

## 色彩値変化からみた来待石の風化速度

横田修一郎\*・妹尾大輔\*\*・西山賢一\*\*\*

### 要 旨

島根県宍道湖南岸から産出する“来待石”は新第三紀中新世の凝灰質砂岩であり、優れた加工性を有する反面、急速に風化して軟質化する欠点がある。この岩石の風化過程では鉄成分の酸化による急速な褐色化が特徴である。そこで、来待石の風化速度を得るため、室内自然状態下に置いた新鮮な岩石表面の色彩値を、その風化過程を通じて2年間以上にわたり繰り返し計測した。その結果、褐色化の主要な指標である $b^*$ 値は、当初は急速に増大するが、増大速度は時間とともに低下することが明らかとなった。これは、時間(経過日数)を $t$ とすれば、 $b^* = 2.35 \log t + 4.40$ のように表現できる。さらに $b^*$ 値と岩石の一軸圧縮強度 $q_c$ (MPa)との間の経験式を用いれば、来待石の一軸圧縮強度は露出後10年以内に半減する。一方、岩石表面から内部への褐色化の進行に関しては、試料切断面の色彩値にもとづけば、少なくとも数十日間に表面から2 cm以上に達することを確認した。

**Key words** : 風化速度 weathering rate, 砂岩 sandstone, 色彩値 color value, 酸化 oxidation

### 1. はじめに

わが国では古くから身近に産する自然石がさまざまな用途に利用されてきたが、こうした石材は今日では環境に優しい自然材料として再評価されつつある。“来待石”は島根県宍道湖南岸の来待地区(図-1, 2)から産出する石材で、各種の生活調度品とともに微細加工の必要な石灯籠等がこれから作られてきた。この石材は地質的には中新世大森層<sup>1)</sup>の中粒凝灰質砂岩であり、この地区の丘陵を構成する層厚50~70mの中粒~粗粒砂岩層のうち、塊状・均質な中粒砂岩の部分が採石の対象とされている(図-2)。

石灯籠等への加工は、岩石が褐色できめ細いという外見上の特徴だけでなく、適度の強度とともに加工性に富んだその力学的特性によるところも大きいと考えられる。しかしながら、石英粒子をほとんど含まない来待石は全体としてやや軟質であるうえに、粒子間結合の弱さを反映して風化されやすい特性を合わせ持っている。

石材としての来待石は現在でも一部で採石されているが、

古くからの採石場の多くはすでに休止している。このため、この地区には高さ10~20mの直立岩壁を伴う採石場跡が各所に散在し、一部では低角節理面に沿った岩盤崩落も発生している。

稼行中の採石場内において、掘削直後の新しい露出面は青みを帯びた灰色を呈するが、他の露出面は通常黄褐色~灰褐色を呈している。こうした露出面等の観察にもとづくと、来待石は風化によって急速に褐色化するとともに、岩石は軟質化し、表面には剥離やクラックが発生するのが特徴である<sup>2)</sup>。また、緩斜面直下ではほぼ斜面に沿った低角のシーティング節理が顕在化してくる<sup>2)</sup>。このため、放置された風化直立岩壁等では常に崩落発生の危険性を有するとともに、新たな道路法面等の切土施工部でも風化の進行によっては法面が急速に不安定化することが懸念される。

来待石の風化過程で特徴的な褐色化は構成物の酸化によ

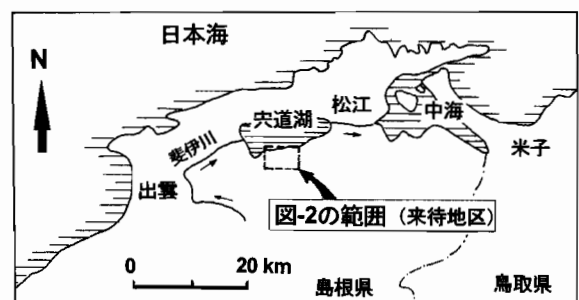


図-1 宍道湖南岸における来待石の産出地域  
 破線の長方形は図-2(来待地区)の範囲

\* 島根大学総合理工学部地球資源環境学科 Department of Geoscience, Shimane University(会員)  
 E-mail: yokota@riko.shimane-u.ac.jp

\*\* 島根大学総合理工学部地球資源環境学科 Department of Geoscience, Shimane University

\*\*\* 徳島大学総合科学部自然システム学科 Department of Mathematical and Natural Sciences, University of Tokushima(会員)

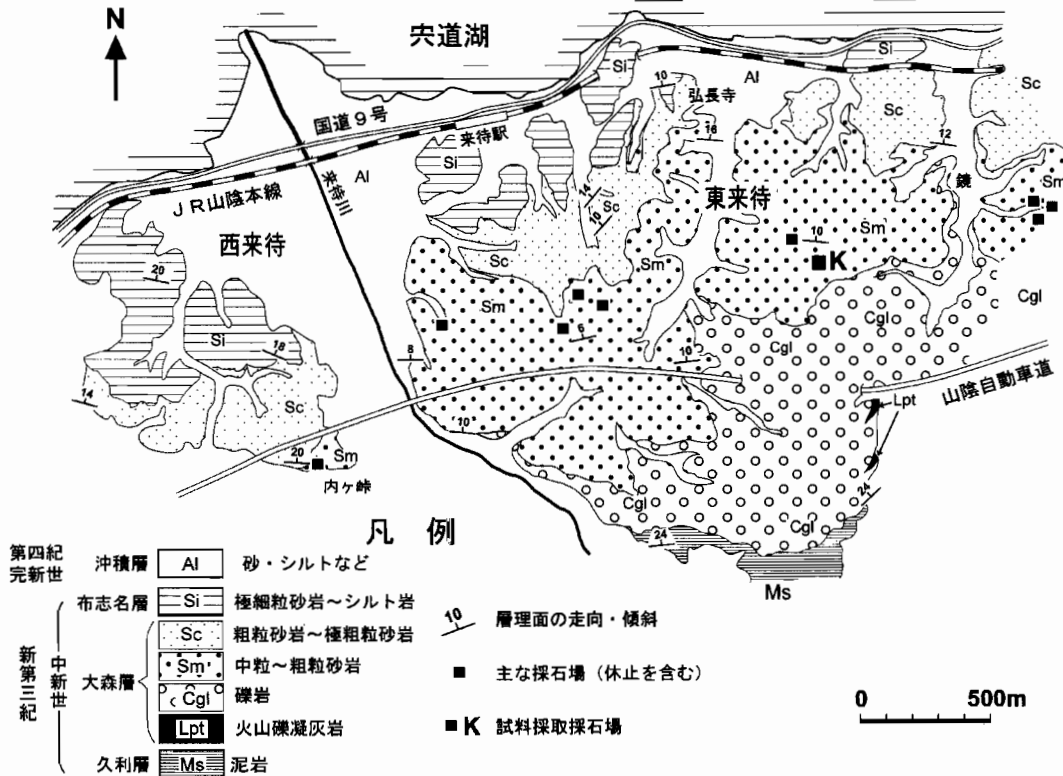


図-2 来待地区(松江市宍道町)の地質概要と来待石の主な採石場の位置(■印) K: 試料を採取した(有)勝部石材の採石場

ると考えられる。これは、普遍的かつ急速に進行することから、風化程度の指標となり得るであろうし、その時間的変化を正確に捉えることで岩石の風化速度の推定も可能であろう。そこで、来待石の風化速度に関する情報を得るため、採石直後の青みを帯びた新鮮な岩石試料を用い、風化過程を通じて岩石表面の色彩値を繰り返し計測して、その時間的変化の把握を試みた。

### 2. 色彩値計測のための試料作成と計測方法

採石直後の新鮮な来待石が青みを帯びた灰色から急速に褐色化していく色調変化は、目視でも数日間で確認できる。一般に“来待石”とよばれている中粒凝灰質砂岩の構成物は、安山岩や凝灰岩の岩石片、斜長石や単斜輝石、角閃石、緑泥石などの結晶片、およびそれら粒子間を埋める基質と空隙よりなり<sup>2),3)</sup>、なかでも安山岩岩片に富むのが特徴である<sup>2)</sup>。また、基質部分にはフッ石の見られることが多い<sup>2),4)</sup>。

ここでは、色彩値計測のために2つの岩石試料(試料-1, 2)を作成した(図-3)。いずれも島根県松江市宍道町の(有)勝部石材採石場(位置は図-2のK)にて採取した径約50cmの岩塊を用いたもので、青灰色中粒凝灰質砂岩よりなる新鮮な岩塊の芯部を直方体に整形した。整形は水流下にてダイヤモンドカッタを使用して行った。

試料-1は6×6×2cmの薄い直方体、試料-2は7×7×12cmの縦長の直方体である(図-3)。いずれも層理面は明瞭ではないが、粒子配列に着目すれば、層理面方向の推

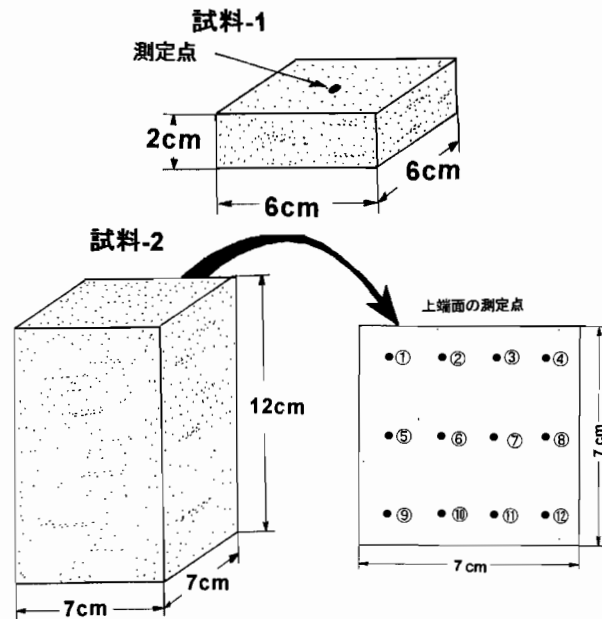


図-3 用いた直方体試料の形状

試料-1: 6×6×2cm, 試料-2: 7×7×12cm. 色彩値測定点は試料-1では上端面の中央. 試料-2では上端面の①～⑫(図の右端参照). 両試料において層理面方向は上下の端面とほぼ平行している。

定は部分的には可能であった。これによれば、試料-1, 2のいずれにおいても層理面方向は上下の端面とほぼ平行であり、とくに試料-2では長い方向が層理面方向に直交するように整形した。

試料表面の岩石組織は全体としてほぼ均質であったが、場所によって粒径や岩片の構成比率、粒子の方向性などに



であったことを考慮すると、開始後数日間の急速な色彩値変化は、酸化に加えて試料表面の自然乾燥過程が大きく影響したものと考えられる。なかでも $L^*$ 値のこうした変化傾向はよく知られており<sup>9)</sup>、上記の結果はこれとも調和的である。

3.2 長期間における色彩値変化

つぎに、全測定期間の計測結果をもとにした試料-1, 2の長期間の色彩値変化を図-5 (a), (b)に示す。ここでは $L^*$ 値を除いた $a^*$ ,  $b^*$ 値の変化のみを示している。 $L^*$ 値を

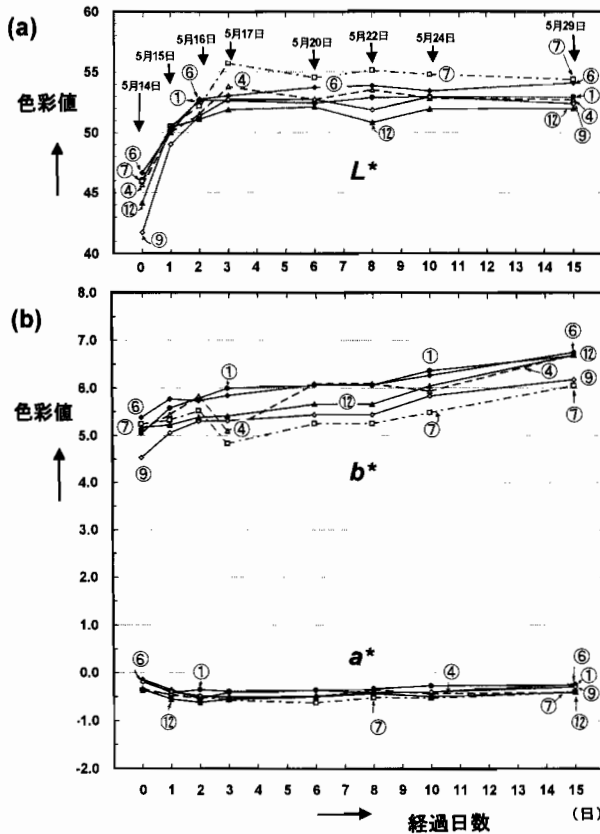


図-4 試料-2の計測開始当初約2週間(5月14~29日まで)における色彩値の変化

(a) $L^*$ 値の変化, (b) $a^*$ 値,  $b^*$ 値の変化. いずれも上端面の測定点のうち, 4隅(①, ④, ⑨, ⑫)と中央部(⑥, ⑦)の経過日数に伴う変化を示している。

除いたのは、 $L^*$ 値は明暗程度の指標であり、前述したように、当初の数日間を除いてほとんど変化しなかったためである。

用いた $a^*$ ,  $b^*$ 値は試料-1では上端面中央の値、試料-2では12点のうち①の値である。後者は、全期間通じて得たのが①のみであったためである。

図-5 (a), (b)では横軸の経過日数を常用対数によって表現した。これは、当初の数日間を除いても、 $a^*$ ,  $b^*$ 値の上昇速度は初期段階では急速であったが、その後はだいに緩慢になったためである。結果として、赤色成分の指標である $a^*$ 値と黄色成分の指標である $b^*$ 値の長期間にわたる変化はいずれも右上がり、直線状をなす。計測の期間と間隔は試料-1と2では異なるが、両者の変化傾向は互いに類似している。

なお、試料-2は試料-1に比較して全般にバラツキが大きい、これは計測間隔が短いことを反映して気温や湿度などの外的環境変化が影響したためと考えられる。

図-5 (a), (b)中の直線はそれぞれ試料-1, 2における $a^*$ ,  $b^*$ 値の時間的変化を近似したもので、直線の近似式として、試料-1では、

$$a^* = 1.22 \log t - 1.62 \quad (1)$$

$$b^* = 3.29 \log t + 1.96 \quad (2)$$

が得られ(相関係数  $r=0.99$ )、試料-2では、

$$a^* = 0.53 \log t - 0.72 \quad (3)$$

$$b^* = 2.35 \log t + 4.40 \quad (4)$$

が得られた(相関係数 $r=0.97$ )。ここで $t$ は経過日数である。

計測の期間と間隔が異なるため、2試料間で係数の単純な比較はできないが、両試料とも $a^*$ ,  $b^*$ は経過日数 $t$ の常用対数値と高い正の相関性をもって上昇したことがわかる。また、直線の勾配は $b^*$ の方が常に $a^*$ より大きい。

4. 来待石の酸化速度とその解釈

多数の計測値が得られた試料-2における $a^*$ ,  $b^*$ 値の関係を見るため、全期間のそれぞれを横軸、縦軸にとると、

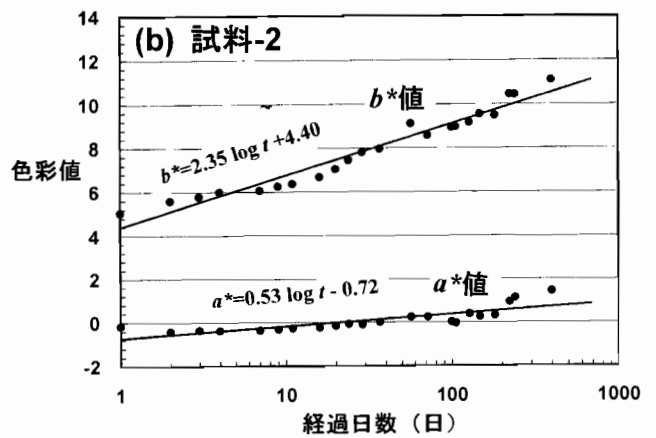
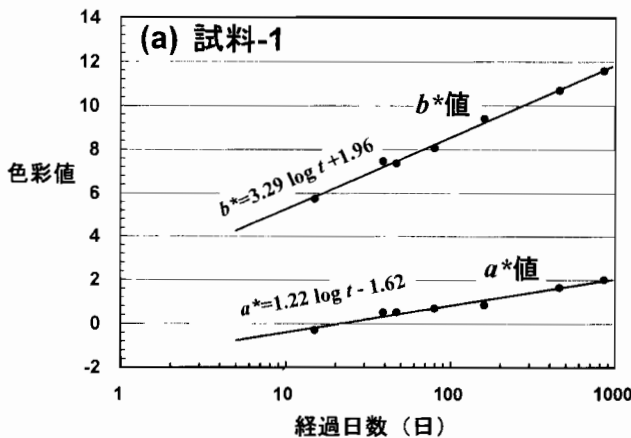


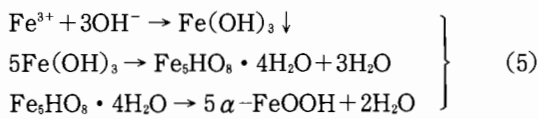
図-5 試料-1と試料-2における色彩値( $a^*$ ,  $b^*$ 値)の長期間にわたる変化

(a)試料-1, (b)試料-2. 黒丸が計測値. 経過日数を常用対数にして表示している. 破線ならびに図中の式は近似曲線を表す。

図-6 のようになる。これに示すように、 $a^*$ 、 $b^*$  値の時間的変化は必ずしも独立ではなく、全体として一つのトレンドで推移していることがわかる。

トレンドの勾配  $\Delta b^*/\Delta a^*$  は、酸化による鉄鉱物の生成過程が常温酸化によるゲータイト(針鉄鉱)の場合と高温酸化によるヘマタイトの場合とによって一般に異なっているため、勾配の大きさがその判定基準となる<sup>8)</sup>。両者の一般的な勾配の違い(図-6 中の矢印)と比較すれば、ここでの  $\Delta b^*/\Delta a^* \approx 3.5$  はこの酸化が主にゲータイトの生成過程であったことを意味している。

NISHIYAMA<sup>9)</sup>によれば、岩石中の鉄成分が酸化してゲータイト( $\alpha$ -FeOOH)が生成されていく過程は以下のように示される。



これは、Feを含む鉱物の溶解によってもたらされた  $\text{Fe}^{3+}$  イオンが、水に対する溶解度が低いために水酸化鉄  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  として沈殿し、それが脱水する過程で非晶質の水和酸化物フェリハイドライト ( $\text{Fe}_5\text{HO}_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) やゲータイトを生成することを表している<sup>9)</sup>。

ところで、式(2)および式(4)にもとづくと、 $b^*$  値の時間的変化(速度)は、

$$\text{試料-1 の場合, } db^*/dt = 1.43 t^{-1} \quad (6)$$

$$\text{試料-2 の場合, } db^*/dt = 1.02 t^{-1} \quad (7)$$

と表現できる。試料-1, 2で係数に差はあるが、酸化速度は経過日数とともに指数関数的に低下していく。

岩石表面の褐色化がゲータイト生成を伴う酸化過程によるのであれば、当初は急激に、その後は緩慢になる  $b^*$  値

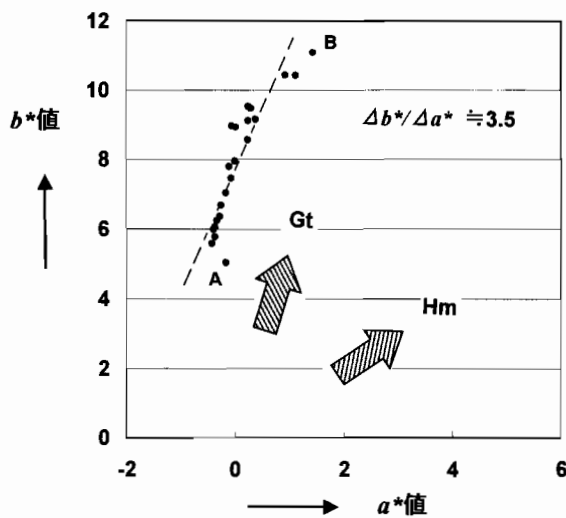


図-6 試料-2の測定点①における開始時から終了時までの間の  $a^*$  値と  $b^*$  値の関係。黒丸が得られた色彩値。破線は近似直線 ( $\Delta b^*/\Delta a^* = 3.5$ )。A: 2003年5月14日(開始日), B: 2004年6月12日(終了時)。矢印の方向と記号Gt, Hmは NAKASHIMA<sup>8)</sup>による一般的なゲータイト生成(Gt)とヘマタイト生成(Hm)のトレンドを示す。

の変化は、岩石の酸化速度が時間的に低下する特性を表していると考えられる。

計測期間は試料-1でも2年間余りにすぎなかったが、数十年以上経過した道路沿いの古い露出面や古い石灯籠、石碑等の表面では  $b^*$  値が14~18に達している箇所も少なくない。したがって、 $b^*$  値の時間的上昇傾向はさらに長期間にわたって継続すると推定される。式(2)および式(4)を用いると、 $b^* = 15$ に達するのに  $t \approx 10^{3.96} \sim 10^{4.51}$  日  $\approx 25 \sim 89$  年を要することになる。

### 5. $b^*$ 値の増大に対応する強度低下

岩石強度は一般に風化の進行とともに低下していくが、来待石でも褐色化したものでは強度が低い。横田・久保<sup>2)</sup>は、来待石の供試体を用いて一軸圧縮試験を行い、一軸圧縮強度  $q_u$  (MPa) と供試体表面の  $b^*$  値との間に図-7のような関係を得ている<sup>2)</sup>。これはさまざまな程度に褐色化した自然露頭の岩石を径2.0cmの円柱状供試体に整形し、自然含水状態で得た一軸圧縮強度  $q_u$  (MPa) と、それに用いた岩石試料表面の  $b^*$  値との関係である<sup>2)</sup>。図-7では力学的特性への粒度や構成物の影響を考慮し、中粒砂岩のなかでも同様の粒度・組織の岩石に限定した。

図-7に示すように、新鮮な来待石では  $q_u = 30$  MPa以上のものもあるが、褐色化の著しいものには  $q_u = 10 \sim 20$  MPaに低下したのももある<sup>2)</sup>。さらに自然露頭からの採取試料には供試体への整形が困難なほどに軟質化したものも少なくない。図-7では値はばらついているが、全体として  $b^*$  値の上昇につれて  $q_u$  (MPa) の低下傾向を読み取ることができる。両者の関係を直線で近似すると、

$$q_u = 47 - 1.7b^* \quad (8)$$

となる(相関係数  $r = 0.83$ )。  $b^*$  値の時間的変化として試料-1, 2で求めた式(2), (4)を式(8)に代入すれば、 $q_u$  (MPa) の時間的変化が得られる。式(2)を用いれば、

$$\begin{aligned} q_u &= 47 - 1.7(3.29 \log t + 1.96) \\ &= 44 - 5.6 \log t \end{aligned} \quad (9)$$

また、式(4)を用いれば、

$$\begin{aligned} q_u &= 47 - 1.7(2.35 \log t + 4.40) \\ &= 40 - 4.0 \log t \end{aligned} \quad (10)$$

となる。

これらは掘削面等に露出した来待石が外気に触れた後、その  $q_u$  (MPa) が経過日数  $t$  とともに低下していく過程を表している。式(9)または式(10)にもとづけば、新鮮な岩石の  $q_u$  が半減するのに必要な年数を推定することができる。式(9)では44MPaから22MPaに半減するのに、 $t \approx 0.83 \times 10^4$  日  $\approx 22$  年、また式(10)では40MPaから20MPaに半減するのに  $t \approx 10 \times 10^{40}$  日  $\approx 270$  年を要することになる。推定年数の幅は大きいですが、速ければ、10<sup>2</sup>年以内に強度は半減するといえる。このとき  $b^*$  値は14~16の値になる。

ところで、上記の $b^*$ 値は径2.0cmの円柱状供試体の整形時に得た径数cmの別の岩片表面で測定したものである。供試体が軟質な場合、整形が試料中の比較的硬質な部分に偏りやすいことや、一部の供試体では整形と色彩値計測との間に時間的ギャップのあること等を考慮すると、 $b^*$ 値と対比すべき $q_u$ は図-7の平均的な値より低い可能性がある。このように考えると、式(8)中の右辺の切片は47より若干小さくなり、強度の半減に要する期間は上記より短くなるかもしれない。

岩石の風化速度やそれによる強度低下速度に関してはこれまでにも多くの報告がある。SUNAMURA<sup>10)</sup>は風化によって強度が指数関数的に低下するとし、流紋岩の場合に

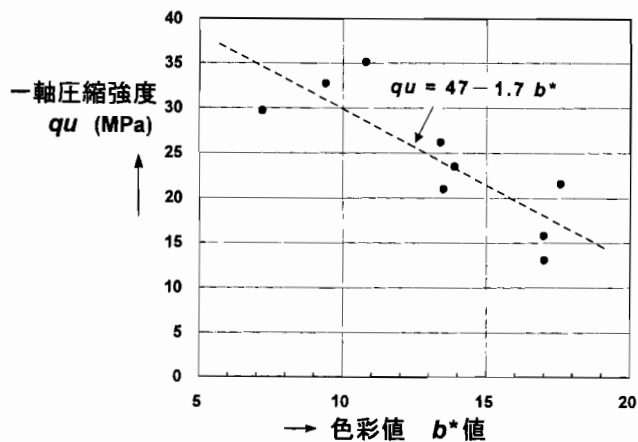


図-7 多数の露頭採取試料による岩石試料表面の $b^*$ 値と一軸圧縮強度 $q_u$ (MPa)の関係(横田・久保<sup>9)</sup>を一部修正) 試料-1, 2と同様の岩相(中粒の凝灰質砂岩)の試料で測定したもので、一軸圧縮強度は径2.0cmの円柱状供試体で測定した。グラフ中の黒丸は測定値、破線 $q_u = 47 - 1.7 b^*$ は両者の関係を近似する直線。

は小口ほか<sup>11)</sup>の例を用いて強度が $1/e$ まで低下するのに約 $2.6 \times 10^4$ 年要すると報告している。これは強度が半減するのに約 $1.8 \times 10^4$ 年要することになるが、これと比較すれば、上記の来待石の強度低下速度は約2桁またはそれ以上に大きい。

### 6. 岩石試料の切断面における色彩値

酸化の進行を反映した色彩値変化は試料表面での時間的変化だけでなく、表面から内部へも波及することが予想された。そこで、繰り返し計測の途中で試料を切断し、切断面の $b^*$ 値を当初から露出していた上端面の値と比較した。

これには図-8に示すように縦長の試料-2を用い、上端面(I面とした)の褐色化がある程度進んだ開始59日目にI面の下方約2cmでI面と平行に切断し、この切断面(II面とした)にて多数の $b^*$ 値を計測した。測定点はI面と同様に①~⑫の12点とし、計測は切断直後( $t=59$ )とその51日後( $t=110$ )の2回行った。これによって得たII面上の $b^*$ 値を、開始時( $t=0$ )および上記各段階( $t=59, 110$ )のI面の値と合わせて図-8に示した。

I面上の $b^*$ 値は経過日数 $t$ とともに上昇し、 $t=0$ の4.5~5.6(①~⑫の平均値は5.1)から $t=59$ の8.0~9.3(同8.7)、 $t=110$ の8.6~10.0(同9.2)へと、バラツキを伴いながらI面全体が上昇した(図-8)。これに対して、切断したII面では $t=59$ の5.7~7.1(平均値6.5)から $t=110$ の6.7~8.2(同7.5)へ上昇した。

試料側面では直接計測しなかったが、外的条件からみて、 $b^*$ 値は開始時にはI面とほぼ同一レベルであり、その後ともI面上での値の上昇と同様に推移したと考えられる。し

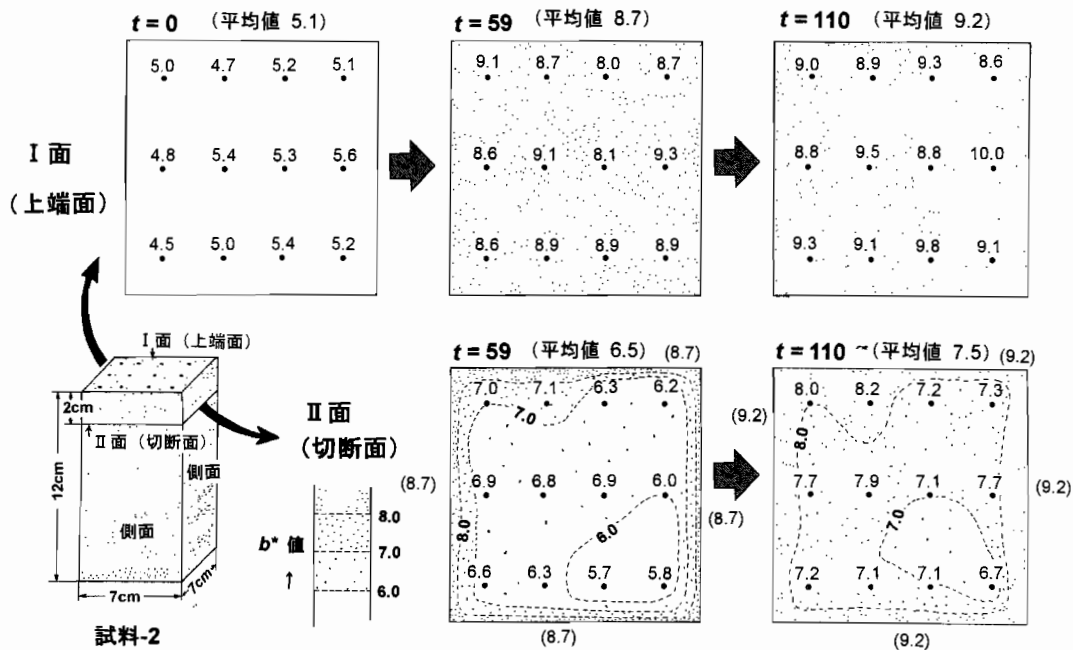


図-8 試料-2の上端面(I面)と切断面(II面)における各段階の $b^*$ 値の分布 I面では $t=0$ (開始時), 59(切断時), 110(切断後51日)における分布を、またII面では $t=59, 110$ における分布を示す。 $t$ は測定開始後の経過日数。II面の $b^*$ 値分布では、側面の値を各段階のI面と同一と推定して、( )内に示した。また、等値線による色彩値区分は6.0以下, 6.0~7.0, 7.0~8.0, 8.0以上とした。

たがって、側面では各段階におけるI面の平均値を用いて、 $t=0$ に5.1前後であったものが $t=59$ には8.7前後に、 $t=110$ には9.2前後に達したと推定した。また、試料内部においては、新鮮な岩塊から整形したことを考慮し、開始時の $b^*$ 値はすべての位置で外側と同一の5.1と推定した。II面の $b^*$ 値分布(図-8)は、こうした側面の推定値も考慮して概略の等値線で示した。

図-8によれば、切断直後( $t=59$ )のII面の値は、バラツキがあるものの、いずれもその時点での外側(I面および側面)の平均値8.7より低く、内部での褐色化はあまり進んでいなかったことがわかる。ただし、開始時( $t=0$ )の外側の平均値5.1と比較すれば、II面の値は全般に高く、側面から最も離れた中央部⑥、⑦の平均値6.85と位置⑩で計測された最低値5.7のいずれも5.1より高い。これは、岩石表面から内部への酸化が59日間に試料内部のこの深度まで及んでいたことを意味している。なお、値はバラツキが大きく、最低値は中央より右下方であったが、これは、酸化の進行が構成物の違いや粒度分布などに支配されて一様でなかったためと考えられる。

## 7. 来待石の風化速度とそれを支配する要因

来待石は鉄成分に富み、常温酸化によって急速に褐色化していく特徴を持つが、顕微鏡下での観察にもとづけば、外見が多少褐色を帯びた岩石では安山岩片等の粒子外縁部や粒子間には褐色部分が断片的に現れている。来待石の場合、Feを含む鉱物としては緑泥石があり、安山岩片や緑泥石の溶解によって供給されたFeイオンがゲータイトに変化していった可能性が高い。ただし、今回は風化による鉱物組成の変化を検討していないため、砂岩中のどの岩石片、鉱物片が具体的にどのような過程を経て変化していったかは今後の検討課題である。来待石と同様に石英粒子をほとんど含まず、火山岩岩片を多く含んだ間隙率の高い砂岩の場合、形成時代にかかわらず、このような色彩値変化の議論は可能であろう。

一般に岩石の風化過程には酸化以外に、さまざまな物理・化学的变化が複合している。泥岩を含めた堆積岩中の鉄鉱物等の酸化による褐色化に関しては、さまざまな化学的变化が想定されている<sup>9), 12), 13)</sup>。多くの鉱物や岩片レベルではこうした酸化とともに水和や溶解、粘土鉱物化、膨潤なども生ずるであろうし、岩石・岩盤レベルでは剥離、微小クラックの形成、コアストーンの形成等が考え得る。前述したように来待石でもこのような風化形態と現象が確認されている<sup>2)</sup>。上記の酸化の進行は基本的に化学的变化であり、これら諸現象とも密接に関係しているはずであるから、 $b^*$ 値の変化はさまざまな物理・化学的变化を含めた岩石の風化過程全体の進行についての指標にもなりうるであろう。したがって、ここでの $b^*$ 値の増大はそのまま、石材

の劣化評価(強度低下等の評価)、斜面の不安定性評価へも言及できると考えられる。とくに、時間を考慮した劣化状態の予測が可能となる。

ただし、本稿で議論した色彩値変化は室内で保管した自然状態の下での計測値であり、屋外での変化やさまざまな気温、湿度下での変化のほかに、現実の自然斜面表面などでの特定の含水状態での変化については今後一つずつ検討していく必要がある。

風化速度には、個々の位置での風化や強度低下の時間的進行と風化部分の空間的移動という二つのとらえ方がある。ここでは両面から検討したが、それらは置かれている条件によって大きく異なる可能性がある。とくに自然斜面を構成する露岩等では表面から数十cm内部で水分は飽和に近い状態と考えられ、内部への酸化の進行速度はその位置より内側では大きく低下するかもしれない。放置採石場の直立岩壁や自然斜面の不安定化の検討にはこうした面からの検討も必要と考えている。

## 8. ま と め

宍道湖南岸から産する来待石表面の色彩値を2年間以上にわたって繰り返し計測し、風化指標としての変化を調べた。結果をまとめると、以下のようになる。

- (1) 色彩値 $a^*$ 、 $b^*$ は、いずれも当初は急速に増大するが、増大速度は時間とともにしだいに低下する。
- (2) 褐色化の主要な指標である $b^*$ 値と経過日数 $t$ との関係は $b^* = 2.35 \log t + 4.40$ のように表現できた。係数は試料によって若干異なったが、それらをもとにすれば、 $b^* = 15$ に達するのに数十年を要することになる。
- (3)  $b^*$ 値と一軸圧縮強度 $q_u$ (MPa)の経験的関係にもとづけば、強度 $q_u$ と経過日数 $t$ との間で、 $q_u = 40 - 4.0 \log t$ のような関係が得られた。これによれば、速い場合、来待石の強度は露出後約 $10^2$ 年以内で半減する。
- (4) 褐色化が進んだ段階で得た試料切断面の色彩値にもとづけば、岩石表面から内部への褐色化の進行は数日間に少なくとも2 cm以上に達する。

## 引用文献

- 1) 鹿野和彦・竹内圭史・松浦浩久(1991):「今市地域の地質」地域地質研究報告(5万分の1地質図幅), 地質調査所, 79p.
- 2) 横田修一郎・久保真大(2002): 石材としての"来待石(きまちいし)"の風化形態と風化特性, 日本応用地質学会平成14年度研究発表会講演論文集, pp.103-106.
- 3) 澤田順弘(2000): 顕微鏡で覗いた来待石, 来待ストーン研究2, pp.15-42.
- 4) 高橋 学・薛 自求・大和田 朗・石島洋二(1992): 青色顔料を混合した樹脂によるポア観察について, 応用地質, Vol.33, No.5, pp.294-306.
- 5) 満下淳二・石沢一吉・遠藤 司・武内俊昭(1998): 岩石の色



- 彩測定と風化区分および物性値評価への応用に関する検討, 応用地質, Vol.38, No.4, pp.370-385.
- 6) 西山賢一・水上陽成・小池克明・松倉公憲(2001): 風化による砂岩礫の間隙構造の時間変化, 応用地質, Vol.42, No.1, pp.2-14.
- 7) 横田修一郎・西山賢一・原口 強・井口 隆(2003): 岩石色彩値の深度変化からみた山形県白鷹火山周辺の風化環境と山体崩壊の可能性, 日本地すべり学会誌, Vol.40, No.4, pp.283-292.
- 8) NAKASHIMA, S., MIYAGI, I., NAKATA, E., SASAKI, H., NITTONO, S., HIRANO, T., SATO, T. and HAYASHI, H. (1992): Color measurement of some natural and synthetic minerals, *Rep. Res. Inst. Natural Resources, Mining college, Akita Univ.*, No.57, pp.57-76.
- 9) NISHIYAMA, K.(2002): Rates of rock property changes due to weathering: sandstone gravel in fluvial terrace deposits in the Miyazaki Plain, *Sci. Rep. of Institute of Geoscience, University of Tsukuba, Section A*, No.23, pp.1-40.
- 10) SUNAMURA, T.(1996): A physical model for the rate of coastal tafoni development, *Jour. Geol.*, Vol.104, pp.741-748.
- 11) 小口千明・八田珠郎・松倉公憲(1994): 神津島における多孔質流紋岩の風化とそれに伴う物性変化, 地理学評論, Vol.67A, pp.775-793.
- 12) 大山隆弘・千木良雅弘・大村直也・渡部良朋(1998): 泥岩の化学的風化による住宅基礎の盤膨れ, 応用地質, Vol.39, No.3, pp.261-272.
- 13) 大山隆弘・千木良雅弘・大村直也・佐々木和裕・長岡 亭(1999): 不飽和領域での堆積岩の化学的風化作用-泥岩トンネル坑壁の風化速度と微生物の影響-, 応用地質, Vol.39, No.6, pp.511-523.

(2005年4月11日受付, 2006年4月14日受理)

*Jour. Japan Soc. Eng. Geol.*, Vol.47, No.4, pp.188-195, 2006

## Weathering Rate of Miocene Kimachi Sandstone Based on Changes of Rock Color Values

Shuichiro YOKOTA, Taisuke SENOO and Ken-ichi NISHIYAMA

### Abstract

The Kimachi sandstone, occurred on the southern coast of Shinji Lake, Shimane, Japan, is a stone material composed of medium-grained tuffaceous sandstone of the Miocene Omori Formation. It has been quarried for processing into various household utensils and stone lanterns since the Burial Mound Period. The sandstone is homogeneous, isotropic, soft, and not brittle in its mechanical properties, and therefore easy to carve with traditional chisels and other tools. However, the sandstone's rapid weathering and deterioration is a serious shortcoming as a stone material.

A distinguishing feature of the weathering of this sandstone is a rapid change of rock color from bluish gray to brownish, reflecting oxidative changes in the iron components of the sandstone. Therefore, the change of color of the rock surface over time can serve as an indicator of the weathering rate of the sandstone.

Rock color values  $a^*$  and  $b^*$  (CIE  $L^*a^*b^*$  color measurement system) of the surface of two samples of the sandstone were repeatedly measured with a colorimeter (Minolta CR-800). The samples were kept under natural room temperature and humidity conditions in a laboratory during more than two years, and their color changes with time were analyzed. The repeated measurements of the color values showed that both  $a^*$  and  $b^*$  values initially increased rapidly with time, but their rates of increase slowed with time. Here, the positive  $b^*$  value, which expresses the yellow color component, was used as the major index of the change of rock color from bluish gray to brownish. The change in the  $b^*$  value with time  $t$  (day) was graphically determined and could be described by the equation  $b^* = 2.35 \log t + 4.40$ .

The empirical relation between uniaxial compressive strength  $q_u$  (MPa) of cylindrical specimens of the sandstone and the  $b^*$  values measured on their surfaces was also determined. From this relation and using the equation mentioned above, the decreasing value of  $q_u$  (MPa) over time  $t$  could be expressed as  $q_u = 40 - 4.0 \log t$ . According to this equation, it takes about  $10^3$  years from the time that Kimachi sandstone is exposed to attain the level of weathering resulting in a 50% reduction in its strength.

The changes in color values  $a^*$  and  $b^*$  were not independent during the weathering process; the two values were related to each other linearly. The slope  $\Delta b^* / \Delta a^*$  of the line graphically determined from the linear relation was around 3.5, which corresponds to the gradient of color values during the formation of goethite, which is brownish, as a result of oxidation of iron at normal temperature. Therefore, the brownish color of the sandstone may be attributable to the formation of iron compounds by oxidation of iron dissolved from the numerous andesite fragments and chlorite that compose the sandstone.

The rock color changes with time not only at the rock surface, which is in direct contact with the atmosphere, but also within the rock. To obtain information on the rate at which oxidation proceeds inward from the outer surface, color values were compared between the outer surface of a rock specimen and the face of a cut plane of the same specimen, which was cut 59 days after the first color measurement. Consequently, slight change of color values was recognized on the cut plane. This means that the oxidation attains at the depth of 2 cm from the surface during 59 days.

**Key words** : weathering rate, sandstone, rock color value, oxidation