

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 25 日現在

機関番号：18001

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2017

課題番号：26790079

研究課題名(和文)八重山島嶼沿岸域における生物学的岩盤風化機構の解明と理論シミュレーション研究

研究課題名(英文)Theoretical simulation and experimental study on biological weathering mechanism of the rock around coastal area in Yaeyama Islands

研究代表者

松原 仁 (MATSUBARA, Hitoshi)

琉球大学・工学部・准教授

研究者番号：50414537

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、八重山島嶼沿岸域における露頭岩盤で見られる風化作用に対して、主に微生物風化作用に着目し、フィールド調査と理論シミュレーションによってそのメカニズムの解明に挑んだ。その結果、西表島の沿岸部において岩内微生物による剥離風化を確認するとともに、琉球層群と八重山層群の境界部に柱状の特異な風化形態が発達していることを確認した。また、これらの風化現象を再現できる数理モデルを移流反応拡散理論に基づいて開発した。

研究成果の概要(英文)：The microbial weathering in/on the outcrops around the coastal area in Yaeyama Islands was investigated. This work was based on the field survey and mathematical/numerical simulation in order to understand its physical, chemical and biological mechanism. As a result, we found some peeling weathering patterns by microorganism activities on the sandstone at Iriomote Island. Additionally, we found that the rock failures at the north part of Iriomote Island may be affected by a unique columnar weathering pattern between the Ryukyu group and Yaeyama group. Furthermore, we developed a mathematical model based on the advection-reaction-diffusion theory to simulate rock weathering phenomena by physical, chemical and biological reactions.

研究分野：地圏工学，計算力学

キーワード：岩の生物学的風化 八重山層群 琉球層群 マルチフィジックスシミュレーション 移流反応拡散方程式

1. 研究開始当初の背景

我が国の最南西端に位置している八重山諸島は、大小合わせて 19 の島々からなる島嶼環境下にあり、多くの地域が沿岸部に位置している。その地質には、砕屑性あるいは礫性の石灰岩を主とする第四系琉球層群と浅海成の砂岩を主とする中新統八重山層群が不整合に累重している箇所が多く見られる。地球規模で見れば、このような堆積岩は地球表面の約 90% に分布しており、日夜、風や波浪などの物理的外乱、あるいは化学物質による溶解・溶出の脅威に晒され、浸食されている。特に、沿岸部においては浸食の度合いも大きく、岩盤崩落・落石、更には地震等の衝撃的要因も加わり、大規模崩壊が発生する危険性も孕んでいる。

例えば、八重山諸島最大の島である西表島の沿岸部で観察された露頭では、下部層の八重山層群が波浪によって浸食され、不安定状態になった上部層の琉球層群の一部が崩落している事例がある。上部の琉球層群もまた、植生による浸食を受けて脆弱化している場合があり、常に崩壊の危険性を有している。更に、八重山層群の露頭では、菌類と藻類の共生生物である地衣類による浸食も見られ、微生物もまた、岩盤崩壊に関与していることが考えられる。

微生物風化に関しては、地球生物学分野において精力的な研究が繰り広げられており、最近では、鉄のような非炭素資源を生命維持に必要なエネルギーに変換する微生物の存在も報告され、微生物が地球の内部、表面の風化を直接的かつ確実に進めていることが分かりつつある。したがって、微生物風化もまた、岩盤崩落や落石等の岩盤災害の誘因となり得る。

一方、岩石の生物学的な風化現象に関する科学的知見の蓄積は、これらの変化が地質学的スケールの時間をかけた緩徐なものであることや、この変化自体を実環境で確認することが困難である等に起因して、遅々として進まない現状があることも否定できない。また、生物学的風化が岩盤の支持力や安定性に与える影響を定量的に評価し得る手法の開発は必要不可欠な要求であることが考えられるが、これについても未だ達成されてはいない。この状況を打開するには、地球生物学にて得られている最新の知見を岩盤工学分野に直接的に導入し、生物風化と力学現象とを相互補完的に捉えた学際的な研究が必要である。更に、観察に要する時間的制約や現象の複雑性を克服することを志向すると、実験や調査研究に加えて、計算科学的なアプローチが解決の鍵になると考えられる。

2. 研究の目的

報告者は、これまで高精度数値計算技術の開発や岩石の亀裂進展解析手法の開発等の研究活動を通じて、亀裂性岩石が主として力学的外乱によって崩壊する様を計算力学の

立場から解明することに取り組んできた。しかしながら、先に述べた露頭における現地調査の結果や地球生物学に関する最近の成果は、岩盤の崩壊パターンやそのメカニズムに関する問題に対して、力学的なアプローチのみで解明することは不十分であることを示している。

以上のことから、本研究では、岩石における生物風化を再現し得る数理モデル・数値シミュレータを開発し、微生物の振る舞いと岩石物性や強度等の力学的パラメータとの関連性、およびそれらが力学的崩壊に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 現地調査に基づく実態解明

八重山諸島西表島および沖縄島南端の沿岸部にある露頭を主な研究対象とし、岩盤崩落の形態観察、打撃試験、針貫入試験、pH 測定等を実施し、当該対象における岩石風化の特性を明らかにする。

(2) 室内実験に基づくメカニズム解明

現地調査より得た岩石サンプルを利用し、SEM-EDS 画像解析、粉末 X 線回折による鉱物分析等を実施し、石灰岩、砂岩における岩石風化のメカニズムを解明する。同時に、土壌サンプルを利用して簡易的な乾湿繰返し実験を実施し、岩石の亀裂パターンの再現を試みる。

(3) 数理モデル解析による現象予測

移流反応拡散方程式に基づき、岩石の風化現象を再現し得る数理モデルを構築する。そして、現地調査、室内実験より得られた各種パラメータを本モデルに導入したシミュレーションを実施する。

4. 研究成果

(1) 現地調査と室内実験に基づいた実態把握とメカニズム解明

西表島の沿岸部において、八重山層群（砂岩）表面で剥離状の風化形態を呈する露頭を発見した。岩石の剥離状風化は、一般には、乾燥収縮の繰返し作用によって生じるものとされているが、本露頭においては、剥離した岩片の下部層に多くの微生物マット層が確認された。現地調査および室内実験によって得られた知見を以下に記す。

粉末 X 線回折解析の結果、当該砂岩のピークは石英に集中していた。石英を主成分とする砂岩においては、シアノバクテリアによる生物的風化が促進されることが知られており、本岩石の剥離状風化はバクテリアを含む微生物によって引き起こされている可能性が示唆された。

走査型電子顕微鏡（SEM）による微細構造観察および元素マッピングの結果、炭素が

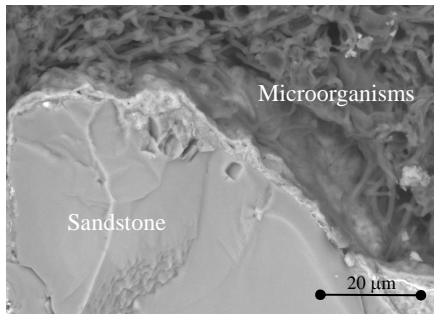


図1 剥離状風化の境界面のSEM画像

主体の微生物マット層が石英質の砂岩層を覆っている様子を捉えた(図1)。同時に、微生物マット層が石英質の岩層に向かって穿孔している様子も捉えることができた。これは、微生物が生命活動に必要な要素を求め、代謝の過程で有機酸を出しながら砂岩層に向かって選択的に移動しているものと考えられた。

一方、西表島の北端に位置する沿岸部では、海岸線に沿って第四紀琉球層群の石灰岩と非石灰質礫層からなる住吉層の琉球石灰岩と、主に砂岩からなる西表層との間で複数のブロックが柱状に形成されていた。この柱状ブロックは、上部の琉球石灰岩を支える支柱の役割を担っているが、露頭の一部では、不連続面に沿って上部の琉球石灰岩が崩落していた。本研究では、この柱状風化のメカニズムを探るべく、ブロックの微細構造解析を実施した。

図2に、SEM-EDSを用いた微細構造および元素分析の結果を示す。同図より、ブロックはケイ素、カルシウム、酸素、炭素、アルミニウムを主な構成元素としていた。また、石英粒子の間隙は方解石によって充填されている状況が確認された。EDS解析の結果より、当該試料の元素マップでは多くのアルミニウムの存在が確認され、これはアルカリ性の浸透水によってケイ素が溶脱され、そこがアルミニウムによって置換されたためと考えられた。

(2) 数理モデル解析による現象予測

琉球層群および八重山層群の風化が雨水によって促進され、それが岩石の微細構造変化をもたらすことが明らかになった。本研究では、石灰岩の雨水による風化を移流反応拡散方程式系に基づいて数理モデル化した。地質学的な時間スケールで変化する岩石風化を数理モデリングすることは、観察に要する時間的制約や現象の複雑性を克服するためには重要な技術であり、岩石風化のマルチフィジックス風化の現象理解を深めることにも繋がる。

具体的には、石灰岩の溶解現象に対して、炭酸カルシウムが炭酸水と反応し、カルシウムイオンと重炭酸イオンに分解されることを想定し、反応拡散方程式を構築した。また、地下水の流速分布については、非圧縮流れの

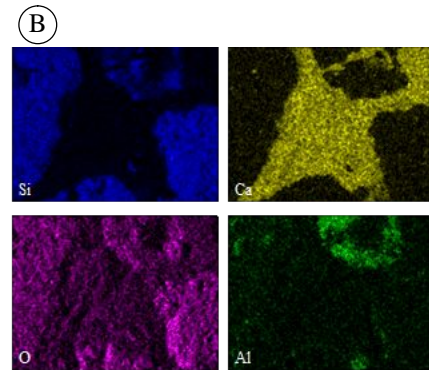
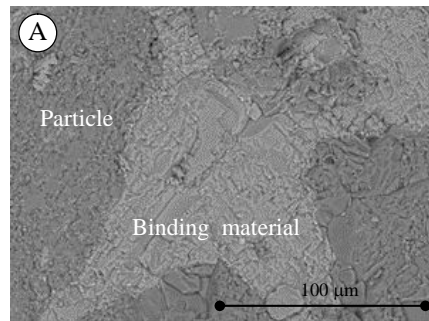
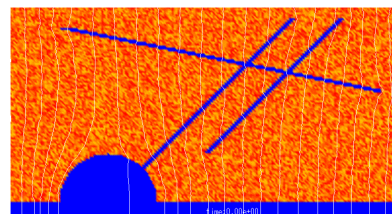
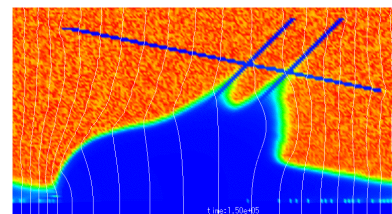


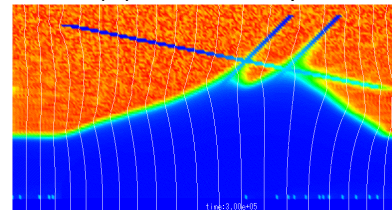
図2 柱状に風化した岩石のSEM画像。
(A) : SEM画像, (B) : 元素マッピング



(a) Initial



(b) 150000 step



(c) 300000 step

図3 石灰岩の溶解シミュレーションの例

連続の式とダルシー則から導かれるポテンシャル分布を用いて算出した。したがって、本研究で定式化した方程式は、岩石内部の化学反応と物理的な挙動を同時に解析することが可能なマルチフィジックスシステムとなる。

図3に本モデルにて再現した地下空洞形成シミュレーションの例を示す。図中のカラーグラデーションは石灰岩濃度を表しており、

赤が青に変化するにつれて石灰岩濃度が小さくなることを意味している。本シミュレーション例では、小規模な空洞と3つの亀裂を想定し、地下水は同図の左から右方向へ様に流れることを仮定している。

同図より、空洞は地下水の流れ方向に拡大し、特に亀裂に沿って深く進展していくことが分かる。亀裂の存在により、地下水の水頭分布が変化し、亀裂内部の流れが卓越し、空洞が拡大しているのである。本結果は、地盤風化の特性やメカニズムを考察する上で極めて大きな成果であると考えている。

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10件)

Hirose, K., and Matsubara, H. (2018). Mechanisms of Mudcrack Formation and Growth in Bentonite Paste. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 144(4), 04018017. (査読有)

大城勇人, 廣瀬孝三郎, 松原仁 (2017). 石灰岩の形成過程で見られる微細なネットワーク構造のSEM画像解析. 第12回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, 369-372. (査読有)

崎山浩考, 廣瀬孝三郎, 岩崎竜馬, 松原仁 (2017). 第四紀琉球層群に見られる特徴的な侵食形態とその物理学的・化学的特徴. 第12回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, 377-382. (査読有)

岩崎竜馬, 廣瀬孝三郎, 崎山浩考, 松原仁 (2017). 砂岩表面に見られる微生物による剥離状風化とその特徴. 第12回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, 383-386.

川上凌悟, 松原仁 (2017). 移流反応拡散系理論に基づいた3次元陥没孔形成シミュレータの開発. 第12回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, 477-480. (査読有)

Aydan, Ö. and Matsubara, H. (2016). The effect of biological degradation of tuffs of Cappadocia. *Rock Mechanics and Rock Engineering: From the Past to the Future*, 871-876. (査読有)

江戸孝昭, 松原仁 (2016). Material Point Methodのエネルギー振動問題に対する抑制手法の提案とその検証. *土木学会論文集中A1(構造・地震工学)*, 72, I_279-I_289. (査読有)

廣瀬孝三郎, 松原仁, 原久夫 (2016). ベントナイトペーストにおける乾燥収縮亀裂のフラクタル次元解析. *土木学会論文集中C(地盤工学)*, 72(1), 27-37. (査読有)

廣瀬孝三郎, 江戸孝昭, 玉那覇圭一, 松原仁, 原久夫 (2016). マッドペーストにおける亀裂進展シミュレーション. *計算工学論文集中*, 2016, 20160007. (査読有)

Matsubara, H. Hirose, K., Edo, T., Tamanaha, K., Hara, H. and Yamada, T. (2016).

Numerical modelling of mudcrack growth, *Japanese Geotechnical Society Special Publication (15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering)*, 1143-1147. (査読有)

[学会発表](計11件)

Hitoshi Matsubara and Ryogo Kawakami, Potential of modeling and simulation by reaction-diffusion system for geomaterials, The 1st International Workshop on Role of Microorganism and Thermo-Hydro-Chemico-Mechanical Process in Geoengineering and Geoscience, 琉球大学, 2017/3/20.

Naoya Shinzato, Ryoma Iwasaki and Hitoshi Matsubara, Evaluation of DNA extraction methods for comprehensive microbial community analysis in rock and soil samples, The 1st International Workshop on Role of Microorganism and Thermo-Hydro-Chemico-Mechanical Process in Geoengineering and Geoscience, 琉球大学, 2017/3/20.

崎山浩考, 廣瀬孝三郎, 松原仁, 第四紀琉球層群の不整合面における特徴的な浸食形態. 第6回土木学会西部支部沖縄会技術研究発表会, 琉球大学, 2017/1/17.

岩崎竜馬, 廣瀬孝三郎, 松原仁, 八重山層群に見られる剥離状風化と微生物活動の関連性. 第6回土木学会西部支部沖縄会技術研究発表会, 琉球大学, 2017/1/17.

大城勇人, 廣瀬孝三郎, 松原仁, 石灰岩のマルチフィジックス生成作用に関する一考察. 第6回土木学会西部支部沖縄会技術研究発表会, 琉球大学, 2017/1/17.

Hitoshi Matsubara, Mathematical and numerical modelling for microbial rock weathering, The 13th US National Congress on Computational Mechanics (USNCCM), サンディエゴ(米国), 2015/7/26-30.

Kosaburo Hirose, Takaaki Edo and Hitoshi Matsubara, Crack propagation simulation on mud pastes, The 13th US National Congress on Computational Mechanics (USNCCM), サンディエゴ(米国), 2015/7/26-30.

松原仁, 玄武岩質ガラスの微生物風化シミュレーション, 計算工学会講演会, つくば国際会議場, 2015/6/8-10.

崎山将, 廣瀬孝三郎, 松原仁, 粘質土壌における亀裂進展シミュレーション. 土木学会第70回年次学術講演会, 岡山大学, 2015/9/16-18.

廣瀬孝三郎, 松原仁, マッドペーストにおける乾燥収縮亀裂のフラクタル次元解析. 土木学会第70回年次学術講演会, 岡山大学, 2015/9/16-18.

廣瀬孝三郎, 松原仁, ベントナイトペーストに発生する乾燥収縮亀裂のフラクタル次元解析. 第28回沖縄地盤工学研究発表会講演会, 琉球大学, 2015/11/24.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松原 仁 (MATSUBARA, Hitoshi)
琉球大学・工学部・准教授
研究者番号：50414537

(2) 研究協力者

藍檀 オメル (AYDAN, Ömer)
琉球大学・工学部・教授
研究者番号：70194636

廣瀬 孝三郎 (HIROSE, Kosaburo)
琉球大学・工学部・技術職員

江戸 孝昭 (EDO, Taka-aki)
琉球大学大学院・理工学研究科・大学院生

岩崎 竜馬 (IWASAKI, Ryoma)
琉球大学大学院・理工学研究科・大学院生

大城 勇人 (OSHIRO, Hayato)
琉球大学大学院・理工学研究科・大学院生

川上 凌梧 (KAWAKAMI, Ryogo)
琉球大学大学院・理工学研究科・大学院生

崎山 浩考 (SAKIYAMA, Hirotaka)
琉球大学大学院・理工学研究科・大学院生

土肥 翔 (DOHI, Kakeru)
琉球大学大学院・理工学研究科・大学院生