

令和 5 年 6 月 10 日現在

機関番号：16401

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2022

課題番号：21K18751

研究課題名（和文）「掘りクズ」から「コア試料」への3Dデジタル転生による海底下超深部の岩石物性評価

研究課題名（英文）The 3D digital transformation from drilling debris "cuttings" to core sample: evaluation of rock physical properties in the ultra-deep subseafloor environments

研究代表者

浦本 豪一郎 (Uramoto, Go-ichiro)

高知大学・教育研究部総合科学系複合領域科学部門・講師

研究者番号：70612901

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：国際プロジェクトによる海底下超深度（>3,000m）ボーリングコア掘削の採取試料に米粒サイズの「掘りクズ」があり、超深度地下環境の情報を保持した貴重試料だが、極小試料であるがゆえに、環境分析の試料としての有用性が確立されていなかった。本研究ではデジタルモデル作成と3Dプリント技術を組み合わせ、微小岩石試料のデジタル転生による模造岩石作成の技術的な基礎を構築した。特に、重元素を含む溶媒の濃度を工夫し、マイクロCTスキャンによる試料の高精度3Dデジタルデータの取得が可能となり、極小の地質試料から、試料の存在環境の状態を明らかにするための技術的基礎を確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

国際プロジェクトによる地震発生帯等の海底下超深度（>3,000m）ボーリングコア掘削で採取される試料に米粒サイズの「掘りクズ」があり、超深度地下環境の情報を保持した貴重試料だが、そのサイズの小ささのため環境指標としての分析が困難だった。本研究ではデジタルモデルと3Dプリント技術を組み合わせることにより、極小の地質試料から、数cmサイズの模造岩石を作成する技術を構築した。これによって、必ずしもボーリングコアのような形で試料を得ることができないプレート境界断層帯などの地下環境の復元を試みる基礎技術を確立した。

研究成果の概要（英文）：This study established the technical foundation for creating synthetic rock through the digital reincarnation of tiny rock samples by combining digital modeling and 3D printing technologies. The drilling debris obtained from the deep subseafloor (>3,000m) borehole core sampling, despite being minute samples, are valuable specimens that retain information about the ultra-deep subsurface environment. However, their usefulness as environmental analysis samples had not been established.

By adjusting the concentration of solvent containing heavy elements, we were able to acquire high-precision 3D digital data of the samples through micro-CT scanning, thus establishing the technical basis to elucidate the conditions of the sample's original environment from these extremely small geological samples.

研究分野：地質学

キーワード：カッタングス 3Dプリント 岩石物性 マイクロCT

## 1. 研究開始当初の背景

海底地下環境の物理化学状態(物質と物性)を“直接”知るには、地下深部の岩石のボーリングコア掘削を行い、得られたコアそのものを分析することが唯一の手段である。研究代表者らはこれまで海底下深部から採取された岩石コア試料を用いて、南海トラフ地震の発生メカニズムや微生物生態の研究などを行ってきた。

そんな中、2018年度、国際プロジェクトによる「南海トラフ地震発生帯掘削」で、震源域の断層到達を目指した海底地下掘削が行われた。しかし、超深度掘削の技術的困難により、掘削深度3,000mのうち、わずか1mほどしかコア試料が得られず、主に回収された米粒大の岩石の「掘りクズ」が研究試料として提供されることとなった。岩石試料の物性を調べるには、分析装置の設定上、少なくとも直径1インチ(2.54cm)以上の試料が必要で、米粒サイズの試料では分析ができないため、地下超深部環境解析の技術的困難に直面することとなった。

一方、研究代表者らは歴史的な南海地震の記録の保全・デジタルアーカイブ化のために、自然災害記念碑の3Dデジタルモデルの製作に取り組んできた(科研費萌芽2015~2016)。この中で、3Dデジタルモデルの防災教育への活用を考えて、3Dプリンタを用いて石碑の模型を製作したところ、様々に“拡大”しながらも高い再現性で石碑の複製を製作できた。このデジタル化による3次元的な複製技術を、直面している「掘りクズ」解析の技術的問題に応用することで、地下深部環境を調べることができると着想し、研究を行った。

## 2. 研究の目的

極小の地質試料を約10cm径の「コア試料」の模造岩石へと転生させるための基礎として、実験用岩石を用いてデジタルデータの取得条件や模造岩石の作成条件を検討した上で、天然の海底下超深部の掘りクズをデジタル転生させた模造岩石を作成し、物性分析等で、海底地下超深部の環境を解明することを目的とする。

## 3. 研究の方法

本研究のアプローチで模造岩石から海底地下環境を知る上で技術的にポイントとなるのは、試料中の空隙構造(微細な割れ目)を忠実に再現したデジタルデータを得ることである。そこでまず、実験用岩石試料(砂岩、凝灰岩、花崗岩、玄武岩、粘板岩および骨材)を用い、岩石の3次元微細構造と水理特性を再現する技術構築を進めた。岩石片はX線マイクロCTスキャナで測定し、3Dデジタルデータを取得後、3Dプリンタで模造岩石を製作・物性試験の実測データを得る。また、3Dデジタルデータから物性データを数値計算し、実測値と比較する。これを繰り返し、水理特性を再現した模造岩石を製作した。

研究成果には手法構築も含まれるため、研究方法の詳細は以下に記載する。

## 4. 研究成果

当初は、天然の掘りクズ試料の解析まで目指したが、コロナ禍により学外機関との調整による装置導入や学外での分析が困難となり、時間的な制約の観点から海底下試料の解析までは断念した。代わりに、実験用に用いられる種々の天然岩石の分析を通して、データ取得およびデータ解析の精密化を行った。

X線マイクロCTによる岩石試料の3Dデジタルデータ取得のための試料調製法の改良

X線マイクロCTスキャナによる画像取得においては、アーチファクトの発生、特に線質効果は画像精度に大きな影響を与えることが知られている。そのため地質試料のマイクロCTスキャンでは、画質改善のため、様々な試みが行われている。例えば、アルミニウムの薄板をX線源と試料の間に挿入し、低線量のX線を遮断した上でのCTスキャン、造影剤を試料の孔隙に浸透させ、X線吸収係数を増大させてのCTスキャンなど、画像処理によるアーチファクトの除去である。しかしながら、アルミニウムの薄板を用いる方法で線質効果を低減することはできるが、完全に除去することはできず、一方で造影剤を用いると試料全体のX線吸収係数が増加し、そもそも試料をX線が透過しない場合が生じるなどのデータ取得に難があった。

そこで本研究では、造影剤として用いられるヨウ化カリウムについて、「低濃度の水溶液(1wt%水溶液)」を調製し、試料に真空浸透させた上で、汎用マイクロCTスキャンで試料計測を試みた。結果の例は図1のようになり、ヨウ化カリウム水溶液を浸透しない場合、試料の表面付近が不自然に明るくなるアーチファクトが発生してしまうが、1wt%ヨウ化カリウム水溶液を浸透させた試料ではアーチファクトのほぼ皆無の画像が得られた。今回の試料調製は、造影剤として用いられるヨウ素が低線量のX線を吸収することで適切に線質効果を除去しつつ、ただしアーチファクトの低減に留まらず、低濃度の水溶液を利用するため、試薬の使用量を少なくできることから環境負荷が少ない。また得られるCT画像そのものの画質が向上するため、画像処理ではアルゴリズムに依存しない処理が可能となり、デジタルデータの再現性が高まるなどの効果も得られた。

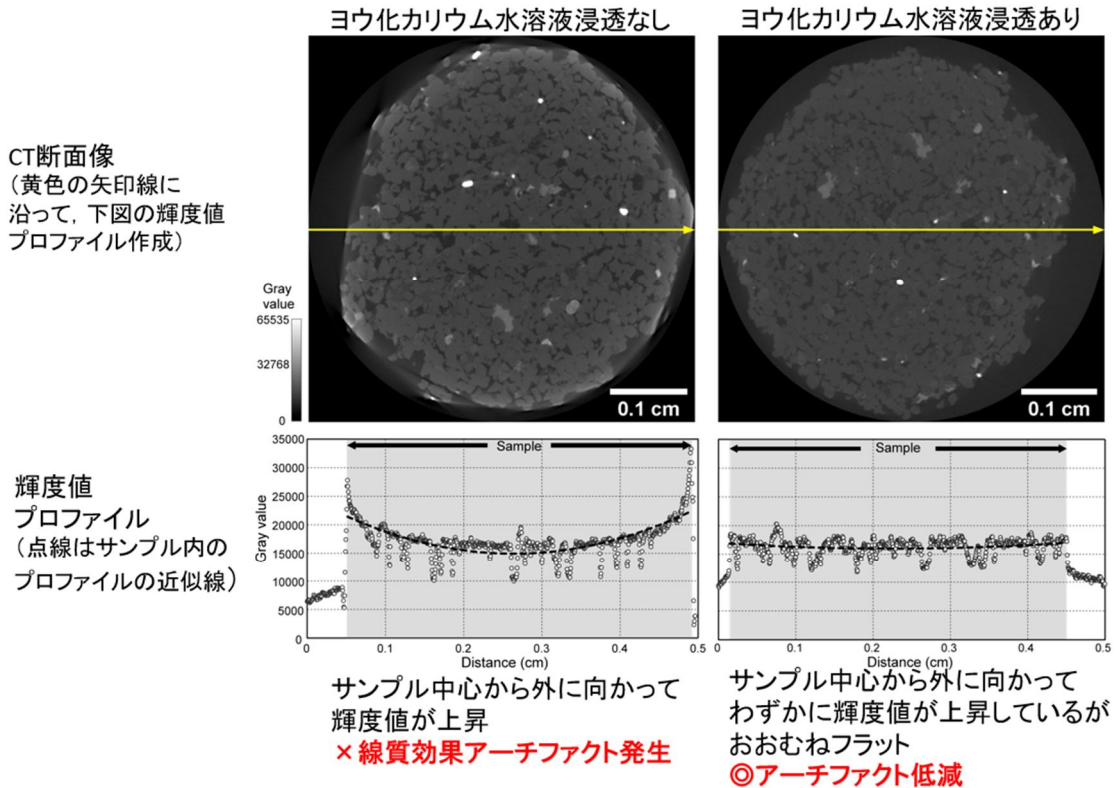


図1 ヨウ化カリウム水溶液の含侵の有無によるCT断面画像の比較

#### デジタルデータ画像解析の高精度化

これを踏まえて、試料の3次元デジタルデータを構築において、画像解析によって試料の微細構造を高精度で抽出する処理を検討した。CTスキャンのデジタルデータから構造抽出には、さまざまな手法が提案されており、濃度情報、鉱物粒子のエッジ情報、領域情報を用いる手法などに大別される。しかし、汎用性、安定性、容易性などの観点から、実用的に使われているのは輝度しきい値法をベースにしたものに限られている。しかし、輝度情報の利用だけでは限界があるため、本研究は、組織の空間的な連続性に着目したリージョンローイング法によるデジタルモデル構築の検討を進めた。リージョンローイングは抽出対象領域内部の点から、同一の領域に属すると判断された領域を順次取り込みながら領域拡張を行い、必要な領域全体を抽出する手法である。多少のノイズには関係なく周辺からまわり込むため、ノイズの影響を除去しやすい。また3次元的にすべての方向に拡張していくと、2次元画像上では孤立した領域になる複雑な3次元形状を持つ領域も、一度に抽出可能である。領域の連結性は、基本的に開始点を中心とした濃度範囲内にあるかで判定する。単純な画像輝度による処理に比べて、領域の連続性も考慮したできるため、有効領域の判定がより精密化できる。

本研究では取得した岩石試料のデジタルデータの解析をリージョンローイング法によって繰り返した処理し、試料の孔隙サイズを計測したところ、低濃度ヨウ化カリウム水溶液の浸透試料では、浸透しない場合に比べて孔隙が5%ほど大きく見積もられる結果が得られた。これはヨウ化カリウム水溶液を浸透しない試料は線質効果で画像全体の明るくなり、画像内の暗部として認識される孔隙が適切に認識できず、孔隙サイズも小さく見積もられたと考えられる。画像解析の結果は、他の物性分析手法で得られた孔隙サイズとも整合的で、高精度のデジタルデータの解析が可能となった。本研究で得られた試料調製、データ処理技術を適用して、3D模造岩石の製作が可能となっており、今後、模造岩石の製作精度を向上させていくことで、地下超深部環境の復元につなげる予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 谷川亘, 内山庄一郎, 浦本豪一郎, 鈴木比奈子, 大橋育順	4. 巻 36
2. 論文標題 SfMとDSMを用いた地震津波碑のデジタル複写による文字の判読、歴史地震	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 歴史地震	6. 最初と最後の頁 149-158
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 清水成, 横井克則, 近藤拓也, 浦本豪一郎	4. 巻 44
2. 論文標題 ポリマーセメントモルタルの性状にセルロースナノファイバーとフライアッシュの混入が与える影響	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 1492-1497
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 諸野祐樹, 浦本豪一郎, 上杉健太郎, 竹内晃久, 安武正展, 谷川 亘
2. 発表標題 Selective 3D visualization of pore space in geologic material by impregnation of heavy element-containing liquid
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岡林 徹, 浦本豪一郎, 新井和乃, 横井克則, 矢野杏菜
2. 発表標題 医療用 X 線 CT を用いた W/C が異なるコンクリートの品質評価方法の検討
3. 学会等名 令和4年度土木学会四国支部技術研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 秋柴 愛斗、谷川 亘、浦本 豪一郎、上杉 健太郎、竹内 晃久、安武 正展、諸野 祐樹
2. 発表標題 CT撮影画像とイオン溶液を利用した岩石試料の空隙率推定手法の検討
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2023年大会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	谷川 亘  (Tanikawa Wataru)  (70435840)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・超先鋭研究開発部門(高知コア研究所)・主任研究員    (82706)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------