

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 21 日現在

機関番号：17401

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2011～2014

課題番号：23246156

研究課題名(和文) X線CTによる非破壊試験が先導するジオマテリアルの構造・現象可視化イノベーション

研究課題名(英文) Visualization innovation of structure and phenomena in the geo-materials led by non-destructive visualization method, X-ray CT method

研究代表者

尾原 祐三 (Obara, Yuzo)

熊本大学・自然科学研究科・教授

研究者番号：50135315

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 36,400,000円

研究成果の概要(和文)：この10年間であまり行われていないX線CTを用いた非破壊試験と最近の地球資源システム工学と地盤環境システム工学の管球課題で重要な解明すべき課題に対し、基本的試験法および測定法の高機能化に焦点を絞り研究を実施した。  
例えば、破壊靱性の荷重荷速度依存性、寸法効果を評価するとともに、X線CTによるき裂の可視化により破壊靱性の粒子配列依存性を明らかにした。また、ベントナイトやアスファルトを含む地盤材料を対象とした移流拡散・分散試験により、および裁荷試験により、空隙内部での水や塩の流動特性を明らかにするとともに、物質のマトリクストラップ現象の定量化に成功した。

研究成果の概要(英文)：In order to assess the super long term stability of underground caverns, it is inevitable to evaluate fracture toughness of rock masses. In this study, the relationship between loading rate and fracture toughness, and size effect of specimen size were evaluated. Through the observing the crack propagation process by X-ray CT method, dependency towards the grain arrangement was also revealed. The diffusion and advection of materials in the pores of geo-materials were visualized by X-ray CT method. The trap phenomena of materials in the pores evaluated and the quantitative analysis of the trapped materials has been also conducted. In order to solve the global warming problem, CCS is the key technique. Here, the existence of CO<sub>2</sub> in the pores was clearly visualized by X-ray CT and the storage ratio of CO<sub>2</sub> was quantitatively evaluated. The 2 phase flows between LNAPL (oil) and water in the soils including fingering process were also visualized and analyzed by X-ray CT method.

研究分野：地下空間工学

キーワード：ジオマテリアル X線CT 可視化 非破壊試験

## 1. 研究開始当初の背景

1996年、産業用 X 線 CT スキャナーを熊本大学に導入した。この導入は工学系の学部において世界初であり、世界の最先端であった。これを機に X 線 CT を用いた地盤・岩盤材料の非破壊試験法の開発に着手した。前例も無く手探りの状態であったが、地道な研究を行なうことで数々の成果を発表してきた。この結果、X 線 CT を用いた非破壊試験法の有用性が認識され、国内外の研究機関で少しずつではあるが、X 線 CT スキャナーの導入が始まり、研究成果が出始めた。

そこで、2003年11月に国内外から130名の研究者の参加を得て、世界で始めて、X 線 CT の岩・土・コンクリートへの適用に関する国際会議 (International Workshop on X-ray CT for geomaterials, GeoX2003) を熊本の地で主催した<sup>1)</sup>。ここでも筆者らの研究は極めて高い評価を得た。とくに、岩質材料試験法の高機能化に不可欠な可視化と画像分析の領域で先端的との評価を受けた。この成果を受けて、筆者らは世界的な研究者ネットワークを構築するとともに、学外者にも開かれたエクス・アース・センタ (X-Earth Center) を開設し、ウェブ上で世界に向けて情報発信を行ってきた<sup>2)</sup>。また、2006年10月にフランスのグルノーブル大学との共同でグルノーブル近郊のオソワで The 2nd International Workshop on X-ray CT for geomaterials, GeoX2006 を<sup>3)</sup>、2010年には米国ルイジアナ州立大学と共同でニューオーリンズにおいて The 3rd International Workshop on X-ray CT for geomaterials, GeoX2010 を共催するなど<sup>4)</sup>、本研究グループは世界的に先駆的な立場にある。

過去10年間で X 線 CT を用いた様々な試験法が研究者ごとに提案され、基本的な試験法が確立されつつある<sup>5)</sup>。しかし、これらは系統的に実施されているとは言えず、これから新しく試験を試みようとするとき、既往の研究成果をまとめそれらのノウハウを分析するには多くの時間と労力が必要となる。そこで、これまで提案されてきた試験を総合的に分析し、体系化して集約すれば、今後の X 線 CT を用いたジオマテリアルの構造や内部で起こっている現象の解明研究のための可視化イノベーションを先導することができ、世界的な研究拠点となりうるという着想に至った。

## 2. 研究の目的

本研究では、現有のマイクロフォーカス X 線 CT スキャナーと産業用 X 線 CT スキャナーを併用し、蓄積した X 線 CT 法のノウハウと各種画像分析技術、独創的で先端的な研究成果、および地球資源システム工学と地盤環境システム工学の研究成果に立脚して、マクロからミクロまでのスケールにおけるジオマテリアルの三次元構造 (3D) および内部で起こっている過渡現象 (三次元と時間: 4D)

の解明研究を系統的に実施した。また、これらの成果とこれまで国内外で提案されてきた X 線 CT を用いた非破壊試験を総合・分析・体系化するとともに、国内外の研究者と協力し、世界の X 線 CT を用いた非破壊試験によるジオマテリアルの構造・現象可視化イノベーションを先導した。

## 3. 研究の方法

ジオマテリアルを対象とした X 線 CT による基本的試験法や測定法の高機能化、およびこれまでの X 線 CT を用いた非破壊試験の総合・分析・体系化に焦点を絞り、適切な分担を設けて研究課題を同時に遂行し、研究代表者 尾原祐三 が研究の企画と総括を行った。具体的には、最近の地球資源システム工学と地盤環境システム工学の研究課題において重要な解明すべき課題に対して X 線 CT を用いた非破壊試験を実施し、その基本的試験法および測定法の高機能化に焦点を絞研究を実施した。

## 4. 研究成果

### (1) 岩石の破壊き裂の可視化および分析

花崗岩などの結晶質岩石の強度は、微小クラックや粒子配列といった岩石の微視的構造に影響を受けることが知られている。そこで本研究では、X 線 CT を用いて、岩石内の破壊き裂の可視化および破壊挙動の分析を行った。岩石の破壊靱性試験に使用した岩石試料を、マイクロフォーカス X 線 CT スキャナーで撮影し、図1に示す CT 画像を得た。この CT 画像からは、岩石内の破壊き裂が観察されるとともに、鉱物粒子の配列といった岩石の微視的構造も可視化することができた。図1より、破壊き裂は、鉱物粒子を貫く部分だけでなく粒子境界に沿う部分もあることが分かる。このことから、この岩石の破壊挙動は、微視的構造特性の中でも粒子配列の影響を受けやすいと結論づけた。また、この微視的構造の配向性により、岩石の強度は異方向性を持つことを明らかにした。

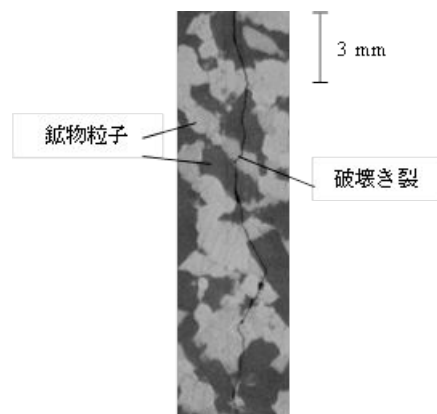


図1 結晶質岩石内の破壊き裂の様子

(2) 多孔質岩石内空隙構造の可視化と流動特性の評価

多くのジオマテリアルは内部に空隙を有しており、空隙構造がマテリアルの透水特性あるいは物質の移流・分散特性を支配している。X線CTは非破壊で内部構造を可視化できる特長を活かし、特に内部の可視化が困難な岩石試料の空隙構造の分析を実施した。本研究では、1つの資料に対して乾燥状態および水飽和状態の2つの異なる状態でX線CTの撮影を実施し、乾燥状態のCT画像と水飽和状態のCT画像間で差分をとることにより、空隙率の分布を評価した。その結果の1例を図2に示す。この岩石試料は、平均の空隙率は約10%であるが、図2に示すように岩石試料内部で空隙率が大きく異なっていることが分かる。このような内部構造は試料マスとしての計測では分析不可能であり、また、本研究グループで用いている画像間差分法により鮮明に情報抽出することが可能となった。また、本試料については固有浸透率の評価も実施されており、空隙率の小さい部分が固有浸透率に大きく影響していることを明らかにした。

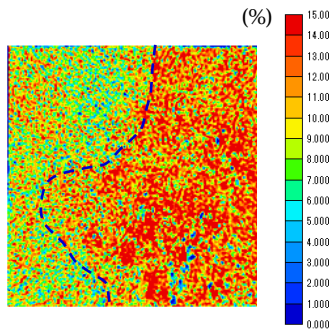


図2 岩石試料内部の空隙率の分布

(3) 多孔質岩石内での拡散による密度プロファイルの可視化

岩石を初めとした多孔質体の空隙ネットワークは物質の拡散にも大きく影響を及ぼす。本研究では、一次元拡散試験を実施し、岩石内部での物質の密度プロファイルをX線CTで可視化し、その結果を基に拡散係数の評価を行った。拡散試験により密度が上昇した

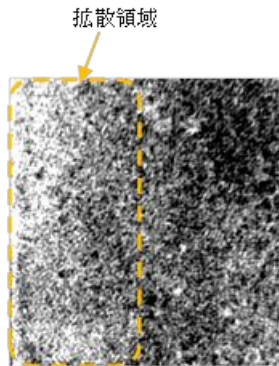


図3 岩石試料内部での拡散現象の可視化

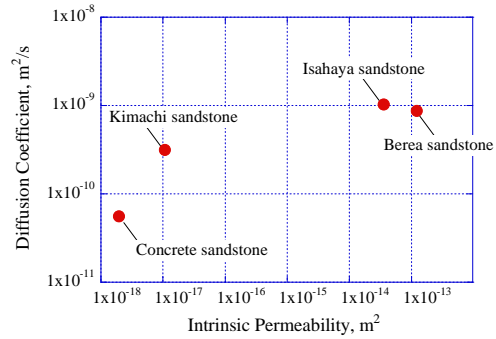


図4 拡散係数と固有浸透率の関係

領域をX線CT画像としてとらえた例を図3に示す。拡散は密度(濃度)勾配に比例して起きる現象であり、密度分布を鮮明にとらえている。また、この画像データを用いて拡散係数の評価も実施しており、固有浸透率の評価結果と併せて岩石の物質移動特性を評価した(図4)。

(4) 球モデルによる間隙分布構造評価法の確立

X線CT画像の特徴を十分に把握し、適切な画像処理を施すことによって、地盤材料内部の間隙構造や粒子構造をより精度よく、3次元的な評価が可能となる。本研究の目的は、μX線CTを使用した豊浦砂の水分保持特性試験を行い、画像解析とLBMを用いて不飽和浸透特性を定量的に評価することである。

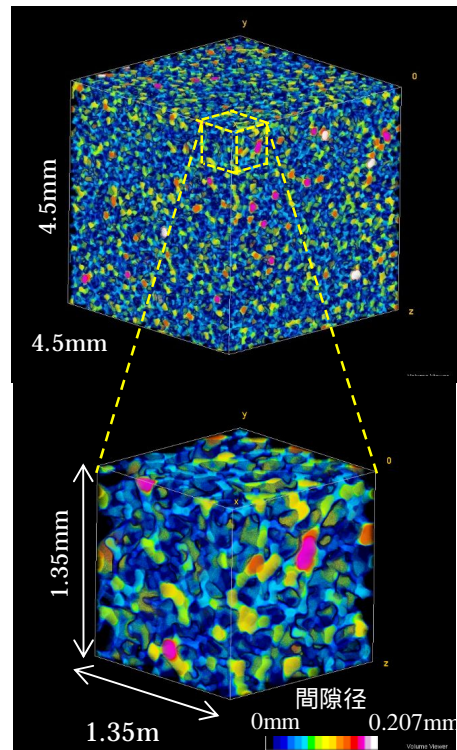


図4 岩石試料内部の空隙率の分布

本テーマでは、 $\mu$ X線CTスキャナを用いて得られた地盤材料のCT画像に対し、画像工学ではよく用いられるマセマティカルモルフロジー演算の概念を導入して、球モデルを用いて毛管力を誘引する空隙構造を評価するための3次元空隙径分布を評価可能な画像解析手法を開発した(図4)。

#### (5) 3次元デジタル画像相関法を用いたアスファルト混合物の変位特性の解明

アスファルト混合物の変形特性およびひずみ特性を把握するため、ホイールトラッキング試験とX線CT撮影を実施し、さらに撮影画像を用いたデジタル画像相関法(DIC)により、変位やひずみを算出した。その結果、ストレートアスファルトを用いた密粒度アスファルト混合物において、変位が混合物の深部へ伝播していく様子や、ポリマー改質アスファルトを用いたアスファルト混合物では表面に大きな引張りひずみが発生すること、ポーラスアスファルト混合物では混合物の内部で大きな引張りひずみが発生するなど、それぞれの混合物での変位およびひずみ特性を確認することができた。図5は、密粒度アスファルトに載荷した際の供試体の水平および鉛直変位をDICにより求めた例である。

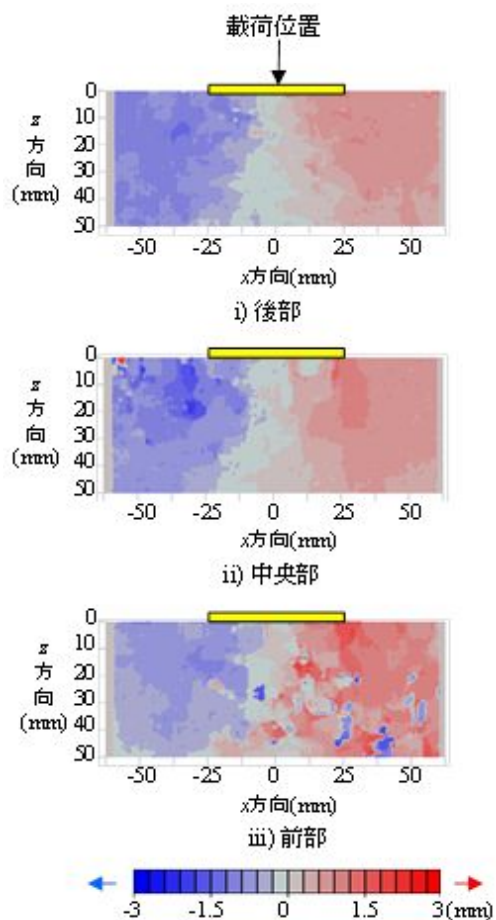


図5 アスファルト内水平方向変位解析結果

#### <引用文献>

- 1) Jun Otani and Yuzo Obara, X-ray CT for Geomaterials - Soils, Concrete, Rocks -, Balkema, 2003.
- 2) X-Earth Center ウェブサイト, <http://www.civil.kumamoto-u.ac.jp/geox/>
- 3) Jacques Desrues, Gioacchino Viggiani and Pierre Besulle, Advances in X-ray Tomography for Geomaterials, ISTE, 2006.
- 4) Khalid A. Alshibli, Allen H. Reed, Advances in X-ray Tomography for Geomaterials -GeoX 2010-, ISTE, 2010.
- 5) 例えば、佐藤 晃, 田中克也, 塩手隆志, X線CT法による多孔質岩石内CO<sub>2</sub>残留ガストラップ現象の分析, Journal of MMIJ, No.126, pp.640-646, 2010.

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計71件)

M. D. Kuruppu, Y. Obara, M. R. Ayatollahi, K. P. Chong, T. Funatsu, ISRM-Suggested Method for Determining the Mode I Static Fracture Toughness Using Semi-Circular Bend Specimen, Rock Mech Rock Eng, 47, 267-274, 2014. (査読有)

M. Kataoka, T. Ito, K. Takashima, Y. Obara, A new testing method to estimate microscopic fracture toughness of rock, Proceedings of ROCKMEC'2014-XI<sup>th</sup> Regional Rock Mechanics Symposium, Afyonkarahisar, Turkey, 2014. (査読有)

M. Kataoka, Y. Obara, M. Kuruppu, Estimation of Fracture Toughness of Anisotropic Rocks by Semi-Circular Bend (SCB) Tests Under Water Vapor Pressure, Rock Mech Rock Eng, 47, 267-274, 2014. (査読有)

doi 10.1007/s00603-014-0665-y, 2014

W.M. Yan, T. Shi, T. Mukunoki, T. Sato and J. Otani, Visualization of grain crushing using micro-focused X-ray CT scanning, Proceedings of Geomechanics from Micro to Macro, Cambridge, UK, 1131-1135, 2014. (査読有)

J. Hironaka, T. Hirai, M. Shintani, J. Otani and T. Sato, Experimental study on the optimum placement of geogrids in the reinforced soil wall, Proceedings of 10<sup>th</sup> ICG, Berlin, Germany, Electric Proceedings, 2014. (査読有)

A. Sato, Ö. Aydan, An X-Ray CT Imaging of Water Absorption Process of Soft Rocks, Unsaturated Soils: Research & Applications, 1, 675-678, 2014. (査読有)

Akira SATO, Koichi IKEDA, Visualization of diffusion phenomena in the porous media by means of X-ray CT, Proc. of 5th International Colloquium on Geomechanics and Geophysics, 9-10, 2014. (査読有)

Toshifumi Mukunoki, Takahiro Nakano, Jun Otani and Jean-Pierre Gourc, Study of cracking process of clay cap barrier in landfill using X-ray CT, Applied Clay Science, Vol. 101, pp. 558-566, 2014. (査読有)

DOI 10.1016/j.clay. 2014.09.019

T. Mukunoki and T. Maeda, Hydraulic conductivity of GCL subjected to freeze-thaw cycles and the effect of CaCl<sub>2</sub> permeation, Proc. of the 10th International conference of Geosynthetics, Berlin in presented USB key, 2014. (査読有) ほか

山田文彦 (YAMADA, Fumihiko)  
熊本大学・大学院自然科学研究科・准教授  
研究者番号：60264280

麻植久史 (ASAUE, Hisafumi)  
熊本大学・大学院自然科学研究科・助教  
研究者番号：70462843

[学会発表](計 43 件)

椋木俊文, 福島淳平, 川中直樹, 赤木佑輔, 高吸水膨潤性不織布を用いた破損遮水シートの止水性能の検討, 平成 26 年度土木学会西部支部年次講演会, 琉球大学(沖縄県中頭郡西原町, 2015 年 3 月 7 日)

片岡みなみ, 澤城光二郎, 伊東孝史, 高島和希, 尾原祐三, 花崗岩を構成する鉱物粒子の破壊靱性, 資源・素材関係学協会合同秋季大会, 熊本大学(熊本市, 2014 年 9 月 15 日)

池田倅一, 佐藤晃, Aquo-Siloxane 法の物質拡散抑制効果の分析と評価, 資源・素材学会九州支部平成 26 年度春季例会講演要旨集, 九州大学(福岡市, 2014 年 5 月 30 日). ほか

[図書](計 0 件)

[産業財産権]

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

[その他]

X-Earth Center ウェブサイト

<http://www.civil.kumamoto-u.ac.jp/geox/>

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

尾原祐三 (OBARA, Yuzo)

熊本大学・大学院自然科学研究科・教授  
研究者番号：50135315

### (2)研究分担者

大谷順 (OTANI, Jun)

熊本大学・大学院自然科学研究科・教授  
研究者番号：30203821

椋木俊文 (MUKUNOKI, Toshifumi)

熊本大学・大学院自然科学研究科・准教授  
研究者番号：30423651

佐藤晃

熊本大学・大学院自然科学研究科・准教授  
研究者番号：40305008