

令和5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
(沿岸部処分システム評価確証技術開発)

平成31年度～令和5年度

とりまとめ報告書

令和6年3月

国立研究開発法人 産業技術総合研究所
公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター
一般財団法人 電力中央研究所

平成 31 年度～令和 5 年度 取りまとめ報告書 目次

第 1 章	はじめに	4
1-1	本事業の背景と目的	5
1-2	本事業の概要と 5 か年の計画	5
1-3	本報告書の構成	6
第 2 章	海陸連続三次元地質環境モデルの構築手法の高度化	8
2-1	海陸連続 3 次元地質環境モデル構築にかかるデータセットの整備とモデルの構築	9
(1)	背景と目的	9
(2)	実施内容	11
(3)	モデル化の手法	11
(4)	結果	19
(5)	まとめ	19
2-2	地質環境モデルの構築と地下水流動解析の高度化	21
(1)	背景と目的	21
(2)	実施方法	22
(3)	まとめ	46
2-3	塩淡境界近傍における地下水流動解析の高度化	49
(1)	目的と概要	49
(2)	3 層地質構造モデルの検討	50
(3)	5 層地質構造モデルによる検討	56
(4)	まとめと今後の課題	61
第 3 章	海陸連続 3 次元地質環境モデルの妥当性の検証に向けたデータ取得方法の高度化	63
3-1	陸域から海域にかけての地質環境特性の把握技術の高度化	64
(1)	背景	64
(2)	目的	64
(3)	結果	67
(4)	ボーリング結果から得られた概念モデル	73
3-2	地下水の流出場及び海底地形把握技術の高度化	76
(1)	背景	76
(2)	湧出水の効率的な探査および定量評価	77
(3)	採水技術および陸と海の地下水の連続性の検討	79
(4)	海域調査の実施における現地条件の重要性	80
(5)	海域調査に関する文献収集	81
(6)	まとめ	82
3-3	物理探査の高度化	84

(1) 背景と目的	84
(2) 実施内容	85
(3) 結果	87
(4) まとめ	92
第4章 沿岸海底下特有の地質環境に着目した工学技術の高度化	93
4-1 はじめに	94
(1) 実施概要	94
(2) 廃棄体周辺の状態変遷と研究の位置づけ	95
4-2 セメント系材料の短期的な変質挙動に関する知見拡充	100
(1) 背景と目的	100
(2) 実施内容	102
(3) 5か年の成果と今後の課題	112
4-3 緩衝材の機能変化に係るデータの拡充	116
(1) 背景と目的	116
(2) 実施内容	117
(3) 5か年の成果と今後の課題	130
4-4 緩衝材-オーバパックの相互作用と緩衝材仕様に関わるデータの拡充	135
(1) はじめに	135
(2) 要素問題（要素試験）	137
(3) 境界値問題（模型試験および数値解析）	143
第5章 分野間連携	154
5-1 はじめに	155
(1) 背景	155
(2) 目的	156
5-2 分野間連携の進め方	156
(1) 基本方針	156
(2) WGの概要	158
5-3 分野間連携の概要	159
(1) 駿河湾地域における地質環境モデルと現地ボーリング調査のデータ共有	160
(2) 密度流解析での連携	160
(3) 人工バリア構成材料の耐久性試験に対する実地下水採取	160
(4) 緩衝材の性能評価に関する連携	162
(5) ボーリング掘削・調査の体系化	162
5-4 分野間連携の目的・目標達成	165
(1) 駿河湾地域における地質環境モデルと現地ボーリング調査のデータ共有	166
(2) 密度流解析での連携	167

(3) 人工バリア構成材料の耐久性試験に対する実地下水採取.....	167
(4) 緩衝材の性能評価に関する連携.....	168
(5) ボーリング掘削・調査の体系化.....	169
5-5 分野間連携の課題.....	169
(1) 駿河湾地域における地質環境モデルと現地ボーリング調査のデータ共有.....	169
(2) 密度流解析での連携.....	170
(3) 人工バリア構成材料の耐久性試験に対する実地下水採取.....	170
(4) 緩衝材の性能評価に関する連携.....	170
(5) ボーリング掘削・調査の体系化.....	171
5-6 次フェーズに向けての留意点.....	171
(1) 駿河湾地域における地質環境モデルと現地ボーリング調査のデータ共有.....	171
(2) 密度流解析での連携.....	172
(3) 人工バリア構成材料の耐久性試験に対する実地下水採取.....	172
(4) 緩衝材の性能評価に関する連携.....	172
(5) ボーリング掘削・調査の体系化.....	173
5-7 おわりに.....	173
第6章 まとめ.....	173
6-1 まとめ.....	174
(1) 海陸連続3次元地質環境モデルの構築手法の高度化.....	174
(2) 海陸連続3次元地質環境モデルの妥当性の検証に向けたデータ取得方法の高度化.....	176
(3) 沿岸海底下特有の地質環境に着目した工学技術の高度化.....	177
6-2 図目次.....	182
6-3 表目次.....	186
6-4 二次利用未承諾リスト.....	187

第1章 はじめに

1-1 本事業の背景と目的

地層処分に対する国民理解を深めるために、国は2017年7月に科学的特性マップを公表し（資源エネルギー庁、2017）、原子力発電環境整備機構（NUMO）は2021年に包括的技術報告書を公開している。これにより、地層処分事業は飛躍的に前進した。我が国において、これまでの原子力発電の利用に伴って既に放射性廃棄物が発生しており、その処理処分対策を着実に進める必要がある。放射性廃棄物の対策については、2000年に成立した「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」（最終処分法）に基づき、地下300m以深の安定した地層に高レベル放射性廃棄物等を処分（地層処分）する方針である。高レベル放射性廃棄物等の地層処分においては、天然の岩盤（天然バリア）と人工的な構築物（人工バリア）から構成される多重バリアシステムによって長期的な安全確保がなされ、この処分システムの成立性や安全性に係る信頼性を一層高めていくためには、天然バリアと人工バリアの特性把握と将来変化に係る調査評価技術の信頼性向上が重要である。高レベル放射性廃棄物の最終処分に向けて公表した科学的特性マップでは、沿岸の陸域20kmの範囲を廃棄物の輸送面でも好ましい範囲としている。しかし、沿岸陸域から海底下においては、塩水の影響や海陸接合部などの沿岸部固有の環境を考慮した、地質環境の調査技術・工学技術のさらなる高度化が不可欠である。

これらの状況を踏まえ、本事業では、我が国における沿岸部固有の環境を踏まえ、概要調査段階から精密調査段階で必要となる地質環境の調査・工学に関する技術開発に取り組むことにより、地層処分技術の信頼性及び安全性の更なる向上を図る。

1-2 本事業の概要と5か年の計画

沿岸部は陸域と比較して、地質環境データが乏しく、また、人間活動の中心であることから調査手法も制限される。したがって地質環境分野においては、そのような条件下において、地層処分事業を進めるうえで非常に重要となる地質環境モデルを、沿岸部を対象にした場合にどのように構築していくのかについて検証していく作業は必要不可欠である。また出来上がったモデルの妥当性をどのように検証していくのかについても、沿岸部に適した調査手法を検討し、高度化していくことも同時に進めていく必要がある。また工学技術分野の側面では、沿岸海底下に処分サイトを建設すると仮定した際に、地層処分における安全性を担保するためには、沿岸部の多様な地下水を想定した人工バリアの性能評価に必要なデータを収集しておくことは非常に重要である。そのため、本事業の事業計画は以下の3つの大きなテーマから構成されている。

- (1) 海陸連続3次元地質環境モデルの構築手法の高度化
- (2) 海陸連続3次元地質環境モデルの妥当性の検証に向けたデータ取得手法の高度化
 - ①陸域からの海域にかけての地質環境特性の把握技術の高度化

②地下水の流出場及び海底地形把握技術の高度化

③物理探査技術の高度化

(3) 沿岸海底下特有の地質環境に着目した工学技術の高度化

本事業が開始された平成 31 年度からの 5 年間の全体スケジュールを表 1-2-1 に示す。各テーマにおいて実施した研究内容の概要については 2 章以降に後述する。

1-3 本報告書の構成

本稿では、2 章から 4 章において、上述した 3 つのテーマに関する研究内容の概要を紹介する。その際、実施した研究テーマごとに背景と目的、実施内容、5 か年の成果と課題について記載した形となっている。また 5 章では本事業で実施した地質環境分野と工学技術分野との分野間連携について記載する。分野間連携については、各年度の成果報告書ではアペンドィクスとして扱ってきたが、連携を進めるうちに、実施した研究テーマと大きく関連するようになり、また本事業において、重要となる成果の最大化と社会実装に必要なものとなったため、本稿では 1 つの章として取り扱うこととした。

表 1-2-1 5か年の全体計画（概要）

実施スケジュール 5か年計画（概要）

— 産業技術総合研究所
— 原子力環境整備促進・資金管理センター
— 電力中央研究所

沿岸部処分システム評価確証技術開発	平成31年度	令和2年度	令和3年度	令和4年度	令和5年度
(1) 海陸連続3次元地質環境モデルの構築手法の高度化		全国海陸連続地質環境モデルの構築		塩水流動モデルの構築と検討	
	課題整理・実施計画	沿岸部の地質環境モデルの試作と地下水流動解析			成果まとめ
(2) 海陸連続3次元地質環境モデルの妥当性の検証に向けたデータ取得手法の高度化		地元説明・用地交渉	ボーリング調査および採水		物理検層の検証など
			火山岩地域における海底湧出地下水ならびに海底地形の探査		成果まとめ
(3) 沿岸海底特有の地質環境に着目した工学技術の高度化			浅海域における反射法物理探査手法の高度化		沿岸部事業における海域調査の成果とりまとめ
			工学技術への情報提供手法(連携)の効率化と適正化		
① 沿岸部に特有な地下水化学環境におけるセメント系材料の短期的な変質挙動に関する知見拡充	課題整理・試験計画	セメント系材料の化学変質と力学的特性に関する検討			成果とりまとめ
		現実的な材料および条件における化学変質と力学的特性に関する検討	地下水や材料の種類に応じた強度推定手法の検討		
② 沿岸部に特有な地下水化学環境における緩衝材の機能変化に係るデータの拡充	塩水環境試験条件の整理	緩衝材の力学挙動への塩水の影響に関する試験			成果とりまとめ
	オーバーバック挙動単純模型試験	緩衝材の化学挙動への塩水の影響に関する試験と分析			成果とりまとめ
③ 緩衝材-オーバーバックの相互作用と緩衝材仕様に関するデータの拡充	基礎物性取得試験	自己修復性試験(緩衝材せん断試験の応用)	オーバーバック長期挙動試験		化学的作用を考慮したせん断試験
					化学的相互作用に着目した試験・分析
○ 再冠水に至る期間を対象とした性能評価手法に係る基盤整備	体系化要素の整理	性能評価に関わる沿岸部の地下水挙動に関する情報整理			力学的相互作用に関する数値解析
		性能評価手順書要素の作成(緩衝材)			成果とりまとめ

第 2 章 海陸連続三次元地質環境モデルの 構築手法の高度化

はじめに

本章では、海域を意識した沿岸部を対象とした地質環境モデル (Site Description Model : SDM) の構築手法の高度化について述べる。本事業では、文献調査から概要調査段階までを対象を時間軸やスケールの異なる 3つの SDM の構築手法の高度化を実施した (図 2-1-1)。3つの SDM は全国を対象としたジェネリックなモデルと特定の地域を対象としたサイトスペシフィックなモデルとに大別される。これは、地層処分事業が進む中で、よりジェネリックなものからサイトスペシフィックへとモデルが詳細化されるためである。またサイトスペシフィックなモデルについても、広域からより局所的なモデルへと目的に沿ってスケールダウンしていく必要がある。本事業では、このような局面の異なる段階で必要となるであろう SDM について、それぞれの目的と構築手法の整理と検証を実施した。

2-1 海陸連続 3次元地質環境モデル構築にかかるデータセットの整備とモデルの構築

(1) 背景と目的

Ueda et al. (2014) などの過年度事業における研究成果から、沿岸部では陸域起源の淡水性地下水が沿岸海底下に存在していることが明らかとなっている。このような現象には、海進海退のような集水域の面積を大きく変化させる超長期の地球規模の環境変化が大きくかかわっており、さらに地下水の流動に影響を与える一因として、海底地形や海底地質が大きくかかわっている。そのため、沿岸部における地下水環境を地層処分スケールの超長期にわたって評価するためには、海域の情報を加味した海陸連続の 3次元地質環境モデルを構築することが必要不可欠である。また、従来の地下水モデルについては、対象とする流域における、より精緻な地下水流動を表現することが目的とされることが多いため、データ密度や異なる構築手法を用いた、別々の流域を対象としたモデル同士を比較することは困難である。一方で、地層処分事業では、複数の候補地の中から最終的に 1つの処分サイトを選定する必要があり、このような過程で地域のステークホルダーあるいは国民全体に対し、異なる地域あるいは流域の地質環境特性の違いから生じる処分サイトとしての特定の地域の優位性を相対的に示していくためには、全国の沿岸地域を一律に評価できるようなモデルの構築手法が必要となる。そこで、本研究では、まず公的機関が全国を対象に発行している陸域と海域の地形や地質データを収集し、それらをデータセットとして整理したうえで、それらのデータのみを用いて、全国 55 の海岸平野や島嶼を対象に統一的な手法を用いて地質環境モデルを構築することを試みた。

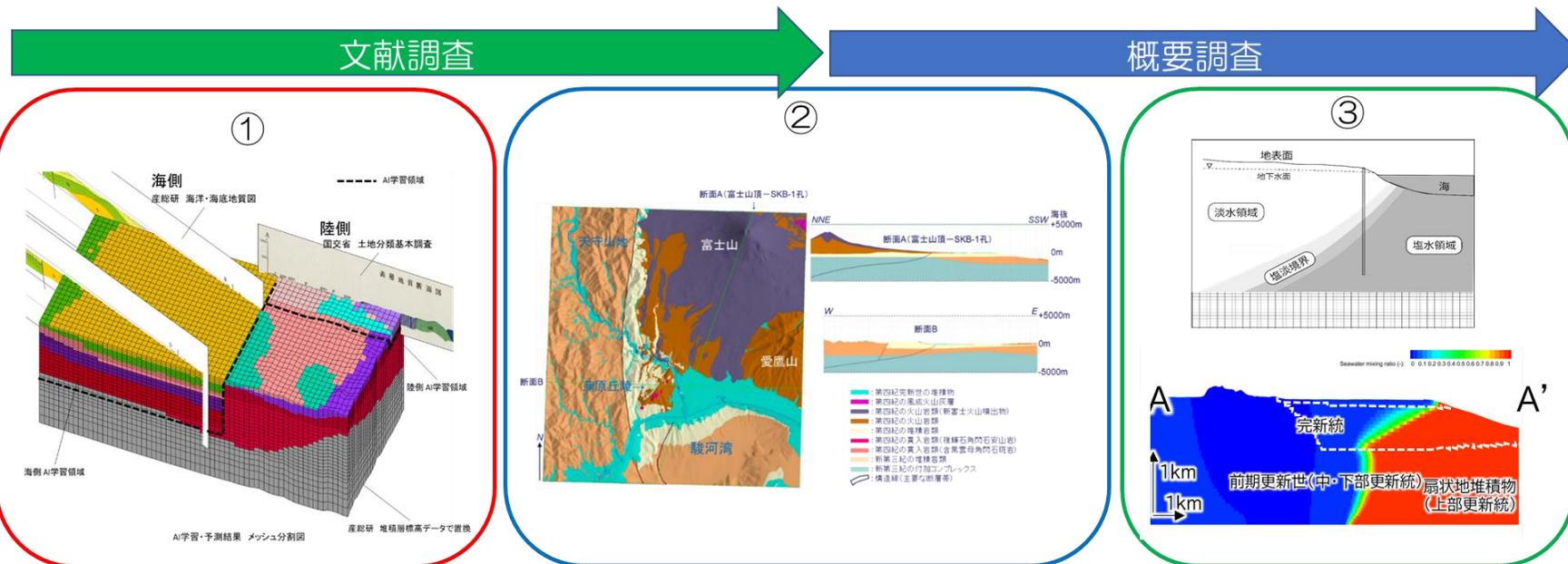


図 2-1-1 各地質環境モデルのスケールと時間軸

- ① 全国を統一基準で比較可能な地質環境モデル（ジェネリックな地質モデル）
- ② 特定の地域を対象とした広域地質環境モデル（サイトスペシフィックな地質モデル）
- ③ 特定地域の沿岸部（塩淡境界近傍）を対象とした狭域地質環境モデル（サイトスペシフィックな地下水モデル）

(2) 実施内容

本研究では、上述したようにデータ密度によるモデル間の差をできるだけ小さくするために公的機関が全国を対象に発行している地質環境データを収集した。なお、収集したデータの範囲は、海岸線から内陸に 20km と海側に 30km の範囲である。収集したデータの一覧を表 2-1-1 に示す。また、これらのデータを使ったモデル化においては、単純に統計学的処理に基づいた統計モデルと、地質的な知見を考慮に入れたエキスパートモデルの 2 種類を作成し、それぞれのモデルに対する比較・検証を実施した。2 種類のモデルを構築した理由は、エキスパートジャッジの有無がこれらの地質構造概念モデルに基づいた下水流動解析結果にどのような影響を与えるのかを評価するためである。ここでいうエキスパートジャッジは表層地質図における断層や褶曲の情報を地下まで反映したモデルのことであり、統計モデルとは、これらの情報を加味しないモデルのことである。

本研究においてモデルを作成した 55 地域は以下のとおりである。

稚内、幌延、勇払、頓別、美幌・斜里、釧路、十勝、石狩、津軽、下北、三本木、能代、秋田、庄内、石巻、仙台、磐城、常磐、越後、高田、富山、金沢、福井、駿河、静岡、遠州、豊橋、岡崎、濃尾、伊勢、和歌山、大阪、播磨、鳥取、倉吉、出雲・松江、岡山、福山・尾道、小郡、徳島、讃岐、松山、高知、伊予、行橋、直方、福岡、筑紫、中津、別府、大分、八代、宮崎、笠之原、対馬

各地域の解析結果については、産業技術総合研究所ほか(2021)の APPENDIX に詳細が報告されているため、ここでは概要のみを紹介する。

(3) モデル化の手法

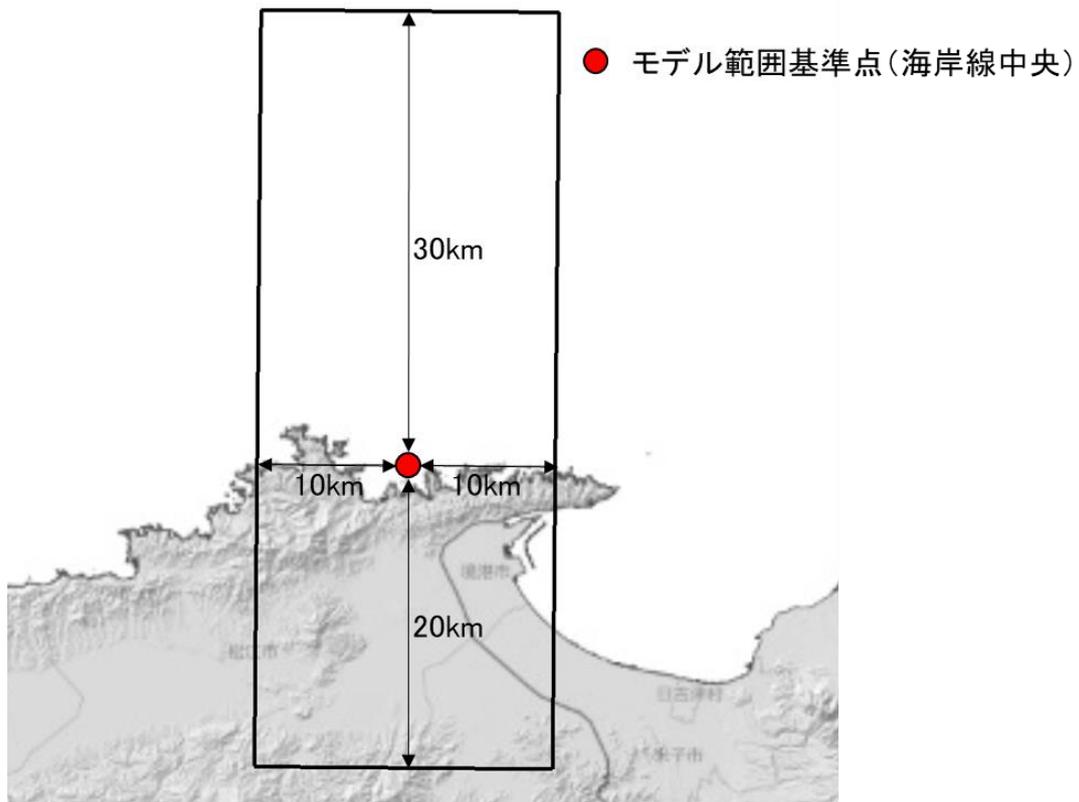
モデル化の範囲については、図 2-1-2 に示すように、一部を除き、1 地域 20km×50km×3km (深度) とした。今回、収集した公的機関が出しているデータのうち、基本となる地質のデータについては、同じ地質の種類を見ても出版物ごとに分類の仕方が異なる。例えば、産総研が出版している表層地質図では、層序名で分類を実施しているが、国交省が出版している土地分類基本調査では岩相の種類による分類を実施している。そのため、これらのデータを、越谷・丸井(2012)に収められている深部ボーリングデータリストを基に作成した堆積層標高データにおける地質年代をもとにした分類に再定義し、AI を用いてモデル化を行った。一例として幌延の事例を図 2-1-3 に示す。地質割り当ての為の AI 学習・予測は、海側と陸側でそれぞれ実施した。

海側と陸側の AI 学習領域について、水平方向は海岸線を基に 2 分し、それぞれ 2 断面以上ある場合は海側(陸側)領域全体を AI 学習領域とする。1 断面しかない場合は、断面周囲 5km を AI 学習領域とした。鉛直方向は海側の場合、地表～海側の全断面の下面中央値を AI 学習領域とした。陸側も同様に設定した。AI 学習領域外の要素については、産総研の堆積層 DB で補間した。

表 2-1-1 本研究において収集したデータ一覧

種類	項	詳細項目	Statistical Model (統計モデル)	Expert Model (専門家モデル)
データ	画像データ	全国大データ 1 (産総研 海洋・海底地質図)	○	○
		全国大データ 2 (産総研 海域地質構造データベース)	データ無し	データ無し
		全国大データ 3 (国交省 土地分類基本調査)	○	○
		全国大データ 4 (海保庁 海底地質構造図)	○	○
		全国大データ 5 (海保庁 海底火山データベース)	データ無し	データ無し
		全国大データ 6 (国土地理院 地勢図、地形図)	△(※)	△(※)
		地域、学会データ	×	×
	標高データ	全国大データ 7 (産総研 堆積層標高データ)	○	○
	境界データ	断層、背斜、向斜データ (全国大データ 1, 3, 1)	-	○
データの抽出 (データセット構築、データの数値化)			ジオモデラー	
物性	材料定数(透水係数)	全国統一データ	○	○
		地域 (計測値) データ	×	×
	材料定数(間隙率)	全国統一データ	○	○
		地域 (計測値) データ	×	×
	材料定数(不飽和特性)	全国統一データ (地質に依存)	○	○
		地域 (計測値) データ	×	×
	材料定数(分散長)	全国統一データ (地質に依存)	○	○
		地域 (計測値) データ	×	×
	材料定数(熱伝導係数)	全国統一データ (地質に依存)	○	○
		地域 (計測値) データ	×	×
モデル化	データ新旧		新規データ優先	
	データ範囲 (水平)		断面位置5km範囲	モデル全域対象
	データ範囲 (鉛直)		データ密度考慮	全データ使用
	AIによるモデル化 (確率・統計の考慮)		○	○
	地質の統合 (全国大データ 1, 3, 1)		地層順序考慮	

※全国大データ 7 で間接的に利用



出雲モデル範囲

図 2-1-2 モデル化の範囲

AI学習・予測に使用する全断面の地質の年代、地質種類より、産総研 堆積層標高データのどの地質に当てはまるか推測し、対応を取る。

AI学習・予測結果 材質一覧表

記号(※)		堆積層	地質種類	年代	
産総研	国交省				
		H		第四紀	更新世-完新世
		Q3			更新世
		Q2			
		Q1			
		N3		新第三紀	中新世-鮮新世
		N2			中新世
		N1			
		Base	N1以下の基盤	-	
Tu			天壳沖層群	第四紀	中期更新世-完新世
Eb			遠別沖層群		更新世
Hb			羽幌沖層群	新第三紀	中新世-鮮新世
Ts			天塩沖層群		中期中新世
Bs			音響基盤	先第三紀	-
	s		砂	-	沖積世
	P		泥炭	-	沖積世
	ss		砂岩	第三紀	-
	alt		砂岩・泥岩互層	第三紀	-
	mst		泥岩	第三紀	-
	ms		泥岩	先第三紀	-

※産総研:産総研 海洋・海底地質図
 国交省:国交省 土地分類基本調査
 堆積層:産総研 堆積層標高データ

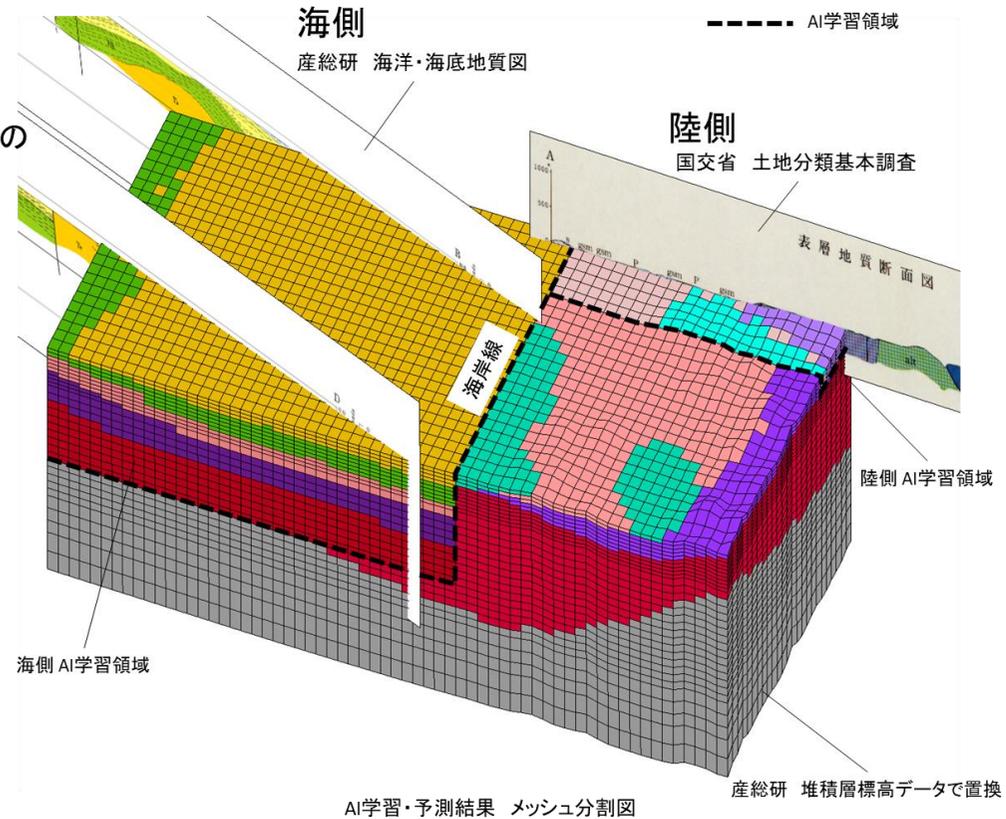


図 2-1-3 AI 学習・予測を用いた地質構造モデル（幌延沿岸部）

作成したモデルに対し、気候変動や海水準変動など外的要因の変化、文献値による透水係数や間隙率を想定したうえでのグリッドサイズ、計算時間分割、工学的な設計を考慮に入れての温度密度流と塩分密度流の三次元連成解析を実施するうえでの計算領域の取り方や種々の制限項目を整理した。また、下記に示す解析時の要素（パラメータ、境界条件、外的要素、計算時間）についても整理を実施した。

①パラメータ

データ発行期間の凡例を整理し、直接読み取れるパラメータと解釈されるパラメータに分けて、それぞれ地域ごとに整理する。また THMC を考慮したうえで、欠けているパラメータも地域ごとに整理する。

②境界条件

後の解析に必要な水理境界の条件を設定する指針を取りまとめる。取りまとめは必ずしも地域ごとでないため、一体的な指針を整理する。

③外的要素

後の解析時に考慮しなければならない THMC に寄与する外的な要素を挙げる。またこの要素について、時間ステップの幅や変異の幅を考察する。

④計算時間

上記①から③を考慮し、同時にペクレ基準やクーラン基準も踏まえた理想的な時間ステップを考察する。特にこの計算ステップが何に起因するか明示する。

文献値を基にした材料定数の設定例を表 2-1-2 に示す。本表の材料定数に対し、観測値などを使った最適化手法を行う事で、各地域の定数の最適化が可能となった。代表例として幌延地域の最適化定数を表 2-1-3 に示す。

本業務で作成した幌延の地質モデル（水平幅：50 km×20 km、鉛直幅：3 km、鉛直方向層数：30 層）において、クーラン基準、ペクレ基準を満たすように時間ステップを設定した際の計算時間の目安を表 2-1-4 に示す。目安計算時間は 8 万年の解析を実施した際の時間とした。

幌延モデルに必要となる解析条件を表 2-1-5 に示した。初期条件は、全領域を全水頭値=0 m、海水混合率=1.0 とした。温度は、底面 100 °C から地表面（海底面）を約 20 °C として線形に分布させた。

深部地下水の超長期的安定領域を推測するため、エキスパートモデルを用いて有限要素法による温度密度流と塩分密度流の三次元連成解析を行い、水質の分布やその特性を考察した。次に、海水準変動を考慮した現在より 24 万年の温度密度流と塩分密度流に係る非定常連成解析を実施した。この解析においては、透水係数など解に影響する感度の高い材料定数を設計変数とし、滞留時間（地下水年代）と塩分濃度を目的変数とする最適化解析を実施し、各地域における材料定数の最適値を求めた。最後に、最適化解析により得られた材料定数の最適値を用いて三次元連成解析を実施し、最適設計変数の適用前後で解を比較、評価した。この解析は、地形・地質・海水準を固定条件として与え、初期の状態として地質が海水

で満たされたところからの降水による洗い出し解析とした。降水量には、現在の各地の平均降水量を与えた。時間ステップは100年とし、各ステップ内で地下水位・地下温度分布・塩分濃度分布が大きく変化せず、安定するまでの解析を実施した(図2-1-4)。これに基づき、過去の物理探査結果(Ueda et al., 2014)と今回の解析結果の比較を図2-1-5で行った。地層処分技術においては、地下水環境の把握は極めて重要であり、天然バリアとしての特性を評価する技術開発が求められている。沿岸域における指定地域の有限要素法解析モデルを適切な水理解析条件により構築し、計算が長時間かかる温度密度流と塩分密度流の三次元非定常連成解析を実施し最適(同定)値を得る必要がある。本解析では、24万前から現代までの気候変動(海水準、気温、降雨量の変化)を考慮した解析を実施するため、伊勢・米田(1997)を基に各年代の海水準を元に海岸線の変動を考慮した。

表 2-1-2 材料定数設定例

地質	透水係数[m/y]		有効間隙率 [-]	比貯留係数 [m ⁻¹]	分散長[m]		熱伝導係数 [J/(m·Kyear)]
	水平方向	鉛直方向			縦	横	
H	1.07E+03	1.07E+01	0.4	6.97E-03	4.00E+03	4.00E+02	4.73E+06
Q3	5.68E+02	5.68E+00	0.25	6.97E-04	5.00E+03	5.00E+02	4.73E+07
Q2	1.23E+02	1.23E+00	0.25	3.97E-04	5.00E+03	5.00E+02	4.73E+07
Q1	3.03E+01	3.03E-01	0.25	1.97E-04	5.00E+03	5.00E+02	4.73E+07
N3	2.05E+01	2.05E-01	0.2	7.06E-05	6.00E+03	6.00E+02	4.73E+08
N2	1.58E+01	1.58E-01	0.2	3.06E-05	6.00E+03	6.00E+02	4.73E+08
N1	9.78E+00	9.78E-02	0.2	1.06E-05	6.00E+03	6.00E+02	4.73E+08
B	3.15E-03	3.15E-03	0.15	7.06E-06	6.00E+03	6.00E+02	4.73E+08

表 2-1-3 幌延地域の材料定数最適値

地域	地質	透水係数 [m/y]		有効間 隙率 [-]	比貯留 係数 [m ⁻¹]	分散長 [m]		熱伝導係数 [J/(m· Kyear)]
		水平方向	鉛直方向			縦	横	
幌延	H	1.07E+03	1.07E+02	0.4	6.97E-03	4.00E+03	4.00E+02	4.73E+06
	Q3	5.68E+02	5.68E+01	0.25	6.97E-04	5.00E+03	5.00E+02	4.73E+07
	Q2	1.23E+02	1.23E+01	0.25	3.97E-04	5.00E+03	5.00E+02	4.73E+07
	Q1	4.80E+01	4.80E+00	0.25	1.97E-04	5.00E+03	5.00E+02	4.73E+07
	N3	2.05E+01	2.05E+00	0.2	7.06E-05	6.00E+03	6.00E+02	4.73E+08
	N2	2.05E+01	2.05E+00	0.2	3.06E-05	6.00E+03	6.00E+02	4.73E+08
	N1	9.78E-01	9.78E-02	0.2	1.06E-05	6.00E+03	6.00E+02	4.73E+08
	B	1.25E-01	1.25E-01	0.15	7.06E-06	6.00E+03	6.00E+02	4.73E+08

表 2-1-4 要素長別の計算時間目安

水平要素長 (m)	モデル総要素数	目安計算時間 (日)
200	750000	16.0~80.0
400	187500	4.0~20.0
500	120000	2.6~12.8
600	82170	1.8~8.9
700	62640	1.3~6.5
800	47250	1.0~5.0

表 2-1-5 幌延モデル境界条件

	海側	陸側	底面	側面
浸透条件	海底面を水位=0m で一定条件	地表面を 降雨量=1.139 (mm/year) で一定条件	不透水境界	不透水境界
塩分条件	海底面を濃度=1.0 で一定条件	地表面を濃度=0.0 で一定条件	不通過境界	不通過境界
温度条件	海底面を海水温=12.95°C で一定条件	地表面を気温=7.23°C で一定条件	100°C で一定条件	断熱境界

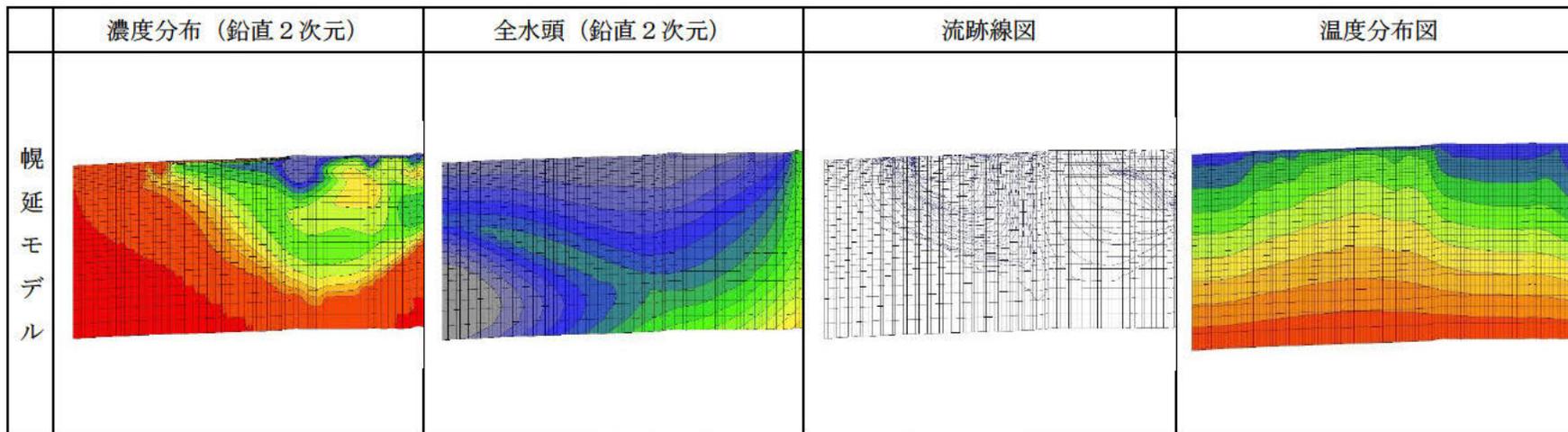


図 2-1-4 幌延地域の最適化解析結果

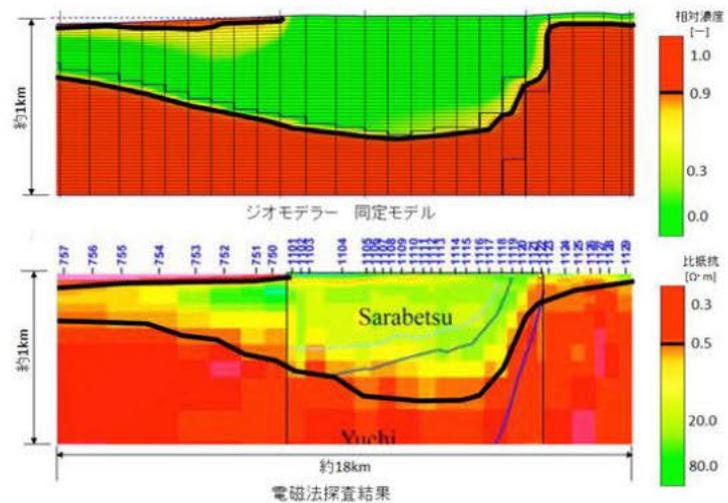


図 2-1-5 幌延沿岸域 塩分濃度の比較 (上: 解析結果、下: 物理探査)

(4) 結果

解析結果は以下のとおりである。

- ・地下水年代については、計測値に近い良好な結果が得られた。
- ・塩分濃度について、既往の研究（平成 30 年度ほか）に用いられた電磁法探査結果より計測値を設定した。電磁法探査結果と比べ今回の最適化解析結果は、塩淡境界が深度約 2.5 km まで広がっている。これは、塩淡境界を電磁法探査結果と同定するため材料分布を変更している点、今回の解析では地下水年代を同定するため各材質の透水係数を変更している点が影響していると考えられる。
- ・温度分布についても、文献値が得られなかったため、調査地点近郊のボーリングデータより計測値を設定した。ボーリングデータは水平位置、深度が文献中の調査地点と異なるので参考値として扱った。

(5) まとめ

地質環境モデルを作成するには、地質や地下水のモデル化に加えて、生物多様性までも考慮に入れた要素・項目をモデル化する必要がある。このため、各要素の遷移する時間を考慮する必要があり、地域や気候変動帯、地質年代ごとの差異をとらえる必要がある。当該課題においては、先ず初めに、我が国の公的機関が発行している沿岸部に係るデータ（図幅）をリスト化し、さらに既往文献を地域ごとに整理した。

その上で、地質（地質構造）と地下水（特にジェネラルフロー）に着目して、我が国の公的機関が発行しているデータ（図幅）をもとに、地質環境モデル構築の第 1 歩として、その地質概念モデルを作成した。その際、地下水流動に影響を与える断層や褶曲構造の推定に対するエキスパートジャッジの有無による影響を把握するため、エキスパートジャッジを排除した統計モデルも同時に作成した。データが疎な地域においては、これら 2 つのモデルに大きな隔たりは見られなかったが、地質調査などが盛んにおこなわれている地域での隔たりは大きかった。また、この 2 つのモデルを比較することで、地層処分事業の段階を進めるために重要な調査のポイントが浮き彫りになったと考える。

さらに当該研究では、我が国の沿岸地域における、海陸連続の三次元温度密度流・塩分密度流に係る非定常連成解析を実施したことで、滞留時間（地下水年代）と塩分濃度、地下水流跡線、水頭圧分布を見える化できた。換言すれば、公的機関が発行するデータを用いて、沿岸部のジェネリックな地下水環境を把握できたと考える。

参考文献

- 越谷 賢・丸井敦尚, 日本列島における地下水賦存量の試算に用いた堆積物の地層境界面と層厚の三次元モデル (第一版). 地質調査総合センター研究資料集, no.564, 産業技術総合研究所地質調査総合センター. 2012.
- 産業技術総合研究所, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 電力中央研究所. 令和 3 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 (沿岸部処分システム評価確認技術開発) 成果報告書 分冊 APPENDIX, 2021, pp.1-834.
- Ueda T., Y. Mitsuhashi, T. Uchida, A. Marui, A new marine magnetotelluric measurement system in a shallow-water environment for hydrogeological study, *Journal of Applied Geophysics*, vol. 100, 2014, pp.23-31.

2-2 地質環境モデルの構築と地下水流動解析の高度化

(1) 背景と目的

沿岸部は、科学的特性マップで示されたように、高レベル放射性廃棄物処分の候補地として、輸送の観点から適性が高いとされている。しかし、沿岸部は、内陸に比べて調査データが少なく、地質環境モデル (Site Descriptive Model, SDM) の構築に関する不確実性が多く存在すると考えられる。このため、不確実性の取り扱いを考慮した地質環境モデルの構築方法を検討しておく必要がある。地質環境モデルとは、地質分布などを示した地質図 (地質モデル) と、地質図をベースにした熱・地下水・力学・化学などの地質環境特性の主題図を束ねたものである (例えば、幡谷・楠原, 2023)。本研究では、地質環境特性のうち地下水流動を取り上げ、地質モデルと地下水モデルを束ねたものを地質環境モデルと呼ぶこととする。

そこで、本項目では、沿岸部における地質モデルが有する不確実性が地質環境特性 (地下水流動) に与える影響を明らかにし、地質環境モデルが有する不確実性を低減させるための方策を提案する。

現在、富士川河口付近でボーリング調査が進められているため、この地点を事例研究の対象として、文献調査から概要調査で計画されている手順で、地質・地下水モデルを構築し、その不確実性とそれを低減する方法を検討する。

富士川河口付近の駿河湾沿岸部を研究対象とした理由は、①本地点が、わが国でも有数の地殻変動が激しい地域であり、地質分布・地質構造の作業仮説を複数議論しやすいこと、②地質や地下水に関して既存データが多いこと、③地下水の流れが非常に速い地域の一つであり、地下水流動に関わる現象を把握しやすいこと、が期待されるためである。

この地点を対象として、図 2-2-1 に示すように文献調査、地質モデル作成、地下水モデル作成、地下水流動解析、原位置調査、調査結果の地質モデルへの反映という、繰り返しアプローチを行うことは、調査の各段階における調査内容の確認や将来的な課題を抽出するうえで有益であると考えられる。

本研究では、①地質のモデル化と地下水流動の解析を繰り返すことにより、地質環境モデル (ここでは地質モデル+地下水モデル) 構築フローの高度化を図る、②地質の不確実性を複数の作業仮説で表現し、想定される地下水流動解析モデルを比較することにより、地質の不確実性が地下水流動の評価に与える影響を検討する、③地質モデル・地下水モデルの不確実性を低減するために必要な調査・評価方法を明らかにする、ことを実施する。高レベル放射性廃棄物の処分事業において、様々な技術を適用し、それらを取り纏めていく必要がある。地質環境モデルは、これらの分野間をつなぐ、インターフェースになることが期待される。

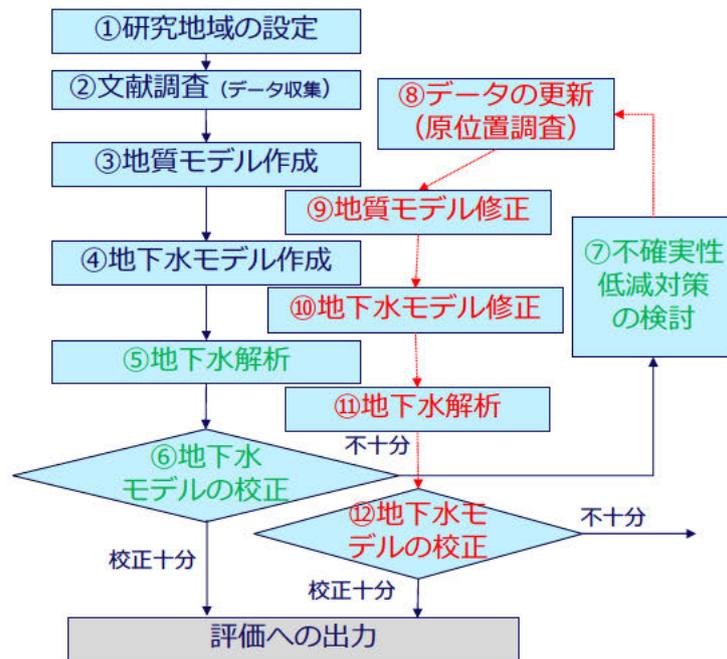


図 2-2-1 本研究のフローチャート

(2) 実施方法

本検討では、地質環境モデルの構築と地下水流動解析の高度化について、富士川河口付近を対象に、図 2-2-1 内の①～⑫に示す繰り返しアプローチで実施した。図 2-2-1 内の①～⑫の実施項目に従って、実施内容を概説する。なお詳細は後述するが、本研究では、③において地質モデルを構築する前段階として、作業仮説を定性的に表現した概念図を作成しており、これを地質モデルと区別して地質概念モデルと呼ぶ。

① 研究地域の設定

始めに大まかな地域を仮設定したのち、地形のみを考慮した地下水流動解析を実施し、検討対象とする領域を絞り込んだ。

事例研究地域の中心となる富士川は一級水系富士川の本流であり、富士川の延長は 128 km、流域面積は 3,990 km²におよび、静岡県、山梨県、長野県にまたがる。富士川河口を中心とした検討地域を設定したが、広域的な地形に基づくと、富士川流域が非常に広範囲にわたるため、上流側の分水嶺位置の決定が困難であった。このため、上流側は甲府盆地、下流側は駿河湾について拡張して評価領域の設定を行った。

地形は、陸域は国土地理院基盤地図情報数値標高モデル 10 m メッシュ（国土地理院、2016）、海底は M7001 Ver2.2 関東南部データ（日本水路協会、2008）を使用した（図 2-2-2）。

広域モデルは、富士川流域（甲府盆地を含む）と相模湾全域を包含するモデルとした。東西約 77 km、南北約 162 km、駿河湾及び富士川流域を網羅する範囲である。数値解析モデ

ルは、水平方向を 500 m グリッドで分割し、底盤標高を EL.-5,000 m に設定し、鉛直方向の分割数を 40 層とした（要素数：約 200 万）。

解析条件を表 2-2-1 に示す。地質モデルは均質とし、透水係数と降雨浸透条件に関する感度解析を行った。この結果、透水係数が 1.0×10^{-6} m/s、降雨涵養量が 2,000 mm/y の場合が、後述する水位分布と比較的近いため、この条件で解析を実施することとした。降雨涵養量は後述するように、土（2007）によれば、2,000 mm/y 程度と想定されるため、この値に対して、実測値に整合的な水位（小野ほか、2016）を形成する透水係数を求めた。ここでは、海水の密度影響を考慮した解析を実施しており、海域の圧力境界条件には、海水の密度を考慮した静水圧を用いた。なお、地下水流動・物質移行解析には、Aquanty 社が開発した HydroGeoSphere を使用した（Aquanty, 2015）。

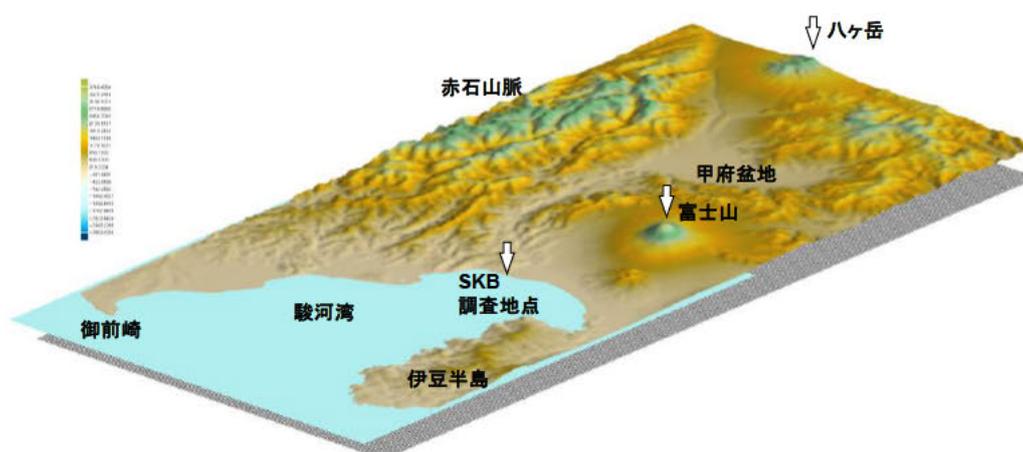


図 2-2-2 広域モデルの領域の鳥瞰図

表 2-2-1 解析条件

		地下水流動	物質移行
物性値		透水係数： 1.0×10^{-7} 、 1.0×10^{-6} [m/s]	間隙率：20 [%] 分散長：縦 500 [m]、横 50 [m] 分子拡散係数： 1.0×10^{-9} [m ² /s]
境界条件	陸域	降雨浸透条件：2,000 [m/y]	海水濃度：0
	海域	静水圧（海水面）	海水濃度：1
	その他	不透水境界	$\frac{\partial C}{\partial x} = 0$
特記事項		海水の密度： $\rho = 1 + 0.025C$ ここに、 ρ は密度、 C は海水濃度	

全水頭、塩分、ダルシー流速ベクトルの解析結果を標高-500 m での平面分布を図化した

(図 2-2-3)。海域に解析結果の表示がない領域が存在するのは、海域の標高が深く、解析結果がその平面に存在しないためである。すなわち、標高-500 m 以深の領域が駿河湾に広く存在することを示している。

一方で、富士山麓周辺の分水嶺（赤線）で区切った領域が狭域モデルであり、狭域モデルでの全水頭分布、海水濃度、ダルシー流速は広域に近いことから、狭域で評価が可能と考えた。広域モデルの領域に対して、深度方向は 5,000 m と非常に薄いため、狭域モデルで評価しても地下水流動などは大きく変わらないと考えられた。このため、赤線で区切った狭域モデルを抽出し地下水流動解析を実施した。

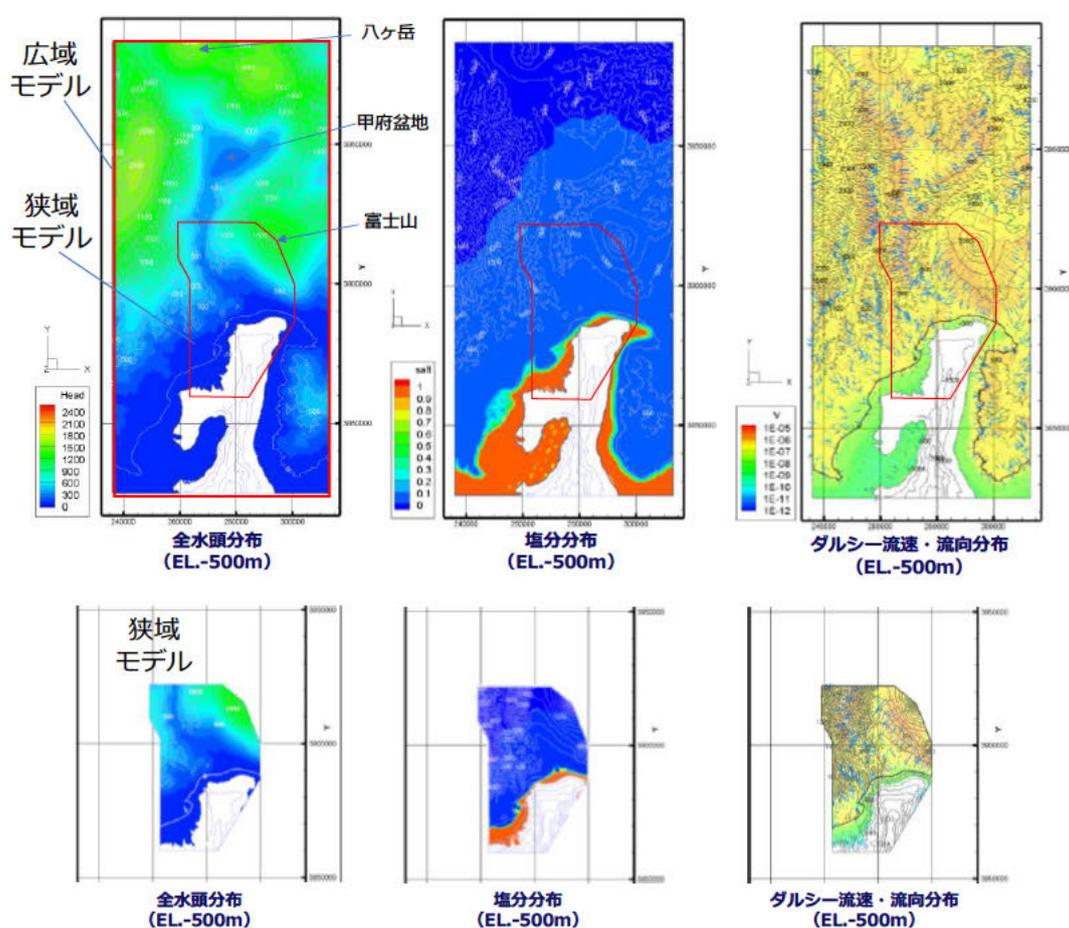


図 2-2-3 広域モデルと狭域モデルの比較

② 文献調査

文献調査部分については、③地質モデルの作成および④地下水モデルの作成でそれぞれ述べる。地質モデル作成のために 138 文献、地下水モデル作成のために 55 文献を収集した。

③ 地質モデルの作成

地質モデルの構築は、(1) データ収集と精査 (2) 地質概念モデルの構築 (3) 地質モデルの構築 の3段階で実施する。この作業は、幡谷・楠原 (2023) で提案された地質モデル構築のPDCAプロセス (図 2-2-4) のうち、1回目のDoにあたる。以下では、それぞれの段階における手順の概略と、令和元年度～令和2年度の実施結果の概略を示す。

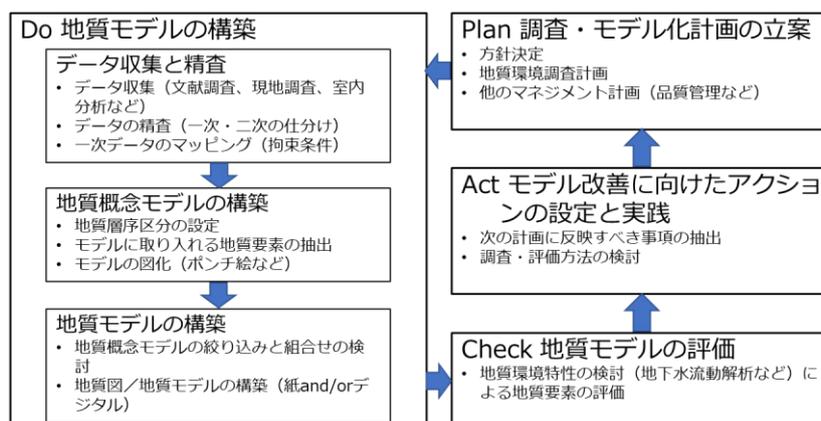


図 2-2-4 地質モデル構築のPDCAサイクルの例

(1) データ収集と精査

既往の文献・資料の調査などによってデータを収集する。収集したデータを、著者の解釈によらない客観的なデータである一次データと、解釈を含むデータである二次データに仕分ける。この後の地質概念モデル、地質モデルの議論の共通基盤として、一次データのマッピングを行う。

令和元年度・2年度は、駿河湾地域を対象とした既往文献・資料を、オンラインの文献検索サイト等を用いて検索し、138件の文献・資料を収集した。各文献・資料に含まれる一次データを抽出し、GISソフトを用いてマッピングした。

(2) 地質概念モデルの構築

地質概念モデルは、対象地域の岩相分布・地質構造に関する作業仮説を定性的に表現したものである。作業仮説は一つとは限らず複数存在しうるものであり、すなわち地質概念モデルは地質の不確実性を表現したものである。この段階でできるだけ多くの作業仮説を議論することが、評価対象地域の地質の理解に重要である。ただし、取り上げる作業仮説が多いほど組合せが膨大となり、その全てを地質概念モデルとして表現するのは困難であるため、目的に対して重要な地質要素に絞り込んで作業仮説を議論するなどの工夫が考えられる。

令和元年度・2年度は、地下水流動解析に供する地質モデルを構築するという目的を踏まえて、地下水流動に影響を与える地質要素(断層、貫入岩、その他高透水性を有する可能性がある地層など)を採り上げ、それらの分布に関する作業仮説を議論し、図で表現した。一例として、事例研究地域の東方の丹沢山地に分布する新第三系の貫入岩が、西方延長して

富士山体直下に分布するという地質概念モデルと、丹沢山地南縁に分布する神縄断層が西方延長して、富士川河口付近の地下まで分布するという地質概念モデルを、図 2-2-5 に示す。

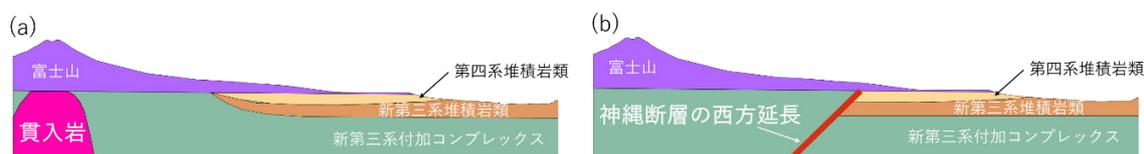


図 2-2-5 本検討で構築した地質概念モデルの例

(3) 地質モデルの構築

地質モデルの構築作業は、採用に至った地質要素の定量的な検討を行った上で、三次元地質モデリングソフトウェアを使って、仮想空間上に入力したデータセット（可視データ）をデジタルモデルとして作業する。具体的には、調査範囲に分布する個々の地質境界面および個々の断層面について、厚さをもたないグリッド／サーフェスモデルを作成する。

令和元年度は、神縄断層の西方延長が分布する／しない地質概念モデルと、富士山体を新富士と古富士以前に分ける／分けない地質概念モデルを採用し、それらの組合せで4つの地質モデルを構築した。令和2年度は、富士山体直下に貫入岩が分布する／しない地質概念モデルなどを考慮して、3つの地質モデルを構築した。一例として、令和元年度に構築した地質モデルの一つ（神縄断層の西方延長が分布し、富士山体を新富士と古富士以前に分ける）を、図 2-2-6 に示す。

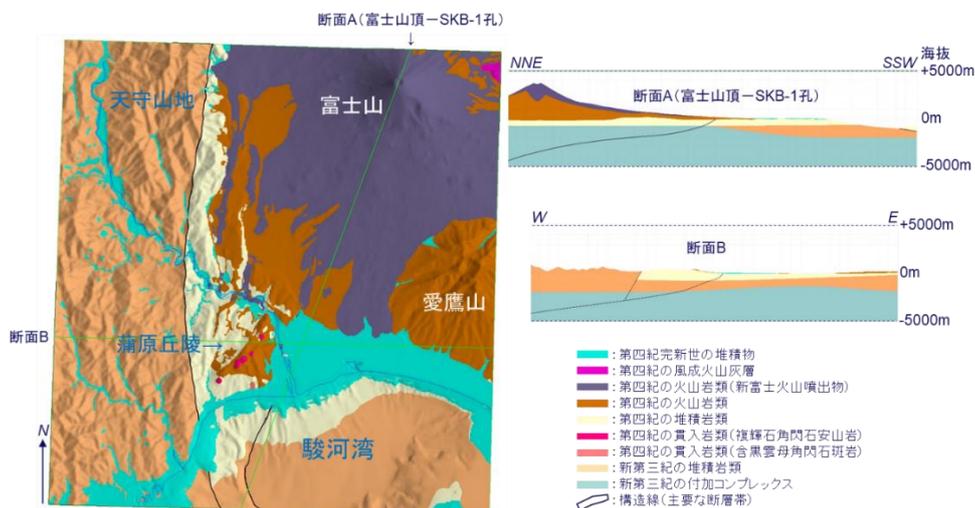


図 2-2-6 本検討で構築した地質モデルの例

④ 地下水モデルの作成

狭域モデルを対象に地下水に関わる文献・資料を収集し、地下水モデルを作成した。地下水流動に影響を与えるのは、地形、地質、地球物理、地下水理、水文、気象、地下水水質、

地化学などであるため、これらを取り扱っている文献・資料を収集した。

主に、国土交通省の「全国地下水資料台帳」(国土交通省、2020)、産業技術総合研究所発行の「水文環境図 No.9「富士山」」(小野ほか、2016)、「日本温泉・鉱泉分布図および一覧」(金原、2005) 全国鑿井協会(1981~2003)の「地下水位年表」、「水文水質データベース」(国土交通省、2020)、「地下水マップ静岡県附属説明書」(国土交通省、2020) などからデータを集めた。

富士山は中新統の基盤上に形成された火山で、透水性に富む新富士火山噴出物の下に、難透水性の古富士火山泥流が大規模な面的な広がりをもって分布する(図 2-2-7)。

降雨量については、土(2007)は富士山麓の4地点の観測データ(白糸、吉原、御殿場、河口湖)に基づき、富士山の総降水量を22億 m^3/y (約2,500 mm/y)と見積もっている。

この涵養量からみて富士山体(体積1,200~1,500 km^3)は、間隙率を10~20%と仮定すれば、単純に考えて67~176年分の降水を蓄えうることとなる(戸崎・浅井、2017)。ただし、戸崎・浅井(2017)も述べているように、多量の水が体積の小さい高透水性の新富士火山噴出物中を流れることにより滞留時間は短くなっている。

山麓の標高800 m 以下は湧水に富んだ豊水域(山本、1971)であるのに対し、高標高部は無水域(標高2,000 m 以上)や乏水域(標高800~2,000 m)と呼ばれる涵養帯の役目を果たす部分である。無水域や乏水域でも、粘土化した火山灰や溶岩緻密部が局所的な難透水層となって小規模な湧水が形成されることがある。

地下水は古富士火山の上を斜面下方へと流れ、山麓下部で一部が湧水として湧出する(安原ほか、2007)。白糸の滝はこのような新富士火山噴出物と古富士泥流の境界部に形成された湧水の代表である。また、新富士火山噴出物は、繰り返し噴出したことで、溶岩流(厚さ数 m ~60 m 程度)や火山灰層などが何重にも重なった構造となっている。溶岩流の上部と下部とでは冷え方が異なり、上部は割れ目が多い構造となっている。その構造中を地下水が流れており、南西麓の湧玉池や南東麓の柿田川湧水はその例とされる。

地下水調査結果の特徴として、水圧、 ^3H 、 δD および $\delta^{18}\text{O}$ の調査量が多い。概ね地形に従った地下水流動で、速い地下水流動は ^3H 、広域地下水流動は δD & $\delta^{18}\text{O}$ に反映されている。一方で、深部については情報が極端に少ない。これは浅部の地下水が豊富で、深部の地下水を採取する必要がないためと考えられる。

^3H については、数多くの報告があるが、地下水の採取時期が、主に1970年以降であり、核実験の影響をかなり強く受けている。このため、定量的な年代推定は困難であるが、新富士火山噴出物を流れる地下水は、数十年未満の滞留時間であると考えられる。

δD と $\delta^{18}\text{O}$ については、安原ほか(2007)が、富士山全体にわたる降水と地下水(湧水、井戸水、風穴水)の酸素同位体比についてまとめ、降水の高度効果と、これに蒸発を考慮した涵養標高を求めている。

小野ほか(2016)によれば、富士山中腹の湧水の δD と $\delta^{18}\text{O}$ よりも、低標高のすそ野の湧水の方が、低い δD と $\delta^{18}\text{O}$ を示すことから、中腹で涵養した地下水は浅部を流れ、比較

的早く中腹で流出し、高標高で涵養した地下水は、深部を流れ、低標高に流出している可能性がある。

地層の透水係数については、全国的には、梅田ほか（1995）に整理されており、これに富士川河口近傍での産業技術総合研究所のボーリング調査結果（産業技術総合研究所、2015；2016）と、当地域に関わる文献、山本（1971）、村本・岸（1967）を合わせて整理した。

沖積層（富士川砂礫層）の透水係数は、砂礫層で $10^{-5} \sim 10^{-4}$ m/s オーダーが多く（一部に 10^{-7} m/s）、シルト層で 10^{-6} m/s オーダーである。新富士火山噴出物では $10^{-6} \sim 10^{-3}$ m/s オーダーで、中でも溶岩は大きい。古富士火山噴出物では泥流堆積物の 10^{-7} m/s から溶岩の $10^{-3} \sim 10^{-2}$ m/s オーダーにわたる。愛鷹火山噴出物では $10^{-6} \sim 10^{-4}$ m/s、中新世の砂岩泥岩礫岩互層で 10^{-6} m/s のオーダーとなっている。

間隙率は、「本邦産岩石の深部物性データ集」（星野ほか、2001）では対象領域内にデータがなく、東側に分布する足柄層群（対象地区に分布する蒲原礫岩と同じ前期更新世の地層）において有効間隙率が約 7～18%との記載がある。落合（1970）は三島溶岩（新富士火山噴出物の一部）の間隙率を、放射能検層の結果に基づき、緻密質で 10%以下、多孔質で 20～40%、空洞部で 60～90%としている。また、戸崎・浅井（2017）では、富士市における溶岩の緻密部で 5%以下、多孔質部で最大 20%程度と述べられている。

地下水流動の概念モデルは図 2-2-7 に示すように、概ね地形に沿った地下水流動となっており、標高 800 m より低い領域は豊水域であり、概ね地形にそった地下水流動となっている。また、地下水は浅部の新富士火山噴出物を主体的に流れており、その滞留時間は数十年のオーダーであると考えられる。さらに、高標高で涵養した地下水が低標高に大きく循環している傾向がある。

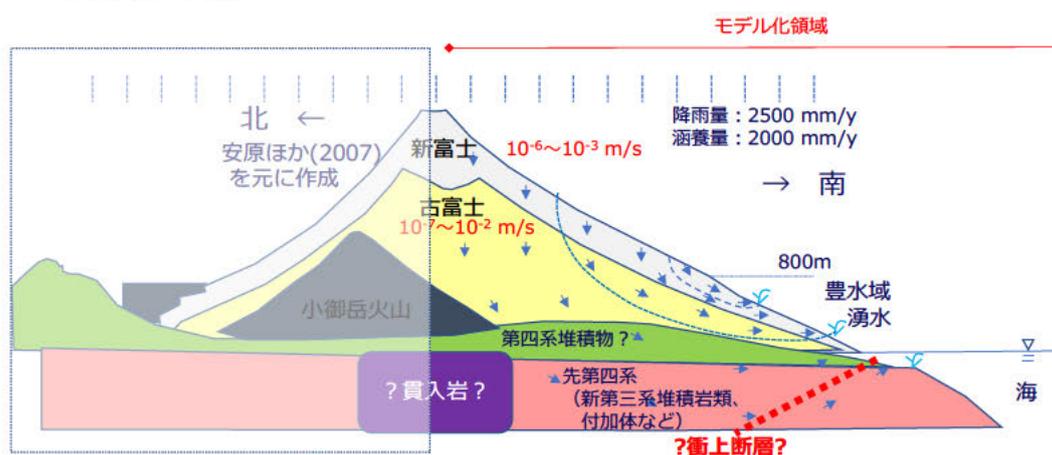


図 2-2-7 富士山の模式断面と地下水流動系

⑤ 地下水流動解析

作成された地下水流動概念モデルに基づいて、地下水流動・物質移行解析を実施する。本地点では、地下水位、トリチウム濃度、水素・酸素同位体比が非常に良く調べられている。

このため、これらを対象に解析を実施する。また、広域的な地下水の滞留性を評価する目的で、 ^4He についても解析を実施した。境界条件を表 2-2-2 に示す。

ここでは、図 2-2-3 の狭域モデルを使用した。モデルの大きさは、東西 41.2 km (200 m×206 分割)、南北 62.25 km (125 m×124 分割+250 m×187 分割)、深度方向は 65 分割で、要素数は約 340 万要素である。数値解析モデルは、この領域を下記に示すように分割した。数値解析モデルのメッシュを図 2-2-8 に示す。これらの地下水流動・物質移行解析の結果から、調査地域における地質モデルの不確実性が地下水流動や物質移行の評価に与える影響を明らかにした。

表 2-2-2 地下水流動・物質移行解析の解析条件

項目	陸域	海域	その他	特記事項
地下水	降雨境界条件 $P < 0$: 2000 mm/y $P \geq 0$: $P=0$	静水圧 (密度考慮)	不透水	海水密度 $\rho=1+0.025C$ C は海水濃度
塩分*	$Q \geq 0$: $C=0$ $Q < 0$: $\partial C/\partial x=0$	$Q \geq 0$: $C=1$ $C < 0$: $\partial C/\partial x=0$		地下水フラックス依存境界条件
$\delta^{18}\text{O}^*$	$Q \geq 0$: $C=0.00222 \text{ Ele}+5.18$ (Ele:標高(m)) $Q < 0$: $\partial C/\partial x=0$	$Q \geq 0$: $C=0$ $C < 0$: $\partial C/\partial x=0$		高度効果は、安原ほか(2007)を参照
$^4\text{He}^*$	$Q \geq 0$: $C=0$ $Q < 0$: $\partial C/\partial x=0$		単位発生速度 $M=1 \text{ g/y}$	^4He 年代 = C/M
$^3\text{H}^*$	$Q \geq 0$: $C=C_0$ $Q < 0$: $\partial C/\partial x=0$		半減期 12.4 年	

*全地層で間隙率 20%、縦・横分散長は 500・50 m とした。

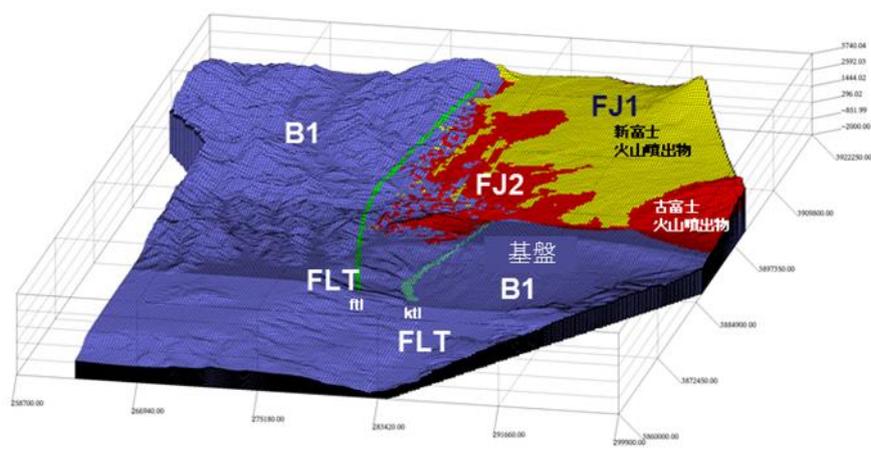


図 2-2-8 解析メッシュ

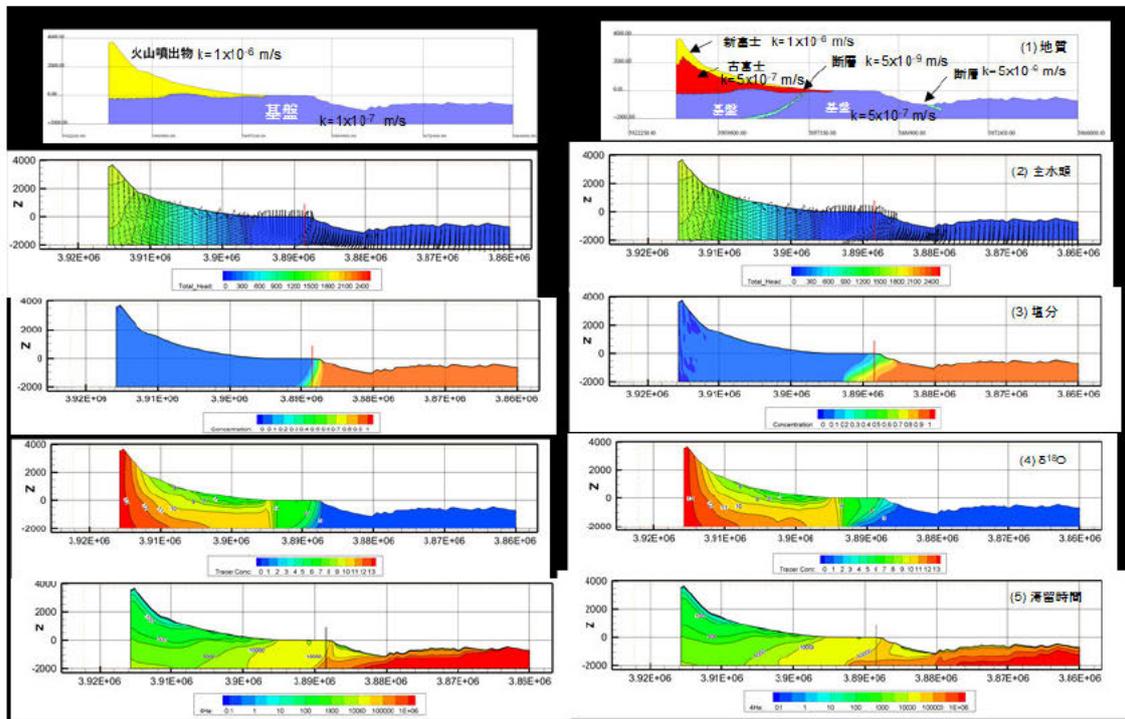
現況海水準の解析結果（図 2-2-9）では、全水頭分布は、富士山付近で最も高く、ボーリング孔付近に向けて低下し、海域ではほぼ一定となっている。このため、地形に従った地下水流動となっている。このため、平面図に見られるように、実測値と解析値が概ね一致しているように見える。新富士と古富士が同じ透水係数のケース（Case 1）よりも、分割したケースの方（Case 2）が、富士山山体において全水頭がやや増加しているのがわかる。これは、古富士を分割し透水係数を下げたことで、富士山山体がやや流れにくくなったためである。海岸線付近において、断層を考慮していないケース（Case 1）は流速に乱れはないが、断層を考慮したケース（Case 2）は、流速分布に乱れが生じる。さらに、断層を考慮したケース（Case 2）は、浅部では淡水の海域への張り出しが、深部では海水の陸域への流入が顕著である。

塩淡境界は、汀線付近に形成されている。前述のように断層を考慮したケース（Case 2）の方が、考慮していないケース（Case 1）に比べて浅部で塩淡境界が張り出していることが分かる。これは、海岸付近にある断層による遮水効果で、沿岸付近での高い圧力が海域まで伝わったためと考えられる。また、深部の塩淡境界は、内陸の断層の影響で全水頭が下がったことにより、海水浸入が大きくなったものと考えられる。

酸素同位体比（ $\delta^{18}\text{O}$ ）は、高度効果を考慮して境界条件を設定しているため、高標高では大きい値、低標高では小さい値となっている。なお、海域では 0 と設定している。地形が平坦になる平野部付近までは、高標高で涵養した地下水が低標高にという大きな半円状の循環系が構成されている。低地部では、高標高からの地下水と平坦部の地下水が混合するため、比較的高標高で涵養した地下水に近い同位体比となっている。

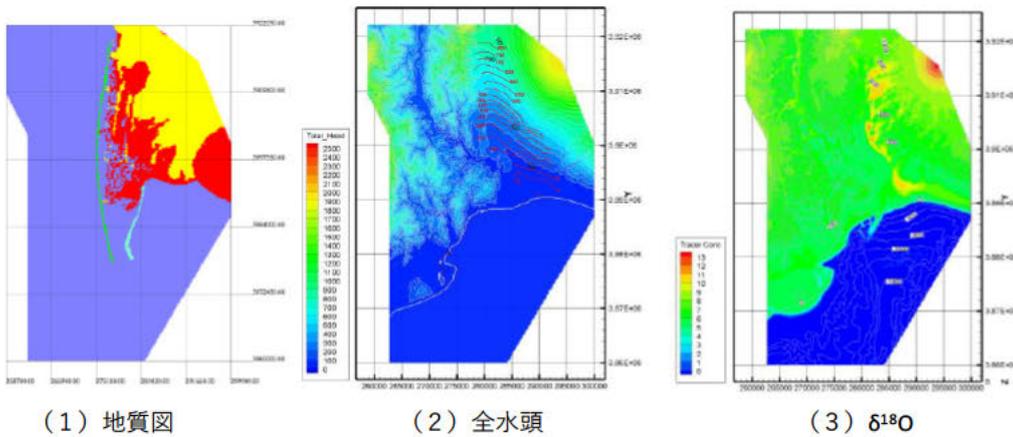
現況海水準の滞留時間（ ^4He 年代）は、涵養域である富士山山体、特に高標高部では若く、標高の低下とともに古くなっている。新富士と古富士を分割した影響はそれほど顕著ではない。内陸の断層の影響は、深部で滞留時間が長くなる傾向に表れている。具体的には、断層を考慮したほうが、滞留時間が 10,000 年の領域が山体側に広がり、沿岸付近でも広がっている。海域では滞留時間が遅い領域が広く広がっている。これは海水域が基本的には受け側で動水勾配を持たないためである。沿岸付近の海域において滞留時間がやや若くなるのは、塩淡境界付近で海水が淡水と混合して流出することにより、海水を塩淡境界に補給する必要があり、流速が速くなるためと考えられる。海域においては、海水は基本的に静水圧分布しているため、ほとんど流速は生じないが、微流速でも流入になる場合には、滞留時間が 0 年になるため、海底面周辺では年代が若くなる傾向がみられる。

上記の様に、塩淡境界付近や断層付近での変化が特に特徴的であり、これらは、水質や同位体、滞留時間に大きな影響を与えている。



(a) Case 1

(b) Case 2



(1) 地質図

(2) 全水頭

(3) $\delta^{18}O$

(c) Case 2 の地表面分布

図 2-2-9 現況海水準での解析結果

⑥ 地下水モデルの校正

地下水流動や物質移行の将来予測および不確実性を評価する際に使用される地下水モデルは、入力パラメータ（たとえば、透水係数）が校正されている必要がある。ここで、地下水モデルの校正とは、実際のフィールドで取得された観測値と、地下水モデルの出力である計算値が合うように、入力パラメータを調整することである。本研究では、観測値と計算値の誤差から定量的に入力パラメータを推定できる PEST (Doherty, 2015) と呼ばれる逆解析ソフトウェアを用いて、地下水モデルの校正を行った。

ここでは、図 2-2-8 に加えて、もう 1 の地下水モデルを新たに構築し、2 つのモデルで透水係数の逆解析を行った。ここで、新たに構築した地下水モデルの概要を図 2-2-10 に示す。新たに構築した地下水モデルでは、第四紀の火山岩類の下位層（地下水モデルでは、基盤と呼ぶこととした）を細分化した。基盤を、第四紀堆積物 (hs)、第四紀堆積岩 (qs)、新第三紀堆積岩 (ns)、付加コンプレックス (ncom) に区分した。新たに構築した地下水モデルの基本透水係数を表 2-2-3 に示す。物質移行の解析条件は、表 2-2-2 とした。以降、図 2-2-8 の地下水モデルを 2019M と呼び、ここで新たに構築した地下水モデルを 2020M と呼ぶこととする。また、逆解析に使用した観測値は、文献調査から収集された水圧、 $\delta^{18}\text{O}$ 、 ^3H である。

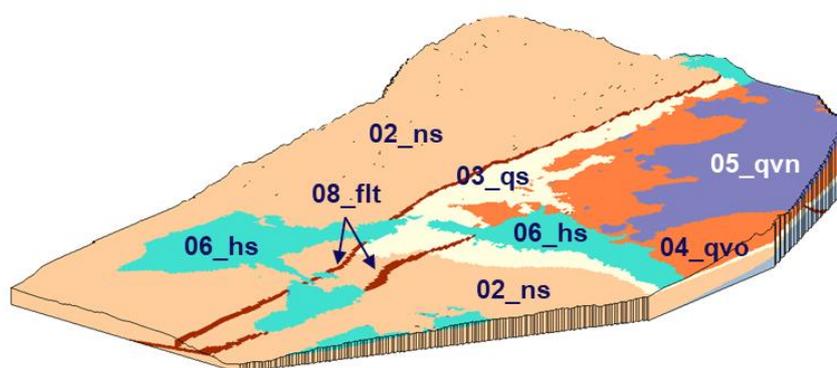


図 2-2-10 地下水モデル (2020M, 7 つの地質区分から構成)

表 2-2-3 新たに構築した地下水モデル (2020M) の基本透水係数

地質区分	記号	基本透水係数 [m/s]
第四紀堆積物	hs	4.0×10^{-6}
新富士火山噴出物	qvn	4.0×10^{-5}
古富士火山噴出物	qvo	1.0×10^{-5}
第四紀堆積岩	qs	1.0×10^{-6}
新第三紀堆積岩	ns	1.0×10^{-7}
付加コンプレックス	ncom	1.0×10^{-9}
断層	flt	1.0×10^{-9}

図 2-2-11 にそれぞれの地下水モデルでの透水係数の推定結果を示す。

まず、2019M における透水係数の推定結果について述べる。断層の推定誤差は水圧と ^3H では非常に大きく、酸素同位体では小さくなった。推定誤差が大きかった水圧と ^3H は、断層の透水係数の推定感度が小さいと考えられた。断層のような局所的な構造の透水係数の推定は、これによる圧力変化や濃度変化が観測値で示されていないとすれば、困難になると考え

られる。さらに、水圧による透水係数の推定結果において、新富士火山噴出物の推定誤差は大きい。新富士火山噴出物は、富士山を中心に浅部に薄く分布するため、水圧の観測点が少なく、推定に十分な感度を持たない可能性がある。一方で、古富士火山噴出物の透水係数は、降雨涵養量とのバランスで水位を決定するため、推定誤差が小さくなったと推測される。基盤の透水係数は、古富士火山噴出物よりも小さく、推定誤差もそれほど大きくない。これは、基盤の透水係数が大きくなると、水位は低下し、これに伴い、地下水流動系が大きく変化するためと考えられる。

$\delta^{18}\text{O}$ の推定誤差はいずれの地質区分でも小さいものの、基盤の透水係数が新富士火山噴出物と古富士火山噴出物の透水係数より大きく推定された。これは、 $\delta^{18}\text{O}$ では流動経路を表現していると考えられ、新富士火山噴出物と古富士火山噴出物の透水係数は小さい方が、高標高から涵養した地下水が低標高部に流出するといった流動経路を再現しやすくなるためと考えられる。

^3H による透水係数の推定値は、水圧の推定値と類似した傾向を持っており、どの地質区分も透水性が高い推定結果となった。

次に、2020Mにおける透水係数の推定結果について述べる。逆解析に使用した観測値の指標によって、透水係数の推定結果が異なる。また、推定誤差が大きい水理地質区分が多い。水圧による透水係数の推定値は、2019Mの古富士火山噴出物と2020Mの第四紀堆積岩がほぼ同じ値であった。これは、富士山麓周辺の水位が、降雨涵養量と、2019Mでは古富士火山噴出物の透水係数、2020Mでは第四紀堆積岩の透水係数のバランスで決定するためと考えられる。つまり、地質区分を細分化したことによって、水位を制御する地層が変わった可能性がある。これらの地層よりも下位の地層の透水係数は、2桁程度大きくなっている。これは、下位の地層の透水係数が高くなると、上位の地層の水位が低下するためと考えられる。第四紀堆積岩よりも上位の地層については、推定感度がない地質区分を細分化したため、推定誤差が非常に大きくなった可能性がある。下位の地層（新第三紀堆積岩よりも下位）については、透水係数が高くなっているが、推定誤差は小さくなった。

$\delta^{18}\text{O}$ による透水係数の推定結果を2019Mと2020Mで比較したところ、浅部の地層の透水係数が低くなる傾向にある。これは、 $\delta^{18}\text{O}$ は流動経路を表現すると考えられ、高標高から涵養した地下水が低標高で流出するように、水位を高く保持することに起因したと考えられる。ただし、水圧による透水係数の推定結果と同様に、第四紀堆積岩よりも上位では推定誤差は大きく、新第三紀堆積岩よりも下位でも推定誤差は大きい。

^3H の実測値によって推定された透水係数は、推定開始時の初期値（基本透水係数）からほとんど変化していない。また、推定誤差も大きいことから、初期値周辺で全ての地質区分に ^3H に対する感度はないことが示唆される。これは、 ^3H の滞留時間が短く、観測値にばらつきが大きいいため、広域の地下水流動の評価に適切でないことを示唆している。以上の結果より、 ^3H の観測値は校正に有効ではない。

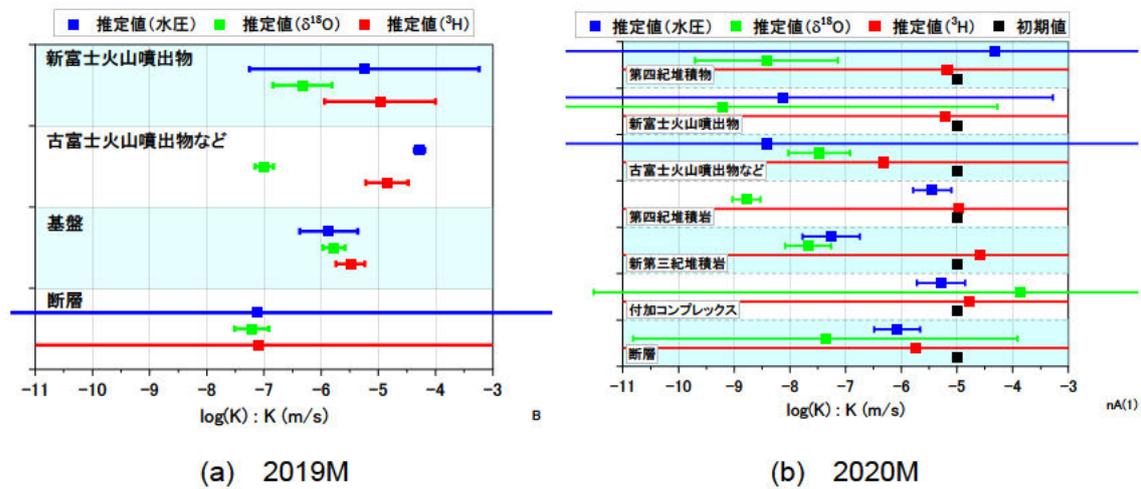


図 2-2-11 透水係数の推定結果 (2019M と 2020M)

⑦ 不確実性低減のための対策の検討

地質分野にとって最も基本的な情報は、地質分布・地質構造である。平たく言えば、どこに何（地層・岩体、断層・褶曲など）があるかということで、これを様々な論理で表現したものが地質モデルである。この不確実性を減らすためには、調査を行って新しいデータを取得するしかない。新しいデータが制約条件となり、モデル（作業仮説）が絞られた状況が不確実性の低減と言える。

ボーリング調査が新しい地質データ取得のための代表的な調査であることは異論のないところであろう。ただし、ボーリング調査に限らないが、新たな事実が、それが出る前のモデル群を絞り込むとは限らず、新たなモデルを考えざるを得なくなることもあり得る。この時点で地質分布・地質構造の不確実性は増しているかもしれない。例えば、予想していた地層とは違うような場合であり、新たな情報が断層や褶曲の存在を示唆することもある。それゆえ、最初から様々なモデルを持てるかどうかが大切である。それが、地質分布・地質構造の不確実性を減らすためのボーリング調査の設計に際して、決定的に重要である。

また、地質モデルの不確実性の波及効果にも留意する必要があるだろう。地下水流動の検討事例において、「一つの」地質モデルに基づいて、「一つの」地下水流動モデルを作って検討している例が多々見られる。ここで如何に精緻な地下水流動解析をしても、地質モデルが変われば地下水流動モデルも変わりうる。したがって、一つのモデルの中で不確実性を減らすことは、手法の検討としては価値があると思うが、地層処分場への適正を判断する点では、不確実性を減らしたと言えるかどうか分からない。つまり、地下水流動解析だけでは、「サイトの」地下水流動系の不確実性を減らすことは難しい場合がありうる。それゆえ、断層、貫入岩、高透水性層と言った地質要素が地下水流動へ与える影響をあらかじめ知ることは、事実上サイトの地下水流動モデルを絞ることになり、不確実性の低減対策の一つとして重要であると考えられる。このような検討は、負荷が大きい地下水流動解析をたくさんのケース

で実施することに繋がり、解析結果の比較検討が必要となることから、計算の高速化はサイトの不確実性への対処において重要な要素技術と見ることができる。

地下水モデルについては、前述のとおり、研究対象地域は富士山体の浅部で、水圧、水質、同位体など非常に多くのデータが取得されており、これらのデータを用いて水収支などを検討した事例が多くある。また、浅部の透水係数は大きく、地下水の供給量も大きいことから、地下水利用が盛んな地域である。一方、地下水利用の観点では地下深部を開発する必要がないため、地下深部の既存データはほとんどなかった。

深部の地質は、比較的新しいとされる富士山の噴出物などで覆われており、どのような地質が分布しているかも明確でなく、断層活動、貫入岩などの存在も不明である。深部の地下水流動は、大局的には流量の大きい浅部に強く影響を受けると考えられるが、地質およびその水理特性が不明なことから、どのような地下水流速となっているかは不明である。

これらの不確実性を低減するには、富士山の火山噴出物の下に存在する地質を推定できる地点、例えば、噴出物の堆積が少ない地点においてボーリング調査を行い、地質や水理特性を特定することが有効と考えられる。さらに、ここまでの検討で、衝上断層の存在が推定されている。衝上断層のような地下水流動方向に対して垂直な地質構造の存在は、地下水流動に大きな影響を及ぼす可能性がある。このため、富士山から海域に向かう方向に対して垂直な地質構造の存在があるかどうかを確認することは重要である。あわせて、研究対象地域は地殻変動が、日本の中でも比較的大きい地域であり、地質の変遷の評価も重要になると考えられる。深部の地下水は、このような地質の変遷の影響を記録している可能性があり（たとえば、化石海水など）、地下水流動場の将来的な予測を行うためにも、深部の地下水の水質や滞留時間を調査する必要がある。

透水係数の逆解析を実施した際に推定誤差や、グローバル感度解析の結果（図 2-2-12）によると、浅部地層の透水係数に感度が認められたが、深部地層や断層の透水係数の感度は小さかった。このことは、地表付近の観測値から、浅部地層の透水係数を推定できる可能性はあるが、深部地層や断層の透水係数は推定できないことを示唆する。これらのことと、上述した地下水流動に関する検討結果を概念図に整理した（図 2-2-13）。

以上のことから、深部地層の透水係数を推定するには、ボーリング調査による観測値の拡充が必要であることが分かった。このように、地下水モデルの校正を通して、透水係数の不確実性が大きい地層を特定することは、次の調査地点の選定などに利用できる。逆解析やグローバル感度解析などの数値解析を利用することで、不確実性を定量化し、これを調査へ反映することで、地下水モデルの不確実性は低減できると考えられる。

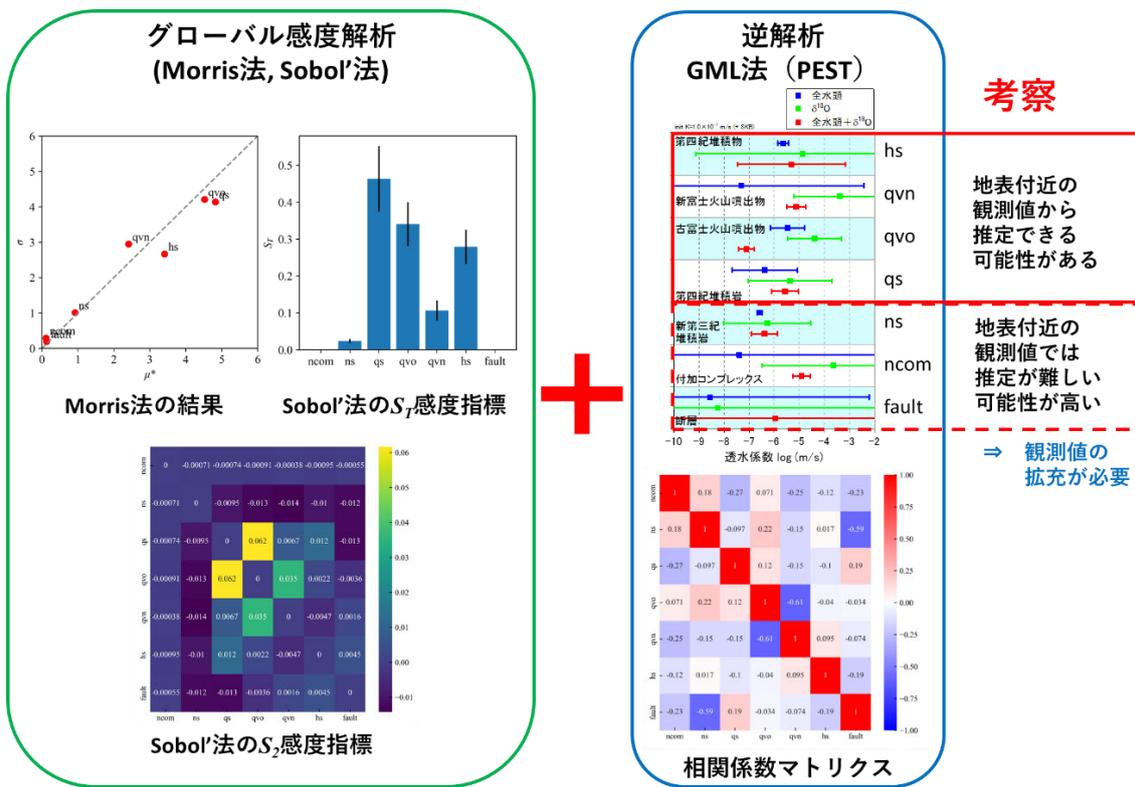


図 2-2-12 グローバル感度解析と逆解析の結果の概要

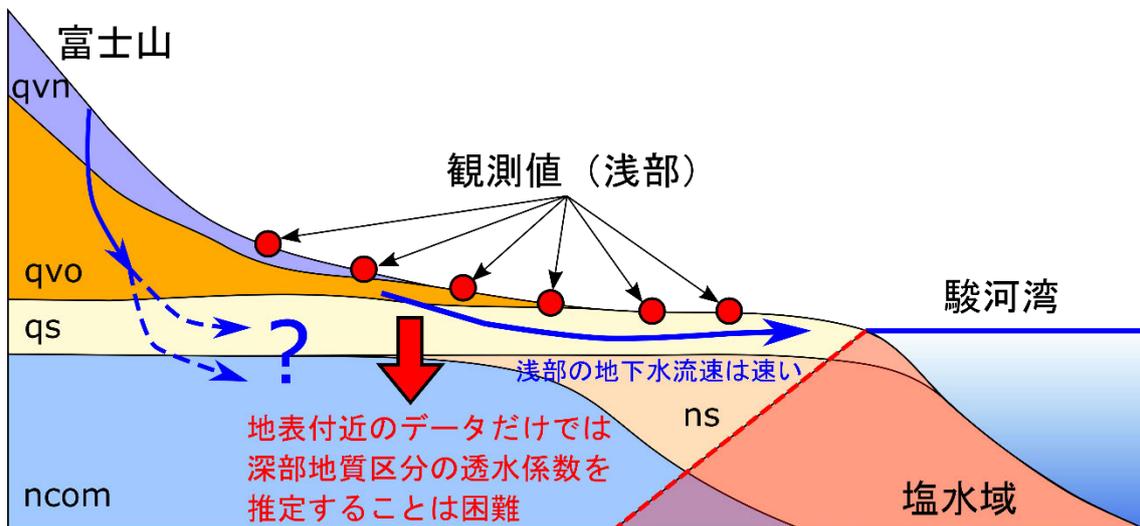


図 2-2-13 深部地質区分の透水係数の推定が困難であることの概要図

⑧ データの更新 (原位置調査)

新たに掘削された FGB-2 孔 (掘削長 800 m) で取得された観測値に基づいて、地質モデル、地下水モデルの更新を行う。FGB-2 孔での調査に関する報告は後述されるため、ここでは説明は割愛し、⑨地質モデルの修正、⑩地下水モデルの修正において観測値を含めて説

明する。

⑨ 地質モデル修正

地質モデルの修正（再構築）の作業は、図 2-2-4 で示した PDCA プロセスのうちの Check→Act→Plan→2 回目の Do にあたる。以下では、令和 5 年度の実施結果の概略を、ステップ毎に示す。

Check（地質モデルの評価）

1 回目の Do で構築された地質モデルを用いた地下水流動解析の結果から、以下のようなフィードバックが得られた。

- ・ 研究地域において地下に分布する可能性がある貫入岩類については、感度解析の感度が低いことから、広域の地下水流動場に影響を及ぼさないと考えられる。
- ・ 過年度の地質モデルを用いた地下水流動解析で推定される塩淡境界深度と、FGB-2 孔で実測された塩淡境界深度は整合しない。第四系の空間分布の修正が必要である可能性がある。

Act（モデル改善に向けたアクションの設定と実践）

前項のフィードバックを受けて、地質モデルの再構築に向けた検討方針を設定した。

- ・ 地下深部の貫入岩の分布は考慮しない。
- ・ 第四系堆積岩類（堆積物）の空間分布の見直しを論点とする。

Plan（調査・モデル化計画の立案）

このステップは本来であれば、Act のステップで設定されたアクションに基づいて、次の Do に向けた調査計画を立案する。本検討では、「Act のステップで設定されたアクションに基づいて、Plan のステップで FGB-2 孔の調査が立案された」と仮定した。

2 回目の Do（地質モデルの再構築）

このステップの実施手順は、1 回目の Do と同様の 3 段階から成るため、各段階の手順についての説明は省略し、実施結果の概略を以下に示す。

(1) データの収集と精査

本事業で掘削された FGB-2 孔のデータと、令和 3 年度以降に発行された 9 件の文献が、新規データとして収集された。FGB-2 孔のボーリングコア観察によって、深度 161～800 m（孔底）に円～亜円礫を主体とする礫層が分布しているなどの一次データが得られた。

(2) 地質概念モデルの構築

3 つの論点で、第四系の空間分布に関する地質概念モデルの検討を実施した。

(a) FGB-2 孔のボーリングコア試料から得られたデータの解釈および概念モデルへの反映

FGB-2 孔のボーリングコアからは年代情報が得られていないが、コアの岩相と FGB-2 孔の周辺地域に分布する第四系の岩相記載を比較した結果、深度 800 m まで更新統が分布し

ていると解釈した。物理探査の既往事例（二次データ）も参考にして、「沿岸陸域において第四系の下限面は、FGB-2 孔の直下で深度 800 m 強を下限とし、西方の富士川河口断層帯に向かって傾斜する」という地質概念モデルに修正した。

(b) 駿河湾海底の第四系の空間分布

過年度は、駿河湾の海底地質については一次データが乏しいことから、陸域の地質構造を水平延長した地質概念モデルを採用していた。令和 5 年度は、既往の海上音波探査で得られている速度構造を一次データとみなすことにより、「駿河湾の海底において第四系は、水平方向に広く分布し、深度方向には最大で水深 2 km 前後まで分布する」という新たな地質概念モデルを構築した。

(c) 富士山体の地下の第四系の空間分布

富士山西麓の地下地質については一次データがない。過年度は第四系堆積岩類の上に富士山体が載るという地質概念モデルを採用していたが、令和 5 年度は極端なケースを想定して、「富士山西麓で富士山体の直下に第四系堆積岩類がない」という新たな地質概念モデルを構築した。

(3) 地質モデルの構築

(2)で修正もしくは新たに構築した地質概念モデルを全て採用し、三次元地質モデリングソフトウェア（Maptek 社 Vulcan）を用いて、新たな三次元地質モデルを一つ構築した。構築した地質モデルの平面図及び 3 方向の断面図を図 2-2-14 に示す。

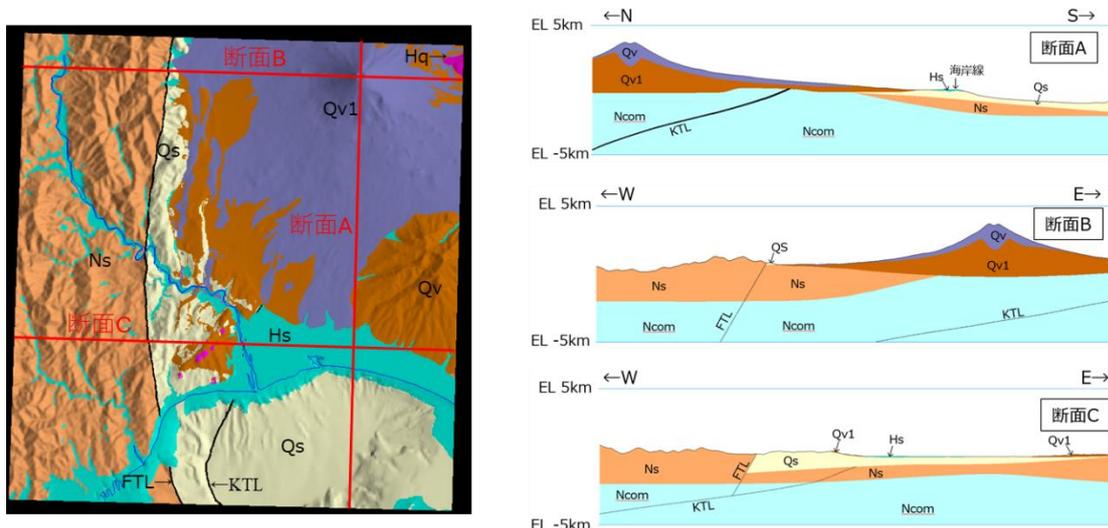


図 2-2-14 令和 5 年度に新たに構築した三次元地質モデルの平面図および断面図

⑩ 地下水モデル修正（調査結果に基づく地下水流動概念モデルの修正）

ボーリング調査の結果を図 2-2-15 に示す。全水頭の鉛直分布は、深度方向に増加傾向があり、塩分の密度を考慮した静水圧分布とほぼ同じになっている。塩分の鉛直分布は、深度

100 m までは淡水で、深度 200 m 以深は海水である。塩淡境界が 100~200 m のため、Ghyben-Herzberg 則に基づくと、淡水水頭は 2.5~5.0 m と考えられ、概ね地表面標高(3.87 m)と整合する。酸素同位体比($\delta^{18}\text{O}$)の鉛直分布は、深度 200 m 以深では 0‰と海水の特性値を示している。淡水域では、10‰程度を示す。この値から涵養標高を評価すると約 2,000 m となる。このことから、この地下水は、富士山山頂周辺の高標高地点から 20~25 km を流れてきた地下水と推定される。 ^{14}C 年代は、50 m 以浅では 0 年程度、深度 100 m 程度の淡水域で 1,000~10,000 年である。深度 100~300 m 付近の混合域から海水域では 10,000 年程度、深度 300~400 m の海水域では 2,000 年程度、深度 600 m 付近では、6,000 年程度、深度 700~800 m では 10,000 年となっている (Ono et al., 2023)。このため、海水域でやや若くなった後、深度とともに深くなる傾向にある。

これらの結果に基づいて、地下水流動の概念モデルを作成すると図 2-2-16 のようになる。浅部 50 m 程度までの淡水領域は、涵養標高 0 m 程度、 ^3H は検出されるので数十年程度と評価される。これに基づいて、地下水流速を評価すると 100 m/y 以上となる。この地下水流速と整合する透水性は、 1×10^{-4} m/s (3,150 m/y) 以上と推定される。

深度 100 m 付近の淡水領域は、涵養標高約 2,000 m で、流動距離は約 20~30 km となる。 ^{14}C 年代は、1,000~8,000 年とばらつきが大きい、地下水流速は、1~10 m/y となる。地下水流速と整合する透水係数は、 1×10^{-6} m/s (31.5 m/y) 程度と推定される。

深度 100~200 m の混合域については、滞留時間は古くなっている。これは、深部から回り込んだ海水が上昇するためと、地下水(淡水)についても流出域では古い地下水が上昇するためである。海水の流速は、塩淡境界で巻き上げられる塩水を補充するために供給されるため、塩淡境界付近での混合、すなわち分散に依存すると考えられる。ただし、分散から直接流速を評価することは難しいので、地下水流速の推定は困難である。

更新された地下水流動の概念モデルでは、水素・酸素同位体比から推定された大局的な地下水流動形態だけでなく、ボーリング地点での涵養標高、地下水年代、塩淡境界の情報が増えている。これらの情報から、水理特性やボーリング地点では静水圧分布であることが考察され、地下水モデルに反映された。

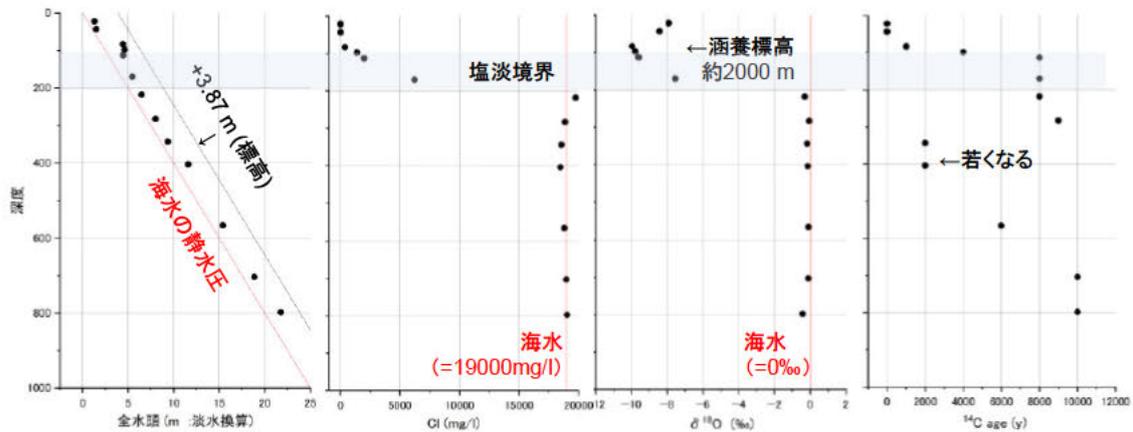


図 2-2-15 FGB-2 孔での調査結果 (深度は G.L.)

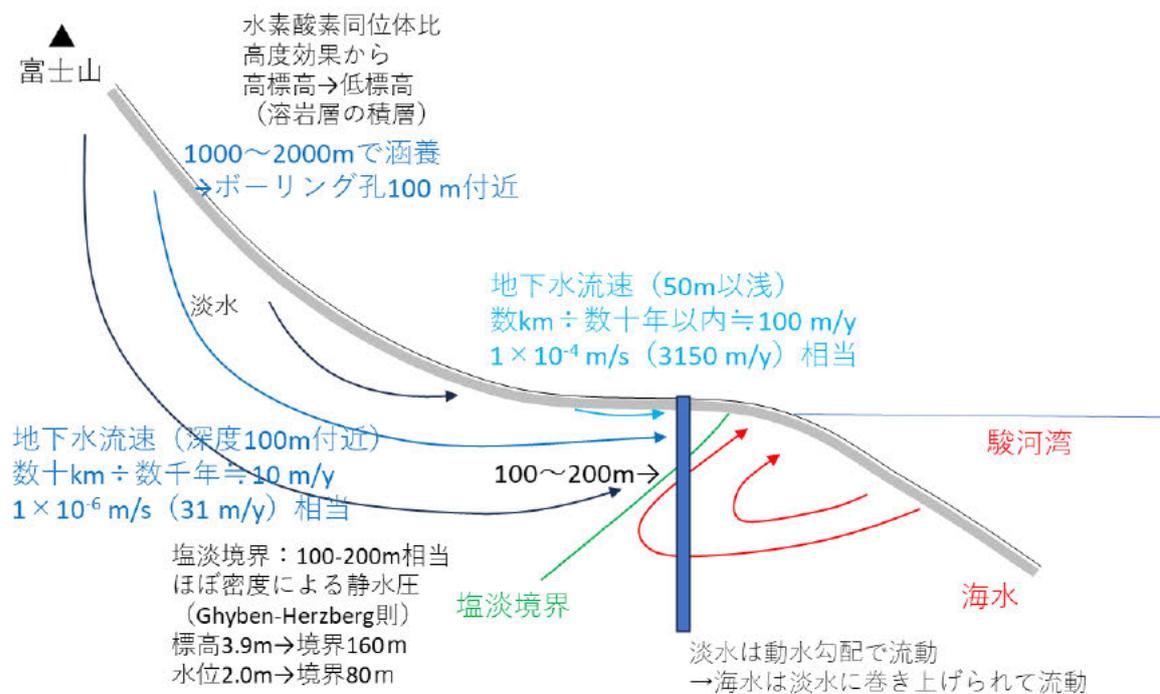


図 2-2-16 FGB-2 孔に基づく地下水流動の概念図

① 地下水流動解析

地質モデルの更新に伴い、地下水流動解析で使用する地下水モデルを修正した。また、修正した地下水モデルでの解析結果とこれまで検討してきた地下水モデル (2020M) での解析結果を比較する。淡水と塩水の密度流による地下水流動・物質移行解析の計算負荷は大きい。計算負荷を低減することを目的に、修正した地下水モデルとこれまで検討してきた地下水モデル (2020M) について、空間解像度 (解析メッシュ) を粗くして、モデルを再構築し

た。以降は、修正した地下水モデルを 2023MC と呼び、これまで検討してきた地下水モデルを 2020MC と呼ぶ。なお、これまで検討してきた地下水モデル（2020MC）の地質区分の分布は変更しておらず、再構築した解析メッシュに対して、地質区分を割り当てた。

図 2-2-17 に、地下水流動解析で使用する地下水モデルを示す。2020MC および 2023MC とともに約 130 万要素であり、全て三角柱メッシュで構築した。地質モデルの修正でも記載があったとおり、2020MC と 2023MC では第四紀堆積岩（qs）の分布が大きく異なっている。特に、海底の地質区分は第四紀堆積岩（qs）に統一された。

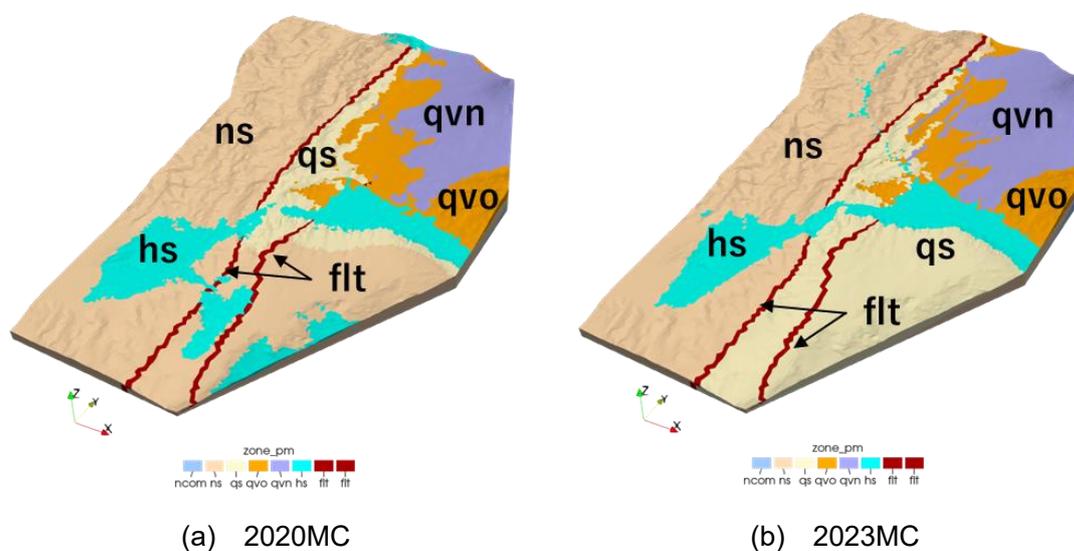


図 2-2-17 モデルの外観図（2020MC と 2023MC）

2020MC と 2023MC で使用する基本透水係数は表 2-2-3 と同じである。また、物質移行解析の解析条件は、表 2-2-2 と同じとした。

図 2-2-18 に順解析結果の地下水モデルの鉛直分布を示す。鉛直断面は、2020MC と 2023MC とともに、富士山と FGB-2 孔を通る鉛直断面と FGB-2 孔を通る南北断面である。 $\delta^{18}\text{O}$ の鉛直断面と塩分の鉛直断面から分かるように、陸域で涵養した淡水地下水が海側に張り出している。また、塩淡境界は垂直に立っているような形状であり、塩淡境界の幅（淡水から塩水に遷移している濃度帯）も短い。これは、高標高である富士山が内陸に存在することと透水係数の設定値から、陸側の淡水地下水の水圧が海側の塩水地下水より高くなったためと考えられる。

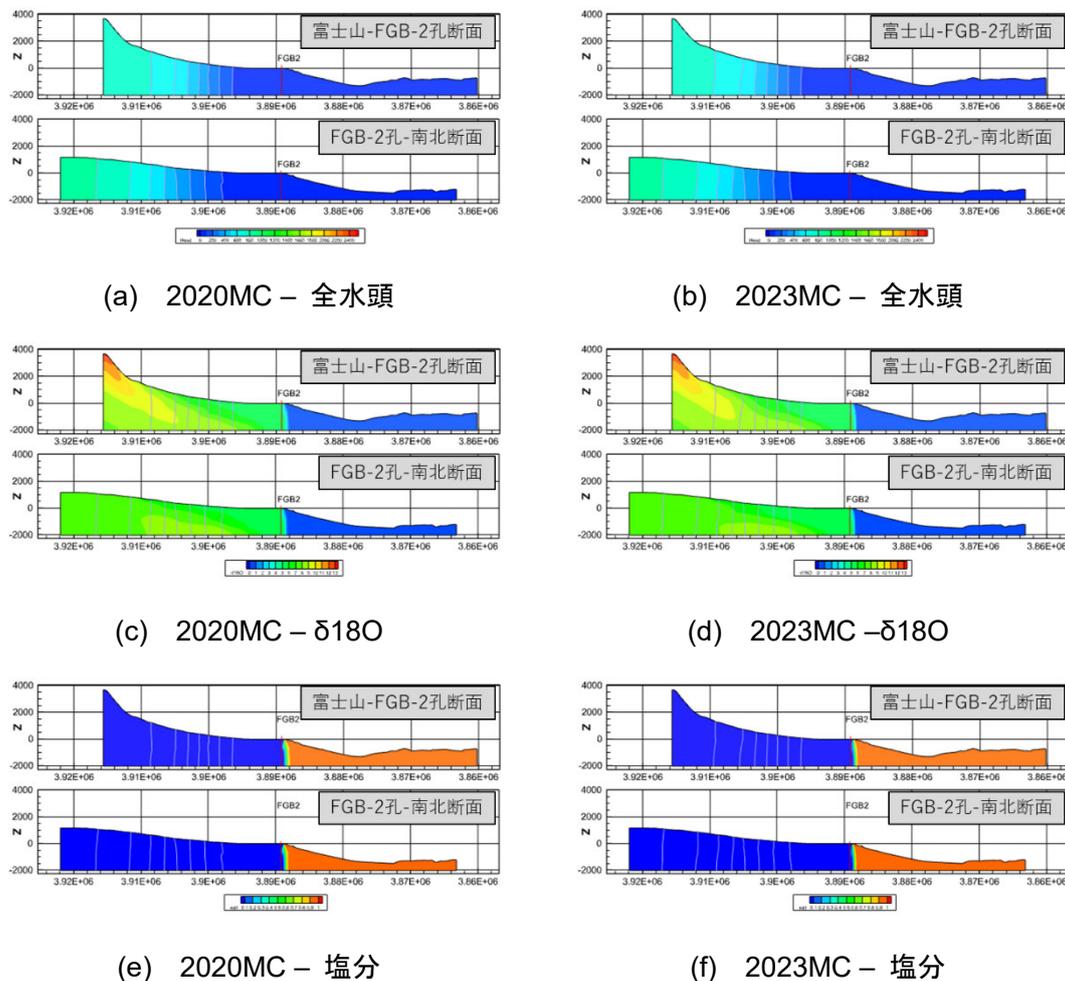


図 2-2-18 順解析結果の鉛直断面

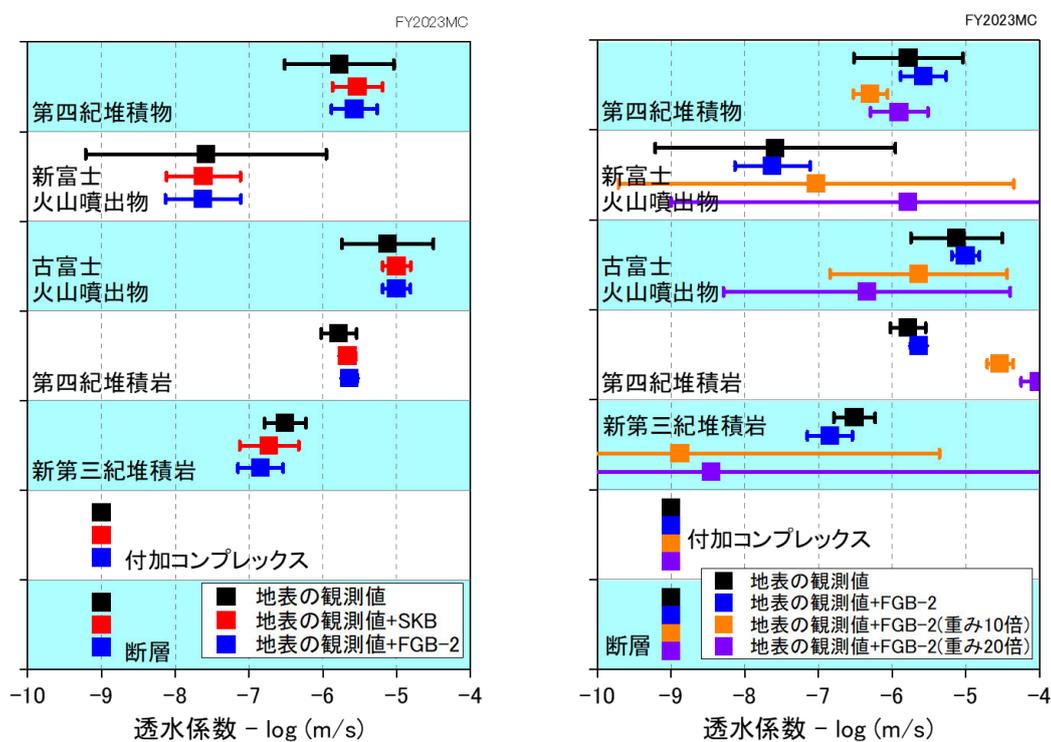
① 地下水モデルの校正

地質・地下水モデルの修正前に実施したように、地下水モデルの校正を行う。モデル修正前に実施した校正と同じように、透水係数を逆解析で推定する。新たに掘削されたボーリング孔（FGB-2 孔）で取得された観測値が逆解析結果に与える影響を比較するために、使用する観測値を変えて逆解析を行った。また、ボーリング孔で取得された観測値の重みを変えた逆解析を実施した。ここで使用した地下水モデルは 2023MC である。

逆解析に使用する観測値の違いと透水係数の推定結果を図 2-2-19 に示す。地表の観測値のみを使用して透水係数を推定した結果と、地表の観測値にボーリング孔（FGB-2 孔）を加えて透水係数を推定した結果は異なる。このとき、地表の観測値に追加した観測値が SKB 孔もしくは FGB-2 孔のものに関わらず、これらの透水係数の推定結果は、同じ傾向を示した。ボーリング孔で取得された観測値を追加した場合、第四紀堆積物と第四紀堆積岩での透水係数の推定誤差が小さくなった。これは、SKB 孔および FGB-2 孔の観測値が第四紀堆積物と第四紀堆積岩内に存在するためと考えられる。つまり、深部の地質区分の透水係数を逆

解析によって推定する場合には、ボーリング孔で取得される観測値が有効である可能性が高いことを示す。

新たに掘削されたボーリング孔（FGB-2 孔）で取得された観測値は、文献調査で得られた観測値よりも品質が高いと仮定して、FGB-2 孔で取得された観測値の重みを大きくした逆解析を実施した。FGB-2 孔の観測値に重みを大きくしたときの推定結果は、重みを大きくしない結果と比べて、推定誤差が大きくなった。また、第四紀堆積岩の透水係数の推定結果は、FGB-2 孔の観測値の重みを大きくすると、高くなる傾向にある。つまり、FGB-2 孔の観測値に計算値を合わせようとする、第四紀堆積岩の透水係数を高くする必要がある。

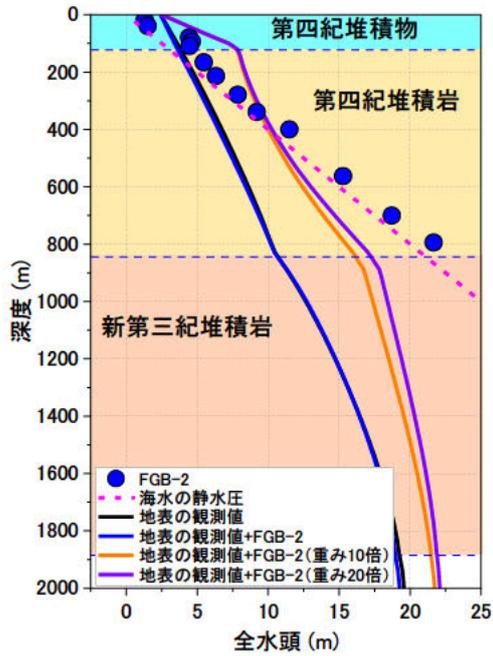


(a) 観測値の違い (b) 重みの違い

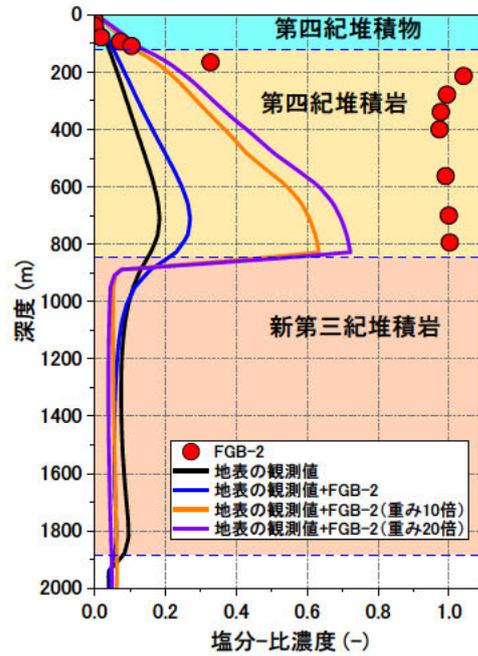
図 2-2-19 透水係数の推定結果 (2023MC)

図 2-2-20 に FGB-2 孔での鉛直分布図を示す。ここで示す計算値は、図 2-2-19 で示す透水係数の推定結果で解析した結果である。FGB-2 孔の観測値の重みを大きくすることによって、FGB-2 孔の観測値の再現性が良くなる傾向にある。しかしながら、観測値が多く存在する第四紀堆積岩の透水係数を校正されただけであり、計算値が示す鉛直分布が現実的であるとは言い難い。特に、塩分の鉛直分布については、深度 800 m 付近まで塩分が増加する傾向にあるが、それ以深は、淡水相当の値となっている。これは、前述した Ghyben-Herzberg 則に基づく傾向とは大きく異なる。また、これに伴って、地下水年代の鉛直分布も計算値と観測値は大きく乖離する。

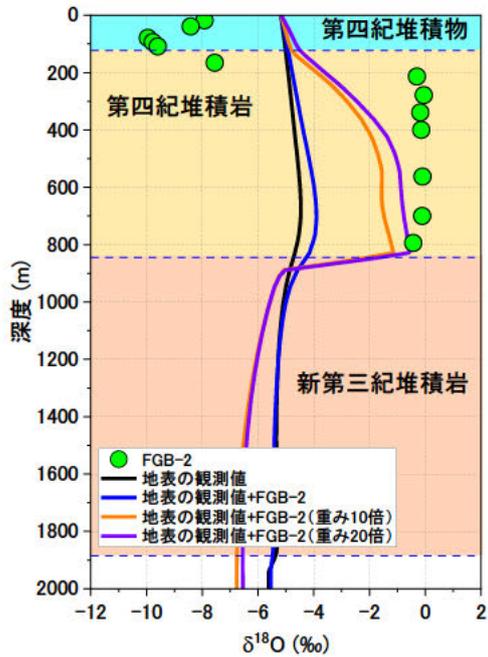
これらのことから、ボーリング調査で新たに取得された観測値を使って、地下水モデルの校正を行う場合、文献調査などで取得された観測値に対して、新たに取得された観測値の重みをどのように設定するか、検討する必要があると考えられる。現状、これは試行錯誤的に設定しなければならないと考えられるものの、①解析目的に合わせて重みを調整し、解析目的に即した結果が得られているか確認すること、②解析結果は現場で想定されるものか確認すること、の2点が重要と考えられる。



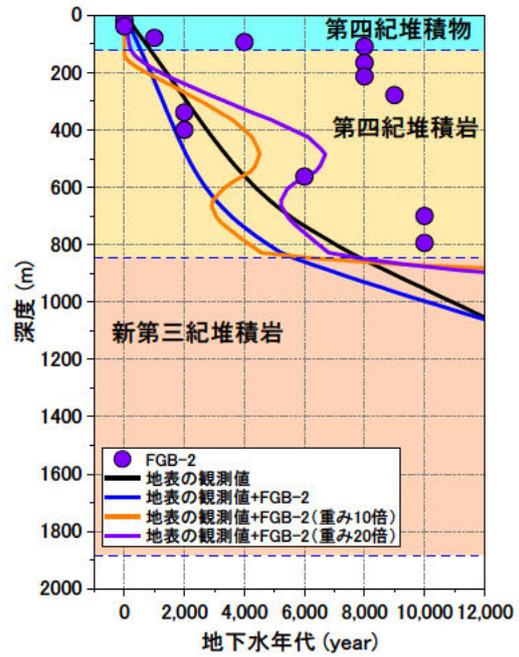
(a) 全水頭



(b) 塩分(比濃度)



(c) δ18O



(d) 地下水年代(14C年代)

図 2-2-20 FGB-2 孔における鉛直プロファイル

(3) まとめ

本研究では、調査、地質のモデル化、地下水のモデル化、地下水モデルの校正を繰り返すことにより、沿岸部における地質環境モデルの構築フローの高度化を図るとともに、地質・地下水モデルの不確実性低減を検討した。ボーリング掘削に時間を要し、想定した地層が現れなかったため、検討自体は1本のボーリング調査結果の反映までにとどまっている。

本研究における評価対象領域は、富士川流域である甲府盆地までの非常に広い領域が想定された。深度方向には2 km 程度までのモデルを作成し、地下水流動解析を実施したところ、分水嶺は富士山山麓から駿河湾の領域となった。このため、富士山山麓から駿河湾を評価対象領域とした。令和元年度～2年度は、既往文献・資料のデータを用いて、対象領域における地質の不確実性を複数のモデルで表現する試みを実施した。神縄断層の西方延長、富士山体直下の新第三系貫入岩、富士川河口沖の第四系貫入岩などの分布の有無を考慮し、合計7つの地質モデルを構築し、地下水流動解析に引き渡した。評価領域は、富士山周辺で地下水利用が活発であり、白糸の滝・湧玉池など有名な湧水もあり、地下水に関する文献は多かった。主な地下水流動経路は、溶岩などの火山噴出物が広く分布する浅部の情報が多い。このように、浅部で地下水が豊富にあり、一方で、深部は地下水利用の観点では開発の必要がないため、既存の文献情報は極めて少なかった。地質情報についても、本地点は火山噴出物に覆われており、地質観察が難しいことから、深部の情報は少なかった。このため、地質モデルは、非常に大きな不確実性を有していたと考えられる。地下水モデルも、多く調べられている湧水などの情報では、浅地層の評価は可能であるが、深地層の評価は困難であった。これは、文献調査データを用いた逆解析、感度解析などからも明らかであった。

令和元年度～2年度の地質モデルに基づく地下水流動解析の結果から得られたフィードバックを参考にして、令和5年度は第四系堆積岩類の空間分布を見直した。ボーリング調査では深度800 mまで更新統の堆積物が分布すると考えられることから、断層運動による沈降と富士川・富士山からの礫・砂の供給によるものと解釈し、沿岸陸域では広く第四系が分布しているモデルに修正した。また、駿河湾海底と富士山体直下の第四系の分布についてもモデルを見直した。ボーリング調査では、深度800 mまで掘削したものの、第三紀層に相当する地層は確認できなかった。このことから、富士川断層などの断層活動だけでなく、富士川による洗掘もかなり激しかったものと想定された。また、第三紀層などの深部の地層に関する情報は得られなかった。一方で、第四紀層は広く広がっていることが想定された。このため、第四紀層の広がりを見直し、モデルの修正を実施した。ボーリング孔での地下水調査結果では、地下水の涵養標高、滞留時間などが分かった。しかしながら、塩淡水境界は比較的浅く(深度100～200 m)、静水圧分布に近いこと、地下水流動が活発ではないこと、深度200 m以深は海水由来の塩水地下水であったことから、深部の陸域の情報を評価することが困難であった。このため、地下水モデルの校正においても、第四紀層よりも上部の地層しか不確実性を低減できなかった。さらに、グローバル感度解析により深部地質区分の透水係数の推定感度が低いこと、逆解析におけるボーリングデータの重み付けは難しいこと

が確認された。ボーリングデータの重み付けは、解析の目的に合わせて調整されることが望ましい。解析結果としては、ボーリングデータの重みを大きくするほど、ボーリング孔のデータに計算値が整合した。

これらの検討結果から、本地点では、地質・地下水モデルともに、文献調査と一本のボーリング調査では、不確実性は減らすことができなかった。このように、事前情報が十分ではないところでは評価が難しく、調査量の拡充が必要不可欠であると考えられた。深部の地層は、文献調査など既存の情報だけでは十分に把握できていないことが想定される。調査・評価計画の立案では、深部の地層の情報を取得できるように検討される必要がある。さらに、地下水年代や地下水中の同位体比など、地下水モデルの校正に有効であると考えられる観測データを取得することも重要である。

ここで使用した逆解析や感度解析に関わる数値解析技術は、地下水に関わる観測値（水圧や水質など）が地下水モデルの更新や校正に寄与できるかどうか定量化できる。これは、不確実性が高く調査量の拡充が必要な領域を定量的に議論することに有益であると考えられる。

参考文献

- 梅田浩司，柳沢孝一，米田茂夫，日本の地盤を対象とした透水係数データベースの作成，地下水学会誌，第 37 巻第 1 号，pp.69-77, 1995.
- 落合敏郎，三島溶岩流中の岩簾地不水に関する研究－溶岩流断面における地下水の流速分布と間ゲキ率ならびに地下水流動量の算定－，日本地下水学会誌，第 11 巻 1-2 号，pp7-16, 1970.
- 小野昌彦，井川怜欧，町田功，丸井敦尚，村中康秀，神谷貴文，大山康一，伊藤彰，水文環境図 No.9 「富士山」，
<https://gbank.gsi.jp/WaterEnvironmentMap/contents/fujisan/fujisan/fujisan.htm>., 2016.
- 金原啓司，日本温泉・鉱泉分布図及び一覧（第 2 版），産業技術総合研究所，2005.
- 国土交通省：水文水質データベース，<http://www1.river.go.jp/>.
- 国土交通省国土政策局：全国地下水資料台帳，<http://nrb-www.mlit.go.jp/kokjo/inspect/landclassification/water/basis/underground/F9/exp.html>.
- 国土交通省国土政策局：地下水マップ付属説明書（静岡地域），<http://nrb-www.mlit.go.jp/kokjo/tochimizu/F8/MAP/807099.pdf>
- 国土地理院、電子国土 Web デジタル標高地形図，
<https://maps.gsi.go.jp/#11/35.144898/138.481979/&ls=d1-no964&disp=1&lcd=d1-no964&vs=c1j0h0k0l0u0t0z0r0s0m0f1&d=vl>.
- 産業技術総合研究所，平成 26 年度 海域地質環境調査確証技術開発成果報告書，2015.

- 産業技術総合研究所, 平成 27 年度 海域地質環境調査確証技術開発成果報告書, 2016.
- 全国鑿井協会 (1981~2003) : 地下水位年表, 建設省河川局編.
- 土隆一、富士山の地下水・湧水, 富士火山, 山梨県環境科学研究所, pp.375-387, 2007.
- 戸崎裕貴, 浅井和由、富士山の地下水年代, 地学雑誌, 第 126 卷 1 号, pp.89-104, 2017. 2
- 日本水路協会、海底地形デジタルデータ M7000 シリーズ、Ver2.2 関東南部データ, 2008.
- 村本敏夫, 岸 和男, 地下水の塩水化についての研究—第 1 報 溶岩帯水層の水理地質学的性質—, 地質調査所月報, 第 18 卷, 第 6 号, pp.379-392, 1967.
- 幡谷竜太, 楠原文武, 地質モデルの構築とその不確実性への対処に関わる提言, 電力中央研究所報告, SS22012, 2023, 32p. 金原啓司, 日本温泉・鉱泉分布図及び一覧 (第 2 版), 産総研, 2005.
- 星野一男, 加藤碩一, 深部物性データ編集委員会, 本邦産岩石の深部物性データ集, 産総研, 2001.
- 安原正也, 風早康平, 丸井敦尚, 富士山の地下水とその涵養プロセスについて, 富士火山, 山梨県環境科学研究所, pp.389-405, 2007.
- 山本莊毅, 富士山とその周辺の陸水, 「富士山」総合学術調査報告書, 1971.
- Aquanty Inc., HydroGeoSphere (HGS) Theory Manual, 2015.
- Doherty, J., Calibration and Uncertainty Analysis for Complex Environmental Models
PEST: complete theory and what it means for modelling the real world, Watermark Numerical Computing, 2015.
- Ono, M., Machida, I., Koshigai, M., Ikawa, R. and Marui, A., Vertical distribution of groundwater age in and around the freshwater–saltwater transition zone determined using noble gases and carbon isotopes, Journal of Hydrology, 627, 130353, 2023.

2-3 塩淡境界近傍における地下水流動解析の高度化

(1) 目的と概要

沿岸部における高レベル放射性廃棄物の地層処分においては、塩淡境界の下位に分布する化石化水を含んだ領域が処分場となる可能性がある(図2-3-1)。そのため、流動性の塩水系地下水が胚胎される領域は、処分場に至る地下坑道(アクセス斜坑)が通るエリアとなり得るが、地下坑道を構成するコンクリート構造物(支保工及び覆工)空洞安定性には地下水の水質(特に塩分)が大きく関係する。そのため、地下坑道および処分場周辺の淡水系地下水と塩水系地下水の移り変わりを予測することは、施設建造時の安全につながる。また、海底下の塩水系地下水は緩慢ながらも流動している可能性があり、それは海域から陸域へ向かい、塩淡境界を通過して再び海に流出すると推定される(Reilly and Goodman, 1985)。そのため、人工バリアを通過した核種はこの塩水系地下水の流動の影響を受け、処分システムの安全評価に影響を及ぼす可能性がある。以上のような点から、沿岸部地下の塩淡境界の環境及びその長期的な挙動を評価することは、地下施設の建設時及び処分システム運用の安全評価において重要である。現地調査が難しい海底下の地下環境を、超長期にわたって評価するためには地下水流動解析は有力なアプローチの1つである。

本事業では、駿河湾沿岸部のFGB-2孔で取得したボーリング調査で得られた現地データと同地域で実施する塩淡境界近傍の地下水流動解析から沿岸部での塩淡境界の挙動メカニズムの解明を目指すと共に、海底下の塩水系地下水流動の評価技術開発の高度化に向けた成果の獲得を目指す。

本事業では、令和4年および令和5年において、駿河湾沿岸部における塩淡境界近傍における塩分濃度による密度差を考慮した密度流解析を実施した。令和4年度は既存研究等を元にした3層の地質構造のモデルを構築し、密度流解析の結果に影響を与えると考えられるパラメータに対する感度解析を行った。令和5年度は、令和4年度までに取得できたFGB-2孔のボーリング調査結果(透水係数分布、¹⁴C年代等)を元に5層の地質構造に更新すると共に、塩分量に伴う密度変化のみならず温度に伴う密度変化も含めた連成解析を実施した。また、最終的に実データに最も近いと考えられるパラメータデータセットを用いて海水準変動を含めた超長期の密度流解析を実施し、超長期における沿岸部での塩水分布変化の評価を行った。なお、解析には地圏流体シミュレーターGETFLOWS((株)地圏環境テクノロジー)を用いた。

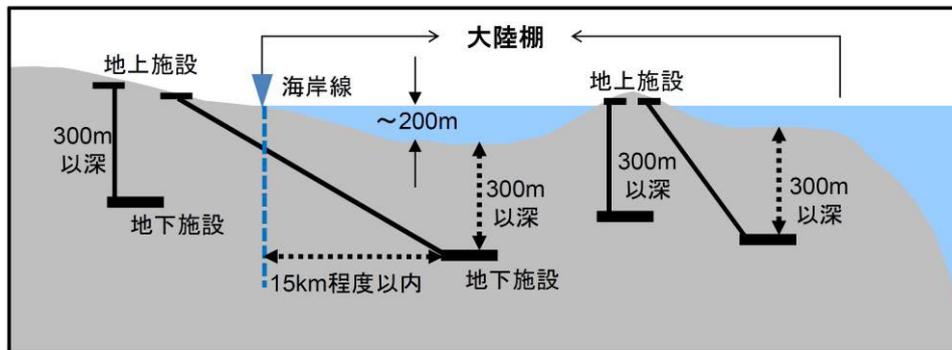


図 2-3-1 沿岸部における地下施設設置のイメージ。

「沿岸海底下における地層処分の技術的課題に関する研究会とりまとめ」より。

https://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy_environment/engan_kaiteika/pdf/report01_01.pdf

(2) 3層地質構造モデルの検討

①地質構造モデルと計算設定

図 2-3-2 に解析領域および完新統基底面標高分布および上部更新統基底面標高分布を示す。図中の赤破線は FGB-2 孔を通るものであり、この線の位置で 2 次元モデルを構築した。本項では感度解析を実施した 2 次元モデルについて詳細を報告する。図 2-3-3 として 2 次元モデルの地質分布を示す。また、表 2.3-1 として解析条件（境界条件）を、表 2.3-2 として、基本としたモデルの水理パラメータを示す。計算初期状態については、モデル全体を塩水で満たした状態から計算を開始し、ほぼ定常状態に至ったと考えられる状態まで計算を行い、計算結果とした。表 2.3-2 で設定した基本ケースの水理パラメータを基準に、各層の透水係数およびその異方性、分散長を変えて計算を行い、それらの水理パラメータが FGB-2 孔周辺の淡水／塩水系地下水の流動に与える影響について検討した。なお、詳細については令和 4 年度の本事業報告書（産業技術総合研究所ほか、2023）を参照のこと。

② 計算結果と考察

基本ケースによる 2 次元モデルの塩分濃度分布（海水混合率分布）を図 2-3-4 に示す。図 2-3-4 の右下の図は FGB-2 孔周辺を拡大したものである。図の左側が陸域、右が海域である。陸域側の境界として産業技術総合研究所ほか（2021）のモデルを用いているため、陸域側面境界はすべて淡水系地下水となっているが、陸域の境界を非流動境界としたケースでも FGB-2 孔周辺の解析結果にほぼ影響がないことは確認している。FGB-2 孔周辺の淡水系地下水／塩水系地下水の分布、流向の計算結果より、海底下から侵入した地下水が塩淡境界に沿って沿岸部付近で流出する流れが生じていることが分かる。

水理パラメータを変更したケースの一例として、基本ケースと完新統の異方性を変更し

たケースの計算結果を図 2-3-5 に示す。FGB-2 孔における塩分濃度、地下水年代、地下水流速の深度分布（図 2-3-5 (a)~(c)）では、塩分濃度分布には大きな差が見られないが、地下水年代および地下水流速の分布には違いが生じている。地下水年代の計算結果では、塩淡境界付近の深度で年代が相対的に古く、その下位で新しい地下水が見られ、FGB-2 孔で実施したボーリング調査の結果と同じ傾向であった。また、塩淡境界の最下部（塩水混合率 0.95 付近）において、地下水流速が極端に遅い層が認められた。これは、陸から海へ向かう淡水系地下水と、海から陸へ向かう塩水系地下水が接する流動境界と呼ばれる領域（登坂、2002）と考えられる。図 2-3-5 (d)(e)より、この流動境界に該当する深度では、ほぼ真上に向かう流動が発生している。現場での流向流速計測では水平成分の流速を測定しているため、本解析との厳密な比較は疑問が残るが、現場での計測結果による該当深度の流速と本解析の結果はどちらも 1.0×10^{-7} m/s 以下とオーダーとしては矛盾がない。また、計算結果による地下水流速が最も遅い深度と地下水年代が最も古い深度は一致しているとは言い難い。

基本ケースと完新統の異方性を与えたケースでは、特に顕著な違いとして塩淡境界が海域に張り出している。これは、鉛直方向の透水性が低減したことにより海域からの塩水浸透が緩やかになり、一方で陸域からの側方流動が活発となるため、陸域の淡水の押し出しが優勢になるためと考えられる。このように、地層の異方性の存在は塩淡境界の位置を大きく変える可能性があることが確認された。なお、本解析では、2次元同様に3次元モデルにおいても水理パラメータの違いによる解析を実施しており、2次元モデルと3次元モデルにおいても、各水理パラメータが解析結果に与える影響はほぼ同様であることが確認された。

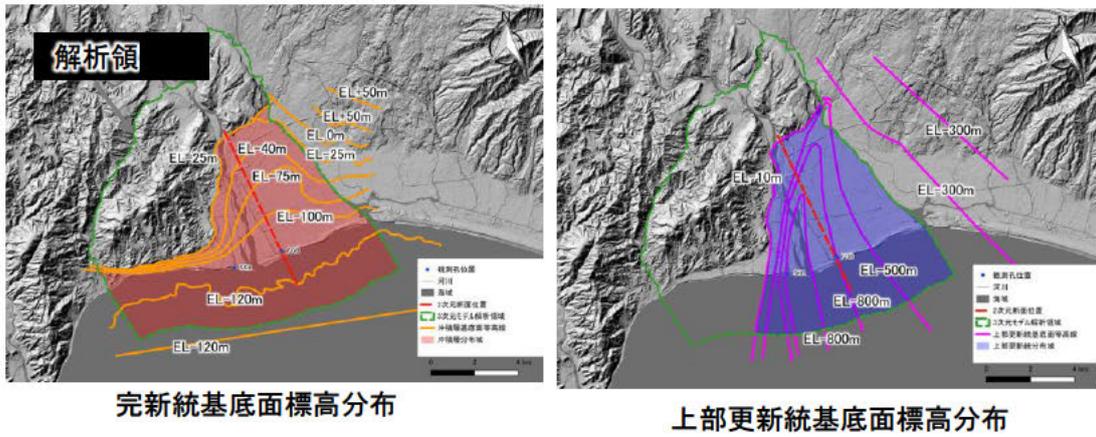


図 2-3-2 解析領域および完新統基底面標高分布（左）および
上部更新統基底面標高分布（右）

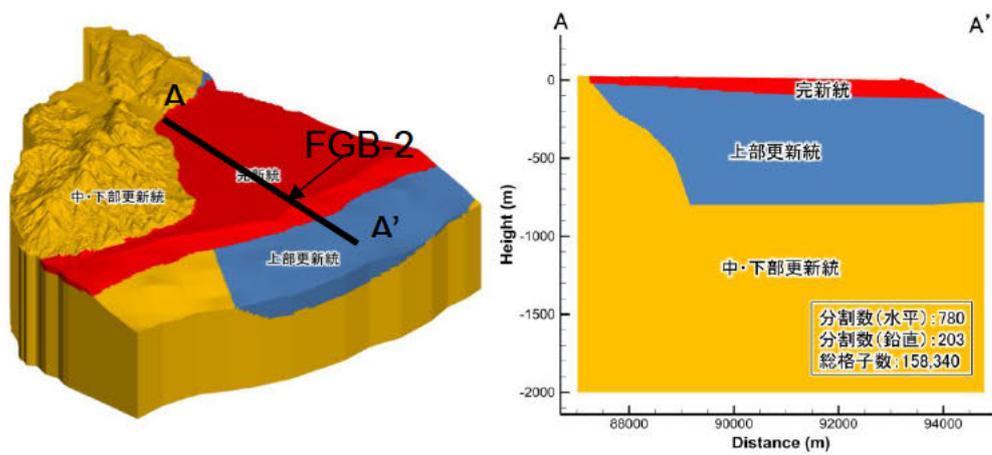


図 2-3-3 (a) 3次元地質モデルの鳥観図（縦：横＝2：1）および(b)FGB-2 孔を通る断面での2次元地質モデル（縦：横＝3：1）。

表 2-3-1 解析条件（境界条件）

境界条件	設定条件
上部境界	涵養フラックスとして1000 mm/yr、塩分濃度C = 0、地表面は流出境界
下部境界	EL-2000 mで非流動境界
陸域の側方境界	産業技術総合研究所ほか（2021）の定常解析結果の水頭固定.
	2Dモデルの場合は陸域側の端の位置における値。
海底面	清水港での平均海水準（0.243m）を与え、海水密度を考慮した静水圧固定境界、および海水濃度を与えた濃度固定境界.

表 2-3-2 基本モデルでの水理パラメータ

地層区分	透水係数	有効間隙率	縦分散長	垂直横分散長
	(m/s)	(-)	(m)	(m)
完新統	1.0×10^{-4}	0.2	30	縦分散長の1/10
上部更新統	1.0×10^{-5}	0.2	30	縦分散長の1/10
中・下部更新統	1.0×10^{-7}	0.2	30	縦分散長の1/10

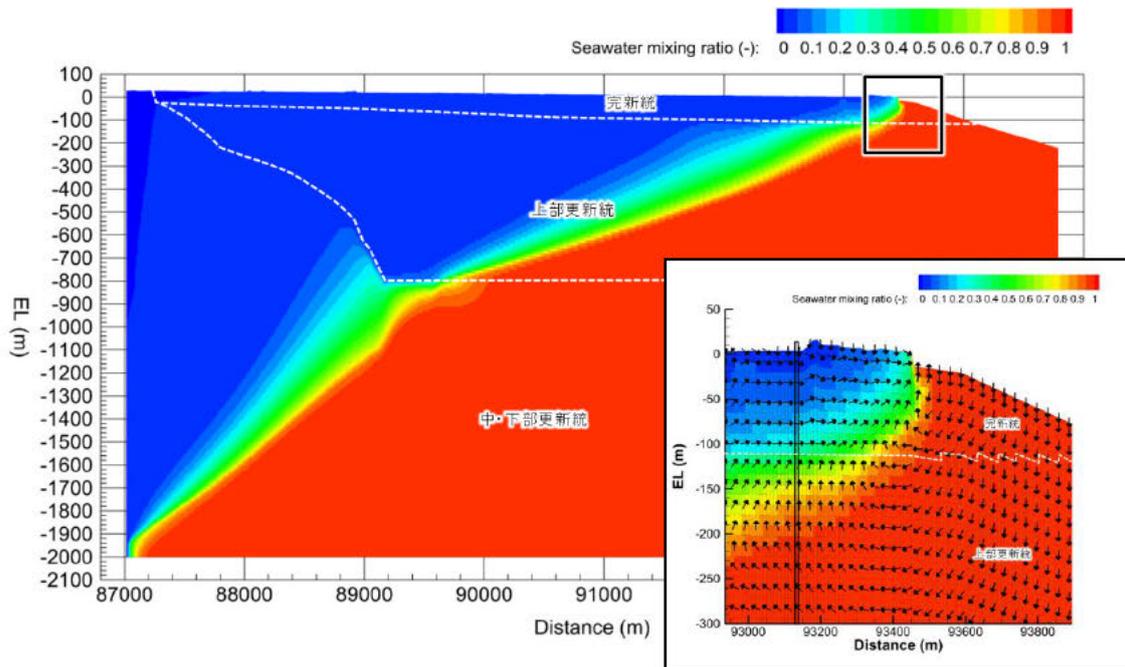


図 2-3-4 基本モデルでの解析結果（塩分濃度を海水混合率として表示）。左側が陸域、右側が海域である。FGB2-孔を含む右上の黒枠内の解析結果を右下に拡大している。

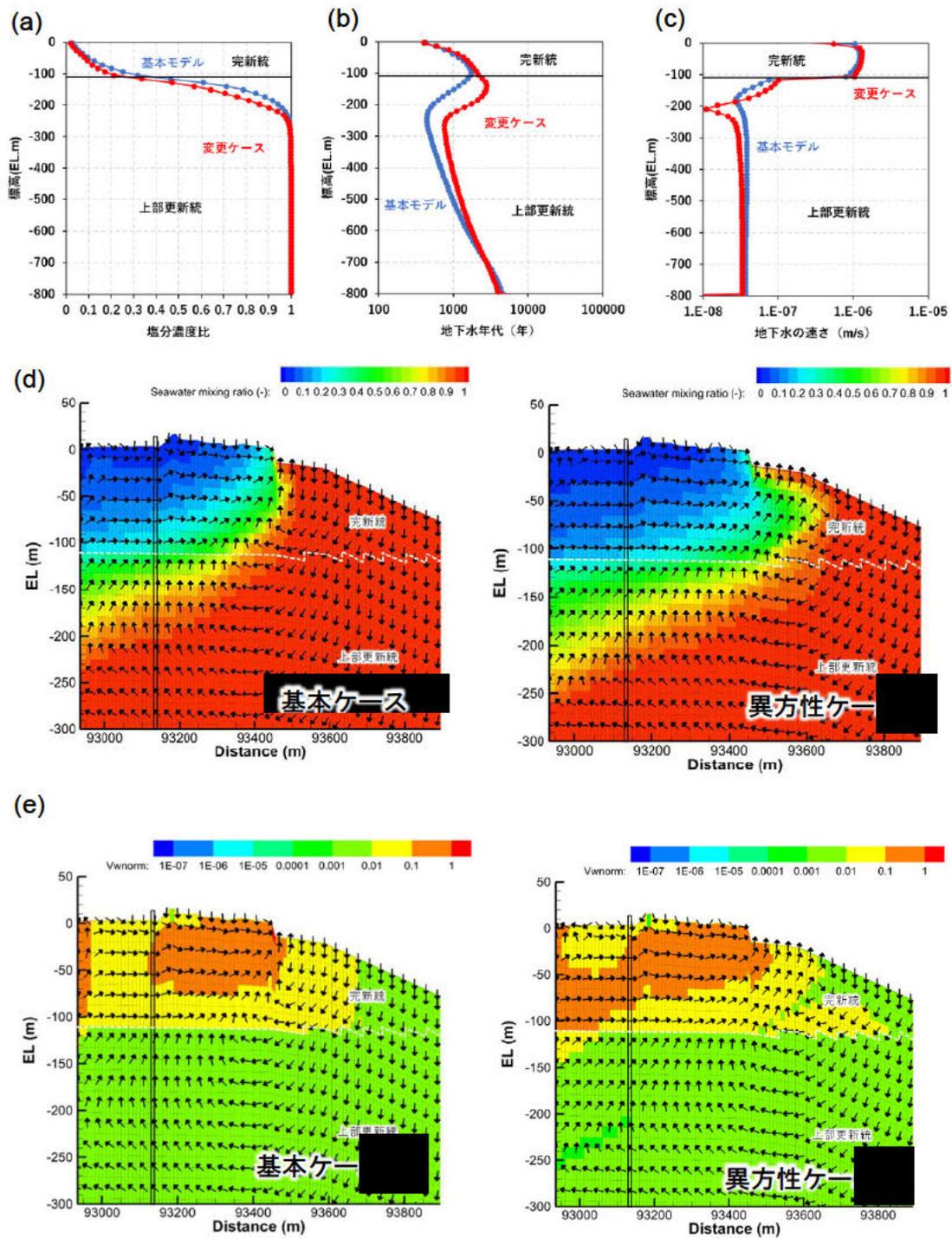


図 2-3-5 2次元モデルにおける基本ケースと完新統の透水係数に異方性を与えたケース ($K_h = 1.0 \times 10^{-4}$ m/s、 $K_v = 1.0 \times 10^{-5}$ m/s) における FGB-2 孔地点の塩分濃度と地下水年代、流速の鉛直分布 (それぞれ(a), (b), (c)) と、FGB-2 孔周辺の塩分濃度 (d) と地下水年代(d)の分布 (左が基本ケース、右が異方性を与えたケース)。

(3) 5層地質構造モデルによる検討

①地質構造モデルと計算設定

FGB-2 孔でのボーリング調査結果を元に地層構造を再検討し、図 2-3-6 に示す 3 次元モデルを構築した。5 層モデルでは、3 層モデルにおける中・下部更新統に相当する層のさらに下位に基盤となる層（第 V 層）を設定している。これは、FGB-2 孔の掘削において深度 800m においても基盤が出現せず、沿岸部での反射法地震探査の結果を再解釈し設定したものである。また、ボーリング調査において得られた透水係数の分布、Cl 濃度、地下水年代等を元に各境界層の深度を決定した。ただし、現地データは FGB-2 孔の 1 地点で得られたものであり、3 次元モデルを構築する際には、それらの結果を元に各層基底面分布を推定して与えた。

また、これまでは塩分濃度による密度差による流動を対象としていたが、本解析ではさらに温度（熱）による密度変化も連成し、塩分・温度連成密度流解析を実施した。表 2.3-3 に解析条件を示す。表 2.3-4 としてモデルに与えた温度に関する地盤物性を示す。なお、水・塩分に関する水理物性に関しては、FGB-2 孔で得られた塩分濃度、温度、全水頭、年代をキャリブレーションターゲットとして主に透水係数とその異方性を対象に、20 ケース以上の計算により試行錯誤的に決定した。本解析で最も実測値に近い結果が得られた透水係数とその異方性を表 2.3-5 に示す。

初期条件としては、(2)と同様にモデル全体が完全に塩水で満たされている状態から計算を開始し、ほぼ定常状態に至ったと考えられる状態まで計算を行い、最終結果とした。なお、解析に関する詳細は令和 5 年度本事業報告書（産業技術総合研究所ほか、2024）を参照のこと。

②計算結果と実測値との比較

図 2-3-7 として FGB-2 孔で得られた実測値分布に最も近いパラメータセットによる最終ケースの塩分濃度分布、温度分布の断面を示す（位置は、FGB-2 孔を通る断面）。塩分濃度分布では、塩水（海水）が陸域の淡水系地下水の下に入り込むような形での塩淡水境界が形成されているが、第 IV 層の基底面に沿って陸域深部にまで侵入し、それと共に上部（浅層）へ、塩水混合率の高い範囲が広がっている様子が認められる。地下水流向によると、この上部へ広がる塩水混合率の高い範囲では渦を巻くような対流が生じていることが確認された。この対流は、温度を主変数から除いた（温度を一定とした）解析結果には見られず、温度を連成した解析による現象であると考えられる。これは、沿岸部地下の塩淡水境界付近の地下水流動を評価する場合に、環境によっては温度変化に伴う密度変化が地下水流動に影響を与える可能性が示唆された。温度分布では、FGB-2 孔地点は比較的低温であるが、陸域において浅層でも比較的高温帯が見られる。これは海水が淡水との密度差により陸域の地下に入り込み、塩淡水境界に沿って上昇（地表面付近に流出）する際に、深部の高温のエネルギーを輸送する役目を果たすためと考えられる。

図 2-3-8 に FGB-2 孔での各鉛直分布の実測値と計算結果（格子サイズを 50m としたケースと 100m としたケース）を示す。塩分濃度分布に関しては、塩淡境界下部でやや違いが見られるものの、全体的には概ねよい一致を示している。一方、温度分布については、全深度の平均的な温度（絶対値）は概ね合っていると見られるが、実測値で得られた逆 S 字のような温度変化は認められなかった。また、地下水年代に関しては特に塩淡境界に当たる深度で実測値よりも若い地下水年代となる結果となった。

③超長期の海水準変動を考慮した 3 次元密度流解析

前述の 3 次元温度・塩分濃度連成密度流解析では海水準を一定として、結果がほぼ定常状態になるまで計算を行ったが、次に海水準変動に伴う塩分濃度分布および温度分布を評価するため、12 万年周期の単調な海水準の上り・下がり（最大、およびそれに伴う涵養量、気温、海水温の変化を与えて、24 万年（2 周期分）の計算を実施した。全項目において、100 年毎に段階的に入力値を変化させるように与えた。なお、初期状態として②の最終データセットでの計算結果を用いている。

④計算結果と考察

図 2-3-9 では、海進期・海退期のピーク時（0 万年、10.2 万年、12 万年、22.2 万年および 24 万年）の、FGB-2 孔断面での塩分濃度分布、温度分布を示す。同じ海進期に当たる 0 万年（計算開始時）、12 万年、24 万年を比較すると、塩分濃度・温度共に 12 万年と 24 万年の分布は類似しているが、0 万年（計算開始時）の分布とは大きな差が認められた。試験的に 12 万年の計算結果から海進期の計算条件を固定し計算を継続した結果、さらに 13 万年程度の計算を行うことで定常状態（0 万年の結果）とほぼ一致する状態に達することが求められた。特に塩分濃度に関しては、12 万年と 24 万年でも計算結果にやや違い（第IV層基底面付近での塩分濃度の分布）が見られ、これは 12 万年周期の海水準の変動に伴う塩分濃度分布の変化の履歴が残存している可能性を示唆しているものと考えられる。10.2 万年、22.2 万年は海退期にあたり、海水面が低下している環境である。駿河湾の場合、海底地形が急峻であり、海水面の低下に伴い陸化する範囲は広くないが、それに伴う塩淡境界の移動や地下温度の変化は、浅層においても生じる可能性が示された。

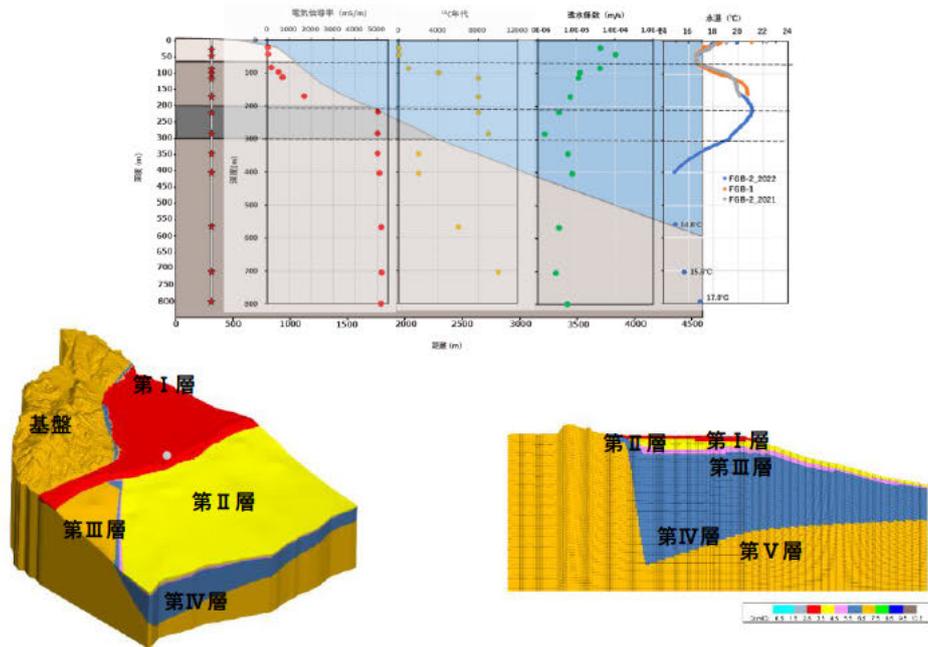


図 2-3-6 5層モデルの概要(a)と構築した3次元地質モデルの鳥観図(b)、FGB-2孔を通る2次元断面図(c)。FGB-2孔でのボーリング調査結果を元に各層の境界を設定(a)し、その深度割合を元にモデル全域の各層基底面分布を作成(b)(c)。

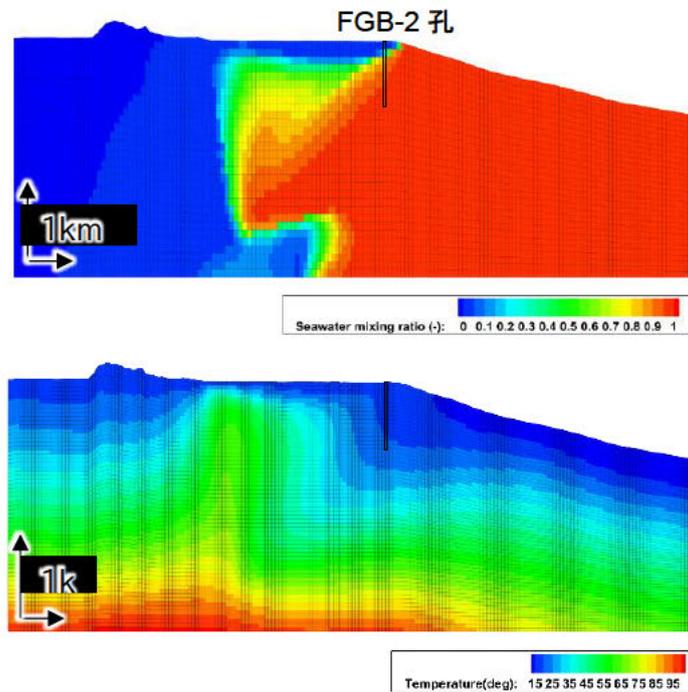


図 2-3-7 FGB-2孔で得られた実測値分布に最も近いパラメータセットによる最終ケースの塩分濃度分布(上)および温度分布(下)。

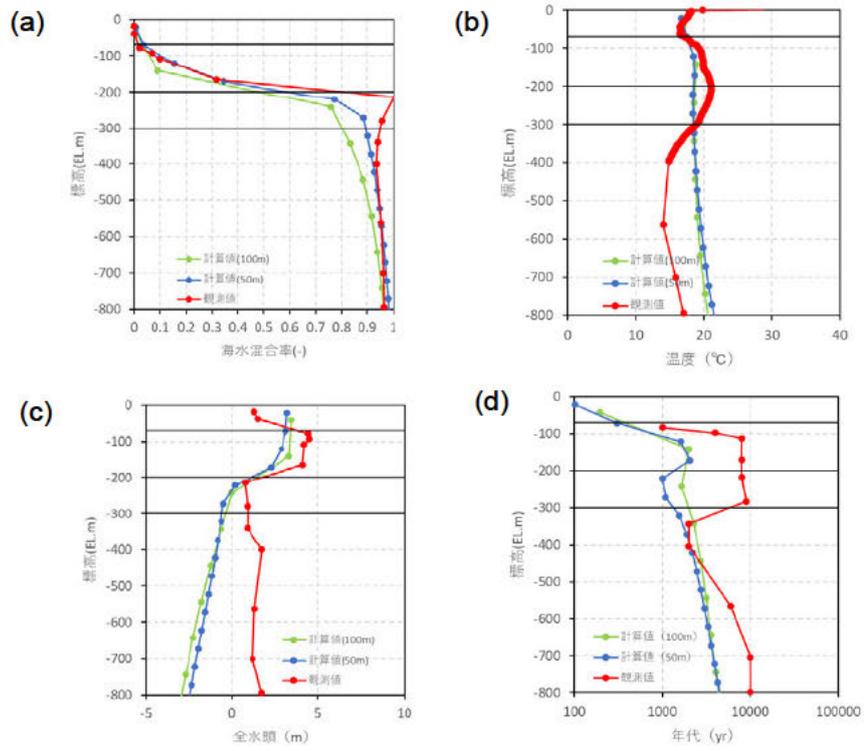
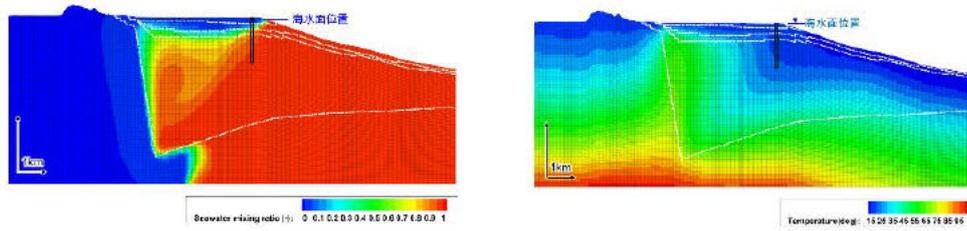
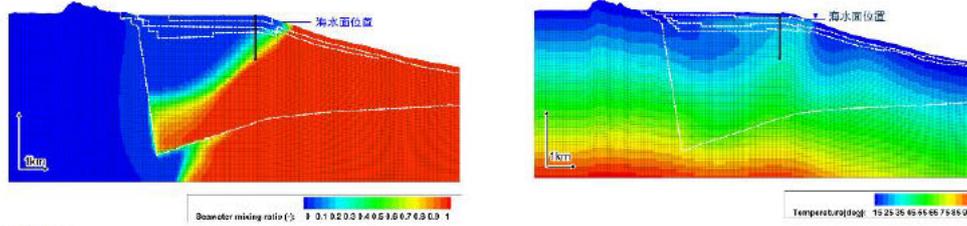


図 2-3-8 FGB-2 孔地点における実測値および最終ケースでの計算結果。(a)塩分濃度、(b)温度、(c)全水頭。(d)地下水年代。計算結果は格子サイズ 50 m、100 m のケースを示す。

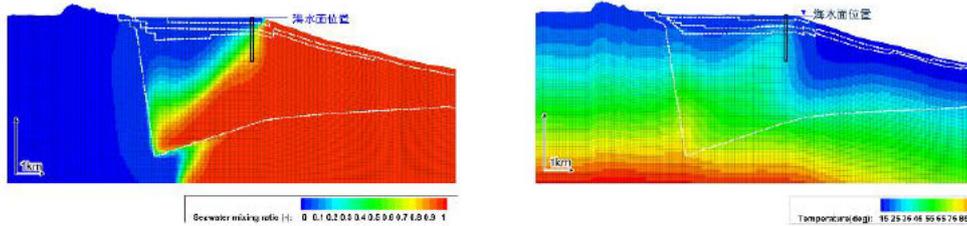
(a) 0 万年 (計算開始時)



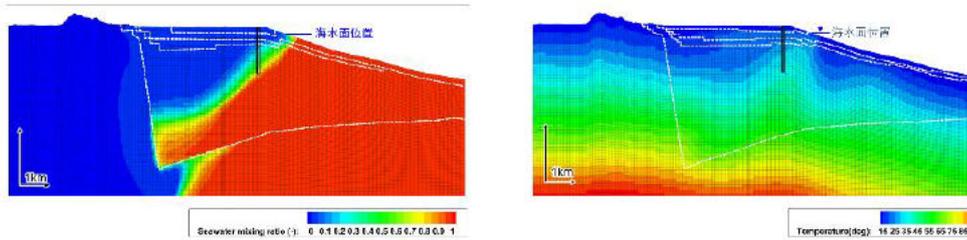
(b) 10.2 万年



(c) 12 万年



(d) 22.2 万年



(e) 24 万年

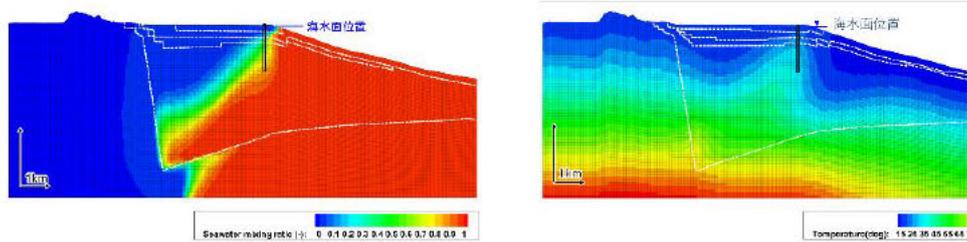


図 2-3-9 海進・海退のピーク時 ((a) 0 万年、(b) 10.2 万年、(c) 12 万年、(d) 22.2 万年、(e) 24 万年) の FGB-2 孔を通る断面における海水混合率分布 (左) および温度分布 (右)。

(4) まとめと今後の課題

本事業では、駿河湾沿岸部を対象に 2 次元および 3 次元の密度流解析を実施し、FGB-2 孔で取得した現地データとの検証を実施した。解析結果と現地データを一致させるまでには至らなかったが、以下の点が明らかとなった。

- ・現地データで得られた地下水年代分布（塩淡境界深度で古く、その下位に相対的に新しい塩水系地下水が存在する）傾向は、モデルの地質構造や水理パラメータによるところがあるが、解析でも再現される可能性があることが明らかとなった。
- ・密度流解析において、沿岸部の塩淡境界の形状は、表層地質の透水性、涵養フラックス、地質の（透水性の）異方性によって変化する。
- ・地質環境によっては、温度による密度変化も塩分濃度の分布に少なからず影響を与える可能性が示された。

本事業では、駿河湾沿岸部のような高透水性の地質かつ動水勾配の大きい地域において、塩分濃度分布および塩淡境界の形状の変化がどのような条件、水理パラメータにより変化するのかを、実測値と比較することで検討を行った。FGB-2 孔での調査結果と本解析を照らし合わせると、塩淡境界付近では地下水流動が非常に遅く測定が困難である可能性があることから、地下水年代の測定はモデルの検証に有用であると言える。また、現地での温度測定は、比較的精度よく、かつ連続的に測定できる項目であり、温度を含めた密度流解析による評価手法の高度化が求められる。このように、本事業で得られた成果をさらに追及し、駿河湾沿岸部のような陸域地下水流動の活発な地域における塩水系地下水流動評価技術の体系化を進める必要がある。一方で、沿岸部の岩盤地質のような透水性の低い地質環境における塩淡境界の評価は今だ未発展であり、今後そのような地域での現地調査及び流動解析を実施すると共に、沿岸部における塩水系地下水流動と地質環境の類型化を実施することが求められる。

引用文献

Reilly T.E. and Goodman A.S.: Quantitative analysis of saltwater-freshwater relationship in groundwater systems – A historical perspective, *Journal of Hydrology*, 80, 125-160.

登坂博行:地質時間にわたる淡塩漸移帯の形成過程と形態変化に関する数値的検討(その2) –動的境界条件下における検討–, *応用地質*, 43(5)、306–315.

産業技術総合研究所・原子力環境整備促進・資金管理センター・電力中央研究所:令和2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 沿岸部処分システム 評価確証技術開発 報告書. 2021.

産業技術総合研究所・原子力環境整備促進・資金管理センター・電力中央研究所:令和2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 沿岸部処分システム 評価確証技術開発 報告書. 2022.

産業技術総合研究所・原子力環境整備促進・資金管理センター・電力中央研究所:令和2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 沿岸部処分システム 評価確証技術開発 報告書. 2023.

第 3 章 海陸連続 3 次元地質環境モデルの妥当性の検証に向けた
データ取得方法の高度化

3-1 陸域から海域にかけての地質環境特性の把握技術の高度化

(1) 背景

平成 29 年 5 月に経済産業省が公開した科学的特性マップにおいて、日本国内の沿岸域の大部分は「好ましい特性が確認できる可能性が相対的に高い地域」のうち、「輸送面でも好ましい」地域とされている（経済産業省，2017）。また、これに先立つ平成 28 年 8 月の「沿岸海底下における地層処分の技術的課題に関する研究会とりまとめ」では、沿岸部の地質環境において検討すべき項目として、海水準変動、塩淡境界、水理場、化学場が挙げられており（経済産業省，2016）、これらの項目は全て地下水に関連づけられるものである。よって、沿岸部における地下水特性の把握が、沿岸海底下等における安全な地層処分事業の実施に必要不可欠であることがわかる。この平成 28 年のとりまとめでは、海域を含めた沿岸部における地層処分を実現するための基本的な技術は概ね整備されているとしながらも、技術の高度化に引き続き取り組む必要性が示されている。このような背景のなか、平成 30 年 3 月に公開された”地層処分における全体計画（平成 30 年度～令和 4 年度）“では、沿岸海底下の地質環境特性の調査・評価技術の整備が項目として挙げられており、沿岸部陸域から沿岸海底下までを対象とした広域地下水流動の連続性や長期にわたる安定な水理場や化学環境の存在、断層の地下水流動への影響などが把握できるように調査・評価技術を体系的に整備することが求められている（地層処分研究開発調整会議，2019）。本事業でのボーリング調査は、この問題意識を受けて行われたものであり、概ね概要調査～精密調査段階初期での調査に資することを目的としている。

(2) 目的

①概要

高レベル放射性廃棄物の地層処分では、塩水領域を処分地にする可能性もあるため、処分システムの超長期の成立性を議論する上でも、塩水系地下水流動の調査方法を整備する必要がある。超長期の地下水および核種の挙動を予報するためには、流動解析（シミュレーション）に頼らざるを得ないが、陸域の淡水系地下水に関しては、数多くの実証例がある一方、塩淡境界以下の地下水流動解析（密度流解析）では、沿岸都市部での塩淡境界の位置を予測することに主眼が置かれており、現場データと解析結果を比較する試みは行われていない。このような現状を考えると、まずは、1つの地域で、信頼できる塩水系地下水流動の概念モデルの構築に取り組むべきである。

信頼できる概念モデルの条件として、少なくとも複数の手法で得られた地下水データと整合している必要があるだろう。地表からの調査手法のうち、ボーリング調査およびボーリング孔を用いた調査は、最も正しく地下情報を把握できる方法であるが、塩水系地下水の動きは極めて遅いと予想され、調査項目が完全に定まっていない。そこで、本事業では高透水性の地質を有し、活発な塩水系地下水流動が期待される駿河湾沿岸部をボーリング調査地

点とした。すなわち、最も塩水系地下水流動の調査が行いやすい地域を選定したということである。ボーリング地点は海岸線から 300m の位置としたが、これは陸域から海に向かって流動する淡水系地下水と、海域から流動してくる塩水系地下水の情報を一度に取得することができると考えたためである（図 3-1-1）。この地点で地下水の流向流速測定、水温プロフィール測定など、実績のある技術を塩淡境界や塩水領域にて適用するとともに、地下水年代評価法等を組み合わせ、塩水系地下水流動にかかる概念モデルを構築した。

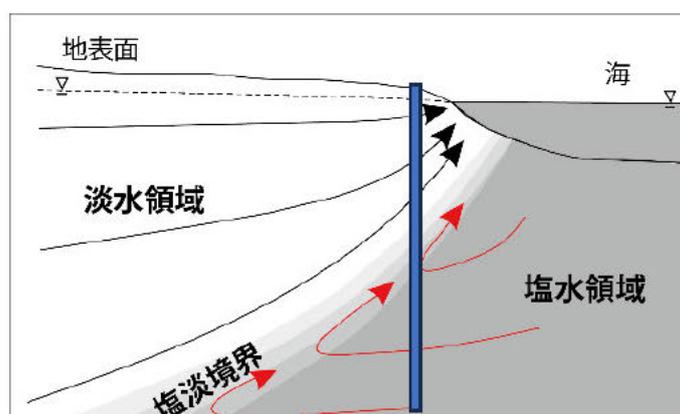


図 3-1-1 塩水くさびと想定されている地下水流動

②調査地点およびボーリング

本事業においては FGB-2（深度 800m）および FGB-3 孔（100m）という 2 本のボーリングを実施し、複数深度にて水理試験をおこなうとともに地下水を採取した。ボーリング孔の位置を図 3-1-2、それぞれのケーシングプログラムを図 3-1-3 に示す。作業用水（掘削泥水、孔内洗浄水、試験用水）には、トレーサーとして蛍光染料 Amino G.acid（CAS No.842-15-9）を添加し、 $1\text{mg/L} \pm 10\%$ の濃度目標値を維持するように管理した。また、蛍光染料の測定には、掘削水中の泥剤を凝集剤によって分離する手法を用いた（越谷ほか、2015）。この手法は、①泥剤の分離を容易とし凝集剤を使用しなかった場合と比較して 1/4 程度の時間で検体を作成可能、②凝集剤が中和作用を示すため、トレーサーとする蛍光染料によっては緩衝剤を添加することなく、中田ほか（2017）の示す測定に適した pH の検体を作成できる、といった利点を有する。

地下水の採取深度と流向流速測定深度を表 3-1-1 に示す。FGB-2 では、地下水の採取深度において、地盤工学会基準（単孔を利用した透水試験方法：JGS 1314-2003）に準じた段階揚水試験、定流量揚水試験、回復試験を連続的に実施し、揚水終了前に揚水する地下水を採水するというサイクルを繰り返した。水理試験では孔底から上部 3～6m 程度の区間をシングルパッカーで遮へいした。これにより、試験区間のみ掘削泥水を排除し、迅速

な調査を行うことができる。一方、FGB-3でも、掘削後設置したスクリーン区間に対して、FGB-2と同様に水理試験および採水を実施した。試験区間は、シングルまたはダブルパッカーを用いて遮蔽した。また、掘削後は孔径検層、電気検層、音波検層、密度検層、中性子孔隙率検層、BHTV検層など、各種物理検層を実施した。検層結果については令和4年度報告書を参照されたい。

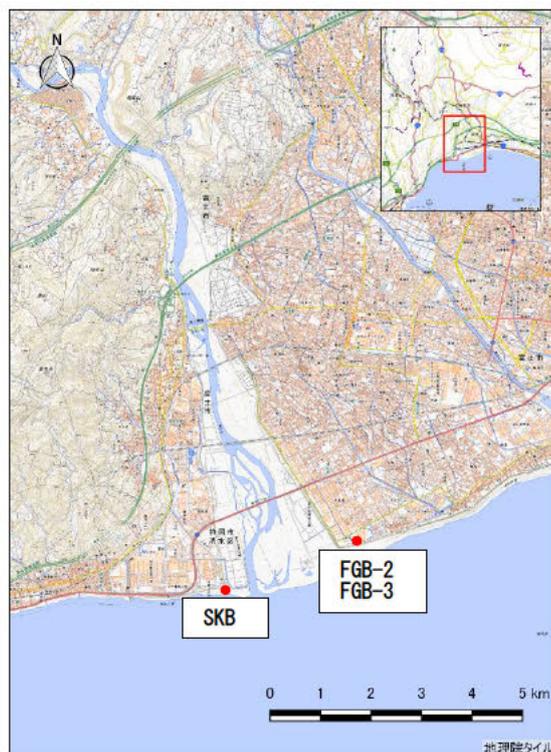


図 3-1-2 FGB-2 および FGB-3 孔の位置を示すマップ（地理院タイル <https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html> に加筆）

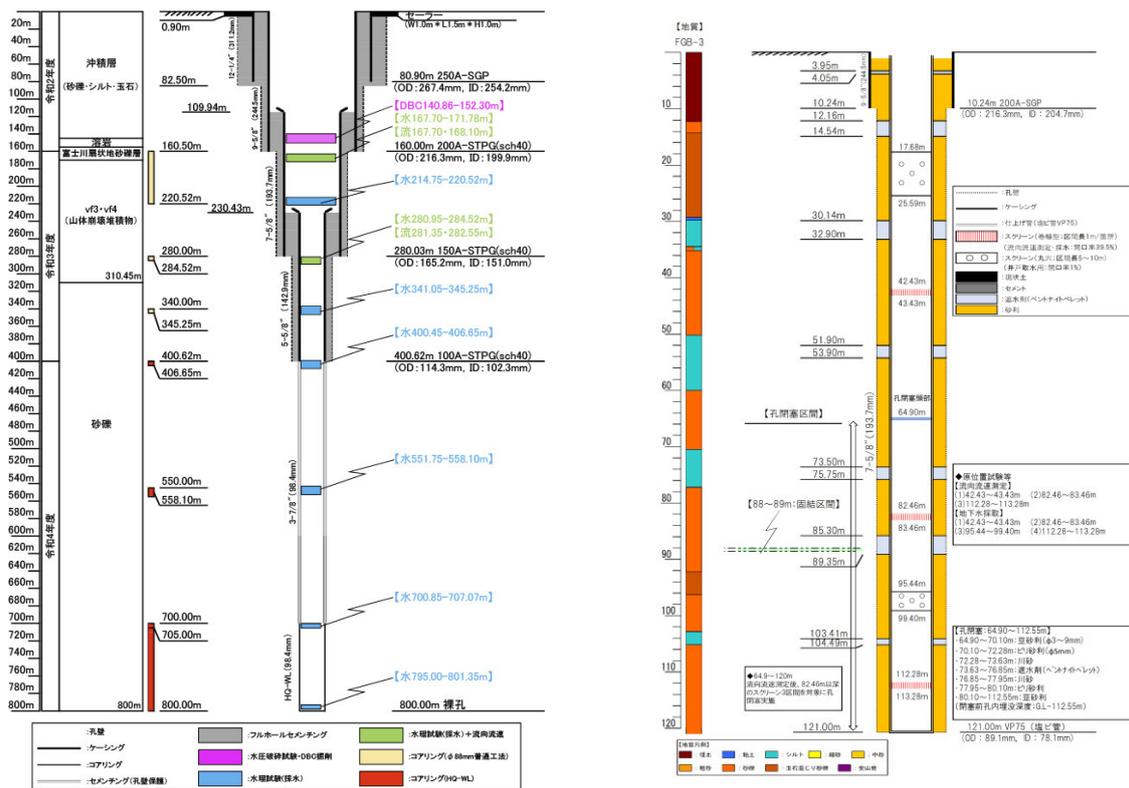


図 3-1-3 FGB-2 孔 (左) および FGB-3 孔 (右) のケーシングプログラム

表 3-1-1 採水および流向流速調査深度

調査項目	実施深度 (m)
採水	22, 43, 83, 97, 113, 170, 218, 283, 343, 404, 566, 704, 794
流向流速測定	42, 82, 111, 160, 220

(3) 結果

①ボーリング調査結果

調査結果を図 3-1-4 に示す。地下水中の Cl⁻濃度から換算した淡水系地下水と塩水系地下水の混合率より(図 3-1-4 の一番左側の図)、本地域では淡水系地下水は地表付近～深度 75m、塩淡境界は深度 75～200m、塩水系地下水は深度 200m 以深に分布することが明らかになった。また、塩淡境界内の塩分濃度は、塩水領域の上面(深度 200m)からわずかに離れると大きく低下し、塩水と淡水が半分ずつ混合する境界面は、深度約 180m に位置する。塩水濃度は、塩淡境界内で下に凸の形状を示しているが、Abarca (2006) のまとめた既存のデータをみるかぎり、このような分布は稀であり、今後、原因を検討する必要がある。

水理水頭については、深度ごとに孔内水の密度が異なることから、実測された水頭を淡水水頭に換算したものを示した（図 3-1-4 の左から 2 番目の図）。深度 22 m および 43m では EL=+1.5m 前後であったが、塩淡境界となる 83m 以深の 3 深度では水位が約 3 m 上昇し +4.5m 程度となった。深度 83m は塩淡境界の最上部ではあるが、塩水混入率はわずかに 2% 程度である。そのため、水理水頭が高くなる理由は、深度 43m と 83m の間に難透水層が存在しているためと解釈した方が良いだろう。深度 200 m 以深では淡水水頭は徐々に高くなるが、これは密度による影響である。

δD は深度 22m~43m までは -56‰以上であるが、塩淡境界最上部以深の深度 83~113m では同位体的に軽くなり、-64~-66‰となった（図 3-1-4 の右から 3 番目の図）。深度 170m 以深は塩水系地下水の影響が大きく、同位体は重くなる。一般に降水の δD は標高が高い領域では軽くなることから、深度 83m の地下水は浅層の淡水系地下水よりも標高の高い領域（富士山体に近い領域）で涵養されたと考えられる。一方、Cl-濃度から塩水との混合率を求め、これらの地下水の淡水成分の δD に補正したものが図 3-1-5 である。淡水成分に補正した δD は塩淡境界において -65‰以下と著しく軽く、それが塩淡境界の最下部に向かってさらに軽くなる。上述したように塩水と淡水が半分ずつ混合する境界面は深度約 180m に位置することから、この境界面よりも上部では、より深い領域に、より標高の高い地域を涵養域とする地下水がもたらされていると考えられる。

地下水の鉛直プロファイルの測定結果を図 3-1-4（右から 2 番目）に示す。深度 400m までの水温プロファイル測定では、孔内水が周囲の地温と平衡になるように掘削深度までケーシングを入れるとともにボーリング中の孔底をセメンチングし、約 4 カ月間、孔内水を静置させた（孔内水を“たまり水”の状態にした）。深度 400m 以深の水温は揚水時の原位置温度である。なお、水温測定は近傍の観測井を含めて過去 2 回行っており、ほぼ同じ結果が得られている（図 3-1-4 の右から 2 番目の図参照）。このことは本調査が適切に行われていることを示唆する。

我が国の一般的な地温勾配である 3°C/100m という関係を基準にすると、図 3-1-4 の水温プロファイルにはいくつかの特徴がある。まず、淡水領域の最低温度は深度 40~66m に認められ、これは流向流速測定で最も流速が速かった深度 42m と一致した（後述）。水温は淡水領域から塩淡境界に入ると上昇し、その上昇は塩水領域との境界の深度 200m まで続く。そして、塩水領域では水温は深度方向に低下し、深度 400m 付近で極小となった。塩淡境界と塩水領域の境である、深度 200m にて水温の最高点が認められるためには、水温の高い地下水が水平成分の卓越した流れに沿って、この深度に運ばれてくる必要がある。すなわち、塩淡境界の大部分で塩淡境界に沿った流動が存在し、内陸かつ深層で（温められた）地下水が運ばれてきたと考えることによって説明が可能である。これは上述した δD で得られた考察とも整合する。

一方、塩水領域では深度 400m 付近に向かって水温が低下し、これは地温勾配と反している。海域調査（3-2 節）によれば、駿河湾の海水温は海面から水深 150m までは 13~15°C

程度、それ以深になると低下し、水深 300m では 10℃以下となる。そのため、塩水領域で水温が低下する可能性として海底を涵養域とする低温の塩水が陸域にもたらされているか、あるいは海底からの熱伝導が影響したと考えられる。

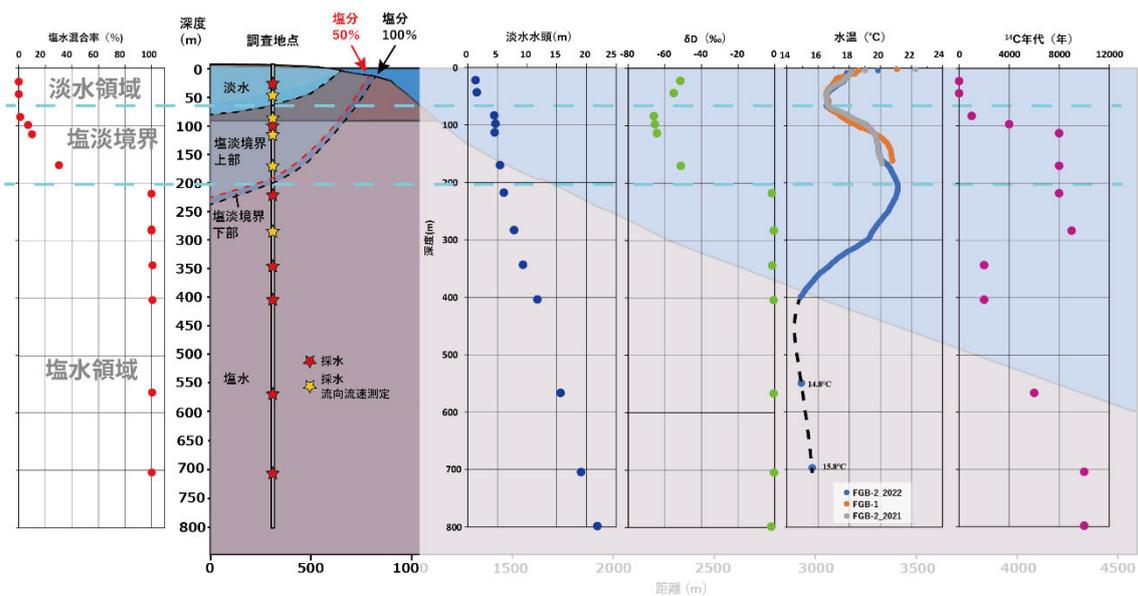


図 3-1-4 FGB-2 および FGB-3 から得られた地下水の水質
背景は陸域および海域の地形（海域調査結果より作成）

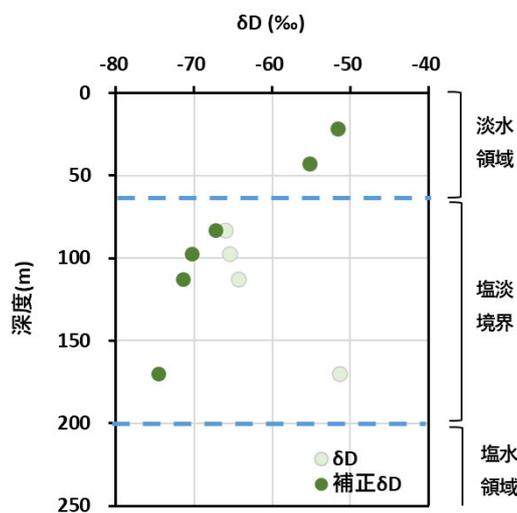


図 3-1-5 塩水成分を除いた地下水中の δD （補正 δD ）の分布

地下水中の各種放射性同位体比を測定して、地下水年代を求めたものが図 3-1-4 の一番右の図である。淡水系地下水（深度 22m と 43m）についてはトリチウム (^3H) が検出されており、地下水年代は約 50 年未満 (^{14}C 年代では 0 年とした) であると評価できる。深度 80m 以深の地下水は ^3H が検出されなかったため、 ^{14}C を用いて地下水年代を決定した。地下水の ^{14}C 年代は分析結果から直接得られるものではなく、分析値に対してあるモデルに基づいた計算をおこなった値（調整年代）である。この計算では淡水と海水を混合した溶液を初期値（Initial water）とした。計算の結果、地下水年代は塩淡境界～塩水領域上部の深度約 113～283m で約 8000 年となり、深度 343m、404m の塩水系地下水は約 2000 年、それ以深は深度方向に古くなった。塩淡境界の年代が古いという結果は、この領域の地下水の流速が遅い、あるいは地下水の涵養域が遠方といった可能性を示唆する。また、深度 340～400m の深度領域では、塩水系地下水は若く、比較的活発に流動している可能性がある。上述したように、この年代値はモデルに基づくものであるから、無条件で信頼はできないにしても、これらの塩水系地下水は少なくとも数万年間地下に滞留していたような、いわゆる化石海水ではないと考えられる。

② 流向流速調査

既存の概念図によると淡水領域と塩水領域では地下水の流向は逆向きとなる（図 3-1-1）。一般に深層地下水の流速は遅いが、本地域は最も地下水流動が活発な地域の 1 つである。本調査はこのような極端な地域の特性を利用し、地下水の流向流速の実測を試みたものである。流向流速測定装置としては、電極間の比抵抗の変化によって地下水の流れを検出する「地下水流向流速計（Type-LD60）」を用いた。この装置では 10^{-7}m/s オーダーの地下水の流速を求めることが可能であり、表 3-1-1 の 5 深度で測定を実施した。

その結果、被圧地下水において最も流速が速いと考えられる、深度 42m でもダルシー流速は $1.9 \times 10^{-6}\text{m/s}$ （0.1m/日オーダー）、淡水領域と塩淡境界の境界となる深度 82m では $1.5 \times 10^{-7}\text{m/s}$ （0.01m/日オーダー）と著しく小さくなり、塩淡境界の最上部の深度 111m よりも深い領域では定量下限以下となった。浅層と比較して塩淡境界や塩水領域では流速は 1/10 以下になると結論づけることができるが、淡水領域と塩水領域の流向の違いを明らかにすることはできなかった。

③ 既存のデータとの比較

平成 26～27 年度にかけて、富士川右岸域の海岸線から約 50m の位置にて本事業と同様のボーリング調査（SKB 孔：深度 350m）を実施した（図 3-1-2）。詳細については産総研（2016）を参照されたい。当時の調査と本事業で得られたデータを図 3-1-6 に示す。

電気伝導率のプロファイルは塩淡境界の深度を示すために描いたものである。SKB 孔と FGB 孔は、掘削地点が異なるために、塩淡境界の深度には違いがあり、FGB 孔では深度約

75～200m、SKB 孔は深度 35～50m と深度 125～170m の 2 カ所に認められる。SKB 孔では背後に大丸山などの山体が位置しているため、高水頭の淡水系地下水が塩淡境界を海側に押し出していると推定される。透水係数に関しては FGB 孔では地表から深度 80 m まで 5.0×10^{-5} m/s に近い値である。それ以深は深度 283m にて、 1.0×10^{-6} (m/s) オーダーに近い値を示すものの、概ね $10^{-5} \sim 10^{-6}$ m/s オーダーであった。SKB 孔でも深度 100m 程度までは FGB 孔と似た 5.0×10^{-5} m/s 程度の値を示すが、深度 100m 以深でも 1.0×10^{-5} m/s 程度であった。

地下水年代は両地点ともに、淡水領域と比較して塩淡境界にて古くなり、ほぼ 8000～10000 年となった。年代が古くなる理由は、塩淡境界に沿った地下水流動が存在するためと考えられるが、両地点で似たような年代を示す理由は分からない。さらに、両地点ともに、塩淡境界の直下（塩水領域の最上部）の塩水系地下水の年代が古く、その下位に年代の新しい塩水系地下水が存在する。この古い塩水系地下水の分布域は FGB 孔においては深度 200～300m であり、低透水性の深度領域と一致するが、SKB 孔ではこの関係はあてはまらない。したがって、地質の透水性が塩水系地下水の年代に影響しているわけではない。したがって、これは塩水系地下水の一般的な性質を反映している可能性が高いが、その理由ははっきりしない。一方、塩淡境界では $^3\text{He}/^4\text{He}$ も高くなる。Ono et al.(2023)によると、地下水に付加されるヘリウムフラックスは、富士山に近いほど $^3\text{He}/^4\text{He}$ が高い。そのため、塩淡境界中の高い $^3\text{He}/^4\text{He}$ は陸から海に向かう流動を、塩水系地下水の低い $^3\text{He}/^4\text{He}$ は、海から陸に向けた流動の存在を示唆する。このように 2 つの掘削地点は距離的に離れているだけでなく、海岸からの距離が 300m と 50m と異なるにもかかわらず、類似点が多い。

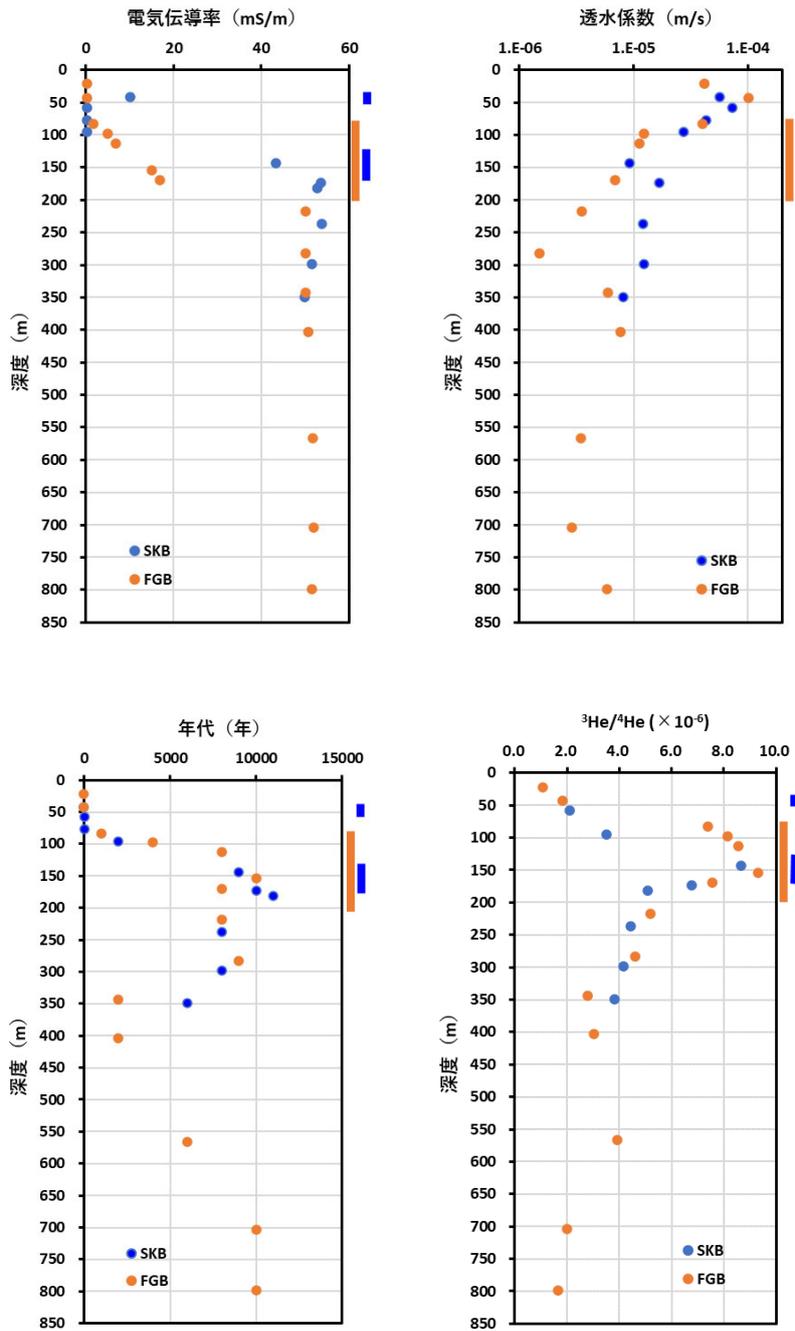


図 3-1-6 FGB 孔と SKB 孔のデータの比較
各グラフの右にあるオレンジ色の棒は FGB 孔、青色は SKB 孔での塩淡水境界の深度である。

(4) ボーリング結果から得られた概念モデル

塩淡境界以深および海底下に胚胎される塩水系地下水の動きは極めて不活発と予想され、その動態を調査するのは難しい。しかし、この領域を処分候補地とする以上は、少なくとも地質環境の一般的な特徴や概念モデルを明らかにする必要がある。そこで、本事業では塩水系地下水の動きが比較的速いことが期待される地域を研究地として選定した。調査の結果、沿岸部の数本のボーリングから海底下を含めた塩水系地下水流動の実態を推定することができた。結論は図 3-1-7 の通りまとめられる。

沿岸部の淡水領域は、地下水流動が（流線が）収束する場となっている。塩淡境界では塩淡境界に沿った流動が生じており、これは淡水系地下水よりも規模の大きな流動系の一部であると考えられる。淡水領域の地下水の動きは、最も活発な領域と塩淡境界最上部では 10 倍程度の差が認められた。一方、 ^{14}C や He 同位体などの調査により、塩水系地下水は化石海水ではなく流動していると推定される。しかし、その流れは一様ではなく、塩淡境界の直下にて極めて不活発な領域が存在することが明らかになった。

本事業（の FGB-2 および FGB-3 孔）で得られた結果を、過年度に実施した SKB 孔での調査結果に照らすと、両者には共通点が多いことがわかった。すなわち、2 つの地点で同様のメカニズムが生じている可能性があり、これを解明することが、塩水系地下水の一般的な特徴を知るための近道になるだろう。例えば、駿河湾のやや内陸部（例えば海岸線から 1km 内外）でもボーリング調査を実施し、塩水系地下水の化学的特性（特に地下水年代）を明らかにすることができれば、塩水系地下水流動の実態をより詳しく明らかにすることができるだろう。

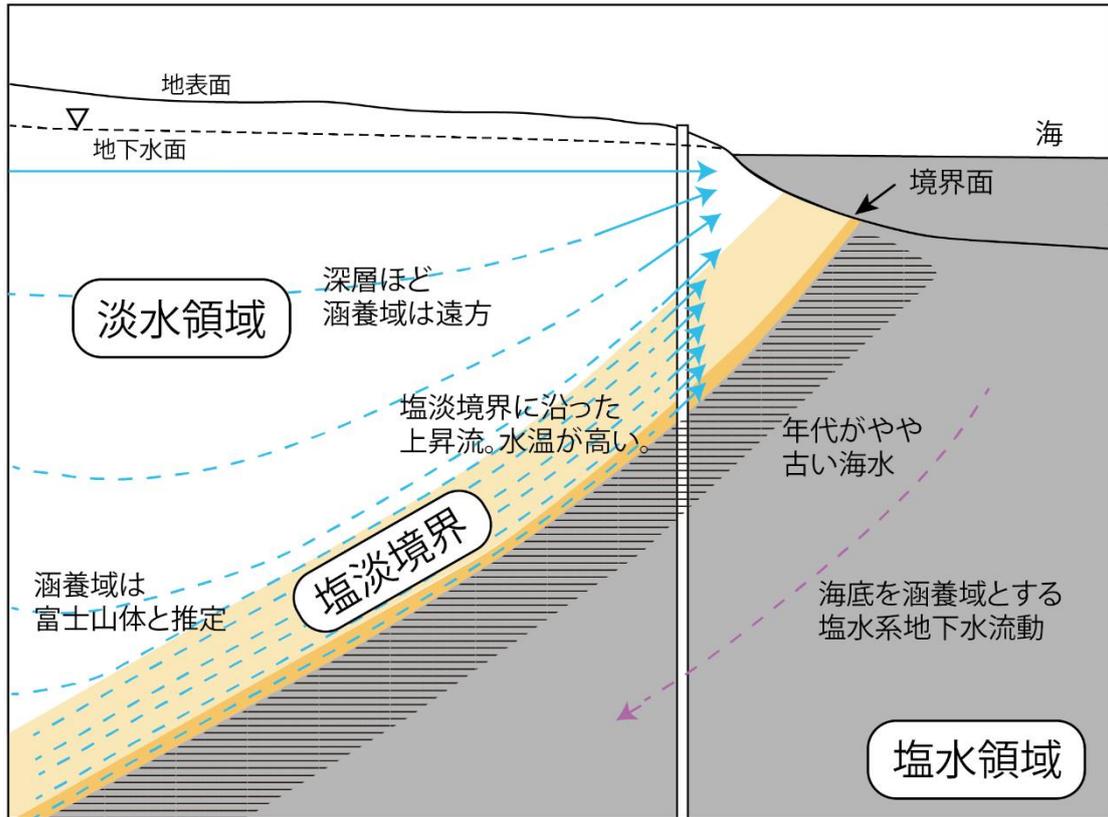


図 3-1-7 ボーリング結果から得られた概念モデル
 塩水系地下水は深層になるほど古くなるわけではなく、塩淡境界の直下に年代がやや古い地下水が存在することが明らかになった。

参考文献

- Abarca E.C.(2006): Seawater intrusion in complex geological environments. PhD Thesis, Department of Geotechnical Engineering and Geo-Sciences (ETCG), Technical University of Catalonia, UPC.
- 経済産業省 (2016) : 沿岸海底下における地層処分の技術的課題に関する研究会とりまとめ
URL:https://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy_environment/engan_kaitei/ka/pdf/report01_01.pdf (確認日 2022年3月18日)
- 経済産業省 (2017) : 科学的特性マップ公表サイト
URL:https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/kagakute/kitokuseimap/ (確認日 2022年3月18日)
- 越谷賢・吉岡正光・町田功・小野昌彦・井川怜欧・丸井敦尚 (2015) : 掘削泥水に添加する蛍光染料トレーサーの検体の迅速な作成方法. 日本応用地質学会研究発表会講演論文集, 181-182.
- 中田弘太郎・長谷川琢磨・柏谷公希 (2017) : 地下水トレーサとしての蛍光染料の分析と試料溶液の保管法の検討. 地下水学会誌, Vol. 59, No.3, 205-227.
- Ono, M, Machida I, Koshigai, M.m Ikawa, R. and Marui, A: Vertical distribution of groundwater age in and around the freshwater–saltwater transition zone determined using noble gases and carbon isotopes. *Journal of Hydrology*, 627. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130353>
- 産総研 (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). 153p.
- 地層処分研究開発調整会議 (2019) : 地層処分における全体計画 (平成 30 年度～令和 4 年度)
URL:https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/chiso_shobun/pdf/20200331_001.pdf (確認日 2022年3月18日)

3-2 地下水の流出場及び海底地形把握技術の高度化

(1) 背景

地質環境モデルの妥当性を検証するうえでは、海底下における陸域からの地下水の流出場を特定し、その水質の分析結果から陸域の化学的特徴を把握することが有効であり、地下水の流出場を特定するためには海底地形を詳細に把握することが必要である。そこで、海底地形の詳細把握に係る技術、陸域地下水の流出場の特定手法や流出している海底湧出地下水から陸域地下水の化学的特徴の推定手法の高度化を行った。具体的には、地質環境モデルの構築に際して、地下水流動の末端現象である海底湧出地下水に着目し、実際の海域における湧出水の検出技術、湧出水の分布と海底微地形の関係、および採取された湧出水から陸域地下水の性状を把握するなど、沿岸部の地下水流動や水質などの地質環境に係る情報を湧出水から評価する目的で実施した。

本事業では、沿岸部における地層処分を想定した際の海底湧出地下水調査の調査フロー(図3-2-1)を基礎として、特に概要調査段階における探査をより効率的に進める観点から技術の高度化を進めた。沿岸部を想定した地層処分では、沿岸部を調査する初期において陸域や海域の地質調査が実施され、それらの結果に基づいて陸から海にかけての地質構造や水理構造モデルが検討されると考えられる。それらのモデルに基づく沿岸部の帯水層の連続性や陸域の水収支の検討結果から、湧出水の存在が推定される場合においては、海底湧出地下水も含めた調査が必要になると考えられる。海底湧出地下水の調査にあたっては、海域における広域の音波探査や海底地形調査から得られる情報に基づいて、地下水が湧出している可能性がある領域を絞り込む。次に絞り込まれた領域を対象に、塩分濃度やpH、放射性元素の測定、原位置での湧出量の測定や水質分析を行うことで、海底湧出地下水の実態を明らかにし、陸から海に至る沿岸部の地下水流動や水質などを含めた地質環境の評価につながる。本事業では特に広域から局所的な領域に絞り込む段階における、より効率的な調査や探査の技術について、実海域での検証を通じて高度化を行った。

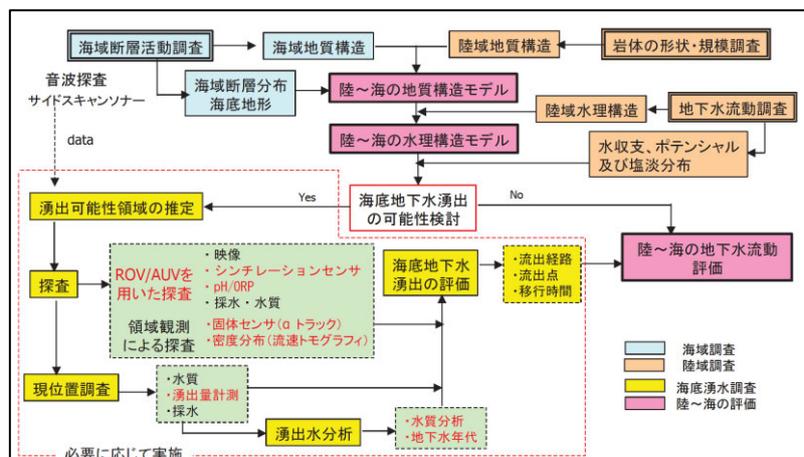


図 3-2-1 海底湧出地下水の調査フロー
(産業技術総合研究所ほか、2016)

(2) 湧出水の効率的な探査および定量評価

沿岸部における効率的な湧出水の探査のためには、ROV (Remotely Operated Vehicle) や AUV (Automatic Underwater Vehicle) の活用が挙げられる (産業技術総合研究所ほか、2016)。本事業では、駿河湾奥部の富士川河口から田子の浦周辺の海域を対象に、ROV と高精度音響カメラ (ARIS Explorer 3000、Sound Metrics 社製) を組み合わせた探査手法について検証した。これは、高精度音響カメラによって撮影された音響画像に現れる湧出水のシグナルを捉えることで、湧出水の分布やその湧出量を評価する技術である (図 3-2-2)。実海域での検証に先立って、駿河湾内に位置する海上実験施設 (計測バージ) において模擬実験を行った。模擬実験は、計測バージの下部に海底湧出地下水を模擬した水源を設置して淡水 (水道水) を湧出させ、その上方を高精度音響カメラが一定速度で移動する形とし、湧出水の検出可能距離や湧出量別の音響画像の違いを検証した

(産業技術総合研究所ほか、2022 ; 2023)。模擬実験の結果から、高精度音響カメラの画像を活用することで、4m から 5m 程度離れた距離からも湧出水を検出できることが分かった。検出においては、模擬湧水の反射 (音圧) とバックグラウンドのノイズ (音圧) との閾値を、高精度音響カメラの前方 3.0~4.9m の範囲における反射 (音圧) の平均値+3 σ として決定し、その閾値を基準として湧出水によるシグナルを抽出した。さらに、湧出水の直上を通過する際に連続的に得られた音響画像を用いて、複数枚の画像中に現れた湧出水の反射面積を合算して疑似的な 3 次元の流体の体積を計算し、流体の体積と湧出量から相関式を算出した (産業技術総合研究所ほか、2021)。以上の湧出水のシグナルを示す音圧の閾値と、湧出量との相関式を基礎として、実海域において ROV と高精度音響カメラの組み合わせによる測線探査を行った。

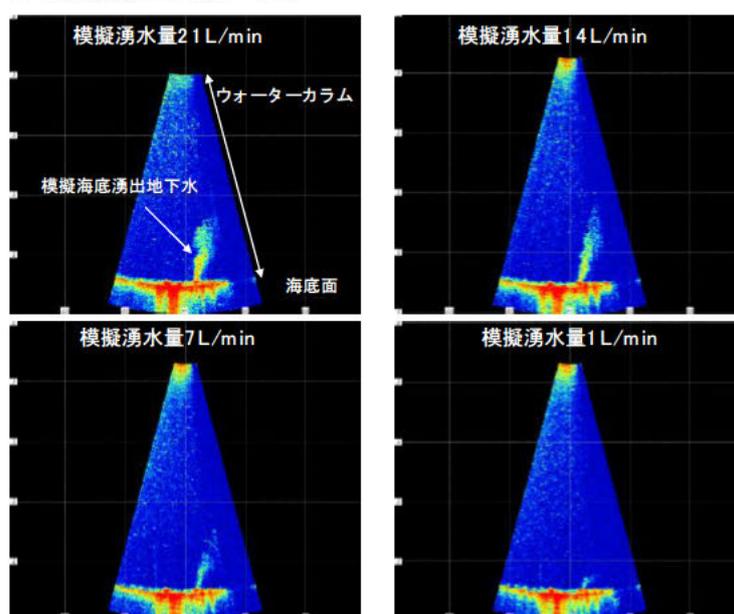


図 3-2-2 模擬実験における湧出量ごとの音響画像
(産業技術総合研究所ほか、2021)

実際の海域で検出された代表的な湧出水の分布と周辺の海底微地形との関係を図 3-2-3 に示す。湧出水は馬蹄形を呈する 2 段からなる急崖の上部に分布していることが分かり、特に田子の浦西部に集中していた。一方で、富士川西部で推定されている断層周辺（静岡県、1996）では、高精度音響カメラによる探査の結果、顕著なシグナルは確認できなかった。海域側からは、湧出水の分布と断層の分布には明確な関係性が認められず、断層周辺の水理特性に係る情報は得られなかった。

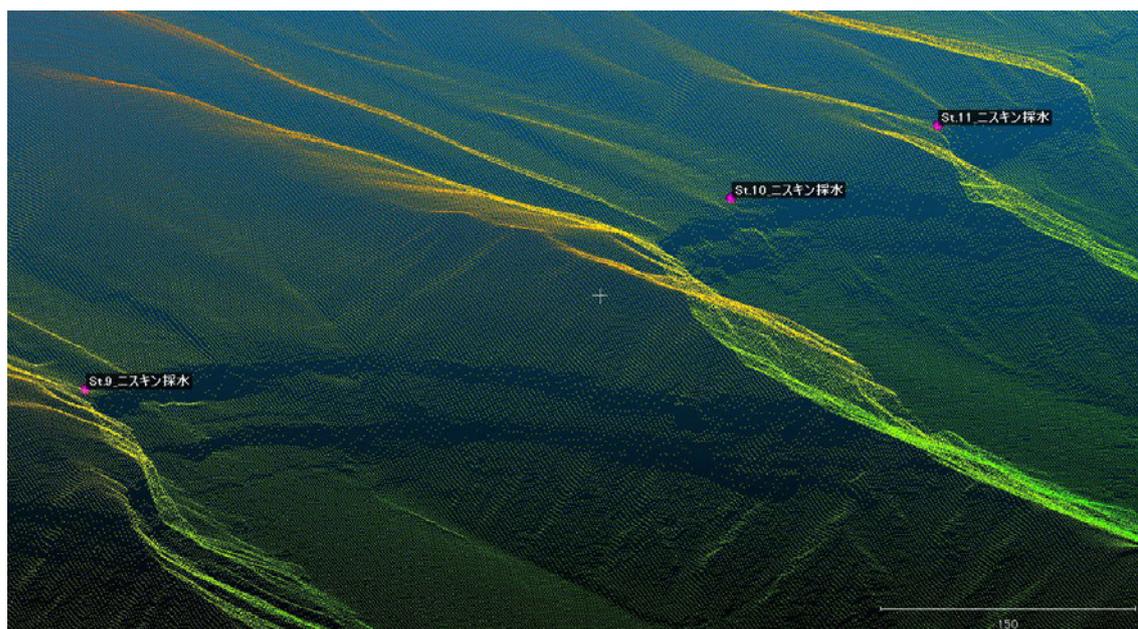


図 3-2-3 海底地形図と湧出水の分布
(画像左上が浅海部、右下が深海部に相当する。湧出水は急崖部の上部に位置しており、それぞれの地点で採水を行った。)

次に湧出量の評価にあたっては、実際の海域では潮流等の影響を受けて ROV の航行速度にばらつきが生まれるため、ROV の移動距離当たり高精度音響カメラが撮影する枚数（フレーム数）に違いが生じる。探査測線ごとにフレーム数が異なると、抽出する音響画像の枚数がそれぞれの測線で異なるため、計算結果を同一に比較できない。そこで、模擬実験で得られたフレーム数と、実海域における ROV の移動距離からフレーム数を補正することで、単位距離ごとに抽出する音響画像の枚数が同一となるように計算した。湧出量は、模擬実験における模擬水源の湧出量（1～21 L/min）と音響画像の反射面積との関係から近似式を導き、実海域でのフレーム数を補正して推定した。以上の計算方法は令和 2 年度事業（産業技術総合研究所ほか、2021）にまとめている。図 3-2-4 が Natural Neighbor 法（ESRI、2022）を用いて内挿を行い、推定した湧出量を平面分布図として示したものである。解析範囲における湧出量は 49 万 m^3 /日と推定された。なお、潮汐変化等の時間変化を考慮していない条件ではあるものの、シーページメータによる実測湧出量と比較を行った結果、高精度音響カメラで推定した湧出量は整合的であった（産業技術総合

研究所ほか、2024)。推定湧出量の規模について陸域の地下水や河川流量と比較すると、山崎・村下（1966）がダルシーの法則に基づいて推定した駿河湾沿岸域（岳南地区）の地下水流動量は、合計 127 万 m^3 /日であるとされ、今回推定された湧出量はその値の 39%に相当する。また富士川の湧水流量（2019 年の計算値）は 180 万 m^3 /日（国土交通省、2023）とされ、推定した湧出量は 27%程度となった。

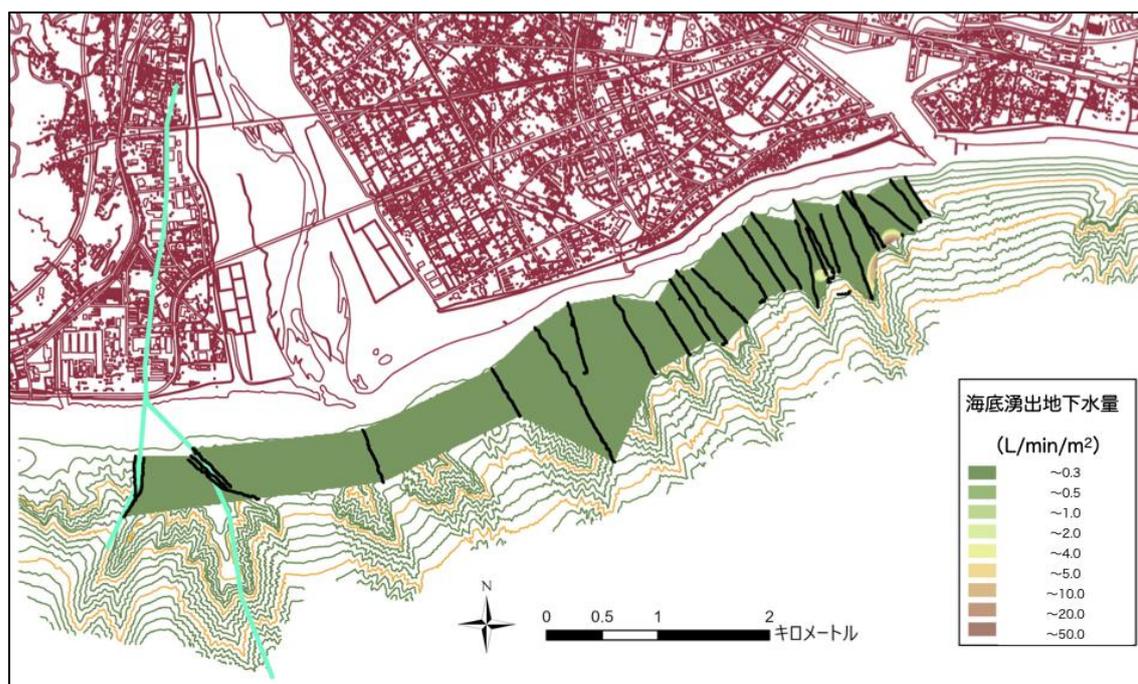


図 3-2-4 ROV と高精度音響カメラによる探査測線の配置図
西の緑線は推定されている断層（静岡県、1996）

（3）採水技術および陸と海の地下水の連続性の検討

本事業で用いた湧出水の採水器を図 3-2-5 に示す。ROV の下部にピストン式の採水器を設置し、海底面で安定して採水するための技術を開発した。実際に発見した湧出水を対象に採水と化学分析を行い、陸域地下水（掘削孔の地下水を含む）と湧出水との性状比較を行って、沿岸部における陸－海の地下水の連続性について検討した。連続性の検討に当たっては、無機溶存イオンや酸素・水素の安定同位体比、微量元素、Sr 同位体比や炭素同位体比など、各種の水文調査に用いられるトレーサーを用いた。沿岸部における湧出水は、多くの場合に淡水と塩水の混合物であるため、両者の間で大きな差がある成分（例えば Cl 濃度、酸素・水素安定同位体比など）が成分分離に活用できる。本事業では、富士山の火山噴出物の影響を受けて地下水のバナジウム（V）濃度が高いという性質を利用し、陸域の地下水と海水の成分分離を行った。例えば、駿河湾の海水の V 濃度は 2 ppb 程度に対して、海底湧出地下水の V 濃度は 22~47 ppb と高い。この結果は、海底湧出地下水には、富士山周辺で涵養された高い V 濃度を持つ陸域地下水が含まれていることを意味するものである。他の地域においても、あらかじめ陸域地下水の地化学特性やその空間分布を把握

することで、沿岸部における地下水流動の実態把握のために活用できるトレーサーを適切に選択し、湧出水と塩水との成分分離や地下水流動の評価を効率的に実施できると考えられる。

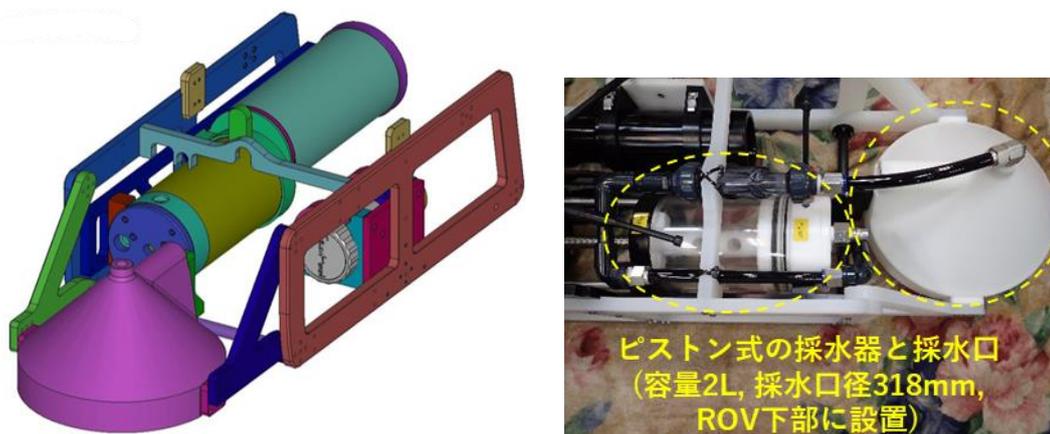


図 3-2-5 ピストン式採水器の模式図および実物写真
(模式図の紫色のパーツが採水口を示す。採水器の容量は 2 L である。)

(4) 海域調査における現地条件の重要性

沿岸部の海域調査は、陸域の掘削調査や物理探査と比べて、調査実施における制約条件が多い。すなわち海域調査の実施においては、現場の気象条件に加えて波などの海象条件が重要な要素である。また、調査の実施時期を設定する際にも留意すべき点が多く、例えば対象とする海域の漁業活動の状況や漁期、潮流の季節変化、水中の観察に係る懸濁物質の量やその季節変化など、様々な要素を考慮する必要がある。例えば駿河湾における調査実績を踏まえると、概ね 12 月以降の冬季は海象が安定しており、調査船の操舵や ROV の操作、および海中における採水作業などが安定して行えた。一方で、8 月以降の夏季から秋季にかけての調査では、海中へ投入した ROV が潮流で流される状況が頻繁に発生し、計画した調査地点への到着が遅れた。このような事態に対しては、あらかじめ計画した予備日において探査を実施する形で対応した。また、効率的な探査の観点から AUV の活用も一案として考えられるが、現場海域の条件を考慮した場合に観測機器の破損や逸失などの可能性も想定されたため、駿河湾での適用は困難であった。今後、AUV による実海域での検証やその際に考慮すべき現地条件を整理しておくことで、より効率的な海域調査に資すると考えられる。

また令和 5 年度に実施したシーページメータの調査では、1400 トン程度の大型調査船による検証を実施した。大型調査船は小型調査船 (10~15 トン程度) に比べて、海象条件が悪い状況でも調査を行えるといった利点がある一方で、調査に掛かる費用や人員などのコスト面を十分に考慮する必要がある。また、大型調査船に搭載可能な大型 ROV を用いることで、設定した地点への迅速に到達できることや大型の観測機材の運搬が可能である

という利点がある一方で、ROVの推進用プロペラの影響による海底堆積物の巻き上げが発生し、海底面の視認が一定時間難しくなる状況もあった。巻き上げられた堆積物が沈殿するまでに時間を要するため、あらかじめ十分な作業時間を確保しておくことが必要である。

以上のことから、沿岸部海域において海底湧出地下水の探査を行う必要があった場合においては、気象や海象などの様々な現地条件を踏まえて、調査船の規模や探査手法、用いる観測機材などを適切に選択することが重要といえる。

(5) 海域調査に関する文献収集

海底湧出地下水の湧出機構は、滲み出し型と亀裂流出型に大別され、沿岸部の底質や地質の特徴を反映している。そのため、地形や地質に応じた湧出機構などの実態について類型化ができる可能性がある。一方で、本事業で収集した海底湧出地下水に関する論文や報告書は、海底湧出地下水を対象に研究・調査を行った結果であり、海底湧出地下水が発見されていない沿岸部における地形・地質情報はあらかじめ除外されている。そのため、先行研究と類似した地形・地質条件下にある別の沿岸部地域に着目した場合に、地形・地質情報のみに基づいて海底湧出地下水の実態を明らかにすることは難しいと考えられる。そこで本事業では、地形や地質条件による海域調査手法の適用性や実績の整理結果（電力中央研究所、2013）を基礎として、昨今の発展が目覚ましい海洋観測機器を活用した探査手法をとりまとめた。特に湧出水の検出の観点から有用と考えられる技術として、水質や水温が大きく変化する層（躍層）を追跡する手法やウォーターカラムの解析方法、湧出現象に伴う砂の巻き上げなどに係る探査手法に着目してまとめた（産業技術総合研究所ほか、2024）。

海域において湧出後の流体を捉える観点では、塩分等の各種の躍層や、湧出現象に伴う海底堆積物の巻き上げに伴う音波の異常に着目することが有効と考えられる。本事業で検証したROVと高精度音響カメラの組み合わせ探査（産業技術総合研究所ほか、2022；2023）も、同様に音波の異常を捉える手法である。近年ではマルチビーム測深機

（MBES）を活用した調査事例が増えており、探査で得られるウォーターカラムの画像から、微細な躍層の検出や気泡の挙動解析が行われている。また、異なる周波数での音響探査は異なる距離や分解能で情報を得られるため、その性質を利用することで海中の内部波や二酸化炭素などの気泡、プランクトン、浮遊砂などの空間分布を把握する技術も開発されている。このような異なる周波数での探査は、海底湧出地下水に伴う堆積物の巻き上げや、湧出水周辺の生物環境の評価に利用できる可能性がある。

課題としては、海域探査で得られるウォーターカラムの画像解析が挙げられる。ウォーターカラムは、探査機器の前面から海底面までの範囲（水柱）を指すものであるが、MBES等を用いた音響探査で得られるウォーターカラムのデータ数は、膨大になることが多い。本事業で実施した高精度音響カメラによる探査においても同様に、1測線の探査で

数百枚を超える画像データが蓄積されるため、その解析作業には相当な時間が必要であった。これらの画像等のデータの処理においてはPCの負荷がかかるため、十分に活用されている現状にはないものの、ボクセルモデルを活用した解析手法も考案されており、今後の適用事例の増加が期待される。

(6) まとめ

本事業では、概要調査における探査をより効率的に進める観点から、ROVと高精度音響カメラの組み合わせによる探査手法や、採水調査による陸と海の地下水の連続性の評価に関して高度化を進めた。本事業の成果として、ROVと高精度音響カメラを組み合わせた測線探査を行うことで、実海域においても遠隔から湧出水を高精度に検出できることや、音響画像の解析から面的な湧出量を評価できることを示した。海底湧出地下水は主に急崖の上部に分布することが確認された一方で、西側の海域における推定断層周辺では顕著な湧出水は確認されなかった。また、ダイバーの潜水調査が困難な水深においても、湧出水を安定して採取できる採水器について検証した。採取した湧出水に対して既存の地化学トレーサーを用いて解析した結果、海底湧出地下水が富士山で涵養された地下水を起源としていることを明らかにした。この結果は、沿岸部の海底湧出地下水の調査から陸と海の間での地下水の連続性を示したといえる。以上のように本事業で高度化した手法に加えて、近年の発展が目覚ましい海洋観測機器を用いた探査手法を収集し、MBESを用いた探査手法やウォーターカラム画像解析における課題を整理した。

参考文献

ESRI, Natural Neighbor 内挿法,

<https://desktop.arcgis.com/ja/arcmap/10.3/manage-data/terrains/hidden-natural-neighbor-interpolation.htm>, 2022, (2022.02.15)

国土交通省, 水文水質データベース, 富士川「松岡」水位流量データ,

<http://www1.river.go.jp/>, 2023, (2023.01.18)

産業技術総合研究所, 日本原子力研究開発機構, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 電力中央研究所, 平成 27 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 (沿岸部処分システム高度化開発) 報告書, 2016.

産業技術総合研究所, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 電力中央研究所, 令和 2 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 (沿岸部処分システム評価確証技術開発) 報告書, 2021.

産業技術総合研究所, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 電力中央研究所, 令和 3 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 (沿岸部処分システム評価確証技術開発) 報告書, 2022.

産業技術総合研究所, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 電力中央研究所, 令和 4 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 (沿岸部処分システム評価確証技術開発) 報告書, 2023.

産業技術総合研究所, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 電力中央研究所, 令和 5 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 (沿岸部処分システム評価確証技術開発) 報告書, 2024.

静岡県総務部地震対策課, 平成 7 年度静岡県地域活断層調査業務報告書, 284p, 1996.

山崎誠治, 村下敏夫, 静岡県岳南地区地下水利用適正化調査成果, 工業用水, 96, 60-70, 1966.

3-3 物理探査の高度化

(1) 背景と目的

総合資源エネルギー調査会地層処分技術ワーキンググループが平成27年に公開した中間整理に基づき、平成28年1月から「沿岸部海底下等における地層処分の技術的課題に関する研究会」(沿岸部研究会)が開始され、沿岸海底下を含む沿岸部において地層処分を実施する場合を想定した沿岸部の特性の整理および技術的対応可能性の検討を関連する研究成果等を踏まえて行うとともに、技術的信頼性を更に向上させるために取り組むべき課題を抽出・整理し、これらを効率的かつ着実に実施するための進め方の検討が行なわれた(経済産業省, 2016)。

沿岸部研究会では信頼性の向上に向けて高度化への取り組みが必要となる重点項目を抽出しており、その中の一つに「海陸接合部付近の活断層分布を確認するための調査・評価技術の高度化」が挙げられている。高度化の方向性として「海陸接合部付近の海域における断層の分布や連続性等に係る調査事例を収集・分析することにより、海底地形計測、音波探査、ボーリング調査、演題測定等のそれぞれの調査技術の適用性を評価するとともに、調査技術の適切な組み合わせ方を検討する」ことが挙げられている。

このように海陸接合部付近の活断層分布を把握する上では、上述されている音波探査を含む物理探査が非常に有効である。

沿岸部は陸域と海域に分けられ、範囲については、経済産業省(2016)においてそれぞれ海岸線から20kmおよび15kmと定義されている(図3-3-1)。地層処分事業において期待される沿岸部の特性は、隆起速度がおそく長期にわたって地下水の流動性が低い場所である。このような条件を満たすためには、海域では海底地形の勾配が小さい環境、言い換えれば遠浅の環境が求められる。すなわち海陸接合部では水深が浅い場所(浅海域)において、どれだけ正確な情報が得られるかが、地質環境モデルを構築する上で重要となる。

浅海域における調査手法の概要については産業技術総合研究所(2014)にまとめられている。本書によると、通常の海域における断層を含む地下地質構造を把握するためには、曳航式の音波探査が用いられるが、この探査ではエアガンと呼ばれる音波発振装置(振源)と長さ数km以上の長大なケーブルにハイドロフォンと呼ばれる音圧を検知するセンサーを取り付けたもの(ストリーマーケーブル)を曳航する受振システムを用いるため、非常に大型の調査船が必要となる。このような大がかりなシステムでは船を回頭するための回転半径も大きくなり、また長大なケーブルを曳航したまま他の船舶や定置網などの漁具を避けて調査することは難しいため、浅海域での調査には適応することができない。そのため、水深200mまでの海域の調査では海底に直接設置できる海底敷設ケーブル(OBC)を用いられることが多い。この手法では、海底に直接、受振機を設置するため高品質なデータが取得可能であるが、一方で、設置・測定・回収という一連の作業の期間が曳航式と比較して長くなるため、漁業活動の状況によっては調査が困難になることが予想される。一般に日本国内

の沿岸部海域には、漁業権が設定されており、これを有する漁業協同組合（漁協）の許可なしに、設定範囲内での調査を行うことはできない。海底に直接受振器を設置する OBC は、定置網やタコつぼの移動の手間や破損の危険性もあるため、使用許可について漁協からの理解を得られにくいという側面もある。そのため、海陸接合部はデータの空白域となっている。

本事業では、浅海域でも適応可能な小型船舶を用いた曳航式探査を高度化することで、データの空白域となっている海陸接合部において、3次元探査を含めた有効な探査手法を構築することを目的とする。

（2）実施内容

本研究では、小型船舶を用いた曳航式探査手法の高度化を目的に令和3年度から5年度にかけて以下の3つの事項に取り組んだ。

- ①非パルス型振源を用いた曳航式探査手法の高度化
- ②パルス型振源を用いた曳航探査手法の適応限界の検証
- ③OBC 探査との比較検証

①については、鶴ほか（2017）や Tsuru et al.（2019）によって提案されている水中スピーカーを用いた曳航式探査の高度化を試みた。本調査手法の特徴としては、従来のパルス型振源と比較して、音圧が小さいため、海洋生態系へのダメージが小さいことが挙げられる。また従来のパルス型振源は振源の種類ごとに音圧が異なるため、浅層から深層まで連続的に高い解像度のデータを取得する際には、振源に合わせた測定システムに変更する必要があり、コストと時間がかかっていたが、非パルス型振源では、振源からの出力を調整することで、同じ探査システムで可探深度を調整可能であることから、コストと時間を低減できるという利点がある。また、可探深度を上げるためには、発振器と受振器の間の距離（オフセット距離）を長く取る必要があるが、村上ほか（2016）で用いられている一台のパルス型振源と複数本のストリーマーケーブルを用いた3次元探査では、浅海域での船の取り回しを意識してストリーマーケーブルを短くせざるを得ない。一方で、Tsuru et al.（2019）によって提案されている非パルス型振源を用いた3次元探査では、複数の振源と1本のストリーマーケーブルを用いることで、この取り回しの問題とオフセット距離の問題を解決している。（図3-3-2）このような観点から、地層処分事業への適応を意識して非パルス式振源を用いた探査手法の高度化に取り組んだ。

②については、すでに技術として確立されており商業化されているパルス式振源を用いた曳航式探査について、同一の測線上で出力の異なる複数の振源を用いた調査を実施することで、振源ごとの可探深度や解像度などを検証した。また①で実施している非パルス型振源を用いた探査結果とも比較することで、互いの測定システムの特徴を整理した。

③については、従来、もっとも可探深度が大きく、また解像度も高いと言われているエアガンと OBC を用いた探査結果と、小型船舶を用いた曳航式音波探査の中で最も可探深度が

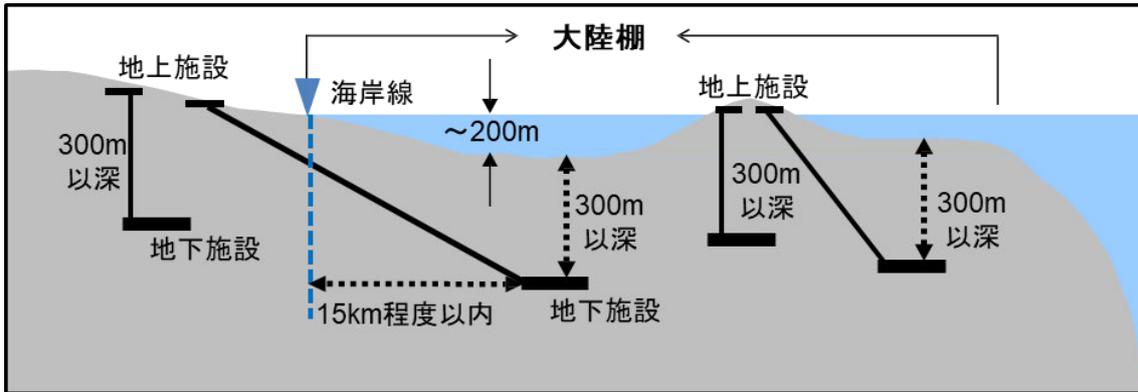


図 3-3-1 沿岸部における地下移設設置のイメージ図（経済産業省，2016）

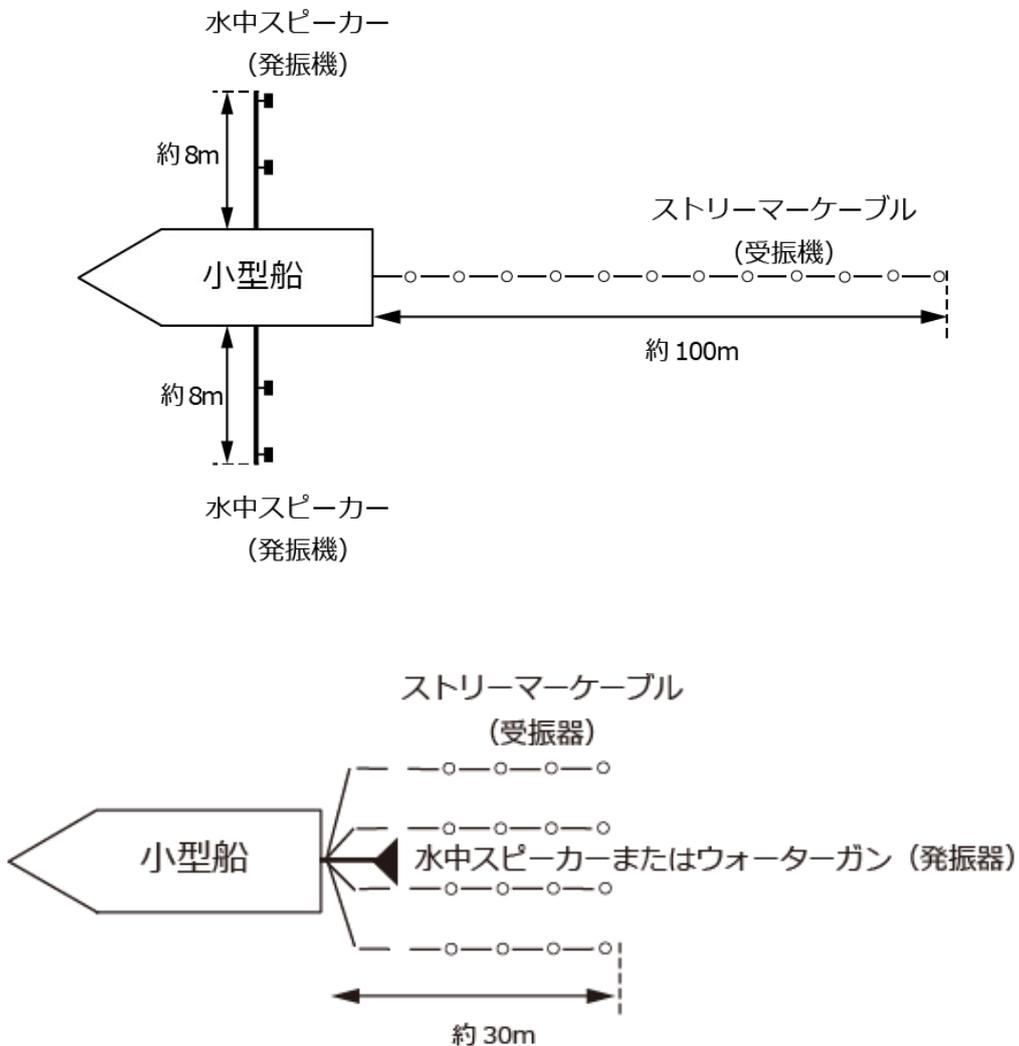


図 3-3-2 2種類の3次元音波探査のイメージ図（上：非パルス型振源、下：パルス型振源）

大きいGIガン（パルス式振源）を用いた探査結果を、同一測線上で比較することで、両者の違いを検証した。

（3）結果

3か年における目的、成果、および課題を表3-3-1に示す。今回、曳航式の探査に用いた3つの振源の写真を図3-3-3に示す。パルス型振源であるGIガンとウォーターガンについては、GIガンの方がより出力が大きい。GIガンは、コンプレッサーをよって圧縮された空気を吐き出す構造となっており、圧縮空気の容量が大きいため、ショートレンジで発振することができない。そのため、3次元探査のような細かい間隔での発振が求められる場合は、ウォーターガンを用いることになる。

①では、非パルス型振源である水中スピーカーの出力の向上と測定システムの安定性の確保（水中でのスピーカーの挙動の制御と測定ノイズの除去）が最も重要な課題であった。そのため、1年目から3年目にかけて水中スピーカーを大型化させていくとともに、調査船やストリーマケーブルの形状を変更するなどの測定システム全体の再構築を実施した。スピーカーを大型化することで、水中で振動板が受ける水圧が大きくなり、それに起因する共振の発生により結果としてエネルギーロスが生じ、低周波での出力が上がらないという課題が生じたが、振動板の材質の変更やスピーカー内部の内圧を調整することで、それらの問題については課題解決にむけた方向性を示すことができた（図3-3-4と図3-3-5）。また、ストリーマケーブルの形状をより抵抗の小さいストレートタイプのものを使い、浮力調整により、水中での位置を安定させることで、ノイズ低減と測定精度の向上につなげることができた。

②では、幌延町海域において、同一測線上で探査を繰り返すことで、表3-3-2のような成果を得ることができた。

③では、静岡市海域で、過年度事業（2014年度 海域地質環境調査確証技術開発）にて取得されたOBC探査の結果と比較することで、表3-3-3に示すように、小型船舶を用いた曳航式探査の測定限界を示すことができた。なお、本表ではOBCの可探深度を過年度の報告書にならい2.0秒としているが、OBCであっても明確に地下構造が確認できたのはGIガンと同じ0.5秒程度である。垂直分解能の精度から見ると、より低コストで短期間での調査が実施できる曳航式の探査の方が2次元探査という視点で見れば、利点は大きいという結論が導かれた。

表 3-3-1 各年度の目的、成果、課題の一覧表

	令和3年度	令和4年度	令和5年度
調査海域	<ul style="list-style-type: none"> 神奈川県横須賀市海域 	<ul style="list-style-type: none"> 北海道幌延町海域 神奈川県横須賀市海域 	<ul style="list-style-type: none"> 北海道幌延町海域 静岡県静岡市海域
目的	<ul style="list-style-type: none"> 非パルス型音源を用いた曳航式調査法の検証 音源の出力強化 既存データ（パルス型音源を用いた調査）との比較 	<ul style="list-style-type: none"> 改良した非パルス型音源を用いた浅海域での測定システムの実証 取得したデータの海陸連続性の確認 改良した測定システム（発振器と受振器）の検証。 	<ul style="list-style-type: none"> 音源別の適応限界の確認 曳航式調査とOBC法との精度比較 調査手法の整理と体系化
成果	<ul style="list-style-type: none"> 非パルス型音源（水中スピーカー）を用いた調査においても、既存のパルス型音源（ブーマー）を用いた調査と同等の深度データ情報を得ることができた。 	<ul style="list-style-type: none"> 幌延海域の浅海域においても深度100m程度の地質構造データを取得できた。 浅部データについては陸域データとの連続性が確認できた。 横須賀海域における初年度と同一測線で、初年度よりも深部までデータを高精度で取得できた。 	<ul style="list-style-type: none"> 音源ごとの可探深度や解像度を整理できた。 パルス型音源をつかった曳航調査とOBCとの精度比較ができた。 調査手法の整理と体系化ができた。
課題	<ul style="list-style-type: none"> 低周波領域における音源からの安定した出力の確保（波による共振を抑える） 受振器の浮力調整 	<ul style="list-style-type: none"> データ取得深度の増加（発振間隔や信号長の変更） 受振器に対する波によるノイズの軽減（ストレートタイプのケーブル利用を検討） 	<ul style="list-style-type: none"> 非パルス型音源の安定性の向上 浅海域の固い岩盤を対象とした調査手法の検討 屈折法を用いた断層や岩盤の割れ目の水みち評価 他の海域調査を含めた調査手法の体系化



水中スピーカー

GIガン

ウォーターガン

図 3-3-3 発振器の種類（左：非パルス型発振器、中央と右：パルス型発振器）

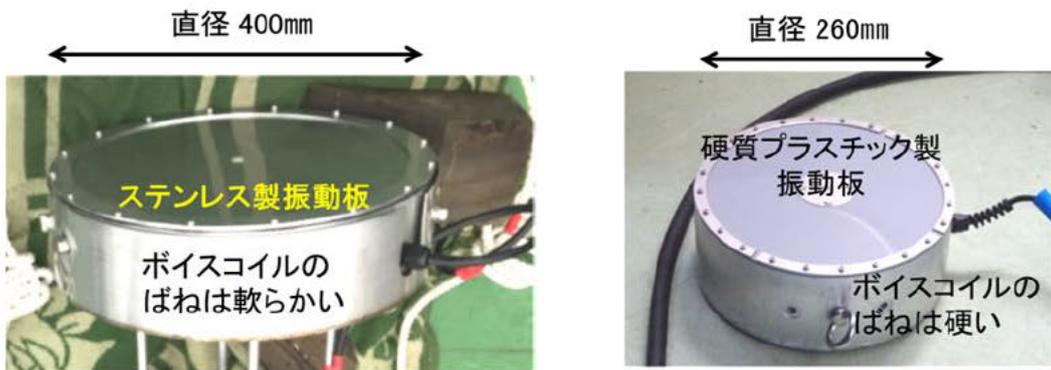


図 3-3-4 大型スピーカー（左）と中型スピーカー（右）

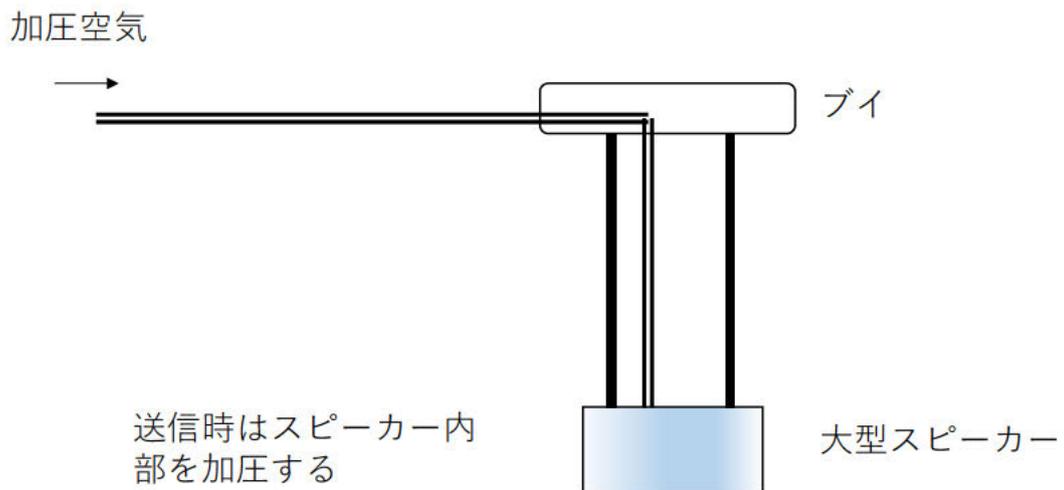


図 3-3-5 大型スピーカーの内圧調整のイメージ図

表 3-3-2 非パルス型振源とパルス型振源との比較

調査条件							音波探査断面の比較結果		
測線名	音源 ※パルス型音源の周波数はデータ処理時のバンドパスフィルタの設定値	受振器	収録設定	重合数	調査日、 海況(風向および 最大瞬間風速) ※横断沖では通常、南西 の風は悪条件となる	調査船	可探深度	垂直分解能	白抜けの見え方
非パルス型音源	2D-2-2 中型水中スピーカー 発振周波数: 312.5Hz 発振時間: 3.3s	Geometrics社製ストリーマーケーブル (産業技術総合研究所所有) チャンネル間隔3.125m, 24チャンネル	サンプリング間隔: 0.25ms 収録時間: 3.5s	-	8月6日 東北東, 12.7m	太幸丸	0.3sec (約225m)	約1.5m	見え方に差はあるものの、いずれの断面も同じ範囲で白抜けていることから、これらは地質状況を反映した結果であると考えられる。
パルス型音源	2D-2 GIガン 空気室容量: 13in ³ 空気室圧力: 120kg/cm ³ 発振エネルギー: 4,500J 周波数 [※] : 30~400Hz	Teledyne社製ストリーマーケーブル チャンネル間隔6.25m, 24チャンネル	サンプリング間隔: 0.5ms 収録時間: 2.0s	12	7月14日 東北東, 11.3m		1.5sec (約1125m)	約3~4m	
	2DW-2 ウォーターガン 空気室容量: 15in ³ 空気室圧力: 120kg/cm ³ 発振エネルギー: 3,000J 周波数 [※] : 70~600Hz	総合地質調査株式会社製 ストリーマーケーブル チャンネル間隔2.5m, 12チャンネル	サンプリング間隔: 0.2ms 収録時間: 1.0s	6	8月1日 南南西, 13.5m		0.5sec (約375m)	約1.5m	

表 3-3-3 OBC 探査（エアガン）と曳航式探査（GI ガン）との比較

調査条件				音波探査断面の比較結果	
音源 ※パルス型音源の周波数はデータ処理時のバンドパスフィルタの設定値	受振器	収録設定	重合数	可探深度	垂直分解能
エアガン 空気室容量: 480in ³ 発振エネルギー、周波数は不明	Sercel社製OBCシステムSeaRay100 受振器間隔25m, 300ユニット	サンプリング間隔: 0.25~4ms 収録時間: 4.0s	100~700程度	2.0sec ? (約2000~3000m)	約15~20m
GIガン 空気室容量: 13in ³ 空気室圧力: 120kg/cm ³ 発振エネルギー: 4,500J 周波数*: 30~400Hz	Teledyne社製ストリーマケーブル チャンネル間隔6.25m, 24チャンネル	サンプリング間隔: 0.5ms 収録時間: 2.0s	12	0.5sec (約400~500m)	約3~5m

(4) まとめ

測定手法の制限から、これまでデータの空白域となっている沿岸部浅海域において、より精度の高い地下地質構造データを取得することを目的に、水深 5~20m 程度でも調査可能な小型船舶を用いた曳航式音波探査手法の高度化を実施した。

もっとも海洋生態系への影響が小さいとされる非パルス型振源を用いた曳航式探査では、一番の課題である出力の向上と安定性の確保にむけて一定の道筋をつけることができた。今後は、より共振を低減させ、また複数の振源を同時発振させることで、さらなる可探深度の向上が見込まれる。既存のパルス型振源を用いた曳航式探査では、振源ごとの性能や解像度などを整理することができた。また OBC 探査と比較しても見劣りしない精度を持っていることが確認された。今回の結果から、小型船舶を用いた曳航式探査手法を高度化させていくことは、浅海域におけるより深い深度の精密な情報を取得することが可能となり、海陸連続の地質環境モデルの作成に資するという観点から、非常に有益であることが示された。

参考文献

- 経済産業省 (2016) : 沿岸海底下等における地層処分の技術的課題に関する研究会とりまとめ、P17
- 村上文敏・古谷昌明・高智英二郎・丸山かおる・畑山一人・武田伸勝・佐藤正良・馬場久紀 (2016) 浅海用高分解能三次元音波探査システムの開発とそれによる駿河湾北部沿岸海域の活断層調査, 活断層研究, 44, pp29-40.
- 産業技術総合研究所 (2014) 海域地質環境調査確証技術開発成果報告書, pp28-76.
- 鶴 哲郎・朴 進午・榊原淳一・高梨 将・辻 健 (2017) 浅海域 3D 反射法地震探査のための多重発振振源の開発. 日本応用地質学会研究発表会講演論文集, pp69-70.
- Tetsuro Tsuru, Kazuo Amakasu, Jin - Oh Park, Junichi Sakakibara and Mamoru Takanashi (2019): A new seismic survey technology using underwater speaker detected a low - velocity zone near the seafloor: an implication of methane gas accumulation in Tokyo Bay, *Planets and Space*.

第4章 沿岸海底下特有の地質環境に着目した
工学技術の高度化

4-1 はじめに

(1) 実施概要

概要調査段階以降に必要なとなる工学技術の高度化の観点では、平成 27 年度の沿岸部処分システム高度化開発において、沿岸部における処分システムの構築を念頭に、沿岸部の特性などに関連したこれまでの地層処分研究開発の成果の再整理を行い、再検討が必要な課題などが抽出・整理された(産業技術総合研究所, 日本原子力研究開発機構, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 電力中央研究所, 2016)。これらの整理結果は、並行して進められた「沿岸海底下等における地層処分の技術的課題に関する研究会」(以下、沿岸部研究会とする)に適宜提供され、平成 28 年 8 月の同研究会のとりまとめでは、“海域を含めた沿岸部において地層処分を実現するために必要な基本的な技術は概ね整備されている”としつつも、“今後、技術の高度化に引き続き取り組むことで、さらに信頼性を高めることが重要である”と結論付け、併せて技術の高度化に向けて取り組むべき課題とその方向性が示された(沿岸海底下等における地層処分の技術的課題に関する研究会, 2016)。工学的対策技術は、沿岸部における技術的な対応の可能性に関して塩水環境下における性能の確認が必要とされ、これは化学場の影響を考慮した人工バリアの設計に資するものと位置づけられている。

このような沿岸部研究会における議論を踏まえ、平成 28 年度からの 3 ヶ年に、工学技術の高度化に向け、設計や施工等のエンジニアリングや操業中の安全確保への反映、及び閉鎖後の長期挙動評価への反映の 2 つの観点から、海水や海水を希釈した塩水等を考慮した環境下での構成要素もしくは構成材料(オーバーパック、緩衝材、セメント系材料)の各種特性に関する「①人工バリア材料等に関する劣化や変質に関する現象の把握(各種特性等のデータ拡充)」、及び溶液型グラウト材の海水下での適用性や総合的な評価方法に関する「②塩水環境下ニアフィールド(NF)領域での処分システムの成立性に係る手法の提示」について検討を進めた(産業技術総合研究所, 日本原子力研究開発機構, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 電力中央研究所, 2019)。

地質環境調査技術によって得られる沿岸部の初期ベースラインは、地下施設の建設・操業に伴う坑内湧水の排水等によって擾乱を受ける。特に沿岸部では、浅部の塩水系地下水の影響など、操業期間中の水理及び化学場の擾乱を注意深く評価する必要がある。沿岸海底下に処分場が建設される場合、処分場建設に伴う地下水の流入や我が国の多様な海底地下水の水質の幅を対象とした、坑道建設に必要な支保工等のセメント系材料の変質機構や緩衝材への影響を評価する必要がある。また、NUMO によりとりまとめられた、包括的技術報告書(原子力発電環境整備機構, 2021: 4 章では以降 NUMO-SC とする)では、ジェネリックな環境での地層処分の実現性が示され、第 4 章の処分場の設計と工学技術では、処分場の設計について、所要の安全機能を確保するための設計の考え方や方法論、想定される建設・操業・閉鎖の手順、およびそれらに適用する技術の工学的な実現性が示された。沿岸部環境に関して

は、海水相当の地下水での実現性が示されており、多様な地下水に対応すべく、データの拡充が望まれるものと考えられる。

そこで、平成 30 年度までの成果を踏まえ、平成 31 年度から令和 5 年度の本事業では、処分場建設に伴う浅部地下水と深部地下水の混合や湧水等への影響に係る水理場の解析技術及び処分場の成立性に関する手法の整理、また、既存情報等から我が国の海底下の地下水水質の幅を整理し、その幅の中での坑道建設から再冠水に至るまでの坑道建設に必要な材料の変質機構や緩衝材への影響の定量化とその対策技術に関する検討を実施してきた（産業技術総合研究所，原子力環境整備促進・資金管理センター，電力中央研究所，2020；2021；2022；2023；2024）。実施した項目は以下の通りである。

①セメント系材料の短期的な変質挙動に関する知見拡充（4-2 節）

②緩衝材の機能変化に係るデータの拡充（4-3 節）

③緩衝材-オーバーパクの相互作用と緩衝材仕様に関わるデータの拡充（4-4 節）

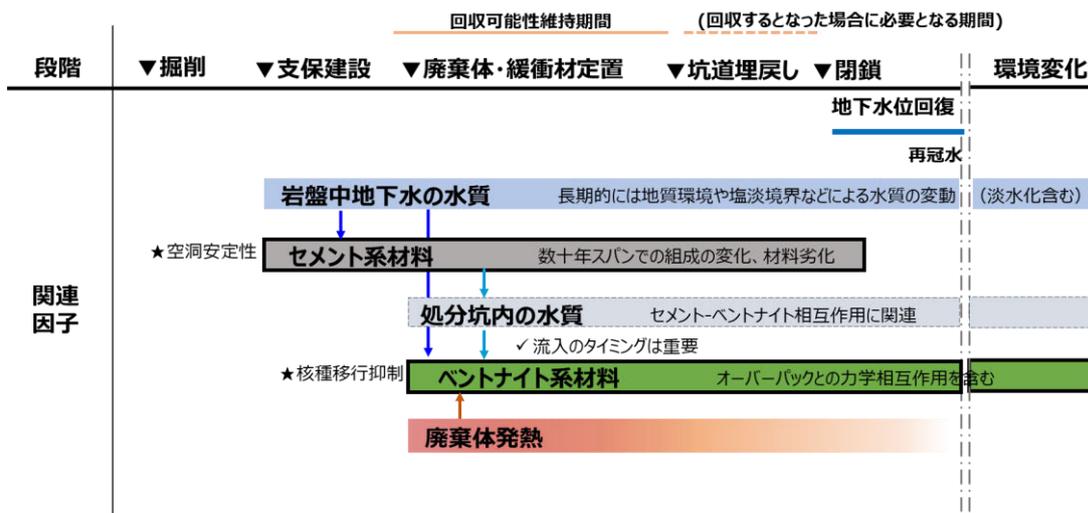
④再冠水に至る期間を対象とした性能評価手法に係る基盤整備（平成 31 年～令和 2 年度）

①から③のセメント系材料及び緩衝材に関する検討は、本報告書の 4-2 節から 4-4 節に 5 か年の成果を取りまとめた。平成 31 年～令和 2 年度に実施した④の性能評価手法に関する検討は、成果を取りまとめた令和 2 年度報告書（産業技術総合研究所，原子力環境整備促進・資金管理センター，電力中央研究所，2021）を参照願いたい。

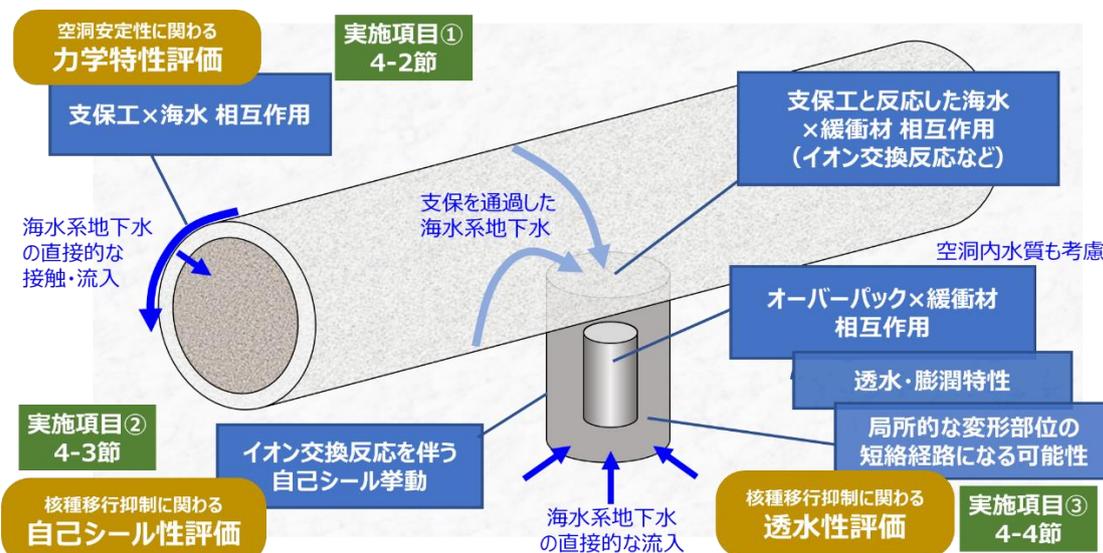
（2）廃棄体周辺の状態変遷と研究の位置づけ

本事業では、沿岸海底下特有の地質環境に着目し、緩衝材や支保工の変質や機能変化に係る知見拡充を通じて、設計に加え性能評価等への反映を意識した工学的な検討を行う。本事業以外にも地層処分研究は幅広く進められている中、ここでは沿岸海底下特有の事象として建設初期から海水系地下水が処分施設の構成要素に浸透することに着目すると共に、建設から再冠水完了までの期間を主な対象とする。

沿岸部処分において構成要素に作用する外的要因を時系列及び空間的な関係で整理したものを図 4-1-1 に例示する。坑道については支保工（セメント系材料）による空洞安定性、緩衝材（ベントナイト系材料）については核種移行抑制機能としての低透水性や自己シール性などが設計要件として求められる（NUMO、2021）。高レベル放射性廃棄物処分の縦置きもしくは横置きの設計を想定するならば、廃棄体発熱は緩衝材に、岩盤中地下水の水質は支保工と緩衝材に作用し、要求性能に影響を及ぼす外的要因になると考えられる。支保工と緩衝材が隣接しない場合には、海水系地下水が支保工や埋戻し材を通過し、水質を変えて緩衝材に到達することも考えられる。すなわち、緩衝材に侵入する地下水については、その時期と水質に多様性が見込まれる。



(a) 時系列での整理



(b) 空間的な関係での整理

図 4-1-1 沿岸部処分において構成要素に作用する外的要因の整理 (研究の位置づけ等を整理するために作成したイメージ)

構成要素と外的要因の相互作用を踏まえ、海水系地下水の浸潤を起点とした時に、支保工または緩衝材において想定される状態変遷の概念図を図 4-1-2 と図 4-1-3 に例示する。状態変遷の概念図の作成経緯については令和 5 年度報告書の Appendix-VI を参照されたい。支保工については、地下水が支保外表面を流動する場合と、支保内部に浸透する場合があります。それぞれ支保工の岩盤側から徐々に化学的変質部が拡大し、健全部は減少すると予想される。こうした不均一な変質の進展に対し、支保全体の力学特性を踏まえて空洞安定性を評価するには、化学的変質部の拡大を段階的に捉える必要がある。すなわち、著しい強度低下を伴わない変質部の拡大から、著しい強度低下を伴う変質部の拡大へと段階が変わるものと考えら

れる。緩衝材は、海水系地下水と接触することにより、飽和度の上昇とイオン交換反応が同時に進行する。岩盤側から徐々に飽和度が上昇するとベントナイト系材料の膨潤が生じ、オーバーバック-緩衝材や緩衝材-岩盤の間等に存在する隙間は緩衝材の自己シール性能によって閉塞されると予想される。ベントナイト系材料のイオン交換反応も岩盤側から廃棄体側に向かって徐々に進行し、一定の水質で海水系地下水が供給され続けられればいずれ平衡に至る。水質に関して、例えば縦置き設計であれば岩盤中の海水系地下水がほぼ直接的に緩衝材に流入する可能性は高く、一方で、支保工を通過した地下水が緩衝材に到達する可能性も考えられる。

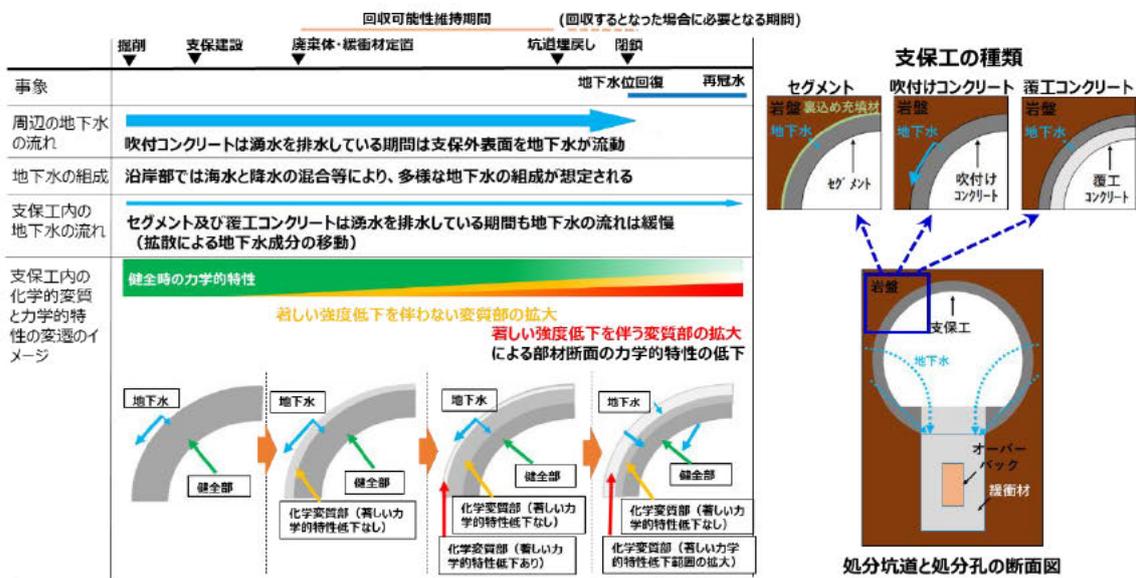


図 4-1-2 支保工において想定される状態変遷の一例 (研究の位置づけ等を整理するために作成したイメージ)

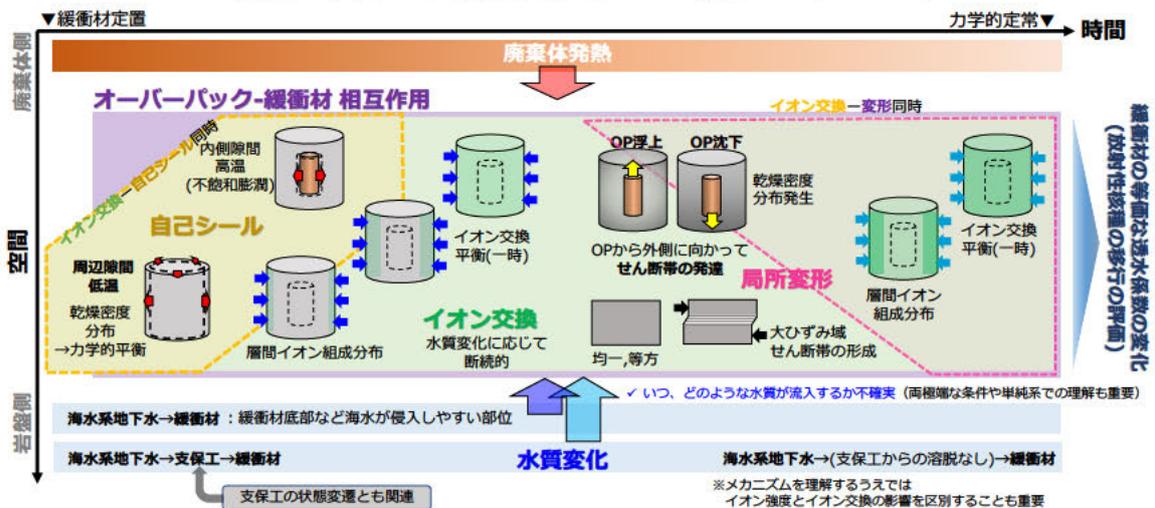


図 4-1-3 緩衝材において想定される状態変遷の一例 (研究の位置づけ等を整理するために作成したイメージ)

流入経路や時期に依って海水系地下水の水質が変動すれば、それとの平衡に向かってイオン交換反応は進行する。そのため、イオン交換反応が生じうる時間スケールは大きい。緩衝材中でこうした変化が生じている段階を含め、オーバーパックと緩衝材の相互作用は生じるものと考えられる。例えば、緩衝材の膨潤や圧密によりオーバーパックが移動すれば、緩衝材にはひずみ分布が生じる。先述したイオン交換反応と重畳することで、緩衝材中に交換性陽イオン組成や乾燥密度の分布が残留する可能性や、物質移行の卓越部（せん断帯）が形成される可能性が考えられる。こうした緩衝材内部で不均一に進行する状態の変化を透水係数と関連づけることが、放射性核種の移行を評価するうえで重要であると考えられる。

状態変遷の概念図を念頭に、本事業で行う研究は以下のように位置づけられる。支保工については、多様な地下水水質の想定に対して、建設から閉鎖までの空洞安定性を満足する支保工の選定や耐久年数を説明するために、変質後の力学特性の評価が重要となる。そこで本事業では、前述した地下水流動のパターンを考慮し、海水系地下水と接触したセメント系材料の化学変質と力学特性の変化を実験的に検討した。支保工内で生じる状態変遷を時空間的に評価することを目指し、数値解析手法の開発も並行して行った（4-2節）。緩衝材については、多様な地下水水質の想定に対して、移行抑制機能を維持できる緩衝材仕様あるいは水質の条件を明確にするために、緩衝材中でのイオン交換反応の予測とそれが低透水性や自己シール性に及ぼす影響の評価が重要になる。そこで本事業では、高イオン強度かつ多様なイオン組成の水質条件のもとイオン交換選択係数に関する基盤的な検討を進め、ベントナイト系材料におけるイオン交換反応の予測精度を向上させた（4-3節）。そして、ベントナイト系材料の透水特性や膨潤変形挙動に及ぼすイオン交換やイオン強度の影響を分析した。水質は、流入経路や時期に依存した不確実性があることから、本事業では現海水のイオン組成を基本条件とし、その端成分や希釈・濃縮倍率、セメント系材料との反応を考慮した。緩衝材とオーバーパックの相互作用については、外的因子として廃棄体発熱も考慮し、模型試験により調べる。模型試験では計測しきれない局所的な変形や透水現象があることから、別途、要素試験を行い、せん断帯が緩衝材の透水性に与える影響の有無について検討した。以上に加え、緩衝材中の状態変遷を時空間的に評価することを目指し、再現解析を通じた数値解析手法の妥当性についても並行して検討した（4-4節）。

状態変遷の概念図には、廃棄体側の緩衝材を想定した高温下での吸水膨潤過程など本事業では実施しない課題的項目も示している。今後の課題を含め、状態変遷の概念図を意識しながら上述した検討を進めることにより、多数ある課題の相互関係が明確となり、抜けのない検討が可能となる。それにより、熱的・水理学的・力学的・化学的挙動に対する予測精度が高まり、性能評価や設計等へ反映されることや、安全評価におけるより確からしい状態設定につながることを期待される。

参考文献

- 沿岸海底下等における地層処分の技術的課題に関する研究会，とりまとめ，2016，
https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/13022278/www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy_environment/engan_kaiteika/report_01.html（最終確認 2024.03.13）
- 原子力発電環境整備機構，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の構築－，（2021），NUMO-TR-20-03.
- 産業技術総合研究所，日本原子力研究開発機構，原子力環境整備促進・資金管理センター，電力中央研究所，平成 27 年度地層処分技術調査等事業（沿岸部処分システム高度化開発）報告書，2016.
- 産業技術総合研究所，日本原子力研究開発機構，原子力環境整備促進・資金管理センター，電力中央研究所，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（沿岸部処分システム高度化開発）平成 27 年度～平成 30 年度取りまとめ報告書，2019.
- 産業技術総合研究所，原子力環境整備促進・資金管理センター，電力中央研究所，平成 31 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（沿岸部処分システム評価確認技術開発）成果報告書，2020.
- 産業技術総合研究所，原子力環境整備促進・資金管理センター，電力中央研究所，令和 2 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（沿岸部処分システム評価確認技術開発）成果報告書，2021.
- 産業技術総合研究所，原子力環境整備促進・資金管理センター，電力中央研究所，令和 3 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（沿岸部処分システム評価確認技術開発）成果報告書，2022.
- 産業技術総合研究所，原子力環境整備促進・資金管理センター，電力中央研究所，令和 4 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（沿岸部処分システム評価確認技術開発）成果報告書，2023

4-2 セメント系材料の短期的な変質挙動に関する知見拡充

(1) 背景と目的

沿岸部における地層処分では、塩水の影響や海陸接合部などの沿岸部固有の環境が想定される。処分場に係る坑道は、建設段階から処分場の閉鎖までの期間に渡って空洞安定性を維持する必要がある。坑道の支保工と覆工を構成するセメント系材料は、吹付けコンクリート（以下、「吹付けコン」）、覆工として打設される普通コンクリートや高炉スラグセメントコンクリートなど、セグメントとして用いられる加温養生されたコンクリート、（以下、「セグメント」）が候補材料とされ（産業技術総合研究所ほか, 2019）、特に主要坑道、連絡坑道、アクセス坑道（立坑・斜坑）については、覆工コンクリートを設置することを基本としている（原子力発電環境整備機構, 2021）。沿岸海底下に処分場が建設される場合、それらのセメント系材料で構成される支保工及び覆工に関しては、図 4-2-1 に示すように、岩盤側からの地下水との接触による化学変質とそれに伴う力学的特性の変化が懸念されているが、現状ではその現象に関する知見については、以下の課題がある。

- ・ セメント系材料の地下水による化学変質に関するデータはあるが、それに伴う強度変化に関するデータは少ない。
- ・ 人工海水やそれを希釈した溶液でのデータはあるが、沿岸部の多様な地下水組成に対応するデータは少ない。

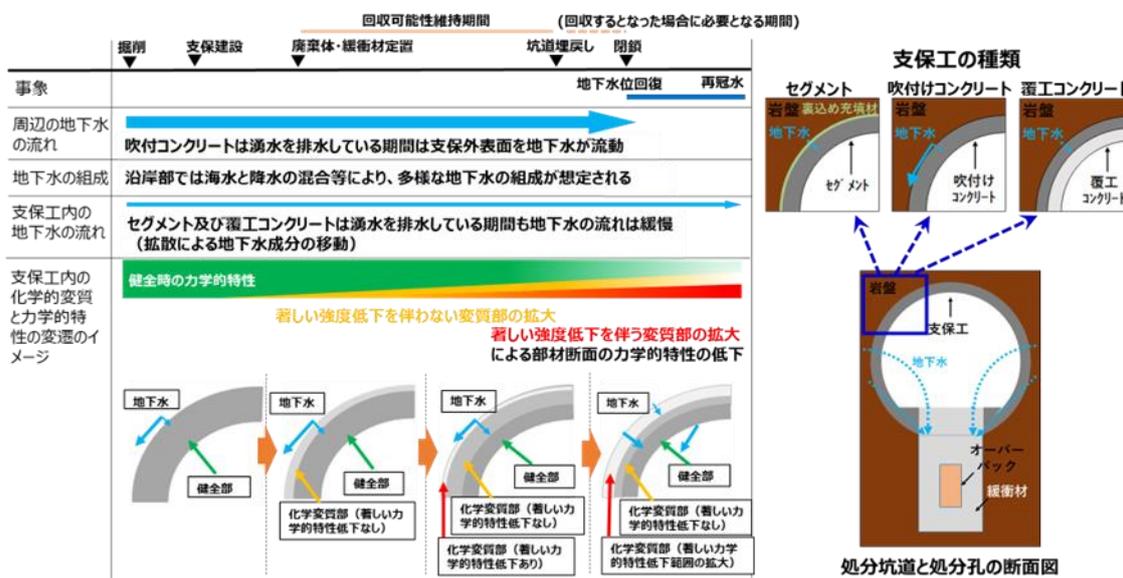


図 4-2-1 坑道の支保工及び覆工の状態変遷のイメージ

また、従来、セメント系材料の圧縮強度は全空隙率との関係でモデルされてきたが、平成 27 年度から平成 30 年度に実施された沿岸部処分システム高度化開発の「塩水環境下におけるセメント系材料の機械的特性変化に関する検討」の結果から、全空隙率の変化だけでは強

度について整理できないことに加えて、化学変質などに関してセメントペーストの試料で多くのデータが取得されてきているが、実際に使用するコンクリートでのデータが少ないことが示された（産業技術総合研究所ほか, 2019）。

それらを踏まえ、本技術開発では、沿岸部に特有な地下水化学環境を念頭に置き、処分場の設計に資する情報として、セメント系材料の化学変質と力学的特性の関係を体系的に整理すると共に解析的な予測手法を整備することを目的に検討を進めた。

今フェーズのアプローチ及び成果の目標を図 4-2-2 に示す。

セメント系材料の化学変質と力学的特性に関する検討では、沿岸部の地下で想定される地下水と支保工や覆工に使用されるセメントの硬化体の変質や力学的特性に与える影響についてマップ図などによる体系的な整理を行うことを目標とする。具体的には、急結剤を添加する吹付けコンや二次製品であるセグメントの水セメント比を想定したセメントペーストの化学変質と力学的特性の変化について影響の大きい地下水成分に着目し、地下水成分に対して適性の有る材料選定に資する情報の整備を目指した。また、現実的な材料及び条件における化学変質と力学的特性に関する検討では、地下水の流動の状況を模擬した浸漬試験を実施し、コンクリートの化学変質と力学的特性の評価に資する情報の整備を目指した。

地下水や材料の種類に応じた化学変質予測と強度推定手法の検討では、支保工などの空洞安定性の維持期間を対象として、沿岸部で想定される様々な組成の地下水による化学変質とそれに伴う力学的特性の変化に関する解析的な予測手法の構築を進めた。今フェーズで得たデータに基づき、セメント系材料に対する地下水の化学成分が及ぼす影響について体系的に整理し、支保工及び覆工の設計に資する情報として取りまとめる。具体的には、類型化した模擬地下水及び実地下水をコンクリートの力学的特性の低下の要因や化学変質を抑制する可能性のある溶存イオンに着目し、化学変質の程度と力学的特性の変化について整理し、マップ図を作成することで、地下水の水質からセメント系材料がどのように変質し、どの程度力学的特性に影響を及ぼすかを把握できるようにする。例えば、処分場の候補地が選定され、地下水組成などの環境条件が明らかになった段階で、施設設計において考慮すべき項目（設計時に考慮すべき変質挙動とその影響の程度、材料の組み合わせ、各要素の厚さなどへの反映など）の抽出や、対策の方針の策定などに資することを目標としている。

また、化学変質予測と強度推定手法の構築について、今フェーズまでの成果から、できること及びできなかったことをまとめ、できることについては手法を提示し、できなかったことについては構築に向けたアクションを明確にする。

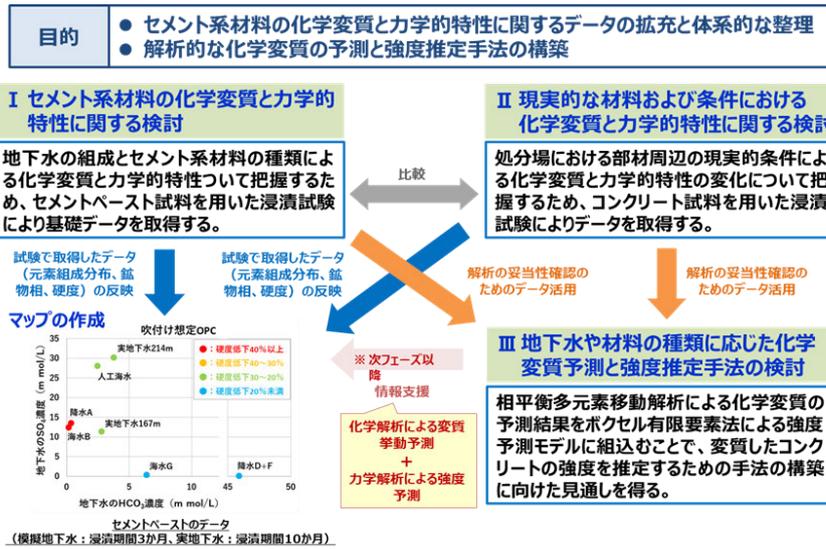


図 4-2-2 今フェーズのアプローチ及び成果の目標

(2) 実施内容

① セメント系材料の化学変質に伴う力学的特性に関する試験による体系的整理

本試験では、セメントコンクリートの力学的特性に影響を与える地下水成分 (図 4-2-3) の整理に基づき (地下水の影響成分 HCO₃、SO₄、Mg)、沿岸部の地下水の組成を類型化し、その代表的な組成の模擬地下水に加えボーリングによって得られた地下水を用いて、セメントペースト試料及びコンクリート試料の浸漬試験を実施し、化学変質に関する分析と変質部の力学的特性に関するナノインデンテーション法による硬度測定を実施し、地下水の化学組成が力学的特性に与える影響についてマップ図を作成し体系的に整理を進めている。令和 5 年度は、浸漬期間がさらに経過した試料からデータを取得し、令和 4 年度までに整備したマップ図を拡充した。

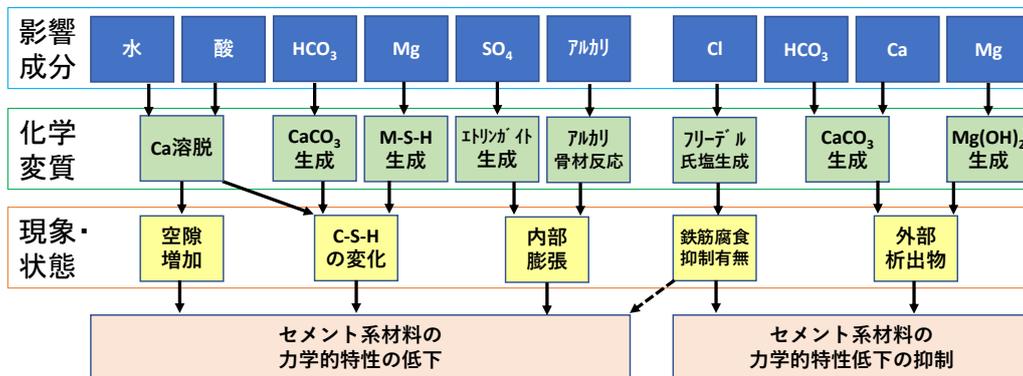


図 4-2-3 セメントコンクリートの力学的特性に影響を与える地下水成分

(a) セメントペーストの試験

(i) 試験方法

浸漬試験に用いる試験液の組成を決定するため、前フェーズに調査した地下水組成のデータ（産業技術総合研究所ほか, 2017; 2018; 2019）を令和 2 年度に整理した（産業技術総合研究所ほか, 2021）。類型化した地下水の組成を図 4-2-4 に示す。セメント系材料の化学変質を促進する成分として SO_4 、 HCO_3 、 Mg 及び外部生成物の生成を促進する可能性がある Ca の濃度を、人工海水と対比してグループ分けを行い、令和 2 年度に実施したセメントペーストによる試験の結果に基づき検討が必要な地下水（5 種類：人工海水（海水 I）、海水 B、海水 G、降水 A 及び降水 D+F）を設定した。加えて、駿河湾で採取した地下水を使用した（FGB-2_167.70~171.78 m 及び FGB-2_214.75~220.52 m）。試験に用いるバルクのセメントペーストは、吹付けコンとセグメントおのおののペースト部分を想定した試料とした。これは、令和 2 年度までの検討結果（産業技術総合研究所ほか, 2020; 2021）より、処分場で使用が想定されるコンクリートのうち、吹付けコンの変質に関する知見が少ないこと及びセグメントと現場打設コンクリートのペースト部分に相当する試料の空隙径分布や鉱物相は同様であり、セグメントは工場製品のため化学変質に対する知見が少ないことを踏まえて選択した。セメントは、普通ポルトランド（以下、「OPC」）と高炉スラグセメント（以下、「BFSC」）を対象に実施した。

浸漬期間 20 箇月（実地下水は 10 箇月）の試料について EPMA による元素組成分布の測定を実施し、化学変質が進んでいる試料についてナノインデンテーション法による硬度測定と μXRD 測定による鉱物相の同定を実施した。

- ・ 試料断面の元素組成分布（EPMA 面分析）
- ・ 接液面近傍（あるいは化学変質部）の鉱物相の同定（ μXRD ）
- ・ 硬度（ナノインデンテーション法）

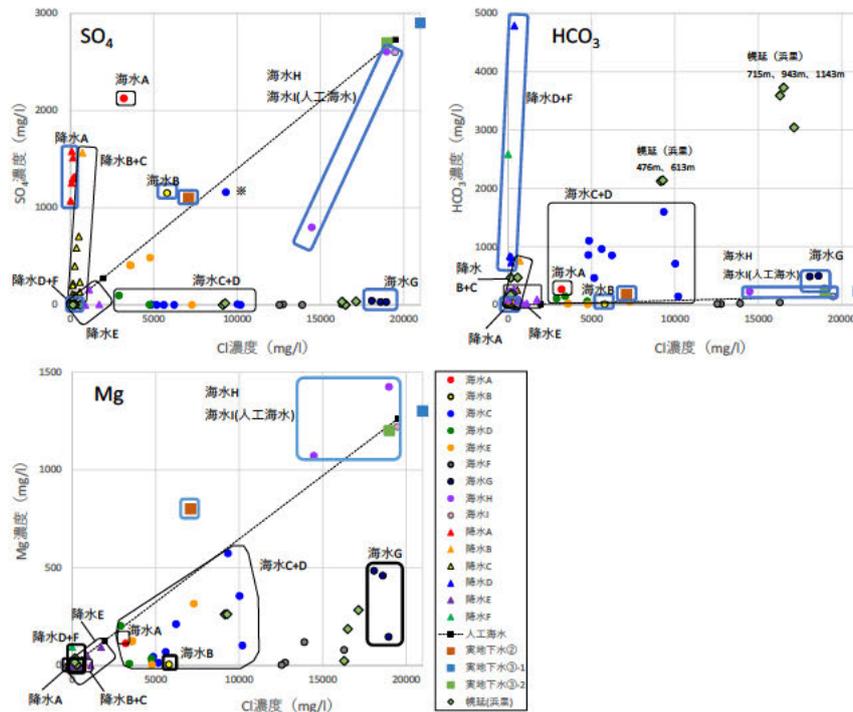


図 4-2-4 類型化した地下水の組成

(ii) 試験結果

吹付け想定 OPC の地下水成分と特性変化の関係を図 4-2- 5 に、吹付け想定 BFSC の地下水成分と特性変化の関係を図 4-2- 6 に示す。

地下水組成による化学変質と力学的特性の変化の関係を、マップ図に取りまとめた。接液面近傍が膨張破壊した水準については、膨張破壊部分のナノインデンテーション法による硬度測定は実施していないが、力学的特性を失っていることから 40%以上硬度低下しているものとして表示した。

図の左側の中央から上部の HCO₃ 濃度が低く SO₄ 濃度が高い領域で硬度低下率が大きくなる傾向が認められた。特に HCO₃ が低い降水 A 及び海水 B に浸漬した試料の硬度低下率が大きい傾向にあった。HCO₃ 濃度が高い地下水 (降水 D+F) では、表面の外側を含む接液面近傍の二次鉱物生成により地下水成分の浸透が抑制されるため硫酸塩による変質が遅延されると考えられる。降水 A 及び海水 B に比べ SO₄ 濃度が高い FGB-2_214.75~220.52 m でも硬度の低下は抑制されることを確認した。化学組成が単純な模擬地下水による浸漬試験は、化学組成が複雑で様々な化学反応が同時に生じる実地下水より化学変質が過剰に進む可能性があると考えられる。

セメント種類を比較すると、BFSC ペーストでは浸漬期間 20 箇月の時点において接液面近傍で膨張破壊を生じた水準は無く、OPC と比較して硬度低下率が低いことを確認した。

以上の検討から、処分環境の地下水組成の特徴として SO_4 濃度が高く HCO_3 濃度が著しく低い場合には、力学的特性の低下を早期に生じる可能性があることから化学変質を考慮した支保工の材料選定や部材厚さの検討が重要になると考えられる。

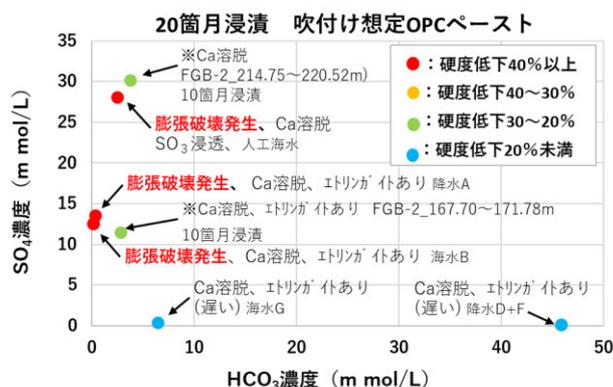


図 4-2-5 吹付け想定 OPC の地下水成分と特性変化の関係
※印は 10 箇月、他は 20 箇月のデータ

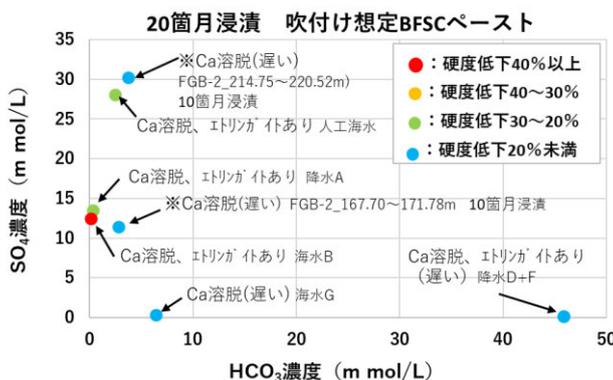


図 4-2-6 吹付け想定 BFSC の地下水成分と特性変化の関係
※印は 10 箇月、他は 20 箇月のデータ

(b) コンクリートの試験

これまでセメント系材料の化学変質に関するデータは、変質が生じやすく分析が容易なセメントペーストで多く取得され、実際に処分場で使用が想定されるコンクリートに対しては知見が少ない。そのため、コンクリートの化学変質とそれに伴う力学的特性の変化を把握しデータを拡充していくことが処分場の設計に資すると考えられる。加えて、これまで浸漬試験により化学変質に関わるデータが取得されてきたが、岩盤からの地下水が支保工の裏面に接触するなどのセメント系材料への水の接触条件について現実的条件を踏まえたデータを整備していくことも設計に資すると考えられる。特に、吹付けコンに関する知見は少なく、本技術開発で知見を拡充していくことは重要である。そこで本技術開発は、実環境における地

下水流動を考慮した条件において、処分場で使用が想定される吹付けコン及びセグメントの処分場における部材周辺の現実的条件（セメント系材料と岩盤との接触部付近での地下水流動など）による化学変質と力学的特性の変化についての試験を実施した。吹付けコンについてはフロースルー法による試験を実施し、流路の二次鉱物の生成状況の観察や化学変質の状態の確認のための分析と変質部の力学的特性の確認のための硬度測定を実施した。セグメントのコンクリートについては浸漬法による試験を実施し、化学変質の状態の確認のための分析と変質部の力学的特性の確認のための硬度測定を実施した。加えて、令和2年度から開始したコンクリート表面への二次鉱物の生成を確認するための界面観察試験については、試料表面に析出した二次鉱物の生成状況を確認した。

(i) 試験方法

吹付けコン試験体のフロースルー法による浸漬試験の模式図を図4-2-7に示す。セグメントについては、一面暴露による浸漬試験を実施した。

令和2年度に開始した変質試験では、浸漬液として人工海水を使用し、令和3年度から駿河湾の地下から採取した実地下水とSO₄濃度が高くHCO₃濃度が低い降水Aによる変質試験を開始した。人工海水については、流速を令和2年度に開始した人工海水と同じ0.12 ml/cm²/日程度（以下、「流速小」）に対して10倍の流速（1.2 ml/cm²/日）とした試験（以下、「流速大」）も実施した。

所定の期間フロースルー法による浸漬試験を実施した後、試料断面の元素分布測定、接液面近傍の鉱物相の同定と硬度の測定を実施した。

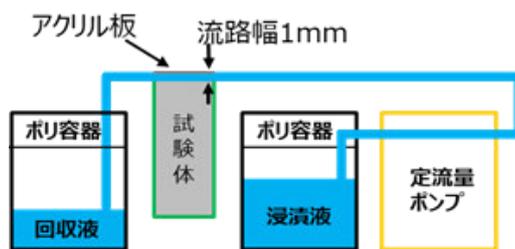


図4-2-7 コンクリート試験体のフロースルー法による浸漬試験の模式図

(ii) 試験結果

吹付けコン OPC の地下水成分と特性変化の関係を図4-2-8に、セグメント OPC の地下水成分と特性変化の関係を図4-2-9に示す。

硬度の低下については、測定した硬度の中から最も低下している値を硬度低下の指標とした。吹付けコンについては、人工海水のフロースルー試験の流速小（浸漬期間30箇月）と流速大（浸漬試験期間20箇月）の中で最も硬度の低下した人工海水の流速大の値に基づいて記載した。

コンクリート試料は、セメントペーストの場合と異なり接液部が膨張破壊した水準は無く、同じ化学組成の地下水に対する化学変質の進展はセメントペーストに比べ遅いことを確認した。硬度低下の傾向は、吹付けコンではセメントペーストと同様に、浸漬液中の HCO_3 濃度が低い降水 A が大きくなっていたが、セグメント OPC では 3 水準の中で HCO_3 濃度の高い地下水の方が硬度の低下は大きくなっていた。硬度の低下は、 SO_4 の浸透による Ettringite 生成と Ca の溶脱が主な原因と考えられるが、 SO_4 濃度が人工海水の 1/2 程度の濃度の降水 A 及び FGB-2_167.70~171.78 が最も硬度が低下した。

地下水の組成とセメント系材料の種類による化学変質と力学的特性の関係について把握するため、セメントペースト試料を用いた浸漬試験により基礎データを取得し、地下水成分の特徴がセメントペーストの力学的特性に与える影響をマップ図に整理した。二次鉱物の生成、 SO_4 浸透深さ及び Ca 溶脱深さなどについて、化学変質への影響が大きいと考えた HCO_3 濃度と SO_4 濃度を軸にマップを作成し多面的に現象を理解した。

セメントペーストでは、浸漬期間 20 箇月で硫酸塩劣化による膨張破壊した水準が確認されたが、実際に使用するコンクリートは同じ化学組成の溶液に 20 箇月間浸漬しても膨張破壊は生じず（より長期的な確認は必要）、接液面近傍の力学的特性が 25~40%程度低下することを確認した。人工海水や人工海水の SO_4 濃度に近い実地下水に比べ SO_4 濃度の低い沿岸部の地下水の方が硫酸塩劣化が進む場合があることを確認した。また、化学変質の劣化要因と考えられる Mg を含む人工海水及び実地下水と Mg を含まない模擬地下水の変質試験の結果から SO_4 の影響に比べ Mg の影響は小さい可能性が示唆された。これらのコンクリート試料での現象は、化学変質の試料表面からの深さが小さいために顕著になっていないことも推測されることから、より化学変質が深さ方向に進行した状態での確認が必要と考えられる。

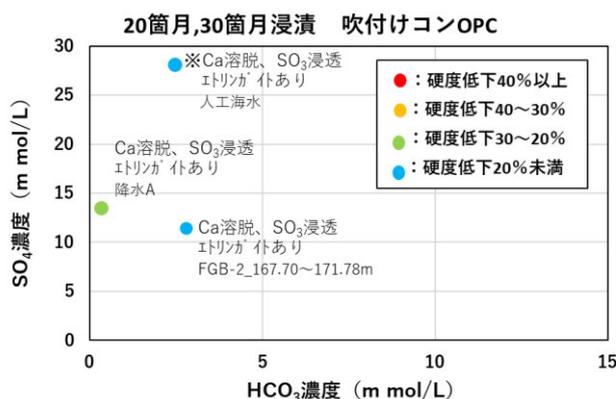


図 4-2-8 吹付けコン OPC の地下水成分と特性変化の関係（※印が 30 箇月）

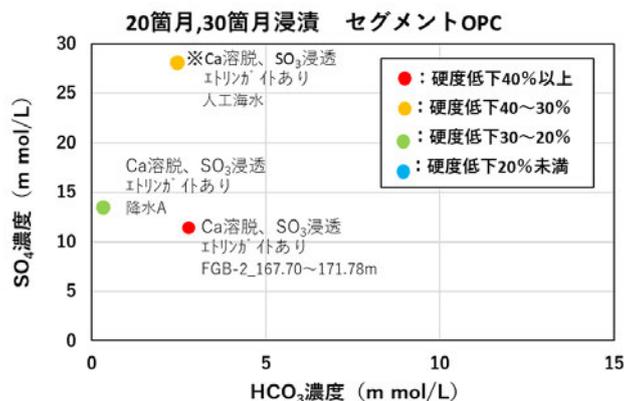


図 4-2-9 セグメント OPC の地下水成分と特性変化の関係（※印が 30 箇月）

② セメント系材料の化学変質に伴う力学的特性に関する解析手法の検討

本技術開発は、沿岸部の様々な組成の地下水におけるセメント系材料の化学変質に関して時間的な変遷を化学解析により予測し、ある時点の状態（鉱物組成等）をもとに圧縮強度を力学解析により予測する一連の手法を構築するためのものである。本フェーズは、化学解析手法と力学解析手法のそれぞれの課題について取り組み、これらをつなぐための課題の抽出をした。

(a) 化学変質挙動の推定手法の検討

外部析出層の有無による化学変質への影響を検討することを目的として、実験において外部析出層が確認されたケースと確認されないケースについて外部析出層を考慮しない解析を実施した（産業技術総合研究所ほか, 2023）。外部析出層が確認されないケースでは、浸漬試験後の化学成分の分布を再現できており、化学成分の移動が適切に評価されていることを確認した。一方、外部析出層が確認されたケースの解析結果は化学成分の移動を過大に評価する結果となり、外部析出層が物質移行を遅延する効果を解析コードに反映する必要があることを確認した。

そこで、外部析出層の影響が生じたケースに対して、試料の接液面の外側に外部析出層を予め設定し、外部析出層の厚さ、化学組成、鉱物相、空隙率及び物質移行に関する係数などをパラメータとして解析し、外部析出層の影響因子を抽出するとともに、解析手法の見通しや課題を整理した。また、十数年～百年程度の期間海水環境で変質したコンクリートに関する文献を調査し、そのデータを活用して再現解析を実施し、化学解析の本技術開発への適用性を確認するとともに課題を整理した。

(i) 化学解析に使用したコード

本技術開発では、相平衡計算と物質移行計算を連成させた相平衡多元素移動計算コード（Hosokawa et al., 2011）を使用（図 4-2-10）して、地下水とセメント系材料の相互作用に

よる鉱物相変化の計算を行った。本コードは、令和4年度に外部析出層が生成しない場合の浸透試験結果を再現できることを確認した、セメント系材料内部の二次鉱物生成とそれに伴う空隙変化を表現できるコードである。地下水との反応で生じる二次鉱物であるM-S-Hの熱力学データとともに、C-S-Hに対するAlの固溶を考慮したC-A-S-H固溶体モデルを解析コードに反映することで、セメント系材料に対する相平衡計算を高度化した。また、コンクリート外部に析出層を設定したモデル体系を構築し、固相外部への二次鉱物の析出現象を計算により再現する手法を検討した。

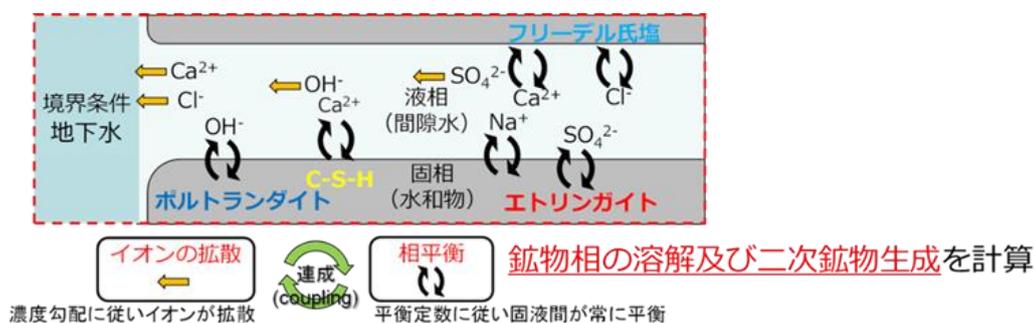


図 4-2-10 相平衡多元素移動計算コードの解析アルゴリズムの模式図

(ii) 外部析出層のコンクリートの化学変質への影響の確認

コンクリート材料と地下水との相互作用を評価する場合には、計算においても外部に二次鉱物が析出する現象を再現することが必要であるが、そのような計算はこれまでに事例は少ない。外部析出層のコンクリートの化学変質への影響は、外部析出層を考慮しないプログラムを用いて外部析出層がない試験ケースと外部析出層の有る試験ケースについて再現解析を実施することで検討した。外部析出層がない試験ケースの再現解析では、固相中の濃度プロファイルの試験結果と解析結果がおおむね一致した。解析結果の濃度プロファイルには、試験では確認できない微量な鉱物相の分布が反映されており、それが試験結果とよく一致していたことから、解析結果が試験結果を再現できたと考えた。一方、外部析出層の有る試験ケースの再現解析では、固相の濃度プロファイルに実験結果と隔たりが生じた。解析では、コンクリート硬化体より外部の液相は境界条件として常に一定となっており、外部析出層による物質移行の抑制効果が考慮されていないため、試験よりもコンクリートからの溶出や海水からのイオンの浸透が生じやすいためと考えた。

(iii) 外部析出層を考慮した化学解析手法に関する検討

相平衡多元素移動計算コードに、外部析出層の条件を設定できるようプログラムを改良した。解析は、外部析出層の厚さ、化学組成、鉱物相、空隙率及び物質移行に関する係数などをパラメータとして実施し、外部析出層の影響因子を抽出するとともに、解析手法の見直しや課題を整理した。パラメータスタディの結果を基に、外部析出層が生成した場合、硬化体

表面に浸透するまでに境界条件の液相から Ca、C、Mg 及び S の一部が除去されると考えた。そこで、外部析出層を設定せず、液相組成から Ca、C、Mg 及び S の一部を除去した条件で解析を行った。外部析出層の生成が物質移行に影響を及ぼすと推定された全ケース (OPC/BFSC セグメント・人工海水/FGB-2_167.70~171.78 m)において、境界条件から Ca、C、Mg 及び S の一部を除去することで、Mg と S の浸透プロファイルは実験結果と概ね一致した。

(iv) 文献データによる解析コードの適用性評価

De Weerd et al. が 1997 年~2013 年の約 16 年間ノルウェー南西部の Solsvik 湾に吊り下げられたコンクリート梁から採取されたコアに対し各種分析結果 (De Weerd et al., 2016 ; De Weerd et al., 2023) の再現解析を実施した。境界条件から Mg と S を減少させて解析することで概ね文献値に近い結果を得ることができ、本検討への適用性を確認した。

(v) 化学変質挙動の推定手法の成果と課題

本解析によって、沿岸部海底下の地下水とコンクリートが接触した際に C、Mg 及び S の浸透が抑制される可能性があることを解析的に証明し、外部析出層の効果を解析に反映する見通しを得ることができた。また、実験のみではなく、海水に接触していた実構造物についても同様の現象が起きており、同じ手法で再現できることが確認できた。沿岸部の地下に建設される処分施設の現実的な化学変質の進展を評価するためには、外部析出層の影響を考慮することが重要であることを確認した。

処分施設の支保工の設計に関する情報及び環境条件から沿岸部の地下水と接触した際のコンクリートの時間的・空間的な組成、強度の変化を予測し、かぶり厚さなどの設計に資する情報を提示するためには、外部析出層の生成の有無及び外部析出層の効果について、支保工の設計に関する情報及び環境条件の観点から整理し、それらを反映した解析を行う必要がある。また、強度を予測するためには、元素の移動だけでなく、コンクリート中に生じる元素分布の変化によってどのような鉱物が生成するかの評価についても精度を高める必要がある。外部析出層を考慮した化学解析では、Ca の表面付近の過剰な溶脱、一部の Cl のプロファイルの形状は本手法では再現できないケースがあり、本現象の検討は課題として残った。また、本解析では実験結果を基に外部析出層の影響の有無やその程度を設定したが、将来的には設計情報及び環境条件から外部析出層の影響を設定できるよう、外部析出層の生成条件及び効果を整理する必要がある。

(b) 力学的解析による強度予測手法に関する検討

本技術開発では、化学変質をしたコンクリートの強度予測をする解析手法を構築するにあたり、先ず健全なコンクリートで予測手法の検討を実施し、化学変質を受けた場合の強度予測の手法やその課題について検討を行った。対象としたコンクリートの強度推定手法は、先

ず、アメリカ国立標準技術研究所（NIST）が開発した Virtual Cement and Concrete Testing Laboratory（VCCTL）モデルを用いて、セメントペースト水和物の分布を三次元で模擬して計算し（Bullard, et al., 2009）、この結果をもとに、非線形ボクセル有限要素法（永井ほか, 2010）を用いてセメントペーストの力学的特性を推定する。さらに細骨材、粗骨材及び粗大空隙などの情報を組み合わせ、マルチスケール解析手法を用いることで、モルタル及びコンクリートの力学的特性を推定する。

(i) 健全なコンクリートによる解析手法の適用性の検討

水セメント比が 0.35、0.45 及び 0.55 のセメントペースト、モルタル及びコンクリートの各試験体を作製し、材料の組成分析や強度など測定を実施して解析結果と比較することにより解析結果の確からしさやコンクリートの強度予測が可能であることを検証した。また、モルタル及びコンクリートについては、内在する粗大空隙をモデルへの反映についても検討をした。圧縮強度及び静弾性係数の実測値と解析値の比較を図 4-2-11 に示す。実験値と解析値が等しくなる値を点線で示しており、圧縮強度は若干点線から離れた条件もあり、また粗大空隙を解析に考慮することで実験値を下回る傾向もあるが静弾性係数の実測値と推定値は概ね一致し、本解析手法は、試験結果を再現できることを確認した。

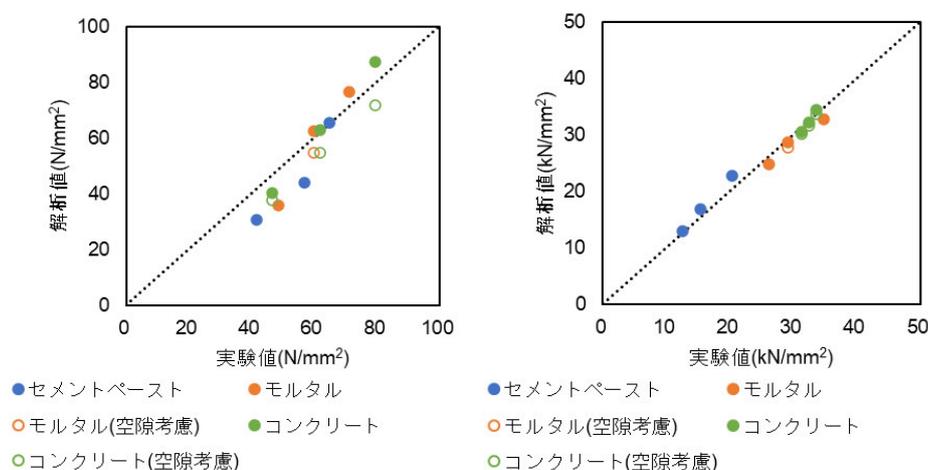


図 4-2-11 実測値と解析値の比較（左：圧縮強度、右：静弾性係数）

(ii) 化学変質したコンクリートの力学的特性の推定手法の検討

本技術開発で提案する化学変質したコンクリートの力学的特性を推定する手法のイメージを図 4-2-12 に示す。これまでに健全なコンクリートを対象として強度推定の手法としての適用性を確認してきた。本技術開発では沿岸海底下のコンクリート支保工の構造設計（空洞安定性）に資する情報を提示するため、支保工の設計情報及び環境条件から沿岸部の地下水と接触した際のコンクリートの時間的・空間的組成、強度の変化を予測することを目的として

いる。化学変質したコンクリートの力学的特性を解析するための課題を抽出し、変質部分の強度を解析モデルに反映するために必要な試験などを提案した。

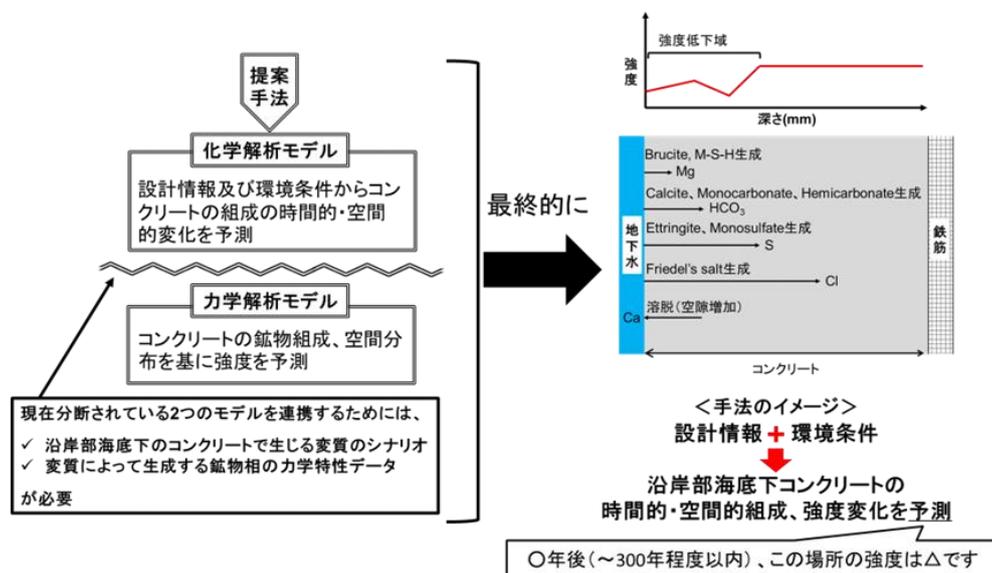


図 4-2-12 本技術開発で提案する化学変質したコンクリートの力学的特性を推定する手法のイメージ

化学変質したコンクリートの力学的特性を本解析により予測するにあたり、解析の基盤として必要となるデータを以下に抽出した。

- ・セメント系材料の主要な鉱物が化学変質した場合の力学特性
- ・Mg イオンの浸透に伴い生成する可能性のある M-S-H の力学特性
- ・硫酸イオンによる膨張破壊挙動の力学解析への反映方法

(3) 5 か年の成果と今後の課題

本技術開発では、処分場のセメント系材料に対して地下水組成が及ぼす影響の有無について体系的に整理を進めていくことで、影響の予測やその対策に必要なデータなどの、支保工及び覆工の設計に反映できる情報を取りまとめた。沿岸部に特有な地下水化学環境を念頭に置き、処分場の設計に資する情報としてセメント系材料の化学変質と力学的特性の関係を体系的に整理し、解析的な予測手法を整備することを目的に検討を進めた。

処分場で使用されるセメント系材料を想定した試料を用いて、化学変質と力学的特性の関係に関する知見を取得した。セメントペーストを使用した試験では、多様な地下水の影響によるセメントペーストの化学変質への影響を確認し、影響の大きい地下水についてセメントペースト及びコンクリートの化学変質と力学的特性への影響を検討した。特に、Ca 溶脱と S との反応によるセメント系材料内部の二次鉱物生成に関する情報及びその二次鉱物が生成した領域での力学的特性として硬度の低下に関する知見を取得しマップ図にまとめた。マップ図を作成することで力学的特性に影響の大きい地下水の特性を明らかにすることができ

た。セメントペーストに対する影響については変質が進展していない水準から接液部が破壊した水準まで地下水の影響を確認できた。施設建設に使用されるコンクリート試験では、セメントペーストに比べて化学変質の速度が遅く試験期間の間に十分な変質領域を確認することができていないことから、長期にわたる試験を実施する必要があると考える。化学変質挙動の推定手法の検討では、外部析出層の有無がコンクリートの変質に及ぼす影響を検討し、外部析出層の影響を解析に反映する見通しを得た。また、外部析出層の影響を反映することで海水と接触した実構造物の文献データを再現できることを確認した。力学的特性の推定手法の検討では、健全なセメントペースト、モルタル、コンクリートの力学的特性推定手法の妥当性評価や信頼性向上のための検討を行った。力学的特性の推定手法の検討では、健全な状態においてコンクリートの力学的特性の推定手法の妥当性評価や信頼性向上のための検討を行った。これらの検討を基に、様々な材料、地下水と接触したコンクリートの力学的特性を解析するための手法のフローと課題を明確にした。今後、抽出した課題を解決することで、将来的に支保工の設計情報及び環境条件から沿岸部の地下水と接触したコンクリートの時間的・空間的な化学組成及び力学的特性の変化を予測できると考える。

参考文献

- Bullard, J. W., Bentz, D., Garboczi, E., Ferraris, C., Martys, N., & Stutzman, P.: Virtual Cement and Concrete Testing Laboratory: US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, 2009.
- De Weerd, K., Orsáková, D., Müller, C.A. A., Larsen, K. C., Pedersen, B. and Geiker, R. M.: Towards the understanding of chloride profiles in marine exposed concrete, impact of leaching and moisture content, *Construction and Building Materials*, vol.120, 2016.
- De Weerd, K., Benard, E., Kunther, W., Pesersen, M. T. and Lothenbach, B.: Phase changes in cementitious materials exposed to saline solutions, *Cement and Concrete research*, vol.165, 107071, 2023.
- 原子力発電環境整備機構, 包括的技術報告書 わが国における安全な地層処分の実現—適切なサイト選定に向けたセーフティケースの構築—, NUMO-TR-20-03, 2021.
- Hosokawa, Y., Yamada, K., Johannesson, B., Nilsson, L.-O.: Development of a multi-species mass transport model for concrete with account to thermodynamic phase equilibriums, *Materials and Structures*, vol.44, pp.1577–1592, 2011.
- 永井 学志, 池田 翔太, 胡桃澤 清文: 硬化セメントペーストの圧縮強度評価に対する非線形ボクセル有限要素解法とその適用可能性, *日本計算工学会論文集*, No.20100012, 2010.
- 産業技術総合研究所, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 電力中央研究所: 平成 31 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 沿岸部処分システム評価確証技術開発 報告書, 2020.
- 産業技術総合研究所, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 電力中央研究所: 令和 2 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 沿岸部処分システム評価確証技術開発 報告書, 2021.
- 産業技術総合研究所, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 電力中央研究所: 令和 3 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 沿岸部処分システム評価確証技術開発 報告書, 2022.
- 産業技術総合研究所, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 電力中央研究所: 令和 4 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 沿岸部処分システム評価確証技術開発 報告書, 2023.
- 産業技術総合研究所, 日本原子力研究開発機構, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 電力中央研究所, 平成 28 年度地層処分技術調査等事業沿岸部処分システム高度化開発, 2017.
- 産業技術総合研究所, 日本原子力研究開発機構, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 電力中央研究所, 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沿岸部処分システム高度化開発報告書, 2018.

産業技術総合研究所, 日本原子力研究開発機構, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 電力中央研究所, 平成 30 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沿岸部処分システム高度化開発報告書, 2019.

4-3 緩衝材の機能変化に係るデータの拡充

(1) 背景と目的

高レベル放射性廃棄物における緩衝材の安全機能の確保に必要な設計要件として、「低透水性」、「自己シール性」、「コロイドろ過能」、「自己修復性」、「微生物影響の防止」、「制作施工性」が設定されている。各設計要件は、原子力発電環境整備機構（2021）（以下、「NUMO-SC」という）によって指標及び基準が設定されており、これを充足する緩衝材の有効粘土密度と厚さの範囲（仕様成立範囲）が示されている。

緩衝材の設計要件を評価するためには、再冠水の過程において生起する緩衝材の諸特性を予測する必要があるが、緩衝材の透水特性や膨潤特性などの状態変化は、浸潤する地下水組成の影響を受けることが知られている（田中・中村, 2005 など）。これまで、サイトを特定しないジェネリックな環境を念頭に、緩衝材の状態変化に影響を及ぼす地下水として、主に海水系地下水を想定した人工海水や Ca^{2+} 濃度の高いセメント系材料からの浸出水を用いた研究が実施されている（田中・中村, 2005 ; 戸井田ほか, 2005）。しかし、沿岸部の地下水（以下、「沿岸部地下水」という）を分析し、イオン強度や陽イオン濃度組成で整理した結果（図 4-3-1）に着目すると、 K^+ 、 Mg^{2+} などの成分を含むイオン強度の高い地下水が存在することが分かった（産業技術総合研究所ほか, 2019）。この結果を踏まえ、沿岸部を想定した多様な組成や高イオン強度の地下水における緩衝材の状態変化に関わるデータを拡充する必要がある。

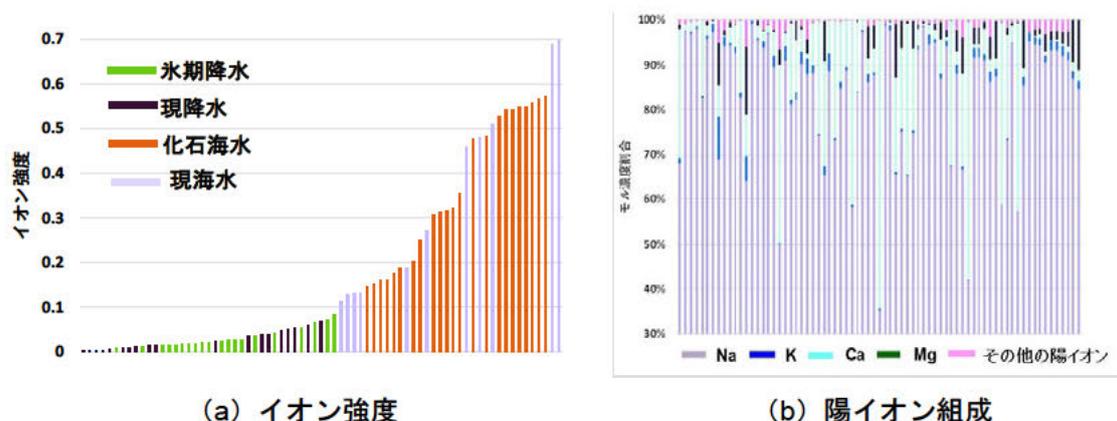
沿岸部地下水のような塩水条件を想定した場合、緩衝材の設計要件のうち、自己シール性の仕様成立範囲が最も狭くなり、塩水条件が最も影響する設計要件として自己シール性に着目した。

自己シール性を評価するためには、緩衝材仕様の指標となる膨潤率についてのデータを整備する必要がある。膨潤率は、ベントナイトの主成分であるモンモリロナイトの層間陽イオンや浸潤する液相のイオン強度の影響を受けて変化することが知られている。層間陽イオン組成は、浸潤する水に含まれる陽イオンと層間陽イオンが交換されることによって変化する。また、液相のイオン強度が高くなるとモンモリロナイト粒子の凝集や、モンモリロナイト層間に作用する浸透圧の損失により膨潤率が低下する（Rao et al., 2013）。以上を踏まえると、浸潤する液相に応じた膨潤率を予測するためには、液相に含まれる陽イオンと緩衝材とのイオン交換反応の把握及び、陽イオン種とイオン強度の膨潤率への影響の把握が有用と考えられる。

以上の背景を踏まえ、本事業では、緩衝材の設計要件（自己シール性）を満たす仕様の検討に活用することを鑑み、沿岸部を想定した現実的な環境における地下水組成での緩衝材のイオン交換反応の予測手法を整備し、陽イオン種やイオン強度の緩衝材の膨潤率への影響に関するデータを拡充する。また、整備したイオン交換反応の予測手法を活用することにより、

緩衝材の自己シール性の設計基準を確認するために用いる膨潤率（最大膨潤率）を予測するための手法を提示することとした。

- ・ イオン交換反応によりベントナイトの層間陽イオン組成が変化することで膨潤挙動が変化するため、多様な地下水組成を対象としたイオン交換反応を把握し、飽和後の層間陽イオン組成を予測できるようにする。
- ・ 緩衝材に浸潤する溶液の陽イオン種やイオン強度等が膨潤率に及ぼす影響に関するデータを取得し、沿岸部地下環境での緩衝材の自己シール性の設計基準を確認するために用いる膨潤率（最大膨潤率）の予測手法を提示する。



(a) イオン強度 (b) 陽イオン組成
 図 4-3-1 沿岸部地下水の (a) イオン強度及び (b) 陽イオン組成の測定結果
 (産業技術総合研究所ほか, 2019)

(2) 実施内容

① 緩衝材のイオン交換反応の予測手法の整備

(a) 研究のアプローチ

現実的な環境での緩衝材のイオン交換反応を予測する手法として、主に地球化学解析がこれまで検討されてきた。圧縮したベントナイト（以下、「圧縮ベントナイト」とする。）を高イオン強度の塩溶液に浸漬させるイオン交換反応試験（以下、浸漬試験とする。）を再現する地球化学解析を実施した（原子力環境整備促進・資金管理センター, 2018）。その結果、固相の層間陽イオンを十分に再現できず、試験結果との乖離が見られた。この要因として、以下の二点が考えられた。

- 1) 解析に設定したイオン交換選択係数が希薄溶液の分散系で取得された値（小田・柴田, 1999）であり、浸漬試験と異なる条件で取得されていること。
- 2) 圧縮ベントナイト中での浸透流や移流・分散などによる物質移行が地球化学解析で考慮されていないこと。

1 点目の要因であるイオン交換選択係数に関しては、これまで、希薄溶液中のバッチ試験で取得された値（例えば、小田・柴田, 1999）を用いることが一般的であった（例えば、Tachi

& Yotsuji, 2014)。しかし、実際の処分環境では、ベントナイトはブロック状に圧縮されているため、分散系とは層間の静電的な特性などが異なる可能性がある。Karland et al. (2011) では、圧縮ベントナイトを用いた通水試験によって、Na に対する Ca のイオン交換選択係数（以下、「Ca-Na のイオン交換選択係数」とする。）を取得し、分散系で得られたイオン交換選択係数（Bradbury and Baeyens, 2003 ; Missana and Garcia-Guitierrez, 2007）と比較している。そこでは、圧縮系の通水試験より得られたイオン交換選択係数は、分散系で取得された値と大きく変わらないと報告されている。しかし、溶液のイオン強度やベントナイトの乾燥密度がイオン交換選択係数に及ぼす影響については十分に調べられていない。そこで、塩水系地下水の浸潤を想定した条件で圧縮ベントナイトへの通水試験を複数のイオン強度、乾燥密度の条件で実施し、イオン交換選択係数のイオン強度や緩衝材乾燥密度との関係を把握しつつ、地球化学解析の入力データとして資するように整理する。また、圧縮系の通水試験とイオン強度等の条件を揃えたバッチ試験を実施し、圧縮系と分散系におけるイオン交換選択係数の差異を確認する。（→検討項目 1 : イオン交換選択係数の取得）

2 点目の要因である解析での物質移行の再現について、上述の圧縮ベントナイトの浸漬試験におけるイオン交換反応を予測する解析（原子力環境整備促進・資金管理センター, 2018）ではベントナイトと溶液を考慮した平衡計算であった。しかし、実際の処分環境では、不飽和の圧縮ベントナイトへの水の浸潤や、移流・分散が想定される。そこで、沿岸部を想定した条件（高イオン強度かつ多様な地下水組成）で飽和・不飽和浸透流、移流・分散、イオン交換反応を連成した地球化学解析を実施し、圧縮ベントナイトにおけるイオン交換反応を予測する解析手法の整備を進めた。（検討項目 2 : イオン交換反応評価のための解析手法の整備）

(b) イオン交換選択係数の取得

(i) 実施内容

圧縮ベントナイトにおける陽イオン (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+}) の Na^{+} に対するイオン交換選択係数を把握するために、圧縮ベントナイトに混合溶液 : KCl と NaCl 、 CaCl_2 と NaCl 、 MgCl_2 と NaCl を通水したイオン交換反応試験を実施した。また、イオン強度及び乾燥密度がイオン交換選択係数に及ぼす影響を把握するために、イオン強度及び乾燥密度を表 4-3-1 に示す複数の条件に設定した。さらに、複雑な溶液組成でのイオン交換反応を把握するために、沿岸部実地下水 (FGB2 孔_167.70~171.78m) を用いた通水試験を実施した。

圧縮系におけるイオン交換選択係数と分散系におけるイオン交換選択係数の差異を確認するために、表 4-3-1 に示すバッチ試験を実施した。浸漬溶液は、混合溶液 CaCl_2 と NaCl 、 MgCl_2 と NaCl 、 KCl と NaCl を用いた。それぞれの溶液でイオン強度、(0.05, 0.125, 0.25, 0.5) の 4 水準で試験を実施した。

圧縮系および分散系におけるイオン交換選択係数は、Gaines&Thomas の関係 (Gaines&Thomas, 1953) で算出した。

表 4-3-1 イオン交換反応試験の一覧表

サンプル名	ρ_m [Mg/m ³]	陽イオン濃度 (M)				イオン強度
		Na	K	Ca	Mg	
圧縮系						
KNa_C1	1.00	0.100	0.400	-	-	0.500
KNa_C2	1.00	0.050	0.200	-	-	0.250
KNa_C3	1.00	0.025	0.100	-	-	0.125
KNa_C4	0.88	0.100	0.400	-	-	0.500
KNa_C5	1.27	0.100	0.400	-	-	0.500
CaNa_C1	1.00	0.100	-	-	0.133	0.500
CaNa_C2	1.00	0.050	-	-	0.067	0.250
MgNa_C1	1.00	0.100	-	0.133	-	0.500
MgNa_C2	1.00	0.050	-	0.067	-	0.250
分散系 (液固比 = 25)						
KNa_D1	-	0.100	0.400	-	-	0.500
KNa_D2	-	0.050	0.200	-	-	0.250
KNa_D3	-	0.025	0.100	-	-	0.125
KNa_D4	-	0.010	0.040	-	-	0.050
CaNa_D1	-	0.100	-	0.133	-	0.500
CaNa_D2	-	0.050	-	0.067	-	0.250
CaNa_D3	-	0.025	-	0.033	-	0.125
CaNa_D4	-	0.010	-	0.013	-	0.050
MgNa_D1	-	0.100	-	-	0.133	0.500
MgNa_D2	-	0.050	-	-	0.067	0.250
MgNa_D3	-	0.025	-	-	0.033	0.125
MgNa_D4	-	0.010	-	-	0.013	0.050

(ii) 試験方法

通水試験には、図 4-3-2 に示す装置を使用した。圧縮ベントナイトには Na 型モンモリロナイトであるクニピア F (クニミネ工業) を用いた。供試体が不飽和な状態から供試体下端から通水し、排水された溶液を経時的に採水した。排水された溶液は簡易イオン濃度計で陽イオン濃度の変化をモニタリングし、測定値が通水溶液の濃度と同程度になり変化がなくなったタイミングでイオン交換反応が平衡に至ったと判断し、通水を終了した。排水溶液中のイオン濃度は、簡易イオン濃度計での測定に加えて、原子吸光光度計及び ICP 発光分光分析装置で (Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺) を分析し、陽イオン濃度を求めた。試験後の供試体は、間隙中の塩溶液を、エタノールを用いて洗浄して取り除いた後、SFSA 改良法 (佐治ほか, 2005) により層間陽イオン量を分析した。なお、通水試験は、それぞれのケースで 2 回実施した。

バッチ試験には、通水試験と同様にクニピア F を用いた。浸漬溶液は、KCl と NaCl、CaCl₂ と NaCl、MgCl₂ と NaCl の混合溶液でイオン強度を (0.05, 0.125, 0.25 及び 0.50) の 4 水準とした。いずれの水準でもイオン強度比で Mⁿ⁺ : Na⁺ = 1 : 4 となる割合で調整した。液固比は、分析精度を確保しつつ試験操作が可能である条件として 25 (浸漬溶液 (g) / 試料 (g)) とした。振とう機とハンドシェイクを併用して攪拌しながら 2 週間浸漬させた後、上澄みと

沈降物を分離した。懸濁液を高速遠心分離機にて分離した後、上澄み液を濾過して得られたろ液を ICP-AES で分析し、陽イオン濃度 (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) を求めた。固相の層間陽イオン量は、浸漬初期の溶液と平衡溶液の陽イオン濃度の増減から固相への収着量を求め、各イオンの当量分率を算出した。

上記の平衡溶液と固相の吸着陽イオン当量分率を基にイオン交換選択係数 K_{GT} を算出した。

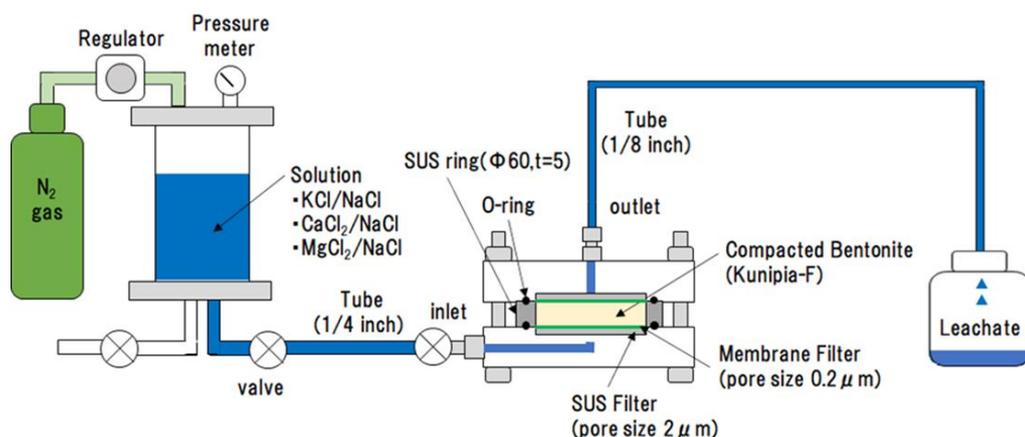
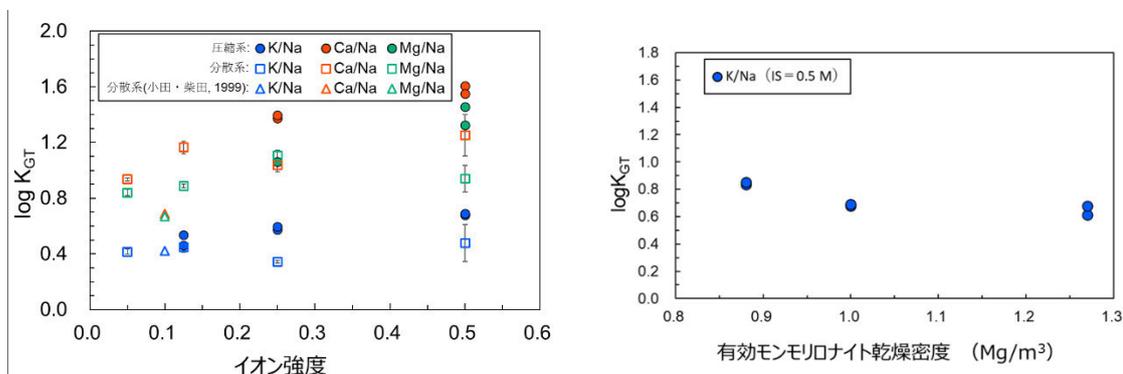


図 4-3-2 通水試験装置の概念図

(iii) 試験結果から算出したイオン交換選択係数

イオン強度とイオン交換選択係数との関係を小田・柴田 (1999) の分散系における K_{GT} も合わせて図 4-3-3 (a) に示す。この結果から、イオン強度が増加するほど K_{GT} がわずかに大きくなる傾向を確認した。また、圧縮系及び分散系の K_{GT} は、イオン強度に依らず、圧縮系のほうが分散系よりも大きい傾向を確認した。

有効モンモリロナイト乾燥密度と K-Na の K_{GT} の関係を図 4-3-3 (b) に示す。有効モンモリロナイト乾燥密度 0.88 Mg/m^3 から 1.00 Mg/m^3 にかけて K_{GT} は減少しているが、 1.00 Mg/m^3 から 1.27 Mg/m^3 までは横ばいの傾向を確認した。



(a) イオン強度と $\log K_{GT}$ の関係

(b) 乾燥密度と $\log K_{GT}$ の関係

図 4-3-3 イオン交換反応試験より得られたイオン交換選択係数 ($\log K_{GT}$)

これらの傾向について、電気二重層理論に基づくポアソン-ボルツマン方程式（以下、P-B方程式とする。）により、Hedstrom & Karanland (2011) と同様の方法で Ca-Na の K_{GT} を導出し、イオン強度及び緩衝材乾燥密度と K_{GT} の関係について検討した。P-B 方程式により求めたイオン強度と K_{GT} の関係は、イオン強度に対して K_{GT} がほぼ横ばいであり、図 4-3-3 (a) に見られるような、イオン強度に対して K_{GT} が増加する傾向は見られなかった。また、P-B 方程式より求めた緩衝材乾燥密度と K_{GT} の関係は、緩衝材乾燥密度に対して K_{GT} が増加する傾向が見られ、図 4-3-3 (b) に見られるような K_{GT} と乾燥密度の関係とは整合しなかった。以上の検討から、電気二重層理論では現状得られている K_{GT} の傾向を十分に再現することは難しく、他の要因を考慮する必要があることが分かった。

上記のような電気二重層理論以外のモデルとして、Tournassat et al. (2011) は、モンモリロナイトの積層構造モデルを提案している。このモデルでは、モンモリロナイト層間のほうが外表面よりも Ca^{2+} イオンの親和性 (affinity) が高いと仮定し、擬似結晶あたりのスタック数、すなわち、モンモリロナイト層間の数が増えるほど Ca-Na のイオン交換選択係数が大きくなることを説明している。ここで、イオン強度の影響について考えると高イオン強度では凝集の影響で積層数が増加 (Verburg and Baveye, 1994) し、低イオン強度ではオスモティックな膨潤により疑似結晶が分離し、積層数が減少すると考えられる (Suzuki et al., 2005; Chen et al., 2021)。したがって、図 4-3-3 (a) に示すイオン強度が増加すると K_{GT} が増加する傾向は、上記の積層構造モデルで説明できると考えられる。また、いずれの陽イオン種についても圧縮系 > 分散系の傾向が見られたが、圧縮系のほうが分散系よりも積層数が大きいことを考慮すれば、この傾向についても積層構造モデルで説明可能と考えられる。

一方で、緩衝材乾燥密度と K_{GT} の関係については、乾燥密度の増加に伴い擬似結晶あたりの積層数は増えると考えられるため、 K_{GT} は増加することになるが、これは、図 4-3-3 (b) に示す乾燥密度と K_{GT} の関係とは逆の傾向になる。現状は乾燥密度と K_{GT} の関係はイオン強度が 0.5 の条件で K-Na のみで取得されているため、他の陽イオン種や低イオン強度の条件でも同様にデータを拡充し、考察を進める必要がある。

以上の積層構造モデルでの検討から、イオン強度と K_{GT} の関係や圧縮系 > 分散系の傾向を積層構造モデルで説明できる可能性が示された。電気二重層理論に基づく P-B 方程式では、モンモリロナイト結晶のみを考慮しており、このような疑似結晶の積層構造はモデル化されていないため、 K_{GT} を算出する際に積層構造をモデル化することにより再現性が向上する可能性が考えられる。

(c) イオン交換反応評価のための解析方法の整備

(i) 実施内容

「②イオン交換選択係数の取得」で実施した通水試験とクニゲル V1 ケイ砂混合土に人工海水を通水した透水-膨潤圧試験 (産業技術総合研究所ほか, 2022) の再現解析を実施し、圧縮ベントナイトにおけるイオン交換反応を予測する解析手法を検討した。再現解析には、一

次元の飽和・不飽和浸透流、移流・分散、イオン交換反応を連成可能な解析コードとして HP1 (Jacques et al., 2018) を含んだ HYDRUS (Šimůnek et al., 2024) を用いた。上記の透水 - 膨潤圧試験の再現解析では、小田・柴田 (1999) による分散系の K_{GT} と「②イオン交換選択係数の取得」で取得した K_{GT} を設定した解析をそれぞれ実施し、設定する K_{GT} の違いによる試験結果の再現性への影響を確認した。ここでは、上記の透水膨潤圧試験の再現解析を中心に説明する。

(ii) 解析条件

透水 - 膨潤圧試験の供試体は円柱形かつ透水方向が中心軸方向上向きであり、円周側面が非排水構造であることから、モデルは鉛直一次元とした。また、解析領域は供試体長と等しい 20 mm とし、これを 60 等分割したメッシュを用いた。

上端及び下端の境界条件は、透水 - 膨潤圧試験 (産業技術総合研究所ほか, 2022) の試験手順及び載荷空気圧をもとに設定した。供試体上端は、浸出面境界とし、下端は時間変化する境界圧とした。

飽和・不飽和浸透流の解析用パラメータ (飽和透水係数、水分特性曲線、(不飽和) 比透水係数) の飽和透水係数は透水 - 膨潤圧試験で取得した値を設定した (産業技術総合研究所ほか, 2022)。水分特性曲線は、van Genuchten モデルで表すこととし、そのパラメータは、産業技術総合研究所ほか (2022) が報告しているクニゲル V1 ケイ砂混合土についての値とした。比透水係数については、水分特性と同じパラメータを用いた Mualem-van Genuchten モデル (Mualem, 1976) により表すこととした。また、移流分散解析用のパラメータ (分散長、分子拡散係数、屈曲度係数) の詳細については令和 5 年度報告書 Appendix-V に示す。

イオン交換選択係数は、小田・柴田 (1999) による分散系の K_{GT} と「②イオン交換選択係数の取得」で取得した K_{GT} を設定した。交換体の初期組成には、試験前のクニゲル V1 について、産業技術総合研究所ほか (2022) が示す浸出陽イオン量の値に、クニゲル V1-ケイ砂混合土のクニゲル V1 の重量割合 0.7 を乗じた値を用いた。間隙水の初期組成は、初期含水比においてイオン交換体と溶液との平衡計算を行ったときに交換体の初期組成を与えるようなものとした。上記の平衡計算の詳細については、令和 5 年度報告書 Appendix-V に示す。

(iii) 解析結果

通水終了時点 (71.8 日後) における供試体の吸着陽イオンの当量分率を、分析結果と解析結果を比較する形で図 4-3-4 に示す。また、イオン交換反応平衡後についても同様に、分析値及び解析結果 (5000 日後) を比較する形で図 4-3-5 に示す。なお解析結果は、分散系の K_{GT} (小田・柴田, 1999) を設定して得られた結果と通水試験で取得した圧縮系の K_{GT} を設定して得られた結果を合わせて示す。図中の、「初期」はクニゲル V1 の通水試験前の分析値であり、解析の初期条件に等しい。試験結果は、試験終了後の供試体の流出側、中央部及び流入

側の3箇所の分析値である。解析結果は、領域（カラム全体）を流入側、中央部及び流出側の3つに等分割し、各領域について算出した平均値である。

通水終了時点においては、圧縮系の K_{GT} を設定した解析結果は、概ね試験結果を再現しており、分散系の K_{GT} よりも圧縮系の K_{GT} を設定したほうが、より再現性が高いことが分かる。また、Mgイオンに見られる、流入側から流出側に向かって吸着量が減少する傾向についても再現されており、固相内における吸着陽イオンの分布も再現できていると考えられる。

平衡時点においても、分散系の K_{GT} よりも圧縮系の K_{GT} を設定したほうが、より再現性が高いことが分かる。また、圧縮系の K_{GT} を設定した解析結果は、各吸着陽イオン組成の大小関係など概ね試験結果と整合しているが、試験結果との乖離がある。これについては、クニゲルV1ケイ砂混合土に含まれる随伴鉱物などの影響が考えられる。

以上のように、人工海水のような複雑な組成の溶液を通視した場合でも概ね試験結果と整合する結果が得られたことから、本解析手法を圧縮ベントナイトのイオン交換反応の予測手法に適用できる見通しが得られた。また、圧縮系のベントナイトにおけるイオン交換反応を予測する際には、既往の分散系の K_{GT} よりも、圧縮系で取得された K_{GT} を入力値として設定する方が望ましいと考えられる。ただし、小田・柴田（1999）の K_{GT} と通水試験で取得した圧縮系の K_{GT} では、溶液のイオン強度が異なっている。図4-3-3に示したように K_{GT} はわずかにイオン強度に依存して増加する傾向があるため、イオン強度の影響についても考慮する必要がある。透水—膨潤圧試験は、クニゲルV1ケイ砂混合土を対象としており、モンモリロナイト以外の随伴鉱物を多く含むと考えられるが、それらの沈殿・溶解については本解析手法では十分に考慮されていない。今後、これらの随伴鉱物などの影響をモデル化し、多様なベントナイト混合土に適用できるコードへと改良することで再現性がより向上すると考えられる。

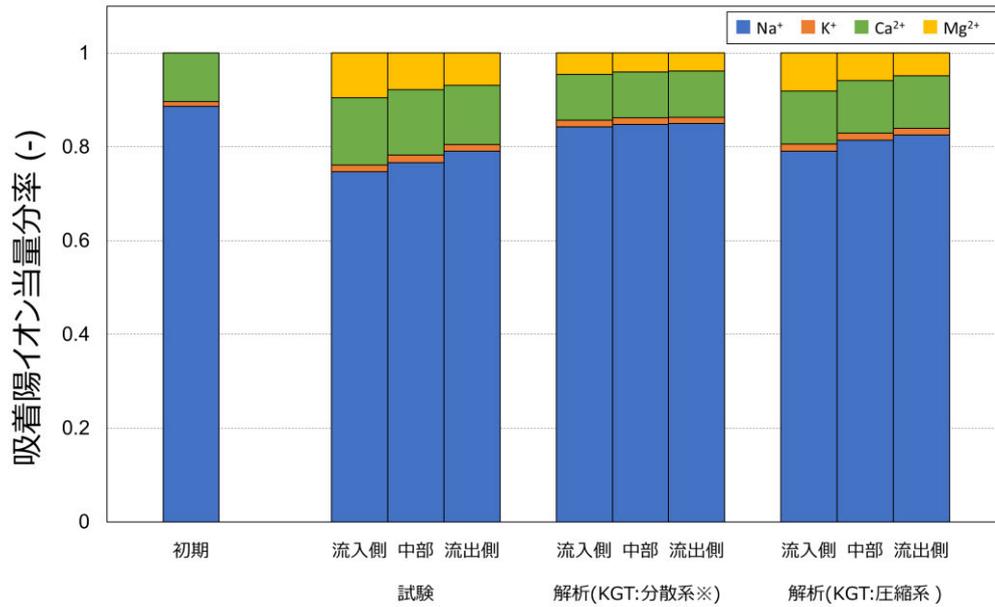


図 4-3-4 透水-膨潤圧試験終了後の吸着陽イオン当量分率と
 通水終了時点 (71.8 日後) での解析結果との比較 (※小田・柴田, 1999)

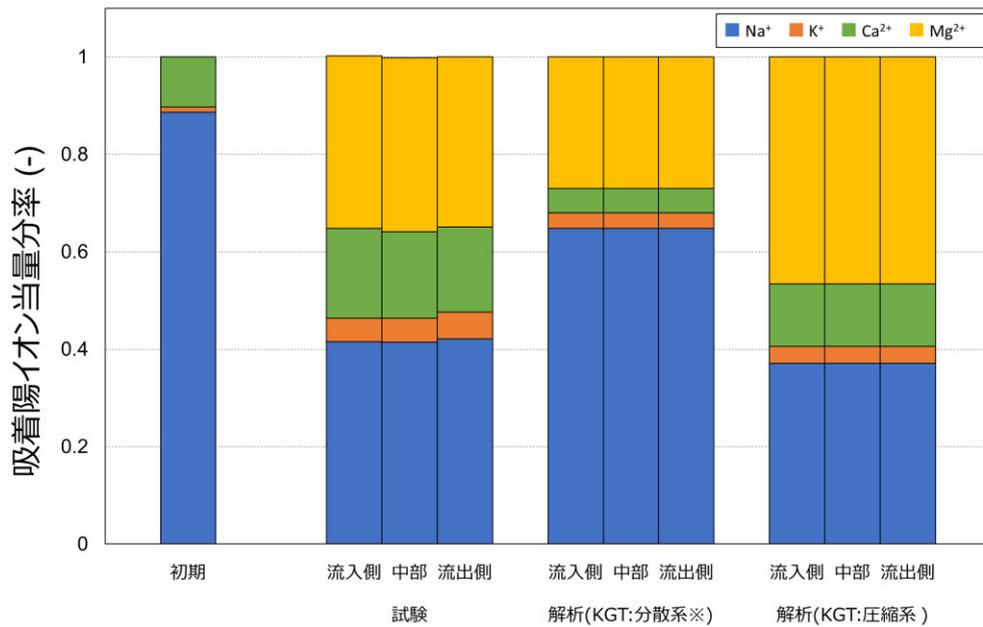


図 4-3-5 海水平衡ベントナイトについての試験終了後の層間陽イオン当量分率と
 平衡時 (5,000 日後) の解析結果との比較 (※小田・柴田, 1999)

② 緩衝材の膨潤率に対する溶存陽イオンの影響把握試験

(a) 研究のアプローチ

緩衝材の設計要件である自己シール性の設計基準を確認する指標として、緩衝材の膨潤率 ε_v が、施工時にできる緩衝材と孔壁およびオーバーパックとの間にできる隙間と緩衝材の初期体積との比である隙間体積比 θ の 2 倍以上 ($\varepsilon_v \geq 2\theta$) であることが基準として設定されている (NUMO-SC)。膨潤率 ε_v (%) は、試験溶液の給水直前から供試体の一次元方向の膨潤量 ΔS を経時的に測定し、この膨潤量 ΔS (mm) を供試体の初期高さ H_0 (mm) で除し、100 倍したものとした。また、膨潤率の最大値を最大膨潤率 ε_{vmax} (%) と定義した (小峯・緒方, 1997)。

$$\varepsilon_v(\%) = \frac{\Delta S}{H_0} \times 100 \quad (\text{式 4.3-1})$$

本検討では、沿岸部の多様な地下水の組成に対応した膨潤率を把握するにあたり、地下水に溶存する主要な陽イオンである Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} の膨潤率への影響を確認するため、 NaCl 溶液、 KCl 溶液、 CaCl_2 溶液、 MgCl_2 溶液を用いた膨潤量試験を実施した。また、通水溶液のイオン強度及び初期乾燥密度をパラメータとし、これらの膨潤率への影響に係るデータを体系的に取得し、整理することとした。なお、詳細な検討フローや試験条件の設定については、令和 5 年度報告書 Appendix-V を参照されたい。

得られたデータに基づき、陽イオン種ごとにイオン強度及び初期乾燥密度と最大膨潤率の関係を整理し、緩衝材の陽イオン組成に基づき膨潤挙動を計算できる評価式 (Komine&Ogata, 2003 ; 2004) などを援用することで、多様な組成の溶液が浸潤した際の緩衝材の膨潤率を予測する手法を検討する。

(b) 緩衝材の最大膨潤率に対する多様な地下水組成の影響の評価に資するデータの整備

膨潤量試験には、図 4-3-6 に示す試験装置を使用した。試験溶液の給水は、試験セルの底部からビュレットの水頭で給水した。また、膨潤量は、ピストンの上部に設置した変位計を用いて測定した。供試体断面にかかる上載圧は、試験セルのピストンの重量による鉛直圧とピストンと試験セルとの摩擦応力の合計値であり、概ね 8.8 kPa 程度である。供試体の寸法は、既往の研究や過去の実績 (日本原子力研究開発機構・原子力環境整備促進・資金管理センター, 2019) から、直径 60 mm、高さ 5 mm と設定した。供試体には、ベントナイト (クニゲル V1) と SiO_2 割合が高いケイ砂 3 号とケイ砂 5 号をベントナイトを 7 として、それぞれ 1.5 の割合で混合したケイ砂 30wt% 混合ベントナイトを使用した。供試体の初期乾燥密度は、NUMO-SC に示される緩衝材仕様の乾燥密度 1.6 Mg/m^3 を設定した。また、陽イオン種ごとに初期乾燥密度の膨潤率への影響を検討するため、初期乾燥密度 1.2 Mg/m^3 および 2.0

Mg/m³を条件に加えて膨潤量試験を実施した。なお、全ての試験ケースの試験条件については、令和5年度報告書 Appendix-V を参照されたい。

液相の陽イオン種ごとのイオン強度及び初期有効粘土密度と最大膨潤率の関係を図 4-3-7 と図 4-3-8 にそれぞれ示す。図 4-3-7 から各陽イオン種ともに最大膨潤率は、既往の研究成果や佐藤（2001）の報告と同様にイオン強度の平方根に反比例する傾向を示す。また、陽イオン種ごとの最大膨潤率について、イオン強度が 0.2 以下の範囲で Na⁺イオン > Ca²⁺イオン ≒ Mg²⁺イオン > K⁺イオンの関係が概ね確認できた。層間陽イオンが主に二価の陽イオンで構成される場合、一価の陽イオンで構成される場合よりも層間に作用する反発力が小さくなり、オスモティックな膨潤が減少することが知られている（Ohazuruike&Lee, 2023）。ただし、K⁺は一価の陽イオンであるが、モンモリロナイト結晶の六員環に入り込む特異吸着により、層間に作用する引力が卓越し膨潤性が損なわれる（Kaufhold&Dohrmann, 2010）。本検討で得られた傾向は、これらの知見と整合していることから、低イオン強度の範囲では、イオン強度などを指標とした総塩分量のみで最大膨潤率を評価することは難しく、多様な地下水組成に対する最大膨潤率を評価するには、通水溶液に含まれる陽イオン種による影響を考慮する必要があると考えられる。また、図 4-3-8 からイオン強度 0.5 の条件では、初期有効粘土密度の増加に伴い、最大膨潤率が増加し、各陽イオン種ともに同等の値を示す。一方、イオン強度 0.2 の条件では、初期有効粘土密度の増加に伴い、最大膨潤率も増加するが、陽イオン種ごとに最大膨潤率の増加の割合が異なる傾向を示した。上記の結果から、イオン強度などを指標とした総塩分量のみで最大膨潤率を評価することは難しく、多様な地下水組成に対する最大膨潤率を評価するには、ベントナイトに吸着している陽イオン種、などを考慮して評価する必要があると考えられる。

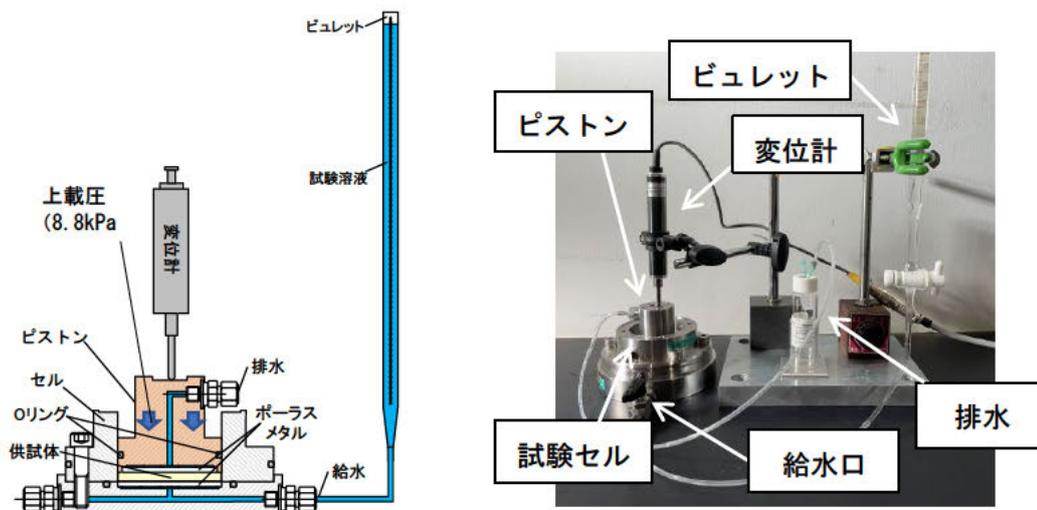


図 4-3-6 膨潤量試験装置の概略

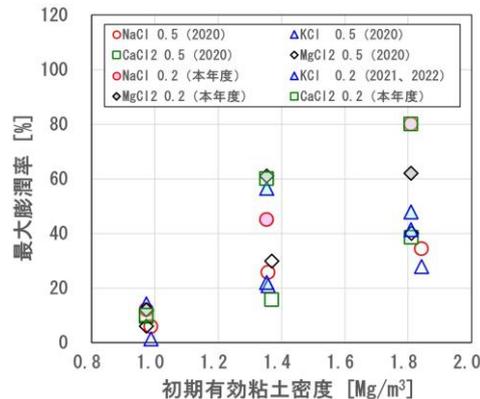
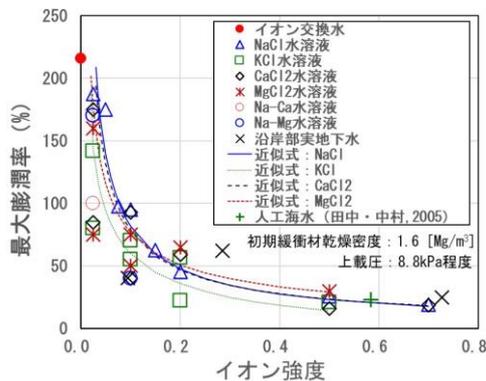


図 4-3-7 イオン強度と最大膨潤率の関係 図 4-3-8 初期有効粘土密度と最大膨潤率の関係

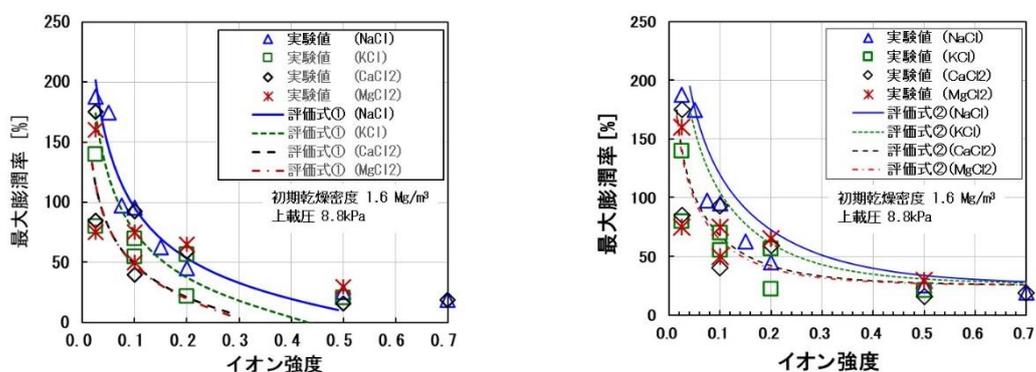
(c) 多様な地下水組成に応じた緩衝材の最大膨潤率の評価方法

圧縮ベントナイトの膨潤挙動を電気二重層理論に基づき定式化した膨潤特性理論評価式が Komine&Ogata (2003 ; 2004) により提案されている (以後、「評価式①」という)。また、Komine&Ogata, (2003 ; 2004) の膨潤特性理論評価式を塩分濃度の高い条件に適用できるように改変した膨潤特性理論評価式が田中・中村 (2005) により提案されている (以後、「評価式②」という)。これらの評価式では、ベントナイトの層間陽イオン組成や陽イオン交換容量などを入力値としているため、溶液組成に応じた膨潤率を評価できると考えられる。そこで、本検討で得られた、イオン強度及び初期有効粘土密度と最大膨潤率の関係 (図 4-3-7 及び図 4-3-8 参照) を対象に、評価式①及び②を用いた再現計算を実施した。評価式①及び②に設定した入力パラメータに関しては、令和 5 年度報告書 Appendix-V を参照されたい。

図 4-3-9 に評価式①及び②により算出したイオン強度ごとの最大膨潤率を膨潤量試験より得られた最大膨潤率と合わせて示す。図 4-3-9 (a) に示す評価式①の場合、イオン強度 0.2 以下で、実験値と計算結果は概ね整合するが、イオン強度 0.2 以上では実験値と計算結果が大きく乖離する傾向を示す。一方、図 4-3-9 (b) に示す評価式②の場合、イオン強度 0.5 以上で、実験値と計算結果は概ね整合する。イオン強度 0.2 以下では、CaCl₂ 及び MgCl₂ 溶液を通過した試験結果に対して概ね整合するが、NaCl、KCl 溶液を通過した試験結果に関しては、乖離する傾向を示す。

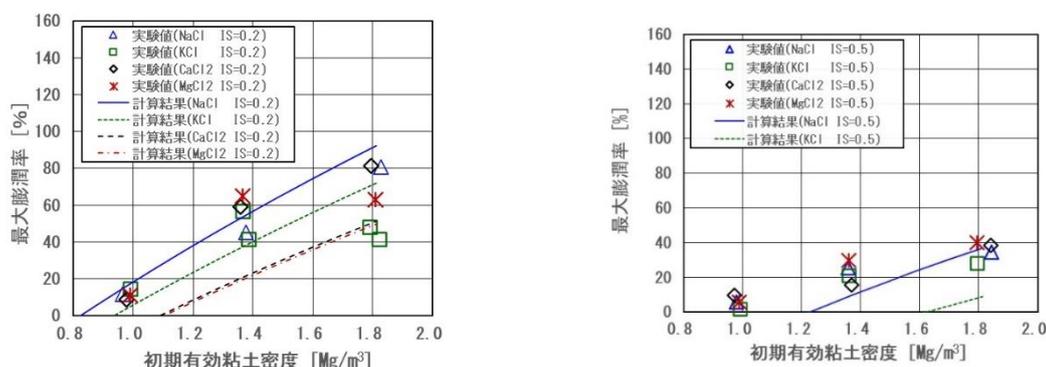
図 4-3-10 および図 4-3-11 に、イオン強度 0.2 と 0.5 の条件における初期有効粘土密度と最大膨潤率の関係について、評価式①及び②より得られた再現計算結果を試験結果と合わせてそれぞれ示す。図 4-3-10 (a) に示す評価式①の場合、イオン強度 0.2 においては、NaCl、KCl 溶液を通過した試験結果と計算結果は概ね整合するが、CaCl₂ 及び MgCl₂ 溶液を通過したケースに関しては、実験値の 2/3 倍から 1/2 倍程度の値を示す。また、図 4-3-10 (b) に示すイオン強度 0.5 の場合は、初期有効粘土密度 1.8 Mg/m³ のとき、NaCl 溶液を通過したケースで実験値と計算結果は概ね整合するが、有効粘土密度 1.37 Mg/m³ 以下では、KCl、CaCl₂

及び $MgCl_2$ 溶液を通水したケースで実験値と計算結果が大きく乖離する。図 4-3-11 に示す評価式②の場合、イオン強度 0.2 においては、 KCl 、 $CaCl_2$ 及び $MgCl_2$ 溶液を通水したケースで実験値と計算結果は概ね整合するが、 $NaCl$ 溶液を通水したケースに関しては、計算結果は、実験値の 1.5 から 2 倍程度である。また、イオン強度 0.5 においては、初期有効粘土密度 $1.0 Mg/m^3$ と $1.37 Mg/m^3$ の条件で実験値と計算結果は、概ね整合するが、初期有効粘土密度 $1.8 Mg/m^3$ に関しては、各陽イオン種ともに実験値と大きく乖離する傾向を示す。以上の結果から、イオン強度の条件に応じて評価式①及び②を併用することで、幅広いイオン強度における緩衝材の膨潤率を概ね予測評価できる見通しが得られた。



(a) 実験値と評価式①を用いた計算結果 (b) 実験値と評価式②を用いた計算結果

図 4-3-9 各陽イオン種におけるイオン強度と最大膨潤率



(a) イオン強度 0.2 (b) イオン強度 0.5

図 4-3-10 初期有効粘土密度と最大膨潤率 (評価式①)

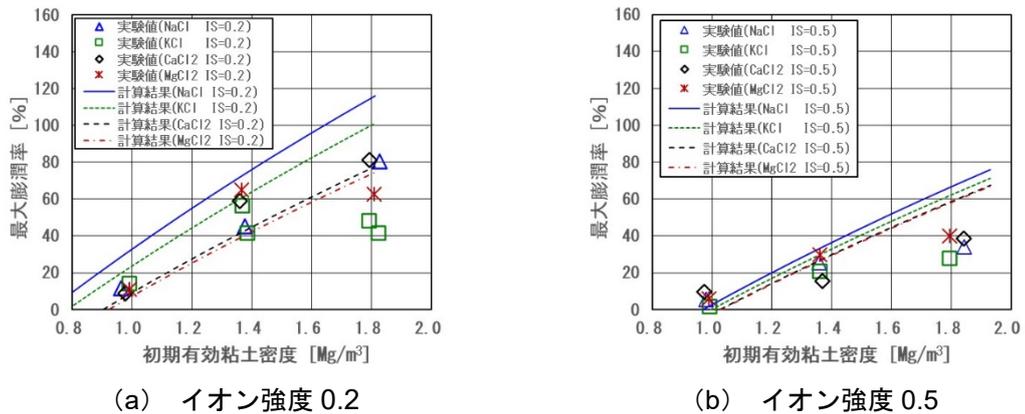


図 4-3-11 初期有効粘土密度と最大膨潤率（評価式②）

(d) イオン交換反応の予測手法を活用した緩衝材の膨潤率の評価手法への適用性の確認
 緩衝材の膨潤率の評価手法の複雑な化学組成の溶液への適用性を確認するため、(3) ③に記載した沿岸部実地下水（FGB-2 孔_167.70 m～171.78 m、イオン強度 0.285）を用いたイオン交換試験の再現解析で得られた吸着陽イオン量（HP1 解析値）と、膨潤量試験後に SFSA 改良法により取得した固相の吸着陽イオン量（固相分析値）を入力値として、おののに対して評価式①及び②を用いて最大膨潤率を求めた。

図 4-3-12 に HP1 解析値と固相分析値を入力値として評価式①及び②により求めた最大膨潤率と沿岸部実地下水を通水した膨潤量試験により得られた最大膨潤率の結果を示す。

図から吸着陽イオン量に HP1 解析値を入力値した場合の計算結果は、評価式①及び②ともに吸着陽イオン量に固相分析値を入力値した場合のそれと同等の値を示した。

また、評価式①及び②の計算結果は、実験で得られた最大膨潤率と比較して小さいことがわかった。

評価式①の計算では、水の浸透に伴う膨潤が起こらない結果となった。この原因は、 Ca^{2+} や Mg^{2+} が地下水に含まれることによって、図 4-3-9(a)で示したのと同様に、実験値と比較して膨潤量が小さく計算されることによるものと考えられた。また、評価式②の計算結果は実験値の 2/3 倍程度となった。

以上の結果から、課題として、陽イオン量やイオン強度の影響等を考慮する必要はあるものの、評価式①及び②を用いて、圧縮ベントナイトにおけるイオン交換反応の予測解析で得られた吸着陽イオン量を入力値として活用することで、沿岸部における様々な組成の地下水での緩衝材の膨潤量を予測できる見通しが得られた。

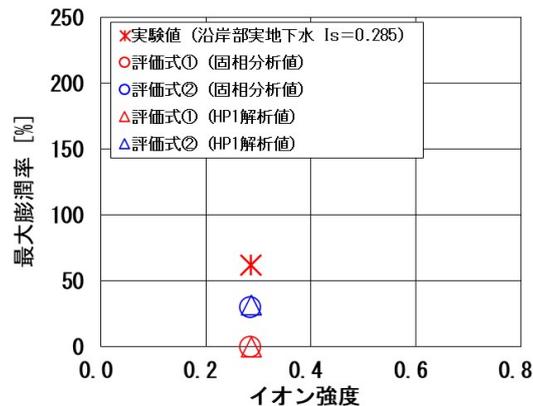


図 4-3-12 沿岸部実地下水を用いた膨潤量試験の最大膨潤率と固相分析値及びイオン交換反応の予測解析結果のそれぞれを入力値とした膨潤特性理論評価式による最大膨潤率

(3) 5か年の成果と今後の課題

本検討では、緩衝材の設計要件（自己シール性）を満たす仕様の検討に活用することを鑑み、沿岸部の地下環境を想定した多様な組成の溶液とベントナイトの間で起きるイオン交換反応の予測解析手法を整備した（①「イオン交換選択性に関する検討」）。また、イオン交換反応の予測解析手法と膨潤特性理論評価式（Komine&Ogata, 2003, Komine&Ogata, 2004；田中・中村, 2005）を併用することで、任意の地下水における緩衝材の膨潤率を予測できる見通しが得られた（②「緩衝材の膨潤率に対する溶存陽イオンの影響把握試験」）。この緩衝材の予測手法は自己シール性を満足する緩衝材の仕様検討に応用できると考えられる。以下に各検討で得られた成果を示す。

① イオン交換選択性に関する検討

緩衝材の自己シール性に係る膨潤率は、ベントナイトの陽イオン組成に依存するため、ベントナイトの層間と間隙水との間で起きる陽イオン交換挙動を把握することが重要である。本検討では、圧縮ベントナイトにおけるイオン交換反応を予測する解析手法を整備し、解析の入力値として圧縮系のベントナイトにおけるイオン交換選択係数を取得した。

イオン交換選択係数の取得に関しては、これまで十分に調べられていない圧縮系のベントナイトにおける陽イオン交換選択係数とそれらのイオン強度及び乾燥密度との関係を把握するために、地下水の主要な陽イオン（ K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} ）を含む塩溶液を用いた通水試験を実施した。圧縮系の Na 型ベントナイトに塩溶液を通水するイオン交換反応試験を複数のイオン強度と乾燥密度の条件で実施し、（ K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} ）の Na に対するイオン交換選択係数を Gaines&Thomas の関係で算出した。圧縮系における各陽イオン種の Na に対する K_{GT} は、イオン強度が増加するほど、 K_{GT} がわずかに増加する傾向が見られた。一方で乾燥密度に対しては、K の Na に対する K_{GT} は、乾燥密度が 0.88 から 1.0 Mg/m^3 でわずかに減少し、 1.0 Mg/m^3 以上では変化しない傾向が見られた。また、同じイオン強度での圧縮系と分散系

の K_{GT} の比較では、圧縮系のほうが分散系よりも大きい傾向を示した。以上のように、地下水に含まれる主要な陽イオンに対して、イオン強度や乾燥密度に対する K_{GT} の依存性を把握しつつ、高イオン強度条件での K_{GT} を取得し、イオン交換反応の予測解析に資するデータとして整理した。

K_{GT} とイオン強度及び乾燥密度との関係について、電気二重層理論に基づく P-B 方程式により検討を試みたが、イオン強度や乾燥密度に対する K_{GT} の傾向を P-B 方程式により再現することは難しかった。一方で、Tournassat et al. (2011) のモンモリロナイトの層間と外表面で陽イオン吸着性の違いを仮定した積層構造モデルを考えると、イオン強度に対する依存性と圧縮系 > 分散系の傾向を定性的に解釈できる可能性が得られた。このようなモンモリロナイトの積層構造は、P-B 方程式においては定式化されていないため、積層構造を考慮することで再現性が向上すると考えられる。

圧縮ベントナイトにおけるイオン交換反応の予測解析手法に関しては、これまでのベントナイトにおけるイオン交換反応を再現する地球化学計算（原子力環境整備促進・資金管理センター, 2018）では考慮されていなかったベントナイト中の不飽和浸透流、移流分散をモデル化した解析手法を構築した。上記の通水試験で取得した圧縮系のイオン交換選択係数を入力値として設定し、通水試験の再現解析を実施した。その結果、人工海水、沿岸部実地下水などの複雑な組成の溶液を用いた通水試験の再現解析において、固相の吸着陽イオン組成を概ね再現することができた。このことから、本解析手法を圧縮ベントナイトにおけるイオン交換反応の予測手法として適用できる見通しが得られた。また、圧縮系の K_{GT} を設定した解析と分散系の K_{GT} （小田・柴田, 1999）を設定した解析をそれぞれ実施し、それらの結果を比較したところ、圧縮系の K_{GT} を設定したほうが分散系の K_{GT} を設定した解析結果よりも再現性が良いことが分かった。このことから、圧縮ベントナイトにおけるイオン交換反応の予測には圧縮系の K_{GT} を設定する方が好ましいと考えられる。ただし、 K_{GT} はイオン強度や乾燥密度に対して変化する可能性があるため、 K_{GT} の設定時にはこの傾向も考慮する必要があると考えられる。

② 緩衝材の膨潤率に対する溶存陽イオンの影響把握試験

平成 31 年度から令和 5 年度までの 5 年間の検討により、緩衝材の設計要件のひとつである自己シール性の評価基準の確認に資する沿岸部を想定した現実的な環境における地下水組成における膨潤率のデータを整備するため、陽イオン種やイオン強度等の影響に関する知見を試験により拡充した。また、既往の研究に基づき、ベントナイトに含まれる主要陽イオン種 (Na, K, Ca, Mg) の価数や交換性陽イオン量などを考慮できる膨潤挙動（膨潤率や膨潤圧）の評価式を用いて陽イオン種やイオン強度等の影響を考慮した評価への適用性を確認した。さらに、沿岸部地下水についてイオン交換反応の解析による予測手法により求めた層間陽イオン組成を評価式への入力値とすることで、緩衝材の自己シール性の設計基準を確認するために用いる膨潤率（最大膨潤率）を予測できる見通しを得ることができた。

今後は、より精度よく緩衝材の自己シール性の設計基準の確認するために、膨潤率（最大膨潤率）の測定手法の標準化やばらつきの影響などを考慮した膨潤率（最大膨潤率）のデータを取得する必要がある。また、塩化物イオンの影響により緩衝材表面が削剥、ベントナイト粒子が凝集し、沈降・堆積することにより緩衝材と孔壁との隙間が不均質な密度分布になる可能性があるため、多様な地下水環境におけるより現実的な緩衝材の自己シール性に係わる挙動の把握や隙間充填に伴う緩衝材の密度分布の変遷を予測するための手法を構築しする必要がある。これにより、自己シール後（隙間充填後）の緩衝材の密度勾配を安全評価上の初期条件に反映することもできる。さらに、陽イオン種のみならず、Cl⁻や SO₄²⁻などの陰イオン種やセメンテーションの影響なども考慮できるようにすることが必要である。

参考文献

- Bradbury, M. H., Baeyens, B., Porewater Chemistry in Compacted Re-Saturated MX-80 Bentonite: Physico-Chemical Characterisation and Geochemical Modelling., Paul Scherrer Institut, 2003.
- Chen, Y., Cai, Y., Pan, K., Ye, W. and Wang, Q., Influence of dry density and water salinity on the swelling pressure and hydraulic conductivity of compacted GMZ01 bentonite-sand mixtures, *Acta Geotechnica*, vol.17, 2021, pp.1879-1896.
- 原子力発電環境整備機構, 包括的技術報告わが国における安全な地層処分の実現—適切なサイト選定に向けたセーフティケースの構築—, NUMO-TR-20-03, 2021.
- 原子力環境整備促進・資金管理センター, 平成 29 年度 地層処分技術調査等事業 処分システム工学確証技術開発報告書 (第 2 分冊) —人工バリア品質/健全性評価手法の構築— 緩衝材, 2018.
- Hedström, M., Karnland, O., Ca/Na selectivity coefficients from the Poisson-Boltzmann theory, *Physics Chemistry of the Earth*, vol.36, 2011, pp.1559-1563.
- Jacques, D., Šimůnek, J., Mallants D., van Genuchten, M.T., The HPx software for multicomponent reactive transport during variably-saturated flow: Recent developments and applications. *J. Hydrol. Hydromech.*, vol.66, 2018, pp.211-226.
- Karnland, O., Birgersson M., and Hedström M., Selectivity coefficient for Ca/Na ion exchange in highly compacted bentonite, *Physics Chemistry of the Earth*, vol.36, 2011, pp.1554-1558.
- Kaufhold, S., Dohrmann, R., Stability of bentonites in salt solutions: II. Potassium chloride solution — Initial step of illitization?, *Applied Clay Science*, vol.49, 2010, pp.98-107.
- 小峯秀雄, 緒方信英, 放射性廃棄物処分のための砂・ベントナイト混合材料の膨潤特性とその評価法, 電力中央研究所 U96029, 1997.
- Komine, H., Ogata, N., New equations for swelling characteristics of bentonite-based buffer materials, *Canadian Geotechnical Journal*, vol.40, No. 2, 2003, pp.460-475.
- Komine, H., Ogata, N., Predicting Swelling Characteristics of Bentonites, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol.130, No.8, 2004, pp.818-829.
- Missana, T., Garcia-Gutierrez, M., Adsorption of bivalent ions (Ca(II), Sr(II) and Co(II) onto FEBEX bentonite, *Physics Chemistry of the Earth*, vol 32, 2007, pp.559-567.
- Mualem, Y., A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, *Water Resour. Res.*, vol.2, 1976, pp. 513-522.
- 日本原子力研究開発機構, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 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 (ニアフィールドシステム評価確証技術開発) 平成 30 年度 報告書, 2019.

- 小田治恵, 柴田雅博, ベントナイト-水相互作用の実験とモデル化, JNC TN8400-99-032, 1999.
- Ohazuruike, L., Lee, K., J., A comprehensive review on clay swelling and illitization of smectite in natural subsurface formations and engineered barrier systems, *Nuclear Engineering and Technology*, vol.55, 2023, pp.1495-1506.
- Rao, S., M., Thyagaraj, T. and Rao, P., R., Crystalline and Osmotic Swelling of an Expansive Clay Inundated with Sodium Chloride Solutions, *Geotechnical and Geological Engineering*, vol.31, 2013, pp.1399-1404.
- 佐治慎一, 伊藤雅和, 柴田雅博, 神徳 敬, 磯貝武司, 河川水と接触したベントナイト鉱床の化学特性変化— 試料採取と分析結果 — (研究報告), JNC TN8400 2005-017, 2005.
- 産業技術総合研究所, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 電力中央研究所: 令和3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 沿岸部処分システム評価 確証技術開発 報告書, 2022.
- 産業技術総合研究所, 日本原子力研究開発機構, 原子力環境整備促進・資金管理センター, 電力中央研究所, 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 (沿岸部処分システム 高度化開発) 平成 27 年度~平成 30 年度取りまとめ報告書, 2019.
- 佐藤努, 粘土基礎講座 I — 粘土の特性と利用 —, 粘土科学, No.41, Vol.1, pp.26-33, 2001.
- Šimůnek, J., Brunetti, G., Jacques, D., van Genuchten M.T., Šejna M., Developments and applications of the HYDRUS computer software packages since 2016, *Vadose Zone Journal*, vol.23(4), 2024, pp.1-29.
- Suzuki, S., Prayongphan, S., Ichikawa, Y. and Chae, B., In situ observations of the swelling of bentonite aggregates in NaCl solution, *Applied Clay Science*, vol.29, 2005, pp.89-98.
- Tachi, Y., Yotsuji, K., Diffusion and sorption of Cs⁺, Na⁺, I⁻ and HTO in compacted sodium montmorillonite as a function of porewater salinity: Integrated sorption and diffusion model, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol.132, 2014, pp.75-93.
- 田中幸久, 中村邦彦, 海水の濃度と高温履歴がベントナイトの膨潤特性に及ぼす影響, 土木学会論文集, No.806/III-73, 2005, pp.93-111.
- 戸井田克, 笹倉 剛, 横関康祐, 小林一三, 渡邊賢三, 芦澤良一, 人工バリア材料の力学的物性取得試験, JNC TJ8400 2004-036, 2005.
- Tournassat, C., Bizi, M., Braibant, G. and Crouzet, C., Influence of montmorillonite tactoid size on Na-Ca cation exchange reactions, *Journal of Colloid and Interface Science*, vol.364, 2011., pp.443-454.
- Verburg, K., Baveye, P., Hysteresis in the binary exchange of cations on 2:1 clay minerals: a critical review, *Clays and Clay Minerals*, vol.42, 1994, pp.207-220.

4-4 緩衝材-オーバーパックスの相互作用と緩衝材仕様に関わるデータの拡充

(1) はじめに

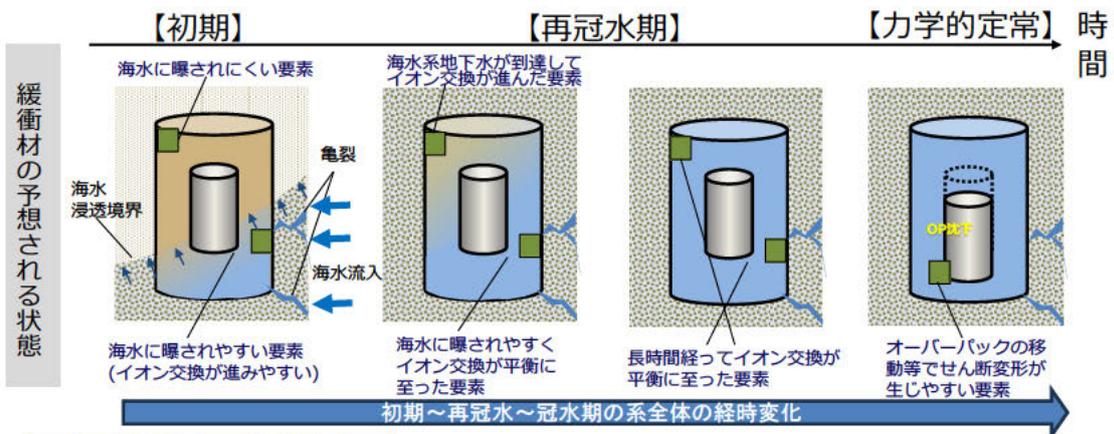
沿岸部は特有の地質・地下水環境であり、地層処分場として想定した場合、少なからず地下水の海水成分を考慮する必要がある。地層処分場で使用が想定される人工バリアのうち、緩衝材について、地下水の動きを抑制する止水性、各バリア材との隙間を閉塞させる自己シール性の観点から、透水係数が低く膨潤率の大きい Na 型ベントナイト（あるいは砂・Na 型ベントナイト混合土）に関する多くの研究がなされている。一方で、代替えオプションとなり得る海水との平衡を考慮したイオン型の異なるベントナイト（例えば、層間陽イオン組成が主に 2 価の Ca 型/Ca 型化ベントナイトなど）に着目することも、処分場の頑健性を高める上で重要と考えられる。

その際、人工バリア性能評価上の不確実性としては、膨潤性が異なると予想される緩衝材中のオーバーパックスの変位（移動）挙動（緩衝材とオーバーパックスの力学的相互作用）、オーバーパックスの変位や腐食膨張などに伴い緩衝材中に生じるせん断帯の自己修復性、化学反応における二次生成物種の生成と沈殿による効果、などが考えられるが、特にイオン型の異なるベントナイトではあまり検討が進んでいない。

オーバーパックスの変位挙動は周辺材料（緩衝材や岩盤）との複合挙動であり、周辺材料の力学特性に強く依存する。このため、再冠水期におけるオーバーパックスの変位とそれともなう緩衝材の変形に関する力学的相互作用を模型試験レベルで把握する必要があるが、イオン型の異なるベントナイトを使用したり沿岸部の地下水環境を考慮した試験は見当たらず、知見がない。また緩衝材に生じたせん断帯の核種移行特性について、化学的雰囲気次第では二次生成物のクロッキングにより核種移行経路を変化させる可能性があり、このような状況は模型試験では捉えきれず、要素試験の難易度も高い。

このため本研究では、沿岸部特有の地下水環境下であることを考慮した人工バリア（緩衝材）性能評価に資する緩衝材仕様に関するデータの拡充を行うことを目的とする。取得したデータなどを通じて、沿岸部の多様な地下水環境条件に柔軟に対応できる緩衝材の材料仕様に関する定量的な評価手法の整備を目指すものである。

図 4-4-1 に本研究の試験や解析を実施するにあたり設定した「場」の概念的な図を示す。処分場の過渡期から再冠水期、力学的定常に至るまでの時空間の状態において、異なる水質や力学等の条件のもと、緩衝材は様々な環境や状況に曝される。例えば、初期の過渡期においては、ある方向から海水が流入すると想定した時、海水に曝されやすい要素や曝されにくい要素があり、こういった系全体においてオーバーパックスが移動する。このような緩衝材の予想される状態を、要素問題と境界値問題として捉え、時空間的にいくつかの状態を要素として抜き出して緩衝材の透水性を評価する要素試験の実施と、系全体の経時変化における力学的相互作用を把握するための模型実験とその数値解析を実施した。



【要素問題(要素試験)】

- 様々な状況が想定されるため、時空間的にいくつかの状態(要素)を抜き出して、次の試験により検討。

【境界値問題(模型実験・数値解析)】

- 系全体の経時変化における力学的相互作用を把握するため、模型実験と数値解析により検討。

- 透水膨潤圧試験
 - 現海水、セメント-海水-ベントナイト反応液の水質の影響把握
- せん断透水試験
 - 現海水の水質下における特性把握
- 遠心力模型実験
 - 異なる材料や水質下のオーバーバックの変位や応力の挙動
- 数値解析
 - 遠心実験の条件に対する数値解析、パラメータスタディ

図 4-4-1 研究の位置づけ

(2) 要素問題 (要素試験)

① 透水性に対する海水影響の検討

(a) 背景と目的

緩衝材の設計要件である低透水性は、ベントナイトの膨潤性に起因する特性である。ベントナイトの膨潤機構として、モンモリロナイト結晶層間の内外におけるイオン濃度差により生じる浸透性膨潤がある。沿岸部の地下水環境下では、Na型ベントナイトを使用した場合、間隙水のイオン濃度の増加により浸透性膨潤による各性能が発現しにくくなることに加え、地下水とのイオン交換が生じることで、2価の層間陽イオンの比率が高まり、拡散二重層が発達しにくくなることが予想される。他方、Ca型ベントナイトを使用した場合には、こうした影響は小さいと予想される。したがって、沿岸部の地下水組成に対して設計や性能評価を行う上で、海水系地下水による緩衝材の性能変化について、ベントナイトのイオン型とそれらの膨潤機構に関連付けて理解することは重要であると考えられる。そこで、海水系地下水のイオン濃度に応じた性能変化の幅、あるいは不確実性の少ない材料仕様の設定に結びつけることを視野に入れ、膨潤圧および透水係数の測定を行った。

(b) 実施内容

(i) 海水平衡ベントナイトの作製

処分施設では、圧縮ベントナイトに海水系地下水が通水することで、層間陽イオン組成が地下水と平衡状態に近づいていくことが想定される。クニゲルV1およびクニボンドについて、上述の状態を模した海水平衡ベントナイトを作製した。具体的には、人工海水によってイオン交換処理を行った後、80%エタノールを用いて人工海水の成分を洗浄した。試料の乾燥後、ハンマーミル（メッシュスクリーン 1 mm）で粉碎し、各試験に用いた。

作製した海水平衡ベントナイトの浸出陽イオン組成は、図 4-4-2 の通りである。2つのベントナイト間の差は、浸出 Na イオンで 2.7%、浸出 Ca イオンで 4.65%、浸出 K イオンで 0.81%、浸出 Mg イオンで 1.16% であり、おおよそ同じイオン比となった。

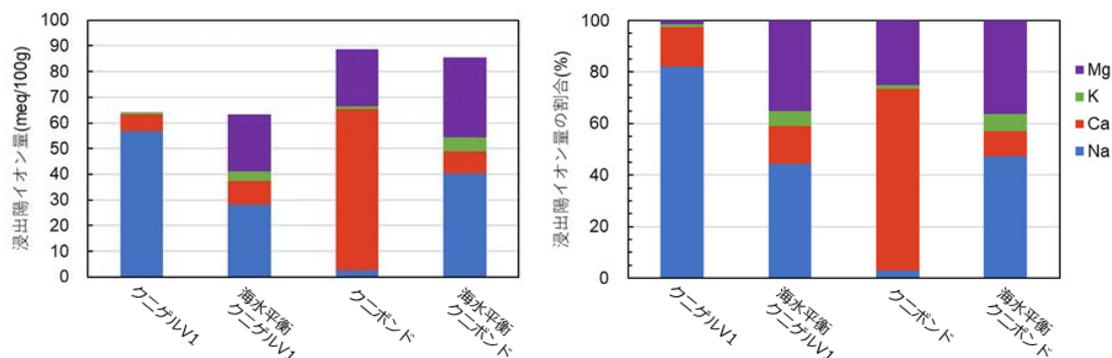


図 4-4-2 未処理および海水平衡処理後の各ベントナイト系材料の浸出陽イオン組成

(ii) 通水液のイオン濃度の影響に関する透水膨潤圧試験

クニゲルV1-砂混合土およびクニボンド単体、また両材料の海水平衡試料を用いて、透水膨潤圧試験を実施した。図4-4-3は試験結果である。透水係数は供試体の浸出陽イオン組成や密度、通水液によらず、平衡膨潤圧の増加に伴い低下した。特に通水液のイオン濃度が人工海水（1倍）以上であれば、海水平衡処理の有無やベントナイトの種類に依らず透水係数は平衡膨潤圧に一義的な関係を示した。一方、イオン交換水におけるクニゲルV1-砂混合土および海水平衡クニゲルV1-砂混合土の透水係数は、同じ平衡膨潤圧の他の条件と比較して、透水係数が1オーダー程度低かった。

同じ供試体条件では、通水液のイオン濃度の増加に伴い、平衡膨潤圧は低下し透水係数は増加した。この傾向は未処理のクニゲルV1-砂混合土で顕著であり、未処理のクニボンド単体では隠微であった。これは、一定の乾燥密度以上の条件では、クニゲルV1-砂混合土の平衡膨潤圧がクニボンド単体と比較して低く、平衡膨潤圧に応じた透水係数の変化量が大きいことに関連すると考えられる。また、各海水平衡ベントナイト材料の各値は、基本的に未処理試料の結果に近い値を示した。

これらの結果は、交換性陽イオン組成等、これまでに認識されていたベントナイトの基本的な性状以外に、各性能に少なからず影響する性状が存在することを示唆するものと考えられる。

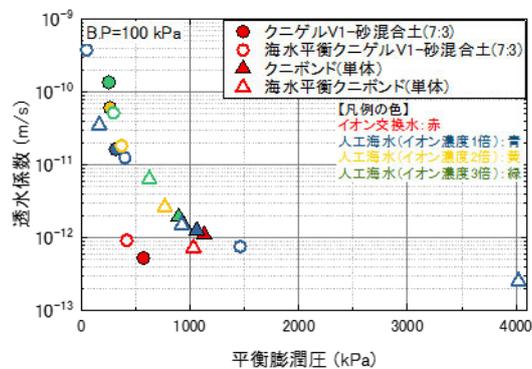


図 4-4-3 平衡膨潤圧と透水係数の関係

(c) 5 ヶ年の成果と今後の課題

本研究で検討した再冠水時に想定される現象に関して、ベントナイトの挙動は必ずしもこれまで透水係数に寄与すると考えられてきたパラメータ（有効モンモリロナイト乾燥密度や交換性陽イオン組成、通水液のイオン組成・濃度など）だけに支配されておらず、他の性状の影響も大きく寄与する可能性が示唆された。当該性状に関する理解が十分でない現状では、ベントナイトの平衡膨潤圧や透水係数などの各性能は、種類によって異なると捉えられる。したがって、各種ベントナイトの性状をより正確に把握することが今後の課

題であり、そのうえで、処分の各段階において想定される現象に対して、目的に応じた材料選定を行うことが重要と考えられる。

② 透水性に対するせん断の影響の検討

(a) 背景と目的

オーバーパックの変位や腐食膨張により、緩衝材が比較的大きなせん断変形を受けた場合、局所的に透水性が変化する可能性が考えられる。緩衝材の設計要件である低透水性や自己修復性に着目すると、このようなせん断を受けた場合でも、局所的な水みち（短絡経路）が生じないことが重要と考えられる。しかし、せん断変形を受けたベントナイトの透水性の変化に関する実験的な調査事例は少なく、特に、せん断方向に沿った透水性や自己修復性の評価はほとんど行われていない。そこで、緩衝材の低透水性に関わるせん断の影響に関して、評価方法を整備しデータを取得した。

(b) 実施内容

(i) せん断透水試験装置と方法の整備

せん断を受けた圧縮成型ベントナイトの透水性を調べるため、リングせん断試験の機構（図 4-4-4）を応用し、せん断の進行に応じた透水係数の変化を調べた。本試験では、せん断の進行に伴う透水性の変化を評価するため、クニゲル V1-砂混合土あるいはクニボンド単体、あるいはこれらにイオン交換処理を施した試料の圧縮成型供試体について、任意のせん断変位（①せん断前、②せん断によるピーク強度発現前、③ピーク強度発現後、④残留状態）において、鉛直方向・水平方向それぞれの透水試験を行った。

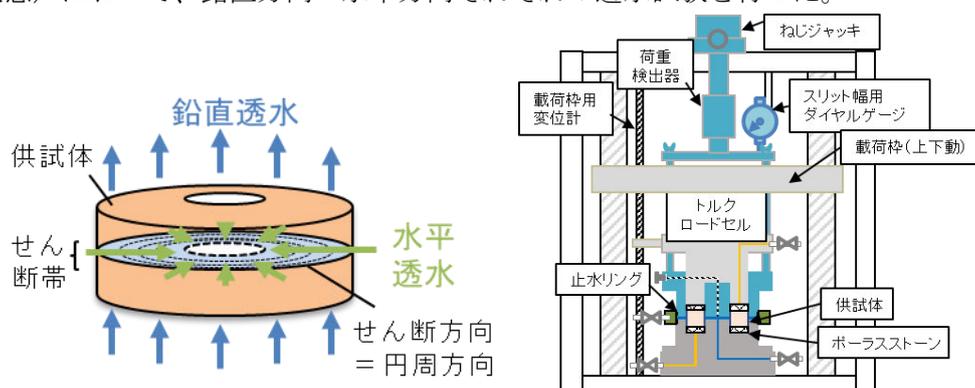


図 4-4-4 せん断透水試験における供試体(左)と試験装置の概略図

(ii) せん断透水試験

図 4-4-5 は、海水平衡ベントナイトのせん断透水試験の結果である。イオン交換水および人工海水 1 倍~3 倍濃度を通水したいずれの試験についても、残留状態（360°）において、透水係数は低下もしくはほぼ変わらなかったことから、定体積条件のせん断では、せん断後に水みちは生じないことが示唆された。

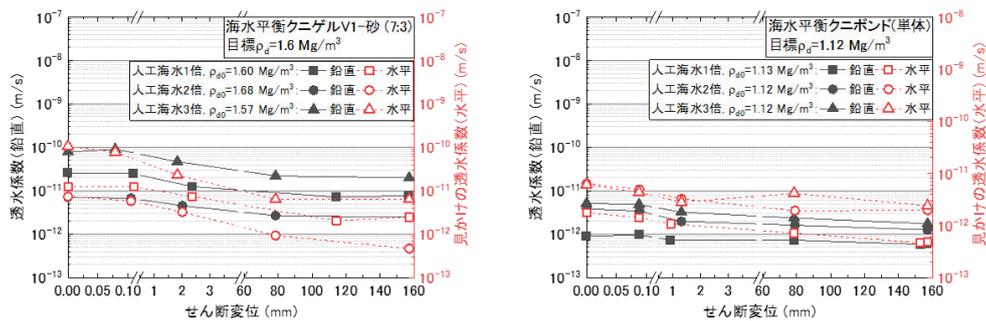


図 4-4-5 せん断に伴う透水係数の変化(左 : クニゲル V1-砂混合土、右 : クニボンド)

(c) 5 年間の成果と今後の課題

イオン交換水および人工海水 1 倍~3 倍濃度を通水したいずれの試験においても、残留状態までの定体積せん断によって、透水係数が増加することはなかった。したがって、定体積条件のせん断では、せん断後に水みちは生じないと考えられる。しかし、せん断後に応力解放が生じた場合、低透水性が保たれるかどうかは明らかでないため、このような条件における性能評価は、今後の課題である。

③ 透水性に対するセメント影響の検討

(a) 背景と目的

沿岸海底下に地層処分施設を建設する場合、緩衝材に対し、周辺岩盤に含まれる海水由来の地下水が浸透することが想定される。ここで、海水が緩衝材に浸透する前に周辺に存在するセメント系材料と反応する可能性を考慮すると、緩衝材に浸透する地下水の水質にバリエーションが生じる。また、それらの水質条件下にてベントナイトが変質した場合、その化学条件に応じて工学的性質が変化することが懸念される。そのため、緩衝材の性能評価では、上述の化学的多様性を考慮した上で、その工学的性質の変化幅を把握しておくことが重要である。

本研究では、セメント系材料との反応により水質変化した海水が緩衝材に浸透することを考慮し、海水-セメント反応液によるベントナイトの変質反応やそれに伴う透水性変化を把握することを目的とした。なお、ベントナイトの工学的性質変化を考慮すべき期間は長期に渡るものの、本研究では再冠水を検討対象期間としていることから、比較的短期の反応に着目した。令和 4 年度は、幅広い化学条件におけるベントナイトの変質反応を理解するため、海水-セメント反応液とベントナイトの相互作用を調べるバッチ試験を実施した。令和 5 年度は、バッチ試験より条件を絞り、ベントナイトの変質反応に伴う透水性や膨潤圧の変化を調べる透水膨潤圧試験を実施した。

(b) 実施内容

(i) バッチ試験

バッチ試験の固相は、クニゲル V1 (以下、「KV」という) やクニボンド (以下、「KB」という)、海水に対してイオン交換反応が完了したクニゲル V1 (以下、「SKV」という)、海水に対してイオン交換反応が完了したクニボンド (以下、「SKB」という) を用いた。液相は、普通ポルトランドセメントペーストに対し、液固比 10、100、1000 の条件にて人工海水と混合し作製した試験溶液 (以下、それぞれの液固比条件にて作製した試験溶液を「S10」「S100」「S1000」という) を用いた。

バッチ試験の結果、ベントナイトの変質反応として、Si を含有する初期鉱物の溶解反応や、モンモリロナイトのイオン交換反応、二次生成物の生成反応が認められた。二次生成物は、S10 条件では炭酸塩の生成が、KB や SKB を用いた S100 や S1000 の条件ではジブサムの生成が認められた。

(ii) 海水-セメント反応液を通水した透水膨潤圧試験

透水膨潤圧試験では、緩衝材に海水が先に浸透し、その後に海水-セメント反応液が浸透するケースを想定し、海水平衡ベントナイトに対して海水-セメント反応液を通水した。ベントナイトは 2 種類 (SKV、SKB) を使い、SKV に対しては、SKV と砂の乾燥質量比が 7:3 になるように砂を混合した。各条件における供試体の有効モンモリロナイト密度を揃え、また、試験溶液は S10 と S1000 を用いた。なお、化学反応は速度論で進むため、供試体内で生じる化学反応は、供試体を通る試験溶液の滞留時間の影響を受けることが考えられる。そこで、各試験条件における滞留時間を揃えるため、各条件における試験時間あたりの PV 比が一定の値に近くなるように透水压を調整しながら試験を実施した。

透水膨潤圧試験の結果、SKB-S10 や SKV-S10 の条件では透水性が低下した。このうち、SKB-S10 の条件における透水性低下の要因は、供試体下面での炭酸塩の生成による局所的な間隙率低下が考えられた。一方、SKV-S10 の条件では間隙率の有意な低下は認められなかった。SKV-S10 の試験における透水性低下の要因の理解には課題が残るものの、溶解-沈殿反応による構造変化によって透水性が低下したことが推察される。S1000 の条件では、S10 と比較して pH は低いものの、海水-セメント反応液により、SKB を用いた場合は透水性が変化せず、SKV を用いた場合は透水性が増加した (図 4-4-6)。

なお、S10 の条件における炭酸塩の生成は、CO₂ ガスの影響によって流入液中に含まれる CO₃ イオンが増加したことに起因すると考えられた。一方、本試験では、海水が先に侵入し、その後に海水-セメント反応液が侵入するケースを想定しており、実際の放射性廃棄物処分施設では、海水由来の HCO₃ イオンの供給により炭酸塩が生成する可能性が考えられる。

(c) 5カ年の成果と今後の課題

本研究より、海水とセメント系材料の反応による水質変化を考慮した場合、ベントナイトの種類に応じた性状や溶液のイオン強度などの要因に加え、溶解—沈殿反応の影響によって透水性が変化することが分かった。また、その透水性変化は、条件に応じて増加する場合も、低下する場合も認められた。具体的には、セメント影響が比較的大きい S10 の条件では透水性が低下し、セメント影響が比較的小さい S1000 の条件では透水性が変化しない、もしくは、増加した。

セメント影響が比較的大きい S10 の条件における透水性低下の要因として、SKB を用いた試験では供試体下面での炭酸塩の生成による間隙率低下が考えられた一方、SKV の場合では、溶解—沈殿反応による構造変化が推察されたものの、要因の特定には課題が残った。将来的に放射性廃棄物処分施設におけるベントナイトの変質反応に伴う透水性変化を予測することを見据えると、SKV-S10 条件において透水性変化に影響を与えた要因を特定することが今後の課題である。

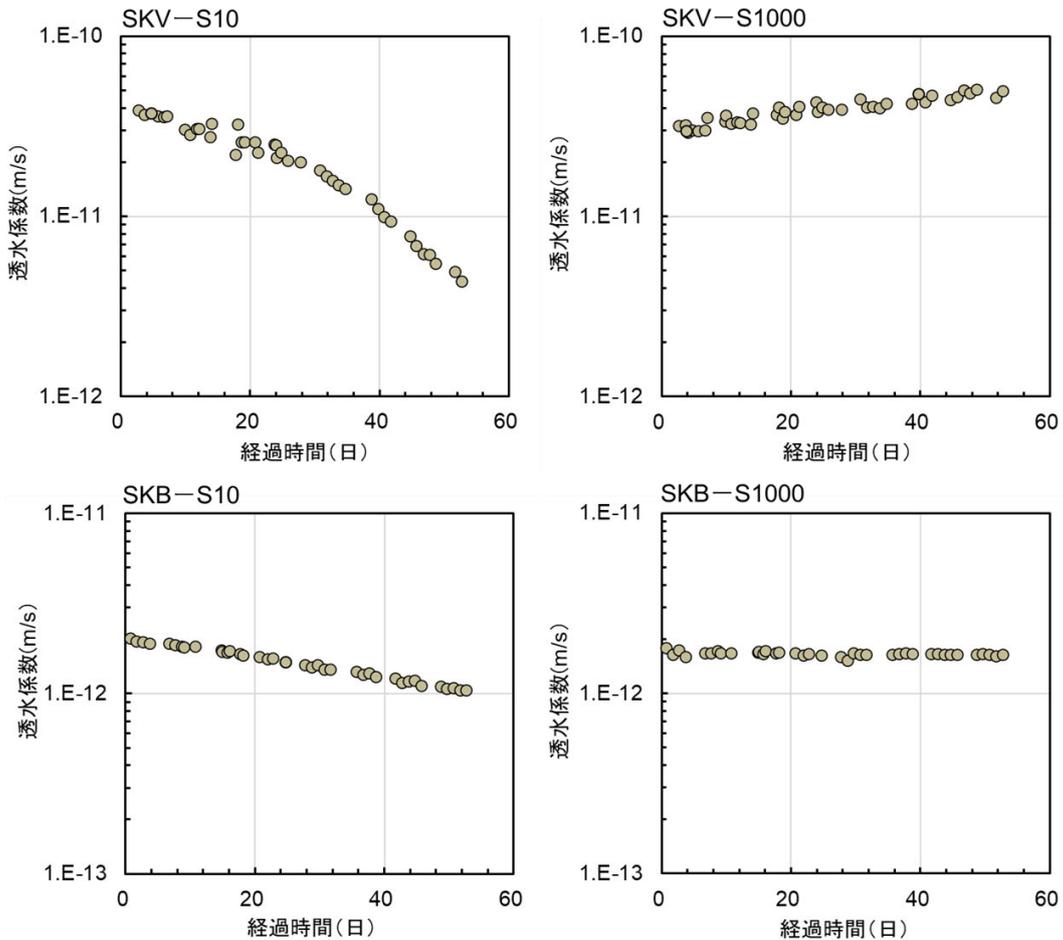


図 4-4-6 透水係数の経時変化

(3) 境界値問題（模型試験および数値解析）

① 再冠水期の力学的相互作用に対する遠心力模型実験による検討

(a) 背景と目的

沿岸部を地層処分施設のサイトとして想定した場合、長期にわたり人工バリアである緩衝材に海水成分を含有する地下水が浸透する。再冠水過程においては緩衝材の膨潤や変形によりオーバーパックが定置場所から変位（浮上・沈下）することが考えられるため、緩衝材とオーバーパックの複合的な挙動を把握する必要がある（図 4-4-7）。ただし、複合的な挙動の把握に対して、要素試験結果を用いた解析的検討では正確に実現象を再現できるとは限らず、解析の妥当性の把握も必要となる。また、実規模レベルの大型模型試験や原位置試験は、実施場所（広さや深度等）、実施期間、経済的な制約等によって必ずしも容易ではない。そこで、遠心力場の相似則（実寸法の $1/n$ の模型を遠心力载荷装置により n 倍の重力加速度場に置けば、実際の応力やひずみの分布が実物換算時間の $1/n^2$ に短縮される）に基づいて物理現象を時間短縮して再現可能な遠心力模型試験によって、縦置き方式の処分におけるオーバーパックの変位挙動を把握する研究が行われてきた。しかし、緩衝材の変形挙動は緩衝材の主な材料となるベントナイトのイオン型や密度、緩衝材に浸潤する地下水の組成、廃棄体の熱など複合的な条件によって異なるが、遠心力模型試験で実施された試験条件は限られている。特に、純水（イオン交換水）条件と海水条件において、Na 型ベントナイトよりも Ca 型ベントナイトの方が性能の変化が小さいことが知られているが、Ca 型ベントナイトを緩衝材の材料とした遠心力模型試験例はない。したがって、長期間の地下水環境の変化を考慮すると、純水に比べ海水条件下での性能の変化が小さい Ca 型ベントナイトを緩衝材の材料とした場合のオーバーパック変位挙動に関する知見も、緩衝材の材料の選択肢を増やす観点で重要である。そこで本事業では、異なる地下水環境（純水/人工海水）、緩衝材材料（Na/Ca 型ベントナイト、海水平衡ベントナイト）、廃棄体温度条件における、再冠水期間の緩衝材の膨潤変形とオーバーパックの変位挙動の関係を明らかにすることを目的とし、各条件の影響を評価した。

(b) 実施内容

(i) 試験条件

本事業で行った試験条件の一覧を表 4-4-1 に示す。平成 31 年度は Na 型ベントナイト（クニゲル V1）および Ca 型ベントナイト（クニボンド）を緩衝材の材料とした条件で試験を実施した。令和 2 年度は緩衝材中のベントナイトのイオン交換反応が平衡状態に至った場合の想定として、あらかじめ海水平衡処理を行ったベントナイト（海水平衡ベントナイト）を使用した試験を行った。令和 3 年度は Ca 型ベントナイトを緩衝材の材料とした条件で、廃棄体温度を 90℃とした場合の模型試験を行い、緩衝材の変形やオーバーパックの変位挙動に対する廃棄体の熱の影響を把握した。令和 3 年度までは実寸法の $1/30$ サイズ（縮尺倍率 $n=30$ ）の模型を使用し、遠心力 30 G 場で最長 43 日間、実物換算時間 105

年の模型試験を実施した。令和4、5年度は1/50サイズの模型を作製し、50G場で最長で実物換算時間273年の模型試験を実施した。遠心力模型試験の概要は図4-4-8のとおりである。なお、模型試験後はCT画像撮影を行い、試験容器から緩衝材試料を取り出して高さごとの密度・含水比測定と浸出陽イオン測定を実施した。

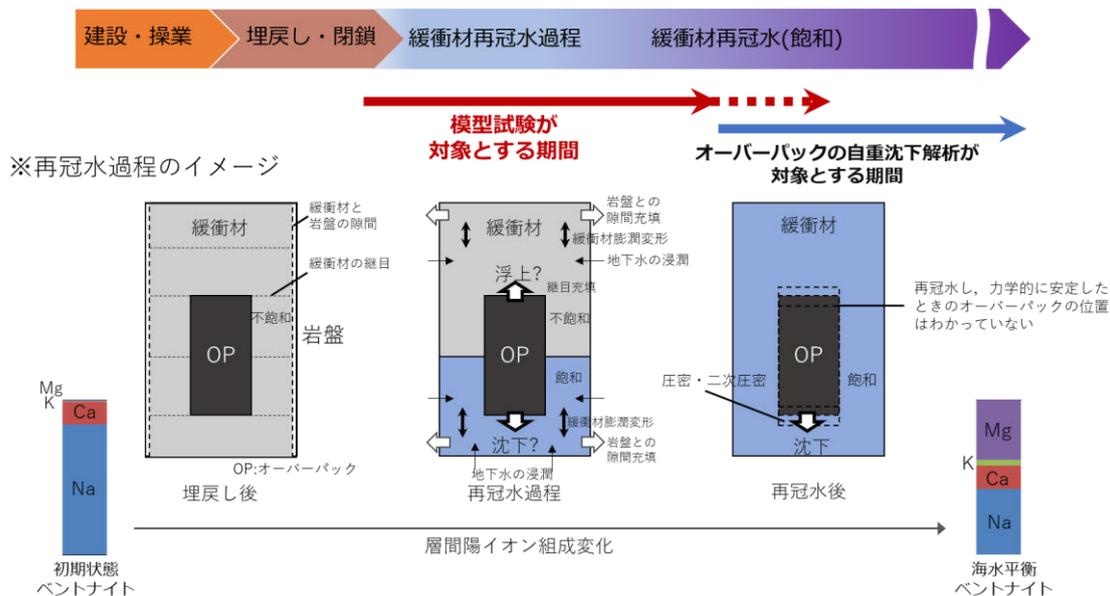
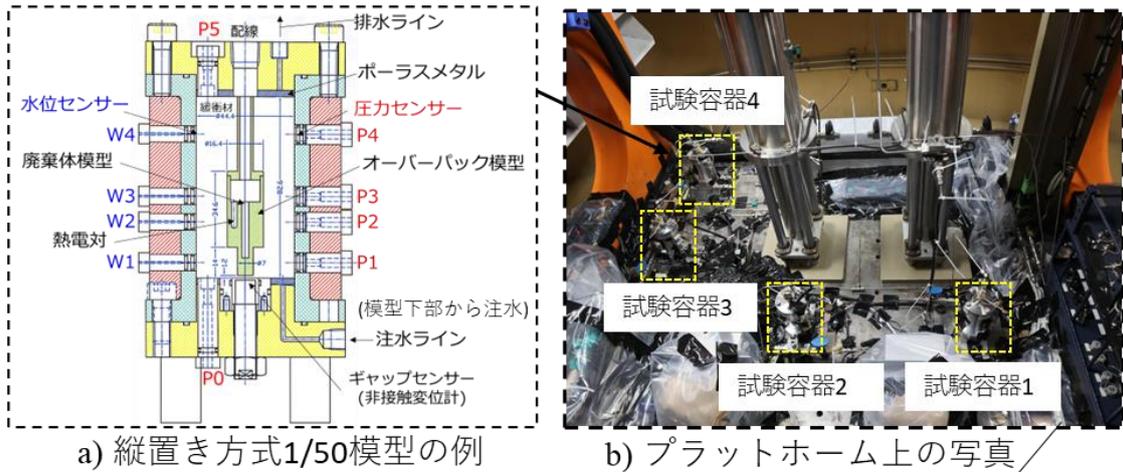


図 4-4-7 緩衝材再冠水過程で生じる現象のイメージ

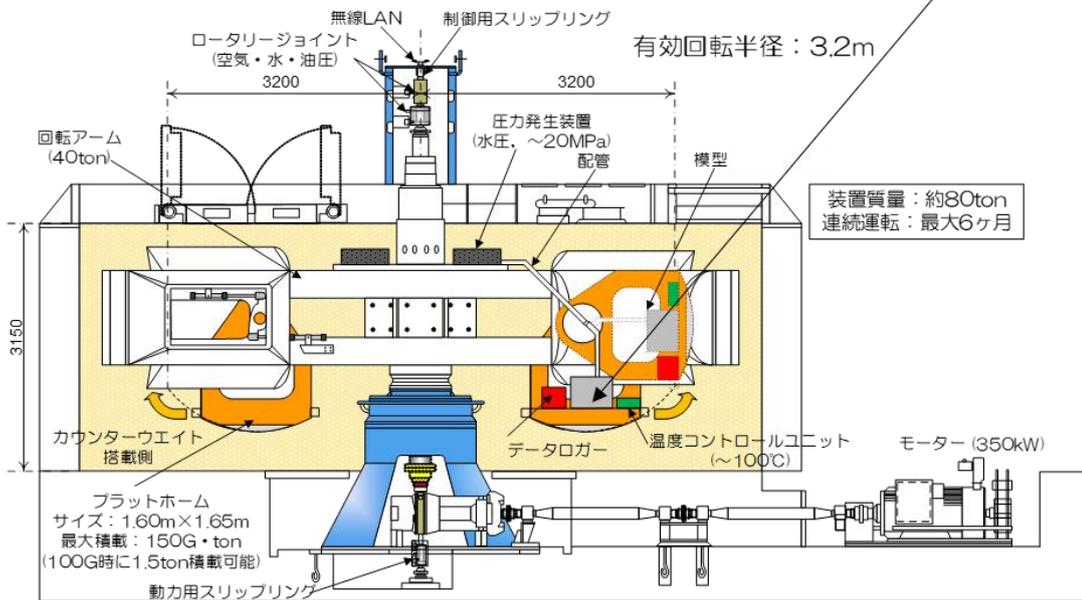
表 4-4-1 遠心力载荷模型試験の試験条件一覧

実施年度	供試体名	緩衝材に使用した試料	$\rho_{em}(Mg/m^3)$	注水	注水圧 (MPa)	加熱	n	試験期間 (日)	実物換算期間(年)
H31	Na-1	クニゲルV1+砂混合土	1.00	純水	1.0	なし	30	20	47
H31	Na-2	クニゲルV1+砂混合土	1.00	人工海水	1.0	なし	30	20	47
H31	Ca-1	クニボンド+砂混合土	0.79	純水	1.0	なし	30	20	47
H31	Ca-2	クニボンド+砂混合土	0.79	人工海水	1.0	なし	30	20	47
H31	Ca-3	クニボンド	1.00	純水	1.0	なし	30	20	47
H31	Ca-4	クニボンド	1.00	人工海水	1.0	なし	30	20	47
R02	Na-3	クニゲルV1+砂混合土	1.00	人工海水	1.0	なし	30	34	83
R02	Ca-4U	クニボンド	1.00	人工海水	1.0	なし	30	34	83
R02	EqSWNa-1	海水平衡クニゲルV1+砂混合土	1.00	人工海水	1.0	なし	30	34	83
R02	EqSWCa-1	海水平衡クニボンド	1.00	人工海水	1.0	なし	30	34	83
R03	Na-4	クニゲルV1+砂混合土	1.00	人工海水	1.0	なし	30	43	105
R03	Na-5	クニゲルV1+砂混合土	1.00	人工海水	1.0	なし	30	43	105
R03	Ca-5	クニボンド	1.00	人工海水	1.0	なし	30	43	105
R03	Ca-6T	クニボンド	1.00	人工海水	1.0	90°C	30	43	105
R03	Na-6T	クニゲルV1+砂混合土	1.00	人工海水	1.0	90°C	30	32	78
R03	Na-7T	クニゲルV1+砂混合土	1.00	人工海水	1.0	90°C	30	32	78
R04	Na-8	クニゲルV1+砂混合土	1.00	人工海水	1.0	なし	50	40	273
R04	Na-9T	クニゲルV1+砂混合土	1.00	人工海水	1.0	90°C	50	40	273
R04	Ca-7	クニボンド	1.00	人工海水	1.0	なし	50	40	273
R04	Ca-8T	クニボンド	1.00	人工海水	1.0	90°C	50	40	273
R05	Na-10T	クニゲルV1+砂混合土	1.00	人工海水	1.0	90°C	50	28	191
R05	Ca-9T	クニボンド	1.00	人工海水	1.0	なし	50	28	191
R05	Na-11	クニゲルV1+砂混合土	1.00	人工海水	1.0	90°C	50	28	191
R05	Ca-10	クニボンド	1.00	人工海水	1.0	なし	50	28	191



a) 縦置き方式1/50模型の例

b) プラットホーム上の写真



c) 超長期遠心载荷岩盤実験装置の概略図

図 4-4-8 遠心力载荷模型試験の概略図

(ii) 試験結果

・緩衝材材料および試験用水の影響

図 4-4-9 に緩衝材材料と試験用水の条件を比較した結果を示す。Na-1 (純水) 条件では透水性が低く、試験終了時には緩衝材下部のみに浸潤していた状況であり、オーバーパックの変位量は小さかった。一方で Na-2 (人工海水) 条件では試験終了時まで上部まで浸潤し、オーバーパックも浮上・沈下が見られた。一方で Ca-3 (純水)、Ca-4 (人工海水) 条件では浸潤挙動・オーバーパック変位の変化幅が小さいことが確認できた。

・廃棄体温度の影響

試験結果から、廃棄体模型 90°C 条件では、加熱なしの条件に比べてオーバーパックが変位するタイミングが速くなること、変位幅が大きくなることを示した。また、図 4-4-10 に

廃棄体温度 90℃条件における、試験用水の浸潤挙動の様子を示す。実物換算時間 105 年時点では廃棄体周囲に飽和度が低い領域が観察されたが、実物換算時間 273 年時点では同様の領域は観察されず、全体的に試験用水が浸潤したことがわかった。廃棄体 90℃条件においては緩衝材外部から浸潤が進み、時間経過とともにオーバーパック周辺の緩衝材にも浸潤が進むと考えられる。

・遠心力载荷模型試験の再現性

Ca 型ベントナイト・人工海水条件を比較した (図 4-4-11)。試験開始直後 (実物換算 10 年程度) は不安定な挙動を示すことがあったものの、それ以降は廃棄体加熱なしおよび 90℃条件それぞれのオーバーパック変位挙動は同様であり、試験の再現性が確認できた。また、縮尺倍率 30 倍、50 倍 ($n=30, 50$) を比較しても変位挙動は同様であった。

・模型試験後の浸出陽イオン測定

代表的な結果として、実物換算時間約 20 年で上部まで試験用水が到達した Na-10T の結果を図 4-4-12 に示す。注水した緩衝材底部から Na から Mg イオンに置換が進んでいるものの、置換された試験用水が上部に流れるため、頂部まで海水のイオン組成になるためにはさらに時間を要すると考えられる。

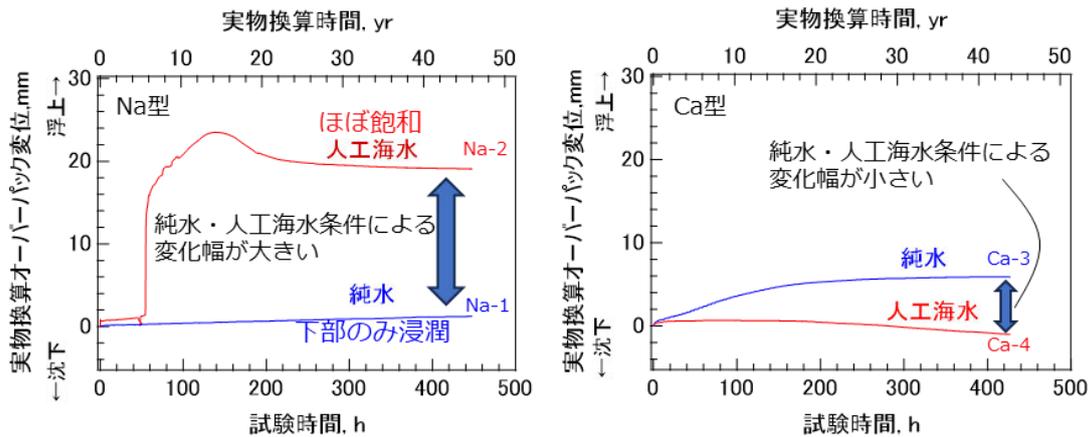


図 4-4-9 異なる緩衝材材料・試験用水での試験結果比較

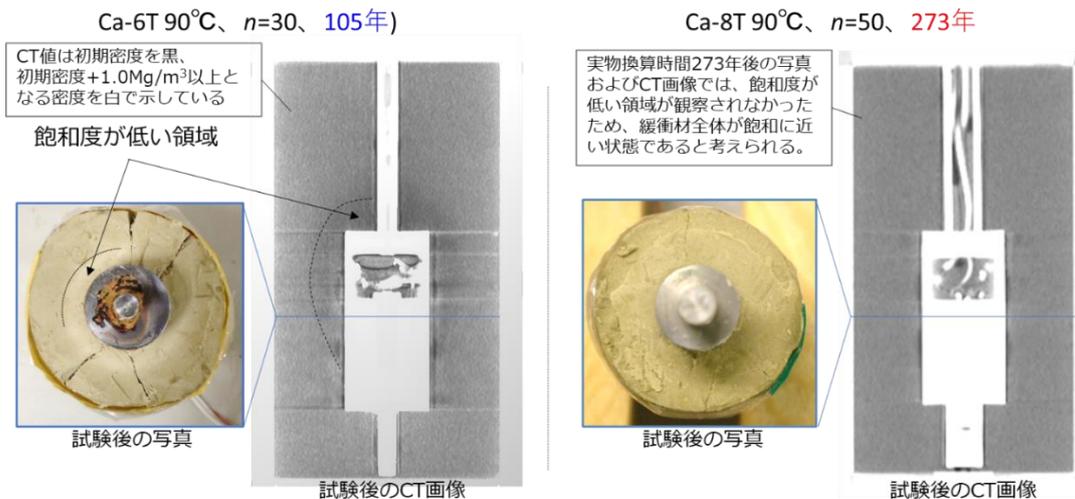


図 4-4-10 試験用水の緩衝材への浸潤挙動

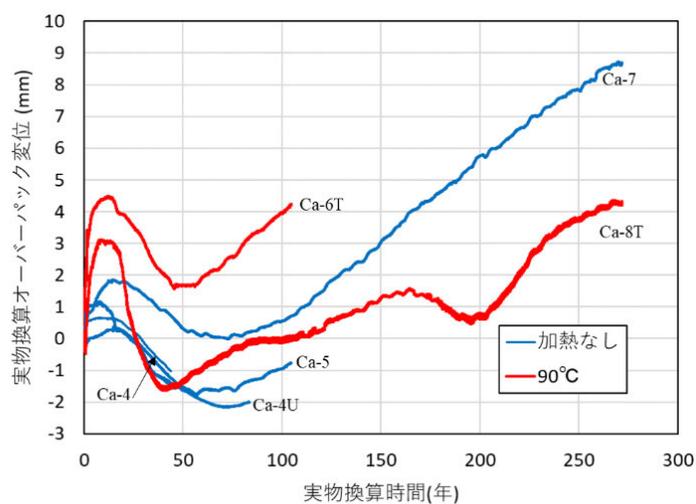


図 4-4-11 オーバーパック変位挙動比較

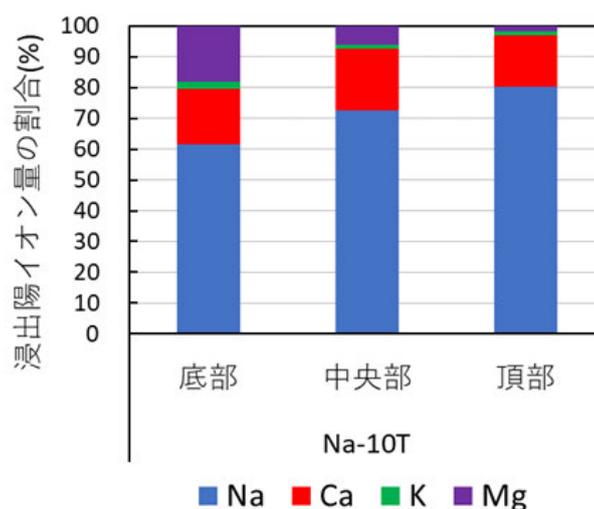


図 4-4-12 試験後緩衝材のCEC分布 (Na-10T)

(c) 5 ヶ年の成果と今後の課題

沿岸部の多様な地下水環境条件に柔軟に対応できる緩衝材の材料仕様に関する定量的な評価方法の整備として、通水液を人工海水としたときの試験環境の整備、長期間を対象とした 1/50 試験容器を設計した。また、整備した試験環境にて、異なる緩衝材の材料・試験用水・廃棄体温度条件での模型試験を実施した。試験結果の成果として、沿岸部の地下水環境を考慮した種々の緩衝材を用いた模型試験によって、オーバーパックの変位（浮上・沈下）にともなう緩衝材の厚み仕様に資する基礎的なデータを拡充した（図 4-4-13）。また、緩衝材中の試験用水の浸潤挙動については要素試験および数値解析と統合的なデータ

が得られたことから、模型試験の結果が妥当性確認データとして有用であると考えられる。

今後の課題として、緩衝材・オーバーパックの挙動は周囲の岩盤の影響を受けるため、周辺岩盤を含めた模型試験の実施が必要であると考えられる。また、オーバーパック変位の取得や廃棄体模型の加熱のため、実際のオーバーパックと形状が異なる模型を使用しているため、より現実に近い設計を行うなどの模型試験における技術的な課題が挙げられる。

○：試験例がある条件 ×：試験例がなかった条件		試験用水		廃棄体の熱		再冠水後の挙動
		純水	人工海水	加熱なし	加熱	長期試験
緩衝材 の材料	Na型ベントナイト	○	○	×→○ (R04,R05)	×→○ (R04,R05)	×→○ (R04,R05)
	Ca型ベントナイト	×→○ (H31,R02)	×→○ (H31,R02)	×→○ (H31,R02, R04,R05)	×→○ (R03,R04, R05)	×→○ (R04,R05)

図 4-4-13 本事業で得られた模型試験データ

② 再冠水期の力学的相互作用に対する数値解析による検討

(a) 背景と目的

高レベル放射性廃棄物の地層処分においては、人工バリア定置後に廃棄体の発熱や周辺岩盤から人工バリアへの地下水の浸入、緩衝材の膨潤などの現象が相互に影響する熱-水理-力学連成現象（THM 連成現象）が発生する。このような連成現象を予測評価することは、ニアフィールド環境の明確化、処分孔・緩衝材の設計の観点から重要な課題の一つであり、評価期間が長期に及ぶことから数値解析が不可欠となる。このような背景から電力中央研究所においても、緩衝材の膨潤特性に対する評価式を多様な条件の室内試験から導き、その評価式を数値モデル化した THM 連成解析コード LOSTUF（澤田ほか、2006）を開発した。

このような数値解析手法の適用は、これまで人工バリアの緩衝材として多くの研究例がある Na 型ベントナイトを対象として実施されているが、沿岸部への高レベル放射性廃棄物の地層処分を考慮した場合、海水との平衡を考慮したイオン型の異なる Ca 型ベントナイトに着目することも重要である。その際、検討すべき人工バリア性能評価上の不確実性の一つとして、膨潤性の異なる緩衝材に対するオーバーパックの変位挙動（緩衝材・オーバーパックの力学的相互作用）が挙げられる。このような観点から、Ca 型ベントナイトを含めて海水平衡の有無や緩衝材の異なる条件に対し、膨潤性や透水性の異なる緩衝材を使用することで生じる影響を確認する必要がある、廃棄体の加熱の有無を考慮した数値解析を実施した。

高レベル放射性廃棄物の地層処分において緩衝材としての研究例の多い Na 型ベントナイトに加え、沿岸部の地層処分では有望と考えられる海水との平衡を考慮した Ca 型ベントナイトを含め、緩衝材の仕様 (Na 型/Ca 型)、水質 (純水/人工海水) 及び廃棄体の加熱の有無を考慮して実施した遠心模型試験の実験条件を対象とした数値解析を行う。また、解析で考慮する緩衝材の条件の違いにより生じる影響の感度解析を実施し、緩衝材条件による膨潤特性や透水性の違いにより、オーバーパックの変位挙動に生じる影響を確認する。さらに、遠心力模型実験の結果との比較検証を行うことで沿岸部の地層処分におけるニアフィールド長期予測評価に対する数値解析の適用性について検討する。

(b) 実施内容、および 5 カ年の成果と今後の課題

(i) 数値解析プログラム

本研究では数値解析に、電力中央研究所で開発した「放射性廃棄物地層処分における地下空洞長期安定性解析プログラム (LOSTUF)」を使用する。LOSTUF は THM 連成の有限要素法解析コード (澤田ほか、2006) である。

LOSTUF では、地盤を粒子骨格と水・空気で満たされた空隙で構成される多相システムとして取り扱い、地下水の連続式、エネルギーの保存則、力の釣り合い式と、応力-ひずみ関係、透水挙動に関するダルシー則、熱伝導に関するフーリエ則、水蒸気の拡散挙動に関するフィック則等の各種構成則から導かれた支配方程式を用いている。間隙ガス圧は一定で大気圧に等しいとしている。

不飽和段階においてサクシジョンの減少に伴って進行するベントナイトの膨潤については、応力-ひずみ関係とは別に節点力を作用させることでモデル化する。節点力は、有効粘土密度と平衡膨潤圧の関係をもとに、作用応力とサクシジョン減少量から求まる最大膨潤ひずみと等価になるように算出する。

解析プログラムの詳細については文献 (澤田ほか、2006) を参照されたい。

(ii) 緩衝材の仕様と水質の組合せの影響

令和 3 年度は、緩衝材の仕様 (Na 型 : クニゲル V1 砂混合 / Ca 型 : クニボンド) と水質 (純水 / 人工海水) の組合せを変化させた令和 2 年度実施の遠心力模型実験の数値解析を実施した。水質条件に対応した要素試験から材料物性値を設定した。そのうち、飽和時の平衡膨潤圧と透水係数を有効粘土密度との関係で整理したものを図 4-4-14 に示す。Na 型緩衝材では平衡膨潤圧と透水係数の水質による違いが大きく異なる一方、Ca 型緩衝材では水質による違いは小さい。解析結果にもその影響が表れ、Na 型緩衝材では、図 4-4-15 のように純水よりも人工海水の方が大幅に緩衝材応力の上昇が早い (再冠水に要する時間が短い)。この傾向は模型実験と一致した。なお、Ca 型緩衝材では、模型実験と比較して数値解析での再冠水に要する時間が短い傾向があり、図 4-4-14b) の青実線から青破

線のように透水係数の見直しを行った。Ca型緩衝材の透水係数については、今後もデータを拡充する必要があると考えられる。

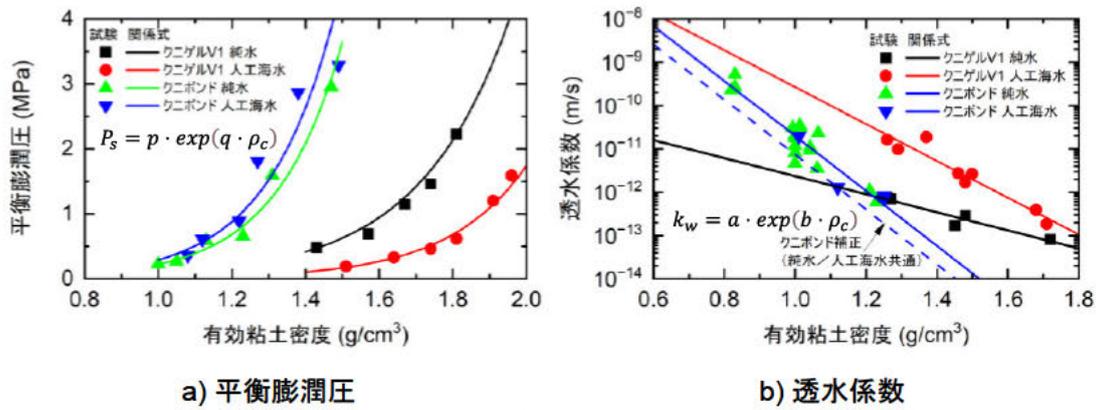


図 4-4-14 有効粘土密度と平衡膨潤圧、透水係数の関係

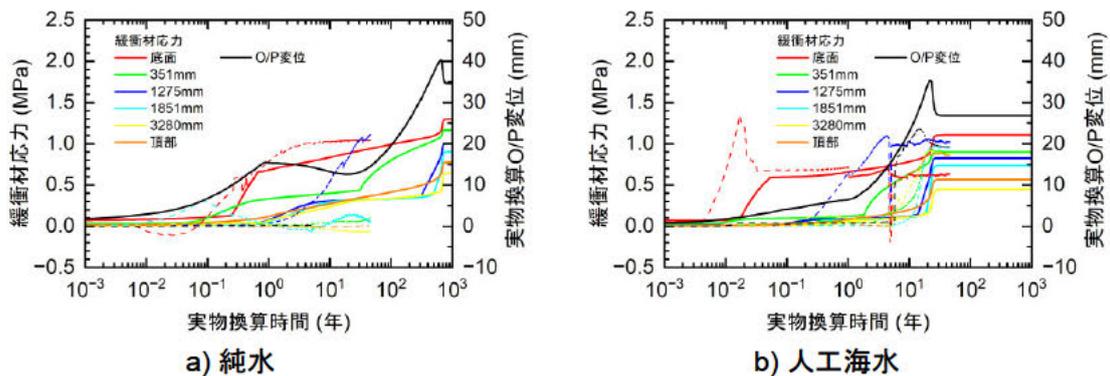


図 4-4-15 クニゲル V1 砂混合供試体を用いた遠心载荷実験とその数値解析における緩衝材応力と O/P 変位の履歴 (実線：解析結果、点線：実験結果)

(iii) 緩衝材の仕様 (Na 型/Ca 型), 加熱の有無の影響

令和 4 年度は、令和 3 年度と令和 4 年度に実施した緩衝材の仕様 (Na 型/Ca 型) と加熱の有無の条件を組み合わせた人工海水による再冠水挙動の遠心力模型実験を対象とした数値解析を実施した。加熱ありの条件では、オーバーパック周辺を迂回するように水が浸透する傾向が見られ、解析でそれを再現できることを確認した (図 4-4-16)。また、加熱なしにくらべて加熱ありの方が再冠水に要する時間が短い傾向がある。これは、温度が高くなることで水の粘性係数が低下し透水係数が大きくなることが要因と考えられる。

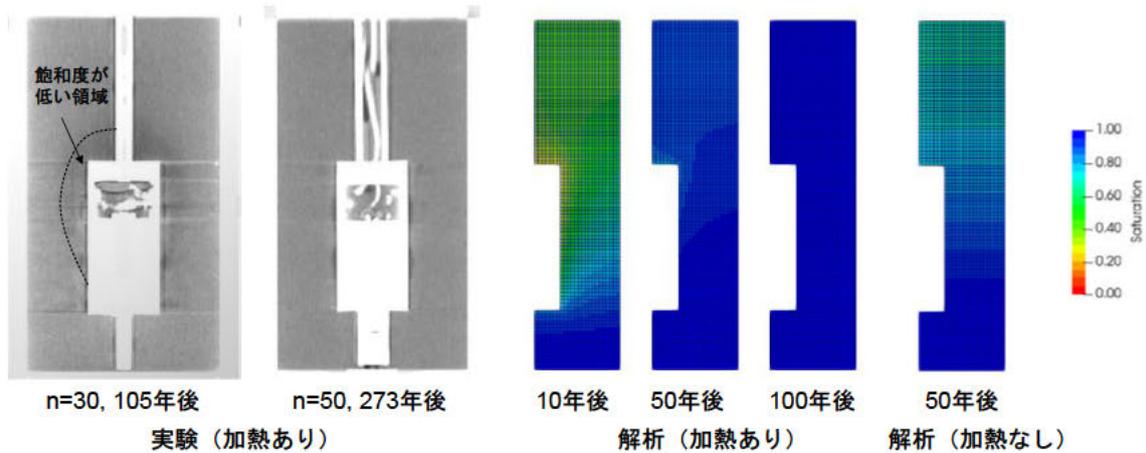


図 4-4-16 実験終了時の X 線 CT スキャン結果と解析で得られた飽和度分布

(iv) 海水平衡緩衝材 (Na 型 / Ca 型)

令和 5 年度は、海水平衡緩衝材 (Na 型 : 海水平衡クニゲル V1 砂混合 / Ca 型 : 海水平衡クニボンド) を用いて、人工海水浸透を行う遠心力模型実験を想定した数値解析を実施した。海水平衡緩衝材の透水特性、膨潤特性を有効粘土密度との関係で取得した。有効モンモリロナイト密度 1.0 g/cm^3 の条件で比較すると、Na 型の海水平衡クニゲル V1 は未処理のクニゲル V1 よりも少し平衡膨潤圧が大きく、透水係数が小さい。一方、Ca 型の海水平衡クニボンドは、未処理のクニボンドよりも少し平衡膨潤圧が小さく、透水係数が大きい傾向であった。この傾向を想定される有効粘土密度の範囲で満たすように未処理の緩衝材の平衡膨潤圧と透水係数を再設定した (図 4-4-17)。海水平衡の有無による緩衝材の膨潤特性、透水特性の違いは大きくないため、再冠水時の緩衝材応力や O/P 変位に大きな違いがないことを確認した。

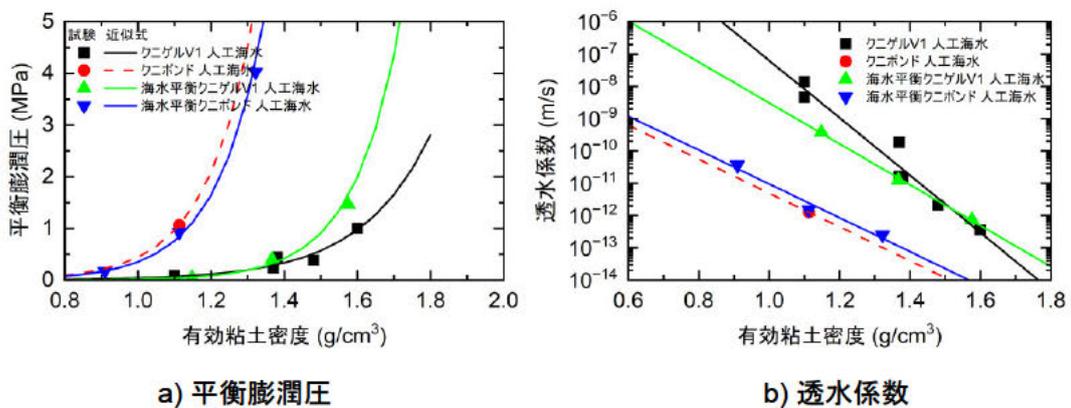


図 4-4-17 有効粘土密度と平衡膨潤圧、透水係数の関係 (再設定)

(v) 感度解析

令和 3～5 年度の数値解析では、緩衝材の透水特性、変形特性、膨潤特性、熱特性について感度解析を合わせて実施し、解析結果に与える影響が大きいパラメータを整理した。再冠水に要する時間に関しては、透水係数が最も影響が大きいことが分かった。O/P の変位に関しても、透水係数はオーバーパック（以降、O/P）の上昇、下降のタイミングに大きく影響する。しかし、最終変位への影響は小さい。一方で、O/P の最終変位に関しては、緩衝材のヤング率の影響が大きい。解析で飽和後のヤング率を用いた場合は、O/P の上昇量が過大になる傾向があり、ヤング率の飽和度依存性を考慮する必要があることが分かった。ただし、ヤング率については、クニゲル V1 と純水の組合せのデータしか得られておらず、他の緩衝材と水質の組合せでも適用していた。本事業で得られたベントナイトのせん断試験の応力-ひずみ曲線から、各緩衝材と人工海水の組合せのヤング率を仮定して再設定し、解析を実施した結果を図 4-4-18 に示す。クニゲル V1 砂混合は人工海水下ではヤング率が小さいため O/P 変位が大きくなる傾向が見られ、逆にクニボンドでは、ヤング率が大きいため O/P 変位が小さくなる傾向となる。これは、模型実験で得られた傾向と一致した。このようにヤング率は、O/P 変位に影響の大きい重要なパラメータであるため、緩衝材仕様と水質の組合せを変え、ヤング率を飽和度の関数として設定するためのデータを取得する必要がある。

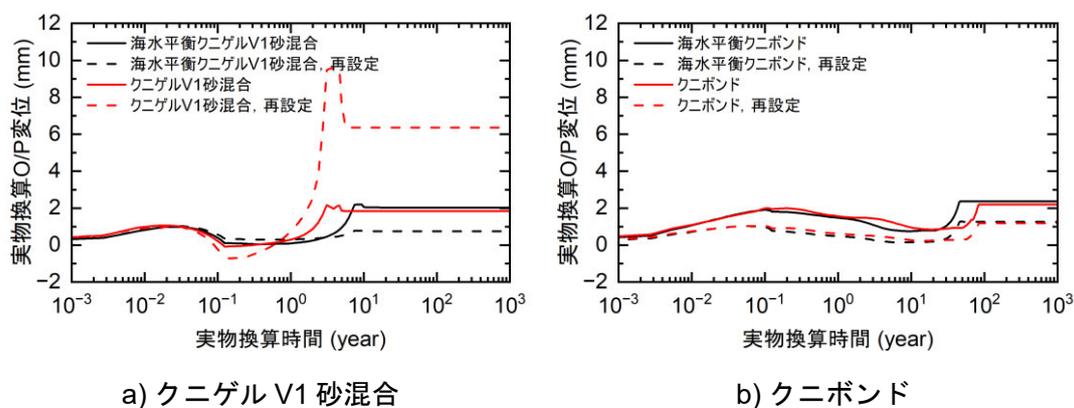


図 4-4-18 O/P 変位（人工海水浸透）へのヤング率の影響

参考文献

澤田昌孝, 岡田哲実, 長谷川琢磨 (2006): 高レベル放射性廃棄物処分地下施設の長期挙動予測評価プログラムの開発—緩衝材膨潤評価式の数値モデル化と熱・水・応力連成解析スキームの構築—, 電力中央研究所 研究報告, N05028.

第 5 章 分野間連携

5-1 はじめに

(1) 背景

高レベル放射性廃棄物の処分事業の実施に際しては、様々な技術の適用が必要である。処分事業においては、これらの技術を地質環境、工学技術（処分場の設計）および安全評価の3つの分野に区分し、これらの分野を有機的に結びつける、換言すればこれらの分野を連携することにより、事業を円滑にかつ安全に進めることを目指している。

このような趣旨に沿って、日本原子力研究開発機構（以降：JAEA）では分野内や分野間の連携を図りつつ、幌延や瑞浪での地下研究施設での作業を進めており、ここで蓄積された知見が将来の処分事業に生かされることが期待されている。

一方、高レベル放射性廃棄物処分事業の実施主体である原子力発電環境整備機構（以降：NUMO）においては、適切なサイト選定に向けたセーフティケースの構築を目指して作業を進め、これらの成果を「包括的技術報告：我が国における安全な地層処分の実現」として取りまとめている。本作業はあくまでも、現在の技術的な知見に基づき一般的なデータを用いて仮想的な作業を行っている。この作業を進める際には、3つの分野が連携して多様な地形、地質条件に則した地質環境モデルを作成している。

2017年に公表された科学的特性マップでは、特に輸送でも好ましい地域として沿岸域に焦点を当てており、これらの情勢を受けて本受託研究の前フェーズである「沿岸部処分システム高度化開発（平成27年度～平成30年度）」が、産業技術総合研究所（以降：産総研）、JAEA、原子力環境整備促進・資金管理センター（以降：原環センター）、電力中央研究所（以降：電中研）の4者共同研究としておこなわれた。これは複数機関による初めての沿岸部に係る共同研究である。当初、この事業では4機関はそれぞれの要素研究を遂行することとしていたが、研究が進むにつれて機関間や分野間の連携が可能ではないか、との意見が出されるようになってきた。その下地にあったのは共同研究の形をとったことである。各研究機関の研究者が顔を合わせて進捗を報告しあったことで、徐々に打ち解け合い、議論が活発化したことが最も大きな理由である。その後、連携を意識した多くのミーティングをおこなったが、専門分野が近い場合はたとえ研究機関が異なっても連携が十分になされたものの、分野間の連携には大きな困難があることがわかってきた。

分野間の連携に関しては、後述する **Supply list** および **Requirement list** の必要性や、実際の研究をもとにした地質環境から安全評価までの一連の流れを実施する必要性などが論じられた。しかしながら、当該事業はもともと要素研究の遂行が目的であったこともあり、具体的な成果とするには至らなかった。加えて、連携のための目的が定まっていなかったこと、実務者の協議体がなかったこと、連携にあたりリーダーシップを発揮する者の不在等が課題としてあげられた。

(2) 目的

以上の背景を受けて、2019年度（平成31年度）開始した受託研究「沿岸部処分システム評価確証技術開発」では、以下の目的・目標を設定したうえで、改めて分野間（内）連携を実施することとした。

- ・分野間連携を実施することにより、効率的な分野間連携のシステムを構築するとともに、各分野の研究成果の高度化を目指す
- ・分野内および分野間の連携により不確実性を低減するための効率的かつ実効的な調査・評価体系を構築する。
- ・特に分野内の連携により、分野での共通のゴールを設定することにより実施項目の網羅性をチェックし、今後開発・高度化が必要な研究課題を探索する。

分野間連携の具体的な検討を実施するにあたっては、実務者による協議体（分野間連携WGおよび工学特性WG）を設置し、分野間（内）連携の在り方や進め方を検討する。

5-2 分野間連携の進め方

(1) 基本方針

分野間連携については、前フェーズの受託研究「沿岸部処分システム高度化開発」において同様な試みがされているが、公開された成果はない。これまでの分野間連携では、各分野が提供できるデータリスト（Supply List）と他分野へ要求するデータリスト

（Requirement List）による連携を図ってきたが、この手法では、各分野での情報の共有ができて、具体的なアクションにつなげにくい。一方、NUMOのセーフティケースの構築に際してはSite Descriptive Model（SDM）（NUMO、2021）をインターフェースにした各分野間の連携が図られている。そこで、本事業での分野間連携に際しても、これと同様にSDMをインターフェースに連携を進めることとした（図5-2-1）。また、対象地点としては、これまでにデータが蓄積されており、今後とも調査が実施される予定の駿河湾地域と幌延沿岸域とした。

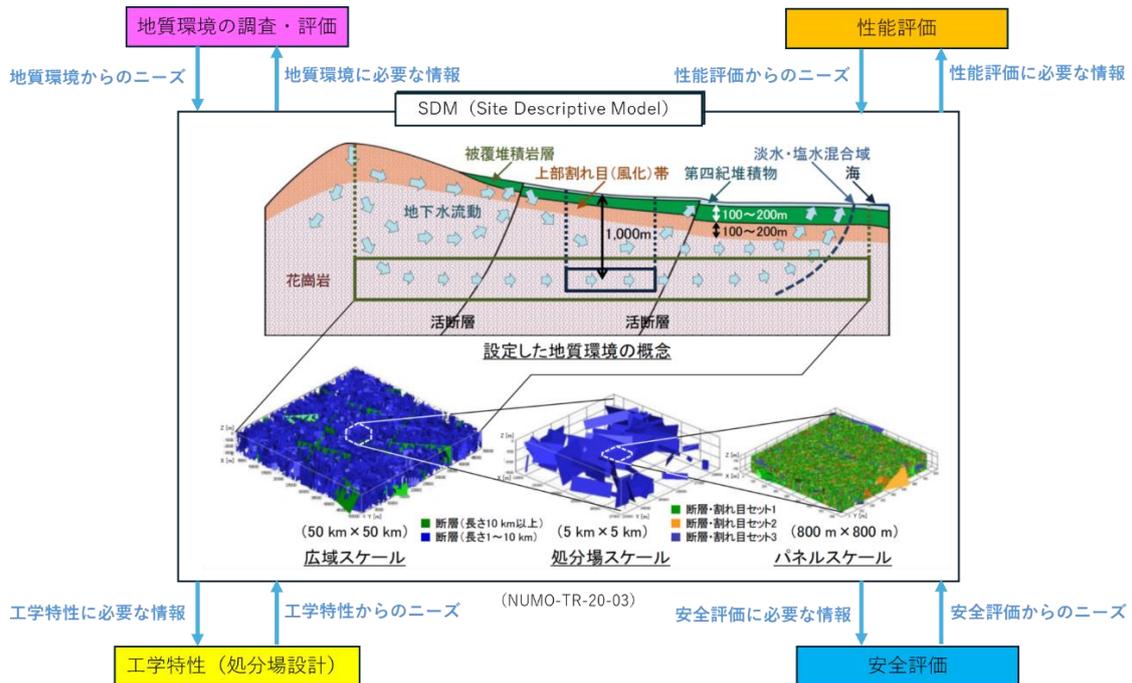


図 5-2-1 SDM をインターフェースとした分野間連携の概念

技術分野については、NUMO の包括的技術報告によれば、“地質環境の調査・評価”、“処分場の設計”および“安全評価”の 3 分野となっている。一方、先行するフィンランド Posiva 社 (Posiva,2012) による体系化されたセーフティケースでは、「処分システムの性能評価」と「閉鎖後の安全評価」を分けて展開しており、前者は建設段階以降の長期にわたる処分場の機能変遷などに係わる評価、後者は機能変遷に基づく安全評価としている。これに倣い、今回の検討では“性能評価”を含めた 4 分野の構造として取り扱うこととした (図 5-2-2)。

今回のプロジェクトには JAEA が参加しておらず、このため現状では処分場設計、安全評価の分野の参加がないため、当面は“地質環境の調査・評価”と“性能評価 (工学特性のうち緩衝材の性能評価など)”の 2 分野での連携から開始した。なお、一部の施設設計の関連研究者の助言を得ることにより、地質環境特性と工学特性の連携を試行した。

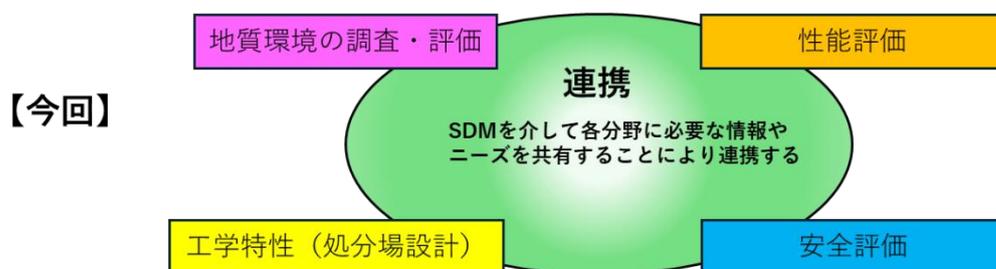
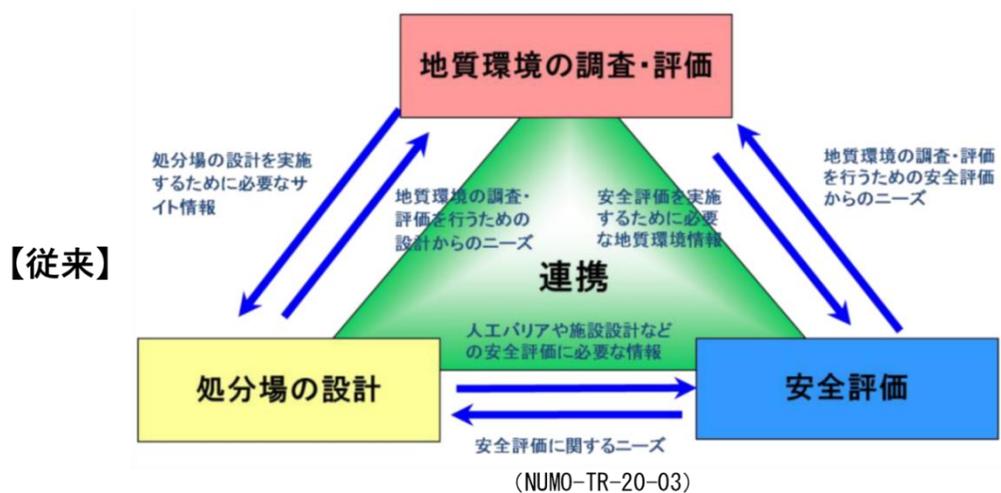


図 5-2-2 連携する分野

沿岸部を対象に初期の限定的なフィールドデータから SDM を構築するための手法やその際の不確実性の評価方法を具体化するような方向で連携を進め、分野間連携の在り方を検討する。検討された分野間連携の在り方に基づき本フェーズの共同研究を進め、連携の在り方をブラッシュアップするとともに、効率的な共同研究の推進に寄与する。

(2) WG の概要

背景でも述べたように、本受託事業は基本的には要素技術開発であり、分野間連携に関しては副次的な作業となる。すなわち要素技術開発を主体としてその中で分野間連携をすることにより、より効率的な研究開発を行うことになる。そのためには、各機関、さらには分野間の情報共有や共通の目標設定が必要となる。このための体制として、各研究機関で研究の実務を担当する研究者を構成委員とする分野間連携 WG を設置し、開催した。

共同研究に参加する産総研、原環センター、電中研から委員およびオブザーバーを選出した。また、JAEA からはこれまでの知見をもって本委員会をサポートしてもらうために“パートナー”として、実施主体の NUMO からは事業者の立場からの要望や助言を得るために“アドバイザー”として参加してもらうこととした。

分野間および分野内の連携については、当初は各分野間での情報共有やそれに伴う認識の統一に時間を要したため年に数回開催し、その後は全体計画に関する情報共有を目的に年2回の開催とした。必要に応じて開催時期を決定したが、同様のメンバーが出席する運営会議が開催された際には会議の後にも開催することとした。分野間連携WGでは地質環境特性分野および性能評価分野での機関間での詳細な議論ができなかった。このため、地質環境特性分野での分野内連携WGを、工学特性分野内での工学技術WGを設置・開催した。

5-3 分野間連携の概要

今フェーズにおける分野間（内）連携、さらには機関間（内）の連携については、本受託研究の各要素技術開発に合わせて鋭意実施してきた。これらの連携の全体像を図5-3-1に示す。また、主たる連携項目の今フェーズにおける全体計画（スケジュール）を表5-3-1に示す。

図5-3-1に示すように、今フェーズの本プロジェクト研究の実施機関は産総研、電中研、原環センターであり、それぞれの機関で実施している研究項目を枠内に記述すると共に、それぞれの研究項目間の連携を矢印で示した。このうち、工学特性WGで議論している人工材料の評価に関する連携を赤字で示した。受託研究機関以外として、JAEA（パートナー）およびNUMO（アドバイザー）を示し、これらとの連携についても矢印で示した。

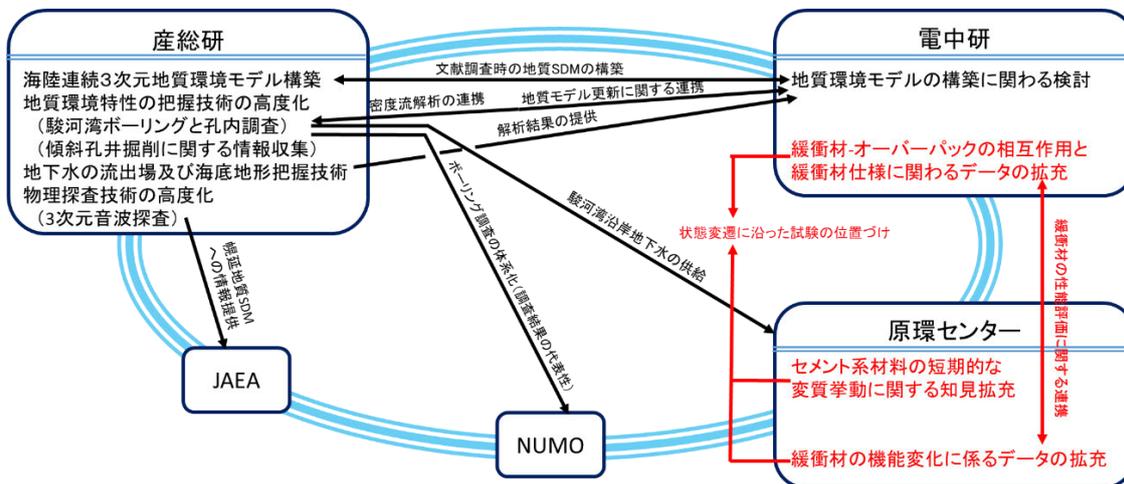


図 5-3-1 分野間（内）・機関間（内）連携の概要
（赤字：工学技術WGで取り扱う連携）

ここでは、表 5-3-1 に赤字でハイライトした 5 つの連携項目の概要を記述するとともに、5-4～5-6 でそれぞれの連携項目の成果、課題及び今後に向けての留意点について詳細を記述する。また、これらの概要を表 5-3-2 にまとめた。

表 5-3-1 分野間連携の主たる連携項目と実施スケジュール

連携項目	2019年度 (令和元年度)	2020年度 (令和2年度)	2021年度 (令和3年度)	2022年度 (令和4年度)	2023年度 (令和5年度)
分野間連携WG 工学技術WG	キックオフ				
文献調査時の地質モデルの構築 (CRIEPI+AIST)	キックオフ	事前協議、情報共有		モデル構築プロセス	モデルの構築 取りまとめ
地質モデルの検証 (CRIEPI+AIST)	モデルの作成、更新		掘削情報の提供		モデルの検証 取りまとめ
密度流解析の連携 (AIST+CRIEPI)		FGB2,3孔の掘削			情報共有
材料試験への地下水情報の提供 (RWMC+AIST)		データ取得		解析	解析、取りまとめ
材料試験への地下水情報の提供 (RWMC+AIST)		キックオフ 情報収集	地下水情報・ 地下水提供	地下水提供	取りまとめ
工学技術分野内の連携 (CRIEPI+RWMC)	キックオフ	情報共有と試験条件の調整	緩衝材の性能評価に関する連携	状態変遷の概念図	取りまとめ
ボーリング調査の体系化 (駿河湾ボーリングを例として)	キックオフ データフローダイアグラム		ボーリング掘削、物理検層、孔内試験	コア試験 (?)	変換解析 取りまとめ

(1) 駿河湾地域における地質環境モデルと現地ボーリング調査のデータ共有

駿河湾地域において電中研が構築する地質環境モデルの深部方向への不確実性を低減することを目的に、産総研が沿岸域で実施しているボーリング調査によって得られる各種データを供与する。

(2) 密度流解析での連携

産総研が駿河湾沿岸部の FGB-2 孔井を中心として範囲で実施している密度流解析の境界条件として、電中研が構築した 2021 年度（令和 3 年度）のモデルを陸側の側面として採用した。この結果を踏まえて、現状の解析範囲においては境界条件が FGB-2 孔付近の解析結果にほぼ影響を与えないことが分かったため、計算の安定性確保のため、境界条件は閉境界とした。

(3) 人工バリア構成材料の耐久性試験に対する実地下水採取

セメント系材料および緩衝材の耐久性に関して、再冠水までの処分場周辺の地下水組成の変遷を考慮して、それぞれの材料に対する試験を行う必要がある。沿岸域における初期から超長期に及ぶ地下水流動の変遷やそれに伴う処分場周辺の地下水の水質の変化については、地質環境特性分野において数々の知見を有しており、現在実施中のシステムティック解析では、これらの知見を踏まえて過去～現状～将来の一連の地下水変遷を検討する予

定である。これらの情報を共有することにより、よりの確な試験条件を設定することができると期待できる。また、FGB-2 孔において、事前に想定した深度に対する地下水水質に沿って、2 深度の地下水を採取し、これらの地下水を人工材料の耐久性試験に提供した。

(4) 緩衝材の性能評価に関する連携

緩衝材の機能変化、緩衝材-オーバーパックの相互作用と緩衝材仕様に関わるデータの拡充については、試験目的を踏まえて各機関で実施可能な技術を用いて検討を進めているが、個別の試験だけでみると、対象とするタイムスケールやシーンが限定されるため、数十年～数百年以上にわたる緩衝材の状態変遷を個別の試験だけではカバーすることができない。このため、沿岸部特有の地下水環境や時間軸を意識しつつ、緩衝材の状態変遷を概念的に整理し、状態変遷の理解を深める。

これまでに実施されたセメント系材料の変質試験と液相の分析結果について情報を共有して、今後、海水系地下水に於ける緩衝材の長期変遷評価に向けた試験条件等の設定の参考情報として利用する。

(5) ボーリング掘削・調査の体系化

地質環境特性に係る地質、地下水、地化学などの専門家、掘削、孔内調査の技術者や地下構造物建設に関連する関係研究者の助力と連携により、駿河湾での FGB-2 孔井の掘削、調査を通して得た知見に基づき、沿岸域での概要調査を考慮したボーリング掘削、調査の体系構築を試みた。

表 5-3-2 (1) 各連携項目の実績 (その1)

	連携の目的・目標			課題	次フェーズに向けた留意点	特記事項
	研究成果の高度化	調査・評価体系の構築	研究課題の探索 (抜け落ちの確認)			
駿河湾地域における地質環境モデルと現地ボーリング調査のデータ共有	幡谷・楠原(2023)で提案したPDCAプロセスに則って、不確実性を考慮した複数の地質モデルを構築し、地下水流動解析によって地質構造の違いが地下水流動に与える影響を評価し、その検討結果をフィードバックとして地質モデルの再検討を実施した。	—	—	本プロジェクトの実施スケジュールの都合上、初めに構築した地質モデルの評価と見直しを実施するよりも先に、ボーリング調査が設計されたため、地質モデルとボーリング調査の連携は不十分であった。	対象地域の地質の不確実性を把握・明示した上で、(ボーリング調査を含めた)各種調査の設計を行うことが望ましい。	調査が足りないならば、足りないなりにやりようがある。少なくとも、概要調査の時点では、できる調査の効果を最大化する努力をすることとして、調査量が足りないのは前提と考える。
塩水系地下水流動の評価に向けた連携	深層塩水系地下水流動を、実データと解析を組み合わせて検討した初めての事例である。	透水性の高い地域における塩水系地下水流動評価の体系化(手順書)に関しては、大きな進捗はあった。	—		透水性の低い地域を対象とした調査を行う必要がある。	解析側ではセルの大きさ以下の分解能を必要としないことを考慮し、具体的に、何を、どの程度の調査密度で調査するべきかを指示できるようにしておく。

表 5-3-1 (2) 各連携項目の実績 (その2)

	連携の目的・目標			課題	次フェーズに向けた留意点	特記事項
	研究成果の高度化	調査・評価体系の構築	研究課題の探索 (抜け落ちの確認)			
人工バリア構成材料の耐久性試験に対する実地下水採取	材料試験への地下水情報の提供	沿岸部の多様な地下水におけるセメント系材料の変質挙動やそれに伴う力学特性の変化に関してマップ化し、情報を示すことができた。ペントナイトの挙動に関連する地下水組成に関する情報（陽イオンの量やイオン強度）に基づいて試験計画や評価方法の検討をすることで、処分事業で活用できるデータの取りまとめや緩衝材の挙動の評価方法を示すことが可能となった。	—	—	連携に関わる課題は特にな い。	新たな地下水データがあれば、追加して地下水の類型化のデータ拡充や必要に応じて見直しをするなど継続して連携が必要（有益）である。
	人工バリア構成材料の耐久性試験に対する実地下水採取	試験例が少ない地下水による材料の挙動のデータが蓄積出来たと共に、模擬地下水を使用した試験で把握した材料の挙動に関し妥当性や相違点などを得ると共に、データの信頼性の向上させることが出来た。	—	—	ボーリング掘削前に沿岸域の地下水分布を考慮した採水深度を決めるのが困難である。地下での状態（還元雰囲気）での試験が必要な場合は、輸送（ボトルへの密封方法）や試験装置への考慮が必要である。	試験に必要な状態の地下水を使用できるよう、採取、輸送、前処理、試験の一連の過程における手順を関係者で確認、調整する必要がある。

表 5-3-2 (3) 各連携項目の実績 (その3)

	連携の目的・目標			課題	次フェーズに向けた留意点	特記事項
	研究成果の高度化	調査・評価体系の構築	研究課題の探索 (抜け落ちの確認)			
緩衝材の性能評価に関する連携	工学技術連携WGを設置し、「状態変遷の概念」を図化することで、緩衝材の時空間変化が明示され、各機関の試験の位置づけがよりはっきりした。これにより、どの時空間の位置で、どの試験や数値解析を結びつければ効率的に性能評価研究を進められるかが明確となり、連携が効率的になり、研究が高度化した事例を示すことが出来た。	—	「状態変遷の概念図」を作成することで、本事業で取り組みが出来なかった、緩衝材の高温時の挙動や長期的な時間経過の中での水質の変化などを考慮した研究を実施する必要があることが分かった。	処分場の環境は様々であり、かつ研究に取り組む関係者も多岐にわたる。このため、様々な環境下における状態変遷の概念図化や継続的に連携することは容易ではなく、幾つかの階層に分けた連携体制を構築することが必要である。	環境条件等を絞った連携の階層、複数の環境条件等も考慮した連携の階層、さらには、性能評価の前提のなる設計、施工、操業や、性能評価結果の利用先である安全評価等との連携の階層といったような対象範囲の異なる階層での連携体制を構築することが有効のように思われる。	
ボーリング掘削・調査の体系化	—	地質特性、掘削技術、水理特性の関係者（専門家）との議論、および共研参加機関以外の物理・力学専門家との議論を経て、限られた範囲ではあるが、ボーリング掘削・調査の体系化（手順書）を構築することが可能となった。	—	共研に施設設計や安全評価の専門家が不在で、これらの分野での連携が不可能であり、統合的な体系化ができなかった。 掘削対象岩体が未固結岩盤であったため、処分場に即した調査ができなかった。	連携の効果を高めるために、次期フェーズでは、処分場に適した対象岩体とすること、掘削位置を選定するための、事前の地質踏査、物理探査を実施すること、すべての分野の関係者が参加できる体制を構築する必要がある。	

5-4 分野間連携の目的・目標達成

今フェーズの分野間（内）連携の成果を連携の目的・目標である①連携を通して各分野の研究成果の高度化を図る、②連携により、不確実性を低減するための効率的かつ実効的な調査・評価体系を構築する、③分野ごとの共通のゴールを設定することにより、今後開発・高度化が必要な研究課題を探索する、を如何に達成したかの観点で成果として取りまとめた。

(1) 駿河湾地域における地質環境モデルと現地ボーリング調査のデータ共有

電中研では、駿河湾地域を事例研究地域として、地質の不確実性が地下水流動系に与える影響を検討した。

地質モデルの検討では、まず、地質モデル化のプロセスを吟味・明示して、PDCA プロセスに落とし込んだ。この PDCA プロセスの中で重要な視点の一つは、地質分布・地質構造に関わる限られたデータを説明する複数の地質モデルを構築することにより、地質分布・地質構造の不確実性を表現することである。そして、複数モデルに基づく複数のケースの地下水流動解析を行い、その解析結果を地質モデル化にフィードバックし、モデルの絞り込みやそのための調査計画の立案などを行う。さらに、これらを通じて、地質分野と地下水分野等の連携の考え方や留意点等について提言した。これらは幡谷・楠原（2023）にまとめられた。

これと並行して、上記の研究と重なる部分があるが、文献調査に基づく地質モデル化と新たに得られたボーリングデータを反映させた地質モデル化の見直しを行った。

本検討では、既往文献・資料のデータを用いた地質モデル構築を令和元年度～2年度に実施し、令和4年度までは令和元年度～2年度に構築した地質モデルに基づいて、地下水流動解析を実施した。しかし、事例研究地域の地下地質に関する既存の一次データは少なく、特に完新統で覆われている沿岸域でのデータは皆無であったことから、地下の地質分布・地質構造に関しては不確実性が高かった。しかし、地下水流動解析における感度解析により、地下水流動への影響が大きい地質分布・地質構造が提案され、それを反映した地質モデルの構築を行った。

電中研の机上検討と並行して、本事業では、令和4年度までに、産総研により富士川河口左岸で FGB-2 孔（掘削深度 800 m）が掘削されており、各種現地調査データが得られていた。そこで令和5年度は、FGB-2 孔のデータも反映させた地質モデルを再構築し、そのモデルに基づいた地下水流動モデルに基づき再度解析を実施した。

このような事例検討を通じて以下のような留意点を得た、あるいは、体験した。これらについては、幡谷・楠原（2023）の中で取り上げられている。

- 地質分布・地質構造に関わる地質概念モデルは多数考えることができるが、蓋然性が高い地質要素に絞っても、その組合せは膨大なものとなる。このため、地質担当者が地質モデルを構築する際に、地下水担当者より、水理学的な影響が大きいと予想される地質

要素を助言してもらい、それを絞り込みに反映した。

- 地質担当者は、事例研究地域の地質の不確実性を複数の地質モデルで表現して、構築された地質モデルを地下水担当者に提示した。地下水担当者は、複数の地質モデルのそれぞれに基づいて地下水流動解析を実施することで、地質の不確実性が地下水流動系に与える影響を評価した。
- 地下水担当者は、地下水流動解析の結果に基づいて地質モデルに対するフィードバックを行い、地質担当者は、それを参考にして地質モデルを再構築した。再構築された地質モデルが地下水の研究者に受け渡され、再度地下水流動解析が実施された。

このように、地質担当者と地下水担当者が、相手方の専門分野の実施内容・ニーズ・手法上の限界などを理解した上で、モデルのやり取りを通じて議論を行うことによって、地質モデルの構築・評価を実効的に進めることができたと考えている。

本検討は、地質環境分野の中での地質分野と地下水分野の連携であったが、他の分野の間でも同様の考えが成り立つ。専門分野が異なる者どうしの相互理解と、それをベースにしたモデルのやり取りが、地質モデル（さらにはそれを含む地質環境モデル）の構築・評価において重要であると考えられる。

（2）密度流解析での連携

地層処分の対象となるような深層の塩水系地下水の流動評価において、国内外の研究事例においても実測データと数値解析を組み合わせる例は見られず、その体系化に関しては入口の段階であると言わざるを得ない。本事業では、地下水の専門家が既存研究や過年度に実施した FGB 孔と SKB 孔の調査結果を参考にして、海底下を含めた塩水系地下水流動評価のための計画を策定し、ボーリング掘削の専門家と議論することによって、解析結果のキャリブレーションに資する地下水の調査深度を決定し、ボーリング孔での地下水流向流速測定などの技術導入について連携した。

その成果として、極めて地下水流動が活発な本調査地点においても、塩水系地下水が極めて遅い流速（ 10^{-7}m/s 以下）ながらも流動していることが明らかとなった。これらの連携により、実データと解析の両方から塩水系地下水流動を評価するためには、地下水年代（ ^{14}C 年代等）のプロファイルを指標として用いることの必要性が示され、塩水系地下水の流動評価において実効的かつ効率的な調査・評価体系（手順書）の構築達成に前進した。

（3）人工バリア構成材料の耐久性試験に対する実地下水採取

① 材料試験への地下水情報の提供

沿岸部を想定した材料試験において使用する模擬地下水の組成の設定にあたり、地質環境分野で産総研が取得した約 70 地点の地下水組成の分析データを使用し、研究成果の高

度化をはかった。原環センターが実施したセメント系材料の試験（セメント系材料の短期的な変質挙動に関する知見拡充）では、変質に関連する溶存イオンなどの情報を基に地下水を類型化して、それらの組成に基づき模擬地下水を作製した。これにより、沿岸部の多様な地下水におけるセメント系材料の変質挙動やそれに伴う力学特性の変化に関してマップ化し、情報を示すことができた。緩衝材の試験（緩衝材の機能変化に関するデータの拡充）では、ベントナイトの挙動に関連する地下水組成に関する情報（陽イオンの量やイオン強度）に基づいて試験計画や評価方法の検討をすることで、処分事業で活用できるデータの取りまとめや緩衝材の挙動の評価方法を示すことが可能となった。

② 人工バリア構成材料の耐久性試験に対する実地下水採取

セメント系材料や緩衝材の室内試験において実際の地下水を使用してデータを取得することにより研究成果の高度化をはかった。これまでに試験例が少ない地下水による材料の挙動のデータが蓄積出来、模擬地下水を使用した試験で把握した材料の挙動に関し妥当性や相違点などを得ると共に、データの信頼性の向上させることが出来た。また、ボーリング時の地下水の採取、輸送（冷温状態にて）、地下水の前処理、材料試験によるデータの取得の一連の工程を既存の方法を組み合わせることで、実際の地下水による試験が実施可能なことを把握できた。

（４）緩衝材の性能評価に関する連携

本事業開始当初、原環センターと電中研とで個別設定した課題を解決するための試験や解析を実施していたため、双方の背景を含む検討内容に関する相互理解に難しさを感じた。相互理解が不十分であることにより、機関間の議論や知見の共有を効果的に行うことも難しくなると感じた。そこで、多様な視点から研究の高度化を図ると共に、本事業における緩衝材の性能評価に関わる課題の見落としを避けた取り組みに発展させるため、工学技術連携 WG を設置し、双方の検討内容を共有することから開始した。検討の背景や方法論に関する双方の認識が進んだ段階で、沿岸環境における緩衝材の「状態変遷の概念」を図化（「見える化」）した。緩衝材に対する外的因子（廃棄体、岩盤、地下水、セメント系材料）を考慮し、緩衝材の各部位で起こりうる事象を既往知見や本事業の実施内容に基づいて整理したことで、緩衝材の時空間変化が明示され、各機関の試験の位置づけが可視化された。これにより、どの時空間の位置で、どの試験や数値解析を結びつければ効率的に性能評価研究を進められるかが明確となり、個別研究だけでは対応できない評価の創出に繋がった。「状態変遷の概念図」という 1 つのツールを使うことで、連携が効率的になり、研究が高度化した事例を示すことができた。

「状態変遷の概念図」を作成することで、各機関、試験の位置づけが明確になっただけでなく、本事業で取り組みが出来なかった、緩衝材の高温時の挙動や長期的な時間経過の

中での岩盤中地下水の水質の変化などを考慮した研究を実施する必要がある（未実施の研究項目の洗い出し）ことを示すことができた。

（５）ボーリング掘削・調査の体系化

駿河湾沿岸域における FGB-2 孔井での掘削・調査の実績やこれまでの知見を踏まえた地質特性、水理特性の関係者（専門家）との議論、および共研参加機関以外の掘削技術、孔内調査および物理・力学特性の専門家・技術者との議論を経て、限られた範囲ではあるが、ボーリング掘削・調査の体系（手順）を構築することが可能となった。

5-5 分野間連携の課題

（１）駿河湾地域における地質環境モデルと現地ボーリング調査のデータ共有

この事業では、繰り返しアプローチを実践したとしているが、実際には、分野ごとに PCDA サイクルがあり、Plan、Do、Check、Act それぞれの段階で必要に応じ互いに干渉／フィードバックしあうという言い方が妥当であると考えられる。幡谷・楠原（2023）ではチェックにおける地下水分野からのフィードバックが取り上げられているが、Act や Plan における目標設定や調査の協働の計画、Do における地下水情報の取り込みなども考えられる。対岩盤分野等にも同様なことが言えるので、その連携は複雑ではあるが、ダム建設など過去の事業ではそれを実践して来ており、可能なことであると考えられる。

幡谷・楠原（2023）は他分野との連携の在り方について、地質分野の視点からしか論じていない。しかし、地下水分野や岩盤分野など他分野の視点で PDCA サイクル、さらには、全分野の総合化に関わる過去の経験／暗黙知を形式知あるいは例示することが、直近の課題であろう。本稿における分野間連携の基本方針でも触れられているが、データのやり取りだけで済む話ではなく、背景にある連携の考え方の共有が重要である。また、そのためには、地質環境調査全般にわたって俯瞰できるかどうかが決定的に重要である。

仮に、まず一孔のボーリング掘削計画を立てるとすれば、複数の目的を標榜することから議論すべきである。今フェーズでは、それができなかった。議論したからといって、全ての分野の要求を満足することは難しいと予想され、欲しいデータの優劣をつけることになろう。何を優先して何を捨てるか、その議論の繰り返しこそが、重要なエクササイズであり、課題である。何を優先せねばならないか、何を捨てられるかについては、分野間の干渉／フィードバックが大きな役割を果たすことになる。幡谷・楠原（2023）では、地下水流動解析からのフィードバックの一例として、広域地下水流動への影響が小さい高透水性岩体／貫入岩というものがあった。これに基づいて、新たな地質モデルの構築では、深部の貫入岩体をモデルから外している。これを受ければ、次のボーリング調査では、深部貫入岩の調査の優先順位を落とすことになる。

(2) 密度流解析での連携

(1) の連携の成果としてボーリング調査による実測データと塩水系地下水の流動評価（密度流解析）の指標の高度化に資する成果を挙げた。しかしながら、本事業において実施した3次元的な塩分濃度・温度を含めた密度流解析を実施したが、実測データと解析データそれぞれに適用限界があり、両者共に密な連携を継続し、評価指標を精査していく必要がある。さらに、密度流解析での検討により、実測での海底地形の把握や海域での水温プロファイルの取得の重要性が示された。これらの点に対する調査技術の開発と解析技術の高度化は課題である。

(3) 人工バリア構成材料の耐久性試験に対する実地下水採取

① 材料試験への地下水情報の提供

この連携では、既に取得した地下水データの情報提供であり、材料試験で使用した地下水の組成に関する情報は、材料の特性を把握するために必要な溶存イオンの量などの基本的な情報が地質環境分野で取得した地下水の分析データに含まれていたため、連携に関わる課題となる点は特になかった。

② 人工バリア構成材料の耐久性試験に対する実地下水採取

本事業では、淡水系地下水～塩淡境界～塩水系地下水塩分濃度の地下水の採取をおこない、ほぼ狙い通りの異なる塩分濃度を持つ複数の地下水試料を得ることができた。ボーリング孔からの一般的な採水手順は、ボーリング孔を掘削し終わった後、電気検層をかけてケーシングを入れ、その後パーフォレーションによって狙った塩分濃度の地下水を採取するというものである。ただし、本事業のように過年度に実施したボーリング結果がある場合や、比抵抗探査やパイロットボーリングなどにより、ある程度塩淡境界の位置が予想できる場合には、本事業のFGB-2孔やFGB-3孔で実施したような、掘削しつつ（シングルパッカーを用いて）揚水および採水を実施することが可能である。

材料試験においては、既存の装置を使用して酸化雰囲気下で試験を実施したため、試験前の地下水の処理（大気雰囲気での酸化還元電位の安定化や鉄の沈殿や微生物などのろ過による除去）をして試験を実施した。地下での状態（還元雰囲気）での試験が必要な場合は、輸送（ボトルへの密封方法）や試験装置への考慮が必要である。

(4) 緩衝材の性能評価に関する連携

本事業は「沿岸部」における処分場建設を前提としているため、建設直後から海水系地下水が緩衝材に浸透するという限定された環境条件における状態変遷の概念図化であった。また、性能評価の視点からの概念図化であった。一方で、処分場の環境は様々なものが想定され、かつ研究に取り組む関係者も多岐にわたる。R5年度では、一例として「平成30年度～令和4年度ニアフィールドシステム評価確証技術開発」（ニアフィールド事

業)を比較対象とした。この比較において、沿岸部事業が沿岸部の多様・特有な地下水環境での現象、状態変遷を対象としているのに対し、ニアフィールド事業では主に淡水や幌延 URL の地下水環境下での現象、状態変遷を対象としている点が異なることがわかり、対象とする現象や研究手法、用いられた試験用水等の観点で整理すると、本事業とニアフィールド事業の違いがより明確に理解することができた。しかし、様々な環境条件を包括した状態変遷の概念図化や継続的に連携することは容易ではない。分野間連携を効果的に進めるためには、連携する分野や、想定する場面や環境条件を選定するなど、例えば、地質条件や地下水条件等の幾つかの階層に分けた連携体制を構築することが必要になると思われる。

(5) ボーリング掘削・調査の体系化

概要調査に際しては、最初に地表からの地質踏査、物理探査などにより地質環境特性に係るモデルを構築したうえで、これらの結果に基づき掘削位置や深度を決定したうえでボーリング掘削・調査を行うことになるが、本事業では時間的、社会的な制約により、これらの事前の調査を十分に実施し、その結果を踏まえたうえでボーリング掘削・調査を実施することができなかった。また、地下深部の文献情報がほとんどなく、地下深部の地質の不確実性を低減できず、処分場として適正な岩体を対象とした調査ができなかった。

共同研究に施設設計や安全評価の分野の専門家が不在で、これらの分野での連携が不可能であり、統合的な体系化ができなかった。

5-6 次フェーズに向けての留意点

(1) 駿河湾地域における地質環境モデルと現地ボーリング調査のデータ共有

地層処分事業における所謂「地質環境調査」における留意点については、5.3.1や5.4.1ですでに述べたが、全体の「俯瞰」が最も重要であると考えられる。各分野の調査・評価の考え方を理解し、それらを体系化する姿勢を持つことである。それぞれの専門分野には、優秀な専門家がいるかもしれないが、俯瞰できる人材は相対的にみてごくわずかと言わざるを得ないので、このような人材を作ること、活用することが大切である。各分野の細かい話は、それぞれの専門家に任せればよい。

また、地質分布・地質構造の不確実性を低減するには、基本的には新たな地質調査を実施するしかないが、やれば必ず低減するというものではない。調査によって、どのような仮説が棄却され、どのような仮説が生まれたかを考察し(リスク分析)、それが許容できるものかどうかを評価し(リスク評価)、次の調査(リスク対応)を考えねばならない。これはリスクマネジメント・プロセスとも捉えられる。つまり、地質調査を俯瞰するプロジェクトマネージャーは、同時にリスクマネージャーであって欲しい。

(2) 密度流解析での連携

次フェーズに向けての留意点として、分野間（内）での連携を円滑かつ実効的に推進するにあたり、ボーリング掘削、海域調査共に多くの労力・資金がかかるため、予め解析担当者から、何を・どの程度の密度で調査すべきかを指示できる体系を整えることが必要である。そのためには、地下水の専門家、ボーリング掘削の専門家および解析の専門家による密な連携を進めていく必要がある。また、現状では、沿岸部および海底下での深層の塩水系地下水に関するデータの蓄積がなく、異なる環境下において本事業で得られた評価手法の体系化をチューニングしていくことが求められる。本事業では地質の透水性が高く動水勾配の大きい地域（地下水の流速が速い地域）での調査を実施してきたが、今後は地質の透水性の低い地域も対象として、本事業で実施したように分野間の連携を取りつつ調査を行うことで、そのような地質環境における調査・評価手法の体系化を進める必要がある。

(3) 人工バリア構成材料の耐久性試験に対する実地下水採取

① 材料試験への地下水情報の提供

新たな地下水データがあれば、追加して地下水の類型化のデータ拡充や必要に応じて見直しをするなど継続した連携が必要（有益）である。また、今後の材料の特性試験や地下水のデータ取得においては、着目する材料の挙動等によって必要となる地下水に関する情報（分析項目）は様々であることから、ボーリング掘削・調査の体系化とも関連するが、工学技術分野から地質環境分野へ必要な情報（分析項目）の伝達などの連携が地下水データの蓄積にあたり有益と考えられる。

② 人工バリア構成材料の耐久性試験に対する実地下水採取

本事業の材料試験では十分な品質の地下水で試験が実施できた。試験に必要な状態の地下水を使用できるよう、採取、輸送、前処理、試験の一連の過程における手順を関係者で確認、調整する必要がある。特に地下水分野と材料分野で協力して実施するため、互いの実施内容を誤解する可能性が少なからずともあることに留意し、丁寧に確認をするなどして連携する必要がある。また、ボーリングの工程の進捗に合わせた試験の開始時期の柔軟な対応などの工程の連携が必要となる場合がある。

(4) 緩衝材の性能評価に関する連携

環境条件等を絞った連携の階層、複数の環境条件等も考慮した連携の階層、さらには、性能評価の前提となる設計、施工、操業分野や、性能評価結果の利用先である安全評価等との連携の階層といったような対象範囲の異なる連携体制を構築することが有効のように思われる。

(5) ボーリング掘削・調査の体系化

連携の効果を高めるために、次期フェーズでは、処分場に適した対象岩体とすること、掘削位置を選定するための、事前の地質踏査、物理探査を実施すること、すべての分野の関係者が参加できる体制を構築する必要がある。

5-7 おわりに

今フェーズの分野間さらには機関間での連携を通して、いろいろな成果を得ることができたが、様々な課題も明らかになってきた。これらを踏まえて、今後に向けた留意点を以下にまとめる。

- 今フェーズの最初に効率的な連携を実施するために、実務者による議論の場として分野間連携WGを設置した。しかしながら初年度は効率的な議論が進まなかった。この理由として、分野によって言葉の定義が違う、分野が同じでも機関によって目標設定が異なる、などの齟齬がある。そのため、相互理解するための情報共有が必要となる。次フェーズでは、この点を前提として、相互理解するために情報共有を密に行い、WGを効率的な情報交換・議論の場としたい。
- 今フェーズでは要素技術開発を主体とした研究計画に基づき研究開発が進んだため、スケジュールの調整や実施項目に齟齬が生じた。連携による成果の高度化を意識して、初期の要素技術開発の計画を立案する必要がある。
- 今フェーズの連携は参加する分野が「地質環境分野」と「性能評価」の2分野での連携であり、4分野の総合的な連携を図ることが困難であった。次フェーズでは「工学特性（処分場の設計）」と「安全評価」の分野が参加することになった。総合的な連携をすることで、より現実的な調査・評価の体系化ができると想定されることから、次フェーズで他のプロジェクトに移動する性能評価の分野との連携が望まれる。

参考文献

- 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、NUMO-TR-20-03.
- 幡谷竜太・楠原文武（2023）地質モデルの構築とその不確実性への対処に関わる提言、電力中央研究所報告、SS22012.
- Posiva(2012), Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto – Synthesis 2012, POSIVA 2012-12.

第6章 まとめ

6-1 まとめ

(1) 海陸連続3次元地質環境モデルの構築手法の高度化

① 海陸連続3次元地質環境モデル構築に係るデータセットの整備とモデルの構築

本事業では、将来的に複数の処分サイトの候補地が出てきた際に、国民やステークホルダーとの対話や議論の土台となるような地質環境モデルの構築手法の確立を目的に、公的機関から出されている全国を対象とした地質環境情報（陸域や海域の地形や地質情報）をデータセットとしてとりまとめ、それを用いて全国55箇所の島嶼や海岸平野を対象に、地質モデルならびに地下水モデルの構築を実施した。モデルの範囲は、一部の地域を除いて1地域20km×50km×3km（深度）とした、地質モデルの作成にあたっては、データ発行機関ごとに異なる定義で実施されている地質区分等の情報を、産総研の堆積層標高データにおける地質年代をもとにした分類に再定義し、AIを用いてモデル化を行った。

今回の地質モデルの作成にあたっては、統計学的手法を用いた地質モデルと専門家によるエキスパートジャッジを含む地質モデルを作成した。ここでいうエキスパートジャッジを含むモデルとは、表層地質図における断層や褶曲の情報を地下まで反映したモデルのことであり、統計モデルとは、これらの情報を加味しないモデルのことである。

本事業において2種類のモデルを構築した理由は、エキスパートジャッジの有無がこれらの地質構造概念モデルに基づいた地下水流動解析結果にどのような影響を与えるのかを評価するためであり、両者を比較することで、地層処分事業の段階を進めるために重要な調査のポイントを明らかにすることができると考えた。

エキスパートモデルを用いた地下水流動解析では、2次元ではあるが、塩分濃度分布、全水頭、温度分布などを再現し、特に幌延沿岸部における塩分濃度分布では、過年度事業で取得したMTを用いた比抵抗断面図と類似した結果を得ることができた。

今回、とりまとめたデータセットやモデル化手法については、地層処分だけでなく、二酸化炭素の地中貯留など沿岸深部を対象とした別の事業においても、非常に有効だと考える。

② 地質環境モデルの構築と地下水流動解析の高度化

本事業では、調査、地質のモデル化、地下水のモデル化、地下水モデルの校正を繰り返すことにより、沿岸部における地質環境モデルの構築フローの高度化を図るとともに、地質・地下水モデルの不確実性低減を検討した。ボーリング掘削に時間を要し、想定した地層が現れなかったため、検討自体は1本のボーリング調査結果の反映までにとどまっている。

本研究における評価対象領域は、富士川流域である甲府盆地までの非常に広い領域が想定された。深度方向には5km程度までのモデルを作成し、地下水流動解析を実施したところ、分水嶺は富士山山麓から駿河湾の領域となった。このため、富士山山麓から駿河湾を評価対象領域とした。まず、既往文献・資料のデータを用いて、対象領域における地質の不確実性を複数のモデルで表現する試みを実施した。神縄断層の西方延長、富士山体直下の新第

三系貫入岩、富士川河口沖の第四系貫入岩などの分布の有無を考慮し、合計 7 つの地質モデルを構築し、地下水流動解析に引き渡した。評価領域は、富士山周辺で地下水利用が活発であり、白糸の滝・湧玉池など有名な湧水もあり、地下水に関する文献は多かった。主な地下水流動経路は、溶岩などの火山噴出物が分布する浅部の情報が多い。浅部では地下水が豊富にあるが、深部は地下水利用の観点では開発の必要がないため、既存の文献情報は極めて少なかった。地質情報についても、本地点は火山噴出物に覆われており、地質観察が難しいことから、深部の情報は少なかった。このため、地質モデルは、非常に大きな不確実性を有していたと考えられる。地下水モデルも、多く調べられている湧水などの情報では、浅部の評価は可能であるが、深部の評価は困難であった。これは、文献調査データを用いた逆解析、感度解析などからも明らかであった。

地下水流動解析の結果から得られたフィードバックを参考にして、第四系堆積岩類の空間分布を見直した。ボーリング調査では深度 800 m まで更新統の堆積物が分布すると考えられることから、断層運動による沈降と富士川・富士山からの礫・砂の供給によるものと解釈し、沿岸陸域では広く第四系が分布しているモデルに修正した。また、駿河湾海底と富士山体直下の第四系の分布についてもモデルを見直した。ボーリング調査では、深度 800 m まで掘削したものの、第三紀層に相当する地層は確認できなかった。このことから、富士川断層などの断層活動だけでなく、富士川による洗掘もかなり激しかったものと想定された。また、第三紀層などの深部の地層に関する情報は得られなかった。一方で、第四紀層は広く広がっていることが想定された。このため、第四紀層の広がりを見直し、モデルの修正を実施した。ボーリング孔での地下水調査結果では、地下水の涵養標高、滞留時間などが分かった。しかしながら、塩淡水境界は比較的浅く（深度 100～200 m）、静水圧分布に近いこと、地下水流動が活発ではないこと、深度 200 m 以深は海水由来の塩水地下水であったことから、深部の陸域の情報を評価することが困難であった。このため、地下水モデルの校正においても、第四紀層よりも上部の地層しか不確実性を低減できなかった。さらに、グローバル感度解析により深部地質区分の透水係数の推定感度が低いこと、逆解析におけるボーリングデータの重み付けは難しいことが確認された。ボーリングデータの重みを大きくするほど、ボーリング孔のデータに計算値が整合することが確認できた。このため、ボーリングデータの重み付けは、解析の目的に合わせて調整されることが望ましいと考えられた。

これらの検討結果から、本地点では、地質・地下水モデルともに、文献調査と一本のボーリング調査では、深部の不確実性はほとんど減らすことができなかった。このように、事前情報が十分でなく、変動が大きいところでは評価が難しく、調査量の拡充が必要不可欠であると考えられた。また、深部の地層の情報は、文献調査など既存の情報だけでは十分に把握できない場合があると考えられた。調査・評価計画の立案では、深部の地層の情報を取得できるように検討する必要がある。さらに、滞留時間や流路の情報を持つ地下水年代や地下水中の同位体比などを取得することは、地下水流況の評価だけでなく、地下水モデルの校正にも有益であると考えられた。

ここで使用した逆解析や感度解析に関わる数値解析技術は、地下水に関わる観測値（水圧や水質など）が地下水モデルの更新や校正に寄与できるかどうか定量化できる。これは、不確実性が高く調査量の拡充が必要な領域を定量的に議論することに有益であると考えられる。

③ 塩淡水境界近傍における地下水流動解析の高度化

本事業では、駿河湾沿岸部を対象に 2 次元および 3 次元の密度流解析を実施し、FGB-2 孔で取得した現地データとの検証を実施した。その結果、現地データと解析結果を一致させるまでには至らなかったが、現地データで得られた地下水年代分布や塩分濃度分布が解析でも再現される可能性があること、沿岸域の塩淡水境界の形状は、表層地質の透水性や涵養フラックス、透水性の異方性などにより変化すること、さらに地質環境によっては温度による密度変化も塩分濃度の分布に少なからず影響を与える可能性があることなどが示された。FGB-2 孔でのボーリング調査結果と本解析を照らし合わせると、塩淡水境界付近では地下水流動が非常に遅く実測が困難である可能性があることから、原位置での地下水年代の鉛直分布はモデルの検証に有用であると言える。また、ボーリング孔での温度測定は、比較的精度よく簡便、かつ連続的に測定できる項目であるため、塩分濃度のみならず温度を含めた密度流解析による評価手法の高度化が求められる。本事業で得られた成果をさらに追及し、駿河湾沿岸部のような陸域地下水流動の活発な地域における塩水系地下水流動評価技術の体系を進める必要がある。一方で、岩盤地質のような透水性の低い地質環境における塩淡水境界評価は未発展と言え、今後そのような地域の現地調査及び流動解析が求められる。さらに、これまでの沿岸部での塩淡水境界形状に関する知見を集約し、沿岸部における塩水系地下水流動と地質環境の類型化を進めることが必要である。

（2）海陸連続 3 次元地質環境モデルの妥当性の検証に向けたデータ取得方法の高度化

① 陸域から海域にかけての地質環境特性の把握技術の高度化

本事業では、沿岸部を対象とした海陸連続の地質環境モデルの妥当性を検証するための 1 つの手法として、海岸線に近い陸域でのボーリング掘削を実施した。沿岸部、とくに海域においては、陸域と比較して地下深部のデータを直接的に得ることは難しい。そのため、モデル化による場の推定が重要となるが、モデルの解析結果のもつ不確実性を実際の現場データ（原位置データ）と比較して検証しておくことは極めて重要であり、本事業の主題である。また、ボーリング掘削によって得られた情報は精密な塩淡水境界近傍の地下水モデルを作成する際の概念モデルの構築においても非常に貴重なものとなり。本事業ではモデル化が実施された駿河湾北部の沿岸部に深度 800m の調査孔を掘削し、物理検層や採水・分析にとどまらず、新たな手法を用いた応力測定、原位置での流向流速測定、地下温度プロファイルの測定など、これまで実施されてこなかった調査も含めて実施するとともに、それらのデータを用いた詳細な概念モデルの作成に取り組み、塩淡水境界近傍の淡水と塩水の動きを定量的に示した。本事業で掘削した調査孔（FGB-2 および FGB-3 孔）で得られた結果を、過

年度に実施した SKB 孔での調査結果に照らすと、両者には共通点が多いことがわかった。すなわち、2つの地点で同様のメカニズムが生じている可能性があり、これを解明することが、塩淡水境界より下位の塩水系地下水の一般的な特徴を知るための近道になるだろう。

② 地下水の流出場及び海底地形把握技術の高度化

本事業では、陸域地下水の流出場の特定手法や流出している海底湧出地下水から陸域地下水の化学的特徴の推定手法について高度化を行った。具体的には、ROV と高精度音響カメラの組み合わせによる湧出水の検出や面的湧出量の評価技術、および潜水調査が困難な水深帯における湧出水の採水技術について、実海域（駿河湾）で検証して高度化した。また、採水した湧出水の地化学成分から湧出水を構成する陸域地下水の起源を特定し、沿岸部における陸と海の地下水の連続性を示した。さらに、駿河湾での海域調査の実績を踏まえて、沿岸部の湧出水の探査の際に考慮すべき海象等の現地条件を整理した。湧出水の探査手法については、近年の海洋観測機器の発展を踏まえて文献収集を行い、マルチビーム測深機（MBES）や異なる周波数での音響探査の適用可能性や、ウォーターカラムデータの解析における課題を整理した。

③ 物理探査の高度化

本事業では、測定手法の制限から、これまでデータの空白域となっている沿岸部浅海域において、より精度の高い地下地質構造データを取得することを目的に、水深 5～20m 程度でも調査可能な小型船舶を用いた曳航式音波探査手法の高度化を実施した。

もっとも海洋生態系への影響が小さいとされる非パルス型振源を用いた曳航式探査では、一番の課題である出力の向上と安定性の確保にむけて一定の道筋をつけることができた。今後は、より共振を低減させ、また複数の振源を同時発振させることで、さらなる可探深度の向上が見込まれる。既存のパルス型振源を用いた曳航式探査では、振源ごとの性能や解像度などを整理することができた。また海底ケーブル敷設（OBC）探査と比較しても見劣りしない精度を持っていることが確認された。今回の結果から、小型船舶を用いた曳航式探査手法を高度化させていくことは、浅海域におけるより深い深度の精密な情報を取得することが可能となり、海陸連続の地質環境モデルの作成に資するという観点から、非常に有益であることが示された。今後は、海底湧出地下水の流出機構を含む水みちとしての断層を含む岩盤の亀裂の評価や、他の海域調査を含めた上での調査の体系化を進めていく必要がある。

（3）沿岸海底下特有の地質環境に着目した工学技術の高度化

① セメント系材料の短期的な変質挙動に関する知見拡充

地下水に含まれる成分及びその組成が、処分場のセメント系材料に対して及ぼす影響の有無について体系的に整理を進めていくことで、影響の予測やその対策に必要なデータ

タなどの、支保工及び覆工の設計に反映できる情報を取りまとめた。化学変質への影響が考えられる HCO_3^- 、 SO_4^{2-} および Mg^{2+} 等に注目して沿岸部の地下水を類型化し、その代表的な組成の模擬地下水に加えボーリングによって得られた地下水を用いて、セメントペースト試料及びコンクリート試料の浸漬試験を実施した。化学変質に関する分析と変質部の力学的特性に関するナノインデンテーション法による硬度測定により、地下水の化学組成が強度やヤング率などの力学的特性に与える影響についてマップ図を作成し体系的に整理した。このように、二次鉱物の生成、 SO_4 浸透深さ及び Ca 溶脱深さなどについて、化学変質への影響が大きいと考えた HCO_3^- 濃度と SO_4 濃度を軸にマップ図を作成して多面的に現象を理解することで、処分環境の地下水組成の特徴として SO_4 濃度が高く HCO_3^- 濃度が著しく低い場合には、力学的特性の低下を早期に生じる可能性があることから、化学変質を考慮した支保工の材料選定や部材厚さの検討が重要である、といった情報を設計に反映できる。加えて、地下水の組成から解析的に化学変質挙動を予測し、その情報を基に力学的特性を予測する手法を検討した。化学変質挙動の予測手法の検討では、外部析出層の有無がコンクリートの変質に及ぼす影響を検討し、これまでは困難であった外部析出層の影響を解析に反映できる見通しを得た。また、外部析出層の影響を反映することで海水と接触した実構造物の文献データを再現できることを確認した。力学的特性の予測手法の検討では、健全なセメントペースト、モルタル、コンクリートの力学的特性の予測手法の妥当性評価や信頼性向上のための検討を行った。これらの検討を基に、様々なセメントを用いたコンクリートや、それらが地下水との接触による化学変質を経た場合の力学的特性を解析するための手法のフローと課題を明確にした。今後、抽出した課題を解決することで、将来的に支保工の設計情報及び環境条件から沿岸部の地下水と接触したコンクリートの時間的・空間的な化学組成及び力学的特性の変化の予測が可能となる。

② 緩衝材の機能変化に係るデータの拡充

緩衝材の安全機能を確保するための設計要件の一つである自己シール性は、塩水条件を考えた場合に、最も厳しい仕様成立範囲となる。本検討では、この自己シール性に注目し、自己シール性の評価指標である緩衝材の膨潤率を多様な化学組成の溶液条件に応じて予測評価する手法を検討した。

緩衝材の膨潤率は、含有するベントナイトの陽イオン組成に依存するため、ベントナイトと浸潤する溶液との間で起きるイオン交換反応を把握することが重要である。そこで、圧縮したベントナイトにおけるイオン交換反応をシミュレートし、ベントナイトの陽イオン組成を評価できる解析手法として、飽和不飽和浸透流、移流分散、地化学計算を連成した有限要素法解析手法（HP1）の適用性を確認した。また、圧縮したベントナイトに塩溶液を通水するイオン交換反応試験を複数のイオン強度及び乾燥密度の条件で実施し、イオン交換反応の解析の入力値としてイオン交換選択係数を整理した。この圧縮系におけるイオン交換選択係数を上記の解析手法の入力値として設定して、沿岸部地下水を通水したイオン交換

反応試験の再現解析を実施した。その結果、ベントナイトの陽イオン組成を概ね再現でき、複雑な化学組成の溶液におけるベントナイトのイオン交換反応を予測する手法として、本解析手法の適用性を確認できた。

緩衝材の膨潤率に関しては、沿岸部の地下水で想定される陽イオンを含む塩溶液を通水した際の膨潤率のデータを複数のイオン強度、乾燥密度の条件で取得し、通水溶液の溶存陽イオン種やイオン強度、乾燥密度の膨潤率に対する影響を把握した。その結果、膨潤率はイオン強度の平方根と反比例の関係があり、特に低イオン強度の範囲（イオン強度が 0.2 以下）で通水溶液の溶存陽イオン種、すなわち、ベントナイトの陽イオン組成の膨潤率に対する影響が大きくなることを把握した。一方、イオン強度が 0.2 より高くなると膨潤率のイオン強度による変化は少なく地下水の組成の影響を受けにくいことも把握した。

また、緩衝材の膨潤率の評価手法の複雑な化学組成の溶液への適用性を確認するため、上記のイオン交換反応の再現解析で得られた沿岸部実地下水（FGB-2 孔_167.70 m~171.78 m、イオン強度 0.285）の吸着陽イオン量（HP1 解析値）と、膨潤量試験後に取得した固相の吸着陽イオン量（固相分析値）を入力値として、おのおのに対して膨潤特性理論評価式（Komine&Ogata2003；Komine&Ogata, 2004；田中・中村, 2005）を用いて最大膨潤率を求めた。その結果、吸着陽イオン量に HP1 解析値を入力値した場合の計算結果は、両評価式ともに吸着陽イオン量に固相分析値を入力値した場合のそれと同等の値を示した。

このことから、イオン交換反応の予測解析手法と上記の膨潤特性理論評価式を併用することで、任意の化学組成、塩濃度の条件で自己シール性を評価するための緩衝材の膨潤率を予測できる見通しが得られた。

③ 緩衝材—オーバーパックの相互作用と緩衝材仕様に関わるデータの拡充

緩衝材—オーバーパックの相互作用と緩衝材仕様に関わるデータの拡充では、沿岸部特有の地下水環境（海水）を考慮し、Na 型ベントナイトに加えて代替オプションとなり得る海水との平衡を考慮したイオン型の異なる材料（Ca 型/Ca 型化ベントナイト等）に着目し、沿岸部特有の地下水環境下であることを考慮した人工バリア（緩衝材）性能評価に資する緩衝材仕様に関するデータの拡充を行うことを目的とした。処分場の過渡期から再冠水期、力学的定常に至るまでの時空間の状態において、異なる水質や力学等の条件のもと、緩衝材は様々な場に曝される。例えば、初期の過渡期においては、ある方向から海水が流入すると想定した時、海水に曝されやすい要素や曝されにくい要素があり、こういった系全体においてオーバーパックが移動する。この様な緩衝材の予想される状態を、要素問題と境界値問題として捉え、時空間的にいくつかの状態を要素として抜き出して緩衝材の透水性を評価する要素試験の実施と、系全体の経時変化における力学的相互作用を把握するための模型実験とその数値解析を実施した。取得したデータなどを通じて、沿岸部の多様な地下水環境条件に柔軟に対応できる緩衝材の仕様に関する定量的な評価手法を整備した。

(a) 要素問題（要素試験）

(i) 透水性に対する海水影響の検討

沿岸部の地下水組成に対して設計や性能評価を行う上で、海水系地下水による緩衝材の性能変化について、ベントナイトのイオン型とそれらの膨潤機構に関連付けて理解することは重要であると考えられる。そこで、海水系地下水のイオン濃度に応じた性能変化の幅、あるいは不確実性の少ない材料仕様の設定に結びつけることを視野に入れ、膨潤圧および透水係数の測定を行った。

その結果、産地が異なるベントナイトの挙動の相違は、必ずしも有効モンモリロナイト乾燥密度や交換性陽イオン組成、通水液のイオン組成・濃度など、これまで透水係数に寄与すると考えられてきたパラメータに支配されておらず、他の性状の影響も大きく寄与する可能性が示唆された。当該性状に関する理解が十分でない現状、ベントナイトの平衡膨潤圧や透水係数などの性能は、種類によって異なると捉えられる。したがって、各種ベントナイトの性状をより正確に把握することが今後の課題である。また、処分の各段階において想定される現象に対して、目的に応じた材料選定を行うことが重要と考えられる。

(ii) 透水性に対するせん断の影響の検討

オーバーパックの変位や腐食膨張により、緩衝材が大きなせん断変形を受けた場合でも、緩衝材に局所的な水みち(短絡経路)が生じないことが重要である。しかし、特にせん断方向に沿った透水性や自己修復性の評価はほとんど行われていないため、当該影響に関する評価方法を整備しデータを取得した。

その結果、イオン交換水および人工海水 1～3 倍の濃度を通水したいずれの試験においても、残留状態までの定体積せん断によって、透水係数が増加することは無かった。したがって、定体積条件のせん断では、せん断後に水みちは生じないと考えられる。しかし、せん断後に応力解放が生じた場合、低透水性が保たれるかどうかは明らかでなく、このような条件における性能評価は、今後の課題である。

(iii) 透水性に対するセメント影響の検討

沿岸海底下に地層処分施設を建設する場合、緩衝材に対し、周辺岩盤に含まれる海水由来の地下水が浸透することが想定される。ここで、海水が緩衝材に浸透する前に周辺に存在するセメント系材料と反応する可能性を考慮すると、緩衝材に浸透する地下水の水質にバリエーションが生じる。また、それらの水質条件下にてベントナイトが変質した場合、その化学条件に応じて工学的性質が変化することが懸念される。そのため、緩衝材の性能評価では、上述の化学的多様性を考慮した上で、その工学的性質の変化幅を把握しておくことが重要であることから、海水-セメント反応液を通水用液としてベントナイトの変質反応に伴う透水性や膨潤圧の変化を調べる透水膨潤圧試験を実施した。

その結果、ベントナイトの種類に応じた性状や溶液のイオン強度などの要因に加え、溶解

—沈殿反応の影響によって透水性が変化することが分かった。また、その透水性変化は、条件に応じて増加する場合も、低下する場合も認められた。

(b) 境界値問題（模型試験および数値解析）

(i) 再冠水期の力学的相互作用に対する遠心力模型実験による検討

再冠水期において、緩衝材の膨潤や変形によりオーバーパックが定置場所から変位(浮上・沈下)することが考えられるため、緩衝材とオーバーパックの複合的な挙動を把握する必要がある。これらの挙動を把握するため、従来検討されてきた Na 型緩衝材だけでなく、Ca 型緩衝材も含め、遠心力場の相似則を利用した加速実験である遠心力模型実験を実施した。

試験結果の成果として、沿岸部の地下水環境を考慮した種々の緩衝材を用いた模型試験によって、オーバーパックの変位にともなう緩衝材の厚み仕様に資する基礎的なデータを拡充した。また、緩衝材中の試験用水の浸潤挙動については要素試験および数値解析と整合的なデータが得られたことから、模型試験の結果が妥当性確認データとして有用であることが示された。

(ii) 再冠水期の力学的相互作用に対する数値解析による検討

地層処分において緩衝材としての研究例の多い Na 型ベントナイトに加え、海水との平衡を考慮した Ca 型ベントナイトを含め、緩衝材の仕様 (Na 型/Ca 型)、水質 (純水/人工海水) 及び廃棄体の加熱の有無を考慮して実施した遠心模型試験の実験条件を対象とした数値解析を行い、以下のことが明らかとなった。

・緩衝材の仕様と水質の組合せの影響

Na 型緩衝材では平衡膨潤圧と透水係数の水質による違いが大きく異なる一方、Ca 型緩衝材では水質による違いは小さく、模型実験の傾向と一致した。

・緩衝材の仕様 (Na 型/Ca 型)、加熱の有無の影響

加熱ありの条件では、オーバーパック周辺を迂回するように水が浸透する傾向が見られ、解析でそれを再現できることを確認した。また、加熱なしにくらべて加熱ありの方が再冠水に要する時間が短い傾向があった。

・海水平衡緩衝材 (Na 型/Ca 型) を用いた際の影響

Na 型の海水平衡緩衝材は未処理 (海水平衡処理なし) よりも少し平衡膨潤圧が大きく、透水係数が小さい。一方、Ca 型の海水平衡緩衝材は、未処理の Ca 型緩衝材よりも少し平衡膨潤圧が小さく、透水係数が大きい傾向であった。

・感度解析によるパラメータの影響

透水係数はオーバーパックの上昇、下降のタイミングに大きく影響した。しかし、最終変位への影響は小さかった。一方で、オーバーパックの最終変位に関しては、緩衝材のヤング率の影響が大きい。解析で飽和後のヤング率を用いた場合は、オーバーパックの上昇量が過大になる傾向があり、ヤング率の飽和度依存性を考慮する必要があることが分かった。

6-2 図目次

図 2-1-1	各地質環境モデルのスケールと時間軸	10
図 2-1-2	モデル化の範囲	13
図 2-1-3	AI 学習・予測を用いた地質構造モデル（幌延沿岸部）	14
図 2-1-4	幌延地域の最適化解析結果	18
図 2-1-5	幌延沿岸域 塩分濃度の比較（上：解析結果、下：物理探査）	18
図 2-2-1	本研究のフローチャート	22
図 2-2-2	広域モデルの領域の鳥瞰図	23
図 2-2-3	広域モデルと狭域モデルの比較	24
図 2-2-4	地質モデル構築の PDCA サイクルの例	25
図 2-2-5	本検討で構築した地質概念モデルの例	26
図 2-2-6	本検討で構築した地質モデルの例	26
図 2-2-7	富士山の模式断面と地下水流動系	28
図 2-2-8	解析メッシュ	29
図 2-2-9	現況海水準での解析結果	31
図 2-2-10	地下水モデル（2020M, 7つの地質区分から構成）	32
図 2-2-11	透水係数の推定結果（2019M と 2020M）	34
図 2-2-12	グローバル感度解析と逆解析の結果の概要	36
図 2-2-13	深部地質区分の透水係数の推定が困難であることの概要図	36
図 2-2-14	令和 5 年度に新たに構築した三次元地質モデルの平面図および断面図	38
図 2-2-15	FGB-2 孔での調査結果（深度は G.L.）	40
図 2-2-16	FGB-2 孔に基づく地下水流動の概念図	40
図 2-2-17	モデルの外観図（2020MC と 2023MC）	41
図 2-2-18	順解析結果の鉛直断面	42
図 2-2-19	透水係数の推定結果（2023MC）	43
図 2-2-20	FGB-2 孔における鉛直プロファイル	45
図 2-3-1	沿岸部における地下施設設置のイメージ	50
図 2-3-2	解析領域および完新統基底面標高分布（左）および上部更新統基底面標高分布（右）	52
図 2-3-3	(a) 3次元地質モデルの鳥瞰図（縦：横=2：1）および(b)FGB-2 孔を通る断面での 2次元地質モデル（縦：横=3：1）	52
図 2-3-4	基本モデルでの解析結果（塩分濃度を海水混合率として表示）	54
図 2-3-5	2次元モデルにおける基本ケースと完新統の透水係数に異方性を与えたケース（ $K_h = 1.0 \times 10^{-4} \text{ m/s}$, $K_v = 1.0 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ ）における FGB-2 孔地点の塩分濃度と地下水年代、流速の鉛直分布	55
図 2-3-6	5層モデルの概要(a)と構築した 3次元地質モデルの鳥瞰図(b)、FGB-2 孔を通る	

2次元断面図(c)	58
図 2-3-7 FGB-2 孔で得られた実測値分布に最も近いパラメータセットによる最終ケースの塩分濃度分布（上）および温度分布（下）	58
図 2-3-8 FGB-2 孔地点における実測値および最終ケースでの計算結果.....	59
図 2-3-9 海進・海退のピーク時（(a) 0 万年、(b) 10.2 万年、(c) 12 万年、(d) 22.2 万年、(e) 24 万年）の FGB-2 孔を通る断面における海水混合率分布（左）および温度分布（右）	60
図 3-1-1 塩水くさびと想定されている地下水流動.....	65
図 3-1-2 FGB-2 および FGB-3 孔の位置を示すマップ	66
図 3-1-3 FGB-2 孔（左）および FGB-3 孔（右）のケーシングプログラム	67
図 3-1-4 FGB-2 および FGB-3 から得られた地下水の水質.....	69
図 3-1-5 塩水成分を除いた地下水中の δD （補正 δD ）の分布	69
図 3-1-6 FGB 孔と SKB 孔のデータの比較	72
図 3-1-7 ボーリング結果から得られた概念モデル.....	74
図 3-2-1 海底湧出地下水の調査フロー	76
図 3-2-2 模擬実験における湧出量ごとの音響画像.....	77
図 3-2-3 海底地形図と湧出水の分布	78
図 3-2-4 ROV と高精度音響カメラによる探査測線の配置図	79
図 3-2-5 ピストン式採水器の模式図および実物写真.....	80
図 3-3-1 沿岸部における地下移設設置のイメージ図（経済産業省，2016）	86
図 3-3-2 2種類の3次元音波探査のイメージ図（上：非パルス型振源、下：パルス型振源）	86
図 3-3-3 発振器の種類（左：非パルス型発振器、中央と右：パルス型発振器）	89
図 3-3-4 大型スピーカー（左）と中型スピーカー（右）	89
図 3-3-5 大型スピーカーの内圧調整のイメージ図.....	89
図 4-1-1 沿岸部処分において構成要素に作用する外的要因の整理	96
図 4-1-2 支保工において想定される状態変遷の一例.....	97
図 4-1-3 緩衝材において想定される状態変遷の一例図	97
図 4-2-1 坑道の支保工及び覆工の状態変遷のイメージ	100
図 4-2-2 今フェーズのアプローチ及び成果の目標.....	102
図 4-2-3 セメントコンクリートの力学的特性に影響を与える地下水成分	102
図 4-2-4 類型化した地下水の組成	104
図 4-2-5 吹付け想定 OPC の地下水成分と特性変化の関係 ※印は 10 箇月、他は 20 箇月のデータ	105
図 4-2-6 吹付け想定 BFSC の地下水成分と特性変化の関係 ※印は 10 箇月、他は 20 箇月のデータ	105

図 4-2-7	コンクリート試験体のフロースルー法による浸漬試験の模式図	106
図 4-2-8	吹付けコン OPC の地下水成分と特性変化の関係	107
図 4-2-9	セグメント OPC の地下水成分と特性変化の関係	107
図 4-2-10	相平衡多元素移動計算コードの解析アルゴリズムの模式図	109
図 4-2-11	実測値と解析値の比較 (左: 圧縮強度、右: 静弾性係数)	111
図 4-2-12	本技術開発で提案する化学変質したコンクリートの力学的特性を推定する手法のイメージ	112
図 4-3-1	沿岸部地下水の(a)イオン強度及び(b)陽イオン組成の測定結果 (産業技術総合研究所ほか, 2019)	117
図 4-3-2	通水試験装置の概念図	120
図 4-3-3	イオン交換反応試験より得られたイオン交換選択係数($\log K_{GT}$)	120
図 4-3-4	透水-膨潤圧試験終了後の吸着陽イオン当量分率と 通水終了時点 (71.8 日後)での解析結果との比較 (※小田・柴田, 1999)	123
図 4-3-5	海水平衡ベントナイトについての試験終了後の層間陽イオン当量分率と 平衡時 (5,000 日後) の解析結果との比較 (※小田・柴田, 1999)	124
図 4-3-6	膨潤量試験装置の概略	126
図 4-3-7	イオン強度と最大膨潤率の関係	127
図 4-3-8	初期有効粘土密度と最大膨潤率の関係	127
図 4-3-9	各陽イオン種におけるイオン強度と最大膨潤率	128
図 4-3-10	初期有効粘土密度と最大膨潤率 (評価式①)	128
図 4-3-11	初期有効粘土密度と最大膨潤率 (評価式②)	129
図 4-3-12	沿岸部地下水を用いた膨潤量試験の最大膨潤率と固相分析値及びイオン交換反応の予測解析結果のそれぞれを入力値とした膨潤特性理論評価式による最大膨潤率	130
図 4-4-1	研究の位置づけ	136
図 4-4-2	未処理および海水平衡処理後の各ベントナイト系材料の浸出陽イオン組成	137
図 4-4-3	平衡膨潤圧と透水係数の関係	138
図 4-4-4	せん断透水試験における供試体(左)と試験装置の概略図	139
図 4-4-5	せん断に伴う透水係数の変化(左: クニゲル V1-砂混合土、右: クニボンド)	140
図 4-4-6	透水係数の経時変化	142
図 4-4-7	緩衝材再冠水過程で生じる現象のイメージ	144
図 4-4-8	遠心力载荷模型試験の概略図	145
図 4-4-9	異なる緩衝材材料・試験用水での試験結果比較	146
図 4-4-10	試験用水の緩衝材への浸潤挙動	146
図 4-4-11	オーバーパック変位挙動比較	147
図 4-4-12	試験後緩衝材の CEC 分布 ($\text{Na}-10\text{T}$)	147

図 4-4-13	本事業で得られた模型試験データ	148
図 4-4-14	有効粘土密度と平衡膨潤圧、透水係数の関係	150
図 4-4-15	クニゲル V1 砂混合供試体を用いた遠心載荷実験とその数値解析における緩衝材応力と O/P 変位の履歴（実線：解析結果、点線：実験結果）	150
図 4-4-16	実験終了時の X 線 CT スキャン結果と解析で得られた飽和度分布	151
図 4-4-17	有効粘土密度と平衡膨潤圧、透水係数の関係（再設定）	151
図 4-4-18	O/P 変位（人工海水浸透）へのヤング率の影響	152
図 5-2-1	SDM をインターフェースとした分野間連携の概念	157
図 5-2-2	連携する分野	158
図 5-3-1	分野間（内）・機関間（内）連携の概要	159

6-3 表目次

表 1-2-1	5か年の全体計画（概要）	7
表 2-1-1	本研究において収集したデータ一覧	12
表 2-1-2	材料定数設定例	16
表 2-1-3	幌延地域の材料定数最適値	17
表 2-1-4	要素長別の計算時間目安	17
表 2-1-5	幌延モデル境界条件	17
表 2-2-1	解析条件	23
表 2-2-2	地下水流動・物質移行解析の解析条件	29
表 2-2-3	新たに構築した地下水モデル（2020M）の基本透水係数	32
表 2-3-1	解析条件（境界条件）	53
表 2-3-2	基本モデルでの水理パラメータ	53
表 3-1-1	採水および流向流速調査深度	67
表 3-3-1	各年度の目的、成果、課題の一覧表	88
表 3-3-2	非パルス型振源とパルス型振源との比較	90
表 3-3-3	OBC 探査（エアガン）と曳航式探査（GI ガン）との比較	91
表 4-3-1	イオン交換反応試験の一覧表	119
表 4-4-1	遠心力载荷模型試験の試験条件一覧	144
表 5-3-1	分野間連携の主たる連携項目と実施スケジュール	160
表 5-3-2 (1)	各連携項目の実績（その1）	162
表 5-3-2 (2)	各連携項目の実績（その2）	163
表 5-3-2 (3)	各連携項目の実績（その3）	164

(様式2)

二次利用未承諾リスト

報告書の題名

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（沿岸部処分システム評価確証技術開発）平成31年度～令和5年度 取りまとめ報告書

委託事業名

令和5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

受注事業者名

国立研究開発法人 産業技術総合研究所

公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター

一般財団法人 電力中央研究所

頁	図表番号	タイトル
10	図 2-1-1	各地質環境モデルのスケールと時間軸
13	図 2-1-2	モデル化の範囲
14	図 2-1-3	AI 学習・予測を用いた地質構造モデル（幌延沿岸部）
18	図 2-1-4	幌延地域の最適化解析結果
18	図 2-1-5	幌延沿岸域 塩分濃度の比較（上：解析結果、下：物理探査）
22	図 2-2-1	本研究のフローチャート
23	図 2-2-2	広域モデルの領域の鳥瞰図
24	図 2-2-3	広域モデルと狭域モデルの比較
25	図 2-2-4	地質モデル構築の PDCA サイクルの例
26	図 2-2-5	本検討で構築した地質概念モデルの例
26	図 2-2-6	本検討で構築した地質モデルの例
28	図 2-2-7	富士山の模式断面と地下水流動系
29	図 2-2-8	解析メッシュ
31	図 2-2-9	現況海水準での解析結果
32	図 2-2-10	地下水モデル（2020M, 7つの地質区分から構成）
34	図 2-2-11	透水係数の推定結果（2019M と 2020M）
36	図 2-2-12	グローバル感度解析と逆解析の結果の概要
36	図 2-2-13	深部地質区分の透水係数の推定が困難であることの概要図
38	図 2-2-14	令和5年度に新たに構築した三次元地質モデルの平面図および断面図
40	図 2-2-15	FGB-2 孔での調査結果（深度は G.L.）
40	図 2-2-16	FGB-2 孔に基づく地下水流動の概念図

(様式2)

41	図 2-2-17	モデルの外観図 (2020MC と 2023MC)
42	図 2-2-18	順解析結果の鉛直断面
43	図 2-2-19	透水係数の推定結果 (2023MC)
45	図 2-2-20	FGB-2 孔における鉛直プロファイル
52	図 2-3-2	解析領域および完新統基底面標高分布 (左) および上部更新統基底面標高分布 (右)
52	図 2-3-3	(a) 3次元地質モデルの鳥観図 (縦:横=2:1) および(b)FGB-2 孔を通る断面での2次元地質モデル (縦:横=3:1)
54	図 2-3-4	基本モデルでの解析結果 (塩分濃度を海水混合率として表示)
55	図 2-3-5	2次元モデルにおける基本ケースと完新統の透水係数に異方性を与えたケース ($K_h = 1.0 \times 10^{-4} \text{ m/s}$, $K_v = 1.0 \times 10^{-5} \text{ m/s}$) における FGB-2 孔地点の塩分濃度と地下水年代、流速の鉛直分布 (それぞれ(a), (b), (c) と、FGB-2 孔周辺の塩分濃度 (d) と地下水年代(d)の分布 (左が基本ケース、右が異方性を与えたケース))
58	図 2-3-6	5層モデルの概要(a)と構築した3次元地質モデルの鳥観図(b)、FGB-2 孔を通る2次元断面図(c).
58	図 2-3-7	FGB-2 孔で得られた実測値分布に最も近いパラメータセットによる最終ケースの塩分濃度分布 (上) および温度分布 (下) .
59	図 2-3-8	FGB-2 孔地点における実測値および最終ケースでの計算結果
60	図 2-3-9	海進・海退のピーク時 ((a) 0 万年、(b) 10.2 万年、(c) 12 万年、(d) 22.2 万年、(e) 24 万年) の FGB-2 孔を通る断面における海水混合率分布 (左) および温度分布 (右)
65	図 3-1-1	塩水くさびと想定されている地下水流動
66	図 3-1-2	FGB-2 および FGB-3 孔の位置を示すマップ
67	図 3-1-3	FGB-2 孔 (左) および FGB-3 孔 (右) のケーシングプログラム
69	図 3-1-4	FGB-2 および FGB-3 から得られた地下水の水質
69	図 3-1-5	塩水成分を除いた地下水中の δD (補正 δD) の分布
72	図 3-1-6	FGB 孔と SKB 孔のデータの比較
74	図 3-1-7	ボーリング結果から得られた概念モデル
76	図 3-2-1	海底湧出地下水の調査フロー
77	図 3-2-2	模擬実験における湧出量ごとの音響画像
78	図 3-2-3	海底地形図と湧出水の分布
79	図 3-2-4	ROV と高精度音響カメラによる探査測線の配置図
80	図 3-2-5	ピストン式採水器の模式図および実物写真
86	図 3-3-1	沿岸部における地下移設設置のイメージ図 (経済産業省, 2016)

(様式2)

86	図 3-3-2	2種類の3次元音波探査のイメージ図（上：非パルス型振源、下：パルス型振源）
89	図 3-3-3	発振器の種類（左：非パルス型発振器、中央と右：パルス型発振器）
89	図 3-3-4	大型スピーカー（左）と中型スピーカー（右）
89	図 3-3-5	大型スピーカーの内圧調整のイメージ図
100	図 4-2-1	坑道の支保工及び覆工の状態変遷のイメージ
102	図 4-2-2	今フェーズのアプローチ及び成果の目標
102	図 4-2-3	セメントコンクリートの力学的特性に影響を与える地下水成分
104	図 4-2-4	類型化した地下水の組成
105	図 4-2-5	吹付け想定 OPC の地下水成分と特性変化の関係 ※印は 10 箇月、他は 20 箇月のデータ
105	図 4-2-6	吹付け想定 BFSC の地下水成分と特性変化の関係 ※印は 10 箇月、他は 20 箇月のデータ
106	図 4-2-7	コンクリート試験体のフロースルー法による浸漬試験の模式図
107	図 4-2-8	吹付けコン OPC の地下水成分と特性変化の関係
107	図 4-2-9	セグメント OPC の地下水成分と特性変化の関係
109	図 4-2-10	相平衡多元素移動計算コードの解析アルゴリズムの模式図
111	図 4-2-11	実測値と解析値の比較（左：圧縮強度、右：静弾性係数）
112	図 4-2-12	本技術開発で提案する化学変質したコンクリートの力学的特性を推定する手法のイメージ
117	図 4-3-1	沿岸部地下水の(a)イオン強度及び(b)陽イオン組成の測定結果（産業技術総合研究所ほか, 2019）
120	図 4-3-2	通水試験装置の概念図
120	図 4-3-3	イオン交換反応試験より得られたイオン交換選択係数(logKGT)
123	図 4-3-4	透水・膨潤圧試験終了後の吸着陽イオン当量分率と通水終了時点（71.8 日後）での解析結果との比較
124	図 4-3-5	海水平衡ベントナイトについての試験終了後の層間陽イオン当量分率と平衡時（5,000 日後）の解析結果との比較
126	図 4-3-6	膨潤量試験装置の概略
127	図 4-3-7	イオン強度と最大膨潤率の関係
127	図 4-3-8	初期有効粘土密度と最大膨潤率の関係
128	図 4-3-9	各陽イオン種におけるイオン強度と最大膨潤率
128	図 4-3-10	初期有効粘土密度と最大膨潤率（評価式①）
129	図 4-3-11	初期有効粘土密度と最大膨潤率（評価式②）

(様式2)

130	図 4-3-12	沿岸部地下水を用いた膨潤量試験の最大膨潤率と固相分析値及びイオン交換反応の予測解析結果のそれぞれを入力値とした膨潤評価式による最大膨潤率
136	図 4-4-1	研究の位置づけ
137	図 4-4-2	未処理および海水平衡処理後の各ベントナイト系材料の浸出陽イオン組成
138	図 4-4-3	平衡膨潤圧と透水係数の関係
139	図 4-4-4	せん断透水試験における供試体(左)と試験装置の概略図
140	図 4-4-5	せん断に伴う透水係数の変化(左：クニゲル V1-砂混合土、右：クニボンド)
142	図 4-4-6	透水係数の経時変化
144	図 4-4-7	緩衝材再冠水過程で生じる現象のイメージ
145	図 4-4-8	遠心力载荷模型試験の概略図
146	図 4-4-9	異なる緩衝材材料・試験用水での試験結果比較
146	図 4-4-10	試験用水の緩衝材への浸潤挙動
147	図 4-4-11	オーバーパック変位挙動比較
147	図 4-4-12	試験後緩衝材の CEC 分布 (Na-10T)
148	図 4-4-13	本事業で得られた模型試験データ
150	図 4-4-14	有効粘土密度と平衡膨潤圧、透水係数の関係
150	図 4-4-15	クニゲル V1 砂混合供試体を用いた遠心载荷実験とその数値解析における緩衝材応力と O/P 変位の履歴 (実線：解析結果、点線：実験結果)
151	図 4-4-16	実験終了時の X 線 CT スキャン結果と解析で得られた飽和度分布
151	図 4-4-17	有効粘土密度と平衡膨潤圧、透水係数の関係 (再設定)
152	図 4-4-18	O/P 変位 (人工海水浸透) へのヤング率の影響
12	表 2-1-1	本研究において収集したデータ一覧
16	表 2-1-2	材料定数設定例
23	表 2-2-1	解析条件
29	表 2-2-2	地下水流動・物質移行解析の解析条件
32	表 2-2-3	新たに構築した地下水モデル (2020M) の基本透水係数
53	表 2-3-1	解析条件 (境界条件)
53	表 2-3-2	基本モデルでの水理パラメータ
67	表 3-1-1	採水および流向流速調査深度
67	表 3-1-1	採水および流向流速調査深度
88	表 3-3-1	各年度の目的、成果、課題の一覧表

(様式2)

90	表 3-3-2	非パルス型振源とパルス型振源との比較
91	表 3-3-3	OBC 探査 (エアガン) と曳航式探査 (GI ガン) との比較
144	表 4-4-1	遠心力載荷模型試験の試験条件一覧