

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 8 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K01124

研究課題名(和文)アコースティックエミッション法による岩石の熱風化機構の解明

研究課題名(英文)Elucidation of solar-induced thermal weathering process of rock using acoustic emission method

研究代表者

藁谷 哲也 (WARAGAI, Tetsuya)

日本大学・文理学部・教授

研究者番号：30201271

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：高温で温度変化の大きい砂漠では、岩石が日射によって破碎すると考えられているが、その証明は行われていない。そこで整形した3種類の岩石に4-84℃の範囲で温度変化速度を変え、加熱-冷却を繰り返す実験を行った。その結果、岩石内部における亀裂の形成や進展などの破壊に伴う弾性波(振動、音波)の発生を確認した。また、岩石内部の微小な間隙の大きさに変化の生じることがわかった。弾性波や間隙の大きさの変化は岩石の種類によって異なり、それは岩石表層の温度勾配や間隙率に関わることが推察された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

日射や熱による岩石の破碎機構は、地形学における重要課題のひとつであるが、十分な解明は進んでいない。本研究が岩石内部における弾性波の発生を実験的に捉えたことは、加熱-冷却の繰り返しに伴う微小な亀裂の形成やその伸展が熱による岩石破碎のきっかけになることを示唆する。実験に用いた3種類の岩石は、文化財の建築石材として多用されている。このため本研究の成果は、石造文化財の劣化や保全の対策を検討するうえで有効な基礎資料となるであろう。

研究成果の概要(英文)：We experimentally investigated the fracture of rock specimens based on changes in pore-size distribution, P-wave velocity, and the occurrence of acoustic emission (AE). Three rock types which are often used as stone materials were used in the experiment. We repeatedly subjected the rock specimens to changes from 4 to 84 °C using a temperature-controlled chamber at a rate from ± 4 °C/min to ± 0.5 °C/min. Consequently, the P-wave velocity decreased by approximately 5%, 28%, and 2% for the granite, marble, and sandstone, respectively. Furthermore, the pore-size distribution changed by approximately 5-6% and 16% for the granite and marble, respectively. The variation in pore size of the sandstone was negligible. The occurrence of AE was detected in all rock types, but its amplitude for the granite was the largest, followed by the marble and sandstone, respectively. Therefore, a low-temperature thermal cycle causes thermo-mechanical fracture inside rocks.

研究分野：地形学

キーワード：熱風化 日射風化 アコースティックエミッション マイクロクラック 熱破碎 熱サイクル 岩石物性 温度勾配

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

加熱・冷却に伴う岩石の膨張・収縮の繰り返しによる破碎過程は、地形学では熱風化あるいは熱破碎などと呼ばれる。とくに、岩石への加熱が日射による場合は日射風化という(松岡ほか, 2017)。熱風化のメカニズムは、熱衝撃破碎と熱疲労破碎の2つに分けられる。岩石の熱衝撃破碎は、しばしば林野火災や爆弾の爆発など、岩石が急速な温度変化を被る際に生じる。この破碎過程は実験的研究も進められ、多くの研究者は、温度変化速度(Rate of Temperature Change: RTC) $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ を閾値と考えている。すなわち、RTCが $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 以上になると岩石の熱衝撃破碎が発生するという。

熱疲労破碎は、岩石が被る温度変化は小さいものの、それによって生じたひずみ(残留ひずみ)の長期間の蓄積が、ついには岩石の破碎に進展するものである。砂漠の礫や岩塊などは長期間にわたって日射による温度変化(図1)を繰り返し受けてきたことから、岩石表面がひびや割れた岩塊は日射風化によると考えられた。しかし、岩石は熱だけで破碎しないことを実験的に示した研究や破碎には水分がかかっているとする古典的研究(Blackwelder, 1925; Griggs, 1936)が、次第に日射風化を懐疑的な風化作用であることを定着させていった。日射風化については、別の実験的研究から微量な重量損失が報告された(Aires-Barros et al., 1975; Aires-Barros, 1977)ものの、古典的研究を覆すほどのインパクトは与えなかった。このため依然として、砂漠の岩石に見られる亀裂や割れた岩塊が日射風化によると断定することについて、疑問符がつけられたままである(例えば, Goudie, 1989; Hall and Thorn, 2014)。

2. 研究の目的

近年、乾燥地域の多くの礫に発達する南北性の亀裂が、向きによる日射の受け方の差異に起因すると指摘する研究(例えば, McFadden et al., 2005)が発表された。彼らはこの亀裂を子午線亀裂(meridional cracks)と呼び、その形成には熱疲労破碎が関わっていると推測している。すなわち、長期間にわたっておもに東西方向から受け取る日射熱が、礫内部に引張応力を発生させ、子午線(南北)方向の亀裂を作ったと推察したもので、日射風化を再評価するユニークな研究である。しかしこの研究は、日射風化の可能性を指摘しただけで、単に状況証拠を示したにすぎない。日射風化の発生を直接証明するためには、 $\text{RTC} < 2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ の条件で生じる岩石の破碎をとらえることが必要である。

岩石内部に発生する亀裂を、非破壊でとらえることは難しい。そこで最近、アコースティックエミッション(acoustic emission, AE)を利用して、岩石内部における亀裂の発生をとらえた研究(Eppes et al., 2016)が発表された。AEは材料の変形や亀裂の発生に伴って生じた弾性波(振動, 音波)の放出現象である。AE法はこの弾性波をAEセンサーで検知することで材料の変形や内部の亀裂発生をとらえる手法である。このAE法は超音波を用いた岩石内部の亀裂診断とは異なり、岩石内部に発生した亀裂をリアルタイムでとらえることができるという特徴がある。このため、温度変化が進行する中で連続的なモニタリングを行えば、岩石内部の突発的な亀裂の形成やその伸展を検知できる可能性がある。すなわち、 $\text{RTC} < 2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ の条件で生じた岩石内部の亀裂をとらえることができれば、日射風化の直接的な証拠のひとつを示すことができる。そこで本研究では、AE法を利用して岩石内部に発生する微小な亀裂をとらえ、これまで100年近くにわたって疑義が持たれてきた岩石の日射風化について、室内実験と野外における実験、観測とを組み合わせる。

3. 研究の方法

AE法では、突発的に生じる波形(突発型波形)の振幅は亀裂の大きさに、持続時間は亀裂の進展時間に、そして波形の数は亀裂の数にそれぞれ対応する。そこで本研究では、1) 3種類の岩石(図2)から作成した3種類の供試体(直径 $20\text{mm} \times$ 高さ 10mm , $50\text{mm} \times 10\text{mm}$, $50\text{mm} \times 100\text{mm}$)にAE法を適用して、熱サイクルに伴う亀裂の発生をとらえる室内実験を実施した。この実験では、環境試験機を利用して $4-84^{\circ}\text{C}$ の温度範囲と加熱-冷却速度 ($4^{\circ}\text{C}/\text{min}$, $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$, $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$, $0.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$) およびサイクル数

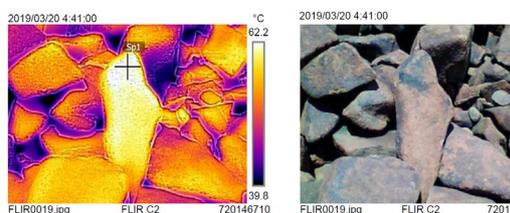


図1 オーストラリアの観測地で表面温度が 62°C に達した岩塊

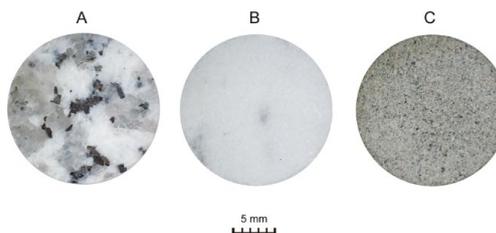


図2 実験試料とした花崗岩(A)、大理石(B)、砂岩(C)

を設定し、試験機内温度・湿度、供試体の表面温度・熱流・ひずみと岩石供試体に発生すると考えられる AE の発生をとらえることを計画した(図3)。また、熱サイクルを与える前や後の供試体(直径50mm×高さ100mm)について、超音波(P波)伝搬速度と表面の硬度測定も併せて実施した。一方、2) 熱サイクル前後の岩石内部の細孔分布の変化を調べるため、4-84℃の温度範囲を温度変化速度2℃/minで繰り返す実験を行った後に水銀圧入法による間隙径の分析を行った。3) 野外における実験、観測では、岩石供試体と露出岩塊を対象に表面温度の計測と同時にAE法によるAEモニタリングを行った。

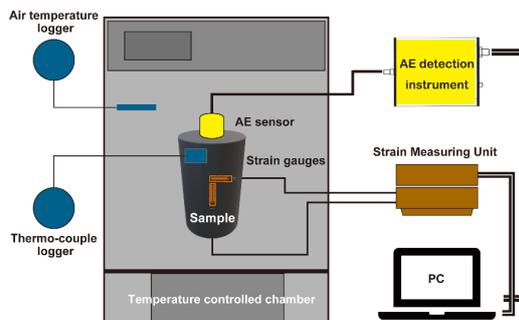


図3 AE、ひずみ、表面温度などを計測する実験システムの概念図

室内実験の試料として茨城県産花崗岩、イタリア産結晶質石灰岩(大理石)、カンボジア産砂岩を選定した(図2)。既往研究から、これらの岩石は、比較的熱膨張係数(20-100℃の範囲で $8-10 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)が大きいことがわかっている。また、これらは広く建築石材として多用されており、とくに大理石はイタリアの石造文化財、砂岩はカンボジアのアンコール遺跡で使われる主要石材である。

野外実験、観測は、室内実験と同じ岩型による供試体を気温変化の大きいカンボジア・シムリアップ(Siem Reap)とオーストラリア・カラサ(Karratha)の野外に暴露してAEと表面温度を計測した。これら対象地の選定理由として、シムリアップには9世紀以降おもに砂岩材で建築されたアンコール遺跡が多くあり、とくに石材は乾季(12月~3月)に強い日射に曝されている。このため一部の研究者は、砂岩材の風化原因を日射風化に求めるものがあるためである。一方、オーストラリア北西に位置するカラサでは、年降水量が296mmと寡少で、日最高気温48.2℃(2003年1月21日)、日最低気温6.9℃(2006年7月19日)、年較差41.3℃を記録した乾燥地である。この気候環境の下で岩石表面には砂漠ワニスが発達し、先住民族の岩絵が数多く残されている。岩絵はそれが多く分布するMurujuga National Parkでは保護されているが、岩塊表層には剥離などの風化形態が認められ、日射風化が期待される。これら野外実験にあたり、カンボジアではユネスコ世界遺産のアンコール遺跡を管理するアプサラ機構(the Authority for the Protection and Safeguarding of Angkor and the Region of Angkor; <http://angkor.com.kh/discover/history/apsara-authority/>), オーストラリアでは岩絵などの管理にあたるMurujuga Aboriginal Corporation (<https://www.murujuga.org.au/>)にそれぞれ許可を取り研究を進めた。

4. 研究成果

(1) 研究の主な成果

室内実験の結果、供試体におけるAEの発生は、すべての実験条件のもとで認めることができた(図4)。また、4サイクル後の供試体のP波伝播速度はいずれの岩型でも減少した(図5)。供試体には目視によるダメージは観察されないものの、加熱・冷却の熱サイクルによって、供試体内部に亀裂が生じたことを裏付けている。しかし、AEの大きさ(1/100秒間の最大振幅値, mV)と頻度は岩型や供試体の大きさによって異なった(図4)。例えば、AEの大きさは花崗岩(間隙率0.64%)に最大で、大理石(2.2%)や砂岩(14%)で小さい。これは岩石の間隙率、鉱物組成、構成鉱物の熱膨張率の異方性に由来すると推察される。とくに岩石の間隙率は、鉱物粒界に発生する熱応力の大きさを左右すると考えられ、間隙率が低ければ、鉱物粒界での破碎は生じやすく、これがAEの大きさの差に現れたと推察される。一方、実験結果には、供試体の大きさによっても、AEの大きさと頻度に差の生じる傾向が認められた。これは、供試体の温度分布の均一性(供試体表面の受熱面から内部への温度勾配の大きさ)がAEの発生、すなわち熱による岩石内部における亀裂の発生に関わっていることを示すものであると考えられる。熱サイクルに伴う岩石の破碎は、岩型の熱物性に由来して表面部に形成され

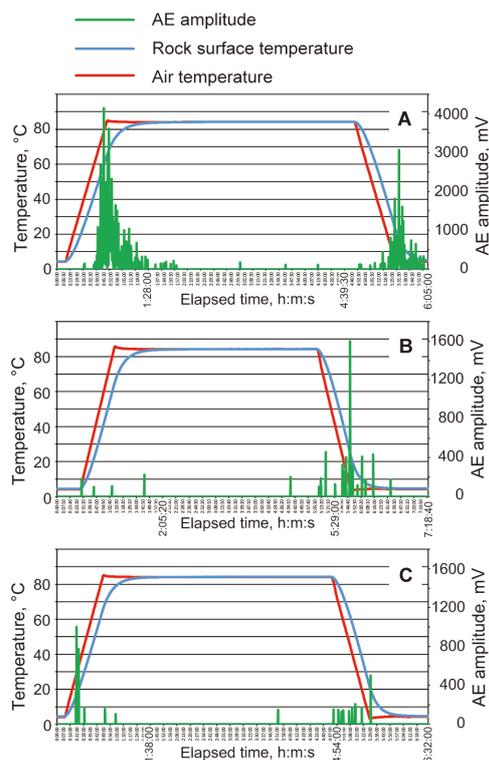


図4 花崗岩、大理石、砂岩供試体のAEと温度変化

る温度勾配に関わっていると解釈することができる。

熱サイクル実験前後の細孔分布の変化については、花崗岩の場合とくに間隙径が $0.8\text{--}0.5\ \mu\text{m}$ の範囲で約 6% 減少し、 $0.4\text{--}0.1\ \mu\text{m}$ で約 5% 増加した (図 6)。これに対して、大理石ではとくに間隙径が $0.5\text{--}0.1\ \mu\text{m}$ の範囲で約 16% 減少して、 $6\text{--}0.65\ \mu\text{m}$ で約 16% 増加した。一方、砂岩では間隙径の変化は小さく、その変化はほとんどなかったと考えられる。これらの結果は、岩型によって細孔分布の変化傾向は異なるものの、比較的間隙率の小さい岩型に細孔分布の変化が生じていることを示す。間隙率のもっとも小さい花崗岩 (間隙比 0.64%) では、鉱物粒界は緊密に接しているが、熱サイクルによって粒界や鉱物粒にマイクロクラックが形成され、より小さい細孔の割合が増加したと考えられる。これに対して大理石 (間隙比 2.2%) では、熱サイクル前から鉱物粒界に存在する間隙同士が、熱サイクルによって連結したことにより、より大きい間隙径へと変化したものと思われる。砂岩 (間隙率 14%) では、他の 2 種類の岩石に比べて間隙が大きく、熱サイクルに伴う鉱物粒の膨張・収縮を吸収するため、細孔分布の変化はほとんど生じなかった。

これら室内実験を通じて、1) 熱サイクルは鉱物粒界に微小な亀裂を生みだして AE を発生させ、細孔分布に変化をもたらしている、2) 岩石内部の亀裂形成を含めた岩石の熱破砕は表層温度勾配が大きいほど生じやすいが、3) 間隙率の大きい岩型では大きい温度勾配が生じていても鉱物粒界での亀裂は生じにくい、と考えられる。

カンボジアとオーストラリアにおける野外実験、野外観測は、短期・長期を合わせて 11 回実施した。この結果、カンボジアでは乾季の 12 月に砂岩供試体で最高表面温度 51.1°C 、温度上昇速度 $1.50^\circ\text{C}/\text{min}$ 、温度降下速度 $1.88^\circ\text{C}/\text{min}$ を記録した。同じ環境に暴露した花崗岩ではそれぞれ 47.9°C 、 $1.45^\circ\text{C}/\text{min}$ 、 $1.31^\circ\text{C}/\text{min}$ を記録し、砂岩のそれらより小さくなった。岩石表面温度の差異には、岩石のアルベドが関わっていると考えられる。一方、AE についてはその発生を捉えることはできなかった。

オーストラリアにおける野外実験では、砂岩供試体で最高表面温度 65.9°C 、温度上昇速度 $1.08^\circ\text{C}/\text{min}$ 、温度降下速度 $1.14^\circ\text{C}/\text{min}$ の最大値を記録した。また、長径約 1m の岩塊の表面 (天頂, 北向き, 西向き), および亀裂部にシート状の T 型温度センサーを貼り付けた温度観測も実施した (図 7)。その結果、岩塊表面の最高温度は天頂方向で 60.2°C が記録され、北向き (57.7°C)、西向き (56.5°C)、亀裂部 (56.4°C) の順で小さくなった。また、観測期間 (2020 年 3 月-2021 年 2 月) における岩塊表面温度の温度差は最大で約 47°C に達した。観測は 1 年に達しなかったが、この温度差は岩塊表面温度の年較差と考えることができる。一方、岩塊表面の温度上昇速度は、亀裂部に最大で $1.8^\circ\text{C}/\text{min}$ が記録され、天頂 (1.6)、西向き (1.4)、北向き (1.2) の順で低下した。温度降下速度についても、亀裂部に最大で $2.0^\circ\text{C}/\text{min}$ が記録され、北向き、天頂、西向きは $1.2^\circ\text{C}/\text{min}$ であった。このように、オーストラリアでも日射による岩石表面の温度変化速度は $2^\circ\text{C}/\text{min}$ に達したが、AE の発生を捉えることはできなかった。

(2) 得られた成果の国内外における位置づけとインパクト

既往研究から、多くの研究者は岩石の熱破砕にかかわる閾値として、温度変化速度 (RTC) $2^\circ\text{C}/\text{min}$ に注目してきた。すなわち、RTC が $2^\circ\text{C}/\text{min}$ 以上になると岩石の熱衝撃破砕が発生するという。本研究による野外観測の結果から、この RTC の閾値は日射によって生じる岩石表面の温度変化速度の上限値であると考えられる。日射による温度変化速度は、この RTC を超えることはほとんど稀であるかもしれない。すなわち、日射による岩石の熱破砕は

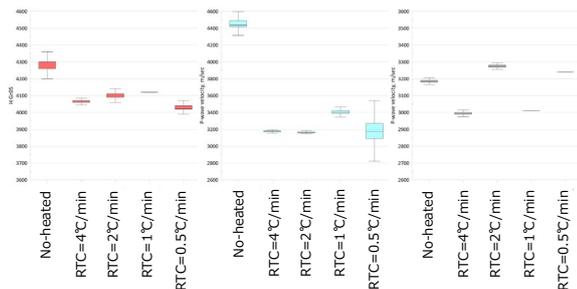


図 5 未加熱処理および 4 種類の温度変化速度で処理した後の P 波伝播速度のボックスプロット

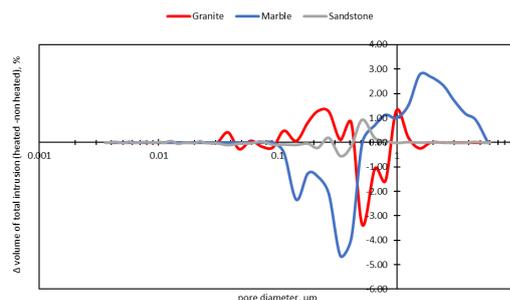


図 6 熱サイクル後の 3 種類の岩石の細孔分布の変化 (熱サイクル後-熱サイクル前)

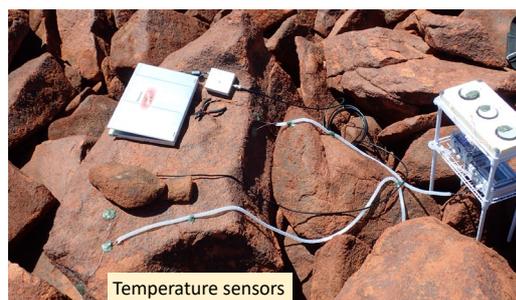


図 7 オーストラリア観測地における観測状況

熱疲労破碎に由来すると理解できる。一方、室内実験から明らかなように RTC が閾値以下であっても岩石には AE が発生し、P 波伝播速度の低下が認められた (図 5)。また、室内実験の結果は岩石内部の微小な亀裂形成に RTC よりも岩石表層の温度勾配の重要性が示された。これらは岩石の熱疲労破碎は、岩石表層の温度勾配に基づいて鉱物粒界における微小亀裂の形成から進展する可能性を示唆するものである。これら得られた成果は、とくに低温の熱サイクルでも岩石内部に微小亀裂が生じることを示すもので、研究成果欄に挙げるように国内外の学会において公表した。近年、熱風化を研究対象に取り上げる研究者は多くはないため、研究成果の浸透を通じて RTC の閾値の意味、低温熱サイクルによる岩石の熱風化プロセスの詳細についての理解が深まると期待される。

(3) 今後の展望

岩石供試体を用いた室内実験では、P 波伝播速度と表面硬度の計測を熱サイクルが 112 サイクルまで行っている。これまでの結果によると、花崗岩と大理石では P 波伝播速度が、それぞれ 23.5%、26.6% 増加する傾向が認められた。また、砂岩でも 7.6% の増加が認められた (図 8)。一方、112 サイクル後の表面硬度については、初期値に比べてほとんど変化は生じていない。当初、岩石の P 波伝播速度は熱サイクルの増加に伴って低下する、すなわち岩石の強度低下を引き起こすと推測していた。しかし、実験の結果はこの仮説とは異なり、強度が増加したことを示している。

金属加工分野では、鋼材の熱処理 (焼き入れ) によって、鋼が硬化することは知られており、焼きなまし効果と呼ばれて金属製品の性質改善に利用されている。岩石の焼きなまし効果についてはほとんど研究事例を聞かないが、日射による低温熱サイクル下の岩石でも同様の効果が生じるかについて、今後検討していきたい。

野外実験、野外観測では供試体の場合、最大で 2°C/min の温度変化速度を被ったが、明瞭な AE 信号をとらえることはできなかった。その理由として、野外における最大温度変化速度の発生頻度が室内実験のそれより低いことが推察されるが、その観測も課題として残された。また、露岩を対象とした AE 観測では短期観測しか行えず、明確な AE の発生も確認できなかった。その理由として AE センサーを含むデータ記録システムの電源供給や耐候性、センサーの設置個数や固定法などに問題があった。これらも今後解決すべき課題といえる。これら課題の克服を通じて、今後はおもに野外における露岩の熱破碎を直接観測することを目指したい。

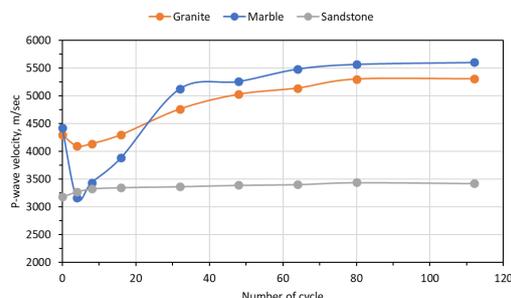


図 8 熱サイクルによる P 波伝播速度の変化

<引用文献>

- ① Aires-Barros, L. (1977) Experiments on thermal fatigue of non-igneous rocks. *Engineering Geology*, 11, 227-238.
- ② Aires-Barros, L., Graça, R.C. and Velez, A. (1975) Dry and wet laboratory tests and thermal fatigue of rocks. *Engineering Geology*, 9, 249-265.
- ③ Blackwelder, E. (1925) Exfoliation as a phase of rock weathering. *Journal of Geology*, 33, 793-806.
- ④ Eppes, M.C., Magi, B., Hallet, B., Delmelle, E., Mackenzie-Helwein, P., Warren, K. and Swami, S. (2016) Deciphering the role of solar-induced thermal stresses in rock weathering. *Geological Society of America Bulletin*, 128, 1315-1338.
- ⑤ Goudie, A.S. (1989) Weathering processes. in *Arid Zone Geomorphology* edited by Thomas, D.S.G., Belhaven, 11-24.
- ⑥ Griggs, D.T. (1936) The factor of fatigue in rock exfoliation. *Journal of Geology*, 44, 783-796.
- ⑦ Hall, K. and Thorn, C.E. (2014) Thermal fatigue and thermal shock in bedrock: An attempt to unravel the geomorphic processes and products. *Geomorphology*, 206, 1-13.
- ⑧ 松岡憲知・藁谷哲也・若狭 幸 (2017) 岩石の物理的風化—実験・観測・自然現象のリンク—。 *地学雑誌*, 126, 369-405.
- ⑨ McFadden, L.D., Eppes, M.C., Gillespie, A.R. and Hallet, B. (2005) Physical weathering in arid landscapes due to diurnal variation in the direction of solar heating. *Geological Society of America Bulletin*, 117, 161-173.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Tetsuya Waragai	4. 巻 128
2. 論文標題 Characteristics of Block Slope in the Burrup Peninsula Landscape	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Geography (Chigaku Zasshi)	6. 最初と最後の頁 Cover06_01 ~ 02
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5026/jgeography.128.Cover06_01	査読の有無 無
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 Tetsuya Waragai, Yusuke Hiki	4. 巻 6
2. 論文標題 Influence of microclimate on the directional dependence of sandstone pillar weathering in Angkor Wat temple, Cambodia	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Progress in Earth and Planetary Science	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) 10.1186/s40645-019-0254-5	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 藁谷哲也	4. 巻 103
2. 論文標題 石材を利用した風化プロセスによる地形変化速度の推定 オーストラリア・ノビーズ岬における砂岩材の穿孔風化を対象として	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 桜門論叢	6. 最初と最後の頁 27-37
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 -

1. 著者名 藁谷哲也	4. 巻 56
2. 論文標題 岩石の熱破砕に関わる温度勾配の効果 アコースティックエミッション法を利用した熱風化実験からのアプローチ	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本大学文理学部自然科学研究所研究紀要	6. 最初と最後の頁 1-9
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8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Tetsuya Waragai
2. 発表標題 Measurements of thermic damage of Angkor dimension sandstone used for World Heritage temples.
3. 学会等名 IAG Regional conference on geomorphology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tetsuya Waragai
2. 発表標題 Possibility of insolation weathering of sandstone blocks composing Angkor temples, Cambodia.
3. 学会等名 The Japan Geoscience Union Annual Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takato Takemura, Tetsuya Waragai
2. 発表標題 Effect of stress concentration on the Weathering Mechanism of Sandstone Pillars of Angkor Wat, Cambodia by means of numerical simulation
3. 学会等名 The Japan Geoscience Union Annual Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 志田清佳・梶山貴弘・藁谷哲也
2. 発表標題 衛星画像を用いたカンボジア・クーレン山における森林伐採と農地転用
3. 学会等名 日本地理学会春季学術大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tetsuya Waragai, Yusuke Hiki
2. 発表標題 Direction dependence of hollows formed on sandstone pillars at Angkor Wat temple, Cambodia
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tetsuya Waragai
2. 発表標題 Detection of microcracks in rock specimens due to thermal changes using the acoustic emission method
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藁谷哲也
2. 発表標題 低温熱サイクルを被る岩石供試体のAEモニタリング
3. 学会等名 日本地形学連合2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tetsuya Waragai
2. 発表標題 Changes in pore-size distribution of rocks induced by thermal cycles of low temperature
3. 学会等名 The Japan Geoscience Union Annual Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計3件

1. 著者名 Tetsuya Waragai	4. 発行年 2020年
2. 出版社 Faculty of Geology and Geoenvironment, National and Kapodistrian University of Athens, Greece	5. 総ページ数 267
3. 書名 Measurements of thermic damage of Angkor dimension sandstone used for World Heritage temples. In: Abstract book of IAG Regional Conference 2019, Geomorphology of Climatically and Tectonically Sensitive Areas	

1. 著者名 Tetsuya Waragai	4. 発行年 2020年
2. 出版社 Mitteldeutscher Verlag	5. 総ページ数 1232
3. 書名 Acoustic emission behavior of rocks subjected to temperature changes. In: Siegesmund, S. & Middendorf, B. (eds.): Monument Future: Decay and Conservation of Stone.	

1. 著者名 藁谷哲也	4. 発行年 2019年
2. 出版社 文真堂	5. 総ページ数 209
3. 書名 カンボジア研究 - その自然・文化・社会・政治・経済 -	

〔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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------