

地質環境の長期変遷を考慮した
四次元地質環境モデルの構築技術の整備

2026年3月
原子力発電環境整備機構

2026年3月 初版発行

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

〒108-0014 東京都港区芝4丁目1番地23号 三田NNビル2階
原子力発電環境整備機構 技術部
電話 03-6371-4004 (技術部) FAX 03-6371-4102

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Science and Technology Department
Nuclear Waste Management Organization of Japan
Mita NN Bldg. 1-23, Shiba 4-chome, Minato-ku, Tokyo 108-0014 Japan

©原子力発電環境整備機構
(Nuclear Waste Management Organization of Japan) 2026

**地質環境の長期変遷を考慮した
四次元地質環境モデルの構築技術の整備**

**2026年3月
原子力発電環境整備機構**

(空白ページ)

地質環境の長期変遷を考慮した四次元地質環境モデルの構築技術の整備

要旨

原子力発電環境整備機構 (NUMO) では、「地層処分事業の技術開発計画 (2018 年度～2022 年度)」(NUMO-TR-20-05) 及び「地層処分事業の技術開発計画 (2023 年度～2027 年度)」(NUMO-TR-23-01) に基づき、隆起・侵食などによる長期的な地形変化や気候・海水準変動に伴う地表から地下深部までの地質環境特性の状態変遷を推定するための地質環境のモデル化技術の整備として、四次元地質環境モデル (三次元空間に時間軸を考慮した地質環境モデル: 4D-SDM) の構築やその妥当性確認に係る技術開発を進めてきた。

本報告書には、処分場の設計及び閉鎖後長期の安全評価の基盤となる地質環境特性の長期変遷のモデル化・評価技術を整備することを目的として、これまで NUMO が進めてきた検討を通じて蓄積してきた経験や技術的知見に基づき、以下に示す 4D-SDM の構築及びその妥当性確認に係る方法論を取りまとめるとともに、仮想的な場や北海道幌延地域を対象とした 4D-SDM 構築技術の適用事例を示した。

- ・4D-SDM の構築については、地質環境の長期変遷の解釈及びそれらを考慮したモデル構築、解析に関する考え方や作業手順
- ・4D-SDM の妥当性確認については、地質環境特性に関する不確実性に加えて、その地質環境特性の長期変遷に関わる解釈や仮定といった 4D-SDM の構築過程に内在する不確実性を考慮して妥当性を確認するための考え方と作業手順

本技術開発によって、今後のサイト調査における、より信頼性の高い地質環境特性とその長期変遷の評価、及び処分場の設計、閉鎖後長期の安全評価の信頼性向上に資するための技術として整備することができた。

Technical development for 4D-SDM modeling considering long-term variability in the geological environment

The Nuclear Waste Management Organization (NUMO) of Japan has been conducting technical development of 4D-SDMs (site descriptive models considering 3D space and time axis) modeling for high-level radioactive waste on the basis of “Technological Development Plan for Geological Disposal Project in the fiscal year from 2018 to 2022” (NUMO-TR-20-05) and “Technological Development Plan for Geological Disposal Project in the fiscal year from 2023 to 2027” (NUMO-TR-23-01). The 4D-SDMs is an essential modeling technology for estimating variability of geological environmental characteristics from the surface to deep underground due to long-term topographic changes associated with uplift and denudation, as well as climate perturbations. In this technical development, the focus has been not only on modeling methods but also on model validation methods considering uncertainty.

This report describes the methodologies for the 4D-SDMs modeling and model validation, as follows. It is based on the experience and technical knowledge acquired through this technical development conducted by NUMO, with the objective of development of modeling and evaluation methods for the long-term variations of geological environmental characteristics that form the basis for repository design and long-term post-closure safety assessment. Furthermore, case studies are presented using methodologies in virtual environments and in the Horonobe area, northern Hokkaido.

- Regarding the 4D-SDMs modeling; the methodologies and procedures for interpreting and modeling of long-term variations of geological environments.
- Regarding validation of the 4D-SDMs; the methodologies and procedures for validation considering the uncertainties in the modeling process of interpretations and assumptions concerning geological environmental characteristics and their long-term variability.

This technological development has advanced the technologies for evaluating the long-term variability of geological environments. In preparation for future site investigations, it has established techniques that contribute to more reliable assessments of geological environmental characteristics and their long-term variability, as well as to enhancing the reliability of repository design and long-term post-closure safety assessment.

*1 Science and Technology Department, Nuclear Waste Management Organization of Japan (NUMO)

目 次

1.	はじめに.....	1
2.	検討の方法.....	3
2.1	4D-SDM の基本的な考え方.....	3
2.2	検討対象の時間スケールの設定.....	4
2.3	検討対象の空間スケールの設定.....	4
3.	4D-SDM の構築に係る技術開発の流れ.....	6
4.	4D-SDM の構築技術.....	8
4.1	評価対象領域の設定と概念モデルの作成.....	11
4.1.1	評価対象領域の設定.....	11
4.1.2	地質環境情報の収集.....	11
4.1.3	4D-SDM 構築に係る各種概念モデルの構築.....	13
4.1.4	モデル化領域の設定.....	18
4.2	現在を対象とした地形・地質構造/水理地質構造モデルの構築.....	19
4.2.1	現在を対象とした地形・地質構造モデルの構築.....	19
4.2.2	現在を対象とした水理地質構造モデルの構築.....	23
4.3	地形及び地質・地質構造の長期変動の解釈.....	26
4.3.1	時間断面の設定.....	27
4.3.2	地形及び地質・地質構造の長期変動パラメータの設定.....	34
4.4	代表時間断面を対象とした地形・地質構造モデルの構築.....	35
4.5	代表時間断面を対象とした水理地質構造モデルの構築.....	37
4.6	代表時間断面を対象とした地下水流動・物質移行モデルの構築.....	38
4.6.1	地質環境の長期変動を考慮した地下水流動・物質移行解析の考え方.....	38
4.6.2	代表時間断面の水理地質構造モデルを用いた地下水流動・物質移行解析.....	40
4.7	不確実性を考慮した 4D-SDM の妥当性確認.....	43
5.	4D-SDM の構築技術の適用事例（先新第三紀堆積岩類モデル）.....	53
5.1	評価対象領域の決定と概念モデルの作成.....	53
5.1.1	評価対象領域の設定.....	53
5.1.2	地質環境情報の収集.....	53
5.2	現在を対象とした地形・地質構造/水理地質構造モデルの構築.....	59
5.2.1	現在を対象とした地形・地質構造モデルの構築.....	59
5.2.2	現在を対象とした水理地質構造モデルの構築.....	69
5.3	地形及び地質・地質構造の長期変動の解釈.....	72
5.3.1	地形及び地質・地質構造の長期変動の概念モデルの構築.....	72
5.3.2	代表時間断面の設定.....	73
5.3.3	地形及び地質・地質構造の長期変動パラメータの設定.....	74
5.4	代表時間断面を対象とした地形・地質構造モデルの構築.....	76
5.5	代表時間断面を対象とした水理地質構造モデルの構築.....	80
5.6	代表時間断面を対象とした地下水流動・物質移行モデルの構築.....	81

5.6.1	境界条件の設定.....	81
5.6.2	初期条件の設定.....	82
5.6.3	解析の実施.....	82
6.	4D-SDM の妥当性確認事例（幌延地域）.....	85
6.1	事例検討地域の選定.....	85
6.2	幌延地域を対象に構築した 4D-SDM の概要.....	86
6.3	評価指標の設定.....	88
6.4	不確実性要因の抽出.....	88
6.4.1	地形及び地質・地質構造モデル構築に係る不確実性要因.....	88
6.4.2	水理地質構造モデル構築に係る不確実性要因.....	89
6.5	感度解析の実施.....	92
6.5.1	感度解析ケースの設定.....	92
6.5.2	時間スケールの設定.....	97
6.5.3	空間スケールの設定.....	97
6.5.4	感度解析結果.....	99
6.6	4D-SDM の不確実性評価.....	104
6.6.1	地下水の塩分濃度に着目した不確実性評価の事例.....	104
6.6.2	地下水の移行時間に着目した不確実性評価の事例.....	108
6.6.3	不確実性評価結果に基づく技術的知見.....	111
6.7	4D-SDM の妥当性確認.....	112
7.	まとめ.....	120
	参考文献.....	121
	謝 辞.....	127

図目次

図 2-1	4D-SDM 構築の基本的な考え方.....	4
図 2-2	サイト調査の範囲と地質環境モデルのスケールとの関係 (NUMO, 2021)	5
図 3-1	4D-SDM 構築に係る技術開発の流れ.....	7
図 4-1	四次元地質環境モデル構築に係る手順と具体的な作業内容	9
図 4-2	地質環境特性の長期変遷の調査・評価に係る統合化データフローダイアグラムの例 (NUMO, 2021 (付属書 3-10))	10
図 4-3	幌延地域を対象とした地形及び地質・地質構造の概念モデルの例 (大澤ほか, 2008)	14
図 4-4	幌延地域を対象とした地形・地質事象の変遷と概念モデル (JAEA, 2015)	15
図 4-5	幌延地域を対象にした地下水流動の概念モデル (大澤ほか, 2008)	16
図 4-6	幌延地域を対象にした地下水化学の概念モデル (大澤ほか, 2008)	17
図 4-7	幌延地域を対象にした地質環境の概念モデル (大澤ほか, 2008)	17
図 4-8	微細透水構造概念モデル (深成岩類) (NUMO, 2021)	18
図 4-9	現在を対象とした地形・地質構造モデルの構築に係る検討フロー.....	19
図 4-10	「現在を対象とした地形モデルの構築」に係る作業フロー.....	19
図 4-11	「現在を対象とした地質・地質構造モデルの構築」に係る作業フロー.....	21
図 4-12	「現在を対象とした水理地質構造モデルの構築」に係る検討フロー.....	23
図 4-13	「現在を対象とした水理地質構造モデルの構築」に係る作業フロー.....	24
図 4-14	「地形及び地質・地質構造の長期変動の解釈」に係る検討フロー.....	26
図 4-15	海水準変動の簡易モデルと代表時間断面の設定例.....	29
図 4-16	代表時間断面の設定フロー.....	34
図 4-17	「代表時間断面を対象とした地形・地質構造モデルの構築」に係る作業フロー.....	35
図 4-18	地質環境の長期変遷を考慮した地下水流動・物質移行解析の流れ (JAEA, 2017)	39
図 4-19	「代表時間断面を対象とした地下水流動・物質移行モデルの構築」に係る作業フロー	40
図 4-20	地質環境特性の時間変遷を考慮した解析の初期条件と境界条件の設定方法.....	42
図 4-21	4D-SDM の不確実性評価と妥当性確認の実施フロー.....	44
図 4-22	4D-SDM の不確実性要因に着目した感度解析の手順.....	49
図 4-23	累積分布関数に基づく CV プロットの手順.....	50
図 4-24	CV プロットに基づく不確実性評価マトリクス図	51
図 4-25	地下水中の塩分濃度の長期的な変動性の推定アプローチ (JAEA, 2017)	52
図 5-1	日本の山地における付加体分布面積.....	54
図 5-2	全付加体優勢山地の地質・地質構造ごとの標高を規格化した結果.....	55
図 5-3	付加体優勢山地における汀線からの距離と平均標高の関係	56
図 5-4	海域の検討対象とした 6 山地とその周辺の海底地形.....	57
図 5-5	先新第三紀堆積岩類の地質環境の概念モデル (NUMO (2021) に追記)	59
図 5-6	陸域に無作為に配置した点 (500 点) をもとに生成した地形面.....	60
図 5-7	先新第三紀堆積岩類の地形モデル	61

図 5-8	代表コンプレックスに関する地質・地質構造のモデル化結果	63
図 5-9	海域における被覆堆積岩層の地層境界面モデル	64
図 5-10	陸域における被覆堆積岩層のモデル化結果	64
図 5-11	代表コンプレックスの境界に基づく基盤岩の境界面のモデル化結果	65
図 5-12	長さ 10 km 以上の断層モデル	67
図 5-13	長さ 1~10 km の断層モデル (水平断面図: 標高4 km)	68
図 5-14	現在を対象とした地形・地質構造モデル (鳥観図)	69
図 5-15	構築したメッシュモデル (鳥観図)	70
図 5-16	DFN モデルに基づき推定した等価な有効間隙率分布	72
図 5-17	現在を対象とした水理地質構造モデル (鳥観図)	72
図 5-18	長期的な地形変化の概念モデル	73
図 5-19	断層関連山地の隆起量の設定	75
図 5-20	断層関連山地に関する地形変化メッシュ	76
図 5-21	時間変遷を考慮した地形モデルの一例 (平面図)	77
図 5-22	時間変遷を考慮した地形及び地層境界面モデルの一例 (断面図, 断面位置: 図 5-21 参照)	78
図 5-23	時間変遷を考慮した地質・地質構造モデルの一例 (鳥観図)	79
図 5-24	時間変遷を考慮した水理地質構造モデルの一例 (鳥観図)	80
図 5-25	海水準変動及び涵養量の時間変化の設定	82
図 5-26	全水頭分布の時間変遷の推定結果	83
図 5-27	地下水の塩分濃度分布の時間変遷の推定結果	84
図 6-1	4D-SDM のモデル化領域 (幌延地域)	87
図 6-2	4D-SDM に考慮した地層及び断層 (幌延地域)	88
図 6-3	感度解析に考慮した地形・地質構造の概念モデル	95
図 6-4	感度解析に考慮した涵養量の変動パターン	96
図 6-5	感度解析に考慮した海水準の変動パターン	97
図 6-6	不確実性評価のための空間スケールの配置	98
図 6-7	幌延深地層研究センター付近のボーリング孔配置 (JAEA, 2016)	99
図 6-8	地下水の塩分濃度分布 (非定常解析結果: モデル化スケールの鉛直断面図)	101
図 6-9	地下水の塩分濃度分布 (定常解析結果: モデル化スケールの鉛直断面図)	102
図 6-10	粒子の指定点から流出点までの移行時間の空間分布 (地下水流動系スケールの鉛直断面図)	103
図 6-11	不確実性評価結果の一例 (評価指標: 地下水の塩分濃度, 評価スケール: モデル化スケール/100 万年スケール)	105
図 6-12	空間スケールの違いによる不確実性評価結果の比較 (CV プロット) (非定常解析, 評価指標: 地下水の塩分濃度, 評価スケール: 100 万年スケール)	107
図 6-13	解析手法の違いによる不確実性評価結果の比較 (CV プロット) (評価指標: 地下水の移行時間, 評価スケール: 地下水流動系スケール/100 万年スケール)	108
図 6-14	時間スケールの違いによる不確実性評価結果の比較 (CV プロット) (非定常解析, 評価指標: 地下水の移行時間, 評価スケール: 地下水流動系スケール)	110

図 6-15	後方粒子追跡法に用いた粒子指定点の配置.....	113
図 6-16	ボーリング孔沿いの塩化物イオン濃度分布に着目した 4D-SDM の妥当性確認結果(すべての感度解析ケースを考慮した場合 : HDB-1~HDB-6)	115
図 6-17	ボーリング孔沿いの塩化物イオン濃度分布に着目した 4D-SDM の妥当性確認結果(すべての感度解析ケースを考慮した場合 : HDB-7~HDB-11, SFI-1)	116
図 6-18	ボーリング孔沿いの塩化物イオン濃度分布に着目した 4D-SDM の妥当性確認結果(重要な不確実性要因の感度解析ケースのみを考慮した場合 : HDB-1~HDB-6)	117
図 6-19	ボーリング孔沿いの塩化物イオン濃度分布に着目した 4D-SDM の妥当性確認結果(重要な不確実性要因の感度解析ケースのみを考慮した場合 : HDB-7~HDB-11, SFI-1) ..	118
図 6-20	浜里地区周辺の塩分濃度分布に着目した 4D-SDM の妥当性確認結果	119

表目次

表 4-1	地形及び地質・地質構造の空間分布と時間変化に関わるデータとその位置付け.....	12
表 4-2	水理地質構造や地下水流動・化学に関わるデータとその位置付け.....	13
表 4-3	「現在を対象とした地形モデルの構築」作業の内容と確認事項.....	20
表 4-4	「現在を対象とした地質・地質構造モデルの構築」作業の内容と確認事項.....	22
表 4-5	「現在を対象とした地形・地質構造モデルの構築」作業の内容と確認事項.....	23
表 4-6	「現在を対象とした水理地質構造モデルの構築」作業の内容と確認事項.....	24
表 4-7	「気候の変化」に関連する FEP の抽出.....	28
表 4-8	「気候の変化」に関する考慮事項.....	29
表 4-9	「地形の変化」に関連する FEP の抽出.....	30
表 4-10	「地形の変化」に関する考慮事項.....	30
表 4-11	「岩相及び流動経路（地質・地質構造）の変化」に関連する FEP の抽出.....	32
表 4-12	「岩相及び流動経路（地質・地質構造）の変化」に関する考慮事項.....	32
表 4-13	「地形及び地質・地質構造の長期変動パラメータの設定」作業の内容と確認事項.....	35
表 4-14	「代表時間断面を対象とした地形・地質構造モデルの構築」作業 の内容と確認事項	36
表 4-15	4D-SDM 構築における地下水流動・物質移行解析の考え方.....	39
表 4-16	「代表時間断面を対象とした地下水流動・物質移行モデルの構築」作業 の内容と確 認事項.....	41
表 4-17	処分場の閉鎖後長期の地質環境に期待される安全機能への影響とその要因.....	45
表 4-18	地形・地質構造モデルの構築作業に内在する不確実性.....	47
表 4-19	水理地質構造モデルの構築作業に内在する不確実性.....	48
表 5-1	汀線から陸域側の 10 km ごとの標高データ.....	56
表 5-2	汀線から海域側の 10 km ごとの標高データ.....	57
表 5-3	GMRT データに基づく海域地形区分と平均傾斜の整理.....	57
表 5-4	付加体の分布形状・面積比の整理.....	58
表 5-5	構築する仮想の地形・地質構造モデルが満たすべき条件.....	58
表 5-6	地質・地質構造モデルに反映した代表コンプレックス.....	62
表 5-7	スラブのモデル化条件.....	62
表 5-8	付加体優勢山地における被覆堆積岩層.....	64
表 5-9	包括的技術報告書における断層・割れ目の長さとその取扱いの整理（NUMO, 2021 : 付属書 3-22）.....	66
表 5-10	断層の幾何学的パラメータ.....	67
表 5-11	全国の付加体分布範囲及び日本の断層マップに基づく値.....	67
表 5-12	メッシュモデルに考慮した深度方向の要素分割サイズ.....	69
表 5-13	水理地質構造区分に設定した透水係数及び有効間隙率.....	71
表 5-14	先新第三紀堆積岩類の有効間隙率の算定に適用した割れ目パラメータ（NUMO, 2021）	71
表 5-15	地形変化パラメータの設定.....	74

表 6-1	事例検討地域の選定結果	86
表 6-2	幌延地域における地形・地質構造モデル構築の不確実性要因の整理.....	90
表 6-3	幌延地域における水理地質構造モデル構築の不確実性要因の整理.....	91
表 6-4	幌延地域における不確実性要因を考慮した感度解析ケース	94
表 6-5	感度解析に考慮した地質構造のパラメータセット	96
表 6-6	既往研究における解析モデルの物性値の設定 (JAEA, 2018b)	96
表 6-7	不確実性評価のための空間スケールの設定.....	98
表 6-8	不確実性要因が解析結果に及ぼす影響 (評価指標:地下水の塩分濃度, 評価スケール: モデル化スケール/100 万年スケール)	106
表 6-9	不確実性要因が解析結果に及ぼす影響 (非定常解析, 評価指標:地下水の塩分濃度, 評価スケール:100 万年スケール)	107
表 6-10	不確実性要因が解析結果に及ぼす影響 (評価指標:地下水の移行時間, 評価スケール: 地下水流動系スケール/100 万年スケール)	109
表 6-11	不確実性要因が解析結果に及ぼす影響 (非定常解析, 評価指標:地下水の移行時間, 評価スケール:地下水流動系スケール)	110
表 6-12	地下水年代に着目した 4D-SDM の妥当性確認結果.....	114

1. はじめに

(1) 背景

原子力発電環境整備機構（以下、「NUMO」という）が日本における地層処分の実施主体としてどのようにサイト¹の調査を進め、安全な処分場の設計・建設・操業・閉鎖を行い、閉鎖後の長期間にわたる安全性を確保しようとしているのかについて、これまでに蓄積された科学的知見や技術を統合して包括的に取り纏めて2018年11月に包括的技術報告書のレビュー版を公開した。その後、第三者機関による中立的な立場からの評価を踏まえて技術的な信頼性を確認するため、「一般社団法人 日本原子力学会」によるレビューを受け、そのレビュー結果を反映し、包括的技術報告書の改訂版を2021年2月に公開した（NUMO, 2021）。

包括的技術報告書においては、日本の代表的な三岩種（深成岩類、新第三紀堆積岩類、新第三紀堆積岩類）を対象として、地質構造の幾何形状や水理特性などの三次元的な空間分布を表現した地質環境モデルを構築するとともに、構築したモデルに基づき処分場の設計や安全評価を実施した。この一連の検討を通じて、数万年以上の長期間にわたる地層処分システムの安全機能をより現実に即して評価するためには、水理場や化学場といった地質環境特性の状態変遷を推定するための地質環境モデルの構築技術を整備することを課題として抽出した。

包括的技術報告書を作成する過程で明らかとなった課題を踏まえて、「地層処分研究開発に関する全体計画（平成30年度～令和4年度）」（地層処分研究開発調整会議（2020））が策定された。ここでは、地質環境の状態変遷に係る評価技術の高度化や安全評価との連携を考慮したモデルの構築を通じて信頼性向上を図るうえでは、包括的技術報告書において提示する三岩種の現実的な三次元地質環境モデルをもとに長期にわたる地形変化や気候・海水準変動に伴う地表から地下深部までの地質環境特性の時間的・空間的变化に係る現実的なモデルを構築することの必要性が示された。また、「地層処分研究開発に関する全体計画（令和5年度～令和9年度）」（地層処分研究開発調整会議（2023））では、実際の地質環境データを用いた妥当性・適用性の確認と時間・空間スケールに応じた不確実性を評価するための方法論の整備の必要性が示された。

上記を踏まえて NUMO では、地下深部から地質圏－生活圏インターフェイス（Geosphere-Biosphere Interface：以下、「GBI」という）までの地質環境特性の状態変遷と GBI の時間変化を考慮した処分場の設計や閉鎖後長期の安全評価に資することを目的として、隆起・侵食などによる長期的な地形変化や気候・海水準変動に伴う地表から地下深部までの地質環境特性の状態変遷を表現することができる四次元地質環境モデル（三次元空間に時間軸を考慮した地質環境モデル：以下、「4D-SDM」という）を構築するための方法論に係る検討を進めてきた（松岡ほか, 2022；尾上, 2022；Suzuki et al., 2022；NUMO, 2023；NUMO, 2024a；NUMO, 2024b；NUMO, 2025；高林ほか, 2025；Abumi et al., 2025；Onoe et al., 2025）。

¹ NUMO は、段階的な調査の対象となる区域や、処分施設の建設地（処分地）として最終的に選定される区域を幅広く意味する語として「サイト」を用いる。

(2) 目的

本報告書は、これまで NUMO が進めてきた検討を通じて蓄積してきた経験・ノウハウなどに基づき、地形・地質構造及び気候・海水準変動の長期変遷をモデル化するための考え方、地形・地質構造モデル及び水理地質構造モデルの構築、地下水流動・物質移行モデルの構築並びにそれらの妥当性確認に係る方法論といった 4D-SDM の構築技術を取りまとめるものである。

本報告書の構成は以下のとおりである。

- ・ 第 2 章に、4D-SDM の基本的な考え方を示す。
- ・ 第 3 章では、第 2 章に示した基本的な考え方に基づき進めてきた検討の方法を示す。
- ・ 第 4 章では、4D-SDM の構築技術として、地形・地質構造の長期変動の解釈やそれらの時間変遷を代表する時間断面の設定、代表時間断面における地形・地質構造モデルや水理地質構造モデルの構築、それらを用いた地下水流動・物質移行モデルの構築に関する一連の作業手順や留意点を整理する。また、構築した 4D-SDM に内在する不確実性を評価しつつ、その妥当性を確認するための考え方と手順を示す。
- ・ 5 章には、4 章で整理した 4D-SDM の構築技術の適用事例を示す。事例としては、包括的技術報告書で検討した日本の代表的な三岩種のうち、先行して実施した新第三紀堆積岩類及び深成岩類を対象とした検討で蓄積した技術的知見を反映した先新第三紀堆積岩類が分布する仮想的な場を対象とした 4D-SDM の構築結果を選定した。
- ・ 6 章には、地質環境特性の体系的な情報やデータが利用可能な北海道幌延地域を事例として、4 章に示した 4D-SDM の妥当性確認手法を適用した結果を示す。
- ・ 7 章には、第 2 章から第 6 章までの成果の要約を結論として示す。

2. 検討の方法

2.1 4D-SDM の基本的な考え方

地層処分事業における安全評価は、処分施設閉鎖後の数万年以上に及ぶ期間を対象として実施されるため、変動帯に位置している日本では、長期的な自然現象が地質環境特性に及ぼす影響を考慮することが必要となる。自然現象のうち、火山・火成活動、地震・断層活動及び処分施設の地表への接近が懸念される速度の著しく速い隆起・侵食は、地質環境に期待される安全機能への著しい影響を与える事象とされており、基本的には地質環境調査を通じて著しい自然現象が生じる範囲を特定するとともに、その範囲を回避してサイトを選定することとしている（NUMO, 2021）。一方で、上記よりも速度の遅い隆起・侵食（以下、「長期的な地形変化」という）及び汎世界的な気候・海水準変動の影響は、緩慢ではあるものの累積的かつ広域に及ぶため、それらの影響を回避することは困難である。そのため、4D-SDM を構築するに当たっては、長期的な地形変化や気候・海水準変動による地質環境の長期変遷をモデル化することが重要といえる。

4D-SDM の構築に係る基本的な考え方を図 2-1 に示す。4D-SDM は現在の地質環境モデル及び地質環境情報に基づく過去から現在までの地質環境の変遷の解釈や推定を基盤として構築する。過去から現在までの長期的な地形変化や気候・海水準変動といった地質環境の変遷が一定の期間の将来にわたって継続する（梅田ほか, 2013）という外挿法を用いた将来予測の基本的な考え方（NUMO, 2021）に基づき、将来における地質環境の変遷について概念モデルを構築するとともに、それらを地質環境モデルに反映する。また、4D-SDM を用いた評価の妥当性を検討するうえでは、4D-SDM の構築に用いた過去から現在までの地質環境の変遷の解釈を用いて過去の地質環境モデルを構築し、地下水流動解析及び塩分濃度に着目した物質移行解析を行うとともに、それらの結果が現在の地質環境と整合していることを確認することが重要となる。

4D-SDM の構築に係る手順は以下のとおりである（下記の番号は、図 2-1 中の番号を示す）。

- ① 現在の地質環境特性の情報を収集・解釈し、現在を対象とした地形・地質構造モデル及び水理地質構造モデルを構築
- ② 過去から現在までの地質環境の変遷履歴に係る情報を収集・解釈し、その結果に基づく、過去の代表時間断面を対象とした地形・地質構造モデル及び水理地質構造モデルを構築
- ③ 上記①及び②で構築したモデルを用いた三次元地下水流動・物質移行解析（地形の形状や上部境界条件の連続的な変化を考慮した解析）を実施
- ④ 上記③の解析結果と地質環境調査で得られた地質環境情報との比較を通じて、地質環境の長期変遷を評価するうえで重要な不確実性要因を抽出するとともに、解析に反映した過去から現在までの地質環境の長期変遷の妥当性を確認。また、妥当性の確認結果が不十分な場合は、その原因を分析したうえで上記①～③の作業の見直しを実施
- ⑤ 上記④で妥当性が確認された過去から現在までの地質環境の長期変遷に基づき現在から将来の変遷を推定、及びそれを考慮した地下水流動・物質移行解析により、将来の水理場・化学場の変遷を推定

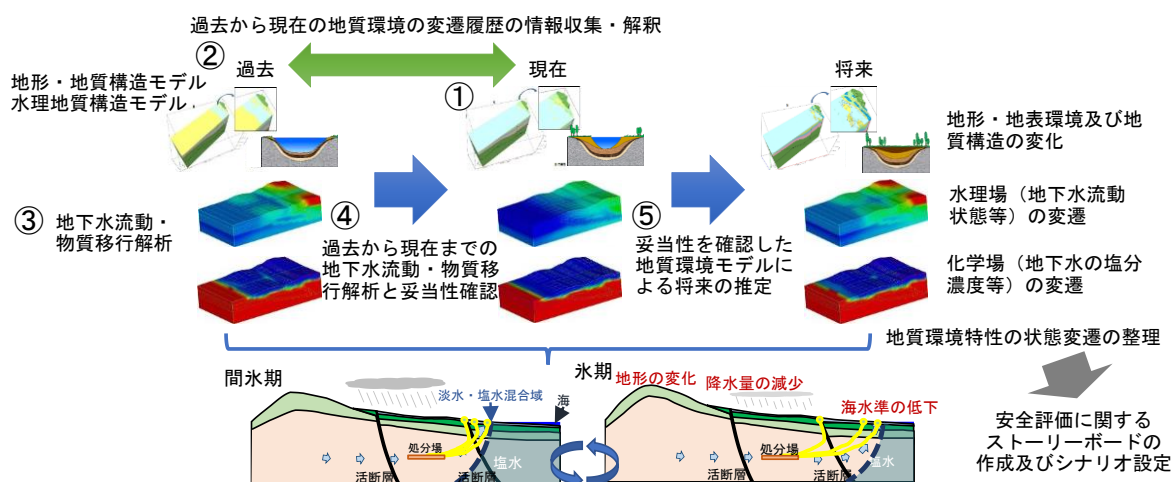


図 2-1 4D-SDM 構築の基本的な考え方

2.2 検討対象の時間スケールの設定

日本第四紀学会編（1987）によると、地殻変動の一樣継続性が成立している場合には、過去から現在までの変動傾向を同程度の期間の将来に外挿できることが示唆されている。また、総合資源エネルギー調査会（2014）においては、断層活動や地殻変動が少なくとも過去数十万年から 100 万年のオーダーで継続していることなどを根拠として、将来 10 万年程度であれば、地殻変動の傾向が継続する可能性は高いとの見解が示されている。一方で、自然現象に関して科学的合理性をもって予測可能な期間は、対象とするサイトごとに異なる過去の情報の量や精度、さらには地質構造の発達過程を考慮し、外挿における前提条件（変動の継続性に関する仮定など）を明らかにしたうえで設定する必要がある。

上記を踏まえて、本検討では将来 10 万年程度を超えるような長期の評価を視野に入れて、10 万年程度を十分包含する 100 万年を検討対象の時間スケールと設定した。

2.3 検討対象の空間スケールの設定

地質環境の調査及び評価によって得られる自然現象の影響や地質環境特性などに係る情報は地質環境モデルとして統合し、処分場の設計及び安全評価に係る検討の基盤となる。そのため、包括的技術報告書においては、対象とする空間的な領域を処分場の設計及び安全評価の目的に応じた適切なスケールに区分し、それぞれの空間スケールに応じて処分場の設計及び安全評価に必要な詳細度を有する地質環境モデルを作成することとしている。具体的には、図 2-2 に示すように、広域スケール（数十 km×数十 km）、処分場スケール（数 km×数 km）、パネルスケール（数百 m×数百 m）の 3 つの空間スケールが設定されている（NUMO, 2021）。

前述のとおり、長期的な地形変化や気候・海水準変動の影響は広範囲に及ぶため、それらを 4D-SDM に考慮することができる広域スケールを検討対象の空間スケールと設定した。

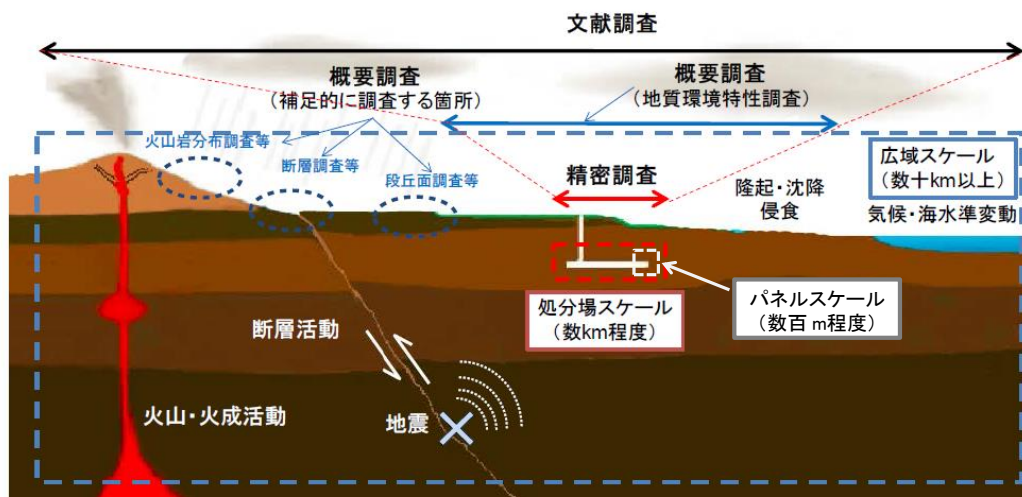


図 2-2 サイト調査の範囲と地質環境モデルのスケールとの関係 (NUMO, 2021)

3. 4D-SDM の構築に係る技術開発の流れ

4D-SDM 構築に係る技術開発の流れを図 3-1 に示す。本技術開発は大きく二つのフェーズに区分される。

2018 年度から 2022 年度にかけて実施したフェーズ 1 では、包括的技術報告書において全国規模で収集した地質環境特性データを用いて、日本の代表的な三岩種（深成岩類，新第三紀堆積岩類，先新第三紀堆積岩類）がそれぞれ分布する仮想的な場，及び河川水系の変遷を伴う広域的な地形変化や三岩種が混在する地形・地質構造条件を考慮したより複雑な地質環境を想定した検討を通じて，4D-SDM の構築技術を整備した（図 3-1 中の実施項目①）。また，構築した 4D-SDM を用いて地質環境特性の状態変遷を推定するための地下水流動・物質移行解析及び粒子追跡線解析を実施し，地下水の流速分布，塩分濃度分布及び地下水移行時間などを考慮した処分場の地下施設設置可能領域の選定，その領域に処分場を設置した場合の安全評価に係るシナリオ作成のためのストーリーボード（地層処分システムの状態変遷に応じた安全機能の働き方などを表現するもの）の作成といった，処分場の設計及び安全評価に反映するための情報の整理を試行した（図 3-1 中の実施項目②）。

前述したとおり，4D-SDM は 100 万年といった長期の時間スケール，かつ数十 km といった大規模な広域スケールを考慮する必要があるため，モデルの妥当性を確認するうえでは，そのモデルに設定した地質環境特性に関する不確実性に加えて，その地質環境特性の長期変遷に関わる解釈や仮定など，モデル化における条件設定に関する不確実性をどのように評価するかが重要となる。そのため，2022 年度から 2024 年度にかけては，フェーズ 2 としてフェーズ 1 で整備した 4D-SDM の構築技術の適用性を確認すること，及び 4D-SDM の不確実性を評価するための方法論を整備することを目的とした検討を実施した（図 3-1 中の実施項目③）。4D-SDM 構築技術の適用性確認については，事例検討として地質環境特性の体系的な情報やデータが利用可能な幌延地域を対象に，蓋然性が高いと考えられる条件で 100 万年程度以前の過去から現在までの地形・地質環境の長期変遷に基づくモデル化・解析を実施し，実測値との比較を通じて，4D-SDM 構築技術の適用性を確認した。また，幌延地域の 4D-SDM に内在する不確実性要因を整理するとともに不確実性要因を考慮した感度解析を実施し，その結果の分析・評価を踏まえて，地質環境の長期変遷に係る不確実性を評価するための考え方や手順を整理した。

最後に，フェーズ 1 及びフェーズ 2 で実施した成果を，4D-SDM の構築技術として本報告書に取りまとめた（図 3-1 中の実施項目④）。なお，図 3-1 に示した実施項目②「設計・安全評価への反映に係る検討」の成果については，4D-SDM を活用した検討として別途取りまとめることとし，本報告書では取り扱わない。

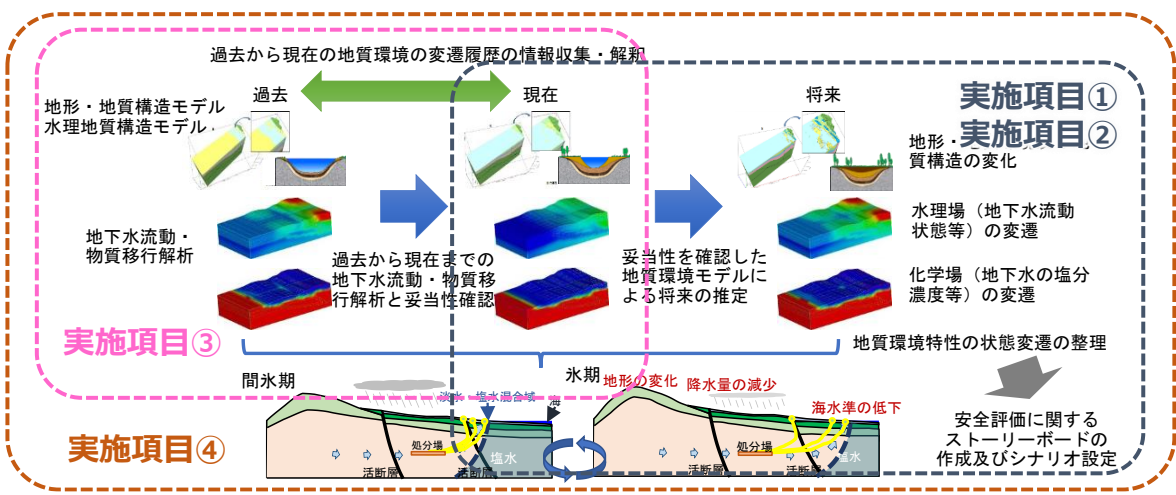
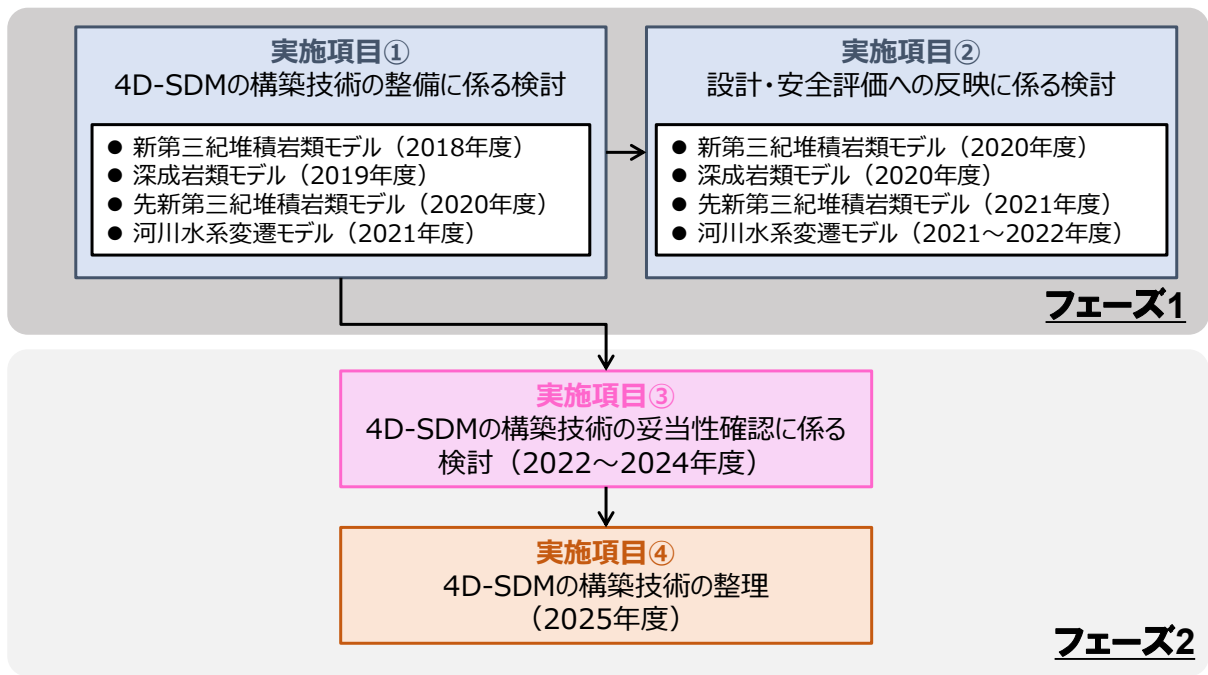


図 3-1 4D-SDM 構築に係る技術開発の流れ

4. 4D-SDM の構築技術

図 4-1 に 4D-SDM の構築手順に係る具体的な作業項目を整理した。本章では、この作業項目に関して、実施すべき作業内容を細分化するとともに作業手順を文書化した。また、それぞれの作業項目において着目すべき点や留意点を明記した。

本章では、初めに一般的な SDM の構築作業である、「現在の地形・地質構造モデルの構築」、「現在の水理地質構造モデルの構築」について説明したうえで、4D-SDM に考慮する時間変遷のモデル化に関わる具体的な作業である「地形及び地質・地質構造の長期変動の解釈」、「地形・地質構造モデルの構築」、「水理地質構造モデルの構築」、「地下水流動・物質移行モデルの構築」及び「モデルの妥当性確認」について説明を行う。

地質環境の調査・評価を合理的に進めていくためには、「調査」から「データの解釈」、「モデル化・解析」に至る具体的な道筋を示すことが重要である (JNC, 2005)。地質環境調査から地質環境モデルの構築に至る一連の作業プロセスを効果的・効率的に管理するうえで有効な方法の一つとして、個々の調査技術により取得するデータ、それらのデータを組み合わせで行う解釈、及び異なる分野で得られた情報の統合など、地質環境調査・評価の一連の流れを系統的に示した統合化データフローダイアグラムがある。地質環境特性の長期変遷に係る調査・評価に関しても、過去から現在に至る自然現象の発生に伴う水理場などの変遷を推定し、将来の変化を予測する「古水理地質学的手法」(太田ほか, 2007) に基づき、図 4-2 に示す統合化データフローダイアグラムが整理されており、4D-SDM の構築においては、このような統合化データフローダイアグラムを活用することが有効である。なお、統合化データフローは 4D-SDM を用いて評価を行う領域の地域的な地質環境条件を考慮して個別に作成する必要がある。図 4-2 に示した統合化データフローはあくまでも参考とされたい。

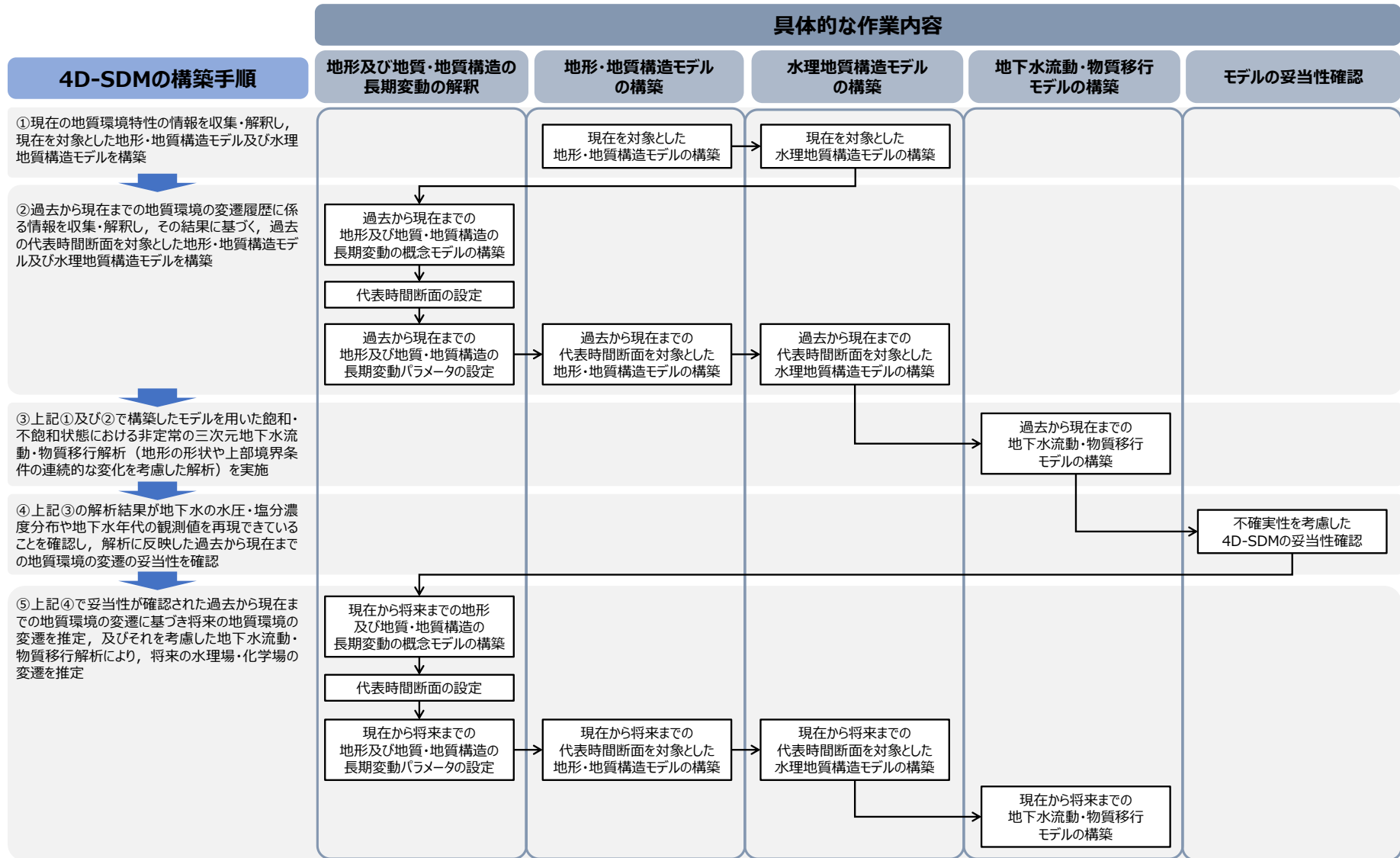


図 4-1 四次元地質環境モデル構築に係る手順と具体的な作業内容

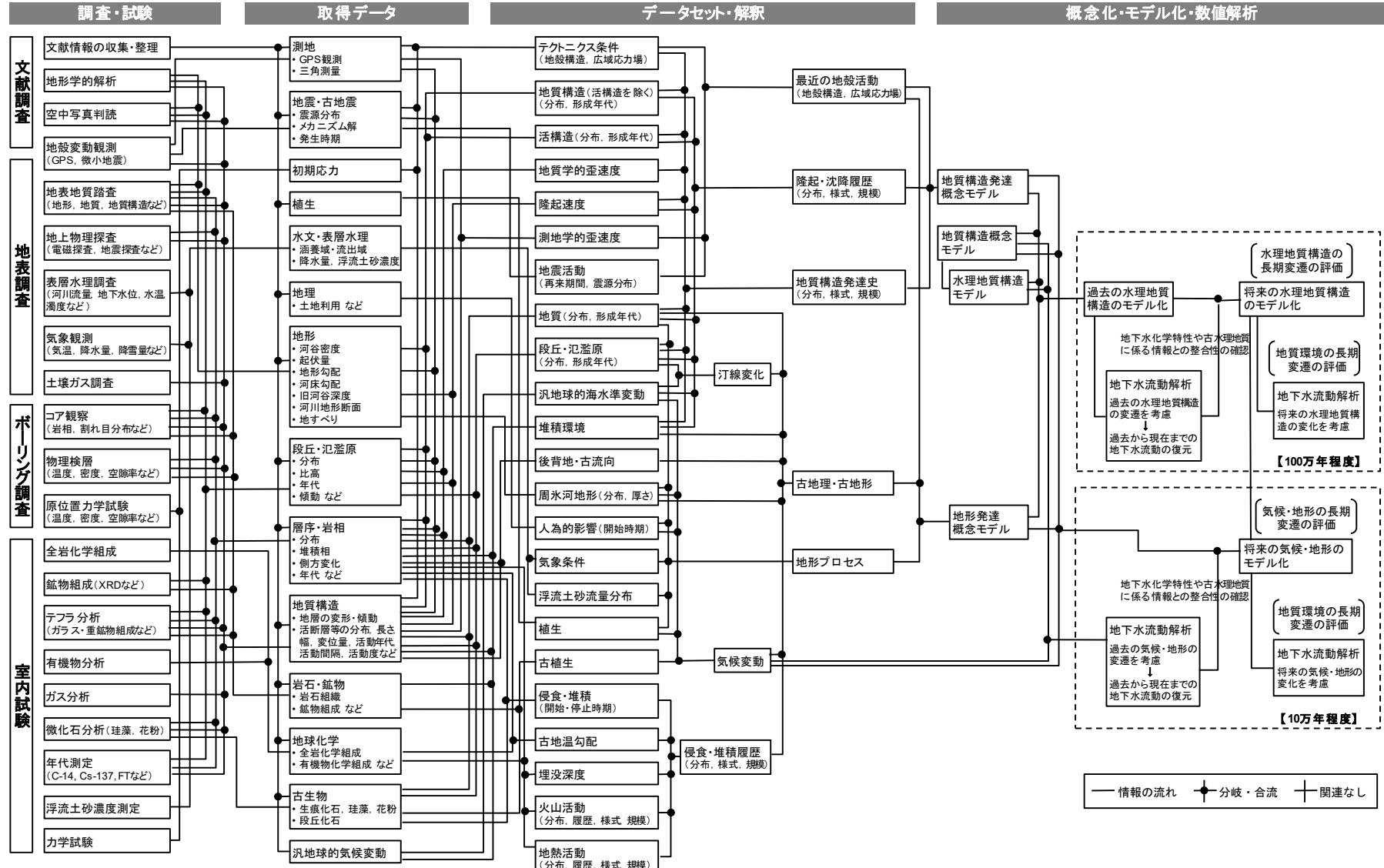


図 4-2 地質環境特性の長期変遷の調査・評価に係る統合化データフローダイアグラムの例 (NUMO, 2021 (付属書 3-10))

4.1 評価対象領域の設定と概念モデルの作成

4.1.1 評価対象領域の設定

本報告書においては、4D-SDM を用いて評価する領域（以下、評価対象領域という）と、実際に 4D-SDM として数値モデルを構築する領域（以下、モデル化領域という）を区別する。4D-SDM 構築の際は、評価対象領域における地形及び地質・地質構造、水理地質構造、地下水流動・物質移行、地形及び地質・地質構造の長期変遷に関する地質環境情報を収集し、それらを総合的に解釈して概念モデルを構築する。その後、各種地質環境情報及び概念モデルを考慮してモデル化領域を設定する。

設定した評価対象領域が適切であるかどうかについては、後述する 4.1.3 において確認し、その設定範囲が適切でなかった場合、評価対象領域を再設定する。設定した評価対象領域の適切性を判断する基準として、例えば、その領域が現在の地下水流動の涵養域、流出域及び分水嶺などの水理境界を含んでいることが挙げられる。また、評価対象領域内やその近傍において規模の大きい地形変化が想定される場合は、それに伴う河川水系の変遷などにより涵養域から流出域までの地下水流動系が変化することが予想されることから、地下水流動系の変化を考慮して評価対象領域を設定する必要がある。さらに沿岸域を含む評価対象領域においては、主要な地下水流動として陸域で涵養した地下水が汀線付近で流出することが想定されることや、過去から将来にわたり海水準変動の影響で汀線の位置が変化することを踏まえて、評価対象領域は少なくとも海水準変動サイクルにおける海退時の汀線位置を包含して設定する必要がある。

4.1.2 地質環境情報の収集

4.1.1 で設定した評価対象領域に対し、4D-SDM の構築を行ううえで必要となる地質環境情報を収集する。収集する地質環境情報は、地形及び地質・地質構造の空間分布と時間変化に関わるデータと、水理地質構造や地下水流動・化学に関わるデータに分けることができ、前者は地形・地質構造モデルの構築及び地形・地質の長期変遷に関する概念モデルの構築に、後者は主に水理地質構造モデルの構築、地下水流動・物質移行モデルの構築及びそれらの妥当性確認に活用する。

4D-SDM を構築するために収集する地質環境情報の例を、表 4-1 及び表 4-2 に示す。

表 4-1 地形及び地質・地質構造の空間分布と時間変化に関わるデータとその位置付け

	収集・考慮すべきデータ	解釈/データセット	概念化/モデル化	
地形に関わるデータ	[空間分布に関わるデータ] <ul style="list-style-type: none"> ・ 数値標高モデル ・ 標高変化（測地データ） ・ 尾根・水系分布など ・ 地形面分布（平面・高度） ・ 地形区分分布（リニアメント，地形面） 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 陸域の地形形状 ・ 海域の地形形状 	地表の形状 （地形モデル）	
	[時間変化に関わるデータ] <ul style="list-style-type: none"> ・ 地形面形成年代 			
地質・地質構造に関わるデータ	[空間分布に関わるデータ] <ul style="list-style-type: none"> ・ 地質分布（地表・地下） ・ 地層の走向・傾斜 ・ 岩種・岩相 ・ 地質層序 ・ 断層・破砕帯の分布（地表・地下） ・ 断層・破砕帯の規模（長さ・幅） ・ 破砕帯の破砕程度 ・ 割れ目の分布 ・ 割れ目の規模（長さ，幅） ・ 割れ目の頻度，密度，性状など ・ 変質帯・風化帯の分布 ・ 変質帯・風化帯の規模（長さ，幅） ・ 変質帯・風化帯の性状など 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 地層・岩体の分布・広がり ・ 地層・岩体の厚さ ・ 断層・破砕帯や割れ目の位置，長さ，幅 ・ 変質帯・風化帯の位置，長さ，幅 	地史（地形・地質構造発達史） 地質・地質構造の概念モデル 地質・地質構造（平面図・断面図）	
	[時間変化に関わるデータ] <ul style="list-style-type: none"> ・ 地質年代 ・ 地史 			

地形・地質構造モデル

表 4-2 水理地質構造や地下水流動・化学に関わるデータとその位置付け

	収集・考慮すべきデータ	解釈/データセット	概念化/モデル化	
水理地質構造・地下水流動に関わるデータ	<ul style="list-style-type: none"> ・分水嶺 ・河川・湖沼・海岸線・湧水地点など ・地下水位・間隙水圧 ・降雨量・気温・日照など ・河川流量 ・涵養量・降雨浸透量 ・地下水涵養域・流出域 ・海水準変動 ・隆起・侵食 ・応力場 	<ul style="list-style-type: none"> ・水理境界条件 	<ul style="list-style-type: none"> ・水理地質構造の概念モデル ・地下水の流動形態（多孔質、割れ目ネットワーク） 	水理地質構造モデル
	<ul style="list-style-type: none"> ・地形・地質構造モデル ・地質構造の概念モデル（地史含む） 	<ul style="list-style-type: none"> ・水理地質区分 		
	<ul style="list-style-type: none"> ・透水係数・比貯留係数 ・有効間隙率・密度 ・分散長・有効分散拡散係数・屈曲率 ・地下水位・間隙水圧 ・流向・流速 ・不飽和特性値 			
地下水化学に関わるデータ	<ul style="list-style-type: none"> ・地表水及び地下水の水質（化学組成・同位体組成・pH・Eh） ・地下水年代 	<ul style="list-style-type: none"> ・地表水質分布 ・地下水質分布 ・地下水の形成年代 	（地下水流動・物質移行解析結果の妥当性確認に使用）	

4.1.3 4D-SDM 構築に係る各種概念モデルの構築

4.1.2 で抽出した各種データを用いて、評価対象領域における現在の地形・地質構造、水理地質構造、地下水流動、地下水化学及び微細透水構造の概念モデルと、地形・地質の長期変遷の概念モデルを構築する。

各種概念モデルの構築の際に、設定した評価対象領域が適切でないとは判断された場合は、評価対象領域を再設定したうえで地質環境情報を収集し各種概念モデルを構築後に、それらが整合的であることを確認する。

(1) 現在の地形・地質構造の概念モデルの構築

4.1.2 で抽出した「地形及び地質・地質構造の空間分布と時間変化に関わるデータ」(表 4-1) をもとに、現在を対象とした地形及び地質・地質構造の概念モデルを作成する（例えば、図 4-3）。ここで、概念モデルとは、地質環境特性に関する情報に基づき、地層処分にとって重要な構造や特性（例えば、地下水の流動や水質形成などに影響を及ぼすと考えられる不連続構

造や岩盤中の水理学的不均質性)を抽出し対象となる範囲の地質環境を図示したものである (JNC, 2005)。また,抽出したデータをもとに広域的な地史(地形や地質・地質構造の発達史)を作成するが,ここで地形及び地質・地質構造の概念モデルと地史との間に齟齬のないことを確認する。

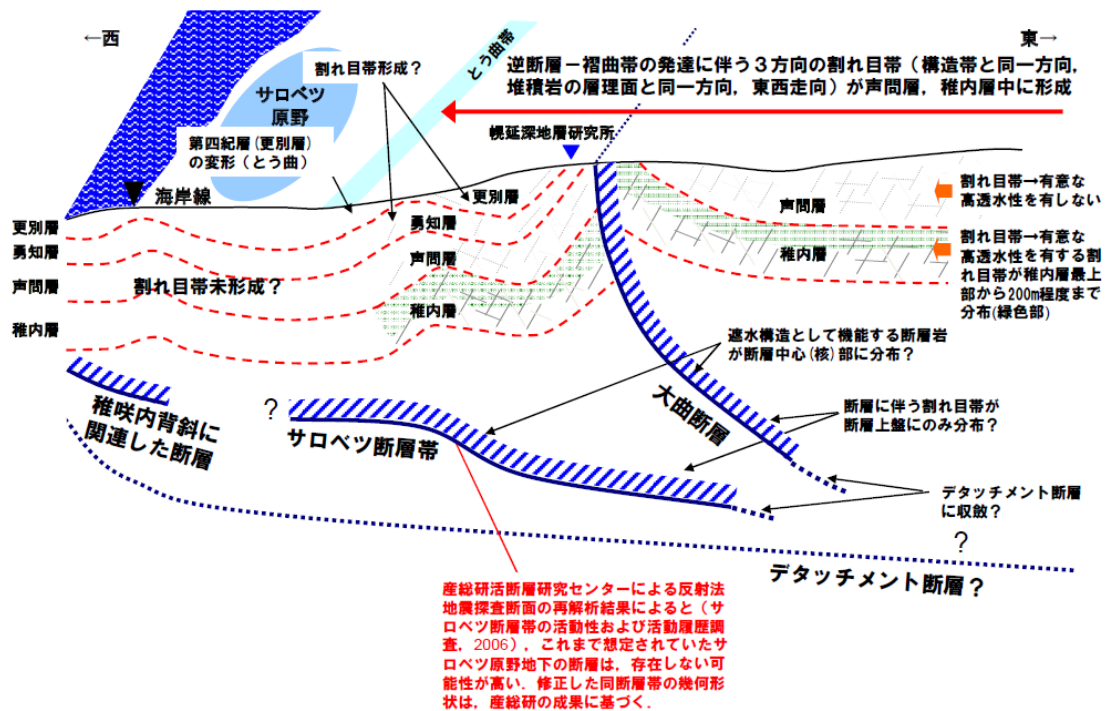


図 4-3 幌延地域を対象とした地形及び地質・地質構造の概念モデルの例 (大澤ほか, 2008)

(2) 地形及び地質・地質構造の長期変遷の概念モデルの構築

4.1.2 で収集した「評価対象領域における地形, 地質・地質構造の空間分布及び時間変化に関わるデータ」(表 4-1), 構築した地質・地質構造の概念モデルと地史及び「水理地質構造や地下水流動・化学に関わるデータ」(表 4-2)をもとに, 地形及び地質事象の変遷を編年表として整理し, それに基づき概念モデルを構築する(例えば, 図 4-4)。

(3) 現在の水理地質構造，地下水流動・物質移行，地下水化学及び微細透水構造の概念モデルの構築

水理地質構造の概念モデルは，現在を対象とした地形・地質構造モデルや地質及び地質構造ごとの水理特性データに基づき，重要となる水理地質構造の区分と水理特性を解釈することによって構築する。また，水理地質構造の概念モデルに表現された地形や水理地質構造の分布及び原位置で取得された地下水位や間隙水圧などの情報に基づき，地下水の涵養域や流出域，地表付近及び地下深部を流れる地下水の向きや速さ，地下水流動やそれに伴う物質移行に影響を及ぼし得る水理地質構造を解釈することで，地下水流動・物質移行の概念モデルを構築する（例えば，図 4-5）。また，地表水及び地下水の水質，地下水年代といったデータを解釈することによって地下水化学の概念モデルを構築する（例えば，図 4-6）。このとき，水理地質構造，地下水流動及び地下水化学のそれぞれの概念モデルを総合的に解釈し，それぞれの概念モデル間の整合性を確認することが重要である（例えば，図 4-7）。

包括的技術報告書では，深成岩類，新第三紀堆積岩類，先新第三紀堆積岩類のそれぞれの検討対象母岩を対象とし，放射性物質の移行・遅延を支配する微細透水構造の特徴を表現した概念モデルが示されている（例えば，図 4-8）。この概念モデルに示されている微細な透水構造によって生じるマトリクス拡散（特に，地下水の移流が生じている破砕部などの透水性割れ目の開口したチャンネルから基質内部に向けて生じる拡散現象）の影響は，4D-SDM が対象とする広域スケールでの水理場や化学場の長期変遷や，物質移行解析結果に大きな影響を与えることがある。そのため，評価対象領域に沿岸域が含まれており，かつ二重空隙モデルのような物質移行特性をもつ地質構造が分布する場合には，マトリクス拡散効果を考慮した概念モデルについても検討を行い，その影響を確認することが重要である。

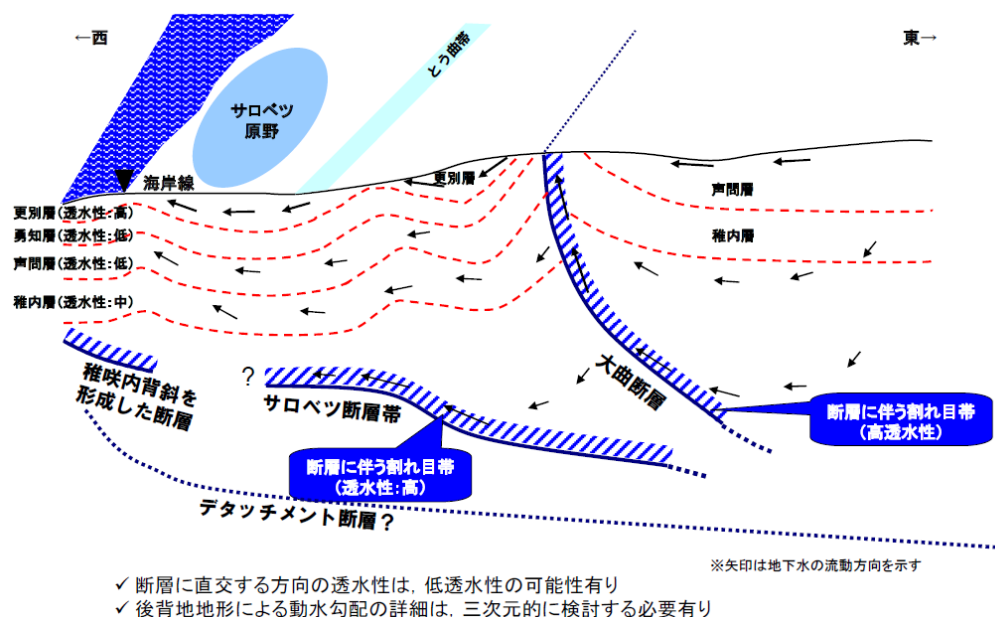
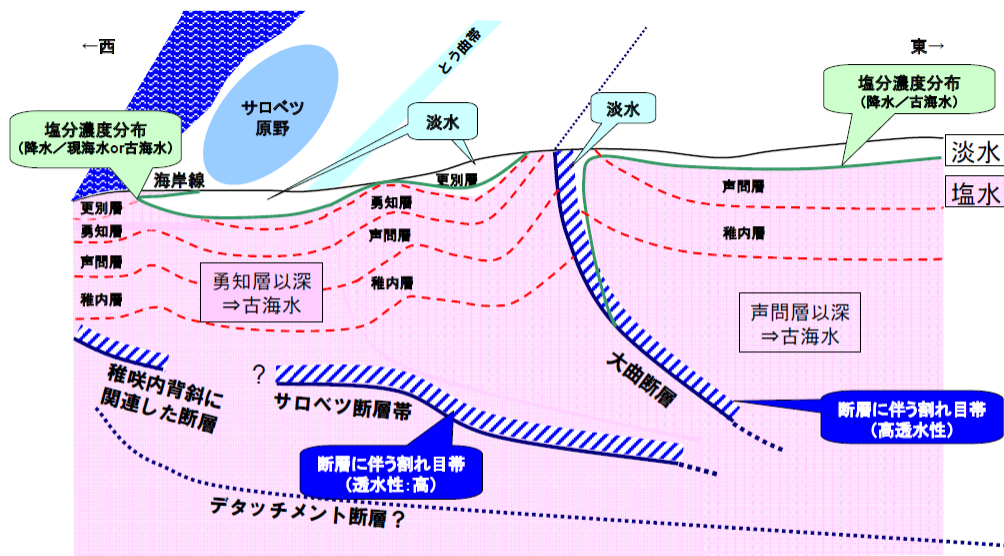
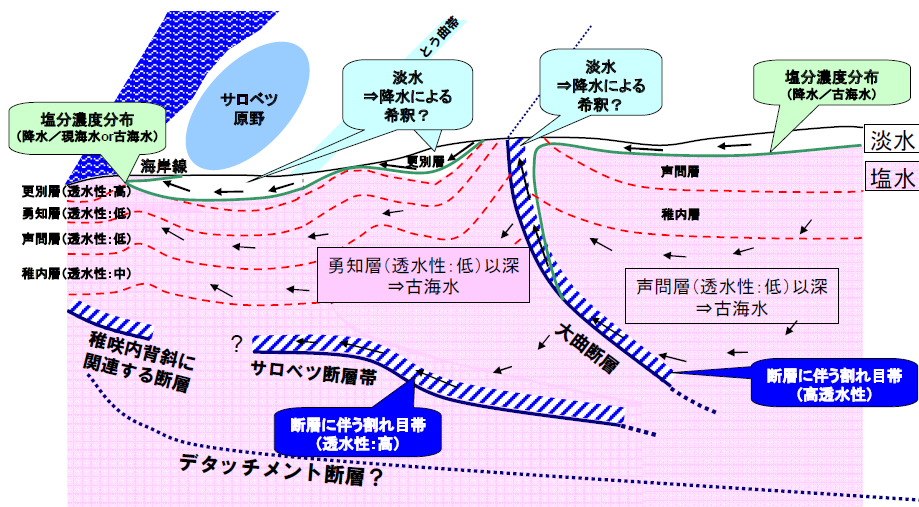


図 4-5 幌延地域を対象にした地下水流動の概念モデル（大澤ほか，2008）



- ✓ 更別層の上部は陸成, 下部は海成
- ✓ 古海水と現海水の区別は困難
- ✓ 海岸線付近の塩分濃度分布は不明
- ✓ 海岸線付近では, 更別層内の堆積構造による透水性の違いにより, 複雑な塩分濃度分布である可能性有り

図 4-6 幌延地域を対象にした地下水化学の概念モデル (大澤ほか, 2008)



- ✓ 断層に直交する方向の透水性は, 低透水性の可能性有り
- ✓ 後背地地形による動水勾配の詳細は, 三次元的に検討する必要有り
- ✓ サロベツ断層帯の透水性(透水性の有無や高透水性の割れ目帯の分布など)や後背地地形による動水勾配は沿岸域の塩分濃度分布に影響を与えている可能性有り
- ✓ 古海水と現海水の区別は困難
- ✓ 海岸線付近の塩分濃度分布は不明
- ✓ 海岸線付近では, 更別層内の堆積構造による透水性の違いにより, 複雑な塩分濃度分布である可能性有り

図 4-7 幌延地域を対象にした地質環境の概念モデル (大澤ほか, 2008)

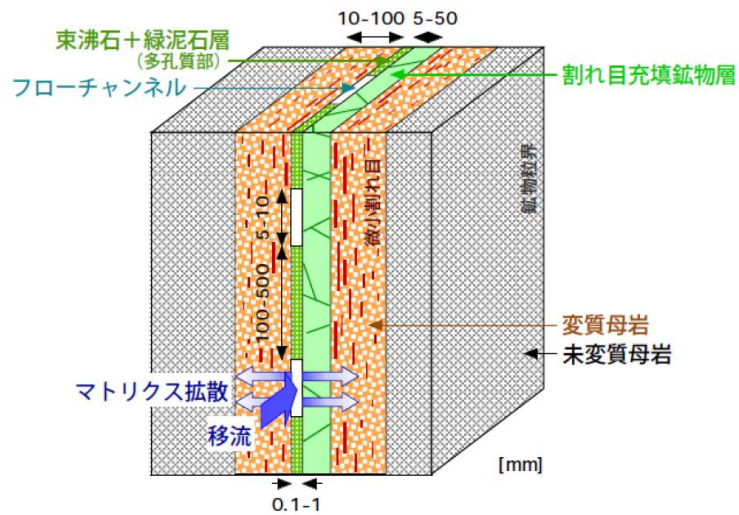


図 4-8 微細透水構造概念モデル（深成岩類）（NUMO, 2021）

4.1.4 モデル化領域の設定

4.1.1～4.1.3 の検討をもとに、4D-SDM のモデル化領域を設定する。モデル化領域を設定する際は、分水嶺となる山地の尾根を水理的な境界として選定したうえで、地下水の涵養域から流出域までを包含する十分な平面領域と深度（例えば、数十 km×数十 km の地表領域に対して、深度方向数 km 程度以上）を設定する。

4.2 現在を対象とした地形・地質構造/水理地質構造モデルの構築

4.2.1 現在を対象とした地形・地質構造モデルの構築

「現在を対象とした地形・地質構造モデルの構築」に係る検討フローを図 4-9 に示す。

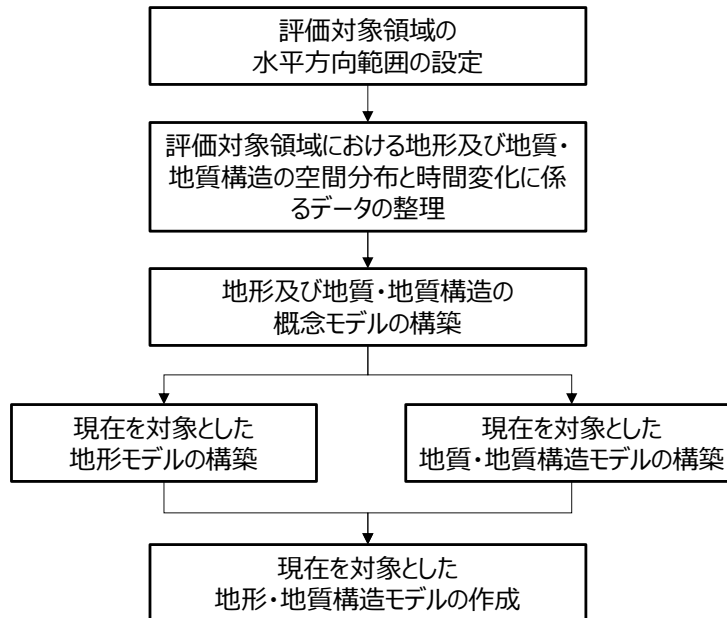


図 4-9 現在を対象とした地形・地質構造モデルの構築に係る検討フロー

(1) 現在を対象とした地形モデルの構築

現在を対象とした地形モデルは、主に 4.1.2 で抽出した「地形の空間分布に関わるデータ」をもとに構築する。「現在を対象とした地形モデルの構築」に係る具体的な作業フローと、その作業内容及び品質管理の観点で確認すべき事項を図 4-10、表 4-3 に示す。

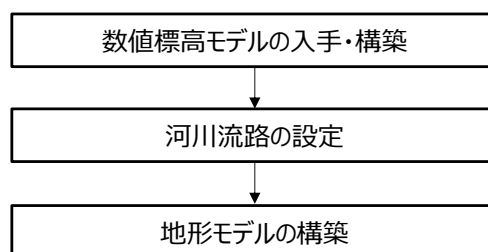


図 4-10 「現在を対象とした地形モデルの構築」に係る作業フロー

表 4-3 「現在を対象とした地形モデルの構築」作業の内容と確認事項

作業名	作業の内容		確認事項
現在を対象とした地形モデルの構築	数値標高モデルの構築	モデル化領域における数値標高モデルの作成	<ul style="list-style-type: none"> ・モデル化領域の範囲 ・各岩種や断層の分布位置 ・地質構造モデル, 水理地質構造モデルのメッシュサイズ
		地形面のスムージング	
	河川の設定	落水線マトリクス作成	<ul style="list-style-type: none"> ・モデル化領域の流域と主要河川の位置及び河川縦断形 ・湖沼の位置
		主要河川の設定, 全河川流路の設定	
	地形モデルの構築	面形状データの作成	<ul style="list-style-type: none"> ・面形状に欠損箇所がないこと ・河川流路に意図しない窪地がないこと

(i) 数値標高モデルの構築

4.1.4 で設定したモデル化領域を対象に、国土地理院の「数値地図 10 m メッシュ (標高)」や「基盤地図情報」、海上保安庁の「日本近海 500 m メッシュ海底地形データ」や「沿岸の海の基本図ー海底地形図」など全国で整備・公開されているデータに基づき、現在を対象として、地表面の標高を数値的に表現した数値標高モデルを構築する。また、現地調査で航空レーザ計測システムなどを用いた測量を実施した際には、その結果も活用する。数値標高モデル構築の際、測地系については世界測地系を採用することとし、座標系はモデル化領域に整合的な平面直角座標系を採用することが望ましい。

数値標高モデルの構築後、地質図や地質構造の概念モデルから分布が予想される各岩種や断層の地表分布位置と数値標高モデルの間に齟齬がないことを確認する。また、水理地質構造及び地下水流動の概念モデルを考慮しつつ、地下水流動モデルの構築に必要な水理地質構造を表現可能な空間解像度となっていること、評価対象深度を通過する地下水流動系に影響を及ぼす可能性がある地形の起伏を再現できる解像度となっていることを確認する。

(ii) 河川流路の設定

モデル化領域内における河川流路の情報は、地下水流動モデルを構築するうえで、境界条件の設定などに活用されるほか、生活圏評価を行ううえでも重要となる。河川流路については、データベースの情報をもとに設定する方法と、数値標高モデルをもとに河川流路を推定する方法が考えられる。現在を対象とした地形モデルを構築する際は、河川流路に関するデータベースが利用することが一般的である。

過去又は将来の地形モデルなど河川流路に関するデータベースが利用できない場合、数値標高モデルをもとに河川流路を推定することとなる。河川流路を推定する方法の一つとして、地形に沿う表面流の流下方向（以下、「落水線」という）をモデル化した落水線図 (Drainage Direction Matrix (越智・柴崎, 1999) ; 以下、「DDM」という) の適用が挙げられる。DDM を

用いて河川流路を推定する場合、河川の逆流地形に応じて河川の上流端から下流端までの流路が適切に設定されていることを確認することが重要である。

(iii)地形モデルの構築

(i) 及び (ii) の作業結果を踏まえて、モデル化領域全体の地形の起伏を面形状で表現した地形モデルを構築する。地形モデルを構築する際は、水理地質構造及び地下水流動の概念モデルを考慮しつつ、モデル化領域における広域的な地下水流動系に影響を与えるような尾根・谷地形の規模や間隔が、モデル上で十分表現可能となる解像度を設定する必要がある（例えば、尾根・谷地形の間隔が 250 m 程度の場合、50 m メッシュで 5 分割程度以下を目安とする）。

(2) 現在を対象とした地質・地質構造モデルの構築

現在を対象とした地質・地質構造モデルの構築は、主に 4.1.2 で抽出した「地質・地質構造に関わるデータ」（表 4-1）をもとに実施する。「現在を対象とした地質・地質構造モデルの構築」に係る具体的な作業フローと、それぞれの段階における具体的な作業内容及び品質管理に係る確認事項を図 4-11、表 4-4 に示す。

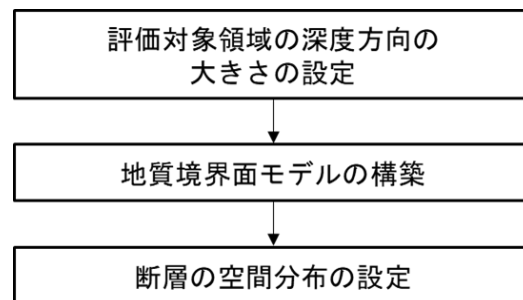


図 4-11 「現在を対象とした地質・地質構造モデルの構築」に係る作業フロー

表 4-4 「現在を対象とした地質・地質構造モデルの構築」作業の内容と確認事項

作業名	作業の内容		確認事項
現在を対象とした地質構造モデルの構築	地質境界面モデルの構築	代表岩種や被覆層の分布, 層厚の設定	<ul style="list-style-type: none"> 各境界面の形状に欠損がないこと 上下関係など, 他の地質境界面との関係性が適切であること (地層の連続性が保たれていること)
		境界面の設定	
	断層の空間分布の設定	比較的大規模な断層の配置 (目安として長さ 10 km 以上) 出来る限り決定論的なモデル化を実施 比較的小規模な断層の配置 (目安として長さ 10 km 未満) 確率論的なモデル化を検討	<ul style="list-style-type: none"> 断層の連続性・不連続性が適切であること (地層や他の断層を切る場合の関係性など) 地質構造の概念モデルとの整合性

(i) 地質境界面モデルの構築

モデル化領域において, 4.1.2 で収集した「空間分布に関わるデータ」をもとに, モデル化する代表岩種や被覆層の分布・層厚を推定し, 地質境界面モデルを構築する。特定の地域を対象とした地質境界面モデルの具体的な構築方法については, モデル化領域に分布する地層・岩体の岩種や形成概念, モデル構築に使用可能なデータの種類や量の違いなどにより, 地域によって大きく異なる。JAEA における既往研究事例 (石橋ほか, 2012) を参考にすると, 地質境界面モデルの構築には, 既存の地質図などの文献データと地表地質調査, 反射法弾性波探査, ボーリング調査で得られたデータが用いられる。地質図や地表地質調査の結果は, モデル化対象の地質境界の空間的な広がり情報となる面又は線の座標データとして, ボーリング調査や反射法弾性波探査の結果は, 地質境界の分布位置の情報となる点の座標データとして適用される。これらの座標データが得られていない範囲は, 多項式スプライン関数で空間的に補間することで三次元的な地質境界面モデルを構築している。地層境界面モデルの具体的な構築方法については, JAEA における既往研究事例 (例えば, JNC, 2005 ; 石橋ほか, 2012) を参照されたい。

(ii) 断層モデルの構築

特定の地域を対象とした断層の空間分布のモデル化については, 地質境界面モデルの構築と同様に, モデル化領域に分布する断層の規模や特徴・形成概念, モデル構築に使用可能なデータの種類や量の違いなどにより, 地域によって大きく異なる。JAEA における既往研究事例 (石橋ほか, 2012) を参考にすると, 断層の空間分布をモデル化するには, 地表地質調査, ボーリング調査, 物理探査及びリニアメント判読などの複数の断片的情報を整合的に組み合わせることが重要であると示されている。反射法弾性波探査などの測線上から抽出した断層と考えられるアノマリと, 地表地質調査やボーリング調査結果で確認された断層部との

空間的な連続性を解釈したうえで、多項式スプライン関数で空間的に補間することで断層の空間分布をモデル化している。断層の空間分布の具体的なモデル化方法については、JAEA における既往研究事例（例えば、JNC，2005；石橋ほか，2012）を参照されたい。

(3) 現在を対象とした地形・地質構造モデルの構築

モデル化領域の地形モデル，地質境界面モデル及び断層の空間分布に関する検討結果を統合し，地形・地質構造モデルを構築する。「現在を対象とした地形・地質構造モデルの構築」における作業の内容と，品質管理に係る確認事項を表 4-5 に示す。

表 4-5 「現在を対象とした地形・地質構造モデルの構築」作業の内容と確認事項

作業名	作業の内容	確認事項
現在を対象とした地形・地質構造モデルの構築	地形モデル，地質境界面モデル及び断層モデルの統合による地形・地質構造モデルの構築	<ul style="list-style-type: none"> ・ 地形モデル，地質境界面モデル及び断層モデルの統合に伴う薄層のモデル化に関する状況の確認 ・ 断層活動と地層・岩体の形成の順序 ・ 概念モデルとの整合性

4.2.2 現在を対象とした水理地質構造モデルの構築

「現在を対象とした水理地質構造モデルの構築」に係る検討フローを図 4-12 に示す。

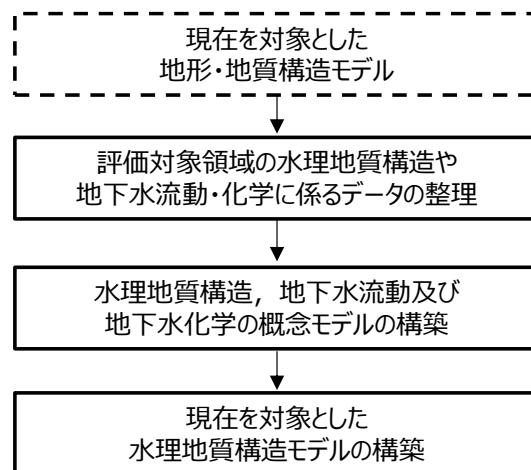


図 4-12 「現在を対象とした水理地質構造モデルの構築」に係る検討フロー

(1) 現在を対象とした水理地質構造モデルの構築

現在を対象とした水理地質構造モデルの構築に係る具体的な作業フローと，それぞれの作業の内容，及び品質管理に係る確認事項を図 4-13，表 4-6 に示す。

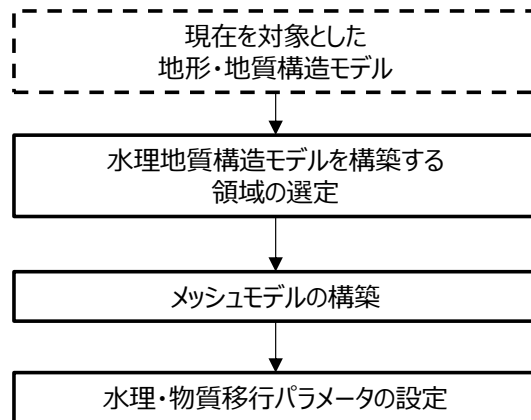


図 4-13 「現在を対象とした水理地質構造モデルの構築」に係る作業フロー

表 4-6 「現在を対象とした水理地質構造モデルの構築」作業の内容と確認事項

作業名	作業の内容		確認事項
現在を対象とした水理地質構造モデルの構築	水理地質構造モデルを構築する領域の選定	地形・地質構造モデルの領域内における水理境界や地下水の涵養域から流出域までを包含する領域を選定	<ul style="list-style-type: none"> 水理境界として設定することの根拠とその適切性があること モデル化領域の涵養域から流出域が包含されていること
	メッシュモデルの構築	地形・地質構造モデルに基づきメッシュモデルを構築	<ul style="list-style-type: none"> 重要と判断された水理地質構造の形状や連続性が適切な分解能で表現されていること 圧力や濃度の変動が大きいことが予測される領域のメッシュが細分化されていること 解（圧力、濃度）が正常に収束すること メッシュモデルを用いた作業や数値計算が現実的に実行可能であること
	水理・物質移行パラメータの設定	透水係数，有効間隙率，分散長の設定	<ul style="list-style-type: none"> パラメータの設定根拠の追跡性があること 入力値が正しく設定されていること

(i) 水理地質構造モデルを構築する領域の選定

モデル化領域の地形・地質構造モデルを対象に，分水嶺となる山地の尾根を水理的な境界として選定したうえで，地下水の涵養域から流出域までを包含する十分な平面領域と深度（例えば，数十 km×数十 km の地表領域に対して，深度方向数 km 程度以上）を設定する。ただし，地形・地質構造モデルと同じ空間領域に対して水理地質構造モデルを構築することが一般的であることから，モデル化領域と水理地質構造モデルを構築する領域は同一として扱う。

(ii) メッシュモデルの構築

水理地質構造モデルは、水理地質構造の概念モデルを地下水流動解析に使用するために数値的に表現したモデルであり、多くの場合、連続体モデル（多孔質媒体モデル）や不連続体モデル（亀裂性媒体モデル）として構築する。一般的に、岩盤中の間隙が主な水みちとなる場合、連続体モデルとして取り扱う。また、岩盤中に分布する割れ目が主な水みちとなる場合には、不連続体モデルとして取り扱う。

地下水の流動形態が不連続体モデルとして陽に取り扱うべきものであっても、モデル化領域全体を不連続体モデルとして扱うことが困難な場合があり得る。例えば、数十 km スケールのモデル化領域に対して、割れ目の分布特性（方位分布、大きさ分布、空間分布、密度分布など）や水理特性（透水量係数、開口幅など）に関するデータが限定的、あるいは偏在している場合、すべての領域を不連続体モデルとして取り扱うことが困難である。そのような場合には、連続体モデル、あるいは等価不均質連続体モデルとして取り扱う。なお、2.3 で記述したとおり、本報告書は広域スケールの 4D-SDM の構築技術に焦点を当てたものであることから、主に連続体モデルとして水理地質構造モデルを構築する際のメッシュモデルの構築について記載する。

メッシュモデルでは、モデル化領域に分布する地形及び地質・地質構造の分布を分割要素や分割格子（メッシュ）として表現する。構築するメッシュモデルは、モデルの空間スケールや水理地質構造の複雑さ、概念モデルの構築の際に抽出した重要な水理地質構造の数や規模などに依存して、その規模や複雑さが異なることとなる。一方で、実務上は計算機の性能や計算に要する時間を考慮してメッシュモデルを構築することも必要となる。したがって、メッシュモデルの構築に当たっては、水理地質構造の概念モデルにおいて重要と考えられる水理地質構造の形状や連続性が適切な分解能で表現されていることを確認するとともに、構築したメッシュモデルを用いた作業や数値計算が現実的に実行可能であることを確認する必要がある。

また、地表近傍は地下水面が形成されるため、地下水面の分布を適切に表現できるようにメッシュを細分化する。一方、地質構造や地下水流動・物質移行特性の時間的・空間的変動が相対的に小さいと考えられる地下深部については、メッシュサイズを大きくすることで、数値計算などに必要な時間を削減できるようなメッシュモデルの構築が可能となる。

(iii) 水理・物質移行パラメータの設定

(ii) で作成したメッシュモデルに水理・物質移行パラメータを設定することで、水理地質構造モデルを構築する。水理・物質移行パラメータの例として岩盤の透水係数や有効間隙率がある。地質環境調査で得られる水理・物質移行パラメータの情報は、多くの場合、空間的に離散したデータである。また、岩盤の水理・物質移行パラメータの多くは不均質性を有する。したがって、メッシュモデルに水理・物質移行パラメータを設定する際は、水理地質構造の概念モデルに基づいて、統計処理（単純化、平均化など）や内挿・外挿などの補間処理を行うことで、地表から地下深部までの空間分布を設定する。

分散長は、移流分散問題において物質の移行速度に関わる重要な物質移行特性であり、特

にモデル化領域に沿岸域が含まれている場合、塩分濃度の高い地下水の移流分散現象に大きな影響を及ぼす物質移行特性となり得る。分散長は評価スケールに依存するパラメータであることから、空間的に大規模なスケールのモデルに対する分散長を調査により得ることは困難であるため、文献情報から設定する必要がある。例えば Gelhar et al. (1992) などでは、モデルのスケールと分散長との関係が示されている。加えて、横分散長は縦分散長より少なくとも 1 オーダー小さい値であるとされている (Domenico and Schwartz, 1995)。

なお、不連続体モデルとしてモデル化する場合には、断層や割れ目などの幾何特性（方位分布、大きさ分布、空間分布、密度分布）や水理特性（透水量係数、開口幅）に基づいて、決定論的な方法、あるいは確率論的な方法により、モデル構築に必要となるパラメータを設定する。不連続体モデルによる水理地質構造モデルの構築手法については、スウェーデンの Forsmark サイトを対象とした事例（例えば、Joyce et al., 2010）を参照されたい。

4.3 地形及び地質・地質構造の長期変動の解釈

「地形及び地質・地質構造の長期変動の解釈」に係る検討フローを図 4-14 に示す。

4D-SDM の構築では、評価対象領域における地形及び地質・地質構造の長期変動の解釈をもとに、検討対象の時間スケールである 100 万年の期間について、気候や地質環境特性の長期的な変動の傾向が大きく変わるため、それに関連するモデルの各種条件（例えば、地形及び地質・地質構造の長期変動パラメータ）を変化させる必要がある時期（以下、「代表時間断面」という）として設定する。また、特定の期間における地形変化を細かく表現する場合には、必要に応じて時間断面を追加して設定する。その後、各時間断面を対象として、地形・地質構造モデル、水理地質構造モデル及び地下水流動・物質移行モデルの構築を行う。

本節では、この作業のうち、代表時間断面のみを対象として 4D-SDM を構築する場合について、その設定に係る考え方や手順について説明する。

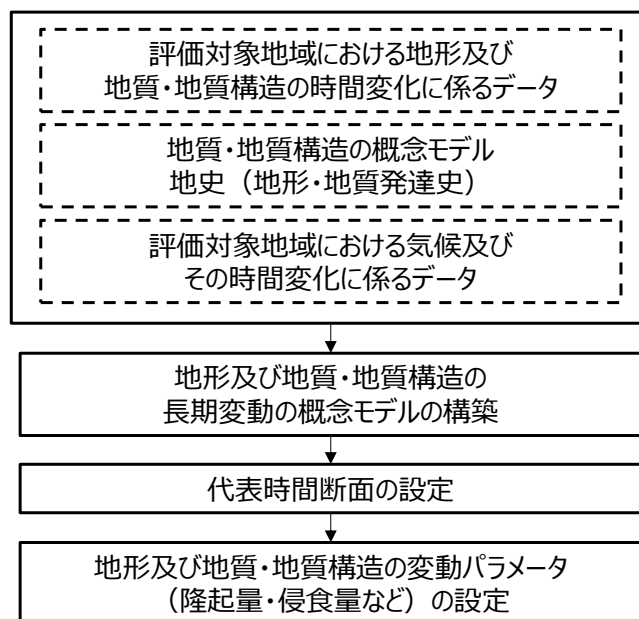


図 4-14 「地形及び地質・地質構造の長期変動の解釈」に係る検討フロー

4.3.1 時間断面の設定

構築した地形及び地質・地質構造の長期変動の概念モデルに基づき、時間断面を設定する。前述のとおり、本項では代表時間断面のみを時間断面とする場合について記載する。

(1) 代表時間断面設定の考え方

代表時間断面の設定の際は、国内外の既存の報告事例 (JAEA, 2015 ; LLW Repository, 2011a ; 2011b ; 2011c) から抽出された長期的な水理的・地球化学的な変化を検討するうえで考慮すべき事項である、長期的な「気候の変化」、「地形の変化」、「岩相及び流動経路 (地質・地質構造) の変化」を考慮する。

代表時間断面設定のために考慮すべき事項を整理するにあたり、包括的技術報告書の「付属書 6-4」で整備された FEP の一覧 (以下、「NUMO_FEP リスト」という) を活用した。ここで、FEP とは放射性廃棄物の地層処分の安全評価において、地層処分システムの各構成要素の特性 (Feature) や、特性に影響を与える事象 (Event)、地層処分システムの時間的変遷の過程 (Process) といった処分場閉鎖後の安全に関する要因のことである。

(i) 「気候の変化」について考慮すべき事項

NUMO_FEP リストから「気候の変化」に関連する FEP を抽出する (表 4-7) とともに、4D-SDM を構築するうえで「気候の変化」について考慮すべき事項について、代表時間断面を設定するうえでの考え方とともに整理した (表 4-8)。

「気候の変化」に関する考慮事項を踏まえ、4D-SDM のモデル化領域において、既存文献などをもとに、科学的根拠に基づく気候変動サイクルを設定する。可能であれば、地球規模のみならず地域的・局所的な気候変化を反映する。この気候変動サイクルに伴って降水量や蒸発散量が変化し、涵養量が変化する。一般的に、涵養量は間氷期と比較して氷期に小さくなることが知られている。特に、モデル化領域において、氷期に永久凍土の形成が想定される場合、涵養量が減少することに伴い水頭分布が大きく低下することが想定される。なお、気候変動サイクルは、後述する汎世界的な海水準変動と連動すると考えられる。本事項は、NUMO_FEP リストにおける F1.3.1, F1.3.2, F1.3.5, F1.3.7 に関する事項である。

モデル化領域に沿岸部が含まれる場合は、海水準変動を考慮する必要がある。この海水準変動は、約 10 万年周期の気候変動による陸氷の拡大と縮小を原因としたものを指す。海水準変動の結果、汀線の移動に伴う陸域面積の変化や塩淡境界の位置の変化が生じ、結果として動水勾配や地下水の化学特性が変化することが想定される。本事項は、NUMO_FEP リストにおける F1.3.3 に関する事項である。

海水準変動を 4D-SDM に考慮するためには、汎世界的な海水準変動曲線をモデル化し、境界条件として設定する。海水準変動を簡易にモデル化する場合、図 4-15 に示すように海進の規模については、JNC (1999) に基づき最大+5 m とし、海進の進行期間は 2 万年と設定する。一方、海退については、深部地質環境研究センター編 (2007) 及び日本地質学会 (2012) に基づき最大-140 m とし、海退の進行期間を 8 万年と設定する。なお、海水準変動をモデル化する際、過去における直近の最大海進 (縄文海進) が約 6,000 年前であることに留意し、約 6,000

年前を起点として海退・海進の進行期間を考慮する。

気候変化に伴う地形の変遷としては、侵食作用を考慮することが考えられる。特にモデル化領域が熱帯地域あるいは氷河が発達するような寒冷地に属する場合、侵食だけでなく風化などによる地形変化も考慮すべき場合がある。本事項は、NUMO_FEP リストにおける F1.3.4, F1.3.6 及び F1.3.10 に関わる事項である。

これらのことから、海水準変動曲線における最大海進・最大海退時は、気候や地質環境特性の長期的な変動傾向が大きく変化する時期と考えられるため、4D-SDM を構築するための代表時間断面と設定する。(図 4-15)。

表 4-7 「気候の変化」に関連する FEP の抽出

整理番号	FEP 番号	FEP 名	内容
24	F1.3.1	地球規模の気候変動	地球規模の長期的な気候変動の、起こり得る将来の状態又は過去の証拠。地域的な状況により特定地域で起こった、気候のゆらぎや短期的な気象変化は含まない。F1.3.2 を参照。
25	F1.3.2	地域的で局所的な気候変動	処分場における、将来あり得る気候変動及び過去の変動の証拠。これは地球規模の気候変動に伴っても起こると考えられるが、処分場における気候変動はその場所特有のものであり、この FEP には短期的変動も含む。F1.3.1 を参照。
26	F1.3.3	海水準の変動	地球規模の (ユースタティック) 変動や、アイソスタティックな運動などの局地的な地質変動による海面の変動。
27	F1.3.4	氷河周辺の影響	寒冷であるが氷床のない環境における物理的プロセスやそれに付随する地形。
28	F1.3.5	局所的な氷河と氷床の影響	処分場が存在する地域における氷河や氷床からの影響。例として、地形学上の変動、侵食、溶けた水の影響、水力学的な影響などである。大きな氷塊が地球規模の気候や局地的な気候に与える影響は含まない。F1.3.1 と F1.3.2 を参照。
29	F1.3.6	暖かい気候の影響 (熱帯と砂漠)	暖かい熱帯及び砂漠の気候の影響であり、季節の影響や、これらの気候に特有な気象及び地形の影響が含まれる。
30	F1.3.7	気候変動に伴う水文学的な変化	水文学及び水文地質学的な変化。例えば、ある地域の気候変化に伴う、水の供給量・掃流土砂量・季節性変化がある。
33	F1.3.10	気候変動に伴う地形学的な変化	氷河周辺の地形の生成などの、地域的又は局所的な表層の地形変化を引き起こす気候変動への地形学的反応。地形学的特徴は、気候・水理・生物学的特徴と同様に、地質学的事象による地形の変遷と関連する。

表 4-8 「気候の変化」に関する考慮事項

考慮事項	考え方	関連する NUMO FEP
涵養量の変化	気候変動の長期的な変化として、間氷期と氷期による気候変動サイクルを設定する。 涵養量は、間氷期と比較して氷期に大きく減少すると考えられる。特に、氷期における永久凍土の形成が想定されるエリアは、涵養量が極めて小さい。	F1.3.1 F1.3.2 F1.3.5 F1.3.7
海水準変動	海水準変動による汀線の移動で陸域地形の領域面積が変化する。また、地下では塩淡境界の位置が変化する。	F1.3.3
(熱帯・寒冷地域特有の) 地形変化	特に、氷河や乾燥地帯における侵食・風化による地形変化を考慮する。(「地形の変化」においても考慮)	F1.3.4 F1.3.6 F1.3.10

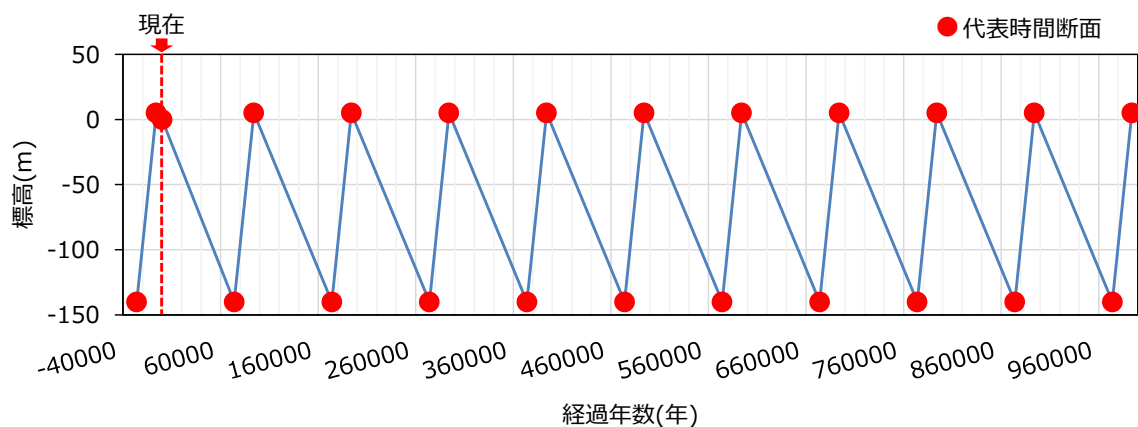


図 4-15 海水準変動の簡易モデルと代表時間断面の設定例

(ii) 「地形の変化」について考慮すべき事項

NUMO_FEP リストから「地形の変化」(表 4-7 で挙げたものを除く)に直接的に関連する FEP を抽出する(表 4-9)とともに、4D-SDM を構築するうえで「地形の変化」について考慮すべき事項について、時間断面を設定するうえでの考え方とともに整理した(表 4-10)。

隆起・侵食に伴う海底地形の陸化、丘陵・山地や谷の形成、地層の剝削及びその後の地層の堆積による地形の変化により、動水勾配が大きく変化することが想定される。また、動水勾配の増加に伴い陸域の地下水流動が促進される結果、特に浅部を流れる地下水の化学特性が大きく変化する可能性がある。本事項は、NUMO_FEP リストにおける F1.2.1, F1.2.2, F1.2.8, F1.2.13, F5.1.13 に関する事項である。

また、「地形の変化」に伴って河川流路の変更や湖の形成が促されることによる涵養域・流出域の変化と、それに伴う地下水流動経路の変化が想定される。本事項は、NUMO_FEP リストにおける F5.1.5.2 に関する事項である。

上記事項を考慮するうえでは、隆起・侵食速度の傾向が大きく変化した時期や、大規模な河川争奪や湖沼形成が生じた時期を代表時間断面として設定する必要がある。また、時間断面設定の観点からは、構造運動による広域的なプロセスについての情報を抽出し、概念モデ

ルとして整理しておくことが望ましい。

涵養域・流出域の変化の評価方法に関する課題として、隆起・侵食に伴って形成された窪地に湖が形成されるようなケースは未検討であることには留意する必要がある。また、NUMO_FEP リストにおける F5.1.13 に相当する、侵食に伴う堆積プロセスについても、その考慮と表現方法は今後の課題である。

表 4-9 「地形の変化」に関連する FEP の抽出

整理番号	FEP 番号	FEP 名	内容
12	F1.2.1	構造運動	構造プレートの基礎運動による岩石圏（地球の最外殻）の運動。これらの運動は大陸の移動や山の生成（造山運動）、地殻の歪み、断層、褶曲や沈下などの広域的なプロセスを生じ得る。
13	F1.2.2	造山運動	山の形成（造山運動）。造山運動の可能性と処分場の性能への影響。
19	F1.2.8	地域的な侵食と堆積	大規模な（地質学的）スケールでの岩石や堆積物の除去や集積に関係する FEP であり、地形の変化や処分場の母岩の地質学的・水文地質学的条件の変化に関係する。
23	F1.2.13	地質学的変動に伴う地形学的な変化	地域的又は局所的な表層の地形変化を引き起こす地質学的変化への地形学的反応が引き起こした現象に関する FEP である。地形学的特徴は、気候・水理・生物学的特徴と同様に、地質学的事象による地形の変遷と関連する。
224	F5.1.1	地形と形態	表面環境の起伏と形状、及びその経時的変遷の可能性。地形は、地表水の流れ、地下水の再補給と放出の場所、及び局所的又は地域的な地下水の流れを駆動する水頭の大きさを定義する。
231	F5.1.5.2	湖と河川	長年にわたって存続するのに十分な大きさの地表水域。地表水域は、漸進的な充填、蛇行、編組などの多くのプロセスを経て変遷する。地表水域の変遷をもたらす気候変動も考慮する必要がある。
240	F5.1.13	侵食と堆積	地表環境で機能する侵食及び堆積プロセス、及びそれらの経時的変遷の可能性。関連するプロセスには、河川及び氷河の侵食と堆積、削剥、風成侵食と堆積が含まれる。これらのプロセスは、気候、植生、地形などの要因によって制御される。

表 4-10 「地形の変化」に関する考慮事項

考慮事項	考え方	関連する NUMO_FEP
隆起・侵食	海底地形の陸化、丘陵・山地や谷の形成による地形の変化	F1.2.1 F1.2.2 F1.2.8 F1.2.13
	侵食や地層の削剥と、その後の堆積による地形の変化	F5.1.1 F5.1.13
	河川流路の変更や湖の形成	F5.1.5.2
（熱帯地域及び寒冷地域特有の）地形変化	特に、氷河や乾燥地帯における侵食・風化による地形変化（「気候の変化」でも事項）	F1.3.4 F1.3.6 F1.3.10

(iii) 「岩相及び流動経路（地質・地質構造）の変化」について考慮すべき事項

NUMO_FEP リストから「岩相及び流動経路（地質・地質構造）の変化」（表 4-10 で挙げたものを除く）に直接的に関連する FEP を抽出する（表 4-11）とともに、4D-SDM を構築するうえで「岩相及び流動経路（地質・地質構造）の変化」について考慮すべき事項について、代表時間断面を設定するうえでの考え方とともに整理した（表 4-12）。

ここで、NUMO_FEP リスト中の「火山・マグマ活動（F1.2.5）」や「熱水活動（F1.2.7）」に関しては、「岩相及び流動経路（地質・地質構造）の変化」と関連する FEP ではあるものの、科学的特性マップ（METI, 2017）で挙げられている「火山・火成活動」及び「地熱活動」における好ましくない範囲の要件・基準の適用により、事前に除外されている可能性が極めて高いことから、表 4-11 からは除外した。また、「変性作用（F1.2.6）」の FEP についても、前述の「火山・火成活動」や「地熱活動」の要件が関連する、あるいは地層処分の対象深度から離れて極めて深い深度で発生するプロセスと考えられることから、同様に抽出対象から除外した。

火成岩体の冷却に伴う収縮や隆起による地層の上昇に伴う応力開放を原因とした割れ目発達領域の形成によって、地質・地質構造の水理特性（透水性や貯留性）とその分布状況が変化することが想定される。また、断層の形成・発達によっても同様の変化が起こる。本事項は、NUMO_FEP リストにおける F1.2.1, F1.2.3, F1.2.12 に関連するものである。

「岩相及び流動経路（地質・地質構造）の変化」に関する考慮事項には、地質層序そのものや地層処分の対象となる母岩の性質や特性、断層や地質境界などで母岩や地層・岩体が不連続に分布している状態とその変化が含まれる。本事項は、NUMO_FEP リストにおける F1.2.9, F4.1.1, F4.1.2, F4.1.3 に関連するものである。

上記事項を考慮するうえでは、地質・地質構造が急激に変化する可能性がある時期に着目し、大規模な割れ目発達領域の形成・発達時期や地質・岩体の性質や分布が大規模に変化する時期を対象に代表時間断面を設定することが重要となる。

表 4-11 「岩相及び流動経路（地質・地質構造）の変化」に関する FEP の抽出

整理番号	FEP 番号	FEP 名	内容
12	F1.2.1	構造運動	構造プレートの基礎運動による岩石圏（地球の最外殻）の運動。これらの運動は大陸の移動や山の生成（造山運動）、地殻の歪み、断層、褶曲や沈下などの広域的なプロセスを生じ得る。
14	F1.2.3	弾性、塑性又は脆性的変形	地球の営力による地質構造の物理的変形。これは、岩石の断層変位、割れ、引張り、圧縮を含む。
20	F1.2.9	続成作用	地表あるいは地表近くにある堆積物が、圧密・セメント作用・結晶化により岩石に変化するプロセスであり、それは、地下 2-3 km までに普通にある温度・圧力下で起こる。
22	F1.2.12	地質の変化に伴う水文学的/水文地質学的な変化	地域的又は局所的な地下水流動や間隙水圧に影響する広域的な地質変化が引き起こした現象に関する FEP である。これらは、地形学的な侵食による水文学的な境界条件の変化や、岩石の応力や断層の動きの変化による地質ユニットの水文学的性質の変化を含む。
179	F4.1.1	層序	地圏を形成する異なる種類の岩石の連なり（母岩以外は F4.1.2 を参照）。一般的に岩石は類似の性質及び特性をもつ地質ユニットに分類される。関連する性質や特性は、次のようなものがある。空間的広がり、熱伝導率や透水係数、亀裂頻度と連結性、圧縮強度やせん断強度、空隙率、屈曲度、厚さ、構造、地下水組成や塩分濃度、鉱物組成や間隙水圧。これらの性質に関連する不均質性や不確実性は、特性の一つである。
180	F4.1.2	母岩の岩質	処分場周囲の岩石の性質や特性（ただし、掘削による力学的影響は含まない）。
181	F4.1.3	大規模な不連続性	母岩や地質ユニットあるいはそれらの境界に存在する不連続面の性質や特性。断層、破碎帯、貫入岩脈、種類が異なる岩石間の境界などを含む。

表 4-12 「岩相及び流動経路（地質・地質構造）の変化」に関する考慮事項

考慮事項	考え方	関連する NUMO_FEP
割れ目発達領域や断層の形成・発達	地質・地質構造の水理特性とその分布状況が変化	F1.2.1 F1.2.3 F1.2.12
地層・岩体の性質や分布状態の変化	地質・地質構造の水理特性とその分布状況が変化	F1.2.9 F4.1.1 F4.1.2 F4.1.3

(2) 代表時間断面の設定

(1)で整理した内容をもとに作成した、4D-SDM を構築するうえでの代表時間断面の設定フローを図 4-16 に示す。

100 万年の時間スケールで評価を行う際、氷期・間氷期の各時期には気候の変化に伴う降雨量の変化や寒冷地の場合は氷河の影響などにより、陸域における涵養量が大きく変化する可

能性が高い。そのため、最初に「気候の変化」を考慮して、気候変動サイクルにおける各氷期・間氷期に基づき代表時間断面を設定する。

モデル化領域が海域及び沿岸域を含む場合は、海水準の変動周期（海退期間と海進期間）と変動量を考慮して、海水準変動をモデル化するとともに、海水準変動による海進・海退を考慮した代表時間断面を設定する。汀線の移動に伴って陸地化する地域については、陸地化している期間に現在との陸域と同様の侵食速度・堆積速度や涵養量を考慮する。

次に「地形の変化」を考慮して、モデル化領域内で隆起・侵食の傾向が大きく変化する時期がある場合には、当該時期を代表時間断面に追加する。加えて、モデル化領域における地形の隆起・侵食に伴い、涵養域や流出域の極端な変化につながるような規模の大きい河川争奪や湖沼の形成が起こる可能性が高い場合に関しても、それらの事象が想定される時期を代表時間断面に追加する。

さらに、「岩相及び流動経路（地質・地質構造）の変化」を考慮して、モデル化領域内で造山運動や褶曲運動などに伴う大規模な割れ目発達領域や断層の形成・発達時期、地質や岩体の物性や分布が大きく変化する時期がある場合には、当該時期を代表時間断面に追加する。その際には、地形学的・地質学的な根拠に基づく地質構造の概念モデルや地質構造発達史を構築するとともに、それらに係る科学的な根拠や不確実性を明示する必要がある。

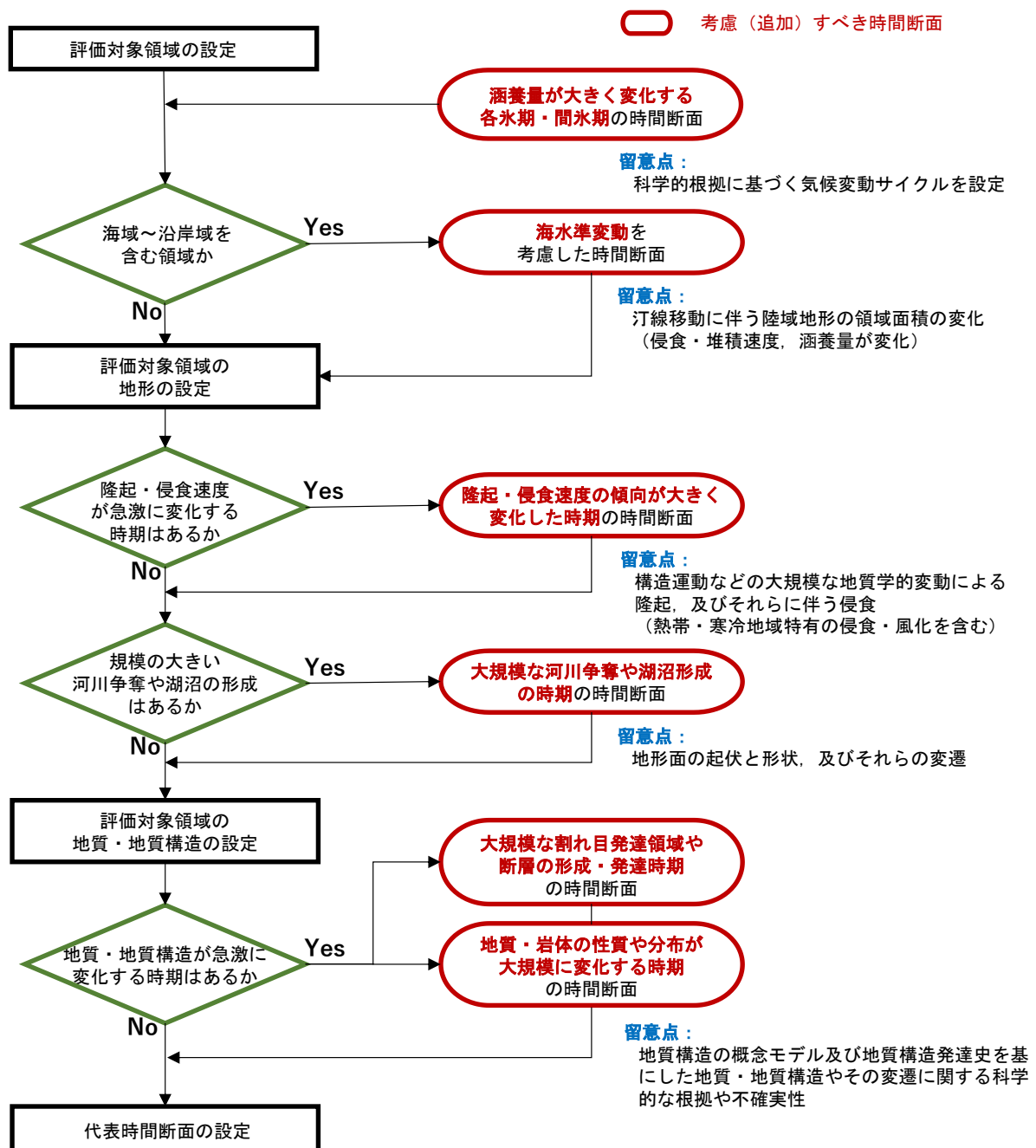


図 4-16 代表時間断面の設定フロー

4.3.2 地形及び地質・地質構造の長期変動パラメータの設定

現在以外を対象とした地形・地質構造モデルを構築するためには、各種自然現象に起因する、地形及び地質・地質構造の長期的な変動を数値的に表現した、地形及び地質・地質構造の長期変動パラメータ（以下、「長期変動パラメータ」という）を設定する必要がある。4D-SDM の構築においては、隆起（沈降）、侵食（堆積）、断層活動や気候・海水準変動を対象に長期変動パラメータを設定する。「地形及び地質・地質構造の長期変動パラメータの設定」作業の内容と確認事項を表 4-13 に示す。

上記の長期変動パラメータの種別や値の設定に際しては、地質・地質構造の概念モデルや

地史（地形・地質構造発達史）との整合性を確保したうえで、設定根拠や不確実性について明示する必要がある。現在から将来までの地形・地質構造モデルの構築においては、過去から現在までの地形・地質構造モデルの構築に使用しており、かつ妥当性を確認できている長期変動パラメータを用いることとなる。

表 4-13 「地形及び地質・地質構造の長期変動パラメータの設定」作業の内容と確認事項

作業名	作業の内容		確認事項
地形及び地質・地質構造の長期変動のパラメータの設定	長期変動パラメータの設定	以下に関して、設定を検討 ・ 地表部における地形の隆起(沈降)速度 ・ 地表部における地層・岩体の侵食(堆積)速度 ・ 地下に分布する地層・岩体の上昇・下降速度及び水平移動速度 ・ 断層活動(移動方向と移動速度)	・ 地質・地質構造の概念モデルや地史(地形・地質構造発達史)との整合性 ・ 設定根拠の妥当性 ・ 設定した長期変動パラメータの不確実性

4.4 代表時間断面を対象とした地形・地質構造モデルの構築

4.3.1 で設定した代表時間断面において、それぞれ地形・地質構造モデルを構築する。構築に係る手順と、「代表時間断面を対象とした地形・地質構造モデルの作成」における作業の内容と、品質管理に係る確認事項を図 4-17 及び表 4-14 に示す。

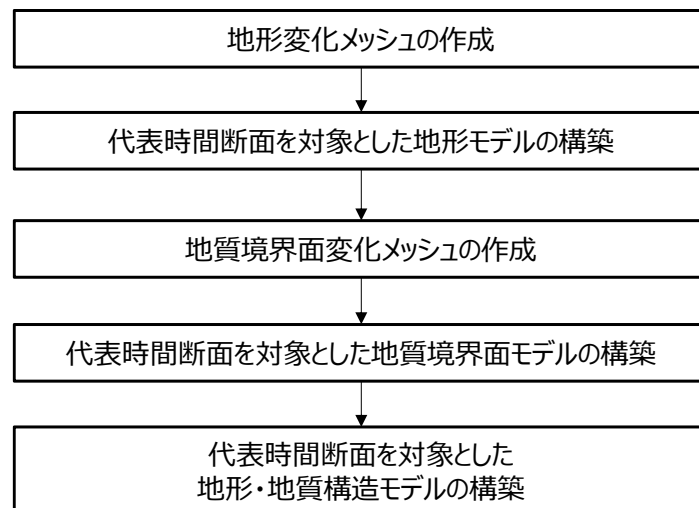


図 4-17 「代表時間断面を対象とした地形・地質構造モデルの構築」に係る作業フロー

表 4-14 「代表時間断面を対象とした地形・地質構造モデルの構築」作業
の内容と確認事項

作業名	作業の内容		確認事項
代表時間断面 を対象とした 地形・地質構 造モデルの構 築	地形変化メッシュの 作成	<ul style="list-style-type: none"> ・ 地表部における長期変動パラメータに基づき、広域的な隆起や（場合によっては）侵食、及び断層活動などによる地形の変化（標高変化量）を表現した地形変化メッシュを作成 ・ （侵食量を単純に考慮できる場合は本作業で考慮。それ以外は、各地形モデルを作成する際に侵食を考慮） 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 地表部における長期変動パラメータの設定根拠 ・ 不確実性の高い海底地形に関する長期変動パラメータの設定根拠
	代表時間断面を対象 とした地形モデルの 構築	地形変化メッシュと現在を対象とした地形モデルをもとに、代表時間断面の地形モデルを構築	<ul style="list-style-type: none"> ・ 侵食が考慮されていること
	地質境界面変化メッ シュの作成	地下における長期変動パラメータに基づき、地層・岩体の上昇・下降速度及び水平移動速度や、断層活動（移動方向と移動速度）に伴う地層・岩体・断層の変化（水平及び垂直変化量）を表現した地質境界面変化メッシュを作成	<ul style="list-style-type: none"> ・ 地下における長期変動パラメータの設定根拠
	代表時間断面を対象 とした地質境界面モ デルの構築	地質境界面変化メッシュと現在を対象とした地質境界面モデルをもとに、代表時間断面の地質境界面モデルを作成	<ul style="list-style-type: none"> ・ 概念モデルや地史（地形・地質構造発達史）との論理的整合性
	代表時間断面を対象 とした地形・地質構 造モデルの構築	代表時間断面の地形モデル及び地質境界面モデルを統合することで、代表時間断面の地形・地質構造モデルを構築	<ul style="list-style-type: none"> ・ 水理地質構造の概念で重要となり得る薄層のモデル化状況（連続性や分布形状など） ・ 断層活動と地層・岩体の形成の順序（切った切られたの関係など） ・ 概念モデルや地史（地形・地質構造発達史）との論理的整合性

(1) 地形変化メッシュの作成

4.3.2 で設定した地形に係る長期変動パラメータに基づき、広域的な隆起（場合によっては侵食を含む）や、断層活動などによる地形の変化を、各地点における標高の変化量で表現した地形変化メッシュを作成する。なお、海底地形の長期的な変化に関する知見は乏しいため、それを定量的に推定することが困難な場合は、海底面が沈降した分だけ堆積物が堆積すると仮定し、海底地形のみかけの標高は変化しないといった設定を行う。

(2) 代表時間断面を対象とした地形モデルの構築

(1)で作成した地形変化メッシュと、4.2.1 (1) で構築した現在を対象とした地形モデルをもとに、過去から現在又は現在から将来までの代表時間断面の地形モデルを構築する。

侵食量を地形変化メッシュとして設定できない場合は、代表時間断面の地形モデルを構築する際に、別途侵食量を考慮する。侵食作用に伴う地形の開析を評価する手法として、例えば各地形モデルに対して、藤原式を用いた侵食速度（藤原ほか，2001）を適用することや、谷埋め接峰面処理（JAEA，2016）を行うことがある。藤原式は、国内における高度分散量（単位エリア内に分布する標高地の標準偏差）と侵食速度の関係を示した式である。また、谷埋め接峰面処理は、河川による侵食などによって生じた地形変化に対して、ある領域の中心の標高がその領域の平均標高より小さいときに、中心の標高をその領域の平均標高に置き換えるという処理であり、これにより侵食が生じる前の緩やかな地形を復元することができる。

(3) 地質境界面変化メッシュの作成

4.3.2 で設定した地質・地質構造に係る長期変動パラメータに基づき、地層・岩体の上昇・下降速度及び水平移動速度や、断層活動（移動方向と移動速度）に伴う地層・岩体・断層の変化（水平及び垂直変化量）を表現した地質境界面変化メッシュを作成する。

(1) の場合と同様に、特に最大 100 万年に及ぶ期間での海底地形の変化に関しては、知見が乏しく不確実性が大きいと考えられる。そのため、沈降による地形変化を考慮する必要がある場合は、沈降分だけ新たな堆積物（第四紀層相当）が堆積するといった仮定に基づき、地質境界面変化メッシュを作成する。

(4) 代表時間断面を対象とした地質境界面モデルの構築

(3)で作成した地質境界面変化メッシュ及び現在を対象とした地質境界面モデルをもとに、過去から現在又は現在から将来までの代表時間断面の地質境界面モデルを構築する。

(5) 代表時間断面を対象とした地形・地質構造モデルの構築

(2)及び(4)で構築した代表時間断面の地形モデル及び地質境界面モデルを統合することで、代表時間断面の地形・地質構造モデルを構築する。ここで、4.2.1 に示した現在を対象とした地形・地質構造モデルの構築と同様に、データの統合に伴う薄層のモデル化状況の確認や、断層活動や地層の形成順序を確認する必要がある。

4.5 代表時間断面を対象とした水理地質構造モデルの構築

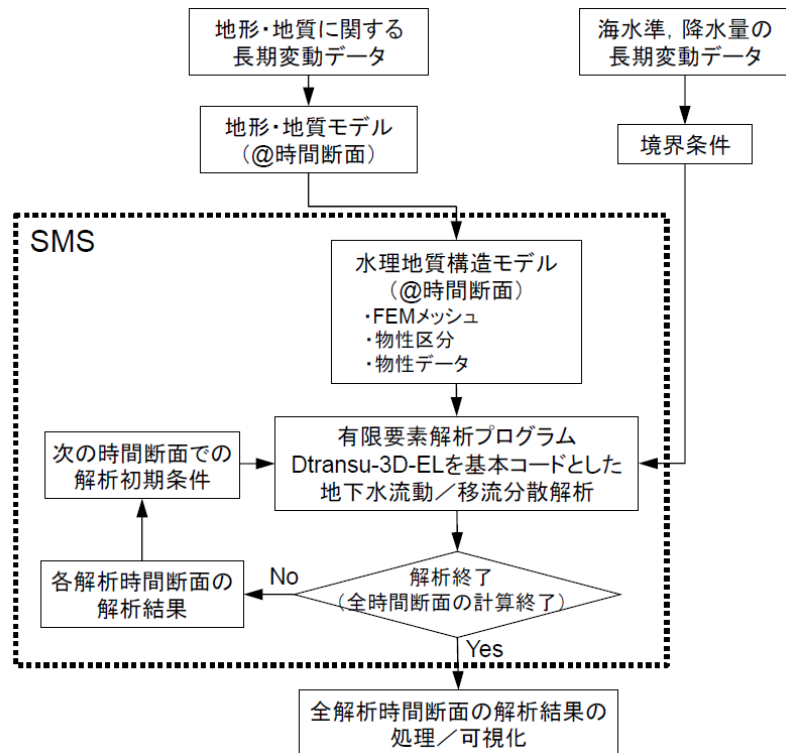
代表時間断面を対象とした水理地質構造モデルの構築は、代表時間断面の地形・地質構造モデルをもとに、4.2.2 と同様の手順で実施する。なお、4D-SDM の構築においては、各代表時間断面における地下水流動・物質移行モデルの情報を次の代表時間断面に受け渡すことが必要となる。そのため、水理地質構造モデルの構築の際に、すべての代表時間断面においてメッシュモデルの節点数、要素数を等しくするといった工夫をすることで、以降の作業を効率的に実施することが可能となる。

4.6 代表時間断面を対象とした地下水流動・物質移行モデルの構築

4.6.1 地質環境の長期変動を考慮した地下水流動・物質移行解析の考え方

地質環境の長期変動を考慮した地下水流動・物質移行解析の結果に基づき、地下水流動・物質移行モデルを構築する。ここで、今井ほか（2009）やJAEA（2017）などの国内の既往検討においては、長期的な地形変化や海水準変動などの変化を考慮しつつ連続的に地下水流動解析などを実施する手法（Sequential Modeling System of geological evolution impact on groundwater flow；以下、「SMS」という）が適用されている。SMSにおいては、図 4-18 に示すように評価対象期間を適切な期間に分割し、分割された期間の地形及び地質・地質構造の分布は同一のものとしたうえで、海水準変動や涵養量などの境界条件は逐次変化させた非定常解析を実施する。さらに、その解析結果を次の期間の非定常解析の初期条件として引き継ぐことで、評価対象期間の長期的な地質環境の変化を連続的に考慮した解析が実施できる。一方で、海外の既往検討事例（例えば、Jaquet et al., 2010）では、気候変動に起因した氷床の増減及び関連する永久凍土の分布が地下水流動特性に及ぼす影響を評価することを目的とした定常解析が実施され、氷床環境下における地下水流動特性を評価するうえで考慮すべき重要因子が特定されている。このような定常状態を仮定した検討に対して、SKB（2020）では形成される氷床の厚さを過大評価している可能性があり、非定常解析を行うことでより現実的な検討が行えることが指摘されている。

上記を踏まえて、本検討においては4D-SDMの構築に有効な解析手法を選定することを目的とした予備検討を実施した。具体的には、包括的技術報告書で検討した日本の代表的な三岩種のうち、先行して実施した新第三紀堆積岩類が分布する仮想的な場を対象とした4D-SDMの構築に係る検討において、表 4-15 に示す2つの解析手法を適用し、それらの違いが解析結果に及ぼす影響を確認した。比較した解析手法は、SMSと同様に非定常状態の地下水流動・物質移行解析を実施する手法（表 4-15 の解析手法1）と、代表時間断面ごとに定常状態の地下水流動解析を実施したうえで非定常状態の物質移行解析を実施する手法（表 4-15 の解析手法2）である。その結果、両解析手法に基づき推定した地下水の全水頭分布や塩分濃度分布に顕著な違いが確認できたことから、海水準変動や涵養量などの境界条件の変化をより高い解像度で考慮することができる非定常状態の地下水流動・物質移行解析（表 4-15 の解析手法1）を適用することとした。上記の検討結果に基づく、それぞれの手法の特徴及び適用方法を、表 4-15 に整理する。



SMS : Sequential Modeling System of geological evolution impact on groundwater flow (今井ほか, 2009)

図 4-18 地質環境の長期変遷を考慮した地下水流動・物質移行解析の流れ (JAEA, 2017)

表 4-15 4D-SDM 構築における地下水流動・物質移行解析の考え方

	解析手法 1	解析手法 2
解析方法	<ul style="list-style-type: none"> 地下水流動解析：非定常解析 物質移行解析：非定常解析 	<ul style="list-style-type: none"> 地下水流動解析：定常解析 物質移行解析：非定常解析
初期条件	地下水流動解析, 物質移行解析：前の代表時間断面の解析で得られた圧力及び濃度分布を利用	<ul style="list-style-type: none"> 地下水流動解析：定常解析であるため出力は初期条件に依存しない 物質移行解析：前の代表時間断面の解析で得られた濃度分布を利用
長所	海水準変動や涵養量などの境界条件の変化を連続的に表現可能であるため, 圧力, 濃度分布などの時間変化を細かく表現可能	地下水流動解析を定常状態で解くことができるため解析時間を短縮することが可能 (ただし, 定常解析で間接法 (反復計算) を適用する場合, 計算時間を要する可能性)
短所	非定常解析であるため計算時間が長い。	海水準の連続的な変化といった地下水流動解析の計算条件の時間変化を単純化するため, 圧力分布の細かな時間的, 空間的な変化を評価できない。
適用方法	地下深部から浅部における水理場や化学場の長期変遷を評価するためのモデル化・解析手法として, 4D-SDM の構築に適用	<ul style="list-style-type: none"> 水理場や化学場の時間変遷の概念的な理解を目的としたモデル化・解析に適用 地形変化や気候変動, 海水準変動などの自然現象が水理場や化学場, 地下水の移行経路などに与える影響を把握するための感度解析に適用

4.6.2 代表時間断面の水理地質構造モデルを用いた地下水流動・物質移行解析

構築した代表時間断面の水理地質構造モデルを用いた地下水流動・物質移行解析を通じて、地下水流動・物質移行モデルを構築するための検討フローと、作業の内容と品質管理のための確認項目をそれぞれ図 4-19、表 4-16 に示す。

また、図 4-18 に示すように、地質環境の長期変遷を考慮した地下水流動・物質移行解析の流れやその適用事例は既往研究（例えば、JAEA, 2017）に整理されているので参考にされたい。

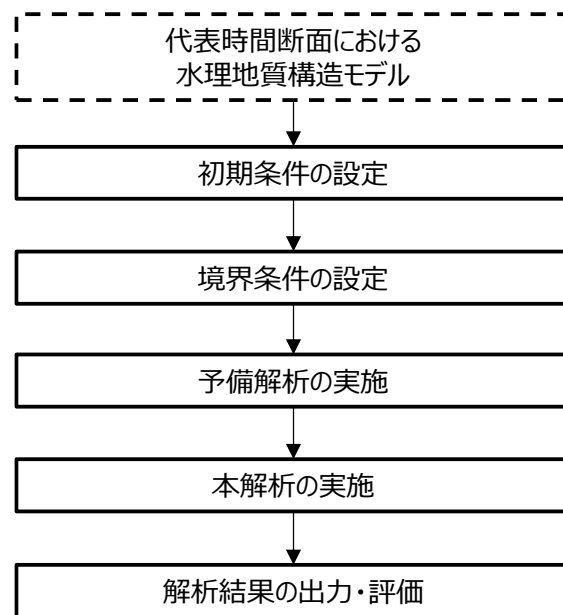


図 4-19 「代表時間断面を対象とした地下水流動・物質移行モデルの構築」に係る作業フロー

表 4-16 「代表時間断面を対象とした地下水流動・物質移行モデルの構築」作業
の内容と確認事項

作業名	作業の内容		確認事項
代表時間断面を対象とした地下水流動・物質移行モデルの構築	初期条件の設定	非定常計算の初期値と代表時間断面の間の初期値（圧力、濃度分布）の設定	<ul style="list-style-type: none"> 過去の地下水化学概念に基づいた設定であること 過去から現在までの時間断面間の初期値（圧力、濃度分布）が正しく受け渡されていること
	境界条件の設定	上部境界の時間変動境界条件として涵養量、海水準変動を設定	<ul style="list-style-type: none"> 上部境界の圧力、濃度条件が正しく設定されていること
	予備解析の実施	本解析の実施前に水理地質構造モデルを用いた予備解析を実施する。	<ul style="list-style-type: none"> 解析コードが正常に動作すること 解（圧力、濃度）が正常に収束すること 計算容量、計算時間が実作業上、問題ない範囲であること
	本解析の実施	<ul style="list-style-type: none"> 水理地質構造モデルを用いた本解析を実施する。 地下水流動・物質移行解析、粒子追跡線解析 	<ul style="list-style-type: none"> 入力パラメータが正しく入力されていること 初期条件・境界条件が正しく設定されていること 解（圧力、濃度分布）が正常に収束すること
	解析結果の出力・評価	解析結果（圧力、濃度分布）を出力及び図化し、感度解析ケース間の比較や実測値との比較のためのデータを整理する。	<ul style="list-style-type: none"> 解析で得られたモデル化領域の圧力・濃度の空間分布が水理地質構造の概念モデルや地下水流動の概念モデルと整合すること 感度解析ケースの解析結果の差異の要因を説明できること

(1) 初期条件の設定

地質環境の長期変遷を考慮した地下水流動及び塩分濃度に着目した物質移行の非定常解析を実施する場合、地下水の水圧及び塩分濃度に関する初期条件の設定が必要となる。特に、沿岸域を対象とした地下水流動・物質移行解析においては、初期条件の設定が解析結果に大きな影響を及ぼす可能性が考えられるため、評価対象領域の地史などに基づき適切な初期条件を設定することが重要である。

最初の代表時間断面を対象とした地下水流動・物質移行解析における具体的な初期条件の設定方法としては、ある代表時間断面の水理地質構造モデルを用いて定常状態の間隙水圧及び塩分濃度分布を計算し、それを初期条件とする方法がある。また、地史などに基づき約 100 万年前におけるモデル化領域の大部分が海底下にあったことが想定されるような地域では、間隙水圧の初期条件としては、100 万年前の地形や海水準に基づいた静水圧分布を仮定し、塩分濃度については、モデルの全領域内を塩水による飽和状態とするといった方法が考えられる。

最初の代表時間断面以外の時間断面に関しては、一つ前の代表時間断面を対象とした地下

水流動・物質移行解析の最終結果を初期条件とする。ある時間断面を対象とした地下水流動・物質移行の非定常解析と、その解析結果を次の代表時間断面の地下水流動・物質移行解析の初期条件として受け渡すことを繰り返し行うことで、約 100 万年間の地形・地質構造の長期変遷や気候・海水準変動を連続的に考慮する（図 4-20）。このとき、代表時間断面間の間隙水圧分布、塩分濃度分布（初期条件）の受け渡しが適切に行われていることを確認することが重要である。異なる代表時間断面間で解析結果の受け渡しを行う方法としては、例えば、ある代表時間断面の解析結果から要素中心座標の間隙水圧及び塩分濃度を出力した後、代表時間断面間の地形や地質構造の変化を考慮して、次の代表時間断面のメッシュモデルに該当する要素中心を算出し、その座標にその出力値を受け渡すといった方法がある。

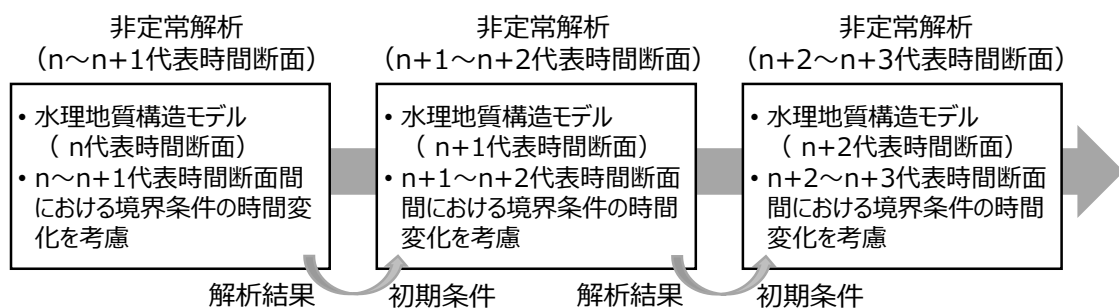


図 4-20 地質環境特性の時間変遷を考慮した解析の初期条件と境界条件の設定方法

(2) 境界条件の設定

4D-SDM の構築においては、特に上部境界条件を設定するうえで、長期的な気候変動サイクルに伴う海水準変動と涵養量の変化を考慮する必要がある。海水準変動に関しては、4.3.1 で設定した海水準変動のモデルに基づき、上部境界条件を設定する。

涵養量の変化を考慮した上部境界条件を設定するには、まず現在の涵養量を設定し、それをもとに過去又は将来の代表時間断面の涵養量を設定することとなる。現在の涵養量については、気象庁が観測した降水量データに基づいて現在の平均的な降水量を算定したうえで、水収支解析を行い岩盤への浸透量を推定する方法がある（例えば、山本ほか、2011；上野・竹内、2015）。また、地下水流動モデルにおける地下水位分布は涵養量と岩盤の透水系数とのバランスにより決まることに着目し、現実的な地下水位分布が得られるような涵養量を設定するという方法もあり得る。この場合、現在の水理地質構造モデルを用いて涵養量に着目した感度解析を行い、設定した涵養量と解析結果である地下水位分布の関係性を確認する。地下水位の観測データが利用可能である場合、感度解析結果と地下水位の観測データを比較することで、妥当な涵養量を推定することが可能になると考えられる。

過去から現在、あるいは現在から将来における地下水流動・物質移行解析においては、温暖期又は寒冷期に相当する降水量や、現在を対象に算出した降雨が岩盤へ涵養する量の割合をもとに上部境界条件を設定することとなる。具体的な方法として、例えば、松未・藤原(2000)を参考に、最海退時の涵養量が現在の涵養量の 5 割になると設定するとともに、海退期及び海進期の涵養量が段階的に低下、あるいは上昇するように設定するというものがある。なお、

4.3.1 で示したように、モデル化領域で氷期に永久凍土が形成されることが想定される場合は、涵養量が非常に小さな値になるよう設定する。

(3) 予備解析及び本解析の実施、解析結果の出力・評価

本解析を実施する前に、数値解析の収束性の程度や動作確認などを目的とした予備解析を実施する。予備解析は、いくつかの代表時間断面の水理地質構造モデルを用いて、本解析を想定した初期条件及び境界条件を設定したうえで、次の時間断面までの一定期間を対象に実施する。予備解析によって数値解析の収束性などに問題が見つかった場合、初期条件・境界条件の設定や水理地質構造モデルの見直しを行う。

予備解析終了後、本解析として地下水流動・物質移行解析を実施する。解析結果は少なくとも地下水の圧力・流速分布や地下水中の塩分濃度分布及びそれらの時間変化について出力、図化处理を行い、設定した解析条件が適切に反映された現実的なものであることを確認する。

また、本解析で得られた地下水流動モデルを用いて、粒子追跡線解析を行い、地下水の移行特性（移行経路、移行時間、移行距離）及びその時間変化を整理する。粒子追跡線解析を行う際は、評価したい領域やスケールに応じて粒子を配置する。

4.7 不確実性を考慮した 4D-SDM の妥当性確認

2章に示したとおり、4D-SDM は将来の水理場・化学場の長期変遷の推定を目的として構築するため、4D-SDM による推定結果と実測値との比較による妥当性を確認することができない。そのため、過去から現在までの地質環境の変遷を考慮した地下水流動・物質移行モデルが、実測された現在の地質環境と整合的であることを確認し（図 2-1 中の④）、4D-SDM に反映した過去から現在までの地質環境の長期変遷の理解の妥当性を確認することを通じて、4D-SDM の信頼性を示すこととなる。

また、3章に示したとおり、4D-SDM は 100 万年といった長期の時間スケール、かつ数十 km といった大規模な広域スケールを考慮するものである。そのため、4D-SDM の妥当性確認を行う際は、モデルに設定した地質環境特性に関する不確実性に加えて、その地質環境特性の長期変遷の仮定や解釈、モデル化の条件設定に関する不確実性をどのように評価するかが重要となる。4D-SDM の不確実性を評価するにあたっては、モデルに内在する不確実性の要因を洗い出したうえで、その不確実性要因に着目した感度解析を行い、それらの不確実性要因があらかじめ設定した評価指標に与える影響を分析すること（以下、「不確実性評価」という）が有効である。

上記を踏まえて、4D-SDM に内在するさまざまな不確実性を考慮しつつ、その妥当性確認を行うための考え方と手順を以下に整理する。

4D-SDM の不確実性評価と妥当性確認の実施フローを図 4-21 に示す。また、実施フローに示した各作業の考え方を以下の(1)～(5)に示す。

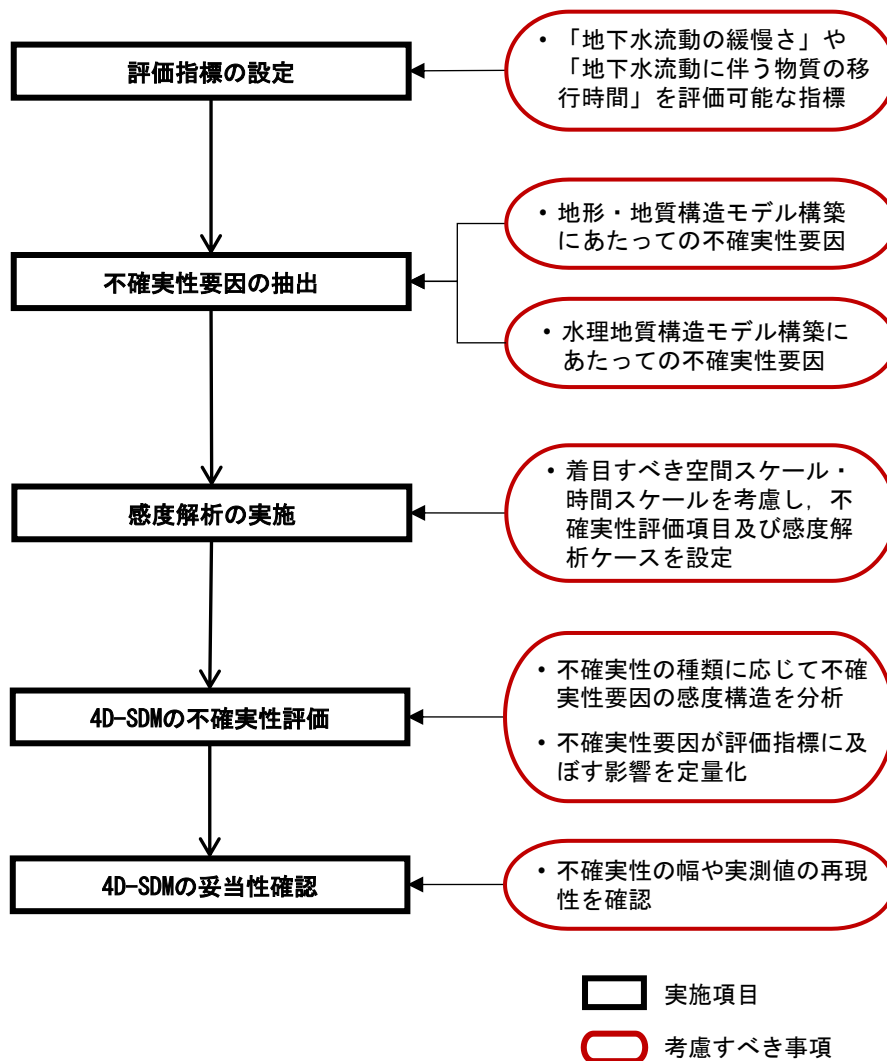


図 4-21 4D-SDM の不確実性評価と妥当性確認の実施フロー

(1) 評価指標の設定

4D-SDM の不確実性評価及び妥当性確認を行うにあたり、着目する評価指標を設定する。評価指標を設定する際は、地形や地質環境の長期変遷に伴う現象を捉えやすいものを設定することが望ましい。また、4D-SDM を処分場の閉鎖後長期の安全確保における放射性物質の溶出・移行抑制機能の評価に活用するという観点から、地質環境が人工バリアの設置環境及び天然バリアとしての役割を果たすために求められる要件である「地下水流動の緩慢さ」や「地下水流動に伴う物質の移行時間」と関連する評価指標を設定する。

包括的技術報告書では、処分場の閉鎖後長期の地質環境に期待される安全機能に影響を及ぼす要因及び想定される主要なプロセスが整理されており、その中で、地形変化（隆起・侵食）及び気候・海水準変動が地質環境に及ぼす影響として、「地下水流動経路や地下水水質の緩慢かつ長期的な変化」が挙げられている（表 4-17）。これは緩慢ではあるものの累積的かつ広域に及ぶものであるため、この影響を捉えることが可能な評価指標を設定することが重要である。

表 4-17 処分場の閉鎖後長期の地質環境に期待される安全機能への影響とその要因
(包括的技術報告書に基づき作成)

影響要因及び主要なプロセス		安全機能に及ぼす影響
火山・火成活動	マグマの貫入及び地表への噴出	人間の生活環境への廃棄体の露出
火山性熱水・深部流体の移動・流入	火山性熱水や深部流体の移動・流入	・地温の上昇 ・地下水の pH の低下又は炭酸化学種濃度の上昇
地震・断層活動	地下深部から地表に達する断層の変位	岩盤の破断・破碎
	断層周辺の岩盤の透水性の増加及び酸化性地表水の流入	地下水流動経路の変化及び地下水の酸化性雰囲気への変化
隆起・侵食 (気候・海水準変動の影響を考慮)	岩盤の厚さの著しい減少	人間の生活環境への廃棄体の接近
	地形や海陸分布の継続的な変化	地下水流動経路や地下水水質の緩慢かつ長期的な変化
鉱物資源の存在	経済的価値が高い鉱物資源の採掘	人間の廃棄体への接近

(2) 不確実性要因の抽出

不確実性評価を行うにあたり、4D-SDM を用いた予測、特に評価指標の予測に影響を与えると考えられる不確実性要因を網羅的に抽出する。不確実性要因を抽出するに当たっては、地形・地質構造モデルと水理地質構造モデルの構築に当たって一般的に考慮すべき事象だけでなく、評価対象領域特有の地質学的事象や地質環境特性を考慮する必要がある。地形・地質構造モデル構築の観点からは、「地質・地質構造の空間分布」及び「地形・地質構造の長期的変化」に関する不確実性要因を抽出・整理する。水理地質構造モデル構築の観点からは、「数値モデル化（岩盤中の空隙のモデル化、モデルの離散化など）手法」及び「解析条件（地質・地質構造の水理・物質移行特性、地下水の古環境、海水準変動、涵養量など）」に関する不確実性要因を抽出・整理する。

既往研究（例えば、JAEA, 2017）によると、地形・地質構造モデルの構築作業のすべての作業項目に不確実性が存在しており、その不確実性によって複数の概念モデルや数値モデルが構築されることが示されている（表 4-18 : JAEA, 2017）。このような情報を参考に、地形・地質構造の変遷に係る具体的事象（例えば、地形発達、侵食・堆積過程）やそれらに起因した地形及び地層境界の変動パラメータとその不確実性を抽出・整理することで、地形・地質構造モデルの構築に係る不確実性要因を特定する。

また、水理地質構造モデルの構築作業においては、モデル化領域設定の違いに関する不確実性、水理特性及び境界条件の設定値やばらつきに関する不確実性などが存在することが示されている（JAEA, 2017 ; 表 4-19）。このような情報を参考に、モデル化領域の範囲、地質分布やその水理特性、涵養量や海水準の設定が異なる複数の水理地質構造モデルを構築し感度解析を実施することで、不確実性が地下水流動特性に及ぼす影響の分析が可能となる。

(3) 感度解析の実施

感度解析は、(1)で設定した評価指標に大きな影響を与え得る重要な不確実性要因を特定することを目的として実施する。また、本項目で特定された重要な不確実性要因は、安全評価において実施されるさまざまな解析においても考慮すべき重要な不確実性要因になるとともに、サイト調査の計画策定や4D-SDMの更新においても重要となる。感度解析の作業手順を図4-22に示す。

最初に、(1)で設定した評価指標を評価するために必要な情報を取得することができる解析の種類（地下水流動解析，物質移行解析及び粒子追跡線解析）を選定する。

次に、(2)で抽出・整理した不確実性要因を評価項目とした感度解析ケースを設定する。その際、(1)で設定した評価指標に対する不確実性要因の感度は時間スケール及び空間スケールで異なる可能性があるため、不確実性評価を実施する際に着目すべき時間スケール及び空間スケールを考慮して感度解析ケースを設定する。時間スケールについては、評価対象領域における地形・地質構造の長期変遷の概念モデルや気候・海水準変動のサイクルを考慮して設定するが、既往研究（JAEA, 2018a）を参考にすると、100万年スケール、数十万年スケール及び10万年スケールといった単位が大まかな目安となる。また、空間スケールについては、地層処分事業の各調査段階における調査範囲や空間スケールを踏まえつつ、評価対象領域における地質環境の特徴や地史などを考慮して設定するが、既往研究（JAEA, 2018a）を参考にすると、モデル化領域を通過する地下水の流動系を考慮しつつ、10km～数十km程度といった単位が大まかな目安となる。多角的な視点で重要な不確実性要因を抽出するためには、複数の空間スケールに対して不確実性評価を行うことが有効である。

6章に後述する、幌延地域を事例とした4D-SDMの不確実性評価結果に基づくと、まず解析自体の計算や解析前後のデータ処理が比較的短時間で実施できる定常解析を行い、評価項目に大きな影響を与える不確実性要因を絞り込む。そのうえで、絞り込んだ不確実性要因に対して地形や気候・海水準変動の連続的な変化を考慮した非定常解析を行い、その影響の詳細を確認し、重要な不確実性要因を特定する段階的な手順が有効である。なお、最初の段階で実施する定常解析は、評価対象領域の地形・地質発達史における特徴的な時期を踏まえて設定したいくつかの代表時間断面を対象に実施する。非定常解析については、数十万年程度の時間スケールを対象とした解析を行い、不確実性要因の感度や解析ケース設定の適切性を確認したうえで、100万年の時間スケールの解析を行うことが効率的である。

表 4-18 地形・地質構造モデルの構築作業に内在する不確実性
(JAEA (2017) に基づき作成)

不確実性要因が 内在する作業項目	作業内容	不確実性	不確実性の発生要因	不確実性の 分類	
地質構造モデルの構築作業	情報の収集・整理	既存文献や調査結果に基づいて、地形（陸上、海底）及び地質の分布・形状、海岸線位置の変動範囲（沿岸地域の場合）及びそれらの変化（地史）に関わる情報や着目すべき地形・地質要素を把握するための地下水流動解析結果などの情報を収集・整理する。	地形・地質の分布・形状とその変化に関する情報の精度や解釈の違い	情報の欠如による理解不足や手法の違い（地形学的、地質学的、地球物理学的など）により異なる結果や解釈が得られる可能性がある。	データの 不確実性
	FEP 解析に基づく考慮すべき事象の抽出	収集・整理した情報に基づいて対象地域における FEP 解析を実施し、百万年程度の期間で考慮すべき事象を抽出する。	抽出した FEP の適切性	収集した情報の不確実性や情報の欠如による理解不足により、関連するすべての事象が抽出できない（又は、除外された FEP が適切でない）可能性がある。	シナリオの 不確実性
	編年表／シナリオの作成	百万年程度の期間を対象に抽出した事象を時系列で整理（気候・地形・地質・テクトニクスなどを時系列で並べた編年表を作成）するとともに、分野間で整合の取れた長期変遷シナリオを作成する。	地形・地質事象に関する天然のプロセスの理解	編年表に整理する各事象の発生時期や事象間の関連性（シナリオ）には、収集した情報の不確実性や情報の欠如による理解不足による影響が含まれており、複数のシナリオが想定できる可能性がある。	
	モデル化領域の設定	概括的な地形・地質分布に基づいて、評価対象となる領域を通過する地下水流動系を包含しつつ、地下水の分水界となる尾根や河川などを境界とした領域を設定する。	モデル化領域設定の違い	百万年程度の期間では、海水準変動や地殻変動に伴う地形・地質分布の変化によって、地下水の分水界となる尾根や河川などが変化し、モデル化領域を通過する地下水流動系に影響を及ぼす可能性がある。	
	概念モデルの構築	抽出した事象とシナリオに基づいて、考慮すべき事象とその変遷に関して概念的に記述したモデルを作成する。	地形・地質事象に関する天然のプロセスの理解	各事象に対して収集した情報や編年表・シナリオの不確実性（例えば、事象の時空間分布の解釈の違いなど）により、複数の概念モデルが構築できる可能性がある。	
	数値モデルの構築	概念モデルで表示した各事象に関して、収集した情報に基づき、百万年程度の期間の数値モデルを作成する。	数値モデルの構築方法	数値的なばらつきや異なる解釈がある情報の取り扱い方や単純化の方法、地形・地質の分布・形状の復元プロセスの違いなどによって、複数の数値モデルが構築できる可能性がある。	モデルの 不確実性

表 4-19 水理地質構造モデルの構築作業に内在する不確実性
(JAEA (2017) に基づき作成)

不確実性要因が内在する作業項目		作業内容	不確実性	不確実性の発生要因	不確実性の分類	
水理地質構造モデルの構築作業	モデル化領域の設定	概括的な地形・地質構造分布に基づいて、評価対象領域を通過する地下水流動系を包含しつつ、地下水の分水界となる尾根や河川などを境界としたモデル化領域を設定する。	モデル化領域設定の違い	海水準変動や地殻変動に伴う地形・地質構造分布の変化によって地下水の分水界が変化するなど、評価対象領域を通過する地下水流動系に影響を及ぼす可能性がある。	シナリオの不確実性	
	水理地質構造区分の抽出	水理モデルに考慮される水理地質構造は、透水性などの物性値の違いに基づき区分設定する。	水理地質構造区分設定の違い	水理地質構造の物性値に関する情報が不足しており、モデル化領域内における地下水流動特性を評価するための適切な区分設定ができない可能性がある。	データの不確実性	
	モデル化手法の選定	モデル化領域における水理地質構造を単純化しつつ、それらの特性を数値モデルとして表現可能なモデル化手法を選定する。	モデル化手法の違い	モデル化領域内の水理地質構造に関する情報の不足や知識の欠如によって、それらの有する特性を適切に数値モデルとして表現できない可能性がある。	シナリオ/データの不確実性	
	モデル化領域の離散化	水理モデルに考慮した地形及び区分設定した水理地質構造の三次元分布の再現性に留意して、数値計算のための要素分割の大きさを設定する。	離散化手法の違い	地形及び水理地質構造の三次元分布の再現性が不十分な要素分割の大きさであり、モデル化領域内の地下水流動特性を適切に評価できない可能性がある。	モデルの不確実性	
	水理地質構造ごとの水理特性の設定		モデル化手法に応じて、水理地質構造の特性を数値モデルに反映するための水理特性を設定する。	水理特性の設定値やばらつき	水理地質構造の物性値に関する情報が不足しており、モデル化領域内における地下水流動特性を評価するための適切な水理特性の設定ができない可能性がある。	データの不確実性
	境界条件・初期条件の設定	側方・下部境界	設定したモデル化領域の境界周辺における地形条件や水理地質構造分布と整合した境界条件を設定する。	モデル化領域設定の違い	海水準変動や地殻変動に伴う地形・地質構造分布が変化することで、モデル化領域境界に適切な境界条件を設定できない可能性がある。	シナリオの不確実性
上部境界		モデル化手法及びモデル化領域に応じて、地表面の境界条件となる降水量や涵養量を設定する。	境界条件の設定値やばらつき	海水準変動や気温・降水量の変化といった長期的な地表環境の変化に関する情報が不足しており、地表面に適切な境界条件を設定できない可能性がある。	データの不確実性	

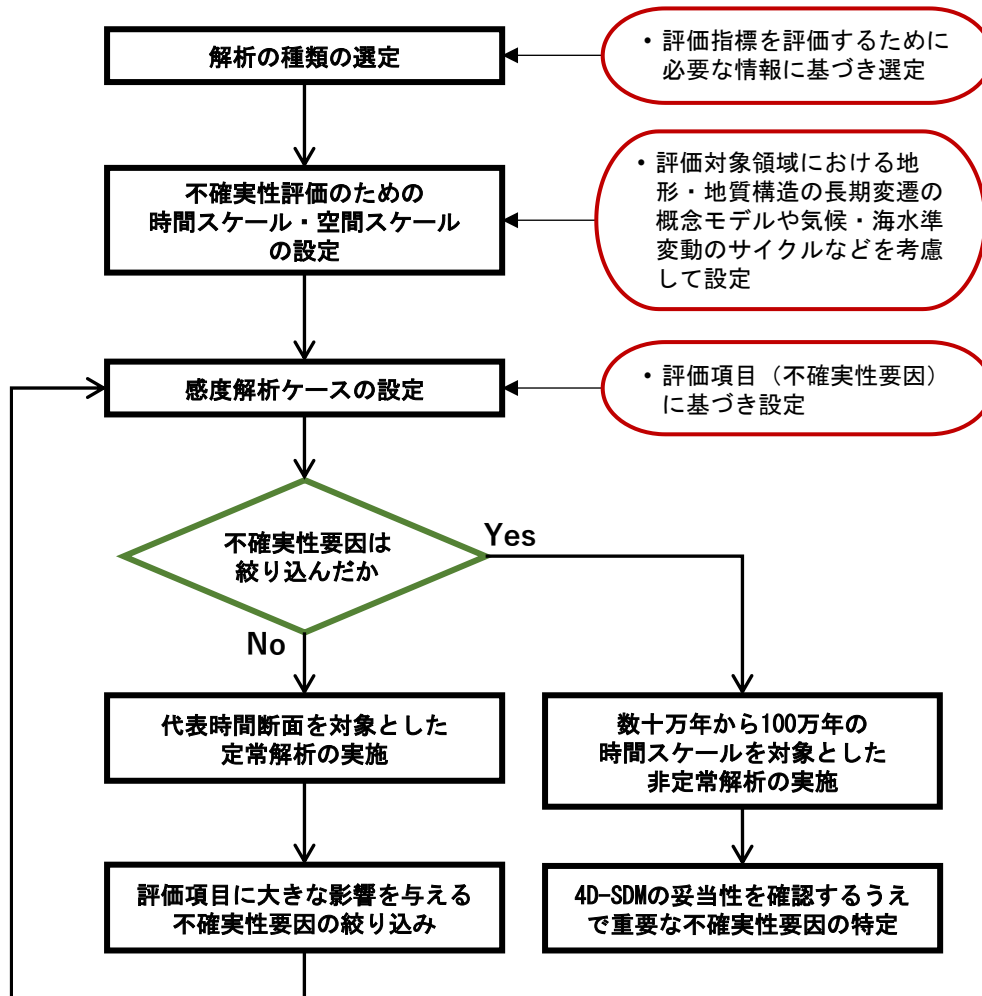


図 4-22 4D-SDM の不確実性要因に着目した感度解析の手順

(4) 4D-SDM の不確実性評価

(3)で実施した感度解析結果を用いて、設定した時間スケール及び空間スケールごとに不確実性評価を行う。不確実性評価を行うに当たっては、4D-SDM に内在する不確実性を OECD/NEA(2012)に示された、安全評価における不確実性の種類（シナリオ、モデル及びデータ）に区分する。具体的には、「シナリオの不確実性」は地質環境の長期変遷の概念に係る不確実性であり、「モデルの不確実性」は水理地質構造モデルの要素分割サイズといった概念の数値化に係る不確実性、「データの不確実性」は物性値や境界条件などの設定に係る不確実性である。既往研究（JAEA, 2017）を参考にすると、地形・地質構造モデル及び水理地質構造モデルの構築に係る作業項目ごとの不確実性は、表 4-18 及び表 4-19 のように分類される。この不確実性の種類に応じて不確実性要因の感度構造を分析する。

不確実性評価を可能な限り客観的に実施するために、不確実性要因が評価指標に及ぼす影響を定量化する。本報告書では、既往研究（JAEA, 2018a, 尾上ほか, 2019）を参考に、変動係数を用いた評価手法について説明する。

変動係数は標準偏差を算術平均で規格化したものであり、母集団が有する数値の大小の影響を排除したばらつきを示す評価指標である。変動係数を用いることで、データの平均値に

対する相対的な差異を評価することができる。不確実性評価の対象とする解析ケースにおいて計算された、地下水の間隙水圧や流速、塩分濃度、地下水の移行時間などを母集団として変動係数を算出する。例えば、地下水の間隙水圧など解析モデルの各節点や要素に計算結果が割り当てられた情報については、節点や要素ごとに統計処理を行う。また、地下水の移行時間については、各解析ケースで得られた間隙水圧分布を用いて粒子追跡線解析を実施し、任意に設定する指定点を通過する涵養域から流出域までの地下水移行時間を算出し、それを指定点位置の情報として統計処理を行う。具体例を用いた変動係数の算出方法の詳細については、JAEA（2015）及び尾上ほか（2019）を参照されたい。

上記で算出した変動係数は、解析モデルの節点や要素などの位置情報と合わせることで、三次元のコンター分布として空間的に可視化することができるとともに、累積分布関数としてデータ処理することで定量的に評価することができる（JAEA, 2018a）。また、6章で後述する事例検討においては、変動係数が1%以上の値を有意な違いと仮定し、その確率密度範囲の中央値と変動係数の値をグラフにプロット（以下、「CVプロット（CV ; Coefficient of Variation（変動係数）」という）することで、累積分布関数の形状をより定量的に評価することを試行した（図 4-23）。CVプロットにおける縦軸の値（変動係数が1%以上の値をとる確率範囲の中央値）が小さいほど不確実性要因の影響が広範囲に及んでいることを示し、横軸の値（縦軸にプロットした中央値での変動係数値）が大きいほど不確実性要因の影響が大きいことを示す（図 4-24）。例えば、CVプロットの縦軸における0.9と0.75の値（算出した変動係数のうち20%及び50%の割合で解析結果に有意な違いが生じたことを示す）を不確実性要因の影響範囲の閾値と仮定し、CVプロットの横軸における20%及び50%の値（平均値に対する相対的なばらつきが20%、50%であることを示す）を不確実性要因が及ぼす影響の大きさの閾値と仮定して、不確実性評価に適用する。図 4-24 では、不確実性要因が及ぼす影響の範囲と大きさに基づいた総合的な影響度を5段階に色別して表示した。不確実性要因が影響を及ぼす範囲や大きさの閾値及び区分については、モデル化領域ごとに異なる可能性があることに留意する必要がある。

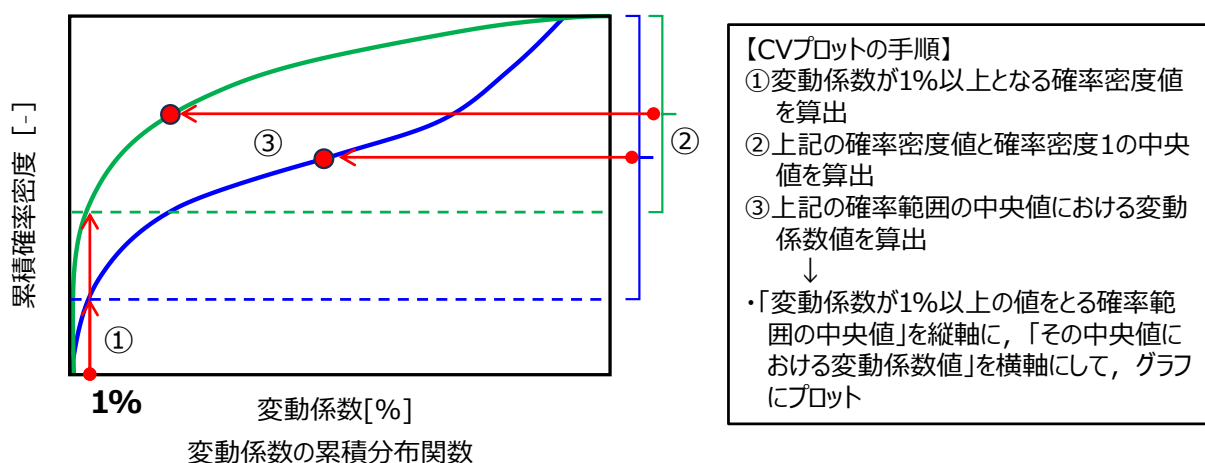


図 4-23 累積分布関数に基づく CV プロットの手順

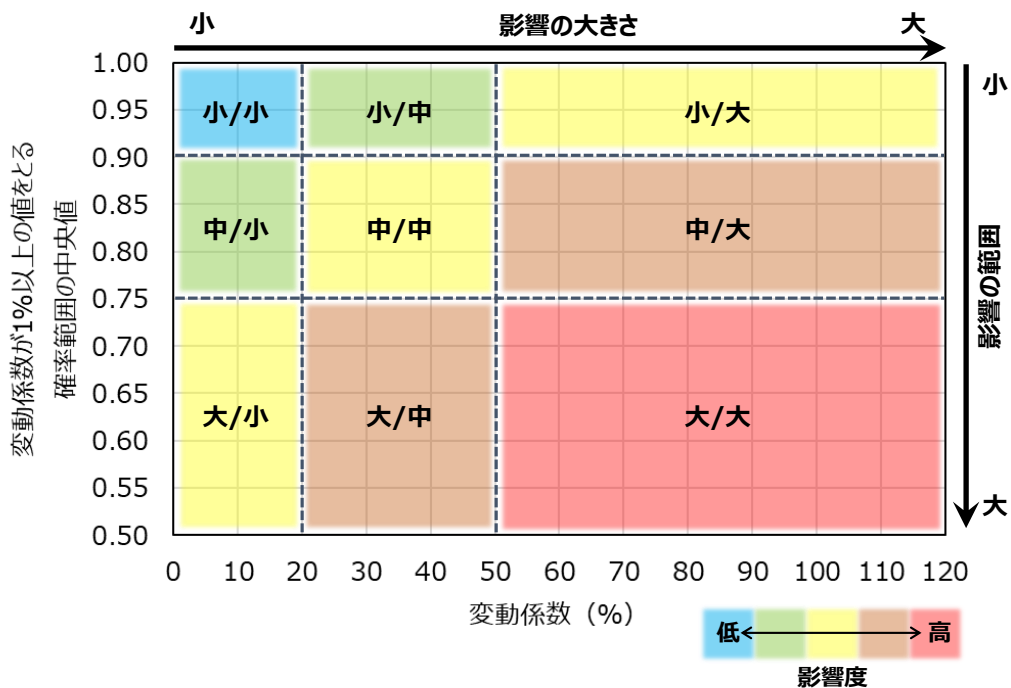


図 4-24 CV プロットに基づく不確実性評価マトリクス図

(5) 4D-SDM の妥当性確認

構築した 4D-SDM の妥当性確認は、(4)で実施した不確実性評価によって抽出した重要な不確実性要因を考慮しつつ、4D-SDM に基づき推定した解析結果と実測値との比較を通じて実施する。解析結果と実測値との比較は、(1)で設定した「地下水流動の緩慢さ」及び「地下水流動に伴う物質の移行時間」に関する評価指標に対して行う。本報告書では、既往研究(JAEA, 2017; JAEA, 2018b)を参考に、地下水年代と地下水の塩分濃度に着目した 4D-SDM の妥当性確認手法について説明する。

既往研究(JAEA, 2017; JAEA, 2018b)で整理された、過去から現在までの地下水流動状態の変化を考慮した地下水中の塩分濃度の長期的な変動性の推定アプローチを図 4-25 に示す。このアプローチにおいては、 ^{14}C 濃度、 ^4He 濃度及び ^{36}Cl 濃度などに基づく地下水年代値との比較に地下水の滞留時間を用いる。地下水の滞留時間は、構築した 4D-SDM を用いた粒子追跡線解析を実施し、涵養域から評価対象地点までの粒子の移行時間から推定する。また、ボーリング調査で得られた地下水中の塩化物イオン濃度の深度プロファイルや電磁探査による比抵抗分布を用いて、4D-SDM に基づき推定した地下水の塩分濃度との比較を行う。

図 4-25 の推定アプローチは、4D-SDM の不確実性評価の評価指標に関連する地下水年代と地下水の塩分濃度に対して、実測値と解析結果との比較を行うものであるため、4D-SDM の妥当性確認に適用することが可能である。上記の実測値との比較に当たっては、蓋然性が高いと考えられる条件で構築した 4D-SDM の結果を基本ケースと位置付けて、他の感度解析ケースの結果を基本ケースからのばらつきとして捉えることで、感度解析で着目した不確実性要因による不確実性の幅を可視化することができる。この不確実性の幅をもって実測値の再現性を確認することが、不確実性を考慮した 4D-SDM の妥当性確認といえる。つまり、基本

ケースだけでなく感度解析ケースも含めて 4D-SDM の構築結果であり、推定した不確実性の幅を絞りこみつつ、実測値に近づけることが次段階で実施する調査や解析の目標となる。不確実性の幅を考慮した 4D-SDM の妥当性確認の具体的な内容については、6 章で後述する事例検討を参照されたい。

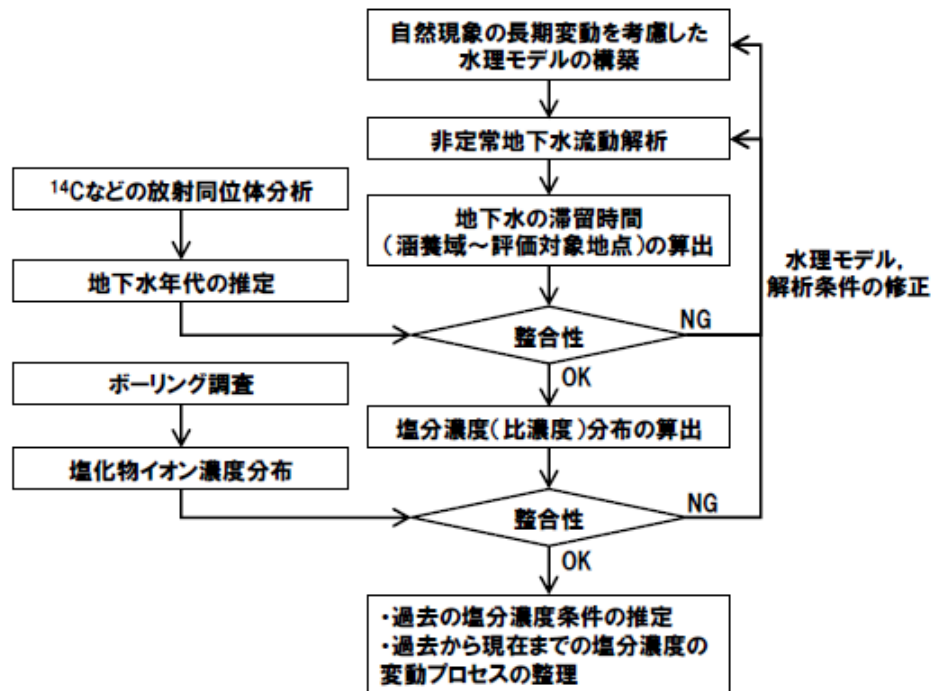


図 4-25 地下水中の塩分濃度の長期的な変動性の推定アプローチ (JAEA, 2017)

5. 4D-SDM の構築技術の適用事例（先新第三紀堆積岩類モデル）

本章では、包括的技術報告書で検討された岩種の一つである先新第三紀堆積岩類が分布する仮想的な場を対象とした 4D-SDM 構築技術の適用事例を示す。図 3-1 に示すように、三岩種を対象とした 4D-SDM 構築技術の整備は段階的に実施しており、先新第三紀堆積岩類を対象とした検討には新第三紀堆積岩類及び深成岩類を対象とした検討で蓄積した技術的知見が反映されているため、本報告書では 4D-SDM 構築技術の適用事例として先新第三紀堆積岩類モデルを選定した。

本事例検討では、特定地域固有の地質学的な特徴を表現したモデルではなく、先新第三紀堆積岩類の地質学的な特徴を表現したモデルを用いた検討を行うこととして、複数地域の情報を平均的に処理することで仮想的な場を設定した。4D-SDM の構築に用いたモデル構築やデータセット作成の基本的な考え方は包括的技術報告書に基づくものとして、本報告書では主に付加体からなる先新第三紀堆積岩類を対象に、現在から将来 100 万年における 4D-SDM の構築事例を取りまとめた。特に、包括的技術報告書では考慮していなかった地形モデル及び地形・地質構造の時間変遷を中心にモデル構築の概要を整理した。なお、4D-SDM の構築に用いたデータセットやモデル構築の基本的な考え方の詳細については、包括的技術報告書（付属書 3-18, 3-19, 3-22）を参照されたい。

5.1 評価対象領域の決定と概念モデルの作成

5.1.1 評価対象領域の設定

包括的技術報告書で先新第三紀堆積岩類を対象に設定した広域スケール（水平方向：40 km×40 km，深度方向：3 km）を参考として、それを十分に包含する領域として、東西方向に 100 km，南北方向に 50 km，深度方向に地表から標高-5 km を設定した。なお、本検討は仮想的な場を対象としたものであるため、評価対象領域とモデル化領域は同様とした。

5.1.2 地質環境情報の収集

(1) 地形及び地質・地質構造の空間分布と時間変化に関わるデータの整理

(i) データ収集対象の岩種及び地域の設定

付加体はスラスト（衝上断層）の発達及び地層の破断・混在化による複雑な産状を示すことから、包括的技術報告書と同様に、より単純な整然相及びより複雑な混在相の両方をモデル化の対象とした。また、付加体の構造層序区分の基本単位である付加コンプレックスや付加コンプレックス全体に及ぶような規模の大きな褶曲構造の分布や形状、付加コンプレックスを構成する基質や岩塊の岩種や存在比水理学的特性、地下深部の地下水流動及び核種移行・遅延に寄与する役割が大きいと考えられるスラスト及び断層・割れ目についてもモデル化対象とした。

東京大学出版会「日本の地形 1 総説」（東京大学出版会，2001）の第 5 章及び産総研地質調査総合センター（2020）に基づき、付加体が優勢に分布する山地を対象として、陸域における付加体の分布面積の割合を抽出し、それを度数分布として整理した（図 5-1）。付加体が優勢に分布する山地であること、付加体の平均的な地質学的特徴を整理するために必要な情

報量を確保することの観点から、本検討では、図 5-1 に示す 40%以上の付加体分布面積割合を有する 11 山地（日高山脈、北上山地、八溝山地、足尾山地、関東山地、明石山地、伊吹山地、丹波高原、紀伊山地、四国山地、九州山地）を設定して、データ収集の対象とした。

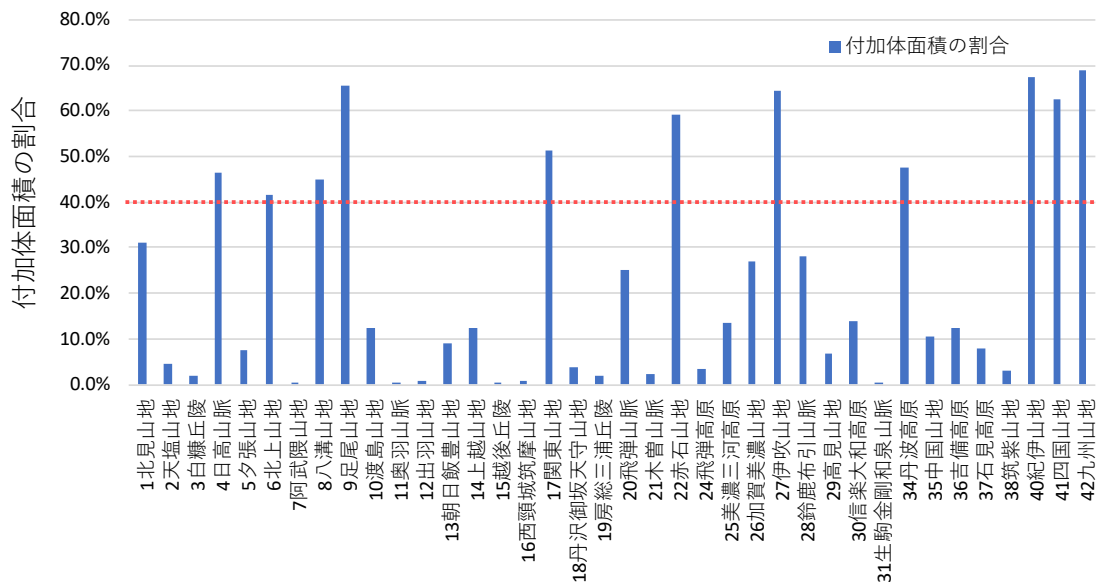


図 5-1 日本の山地における付加体分布面積

(ii) 地質・地質構造の分布と標高の関係

付加体が分布する地域における地質・地質構造の分布と標高との傾向を整理するために、付加体優勢山地において広く観察される 14 種の地質・地質構造を対象に、各地質・地質構造が分布する領域の標高の平均値を算出し、山地全体の標高の平均値によって規格化した。すべての付加体優勢山地における地質・地質構造ごとの整理結果を図 5-2 に示す。同図より、メランジュ、石灰岩ブロック、チャートブロック（御荷鉾チャート含む）、玄武岩ブロックは、それぞれの地質・地質構造が分布する領域の標高の平均値を付加体優勢山地全体の標高の平均値で規格化した値が 1.1 より大きいことが確認できた。そこで、仮想の地形・地質構造モデルを構築する際は、上記の地質・地質構造は標高の高い地域に分布する傾向を反映することとした。

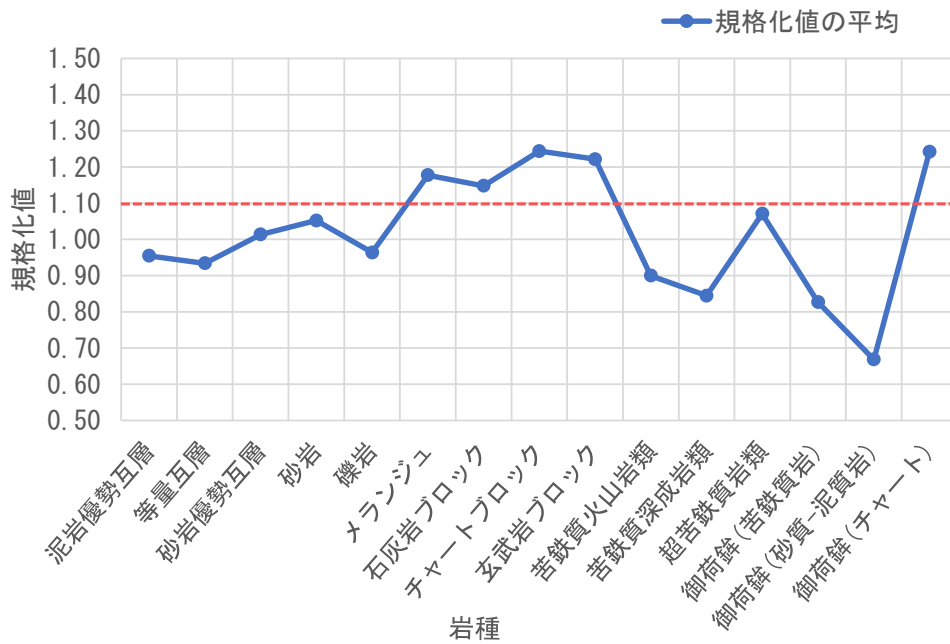


図 5-2 全付加体優勢山地の地質・地質構造ごとの標高を規格化した結果

(iii)陸域及び海域における汀線からの距離と標高の関係

付加体優勢山地の陸域及びその海域を対象として標高の統計量に基づき、汀線からの距離と標高の関係を整理した。

陸域における標高の統計量を求める際は、それぞれの付加体優勢山地を汀線から 10 km 間隔で領域を分割し、それぞれの領域での標高の平均値及び最大・最小値を算出した。付加体優勢山地ごとの汀線から陸域側への距離と標高の平均値の関係を表すグラフを図 5-3 に示す。同図より、汀線から陸域側に 50 km 程度までの範囲では、内陸に向かい次第に平均標高が高くなる傾向が認められた。そこで、仮想の地形モデルを構築する際は、汀線から 50 km 程度の地点で標高が最大値をとると仮定するとともに、表 5-1 に整理した汀線からの距離と標高の関係を考慮した。

海域については、関東山地や足尾山地のように海岸までの距離が遠く、またプレート境界が複雑な配置であるなど、海底地形の発達過程が他の地域と異なることが想定されるため、本検討では付加体優勢山地のうち、太平洋側に分布しており、かつ汀線に近い地域に分布している 6 山地（日高山地、北上山地、赤石山地、紀伊山地、四国山地、九州山地；図 5-4）を対象として、汀線から海域側に 50 km までの範囲を対象として標高の統計量を算出した。標高の統計量は、陸域の場合と同様に、汀線からの距離に応じて領域を 10km ごとに分割し、それぞれの領域の標高の最大・最小値、平均値を算出した（表 5-2）。また、表 5-2 からは、6 山地全体の平均標高は、汀線から 10 km までの範囲と 10 km～50 km の範囲で海底地形の平均勾配が異なることが確認された。そのため、付加体優勢山地の汀線から海域側に 50 km までの範囲について、マルチビームソナーによって取得された世界中の海域の標高データを統合したものである GMRT (Global Multi-Resolution Topography Data Systhesis ; <https://www.gmrt.org/>) の 250 m グリッド標高データに基づき、地形を大陸棚、大陸斜面（陸側）、大陸斜面（海側）

に区分し、傾斜量図から平均傾斜を算出した（表 5-3）。仮想の地形モデルを構築する際は、表 5-3 に整理した海底地形区分ごとの面積比及び平均傾斜を考慮した。

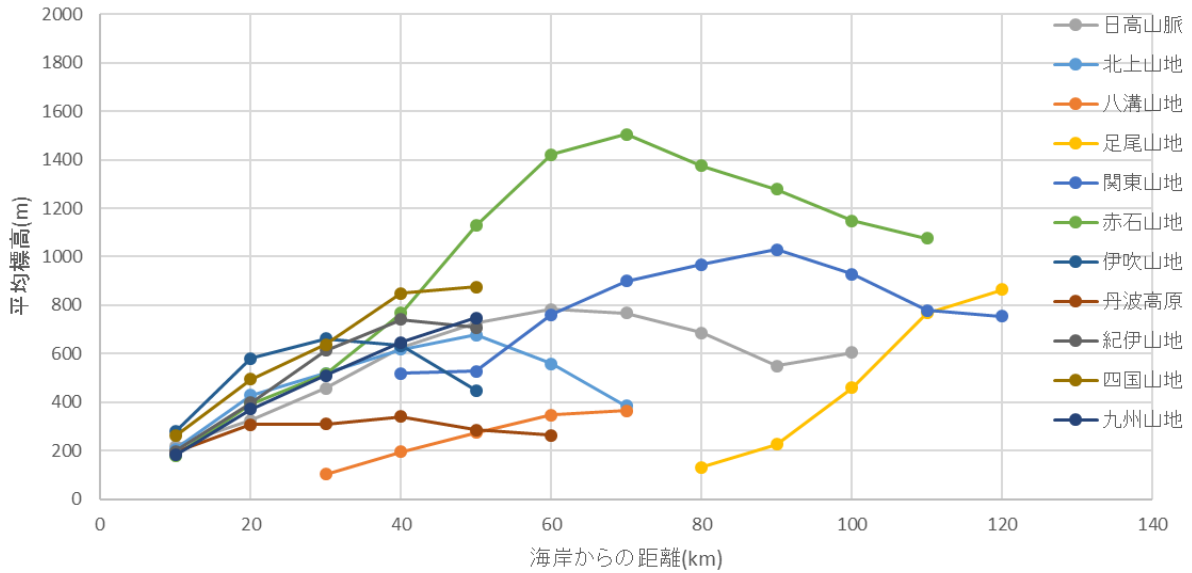
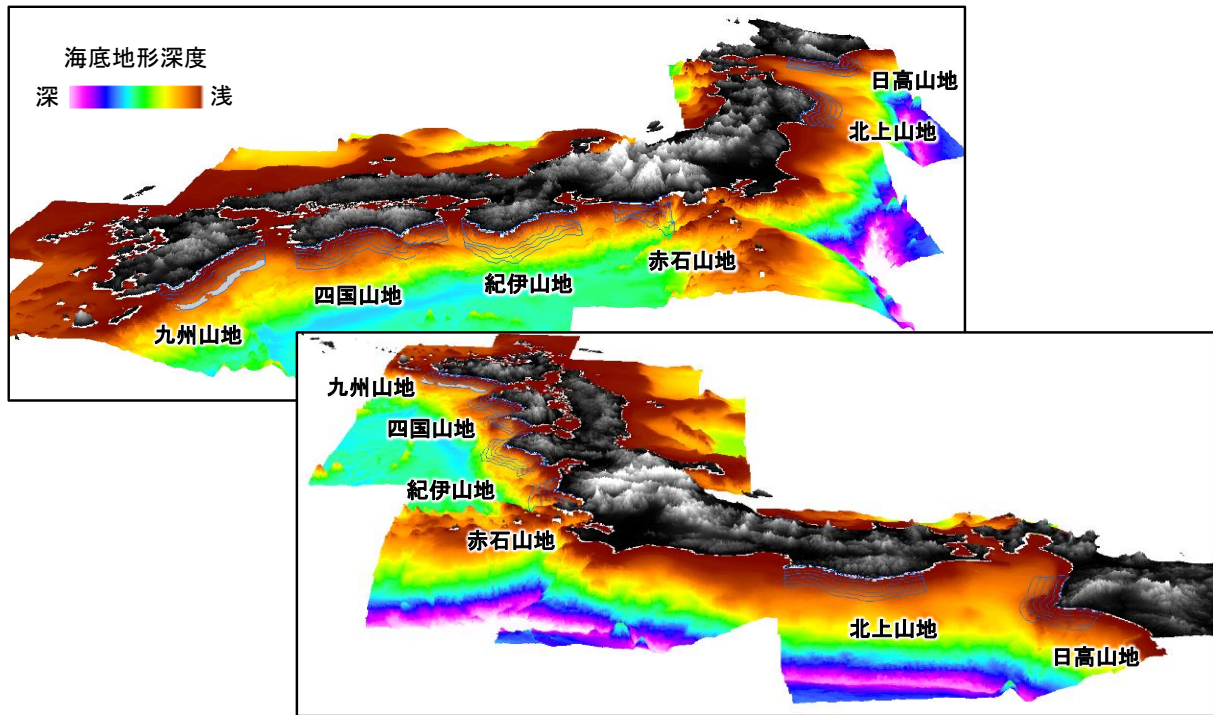


図 5-3 付加体優勢山地における汀線からの距離と平均標高の関係

表 5-1 汀線から陸域側の 10 km ごとの標高データ

汀線からの距離 (km)	最小標高 (E.L.m)	最大標高 (E.L.m)	平均標高 (E.L.m)
0~10	-0.1	631.0	225.8
10~20	21.3	769.7	488.2
20~30	58.5	875.7	559.1
30~40	113.4	988.6	713.9
40~50	198.8	1,072.3	754.9



※10km間隔のDEMの集計エリアを青線で表示

図 5-4 海域の検討対象とした6山地とその周辺の海底地形

表 5-2 汀線から海域側の10 km ごとの標高データ

海岸線からの距離 (km)	最小標高 (E.L.m)	最大標高 (E.L.m)	平均標高 (E.L.m)	平均傾斜 (°)
10	-1,449	-1	-115	0.7
20	-2,193	-32	-381	1.5
30	-2,767	-64	-674	1.7
40	-3,094	-62	-919	1.4
50	-3,610	-162	-1,163	1.4

表 5-3 GMRT データに基づく海域地形区分と平均傾斜の整理

海底地形区分	面積 (km ²)	面積比	平均傾斜 (°)
大陸棚	20,306	30 %	0.6
大陸斜面 (陸側)	27,381	41 %	2.4
大陸斜面 (海側)	19,180	29 %	1.6

(iv)付加体の統計データの整理

包括的技術報告書で取りまとめた付加体の統計データに基づき、付加体の分布形状・面積比を整理した。

表 5-4 付加体の分布形状・面積比の整理

ユニットタイプ		軸方位 [°] ^{*2}	長径 [km]	短径 [km]	長径/ 短径	面積比 ^{*1}	モデル内 面積[km ²]
混在相	平均値	62	49	25	2.0	42%	2,100
	標準偏差	32	30	22	-	-	-
整然相	平均値	77	48	24	2.0	41%	2,050
	標準偏差	33	23	15	-	-	-
スラブ ^{*3}	平均値	65	36	15	2.4	17%	850
	標準偏差	43	27	11	-	-	-
合計		-	-	-	-	100%	5,000

*1：NUMO（2021）に基づく

*2：軸方位は北から東回り 180°として集計

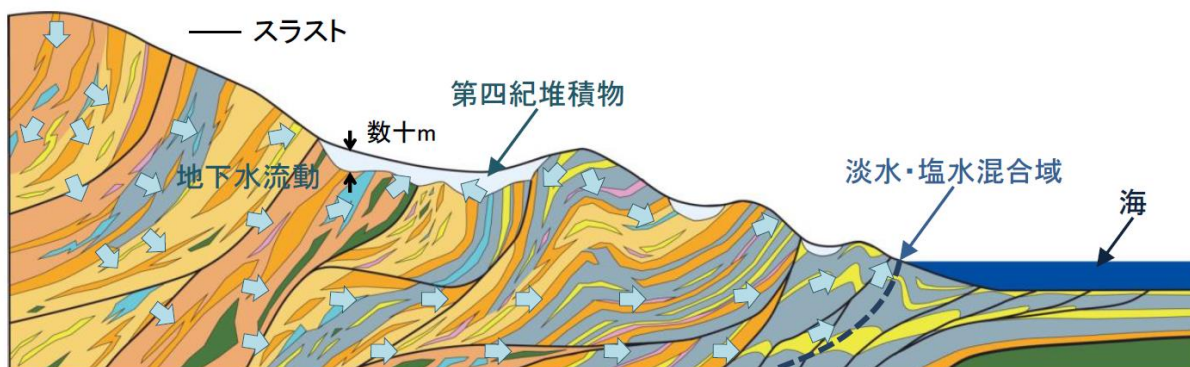
*3：スラブ軸方向は西南日本のみ集計

(2) 地形及び地質・地質構造の概念モデルの構築

本検討では、包括的技術報告書で提示した先新第三紀堆積岩類の概念モデル（図 5-5）に基づき、構築する仮想の地形・地質構造モデルが満たすべき条件を表 5-5 に整理した。

表 5-5 構築する仮想の地形・地質構造モデルが満たすべき条件

大～中地形	<ul style="list-style-type: none"> ・ 陸域は全体的に山地が多く、平野や盆地が少ない ・ 陸域の平野、盆地及び海域には、必要に応じて新第三紀～新第四紀堆積岩の被覆層を配置 ・ 付加体分地地域の山地の形態的特徴を反映 ・ 内陸ほど標高が高い傾向と仮定 ・ 海域には大陸棚や大陸斜面を設定
小地形	<ul style="list-style-type: none"> ・ 岩種による侵食抵抗性の違いを考慮した標高や起伏を設定



- 先新第三紀堆積岩類の地表分布面積の70%が付加体に該当することから、付加体を構成する先新第三紀堆積岩類を対象とする
- 褶曲構造や覆瓦構造が発達し、スラストや断層で境された岩相や層序などが異なるユニットから構成される。
- 付加コンプレックスは、大局的に砂岩や泥岩などの連続性の高い互層からなる整然相及び泥岩を基質とし異地性または原地性の岩塊を大量に含む混在相により構成され、一般的に整然相は海溝側に、混在相はそれよりも背弧側に卓越する。
- スラスト及び地殻変動により発達したと考えられる長さ数km以上の規模を有する断層帯が分布する。

図 5-5 先新第三紀堆積岩類の地質環境の概念モデル (NUMO (2021) に追記)

5.2 現在を対象とした地形・地質構造/水理地質構造モデルの構築

5.2.1 現在を対象とした地形・地質構造モデルの構築

(1) 現在を対象とした地形モデルの構築

仮想の地形モデルは、以下の手順で構築した。なお、地形モデルの構築作業を行うに当たっては、モデル化領域の西側半分約 50 km を海域に、東側半分約 50 km を陸域に設定した。

(i) 陸域の数値標高モデルの作成

陸域を汀線から 10 km ごとに領域分割し、それぞれの領域ごとに無作為な位置に 100 個の点を配置する (図 5-6)。その後、それぞれの領域について、配置した点の標高の平均値と、表 5-1 に整理した汀線から陸域側の 10 km ごとの標高の平均値が一致するようにばらつきを考慮しつつ各点の標高値を設定 (図 5-6) することで、数値標高モデルを作成する。

(ii) 海域の数値標高モデルの作成

陸域と同様に、海域を汀線から 10 km ごとに領域分割し、それぞれの領域ごとに無作為に 100 個の点を配置したうえで、配置した点の標高の平均値と、表 5-2 に整理した汀線から海域側に 10 km ごとの標高の平均値が一致するようにばらつきを考慮しつつ各点の標高値を設定する。その後、表 5-3 に整理した海域地形区分と平均傾斜を用いて、大陸棚、大陸斜面 (陸側)、大陸斜面 (海側) の面積比を考慮した範囲ごとに、作成した数値標高モデルの地形勾配を修正 (図 5-7) する。

(iii)地形面の作成と河川流路の設定

(i)及び(ii)で作成したモデル化領域全体の数値標高モデルに対し、極端な急傾斜地のない連続的な地形となるように、クリギング法で各点間の標高分布を補間することで地形面の数値標高モデルを作成した(図 5-7)。

次に、陸域を対象として、付加体優勢山地の地形の特徴の再現性を高めるために地形面の修正を行った。すべての付加体優勢山地のデータを用いて汀線から 10 km 区間ごとに標高ヒストグラムを作成した。その後、モデル化領域の地形面を対象として、汀線から 10 km 区間ごとに標高ヒストグラムを作成し、対応するヒストグラムの形状が合うようにモデル化領域の地形面の数値標高モデルの標高値を補正した。

構築した地形面の数値標高モデルに基づき、DDM を作成するとともに、河川次数が比較的高い落水線を通し、かつ、凹陷地における落水線の内部収束を解消するように河川流路を設定した。その後、付加体優勢山地を流れる河川である大井川の河川縦断形を参考に、河川の流路が上流から下流にかけて連続して形成されるように、河川部の数値標高モデルを修正した。

最終的に得られた地形面の数値標高モデルを、地形モデルとした(図 5-7)。

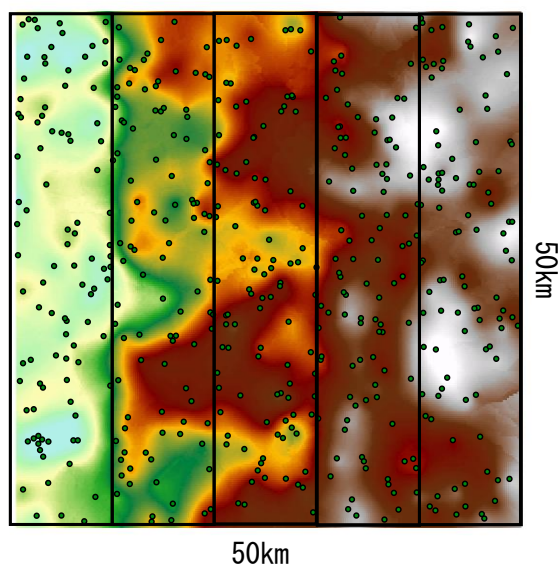


図 5-6 陸域に無作為に配置した点(500点)をもとに生成した地形面

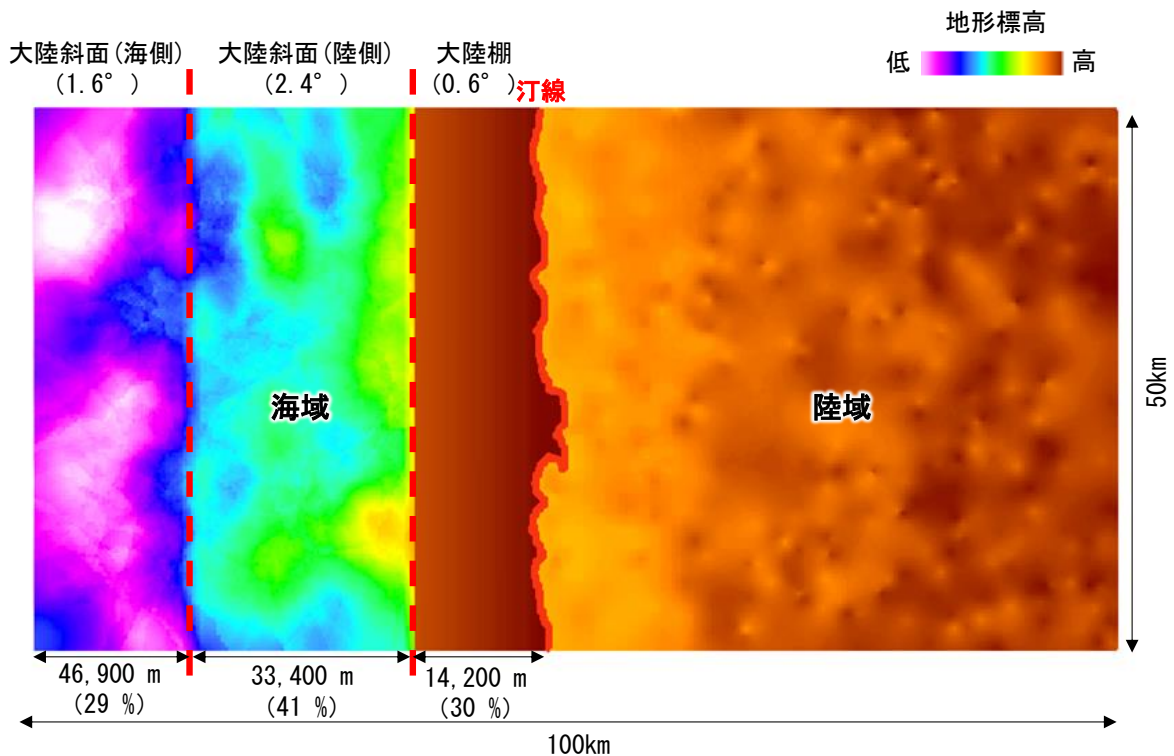


図 5-7 先新第三紀堆積岩類の地形モデル

(2) 現在を対象とした地質・地質構造モデルの構築

(i) 地質境界面モデルの構築

(a) 付加コンプレックスに関する地質・地質構造の設定とモデル化

表 5-4 に基づき、仮想の地質・地質構造モデルに考慮する代表的な付加コンプレックス（以下、「代表コンプレックス」という）として、整然相、混在相及びスラブ優勢混在相（表 5-4 のスラブの値を適用）の 3 種類を設定した。代表コンプレックスの配置関係は、西南日本外帯の分布状況を参考に、海側には主に整然相が、陸側には主に混在相基質とスラブ優勢混在相が分布すると設定した。

整然相及びスラブ優勢混在相はそれぞれ楕円で近似して表現し、表 5-4 に整理した長径・短径の平均値及び標準偏差に基づき 3 パターン（大円：平均値＋標準偏差，中円：平均値，小円：平均値－標準偏差）を設定した。東北日本と西南日本は地質学的に異なる形成過程を持つと考えられるため、西南日本とは軸方位の統計的な特徴が異なると解釈し、整然相及びスラブ優勢混在相の軸方位は西南日本のスラブの統計値に合わせて、表 5-4 に整理した軸方位の平均値及び標準偏差に基づき、3 パターン（平均軸方位＋標準偏差，平均軸方位，平均軸方位－標準偏差）を設定した。混在相は、整然相とスラブ優勢混在相間の領域に分布する設定とした。また、地質・地質構造モデル構築の際は、表 5-4 に整理した面積比に基づき各代表コンプレックスを配置することとした。地質・地質構造モデルに反映した代表コンプレックスの設定を表 5-6 に示す。さらに、包括的技術報告書を参考に、代表コンプレックスにはモデル平面上の褶曲構造に合わせてスラブをモデル化することとした。そのモデル化条件を

表 5-7 に示す。

上記で整理した情報に基づき作成した代表コンプレックスに関する地質・地質構造のモデル化結果を図 5-8 に示す。

表 5-6 地質・地質構造モデルに反映した代表コンプレックス

形態	コンプレックスの種類	面積 [km ²]	面積比	面積比の合計
楕円	整然相	297	6%	41%
	整然相	1,109	22%	
	整然相	406	8%	
	整然相	154	3%	
	整然相	103	2%	
基質部	混在相	2,084	42%	42%
楕円	スラブ優勢混在相	416	8%	17%
	スラブ優勢混在相	403	8%	
	スラブ優勢混在相	28	1%	

表 5-7 スラブのモデル化条件

項目	モデル化条件
スラブの配置	・ 整然相及びスラブ優勢混在相のスラブは、褶曲軸の方位を楕円の長軸方位に合わせて回転させて配置
スラブの面積比	・ 整然相のスラブ 3% (モデル領域全体の 1.2%) ・ 混在相のスラブ 20% (モデル領域全体の 8.4%) ・ スラブ優勢混在相のスラブ 43.5% (モデル領域全体の 7.4%)
スラブの岩種の組み合わせ・比率	・ 整然相基質：砂岩 48.5%，泥岩 48.5% ・ 整然相のスラブ (3%)：チャート 3% ・ 混在相の基質：80% ・ 混在相のスラブ (20%)：チャート 9%，緑色岩 11% ・ (中江 (2000) の付加体の分類例を参考とし、包括的技術報告書の混在相スラブの岩種組み合わせから、石灰岩と超苦鉄質岩を削除して再設定) ・ スラブ優勢混在相の基質：56.5% ・ スラブ優勢混在相のスラブ (43.5%)：チャート 17.5%・石灰岩 2%，緑色岩 20%，超苦鉄質岩 4%

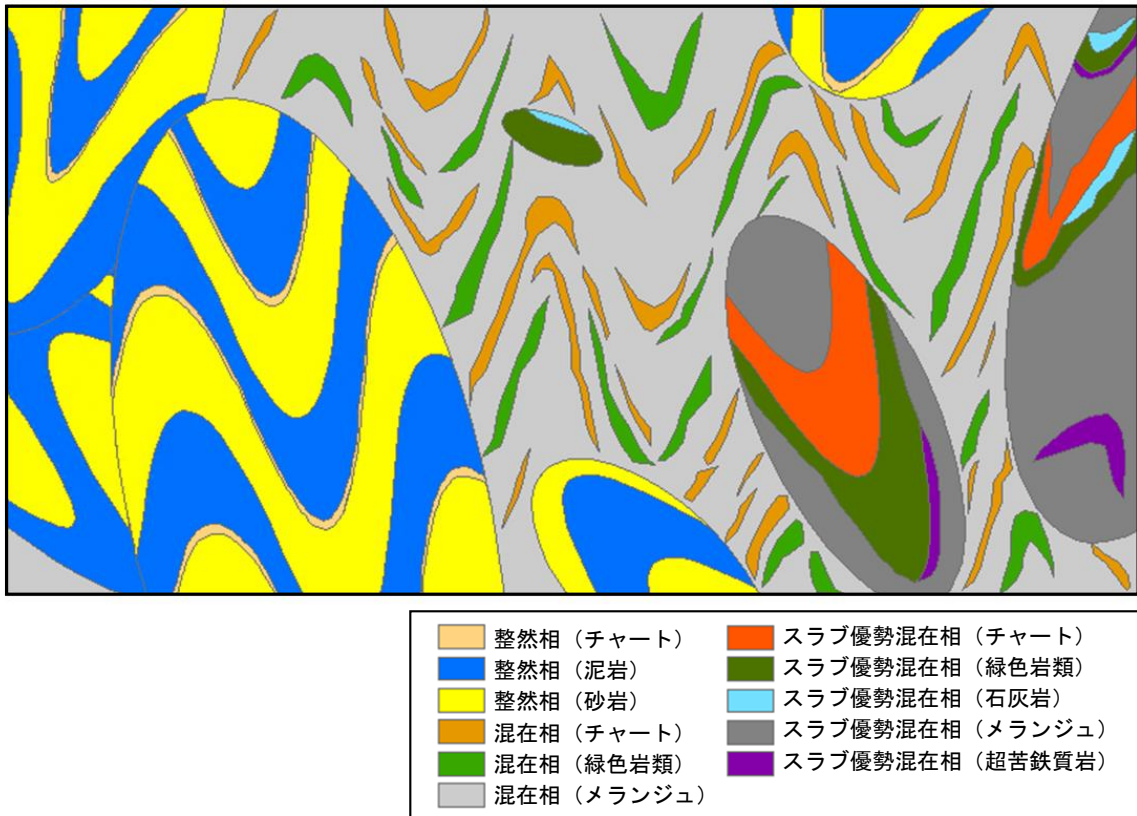


図 5-8 代表コンプレックスに関する地質・地質構造のモデル化結果

(b) 被覆堆積岩層の分布条件の設定とモデル化

地質・地質構造の概念モデルに基づき、陸域の平野や盆地、及び海域に必要な応じて新第三紀～第四紀堆積岩類の被覆堆積岩層を配置した。

海域に関しては、付加体の上位に被覆堆積岩層が分布する地域である紀伊半島沖の地質構造の情報を参考に、被覆堆積岩層の分布条件を設定した。当該海域では、付加体の上位に新第三紀堆積岩類からなる熊野堆積盆地が発達しており、海岸線から 50 km 付近の基盤上面は最大で標高-4,000 m 程度であるとともに、第四紀堆積岩類の層厚は、1,000 m 程度であることが示されている (IODP Expedition 319, 2009)。上記に基づき、地質・地質構造モデルの海域側境界面においては、付加体と新第三紀堆積岩類の境界が標高-4,000 m にあり、さらに新第三紀堆積岩類の上部には第四紀堆積岩類が層厚 1,000 m で分布する設定とした。モデルの海域側境界面と海岸線 (標高 0 m) との間の地層境界面は平面で結ぶことで、海域における被覆堆積岩層の地層境界面をモデル化した (図 5-9)。

陸域については、表 5-8 に示す付加体優勢山地に占める分布面積割合に基づき、新第三紀堆積岩類及び第四紀堆積岩類を地形的な窪みに配置することで、被覆堆積岩層をモデル化した (図 5-10)。

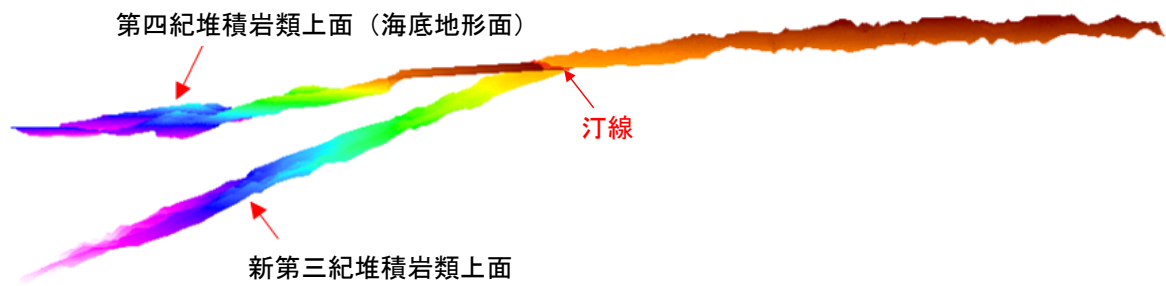


図 5-9 海域における被覆堆積岩層の地層境界面モデル

表 5-8 付加体優勢山地における被覆堆積岩層

被覆堆積岩層	分布面積 [km ²]	付加体優勢山地に占める割合
第四紀堆積岩類	5,560	8%
新第三紀堆積岩類	2,623	4%
付加体優勢山地	71,517	-

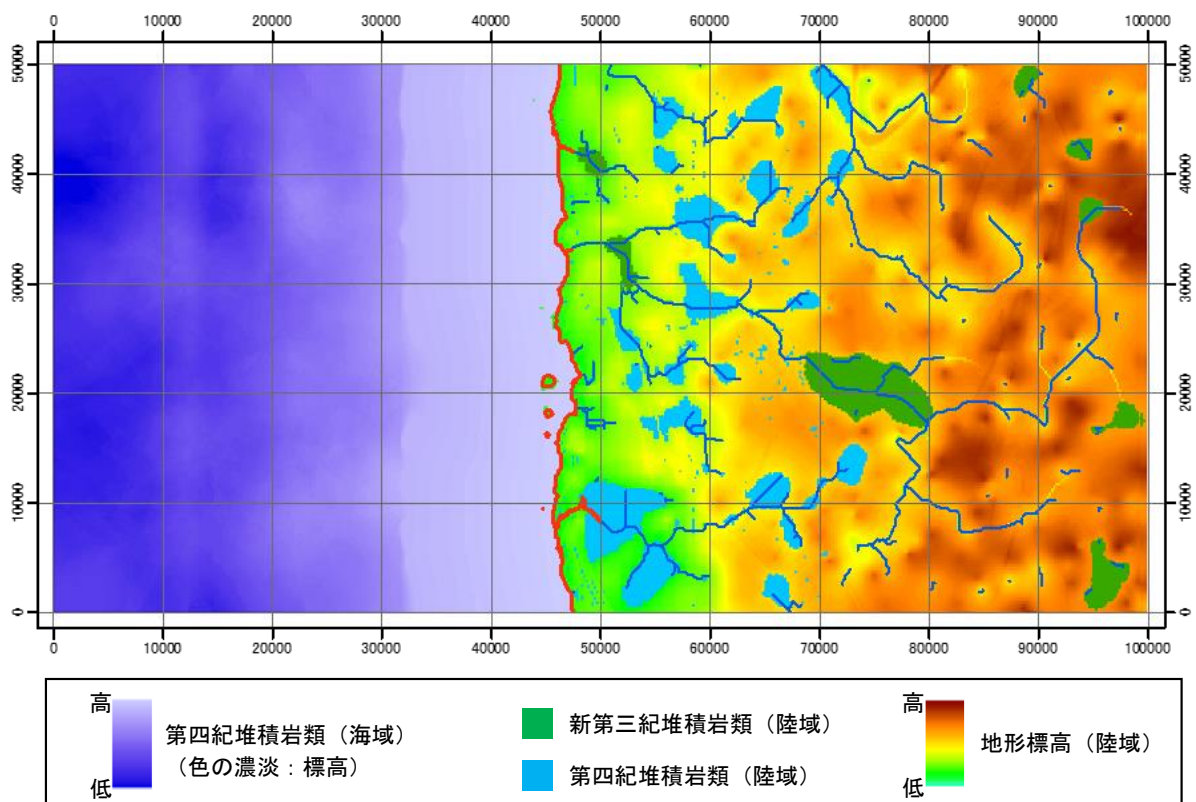
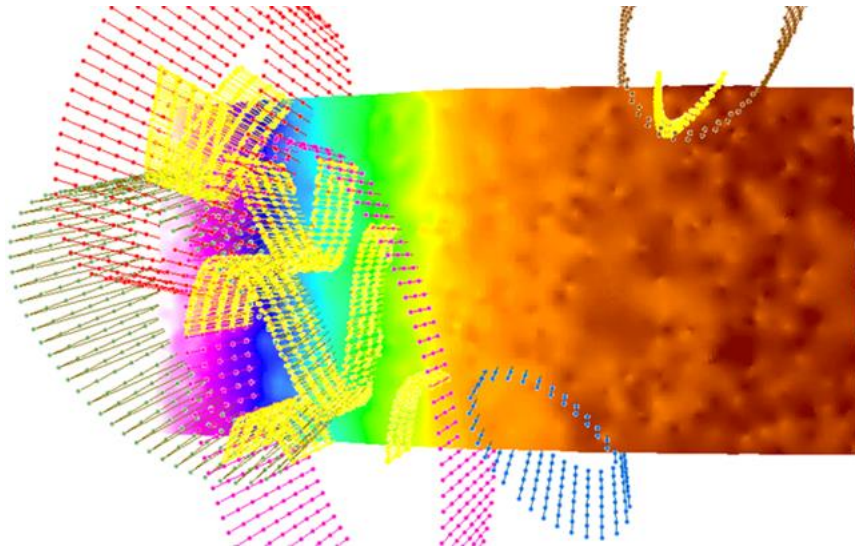


図 5-10 陸域における被覆堆積岩層のモデル化結果

(c) 代表コンプレックスの境界に基づく基盤岩の境界面のモデル化

本検討では、基盤岩の境界面として各代表コンプレックスの境界（スラスト）をモデル化した。一方で、その他の地質構造については、地表の分布状況から地下の連続性を決定することが困難であるため、包括的技術報告書において水理パラメータが設定されている整然相のチャートのみをモデル化の対象とした（図 5-11）。



※黄色点で示す整然相のチャートのみを地質・地質構造モデルに反映

図 5-11 代表コンプレックスの境界に基づく基盤岩の境界面のモデル化結果

(ii) 断層の空間分布の設定

包括的技術報告書に示された地質・地質構造モデル構築の考え方においては、断層・割れ目の長さに着目して、長さ 10 km 以上、長さ 1~10 km、長さ 1 km 未満の 3 つに区分したうえで、それらの地質学的特徴や処分場に与える影響、分布頻度に応じて、モデル化の有無やその方法を整理している（表 5-9）。先新第三紀堆積岩類における広域スケールの地質・地質構造モデル構築においては、長さ 10 km 以上の断層として、付加コンプレックスを分断するスラストを決定論的にモデル化している。また、長さ 1~10 km の断層は、スラストの走向を考慮してその卓越方位を決定論的に取り扱ったうえで、確率論的に割れ目を生成することでモデル化されている。なお、長さ 1 km 未満の断層に関しては、モデル化領域の空間スケールと断層の規模及び分布頻度を考慮し、モデル化されていない。

本検討においては、包括的技術報告書の事例と同様に、長さ 10 km 以上の断層及び長さ 1~10 km の断層の 2 種類をモデル化対象とした。また、包括的技術報告書の検討に比べて本検討におけるモデル化領域が広いことを考慮し、長さ 10 km 以上の断層を設定する際は、包括的技術報告書で構築された新第三紀堆積岩類の広域スケールのモデルを参考に、長さ 1 km 以上の断層を確率論的に生成し、長さ 10 km 以上の断層を抽出したうえで、スラストの空間分布を考慮して決定論的に修正した。

表 5-9 包括的技術報告書における断層・割れ目の長さとその取扱いの整理
(NUMO, 2021 : 付属書 3-22)

区分	取扱い
長さ 10 km 以上	地質学的にある程度の構造的規模を有しており、活断層を想定した場合には M6.5 の地震規模に相当する活動性を有する可能性があることに加えて、大規模な地下施設に著しい影響を及ぼす可能性も想定されること（小坂ほか，2010）を踏まえて、包括的技術報告書では、文献調査から精密調査の前半までの段階で除外する断層として取り扱う。したがって、長さ 10 km 以上のスラストや断層は処分場スケールの領域から除外する。
長さ 1～10 km	JAEA が進めている瑞浪の深地層の研究施設計画における地上からの調査結果（三枝ほか，2007）に基づくと、文献調査から精密調査の前半までの段階でその位置や構造的及び水理学的な特徴を概ね把握することは可能であると考えられる。ただし、長さ 10 km 以上の断層と比較するとその規模が小さく分布頻度が高いことから、長さ 1～10 km の断層は処分場スケールの領域内に分布することを許容するものの、パネルスケールの領域からは除外する。
長さ 1 km 未満	母岩中に普遍的に分布しているため、概要調査及び精密調査の段階においてすべてを検出することは現実的ではなく、その性状の把握や統計量の算出を目的とした調査・評価を行うこととなる。

(a) 長さ 10 km 以上の断層のモデル化

表 5-10 に示す幾何学的パラメータに基づき、長さ 1 km 以上の断層を確率論的に発生させ、そのうち、長さ 10 km 以上の断層のみを抽出した。なお、断層を発生させる際の方角分布はフィッシャー分布を仮定したが、先新第三紀堆積岩類分布域における長さ 1 km 以上の断層に適用できるパラメータの情報がないことから、表 5-10 の幾何学的パラメータを満たすまでトライアンドエラーを行い、10 パターンの断層モデルを構築した。さらに、構築した 10 パターンの断層モデルにおける断層の分布密度として、P21（単位面積あたりに分布する断層のトレース長の長さ； km/km^2 ）を算出し、表 5-11 に示す P21 に最も整合的な断層モデルを抽出した。

次に、包括的技術報告書を参考に、各代表コンプレックスの境界であるスラスト（総延長：351 km）を、長さ 10 km 以上の断層としてモデル化した。具体的には、表 5-10 に示した断層の幾何学的パラメータとの整合性を保つため、確率論的に発生させた長さ 10 km 以上の断層を乱数によって 1 本ずつ選択していき、選択した断層の長さの総和がスラストの総延長（351 km）に最も近くなったときに、それらの断層を削除したうえで、スラストを地質・地質構造モデルに考慮した。さらに、地質・地質構造モデルに表現した地質及び断層の分布を俯瞰したうえで、1 本の断層を再配置することで、付加体において特徴的な断層地塊を表現した。

上記に基づき構築した、長さ 10 km 以上の断層モデルを図 5-12 に示す。

表 5-10 断層の幾何学的パラメータ

断層の長さ分布のべき乗数[-]	4.0 ^{*1}
断層・割れ目密度[m ² /m ³]	0.002 ^{*1}
断層の方位[°]	N68±36 ^{*2}
断層の傾斜[°]	E50±16 ^{*3}

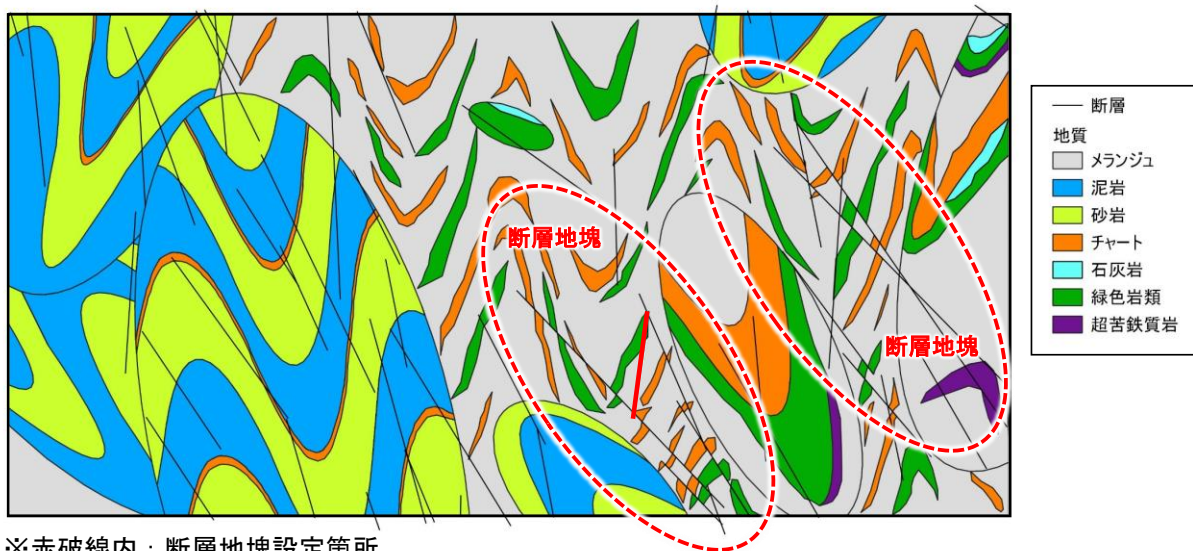
*1 : NUMO (2021) を参考に設定

*2 : に示した混在相, 整然相, スラブの軸方位の平均値及び標準偏差を平均した値

*3 : NUMO (2021) を参考に設定

表 5-11 全国の付加体分布範囲及び日本の断層マップに基づく値

	面積 (全国) [km ²]	断層長さ (全体) [km]	断層長さ (全体) /面積 P21[km/km ²]
付加体	57,815	10,408	0.18



※赤破線内：断層地塊設定箇所

※赤線：断層地塊を設定するために再配置した断層

図 5-12 長さ 10 km 以上の断層モデル

(b) 長さ 1~10 km の断層のモデル化

包括的技術報告書においては、整然相に分布する長さ 1~10 km の断層は、最も近傍のスラストと整合するように断層の方位・傾斜が設定されている。また、混在相に分布する長さ 1~10 km の断層に関しては、整然相と同様に断層を生成したのち、その約 30% が序列外スラスト（形成されていた一連のスラスト群を大規模に斜めに切る形で形成されるスラスト）であると仮定し、最も近傍のスラストと直交及び斜交するように設定している。

そこで、本検討においては、「整然相」と「混在相及びスラブ優勢混在相」の 2 つの領域に分けて断層を確率論的に生成することとした。「整然相」については、長さ 10 km 以上の断層

と同じ方位・傾斜分布を適用して、長さ 1～10 km の断層を確率論的に生成した。「混在相及びスラブ優勢混在相」については、断層の 70 %が「整然相」と同じ方位分布となるように、残りの 30 %が「整然相」の方位分布に対し直交 (90° 回転) 及び斜交 (45° 及び 135° 回転) することで、長さ 1～10 km の断層を確率論的に生成した。

上記に基づき構築した、長さ 1～10 km の断層モデルを図 5-13 に示す。

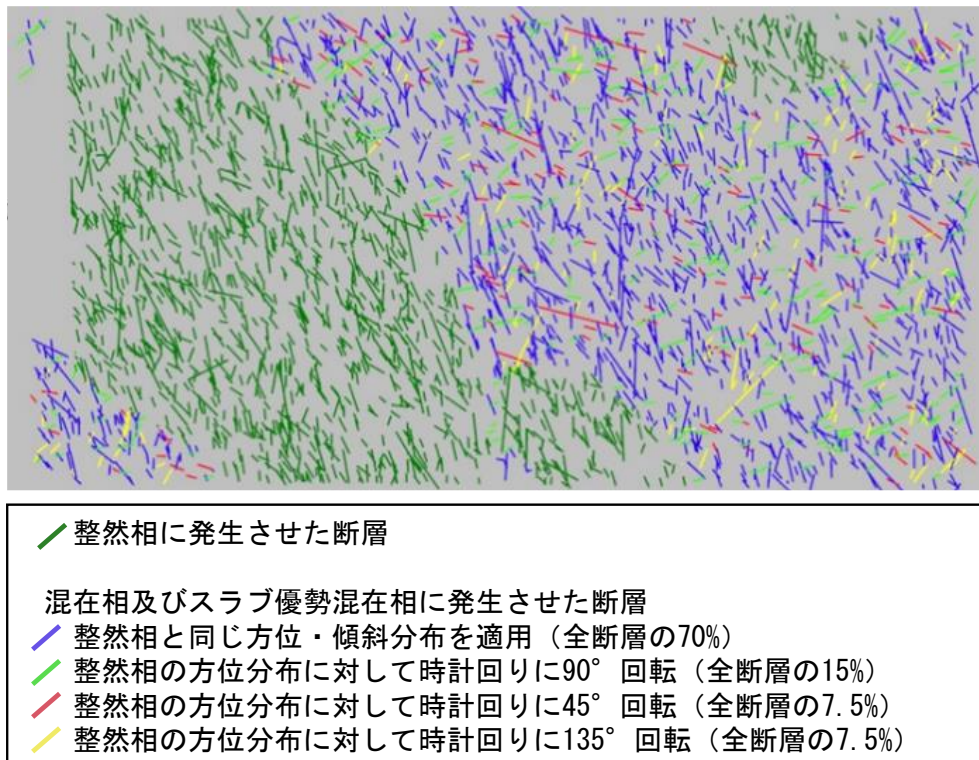


図 5-13 長さ 1～10 km の断層モデル (水平断面図 : 標高-4 km)

(3) 現在を対象とした地形・地質構造モデルの構築

上記(4)及び(5)で構築した地形モデル、地層境界面モデル及び断層モデルを統合し、現在を対象とした地形・地質構造モデルを構築した (図 5-14)。

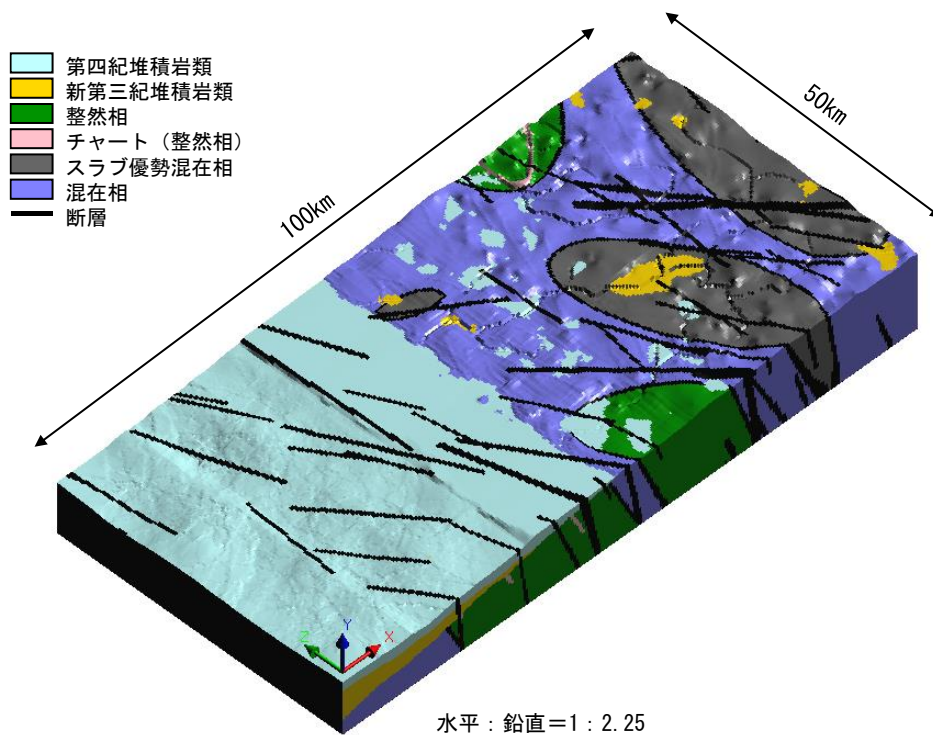


図 5-14 現在を対象とした地形・地質構造モデル（鳥観図）

5.2.2 現在を対象とした水理地質構造モデルの構築

(1) 水理地質構造モデルを構築する領域の選定

水理地質構造モデルを構築する領域は、地形・地質構造モデルと同様に、東西方向に 100 km、南北方向に 50 km、深度方向には地表から標高-5 km とした。

(2) メッシュモデルの構築

水理地質構造モデルは、有限要素法により空間を離散化したメッシュモデルをベースとして構築した。メッシュモデルにおいては、平面方向には全領域を 300 m 間隔のグリッドで分割し、深度方向には地質構造の連続性が表現できるように、メッシュサイズを表 5-12 に示すように設定した。

構築したメッシュモデルを図 5-15 に示す。

表 5-12 メッシュモデルに考慮した深度方向の要素分割サイズ

深度 0~-20 m	5 m 間隔
深度-20~-100 m	10 m 間隔
深度-100~-500 m	50 m 間隔
深度-500~-1,000 m	100 m 程度の間隔（地表標高に依存）
深度-1,000~-3,000 m	125 m 間隔
深度-3,000~-5,000 m	250 m 間隔

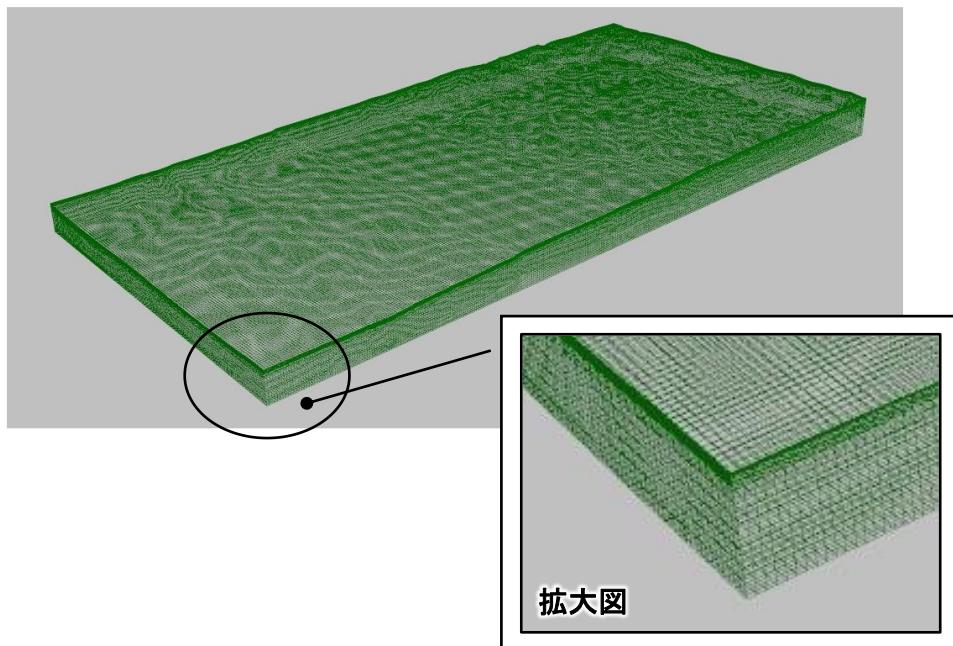


図 5-15 構築したメッシュモデル（鳥観図）

(3) 水理・物質移行パラメータの設定

水理地質構造区分は、地質構造により異なる水理特性を有することを前提として地質区分に準じて設定した。水理地質構造区分に設定した透水係数及び有効間隙率の一覧を表 5-13 に示す。

第四紀堆積岩類、新第三紀堆積岩類及び先新第三紀堆積岩類である整然相や混在相の透水係数は、包括的技術報告書に記載された値を参照した。先新第三紀堆積岩類の有効間隙率は、包括的技術報告書に示された割れ目の統計パラメータ（表 5-14）を用いて確率論的に構築した割れ目ネットワークモデル（以下、「DFN モデル」という）に基づき等価な有効間隙率の分布を推定し、その対数平均値を設定した（図 5-16）。

長さ 10 km 以上の断層は、水理地質構造区分として陽にモデル化して物性値を設定した。長さ 1~10 km の断層については、長さ 10 km 以上の断層と同じ物性値を設定したうえで、スメアード法により断層を含む要素の三次元透水テンソルを修正することで、水理地質構造モデルへ反映した。

分散長は、圧力と濃度の連成解析における解の収束性や数値分散の抑制のため、メッシュモデルのメッシュサイズ（300 m）よりも大きい縦 1,000 m、横 500 m を設定した。また、比貯留係数は、地下水流動・物質移行解析の解析対象期間が 100 万年の長期間であることから、岩盤の貯留効果の影響を無視できると仮定し、ゼロを設定した。

表 5-13 水理地質構造区分に設定した透水係数及び有効間隙率

水理地質構造区分	透水係数 [m/s]	有効間隙率 [%]	備考
第四紀堆積岩類(被覆層)	1.0×10^{-5}	29	透水係数：NUMO (2021) 付属書 3-21 有効間隙率：NUMO (2021) 付属書 3-13 (中央値)
新第三紀堆積岩類(被覆層)	(水平) 5.3×10^{-7} (鉛直) 2.3×10^{-8}	25	透水係数：NUMO (2021) 付属書 3-21 (砂泥互層の値) 有効間隙率：NUMO (2021) 付属書 3-13 (中央値)
整然相(基質)	2.0×10^{-9}	0.0022	透水係数：NUMO (2021) 付属書 3-22 有効間隙率：DFN モデルに基づく推定値
整然相(チャート)	1.0×10^{-8}	0.0022	透水係数：NUMO (2021) 付属書 3-22 有効間隙率：DFN モデルに基づく推定値
混在雄, スラブ優勢混在相	2.0×10^{-9}	0.0022	透水係数：NUMO (2021) 付属書 3-22 有効間隙率：DFN モデルに基づく推定値
断層	1.0×10^{-8}	0.4	透水係数：NUMO (2021) 付属書 3-22 有効間隙率：澤田ほか (2007) に示された割れ目帯部分の有効間隙率を参考に設定

表 5-14 先新第三紀堆積岩類の有効間隙率の算定に適用した割れ目パラメータ (NUMO, 2021)

断層・割れ目セット	方位分布			長さ分布		三次元密度 [m ² /m ³]	透水量係数分布	
	傾斜方位[°]	傾斜[°]	Fisher係数	べき乗数	最小長さ[m]		最大長さ[m]	対数平均値
NE系	358	76	20	40	40	12.5	2.0×10^{-9}	1.0
NS系	96	78	20		0.15	1.25		
低角度	223	19	20		1,000	1.25		

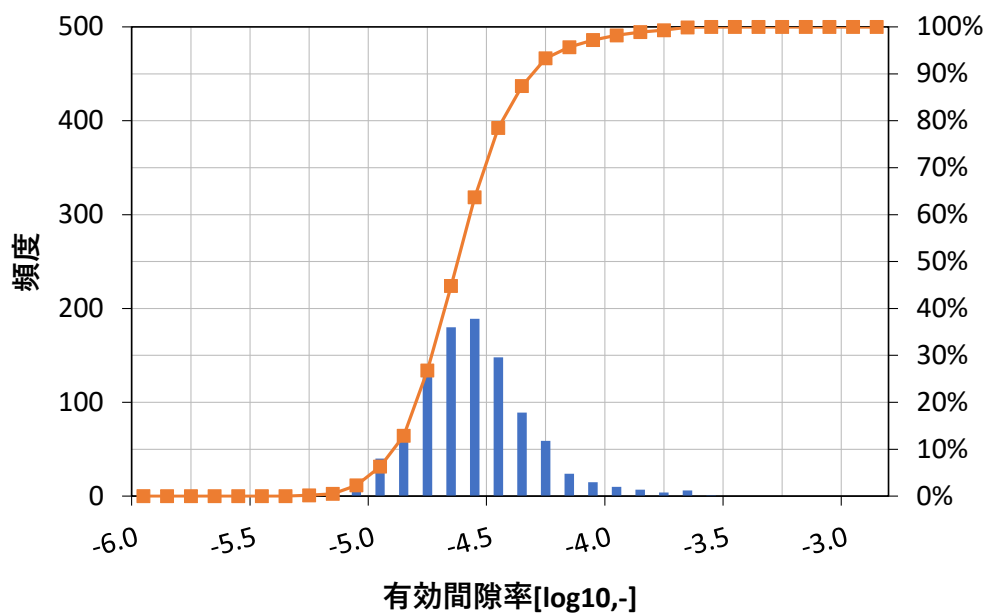


図 5-16 DFN モデルに基づき推定した等価な有効間隙率分布

(4) 現在を対象とした水理地質構造モデルの構築

(2)で構築したメッシュモデル及び(3)で設定した水理・物質移行パラメータに基づき、現在を対象とした水理地質構造モデルを構築した (図 5-17)。

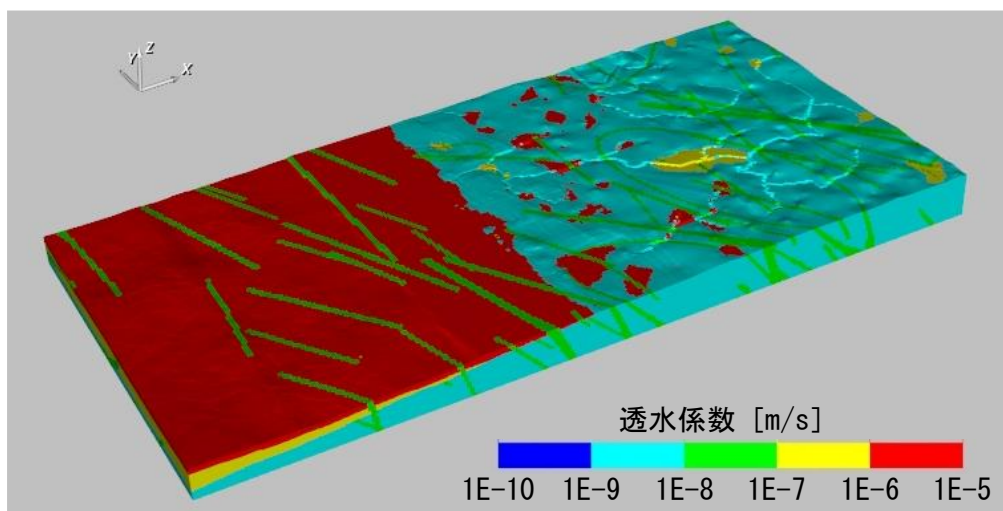


図 5-17 現在を対象とした水理地質構造モデル (鳥観図)

5.3 地形及び地質・地質構造の長期変動の解釈

5.3.1 地形及び地質・地質構造の長期変動の概念モデルの構築

本検討は仮想的な場を対象としているため、4D-SDM を構築するために必要な地質環境の長期変動の条件を以下のように設定した。

- ・気候変動サイクルは10万年周期で生じており、海進期間（寒冷期から温暖期に向かう期間）は2万年、海退期間（温暖期から寒冷期に向かう期間）は8万年である。
- ・気候変動に伴って、温暖期の最大海進時には最大+5 m（現在の標高基準）、寒冷期の最大海退時には最大-140 m（現在の標高基準）の海水準変動が生じる。
- ・気候変動に伴い涵養量が増減し、寒冷期の涵養量は温暖期と比べて減少する。
- ・付加体は日本列島の基盤であること、本検討でデータ収集の対象とした付加体優勢山地が主に沿岸域であり極端に大きな隆起量を見込む必然性が小さいこと、海域の隆起速度の情報がないことを考慮し、検討対象期間の100万年における長期的な地形変化は一定と仮定する。長期的な地形変化の概念を図5-18に示す。
- ・現在の地形・地質構造モデルには地質・地質構造ごとの標高差が考慮されているため、地質・地質構造ごとに異なる地形変化パラメータは設定しない。
- ・図5-12に示した断層地塊においては、周辺よりも隆起速度が速い断層関連山地が存在する。
- ・検討対象期間の100万年間においては、現在の河川流域に大きな変化はない。

現在の地形モデル

ある時間の標高(m)

122	126	132
125	124	128
126	125	127

隆起量(mm/year)

0.3	0.3	0.5
0.3	0.4	0.5
0.3	0.5	0.5

侵食量(mm/year)

0.4	0.4	0.6
0.4	0.5	0.6
0.4	0.6	0.6

$$\begin{aligned}
 & \text{X万年後の標高(m)} \\
 & = \text{標高(m)} + \text{隆起量(m)} - \text{侵食量(m)}
 \end{aligned}$$

将来の地形モデル

112	116	122
115	114	118
116	115	117

図 5-18 長期的な地形変化の概念モデル

5.3.2 代表時間断面の設定

5.2.1に示した地質環境の長期変動の条件及び図4-16に整理したフローに基づき、4D-SDM構築に考慮する代表時間断面について検討した。

本検討においては、涵養量の変化を考慮して代表時間断面を設定する必要があるとともに、モデル化領域は海域から沿岸域を含んでいるため、海水準変動を考慮した代表時間断面を設定する必要がある。長期的な地形変化は一定の速度で生じる条件及び現在の河川流域に大きな変化はない条件としたことから、隆起・侵食の傾向や地質構造の分布が大きく変化することを想定した代表時間断面は設定しない。

以上のことから、10 万年周期の気候変動サイクルに基づく、将来 100 万年間の最大海進時と最大海退時を代表時間断面として、現在を含む合計 21 の代表時間断面を設定した。

5.3.3 地形及び地質・地質構造の長期変動パラメータの設定

(1) 地形変化パラメータの設定

本検討で用いた地形変化パラメータを表 5-15 に示す。

表 5-15 地形変化パラメータの設定

地質・地質構造	隆起	侵食	堆積
第四紀堆積岩類	基盤岩： 300 m/100 万年	<ul style="list-style-type: none"> ・陸域：藤原ほか(2001)に基づき、地形メッシュごとの標高から算定 ・海域：0 m/100 万年 	現在時間断面の河川流路上で、河川が滞留した場合に瞬時堆積
新第三紀堆積岩類			—
先新第三紀堆積岩類			
断層関連山地	基盤岩の隆起量に加えて以下を考慮(図 5-19) <ul style="list-style-type: none"> ・97 m/100 万年(横ずれ断層により形成される山地を想定) ・225 m/100 万年(逆断層により形成される山地を想定) 		

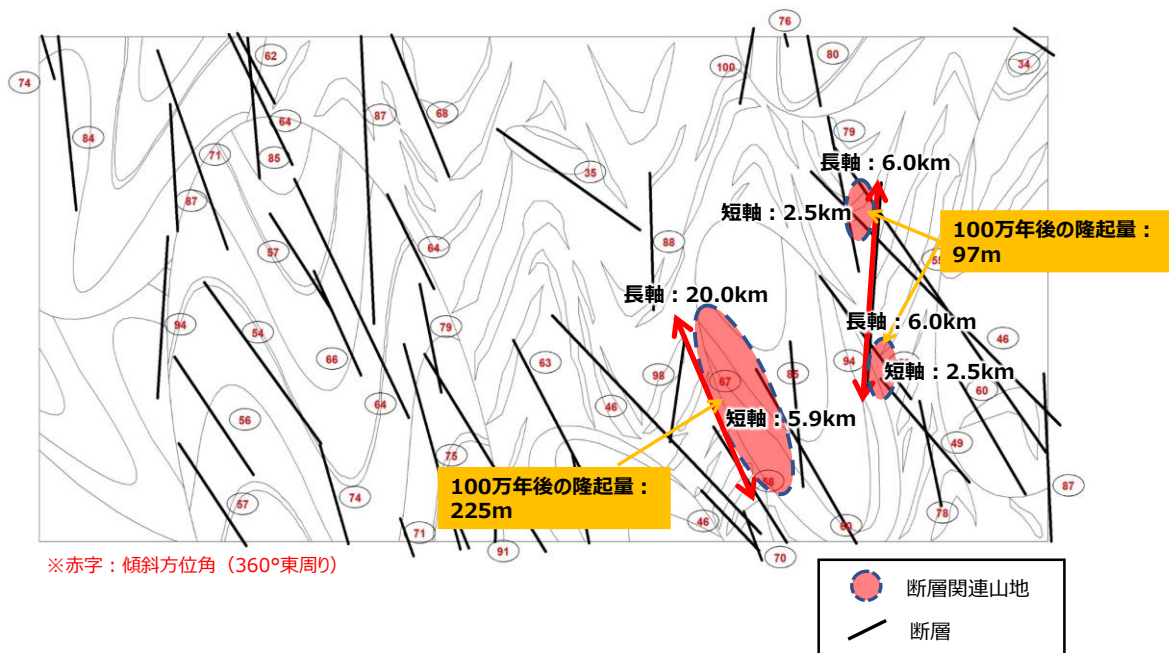


図 5-19 断層関連山地の隆起量の設定

(2) 地形変化メッシュの作成

表 5-15 に示した地形変化パラメータに基づき作成した地形変化メッシュを図 5-20 に示す。なお、モデル化領域全体の隆起・侵食に伴う地形変化は一定のため、同図には表示しない。

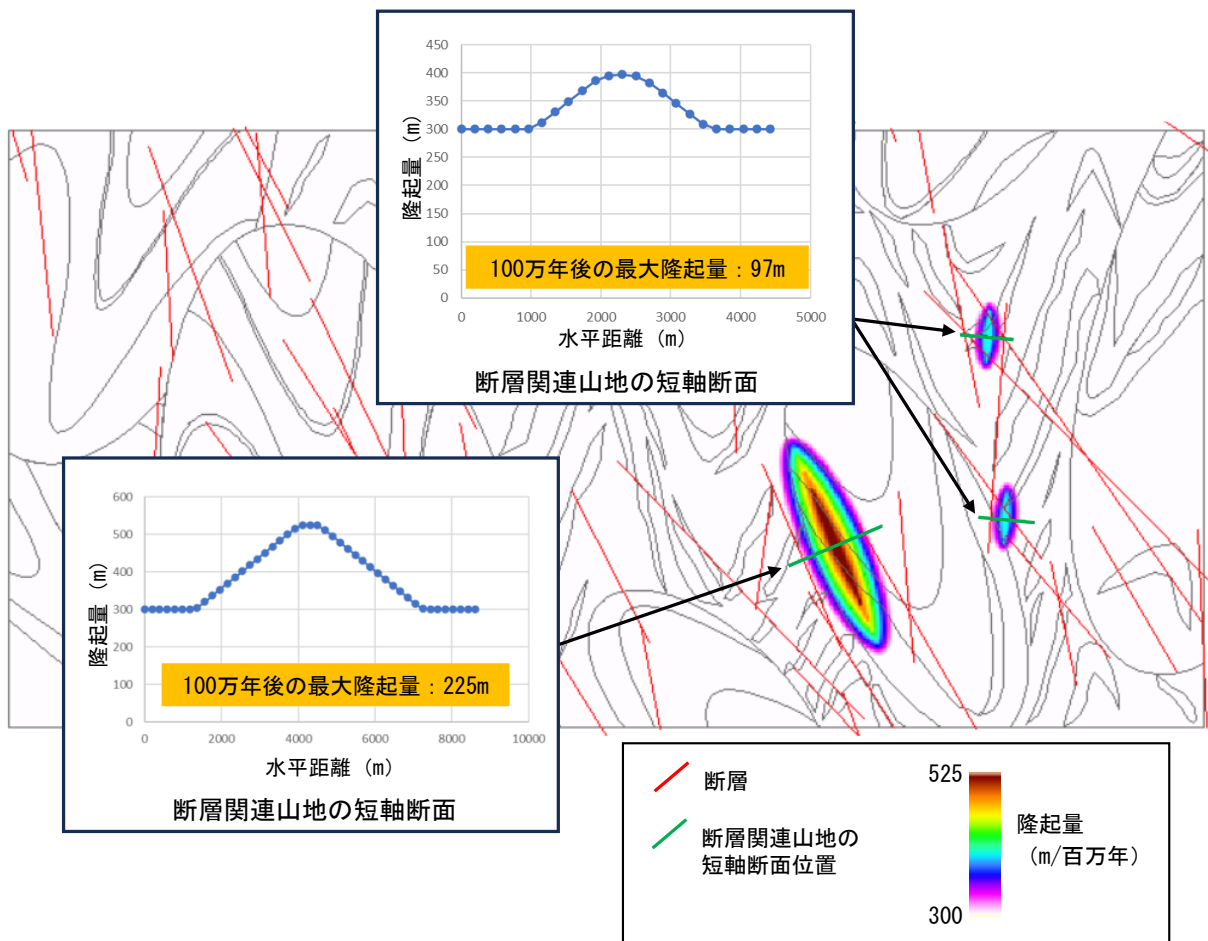
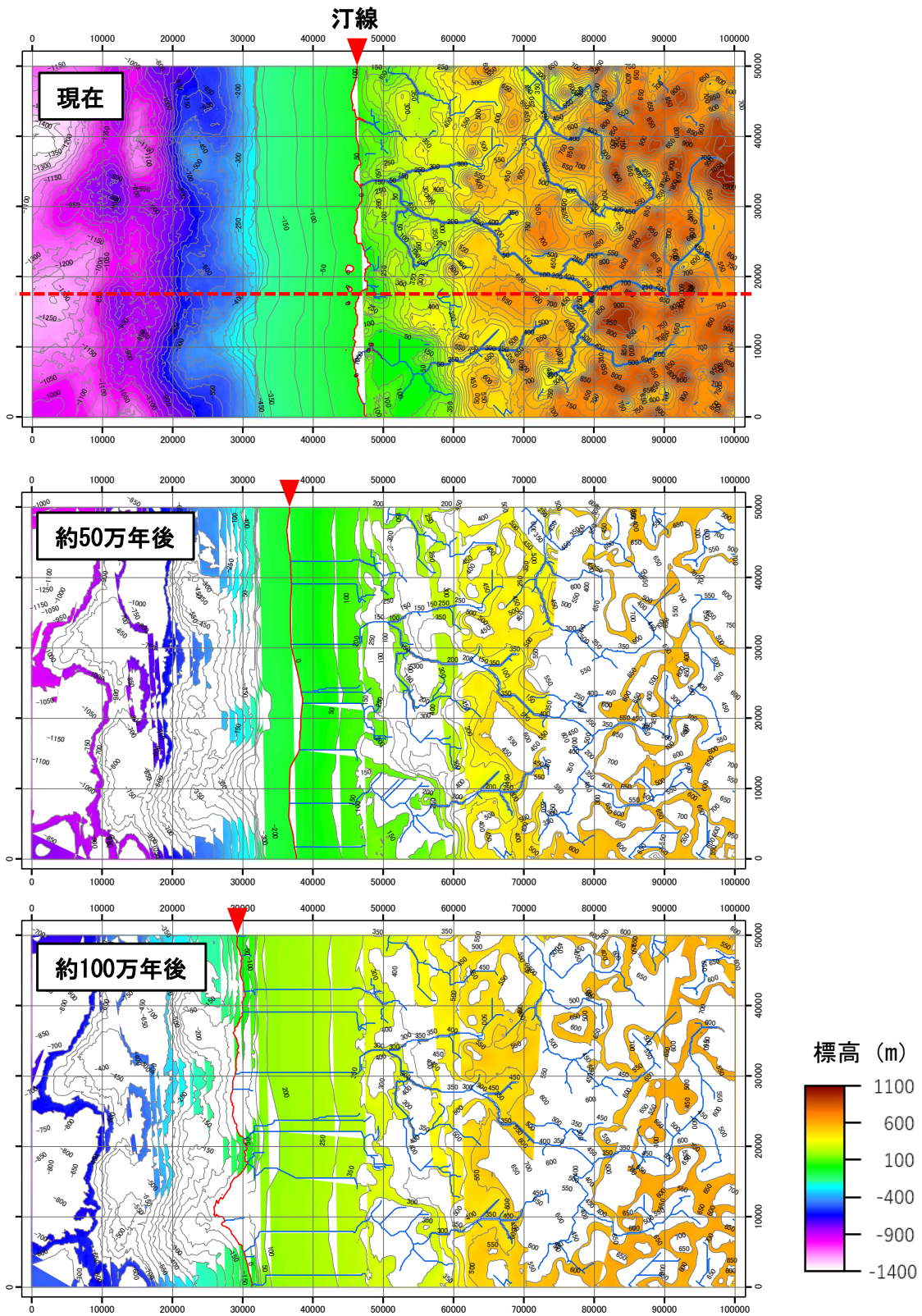


図 5-20 断層関連山地に関する地形変化メッシュ

5.4 代表時間断面を対象とした地形・地質構造モデルの構築

5.3.3 で設定した地形及び地質・地質構造の長期変動パラメータに基づき、現在から将来 100 万年間の代表時間断面の地形・地質構造モデルを構築した。構築した地形及び地層境界面モデルの一例を図 5-21 及び図 5-22 に示す。また、構築した地形・地質構造モデルの一例を図 5-23 に示す。



※図中の赤破線：図 5-22 の断面位置を示す

図 5-21 時間変遷を考慮した地形モデルの一例（平面図）

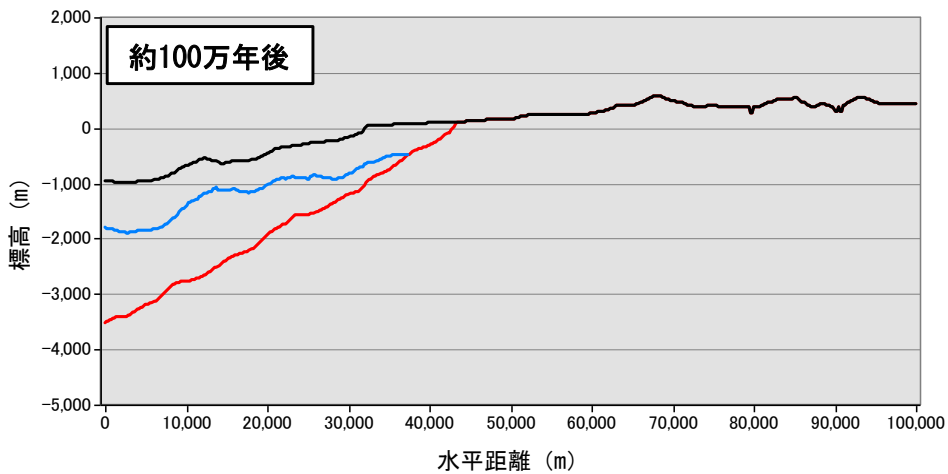
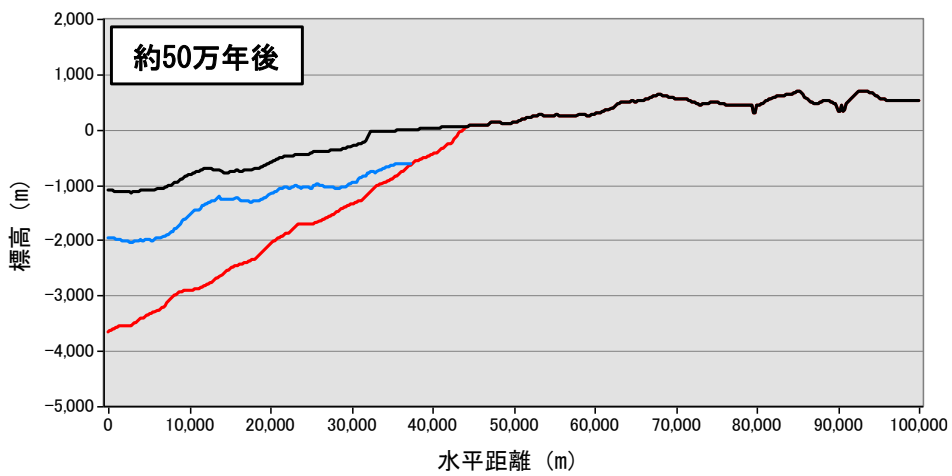
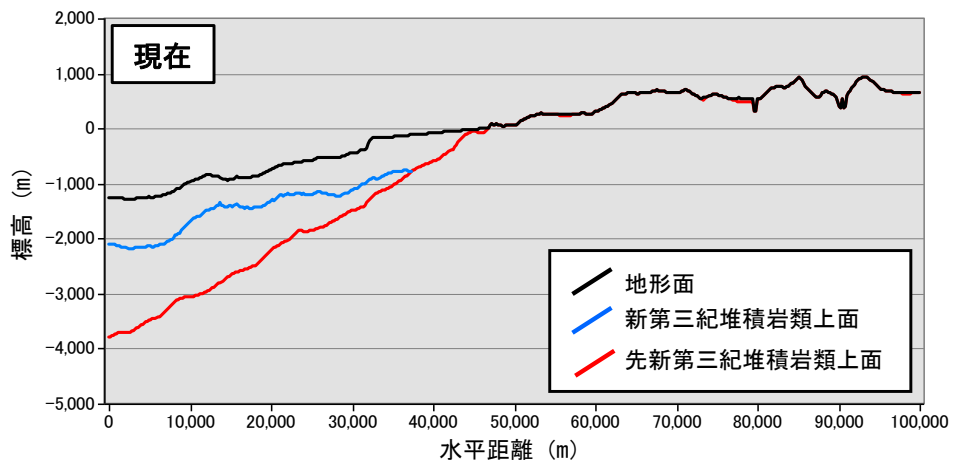


図 5-22 時間変遷を考慮した地形及び地層境界面モデルの一例
(断面図, 断面位置: 図 5-21 参照)

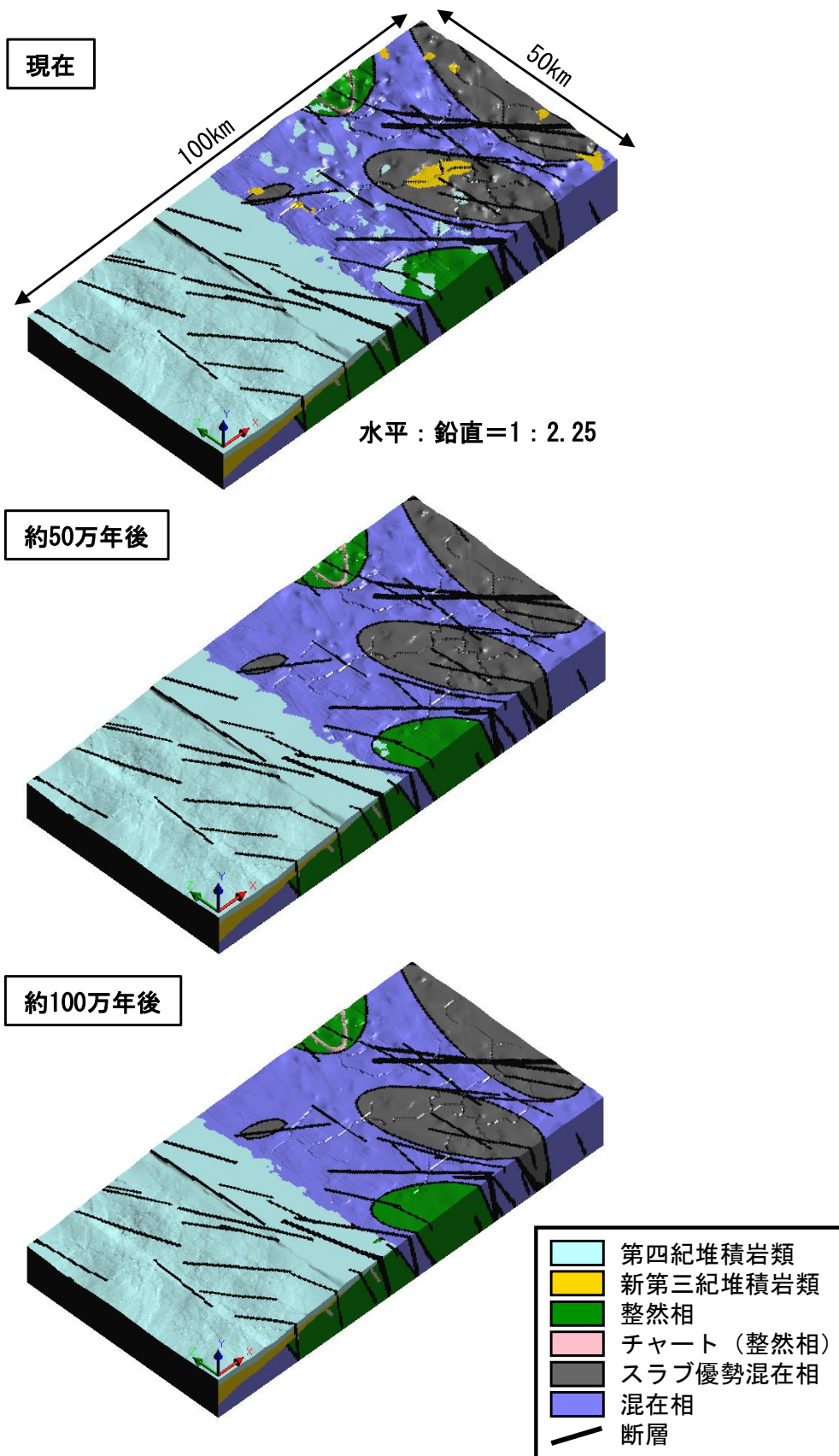


図 5-23 時間変遷を考慮した地質・地質構造モデルの一例（鳥観図）

5.5 代表時間断面を対象とした水理地質構造モデルの構築

5.4 で構築した地形及び地質・地質構造モデル及び 5.2.2(3)で設定した水理・物質移行パラメータに基づき、現在から将来 100 万年間の代表時間断面の水理地質構造モデルを構築した。構築した水理地質構造モデルの一例を図 5-24 に示す。

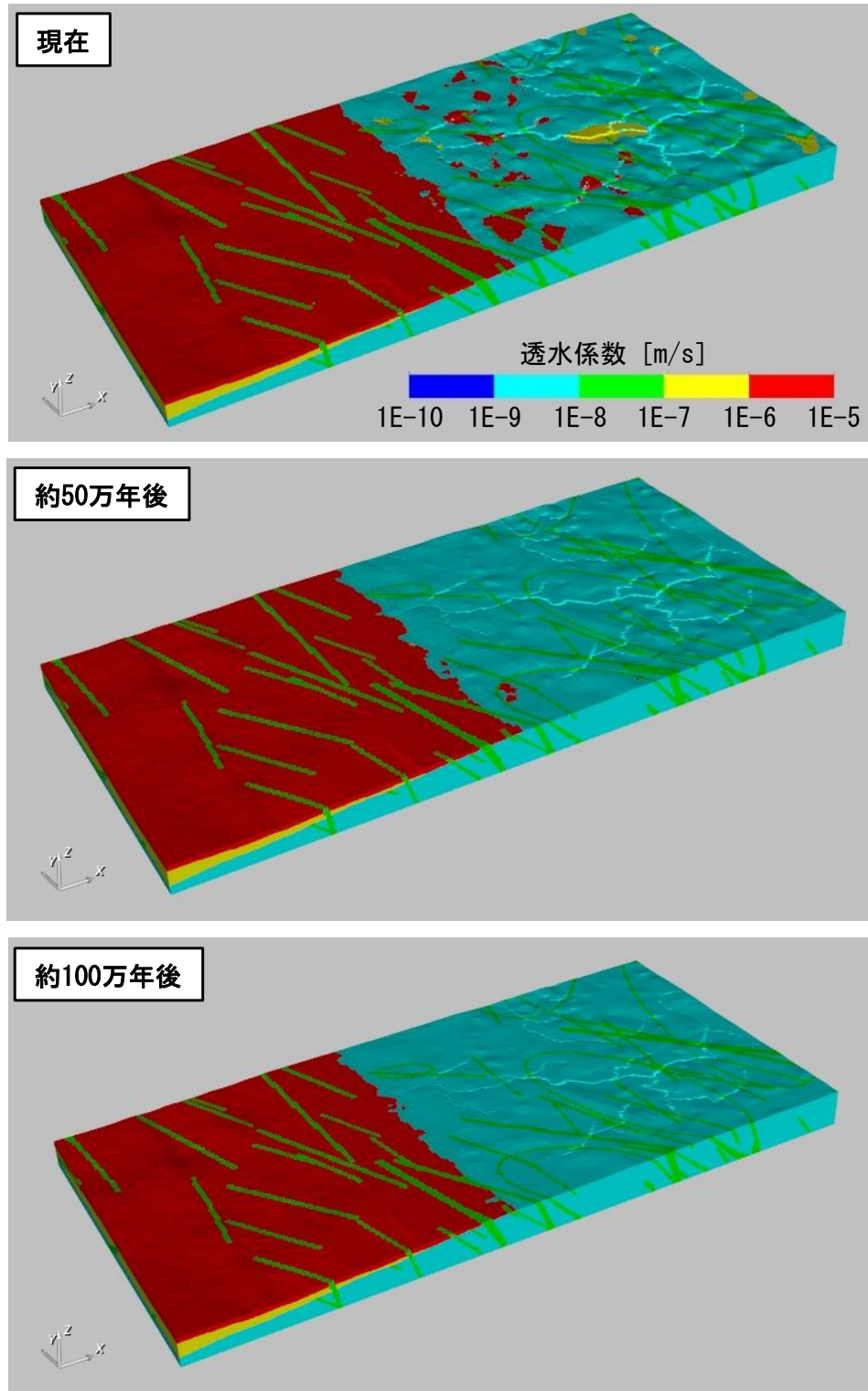


図 5-24 時間変遷を考慮した水理地質構造モデルの一例（鳥観図）

5.6 代表時間断面を対象とした地下水流動・物質移行モデルの構築

本検討では、5.5で構築した水理地質構造モデルを用いて地下水流動解析及び地下水中の塩分に着目した物質移行解析を実施し、その結果を地下水流動・物質移行モデルとして整理した。これらの解析には、Jacobs社（現 Amentum社）製の地下水流動・物質移行解析コード Connect Flow version 12.2（Jacobs, 2020a ; Jacobs, 2020b ; Jacobs, 2020c）を用いた。

5.6.1 境界条件の設定

(1) 上部境界条件

氷期と間氷期では降水量が変化し、その結果、涵養量が変化することが考えられるため、陸域は降雨涵養条件、海域は塩水の密度 $1,025 \text{ kg/m}^3$ を考慮した全水頭固定条件とした。濃度条件に関しては、陸域ではモデル内に水が流入する時には淡水が流入する条件、流出時はモデル内から流出する地下水の濃度と淡水濃度によりフラックスを規定した。

海域では、海水準変動が生じる標高-140 m までの範囲について流入時に海水流入条件、流出時は流出する地下水の濃度と海水濃度によりフラックス (F_c) を規定した (式 5-1)。

$$F_c = \begin{cases} (q \cdot n)c & q \cdot n \geq 0 \\ (c - c_0) & q \cdot n \leq 0 \end{cases} \quad \text{式 5-1}$$

ここで、 q はダルシー流速、 n は法線ベクトル、 c はモデル内の塩分濃度、 c_0 はモデル境界における塩分濃度である。

標高-140 m よりも低い領域に対しては海水濃度（相対濃度 1）の固定条件とした。

(2) 側方及び下部境界条件

側方及び下部の境界面には、下記を仮定して地下水流動に関して不透水条件、物質移行に関して濃度ゼロフラックス条件とした。

- ・山地側の側面 (X : 50,000 m) : 分水嶺
- ・陸域から海域方向 (Y : 0 m と Y : 50,000 m) の側面 : 主流動方向と平行する
- ・海域側の側面 (X : 0 m) : 海水準変動の影響が及ばない領域
- ・底部 : 地下水流速が極めて遅い領域 (Z : 標高-5,000 m)

(3) 気候・海水準変動の設定

現在から将来 100 万年までの気候・海水準変動は、5.3.1 で整理した地質環境の長期変動条件に基づき、以下のように設定した。

海水準変動については、汎世界的な海水準変動曲線（深部地質環境研究センター編，2007；日本地質学会，2012）を単純化し、一定の海水準の変動幅と周期を設定した。具体的には、現標高基準で+5 m～-140 m の変動幅とし、温暖期と寒冷期の 1 サイクルを 10 万年（海退期間：8 万年，海進期間：2 万年）の周期とした（図 5-25）。

気候変動に伴う涵養量の増減については、松末ほか（2000）を参考として、寒冷期の最大

海退時には現在の涵養量の5割に低減することとし、図 5-25 に示すように、海退期及び海進期の降雨涵養量が段階的に低下、あるいは上昇する設定にした。また、現在の涵養量については、現在の水理地質構造モデルを用いて涵養量に着目した感度解析を行い、陸域に形成される地下水位分布が妥当と判断された値として 20 mm/y を設定した。

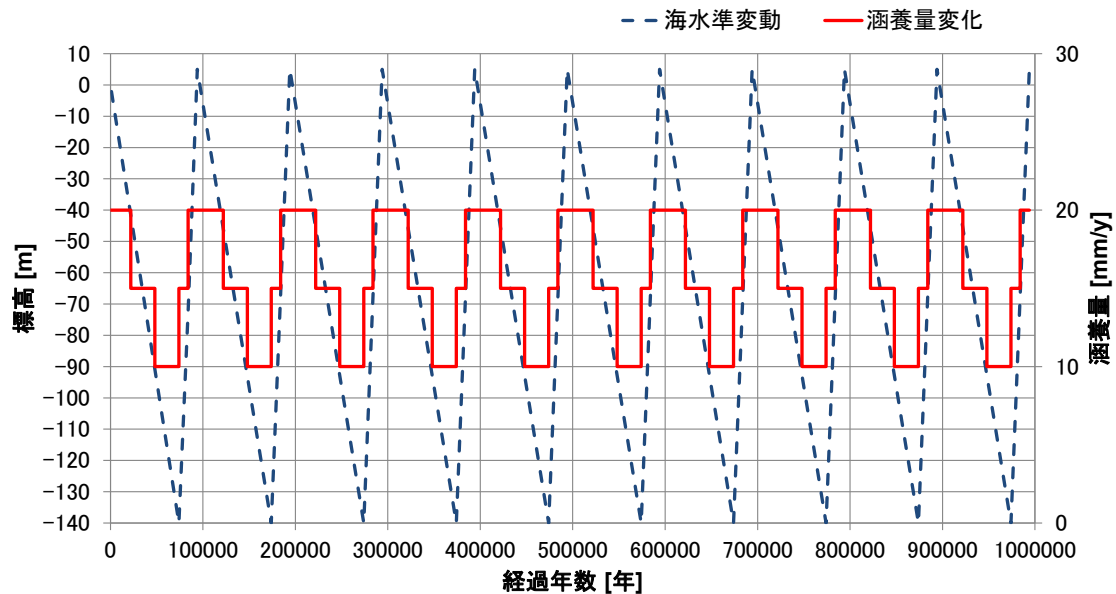


図 5-25 海水準変動及び涵養量の時間変化の設定

5.6.2 初期条件の設定

5.6.1 に示した現在の時間断面に係る境界条件に基づき、定常状態での密度流を考慮した地下水流動・物質移行解析を実施し、その解析結果である地下水の間隙水圧分布及び塩分の濃度分布を現在の時間断面における水理地質構造モデルの初期条件とした。

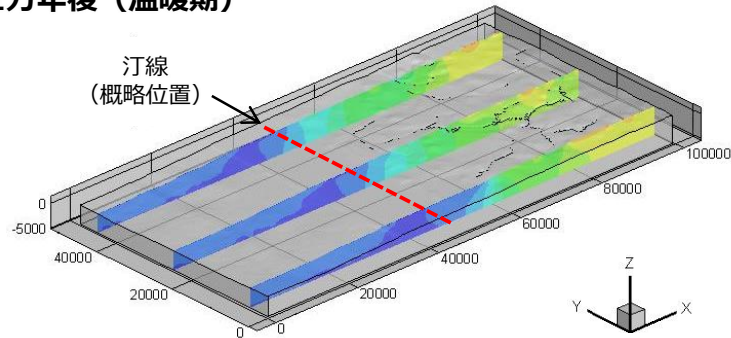
代表時間断面ごとの初期条件については、図 4-20 に示した方法を適用して、前の代表時間断面の解析結果を次の代表時間断面の初期条件として受け渡すことで、現在から将来 100 万年までの解析を実施した。

5.6.3 解析の実施

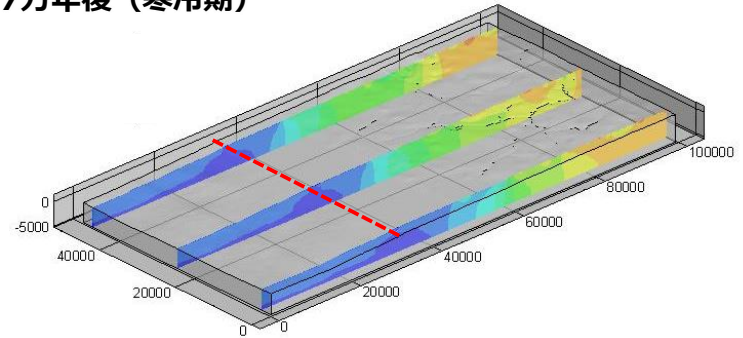
地下水流動・物質移行解析によって推定した全水頭分布及び地下水の塩分濃度分布の時間変遷の一例を図 5-26 及び図 5-27 に示す。

全水頭分布からは、海水準変動による水頭値の変化、図 5-21 及び図 5-22 に示したモデル化領域全体に考慮した隆起による水頭値の増加や、侵食によって山地部の地形がなだらかになることに起因した水頭値の減少といった時間変化が表現されていることが確認できる。また、地下水の塩分濃度については、海水準変動に伴う汀線の移動に応じた淡水・塩水混合域が形成される位置やその深度分布傾向の時間変遷が表現されている。

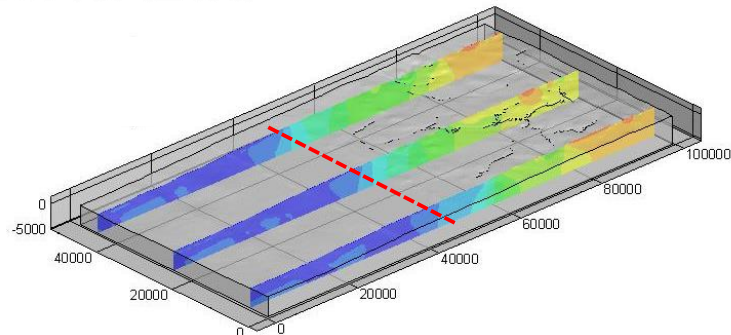
1万年後 (温暖期)



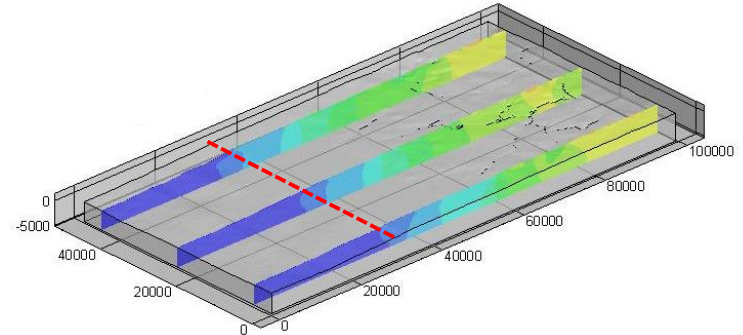
7万年後 (寒冷期)



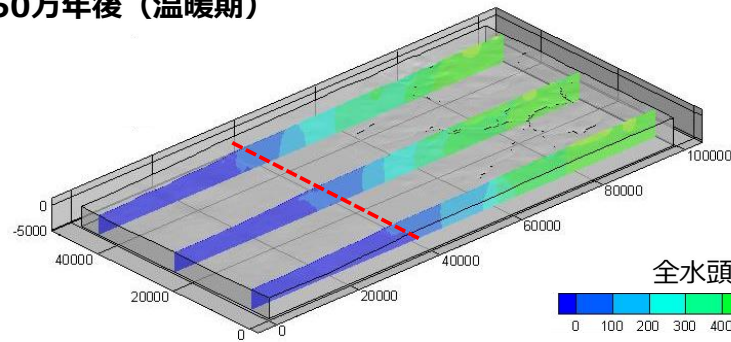
10万年後 (温暖期)



47万年後 (寒冷期)



50万年後 (温暖期)



97万年後 (寒冷期)

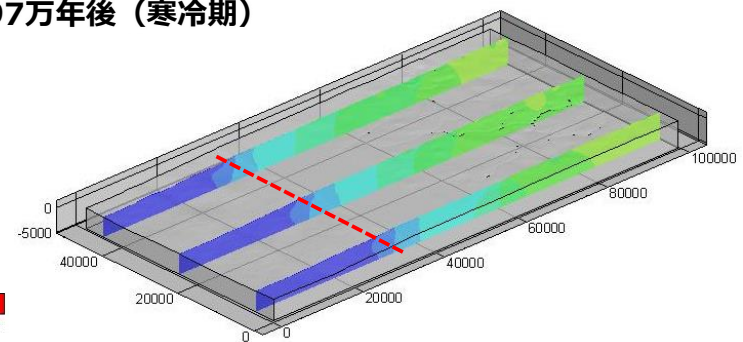
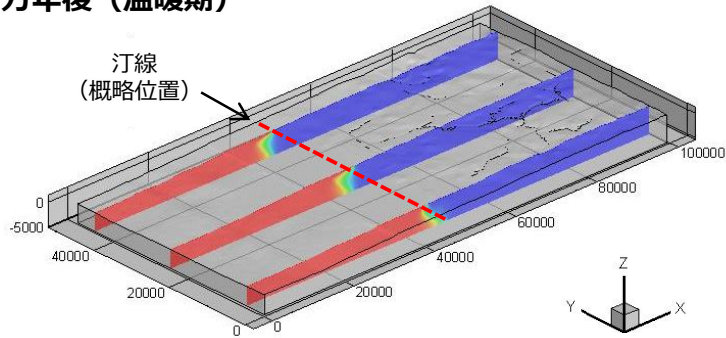
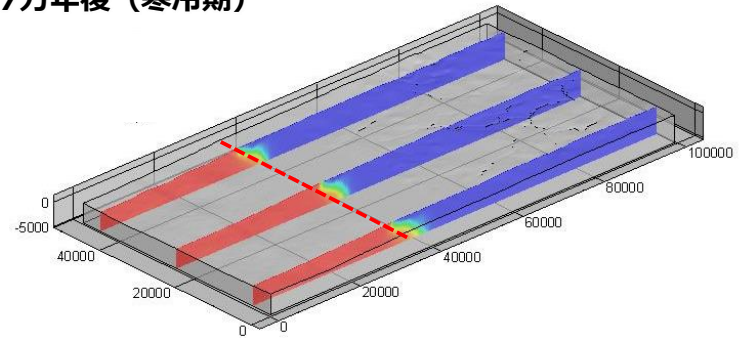


図 5-26 全水頭分布の時間変遷の推定結果

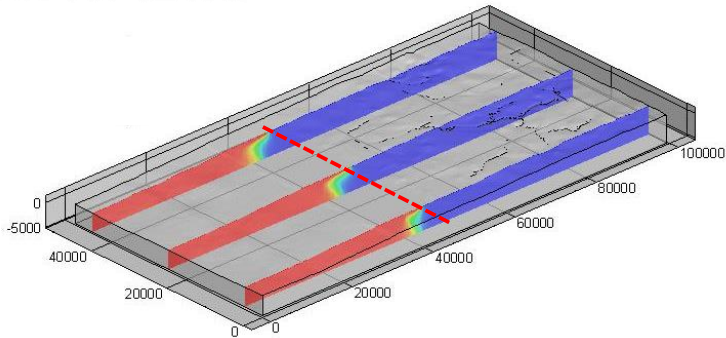
1万年後 (温暖期)



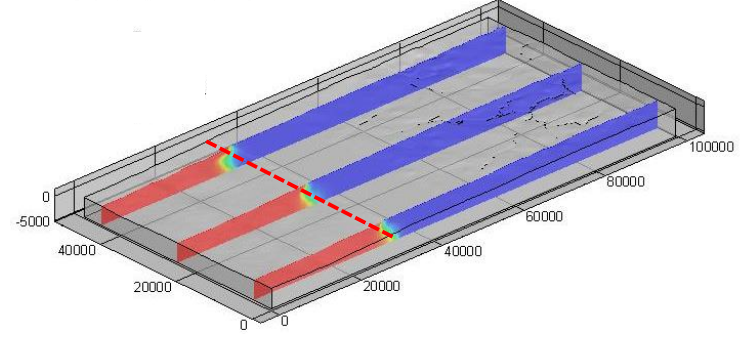
7万年後 (寒冷期)



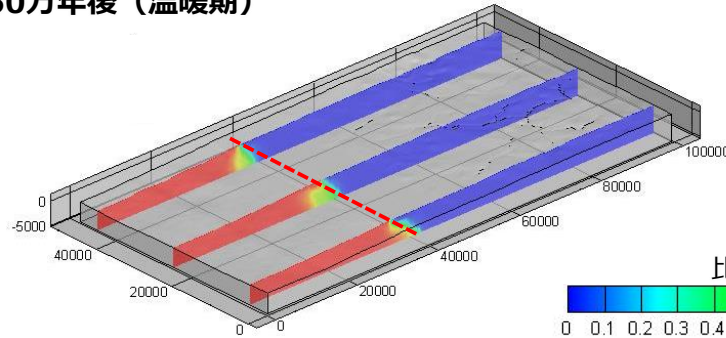
10万年後 (温暖期)



47万年後 (寒冷期)



50万年後 (温暖期)



97万年後 (寒冷期)

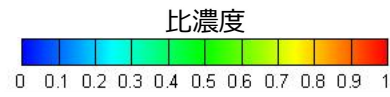
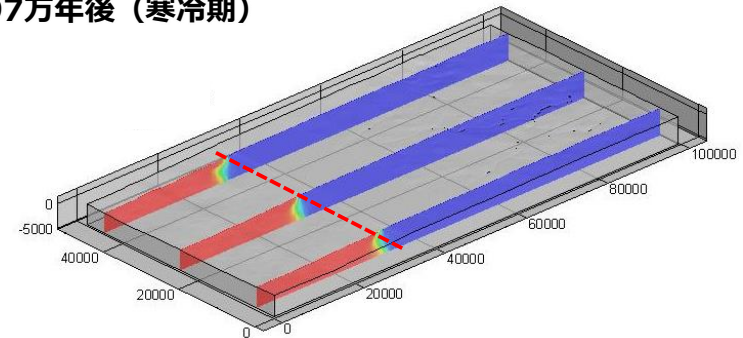


図 5-27 地下水の塩分濃度分布の時間変遷の推定結果

6. 4D-SDM の妥当性確認事例（幌延地域）

4D-SDM の構築技術の信頼性を示すため、5 章では、仮想の先進第三紀堆積岩類が分布する地域を設定し、これを対象に 4D-SDM の構築技術を適用した。一方で、4D-SDM 構築に係る作業項目のうち、4.7 に示した「不確実性を考慮した 4D-SDM の妥当性確認」は、仮想の地域を対象とした 4D-SDM 構築作業においては実施することができない。そこで、本章では、わが国において地形変化や気候・海水準変動及び地質環境特性の時間的・空間的变化に係るデータや知見が蓄積されている地域を事例（以下、「事例検討地域」という）として、過去から現在までを対象に代表時間断面を設定し、それらを対象に地形・地質構造モデル、水理地質構造モデル、地下水流動・物質移行モデルを構築するとともに、4D-SDM の妥当性確認を実施することで、これまでの検討で整備した考え方や技術の適用可能性を示すこととした。

6.1 事例検討地域の選定

4D-SDM の妥当性確認を行うための事例検討地域を選定するうえで必要な条件は、以下のよう整理することができる。

- ① 現在の地質環境モデルの構築作業に利用可能な情報やデータが整備されていること
- ② 過去から現在までの地質環境の変遷モデルの構築作業に利用可能な情報やデータが整備されていること
- ③ モデル化・解析結果との比較作業に利用可能な情報やデータが整備されていること
- ④ 情報やデータの適用条件として地質環境特性の長期的な変化の主要影響因子である海水準変動を考慮可能な沿岸域を含む地域であること

ここで、③の「モデル化・解析結果との比較」に関しては、過去から現在までの地質環境の長期変遷の考え方やそのモデルの妥当性を確認するため、過去から現在にかけての地質環境の変遷の影響が反映された情報やデータをモデル化・解析結果との比較に適用する必要がある。本検討においては、上記の情報やデータとして地下水の水質や年代などの地球化学特性情報をモデル化・解析結果との比較に用いることとした。さらに、地形変化や気候・海水準変動の影響を考慮した検討は、数十 km の空間スケールを対象として実施するため、事例検討地域では、地球化学特性情報は複数地点かつ地表付近から地下深部までの広い範囲で取得されている必要がある。

また、わが国の地層処分事業への適用を前提にすると、日本の気候条件や地質環境条件及びそれらの長期変遷を考慮した条件で、4D-SDM のモデル構築技術の適用性を確認することが望ましい。そのため、国内を対象として事例検討地域の選定を実施した。

研究機関によって長期的な調査研究が進められている地域で、上記①～③の情報やデータが十分に整備されている可能性が高いと考えられることから、JAEA、CRIEPI 及び AIST の 3 機関による国内の調査研究事例に基づき、東濃地域、幌延地域、横須賀地域及び駿河湾地域の 4 つを候補地域とした。4 つの候補地域を対象として、上記①～④の観点に基づき事例検討地域の絞り込みについて検討した（表 6-1）。その結果、幌延地域においては、沿岸部と内陸部の地表付近から地下深部にかけて本検討に適用可能な地球化学特性情報が豊富に取得されていることから、幌延地域を本検討の事例検討地域として選定した。

表 6-1 事例検討地域の選定結果

必要となる公開情報・ 公開データ		候補地域			
		東濃地域 (JAEA, 2017)	幌延地域 (JAEA, 2017)	横須賀地域 (近藤ほか, 2014)	駿河湾地域 (産業技術総 合研究所, 2016)
①現在の地質構造モデルの構築		○	○	○	○
②過去から 現在までの 地質環境の 変遷モデル の構築	地形・地質構造の 発達史や編年表	○	○	×	×
	過去の地質構造 モデル	○	○	×	×
	解析事例	○	○	×	×
③モデル化・解析結果との比較 (地下水の水質や年代)		△*1	○*2	×*3	×*4
④情報やデータの適用性条件 (沿岸域を含む地域で取得)		×	○	○	○
事例検討地域としての適用性		△	○	×	×
<p>*1 モデル化・解析結果の妥当性確認に有効な地下深部の地下水年代のデータが取得されていない。</p> <p>*2 幌延深地層研究センター周辺及び沿岸部（浜里地区）の複数地点において、地表付近から地下深部の複数深度で地下水の水質や年代のデータが取得されている。</p> <p>*3 電力中央研究所横須賀地区敷地内のみで地下水の水質や年代のデータが取得されており、モデル化・解析結果の妥当性を確認するうえでは、取得されている地球化学特性情報に空間的な広がりがない。</p> <p>*4 モデル化・解析結果の妥当性確認に必要な地下深部の地下水の水質や年代のデータが取得されていない。</p>					

6.2 幌延地域を対象に構築した 4D-SDM の概要

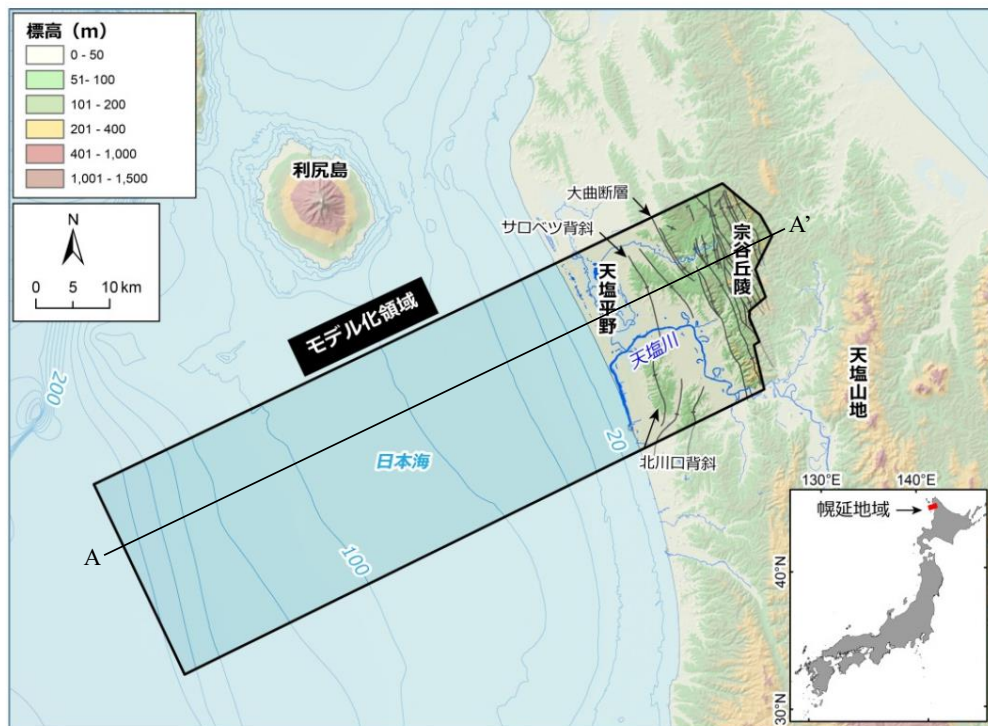
本検討では、JAEA の公開情報（酒井・松岡，2019）に基づきモデル化領域を設定し、4D-SDM を構築した（図 6-1 及び図 6-2）。

モデル化領域は、図 6-1 に示すように、幌延地域の主要河川である天塩川の流域境界である宗谷丘陵の尾根線を東側境界とし、気候変動に伴う海水準の最大低下量（現在の海水準を基準として、E.L. -150 m）を包含する位置を西側境界とする、東西方向に約 90 km、南北方向に約 30 km の範囲である。なお、深度方向は地表から標高-10 km までとした。

図 6-2 に示すように、幌延地域においては白亜紀から第四紀の堆積岩類が広く分布する。地層に関しては、幌延断層の東側には地表から最深部まで白亜系のみが分布すると簡略化した。幌延断層の西側には、下位より白亜系、増幌層～古第三系、稚内層、稚内層上部（高透水層）、声間層、勇知層及び更別層を 4D-SDM に考慮した。なお、最上位の地層である更別層については、大曲断層西側にのみ設定した。また、水理場や化学場に大きな影響を与えると考

えられる比較的規模の大きな7つの断層（幌延断層，大曲断層，サロベツ断層，北川口断層，稚咲内断層，海域断層及びデタッチメント）を考慮した。

既往研究（JAEA，2016；新里ほか，2007）によると，鮮新世の中頃から日本海東縁変動帯の一部として東西圧縮テクトニクスが活発化することにより，幌延地域に分布する大曲断層や幌延断層などが活動し，現在のような褶曲構造が発達したと考えられている。つまり，特に断層活動と，それに伴う褶曲構造の発達が，本地域の地形や地質構造の形成には大きな影響を与えていると推察される。



(JAEA (2018a) に加筆)

図 6-1 4D-SDM のモデル化領域（幌延地域）

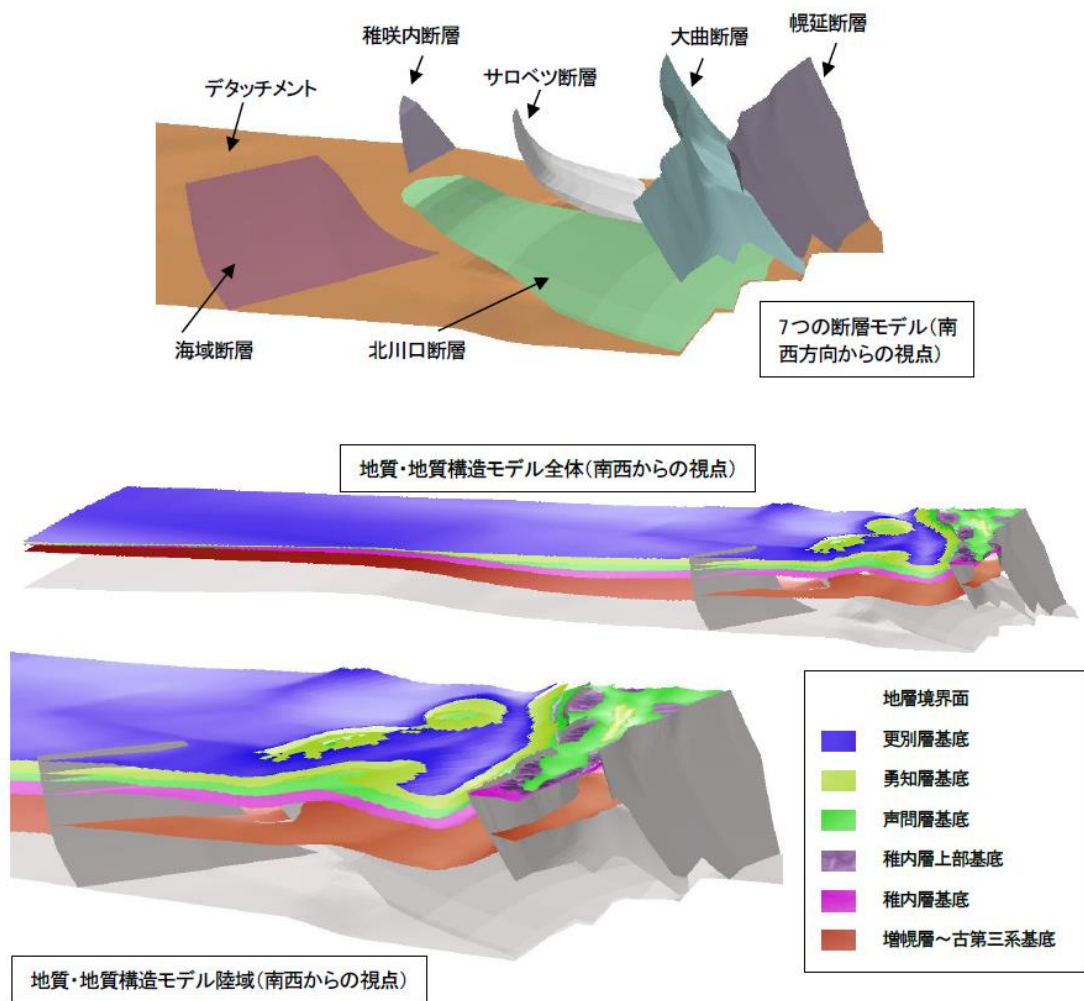


図 6-2 4D-SDM に考慮した地層及び断層（幌延地域）

6.3 評価指標の設定

本検討では、表 4-17 に示した地形変化（隆起・侵食）及び気候・海水準変動による地下水流動経路や地下水水質の緩慢かつ長期的な変化を捉えやすい評価指標として、地下水流動経路に対しては「地下水の移行時間」を、地下水水質に対しては「地下水の塩分濃度（淡水・海水の挙動）」を設定した。

6.4 不確実性要因の抽出

6.4.1 地形及び地質・地質構造モデル構築に係る不確実性要因

幌延地域を事例として、地形・地質構造モデル構築の不確実性要因に係る事象を整理した結果を表 6-2 に示す。

地形・地質構造モデル構築における不確実性要因は、地形変遷及び地質構造変遷の概念に内在すると考えられる。幌延地域において地形変遷の概念を構築する際に考慮すべき事象は、主に隆起・沈降・侵食・堆積とそれによる地形変化の速度や量である。また、地質構造変遷の概念を構築する際に考慮すべき事象は、同じく隆起・沈降・侵食・堆積とそれによる地質構

造変化の速度や量である。これらは、地形・地質構造の長期的変化、つまりは「地質環境の時間変化」に係る不確実性要因といえる。加えて、地質構造変遷の概念を構築する際に考慮すべき事象には、層序や地質構造といった「水理地質構造の空間分布」に係る不確実性要因が含まれている。

上記のような整理を通じて、モデルや解析結果に及ぼす影響が大きいと考えられる事象、かつ地形・地質構造モデルに考慮可能な事象を概念モデルに反映する。事例検討においては、「地形・地質構造変遷の概念」を不確実性要因として抽出し、地形・地質構造の長期変遷が異なる2パターンの地形・地質構造モデル (Geo_model_A, Geo_model_B) を構築し、感度解析の対象とした。

6.4.2 水理地質構造モデル構築に係る不確実性要因

幌延地域を事例として、水理地質構造モデル構築の不確実性要因に係る事象を整理した結果を表 6-3 に示す。

水理地質構造モデル構築に係る不確実性要因は、表 4-19 に示したモデルの構築作業プロセスに内在している。本事例検討においては、表 6-3 に示したとおり、モデル化領域の設定、水理地質構造区分の抽出及びモデル化手法の選定に関する不確実性は小さい、もしくは考慮することが困難と判断し、モデル化領域の離散化、水理地質構造ごとの水理特性の設定及び境界条件の設定に関する作業項目についての不確実性要因を考慮した。不確実性要因のうち、モデル化領域の離散化に関しては「数値モデルの要素分割サイズ」に着目した。また、水理地質構造ごとの水理特性の設定に関しては「地層及び断層の水理特性」、境界条件の設定に関しては上部境界条件として「地表環境 (海水準変動及び涵養量) の変遷」、初期条件として「地下水の古環境 (約 100 万年前の塩分濃度)」に着目した。2 パターンの地形・地質構造モデル (Geo_model_A, Geo_model_B) をもとに、これらの不確実性要因を考慮して複数の水理地質構造モデルを構築し、感度解析の対象とした。

表 6-2 幌延地域における地形・地質構造モデル構築の不確実性要因の整理

不確実性要因が内在する事項	不確実性要因に係る事象		モデルや解析結果に及ぼす影響		概念モデルへの反映
地形変遷の概念	地形発達	侵食・堆積過程	小	内陸部で大きな湖沼などの発達を確認されていない。モデルでは凹地が発達した場合、瞬時堆積とするため、影響は小さいと判断	×
		斜面崩壊の影響	大	一般に斜面侵食速度に支配的な因子とされるが、情報がなく概念モデルへの反映は困難（数値モデルでは谷埋め法で表現）	×
		平野部での河川流路	大	平野部の河川流路変遷の情報はないため、概念モデルへの反映は困難（数値モデルでは落水線法で表現）	×
	変動パラメータ	隆起・沈降・侵食・堆積の速度及び量	大	地質構造発達史の観点から地形変動パラメータを設定。山地の発達が地質構造モデルや地下水流動解析に及ぼす影響は大きいと判断	○
地質構造変遷の概念	層序	削剥された地層の層厚・分布	大	文献情報がないため、周囲の地層の層厚から推定。地質構造モデルや地下水流動解析への影響は大きいと判断	○
		声問層/稚内層境界	大	Opal-A/CT 相転移温度、地温勾配の設定に不確実性があり、その結果、隆起/浸食量の設定、地質構造モデル及び地下水流動解析への影響は大きいと判断	○
		最上位の更別層の分布	小	現世の堆積物を含めて更別層と設定しているが、水理特性は同じと考えられ、地下水流動解析への影響は小さいと判断	×
		幌延断層の東側の層序	小	JAEA (2016) においては、幌延断層以東の地質構造は複雑であるうえ、その分布に関する情報が十分に得られていないことから、地下の主要な岩体と考えられる白亜系が地表から深部まで分布するものとして簡略化されている。上記を参考に、本検討においても同様に設定	×
	地質構造	稚内層上部（高透水層）の分布	大	声問層/稚内層境界の不確実性に関連。透水性が稚内層下部よりも高く地下水流動解析への影響は大きいと判断	○
		海域の地質構造	小	反射法断面より推定。不確実性の評価は困難	×
		海域堆積盆の発達過程	大	現在の地質構造から発達史を推定。1.5 Ma で地層面がフラットと仮定し、沈降速度を設定。地質構造モデルに与える影響は大きいと判断	○
		断層の分布と影響範囲	小	7つの主要断層以外の小規模な断層は、地下水流動解析に及ぼす影響が小さいと判断	×
	変動パラメータ	隆起・沈降・侵食・堆積の速度及び量	大	褶曲発達開始時期を仮定し、声問層/稚内層境界深度と海成段丘面の標高から隆起量や侵食量を推定。前提条件としての褶曲開始時期と声問層/稚内層境界深度の不確実性は大きいと判断	○

表 6-3 幌延地域における水理地質構造モデル構築の不確実性要因の整理

不確実性要因が 内在する事項	不確実性要因に係る 作業項目	モデルや解析結果に及ぼす影響		感度 解析 対象
水理地質構造 モデルの構築 作業プロセス	モデル化領域の設定	小	海水準変動や地形・地質構造の変遷により、領域内で生じる分水界の変化などの評価対象領域を通過する地下水流動系に及ぼす影響を表現可能な領域を設定。そのため、本検討ではモデル化領域の設定に関する不確実性は小さいと判断	×
	水理地質構造区分の 抽出	大	モデル化領域における水理地質構造区分設定に関する不確実性はあるものの、地形・地質構造モデルで地質層序が考慮されていること、それ以外の水理地質構造モデルを構築するための情報が乏しいことから、水理地質構造区分が異なる水理地質構造モデルを構築することは困難と判断	×
	モデル化手法の選定	大	本検討では広域スケールを対象としていることから、水理地質構造区分で抽出した各水理地質構造は各構造単元の水理・物質移行特性が均質であると仮定し、均質多孔質媒体として単純化した連続体でモデル化することが適切と判断	×
	モデル化領域の 離散化	大	モデルの要素分割サイズによっては、地形の起伏や水理地質構造分布の再現性が不十分で、モデル化領域の地下水流動・物質移行特性を適切に評価できない可能性がある。そのため本検討では上記以外のケースとして、地形の起伏が発達し、褶曲構造や断層構造が分布する陸域から沿岸域の平面領域をより細かな分解能とした水理地質構造モデルを構築し、感度解析を実施	○
	水理地質構造ごとの 水理特性の設定	大	水理地質構造の物性値に関するデータや根拠情報が不足することで、モデル化領域内の地下水流動・物質移行特性を適切に評価できない可能性がある。そのため本検討では、幌延深地層研究センター周辺に分布する地層の水理特性値の不確実性に着目した感度解析を実施	○
	境界条件の 設定	上部境 界条件	大	海水準変動や気温・降水量などの地表環境の長期的な変遷に関する情報が不足することで適切な境界条件を設定できない、あるいは過去の地下水環境を類推するための情報が不足することで地下水の圧力や塩分濃度の初期条件（地下水の古環境）を適切に設定できない可能性がある
初期 条件		そのため本検討では、境界条件としては海水準変動及び涵養量の時間変化を、初期条件としては地化学的観点から約 100 万年前における地下水の塩分濃度分布の不確実性に着目した感度解析を実施		○

6.5 感度解析の実施

6.5.1 感度解析ケースの設定

幌延地域を対象として、6.4で抽出・整理した不確実性要因に基づき設定した感度解析ケースを表 6-4 に示す。

各解析ケースの条件設定の概要について、以下に取りまとめる。

(1) 地形・地質構造変遷の概念

「シナリオの不確実性」である地形・地質構造変遷の概念については、幌延地域の地形及び地質・地質構造の変動パラメータに着目した。変動パラメータ（隆起・沈降・侵食・堆積の速度及び量）の設定に大きく関わる地形・地質構造の隆起量あるいは沈降量といった変動の大きさと、その開始時期に関する事象として、大曲断層周辺の褶曲構造の発達開始時期及び声問層／稚内層境界（オパール A/CT 境界）の最大埋没深度の2つが挙げられる。大曲断層周辺の褶曲構造の発達開始時期は、幌延地域における地質構造形成の主たる要因、かつ隆起・沈降速度を定量的に見積る根拠となる事象であり、その時期は 2.2 Ma～1.0 Ma の間とされ、かなりの幅が存在する。発達開始時期をどの程度に推定するかで隆起・沈降速度の推定に大きな影響を与える。また、声問層／稚内層境界の最大埋没深度は、地質体の隆起量と削剥量を定量的に見積る根拠となる事象であり、オパール A/CT 相転移を生ずる物理条件の過程により、オパール A/CT 境界の最大埋没深度が算出される。その深度と現在の声問層／稚内層境界の差から、現在の地質体の隆起量と削剥量が推定されることから、隆起・沈降速度の推定に大きな影響を与える。

本検討では、上記を考慮して地形・地質構造の長期変遷が異なる 2 種類の概念モデル及び地形・地質構造モデルを構築した。構築した概念モデルを図 6-3 に示す。Geo_model_A においては、大曲断層周辺の褶曲構造の発達開始時期を 1.5 Ma と仮定し、大曲断層上盤側と下盤側の隆起速度をそれぞれ 0.8 m/ky と 0.3 m/ky と推定した。Geo_model_B においては、大曲断層周辺の褶曲構造の発達開始時期を 1.0 Ma と仮定し、大曲断層上盤側と下盤側の隆起速度をそれぞれ 1.3 m/ky と 0.7 m/ky と推定しており、Geo_model_A と比較して地形や地質構造の変化が速い条件を設定した。

(2) 要素分割サイズ

「モデルの不確実性」である要素分割サイズについては、地形の起伏や水理地質構造分布の解像度に着目し、平面方向に高解像度（200～300 m 間隔）及び低解像度（500 m 間隔）の 2 パターンでモデル化領域を離散化した。なお、深度方向については、地表付近は詳細に分割し、深度とともに分割サイズが大きくなる設定とし、両パターンともに同様とした。

(3) 地質構造の水理特性

「データの不確実性」である地質構造の水理特性に関する不確実性の要因として、水理地質構造の物性値に関するデータや根拠情報が不足することで、モデル化領域内の地下水流動、物質移行特性を適切に評価できていない可能性があるということが挙げられる。本検討では、

幌延深地層研究センター周辺に分布する更別層、勇知層及び声間層の透水係数の不確実性に着目し、JAEA (2016) 及び JAEA (2018b) を参考に、設定値がとり得るばらつきとして地層、断層ともにそれぞれ 2 つのパラメータセットを設定した (表 6-5)。

(4) 地表環境の変遷

「データの不確実性」である地表環境の変遷のうち涵養量については、その変動幅の違いに着目し、温暖期、寒冷期で規則的に一定の幅で変動する場合 (規則変動) と、時期によって温暖期、寒冷期の変動幅が異なる場合 (不規則変動) の 2 つの変動パターンを設定した (図 6-4)。規則変動パターンは、JAEA (2016) をもとに、温暖期及び寒冷期それぞれで同様の値を境界条件として設定した。不規則変動パターンは、JAEA (2017) で幌延地域における地表環境の変遷を考慮しつつ水収支法で涵養量を推定した結果に基づき設定した。

海水準については、そのサイクルと変動幅に着目して、汎世界的な海水準変動曲線 (深部地質環境研究センター編, 2007 ; 日本地質学会, 2012) を単純化し、一定の海水準の変動幅と周期を設定した場合 (規則変動)、海水準変動曲線の時期的な変動幅や周期の違いを反映した場合 (不規則変動)、海水準変動曲線の時期的な変動幅や周期の違いを考慮しつつ海水準の変動幅が最大となるように設定した場合 (不規則変動 (変動幅 : 最大)) の 3 つの変動パターンを設定した (図 6-5)。具体的には、規則変動パターンは現標高基準で +5 m ~ -140 m の変動幅とし、温暖期と寒冷期の 1 サイクルを 10 万年 (海退期間 : 8 万年, 海進期間 : 2 万年) の周期とした。2 つの不規則変動パターンは Spratt, R.M. and Liescke, L.E. (2016) 及び Lisiecki, L.E. and Raymo, M.E. (2005) に基づき、時期的な変動幅と周期を設定した。

Geo_model_A は、規則変動パターンの海水準変動に基づき代表時間断面を設定して構築したため、Geo_model_A を適用した解析ケースには規則変動パターンを設定した。Geo_model_B は、不規則変動パターンの海水準変動に基づき代表時間を設定して構築したため、Geo_model_B を適用した解析ケースに、変動幅が異なる 2 種類の不規則変動パターンを設定した。

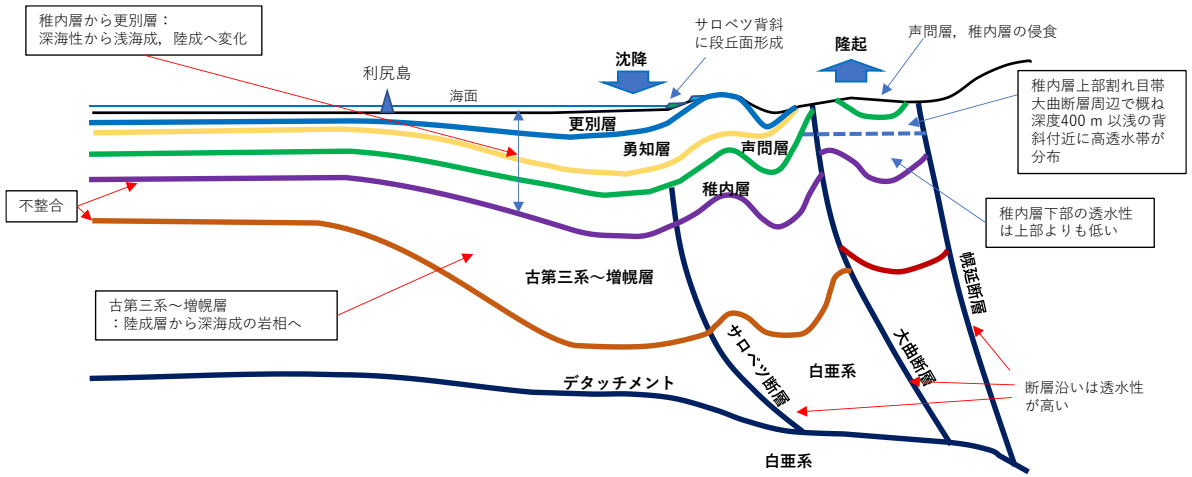
(5) 地下水の古環境

「データの不確実性」である地下水の古環境については、約 100 万年前の塩分濃度分布に着目し、二種類の分布パターンを設定した。一つはすべての地層内に海水相当の塩分濃度の地下水が分布する条件とした。別のパターンは既往研究 (岩月ほか, 2009 ; 柴田・棚井, 1982 ; 石井・安江, 2005 ; 石井ほか, 2008 ; 辻・横井, 1994 ; 甲斐・前川, 2009) を参考に、オパール A からオパール CT, 石英までの脱水反応に伴う希釈が地下水の塩分濃度分布に影響を及ぼしていると解釈し、オパール A/CT 境界より深部に分布し脱水層と考えられる珪藻起源の稚内層及び増幌層と、それに加えて脱水により上昇した水が最も混合したと考えられる声間層の 3 層の分布領域における地下水の塩分濃度を海水の 1/2 と設定した。

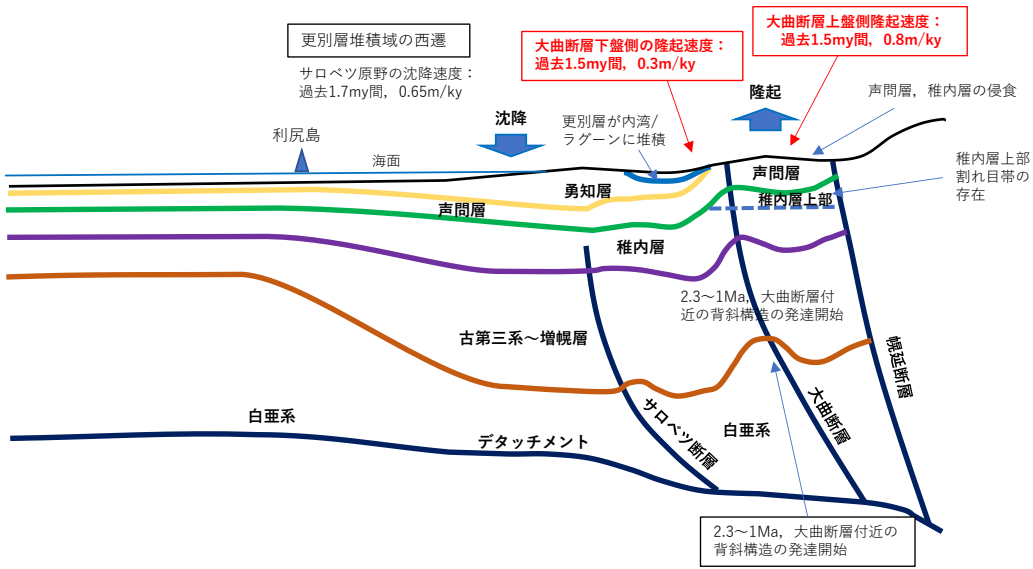
表 6-4 幌延地域における不確実性要因を考慮した感度解析ケース

不確実性の分類		シナリオ	モデル	データ				
解析 ケース	不確実性要因	地形・地質構造 変遷の概念*1	要素分割 サイズ*2 (平面方向)	地質構造の水理特性*3		地表環境の変遷*4		地下水の古環境*5
				地層の 透水性	断層の 透水性	涵養量の変動	海水準変動	約 100 万年前の 塩分濃度
A-1	(基本ケース)	Geo_model_A	高解像度	低透水性	低透水性	規則変動	規則変動	海水が分布
A-2*6	数値モデルの 要素分割サイズ	Geo_model_A	低解像度	低透水性	低透水性	規則変動	規則変動	海水が分布
A-3	地層の水理特性	Geo_model_A	高解像度	高透水性	低透水性	規則変動	規則変動	海水が分布
A-4	断層の水理特性	Geo_model_A	高解像度	低透水性	高透水性	規則変動	規則変動	海水が分布
A-5	涵養量の変遷	Geo_model_A	高解像度	低透水性	低透水性	不規則変動	規則変動	海水が分布
A-6*7	地下水の古環境 (塩分濃度)	Geo_model_A	高解像度	低透水性	低透水性	規則変動	規則変動	一部の地層内に海 水の 1/2 の濃度の 地下水が分布
B-1	地形・地質構造 変遷の概念	Geo_model_B	高解像度	低透水性	低透水性	規則変動	不規則変動	海水が分布
B-2	海水準変動の 変遷	Geo_model_B	高解像度	低透水性	低透水性	規則変動	不規則変動 (変動幅：最大)	海水が分布

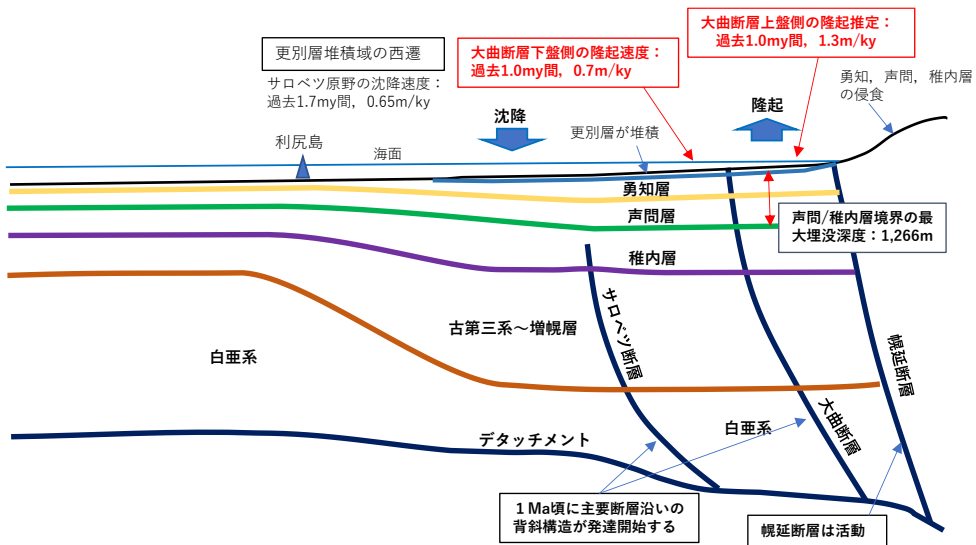
*1 地形・地質構造変遷の概念：幌延地域における地形変動の開始時期が異なる 2 つのモデルを設定
 *2 要素分割サイズ：平面方向に高解像度（200～300 m 間隔）及び低解像度（500 m 間隔）の 2 通りの設定でモデル化領域を離散化
 *3 地質構造の水理特性：JAEA（2016）及び JAEA（2018b）を参考に、設定値がとり得るばらつきとして地層、断層ともにそれぞれ 2 つのパラメータセットを設定
 *4 地表環境の変遷：JAEA（2017）を参考にして海水準変動曲線の時期的な変動幅や周期を考慮し、設定値がとり得るばらつきとして涵養量、海水準変動ともに、それぞれ単純化の度合いが異なるパターンを設定
 *5 地下水の古環境：既往研究（岩月ほか，2009；柴田・棚井，1982；石井・安江，2005；石井ほか，2008；辻・横井，1994；甲斐・前川，2009）を参考に、約 100 万年前の地下水の塩分濃度分布として、すべての地層内に海水相当の地下水が分布する場合と、声問層、稚内層及び増幌層の 3 層の分布領域に海水の 1/2 程度の地下水が分布する場合を設定
 *6 定常解析のみを実施
 *7 非定常解析のみを実施



(a) 現在



(b) 約100万年前 (Geo_model_A)



(c) 約100万年前 (Geo_model_B)

図 6-3 感度解析に考慮した地形・地質構造の概念モデル

表 6-5 感度解析に考慮した地質構造のパラメータセット

不確実性要因		パラメータセット	
地質構造の 水理特性	地層の透水性	低透水性 ケース	表 6-6の更新モデルにおける各地層の透水係数 (JAEA, 2018b)
		高透水性 ケース	表 6-6の基本モデルにおける各地層の透水係数 (JAEA, 2018b)
	断層の透水性	低透水性 ケース	2.7E-10 m/s (JAEA, 2016)
		高透水性 ケース	1.0E-7 m/s (JAEA, 2016)

表 6-6 既往研究における解析モデルの物性値の設定 (JAEA, 2018b)

解析 モデル	水理地質構造区分	透水係数 [m s ⁻¹]		比貯留係数 [1 m ⁻¹]	間隙率	縦分散長 [m]	横分散長 [m]	有効 拡散係数 [m ² s ⁻¹]	遅延 係数	減衰 定数
		水平方向 (断層面方向)	鉛直方向 (断層面直交方向)							
基本 モデル	更別層	1.0E-06	1.0E-06	1.0E-05	0.45	100	20	1.78E-10	1.0	0.0
	勇知層	9.4E-10	9.4E-10	1.0E-05	0.45			1.78E-10		
	声問層	6.5E-09	6.5E-09	1.0E-05	0.50			1.98E-10		
	稚内層浅部	1.6E-08	1.6E-08	1.0E-05	0.40			1.58E-10		
	稚内層深部	5.9E-10	5.9E-10	1.0E-05	0.40			1.58E-10		
	増幌層～古第三系	5.0E-11	5.0E-11	1.0E-05	0.10			3.95E-11		
	白亜系	5.0E-12	5.0E-12	1.0E-05	0.10			3.95E-11		
	断層	1.5E-09	1.4E-09	1.0E-05	0.30			1.19E-10		
更新モデル	更別層	3.3E-08	3.3E-08	1.0E-05	0.45	100	20	1.78E-10	1.0	0.0
	勇知層	9.4E-11	9.4E-11	1.0E-05	0.45			1.78E-10		
	声問層	2.2E-09	2.2E-09	1.0E-05	0.50			1.98E-10		
	稚内層浅部	1.6E-08	1.6E-08	1.0E-05	0.40			1.58E-10		
	稚内層深部	5.9E-10	5.9E-10	1.0E-05	0.40			1.58E-10		
	増幌層～古第三系	5.0E-11	5.0E-11	1.0E-05	0.10			3.95E-11		
	白亜系	5.0E-12	5.0E-12	1.0E-05	0.10			3.95E-11		
	断層	1.5E-09	1.4E-09	1.0E-05	0.30			1.19E-10		

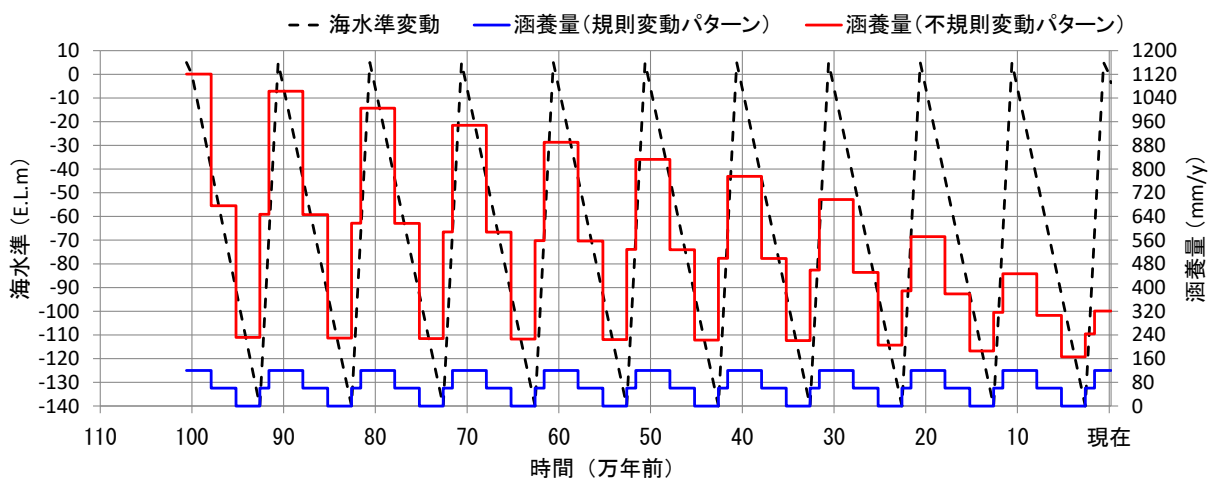


図 6-4 感度解析に考慮した涵養量の変動パターン

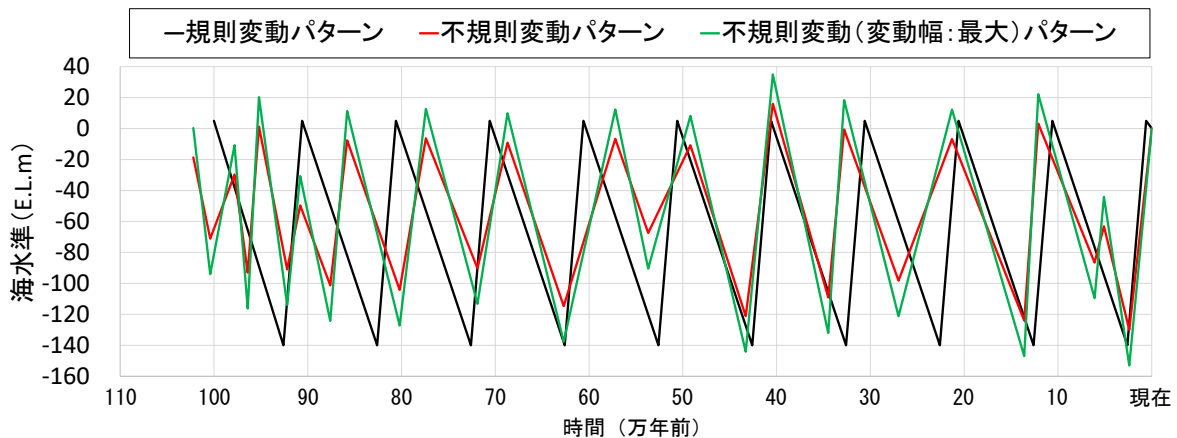


図 6-5 感度解析に考慮した海水準の変動パターン

6.5.2 時間スケールの設定

幌延地域の地形・地質構造は、約 230 万年前以降のアムール/オホーツク海プレート相互作用により当該地域が東西圧縮応力場に転じた後、特に約 230～100 万年前の間に、大曲断層付近の背斜構造の発達を開始されつつ、現在に至ったと考えられている（大竹ほか，2002；石井ほか，2008；Niizato et al., 2010）。特に、約 100 万年前は宗谷丘陵が陸化したステージ、約 33 万年前以降は宗谷丘陵西側が陸化し、サロベツ背斜、川口背斜に海成段丘面が形成されたステージと位置づけられ、さらに、約 13 万年前以降はサロベツ原野の沈降・堆積とサロベツ背斜の隆起が進行する、現在と概ね同様な地形・地質構造が形成されているステージと位置づけられる。

上記を踏まえて、100 万年スケール、30 万年スケール及び 10 万年スケールを感度解析で着目すべき時間スケールとして設定した。

6.5.3 空間スケールの設定

本検討においては、空間スケールの設定方法の違いが不確実性評価に及ぼす影響を確認するために、表 6-7 に示す 3 つの空間スケールを設定した。

「モデル化スケール」は 4D-SDM のモデル化領域全体であり、「地下水流動系スケール」は、解析結果との比較に用いる地下水の水質や地下水年代のデータが取得されている領域に着目したものであり、具体的には幌延深地層研究センター周辺及び沿岸部(浜里地区;CRIEPI, 2013)における深度-1km までを通過する地下水の涵養域から流出域までの地下水流動系を概ね包含する空間スケールである。「BH スケール」は、地下水の水質のデータが取得されている幌延深地層研究センター付近のボーリング孔近傍に着目した空間スケールである。

表 6-7 不確実性評価のための空間スケールの設定

空間スケール	概要
モデル化スケール	<ul style="list-style-type: none"> 幌延地域を対象とした 4D-SDM のモデル化領域 (水平方向：約 30 km×約 90 km；図 6-6, 深度方向：地表～標高-10 km)
地下水流動系スケール	<ul style="list-style-type: none"> 幌延深地層研究センターが位置する研究所設置地区周辺及び沿岸部（浜里地区；図 6-6）における深度-1km までを通過する地下水の涵養域から流出域までの地下水流動系を概ね包含する領域 (水平方向：20 km×30 km；図 6-6, 深度方向：地表～標高-2 km) 領域内に粒子追跡線解析を行うための粒子指定点を配置（図 6-6）
BHスケール	<ul style="list-style-type: none"> 幌延深地層研究センター付近に位置するボーリング孔近傍領域（ボーリング孔沿いの数百 m；図 6-7）

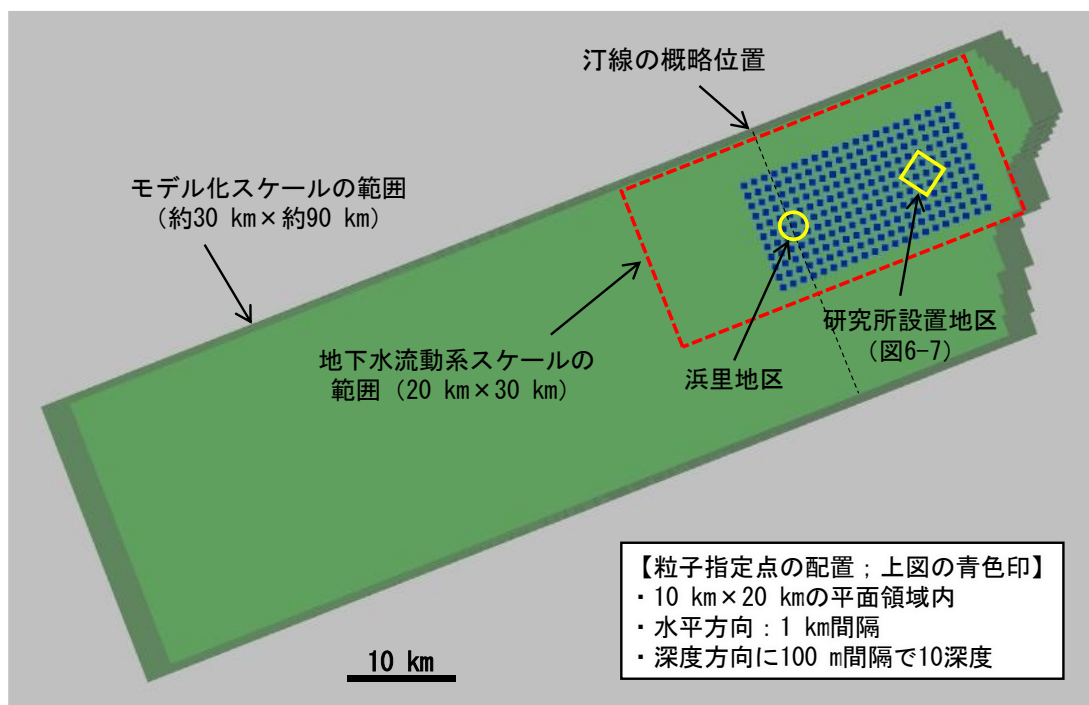


図 6-6 不確実性評価のための空間スケールの配置

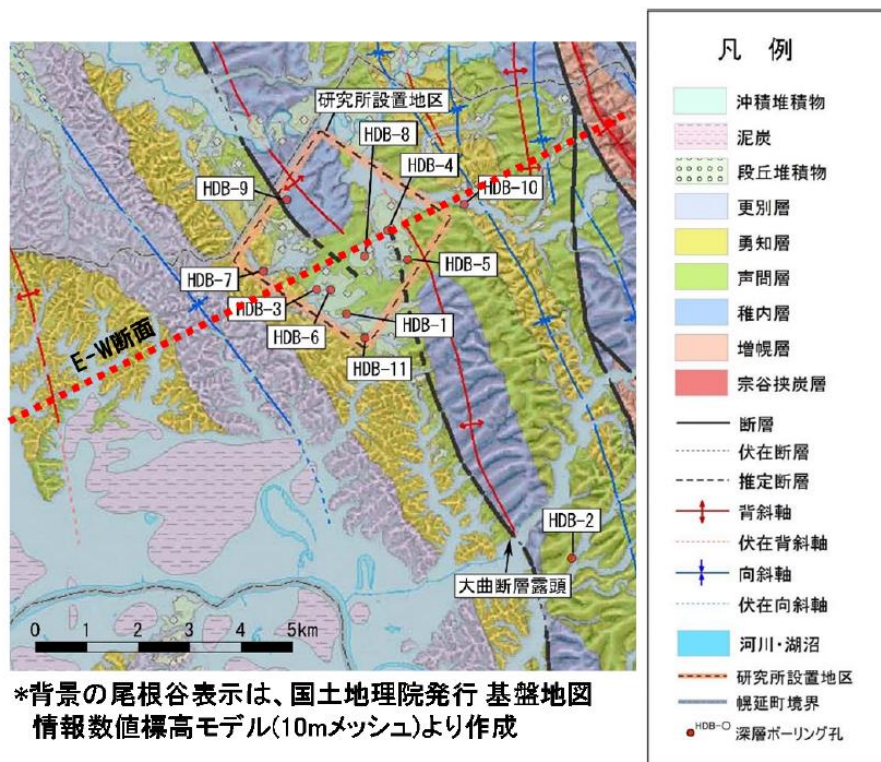


図 6-7 幌延深地層研究センター付近のボーリング孔配置 (JAEA, 2016)

6.5.4 感度解析結果

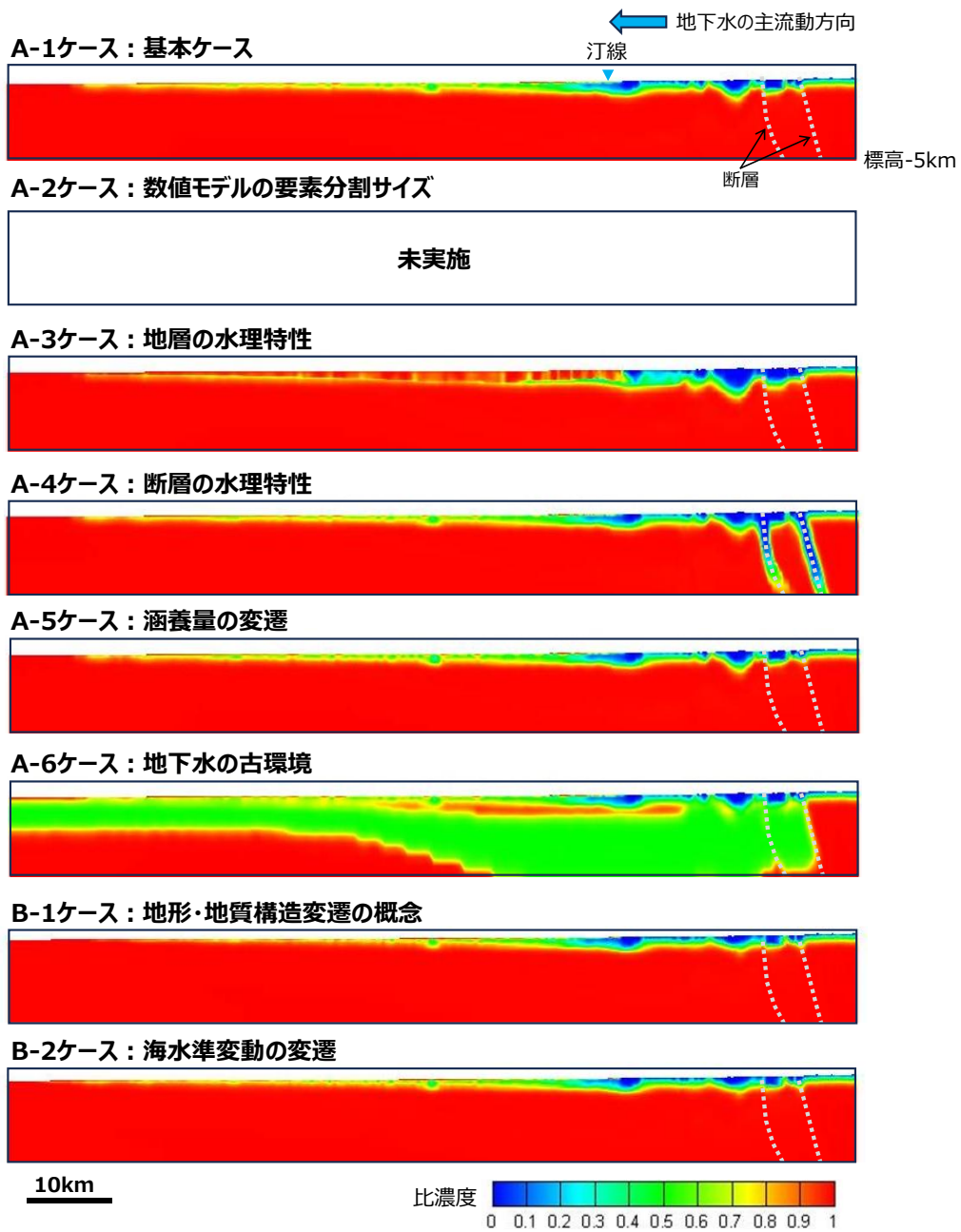
本検討では、6.3 で評価指標として設定した「地下水の移行時間」及び「地下水の塩分濃度（淡水・海水の挙動）」を評価するために、飽和・不飽和状態の三次元地下水流動・物質移行解析及び粒子追跡解析を実施した。解析手法が不確実性評価に与える影響を確認することを目的として、約 100 万年前から現在までの地形や気候・海水準の連続的な変化を考慮した非定常解析と、幌延地域の地形・地質発達史における特徴的な時期を踏まえて設定した代表時間断面での定常解析を実施した。非定常解析では幌延地域における過去 100 万年間の地形・地質発達史や海水準変動を考慮して、地形や地質構造の三次元的な分布及び涵養量や汀線の位置といった上部境界条件が異なる 20 の時間断面程度の解析モデルを構築した。約 100 万年前の解析モデルに塩水（比濃度 1）を満たした初期条件で次の時間断面まで実施し、その解析結果を次の時間断面のモデルの初期条件として受け渡すことを繰り返し行うことで、100 万年間の地形・地質構造の長期変遷や気候・海水準変動を連続的に考慮した。定常解析では、非定常解析を行うために構築した解析モデルのうち、幌延地域における代表的な丘陵が陸化した時期などを踏まえて約 100 万年前と約 30 万年前を特徴的な時間断面として抽出し、それらに現在の時間断面を加えた 3 つの代表時間断面を解析対象として設定した。なお、表 6-4 に示したとおり、数値モデルの要素分割サイズに着目した A-2 ケースは定常解析のみを行い、その結果を用いて不確実性を評価することとし、地下水の古環境に着目した A-6 ケースは非定常解析のみを行い、その結果を用いて不確実性を評価することとした。

感度解析結果の一例として、物質移行解析で推定した現在断面における地下水の塩分濃度

分布を図 6-8 及び図 6-9 に示す。解析手法の違いに着目すると、非定常解析結果と定常解析結果で塩分濃度の分布傾向が大きく異なっており、特に、定常解析においては非定常解析では見られない陸域（汀線位置の右側領域）の地下深部まで塩水の洗い流しが生じている。一方、不確実性要因の影響に着目すると、両解析手法の結果には類似の傾向が認められた。例えば、A-1 ケースと A-3 ケース、及び A-1 ケースと A-4 ケースの比較からは、他のケースよりも地層や断層の水理特性が解析結果に顕著な影響を与えることが確認された。また、非定常解析のみで実施した地下水の古環境による影響が広範囲に及んでいることがわかる（A-1 ケースと A-6 ケースの比較）。

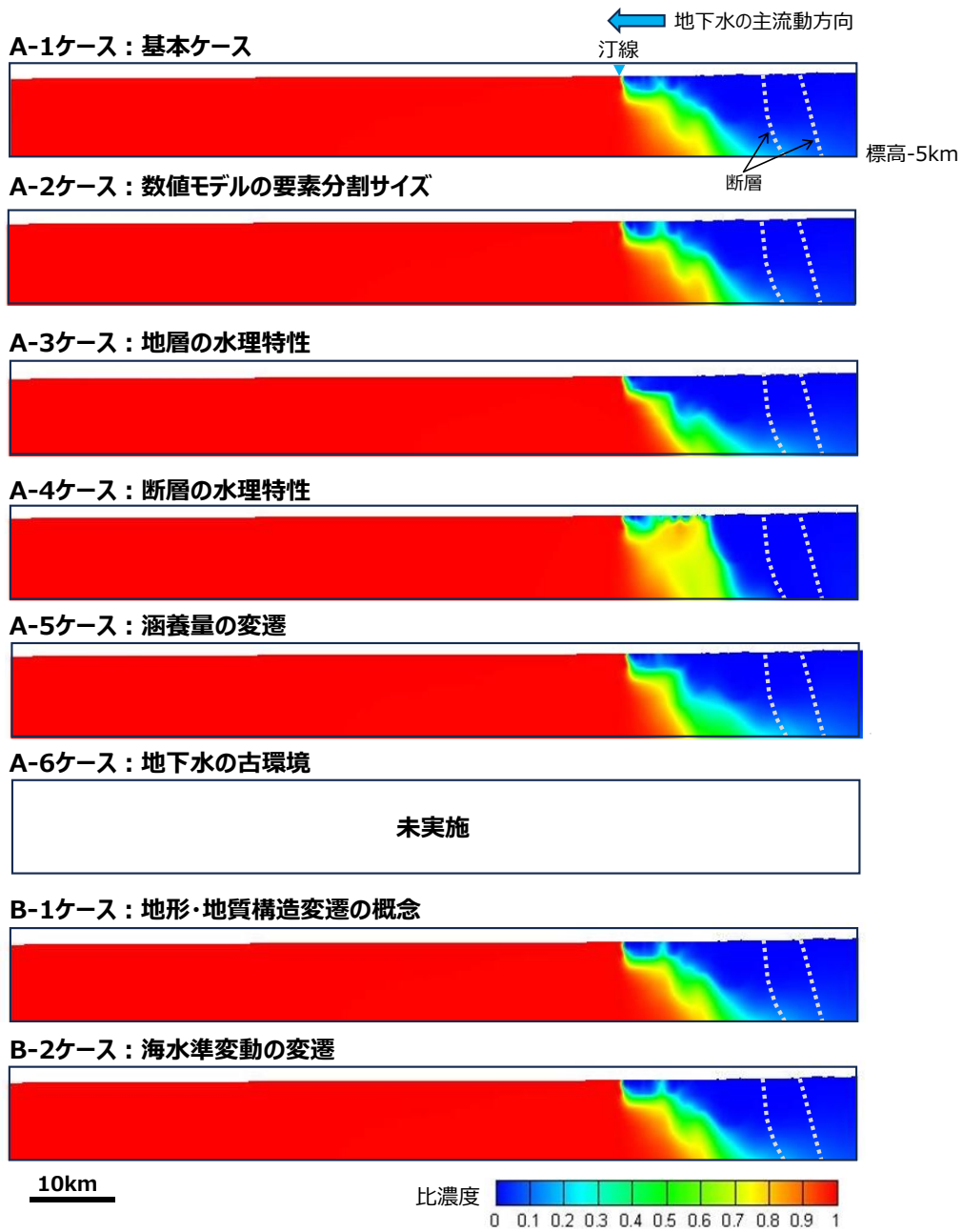
粒子追跡線解析では、図 6-6 に示すように、現在の陸域と海域を含む 10 km×20 km の平面領域内に水平方向に 1 km 間隔、深度方向に 100 m 間隔で 10 深度の合計 2,310 点の指定点を配置し、これらの指定点を通過する涵養域から流出域までの粒子の移行特性を算出した。各代表時間断面における指定点の配置深度は、評価領域における長期的な隆起や沈降による地形・地質構造の変化を考慮する必要がある。そのため、Geo_model_A 及び Geo_model_B の約 100 万年前の時間断面において EL-400 m～EL-1,300 m の深度に 100 m の等間隔で指定点を配置し、それ以降の指定点の深度は、過去から現在までの隆起沈降量を考慮して粒子追跡線解析の対象とした代表時間断面ごとに算出した。定常解析では代表時間断面における定常状態の地下水流速場に基づき、粒子が地表に到達するまでの粒子追跡線解析を行った。非定常解析では代表時間断面における非定常状態の地下水流速場に基づく粒子の移行位置を次の代表時間断面に考慮することで、最大 100 万年間の連続的な粒子追跡線解析を実施した。

感度解析結果の一例として、粒子の指定点から流出点までの移行時間を粒子指定点位置の情報として三次元的に補間した分布図を図 6-10 に示す。解析手法の違いに着目すると、非定常解析では A-3 ケースを除く解析ケースにおいて、ほとんどの粒子が最大計算時間である 100 万年では地表に到達していないことがわかる。一方、定常解析では、陸域（汀線付近から右側領域）の地下浅部で移行時間が速い傾向、海域で移行時間が遅い傾向といった分布傾向が確認できる。不確実性要因の影響に着目すると、両解析手法ともに、地層の水理特性が解析結果に顕著な影響を与えることが確認された（A-1 ケースと A-3 ケースの比較）。また、定常解析においては、A-1 ケースと A-2 ケース、及び A-1 ケースと B-1 ケースの比較から、要素分割サイズの違い及び地形・地質構造変遷の概念が他ケースと比較して、陸域の地下浅部に影響を与えていることがわかる。



断面位置：A-A' 断面（図 6-1）

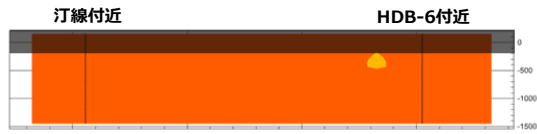
図 6-8 地下水の塩分濃度分布（非定常解析結果：モデル化スケールの鉛直断面図）



断面位置：A-A' 断面（図 6-1）

図 6-9 地下水の塩分濃度分布（定常解析結果：モデル化スケールの鉛直断面図）

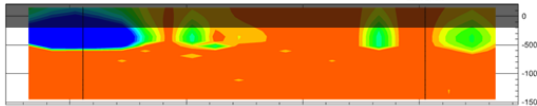
A-1ケース：基本ケース



A-2ケース：数値モデルの要素分割サイズ



A-3ケース：地層の水理特性



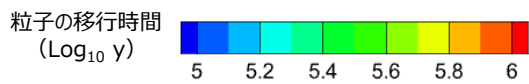
A-4ケース：断層の水理特性



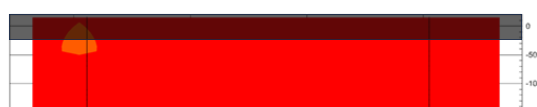
A-5ケース：涵養量の変遷



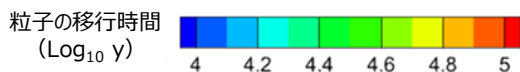
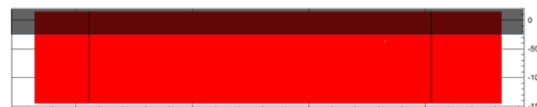
A-6ケース：地下水の古環境



B-1ケース：地形・地質構造変遷の概念

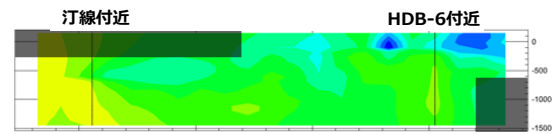


B-2ケース：海水準変動の変遷

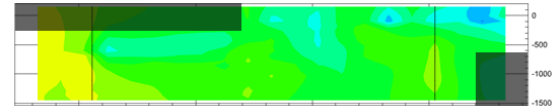


(a) 非定常解析結果

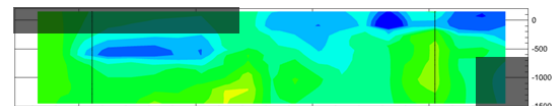
A-1ケース：基本ケース



A-2ケース：数値モデルの要素分割サイズ



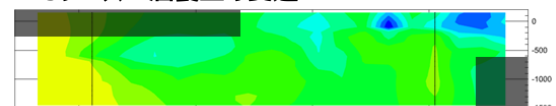
A-3ケース：地層の水理特性



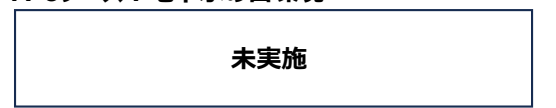
A-4ケース：断層の水理特性



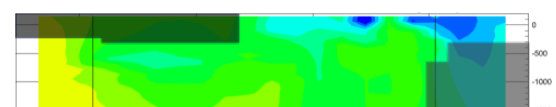
A-5ケース：涵養量の変遷



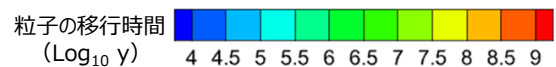
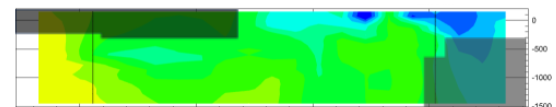
A-6ケース：地下水の古環境



B-1ケース：地形・地質構造変遷の概念



B-2ケース：海水準変動の変遷



(b) 定常解析結果

※断面位置：A-A' 断面 (図 6-1)

図 6-10 粒子の指定点から流出点までの移行時間の空間分布

(地下水流動系スケールの鉛直断面図)

図中の黒い網掛け部：データ密度が極めて低い領域，非定常解析の B-1 及び B-2 ケース：移行時間のコントラストを表示させるため，A-1～A-6 ケースと異なるカラーバーで図化

6.6 4D-SDMの不確実性評価

6.6.1 地下水の塩分濃度に着目した不確実性評価の事例

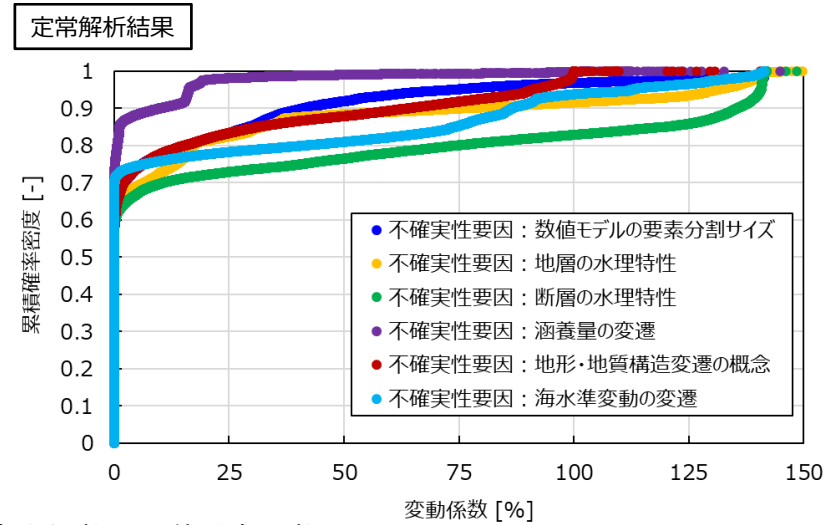
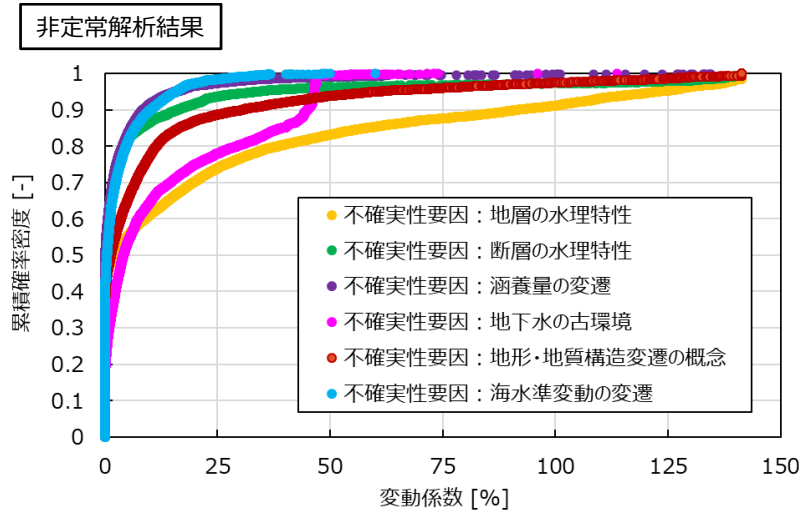
(1) 解析手法の違いが不確実性評価結果に及ぼす影響

モデル化スケールを対象に、「地下水の塩分濃度」に着目した不確実性評価結果を示す。なお、時間スケールは100万年である。

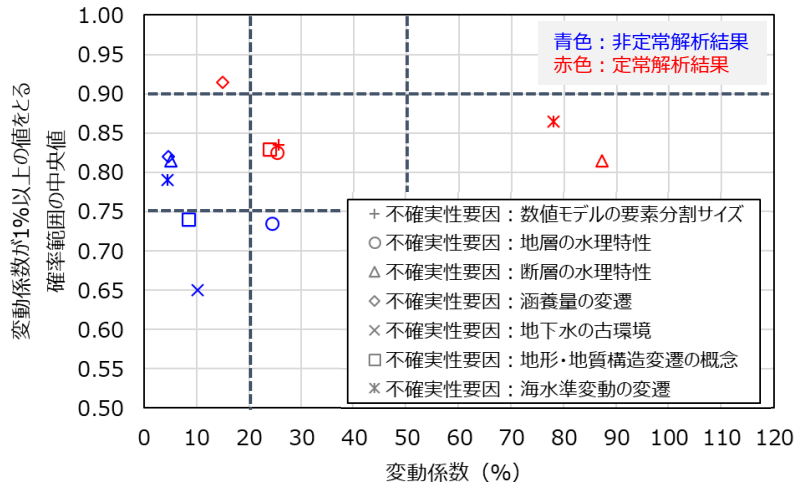
各不確実性要因が評価指標に及ぼす影響の程度を定量的に評価するために、図6-9に示した鉛直断面上における解析モデルの全要素の塩分濃度値を用いて、基本ケースと他ケースとの変動係数を算出し、累積分布関数として整理した(図6-11(a))。非定常解析結果については最終結果である現在の変動係数で累積分布関数を作成し、定常解析結果については3つの代表時間断面(約100万年前、約30万年前及び現在)ごとに変動係数を算出し、それらをすべて足し合わせることで累積分布関数を作成した。また、各ケースの累積分布関数に基づき作成したCVプロットを図6-11(b)に示す。

図6-11(a)からは、より幅広い確率範囲で大きな変動係数値を示す不確実性要因として、非定常解析では「地層の水理特性」及び「地下水の古環境」が、定常解析では「断層の水理特性」が他の要因と比べて塩分濃度分布に及ぼす影響が大きいと判断できる。これは図6-8及び図6-9に示した各ケースの塩分濃度分布の違いと整合的である。また、図6-11(a)のように累積分布関数として結果を整理することで、「地形・地質構造変遷の概念」のように、図6-8及び図6-9では、その影響が不明瞭であった不確実性要因についても影響の有無を確認することができた。さらに、図6-11(b)のCVプロットは、図6-11(a)に示した累積分布関数の形状から読み取れる不確実性要因の影響範囲(縦軸)と影響の程度(横軸)の特徴をよく表現できており、CVプロットを用いることで不確実性評価を定量的かつ視覚的に行うことができると考えられる。例えば、図6-11(b)中の「地形・地質構造変遷の概念」(図中の□印)が塩分濃度分布に及ぼす影響に着目すると、定常解析と比べて非定常解析の方が、その影響は広い範囲に及ぶが、影響の程度は小さいといった分析が可能である。

次に、図4-24に示した不確実性評価マトリクス図に基づき、各不確実性要因が解析結果に及ぼす影響を表6-8に整理した。非定常解析と定常解析の結果について色別した影響度で比較すると規則性は見いだせないが、図6-11(b)と合わせて影響の大きさに着目すると、全体として定常解析の方が非定常解析よりも大きい傾向にあるといえる。



(a) 不確実性要因による変動係数の累積分布関数



※図中の破線：図4-21に示した影響の範囲と大きさの閾値を示す。

(b) 累積分布関数に基づくCVプロット

(c) 変動係数の算出に用いた解析ケース

不確実性要因	解析ケース (各ケースの概要は表6-4参照)
数値モデルの要素分割サイズ	A-1, A-2 (定常解析のみ)
地層の水理特性	A-1, A-3
断層の水理特性	A-1, A-4
涵養量の変遷	A-1, A-5
地下水の古環境	A-1, A-6 (非定常解析のみ)
地形・地質構造変遷の概念	A-1, B-1
海水準変動の変遷 ^{*1}	B-1, B-2

^{*1}複数の海水準変動パターンを設定可能なモデルBを用いて変動係数を算出

図 6-11 不確実性評価結果の一例 (評価指標：地下水の塩分濃度, 評価スケール：モデル化スケール/100 万年スケール)

表 6-8 不確実性要因が解析結果に及ぼす影響

(評価指標：地下水の塩分濃度，評価スケール：モデル化スケール/100 万年スケール)

不確実性の分類	不確実性要因	解析結果に及ぼす影響 ^{*1}		
		 影響度		
			非定常解析	定常解析
モデル	数値モデルの要素分割サイズ	影響の範囲		中
		影響の大きさ		中
データ	地層の水理特性	影響の範囲	大	中
		影響の大きさ	中	中
	断層の水理特性	影響の範囲	中	中
		影響の大きさ	小	大
	涵養量の変遷	影響の範囲	中	小
		影響の大きさ	小	小
	地下水の古環境	影響の範囲	大	
		影響の大きさ	小	
シナリオ	地形・地質構造変遷の概念	影響の範囲	大	中
		影響の大きさ	小	中
データ	海水準変動の変遷	影響の範囲	中	中
		影響の大きさ	小	大

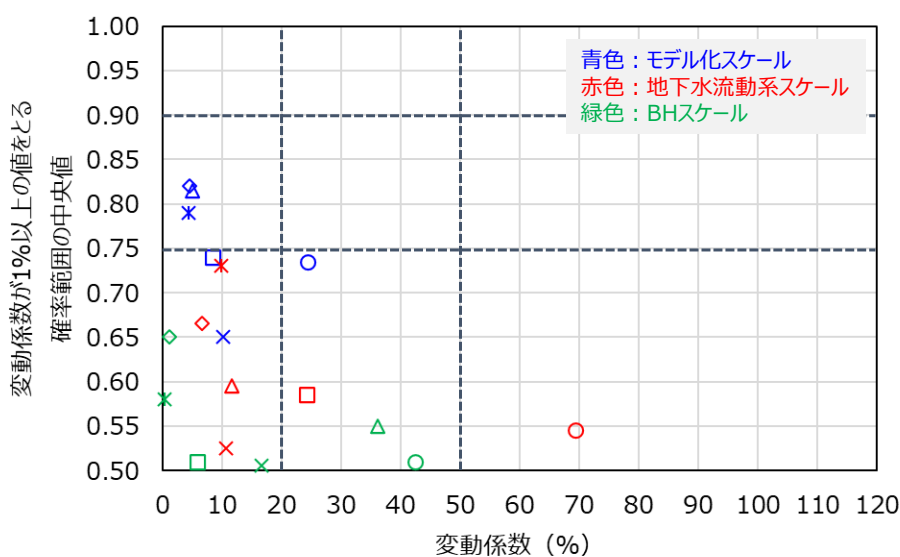
*1 表中に示す影響の大小や色別は、図 4-24 の不確実性評価マトリクス図に基づく。

(2) 空間スケールの違いが不確実性評価結果に及ぼす影響

異なる空間スケールを対象として、「地下水の塩分濃度」に着目した非定常解析による不確実性評価結果を図 6-12 及び表 6-9 に示す。なお、時間スケールは 100 万年スケールである。

不確実性評価を行う空間スケールが異なることで各不確実性要因が解析結果に及ぼす影響が変化しており、全体的には空間スケールが小さくなることに伴い、その影響は大きくなる傾向を示す。モデル化スケールでは、地下水流動系スケールと比較して、不確実性要因の影響が生じにくい深い領域を評価対象に含めるため、不確実性要因の影響が過小評価されることが考えられる。また、BH スケールでは、ボーリング孔沿いのみが評価対象となるため、周辺地層の分布や断層との位置関係など、そのボーリング孔が位置する場所の地質環境の特徴によって、不確実性要因の影響が大きく異なる可能性が考えられる。

一方、すべての空間スケールにおいて、「地層の水理特性」が相対的に解析結果に大きい影響を及ぼす不確実性要因であることが示された。



- 不確実性要因：地層の水理特性 △ 不確実性要因：断層の水理特性
- ◇ 不確実性要因：涵養量の変遷 × 不確実性要因：地下水の古環境
- 不確実性要因：地形・地質構造変遷の概念 * 不確実性要因：海水準変動の変遷

※図中の破線：図 4-21 に示した影響の範囲と大きさの閾値を示す。

図 6-12 空間スケールの違いによる不確実性評価結果の比較 (CV プロット)
(非定常解析, 評価指標：地下水の塩分濃度, 評価スケール：100 万年スケール)

表 6-9 不確実性要因が解析結果に及ぼす影響

(非定常解析, 評価指標：地下水の塩分濃度, 評価スケール：100 万年スケール)

不確実性の分類	不確実性要因	解析結果に及ぼす影響 ^{*1}			
		モデル化スケール	地下水流動系スケール	BH スケール	影響度
データ	地層の水理特性	影響の範囲	大	大	大
		影響の大きさ	中	大	中
	断層の水理特性	影響の範囲	中	大	大
		影響の大きさ	小	小	中
	涵養量の変遷	影響の範囲	中	大	大
		影響の大きさ	小	小	小
	地下水の古環境	影響の範囲	大	大	大
		影響の大きさ	小	小	小
シナリオ	地形・地質構造変遷の概念	影響の範囲	大	大	大
		影響の大きさ	小	中	小
データ	海水準変動の変遷	影響の範囲	中	大	大
		影響の大きさ	小	小	小

*1 表中に示す影響の大小や色別は、図 4-24 の不確実性評価マトリクス図に基づく。

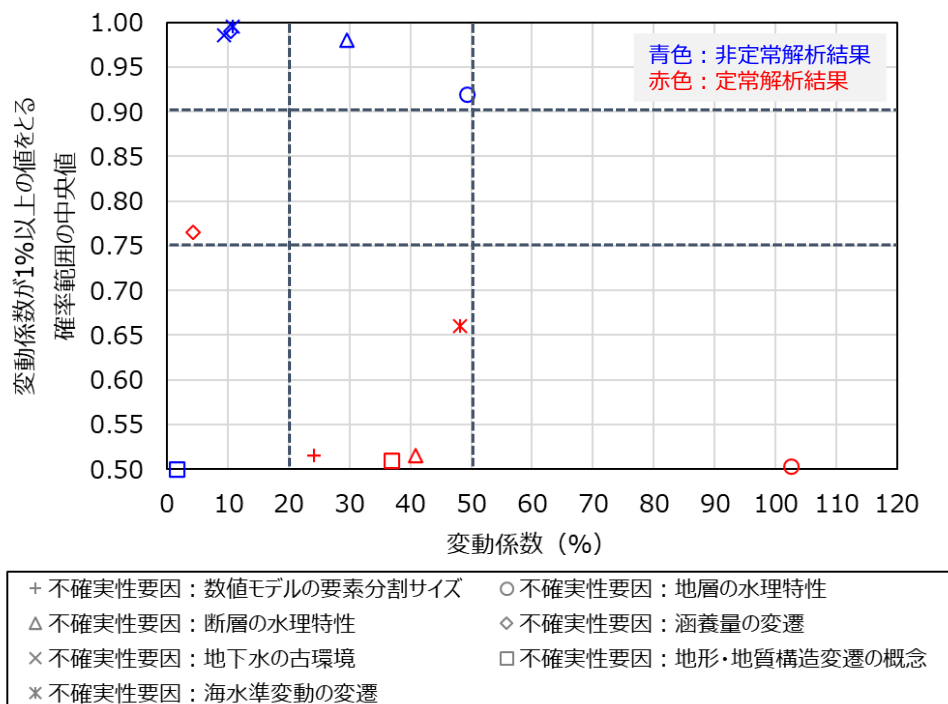
6.6.2 地下水の移行時間に着目した不確実性評価の事例

(1) 解析手法の違いが不確実性評価結果に及ぼす影響

地下水流動系スケールを対象に、「地下水の移行時間」に着目した不確実性評価結果を示す。なお、時間スケールは100万年である。

各不確実性要因が評価指標に及ぼす影響の程度を定量的に評価するために、図6-10の作成に使用した粒子指定点ごとの移行時間に基づき、基本ケースと他ケースとの変動係数を算出し、累積分布関数を作成した。定常解析結果については、地下水の塩分濃度と同様に、3つの代表時間断面（約100万年前、約30万年前及び現在）ごとに変動係数を算出し、それらをすべて足し合わせることで累積分布関数を作成した。各ケースの累積分布関数に基づき作成したCVプロットを図6-13に、各不確実性要因が解析結果に及ぼす影響を表6-10に整理した。

これらの整理結果から、6.6.1に示した地下水の塩分濃度を指標とした不確実性評価と同様に、非定常解析と比較して定常解析の方が各不確実性要因による影響をより明瞭に評価できることが示された。非定常解析においては、「地層の水理特性」と「地形・地質構造変遷の概念」の影響が相対的に大きく、定常解析においては、「地層の水理特性」の影響が相対的に大きい結果が得られた。



※図中の破線：図4-21に示した影響の範囲と大きさの閾値を示す。

図6-13 解析手法の違いによる不確実性評価結果の比較 (CVプロット)

(評価指標：地下水の移行時間，評価スケール：地下水流動系スケール/100万年スケール)

表 6-10 不確実性要因が解析結果に及ぼす影響

(評価指標：地下水の移行時間, 評価スケール：地下水流動系スケール/100 万年スケール)

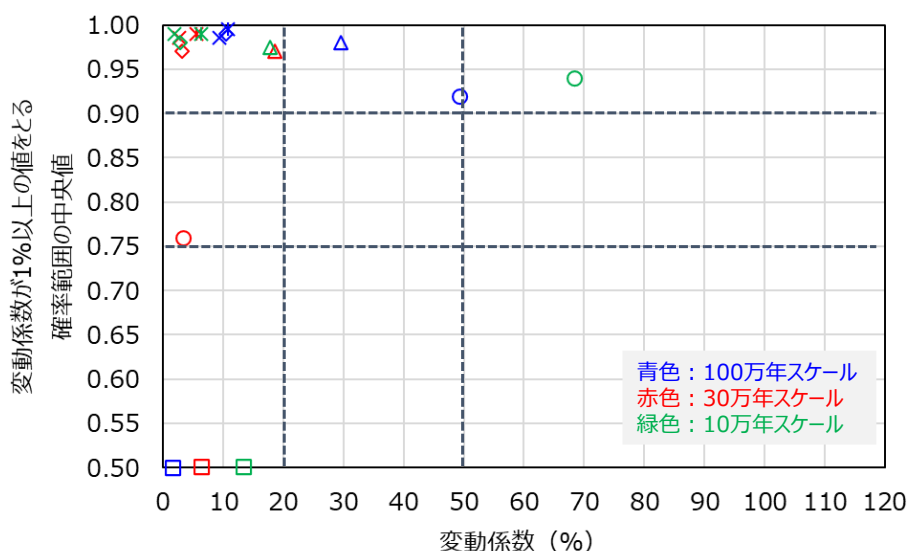
不確実性の分類	不確実性要因	解析結果に及ぼす影響 ^{*1}		
		 影響度		
		非定常解析		定常解析
モデル	数値モデルの要素分割サイズ	影響の範囲		大
		影響の大きさ		中
データ	地層の水理特性	影響の範囲	小	大
		影響の大きさ	中	大
	断層の水理特性	影響の範囲	小	大
		影響の大きさ	中	中
	涵養量の変遷	影響の範囲	小	中
		影響の大きさ	小	小
	地下水の古環境	影響の範囲	小	
		影響の大きさ	小	
シナリオ	地形・地質構造変遷の概念	影響の範囲	大	大
		影響の大きさ	小	中
データ	海水準変動の変遷	影響の範囲	小	大
		影響の大きさ	小	中

*1 表中に示す影響の大小や色別は、図 4-24 の不確実性評価マトリクス図に基づく。

(2) 時間スケールの違いが不確実性評価結果に及ぼす影響

異なる時間スケールを対象として、「地下水の移行時間」に着目した非定常解析による不確実性評価結果を図 6-14 及び表 6-11 に示す。30 万年スケール及び 10 万年スケールの地下水移行時間は、それぞれ約 30 万年前及び約 10 万年前を出発時刻とした粒子追跡解析を行った結果に基づき算出した。なお、空間スケールは地下水流動系スケールである。

図 6-10 に示したとおり、幌延地域は地下水流動が緩慢であるため、時間スケールによる違いが生じにくい条件下であるが、不確実性評価を行う時間スケールに関わらず、各不確実性要因が解析結果に及ぼす影響は概ね同様の傾向を示す。また、すべての時間スケールにおいて、「地層の水理特性」及び「地形・地質構造変遷の概念」が相対的に解析結果に大きい影響を及ぼす不確実性要因であることが示された。



- 不確実性要因：地層の水理特性 △ 不確実性要因：断層の水理特性
- ◇ 不確実性要因：涵養量の変遷 × 不確実性要因：地下水の古環境
- 不確実性要因：地形・地質構造変遷の概念 * 不確実性要因：海水準変動の変遷

※図中の破線：図 4-21 に示した影響の範囲と大きさの閾値を示す。

図 6-14 時間スケールの違いによる不確実性評価結果の比較 (CV プロット)
(非定常解析, 評価指標：地下水の移行時間, 評価スケール：地下水流動系スケール)

表 6-11 不確実性要因が解析結果に及ぼす影響

(非定常解析, 評価指標：地下水の移行時間, 評価スケール：地下水流動系スケール)

不確実性の分類	不確実性要因	解析結果に及ぼす影響*1			
		100 万年スケール	30 万年スケール	10 万年スケール	
データ	地層の水理特性	影響の範囲	小	中	小
		影響の大きさ	中	小	大
	断層の水理特性	影響の範囲	小	小	小
		影響の大きさ	中	小	小
	涵養量の変遷	影響の範囲	小	小	小
		影響の大きさ	小	小	小
地下水の古環境	影響の範囲	小	小	小	
	影響の大きさ	小	小	小	
シナリオ	地形・地質構造 変遷の概念	影響の範囲	大	大	大
		影響の大きさ	小	小	小
データ	海水準変動の 変遷	影響の範囲	小	小	小
		影響の大きさ	小	小	小

*1 表中に示す影響の大小や色別は、図 4-24 の不確実性評価マトリクス図に基づく。

6.6.3 不確実性評価結果に基づく技術的知見

幌延地域を事例とした 4D-SDM の不確実性評価結果に基づく技術的知見を以下に示す。

- ・変動係数を用いた評価手法は、4D-SDM の不確実性評価に有効であり、変動係数を三次元コンター分布として空間的に可視化し、累積分布関数としてデータ処理することで、定量的な評価が可能である。さらに、累積分布関数に基づく CV プロット及び影響度マトリクス図による整理は、不確実性評価をより定量的かつ視覚的に行うために有効である。
- ・解析手法の違いに着目すると、地下水の塩分濃度及び地下水の移行時間を評価指標とした不確実性評価結果とともに、定常解析の方が非定常解析よりも不確実性要因の影響を明瞭に評価できることが示された。このことは、非定常解析と比較して定常解析の方が変動係数の感度が高い解析手法であることを示唆しており、影響の大きい不確実性要因を抽出する際に、感度が高い定常解析は有効な解析手法であると考えられる。
- ・空間スケールの違いに着目すると、同じ不確実性要因であっても空間スケールの設定によってその感度の見え方が異なることが示唆され、不確実性要因を行うに当たっては評価対象に応じて空間スケールを適切に設定することが重要であるといえる。
- ・時間スケールの違いに着目すると、不確実性評価結果に大きな違いは生じなかったことから、数十万年程度の時間スケールを考慮した検討を行うことで、影響の大きい不確実性要因を抽出することが可能と考えられる。一方で、幌延地域は地下水流動が緩慢であるため、時間スケールによる違いが生じなかった可能性も考えられることから、他の地域を対象として検討する際には、予備検討を行い時間スケールの設定が不確実性評価結果に及ぼす影響を確認する必要がある。
- ・本事例検討においては、「地層の水理特性」及び「地形・地質構造変遷の概念」が、解析結果に大きな影響を及ぼし得る重要な不確実性要因であることが示された。モデル化領域の地質環境条件によって重要な不確実性要因は異なるものの、不確実性評価を行うに当たっては、データの不確実性としては「地層の水理特性」を、シナリオの不確実性としては「地形・地質構造変遷の概念」は考慮すべき不確実性要因であると考えられる。

上記を踏まえると、4D-SDM の不確実性評価を行うに当たっては、最初にいくつかの代表時間断面を対象とした定常解析で評価項目に大きな影響を与える不確実性要因を絞り込んだうえで、その不確実性要因に対して非定常解析を行い、その影響を精緻に確認するといった段階的な評価アプローチが有効と考えられる。非定常解析を行う際には、数十万年程度と 100 万年の時間スケールの解析を使い分けることで、不確実性要因の感度構造を効率的に把握することができる可能性がある。また、いくつかの空間スケールを設定して不確実性評価を行うことで、多角的な視点で重要な不確実性要因を抽出することができると考えられる。

6.7 4D-SDM の妥当性確認

図 4-25 に示した地下水中の塩分濃度の長期的な変動性の推定アプローチを適用して、地下水年代と地下水の塩分濃度に着目した 4D-SDM の妥当性確認を試行した。

まず、幌延地域で取得された地下水年代と 4D-SDM を用いて推定した地下水の滞留時間との比較を行った。地下水年代は、原位置で採水した地下水中の ^{36}Cl や ^4He 濃度に基づき推定された結果 (CRIEPI, 2013 ; 中田・長谷川, 2010) を適用した。地下水の滞留時間については、図 6-15 に示した浜里地区及び研究所設置地区周辺の粒子指定点を対象として、現在を出発時刻とした後方粒子追跡法を 100 万年前の代表時間断面まで実施することで、評価対象地点から涵養域までの粒子の移行時間を逆算し、それらの平均値と標準偏差を算出した。なお、後方粒子追跡法は非定常計算で実施することができないため、ある時間断面における定常状態の地下水流速場を前の時間断面まで適用するとともに、その時点の粒子の位置座標を前の時間断面の出発点として引き継ぐことで、現在から過去への粒子の移行を追跡した。また、後方粒子追跡法は 100 万年前の時間断面到達以降、1,000 万年前までを計算対象とした。

地下水年代と地下水の滞留時間との比較結果を表 6-12 に示す。地下水の滞留時間については、すべての感度解析ケースを考慮した場合 (表 6-12 中の全ケース) と、基本ケースに加えて 6.6.3 で解析結果に大きな影響を及ぼし得る重要な不確実性要因として抽出した「地層の水理特性」及び「地形・地質構造変遷の概念」に対する感度解析ケースのみを考慮した場合 (表 6-12 中の重要要因ケース) の 2 パターンで算出した。幌延地域においては、地下深部の地下水の流れが緩慢であるため、後方粒子追跡法の計算時間の上限値 (1,000 万年) が経過しても地表に到達しなかった粒子が多く見受けられる解析結果であったが、4D-SDM を用いて推定した地下水の滞留時間は、上記の 2 パターンの算出結果ともに浜里地区及び研究所設置地区における地下水年代と整合的であることが示された。

次に、浜里地区及び研究所設置地区に掘削されたボーリング孔沿いの塩化物イオン濃度分布と 4D-SDM を用いて推定した地下水の塩分濃度との比較結果を図 6-16～図 6-19 に示す。4D-SDM を用いた推定結果については、基本ケースを最も蓋然性が高い結果とするとともに、基本ケースに対する感度解析ケースのばらつきを不確実性要因による不確実性の幅として表示した。不確実性を考慮した解析結果は、地下水の滞留時間と同様に、すべての感度解析ケースを考慮した場合 (図 6-16, 図 6-17) と、基本ケースに加えて 6.6.3 で解析結果に大きな影響を及ぼし得る重要な不確実性要因として抽出した「地層の水理特性」及び「地形・地質構造変遷の概念」に対する感度解析ケースのみを考慮した場合 (図 6-18, 図 6-19) の 2 パターンで整理した。すべての感度解析ケースを考慮した場合 (図 6-16, 図 6-17) については、不確実性の幅を含めた 4D-SDM の推定結果が、HDB-1, HDB-3, HDB-4～6, HDB-8, HDB-10, SFI-1 沿いの塩化物イオン濃度の深度分布を概ね包含できている。一方、上記以外のボーリング孔 (HDB-2, HDB-7, HDB-9, HDB-11) では、実測値と 4D-SDM の推定結果に乖離が見られた。これらは研究所設置地区周辺に分布する大曲断層近傍に位置するボーリング孔であり、水理地質構造モデルに表現された大曲断層の分布形状や水理学的な不均質性などが実際とは異なることによって、実測値との乖離が生じたものと考えられる。また、重要な不確実性要因の感度解析ケースのみを考慮した場合についても、すべての感度解析ケースを考慮

した場合と同様に、大曲断層近傍に位置するボーリング孔（HDB-2, HDB-7, HDB-9, HDB-11）を除くボーリング孔沿いの塩化物イオン濃度の深度分布を 4D-SDM の推定結果が概ね包含できている（図 6-18, 図 6-19）。さらに、浜里地区周辺で実施された電磁探査結果（AIST, 2012）と比較すると、比抵抗分布から読み取れる SFI-1 の標高-500 m 付近を境とした更別層と勇知層における塩分濃度の濃淡の傾向や、沿岸海域の浅部における淡水領域の分布傾向が 4D-SDM の推定結果と調和的である（図 6-20）。

上記の比較結果から、感度解析ケースを含めた 4D-SDM の推定結果は、地下水年代と地下水の塩分濃度ともに実測値を概ね再現できていることが確認され、本事例検討で構築した 4D-SDM の妥当性が示されたと考えられる。また、すべての感度解析ケースを考慮した場合と、重要な不確実性要因に対する感度解析ケースのみを考慮した場合ともに、同程度の実測値の再現性を有している。このことは、6.6.3 で解析結果に大きな影響を及ぼし得る重要な不確実性要因として、「地層の水理特性」及び「地形・地質構造変遷の概念」を抽出した結果が妥当であったことを示している。

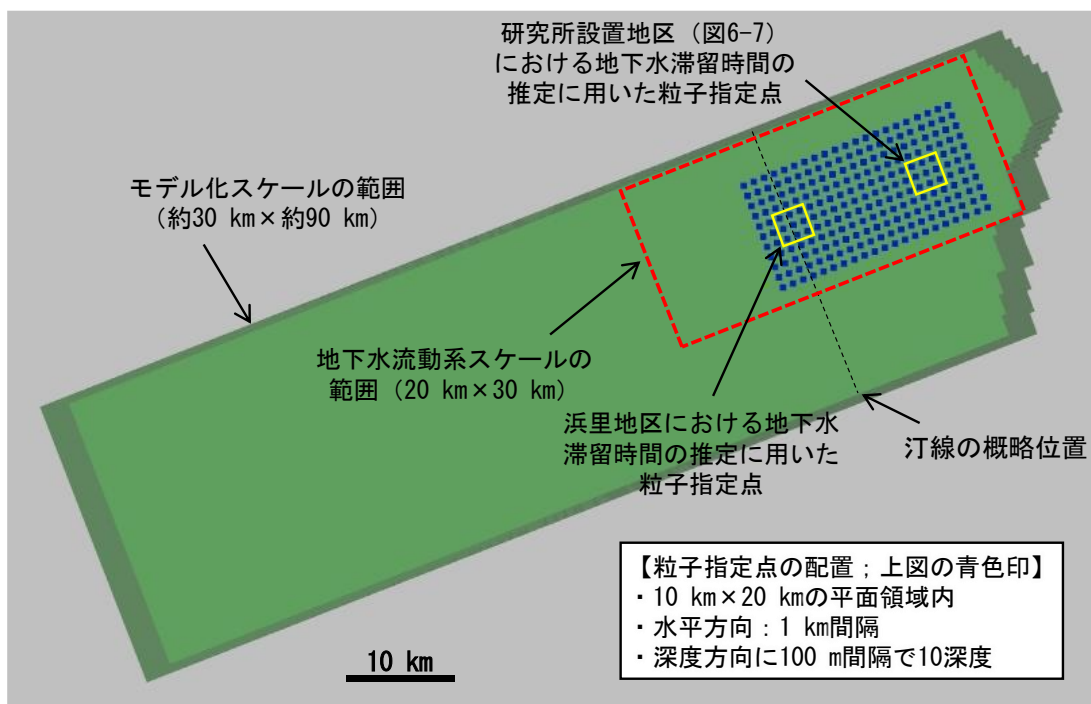


図 6-15 後方粒子追跡法に用いた粒子指定点の配置

表 6-12 地下水年代に着目した 4D-SDM の妥当性確認結果

地点	比較対象 深度	【実測値】 地下水年代	【解析結果】 地下水の滞留時間（年） ^{*3}	
			全ケース ^{*4}	重要要因ケース ^{*5}
浜里地区	深度 800 m 以深	・ 数十万～100 万年以上 (³⁶ Cl 濃度による推定結果) ^{*1}	平均値：9.3E+6 標準偏差：1.9E+6	平均値：9.2E+6 標準偏差：1.9E+6
研究所 設置地区	深度 250 m 以浅	・ 50～200 万年 (⁴ He 濃度による推定結果) ^{*2}	平均値：5.5E+5 標準偏差：1.6E+6	平均値：4.7E+5 標準偏差：1.6E+6
	深度 300 m 以深	・ 100 万年以上 (⁴ He, ³⁶ Cl 濃度による推定結果) ^{*2}	平均値：3.4E+6 標準偏差：3.8E+6	平均値：3.1E+6 標準偏差：3.6E+6
<p>^{*1}CRIEPI, 2013</p> <p>^{*2}中田・長谷川, 2010</p> <p>^{*3}浜里地区における深度 800 m 以深：標高-800～-1000 m に位置する指定点を対象に移行時間を算出。研究所設置地区における深度 250 m 以浅及び深度 300 m 以深：標高-100～-250 m 及び標高-300～-1,000 m に位置する指定点を対象に移行時間を算出。</p> <p>^{*4}基本ケース（A-1 ケース）及びすべての感度解析ケース（A-2～A-6, B-1 及び B-2 ケース）</p> <p>^{*5}基本ケース（A-1 ケース）及び重要な不確実性要因を考慮した感度解析ケース（A-3, B-1 ケース）</p>				

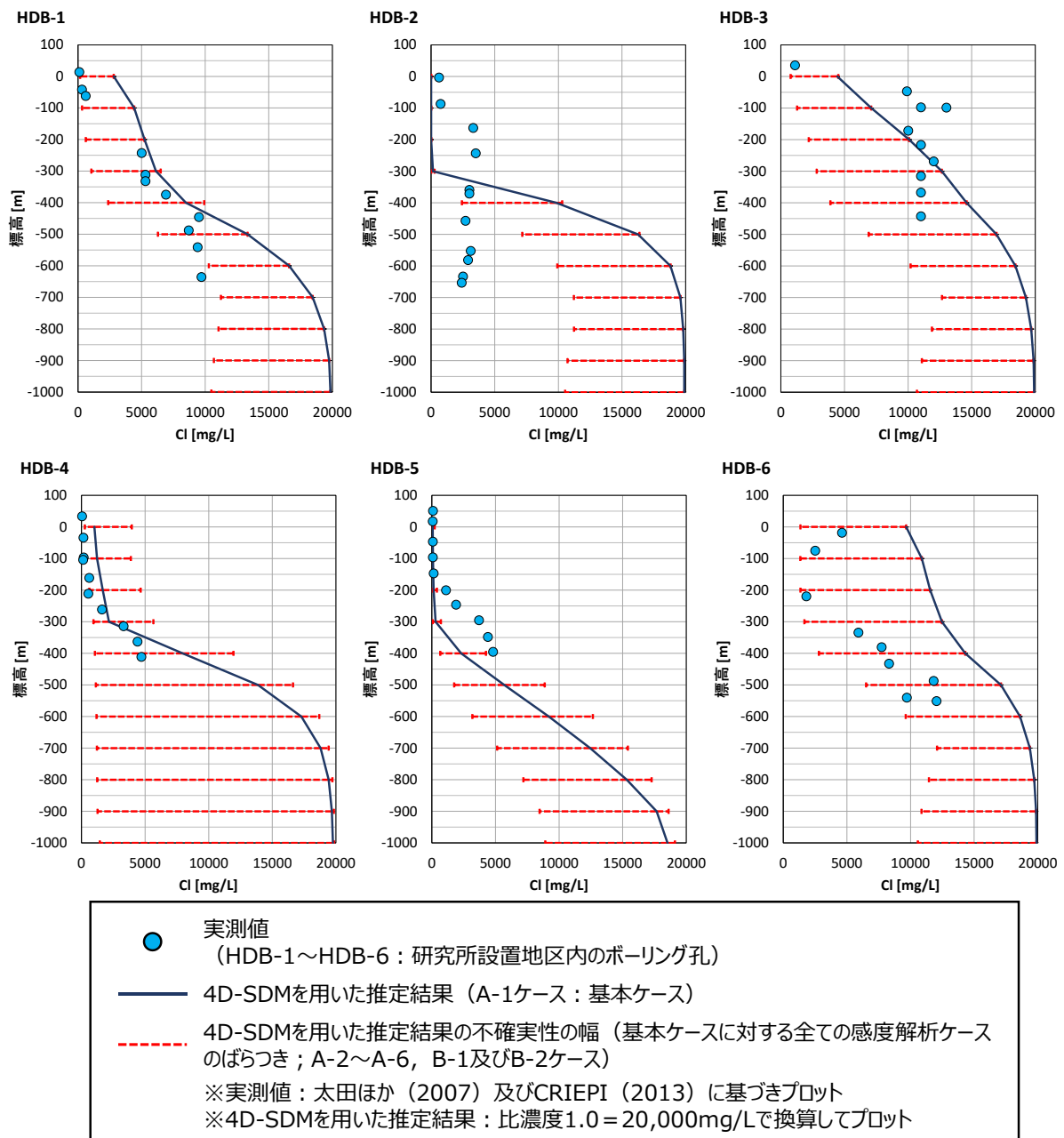


図 6-16 ボーリング孔沿いの塩化物イオン濃度分布に着目した 4D-SDM の妥当性確認結果 (すべての感度解析ケースを考慮した場合：HDB-1～HDB-6)

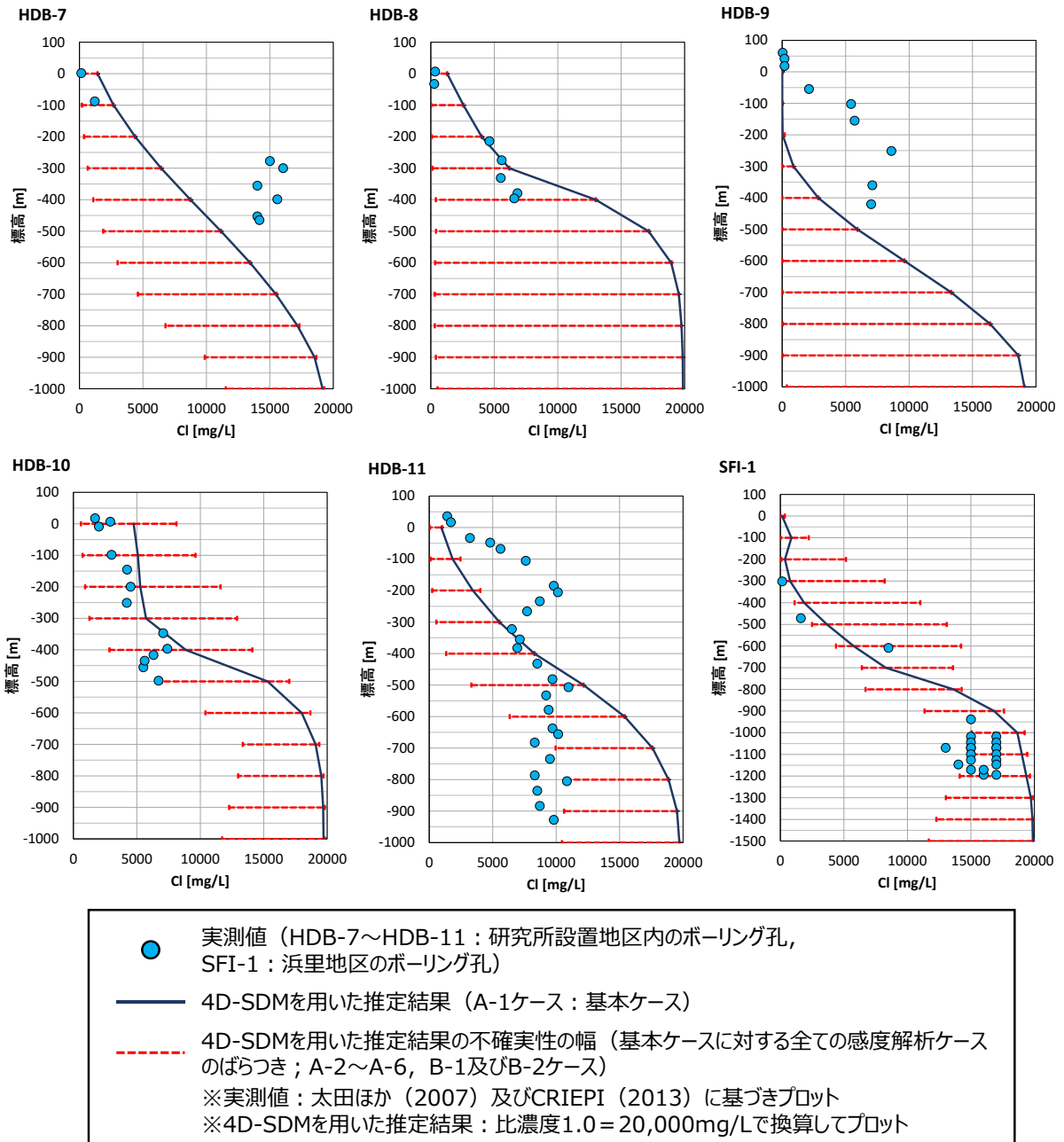


図 6-17 ボーリング孔沿いの塩化物イオン濃度分布に着目した 4D-SDM の妥当性確認結果 (すべての感度解析ケースを考慮した場合：HDB-7～HDB-11, SFI-1)

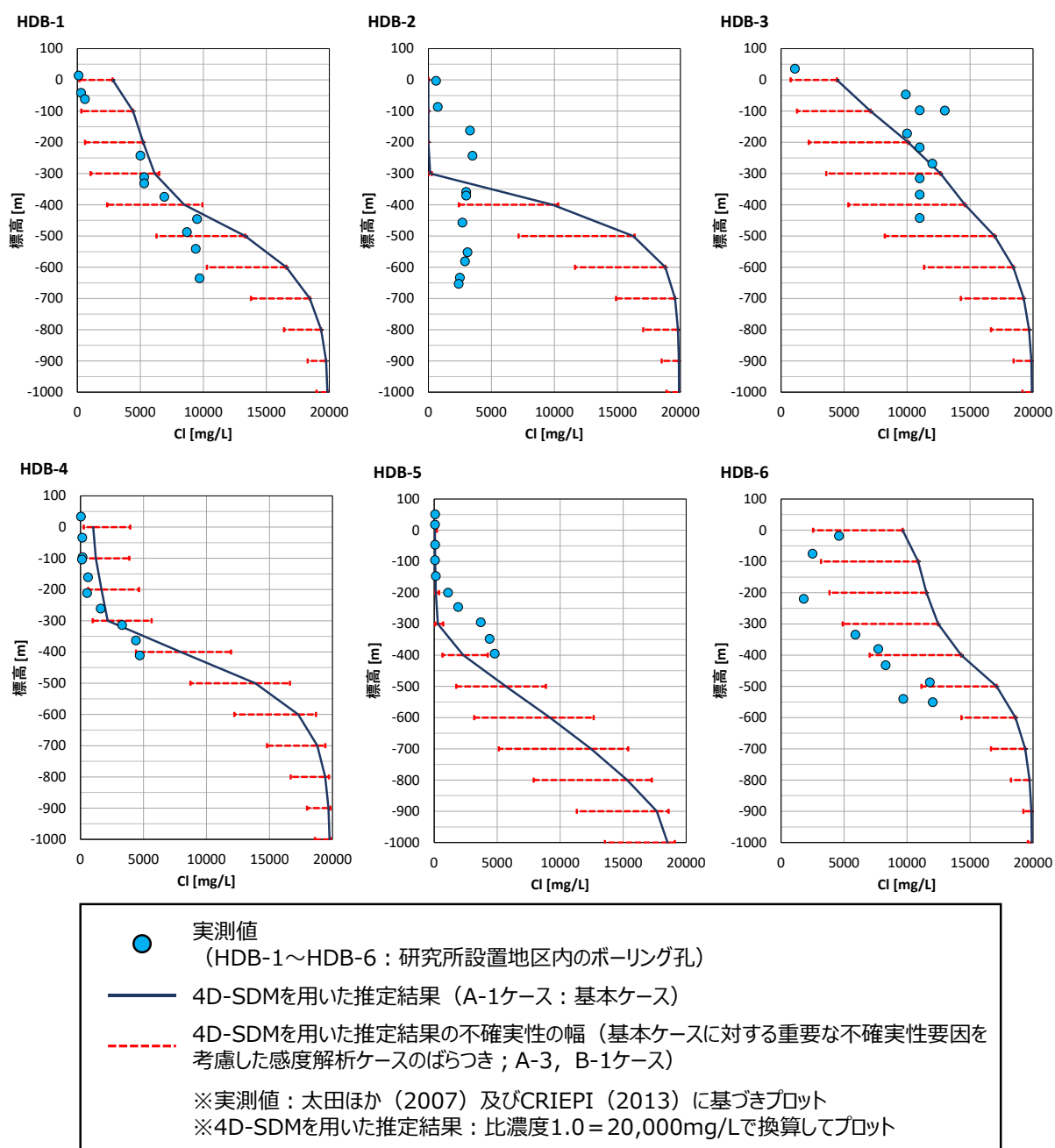


図 6-18 ボーリング孔沿いの塩化物イオン濃度分布に着目した 4D-SDM の妥当性確認結果 (重要な不確実性要因の感度解析ケースのみを考慮した場合：HDB-1～HDB-6)

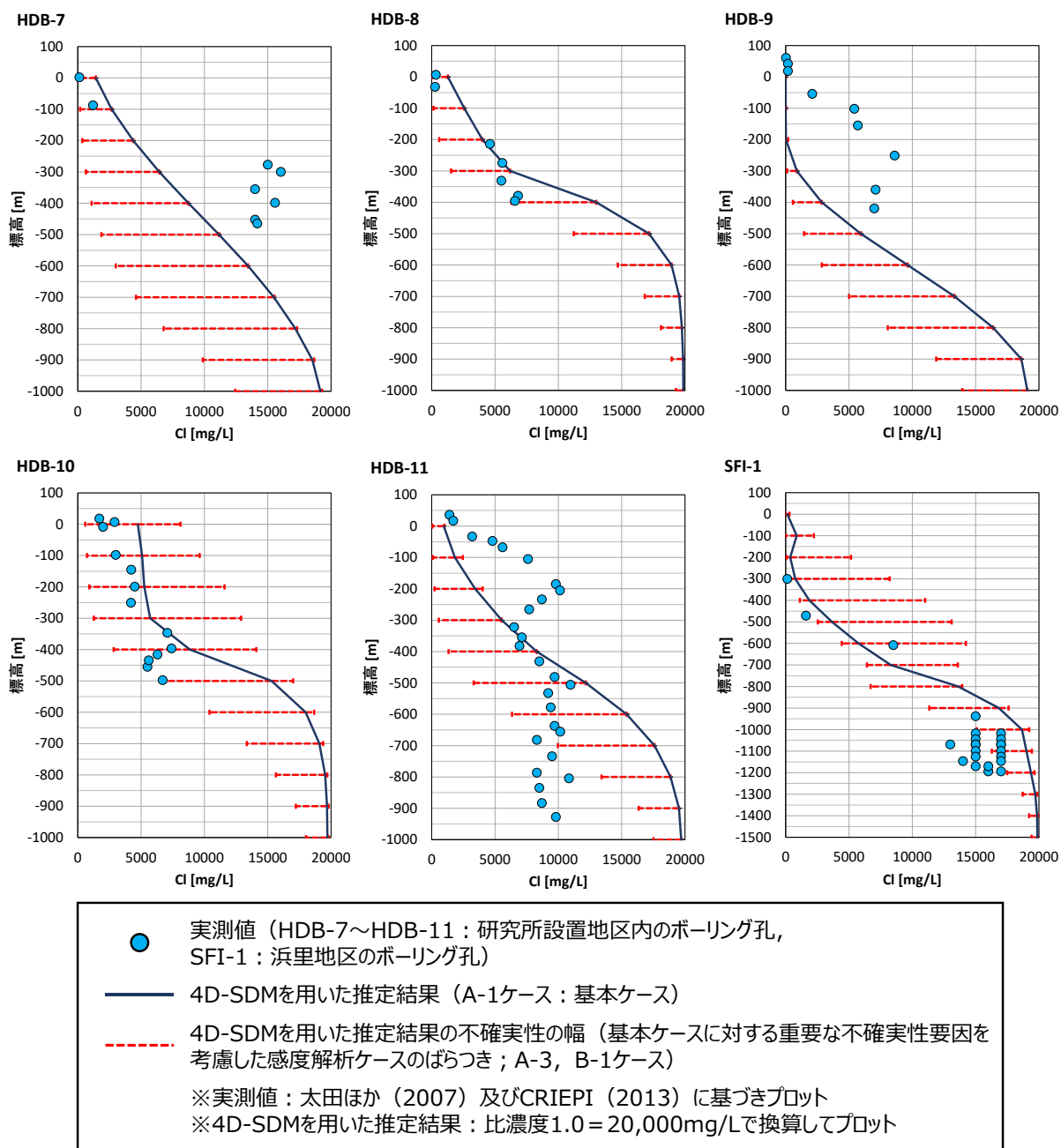
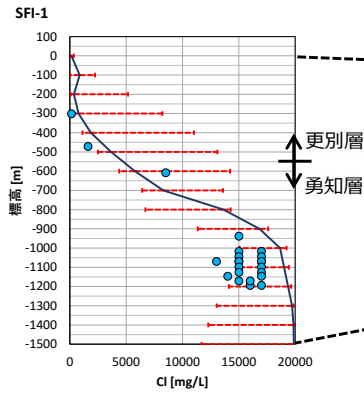
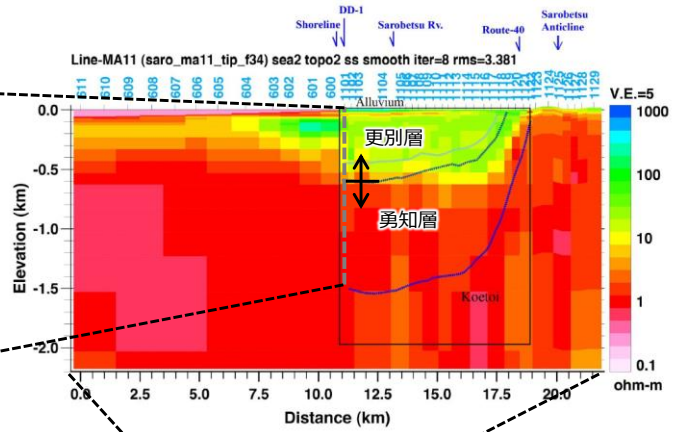


図 6-19 ボーリング孔沿いの塩化物イオン濃度分布に着目した 4D-SDM の妥当性確認結果 (重要な不確か性要因の感度解析ケースのみを考慮した場合 : HDB-7~HDB-11, SFI-1)

(a) 4D-SDMで推定した地下水の塩分濃度分布
 (全ての感度解析ケースを考慮した場合：
 図6-16から抜粋)



(b) 電磁探査による比抵抗分布 (AIST, 2012)



(c) 4D-SDMで推定した地下水の塩分濃度分布
 (A-1ケース：A-A'断面 (図6-1))

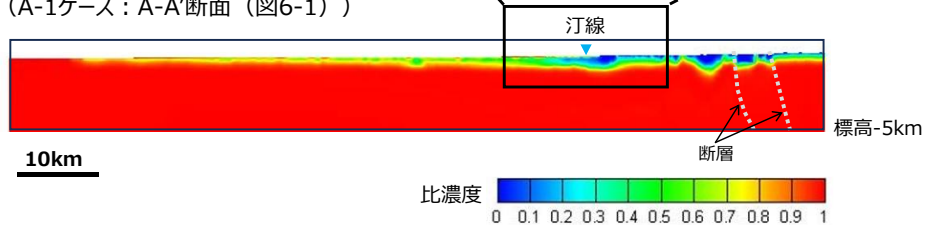


図 6-20 浜里地区周辺の塩分濃度分布に着目した 4D-SDM の妥当性確認結果

7. まとめ

本報告書では、包括的技術報告書に示された、数万年以上の長期間にわたる地層処分システムの安全機能をより現実に即して評価することを目的として、2018年度から2024年度の6カ年において、NUMOが技術開発を進めてきた4D-SDMの構築やその妥当性確認に係る一連の検討成果を取りまとめた。

4D-SDMの構築については、隆起・侵食などによる長期的な地形変化や気候・海水準変動に伴う地表から地下深部までの地質環境特性の状態変遷を表現するための、地形及び地質・地質構造の長期的変動の解釈及びモデル化、それらを考慮した解析に関する考え方や作業手順を整理した。また、先新第三紀堆積岩類が分布する仮想的な場を対象とした、4D-SDM構築技術の適用事例を提示した。

4D-SDMの妥当性確認については、地質環境特性に関する不確実性に加えて、その地質環境特性の長期変遷に関わる解釈や仮定といった4D-SDMの構築過程に内在する不確実性を評価しつつ、その妥当性を確認するための考え方や作業手順を整理した。また、事例対象地域として地質環境特性の体系的な情報やデータが利用可能な幌延地域を選定し、不確実性を考慮した4D-SDMの妥当性確認の具体例を提示した。

これら技術開発の成果により、地質環境の状態変遷に係る評価技術の高度化が図れ、今後のサイト調査における、より信頼性の高い地質環境特性とその長期変遷の評価、及び処分場の設計、閉鎖後長期の安全評価の信頼性向上に資するための技術の一つを整備することができた。

今後は、包括的技術報告書を更新する際に、本報告書に取りまとめた4D-SDMの構築技術と、その妥当性確認に係る方法論を反映することを検討するとともに、さらに事例検討などを通じて本手法の信頼性を高めつつ最適化を図る。

参考文献

- Abumi, K., Ozutsumi, T., Onoe, H., Saegusa, H. (2025) : Technical Development of 4D-SDM for Long-Term Post-Closure Safety Assessment of a Repository in Japan (1) Modeling approach for geological model considering long-term geological phenomena, Proceedings of 2025 International High-Level Radioactive Waste Management Conference, pp. 36-39.
- AIST(独立行政法人産業技術総合研究所) (2012) : 沿岸域塩淡境界・断層評価技術高度化開発平成 23 年度成果報告書, ISSN 1881-8838.
- 地層処分研究開発調整会議 (2020) : 令和 2 年 3 月改訂 地層処分研究開発に関する全体計画 (平成 30 年度～令和 4 年度) .
- 地層処分研究開発調整会議 (2023) : 地層処分研究開発に関する全体計画 (令和 5 年度～令和 9 年度) .
- CRIEPI(財団法人電力中央研究所) (2013) : 平成 24 年度地層処分技術調査等事業 岩盤中地下水移行評価技術高度化開発 ー地下水年代測定技術調査ー 報告書.
- Domenico, P.A. and Schwartz, F. W. (1995) : 地下水の科学 (I～III), 土木工学社.
- 藤原治, 三箇智二, 大森博雄 (2001) : 日本列島における侵食速度の分布 (CD-ROM 版), JNC TN7410 2001-015.
- Gelhar, L.W., Welty, C. and Rehfeldt, K. R. (1992) : A Critical Review of Data on Field-Scale Dispersion in Aquifers, Water Resources Research, Vol.28, No.7, pp.1955-1974.
- 今井久, 山下亮, 塩崎功, 浦野和彦, 笠博義, 丸山能生, 新里忠史, 前川恵輔 (2009) : 地下水流動に対する地質環境の長期変遷の影響に関する研究, JAEA-Research 2009-001.
- IODP Expedition 319 (2009) : Expedition 326 Scientists, 2011. NanTroSEIZE Stage 3: plate boundary deep riser: top hole engineering. IODP Prel. Rept., 326.
- 石橋正祐紀, 栗原新, 松岡稔幸, 笹尾英嗣 (2012) : 超深地層研究所計画におけるサイトスケール地質構造モデルの構築ー第 2 段階における Shaft180 から Stage300 地質構造モデルへの更新ー, JAEA-Research 2012-018.
- 石井英一, 安江健一 (2005) : 幌延町における鮮新世～前期更新世のテフラ層序と FT 年代, 核燃料サイクル開発機構技術資料, JNC TN5400 2005-006.
- 石井英一, 安江健一, 大平寛人, 古澤明, 長谷川健, 中川光弘 (2008) : 北海道北部, 大曲断層近傍の背斜成長の開始時期, 地質学雑誌, Vol.114, No.6, pp.286-29.
- 岩月輝希, 石井英一, 新里忠史 (2009) : 北海道幌延地域における深部地球化学環境の長期変遷シナリオの構築, 地学雑誌, Vol.118, No.4, pp.700-716.

Jacobs (2020a) : Connect Flow Release 12.2 Technical Summary Document.

Jacobs (2020b) : NAMMU Release 12.2 Technical Summary Document.

Jacobs (2020c) : Connect Flow Release 12.2 Verification Document.

JAEA(日本原子力研究開発機構)(2015) : 平成 26 年度 地層処分技術調査等事業 地質環境長期安定性評価確証技術開発 報告書.

JAEA(日本原子力研究開発機構)(2016) : 平成 27 年度 地層処分技術調査等事業 地質環境長期安定性評価確証技術開発 報告書.

JAEA(日本原子力研究開発機構)(2017) : 平成 28 年度 地層処分技術調査等事業 地質環境長期安定性評価確証技術開発 報告書.

JAEA(日本原子力研究開発機構)(2018a) : 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 地質環境長期安定性評価確証技術開発 5 か年報告書.

JAEA(日本原子力研究開発機構)(2018b) : 平成 29 年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 地質環境長期安定性評価確証技術開発 報告書.

Jaquet O, Namar R, Jansson P. (2010) : Groundwater flow modelling under ice-sheet conditions: scoping calculations. SKB R-10-46.

JNC(核燃料サイクル開発機構)(1999) : わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第 2 次取りまとめ－分冊 1 わが国の地質環境, JNC TN1400 99-021.

JNC(核燃料サイクル開発機構)(2005) : 高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築－平成 17 年取りまとめ－ 一分冊 1 深地層の科学的研究－, JNC TN1400 2005-014.

Joyce, S., Simpson, T., Hartley L., Applegate D., Hoek J., Jackson P., Swan D. (2010) : Groundwater flow modelling of periods with temperate climate conditions -Forsmark, SKB R-09-20.

甲斐邦男, 前川恵輔 (2009) : 北海道幌延地域の第三系珪藻質泥岩中の地下水の酸素・水素同位体比と塩化物イオン濃度, 石油技術協会誌, Vol.74, pp.96-106.

小坂和夫, 金折裕司, 千木良雅弘, 吉田鎮男 (2010) : 日本の断層マップ, 培風館.

近藤浩文, 鈴木浩一, 長谷川琢磨, 濱田崇臣, 吉村公孝 (2014) : 地層処分地選定のための地質環境調査技術の実証研究: 調査段階に応じた地質環境モデルの構築と調査手法の適用性検討, 地質学雑誌, 120 巻, 12 号, p.447-471.

Lisiecki, L.E. and Raymo, M.E. (2005) : A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic

- d18O records, Paleoclimatology, Vol.20, PA1003.
- LLW Repository (2011a) : The 2011 Environmental Safety Case: Main Report. LLWR/ESC/R(11)10016, Low-Level Waste Repository Ltd., Holmrook, UK.
- LLW Repository (2011b) : The 2011 Environmental Safety Case: Hydrogeology. LLWR/ESC/R(11)10022, Low-Level Waste Repository Ltd., Holmrook, UK.
- LLW Repository (2011c) : The 2011 Environmental Safety Case: Site Evolution. LLWR/ESC/R(11)10023, Low-Level Waste Repository Ltd., Holmrook, UK.
- 松岡稔幸, 三枝博光, 尾上博則, 高畑祐美, 高林佑灯 (2022) : 処分場の閉鎖後安全評価のための四次元地質環境モデル構築技術の整備の取り組みについて, 日本地球惑星科学連合 2022 年大会, HCG24-P05.
- 松末和之, 藤原治 (2000) : 日本列島における最終氷期最寒冷期の気候, サイクル機構技報, No.6, pp93-104, 核燃料サイクル開発機構.
- METI(経済産業省 資源エネルギー庁) (2017) : 科学的特性マップ, https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/kagakutekitokuseimap/ (2026 年 1 月 5 日閲覧)
- 中江訓 (2000) : 西南日本内帯ジュラ紀付加複合体の広域対比, 地質学論集, 第 55 号, pp.73-98.
- 中田弘太郎, 長谷川琢磨 (2010) : 地下水年代測定評価技術の開発 (その 10) - 北海道幌延地域における $4\text{He} \cdot 36\text{Cl}$ 法適用の試み -, 電力中央研究所報告, N09027.
- 日本地質学会 (2012) : Field Geology 9 第四紀, 日本地質学会フィールドジオロジー編.
- 日本第四紀学会編 (1987) : 百年・千年・万年後の日本の自然と人類, 古今書院.
- 新里忠史, 舟木泰智, 安江健一 (2007) : 北海道北部, 幌延地域における後期鮮新世以降の古地理と地質構造発達史, 地質学雑誌, Vol.113 (補遺), pp.119-135.
- Niizato, T., Amano, K., Ota, K., Kunimaru, T., Lanyon B. and Alexander W.R. (2010) : Development of Comprehensive Techniques for Coastal Site Characterisation (3) Conceptualisation of Long-term Geosphere Evolution, Proceedings of the ASME 13th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management, ICEM2010-40052, pp. 97-106.
- NUMO(原子力発電環境整備機構) (2021) : 包括的技術報告 : わが国における安全な地層処分の実現 - 適切なサイトの選定に向けたセーフティケース構築 -, NUMO-TR-20-01.
- NUMO(原子力発電環境整備機構) (2023) : 技術開発成果概要 2021, NUMO-TR-22-02, pp. 5-7.

NUMO(原子力発電環境整備機構) (2024a) : 技術開発成果概要 2022, NUMO-TR-24-01, pp. 6-9.

NUMO(原子力発電環境整備機構) (2024b) : 技術開発成果概要 2023, NUMO-TR-24-03, pp. 6-9.

NUMO(原子力発電環境整備機構) (2025) : 技術開発成果概要 2024, NUMO-TR-25-03, pp. 11-17.

越智士郎, 柴崎亮介 (1999) : DEM (GTOPO30) と DCW を用いた落水線図作成アルゴリズムの開発, 写真測量とリモートセンシング, 38 巻, 3 号, pp.60-68.

OECD/NEA (2012) : Methods for Safety Assessment of Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste, ISBN 978-92-64-99190-3.

尾上博則, 小坂寛, 松岡稔幸, 小松哲也, 竹内竜史, 岩月輝希, 安江健一 (2019) : 長期的な地形変化と気候変動による地下水流動状態の変動性評価手法の構築, 原子力バックエンド研究, Vol.26, No.1, pp.3-14.

尾上博則 (2022) : NUMO における地質環境のモデル化技術の高度化に向けた取組み状況, 放射性廃棄物処分技術の最新動向に関する総合シンポジウム, 土木学会エネルギー委員会, <https://committees.jsce.or.jp/enedobo/node/91> (2026 年 1 月 5 日閲覧) .

Onoe, H., Saegusa, H., Abumi, K., Ozutsumi, T. (2025) : Technical Development of 4D-SDM for Long-Term Post-Closure Safety Assessment of a Repository in Japan (2) Approach to Model Uncertainty Evaluation for 4D-SDM, Proceedings of 2025 International High-Level Radioactive Waste Management Conference, pp. 40-43.

大澤英昭, 太田久仁雄, 濱克宏, 澤田淳, 竹内真司, 天野健治, 三枝博光, 松岡稔幸, 宮本哲雄, 豊田岳司, 岩月輝希, 前川恵輔, 國丸貴紀, 新里忠史, 浅森浩一, 平賀正人, 山中義彰, 重廣道子, 島田顕臣, 阿部寛信, 梅木博之 (2008) : 「地質環境総合評価技術高度化開発; 次世代型サイト特性調査情報統合システムの開発」平成 19 年度成果報告書 (受託研究), JAEA-Research 2008-085.

太田久仁雄, 阿部寛信, 山口雄大, 國丸貴紀, 石井英一, 操上広志, 戸村豪治, 柴野一則, 濱克宏, 松井裕哉, 新里忠史, 高橋一晴, 丹生屋純夫, 大原英史, 浅森浩一, 森岡宏之, 舟木泰智, 茂田直孝, 福島龍朗 (2007) : 幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階(第 1 段階)研究成果報告書 分冊「深地層の科学的研究」, JAEA-Research 2007-044.

大竹政和, 平朝彦, 太田陽子編 (2002) : 日本海東縁の活断層と地震テクトニクス, 東京大学出版会.

- 三枝博光, 瀬野康弘, 中間茂雄, 鶴田忠彦, 岩月輝希, 天野健治, 竹内竜史, 松岡稔幸, 尾上博則, 水野崇, 大山卓也, 濱克宏, 佐藤稔紀, 久慈雅栄, 黒田英高, 仙波毅, 内田雅大, 杉原弘造, 坂巻昌工 (2007): 超深地層研究所計画における地表からの調査予測研究段階 (第1段階) 研究成果報告書, JAEA-Research 2007-043.
- 酒井利啓, 松岡稔幸 (2019): 幌延深地層研究計画における広域スケールを対象とした地質構造モデルの構築データ集, JAEA-Data/Code 2019-007.
- 産業技術総合研究所 (2016): 海域地質環境調査確証技術開発 3 箇年とりまとめ (総括報告書) .
- 産業技術総合研究所 地質調査総合センター (2020): 20 万分の 1 日本シームレス地質図 V2 (データ更新日: 2020 年 4 月 6 日, <https://gbank.gsj.jp/seamless/>) .
- 澤田淳, 竹内真司, 三枝博光, 天野健治 (2007): 亀裂性岩盤におけるボーリング調査に基づく水理学的有効間隙率の設定について, 第 36 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp.273-278.
- 柴田賢, 棚井敏雄 (1982): 北海道第三紀火山岩類の K-Ar 年代, 北海道新第三系生層序の諸問題, 北海道新第三系総研事務局 (北海道大学理学部), pp.75-79.
- 深部地質環境研究センター編 (2007): 概要調査の調査・評価項目に関する技術資料, 一長期変動と地質環境の科学的知見と調査の進め方, 地質調査総合センター研究資料集, No.459, 産業技術総合研究所地質調査総合センター.
- SKB (2010): Post-closure safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark, Climate and climate-related issues, PSAR version, TR-20-12.
- 総合資源エネルギー調査会 (2014): 最新の科学的知見に基づく地層処分技術の再評価ー地質環境特性および地質環境の長期安定性について, 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 原子力小委員会 地層処分技術 WG.
- Spratt, R. M. and Lisiecki, L. E. (2016): A Late Pleistocene sea level stack, *Climate of the Past*, Vol. 12, pp.1079-1092.
- Suzuki, S., Ichimura, T., Saegusa, H., Kitagawa, Y. (2022): Case Studies of the Repository Layout Design in the Virtual SDMs, *American Nuclear Society, Proceedings of 2022 International High-Level Radioactive Waste Management Conference*, pp.597-606.
- 高林佑灯, 尾上博則, 高畑祐美, 鑑頭正, 奥木さくら, 橋本秀爾, 松尾重明, 三枝博光 (2025): 長期的な地形変化や海水準変動を考慮した四次元地質環境モデル構築と地下深部の水理場・化学場への影響評価に関する検討, 日本地質学会第 132 年学術大会, T8-O-5.
- 東京大学出版会 (2001): 日本の地形 1 総説.

辻隆司, 横井悟 (1994) : 北海道天北地域における新第三系珪質岩中の炭化水素トラップ, 石油技術協会誌, Vol. 59, pp.283-295.

上野哲朗, 竹内竜史 (2015) : 広域地下水流動研究における表層水理観測データ集—2014年度—, JAEA-Data/Code 2015-32.

梅田浩司, 谷川晋一, 安江健一 (2013) : 地殻変動の一様継続性と将来予測—地層処分の安全評価の視点から—, 地学雑誌, Vol. 122, No.3, pp.385-397

山本陽一, 前川恵輔, 横田秀晴, 山崎雅則 (2011) : 幌延深地層研究計画における表層水理調査流域の水文諸量の空間分布および地下水涵養量の推定—2004年12月～2009年11月—, JAEA-Research 2011-042.

謝 辞

本検討に関する委託業務の中でご支援いただいた、株式会社大林組，三菱マテリアルテクノ株式会社，株式会社イーエムジー，基礎地盤コンサルタンツ株式会社の関係者各位に深く感謝します。

(空白ページ)

原子力発電環境整備機構

(略称：原環機構)

Nuclear Waste Management Organization of Japan (NUMO)