

猿島砲台跡における明治初期の国産煉瓦保存のための物性調査

Characterization of Japanese Bricks Made in the Early Years of Meiji in Sarushima

深見利佐子
FUKAMI Risako

1. はじめに

(1) 研究背景

近年、群馬県の「富岡製糸場と絹産業遺産群」や九州、中国地方などにまたがって所在する「明治日本の産業革命遺産 製鉄・製鋼、造船、石炭産業」がユネスコの文化遺産に登録されたことで、国内における近代化遺産への注目が高まりつつある。東京文化財研究所によると、重要文化財に指定されている近代化遺産のうち非木造の遺産は 230 件であると報告されており、そのうち煉瓦造の文化財は 71 件と全体の約 3 割を占め、構造別に見ると件数が最も多い¹。さらに最近では、煉瓦造の近代化遺産や文化財をまちづくりや地域おこしに活用する取り組みが各地で推進されている。

しかし、煉瓦造の文化財は現在、建造物の老朽化に伴う耐震性の問題や、文化財を構成している煉瓦の劣化などが課題として指摘されている。建造物や構造物の耐震性の問題に対しては、最小限の介入や可逆性を重視した耐震補強、補修作業などが施されている一方で煉瓦の劣化に対しては、保存処置方法が非常に少なく、事例に応じて行われてきた基礎研究が実際に検証されていないことが現状である。また、保存処置を行うにあたり、煉瓦の特性を明確にする必要があるが、これまでに明治初期に生産された煉瓦の特性に関して殆ど言及されてこなかった。

(2) 先行研究

屋外に存在する場合が多い煉瓦造文化財は外気や周辺環境の影響を受けやすく、塩類風化や凍結破砕などの劣化被害が各地の遺跡で報告されており、深刻な状況であるといえる。そのため、これまでの研究では煉瓦造文化財にみられる劣化やその調査方法の検討、また劣化の発生メカニズムの解明を中心とした研究が多くなされてきた。一方、劣化の見られる煉瓦造文化財に対する保存処理方法に関する研究

においては合成樹脂を用いた煉瓦の水分特性のコントロール法が提案され、旧下野煉瓦製造会社煉瓦窯（重要文化財）では劣化現象の軽減がみられるなど効果的であることが証明された²。しかし、このような煉瓦の保存処理に関する研究は劣化現象やそのメカニズムに関する研究と比較して非常に少ない。つまり、これらの研究が臨床的治験に結びついていないことが現状である。

(3) 研究目的

煉瓦造文化財が有する情報や価値を失わないためには、これらの文化財に対し、適した保存処置を講じる必要がある。そのためには先に述べたような臨床的治験を行う必要があり、保存処置に関する治験を行うためには現時点で起こっている劣化現象や、煉瓦の持つ物性を細かく把握しなければならない。そこで、本研究ではこれまで詳しく言及されてこなかった明治初期の国産煉瓦の物性の解明を目的の一つとした。さらに明治初期の国産煉瓦が使用されている遺跡にて実際にどのような劣化が見られるのか劣化の特徴を把握し、劣化要因の解明に迫ることとする。そして、煉瓦個々に対する今後の新たな保存処置や保存計画のための知見を得ることを二つ目の目的とした。

また、本研究では明治初期の国産煉瓦が使用されている遺跡として猿島砲台跡を調査の対象とした。

(4) 論文構成

本論では、まず第 2 章において自然科学的手法を用いて明治初期の国産煉瓦である東洋組煉瓦の物性の解明を行った。分析方法には吸水率および圧縮強度試験、蛍光 X 線分析、熱分析 (TG および DTA) を用いた。続く第 3 章では、東洋組煉瓦が実際の遺跡ではどのような劣化状態であるのか猿島砲台跡にて現地調査による劣化の進行と特徴について考察を

行った。また、これら劣化の進行と特徴の把握には現地調査にて実施している温湿度調査と煉瓦の崩落量のこれまでの結果より考察を行った。そして第4章にて猿島砲台跡の東洋組煉瓦に見られる劣化の要因解明を行った。第4章においては、粉末X線回折や、水分計を用いた煉瓦壁面の水分率の分布状況や挙動の調査、遺跡内における漏水のイオンクロマトグラフィー分析を用いることで、劣化要因の解明に努めた。これらの調査結果から総合的に考察を行い、第5章にて本研究の結論と今後の課題について述べる。

2. 明治初期における東洋組煉瓦の物性

(1) 吸水率及び圧縮強度

東洋組煉瓦は明治15年頃に愛知県において創出した東洋組によって製造された煉瓦³であり、明治初期を代表する国産煉瓦の一つである。

猿島砲台跡より採取された東洋組煉瓦単体試料6点(写真1)より内径φ33でコア採取された試験体40点(写真2)に対し、吸水率試験を行った。吸水率試験はJIS A 1509-3:2008に基づき、真空法による試験を実施した。そして吸水率は式(2.1)によって求めた。

$$\text{吸水率: } E_v = \frac{m_{2v} - m_1}{m_1} \times 100 \quad (2.1)$$

ここに、 E_v :吸水率(%), m_1 :乾燥時の質量(g)、 m_{2v} :吸水時の質量(g)とする。

さらにコア採取された試験体の内20点に対し圧縮強度試験を行った。圧縮強度は式(2.2)によって求めた。

$$\text{圧縮強度: } \sigma_c = \frac{P_{\max}}{A} \quad (2.2)$$

ここに、 σ_c :圧縮強度[N/mm²]、 P_{\max} :最大荷重[N]、 A :断面積[mm²]である。

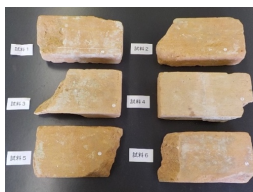


写真1 煉瓦単体試料



写真2 コア採取された試験体

試験の結果、東洋組の煉瓦の吸水率は 17.0 ±

1.6%、圧縮強度は 9.5 ± 3.8 N/mm² という結果であった。試験体に対して行った物性試験より得られた結果は、さらに煉瓦単体試料ごとに区分しそれぞれの平均値を算出し、図1を作成した。図1は物性試験における東洋組の煉瓦の吸水率と圧縮強度の関係を示したものである。

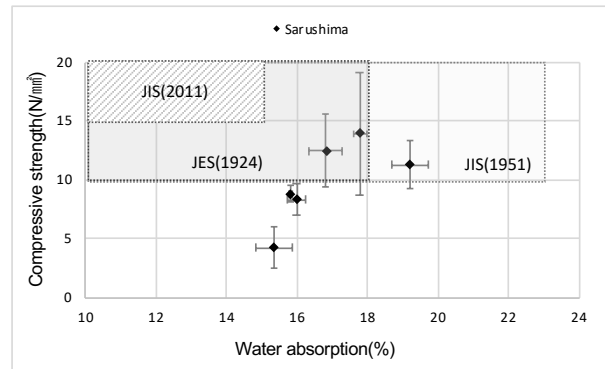


図1 吸水率試験及び圧縮強度試験結果

図1より東洋組の煉瓦の物性値にはばらつきがあることを確認した。近藤はJES規格が制定される以前の大正11(1923)年に日本煉瓦製造株式会社で生産された煉瓦を「東京煉瓦」としてその品質を評価するために吸水率試験を行った⁴。近藤による試験の結果によると大正11年に製造された煉瓦の吸水率は並焼三等のもので18.17%、同二等は17.55%、そして同一等は16.48%と明治初期に製造された東洋組の煉瓦の吸水率と大差無い結果であった。このことから、明治初期の煉瓦である東洋組の煉瓦は製造された当初から物性値にはばらつきがあり、当時は国による規格値が存在していなかったため、吸水率が高いものや圧縮強度が低いものも建築材料として使用されていた可能性が考えられる。

(2) 元素分析

東洋組煉瓦において特徴性の有無を確認するために蛍光X線分析を行なった。蛍光X線分析法とは、蛍光X線を用いて非破壊で物質中に存在する元素の種類及び量を解析する方法である。測定にあたり、分析条件は管電圧を50kV、管電流を1mA、コリメーターを7mmに設定した。また測定雰囲気は真空とし、測定時間は300秒とした。また分析試料は、猿島砲台跡で採取された東洋組の煉瓦試料19点と、幕末期に製造されたと考えられる奄美大島出土の煉瓦試料51点の計70点である。

測定後、標準岩石JG-1aに対する強度比の結果から各元素間の散布図の作成を行った。散布図を作成した結果、東洋組煉瓦はK-Ca、Ca-Fe、Rb-Ca、Ca-Sr、

K-Rb、Rb-Sr の計 6 つの散布図 (図 2) において相関関係や傾向が見られた。特に 5 つの元素のうち Sr と Ca に着目したところ、猿島砲台跡出土の東洋組煉瓦は Sr の分布が強度比 1 以内にまとまった分布をしている一方で、Ca は強度比 1 以上と広範囲に分布する傾向が見られ、これは東洋組煉瓦の持つ特徴であると判断した。

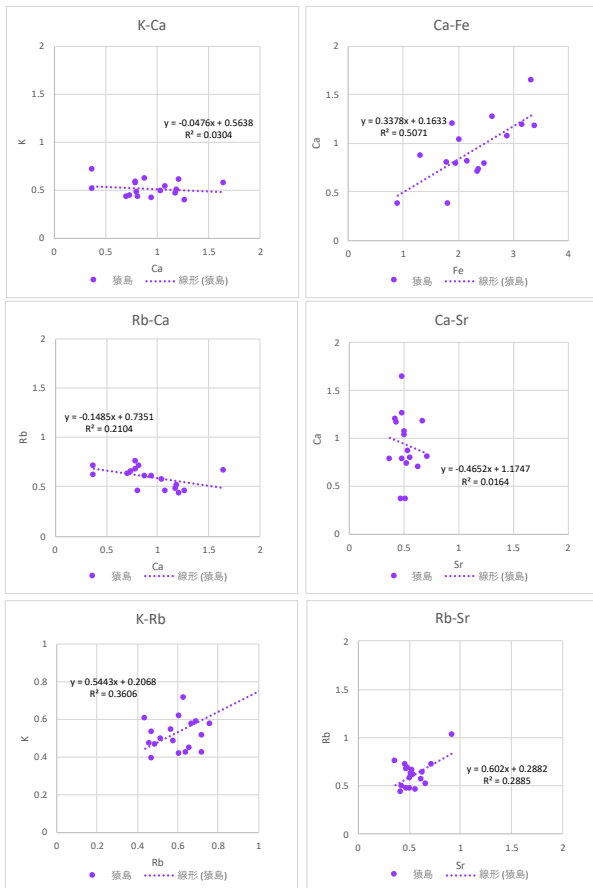


図 2 強度比の分布図

(3) 熱分析

蛍光 X 線分析に続き、東洋組煉瓦の物性における特徴を把握するために明治初期に製造されたと考えられている東洋組の普通煉瓦 1 点と、幕末に製造されたと考えられている奄美大島出土の耐火煉瓦と普通煉瓦 1 点ずつの計 3 点に対して熱重量測定 (TG) と示差熱分析 (DTA) を行った。TG 及び DTA における測定温度は 50°C~1000°C とし、加熱速度は 20°C/min と設定した。さらに、これらの熱分析を行う前後において煉瓦試料に含まれる物質の変化を見るために粉末 X 線回折 (XRD) を行った。

東洋組煉瓦試料の熱分析より得られた減量曲線及

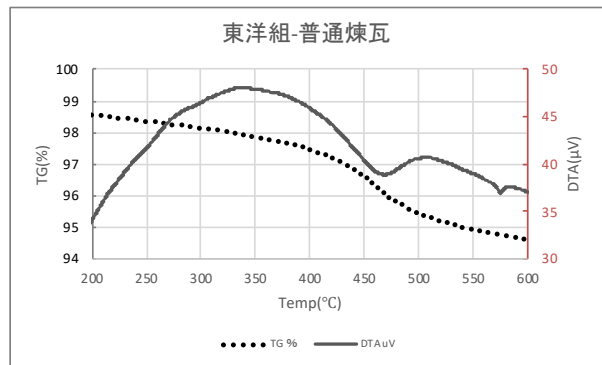


図 3 東洋組煉瓦分析結果

び DTA 曲線を図 3 に示す。図 3 より、東洋組煉瓦は DTA において 450°C~500°C、550°C~600°C 付近に吸熱反応がみられた。さらに熱分析の前後で行った XRD より得られた結果を比較したところ、東洋組煉瓦は熱分析の前後において検出される鉱物が異なることがわかった。熱分析前の検出物に雲母類が含まれていたが熱分析後は雲母類のピークは検出されなかった。このことから、DTA で見られた吸熱反応は雲母類に由来するものであることが考えられる。また熱分析を行う以前よりムライトの形成は見られなかった。このことから、東洋組煉瓦は焼成温度 900°C 以下で焼成された可能性が考えられるが、雲母類が消失したことや、450°C~600°C 付近に吸熱反応が見られたことから、煉瓦中心部分は焼成温度が 500°C にも達していなかったことが分かった。

3. 猿島砲台跡

(1) 遺跡の概要

猿島砲台は 1881 (明治 14) 年 11 月 5 日に起工して、1884 (明治 17) 年 6 月 30 日に竣工した沿岸砲台である。砲台が建設された猿島は横須賀新港沖より約 1.7km 地点に位置する。観音埼・富津元州砲台とともに日本で最も早く建設された沿岸砲台のため、竣工後に砲台の改廃や観測所など諸施設の増改築が行われ砲台としての諸機能が整備されていった⁵。遺跡内の煉瓦造構造物には塩類風化や煉瓦の崩落など煉瓦に見られる代表的な劣化が確認されている。



写真3 遺跡内の煉瓦造構造物

(2) 調査対象地

遺跡内に現存する煉瓦構造物の中で立地環境の異なる構造物3棟および屋外にて温湿度調査を行なった。調査の対象となった煉瓦構造物は第二砲台第一砲側弾薬庫(d3)、南側弾薬元庫1階(f1-3)及び2階(f1-2)である。また煉瓦構造物内では温湿度調査に加え、劣化の見られる壁面の一部にて崩落量の測定を行なった(写真4)。



写真4 崩落量測定

(3) 構造物内における劣化の進行と傾向

温湿度の測定は毎30分間隔で記録した。崩落量の測定は底面積が85cm²のトレーを1~3個煉瓦壁面に接するように設置して測定を行った。得られた崩落物は一定期間毎に回収し、実験室内にて計量を行った。また、崩落量は調査月において測定期間にばらつきがあるため、各調査期間における30日間の崩落量に換算して示した。

調査の結果、猿島砲台跡における煉瓦造構造物内の環境は外気よりも温度がやや低く、屋内の温度変動も小さいが、相対湿度は外気に比べて約20%高く、夏季に当たる6月~9月は相対湿度が約100%の状態が続く高湿な環境であることが分かった。

さらに相対湿度の月平均値の挙動(図4)と崩落量の挙動(図5)を比較したところ、構造物内の相対湿度が70%付近に低下する時期に崩落量も減少し、その後相対湿度が90%付近にまで上昇すると崩落量も増加する傾向が分かった。これらは、煉瓦の崩落が時期によって増減することを示している。このように、煉瓦の崩落と相対湿度には関係性が示唆されたことから、煉瓦の崩落は煉瓦造構造物内の相対湿度の影響を受けている可能性が考えられる。

しかし、猿島砲台跡の場合、全体の崩落量は他の遺跡における事例と比較して少なく、崩落物の大きさ次第で大きく崩落量が増えることがわかったため、本調査で得られた崩落量のデータは崩落量に関して十分に考察できるデータであるとは断言できず、継続的な調査が必要である。

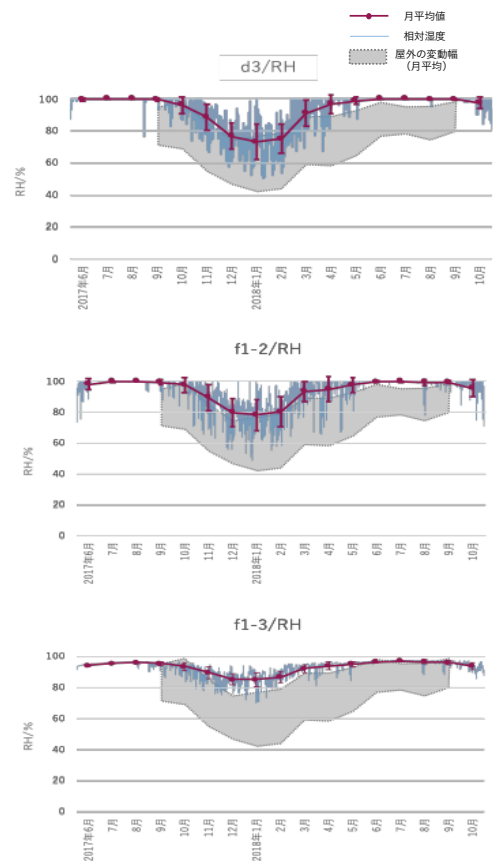


図4 相対湿度の挙動

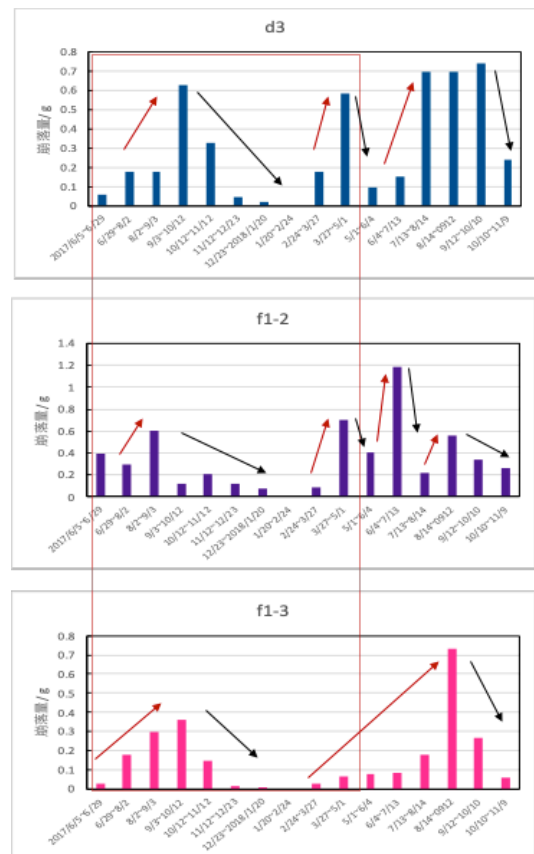


図5 崩落量の挙動

4. 東洋組煉瓦の劣化要因の解明

(1) 崩落物に含まれる物質の同定

2017年6月より行っている崩落量の計測において各時期に採取された崩落物の中にはどのような物質が含まれているのかを探るために粉末X線回折(XRD)による分析を行った。測定条件は対陰極をCuとし、管電圧を40kV、管電流は40mAに設定した。また測定範囲は 5° ~ 90° 、測定速度は0.1 sec/stepにて6000ステップとした。

崩落物からは煉瓦を構成する鉱物と、いくつかの塩類が検出された。煉瓦を構成する鉱物として、主に長石類や雲母類が含まれているということがわかった。さらにこれらの鉱物の他にカオリナイトといった粘土鉱物も一部の崩落物には含まれていることがわかった。

検出された塩類に関してさらに具体的に述べる。まずd3地点では2017年6月~12月にかけて石灰岩の主成分であり水に対して難溶性のCalcite(CaCO_3)が検出され、12月にはThenardite(Na_2SO_4)とMirabilite($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)が壁面に析出し(写真5)、その後2018年4月まで検出された。ThenarditeとMirabiliteはともに硫酸ナトリウム塩であり、水に対して可溶性の塩類として知られる。また、さらに2月以降はこれらの他に水に可溶性のSylvite(KCl)やEpsomite($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)が崩落物に含まれていた。f1-2地点では調査開始期から水に難溶性のGypsum($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)またはCalciteが検出されていたが、3月末以降、ここでもThenardite、Sylvite、Epsomiteが検出された。そしてf1-3地点では主にGypsumとCalciteが検出された。5月にはこの2種類の塩類に加え他の地点でも検出されたEpsomiteが崩落物内に含まれていた。

このように猿島では時期によって異なる塩類が析出することが分かった。そして、これらの塩類は温湿度変化に伴い析出と潮解を繰り返すことで煉瓦の崩落を誘発していると考えられる。特にGypsumまたはCalciteは調査開始期の2017年6月から2018年5月に至るまで常に検出されている。これらの塩類は高湿な環境下に存在する塩類であることが知られており、弾薬庫内の湿度が100%付近に達すると煉瓦内に潮解し煉瓦の脆弱化を招く。その後弾薬庫内が



写真5 塩類の析出

乾燥することで崩落が生じると考える。

さらに、崩落量の挙動と崩落物より検出された塩類の種類を併せて見たところ、2018年3月27日~5月1日の期間におけるd3地点とf1-2地点の崩落量が急増しているが、この期間の崩落物からはSylviteとEpsomiteが両地点で検出された。特にEpsomiteに関してはこれまでの研究において破壊力が大きいということが分かっている⁶ため、多種の塩類の中でもこの2種類の塩類が特に崩落に影響を与えている可能性が考えられる。しかし、現時点においてこれらの塩類が生成される由来が何であるのか突き止めていないことが現状であり、今後の調査として塩類の生成由来の解明につながる調査方法を講じる必要がある。

(2) 煉瓦壁面の水分率分布

次に煉瓦の水分率と崩落において関係性の有無を確認するために、煉瓦壁面における水分率の分布状況調査を行なった。調査の対象とした壁面は、d3地点北面の一部(高さ110cm×幅260cm)とf1-2地点東面の一部(高さ104.5cm×幅245cm)である(写真6,7)。



写真6 d3地点北面測定範囲

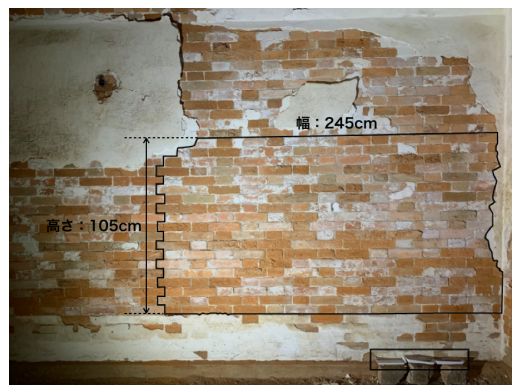


写真7 f1-2地点東面測定範囲

測定は、調査対象の壁面における煉瓦一点ずつの表面に水分計を押し当てて測定を行なった。また測定回数は2018年8月、10月、11月、12月に一回ずつ行い、全部で計4回である。

測定の結果、d3地点は8月から12月にかけて壁面全体における水分率の変化はほとんど見られなかったが、水分率の高低差が80%以上あることが分かった。f1-2地点では8月の測定時に比べ、10月及び11月の壁面全体の水分率が上昇傾向にあることが分かった。このことは、表1からも読み取ることができる。特に11月時点では、測定範囲の壁面のうち約半数の煉瓦が水分率17%以上であった。また、f1-2地点の壁面における煉瓦の水分率は低いものと高いものでその差は最大90%以上あるということが分かった。

さらに、f1-2地点において水分率の挙動が見られる箇所とそうでない箇所における煉瓦の目視観察を行った。前者の煉瓦は表面に粉状化が確認され、煉瓦表面に触れると粉状化している部分が粉状となって崩落する状態であった。次に後者の煉瓦を観察したところ、煉瓦表面に薄く漆喰が残っている状態であり、前者の煉瓦に比べ、表面に触れても崩落することはなく、激しい劣化や粉状化は確認されなかった。

表1 水分率17%以上の煉瓦の個数と割合

	d3		f1-2	
	個数	割合/%	個数	割合/%
8月	8	3.1	43	16.2
10月	13	5.1	96	36.1
11月	12	4.7	134	50.4
12月	12	4.7	107	40.2

これらの結果から、明治初期の煉瓦により構成された壁面における煉瓦の水分率すなわち煉瓦が含む水分量にはばらつきがあると言える。また時期によって水分量に変動が見られ、かつ水分量の高い煉瓦は劣化が進行している可能性が考えられる。

(3) 遺跡内に見られる漏水の陰イオン分析

煉瓦表面及び煉瓦の崩落物に塩類が含まれていることから、塩類の起源を探るために隧道内に見られる漏水が塩類の起源であると考え、漏水の陰イオン分析を行った。

分析の結果、隧道内の漏水からは塩化物イオン

(Cl⁻)と硫酸イオン(SO₄²⁻)が検出された。しかし、いずれも積極的に塩類を引き起こす程の濃度ではなかったため、現時点においては塩類の由来でないと考えるが、今後イオン濃度が上昇する可能性も考えられるため、継続的な水質のモニタリング調査が必要である。

5. おわりに

本研究より、明治初期の煉瓦である東洋組煉瓦は吸水率が14.7~19.8%の範囲に分布し、圧縮強度は2.8~17.6N/mm²の範囲に分布することが明らかとなった。また、熱分析の結果からは東洋組煉瓦は900℃以下で焼成されたと考えられるが、煉瓦中心部分は500℃未満と十分に焼成されていなかった煉瓦が存在していた可能性が高い。そのため煉瓦壁面における水分量のばらつきや時期による変動があったことが考えられる。また、現地調査では水分量の変動する煉瓦は劣化の進行が見受けられたことや、時期によって異なる種の塩類が崩落物に含まれていたこと、またその内SylviteとEpsomiteが崩落に影響を与えている可能性があることが分かった。しかし、塩類の起源を解明することには至らず、またこれらは環境による影響を受けている可能性も十分に考えられる。その為、今後は環境のことも考慮しつつ解明につながる調査を行う必要がある。

煉瓦造文化財の様々な活用方法がなされている現在、構造物や建造物としてだけでなく、煉瓦表面の美しさや煉瓦組積に見る意匠性までも長期にわたり保存すべき段階である。本研究より得られた明治初期というこれまでほとんど明らかにされてこなかった煉瓦の物性に関する知見はこれからの煉瓦の保存について新たな方法を見出すための重要なデータになることが期待できる。

- 1) 東京文化財研究所：未来につながる人類の技⑩ 煉瓦造建造物の保存と修復、東京文化財研究所、p.7、2017
- 2) 朽津信明、早川典子：文化財の保存を目的とした煉瓦の樹脂処理効果に関する研究、保存科学(40)、pp.35-46、2001
- 3) 水野信太郎：東洋組創立とその技術の系譜(国産煉瓦製造史の研究1)、日本建築学会大会学術講演梗概集 計画系(59)、pp.2729-2730、1984
- 4) 近藤清治：普通煉瓦の組織、大日本窯業協会雑誌(370)、p.283-291、1923
- 5) 横須賀市教育委員会：横須賀市文化財調査報告書 第51集 東京湾要塞跡 猿島砲台跡 千代ヶ崎砲台跡、横須賀市教育委員会、2014
- 6) GOUDIE, A. S : Laboratory simulation of 'the wick effect' in salt weathering of rock, Earth Surface Processes and Landforms, Vol. 11, pp.275-285, 1986