

大谷石と大谷石類似石の強度発現の 差異に関する検討

島田 大輔^{1*}・坂田 裕樹²・清木 隆文¹

¹宇都宮大学大学院 (〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東7-1-2)

²(株)草津ナウリゾートホテル (〒377-1711 群馬県吾妻郡草津町大字草津750)

*E-mail: mt126430@cc.utsunomiya-u.ac.jp

大谷石は、栃木県宇都宮市で産出される石材として、耐震性、耐火性に優れていることから建築材料など様々な用途に利用されてきた。硬岩と比較しても岩質が軟らかく、加工がしやすい一方で、風化の進行が早いこと、強度低下や変色、岩石表面の欠落が多く見られる。また、栃木県内において、大谷石の類似石である深岩石、田下石、芦野石等も石材として採掘後、利用されている。これらの石については既往の研究より、各岩石について構成鉱物の種類や含有率の違いが明らかになっている。そこで本研究では各岩石において、強度測定や構成鉱物の把握など岩石に対して様々な視点から検討を行い、構造と強度発現の関連性について考察を行った。

Key Words : Oya tuff, similar stone material, constituent minerals, threshold strength, SEM

1. はじめに

栃木県宇都宮市北西部に位置する大谷地区は代表的な堆積軟岩である大谷石(軽石火山礫凝灰岩)の産地である。また、栃木県内において、大谷石の類似石である深岩石、田下石、芦野石等も石材として採掘・利用されている¹⁾。大谷石は地質学的に、軽石火山礫凝灰岩に分類され、深岩石、田下石も同様の凝灰岩。芦野石は石英安山岩質溶結凝灰岩である。

これまでに大谷石と大谷石類似石について、その工学的性質を調べる様々な研究が行われてきた。既往の研究より、各岩石は同じような種類の鉱物によって構成されていることが分かっている^{2,3)}。このような状況であるにも関わらず、大谷石と類似石の各岩石では強度特性にそれぞれ違いがある。そこで本研究では各岩石において、様々な試験を行い、それらの構成鉱物と一軸圧縮強さの間に関連性を見出し、強度の発現のメカニズムを探ることを目的とする。

2. 研究手順

(1) 本研究で対象とした試験試料について

大谷石は、凝灰岩の一種であり、耐震性、耐火性に優

れていることと加工の容易さから様々な用途に使われている。しかし風化の進行が早いこと、それに伴う強度の低下や岩石表面の剥落が生じてしまう。深岩石は、大谷石と見た目が似ているため、大谷石として流通することもあるが、緻密で吸水率が低い、圧縮強度が高いといった特徴を有している³⁾。深岩石には青目と白目があり、採掘される場所によってその色が異なる。田下石は、大谷石の細目に分類される石材で大谷石よりもきめが細かいという特徴がある⁴⁾。芦野石は、準硬岩であるため、ある程度の強度は持ちつつも加工が容易で、古くから石材として利用されてきた⁵⁾。

(2) 試験方法の概要

各岩石に対し針貫入試験を行い、換算一軸圧縮強さを求めた。さらに SEM(走査型電子顕微鏡)を用いて各岩石を高倍率で観察し、表面の構造の形状や元素分布を確認。EDX(エネルギー分散型X線分析装置)やXRD(X線粉末回折装置)によって定量定性分析を行った。

これらの試験に使用した岩石はいずれも、直射日光や雨に当たらない屋内で保管されているもので、自然乾燥状態にあるものである。電子顕微鏡で観察するにあたっては出来る限り自然にも存在しうる状態の岩石表面を観察するため、カッター等での切断面ではなく、力を加えて引き剥がされた面を選択し、観察した。

3. 観察・試験結果

(1) X線粉末回折試験の結果

XRDの結果、各岩石を構成する主要鉱物が抽出された(表-1)。これらの岩石はQuartz(石英)を含んでおり、芦野石、田下石、深岩石、大谷石の順でピークの回折強度が高い傾向がある。田下石からはピークは小さいもののMordenite(モルデン沸石)が、芦野石からはCristobalite(クリストバル石)がそれぞれ確認された。

(2) EDXによる元素分析

表-2にEDXによる元素分析結果を示す。Si(ケイ素)が大谷石では81.23 %、深岩石の青目では77.22 %、白目では72.71 %、田下石では64.50 %、芦野石では71.75 %と、全ての岩石試料においてSiが最も高い割合で検出された。XRDによる結果で、Siを化学式に含む鉱物が主要鉱物として同定されたことと関連がある。また、田下石でのみMg(マグネシウム)の存在が確認され、Fe(鉄)の割合も9.96 %と、他の試料と比較すると高く、特徴的な結果を示している。芦野石においても、Feは6.30 %の割合で含まれていた。深岩石(白目)でK(カリウム)が9.76 %と青目と比較して高い値を示していたが、全体としてNa(ナトリウム)、Al(アルミニウム)、Ca(カルシウム)等のそれ以外の元素は種類、含有率ともに試料全体を通して似た傾向を持つ。

表-1 各岩石の主な含有鉱物

	鉱物名		
大谷石	Clinoptilolite	Quartz	
深岩石(青目)	Clinoptilolite	Quartz	Albite
深岩石(白目)	Clinoptilolite	Quartz	Albite
田下石	Mordenite	Quartz	Albite
芦野石	Cristobalite	Quartz	Albite

(3) 針貫入試験の試験結果

表-3に各岩石試料について行った針貫入試験の結果と物理特性を示す。測定は鉱物や岩片、ミソを避けた基質部分に対し各岩石25ヶ所実施し、極端に外れた値をしめす値を予め避けるために、最大値および最小値から3点ずつを取り除いた、計19ヶ所の測定値の平均を岩石の換算一軸圧縮強さとした。それぞれの結果における換算一軸圧縮強さのバラつき具合を評価するために、変動率(標準偏差/平均値)も算出した。

芦野石が最も強度が高く、次いで深岩石の青目と白目、田下石がほぼ同値を示し、今回の試料の中では大谷石が最も強度の低い岩石という結果となった。変動率を見ると、大谷石と深岩石(青目)の値が他に比べて大きいことが目立つ。そこで、さらに大谷石に着目し、針貫入試験機によって貫入量の小さい部分(岩石として強い部分)と貫入量の大きい部分(弱い部分)を区別し、その強度に差が生じる要因を探った。

換算一軸圧縮強さと有効間隙率、乾燥密度を比較すると、間隙率が大きくなるに従って一軸圧縮強さが小さくなり、また乾燥密度が高くなるに従い一軸圧縮強さも大きくなるという関係を見出すことができる。このことから、各岩石において間隙率や密度といった物理特性は、強度に直接関係することが裏付けられる。

表-2 各岩石の定量分析結果(%)

	大谷石	深岩石 (青目)	深岩石 (白目)	田下石	芦野石
Na	2.51	1.94	1.32	3.57	4.17
Mg	—	—	—	3.83	—
Al	10.57	11.18	12.25	14.35	12.14
Si	81.23	77.22	72.71	64.50	71.75
K	3.71	5.73	9.76	2.12	1.96
Ca	0.98	1.82	1.88	1.68	3.67
Fe	1.01	2.11	2.07	9.96	6.30

表-3 各岩石の物理特性値

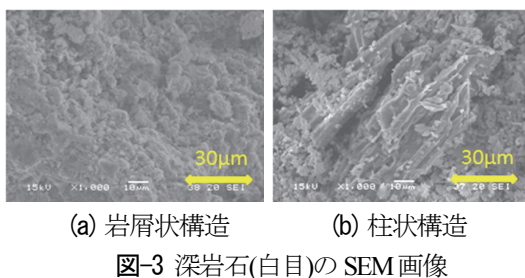
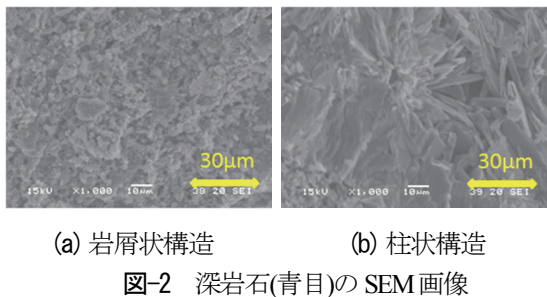
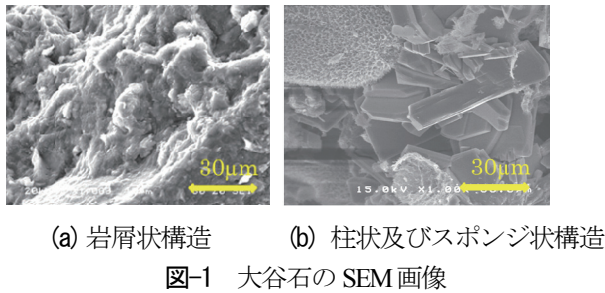
特性値 岩石名	換算一軸圧縮強さ (MPa)	標準偏差	変動率	乾燥密度 (g/cm ³) ⁴⁾	有効間隙率 (%) ⁴⁾
大谷石	1.36	0.53	0.387	1.36	36.91
深岩石(青目)	3.17	1.07	0.337	1.66	25.50
深岩石(白目)	3.25	0.66	0.202	1.63	26.56
田下石	3.29	0.54	0.165	1.68	24.89
芦野石 ⁴⁾	5.61 ¹⁾	1.30	0.232	2.00	18.46

(4) SEMによる観察結果

SEMにより試料を高倍率で観察した結果、各岩石からそれぞれ特徴的な結晶構造を確認することができ、本研究ではそれらを5種類の構造に分類し、結果を考察した。表-4に各岩石試料における構造の構成比を示す。構成比は岩石のSEM画像から各構造の割合を求めて総数で除して算出した。また、各岩石試料表面の主な構造をSEM画像でそれぞれ図-1～5に示す。

岩屑状構造は全ての岩石において高い割合で存在しており、岩石の構成に関し、主要な構造であることが分かる。深岩石では、岩屑状に次いで柱状構造が広く分布していた。このことは他の岩石からは確認できなかったもので、柱状構造の存在を深岩石の特徴として捉えることができる。平滑構造は深岩石(青目)で12.4 %、芦野石で34.8 %の割合で存在しているが、他の岩石では5 %前後とその割合は小さいことから、こちらも柱状構造と同様に平滑構造の存在を芦野石の特徴として捉えることができる。深岩石の青目と白目で構造の割合に差異があるものの、全体の傾向として同一種類の岩石であることを示す結果になっていると言える。繊維状構造は田下石で26.5 %、スポンジ状構造は田下石で35.8 %、芦野石で34.6 %存在が確認され、岩石毎の特徴が明確に現れた。

4. 試験結果と観察についての考察



(1) 各岩石試料の構造についての考察

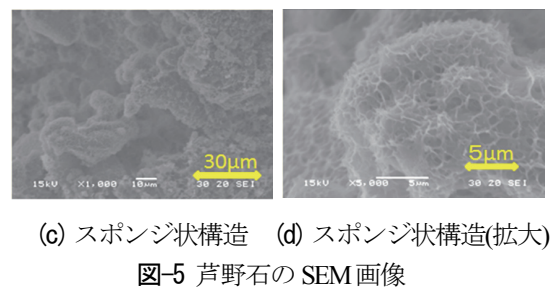
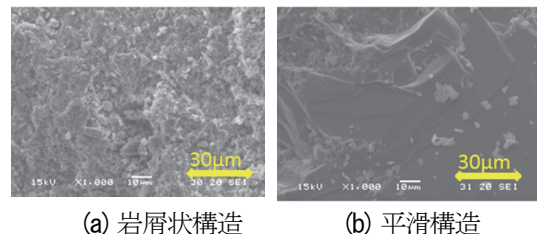
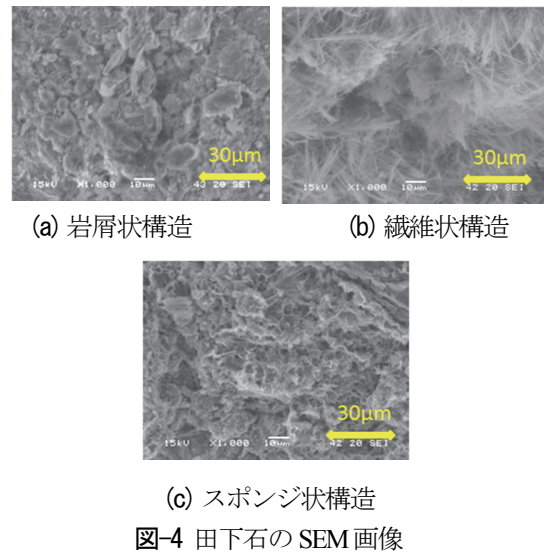
a) 大谷石

大谷石は岩屑状構造(図-1(a))が基質部分の83 %と大部分を占めており、また基質部分における一軸圧縮強さが1.36 MPaと対象試料の中で最も低い。そして他の岩石が岩屑状構造の占める割合が低くなるに伴い一軸圧縮強さが高くなっていくことから、岩屑状構造は互いの結びつきが弱い構造で、基質部分の強度は岩屑状構造の割合に依存するものと考えられる。

EDX による定量分析の結果(表-2)を整理すると、元素分析の結果から、岩屑状構造において Si の 81.23 %に次いで、Al が 10.57 %と多く分布していることが確認された。Na, K, Ca, Fe はいずれも 5 %以下の、低い値での検出である。Clinoptilolite(単斜プチロル沸石)の化学式

表-4 各岩石で確認された微視的構造と構成比(%)

岩石名	構造	岩屑状	柱状	平滑	繊維状	スポンジ状
大谷石 ^{a)}		83.0	5.4	3.4	0.0	8.2
深岩石(青目)		60.2	23.2	12.4	2.4	1.8
深岩石(白目)		45.0	37.7	5.6	10.7	1.0
田下石		31.7	0.5	5.5	26.5	35.8
芦野石		30.3	0.0	34.8	0.3	34.6



は $(\text{Na,K})_6(\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{22}) \cdot 20\text{H}_2\text{O}$ であり、組成に必要な元素および元素数濃度を満足している。同様に、Quartz (SiO_2) が Si を含むために、主要鉱物である可能性も考えられるが、後述する Quartz の強度特性が岩屑状構造のそれとは一致しないため、沸石特有の空隙を多く含み、強度的には低いと考えられる Clinoptilolite であると判断した。このことは他の岩石の岩屑状においても言える。

b) 深岩石

深岩石は柱状構造が青目で23.2 %、白目で37.7 % (表-4) 確認された。図-2 (b)、図-3 (b) に示すSEMの観察結果から、大部分の柱状構造が一本の帯を形成するようにまとまって存在している様子が確認できた。この柱状構造が成す帯は縦横様々な方向に向かって伸びていたほか、帯に取り込まれず単独で存在していた柱状構造も確認でき、これらの構造は岩屑状構造の中において繊維補強としての機能を果たしていると考えられる。このことによって強度が増加し、類似した石材としてよく比較される大谷石よりも高い一軸圧縮強さを発揮するのではと推測する。針貫入試験結果の変動率 (表-3) は青目が0.337、白目が0.202とバラつき具合に差が生じているが、これは青目の方が、間隙部分が少なく構造的に強いと考えられる平滑構造の割合が高いため、局所的に一軸圧縮強さが高い部分が多く存在することに加え、弱い構造と位置付けている岩屑状の割合も高いことから、その差が大きく表れたと考えられる。

c) 田下石

田下石は、岩屑状構造 (図-4 (a)) と繊維状構造 (図-4 (b))、スポンジ状構造 (図-4 (c)) で表面の90 %以上が構成されており、それぞれの構造が集合し、まとまりを持っていた。XRDにより、Mordeniteが検出された (図-6)。その結晶とSEMにより撮影した田下石の繊維状構造と同等の倍率で比較すると、視覚的な特徴が酷似しているため、田下石の繊維状構造はMordeniteによる結晶である可能性が高い。その繊維状のほかに岩屑状とスポンジ状の構造が多くを占めたが、一軸圧縮強さが3.29MPaと大谷石より大きく、深岩石と同程度の値を示したことを考えると、繊維状の構造は相対的に強い構造と考えることができる。

d) 芦野石

芦野石は、主にQuartz, Albite, Cristobaliteから構成されており、強度の視点から弱いと考えられるClinoptiloliteを含んでおらず、かつ内部の構造自体も空隙を含まない平滑構造が34.8 % (表-4) を占め、また、図-5 (c)、図-5 (d) に示したスポンジ状の構造も他の岩石と比べ、間隙の目が非常に細かいことから、非常に緻密な基質部分を有する岩石であることがわかる。針貫入試験結果の変動率も0.232と比較的小さな値に収まっており、比較的バラつきが小さい構造と強度を持つ岩石であると

表-5 平滑構造の定量分析結果

	芦野石：平滑構造
Na	2.99
Mg	—
Al	9.49
Si	80.66
K	0.11
Ca	4.73
Fe	2.02

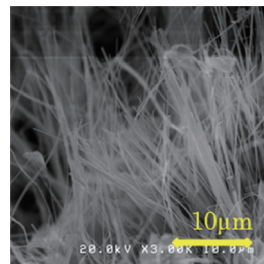


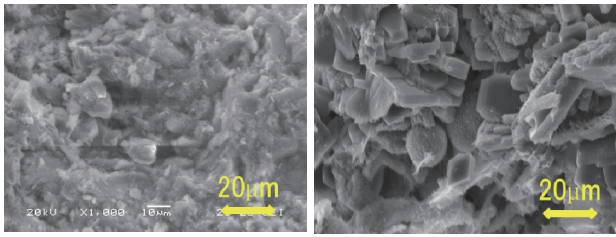
図-6 Mordeniteの繊維状結晶のSEM画像

言える。針貫入試験を行う際も針が非常に刺さりにくい感覚があり、針を岩石試料に刺す際の手応えからも、非常に結び付きの強い構造を有していることが確認できた。平滑、または目の細かいスポンジ状構造がその強度を発揮していると考えられる。表-5は芦野石の平滑構造に対して行った定量分析の結果である。これを見るとSiが80.66 %と大部分を占め、この元素が分布している場所は平滑構造部分に集中していた。このことから平滑構造は、QuartzまたはCristobaliteの結晶によって構成されている可能性が高い。また他の岩石が平滑な構造をほとんど有さないことから、Cristobaliteの結晶と考えられる。

(2) 大谷石の表面についての考察

針貫入試験において分類した強い部分と弱い部分をそれぞれ抽出すると、強い部分は白色を、弱い部分は緑色を呈していることが確認された。そこで、色別に一軸圧縮強さを測定すると、白色部分は1.95 MPa、緑色部分は1.42 MPaであり、その色と強度の特徴が一致している。また図-7 (a)、図-7 (b) に示すSEMの観察より、白色部分は岩屑状を中心に、柱状、平滑、繊維状の各種構造が確認されたが、緑色部分は大部分を柱状構造が占めていた。その柱状構造は粒状の付着物を伴って、まとまって存在しており、所々に間隙が見られた。大谷石表面で見られた緑色部分の朽ちた場所というのは、柱状構造の集合体と関係があると思われる。

白色部分と比較して緑色部分の方は強度が低いことから、緑色部分を構成する柱状構造が構造的に弱いものであると考えられるが、それでは深岩石における柱状構造の働きと矛盾が生じる。柱状の結晶自体は強度が高いが、



(a) 岩屑状構造(白色部分) (b) 柱状構造(緑色部分)

図-7 大谷石表面のSEM画像

それらが単体で集合しても接着面が小さく、外部からの力で簡単に剥がれてしまうので、その間隙部分を埋める役割を果たす岩屑状構造と共に存在することで強度を発揮することができるためであると考えられる。

5. まとめ及び今後の課題

(1) まとめ

大谷石と大谷石類似石内部は、岩屑、柱状、平滑、繊維状、スポンジ状等の様々な形状の構造により構成されており、各岩石によりその構成の割合は異なる。

岩屑状構造は今回試料とした全ての岩石の中において主となる構造であり、大谷石、深岩石(青目)、深岩石(白目)、田下石、芦野石の順で割合が高い。基質部分の強度もその順で高くなり、このことから岩屑状構造は今回確認された中では相対的に弱い構造に位置づけられると考えられる。柱状構造は、岩屑状構造内に取り込まれる形でより多く存在するほど強度を高める働きをすると結論付けた。これは、元素の含有量や岩石を構成する主要な鉱物、顕微鏡で確認された構造の様子等、特徴がほぼ変わらない大谷石と深岩石において顕著に表れた大きな差がこの柱状構造の占める割合であるからである。まとまる力の弱い岩屑状構造の中で、柱の形をした結晶が繊維補強材としての役割を果たし、岩石を強く結び付けていると考える。深岩石はこの柱状構造による影響で、岩屑状構造が83.0 %を占める大谷石よりも強度が高いと思われる。また、岩屑状構造と柱状構造はClinoptiloliteの結晶を主として構成されていると考えられる。

平滑構造は、観察により間隙部分が見受けられず、さらに一軸圧縮強さが最も高い芦野石において高い割合で存在していたことから考えると、相対的に構造上強いものであると考えられる。岩屑状内の柱状構造と同じく、その割合が高いほどに岩石基質部分の一軸圧縮強さを高めるが、こちらは単体で強度を発揮する。

田下石に多く見られた繊維状構造は、Mordeniteの結晶であるという可能性を示すことができた。強度を低くする構造と位置付けた岩屑状、スポンジ状の構造が全体の67 %を占めながら、3.29 MPaと深岩石と同等の強度を示

す田下石において、26.5 %存在する繊維状構造は岩石の強度を高くする働きをすると推測される。しかし他の岩石との鉱物構成比の比較に基づく相対的な強度の評価を試みたが、他の岩石から田下石の比較対象となる適当なデータを得られず、検討が不十分で繊維状構造自体の強度との関連性を解明するには至らなかった。また、同じく繊維状構造を有する他の岩石においてXRDによりMordeniteの検出は確認できなかった。このことを解明するために、田下石以外の繊維状構造を含む類似石に対しての検討が必要である。

(2) 今後の課題

本研究で用いた岩石試料は、石材業者が地下採石場から切り出し、倉庫に保管されていたものを実験用に切断して加工した断面を対象としており、新鮮な岩石に分類される。よって、石材として利用されて久しい、風化した岩石に試験結果を適用できるか不明であるため、風化した石材を利用するなどの諸条件を変えた試料で試験を行うことが必要である。

走査型電子顕微鏡による観察結果が、岩石固有の特性なのか個体差によるものなのかが不明瞭であるため、サンプル数を増やすことでより正確に岩石構造の傾向を把握できるものと考えられる。XRDにおいても同様の課題が挙げられ、また同定できた鉱物について、純度の高い試料で強度試験を行うことが望ましい。針貫入試験における貫入部分により異なってくる強度結果に対して、岩石に含まれる鉱物の結晶が影響を与える可能性を検討することができ、岩石表面という限られた範囲内での強度発現について手掛かりとなると期待できる。

本研究により実施した試験は、岩石の表面を対象にしたものが多く、岩石の強度により大きな影響を与えられとされる岩石の内部に関する検討が不十分である。従って、岩石内部により目を向けた観察や試験を行う必要がある。最終的には大谷石と、大谷石類似石の強度の発現の違いを定量的に評価する手法の確立が期待される。

参考文献

- 1) 小林 靖: 岩石の風化に伴う強度・組成の変化に関する研究, 平成12年度宇都宮大学卒業論文.
- 2) 清木隆文, 高葉悠, 井上達也, 木村理紗子, 斎藤友彦: 大谷石の岩石構造および色調変化機構の推定, 第13回岩の力学国内シンポジウム&日韓ジョイントシンポジウム講演論文集 DVD, pp191-196, 2013.
- 3) 佐藤陽, 清木隆文: 風化による大谷石の構成成分と表面色調への影響及び強度変化に関する検討, 第12回岩の力学国

内シンポジウム, pp.737-744, CD-ROM, 岩の力学連合会, 2008.

- 4) 林聖也, 高梨倫明, 佐藤陽, 清木隆文: 大谷石類似石の工学的性質の比較と大谷石の自硬性に関する研究, 第 40 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 土木学会, CD-

ROM, pp.381-386, 2011.

- 5) 道の駅 那須高原友愛の森工芸館 芦野石について, <http://nasu-kougei.main.jp/jizoo4.htm>, (2013/9/15 確認)

CONSIDERATION TO DIFFERENCE OF STRENGTH THRESHOLD AMONG OYA TUFF AND ITS SIMILAR ROCKS

Daisuke SHIMADA, Yuki SAKATA and Takafumi SEIKI

The Oya tuff that has been mined in Utsunomiya City, Tochigi Prefecture, is used for building materials and so on because it is believed that Oya tuff has earthquake resistance and refractoriness. As Oya tuff is classified into soft rock, it is easy to manufacture it as a stone material. On the other hand, it is easy to get defect and colour tone change on the surface because of weathering. The authors focused on, similar stone material of Oya tuff e.g. Fukaiwa tuff. Based on the constituent minerals, visible SEM patterns and the difference of those content on Oya tuff in previous study, the authors applied those results on the similar stone materials of Oya tuff and consider to the strength threshold of those rock materials.