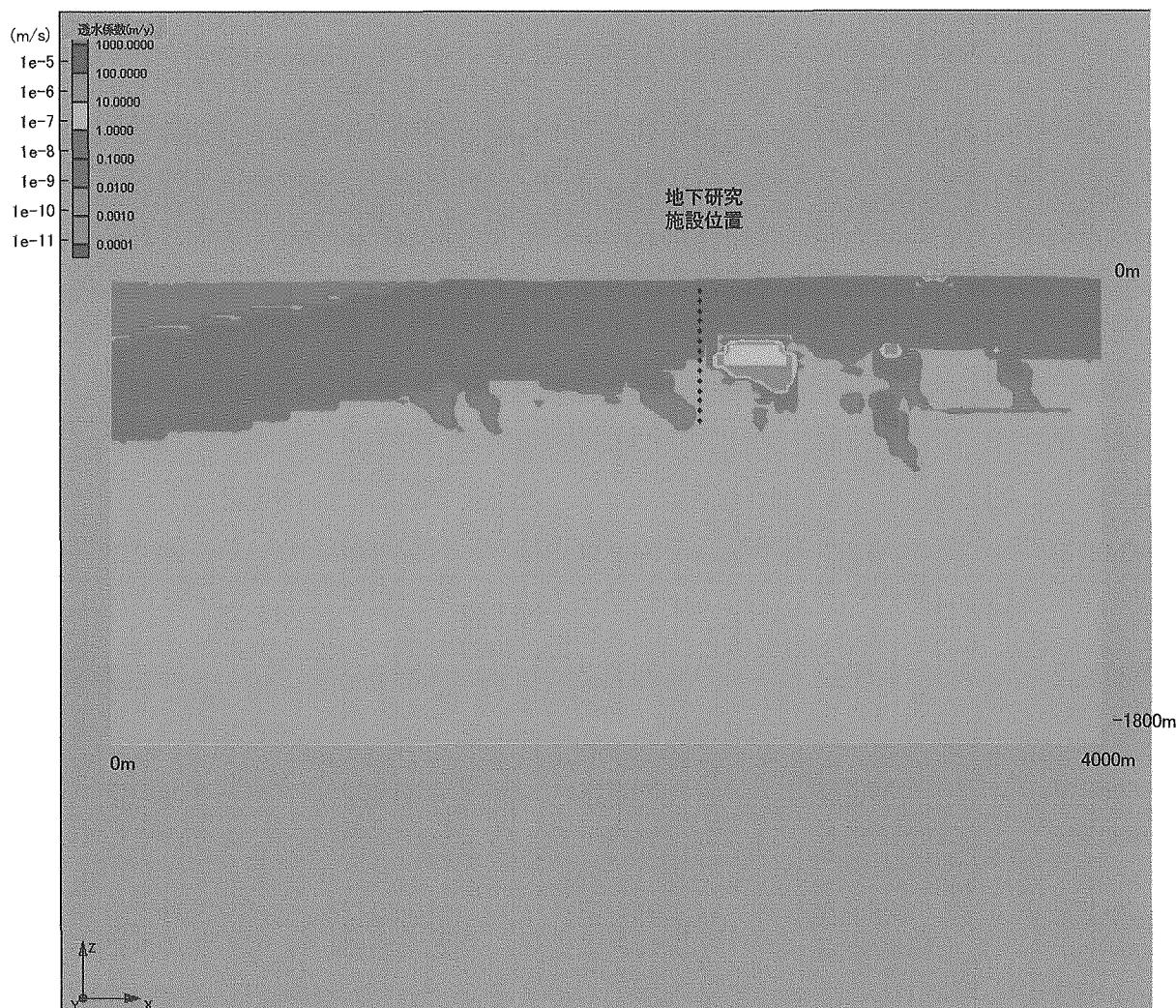


図 3.3.1-42 透水係数分布（地下施設位置を通る xz 鉛直断面、モデル 6-A）

モデル 6-A 稚内層健岩部 : $K=1E-10\text{m/s}$ 、深度依存性なし
 割れ目帯の透水係数の設定法 : ブーストランピング
 大曲断層 : $K=1E-6\text{m/s}$

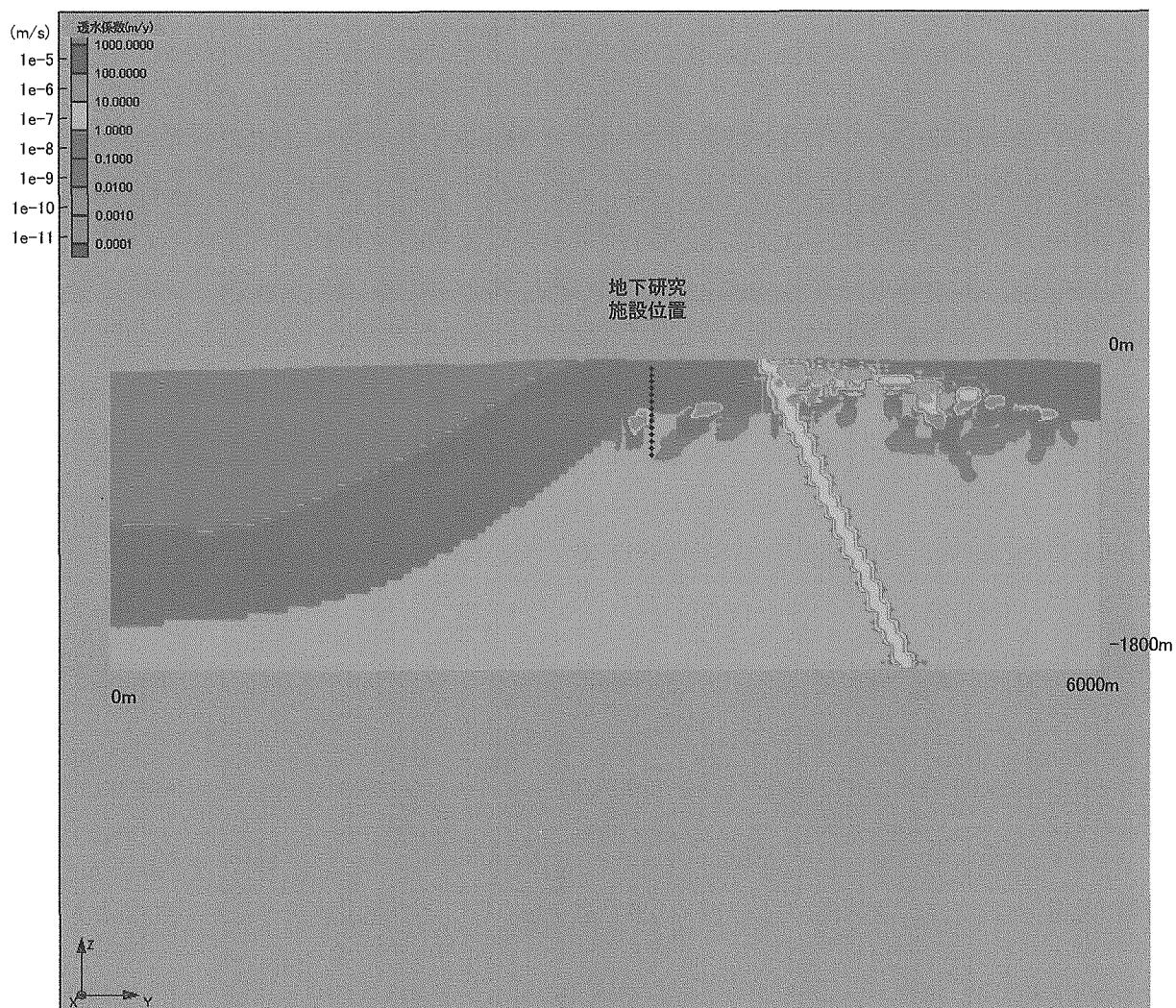


図 3.3.1-43 透水係数分布（地下施設位置を通る yz 鉛直断面、モデル 6-A）

モデル 6-A 稚内層健岩部 : $K=1E-10m/s$ 、深度依存性なし
 割れ目帯の透水係数の設定法 : ブーツストラッピング
 大曲断層 : $K=1E-6m/s$

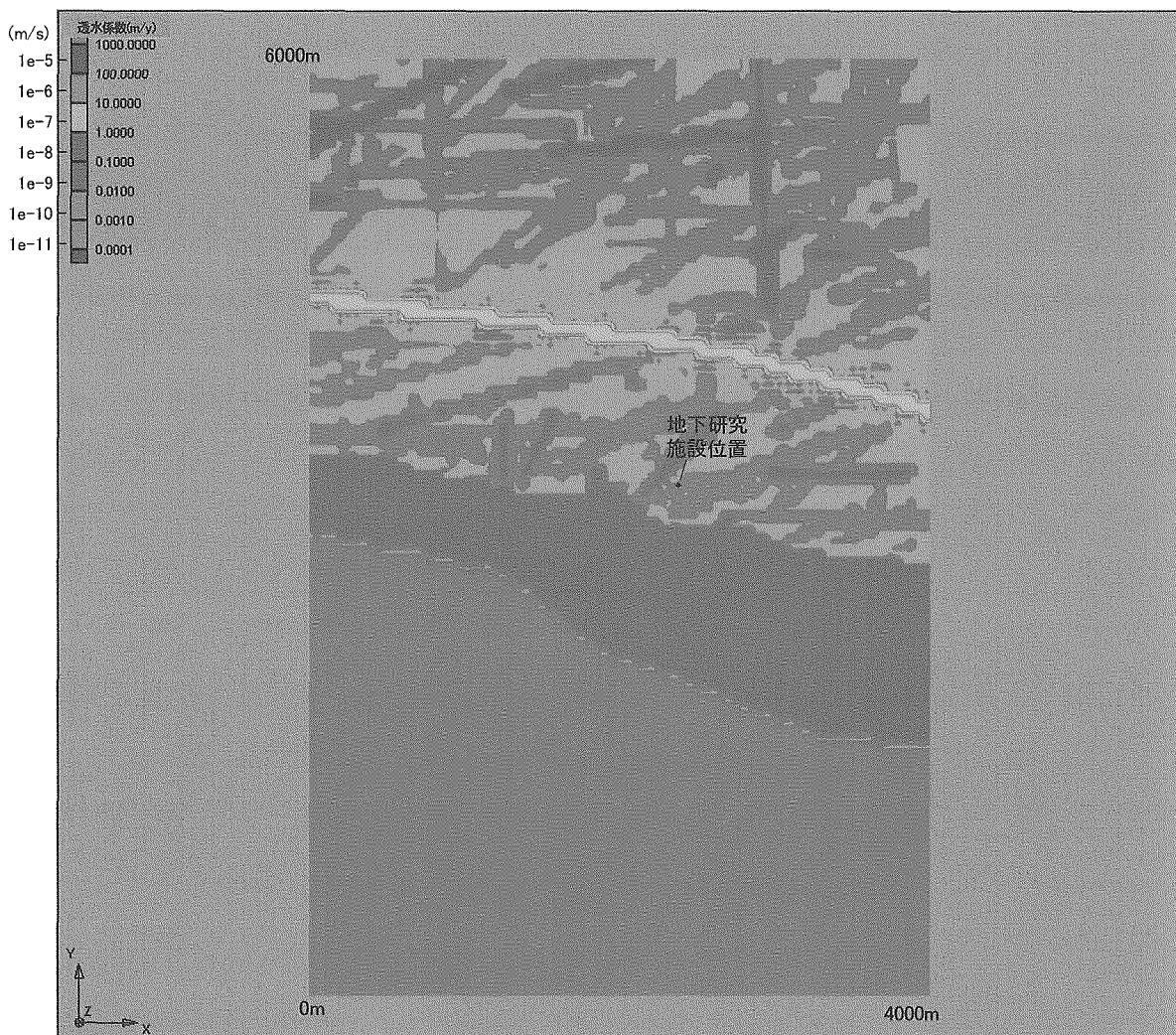


図 3.3.1-44 透水係数分布（水平断面：深度 400m、モデル 6-B）

モデル 6-B 稚内層健岩部 : $K=1E-10\text{m/s}$ 、深度依存性なし
割れ目帶の透水係数の設定法 : 相関回帰式
大曲断層 : $K=1E-6\text{m/s}$

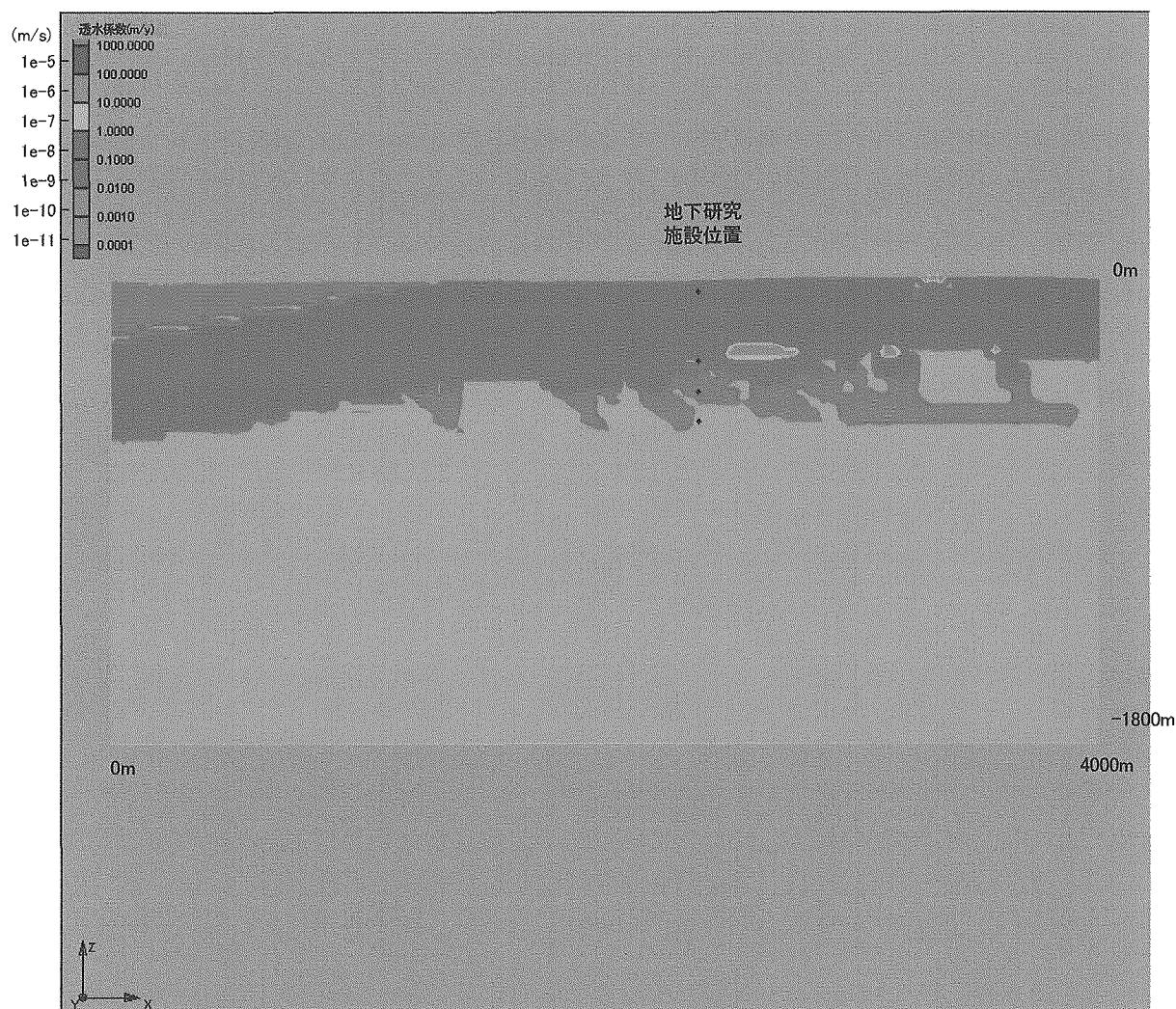


図 3.3.1-45 透水係数分布（地下施設位置を通る XZ 鉛直断面、モデル 6-B）

モデル 6-B 稚内層健岩部 : $K=1E\cdot10\text{m/s}$ 、深度依存性なし
割れ目帯の透水係数の設定法 : 相関回帰式
大曲断層 : $K=1E\cdot6\text{m/s}$

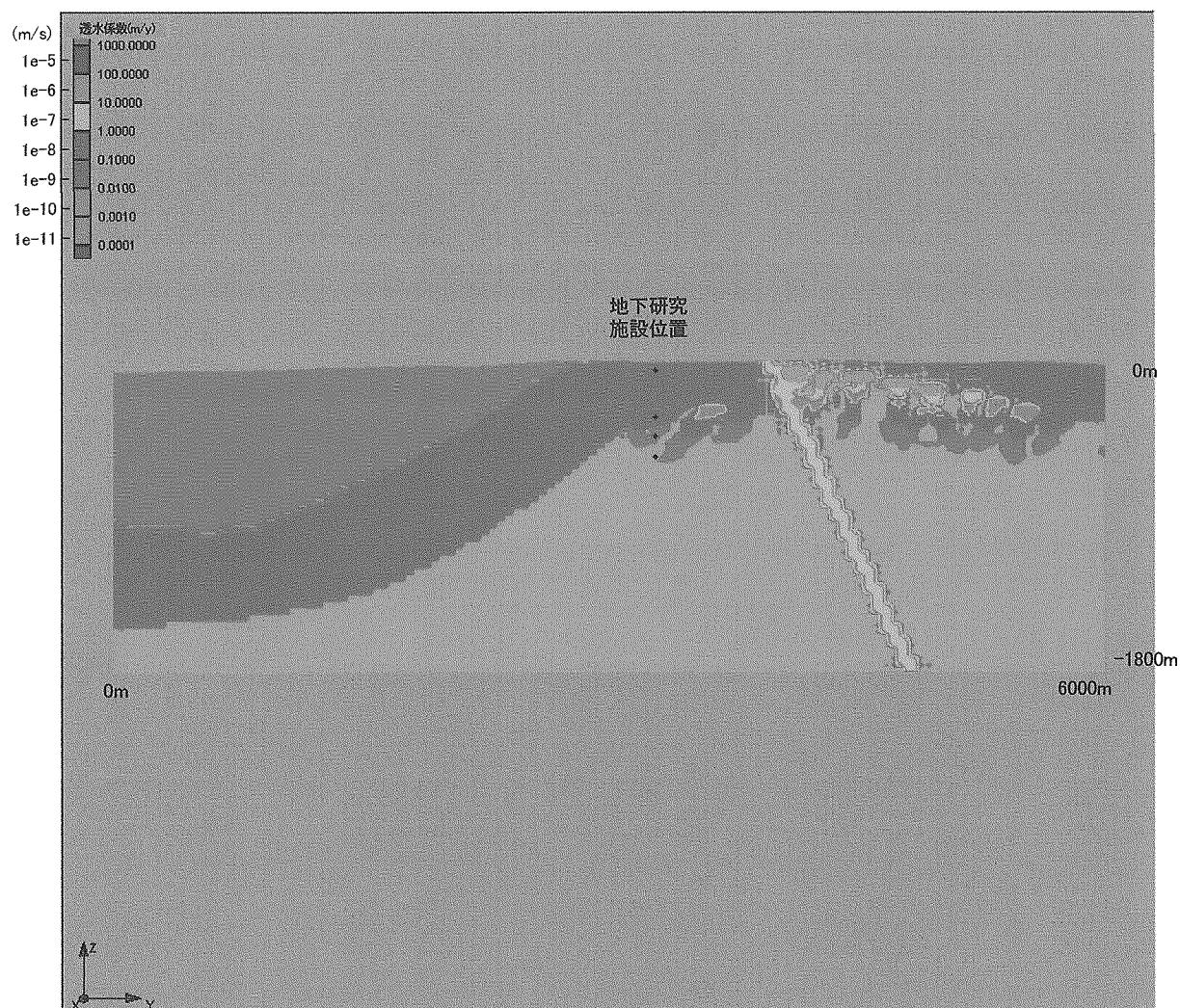


図 3.3.1-46 透水係数分布（地下施設位置を通る yz 鉛直断面、モデル 6-B）

モデル 6-B 稚内層健岩部 : $K=1E-10\text{m/s}$ 、深度依存性なし
 割れ目帯の透水係数の設定法 : 相関回帰式
 大曲断層 : $K=1E-6\text{m/s}$

(vii) モデル 7

前節までに述べた水理地質構造に対して、稚内層の深度依存性を考慮して透水係数を割り当て、さらに図 3.3.1-4～図 3.3.1-10 に示した割れ目帯分布を加えることによって研究所設置領域の不均質透水係数場のモデルを作成した。結果を図 3.3.1-47～図 3.3.1-52 に示す。

このモデルでは、大曲断層は遮水性であると仮定しているために、深度 400m の水平断面を横断する青色の曲線として表現されている。ただし、この断層と交差する割れ目帯（明緑色の直線的なオブジェクト）は断層以上の透水性を有しており、交差部はこれらの割れ目の透水性によって支配されるものと仮定したため、遮水性断層は連続性に乏しいものとなっている。また、この断面の中央部分を横断する明緑色の帯は声問層である。

鉛直断面についてはほぼモデル 1 と同様であるが、大曲断層が遮水性である点が大きく異なる。

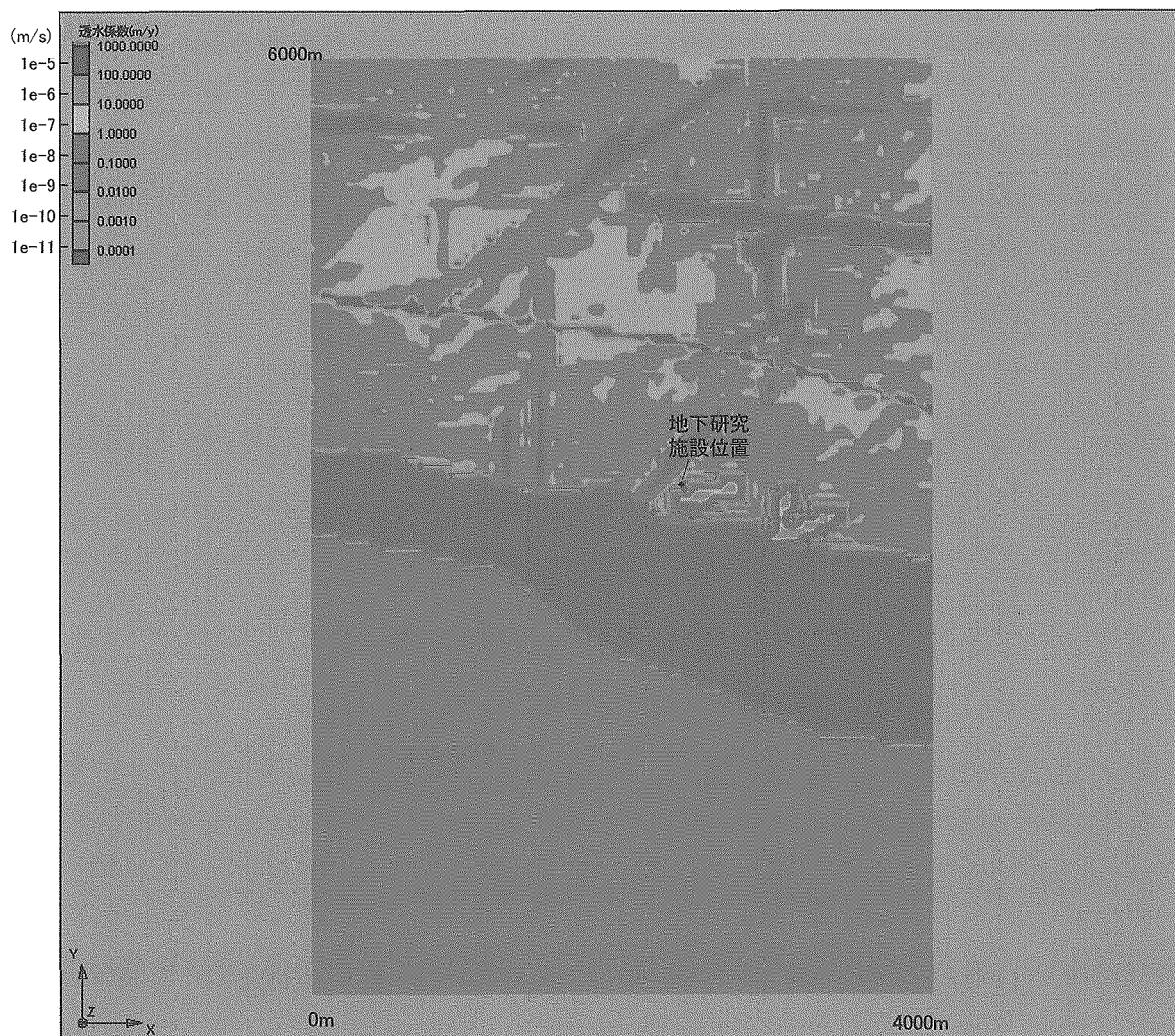


図 3.3.1-47 透水係数分布（水平断面：深度 400m、モデル 7-A）

モデル 7-A 稚内層健岩部： $K=1E-9\text{m/s}$ 、深度依存性あり
割れ目帯の透水係数の設定法： ブーツストラッピング
大曲断層： $K=1E-11\text{m/s}$ （遮水性）

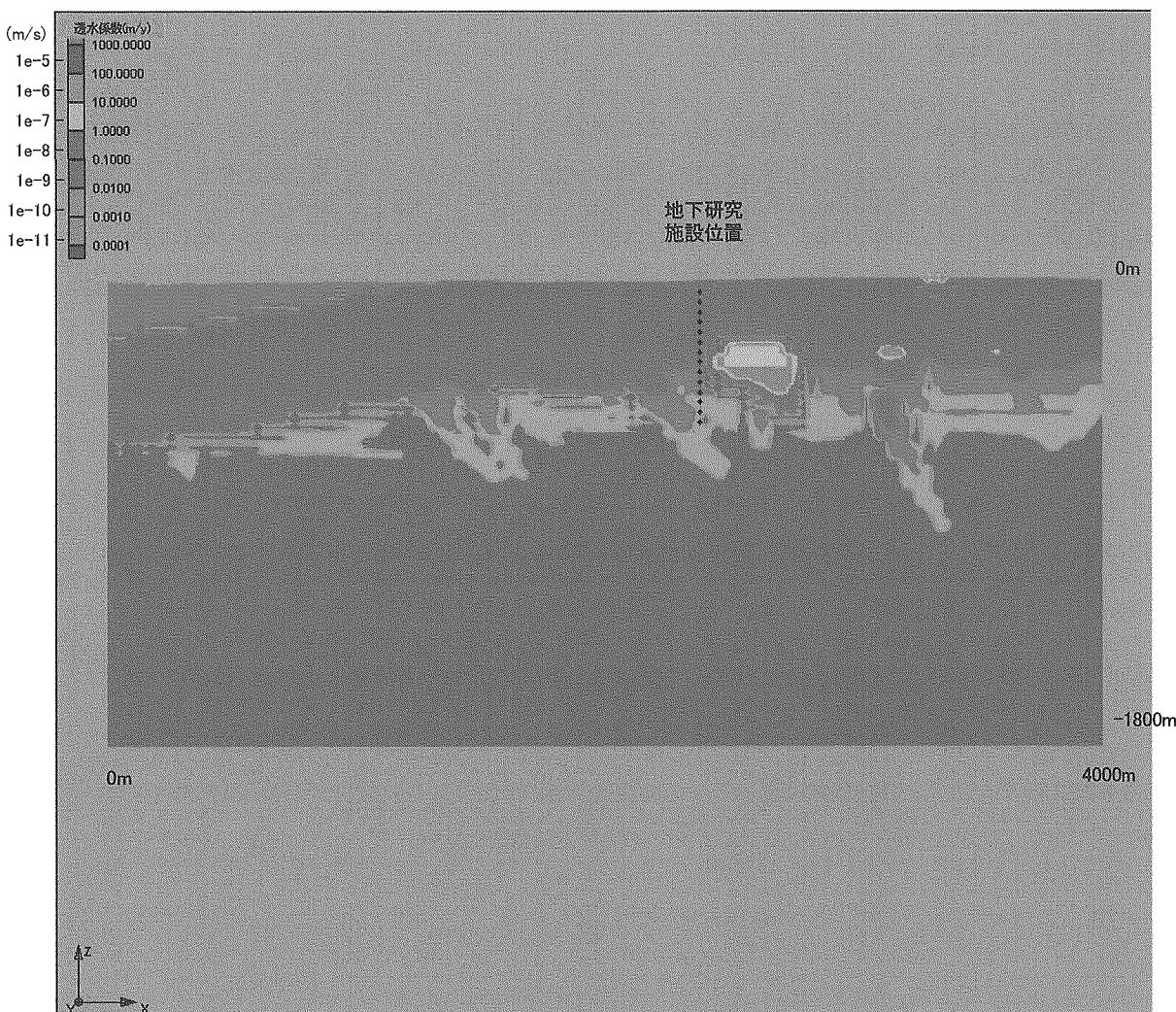


図 3.3.1-48 透水係数分布（地下施設位置を通る xz 鉛直断面、モデル 7-A）

モデル 7-A 稚内層健岩部 : $K=1E-9\text{m/s}$ 、深度依存性あり
 割れ目帯の透水係数の設定法 : ブーツストラッピング
 大曲断層 : $K=1E-11\text{m/s}$ (遮水性)

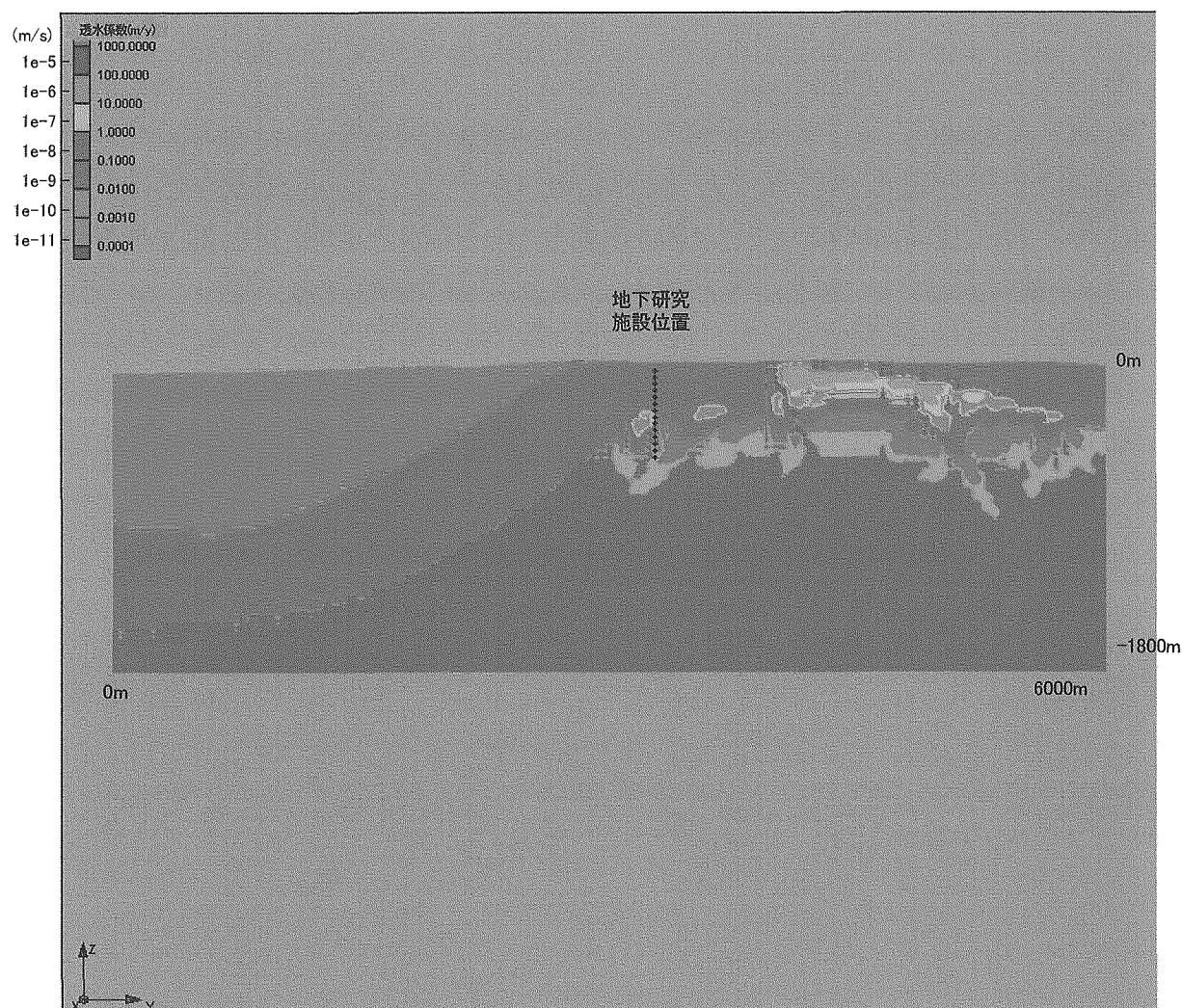


図 3.3.1-49 透水係数分布（地下施設位置を通る yz 鉛直断面、モデル 7-A）

モデル 7-A 稚内層健岩部 : $K=1E-9\text{m/s}$ 、深度依存性あり
 割れ目帯の透水係数の設定法 : ブーツストラッピング
 大曲断層 : $K=1E-11\text{m/s}$ (遮水性)

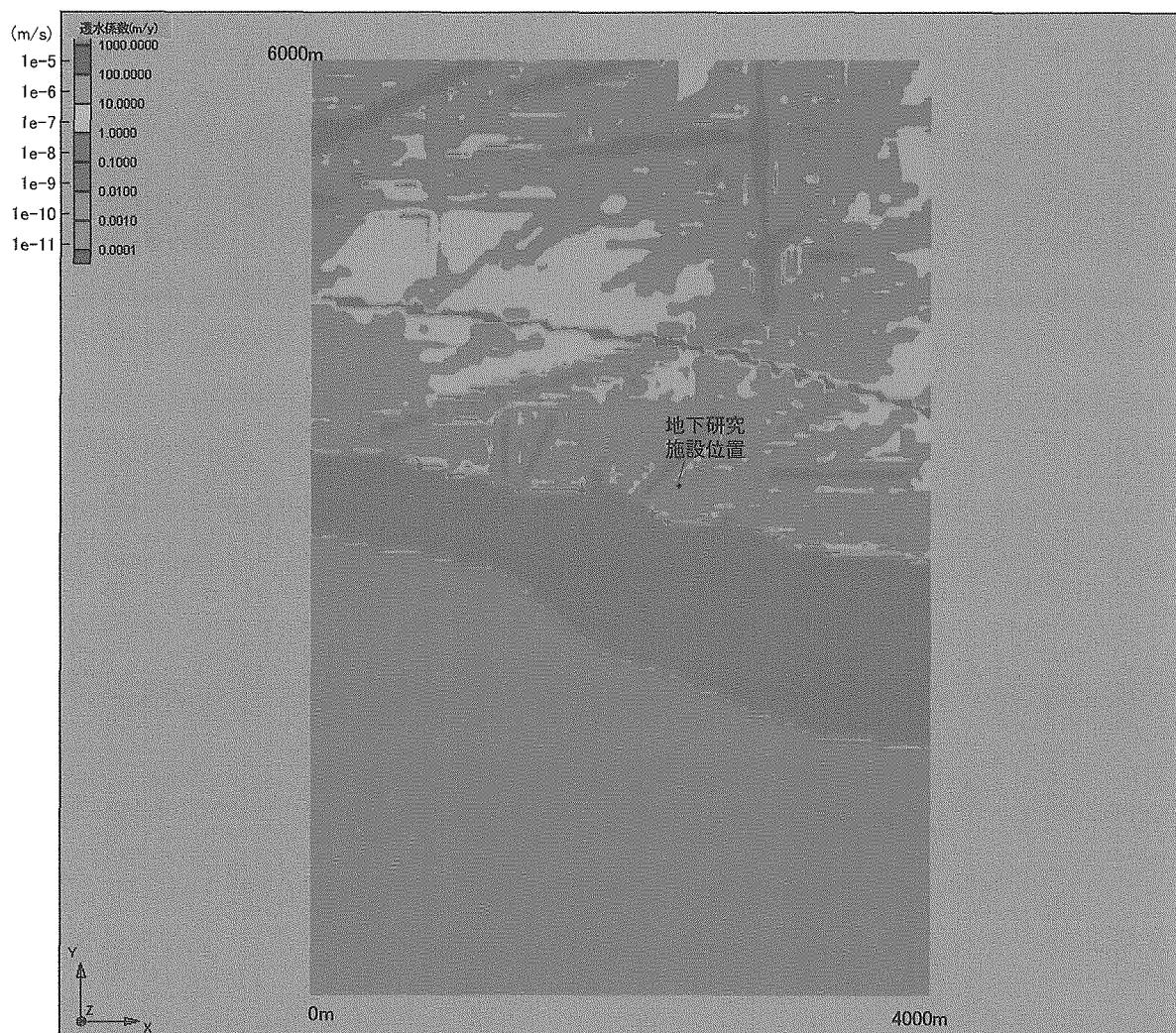


図 3.3.1-50 透水係数分布（水平断面：深度 400m、モデル 7-B）

モデル 7-B 稚内層健岩部 : $K=1E-9\text{m/s}$ 、深度依存性あり
 割れ目帯の透水係数の設定法 : 相関回帰式
 大曲断層 : $K=1E-11\text{m/s}$ (遮水性)

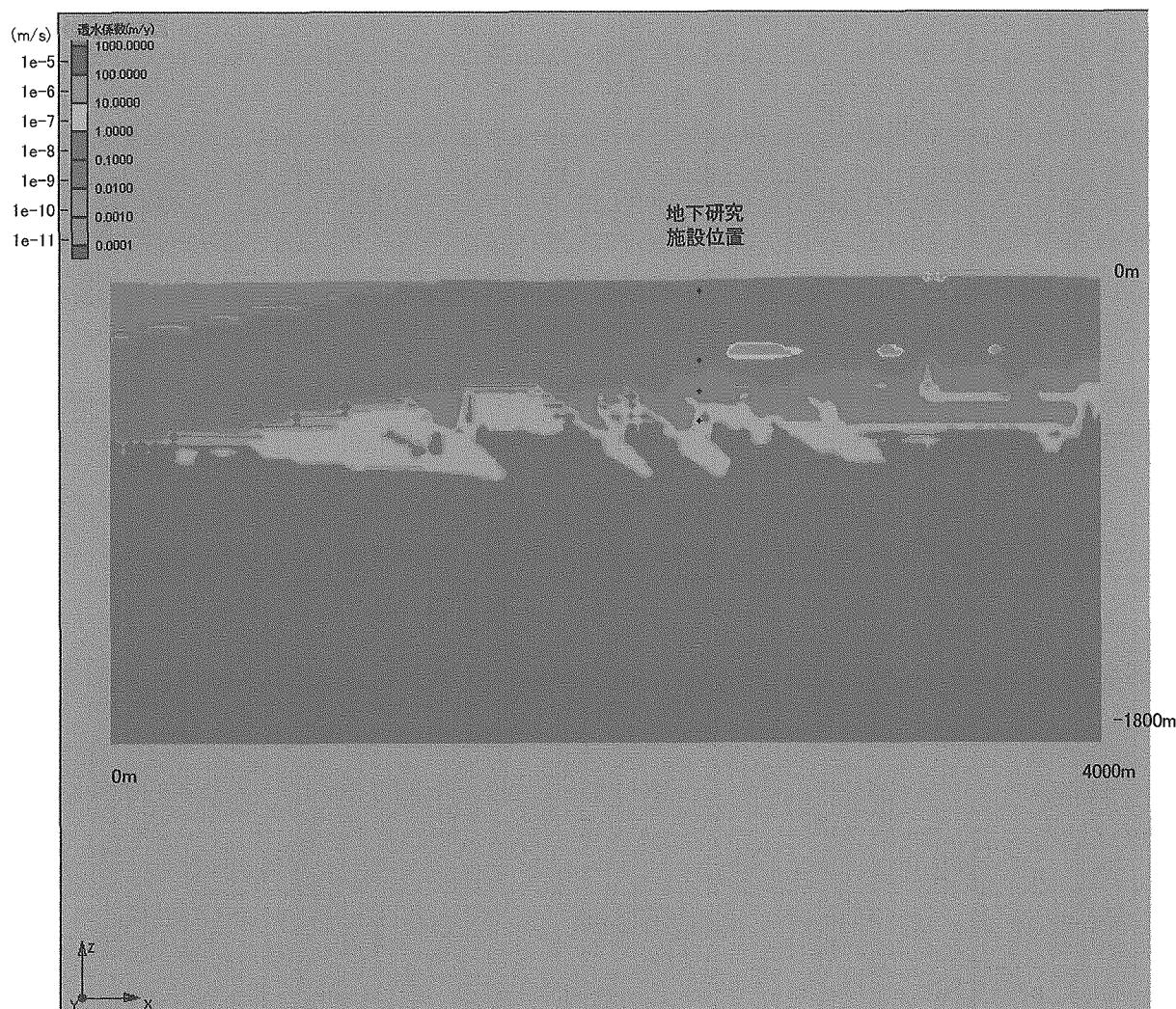


図 3.3.1-51 透水係数分布（地下施設位置を通る xz 鉛直断面、モデル 7-B）

モデル 7-B 稚内層健岩部 : $K=1E-9\text{m/s}$ 、深度依存性あり
 割れ目帯の透水係数の設定法 : 相関回帰式
 大曲断層 : $K=1E-11\text{m/s}$ (遮水性)

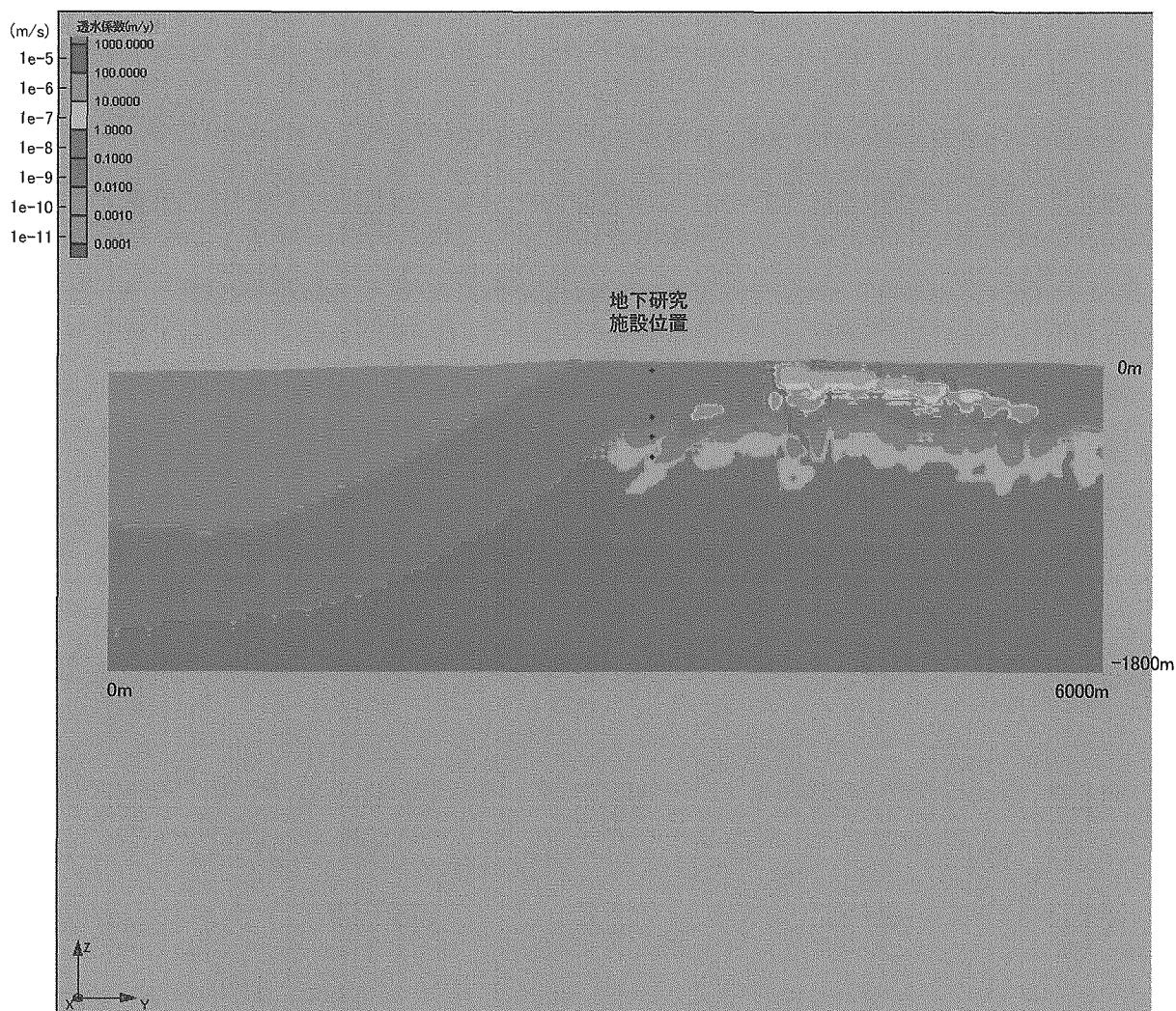


図 3.3.1-52 透水係数分布（地下施設位置を通る yz 鉛直断面、モデル 7-B）

モデル 7-B 稚内層健岩部 : $K=1E-9\text{m/s}$ 、深度依存性あり
 割れ目帯の透水係数の設定法 : 相関回帰式
 大曲断層 : $K=1E-11\text{m/s}$ (遮水性)