

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 29 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2018～2019

課題番号：18K18778

研究課題名(和文) 岩石-水反応と物質移動による階層的構造を読み解く超解像イメージング

研究課題名(英文) Super-resolution imaging for understanding hierarchical structures produced by water-rock reactions and mass transfer

研究代表者

岡本 敦 (Okamoto, Atsushi)

東北大学・環境科学研究科・准教授

研究者番号：40422092

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,800,000円

研究成果の概要(和文)：X線断層撮影(CT)は、非破壊で3次元構造を調べる手法であり、近年、岩石の掘削コア試料にも汎用的に適用されつつある。しかし、広範囲を撮像では、岩石組織まで観察する解像度がないという問題がある。本研究では、「スパース超解像技術」を軸に、ミクロとマクロをつなぐ新しい岩石の解読方法を開発にチャレンジした。解析試料は、オマーンオフィオライトの蛇紋岩化したかんらん岩であり、同じ場所を異なる解像度で撮像した。スパース超解像により、特徴的な少数の(スパース)基底画像が抽出され、従来の補間法などと比べて高性能な超解像に成功した。さらに、大きな解像度の差がある場合には、段階的超解像が有効であることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地球内部では、鉱物からプレートまで様々なスケールの現象が運動して起こっている。近年、分析・解析装置は飛躍的に向上したものの、異なるスケールの間を結びつけることは未だにできていない。本研究では、X線CTという岩石・地質試料の普遍的に使われる分析方法に、スパース超解像という機械学習技術の1つを適用して岩石組織解読の方法論を提案したものであり、この「スケールの壁」を打破すること第一歩になったと考えられる。

研究成果の概要(英文)：X-ray tomography (CT) is a non-destructive method for investigating three-dimensional structures. In recent years, this method has been widely applied to rock drill core samples. However, when imaging a wide area, there is a problem that the resolution is not enough for analyzing microstructure of rocks. In this research, I challenged to develop a new method of decoding rock textures that connects micro and macro, based on "sparse super-resolution technology". The analyzed sample was a serpentinized peridotite taken from the Oman Drilling Project, and the same part of the rock core was imaged at different resolutions. By sparse super-resolution, a small number of characteristic (sparse) basis images were extracted, and high-performance super-resolution was successful compared to conventional interpolation methods. Furthermore, it was found that stepwise super-resolution is effective when there is a large difference in resolution.

研究分野：岩石学

キーワード：X線CT スパース超解像 掘削コア 岩石組織 蛇紋岩化作用 オマーン掘削プロジェクト 岩石-水相互作用

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

固体地球内部では、少量の流体が、化学反応を劇的に促進させる。従って、地球のダイナミックな現象を理解するためには、マクロな流体移動とミクロな反応過程を結びつけた全体像の理解が重要である。X線断層撮影(CT)は、非破壊で岩石の3次元構造をみる手法として期待されている。様々な掘削プロジェクトにおいて、掘削コアの連続CTデータが汎用的に撮像されるようになりつつあるが、細かい岩石組織まで観察する解像度がないため、定量的解析には限界がある。超解像技術は、動画や静止画の解像度を上げる画像処理技術であり、近年、急速に進展し、医療分野などをはじめとして、X線CTデータに適用されつつある。しかし、岩石のX線CTデータへの適用例はほとんど存在せず、岩石組織に適した方法論を構築する必要がある。

### 2. 研究の目的

本研究では、X線CTのスパース超解像技術を軸に、ミクロとマクロをつなぐ新しい岩石の解読方法を開発することにチャレンジする。岩石の開発した方法を海洋の変質(蛇紋岩化)したかんらん岩に適用して、地球内部の反応性流路の発達過程について考察する。

### 3. 研究の方法

(1) 本課題は、手法の開発と変質かんらん岩への適用の2ステップからなる。手法の開発においては、東北大学環境科学研究科のマイクロフォーカスX線CTスキャナーを使用する。解析試料として、オマーン国際掘削プロジェクトで採取された地殻マントル境界の蛇紋岩化したダナイトを主に使用した。このコア試料は、掘削船「ちきゅう」の医療用スキャナにおいて連続X線CT撮像が行われた。

(2) スパース超解像 自然画像は、少数の基本画像に係数をかけた線形和として表現できる。スパース超解像では、高解像度においてできるだけ少数の(スパースな)基底で表すための辞書学習を行い、その基底を使って低解像画像の超解像を実現する(図1)。本研究で用いた手法は、Yang et al. (2010)で提案された方法を基にしているが、抽出したい「岩石固有の組織」の特徴によって辞書数やパッチ(基底画像)サイズをチューニングする必要がある。また、通常の2、3倍の超解像であり、例えば、10倍、100倍超解像を可能にするには新たな方法論が必要である。

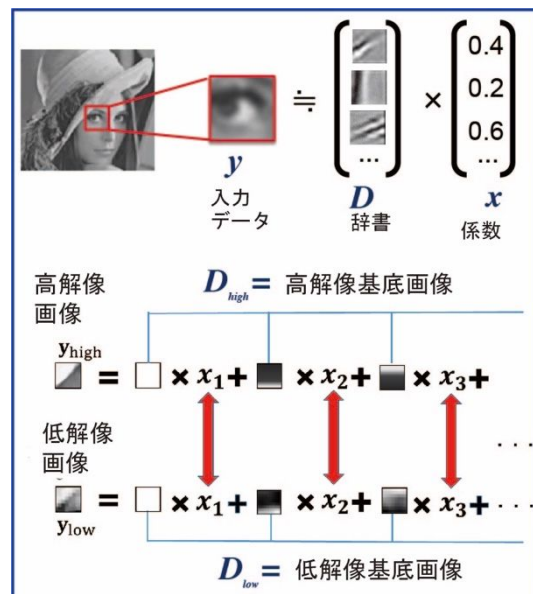


図1 スパース超解像の概念図

### 4. 研究成果

#### (1) オマーン掘削プロジェクトと解析試料

2017-2018年において、オマーンオフィオライト(海洋地殻からマントルまでの断面が露出したもの)の国際陸上掘削プロジェクト(<https://www.omandrilling.ac.uk>)が行われた。報告者は、2018年に掘削船「ちきゅう」におけるコア記載に参画し、本研究で使用する蛇紋岩化したかんらん岩(ダナイト)を取得した。CM1サイトの掘削では、地殻-マントル境界をつらぬく400mを超える連続コアの回収に成功している。「ちきゅう」での医療用X線CT画像のボクセルサイズが、 $167 \mu\text{m}$ であるのに対して(図1a, b)、東北大のマイクロフォーカスCTスキャナでは、ボクセルサイズが10, 20, 40,  $80 \mu\text{m}$ CT画像を取得した(図1c, d)。解析試料は、蛇紋岩化作用が完全に進行しており、かんらん石などは残っていない。一方、岩石全体的に、CTやBSE画像で明るく見えるマグネタイトの脈のネットワークが発達している。高解像度で見ると

この脈は、マグネタイトで縁取られた蛇紋石脈であることがわかる (図 e, d)。

## (2) スパース超解像の結果

スパース超解像アルゴリズムを開発するにあたって、基底画像のサイズ、数、学習に用いる CT 画像の枚数などを試行錯誤しながらすすめた。図 3 は超解像の結果の一例である。適切な基底サイズで辞書学習を行うと、基底画像として、スピネルの球形であったり、マグネタイトが並ぶ線的な構造が特徴量として抽出されることがわかった (図 3 a)。また、4 倍超解像の結果をみると、オリジナルの画像では、ガタガタしたピクセルの輪郭が目立つところが、なめらかになっていることがわかる。また、単純な平滑化処理では高い輝度の部分が弱くなってしまいが、超解像では輝度の範囲も維持されており、うまくいっているといえる。人工的に作成した劣化画像を用いてスパース超解像を行い、定量的指標 (PSNR, SSIM) を使って、従来の補間法による超解像と比較したところ、本研究の方が性能が良いことが確認された。

より広いスケールをつなぐ超解像を行うために段階的超解像を試みた。8 倍の直接超解像よりも、2 倍超解像を 3 回行う段階的超解像の方が、滑らかに組織を復元できることがわかった。

## (3) 関連する成果

オマーンのコア試料に関して、高エネルギー加速器研究機構の放射光施設において、ナノスケールの X 線 CT を取得し、解析を進めている。また、かんらん岩の炭酸塩化作用、岩石 流体反応による岩石の亀裂発生についての実験を進めた。これらを合わせることで岩石 流体相互作用とパターン形成の理解が深まると期待できる。

## (4) インパクトと今後の展望

本研究の成果は、2020 年 1 月にオマーン国で行われた国際会議で発表し、海外の研究者から高い評価を受けた。現段階では、高解像画像で観察される細かい組織が超解像において完全に再現されているとはいえない。これをクリアするためには、実際に異なる解像度で取得したデータを用いて、低解像基底と高解像基底との関係そのものを学習させることが望ましい。本研究の成果は、地球科学の大きな壁である「スケールの壁」を打ち破るための第 1 歩となったと考える。ナノスケール X 線 CT の結果を、マイクロスケール X 線 CT を介して、掘削コアの数百 m スケールの連続 CT データと結びつけることができれば、掘削コアを強力なビッグデータに変貌させられると期待できる。

<引用文献> Yang, J., Wright, J., Huang, T., Ma, Y., 2010. Image super-resolution via sparse representation. IEEE Transactions on Image Processing, 19, 2861-2873.

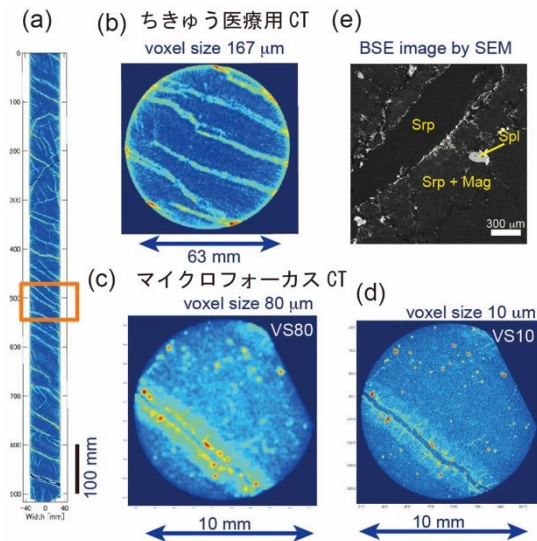


図 2 オマーン掘削により採取された蛇紋岩化したダナイト試料 (CM1A-90z02-48-53)。(a, b) ちきゅうの医療用 CT による X 線画像。(a) 90 cm のコア。オレンジ部分は詳細な解析に用いた部分。明るい部分はスピネルとマグネタイトを示し、暗い部分が蛇紋石を示す。ボクセルサイズは 167  $\mu\text{m}$ 。(c, d) 東北大学のマイクロフォーカス X 線スキャナによる画像。ボクセルサイズは (b) 80  $\mu\text{m}$ 、(c) 10  $\mu\text{m}$ 。(e) 同じ試料の蛇紋石脈周辺の走査型電子顕微鏡 (SEM) による後方散乱像。Srp = 蛇紋石、Mag = マグネタイト、Spl = スピネル。

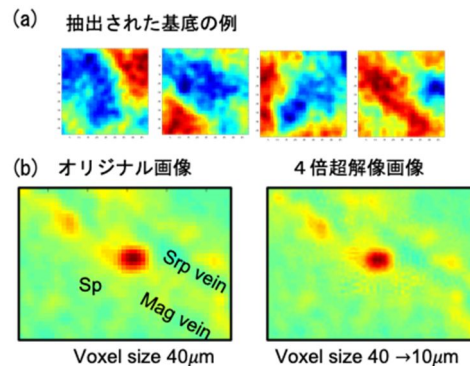


図 3 4 倍超解像の結果。(a) 辞書学習によって抽出された基底の例。(b) 低解像のオリジナル画像 (左) と超解像画像 (右)。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5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 Wang Jiajie, Watanabe Noriaki, Okamoto Atsushi, Nakamura Kengo, Komai Takeshi	4. 巻 23
2. 論文標題 Acceleration of hydrogen production during water-olivine-CO <sub>2</sub> reactions via high-temperature-facilitated Fe(II) release	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Hydrogen Energy	6. 最初と最後の頁 11514-11524
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ijhydene.2019.03.119	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 -
1. 著者名 Wang Jiajie, Watanabe Noriaki, Okamoto Atsushi, Nakamura Kengo, Komai Takeshi	4. 巻 30
2. 論文標題 Enhanced hydrogen production with carbon storage by olivine alteration in CO <sub>2</sub> -rich hydrothermal environments	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of CO <sub>2</sub> Utilization	6. 最初と最後の頁 205 ~ 213
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jcou.2019.02.008	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 -
1. 著者名 Kuwatani Tatsu, Nagao Hiromichi, Ito Shin-ichi, Okamoto Atsushi, Yoshida Kenta, Okudaira Takamoto	4. 巻 98
2. 論文標題 Recovering the past history of natural recording media by Bayesian inversion	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevE.98.043311	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 -
1. 著者名 Oyanagi Ryosuke, Okamoto Atsushi, Tsuchiya Noriyoshi	4. 巻 8
2. 論文標題 Multiple Kinetic Parameterization in a Reactive Transport Model Using the Exchange Monte Carlo Method	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Minerals	6. 最初と最後の頁 579 ~ 579
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/min8120579	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 Dandar Otgonbayar, Okamoto Atsushi, Uno Masaoki, Batsaikhan Undarmaa, Ulziiburen Burenjargal, Tsuchiya Noriyoshi	4. 巻 -
2. 論文標題 Drone brings new advance of geological mapping in Mongolia: Opportunities and challenges	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Mongolian Geoscientist	6. 最初と最後の頁 53~57
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5564/mgs.v0i47.1063	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18件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 Jiajie Wang, Noriaki Watanabe, Kengo Nakamura, Atsushi Okamoto, Takeshi Komai
2. 発表標題 CO2リッチ水熱環境における橄欖石の加速風化を用いた水素生成と炭素固定
3. 学会等名 日本地熱学会平成30年学術講演会 (東京大会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 宮澤美幸, 鈴木杏奈, 岡本敦, 清水浩之, 大林一平, 平岡裕章, 伊藤高敏
2. 発表標題 数値シミュレーションと組み合わせた構造解析による蛇紋岩の形成メカニズム推定
3. 学会等名 日本地質学会第125年学術大会 (2018つくば特別大会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 新部 貴理, 岡本 敦, 天谷 宇志, 土屋 範芳
2. 発表標題 アモルファスシリカの亜臨界・超臨界環境における相変化の速度論的検討
3. 学会等名 日本鉱物科学会2018年年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大柳 良介、岡本 敦、土屋 範芳
2. 発表標題 海洋底蛇紋岩作用におけるSi交代作用の律速過程
3. 学会等名 日本地質学会第125年学術大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岡本 敦
2. 発表標題 シリカ粒子と流体圧振動
3. 学会等名 変成岩などシンポジウム2019、蒲郡
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Otgonbayar Dandar, Atsushi Okamoto, Masaaki Uno, Noriyoshi Tsuchiya
2. 発表標題 Ca-metasomatism of the Mantle: an example from the Khantaishir ophiolite in the chandman area, western Mongolia
3. 学会等名 日本鉱物科学会2018年年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 笠原 久夢, 宇野 正起, 岡本 敦, 土屋 範芳
2. 発表標題 吸水反応における反応誘起応力の反応速度・変形速度依存性: MgO- H <sub>2</sub> O系における実験的研究
3. 学会等名 日本鉱物科学会2018年年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 杉沢 直樹, 東野 文子, 宇野 正起, 岡本 敦, 土屋 範芳
2. 発表標題 350-450 水熱反応によるアパタイト中のハロゲン置換反応実験
3. 学会等名 日本鉱物科学会2018年年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 ミンダリョウ ディアナ, 宇野 正起, 東野 文子, 岡本 敦, 土屋 範芳
2. 発表標題 東南極セールロンダーネ山地, グラニユライト・角閃岩相反応帯における多元微量元素解析による含Cl流体の浸透の時間スケール
3. 学会等名 日本鉱物科学会2018年年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Jiajie Wang, Kengo Nakamura, Noriaki Watanabe, Atsushi Okamoto, Takeshi Komai
2. 発表標題 NaHCO <sub>3</sub> -promoted olivine weathering with H <sub>2</sub> generation and CO <sub>2</sub> sequestration in alkaline hydrothermal system
3. 学会等名 9th International Conference on Future Environment and Energy (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Miyazawa, A. Suzuki, A. Okamoto, H. Shimizu, I. Obayashi, and T. Ito
2. 発表標題 Analysis of rock fracture pattern and fluid flow by persistent homology
3. 学会等名 The 15th International Conference of Flow Dynamics, Sendai, Japan (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Oyanagi, R., A. Okamoto, and N. Tsuchiya
2. 発表標題 Hydrothermal experiments on olivine-quartz-seawater system at 300 ° C: implication for the progress of silica-metasomatism during serpentinization at the crust-mantle boundary in the oceanic lithosphere
3. 学会等名 American Geophysics Union, Fall Meeting 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Frueh-Green, G. L., Grabowska, M., Oyanagi, R., Kimura, K., Klein, F., Okamoto, A., Morishita, T., Warsi, N., Tamura, A., Teagle, D.A.H., Takazawa, E., Coogan, J.A., Kelemen, P.B., Matter, J.M., the OmanDP Phase 2 Science Party
2. 発表標題 Hydrothermal Alteration of the Crust-Mantle Transition and Upper Mantle in the Samail Ophiolite: Insights from Holes CM1A and CM2B of the Oman Drilling Project
3. 学会等名 American Geophysics Union, Fall Meeting 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Atsushi Okamoto
2. 発表標題 Hydrothermal experiments on supercritical water-rock interaction: thermodynamic data and silica
3. 学会等名 16th international symposium on Water Dynamics, March 12, Sendai (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Otgonbayar Dandar, Atsushi Okamoto, Masaaki Uno, Noriyoshi Tsuchiya
2. 発表標題 Formation of secondary olivine after orthopyroxene induced by highly oxidizing fluid in the mantle wedge: An evidence from the Khantaishir Ophiolite, western Mongolia
3. 学会等名 JSPS-DST Japan-India Forum for Advanced Study, Niigata (国際学会)
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 Otgonbayar Dandar, Atsushi Okamoto, Masaaki Uno, Noriyoshi Tsuchiya
2. 発表標題 Formation of Pseudomorphs after Orthopyroxene during serpentinization and Ca-metasomatism of mantle wedge (the Alag Khadny accretionary wedge, the Chandman area, western Mongolia)
3. 学会等名 16th international symposium on Water Dynamics, March 12, Sendai (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 A. Nurdiana, A. Okamoto, M. Uno, N. Tsuchiya
2. 発表標題 Pore network of feldspar replacement as the mark of potassium-rich supercritical fluids on the top of granitic intrusion
3. 学会等名 16th international symposium on Water Dynamics, March 12, Sendai (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Jiajie Wang, Kengo Nakamura, Noriaki Watanabe, Atsushi Okamoto and Takeshi Komai
2. 発表標題 Simultaneous H <sub>2</sub> production with carbon storage by enhanced olivine weathering in laboratory-scale: An investigation of CO <sub>2</sub> effect
3. 学会等名 The Second International Conference on Materials Chemistry and Environmental Protection. Oral, Sanya (China), (国際学会)
4. 発表年 2018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	大森 敏明  (Omori Toshiaki)  (10391898)	神戸大学・工学研究科・准教授   (14501)	

## 6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 協力者	宇野 正起  (Uno Masaoki)	東北大学・大学院環境科学研究科・助教  (11301)	
連携 研究者	道林 克禎  (Mlchibayashi Katsuyoshi)  (20270978)	名古屋大学・環境学研究科・教授  (13901)	