

ニアフィールドにおける  
過渡期の熱-水-応力連成挙動に及ぼす  
緩衝材の密度変化の影響評価  
(受託研究)

Impact Assessment of Density Change on the Buffer Material on the Coupled  
Thermal-Hydraulic and Mechanical (THM) Behavior in the Near-field  
(Contact Research)

鈴木 英明 高山 裕介

Hideaki SUZUKI and Yusuke TAKAYAMA

核燃料・バックエンド研究開発部門

核燃料サイクル工学研究所

環境技術開発センター

基盤技術研究開発部

Department of Geological Disposal Research

Nuclear Backend Technology Center

Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories

Sector of Nuclear Fuel, Decommissioning and Waste Management Technology Development

December 2020

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。  
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。  
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<https://www.jaea.go.jp>)  
より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課  
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方2番地4  
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.  
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to  
Institutional Repository Section,  
Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department,  
Japan Atomic Energy Agency.  
2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan  
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2020

ニアフィールドにおける過渡期の熱-水-応力連成挙動に及ぼす  
緩衝材の密度変化の影響評価  
(受託研究)

日本原子力研究開発機構 核燃料・バックエンド研究開発部門  
核燃料サイクル工学研究所 環境技術開発センター  
基盤技術研究開発部

鈴木 英明\*、高山 裕介

(2020年9月30日受理)

高レベル放射性廃棄物の地層処分におけるニアフィールド環境は、廃棄体からの発熱による熱的作用、人工バリア内への地下水の浸潤による水理的作用及び緩衝材の膨潤などによる力学的作用が相互に影響を及ぼしあう複合現象として取り扱う必要がある。このような複雑なニアフィールド環境を評価するためのツールとして、熱-水-応力 (THM) 連成解析コードの開発が進められている。

本研究では、THM 連成解析モデルの高度化として、緩衝材の力学特性、熱特性及び水理特性の密度依存性について整理を行い、緩衝材の密度変化によって生じる THM に関する物性値の変化を考慮できるように解析コードの更新を行った。そして、力学解析側から熱解析及び水理解析側へ解析結果を提供するスキームを追加した解析コードを用いて、幌延深地層研究計画において実施している人工バリア性能確認試験を対象とした再現解析を実施し、原位置で得られた計測データとの比較を通じて、モデルの適切性を確認するとともに、緩衝材の密度変化が及ぼす温度や浸潤及び膨潤変形挙動への影響の程度を把握した。さらに、ニアフィールドの長期挙動に関する事例解析として、廃棄体堅置き方式の人工バリアを対象として、廃棄体からの放熱と人工バリア内への地下水浸潤にともない、緩衝材が埋め戻し材側へ膨出することによって生じる緩衝材の密度変化が、緩衝材中の温度や浸潤挙動へ与える影響を確認した。

Impact Assessment of Density Change on the Buffer Material on the Coupled  
Thermal-Hydraulic and Mechanical (THM) Behavior in the Near-field  
(Contact Research)

Hideaki SUZUKI\* and Yusuke TAKAYAMA

Department of Geological Disposal Research  
Nuclear Backend Technology Center, Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories  
Sector of Nuclear Fuel, Decommissioning and Waste Management Technology Development  
Japan Atomic Energy Agency  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received September 30, 2020)

It is anticipated that the coupled thermal-hydraulic and mechanical (THM) processes will occur, involving an interactive process with radioactive decay heat arising from the vitrified waste, infiltration of groundwater from the host rock into the buffer material, swelling pressure of buffer material due to its saturation in the near-field of a geological disposal system for high-level radioactive waste repository. In order to evaluate these phenomena in the near-field, the THM model has been developed.

In this report, the density dependence of thermal, hydraulic and mechanical properties of the buffer material was investigated to evaluate the near-field environment. These density dependence schemes were added to the coupled THM model.

The THM analysis of the in-situ experiment of engineered barrier system (EBS) experiment at the Horonobe Underground Research Laboratory was carried out. As a result, the effect of the density change of the buffer material on the temperature and infiltration behavior of buffer material was found.

A case analysis on the long-term behavior of the near field was also carried out. Then, the behavior that the buffer material swelled out toward the backfill material and the density of the buffer material decreasing was shown.

Keywords: Buffer material, Density change, Swelling pressure, Geological disposal,  
THM model

---

\* Inspection Development Company Ltd.

目次

1. はじめに .....	1
2. 熱-水-応力連成解析コードの概要.....	4
3. 熱-水-応力連成解析コードの高度化.....	6
3.1 変形係数の密度依存性の導入.....	8
3.2 膨潤圧の密度依存性の導入 .....	12
3.3 熱伝導率の密度依存性の導入.....	17
3.4 比熱の密度依存性導入.....	21
3.5 固有透過度の密度依存性導入.....	22
3.6 密度変化を考慮した水分特性曲線の設定方法の検討.....	23
3.7 まとめ.....	27
4. 幌延深地層研究計画における人工バリア性能確認試験に基づく 熱-水-応力連成解析モデルの信頼性確認.....	28
4.1 概要.....	28
4.2 解析条件 .....	28
4.3 解析結果 .....	34
4.4 まとめ.....	39
5. 熱-水-応力連成解析モデルによるニアフィールドの長期挙動評価.....	41
5.1 概要.....	41
5.2 解析条件 .....	41
5.3 解析結果 .....	43
5.4 まとめ.....	47
6. おわりに .....	48
謝辞.....	49
参考文献 .....	50

Contents

1. Introduction.....	1
2. Outline of the coupled thermo-hydro-mechanical model.....	4
3. Improvement of THM analysis model.....	6
3.1 Data setting for density dependence of deformation coefficient of buffer material.....	8
3.2 Data setting for density dependence of swelling pressure of buffer material.....	12
3.3 Data setting for density dependence of thermal conductivity of buffer material.....	17
3.4 Data setting for density dependence of specific heat of buffer material.....	21
3.5 Data setting for density dependence of intrinsic permeability.....	22
3.6 Study on density dependence of moisture retention curve of buffer material.....	23
3.7 Summary.....	27
4. Verification of THM model based on EBS experiment at the Horonobe URL .....	28
4.1 Outline of analysis .....	28
4.2 Input parameters and boundary conditions.....	28
4.3 Results.....	34
4.4 Summary.....	39
5. Numerical simulation on the long-term behavior of the near field .....	41
5.1 Outline of analysis .....	41
5.2 Input parameters and boundary conditions.....	41
5.3 Results.....	43
5.4 Summary.....	47
6. Conclusion .....	48
Acknowledgements.....	49
References.....	50

図リスト

図 1-1	ニアフィールドで想定される連成現象の相関マトリクス .....	3
図 3-1	緩衝材の密度変化を考慮した THM 連成モデル .....	6
図 3-1-1	一軸圧縮強度と含水比の関係 .....	9
図 3-1-2	変形係数と含水比の関係 .....	9
図 3-1-3	変形係数と水分飽和度の関係 .....	10
図 3-1-4	近似式 (式 3-1-1) の傾き (正負逆) と乾燥密度の関係 .....	11
図 3-1-5	近似式 (式 3-1-1) の切片と乾燥密度の関係 .....	11
図 3-1-6	変形係数の測定結果と関数式の比較 .....	12
図 3-2-1	膨潤圧試験結果 (供試体自然含水比状態) .....	14
図 3-2-2	膨潤圧試験結果 (供試体の初期水分飽和度 50%) .....	14
図 3-2-3	膨潤圧試験結果 (供試体の初期水分飽和度 80%) .....	15
図 3-2-4	膨潤圧試験結果 (供試体の初期乾燥密度 1.6Mg/m <sup>3</sup> ) .....	15
図 3-2-5	膨潤圧試験結果 (供試体の初期乾燥密度 1.5Mg/m <sup>3</sup> ) .....	15
図 3-2-6	膨潤圧試験結果 (供試体の初期乾燥密度 1.4Mg/m <sup>3</sup> ) .....	16
図 3-2-7	膨潤圧試験結果 (供試体の初期乾燥密度 1.3Mg/m <sup>3</sup> ) .....	16
図 3-2-8	乾燥密度と膨潤圧の関係 .....	16
図 3-3-1	クニゲル V1 単体の熱伝導率の測定結果 .....	18
図 3-3-2	30wt%ケイ砂混合体の熱伝導率の測定結果 .....	18
図 3-3-3	クニゲル V1 単体の熱伝導率の測定結果と関係式 .....	19
図 3-3-4	30wt%ケイ砂混合体の熱伝導率の測定結果と関係式 .....	19
図 3-3-5	クニゲル V1 単体の熱伝導率と水分飽和度の関係 .....	20
図 3-3-6	30wt%ケイ砂混合体の熱伝導率と水分飽和度の関係 .....	20
図 3-4-1	クニゲル V1 単体の比熱と含水比の関係 .....	21
図 3-4-2	30wt%ケイ砂混合体の比熱と含水比の関係 .....	22
図 3-5-1	緩衝材の固有透過度と有効粘土密度の関係 .....	23
図 3-6-1	30wt%ケイ砂混合体のサクシヨンの測定結果 .....	24
図 3-6-2	30wt%ケイ砂混合体のサクシヨンの測定結果に基づき設定した 水分特性曲線 (乾燥密度 1.6Mg/m <sup>3</sup> の場合) .....	24
図 3-6-3	不飽和な状態における緩衝材の圧縮変形 .....	25
図 3-6-4	30wt%ケイ砂混合体の含水比とサクシヨンの関係 .....	26
図 3-6-5	30wt%ケイ砂混合体の水分飽和度とサクシヨンの関係 .....	27
図 4-1	人工バリア性能確認試験の解析評価に用いた解析メッシュモデル .....	29
図 4-2	緩衝材及び埋め戻し材への加圧注水条件 .....	30
図 4-3	オーバーパックを模擬した金属容器表面の温度境界条件 .....	30
図 4-4	浸潤試験に基づく緩衝材の比透水係数の同定結果 .....	33

図 4-5	人工バリア性能確認試験における緩衝材の密度変化に関する解析結果.....	37
図 4-6	人工バリア性能確認試験における計測結果と THM 連成解析結果の比較.....	38
図 5-1	ニアフィールドの長期挙動評価解析条件.....	42
図 5-2	熱-水-応力連成解析モデルによるニアフィールドの長期挙動解析結果.....	44
図 5-3	熱-水-応力連成解析モデルによる緩衝材の密度分布に関する解析結果.....	46

表リスト

表 3-1	解析コードの高度化に向けた実施項目.....	7
表 3-1-1	一軸圧縮試験ケース.....	8
表 3-2-1	膨潤圧試験ケース.....	13
表 4-1	人工バリア性能確認試験の解析評価に用いた物性値.....	30
表 4-2	岩盤及び埋め戻し材の熱物性と含水比の関係に係るパラメータ.....	31
表 4-3	不飽和水理特性における van Genuchten モデルのパラメータ.....	33
表 4-4	人工バリア性能確認試験を対象とした解析ケース.....	34
表 5-1	ニアフィールド長期挙動評価の解析ケース.....	42

写真リスト

写真 3-2-1	膨潤圧試験装置.....	13
----------	--------------	----

## 1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分におけるニアフィールドの挙動は、廃棄体からの発熱による熱的作用、人工バリア内への地下水の浸潤による水理的作用及び緩衝材の膨潤などによる力学的作用が相互に影響を及ぼしあう複合現象として取り扱う必要がある。このような連成プロセスの現象理解に向け、国内外において多くの原位置試験やモックアップ試験が行われ、また、長期的なプロセスを定量化するために、連成解析モデルの開発や原位置試験などに基づく検証など解析的研究も進められている。

日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構という）では、人工バリアを設置した時点から緩衝材が飽和に至るまでの過渡的な期間を対象として、ニアフィールドで生じる熱的（熱膨張と熱輸送）、水理的（地下水浸潤）、力学的（膨潤圧の発生）なプロセスが相互に影響を及ぼし合う連成現象を把握するためのツールとして、大西ら（Ohnishi et al., 1985 [1]）によって構築された熱-水-応力（THM）連成解析モデル（THAMES）の開発を進めている（Chijimatsu et al., 2000 [2]）。第2次取りまとめでは、開発したTHM連成解析モデルを用いて、釜石鉱山における原位置試験の粘土熱負荷試験を対象としたモデルの妥当性の評価を行った上で（Chijimatsu et al., 2001 [3]）、ニアフィールドの長期挙動解析により、人工バリアの再冠水時間などを評価した（核燃料サイクル開発機構, 1999 [4]）。その後も、FEBEXプロジェクトにおける原位置試験を対象とした再現解析や（例えば、操上ほか, 2004 [5]；日本原子力研究開発機構, 2019 [6]）、国際共同研究 DECOVALEX を活用したモデル間の比較を通じた検証など（例えば、Rutqvist et al., 2005 [7]；Sugita et al., 2016 [8]）、解析コードの信頼性や適用可能性などを示す事例が蓄積されてきている。

他方、人工バリア内への地下水の浸潤にともなう地下水中の溶存酸素量、化学成分や酸化還元電位など放射性核種の溶解度やオーバーパックの腐食挙動に影響を及ぼすと考えられる間隙水化学の定量化や、第2次取りまとめのリファレンスケースのシナリオ上で選択されたFEPの妥当性の検証といった要求事項に応えるため、THM連成プロセスに、緩衝材の間隙水化学の影響を考慮したTHMC連成解析モデルの開発に着手した（伊藤ほか, 2004 [9]）。さらに、平成19年度から平成21年度の3年間は、経済産業省資源エネルギー庁の受託事業「地層処分技術調査等委託費（高レベル放射性廃棄物処分関連：処分システム化学影響評価高度化開発）」において、緩衝材中での塩濃縮析出現象をはじめとする間隙水化学の把握に重きを置いたTHMC連成モデルの高度化を進めてきた（日本原子力研究開発機構, 2008 [10]；日本原子力研究開発機構, 2009 [11]；日本原子力研究開発機構, 2010 [12]）。そして、第2次取りまとめにおいてFEP除外事象であったオーバーパック周辺での塩濃縮析出現象について、緩衝材が不飽和な状態にある期間においてオーバーパックと緩衝材の境界で塩類が濃縮、析出するものの、長期的には再溶解して散逸するとした第2次取りまとめのシナリオに整合する計算結果が得られている（木村ほか, 2010 [13]）。

過渡的な期間のニアフィールドにおいて、連成挙動に及ぼす影響が大きいと考えられる相関関係をマトリクスで整理すると図1-1のようになる。これまでに開発したTHM連成解

析モデルは、図 1-1 に示す相互作用のうち、力学から熱及び力学から水理への作用として、密度依存性を有する緩衝材の熱物性と水理特性及び力学特性について、密度変化によって生じるこれら物性値の変化が反映されていないため、緩衝材の密度が低下するような場合の連成挙動が適切に評価できていないといった課題を有していた。例えば、岩盤亀裂内への緩衝材の侵入や、廃棄体堅置き的人工バリア仕様において、緩衝材の膨潤による坑道埋め戻し材側への膨出などに起因した緩衝材の密度の低下は、緩衝材に期待される核種移行遅延・抑制機能やコロイドフィルトレーション効果などの設計で期待する機能を損なう可能性があるため（核燃料サイクル開発機構，1999 [14]）、緩衝材の密度変化を定量的に把握することは重要である。そこで、熱-水-応力連成解析において、緩衝材の熱特性、水理特性及び力学特性の密度依存性を考慮するためのデータ取得、モデル開発及びプログラムの更新を行った。緩衝材の力学特性については、供試体の密度及び水分量をパラメータとして一軸圧縮試験を実施し、①変形係数と水分飽和度及び乾燥密度との関係式を取得した。また、緩衝材の膨潤圧を測定する試験を実施し、②膨潤圧と乾燥密度との関係式を取得した。熱特性については、これまでに取得された計測データに基づき、③熱伝導率の水分飽和度及び乾燥密度との関係、④比熱の水分飽和度及び乾燥密度との関係として整理した。水理特性については、これまでに得られている計測データに基づき、⑤固有透過度と乾燥密度との関係について整理した。これら物性値の密度依存性を考慮できるように THAMES のプログラムを更新した。また、緩衝材の密度変化が生じた場合の水分特性曲線について検討を行った。

そして、原子力機構が幌延深地層研究計画において実施している人工バリア性能確認試験（花室，2014[15]）を対象とした再現解析を実施し、緩衝材中の温度や浸潤挙動及び応力変形挙動に関する計測データとの比較を通じてモデルの適切性の確認と課題の抽出を行うとともに、緩衝材の密度変化が温度や浸潤挙動へ及ぼす影響を把握した。さらに、第2次取りまとめで示された廃棄体堅置き的人工バリア仕様を対象として、緩衝材の密度変化がニアフィールドの長期挙動に与える影響を分析するための事例的な解析を実施した。そして、廃棄体からの放熱と人工バリア内への地下水浸潤にともない緩衝材が埋め戻し材側へ膨出することによって生じる緩衝材の密度変化と、それが温度や浸潤挙動へ与える影響を定量的に把握した。

<p><b>熱</b> (エネルギー保存則)</p>	<p>熱→水理 ・温度勾配による水分移動 ・透水性の温度依存性 ・間隙水密度の温度依存性 ・粘性係数の温度依存性</p>	<p>熱→力学 ・熱応力の発生 ・力学特性の温度依存性</p>	<p>熱→化学 ・平衡定数の温度依存性</p>
<p>熱←水理 ・熱輸送 ・熱物性の飽和度依性</p>	<p><b>水理</b> (連続の式)</p>	<p>水理→力学 ・膨潤圧の発生 ・力学特性の飽和度依存性</p>	<p>水理→化学 ・飽和度に応じた液相濃度変化</p>
<p>熱←力学 ・熱物性の密度依存性</p>	<p>水理←力学 ・飽和度の変化 ・透水性の密度依存性</p>	<p><b>力学</b> (つり合い式)</p>	<p>力学→化学</p>
<p>熱←化学</p>	<p>水理←化学 ・透水性の変化</p>	<p>力学←化学 ・膨潤圧の変化 ・力学特性の変化</p>	<p><b>化学</b> (電気的中性の式) (電子保存の式) (質量保存の式) (固相の質量作用の式) (水溶性化学種の質量作用の式)</p>

図 1-1 ニアフィールドで想定される連成現象の相関マトリクス

## 2. 熱－水－応力連成解析コードの概要

熱－水－応力連成解析コード (THAMES) は、熱、水理及び応力変形の支配方程式を有限要素法によって離散化し、相互作用を扱う非線形問題に対して各時間ステップで反復計算することによって計算精度を高めている。以下に、それぞれの支配方程式を示す (千々松ほか, 2003[16])。

### ① 熱移動の支配方程式

THAMES では、固相、液相及び気相の三相で構成される岩盤及び緩衝材中の熱移動現象が、以下に示すエネルギー保存則でモデル化されている。なお、気相－液相間の相変化や気相中の熱移動については考慮されておらず、間隙水は全て液状水として存在すると仮定されている。

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho_l C_l q_l T) - \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \lambda_m \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial t} (\rho_m C_m T) = 0 \quad (2-1)$$

ここに、 $\rho$  : 密度、 $C$  : 比熱、 $\rho_l$  : 液相ダルシー流速、 $\lambda$  : 熱伝導率、 $T$  : 温度、添え字  $l$ 、 $m$  はそれぞれ液相、固相である。左辺第一項は、液相流動にともなう移流効果、左辺第二項は、温度勾配による伝導効果、左辺第三項は、固相の貯留効果を示す。

### ② 水移動の支配方程式

THAMES では、緩衝材中の温度が 100°C 以下となることを前提としており、液状水と蒸気水の移動を個別には取り扱わずに、水分勾配及び温度勾配を駆動力として水移動の支配方程式を構築している。水分勾配による移動フラックスは透水係数、温度勾配による移動フラックスは温度勾配水分拡散係数を用いて表現している。

$$-\frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \xi \rho_l k_r \frac{\partial \theta}{\partial x_i} + (1 - \xi) \frac{\rho_l g \kappa}{\mu_l} \frac{\partial (\psi + z)}{\partial x_i} + \rho_l D_T \frac{\partial T}{\partial x_i} \right\} + \frac{\partial}{\partial t} (\rho_l n_e S_r) = 0 \quad (2-2)$$

ここに、 $k_r$  : 比透水係数、 $\theta$  : 体積含水率、 $\xi$  : 不飽和パラメータ (飽和で 0、不飽和で 1)、 $\kappa$  : 固有透過度、 $\psi$  : 圧力水頭、 $z$  : 位置水頭、 $\mu_l$  : 液相粘性係数、 $g$  : 重力加速度、 $D_T$  : 温度勾配水分拡散係数、 $n_e$  : 間隙率、 $S_r$  : 水分飽和度である。左辺第一項、第二項は、全水頭勾配による水の移動効果、左辺第三項は、温度勾配による水の移動効果、左辺第四項は、貯留効果を示す。

## ③ 力学挙動の支配方程式

THAMES では、静的条件を仮定した運動量保存則に基づく全応力の釣り合い条件から力学挙動をモデル化している。全応力増分は、圧縮を正とすると次式で表される。

$$\Delta\sigma_{ij} = \frac{1}{2}C_{ijkl}(\Delta u_{k,l} + \Delta u_{l,k}) + (1 - \xi)\Delta P_w\delta_{ij} - \Delta\sigma_{sw}\delta_{ij} - \frac{E}{1-2\nu}\alpha_s\Delta T\delta_{ij} \quad (2-3)$$

ここに、 $C_{ijkl}$  : 変形係数テンソル、 $u$  : 変位、 $P_w$  : 水圧、 $\delta_{ij}$  : クロネッカーのデルタ、 $\sigma_{sw}$  : 膨潤圧、 $E$  : 変形係数、 $\nu$  : ポアソン比、 $\alpha_s$  : 固相の熱線膨張係数、 $T$  : 温度である。 $C_{ijkl}$ は、 $E$ と $\nu$ で次式で表される。

$$C_{ijkl} = \frac{E}{(1+\nu)} \left\{ \frac{1}{2} (\delta_{ik}\delta_{jl} + \delta_{il}\delta_{jk}) + \frac{\nu}{1-2\nu} \delta_{ij}\delta_{kl} \right\} \quad (2-4)$$

### 3. 熱－水－応力連成解析コードの高度化

前述したように、これまでに開発した THM 連成解析コード (THAMES) は、密度依存性を有する緩衝材の熱物性、水理特性及び力学特性について、密度変化によって生じるこれら特性値の変化が考慮されていない。そのため、例えば、廃棄体堅置きの人工バリア仕様において、緩衝材が膨潤して埋め戻し材側に膨出し、緩衝材の密度が低下するような場合の連成挙動が正しく評価できていないといった課題があった。そこで、膨潤変形などによる緩衝材の密度変化が力学特性、熱特性及び水理特性へ与える影響を考慮するため、緩衝材の変形係数、膨潤圧、熱伝導率、比熱及び固有透過度について密度依存性を考慮した関係式を構築した。また、水分特性曲線の密度依存性を考慮する場合の設定方法について検討を行った。表 3-1 に実施項目を示す。

実際の THAMES での解析においては、ある時間ステップにおいて計算された緩衝材の乾燥密度を用いて、3.1 節～3.5 節で示した手法によって変形係数、膨潤圧、熱伝導率、比熱及び固有透過度を算定する。そして、これらの値を次の時間ステップでの計算に反映することで、力学特性、水理特性及び熱特性の密度依存性を考慮できるようにプログラムの改良を行った。緩衝材の密度変化による特性値の変化を考慮した THM 連成モデルのスキームを図 3-1 に示す。

以下に、実施項目 3.1～3.6 の詳細について述べる。

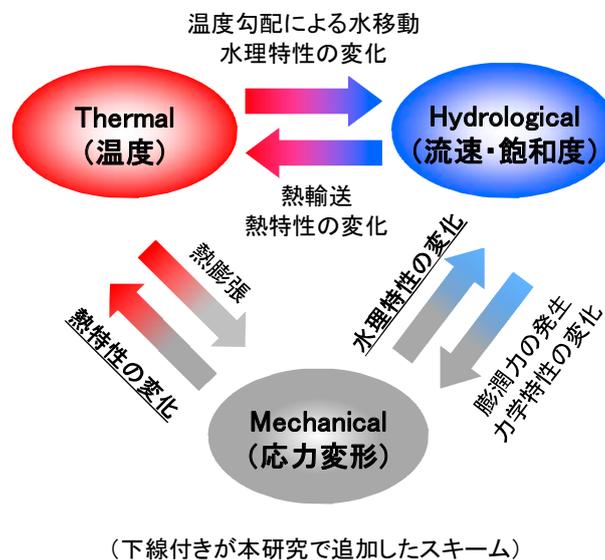


図 3-1 緩衝材の密度変化を考慮した THM 連成モデル

表 3-1 解析コードの高度化に向けた実施項目

実施項目	実施内容
3.1 変形係数の密度依存性の導入	緩衝材の一軸圧縮試験を実施し、変形係数の乾燥密度及び水分飽和度との関係について整理した。得られた関係式を THAMES に導入し、解析で計算される乾燥密度と水分飽和度から変形係数が設定されるようにプログラムを更新した。
3.2 膨潤圧の密度依存性の導入	緩衝材の膨潤圧を測定する試験を実施し、乾燥密度と最大膨潤圧の関係を整理した。得られた関係式を THAMES に導入し、解析で計算される乾燥密度から最大膨潤圧が設定されるようにプログラムを更新した。
3.3 熱伝導率の密度依存性導入	緩衝材の熱伝導率の測定結果に基づき、熱伝導率の乾燥密度と水分飽和度との関係について整理した。得られた関係式を THAMES に導入し、解析で計算される乾燥密度と水分飽和度から熱伝導率が設定されるようにプログラムを更新した。
3.4 比熱の密度依存性導入	緩衝材の比熱の測定結果に基づき、比熱に対する乾燥密度と含水比の関係について整理した。比熱については顕著な密度依存性が認められないことから、ここでは含水比との関係式を THAMES に導入した。解析で計算される含水比から比熱が設定されるようにプログラムを更新した。なお、含水比は水分飽和度と乾燥密度の解析結果から求める。
3.5 固有透過度の密度依存性導入	緩衝材の固有透過度と有効粘土密度の関係式を THAMES に導入し、解析で計算される乾燥密度から固有透過度が設定されるようにプログラムを更新した。そして、透過する溶液が蒸留水、人工海水及び幌延地下水の場合について、それぞれの関係式を解析の入力ファイル上で選択できる設定とした。
3.6 密度変化を考慮した水分特性曲線の設定方法の検討	現状の THAMES における飽和・不飽和浸透流解析では、圧力水頭と体積含水率の関係を表す水分特性曲線に基づき水分飽和度が求められている。しかしながら、この体積含水率は、初期に設定した乾燥密度から与えられており、緩衝材の密度変化を考慮することができない。そこで、密度依存性を考慮した水分特性曲線の設定方法について検討を行った。本研究では、検討に止まり、THAMES への導入は行っていない。

### 3.1 変形係数の密度依存性の導入

緩衝材の変形係数の密度依存性に関する関係式を取得するために、緩衝材の水分飽和度及び乾燥密度をパラメータとした一軸圧縮試験を実施した。ここでは、表 3-1-1 に示すように、供試体の乾燥密度が 1.6Mg/m<sup>3</sup>、1.5Mg/m<sup>3</sup>、1.4Mg/m<sup>3</sup> 及び 1.3Mg/m<sup>3</sup>、初期含水比が 7.8%~40.3% について、合計 16 ケースの試験を実施した。供試体寸法は、直径 5cm×高さ 10cm である。供試体材料は、ベントナイトのクニゲル V1 とケイ砂の混合材料（ケイ砂混合率は 30wt%）である。ケイ砂には、珪砂 3 号と、パール 5 号を乾燥質量比 1 : 1 で混合したものをを用いた。使用したクニゲル V1 のメチレンブルー吸着量は 87mmol/100g であった。また、クニゲル V1、珪砂 3 号、パール 5 号の土粒子密度は、それぞれ、2.760 Mg/m<sup>3</sup>、2.644 Mg/m<sup>3</sup>、2.658Mg/m<sup>3</sup> であった。試験温度は室温である。

一軸圧縮試験の結果を図 3-1-1 から図 3-1-3 に示す。図 3-1-1 は、各乾燥密度の供試体の含水比と一軸圧縮強度  $q_u$  の関係、図 3-1-2 は含水比と変形係数  $E_{50}$  の関係、図 3-1-3 には、水分飽和度と変形係数の関係を示している。図中の直線は、最小二乗法によって求めた回帰直線である。これより、供試体の乾燥密度が大きくなるに従い、一軸圧縮強度、変形係数ともに大きくなり、含水比、水分飽和度が高くなるに従って小さくなっていることが分かる。

表 3-1-1 一軸圧縮試験ケース

試験ケース	乾燥密度 (Mg/m <sup>3</sup> )	初期含水比 の設定値	初期含水比 (%)	水分飽和度 (%)
QU-16-NWC	1.6	自然含水比	7.8	29.9
QU-15-NWC	1.5			26.2
QU-14-NWC	1.4			22.2
QU-13-NWC	1.3			19.3
QU-16-SR50	1.6	初期水分飽和度が 50%になるように 初期含水比を設定	12.9	49.7
QU-15-SR50	1.5		15.0	50.4
QU-14-SR50	1.4		17.4	49.0
QU-13-SR50	1.3		20.2	49.4
QU-16-SR80	1.6	初期水分飽和度が 80%になるように 初期含水比を設定	20.7	79.9
QU-15-SR80	1.5		24.0	79.3
QU-14-SR80	1.4		27.8	79.8
QU-13-SR80	1.3		32.2	81.5
QU-16-SR100	1.6	初期水分飽和度が 100%になるように 初期含水比を設定	25.9	95.1
QU-15-SR100	1.5		30.0	95.6
QU-14-SR100	1.4		34.8	96.5
QU-13-SR100	1.3		40.3	95.5

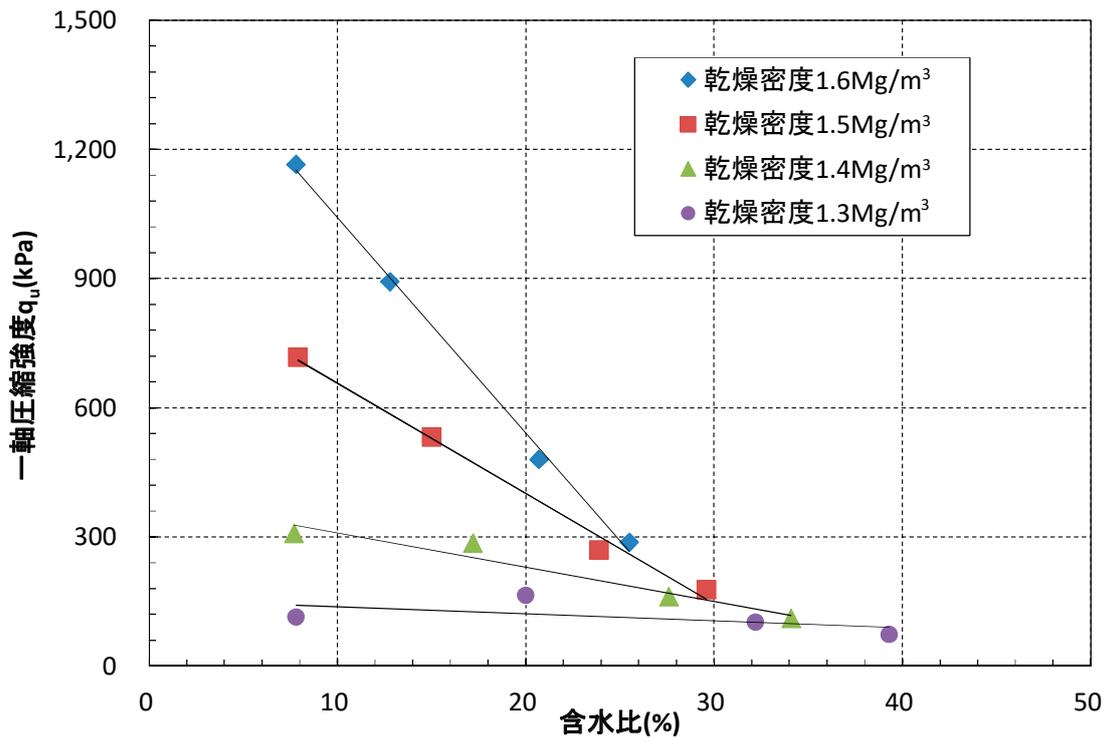


図 3-1-1 一軸圧縮強度と含水比の関係

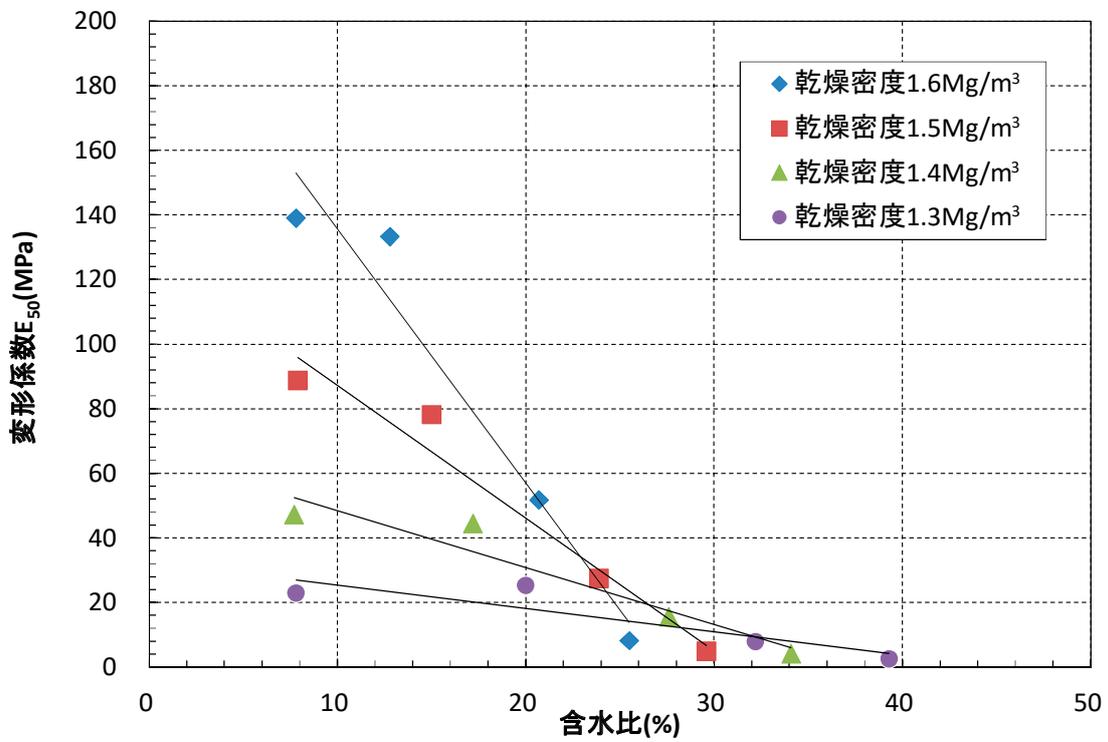


図 3-1-2 変形係数と含水比の関係

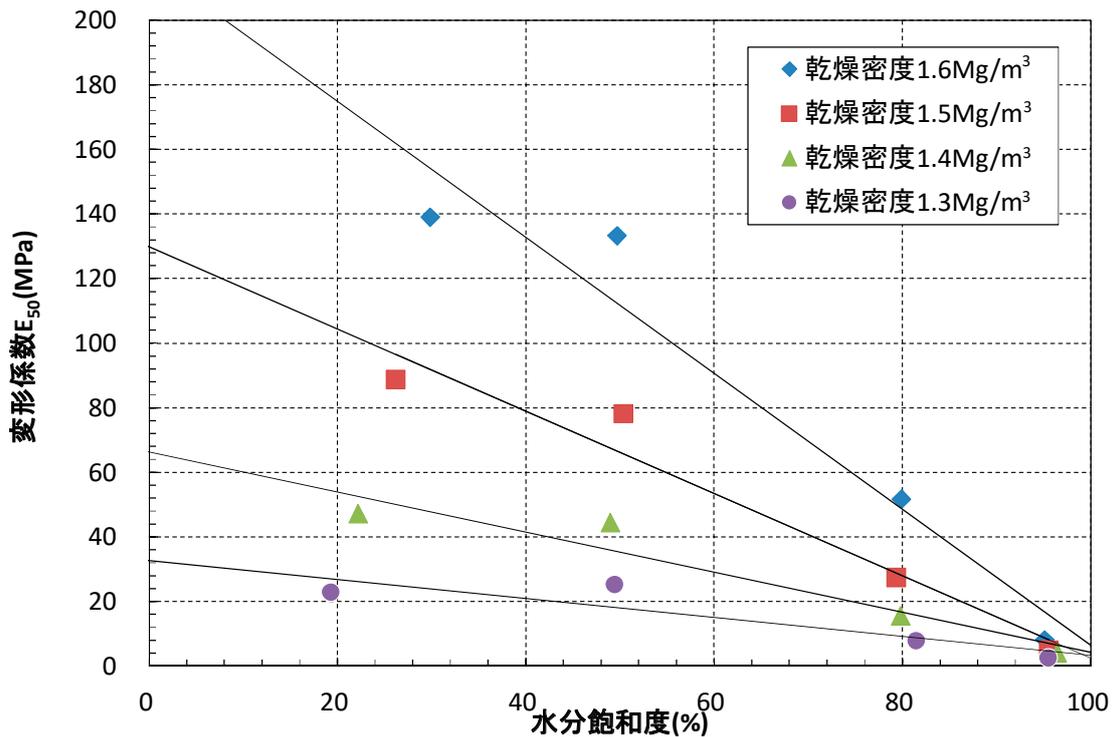


図 3-1-3 変形係数と水分飽和度の関係

これらの測定結果から、変形係数と水分飽和度及び乾燥密度の関係式を導出した。ここで、変形係数 $E_{50}$  (MPa) を、次式に示すような水分飽和度 $S_r$  (%) との関係式で表すこととする。

$$E_{50} = a(S_r - 100) + b \quad (3-1-1)$$

上式における係数 $a$ は、図 3-1-3 で示した線形近似した直線の傾きであり、乾燥密度 $\rho_d$  (Mg/m<sup>3</sup>) との関係で整理すれば、図 3-1-4 のようになり、その回帰曲線を次式で表すこととする。

$$a = -0.00006e^{6.635\rho_d} \quad (3-1-2)$$

一方、式 (3-1-1) における係数 $b$ は、図 3-1-3 に示す各乾燥密度の水分飽和度 100%の時の切片の値であり、乾燥密度 $\rho_d$  (Mg/m<sup>3</sup>) との関係は図 3-1-5 のようになる。これより、乾燥密度 1.5Mg/m<sup>3</sup>については、小さめの値を示しているが、変形係数は、乾燥密度の増加とともに大きくなると考えられるため、その回帰直線を次式で表すこととする。

$$b = 7.576\rho_d - 6.8387 \quad (3-1-3)$$

図 3-1-6 には、式 (3-1-1)、(3-1-2) 及び (3-1-3) により算出した乾燥密度と変形係数の関係を示す。

以上、式 (3-1-1) ~ 式 (3-1-3) を THAMES に導入することによって、30wt%ケイ砂混合体について、変形係数の水分飽和度依存性及び密度依存性を考慮でき、そのため、浸潤過程における緩衝材の膨潤挙動をより現実的に計算できるようになった。

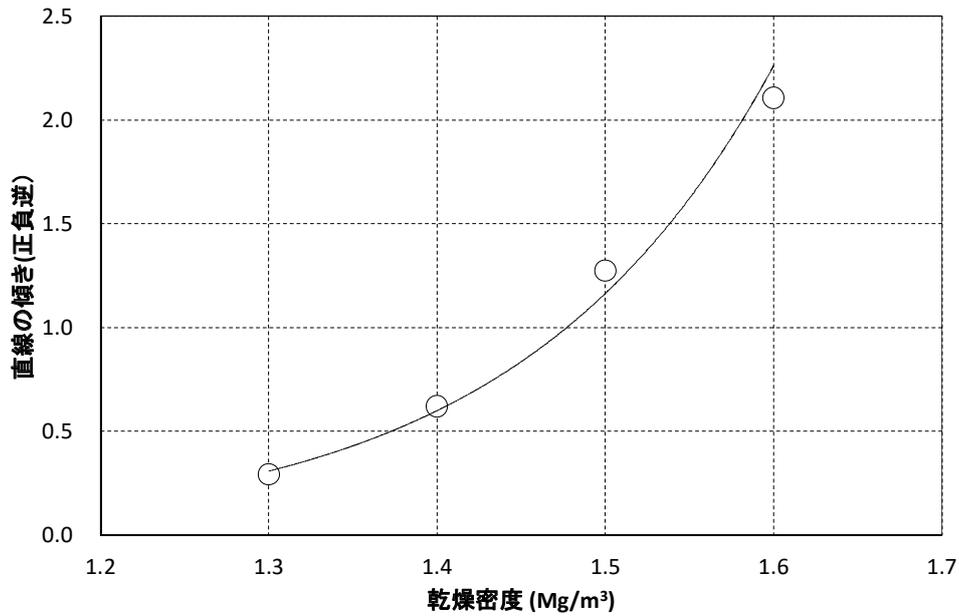


図 3-1-4 近似式(式 3-1-1)の傾き(正負逆)と乾燥密度の関係

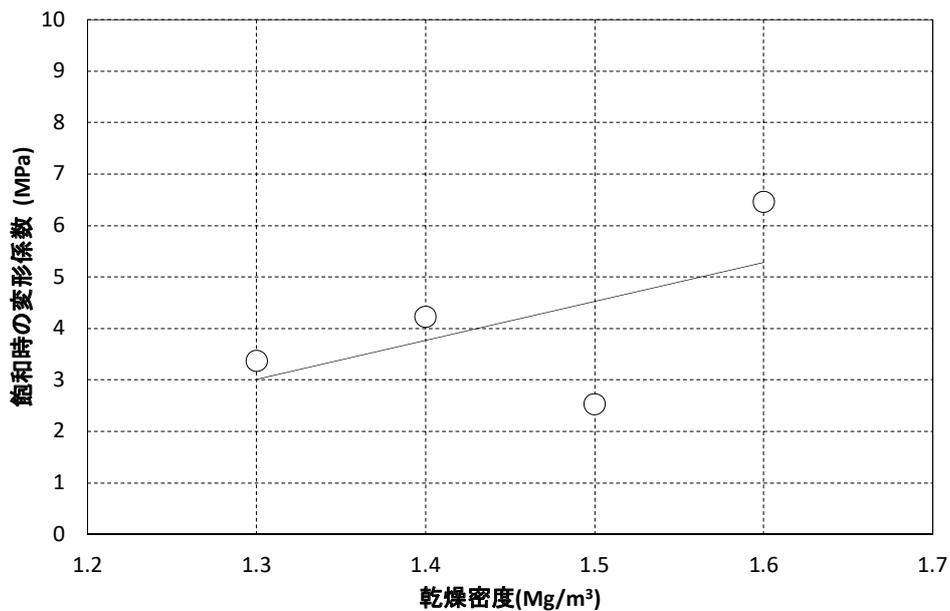


図 3-1-5 近似式(式 3-1-1)の切片と乾燥密度の関係

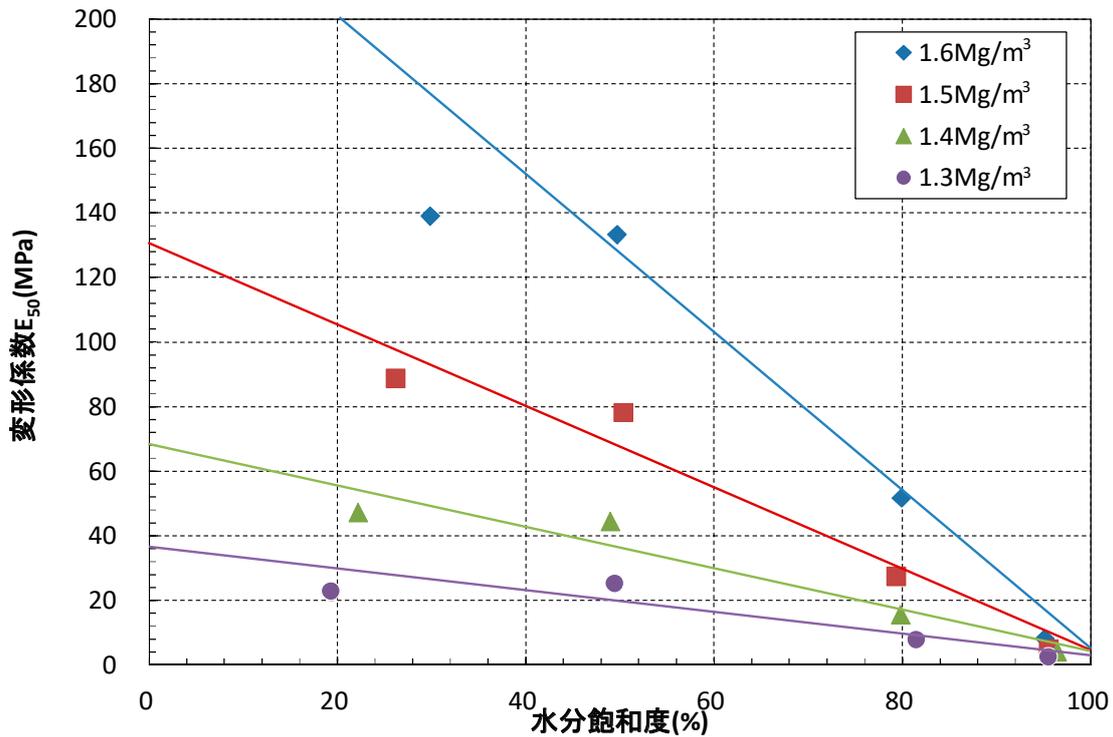


図 3-1-6 変形係数の測定結果と関数式の比較

### 3.2 膨潤圧の密度依存性の導入

供試体の乾燥密度をパラメータとして膨潤圧試験を実施し、乾燥密度と膨潤圧の関係を取得した。膨潤性粘土の膨潤圧の測定方法は、地盤工学会などで標準化されていないが、一般には、土の圧密試験装置に類似した装置が用いられている。膨潤圧測定試験は、写真 3-2-1 に示した試験装置を用いた。本装置は、供試体を金属製の容器内に収め、膨潤圧を測定するための圧力計とともに反力枠で固定する構造となっている。体積を固定した状態の供試体の下端から蒸留水を浸潤させ、供試体上端に発生する圧力の時間変化を計測した。供試体の寸法は、直径 6cm×高さ 2cm とした。ここでは、表 3-2-1 に示すように、供試体の乾燥密度が 1.6Mg/m<sup>3</sup>、1.5Mg/m<sup>3</sup>、1.4Mg/m<sup>3</sup> 及び 1.3Mg/m<sup>3</sup>、初期含水比が 7.2%～32.2% について、合計 12 ケースの試験を実施した。



写真 3-2-1 膨潤圧試験装置

表 3-2-1 膨潤圧試験ケース

試験ケース	乾燥密度 (Mg/m <sup>3</sup> )	初期含水比 の設定値	初期含水比 (%)	水分飽和度 (%)
SP-16-NWC	1.6	自然含水比	7.2	27.7
SP-15-NWC	1.5		7.2	23.8
SP-14-NWC	1.4		7.2	20.6
SP-13-NWC	1.3		7.2	17.8
SP-16-SR50	1.6	初期水分飽和 度が 50%にな るように初期 含水比を設定	12.9	49.9
SP-15-SR50	1.5		15.0	50.0
SP-14-SR50	1.4		17.4	50.1
SP-13-SR50	1.3		20.2	50.1
SP-16-SR80	1.6	初期水分飽和 度が 80%にな るように初期 含水比を設定	20.7	80.0
SP-15-SR80	1.5		24.0	80.0
SP-14-SR80	1.4		27.8	80.0
SP-13-SR80	1.3		32.2	80.0

膨潤圧の時間変化に関する測定結果を、図 3-2-1～図 3-2-7 に示す。このうち、図 3-2-1～図 3-2-3 は、供試体の乾燥密度の違いによる膨潤圧への影響を把握するために測定結果を整理したものであり、図 3-2-1 は供試体作製時の含水比が 7.2%（自然含水比）の場合、図 3-2-2 は供試体の初期水分飽和度が 50%の場合、図 3-2-3 は、供試体の初期水分飽和度が 80%の場合である。いずれにおいても、乾燥密度が大きくなるほど発生する膨潤圧の値は大きくなっており、最大で 0.5MPa 程度の差が生じていることが分かる。

また、図 3-2-4～3-2-7 は、初期水分飽和度の違いによる膨潤圧への影響を把握するために測定結果を整理したものであり、図 3-2-4 は、供試体の乾燥密度が 1.6Mg/m<sup>3</sup> について、

図 3-2-5 は、 $1.5\text{Mg/m}^3$ 、図 3-2-6 は、 $1.4\text{Mg/m}^3$ 、図 3-2-7 は、 $1.3\text{Mg/m}^3$  の場合である。これより、初期水分飽和度が大きい程、膨潤圧が平衡となった時の値が大きくなる傾向にあるが、最大でも  $0.1\text{MPa}$  程度であり、乾燥密度に比べて膨潤圧に及ぼす影響は小さくなっている。ここでは、膨潤圧に及ぼす供試体の初期含水比の影響は無視し、乾燥密度と平衡膨潤圧の関係について整理すると図 3-2-8 のようになる。そして、乾燥密度 $\rho_d$  ( $\text{Mg/m}^3$ ) と、膨潤圧 $\sigma$  ( $\text{MPa}$ ) 関係として、図 3-2-8 の回帰曲線から次式を得た。

$$\sigma = 0.0042e^{3.1357\rho_d} \quad (3-2-1)$$

以上、式 (3-2-1) を THAMES に導入することによって、膨潤圧の密度依存性を考慮できるようにプログラムを更新した。

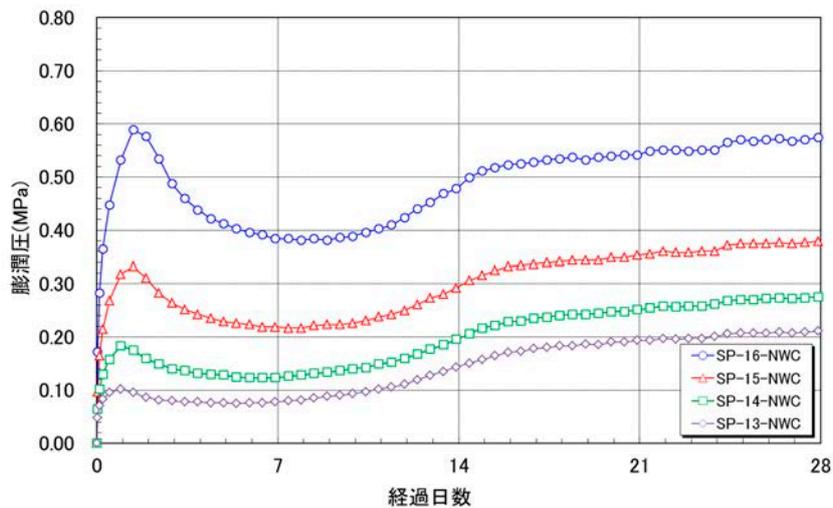


図 3-2-1 膨潤圧試験結果(供試体自然含水比状態)

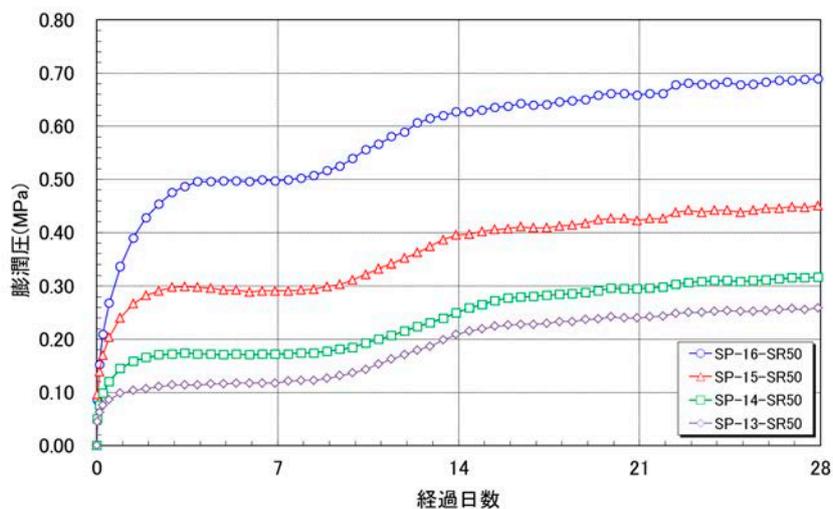


図 3-2-2 膨潤圧試験結果(供試体の初期水分飽和度 50%)

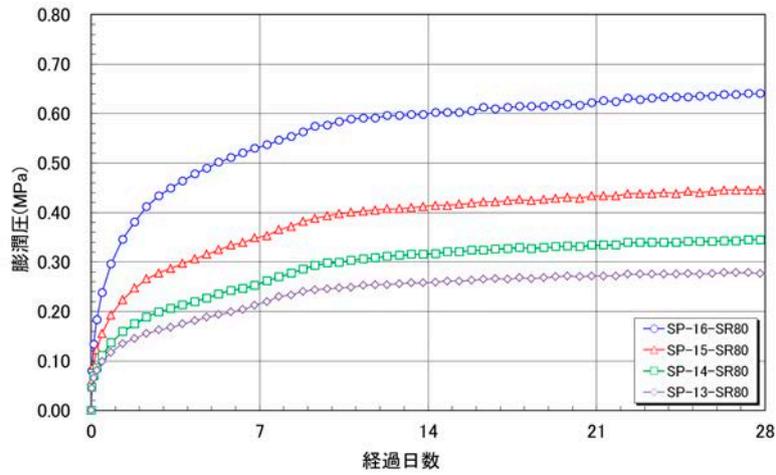


図 3-2-3 膨潤圧試験結果(供試体の初期水分飽和度 80%)

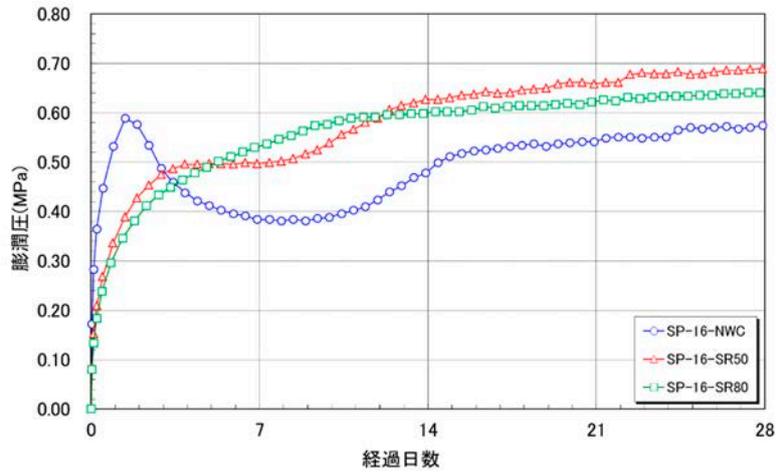


図 3-2-4 膨潤圧試験結果(供試体の初期乾燥密度  $1.6\text{Mg}/\text{m}^3$ )

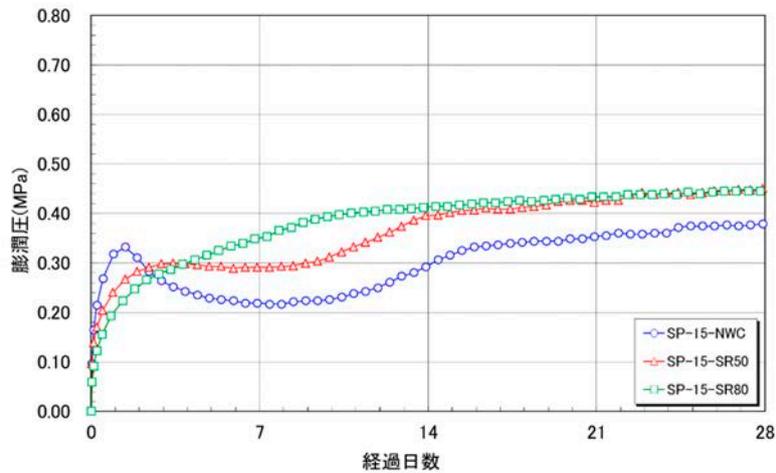


図 3-2-5 膨潤圧試験結果(供試体の初期乾燥密度  $1.5\text{Mg}/\text{m}^3$ )

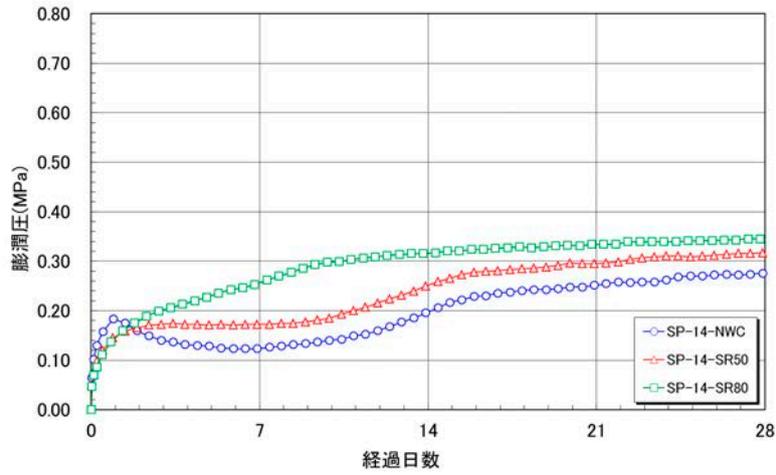


図 3-2-6 膨潤圧試験結果 (供試体の初期乾燥密度 1.4Mg/m<sup>3</sup>)

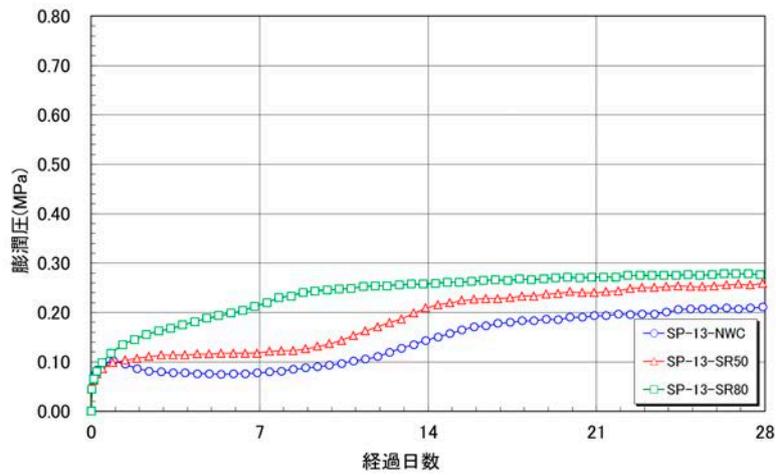


図 3-2-7 膨潤圧試験結果 (供試体の初期乾燥密度 1.3Mg/m<sup>3</sup>)

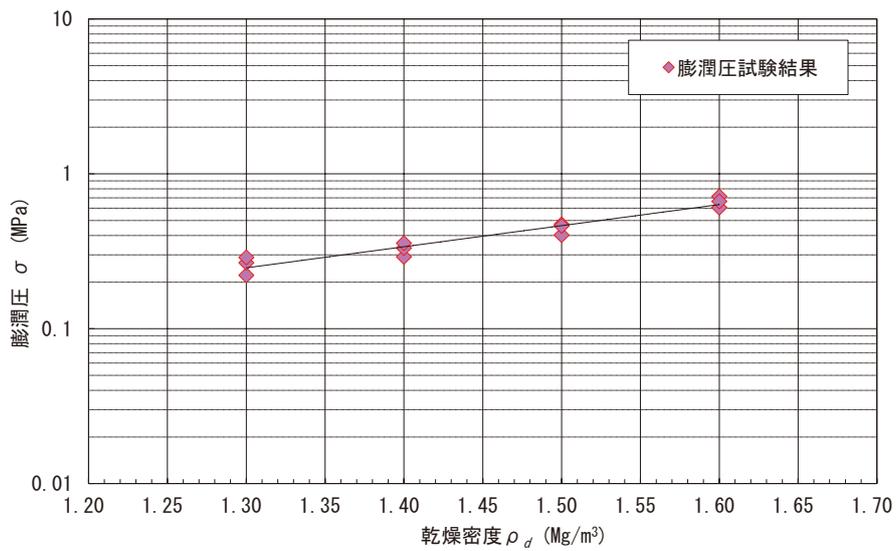


図 3-2-8 乾燥密度と膨潤圧の関係

### 3.3 熱伝導率の密度依存性の導入

緩衝材の密度変化が熱物性に及ぼす影響を考慮するため、これまでに取得されている熱伝導率と乾燥密度との関係について再整理を行った。

緩衝材の熱伝導率は、クニゲル V1 単体及び 30wt%ケイ砂混合体に関して、図 3-3-1 及び図 3-3-2 に示すような結果が得られており、熱伝導率 $\lambda$  (W/mK) と含水比 $\omega$  (%) との関係は式 (3-3-1) から式 (3-3-7) のようになる (菊池・棚井, 2003[17])。

クニゲル V1 単体の場合

乾燥密度 1.2Mg/m<sup>3</sup>

$$\lambda = 1.38 \times 10^{-1} + 2.96 \times 10^{-2}\omega + 5.00 \times 10^{-5}\omega^2 \quad (3-3-1)$$

乾燥密度 1.4Mg/m<sup>3</sup>

$$\lambda = 2.68 \times 10^{-1} + 3.33 \times 10^{-2}\omega + 1.00 \times 10^{-4}\omega^2 \quad (3-3-2)$$

乾燥密度 1.6Mg/m<sup>3</sup>

$$\lambda = 3.89 \times 10^{-1} + 4.79 \times 10^{-2}\omega + 2.00 \times 10^{-4}\omega^2 \quad (3-3-3)$$

乾燥密度 1.8Mg/m<sup>3</sup>

$$\lambda = 5.47 \times 10^{-1} + 6.47 \times 10^{-2}\omega + 7.00 \times 10^{-4}\omega^2 \quad (3-3-4)$$

30wt%ケイ砂混合体の場合

乾燥密度 1.4Mg/m<sup>3</sup>

$$\lambda = 3.64 \times 10^{-1} + 1.78 \times 10^{-2}\omega + 3.00 \times 10^{-3}\omega^2 - 6.40 \times 10^{-5}\omega^3 \quad (3-3-5)$$

乾燥密度 1.6Mg/m<sup>3</sup>

$$\lambda = 4.81 \times 10^{-1} + 1.01 \times 10^{-2}\omega + 6.40 \times 10^{-3}\omega^2 - 1.77 \times 10^{-4}\omega^3 \quad (3-3-6)$$

乾燥密度 1.8Mg/m<sup>3</sup>

$$\lambda = 7.28 \times 10^{-1} + 8.00 \times 10^{-3}\omega + 1.15 \times 10^{-2}\omega^2 - 4.50 \times 10^{-4}\omega^3 \quad (3-3-7)$$

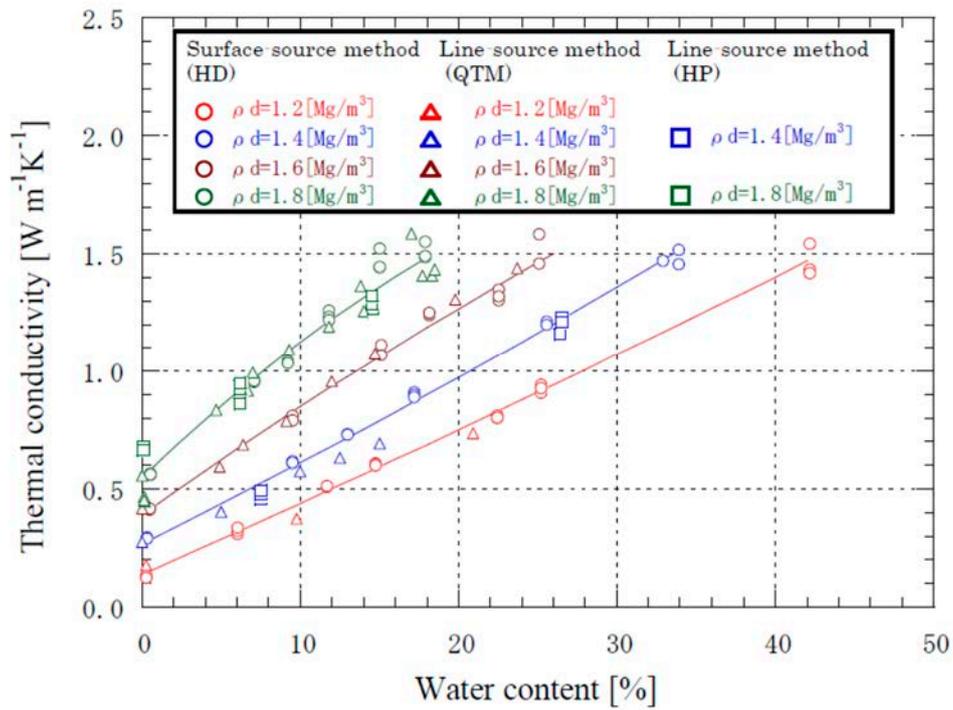


図 3-3-1 クニゲル V1 単体の熱伝導率の測定結果  
(菊池・棚井, 2003[17], 図 4-2, p.9)

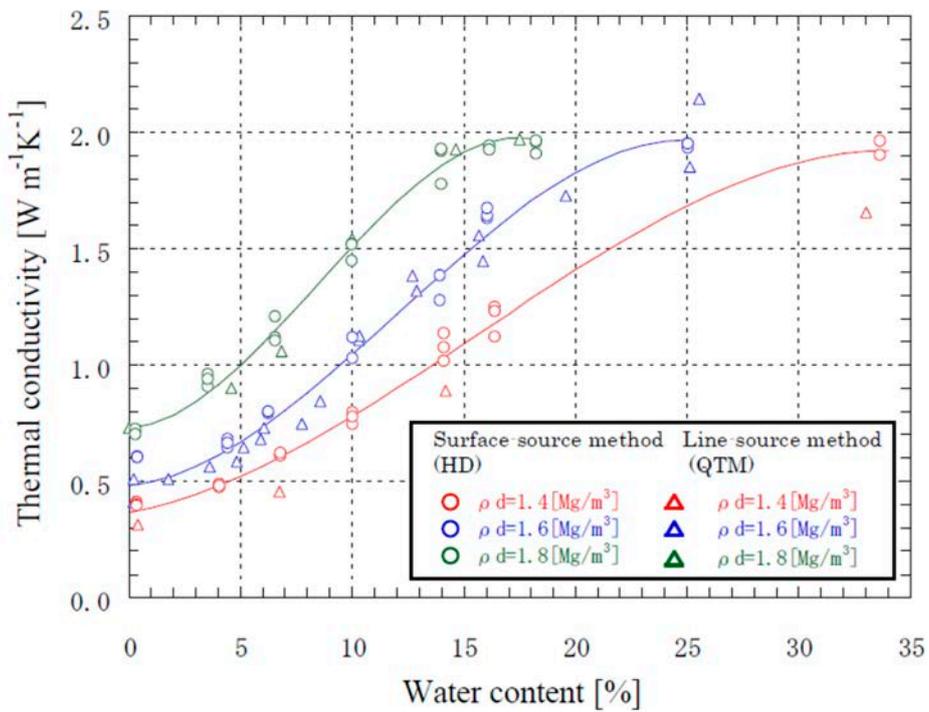


図 3-3-2 30wt%ケイ砂混合体の熱伝導率の測定結果  
(菊池・棚井, 2003[17], 図 4-3, p.9)

これらのデータを、熱伝導率を乾燥密度 $\rho_d$  (Mg/m<sup>3</sup>) と含水比 $\omega$  (%) の関係式で整理すると、次式のようになる。

クニゲル V1 単体の場合

$$\lambda = -1.40 + 4.71 \times 10^{-2}\omega - 3.00 \times 10^{-4}\omega^2 + 1.15\rho_d \quad (3-3-8)$$

30wt%ケイ砂混合体の場合

$$\lambda = -2.01 + 7.56 \times 10^{-2}\omega - 7.00 \times 10^{-4}\omega^2 + 1.56\rho_d \quad (3-3-9)$$

式 (3-3-8) 及び式 (3-3-9) により算出される熱伝導率を測定値と比較して図 3-3-3 及び図 3-3-4 に示す。

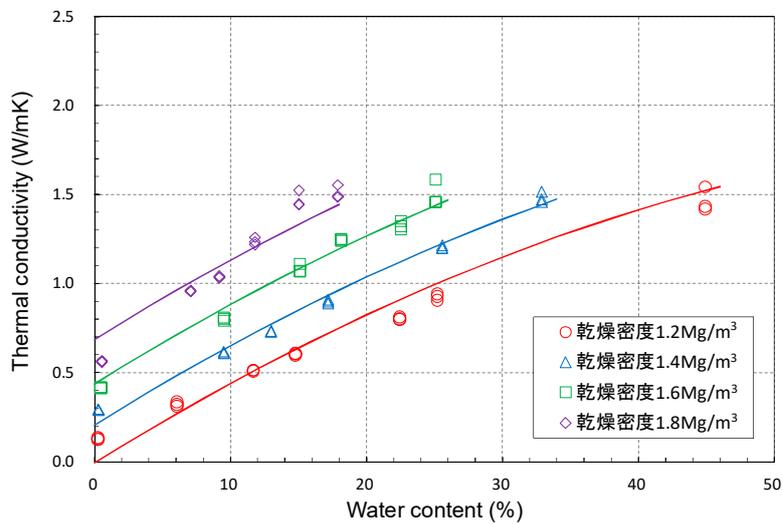


図 3-3-3 クニゲル V1 単体の熱伝導率の測定結果と関係式

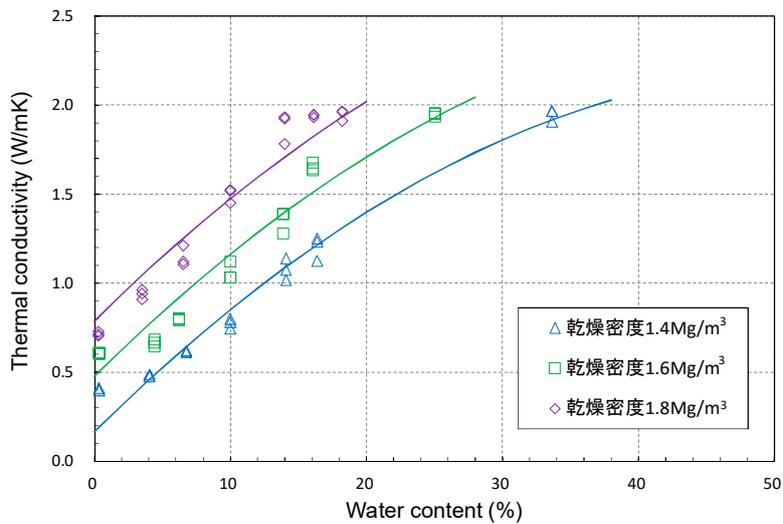


図 3-3-4 30wt%ケイ砂混合体の熱伝導率の測定結果と関係式

また、乾燥密度と含水比から水分飽和度を求め、熱伝導率を水分飽和度 $S_r$  (%) の関数として再整理した結果を図 3-3-5 及び図 3-3-6 に示す。また、関係式は以下の通りである。

クニゲル V1 単体の場合

$$\lambda = 3.18 \times 10^{-1} + 5.70 \times 10^{-3} S_r + 2.00 \times 10^{-4} S_r^2 - 2.00 \times 10^{-6} S_r^3 \quad (3-3-10)$$

30wt%ケイ砂混合体の場合

$$\lambda = 5.62 \times 10^{-1} - 4.00 \times 10^{-4} S_r + 5.00 \times 10^{-4} S_r^2 - 3.00 \times 10^{-6} S_r^3 \quad (3-3-11)$$

以上より、熱伝導率として、式 (3-3-8) 及び式 (3-3-9) を THAMES に導入することによって、熱伝導率の密度依存性を考慮できるようにプログラムを更新した。

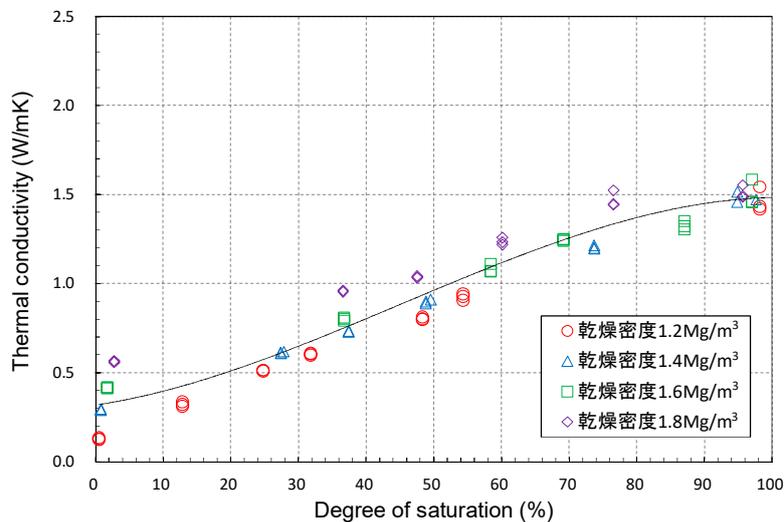


図 3-3-5 クニゲル V1 単体の熱伝導率と水分飽和度の関係

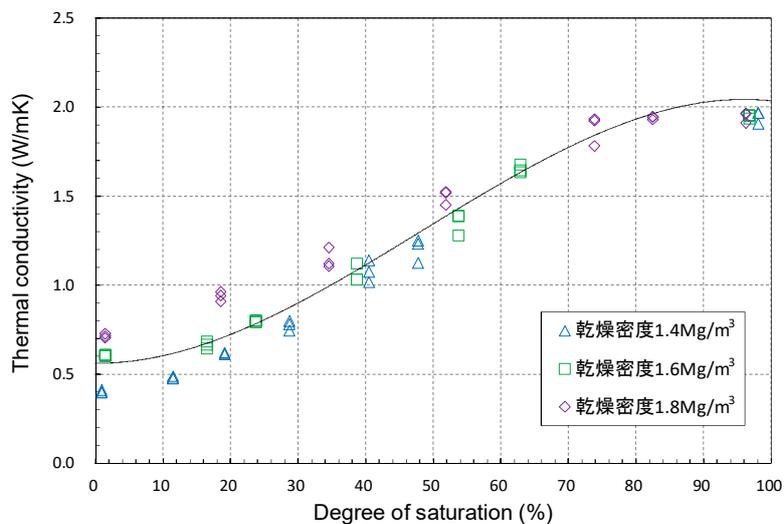


図 3-3-6 30wt%ケイ砂混合体の熱伝導率と水分飽和度の関係

### 3.4 比熱の密度依存性導入

緩衝材の比熱 $c$  (kJ/(kgK)) は、クニゲル V1 単体及び 30wt%ケイ砂混合体について、図 3-4-1 及び図 3-4-2 のような測定結果が得られている (菊池・棚井, 2003[17])。これらの図から、緩衝材の比熱については、顕著な密度依存性は確認できない。そのため、比熱は、含水比 $\omega$  (%) の関数として次式で表すこととし、これを THAMES に組み込んだ。

クニゲル V1 単体の場合

$$c = \frac{63.10+4.18\omega}{100+\omega} \quad (3-4-1)$$

30wt%ケイ砂混合体の場合

$$c = \frac{67.32+4.18\omega}{100+\omega} \quad (3-4-2)$$

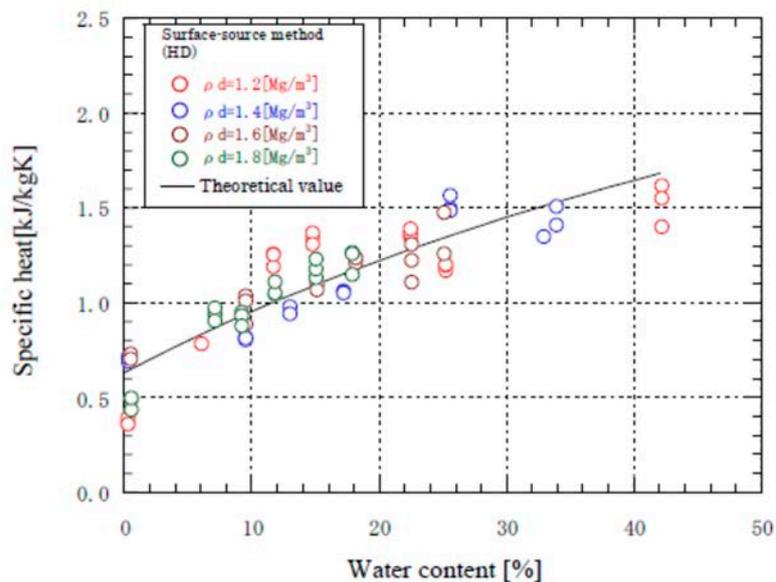


図 3-4-1 クニゲル V1 単体の比熱と含水比の関係  
(菊池・棚井, 2003[17], 図 4-8, p.18)

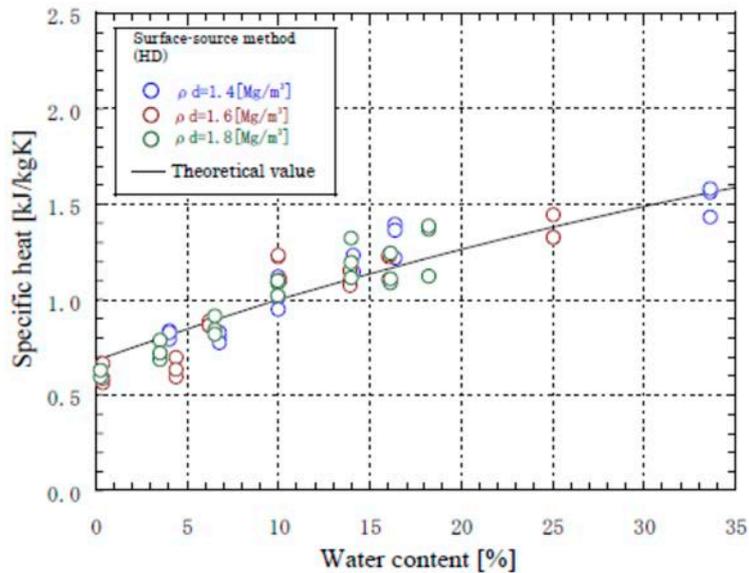


図 3-4-2 30wt%ケイ砂混合体の比熱と含水比の関係  
(菊池・棚井, 2003[17], 図 4-9, p.18)

### 3.5 固有透過度の密度依存性導入

緩衝材の固有透過度 $\kappa$  ( $\text{m}^2$ ) は、有効粘土乾燥密度 $\rho_b$  ( $\text{Mg}/\text{m}^3$ ) の関数として、図 3-5-1 に示すような結果が得られている (菊池・棚井, 2004 [18])。固有透過度は、透過する溶液によって異なる値を示し、蒸留水、人工海水及び幌延地下水に対してそれぞれ次式のようになる。次式を THAMES に組み込み、透過する地下水組成に応じた選択が可能とし、固有透過度の密度依存性を考慮することとした。

蒸留水の場合 (松本ほか, 1997 [19])

$$\kappa = \exp(-42.100 + 1.1447\rho_b - 2.123\rho_b^2) \quad (3-5-1)$$

人工海水の場合 (菊池ほか, 2003 [20])

$$\kappa = \exp(-47.155 + 15.138\rho_b - 7.878\rho_b^2) \quad (3-5-2)$$

幌延地下水の場合 (菊池・棚井, 2004 [18])

$$\kappa = \exp(-41.466 + 4.316\rho_b - 4.069\rho_b^2) \quad (3-5-3)$$

有効粘土乾燥密度 $\rho_b$  ( $\text{Mg}/\text{m}^3$ ) は次式から求める。

$$\rho_b = \frac{\rho_d(100 - R_s)}{100 - \rho_d \frac{R_s}{\rho_s}} \quad (3-5-4)$$

ここで、 $R_s$  : ケイ砂混合率 (%)、 $\rho_s$  : ケイ砂の土粒子密度 ( $\text{Mg}/\text{m}^3$ ) で、 $2.64\text{Mg}/\text{m}^3$  (核燃料サイクル開発機構, 1999 [4]) である。

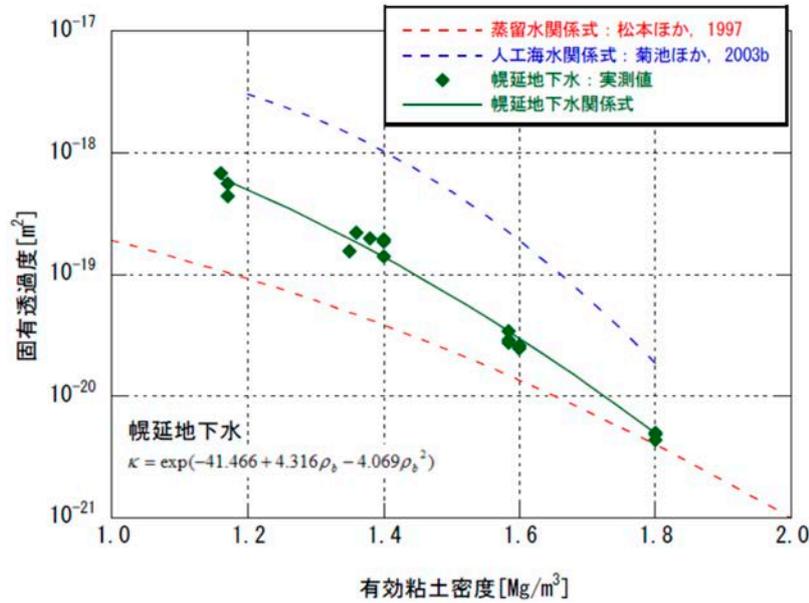


図 3-5-1 緩衝材の固有透過度と有効粘土密度の関係  
(菊池・棚井, 2004 [18], 図 3.5-2, p.29)

### 3.6 密度変化を考慮した水分特性曲線の設定方法の検討

緩衝材の体積含水率 $\theta$  (-)、水分飽和度 $S_r$  (-)、間隙率 $n_e$  (-) の関係は以下ようになる。

$$\theta = \omega \rho_d \tag{3-6-1}$$

$$S_r = (1 - n_e) \omega G_c \tag{3-6-2}$$

$$n_e = 1 - \frac{\rho_d}{G_c} \tag{3-6-3}$$

ここで、 $\omega$ は含水比 (-)、 $G_c$ は真密度 ( $\text{Mg}/\text{m}^3$ ) である。

緩衝材のサクシオンは、熱電対サイクロメータを用いて、様々な含水比の試料を対象に測定を行い、図 3-6-1 に示すような結果が得られている (鈴木・藤田, 1999 [21])。飽和・不飽和浸透流解析においては、サクシオンと体積含水率の関係を表す水分特性曲線が必要となるが、これまでの水分特性曲線は、サクシオンの測定結果に基づき、緩衝材の乾燥密度が

1.6Mg/m<sup>3</sup>であるとすれば、式 (3-6-1) に従い、含水比に乾燥密度を乗じて体積含水比に変換し、次式に示す van Genuchten モデル (van Genuchten, 1980 [22]) でフィッティングすることで設定を行っていた (図 3-6-2)。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta} = [1 + |\alpha\psi|^n]^{-m} \quad m = 1 - \frac{1}{n} \quad (3-6-4)$$

ここで、 $S_e$ は有効飽和度 (-)、 $\psi$ はサクシオン (mH<sub>2</sub>O) であり、30wt%ケイ砂混合体の緩衝材においては、飽和時の体積含水率 $\theta_s = 0.403$ 、最小体積含水率 $\theta_r = 0.000$ 、 $\alpha$ と $n$ はフィッティングパラメータで、それぞれ、 $8.0 \times 10^{-3} \text{m}^{-1}$ 、1.68 となる。

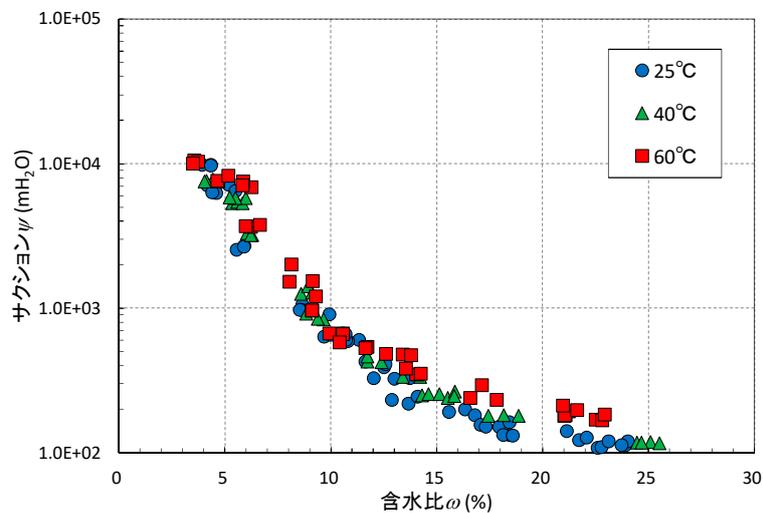


図 3-6-1 30wt%ケイ砂混合体のサクシオンの測定結果

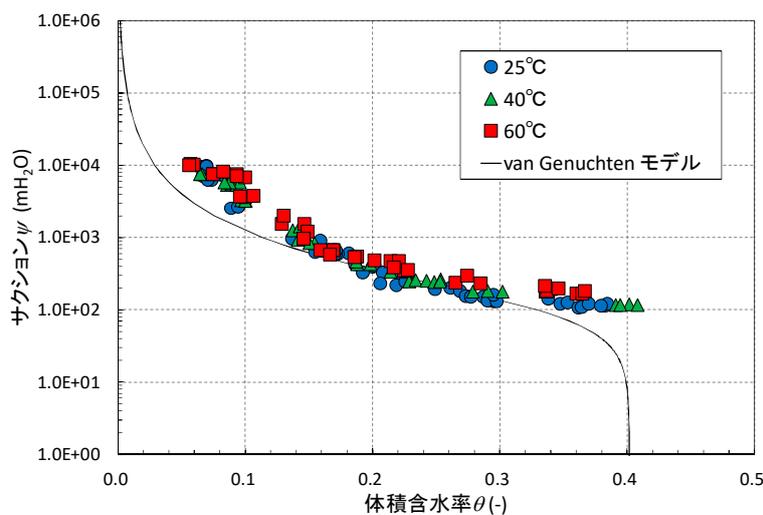


図 3-6-2 30wt%ケイ砂混合体のサクシオンの測定結果に基づき設定した水分特性曲線 (乾燥密度 1.6Mg/m<sup>3</sup> の場合)

これまでの THAMES は、式 (2-2) の水移動の支配方程式で示すように、計算で求められる圧力水頭 $\psi$  (mH<sub>2</sub>O) から、式 (3-6-4) で与えた水分特性曲線を介して体積含水率が計算され、式 (3-6-1) 及び式 (3-6-2) から水分飽和度が求められている。しかしながら、式 (3-6-4) 及び図 3-6-2 は、緩衝材の乾燥密度が 1.6 Mg/m<sup>3</sup> の場合の水分特性曲線であり、密度依存性は考慮されておらず、水分飽和度の計算においては、緩衝材の応力変形による密度変化は反映されていない。

そこで、緩衝材の密度変化を考慮した水分特性曲線を与える手法について検討を行った。図 3-6-3 に示すように、ある不飽和状態の供試体に圧縮による変形が生じ、供試体の密度が大きくなった場合、式 (3-6-1) ~ 式 (3-6-3) から分かるように、体積含水率及び水分飽和度の値は上昇する。一方、固相質量に対する液相質量の比を表す含水比については値の変化は生じず、サクシオン変化は生じないと考えられる。このような現象を表現できるように、緩衝材の含水比と、その解析ステップで得られた緩衝材の乾燥密度を用いて水分飽和度を求め、これより水分特性曲線を設定する手法について検討を行った。

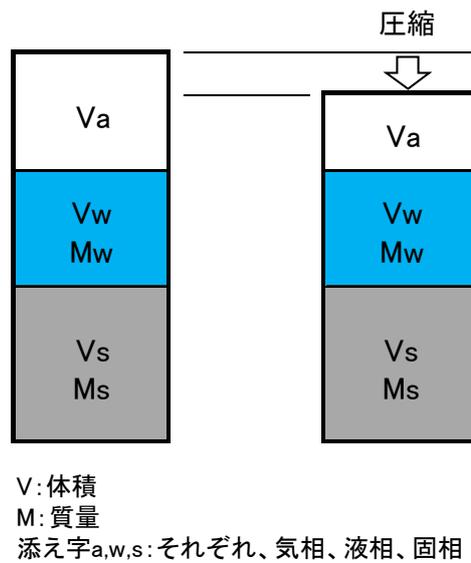


図 3-6-3 不飽和な状態における緩衝材の圧縮変形

図 3-6-2 で示したサクシオン (mH<sub>2</sub>O) と含水比 (%) の関係について、図 3-6-4 のように整理し、その回帰曲線として次式を得た。

$$\omega = a\psi^b \quad (3-6-5)$$

ここで、 $a$  と  $b$  はパラメータであり、30wt% ケイ砂混合体の場合は、 $a = 124.07$ 、 $b = -0.371$  となる。

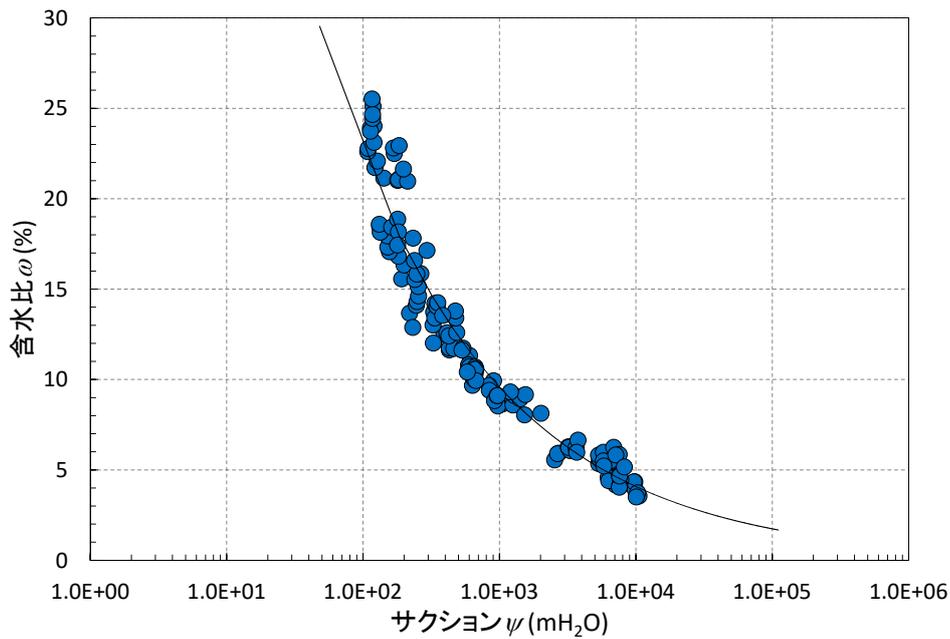


図 3-6-4 30wt%ケイ砂混合体の含水比とサクシヨンの関係

さらに、式 (3-6-5) の含水比は、次式より水分飽和度 $S_r$  (-) に変換することができる。

$$S_r = \frac{\omega \rho_s}{n_e \rho_w} \quad (3-6-6)$$

ここで、 $\omega$ は含水比 (-)、 $\rho_s$ は供試体の乾燥密度 ( $\text{Mg}/\text{m}^3$ )、 $\rho_w$ は水の密度 ( $\text{Mg}/\text{m}^3$ )、 $n_e$ は間隙率 (-) であり、式 (3-6-6) を用いて、水分飽和度とサクシヨンの関係を表すことができる。

次に、水分特性曲線の密度依存性を検討するために、図 3-6-4 で示した含水比とサクシヨンの関係について、式 (3-6-6) によって、乾燥密度  $1.2 \sim 1.8 \text{Mg}/\text{m}^3$  の間で  $0.1 \text{Mg}/\text{m}^3$  ごとの水分飽和度に変換し、サクシヨンとの関係で整理したものを図 3-6-5 に示す。これより、密度依存性を考慮した水分特性曲線として次式を得た。

$$S_r = a n_e^b \psi^c \quad (3-6-7)$$

ここで、 $a$ 、 $b$ 及び $c$ はパラメータであり、30wt%ケイ砂混合体の場合は、 $a = 0.9675$ 、 $b = -1.77$ 、 $c = -0.371$ となる。図 3-6-5 中には、式 (3-6-7) で与えられる値を曲線で示している。なお、式 (3-6-7) で得られた値が 1 以上となる時は、 $S_r = 1$ とする。

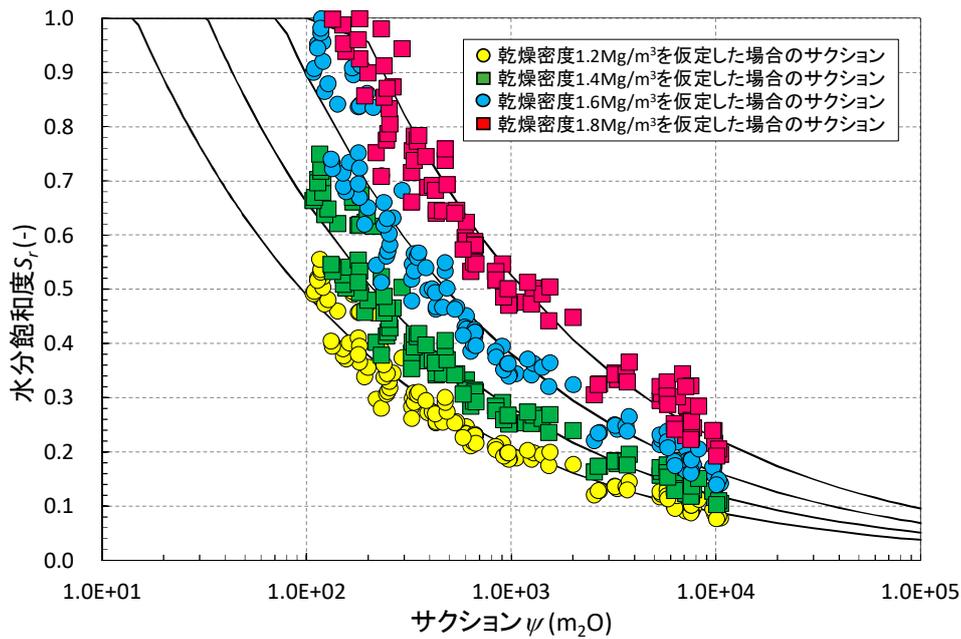


図 3-6-5 30wt%ケイ砂混合体の水分飽和度とサクシジョンの関係

以上、緩衝材の密度依存性を考慮した水分特性曲線の設定方法について検討を行った。しかしながら、式 (3-6-7) で与えられる水分特性曲線は、図 3-6-5 から分かるように、緩衝材が飽和した時点で大きなサクシジョン（負の圧力水頭）が残留する。土壌の保水特性は、水は主として土壌の表面張力（毛管圧）で保持されると考えられており、サクシジョンがゼロに近い時に、土壌は飽和に近くなるのが一般的な考え方であるから、式 (3-6-7) では、水分飽和度が高い時のサクシジョンが適切に表現できていないことになる。このようなことから、本検討結果に基づく水分特性曲線の密度依存性について、THAMES への導入を見送ることとした。緩衝材が飽和した時点でサクシジョンがゼロとなる関数モデルとしては、式 (3-6-4) で示した van Genuchten モデルがその一例であるが、近年、このモデルを拡張し、保水特性の密度依存性ととも温度の影響までを考慮したモデルが提案されている（菊本ほか、2009 [23]）。今後は、このような水分特性曲線の拡張モデルの THAMES への導入に向け、密度依存性を考慮した水分特性曲線モデルの構築が課題としてあげられる。

### 3.7 まとめ

熱-水-応力連成解析モデル（THAMES）において、緩衝材の密度変化が力学特性、熱特性及び水理特性へ与える影響を考慮するため、緩衝材の変形係数、膨潤圧、熱伝導率、及び固有透過度について密度依存性を考慮した関係式を導入した。そして、THAMES で計算される時間ステップごとの乾燥密度を、次の時間ステップの乾燥密度に反映させるとともに、その乾燥密度に応じた力学特性、水理特性及び熱特性の変化を考慮できるようにプログラムの改良を行った。

## 4. 幌延深地層研究計画における人工バリア性能確認試験に基づく 熱-水-応力連成解析モデルの信頼性確認

### 4.1 概要

ここでは、第3章で示した緩衝材の変形係数、膨潤圧、熱伝導率及び固有透過度の密度依存性を導入した熱-水-応力連成解析モデル (THAMES) を用いて、原子力機構が幌延深地層研究計画において実施している人工バリア性能確認試験 (花室, 2014 [15]) を対象とした再現解析を実施した。そして、原位置で得られた温度や浸潤挙動及び応力変形挙動に関する計測データとの比較を通じて、熱-水-応力連成モデルの適切性の確認を行うとともに、緩衝材の密度変化が温度や浸潤挙動へ及ぼす影響を把握した。

### 4.2 解析条件

幌延深地層研究計画における人工バリア性能確認試験 (花室, 2014 [15]) を構成するガラス固化体からの発熱を考慮可能なヒーターを含むオーバーパックを模擬した金属容器、緩衝材、緩衝材と岩盤の隙間に充填した砂層、埋め戻し材、支保コンクリート、路盤、コンクリートプラグ及び岩盤について、33,480 節点、29,808 要素でモデル化した (図 4-1)。モデル化の範囲は、坑道を中心に鉛直方向の対称性を仮定した 1/2 とし、温度に対して境界の影響が生じないように、ガラス固化体を模擬したヒーターから 25m 以上を確保した。

熱的な境界条件として、モデル上下両端面及び背面は、初期温度での固定境界、モデル前面及び左右両端面は断熱境界とした。水理的境界条件は、モデル上下両端面及び背面は、初期圧力水頭での固定境界、モデル前面及び左右両端面は不透水境界とした。力学的境界条件は、岩盤、支保、路盤及びコンクリートプラグの節点変位を固定とし、それ以外の節点について、モデル前面は x 及び z 方向に対してスライド境界、モデル左右両端面は、y 及び z 方向に対してスライド境界とした。地下水位は、原位置での計測結果に基づき、人工バリア性能確認試験が実施されている地表面から -350m の全水頭を 22mH<sub>2</sub>O とした。また、試験条件に合わせて、緩衝材底面及び埋め戻し材中に設置した注水管からの加圧注水を考慮した (図 4-2)。初期温度は全領域で 23°C とし、オーバーパックを模擬した金属容器の表面の温度は、一週間で 90°C に段階的に上昇させ、その後は、90°C で一定とした (図 4-3)。解析評価期間は、10 年後までとした。

解析に用いた岩盤、支保、路盤、埋め戻し材、緩衝材及びオーバーパックを模擬した金属容器の諸物性を表 4-1 に示す。緩衝材と岩盤の隙間に充填した砂の物性は、真密度 2.51Mg/m<sup>3</sup>、乾燥密度 1.4 Mg/m<sup>3</sup>、初期水分飽和度 1.00、間隙率 0.442、固有透過度  $1.00 \times 10^{-13} \text{m}^2$ 、熱伝導率 2.04W/mK、比熱 1,277J/kgK とし、力学的な物性値は岩盤と同一の設定とした。支保、路盤及びプラグは同一のものと仮定し、第2次 TRU レポートにおいて軟岩系岩盤に対する吹き付けコンクリートの仕様に準じて、間隙率及び真密度を設定した (電気事業連合会・核

燃料サイクル開発機構, 2005 [24])。また、熱物性値及び線膨張係数は、コンクリート標準示方書に基づき設定した(土木学会, 2007 [25])。埋め戻し材は、下側半分が原位置での転圧による締固め施工で乾燥密度が  $1.2\text{Mg/m}^3$ 、上側半分が金型を用いて圧縮成形した乾燥密度が  $1.4\text{Mg/m}^3$  のブロックを積み重ねる方法で施工されており、それぞれの密度に応じた物性値を与えた。これらの物性値は、国際共同研究 DECOVALEX において、本試験を対象としたベンチマーク解析で用いられた値に準じた (Sugita et al., 2016 [8])。緩衝材については、埋め戻し材側への膨出にともない密度低下が生じることが予想されることから、第3章で示したように、変形係数、膨潤圧、熱伝導率及び固有透過度の密度依存性を考慮した。変形係数は、一軸圧縮試験の結果に基づき、水分飽和度及び乾燥密度の関数として式(3-1-1)を用いた。また、飽和状態における膨潤圧は、乾燥密度の関数として式(3-2-1)で与えた。水分飽和度と膨潤圧の関係については、3.2節で示したような膨潤圧の時間変化の計測結果に対して、THAMESを用いた再現解析による検討が行われており(操上, 2003 [26])、これより、膨潤圧が水分飽和度に比例するモデルあるいは水分飽和度の平方根に比例するモデルの再現性が良いことが確認できる。ここでは、簡単化のために、膨潤圧が水分飽和度に比例するとしたモデルを用い、初期水分飽和度から飽和の間で膨潤圧が線形的に増加すると仮定した。

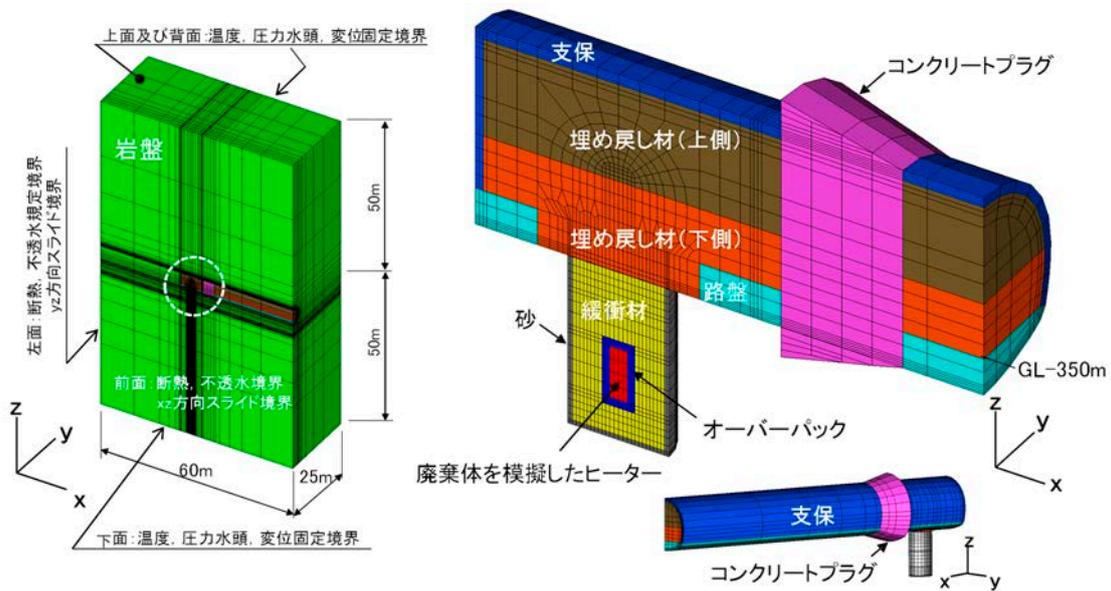


図 4-1 人工バリア性能確認試験の解析評価に用いた解析メッシュモデル

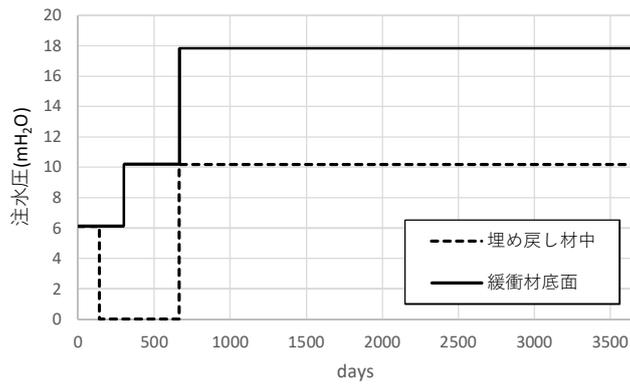


図 4-2 緩衝材及び埋め戻し材への加圧注水条件

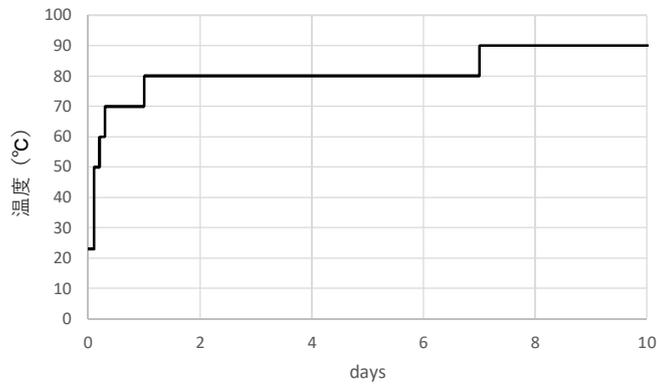


図 4-3 オーバーパックを模擬した金属容器表面の温度境界条件

表 4-1 人工バリア性能確認試験の解析評価に用いた物性値

パラメータ	単位	岩盤	支保路盤プラグ	埋め戻し材(下側)	埋め戻し材(上側)	緩衝材	オーバーパックを模擬した金属容器
真密度	Mg/m <sup>3</sup>	2.454	2.620	2.593	2.593	2.680	7.800
乾燥密度	Mg/m <sup>3</sup>	1.354	2.280	1.200	1.400	1.600	-
空隙率	-	0.448	0.130	0.538	0.460	0.403	-
変形係数	Pa	$1.82 \times 10^9$	$2.94 \times 10^{10}$	$1.00 \times 10^5$	$3.00 \times 10^6$	式 3-1-1	$2.00 \times 10^{11}$
ポアソン比	-	0.21	0.20	0.40		0.30	
線膨張係数	-	$1.33 \times 10^{-5}$	$1.00 \times 10^{-5}$	$1.00 \times 10^{-6}$		$1.00 \times 10^{-6}$	$1.64 \times 10^{-6}$
初期水分飽和度	-	1.00		0.91		0.50	-
熱伝導率	W/mK	式 4-1	$2.56 \times 10^0$	式 4-1		式 3-3-11	$5.30 \times 10^1$
比熱	kJ/kgK	式 4-2	$1.05 \times 10^0$	式 4-2		式 3-4-2	$4.60 \times 10^{-1}$
固有透過度	m <sup>2</sup>	$1.33 \times 10^{-15}$	$9.10 \times 10^{-18}$	$3.00 \times 10^{-18}$	$1.76 \times 10^{-19}$	式 3-5-1	-
水分特性曲線	-	式 3-6-4					
比透水係数	-	式 4-3				式 4-4	-
温度勾配水分移動係数	m <sup>2</sup> /sK	-	-	-	-	$1.00 \times 10^{-11}$	-
飽和膨潤圧	MPa	-	-	0.1	1.0	式 3-2-1	-

① 熱物性

岩盤の熱伝導率 $\lambda$  (W/mK) と比熱 $c$  (kJ/kgK) については、HDB-6 孔の岩石コアの室内試験結果に基づき (山本ほか, 2005 [27])、木村ら (木村ほか, 2010 [13]) に従い、式 (4-1) 及び式 (4-2) によって含水比 $\omega$  (%) の関数として設定した。また、埋め戻し材については、下側半分が原位置での締固めによる施工、上側半分がブロックを積み重ねる方法で施工されているが (中山・大野, 2019 [28])、ここでは、乾燥密度 1.4 Mg/m<sup>3</sup> のブロック形状の供試体に対する測定結果を用いて (日本原子力研究開発機構, 2016 [29])、岩盤と同様に、式 (4-1) 及び式 (4-2) により設定した。式 (4-1) 及び式 (4-2) 中におけるパラメータ $p_1 \sim p_6$ は、表 4-2 の通りである。一方、緩衝材の熱伝導率については、密度依存性を考慮するため水分飽和度及び乾燥密度の関数として、第 3 章で示した式 (3-3-11) を、比熱については式 (3-4-2) を適用した。

$$\lambda = p_1 + p_2\omega + p_3\omega^2 + p_4\omega^4 \quad (4-1)$$

$$c = \frac{p_5 + p_6\omega}{100 + \omega} \quad (4-2)$$

表 4-2 岩盤及び埋め戻し材の熱物性と含水比の関係に係るパラメータ

	$p_1$	$p_2$	$p_3$	$p_4$	$p_5$	$p_6$	引用文献
岩盤	$5.79 \times 10^{-1}$	$1.97 \times 10^{-2}$	0.00	0.00	$6.26 \times 10^1$	$3.20 \times 10^0$	木村ほか, 2010 [13]
埋め戻し材	$3.39 \times 10^{-1}$	$2.97 \times 10^{-2}$	0.00	0.00	$4.00 \times 10^1$	$4.18 \times 10^0$	日本原子力研究開発機構, 2016 [29]

② 水理特性

不飽和水理特性は、工学規模の人工バリア試験や、幌延深地層研究計画における人工バリア性能確認試験の評価に基づいた検討がなされており、岩盤、支保、路盤、プラグ、埋め戻し材及び緩衝材の水分特性曲線は、式 (3-6-4) に示した van Genuchten モデルにより設定した。このうち、幌延の岩盤を対象としたサクションについては、知見が得られていないため、ここでは、幌延の地質と類似する泥岩に関する室内試験結果に基づき (堤ほか, 1994 [30])、木村らの手法に準じてフィッティングパラメータである $\alpha$ と $n$ を設定した (木村ほか, 2010 [13])。また、人工バリア性能確認試験において施工されている支保、路盤及びプラグについてもサクションの測定が行われていないことから、ここでは、モルタルの供試体を対象に、遠心法によって取得されている値を採用した (藤崎ほか, 2008 [31])。埋め戻し材については、乾燥密度 1.4 Mg/m<sup>3</sup> のブロック形状の供試体に対するサクションの測定結果に基づき設定した (日本原子力研究開発機構, 2016 [29])。緩衝材については、藤崎らが (藤崎ほか, 2008 [31])、乾燥密度 1.6 Mg/m<sup>3</sup> の供試体を対象に、サイクロメータ法によって取得したサクションに基づく設定値を採用した。これら水分特性曲線のパラメータを整理して表 4-3 に示す。

また、比透水係数については、岩盤、支保、路盤、プラグ及び埋め戻し材に対して、次式 (van Genuchten, 1980 [22]) により設定した。

$$k_r = \frac{k}{k_s} = \sqrt{S_e} \left[ 1 - \left( 1 - S_e^{1/n} \right)^n \right]^2 \quad S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta} \quad (4-3)$$

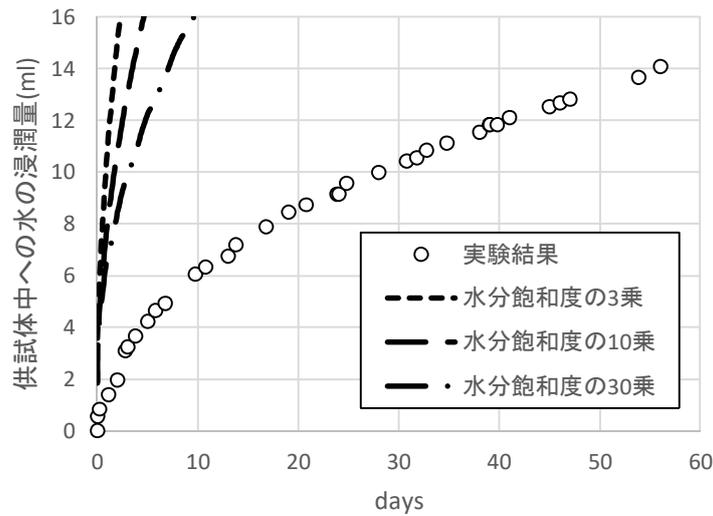
ここで、 $k_r$ ：比透水係数 (-)、 $k$ ：不飽和透水係数 (m/s)、 $k_s$ ：飽和透水係数 (m/s)、 $S_e$ ：有効水分飽和度 (-)、 $n$ ：フィッティングパラメータ (-) であり、パラメータは表 4-3 の通りである。一方、緩衝材の比透水係数については、浸潤試験結果 (日本原子力研究開発機構, 2012 [32]) に基づいた飽和-不飽和浸透流解析によって求めた。試験は、ケイ砂 30wt%混合体、乾燥密度 1.60Mg/m<sup>3</sup>、初期含水比 15.3%、直径 50 mm、高さ 100 mmの供試体に対して、3.0wt%の NaCl 濃度の溶液を供試体下部より浸潤させ、その浸潤量を計測している。解析物性値として、水分特性曲線については、式 (3-6-4) を用い、パラメータは表 4-3 の通りである。固有透過度については、浸潤試験で対象とした溶液の 3.0wt%NaCl を同様の濃度として、式 (3-5-2) から求められる人工海水に対する固有透過度として 1.29×10<sup>-18</sup>m<sup>2</sup>を用いた。その結果、図 4-4 (a) に示すように、浸潤試験の結果に比べて、解析結果の浸潤は速く、比透水係数を極めて小さく設定した場合でも浸潤試験結果を再現することができなかつた。一方、図 4-4 (b) に示すように、蒸留水を透過させた透水試験で得られる固有透過度の 4.00×10<sup>-20</sup>m<sup>2</sup>を用いた場合には (核燃料サイクル開発機構, 1999 [4])、浸潤試験結果を再現することが可能であったことから、ここでは、次式で示す比透水係数を用いることとした。

$$k_r = S_r^3 \quad (4-4)$$

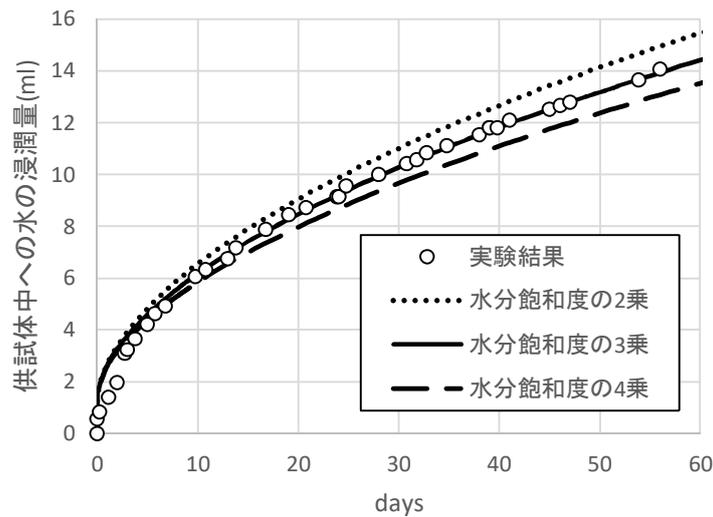
ここで、 $S_r$ は水分飽和度 (-) である。浸潤試験では、供試体に 3.0wt%NaCl の溶液を浸潤させているが、この溶液に対する固有透過度を用いた場合に、浸潤試験の結果を再現することができなかつた。この理由については、緩衝材中に初期に存在する間隙水と、浸潤水が混合することで塩分濃度が変化し、3.0wt%の NaCl 溶液に対する固有透過度を用いることが適切でないことが考えられる。このようなことから、塩水系地下水環境下での緩衝材の浸潤挙動を適切に評価することを目的として、水理、物質移動及び地球化学反応を連成させ、緩衝材の間隙水組成が水理特性に及ぼす影響を考慮した解析評価も行われている (日本原子力研究開発機構, 2018 [33])。

表 4-3 不飽和水理特性における van Genuchten モデルのパラメータ

	$\theta_r$	$\theta_s$	$\alpha$	$n$	引用文献
岩盤	0.00	0.386	$9.93 \times 10^{-3}$	2.01	木村ほか, 2010 [13]
支保・路盤・プラグ		0.130	$3.80 \times 10^{-1}$	1.11	藤崎ほか, 2008 [31]
埋め戻し材(下側)		0.538	$3.80 \times 10^{-3}$	1.30	日本原子力研究開発機構, 2016 [29]
埋め戻し材(上側)		0.460			
緩衝材		0.403	$1.20 \times 10^{-2}$	1.40	藤崎ほか, 2008 [31]



(a) 人工海水(3.0wt%NaCl)に対する固有透過度を用いた場合



(b) 蒸留水に対する固有透過度を用いた場合

図 4-4 浸潤試験に基づく緩衝材の比透水係数の同定結果

以上、緩衝材の変形係数、膨潤圧、熱伝導率及び固有透過度について、これらの密度依存性を考慮した熱-水-応力連成解析を実施し、これをケース 1 とした。また、ケース 1 との比較により緩衝材の密度変化が及ぼす緩衝材中の温度や浸潤挙動などへの影響を把握するため、緩衝材の密度変化を生じさせないケースとして、節点変位を拘束した熱-水 (TH) 連成解析を実施した (ケース 2)。さらに、変形係数の密度依存性を考慮した式 (3-1-1) を用いたケース 1 の解析結果は、後述するように、幌延深地層研究計画における人工バリア性能確認試験において、緩衝材中に設置された変位計によって得られた計測値と乖離が見られた。そこで、変位量に関する計測値と一致させるような変形係数として、式 (3-1-1) で得られる値の 2/3 とした場合の解析をケース 3 として実施した。変形係数の設定根拠については後述する。各解析ケースとその条件を整理して表 4-4 に示す。

表 4-4 人工バリア性能確認試験を対象とした解析ケース

	緩衝材物性値 の密度依存性	緩衝材の変形係数の設定値	備考
ケース 1	考慮する	式 (3-1-1) で与える	解析ケース 3 に比べて緩衝材の密度変化が生じにくい条件
ケース 2	考慮しない	TH 解析のため力学に関する設定はない	節点の変位を固定し緩衝材の密度変化を生じさせない条件
ケース 3	考慮する	式 (3-1-1) の 2/3 で与える	解析ケース 1 に比べて緩衝材の密度変化が生じやすい条件

#### 4.3 解析結果

緩衝材の密度変化に関する解析結果として、ケース 1 とケース 3 の初期状態から 10 年後までの密度分布の変化を比較して図 4-5 に示す。ケース 1 の場合は、緩衝材の密度は初期から大きく変化していない結果となっている。これに比べて、変形係数をケース 1 の 2/3 と小さく設定したケース 3 では、岩盤からの地下水の浸潤によって緩衝材は膨潤し、緩衝材の外側で密度が低下する一方で、オーバーパックを模擬した金属容器周辺では圧縮されることによって、初期の乾燥密度の 1.6Mg/m<sup>3</sup> よりも大きくなっている。また、緩衝材の上部は、埋め戻し材側へ膨出し、その影響により乾燥密度が 1.5 Mg/m<sup>3</sup> 程度まで低下している。そして、緩衝材全体としては、密度が低下する方向に変化している結果となっている。なお、図 4-5 に示した変形量は 10 倍表示とし、埋め戻し材、オーバーパックを模擬した金属容器及び岩盤は非表示としている。

次に、人工バリア性能確認試験において計測されている緩衝材中の温度、水分飽和度、鉛直方向の変位及び応力の時間変化について、解析結果と比較して図 4-6 に示す。比較対象とする計測値は、温度については熱電対 (センサー番号 TE007)、水分飽和度についてはサイ

クロメータ（センサー番号 PS003）、鉛直変位については変位計（センサー番号 DS001-1）、応力については土圧計（センサー番号 TP011）によって得られた値である（中山ほか, 2019 [34]）。比較期間は、廃棄体を模擬したヒーターによる熱負荷を開始した平成 27 年 1 月から平成 30 年 3 月までの約 1200 日間である。このうち、サイクロメータによって計測されるサクション値は、式 (3-6-4) を用いて水分飽和度に変換している。

緩衝材中の温度は、図 4-6 (a) に示すように、試験における設定温度の変更や停電の影響などに起因し計測値が大きく上下しているのに対して、解析においては、図 4-3 に示すように、7 日以降、オーバーパックを模擬した金属容器表面の温度を 90°C としているため、概ね一定の温度で推移する結果となっている。今回の解析では、原位置試験における温度設定を解析条件に反映するまでに至っていないことから、温度に関する解析結果の正確性について確認を行うことはできなかった。一方、温度環境に及ぼす緩衝材の密度依存性に関しては、緩衝材の変形係수에式 (3-1-1) を用いたケース 1 と、緩衝材の応力変形を考慮しないケース 2 の結果がほぼ同じであった。そして、緩衝材の変形係数を式 (3-1-1) の 2/3 と小さく設定したケース 3 は、それ以外のケースに比べて温度が僅かながら高くなっている。これは、緩衝材の外側が膨潤して密度が低下することによって、緩衝材外側の熱伝導性が低下し、それよりオーバーパックを模擬した金属容器に近い出力ポイント A の温度が上昇したと考えられる。

緩衝材の浸潤挙動については、図 4-6 (b) に示すように、サイクロメータによって得られた計測値と解析結果は概ね一致し、時間の経過とともに緩衝材中の水分が上昇している様子を再現している。しかしながら、本解析では、塩水系である幌延地下水に対する固有透過度ではなく、蒸留水に対する固有透過度を用いている。幌延深地層研究施設周辺の地下水中の NaCl 濃度は、約 0.2mol/l (=1.18wt%) であり（藤田ほか, 2007 [35]）、緩衝材中にも、この塩濃度の地下水が浸潤すると考えられる。緩衝材の固有透過度は、式 (3-5-1) と式 (3-5-3) から、乾燥密度が 1.6Mg/m<sup>3</sup>において、それぞれ、蒸留水の場合、 $4.67 \times 10^{-20} \text{m}^2$ 、幌延地下水の場合、 $1.76 \times 10^{-19} \text{m}^2$  であり、幌延地下水の固有透過度は、蒸留水に比べて、1 オーダー大きくなる。実際の地下水に対する固有透過度よりも小さい値を用いたにも関わらず計測値との一致が見られた理由として、固有透過度の大小の影響は、浸潤面である岩盤壁面より距離がある緩衝材内部ほど大きくなると考えられるが、今回の評価は、岩盤壁面に近い部分であるため、塩水系地下水の影響が表れにくくなっている可能性もある。また、前述したように、不飽和状態にある緩衝材の初期に存在する間隙水と塩水系の幌延地下水とが混合して塩濃度が変化し、塩濃度に応じて透水性も変化し、時間や場所によって固有透過度は異なることが考えられる。このようなことから、本解析結果は、緩衝材の浸潤挙動を適切に表現できていない可能性も考えられる。浸潤挙動に及ぼす緩衝材の密度依存性に関しては、ケース 3 が、それ以外のケースに比べて、僅かながら水分飽和度が高くなっている。これは、膨潤による緩衝材の密度低下と、緩衝材中の温度が高くなることの二つの要因によって、緩衝材の透水係数が大きくなったことに起因するものと考えられる。

緩衝材中の鉛直方向の変位については、式(3-1-1)で示した変形係数を用いたケース1の解析結果については、計測結果の1/10程度と大きく乖離する結果となっている(図4-6(c))。緩衝材の変形係数は、温度が高いほど小さくなり、30°Cと80°Cとでは倍以上の差があるとの報告例もある(原子力環境整備促進・資金管理センター, 2017[36])。人工バリア性能確認試験における緩衝材の温度環境からは、3.1節で示した室温の条件下で実施した一軸圧縮試験に基づき設定された式(3-1-1)の変形係数を用いることが適切でない可能性があり、このことが計測値との乖離の原因の一つと考えられる。そこで、緩衝材の変形係数をパラメータとした感度解析を実施したところ、式(3-1-1)で与えられる変形係数よりも小さく設定することで計測値と一致する方向にあることを確認した。ケース3の解析結果は、式(3-1-1)で得られる変形係数の2/3の値を与えた場合のものである。これは、上述したように、変形係数の温度依存性に関する報告例と整合するものである。なお、図4-6(c)及び図4-6(d)中には、ケース2の解析結果の表示がないが、これは、応力変形を考慮しない熱-水連成解析として実施しているためである。

緩衝材で生じる応力は、図4-6(d)に示すように、解析結果は計測値よりも小さくなっている。この要因としては、解析で設定した飽和膨潤圧が適切でなかったことや、時間の経過とともに計測値と解析結果の解離が大きくなる傾向にあることから、膨潤圧は水分飽和度に比例するとした設定が適切でないことも考えられる。また、ケース3の応力が、ケース1よりも低くなっている要因としては、ケース3は、ケース1に比べて変形係数が小さいため、埋め戻し材側への膨出が生じやすく、緩衝材の密度低下がより顕著となるためと考えられる。

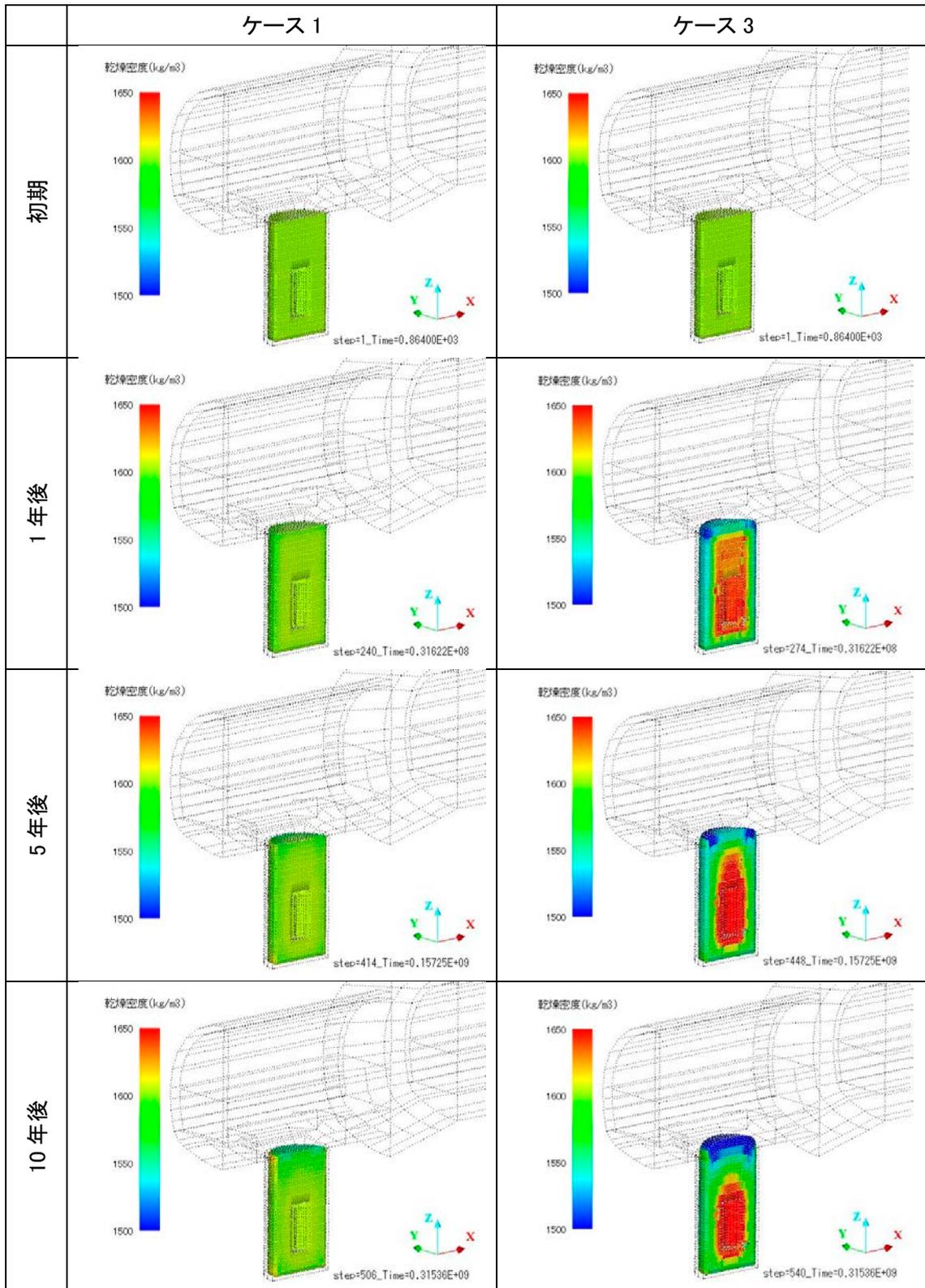
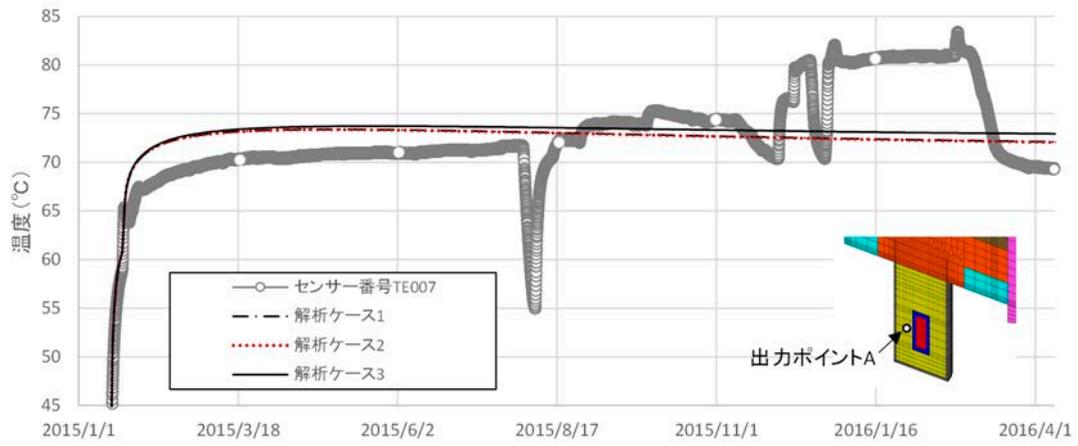


図 4-5 人工バリア性能確認試験における緩衝材の密度変化に関する解析結果  
(変形量は 10 倍で表示)



(a) 温度

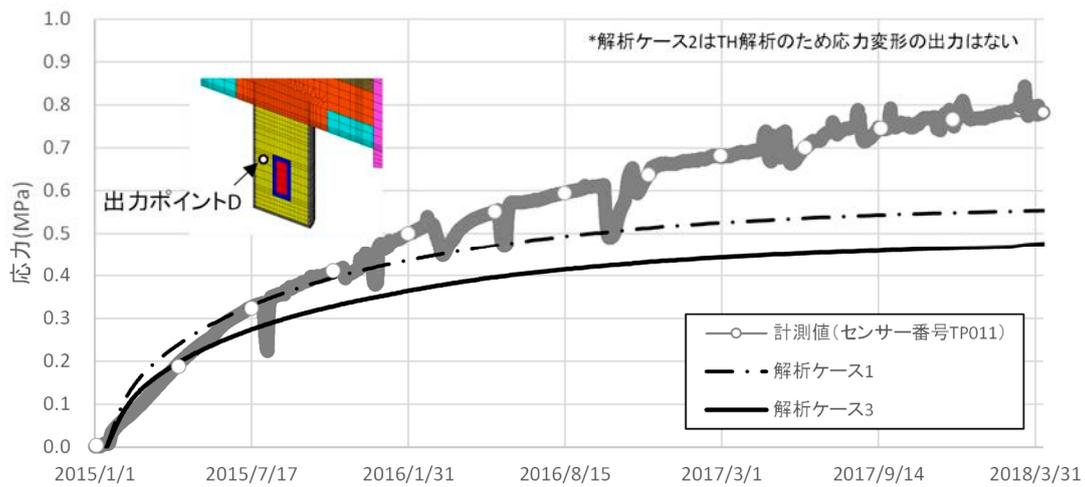


(b) 水分飽和度



(c) 鉛直方向の変位

図 4-6 人工バリア性能確認試験における計測結果と THM 連成解析結果の比較(1/2)



(d) 応力

図 4-6 人工バリア性能確認試験における変位の計測結果と THM 連成解析結果の比較 (2/2)

#### 4.4 まとめ

緩衝材の膨潤変形によって生じる密度変化と、これが熱特性、水理特性及び力学特性へ及ぼす影響を考慮できるように更新した熱-水-応力連成解析モデルを用いて、幌延深地層研究計画における人工バリア性能確認試験を対象とした再現解析を実施した。そして、原位置で計測されたデータとの比較を通じて解析モデルの妥当性の確認を行うとともに、緩衝材の密度変化が緩衝材中の温度や浸潤挙動へ及ぼす影響を確認した。緩衝材の浸潤挙動の評価については、計測値を再現したものの、塩水系地下水が浸潤する人工バリア性能確認試験に対して、蒸留水に対する固有透過度を用いていることから、本解析結果は、緩衝材の浸潤挙動を適切に表現できていない可能性もある。今後は、図 1-1 で示したように、水理と物質移行の相互作用を考慮した評価を行い、塩水系地下水の浸潤挙動を把握することが求められる。また、緩衝材の密度変化が及ぼす熱特性、水理特性及び力学特性への影響を考慮した場合、緩衝材外側の密度低下や、埋め戻し材側へ膨出し緩衝材の密度低下することで熱伝導性が低下し、物性値の密度依存性を考慮しない場合に比べて緩衝材内側の温度は若干高くなる結果となった。また、膨出による密度低下によって、緩衝材の透水係数が大きくなることに合わせて温度が高くなり、それにより、緩衝材の水分が僅かながら高くなる結果となっている。しかしながら、今回の評価においては、緩衝材の膨出量が少なく緩衝材の密度低下も僅かであったことから、緩衝材の密度変化が温度や浸潤挙動に及ぼす影響は小さいものであった。他方、緩衝材の膨潤変形挙動を再現するためには、緩衝材の変形係数の密度依存性と合わせて、温度の影響も考慮する必要があることが明らかとなり、今後は、変形係数の温度依存性に関するデータ取得とそれを考慮した連成解析モデルの構築が課題となる。

以上、緩衝材の密度変化にともなう熱特性、水理特性及び力学特性への影響を反映できるように高度化した熱－水－応力連成解析モデルを用いて、幌延深地層研究計画における人工バリア性能確認試験の再現解析を実施した。そして、緩衝材が膨出し密度変化が生じることによる緩衝材中の温度や浸潤挙動及び応力変形挙動に及ぼす影響の程度を確認した。

## 5. 熱－水－応力連成解析モデルによるニアフィールドの長期挙動評価

### 5.1 概要

ここでは、過渡期におけるニアフィールドの熱－水－応力連成挙動の把握を目的とした数値実験の事例として、前述した緩衝材の密度変化にともなう熱特性、水理特性及び力学特性への影響を考慮できるように高度化された熱－水－応力連成解析モデルを用いて、緩衝材の密度変化に着目したニアフィールドの長期挙動に関する評価を実施した。緩衝材の密度は、その品質を規定する重要なパラメータであることから、人工バリア設置時に確保すべき密度を適切に設定するためには、このような長期的な緩衝材の密度変化の予測が必要不可欠である。

解析対象は、第 2 次取りまとめで示された廃棄体豎置き仕様の人工バリアとし、地下水の浸潤にともない緩衝材が膨潤して埋め戻し材側へ膨出することによる温度や浸潤挙動への影響及び緩衝材の密度変化を定量的に把握した。

### 5.2 解析条件

本解析で対象とした処分システムは、第 2 次取りまとめに示されている廃棄体豎置き定置方式であり、軟岩系岩盤、深度 500m とした（核燃料サイクル開発機構, 1999 [4]）。解析領域は、処分深度（GL-500m）の $\pm 100\text{m}$ をモデルに含め、ガラス固化体を中心として、ガラス固化体定置ピッチと坑道離間距離の 1/2 を水平方向に想定した 1/4 領域で形成する三次元モデルとし、8,692 節点、7,148 要素でモデル化した（図 5-1）。ガラス固化体定置ピッチは、第 2 次取りまとめに示された処分孔径の 3 倍の 6.66m とし、坑道離間距離については、処分坑道の空洞安定性から生じる制限により処分坑道径の 2.6 倍の 13m とした（核燃料サイクル開発機構, 1999 [4]）。熱的境界条件として、モデル上下両面は初期温度での固定境界、モデル四側面は断熱境界とした。水理的境界条件は、モデル上下両面が所定の水頭での固定境界、モデル四側面は不透水境界とした。変位境界条件としては、スライド境界とした。

地質環境は、幌延深地層研究計画における調査研究結果に基づき、設定深度の 500m に該当する岩盤の値とし、真密度  $2.481\text{Mg/m}^3$ 、乾燥密度  $1.523\text{Mg/m}^3$ 、間隙率 0.386、水分飽和度 1.0、線膨張係数  $1.34 \times 10^{-5}$ 、変形係数  $1.71 \times 10^9\text{Pa}$ 、ポアソン比 0.17（山本ほか, 2005 [27]）、固有透過度  $4.68 \times 10^{-16}\text{m}^2$  とした（太田ほか, 2007 [37]）。熱物性については、式 (4-1)、式 (4-2) を用い、 $p_1=7.38 \times 10^{-1}$ 、 $p_2=2.57 \times 10^{-2}$ 、 $p_3=0.00$ 、 $p_4=0.00$ 、 $p_5=5.32 \times 10^1$ 、 $p_6=2.8$ 、不飽和水理特性は、式 (3-6-4)、式 (4-3) を用い、 $\alpha=4.96 \times 10^{-3}$ 、 $n=2.01 \times 10^{-1}$  とした（木村ほか, 2010 [13]）。地温勾配は、地表面から  $4.7^\circ\text{C}/100\text{m}$  で線形勾配とし、地表面は年間の平均的な気温として  $15^\circ\text{C}$  を仮定した（藤田ほか, 2007 [35]）。地下水組成については、固有透過度が蒸留水に対して取得された値を用いることで降水系地下水環境を仮

定した。ガラス固化体については、第2次取りまとめにおける処分場の温度の解析評価と同様に、再処理までの冷却期間を4年、中間貯蔵期間を50年とした発熱量の時間変化を考慮し、ガラス固化体の物性については、第2次取りまとめに準じた設定とした（核燃料サイクル開発機構，1999 [4]）。埋め戻し材については、幌延深地層研究計画の人工バリア性能確認試験において、原位置で締固められた乾燥密度 1.20Mg/m<sup>3</sup>の埋め戻し材の仕様を仮定し、物性値は表 4-1 に示す通りである。緩衝材についても、表 4-1 で示した物性値に準じた。

ここでは、緩衝材の埋め戻し材側への膨出と、それによる密度変化が緩衝材中の温度や浸潤挙動へ及ぼす影響の程度を把握するため、以下の2ケースの解析を実施した。ケース1は、前節で示したように、人工バリア性能確認試験における緩衝材の鉛直方向の変位量に関する計測結果と一致させる方向で設定した式(3-1-1)で与えられる値の2/3の変形係数を用いた。ケース2は、緩衝材の密度変化を生じさせないようにするため、節点変位を拘束した熱-水（TH）連成解析とした。各解析ケースの条件を整理して表 5-1 に示す。

表 5-1 ニアフィールド長期挙動評価の解析ケース

	変形係数の設定値	備考
解析ケース1	式(3-1-1)の2/3で与える	緩衝材の密度変化が生じる
解析ケース2	TH解析のため力学に関する設定はない	緩衝材の密度変化は生じない

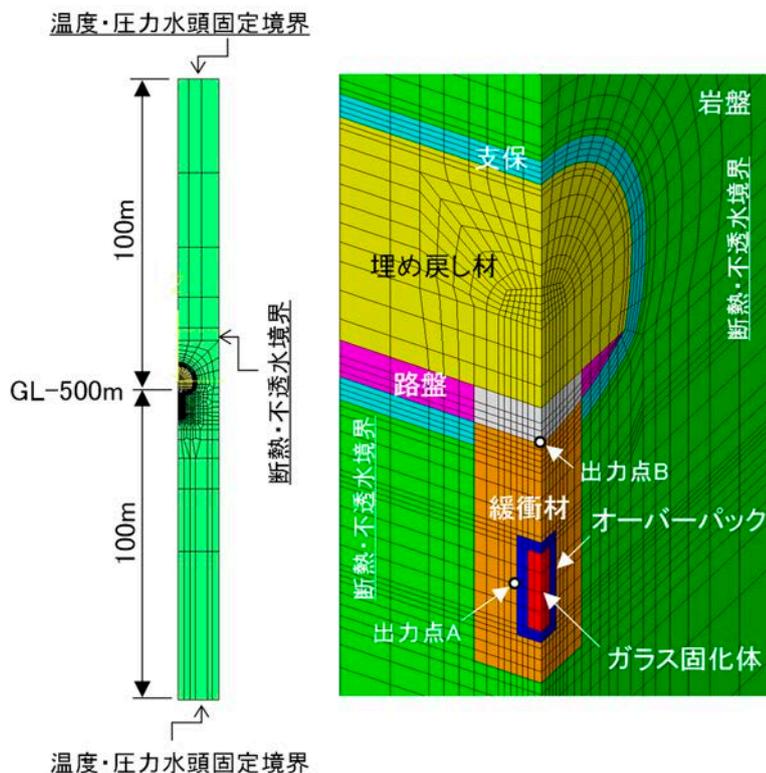


図 5-1 ニアフィールドの長期挙動評価解析条件

### 5.3 解析結果

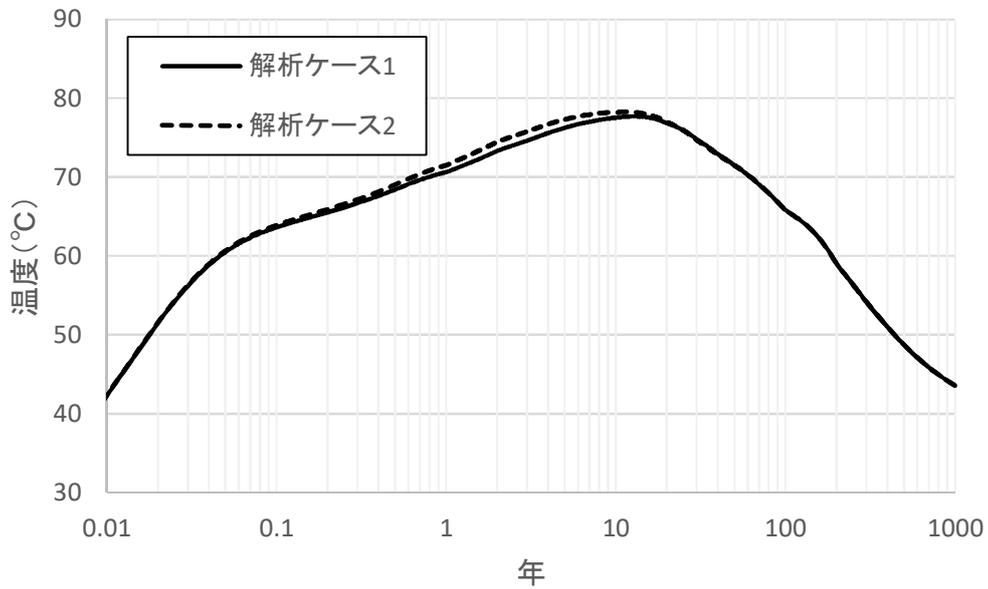
人工バリア設置から 1000 年後までのオーバーパック表面の温度(図 5-1 中の出力点 A)、オーバーパックと接触している緩衝材の水分飽和度と応力(出力点 A)及び緩衝材上面の中央部における鉛直方向の変位(出力点 B)の時間変化を図 5-2 に示す。

これより、緩衝材の変形係数を式(3-1-1)で与えられる値の 2/3 で与えたケース 1 の場合のオーバーパック表面の温度は、12.8 年後に最高温度の 77.7°C 程度に達し、その後、温度は低下して 1000 年後には 43.6°C になっている。オーバーパックと接する緩衝材の水分飽和度は、廃棄体の放熱にともなう温度勾配による水分移動によって、一時的に 0.1 程度まで低下し、その後、地下水の浸潤が進んで 48.5 年で飽和する結果となっている。緩衝材中の応力については、緩衝材が飽和した時点で最大の 0.45MPa となっている。これは、緩衝材の密度が 1.6 Mg/m<sup>3</sup> の時に発生する膨潤圧として設定した式(3-2-1)で与えられる値の 0.63MPa よりも低く、密度の低下によって発生する膨潤圧も小さくなったものと考えられる。また、緩衝材上面の中央部における鉛直方向の変位は、緩衝材中への地下水の浸潤が進むにつれて増加しており、埋め戻し材側に 0.11m 程度膨出する結果となっている。これら応力変形挙動は、水分飽和度の変化に呼応した挙動を示しており、緩衝材が飽和した以降は一定値を保つ結果となっている。一方、緩衝材の密度変化を生じさせないケース 2 では、オーバーパック表面の最高温度は、11.2 年後に 78.3°C、また、緩衝材は 45.5 年で飽和に達する結果となっている。今回の評価では、緩衝材の膨出によって生じる緩衝材の密度変化が及ぼすオーバーパック表面の温度や、緩衝材が飽和するまでの時間への影響は小さいものであった。

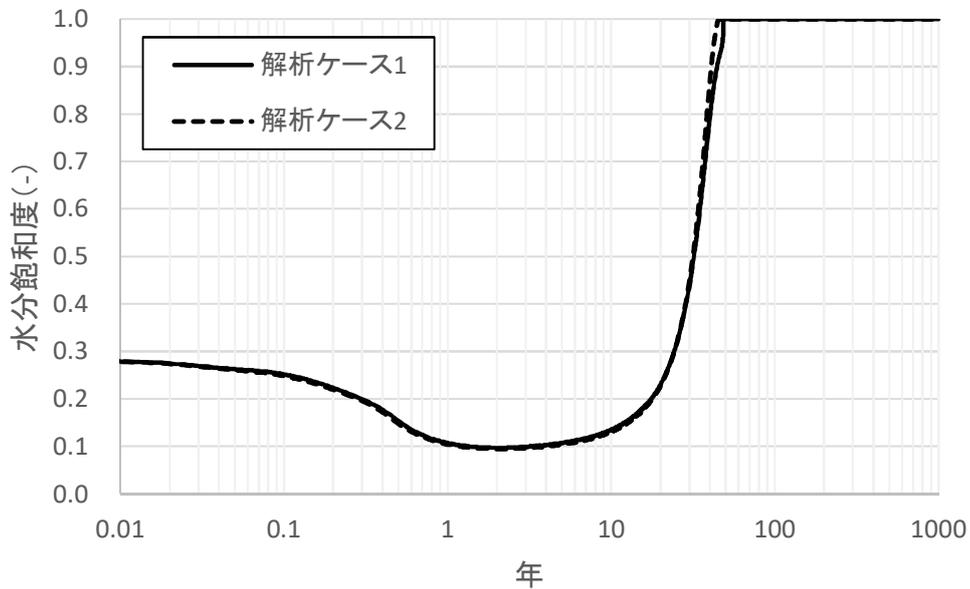
緩衝材の密度分布の時間変化を図 5-3 に示す。ここでは、ガラス固化体、オーバーパック及び埋め戻し材の要素は非表示としてある。また、変形量は 5 倍で表示している。これより、緩衝材の密度は、緩衝材が飽和する 48.5 年後の間で変化し、緩衝材が飽和した後の密度変化は生じていない。緩衝材が飽和するまでの間は、岩盤からの地下水の浸潤によって岩盤に近い部分の緩衝材が膨潤して密度が低下する一方で、オーバーパック周辺の緩衝材が圧縮されることによって、一時的に初期の 1.60 Mg/m<sup>3</sup> から 1.65 Mg/m<sup>3</sup> 程度に増加している。また、緩衝材は埋め戻し材側へ膨出し、緩衝材上部では密度の低下が生じている。緩衝材が飽和すると、オーバーパック周辺では 1.55 Mg/m<sup>3</sup> 程度、緩衝材上部では 1.45 Mg/m<sup>3</sup> 程度に密度が低下している。そして、最も密度が低下した緩衝材上部の固有透過度は、式(3-5-1)に基づけば初期に比べて 2 倍程度大きくなる結果となっている。

ベントナイトを主成分とする緩衝材及び埋め戻し材は、水の浸潤にともない膨潤し、密度の高い部分と低い部分が存在する場合には、緩衝材及び埋め戻し材全体が飽和するにつれて、全体として均質化する方向に向かうと考えられる。本解析における密度の均質化に向けた動きとしては、密度の高い緩衝材が、密度の低い埋め戻し材側へ膨出しており、これによって緩衝材の密度が低下している。緩衝材の膨出は水分飽和度の上昇によって生じており、緩衝材が飽和した時点で膨出も停止する結果となっている。このような緩衝材の密度変化

については、異なる密度の緩衝材が接している場合に、密度は均質化する方向に変化し、緩衝材が飽和することでほぼ終了するとした試験結果もあり（山下ほか，2010 [38]）、本解析結果は、これと整合的である。

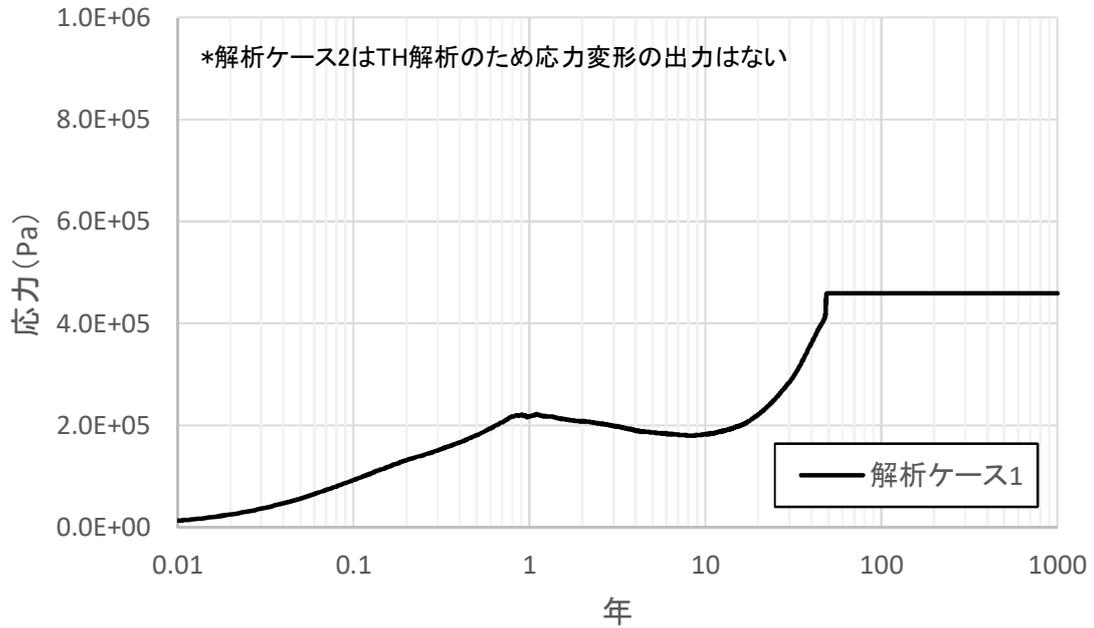


(a)オーバーパック表面の温度

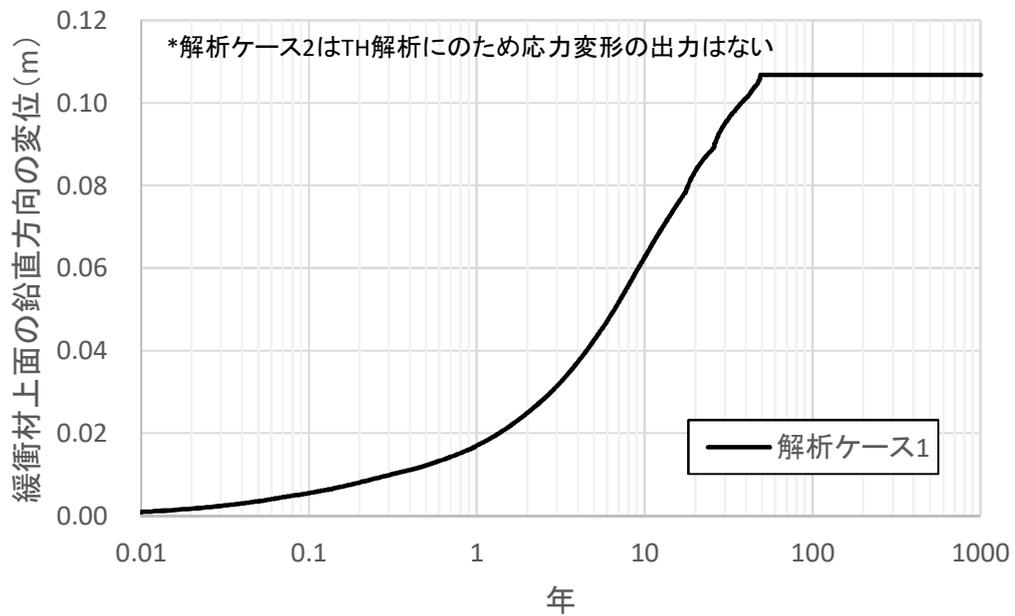


(b)オーバーパックと接する緩衝材の水分飽和度

図 5-2 熱-水-応力連成解析モデルによるニアフィールドの長期挙動解析結果(1/2)  
 (解析ケース 1 は THM 解析、解析ケース 2 は TH 解析で実施)



(c) オーバーパックと接する緩衝材の応力



(d) 緩衝材上面中央部の鉛直方向の変位

図 5-2 熱-水-応力連成解析モデルによるニアフィールドの長期挙動解析結果 (2/2)  
 (解析ケース 1 は THM 解析、解析ケース 2 は TH 解析で実施)

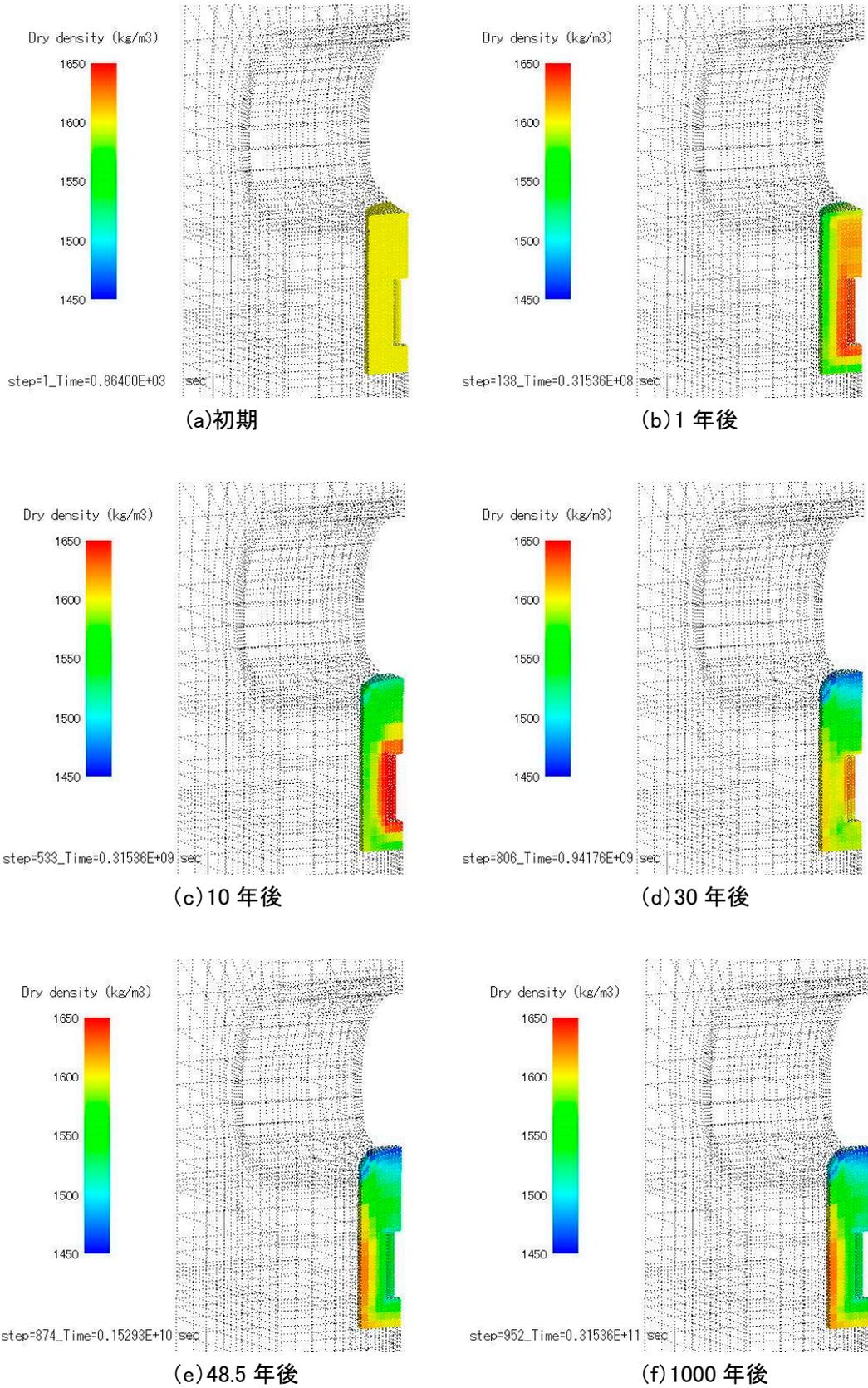


図 5-3 熱-水-応力連成解析モデルによる緩衝材の密度分布に関する解析結果  
(変形量は 5 倍で表示)

## 5.4 まとめ

過渡期におけるニアフィールドの熱-水-応力連成挙動の把握を目的とした数値実験の事例として、緩衝材の密度変化にともなう熱特性、水理特性及び力学特性への影響を考慮できるように高度化された熱-水-応力連成解析モデルを用いて、緩衝材の密度変化に着目したニアフィールドの長期挙動に関する評価を実施した。そして、緩衝材が埋め戻し材側に膨出することによる温度や浸潤挙動への影響及び緩衝材の密度が変化する挙動を把握した。

今回の評価では、緩衝材の膨出が緩衝材の最高温度や緩衝材の再冠水時間へ及ぼす影響は小さいものの、埋め戻し材側に膨出した緩衝材上部の乾燥密度は、 $1.45 \text{ Mg/m}^3$ 程度まで低下し、この部分の固有透過度は初期に比べて2倍程度大きくなる結果であった。

今後は、このような情報を用いた核種移行評価を実施し、核種移行に与える密度低下の影響を把握していくことが重要と考える。

## 6. おわりに

人工バリア定置後のニアフィールドで生じる複雑なプロセスを定量化するための数値解析ツールの開発として、熱-水-応力連成解析モデル (THAMES) において、緩衝材の密度変化にともなう力学特性、熱特性及び水理特性への影響を考慮できるように高度化を実施した。

そして、力学解析側から熱解析及び水理解析側へ解析結果を提供するスキームを追加した THAMES を用いて、幌延深地層研究計画における人工バリア性能確認試験を対象とした再現解析を実施し、原位置で得られている計測データとの比較を通じて熱-水-応力連成解析モデルの適切性を確認するとともに、緩衝材の膨潤変形による密度変化が緩衝材中の温度や浸潤挙動及び応力変形挙動に及ぼす影響の程度を確認した。さらに、ニアフィールドの長期挙動に関する事例解析からは、人工バリア内への地下水の浸潤により、緩衝材が埋め戻し材側へ膨出することによって生じる温度や、浸潤挙動への影響及び緩衝材の密度変化を定量的に把握した。

このように、緩衝材の密度変化にともなう力学特性、熱特性及び水理特性への影響を考慮することで、人工バリア定置後から緩衝材が飽和するまでの過渡期におけるニアフィールド環境を、より詳細に分析することが可能となった。そして、本研究によって示されたように、緩衝材の埋め戻し材側への膨出と、それによって形成される緩衝材の密度分布は、人工バリアの設計研究や、安全評価における核種移行解析の初期状態の設定に反映される情報となり得るものである。

他方、塩水系地下水環境下における緩衝材の浸潤挙動を適切に評価するためには、緩衝材に塩水を浸潤させる試験による浸潤現象に関するデータの拡充と、それに基づく不飽和水理に関する物性値の整備、さらに、水理解析と地球化学解析を連成させた解析によって緩衝材の間隙水化学の影響に関する検討などを行い、塩水が及ぼす浸潤挙動への影響について理解を進める必要がある。また、過渡期における緩衝材の応力変形挙動に及ぼす影響が大きいことが明らかとなった力学特性の温度依存性に関するデータ取得と連成解析モデルへの反映が課題として挙げられる。

## 謝辞

本報告書は、経済産業省資源エネルギー庁から受託した「平成 27 年度地層処分技術調査等事業（処分システム評価確証技術開発）」及び「平成 28 年度地層処分技術調査等事業（処分システム評価確証技術開発）」のうち、ニアフィールドのシステム変遷と核種移行を評価するための先端的技術の開発として実施したシステムの過渡的状态評価技術の開発の一部である。本報告書の取りまとめや、熱-水-応力連成解析の高度化にあたって多くの助言やご協力を頂いた、株式会社安藤・間の千々松正和氏、塚田泰博氏には厚く謝意表します。

## 参考文献

- [1] Ohnishi, Y., Shibata, H. and Kobayashi, A. : Development of finite element code for the analysis of coupled Thermo-Hydro-Mechanical behaviors of a saturated-unsaturated medium, Proc. of Int. Symp. on Coupled Process Affecting the Performance of a Nuclear Waste Repository, Berkeley, 1985, pp.263-268.
- [2] Chijimatsu, M., Fujita, T., Kobayashi, A. and Nakano, M. : Experiment and validation of numerical simulation of coupled thermal, hydraulic and mechanical behaviour in the engineered buffer materials, Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech., Vol.24, 2000, pp.403-424.
- [3] Chijimatsu, M., Fujita, T., Sugita, Y., Amemiya, K. and Kobayashi, A. : Field experiment, results and THM behavior in the Kamaishi mine experiment, Int. J. Rock Mech. Min., Vol.38, 2001, pp.67-78.
- [4] 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物 地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第 2 次取りまとめ－分冊 2 地層処分の工学技術, JNC TN1400 99-022, 1999, 703p.
- [5] 操上広志, 千々松正和, 小林晃, 杉田裕, 大西有三：グリムゼル試験場における熱－水－応力連成原位置試験の解析, 土木学会論文集, No.757/III-66, 2004, pp.127-137.
- [6] 日本原子力研究開発機構：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ニアフィールドシステム評価確証技術開発報告書, 2019, 405p.
- [7] Rutqvist, J., Chijimatsu, M., Jing, L., Millard, A., Nguyen, T.S., Rejeb, A., Sugita, Y. and Tsang, C.F. : A numerical study of THM effects on the near-field safety of a hypothetical nuclear waste repository – BMT1 of the DECOVALEX III project. Part 3: Effects of THM coupling in sparsely fractured rocks, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol.42, 2005, pp.745-755.
- [8] Sugita Y., Kwon S., Lee C., Massmann J., Pan P-Z and Rutovist J. : DECOVALEX-2015 project Task B2 final report, KTH Architecture and the Built Environment, 2016, 89p.
- [9] 伊藤彰, 川上進, 油井三和：高レベル放射性廃棄物地層処分におけるニアフィールドの熱-水-応力-化学連成モデル／解析コードの開発（研究報告）, JNC TN8400 2003-032, 2004, 46p.
- [10] 日本原子力研究開発機構：平成 19 年度 地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム化学影響評価高度化開発報告書, 2008, 260p.
- [11] 日本原子力研究開発機構：平成 20 年度 地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム化学影響評価高度化開発 報告書, 2009, 327p.
- [12] 日本原子力研究開発機構：平成 21 年度 地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム化学影響評価高度化開発 報告書, 2010, 319p.

- [13] 木村誠, 九石正美, 藤田朝雄, 中間茂雄, 鈴木英明: 緩衝材中の化学影響評価に向けた熱-水-応力-化学連成解析モデルの開発, JAEA-Research 2010-034, 2010, 131p.
- [14] 核燃料サイクル開発機構: わが国における高レベル放射性廃棄物 地層処分の技術的信頼性-地層処分研究開発第2次取りまとめ-分冊3 地層処分システムの安全評価, JNC TN1400 99-023, 1999, 526p.
- [15] 花室孝広: 幌延深地層研究計画 平成25年度調査研究成果報告, JAEA-Review 2014-039, 2014, 69p.
- [16] 千々松正和, 今井久, 福留和人, 粥川幸司, 佐々木肇, 茂呂吉司: ニアフィールド連成挙動の解析評価, JNC TJ8400 2003-089, 2004, 354p.
- [17] 菊池広人, 棚井憲治: 緩衝材の熱物性測定試験(Ⅲ) 一面熱源法による緩衝材熱物性の取得- (試験報告), JNC TN8430 2003-009, 2003, 27p.
- [18] 菊池広人, 棚井憲治: 幌延地下水を用いた緩衝材・埋め戻し材の基本特性試験(試験報告), JNC TN8430 2004-005, 2005, 96p.
- [19] 松本一浩, 菅野毅, 藤田朝雄, 鈴木英明: 緩衝材の飽和透水特性, PNC TN8410 97-296, 1997, 134p.
- [20] 菊池広人, 棚井憲治, 松本一浩, 佐藤治夫, 上野健一, 鐵剛志: 緩衝材の飽和透水特性Ⅱ-海水性地下水が緩衝材の透水性に及ぼす影響-, JNC TN8430 2003-002, 2003, 47p.
- [21] 鈴木英明, 藤田朝雄: 緩衝材の不飽和水理特性(試験報告), JNC TN8430 99-010, 1999, 76p.
- [22] van Genuchten, M. Th.: A Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, Soil Sci. Soc., Vol. 44, 1980, pp.892-898.
- [23] 菊本統, 京川裕之, 中川照夫: サクシヨン履歴・間隙比・温度の影響を考慮した水分特性曲線モデル, 応用力学論文集, Vol.12, 2009, pp.343-352.
- [24] 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構: TRU廃棄物処分技術検討書-第2次TRU廃棄物処分研究開発取りまとめ-, JNC TY1400 2005-013/FEPC TRU-TR2-2005-02, 2005, 590p.
- [25] 土木学会: コンクリート標準示方書「設計編」(2007年制定), 2007, 623p.
- [26] 操上広志: 地盤における熱-水-応力連成現象のモデル化に関する研究, 京都大学, 博士論文, 2003, 162p.
- [27] 山本卓也, 下茂道人, 藤原靖, 服部弘道, 各合牧人, 田所照夫, 中垣真一: 幌延深地層研究計画における試錐調査(HDB-6,7,8孔)のうちHDB-6孔, JNC TJ5400 2005-004, 2004, 1182p.
- [28] 中山雅, 大野宏和: 幌延深地層研究計画における人工バリア性能確認試験-350m調査坑道における人工バリアの設置および坑道の埋め戻し-, JAEA-Research 2019-007, 2019, 132p.

- [29] 日本原子力研究開発機構：平成27年度 地層処分技術調査等事業 処分システム評価確証技術開発報告書，2016, 720p.
- [30] 堤和大，渡辺邦夫，菅伊三男，山脇真二：岩石の不飽和特性の逆推定法，応力地質，Vol.35, No.2, 1994, pp.23-30.
- [31] 藤崎淳，鈴木英明，藤田朝雄：熱－水－応力連成試験設備（COUPLE）を用いた室内試験結果に基づく熱－水連成モデルの信頼性確認，JAEA-Research 2008-020, 2008, 62p.
- [32] 日本原子力研究開発機構：平成23年度 地層処分技術調査等事業高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム化学影響評価高度化開発報告書，2012, 319p.
- [33] 日本原子力研究開発機構：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 ニアフィールドシステム評価確証技術開発報告書，2018, 318p.
- [34] 中山雅，大野宏和，中山真理子，小林正人：幌延深地層研究計画における人工バリア性能確認試験計測データ集（平成 29 年度），JAEA-Data/Code 2019-003, 2019, 57p.
- [35] 藤田朝雄，谷口直樹，松井裕哉，棚井憲治，西村繭果，小林保之，平本正行，前川恵輔，澤田淳，牧野仁史，笹本広，吉川英樹，柴田雅博，若杉圭一郎，濱克宏，操上広志，國丸貴紀，石井英一，竹内竜史，中野勝志，太田久仁雄，瀬尾俊弘，宮原要，内藤守正，油井三和：幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階（第 1 段階）研究成果報告書 分冊「地層処分研究開発」，JAEA-Research 2007-045, 2007, 140p.
- [36] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 26 年度放射性廃棄物共通技術調査等事業 放射性廃棄物重要基礎技術研究調査（国庫責務負担行為に係るもの）報告書（平成 28 年度分），2017, 336p.
- [37] 太田久仁雄，阿部寛信，山口雄大，國丸貴紀，石井英一，操上広志，戸村豪治，柴野一則，濱克宏，松井裕哉，新里忠史，高橋一晴，丹生屋純夫，大原英史，浅森浩一，森岡宏之，舟木泰智，茂田直孝，福島龍朗：幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階（第 1 段階）研究成果報告書 分冊「深地層の科学的研究」，JAEA-Research 2007-044, 2007, 434p.
- [38] 山下亮，雨宮清，塚田泰博，長屋淳一，中島均，朝野英一：緩衝材の再冠水に伴う密度変化に関する検討，ハザマ研究年報，Vol.42, No.5, 2010, pp.1-8.

# 国際単位系 (SI)

表1. SI基本単位

基本量	SI基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質량	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI組立単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m <sup>2</sup>
体積	立方メートル	m <sup>3</sup>
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s <sup>2</sup>
波数	毎メートル	m <sup>-1</sup>
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m <sup>2</sup>
比体積	立方メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 <sup>(a)</sup> , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>
屈折率 <sup>(b)</sup>	(数字の)	1
比透磁率 <sup>(b)</sup>	(数字の)	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。  
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン <sup>(b)</sup>	rad	1 <sup>(b)</sup>	m/m
立体角	ステラジアン <sup>(b)</sup>	sr <sup>(e)</sup>	1 <sup>(b)</sup>	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
周波数	ヘルツ <sup>(d)</sup>	Hz		s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N		m kg s <sup>-2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
静電容量	ファラド	F	C/V	m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-2</sup>
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>3</sup> A <sup>2</sup>
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(e)</sup>	°C		K
光照射量	ルーメン	lm	cd sr <sup>(e)</sup>	cd
放射線量	グレイ	Gy	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
放射性核種の放射能 <sup>(f)</sup>	ベクレル <sup>(d)</sup>	Bq		s <sup>-1</sup>
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト <sup>(g)</sup>	Sv	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
酸素活性化	カタール	kat		s <sup>-1</sup> mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。  
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。  
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。  
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。  
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。  
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。  
 (g) 単位シーベルト (PV, 2002, 70, 205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI組立単位		
	名称	記号	SI基本単位による表し方
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>
表面張力	ニュートンメートル	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s <sup>-2</sup>
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> = s <sup>-1</sup>
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s <sup>2</sup>	m m <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup> = s <sup>-2</sup>
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-3</sup>
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
電荷密度	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
電表面積	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> mol <sup>-1</sup>
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup>
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg <sup>-1</sup> s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m <sup>4</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> = m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
酵素活性濃度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m <sup>2</sup> sr)	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> = kg s <sup>-3</sup>
	カタール毎立方メートル	kat/m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> mol

表5. SI接頭語

乗数	名称	記号	乗数	名称	記号
10 <sup>24</sup>	ヨタ	Y	10 <sup>1</sup>	デシ	d
10 <sup>21</sup>	ゼタ	Z	10 <sup>2</sup>	センチ	c
10 <sup>18</sup>	エクサ	E	10 <sup>3</sup>	ミリ	m
10 <sup>15</sup>	ペタ	P	10 <sup>6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>12</sup>	テラ	T	10 <sup>9</sup>	ナノ	n
10 <sup>9</sup>	ギガ	G	10 <sup>12</sup>	ピコ	p
10 <sup>6</sup>	メガ	M	10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>3</sup>	キロ	k	10 <sup>-18</sup>	アト	a
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h	10 <sup>-21</sup>	ゼプト	z
10 <sup>1</sup>	デカ	da	10 <sup>-24</sup>	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値
分	min	1 min=60 s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10 800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
トン	t	1 t=10 <sup>3</sup> kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 <sup>11</sup> m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100 kPa=10 <sup>5</sup> Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 <sup>-10</sup> m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm <sup>2</sup> =(10 <sup>12</sup> cm <sup>2</sup> ) <sup>2</sup> =10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的関係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	B	
デシベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 <sup>-7</sup> J
ダイン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1Pa s
ストークス	St	1 St=1cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> =10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> cd m <sup>-2</sup>
フオト	ph	1 ph=1cd sr cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm <sup>2</sup> =10 <sup>-8</sup> Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> T
エルステッド <sup>(a)</sup>	Oe	1 Oe <sub>e</sub> =(10 <sup>3</sup> /4π)A m <sup>-1</sup>

(a) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「△」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 <sup>-4</sup> C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 <sup>-9</sup> T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 <sup>-15</sup> m
メートル系カラット		1 メートル系カラット=0.2 g=2×10 <sup>-4</sup> kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858J (「15°C」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ), 4.184J (「熱化学」カロリ)
マイクロ	μ	1 μ=1μm=10 <sup>-6</sup> m

