

X線CTスキャナによる亀裂内侵入ベントナイトの密度測定に関する適用性

松本一浩*1 榎井憲治*2

高レベル放射性廃棄物の地層処分では、廃棄体埋設後における人工バリアの長期健全性を評価するための評価手法の構築と、その評価手法の信頼性を高めることにより、安全評価における不確実性を低減させることが重要な課題である。本研究では、地層処分研究において懸念される事象の一つである緩衝材の岩盤亀裂内への侵入現象について、現象理解とより現実的な評価手法の構築に反映するために、X線CTスキャナを適用した模擬亀裂内におけるベントナイトの侵入密度測定を試み、その適用性を考察した。

Keywords: 高レベル放射性廃棄物, 緩衝材, 乾燥密度, 侵入モデル, X線CT

For the geological disposal of the high-level radioactive waste, it is important to develop the model to evaluate the long-term stability of the engineered barrier system. The increase in the reliability of the evaluation model may reduce the uncertainty of the safety assessment. In this study, the density distribution of the bentonite buffer extruded into the artificial fractures was measured by using a X-ray CT scanner to promote understanding of the extrusion phenomenon of the bentonite into fractures.

Keywords: high-level radioactive waste disposal, bentonite buffer, dry density, extrusion model, X-ray CT

1 緒言

わが国における高レベル放射性廃棄物の地層処分において、緩衝材の物理的安定性に影響を及ぼす事象の一つに、周辺岩盤亀裂内への緩衝材の流出・侵入現象が考えられている。緩衝材の主材料として考えられているベントナイトは、水の浸潤によって膨潤する性質を有し、これにより人工バリアの設置時に生じる緩衝材と岩盤との隙間や周辺岩盤の亀裂などがシールされることで、安定な水理場を確保することなどが期待されている[1]。その一方、この膨潤による亀裂などへの緩衝材の流出により、処分坑道における緩衝材自体の密度が減少する場合には、緩衝材に期待される低透水性や放射性核種の移行抑制などの種々の好ましい性質のほか、オーバーバック支持性といった人工バリアの構造力学安定性にも悪影響を及ぼす可能性がある。

このような背景から、日本原子力研究開発機構（旧、核燃料サイクル開発機構）では、緩衝材の流出・侵入現象を模擬した試験を実施し、現象理解ならびに評価手法の構築を進めてきた[2]。

緩衝材の侵入現象に関する実験的な挙動の把握としては、本来複雑である岩盤亀裂を、透明アクリル平板によって平滑化した平行平板の隙間（以下、模擬亀裂という）として模擬し、水の浸潤により膨潤する圧縮ベントナイトの模擬亀裂中への侵入距離と侵入時間との関係について主に測定されてきた。これにより、ベントナイトの仕様や模擬亀裂の開口幅、さらには水質条件による亀裂侵入速さの傾向がほぼ把握できている。しかしながら、これらのデー

タは、緩衝材の侵入現象を侵入速さという観点から定性的に評価しているに過ぎない。本来、緩衝材の物理的安定性を評価対象としている本研究では、定量的な物理量の変化、すなわち亀裂中における緩衝材の侵入密度や、それにともなって減少する緩衝材自体の密度変化の把握が、評価手法を構築するうえで必要不可欠である。

本報では、緩衝材の岩盤亀裂中への侵入現象の現象理解と評価手法の構築に資するために、これまで測定自体が困難であった侵入現象にともなう緩衝材の密度変化について、X線CTスキャナ（X-ray Computed Tomography Scanner）を適用した非破壊検査技術により定量的な把握を試みた。

2 X線CTスキャナを用いた侵入密度測定

2.1 医療用X線CTスキャナの概要

本測定では、産業用のものと比べ走査（スキャン）速度が速いことや測定対象物の寸法範囲が比較的大きいものまで測定できる医療用X線CTスキャナを用いた。測定に使用した医療用X線CTスキャナ（東芝製、Asteion VI）の仕様をTable 1に示す。

Table 1 Specification of X-ray CT Scanner

スキャン方式	R/R 連続回転方式
スキャンスピード [sec]	0.75, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0
スライス厚 [mm]	1, 2, 3, 5, 7, 10
ガントリ開口部 [mm]	720
X線管電圧 [kV]	80, 120, 135
X線管電流 [mA]	30 ~ 300
最大スキャン時間 [sec]	100
最大スキャン範囲 [mm]	1390
画像再構成数	512×512
空間解像度 [mm]	0.35

The measurement of density distribution of bentonite buffer extruded into fractures by using x-ray CT scanner by Kazuhiro Matsumoto (matsumoto.kazuhiro@jaea.go.jp), Kenji Tanai

*1 検査開発株式会社

Inspection Development Corporation
〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4-33

*2 日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門 地層処分基盤研究ユニット

Geological Isolation Research Unit, Geological Isolation Research and Development Directorate, Japan Atomic Energy Agency
〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4-33

X線CTスキャナは、X線が物体を透過した際、X線吸収係数の違いによる物体の空間分布が求められるものであり、式(1)で定義される[3]。

$$CT値 = \frac{\mu_t - \mu_w}{\mu_w} K \quad (1)$$

ここで、 μ_t は物体の吸収係数、 μ_w は水の吸収係数、 K は比例定数である。

X線の線吸収係数はCT値という数値に換算され、CT値に応じて物体の空間分布が画像処理される。本装置は、水のCT値が0、空気が-1000と定義される。

2.2 侵入密度測定試験

試験に使用した容器は、目視により侵入距離や形状を観察することができる透明アクリル製のものを用いた (Fig.1)。試験容器は、上部、下部からなるアクリル板により構成され、中央部にはベントナイト供試体を設置する孔を設けている。ベントナイト供試体に接する側面の周囲には単一の平滑な模擬亀裂を設け、給水孔より模擬亀裂を通じてベントナイト供試体に水が浸潤する構造となる。試験には、ベントナイト材料としてクニゲル V1 (山形県月布産 -Na 型ベントナイト)を用い、乾燥密度を 1.8 Mg m^{-3} に圧縮成型したものを供試体として使用した。なお、緩衝材の定置後からの挙動を把握するために、供試体は不飽和条件とした。また、緩衝材への周辺岩盤亀裂からの地下水の浸潤を模擬し、供試体の外周面より水の給水を行った。供試体の寸法は、X線CTスキャナの適用性を確認するために、大きさの異なる3ケースで行った。侵入密度測定試験の条件を Table 2 に示す。

試験手順は、アクリル製容器の下部の孔に圧縮成型し

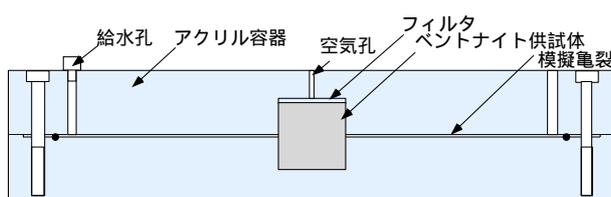


Fig. 1 Bentonite buffer extrusion test

Table 2 Experimental conditions

試料(ベントナイト)	クニゲル V1		
供試体寸法 [mm]	20×H20	30×H30	40×H40
ケイ砂混合率 [%]	0		
乾燥密度 [Mg m^{-3}]	1.8		
初期含水比 [%]	10		
亀裂幅 [mm]	0.6	0.9	1.2
試験温度 []	室温 (20)		
試験水	蒸留水		

たベントナイト供試体を置き、上部のアクリル板を下部に重ね合わせて拘束する。これにより、供試体の側面中央において単一平行平板の模擬亀裂が形成される。給水孔より模擬亀裂内に水を供給し、供試体への水の浸潤と同時に試験を開始した。

2.3 X線CT測定

X線CTスキャナによる測定は、模擬亀裂内への水の給水前と給水開始後よりベントナイトの亀裂内への侵入の進展に応じて適宜行った X線CTスキャンの測定条件は、Table 3 に示すとおりである。なお、測定位置については、Fig. 2 に示すように試験容器の中心 (破線部) について測定した。ベントナイトの亀裂侵入密度の評価では、CT値をもとに侵入密度分布を得るため、測定されるCT値の正確さが求められる。一般に、X線CTスキャナの測定において、画像ノイズは透過 X線線量や装置の性能に依存する。質のよい画像を得るために、管電圧や管電流を高くすることで、X線強度や X線光子数を増加させ、検出器に到達する X線光子数を増して画像ノイズを減少させることが可能である。しかしながら、これらは装置の性能に依存するために限界があることから、装置の性能による画像ノイズの除去のほか、さらにノイズを低減する方法として、スタッキング[4]という手法が用いられる。スタッキング法は、データの蓄積とその重ね合わせを行うことにより S/N (signal/noise) 比を向上させ、ノイズを低減化することで、より良い画像を得る手法である。本測定では、1回

Table 3 Measurement condition of X-ray CT scanner

スキャン条件	ノンヘリカルスキャン
X線管電圧 [kV]	135
X線管電流 [mA]	150
スライス厚 [mm]	1
スキャンスピード [sec]	1

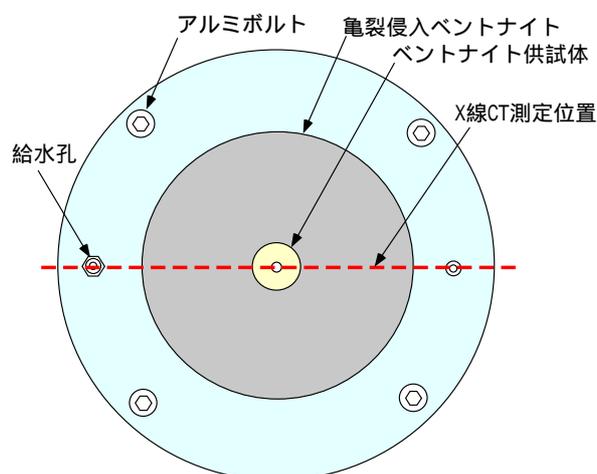


Fig. 2 Measurement position

の測定につき 30 スキャンを行い、再構成後の CT 画像についてスタッキングによる画像ノイズの低減化を図った。

X線CTスキャナの測定では、投影データのフィルタ処理を行い投影画像のボケを補正する際、重畳積分する関数（再構成関数）が用いられる。当該装置には、41 種類の再構成関数が設定されており、これらのうち、特に模擬亀裂内におけるペントナイト密度の評価に適した再構成関数を選出することが重要となる。また、単位体積内（ボクセル）に X 線の吸収値が異なるものが含まれる場合、その物質の割合によってパーシャルボリューム効果（部分体積効果）が生じ、CT 値が平均化処理される[5]。これにより、X 線の吸収差のある境界部において CT 値に歪みが生じ、CT 値が不正確になる。本試験で対象とするような微小な亀裂内の CT 値を数値的に評価する場合には、この効果の影響に留意しておく必要がある。

本測定では、試験の目的に適した再構成関数を設定するために、水、空隙域（空気）、ペントナイト供試体および侵入ペントナイトを模擬したペントナイトゲルを用いて、予備的な検討を行った。検討結果を Table 4 に示す。Table 4 は、各再構成関数とそれぞれの条件で測定を行った評価結果を定性的に整理している。本試験では模擬亀裂内に侵入したペントナイトゲルの密度分布の把握を目的としていることから、Table 4 に示す侵入試験容器を用いて測定を行った亀裂内の結果に着目して再構成関数の検討を行った。なお、本検討では亀裂開口幅 0.6mm の侵入試験容器を用い、Fig. 3 に示す測定位置により CT 値分布を求めた。各再構成関数により測定した CT 値分布の結果を、Fig.4 に示す。Fig.4 は、亀裂内に水を給水していない

条件で測定したアクリル容器と亀裂内の CT 値を示している。図中のほぼ中央の CT 値が小さい箇所が亀裂内の部位、その両脇がアクリルの CT 値を示している。本条件では、アクリル材によるパーシャルボリューム効果や再構成関数のアルゴリズムによる CT 値への影響がなければ、亀裂内は空気の CT 値である -1000 を示す。したがって、再構成関数を選定する判断基準として亀裂内の CT 値が -1000 を示すものとした。結果として、亀裂内の CT 値が基準値を満足した関数は FC30, FC81 であった。一方、同様な考え方で、亀裂内に水を給水した条件で測定した結果を Fig. 5 に示す。ここでは、亀裂内の水の CT 値である 0 を判断基準とした。本条件では、関数 FC41, FC69, FC81, FC85 において比較的妥当な値を示した。これらの結果より、微小な亀裂内における空気と水の CT 値が共に判断基準を満足した再構成関数は FC81（耳・骨用の高精細関数）であった。したがって、本試験容器の亀裂内に着目した場合に、亀裂内における物質の吸収係数を最も正確に測定できる関数として FC81 を本測定で用いた。

本測定により、再構成関数ごとのアルゴリズムによって、CT 値に影響が生じることを把握した。また、アクリル容器と亀裂との境界ではすべての結果でパーシャルボリューム効果が生じていることから、投影画像を構成する 512×512 画素よりデータを抽出する際、画像の撮像範囲 FOV（Field of View）の最小単位（ピクセル）を考慮したうえでデータを抽出した。

Table 4 Examination of setting of reconstruction factor

再構成関数	びり容器			侵入試験容器							
	水	亀裂内 0.1Mg m ⁻³	亀裂内 0.2Mg m ⁻³	総和 供試体	亀裂内 (水の給水なし)		亀裂内 (水の給水あり)		不飽和状態外 総和密度 1.0Mg m ⁻³		
					容器外	亀裂内	コア部	容器外	亀裂内	コア部	容器外
FC01	○	○	○	○	×	×	×	×	×	△	○
FC02	×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	×
FC03	○	○	×	○	○	×	○	○	×	×	×
FC04	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×
FC05	○	○	○	○	○	×	○	○	×	×	×
FC06	○	○	×	○	×	×	○	○	×	×	×
FC07	○	○	×	○	×	×	○	○	×	△	○
FC08	○	○	×	○	×	×	○	○	×	△	○
FC09	○	○	×	○	×	×	○	○	×	△	○
FC10	○	○	×	○	×	×	○	○	×	△	○
FC11	○	○	×	○	×	×	○	○	×	△	○
FC12	○	○	×	○	×	×	○	○	×	△	○
FC13	○	○	×	○	×	×	○	○	×	△	○
FC14	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
FC15	×	×	×	×	×	×	×	○	×	×	×
FC16	×	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×
FC17	×	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×
FC18	×	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×
FC19	×	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×
FC20	×	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×
FC21	×	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×
FC22	×	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×
FC23	○	○	○	×	×	×	○	×	×	×	×
FC24	○	○	○	×	×	×	○	×	×	×	×
FC25	○	○	○	×	×	×	○	×	×	△	○
FC26	○	○	×	○	×	×	○	×	×	×	×
FC27	×	○	○	○	×	×	×	○	×	×	×
FC28	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
FC29	×	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×
FC30	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×	○
FC31	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×	○
FC32	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×	○
FC33	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×	○
FC34	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×	○
FC35	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×	○
FC36	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×	○
FC37	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×	○
FC38	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×	○
FC39	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×	○
FC40	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×	○
FC41	×	×	○	×	×	×	△	×	×	×	○
FC42	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×	○
FC43	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×	○
FC44	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×	○
FC45	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×	○
FC46	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×	○
FC47	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×	○
FC48	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×	○
FC49	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×	○
FC50	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×	○
FC51	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×	○
FC52	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×	○
FC53	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×	○
FC54	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×	○
FC55	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×	○

Pv効果, CT値への影響, ○:影響小 △:影響やや有 ×:影響有

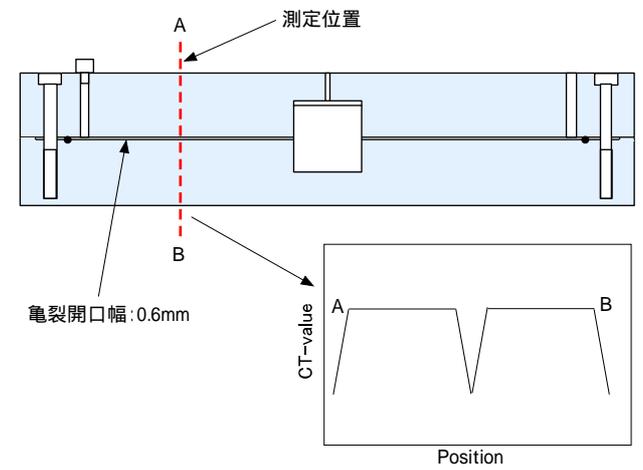


Fig. 3 Measurement position

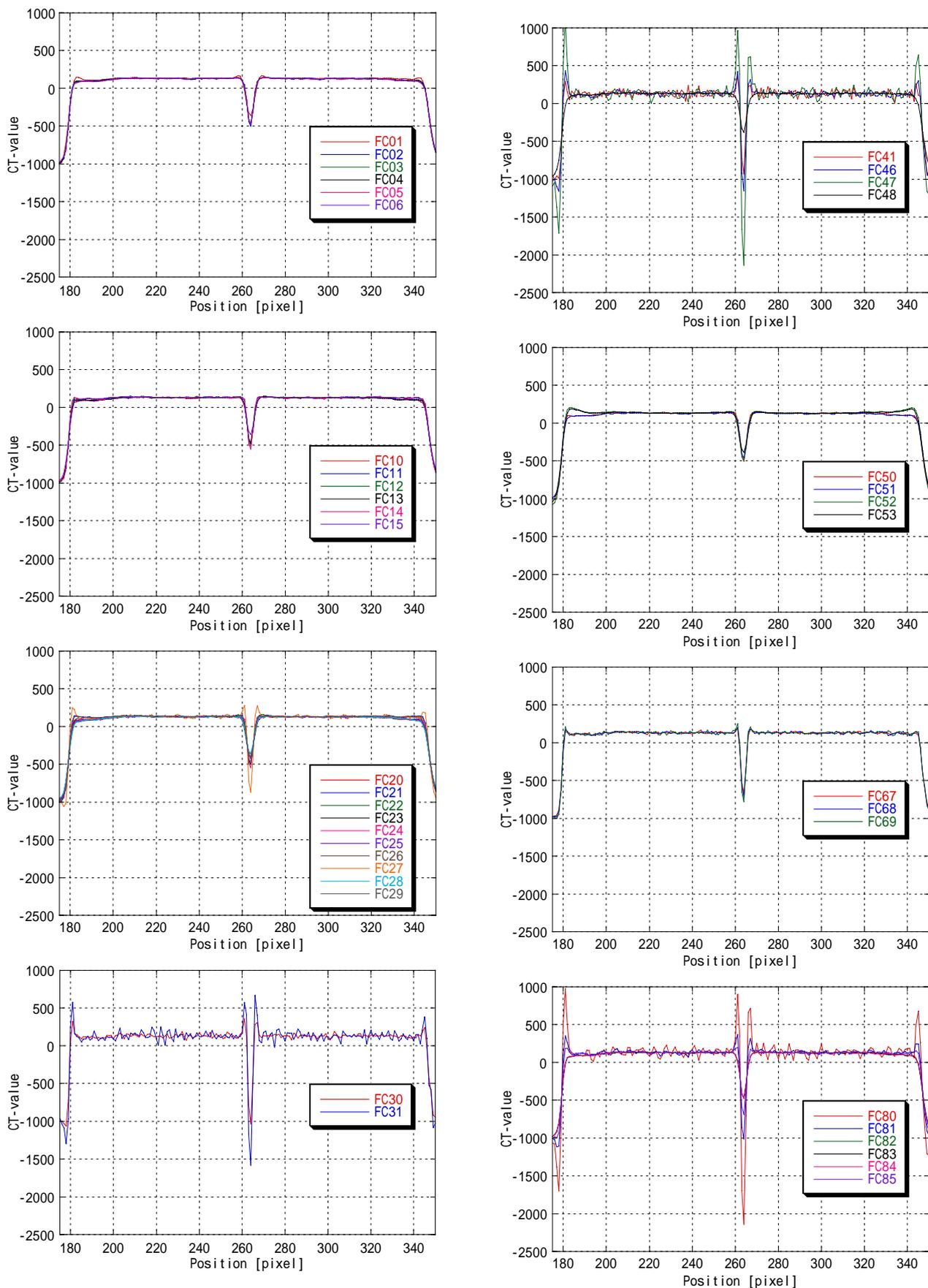


Fig. 4 CT-value distribution

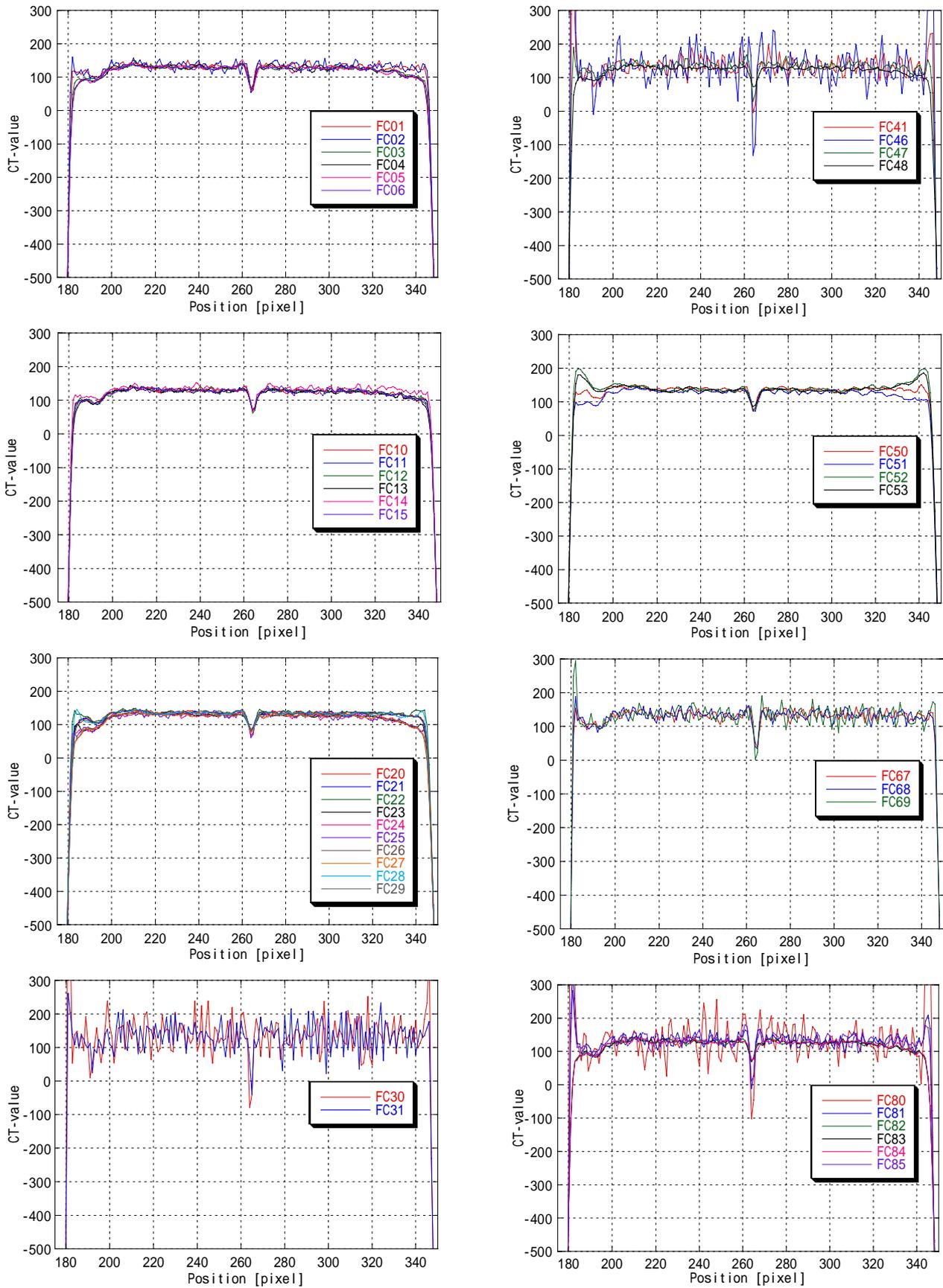


Fig. 5 CT-value distribution

2.4 密度の算出方法

測定によって得られる空間画像を構成する CT 値は、医療分野で用いられることを想定した定義上の数値である。したがって、CT 値からベントナイトの密度を求めるためには、ベントナイト密度と CT 値との相関関係を予め把握しておく必要がある。この関係については、ベントナイト（クニゲル V1）の乾燥密度と飽和度をパラメータとしたデータの取得が行われており[6]、湿潤密度と CT 値との相関関係の式(2)が報告されている[7]。

$$\rho_w = \frac{(CT \text{ 値} + 1465.7)}{1495.6} \quad (2)$$

ここで、 ρ_w は湿潤密度[Mg m⁻³]である。

なお、式(2)の適用性については、実測で得られたベントナイトの密度分布の測定結果と、X 線 CT 値により式(2)から換算された密度分布との比較によって確認している[8]。

これらの適用性の確認を踏まえ、本評価では CT 値の密度換算に式(2)を適用した。

3 測定結果

3.1 試料断面

ベントナイトが模擬亀裂内に侵入している写真を Fig.6 に示す。Fig.6 は、試験開始 70 日後における侵入状態を表



Fig. 6 Examination example
(Size of sample : 40mm×H40mm)

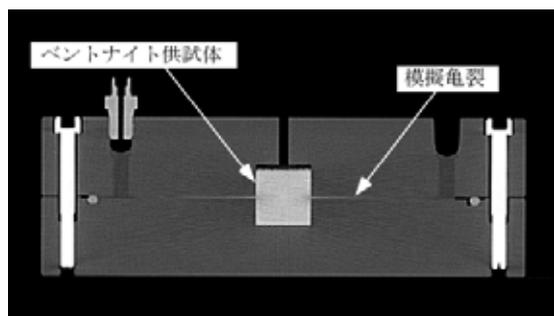


Fig. 7 Measured section image
(Size of sample : 20mm×H20mm)

しており、ベントナイトの亀裂内への侵入が試験容器の中央部にあるベントナイト供試体の壁面より、模擬亀裂を通じて供試体直径の 3 倍程度まで進展した。また、模擬亀裂は平滑であり、ベントナイトの侵入進路に障害がないことから、その侵入形状は放射状に広がる。

次に、X 線 CT スキャナにより測定した試験中の断面画像の一例を Fig.7 に示す。Fig.7 より、試験容器の中央にベントナイト供試体があることが確認できる。また、供試体側面に接する模擬亀裂内のコントラストが白色になっている。一般に、X 線の吸収が大きい部位ほど、画像上においてコントラストが白く表示されることから、亀裂内の水域のコントラストを考慮すれば、この白色は、亀裂内に侵入したベントナイトを表していることになる。

3.2 密度分布

ベントナイトの密度の算出については、測定により得られる断面画像の構成データである CT 値を用いる。まず、前述した式(2)により、ベントナイト供試体部（以下、コア部という）と亀裂に侵入したベントナイト部の CT 値を湿潤密度に換算した。湿潤密度は、土の物理的な絶対量を表すものではないため、本検討ではさらに湿潤密度から乾燥密度を求めることになる。乾燥密度の算出には、測定時におけるベントナイトの含水比が必要となる。試験に供した圧縮ベントナイトは、初期に不飽和の状態であるが、給水によるベントナイトへの水の浸潤、浸潤によるベントナイトの膨潤、膨潤によるベントナイトの亀裂への侵入とコア部の密度変化などが流動的に生じる。これにより徐々にコア部が不飽和から飽和状態に至るが、その間のベントナイト含水比を把握することはできない。したがって、乾燥密度の算出には、X 線 CT によって測定した時点のベントナイト含水比について、何らかの仮定を設ける必要がある。まず、コア部について考察する。コア部は、前述したようにベントナイトが不飽和から飽和に至る間の含水比は把握できないが、初期条件である含水比 10%を用いること、十分な浸潤時間によってコア部が飽和することを仮定することによって、初期時と最終的な乾燥密度の算出が可能である。一方、亀裂内におけるベントナイトについては、十分な水の浸潤によって膨潤していることを考慮すれば、ほぼ飽和していると推察される。したがって、模擬亀裂内の侵入ベントナイトは、飽和していると仮定して乾燥密度を算出した。なお、ベントナイト飽和時の湿潤密度と乾燥密度の相関は、式(3)を用いた。

$$\rho_d = \frac{\rho_s(\rho_t - 1)}{(\rho_s - \rho_w)} \quad (3)$$

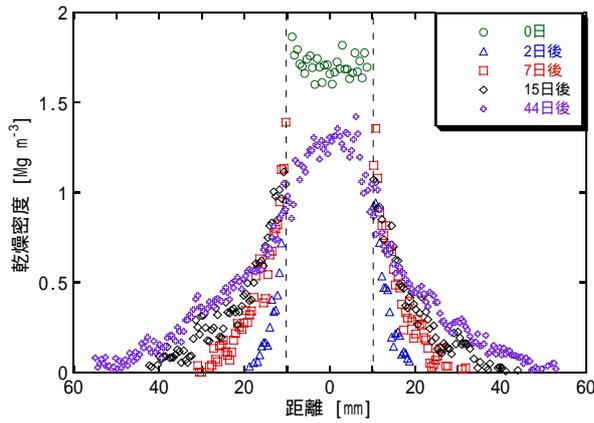


Fig. 8 Dry density distribution in fractures
(Size of sample : 20mm×H20mm)

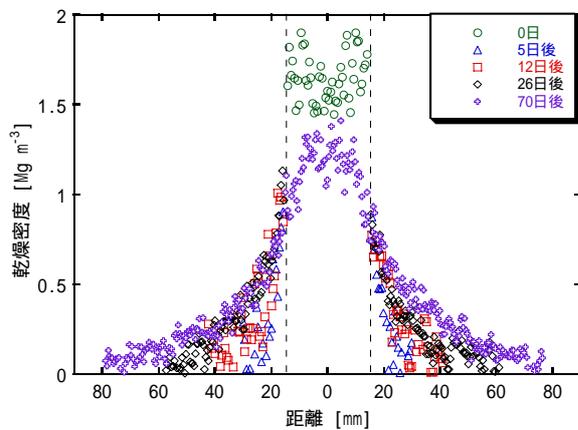


Fig. 9 Dry density distribution in fractures
(Size of sample : 30mm×H30mm)

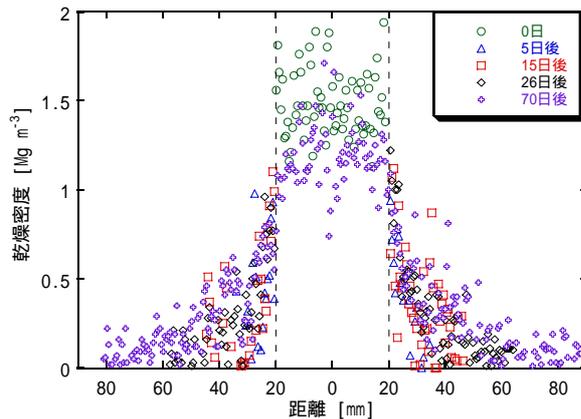


Fig. 10 Dry density distribution in fractures
(Size of sample : 40mm×H40mm)

ここで、 d は乾燥密度[Mg m⁻³]、 s は土粒子の単位体積重量[Mg m⁻³]、 w は水の単位体積重量[Mg m⁻³]である。なお、 s は2.7、 w は20における値である0.9982を用いた。

上記の方法により、コア部と亀裂内におけるペントナ

イトの乾燥密度を算出し、時間経過にともなう密度分布を整理した。供試体寸法：20 mm×H 20 mmの結果を Fig. 8に、供試体寸法：30 mm×H 30 mm および 40 mm×H 40 mmの結果をそれぞれ Fig. 9と Fig. 10に示す。

各図における横軸の距離0 mmの位置は、供試体の中心軸を示す。また、中心軸の左右の破線は、供試体と亀裂との境界を示している。すなわち、破線の内側はコア部の乾燥密度、破線の外側は模擬亀裂内に侵入しているペントナイトの乾燥密度である。これらのプロファイルより、時間経過にともなう模擬亀裂内へのペントナイトの侵入距離の進展や、密度分布の状態をほぼ定量的に把握できる。特に、亀裂内における密度が非線形的な分布を示すことが明らかである。これらは、供試体寸法や亀裂幅に依存せずと同様な傾向を示すが、供試体寸法：40mm×H40mmにおいては、密度分布のばらつきが大きく生じ、その傾向は顕著ではない。

3.3 考察

本試験では、供試体の寸法に比例して試験容器のサイズや肉厚が大きくなっていることから、供試体寸法が大きい試験ケースほど、X線の透過エネルギーの減弱により、測定値にばらつきが生じたものと推察される。また、全体的なプロファイルは局部的に密度のばらつきがみられるが、その傾向性は把握が可能である。しかしながら、最も乾燥密度分布のプロファイルが良好であった供試体寸法：20mm×H20mmにおいても、精度を有する測定結果であるとは言いがたい。

本試験結果より、供試体の寸法（試験容器寸法も含む）が小さくなることで、密度分布のばらつきが改善する傾向にあることから、今後の測定においては測定対象物のスケール効果を考慮することで、より明瞭な密度分布の結果を得ることが可能であるものと考えられた。これは、測定対象物のスケールが小さくなることでX線の透過エネルギーの減弱が軽減され、それによって測定感度の向上が図られるものと考えられることができる。

したがって、密度分布のばらつきを改善する方策として、

X線CTスキャナの測定条件変更による透過エネルギーの増加やノイズ低減など、測定感度の向上を図る。

上記により、X線CTスキャナの性能限界などの理由によって、密度分布のばらつきが改善されない場合には、より小型化したスケールでの試験を実施する。

ことなどの対応が考えられた。

Table 5 Experimental conditions

試料(ベントナイト)	クニゲル V1
供試体寸法 [mm]	20×H20
ケイ砂混合率 [%]	0
乾燥密度 [Mg m^{-3}]	1.6
初期含水比 [%]	7.7
亀裂幅 [mm]	0.6
試験温度 [°C]	室温 (20)
試験水	蒸留水

Table 6 Measurement condition of X-ray CT scanner

スキャン条件	ノンヘリカルスキャン
X線管電圧 [kV]	135
X線管電流 [mA]	200
スライス厚 [mm]	1
スキャンスピード [sec]	3

3.4 再試験結果

3.3 節の検討により、乾燥密度分布のプロファイルの感度が比較的に良好であった供試体寸法：20mm×H20mmの試験容器を用い、まず上述したの方法によって測定条件の最適化を視野におき、測定条件変更による密度分布のより明瞭化が可能であるのかを検証するために、再試験を実施した。侵入試験条件を Table 5 に、X線 CT スキャンの測定条件を Table 6 に示す。

X線 CT スキャンの測定は、前回の測定よりも画像ノイズを低減させるために、以下の測定条件にて行った。

スタッキング数を 30 回から 50 回に増加。

X線管電流を 150 mA から 200 mA に増加。

スキャンスピードを 1 秒から 3 秒スキャンへ変更。

スタッキング数を増すことによる画像ノイズの低減の効果について、CT 値のばらつきを標準偏差によって確認した結果を Fig. 11 に示す。Fig. 11 から分かるように 1

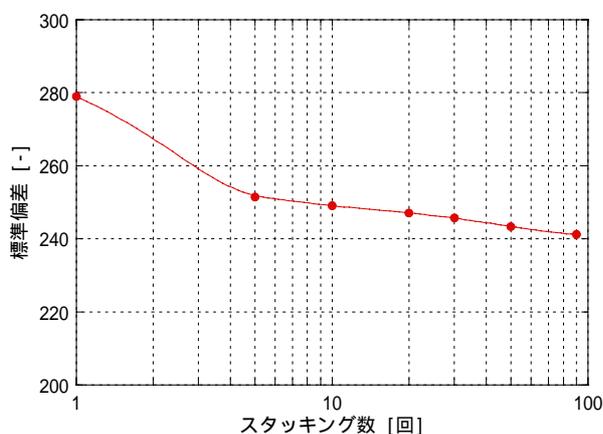


Fig. 11 Relation of stackings and standard deviation

回～90 回の間で CT 値のばらつきが緩和される傾向がある。また、5 回程度のスタッキングでも効果がみられ、さらに回数が増加するにしたがいばらつきが緩和される傾向にある。スタッキング数の決定には、測定対象物の種類や評価目的などに応じて適宜判断する必要がある。今回の測定では、少なからず密度分布のばらつきを低減させるために、スタッキング数を 1 回の測定につき 50 スキャンに設定した。

X線管電圧を高くすると X線強度が増し、検出器に到達する X線光子数の増加により画像ノイズが減少する。また、X線管電流を増加させることでも X線光子数の増加により画像ノイズが減少する。X線管電圧については、装置の最大値を用いて測定を行っているため、本測定では X線管電流を増加させることによって画像ノイズの低減を図った。また、スキャンスピードが速いほど、X線量が減少し、画像ノイズが増加することから、スキャンスピードを低速にすることで、画像ノイズの低減を図った。

スライス厚は厚いほど多くの X線光子が検出器に到達することから、画像ノイズの低減の観点からは有効である。しかしその一方で、パーシャルボリューム効果が大きく影響し空間分解能が低下する。本試験では、スライス厚を厚くする場合、亀裂内におけるベントナイトの CT 値に容器の材質(アクリル)の CT 値が含まれてしまうことで、CT 値が不正確になる可能性がある。このため、スライス厚に関しては、画像ノイズの低減よりもパーシャルボリューム効果を小さくするために、薄いスライス厚によって測定を行った。測定結果を Fig.12 に示す。Fig.8(1 回目の評価)、Fig.12(2 回目の評価)の結果を比較すると分かるように、2 回目の測定の乾燥密度分布は 1 回目よりも、より明瞭に密度分布の傾向が表れている。これは、上記のスキャン条件の設定変更により、検出器へ到達する X線光子数が増したことによる感度の向上や画像ノイズが低減されたことにより改善されたものと考えられる。

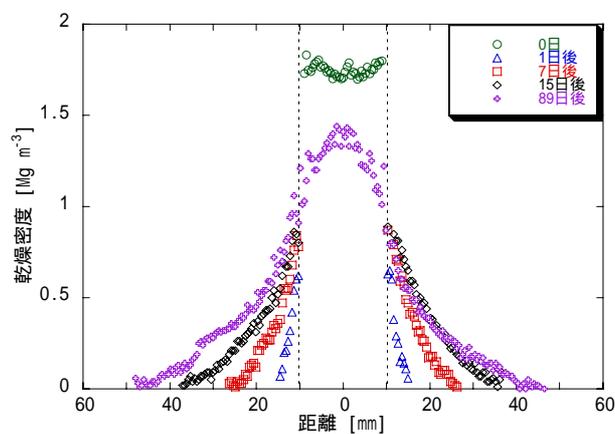


Fig. 12 Dry density distribution in fractures (Size of sample : 20mm×H20mm)

3.5 測定結果の妥当性確認

X線CTスキャナを用いた非破壊測定による評価値(乾燥密度)の妥当性については、試験後の供試体部の残留密度を測定した実測値と非破壊測定値を比較することによって確認を行った。

具体的には、以下の方法により比較を行った。

試験後の解体時における供試体部のサンプリングによる乾燥密度の実測。

Fig. 12の結果を用いた侵入部の密度分布と侵入距離から求めた亀裂内における侵入質量より供試体部の残留密度を算定。

供試体部におけるX線CTの測定断面データを平均化し、供試体部の乾燥密度を算出。

その結果、コア部の残留密度は、実測で 1.39 Mg m^{-3} 、最終的な侵入距離と侵入密度分布から求めた場合に 1.41 Mg m^{-3} 、コア部におけるCT値分布の平均値からは 1.40 Mg m^{-3} となっており、それぞれがほぼ一致する密度を示していることから、本測定による密度分布評価値の妥当性が確認された。

4 結言

本報では、地層処分研究における緩衝材の侵入現象の現象理解と予測評価手法の構築に資するために、X線CTスキャナを用いた非破壊検査により、これまでに測定が困難であった亀裂内侵入ベントナイトの定量的な密度測定への適用性に関する検討を行った。

本検討により、X線CTスキャナを適用した測定技術によって、亀裂侵入ベントナイトの密度を定量的に把握することが可能であることを示した。さらに、測定条件設定の最適化について検討を行い、それらの条件によって得られた密度測定評価データの妥当性を検証することができた。これにより、本測定手法を適用することによって、侵入現象の予測評価手法の妥当性検討や高度化に必要となる定量的なデータを取得することができるものとする。

今後は、種々の侵入試験条件下におけるデータの取得を行い、本評価手法の妥当性についてさらに検証して信頼性を向上させる。また、それらのデータを侵入現象の予測評価手法の妥当性の検討や高度化に反映させ、評価手法の最適化を図っていくことが課題である。

本測定技術や評価手法の進歩に応じ、実際の岩盤亀裂を視野においた検討など、将来的には現実的な環境に即したデータ取得を行い、実用的な侵入現象の予測評価手法の構築に反映していきたい。

参考文献

[1] 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, pp.IV-143 ~ 145, 1999.

- [2] 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, pp.IV-137 ~ 142, 1999.
- [3] 岩井喜典：CTスキャナ, コロナ社, 1979.
- [4] 佐藤晃, 深堀大介, 澤田淳, 菅原勝彦：X線CTによる不均質材料中の亀裂開口量評価, 資源・素材学会誌, Vol.120, p.366, 2004.
- [5] 辻岡勝美：CT自由自在, メジカルビュー社, p.22, 2001.
- [6] 棚井憲治, 松本一浩, 菊池広人：X線CT法の適用性に関する検討, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN8430 2003-001, p.5, 2003.
- [7] Tanai, K. and Yamamoto, M : Experimental and Modeling Studies on Gas Migration in KunigelV1 Bentonite, Japan Nuclear Cycle Development Institute, p.5, 2003.
- [8] 松本一浩, 棚井憲治：緩衝材の流出/侵入特性, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN8400 2003-035, pp.19 ~ 24, 2004.