

タイの歴史的レンガ造建造物の修復に用いる低温焼成レンガの吸水特性

石田 優子* 山田 味佳**

Water Absorption Properties of Low-Temperature Fired Bricks for Restoration of Historical Brick Buildings in Thailand

Yuko ISHIDA* Mika YAMADA**

In the restoration of cultural properties, the original materials and construction methods should be used in principle from the viewpoints of authenticity and anastylosis. Low-temperature fired bricks made by traditional methods are used for the restoration of historical brick buildings in Ayutthaya, Thailand. From the deterioration survey of the restorative bricks used in the 2013 restoration of Wat Krasai pagoda, the deterioration rate was significantly faster in parts where rainwater was collected. In addition, salt weathering was recognized. In order to ensure the long-term soundness of cultural property buildings after restoration based on the proper restoration method, it is necessary to understand the characteristics of restoration materials. Therefore, to evaluate the effect of salts and water content conditions on the deterioration of the restorative bricks, immersion experiments using distilled water were conducted as a preliminary experiment. 5 specimens (5 cm x 5 cm x 2 cm) were immersed in distilled water, and the surface dry mass was measured every 3 to 7 days. The distilled water was replaced at the time of measurement. The results showed that the surface dry mass increased cumulatively, and the deterioration such as cracking and chipping hardly progressed with distilled water even after 5000 hours.

Keyword Historical Brick Building, Low-temperature fired brick, Deterioration, Salt weathering, Water absorption

1. はじめに

1991年に世界遺産に登録された「Historic City of Ayutthaya」にはアユタヤ王朝時代（1351-1767）に建造された歴史的レンガ造建造物が多く遺されている。筆者らは2014年からアユタヤ歴史公園の南西に位置する Wat Krasai の傾斜仏塔に関する調査研究を実施してきた。Wat Krasai では2013年に文化財修復用レンガを用いた修復工事が行われたが、わずか1年後に劣化が認められた(図1)。劣化は雨水が集まる日当たりの悪い狭い範囲に限定され、部分的な塩類の析出も認められた。アユタヤには修復が必

要な文化財が多数あり、修復用レンガの活用は必須である。しかし、これらの劣化挙動について検討されている例は乏しい。修復レンガの劣化挙動を解明することで、Wat Krasai の修復方法を改善することが本研究のねらいである。本稿



図1 修復レンガの劣化と植物繁殖 (2014.8.24 撮影)

*近畿大学工業高等専門学校

総合システム工学科都市環境コース (土木系)

**早稲田大学

理工学術院総合研究所

では、修復レンガの含水状態が劣化に及ぼす影響を把握するために実施した蒸留水を用いた浸漬試験について報告する。またこれまでの調査研究に基づいて Wat Krasai における修復レンガの劣化現象を考察した。

2. レンガの劣化要因

2.1 レンガの風化

レンガの劣化要因は、主に物理的風化、化学的風化、生物的風化に分類される。それらの風化は密接に関わり、複合的に作用し合う。また熱帯地域の高温多湿な環境下では、劣化はより深刻な状態となる¹⁾。Wat Krasai で想定される風化を現地の調査に基づいて推察すると、物理的風化では①気温の日較差による膨張、収縮、②塩類析出による膨張圧、③植物根の生育による圧力が考えられる。2019年3月12日から2020年2月29日に Wat Krasai で計測した気温の変化を図2に示す。気温は年間を通して約20°～40°の範囲にあるため、凍結融解による風化はない。

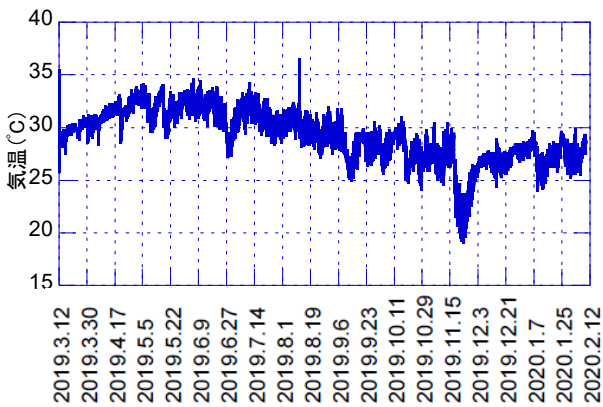


図2 アユタヤの気温 (Wat Krasaiにて計測)

化学的風化は、鉱物がより安定な化合物に変化する過程で、水和、加水分解、酸化、還元、脱水、溶脱等の化学反応により生じる。岩石の化学的風化では造岩鉱物のうち溶解度の高い元素やイオン (Cl、SO₄、Na、Ca、Mg 等) が溶脱して除去されていき、溶解度の低い元素 (Fe、Al 等) は残留して粘土鉱物が生成されていく²⁾。アユタヤのレンガでは二次鉱物の石膏やテナルダイトの生成が確認されており³⁾、原料の粘土鉱物の分解やイオンの溶脱が推察される。レンガに含まれる成分を把握する目的で、Wat Krasai の修復レンガを製造した工場に2020年に作られた修復用レンガの組成を分析した。分析には蛍光 X 線分析装置を使用し、酸化物計算を行っている⁴⁾。組成分析によると、SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃ が主成分となっている (図3(a))。レンガは粘土を主原料とするため、産出された場所や時期により成分や構成比率は異なる。参考に Natthanan ら⁵⁾が実施したアユタヤの修復用レンガの組成を図3(b)に示す。

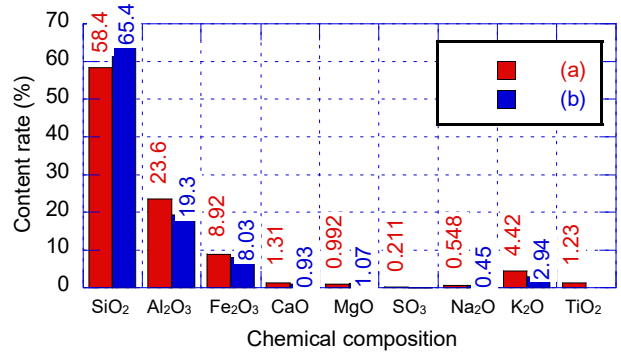


図3 アユタヤの修復用レンガの組成

生物的風化には、①生物の食害や営巣、②バクテリア類の繁殖、③藻類や苔類の繁茂、④植物根によるCO₂や有機酸の供給、それによるpHの低下に起因する鉱物の化学的風化促進等が挙げられる²⁾。Wat Krasai 仏塔は下部の形状が八角形で、南東、南西、北東、北西の4面に15cm×20cm程度の孔があり、うち1つに蜂が営巣している。レンガの表面には黒いカビやコケ類の繁茂がみられ、風化した碎屑物には植物が根を下ろしている。仏塔の上部にも、傾斜が緩く雨や土が溜まりやすい部分に植物が繁殖している。

2.2 塩類風化

レンガは多孔質体で、毛細管現象により細孔中に水を吸収する。雨水や地下水、またレンガや目地モルタルに含まれる酸由来の陰イオンと塩基由来の陽イオンが間隙水に溶脱し、水分の蒸発や温度変化等により溶液が過飽和になると、イオン結合した塩類が結晶化する⁶⁾⁷⁾⁸⁾。結晶化の場所により、細孔内で塩類が析出することはサブフロッセンス、表面に析出することはエフロッセンスとして区別される。サブフロッセンスは、析出圧や結晶の熱膨張、水和による体積変化に起因して応力が生じるため、材料の引張強度を上回ると破壊につながる。エフロッセンスは白華現象とも呼ばれ、レンガ表面に白い析出物として認められ美観を損なうが、物理的な被害は与えない⁶⁾⁷⁾。石崎ら³⁾は、アユタヤ等でレンガ建造物の水分測定、析出塩類の調査、気象観測を実施し、雨期に石膏 (CaSO₄・2H₂O) を中心とする微量の難溶性塩類しか見られないものが、乾季にはテナルダイト (Na₂SO₄) を中心とする可溶性塩類が多量に見られることを明らかにしている。Wat Krasai ではエフロッセンスが認められるとともに、レンガ表面の剥落や多数の亀裂の様子からサブフロッセンスが生じている可能性が高い (図4、図5)。

朽津⁹⁾はアユタヤ地域のレンガ遺跡の装飾用にスタッコと砂岩が用いられることを報告している。スタッコ (化粧漆喰) は、水のレンガ内部への侵入を防止する表面保護の役割を果たしてきたと考えられるが、現在は多くの建造物

でスタッコが剥落し、レンガ内部に水が容易に侵入できる状態となっている。Wat Krasaiの修復用レンガにはスタッコが塗布されておらず、表面保護の有無は水分の浸潤と乾燥による劣化の大きな原因になると推察される。



図4 修復レンガのエフロレッセンス (2022年11月撮影)



図5 修復レンガの表面剥落 (2022年11月撮影)

2. 3 洪水の影響

アユタヤは、首都バンコクから北へ約80km、タイ中部の中央平野チャオプラヤー川流域デルタ地帯に位置する。チャオプラヤー平野は、地形勾配が約1/100,000~1/50,000と緩い広大な低平地である。上流は深さ50mの基盤岩の上に氾濫原堆積物と扇状地堆積物が、下流はデルタ性堆積物が堆積し、堆積物は南へ行くほど厚く、最下流では800m以上になる¹⁰⁾。地盤は、砂や砂礫層と、粘土およびシルトの互層から成り、弱い地盤の上に建造された遺跡の多くは、不同沈下により亀裂や傾斜が生じている。タイでは毎年のように洪水が発生し、2002~2008年には年間約10回の洪水が生じた¹¹⁾。アユタヤの標高は5m程度で、緩い地形勾配のためにひとたび洪水が生じると長期間湛水する。1995年や2011年の洪水でも遺跡群が水没し、局所的な塩類析出や一部壁画の汚損などの被害が確認されている¹²⁾¹³⁾。

2020年3月調査時と、2022年11月調査時の仏塔北面の写真を図6、7に示す。タイの気候は熱帯性モンスーン気候で、乾季は11~2月、暑季は3~5月、雨季は6~10月とされる。雨季に浸透した水分により、2022年11月はレンガ表面の黒緑色のコケ類や草本類が繁殖し、エフロレッセンスの白色が見て取れる。また2020年以前には見られなかった部分で風化や部分的なレンガの抜け落ちも見られた。2021年10月と2022年10月にアユタヤ地方では洪水が発生しており、Wat Krasaiの浸水状況は不明であるが、仏塔の傾斜計測結果から洪水発生を含む期間に地盤の変動があったと推察

された。2014年から2020年までのレンガの劣化進行状況に比べて、2020年から2022年の劣化は著しく、浸水せずとも多量の水分供給、劣化を促進させる成分の供給等があった可能性がある。



図6 Wat Krasai仏塔北面 (2020年3月撮影)



図7 Wat Krasai仏塔北面 (2022年11月撮影)

3. 修復用レンガの浸漬試験

3. 1 試験の目的と方法

アユタヤの修復用レンガを用いた乾湿繰り返し試験³⁾では、20±5℃の蒸留水を30±5分片面から吸水させ、40±5℃で23.5時間乾燥させて、雨季のスコールを模擬した。実験の結果、吸水率が徐々に低下したことから、1日1回のスコールで吸水した水分は蒸発せずに徐々にレンガ内に蓄積されると推察された。そこで、修復レンガの吸水特性を調べるために、5 cm x 5 cm x 2 cmの供試体を5個作成し、蒸留水に浸漬させて、3~7日の間隔で表面乾燥質量を計測した。また、亀裂や欠け等の劣化状況を観察した。蒸留水は計測時に入替え、浸漬していた溶液は蒸発皿に入れて乾燥させ、碎屑物の累積質量を計測した。

3. 2 試験結果と考察

蒸留水に5000時間浸漬した供試体には、顕著な亀裂の増加等の劣化現象を目視で確認することはできなかった。一方、吸水量の増加が認められた。図8に浸漬時間と質量増加の関係を示す。浸漬開始から7日程度の増加量は大きく、その後は徐々に吸水量が減少し、1500時間程度から増加量

は緩やかになった。5000時間経過後も僅かながら増加傾向が見られ、収束はしていない。レンガは粘土を焼成して製造するが、焼成温度が低い場合は粘土鉱物や造岩鉱物への熱による影響は比較的低いとされる¹⁴⁾。修復用レンガは、7日間もみ殻で覆い薪で焼成するが、低温であるため原料である粘土の性質をある程度保持しているものと推測する。石田ら¹⁵⁾は、軟岩の吸水試験を行い、軟岩に含まれるスメクタイトの交換性陽イオンの組成と吸水特性に密接な関係があることを指摘している。今後は、X線回折(XRD)による鉱物の特定、溶脱成分の分析、塩溶液を用いた浸漬、乾湿繰返し試験等により、さらに分析を進める。

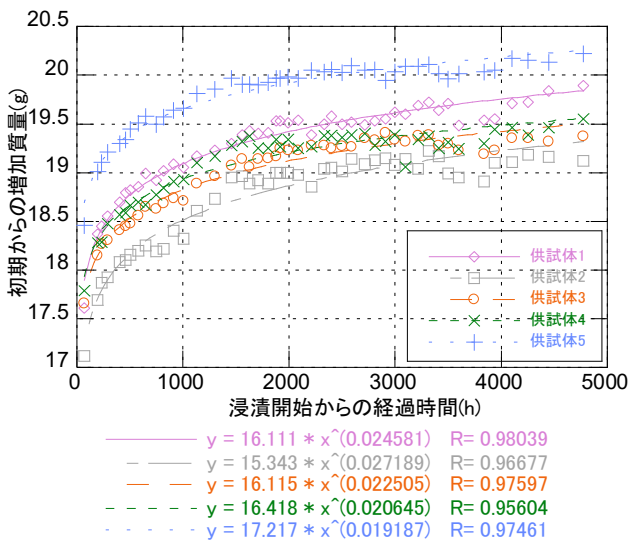


図8 浸漬時間と質量増加の関係

謝辞

アユタヤ歴史公園事務所の Veerasak Sansaard 氏にはレンガの入手についてご協力いただいた。また供試体作成は早稲田大学理工学術院の王海龍准教授にご協力いただいた。分析に用いた ZSX-Primus II は、文部科学省先端研究基盤整備事業(課題番号 JPMXS0440500021)の共用装置である。ここに記して深謝する。

参考文献

- 1) T.L.Webb and J.H.P. van Aardt : Deterioration of materials under tropical conditions, *Ekistics*, Vol.7, No.41, pp.260-266, 1959.
- 2) 岡本研 : 岩石の風化作用から何を学ぶか, 北海道立理科教育センター, 研究紀要第 18 号 (2006), pp.85-94.
- 3) 石崎武志, 朽津信明, 西浦忠輝, ユッカ シムネック : タイ国アユタヤの歴史的レンガ建造物中の水分移動解析, *保存科学*, No.38, pp.154-163, 1999.
- 4) Yuko Ishida, Masaru Koemoto, Mika Yamada and Hajime Ito : Experimental study on surface protection of restorative brick for cultural properties in Ayutthaya, *Proc.12th Int. Conf. on Geotechnique, Construction Materials & Environment*, 2021.
- 5) Natthanan W., Chainarong A., Peerasit M., Weerachart T., Raktipong S. and Sutat L., Ancient materials and substitution materials used in Thai historical masonry structure preservation, *Journal of renewable materials*, Vol.9, No.2, 2021, pp.179-204.
- 6) Carlos Rodriguez-Navarro, Eric Doehne : Salt Weathering: Influence of evaporation rate, supersaturation and crystallization pattern, *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol.24, pp.191-209, 1999.
- 7) 吉田夏樹, 松浪良夫, 永山勝, 坂井悦郎 : モルタルの塩類風化に及ぼす細孔構造および引張強度の影響, *Cement Science and Concrete Technology*, No.64, pp.398-404, 2010.
- 8) 脇谷草一郎, 高妻洋成 : 塩類による遺跡の劣化について, 古墳壁画の保存活用に関する検討会装飾古墳ワーキンググループ (第 10 回) 資料 5, 2014.
- 9) 朽津信明 : タイの遺跡における使用石材とその劣化に関する調査報告, *保存科学*, No.38 (1998), pp.59-68.
- 10) 独立行政法人国際協力機構(JICA), (株)建設技研インターナショナル, (株)オリエンタルコンサルタンツ, 日本工営(株), (株)建設技術研究所 : タイ王国パサック川東部アユタヤ地区洪水対策計画協力準備調査報告書(詳細設計), pp.2-8-2-9, 2012.
- 11) Wittaya Daungthima, Kazunori Hokao : Analysing the Possible Physical Impact of Flood Disasters on Cultural Heritage in Ayutthaya, Thailand, *International journal of Sustainable Future for Human Security*, Vol.1, No.1, pp.35-39, 2013.
- 12) 文化遺産国際協力センター・朽津信明 : 研究所昔語り : 日タイ共同研究が始まったころ, 独立行政法人国立文化財研究機構東京文化財研究所, *TOBUMKENNEWS*, no.38, pp.12-13, 2009.
- 13) National Research Institute for Cultural Properties, Tokyo : Report on the investigations of the flood damage of cultural properties in the Ayutthaya Historical Park, pp.1-47, 2012.
- 14) 井上巖 : 胎土分析法と分析例一大阪府下の埴輪窯跡出土埴輪の産地同定一, *日本考古学*, 第4号, pp.91-107, 1997.
- 15) 石田良二, 西川聡明 : スメクタイトを含む軟岩の諸性質(1)ー交換性陽イオンと吸水特性ー, *粘土科学*, 第32巻, 第2号, pp.97-117, 1992.