

明治期の煉瓦造の文化財にみられる特性と保存方法に関する研究

A Study on the Characteristic and Conservation Methods of Brick Cultural Properties  
of the Meiji Period

筑波大学大学院 人間総合科学研究科  
世界文化遺産学専攻 博士後期課程 3年  
201930522 深見 利佐子

# 目次

## 第1章 序論

第1節 研究背景	3
第2節 既往研究	7
第3節 研究目的	9
第4節 論文構成	10

## 第2章 歴史的煉瓦のキャラクター化

第1節 東洋組煉瓦	15
第2節 小菅集治監製煉瓦	16
第3節 シャトーカミヤ旧醸造場施設にて使用された煉瓦	16
第4節 吸水率試験及び圧縮強度試験	17
第5節 熱分析	25
第6節 物性の違いが煉瓦の劣化に与える影響	31

## 第3章 長期的な現地調査による劣化の現状把握と要因の特定

第1節 猿島砲台跡	34
第2節 猿島砲台跡の煉瓦に見られる劣化の現状と要因	35
第3節 東洋組煉瓦に含まれる塩類の起源の解明	47
第4節 煉瓦壁面の水分率変動がもたらす劣化への影響	50

## 第4章 電気化学的脱塩工法を用いた煉瓦の脱塩

第1節 電気化学的脱塩 (ED)	63
第2節 銅板を用いた ED 試験	64
第3節 炭素棒を用いた ED 試験	74
第4節 ED 試験後の試験体暴露試験	78
第5節 ED 処理後における試験体の水の吸い上げ試験	84

## 第5章 総括

参考文献	94
------	----

付録	99
----	----

# 第 1 章

## 序論

## 第1章 序論

### 第1節 研究背景

近年、日本では近代化遺産として煉瓦造の文化財が注目を浴びている。日本における近代化遺産とは幕末(1853～1869)から第二次世界大戦期にかけての間に建設され、日本の近代化に貢献した産業・交通・土木に係る建造物を指す<sup>1</sup>。近代化遺産は日本の近代化の歴史や文化を理解する上で大事な文化財である。1978年にポーランドの「ヴィエリチカ・ボフニア王立岩塩坑」がユネスコ世界文化遺産に登録されて以降、世界中で近代化遺産や産業遺産の世界文化遺産登録が続いた。日本においては2014年に「富岡製糸場と絹産業遺産群」が、2015年にはいくつかの地域にまたがった23の構成資産からなる「明治日本の産業革命遺産」が世界文化遺産に登録された<sup>2</sup>。このようにいくつかの近代化遺産がユネスコ世界文化遺産に登録されたことをきっかけに、日本国内においても人々の近代化遺産に対する関心は高まっていることが考えられる。現在、国内には近代に建設された建造物389件が国宝または重要文化財として指定されている(2022年5月25日時点)。近代化遺産の多くは煉瓦造やコンクリート造の建造物や構造物であるが、2017年に東京文化財研究所によって行われた近代化遺産に関する調査では重要文化財に指定されている近代に関する建造物のうち非木造の近代化遺産は230件であり、そのうち煉瓦造の文化財は71件と全体の約3割を占め、構造別に見ると煉瓦造の数が最も多いことが報告されている<sup>3</sup>(表1.1)。さらに1990年代以降には、昭和期に建設された煉瓦造建造物や一部煉瓦が使用されている文化財も登録有形文化財として次々に登録されており、煉瓦造建造物や構造物の

表 1.1 非木造の近代化遺産の件数 (東京文化財研究所 2017 より著者一部改変)

構造	件数
煉瓦造	71
(鉄筋)コンクリート造	52
石造	30
鉄骨造	19
その他(混構造等)	58
合計	230

<sup>1</sup> 文化庁、「登録の日」「近代化遺産の日」と一斉公開事業」、文化庁、2022年5月、<https://www.bunka.go.jp/seisaku/bunkazai/hogofukyu/koukai/index.html#:~:text=%E8%BF%91%E4%BB%A3%E5%8C%96%E9%81%BA%E7%94%A3%E3%81%A8%E3%81%AF,%E3%81%AB%E4%BF%82%E3%82%8B%E5%BB%BA%E9%80%A0%E7%89%A9%E3%81%A7%E3%81%99%E3%80%82> (閲覧日:2022/05/27)

<sup>2</sup> 上代庸平、野口健格、林晃大、「欧州における産業遺産の保存と利活用のための法制度」、武蔵野法学、vol.12, pp.202-165, 2020

<sup>3</sup> 東京文化財研究所、「未来につなぐ人類の技⑩ 煉瓦造建造物の保存と修復」、2017

登録件数は今後さらに増加していくことが予想される。

煉瓦が日本国内に流通し始める時期は 1850 年代から 1860 年代にかけてであると考えられており、これら国内にもたらされた煉瓦はのちに国内で生産されるようになった。そして明治時代を中心に日本の近代化の象徴として多くの煉瓦造建造物や構造物が国内各地に建設された。しかし 1923 年に発生した関東大震災によってそれらの多くは倒壊してしまったため、1923 年の震災以降は地震が頻繁に発生する日本において耐震上に問題があるとして、煉瓦が建造物の構造体として使用されることはほとんどなくなった。そのため、日本で残存する 1923 年以前の煉瓦造建造物や構造物は非常に貴重であり、意匠的または技術的に優秀であると認められている。そのため、それらが有する学術的価値や歴史的価値は高いと言える。

近年ではこれら煉瓦造の文化財を保存するだけに留まらず、積極的に活用する動きが見られるようになった。たとえば世界文化遺産に登録されている富岡製糸場(国宝)の西置繭所では1階にハウスインハウス手法という新しい手法を用いた多目的ホールとギャラリーが整備された(図 1.1)。この手法は耐震補強用の鉄骨を骨組みとして活用し、壁と天井をガラスにすることで中にいながらガラス越しに煉瓦造建造物を体感することができる<sup>4</sup>ものである。整備された多目的ホールは有料で貸出しされており、ユニークベニューとして多くの人々に活用されていくことが期待される。



図 1.1 西置繭所内の多目的ホール (著者撮影)

<sup>4</sup> 富岡市、「世界遺産富岡製糸場」、しるくるとみおかー富岡市観光ホームページ、2022 年 5 月、<http://www.tomioka-silk.jp/tomioka-silk-mill/preserve/> (閲覧日：2022/05/24)

このように煉瓦造の文化財は今後も活用が活発になることが予測され、活用形態も多様化することが考えられる。その一方で煉瓦造の文化財は現在、老朽化に伴う耐震性の問題や、屋外にさらされている場合が多いため、周辺環境(特に水分)の影響により塩類風化などによる煉瓦自体の劣化(図 1.2)が日本国内各地で報告されている。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。しかし、煉瓦の劣化に対しては、保存処置方法は試験段階であり未確立である。また保存処置を行うにあたり明治期の煉瓦の物性を明確にすることや遺跡がおかれている環境を把握するための長期的な現況調査を行う必要がある。しかし、これまでに明治期に国内製造された煉瓦の物性に関しては殆ど言及されてこなかった。また実際の遺跡における劣化状況に関する報告や数年にわたる実測データも少なく、長期間の温湿度変動や塩類風化に影響を与えている要因の一つとされている煉瓦内の水分状況やその挙動は不明瞭であることが現状である。



図 1.2 劣化した煉瓦表面 (著者撮影)

## 第2節 既往研究

水野信太郎によると煉瓦の歴史は古代に遡り、古代エジプトとメソポタミアで建築材料として初めて日干し煉瓦が誕生したと考えられている。しかし日本国内で煉瓦の使用が確認されているのは幕末以降であり、明治期の近代化に伴い多くの煉瓦造建造物や構造物が全国各地に建設された<sup>5</sup>。そのため煉瓦造の建造物は日本の近代化を象徴するものであると広く認識されている。国内における煉瓦製造に関して水野によりまとめられたものによると、幕末から明治 10 年代にかけて生産された初期の国産煉瓦の多くは手抜き技法と呼ばれる方法で成形され、登り窯またはだるま窯で薪を燃料として焼成されていたことが判明している。手抜き技法とは、型枠の中に粘土素地を入れて成形する型抜きによる技法であり、手作業によって個別に作る方法を指す。明治 20 年以降は機械による成形法や長時間窯内の温度を高温に保つことが可能なホフマン窯が導入されるようになった。ホフマン窯の燃料は石炭を使用するため、これまで使用されていた薪よりも高温が得られたとされている。そして、この新たな技術が導入されたことで一度に大量の良質な煉瓦の生産が可能となった(水野 1999)。

近代の文化遺産である煉瓦造の文化財が人々の関心を集めていると同時に、それらの文化財を保存するだけでなく、遺産の特性に応じて多様に活用することも求められている。しかし、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。東京文化財研究所が作成した煉瓦造建造物の保存と修復に関する書籍によると、煉瓦に見られる劣化の主な要因は水分の侵入であると考えられ、水分の侵入に起因する劣化は 5 つに分類される(東京文化財研究所 2017)(表 1.2)。

表 1.2 劣化の種類 (東京文化財研究所 2017 より著者作成)

劣化要因	劣化の種類	劣化の症状
水分の侵入	1. 塩類風化	剥離・粉状化
	2. 凍結破砕	亀裂
	3. 生物劣化	亀裂・汚損
	4. 白華	汚損
	5. 腐食劣化	亀裂

<sup>5</sup> 水野信太郎 1999 『日本煉瓦史の研究』法政大学出版局：東京

これらの中でも塩類風化と凍結破砕による劣化の事例報告が多く見受けられる。例えば、重要文化財であり煉瓦期の煉瓦が使用されている碓氷峠鉄道施設では塩類の析出や凍結破砕などによる煉瓦の崩落が報告されている<sup>6</sup>。また類似した劣化は国内の文化財のみならず、海外の文化遺産においても確認されている。長谷川によるとタイのアユタヤ遺跡では降雨や日射などの環境外力や塩類風化により煉瓦そのものが風化したことで、仏塔の形が大きく変形したことが報告されている<sup>7</sup>。またカンボジアのサンポー・プレイ・クック遺跡群の煉瓦造建造物では朴による劣化状況の調査が実施され、塩類風化や粉状化が深刻な状況であることが報告されている<sup>8</sup>。

煉瓦造の文化財にみられる劣化や保存・修復をテーマとした研究は 1990 年代後半より開始される。この背景には 1990 年に文化庁による近代化遺産に関する全国調査が実施されたことが挙げられる。そして 2000 年以降に突入すると煉瓦に関する研究はさらに活発に行われるようになった。これまでの研究では煉瓦造の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ものが多く見受けられた。煉瓦造の文化財にみられる劣化やその発生メカニズムに関する研究において朽津は、文化財としての煉瓦が物理的に風化する要因としては、乾湿の繰り返しや熱による膨張収縮、さらには生物に関係した現象なども観察される場合があるが、焼成煉瓦に限定すれば、塩類風化と凍結破砕の問題が特に大きい<sup>9</sup>と述べている。塩類風化とは塩類の析出に伴って物質が物理的に破壊される現象のことであり、析出する塩類は煉瓦の原料や供給される水、周辺の土壌、また大気汚染物質などから起因していることが多い<sup>10</sup>。塩類風化は煉瓦内における水の挙動と密接に関係していることが指摘されているが、石崎らによると煉瓦の含水率分布は非破壊で測定することが非常に難しく、数値解析手法によって含水率の分布を求める方法を提案している<sup>11</sup>。非破壊による煉瓦壁体の含水率分布の測定は困難であるとされている一方で、佐々木らは熱画像を用いることで含水率と劣化に関係性があるということを証明している<sup>12</sup>。このように煉瓦造の文化財にみられる劣化現象やそのメカニズム、調査・分析方法に関する研究は活発に行われてきた。

国内における煉瓦の劣化に対する保存処理に関して朽津・早川らによって煉瓦の水分特性をコント

<sup>6</sup> 朽津信明、森井順之 2004 「O-242 碓氷峠鉄道施設における煉瓦の塩類風化と凍結破砕の比較(30. 応用地質学一般)」『日本地質学会学術大会講演要旨』p.146

<sup>7</sup> 長谷川哲也、畑中重光、PRINYA Chindapasirt、THANUDKIJ Chareerat 2006 「タイ国アユタヤ遺跡の劣化調査と修復方法の提案」『日本建築士学会 2006 年大会学術講演会』p.191-194

<sup>8</sup> 朴東熙 2015 『クメール煉瓦造遺構の修復技術に関する研究』早稲田大学、博士論文

<sup>9</sup> 朽津信明 2005 「文化財材料としての煉瓦の劣化」『マテリアルライフ学会誌』17(1)

<sup>10</sup> Chiraporn . A 2001 Salt weathering of monumental building materials in Thailand, 平成 10 年度～平成 12 年度科学研究費補助金 研究成果報告書 タイ国・アユタヤ遺跡の保存修復に関する研究

<sup>11</sup> 石崎武志、朽津信明、西浦忠輝、青木繁夫 2005 「タイの歴史的レンガ建造物の保存に関する研究」『土と基礎』566, 53 (3)

<sup>12</sup> 佐々木淑美、吉田直人、小椋大輔、安福勝、水谷悦子、石崎武志 2015 「ハギア・ソフィア大聖堂をはじめとした歴史的建築物の内壁の劣化と材料に関する調査」『保存科学』54, p.215-226

ロールするために合成樹脂による処理が提案され、重要文化財である旧下野煉瓦製造会社煉瓦窯における実践的研究では処理を施した箇所において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。しかし、文化財の置かれる環境によっては逆効果が見られる場合もあるということが指摘されている。そのため文化財の置かれている環境を正確に把握し、他の対策も合わせた総合的な保存対策の一環として行うべきであることが主張されている<sup>13</sup>。その他にも相川による浸透性コーティング剤を用いた煉瓦の処理が試みられ、塩類風化の抑制に効果が見られたことが報告されている<sup>14</sup>。一方、国外では通電による煉瓦の脱塩による保存処理方法が研究されており、2007年に Lisbeth M. Ottosen らによる硝酸塩と塩化物を対象とした煉瓦の電気化学的脱塩試験 (ED: Electrochemical Desalination) が行われた。さらに 2013 年には J.M. Paz-Garcia らによって類似した方法での煉瓦の脱塩試験が行われた。これらの試験によると、塩化物や硝酸塩は ED によって約 99% 煉瓦内より除去できるという結果が報告された。一方で硫酸塩の除去速度は塩化物や硝酸塩に比べるとかなり遅く、さらに除去率は 8 日間以下の通電(2.22A m<sup>-2</sup>)で 89%にとどまったと報告されている<sup>15,16,17</sup>。しかし、これらの方法も未だ試験段階であり、実装化までには至っていない。このように煉瓦の劣化現象に関する研究は十分に行われてきた一方でそれら劣化に対する処理方法や対策に関する研究は不十分であると言える。今後、煉瓦造の文化財が多様な方法で活発に活用されることが予想されるが、文化財の活用に伴って劣化が進行している煉瓦への早急な対策が求められる。そのためには煉瓦の保存や劣化対策に関してより活発に議論が行われるべきであり、この歴史的な煉瓦に対する保存方法の未確立という現状は日本の煉瓦造の文化財保存における課題の一つであると言える。

### 第3節 研究目的

煉瓦造の文化財は煉瓦の組積が生み出す美しさで人々を魅了させるだけでなく、日本の幕末から明治期への移り変わり、そしてそれに伴って進められた国内の近代化や産業の発展を現代に伝える情報を多く含んでいる。さらに現存している明治期に建設された煉瓦造建造物や構造物は煉瓦が日本国内にもたらされて建築資材としての使用が減衰する約 70 年間という限られた期間に建設されたものであり、

<sup>13</sup> 朽津信明、早川典子 2001 「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, p.35-46

<sup>14</sup> 相川悠, "煉瓦の吸水放湿特性にみる塩の影響及び保存修復材料の検討," (修士論文, 筑波大学大学院, 2013).

<sup>15</sup> L. M. Ottosen, A. J. Pedersen, and I. Rørig-Dalgaard, "Salt-Related Problems in Brick Masonry and Electrokinetic Removal of Salts," *Journal of Building Appraisal*, vol. 3, no.3, pp. 181-194, 2007, doi:10.1057/PALGRAVE.JBA.2950074/FIGURES/9

<sup>16</sup> Paz-García, J.M., B. Johannesson, L.M. Ottosen, A.B. Ribeiro, and J.M. Rodríguez-Maroto, "Simulation-Based Analysis of the Differences in the Removal Rate of Chlorides, Nitrates and Sulfates by Electrokinetic Desalination Treatments," *Electrochimica Acta*, vol. 89, pp. 436-444, 2013, doi:10.1016/j.electacta.2012.11.087.

<sup>17</sup> S. Gry, L. M. Ottosen, P. E. Jensen, and J. M. Paz-Garcia, "Electrochemical Desalination of Bricks – Experimental and Modeling," *Electrochimica Acta*, vol. 181, pp.24-30, 2015, doi:10.1016/j.electacta.2015.03.041.

それらは高い歴史的価値や美術的価値を有していると言える。また先述したように産業や近代化に焦点を当てた文化遺産が注目を浴びていることから、今後さらに多くの煉瓦造の建造物や遺構が文化財として指定、登録され、これに伴い多様な形態で活用されることが予想される。しかし煉瓦造の文化財は屋外にさらされている場合が多く、先述したとおり周辺環境の影響により塩類風化などの劣化が日本国内各地で報告されている。さらに今後さまざまな活用形態で文化財が活用されることで煉瓦の劣化リスクや劣化速度の上昇につながる可能性も考えられる。この課題に対し、煉瓦の保存処理方法を検討するためにはまず明治期に製造された煉瓦の物性を把握する必要がある。そして遺跡での現況調査を行うことで劣化状況を詳しく把握し、その要因を明確にすることが不可欠である。また煉瓦造の文化財は、劣化の進行だけでなく、煉瓦造の文化財に関する専門家不足や文化財を管理する自治体や団体の人員不足、保存を行うための予算不足などの課題をも抱えている。そのため、煉瓦造の文化財に対する保存方法として、より簡易的に扱うことができ、かつ低予算で効果的な方法が求められている。

そこで本研究では日本国内で煉瓦の規格化が行われる 1925 年(大正14年)以前の煉瓦を「歴史的煉瓦」と位置づけ、文化財保存科学の視点から歴史的煉瓦の特性を明確にし、遺跡における歴史的煉瓦の劣化状況及びその挙動と要因を明らかにする。その上で劣化を抑制させる対策方法の一つとして電気化学的脱塩工法を用いた脱塩方法の提案と開発を目的とした。

#### 第4節 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た歴史的煉瓦のキャラクター化を明らかにする。歴史的煉瓦資料として、東洋組煉瓦、小菅集治監製煉瓦、牛久シャトーで使用された煉瓦を用いた。分析方法には、吸水率及び圧縮強度試験、熱分析(TG 及び DTA)を用いた。さらに上記の煉瓦資料に加えて JES 規格が制定された後に製造された大正期の煉瓦及び昭和期の煉瓦の物性に関する情報を各遺跡の報告書より抽出し、歴史的煉瓦の特性について検討した。次に第3章では、第2章で得られた歴史的煉瓦の物性を把握した上で、分析した煉瓦の一つである東洋組煉瓦が用いられている猿島砲台跡にて現況調査を行い、煉瓦構造物内環境の挙動や劣化状況を詳しく把握し、劣化要因の解明をおこなった。調査方法は煉瓦構造物内における温湿度調査、崩落物測定及び粉末 X 線回折分析(XRD)による崩落物の同定、そして煉瓦壁面の水分率測定を実施した。また第2章で得られた煉瓦の物性と実際の遺跡での劣化状況に関係性が見られるのか検討を行った。続く第4章では煉瓦に見られる代表的な劣化である塩類風化に対する劣化を抑制させる方法として電気化学的脱塩工法を用いた煉瓦の脱塩モデルの作成を行い、いくつかの異なる通電条件下における脱塩試験を通して脱塩効果の検討を行った。脱塩モデルは歴史的煉瓦の物性を考慮した上で電極に銅板、炭素、セルロースとい

った入手しやすくかつ安価な素材を採用した。そして最後にこれまでの調査及び試験結果から総合的に考察を行い、第5章にて本研究の結論を述べ、得られた知見と今後の課題の抽出を行った。

## 第2章

### 明治期に製造された煉瓦のキャラクターゼーション

## 第2章 明治期に製造された煉瓦のキャラクターゼーション

日本国内における煉瓦生産の開始は幕末に遡り、外国人技師によって伝来したと考えられている。明治期に入ると国産煉瓦は灯台や外国人居留地の建築、下水等の施設、官営工場などに多用されるようになり、明治 10 年代には全国各地において煉瓦生産が展開するようになる<sup>18</sup>。これら幕末から明治 10 年代にかけて生産された初期の国産煉瓦の多くは手抜き技法と呼ばれる方法で成形され、登り窯またはだるま窯で薪を燃料として焼成されていたことが判明している。手抜き技法とは、型枠の中に粘土素地を入れて成形する型抜きによる技法であり、手作業によって個別に作る方法を指す。明治 20 年以降は機械による成形法や長時間窯内の温度を高温に保つことが可能なホフマン窯(図 2.1)が導入されるようになった。ホフマン窯の燃料は石炭を使用するため、これまで使用されていた薪よりも高温が得られたとされている。そして、これらの新たな技術が導入されたことで一度に大量の良質な煉瓦の生産が可能となった。このように同じ明治期においても時期によって煉瓦の製造方法が異なり、それに伴って煉瓦の品質や物性は異なっていることが考えられる。さらに、1925(大正 14)年には煉瓦製造に関して規格化、標準化が本格的に始まり、日本工業規格(JES: Japanese Engineering Standard)が制定されたことで、規格を満たした煉瓦のみが建築材として使用されていった。その後は日本産業規格(JIS: Japanese Industrial Standard)として改訂され、現在は煉瓦に関する規格は JIS R 1250 として定められている(表 2.1)。

表 2.1 日本国内における標準規格

年	規格	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	吸水率 (%)
大正 14 (1925) 年	JES 規格 <sup>19</sup> (Japanese Engineering Standard)	上焼 150kg/cm <sup>2</sup> (14.7N/mm <sup>2</sup> )	14%以下
		並焼 100kg/cm <sup>2</sup> (9.8N/mm <sup>2</sup> )	18%以下
昭和 26 (1951) 年	JIS 規格 <sup>20</sup> (Japanese Industrial Standard)	上焼 150kg/cm <sup>2</sup> (14.7N/mm <sup>2</sup> )	20%以下
		並焼 100kg/cm <sup>2</sup> (9.8N/mm <sup>2</sup> )	23%以下
平成 23 (2011) 年	JIS R 1250 <sup>21</sup>	2 種 15N/mm <sup>2</sup>	15%以下
		3 種 20N/mm <sup>2</sup>	13%以下
		4 種 30N/mm <sup>2</sup>	10%以下

<sup>18</sup> 斎藤進、“考古学が語る日本の近現代”、同成社:東京、2007

<sup>19</sup> 永井彰一郎 1931「獨逸に於ける窯業製品の工業規格に就て(其一)」『大日本窯業協會雑誌』39(460), p.240-246

<sup>20</sup> 日本煉瓦製造株式会社社史編集委員会編 1990『日本煉瓦 100 年史』日本煉瓦製造株式会社

<sup>21</sup> JIS R 1250:2011 普通れんが及び化粧れんが (HP: [kikakurui.com/r1/R1250-2011-01.html](http://kikakurui.com/r1/R1250-2011-01.html))

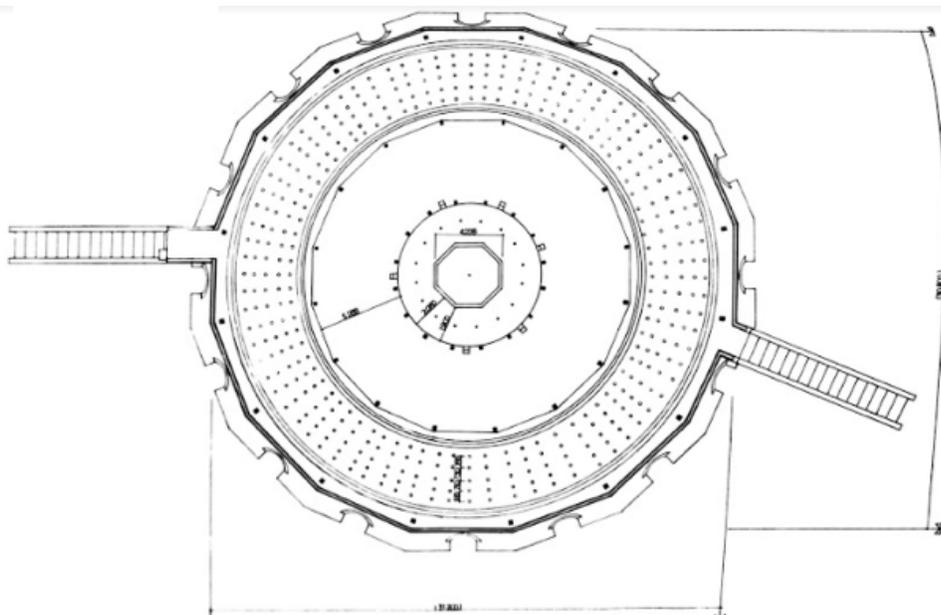
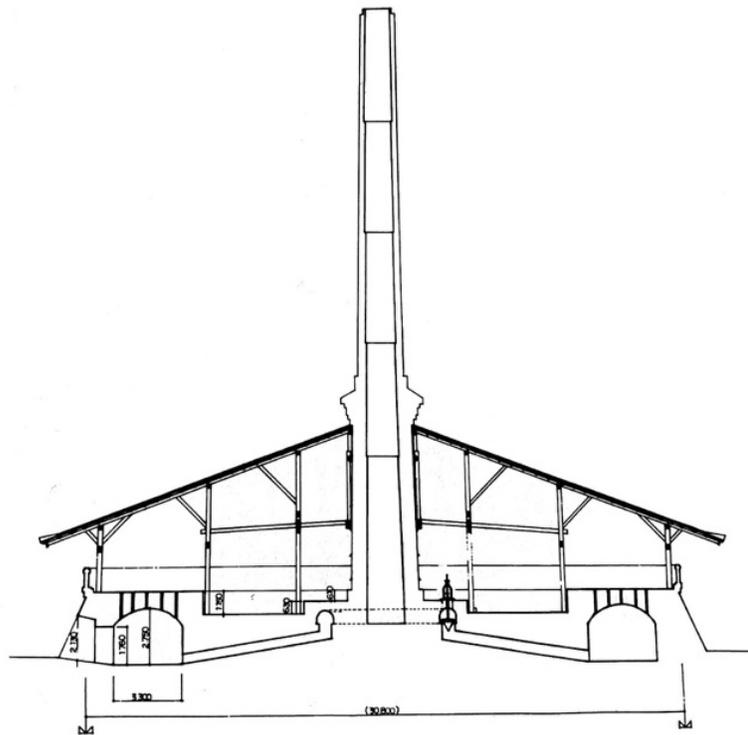


図 2.1 ホフマン窯 上：断面図 下：2階平面図（旧下野煉瓦製造会社）  
（水野 1999 より引用）

これまで歴史的煉瓦の研究では煉瓦の寸法に関する区分や調査が活発に行われてきた。石田らによる研究では明治 20 年以降に機械による煉瓦の大量製造が開始されるまでは建造物に合わせた寸法で煉瓦が製造されていた可能性が高く、建造物ごとに煉瓦寸法は異なることが指摘されている<sup>22</sup>。明治期に煉瓦の製造方法が大きく転換するが、当時の煉瓦の物性や特徴に関する研究は少なく、不明瞭であることが現状だ。しかし、歴史的煉瓦の物性を把握することは煉瓦の保存方法を検討する際に必要不可欠なことである。そこで本章では、自然科学的手法による歴史的煉瓦の物性調査を行い、煉瓦構造物の用途や製造元、製造された年代などを併せて考察することで規格化される以前の特に明治期の煉瓦の特性を把握し、煉瓦保存のための知見を得ることを目的とした。物性試験には歴史的煉瓦に区分される東洋組煉瓦、小菅集治監製煉瓦、シャトーカミヤ旧醸造場施設で使用された煉瓦、そして昭和期に製造されたと考えられる添川瓦工場窯跡出土の煉瓦を用いた。まず第 1 節から第 3 節にかけて物性試験に使用した各煉瓦について述べ、その後 4 節から 5 節において物性試験で得られた結果及び考察を行った。

## 第1節 東洋組煉瓦

東洋組煉瓦は 1882(明治 15)年ごろに愛知県において創立し、明治新体制により生活に困窮していた士族たちの授産事業の一環として煉瓦やセメントなどを含む建築材料用窯業製品製造を行ったことで知られている。水野信太郎によると東洋組は創立時、西尾分局、刈谷分局、田原分局、岡崎分局の4つの分局に分かれており、その中でも西尾分局と刈谷分局が煉瓦工場として機能していた。東洋組の煉瓦製造技術は同時期に煉瓦製造を行っていた東京小菅集治監の技師らにより直接伝えられ、具体的な煉瓦製造方法は、地元で入手できる粘土を原料とし、手抜き技法により成形されていたと報告されている。煉瓦を焼成した窯は登り窯とだるま窯の2種類の窯が使用され、窯の燃料は松の薪を用いていたと考えられている<sup>23</sup>。また横須賀市の調査報告<sup>24</sup>によると、これまでに出土している東洋組煉瓦の大きさは小口 108～115mm×57～61mm、長手 223～227mm の範囲に分布し、総じてにぶい橙色の色調を呈している。これら東洋組で製造された煉瓦には「東洋組西尾分局士族就産所」の刻印が押捺されており、視覚的に東洋組の煉瓦と区別することができる。煉瓦の種類には普通煉瓦の他に耐火煉瓦や焼

---

<sup>22</sup> 石田真弥、関崇夫、“煉瓦寸法の変遷と組積技術の関連性に関する研究”，*前橋工科大学研究紀要*, vol.22, pp.13-22, 2019

<sup>23</sup> 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*, vol.59, pp.2729-2730, 1984

<sup>24</sup> 横須賀市 横須賀市埋蔵文化財調査報告書第9集 猿島遺跡群(猿島遺跡・猿島洞穴・猿島台場跡・猿島砲台跡), 2002

過煉瓦など様々な種類の煉瓦が存在するが、本研究で試験体として扱った東洋組煉瓦は全て普通煉瓦である。

## 第2節 小菅集治監製煉瓦

小菅集治監(東京集治監)で製造された煉瓦は、1879(明治 12)年に開庁した小菅集治監に収容されていた囚人らによって製造された煉瓦である。西原らによる調査では 1886(明治 19)年当時で囚人 1500 人中、1100 人が煉瓦製造に従事していたことから、小菅集治監では煉瓦製造が労役の中心であったと考えられ、煉瓦製造においては当時最新の窯であったホフマン式輪層窯を用いて煉瓦が焼成されていたことが報告されている<sup>25</sup>。前述したようにホフマン窯の燃料は石炭を使用するため、これまで燃料として使用されていた薪よりも高温が得られ、一度に大量の良質な煉瓦の生産が可能となる<sup>26</sup>。小菅集治監製煉瓦には桜の蕾の刻印(図 2.2)が押されており、この刻印が見られる煉瓦は東京周辺の明治期の構造物に多く使用されている<sup>27</sup>。さらに明治 20 年代後半の東京湾要塞建設では小菅集治監製煉瓦の多用が特徴的に認められている<sup>28</sup>。また小菅集治監製煉瓦には普通煉瓦と濃い茶褐色を呈した焼き過ぎ煉瓦があるが、本章では東京湾要塞の一つである千代ヶ崎砲台跡(神奈川県横須賀市)で使用された小菅集治監製の普通煉瓦のみを扱う。

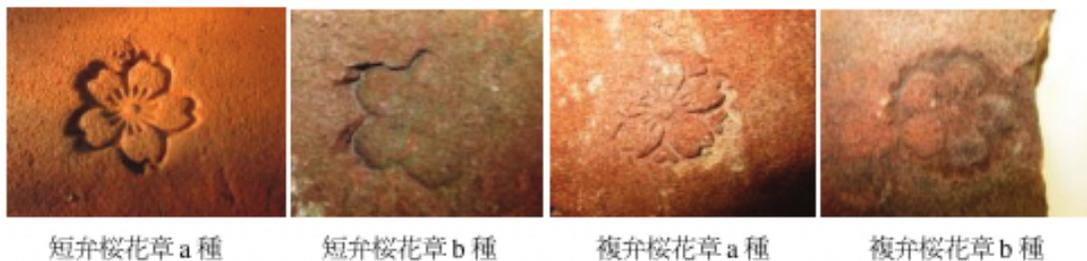


図 2.2 小菅集治監製煉瓦に見られる刻印(野口 2015 より引用)

## 第3節 シャトーカミヤ旧醸造場施設にて使用された煉瓦

文化財建造物保存技術協会が編集した報告書によるとシャトーカミヤ旧醸造場施設(牛久シャトー)は 1901(明治 34)年～1903(明治 36)年に茨城県牛久市に建設された国内で最初の本格的ワイン醸造

<sup>25</sup> 西原義文、渡辺貴介、村田尚生，“明治以降の日本における刑務所配置特性に関する研究”，*都市計画論文集*，vol.30，pp.469-474，1995

<sup>26</sup> 水野信太郎，“日本煉瓦史の研究”，法政大学出版局：東京，1999

<sup>27</sup> 野口孝俊、浦本康二、鈴木武“明治期に建設された東京湾砲台群における煉瓦の調達に関する一考察-第二海堡跡煉瓦構造物調査-”，*土木学会論文集 D2(土木史)*，vol.71，No.1，pp.1-10，2015。

<sup>28</sup> 公共財団法人たましん地域文化財団，“多摩のあゆみ”，株式会社ぎょうせい，2015

施設である。2008年に施設内3棟が「最初期の本格的ワイン醸造場施設」として高い歴史的価値と明治中期の産業技術史上において重要であることが評価され、国の重要文化財に指定されている<sup>29</sup>。牛久シャトーで用いられていた煉瓦は、敷地内で製造され、近隣の上柏田の砂を用いて登り窯により焼成されたことがわかっている<sup>30</sup>。煉瓦の焼き色は黄色がかった橙色で全体的に薄く、明治36年に建設された建造物に使用された煉瓦の大きさは小口約10.3mm×5.6mm、長手は約218mmであり、平部の表面状態から煉瓦成形は手抜きで行われたと考えられている<sup>31</sup>。

## 第4節 吸水率試験及び圧縮強度試験

### 2.4.1 吸水率試験

試験体には、先に挙げた明治期に国内製造されていた煉瓦のうち東洋組煉瓦の単体試料6点、小菅集治監製煉瓦の単体試料3点、また明治期の国産煉瓦には該当しないが比較対象として昭和9年から昭和30年代に稼働していた添川瓦工場窯跡(山形県西置賜郡飯豊町)の燃焼室及び焼成室から出土した煉瓦の単体試料3点を用いた。試験体の作成では内径φ33mmの円柱試験体を単体試料1点あたり3～8点作成し(図2.3、2.4)、それらの円柱試験体に対して吸水率試験を行った。円柱試験体数は東洋組煉瓦が40点、小菅集治監製煉瓦が9点、そして添川瓦工場窯跡出土の煉瓦が9点であった。また円柱試験体の作成及び試験は株式会社鴻池組技術研究所(茨城県つくば市)のご協力の下実施した。

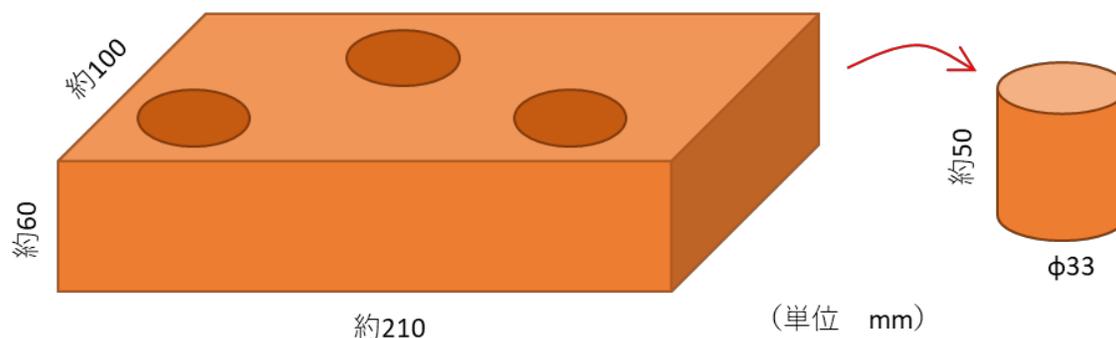


図 2.3 試験体加工 (鴻池組技術研究所報告書より引用)

<sup>29</sup> オエノンホールディングス株式会社、“牛久シャトーについて”、牛久シャトー、2020年7月、<https://www.oenon.jp/ushiku-chateau/history/about/#:~:text=%E5%9B%BD%E6%8C%87%E5%AE%9A%E9%87%8D%E8%A6%81%E6%96%87%E5%8C%96%E8%B2%A1%E3%81%AB%E6%8C%87%E5%AE%9A&text=%E6%98%8E%E6%B2%BB%E4%B8%AD%E6%9C%9F%E3%81%AE%E7%85%89%E7%93%A6%E9%80%A0,%E8%A1%8C%E3%81%A3%E3%81%A6%E3%81%8A%E3%82%8A%E3%81%BE%E3%81%9B%E3%82%93%E3%80%82> (閲覧日:2022年9月30日)

<sup>30</sup> 牛久市史編さん委員会、“牛久市史研究第八号”、1999

<sup>31</sup> 公益財団法人文化財建造物保存技術協会、オエノンホールディングス株式会社、“重要文化財シャトーカミヤ旧醸造場施設保存修理工事(災害復旧)報告書”、有限会社シンセイ:茨城. 2016

吸水率試験は JIS A 1509-3:2008 に基づいて実施した。まず円柱試験体を 105℃の恒温器内で 24 時間以上乾燥させ、室温まで冷却後、質量(乾燥質量  $m_1$  [g])を測定した。次に 20±5℃の水中に浸漬させ、24 時間以上経過した後取り出し、表面の水分を拭き取ってから質量(飽水質量  $m_2$  [g])を測定した。得られた質量から、式 2.1 より吸水率を算出した。

$$a = (m_2 - m_1)/m_1 \quad (2.1)$$

ここで、 $a$  : 吸水率[%]、 $m_1$  : 乾燥質量[g]、 $m_2$  : 飽水質量[g]とする。



図 2.4 加工後の試験体 (左 : 東洋組煉瓦、中 : 小菅集治監製煉瓦、右 : 添川瓦工場窯跡出土の煉瓦)

#### 2.4.2 圧縮強度試験

吸水率試験を行った試験体の内、東洋組煉瓦 20 点、小菅集治監製煉瓦 9 点、添川瓦工場窯跡出土の煉瓦 9 点に対しオートグラフ (AG-250kNG/島津製作所社製) を用いて最大荷重を測定した (図 2.5)。速度は 85.5N/sec (0.1N/mm<sup>2</sup>/sec) とした。得られた最大荷重から式 2.2 を用いて圧縮強度を算出した。この際、試験に用いた円柱試験体は全て乾燥させた状態のものを用いた。また吸水率試験に加え圧縮強度試験も株式会社鴻池組技術研究所のご協力のもと実施した。

$$\sigma_c = \frac{P_{max}}{A} \quad (2.2)$$

ここで、 $\sigma_c$  : 圧縮強度[N/mm<sup>2</sup>]、 $P_{max}$  : 最大荷重[N]、 $A$  : 断面積[mm<sup>2</sup>]である。



図 2.5 圧縮強度試験機

### 2.4.3 結果と考察

吸水率および圧縮強度試験結果を表 2.2 に示す。試験の結果、東洋組煉瓦の吸水率は  $17.0 \pm 1.6\%$ 、圧縮強度は  $9.5 \pm 3.8 \text{N/mm}^2$ 、小菅集治監製煉瓦は吸水率が  $8.4 \pm 1.5\%$ 、圧縮強度は  $44.7 \pm 11.2 \text{N/mm}^2$ 、そして比較対象として用いた昭和期の煉瓦である添川瓦工場窯跡出土の煉瓦は吸水率が  $20.3 \pm 1.0\%$ 、圧縮強度は  $7.3 \pm 1.7 \text{N/mm}^2$  であった。さらに煉瓦単体試料ごとの吸水率および圧縮強度の平均値を算出し、図 2.6 を作成した。図 2.6 は物性試験を行った歴史的煉瓦の吸水率と圧縮強度の関係を示したものである。また本試験では実施していないが、文化財建造物保存技術協会により実施された牛久シャトーで使用された煉瓦と旧富岡製糸場で使用された煉瓦の物性調査の結果を各報告書<sup>32, 33</sup>より抽出し、図 2.6 内に追加した。このグラフは横軸が吸水率を表し、縦軸は圧縮強度を表す。現在国内で制定されている JIS R 1250<sup>34</sup>によると普通れんが 2 種は圧縮強度が  $15.0 \text{N/mm}^2$  以上、吸水率は  $15.0\%$  以下の性能であることが定められている。図 2.6 より小菅集治監製煉瓦を除いた、東洋

<sup>32</sup> 文化財建造物保存技術協会編集、“国宝旧富岡製糸場西置繭所保存修理工事報告書、建造物編旧富岡製糸場建造物保存修理工事報告書”、富岡市教育委員会：群馬、2020

<sup>33</sup> 文化財建造物保存技術協会編集、“重要文化財 シャトーカミヤ旧醸造場施設 保存修理工事(災害復旧)報告書”、オエノンホールディングス株式会社：東京、2016

<sup>34</sup> 日本産業標準調査会、“JIS R 1250 普通れんが及び化粧れんが”、日本産業標準調査会、2021、<https://www.jisc.go.jp/app/jis/general/GnrJISNumberNameSearchList?toGnrJISStandardDetailList>、(閲覧日：2022/05/24)

組煉瓦、牛久シャトーで使用された煉瓦、旧富岡製糸場で使用された煉瓦、そして昭和期の煉瓦である添川瓦工場窯跡出土の煉瓦は現代の煉瓦の規格を吸水率、圧縮強度共に満たしていないことがわかる。一方で小菅集治監製煉瓦は煉瓦の規格化が開始する以前の 1892 年に建設された千代ヶ崎現代砲台跡で使用されていた煉瓦であるが、現代の普通煉瓦の規格を満たし、圧縮強度  $60\text{N}/\text{mm}^2$  を超過するなど強度が非常に高いものも存在した。しかし小菅集治監製煉瓦は煉瓦単体によって物性値に大きなばらつきが見られる結果となった。

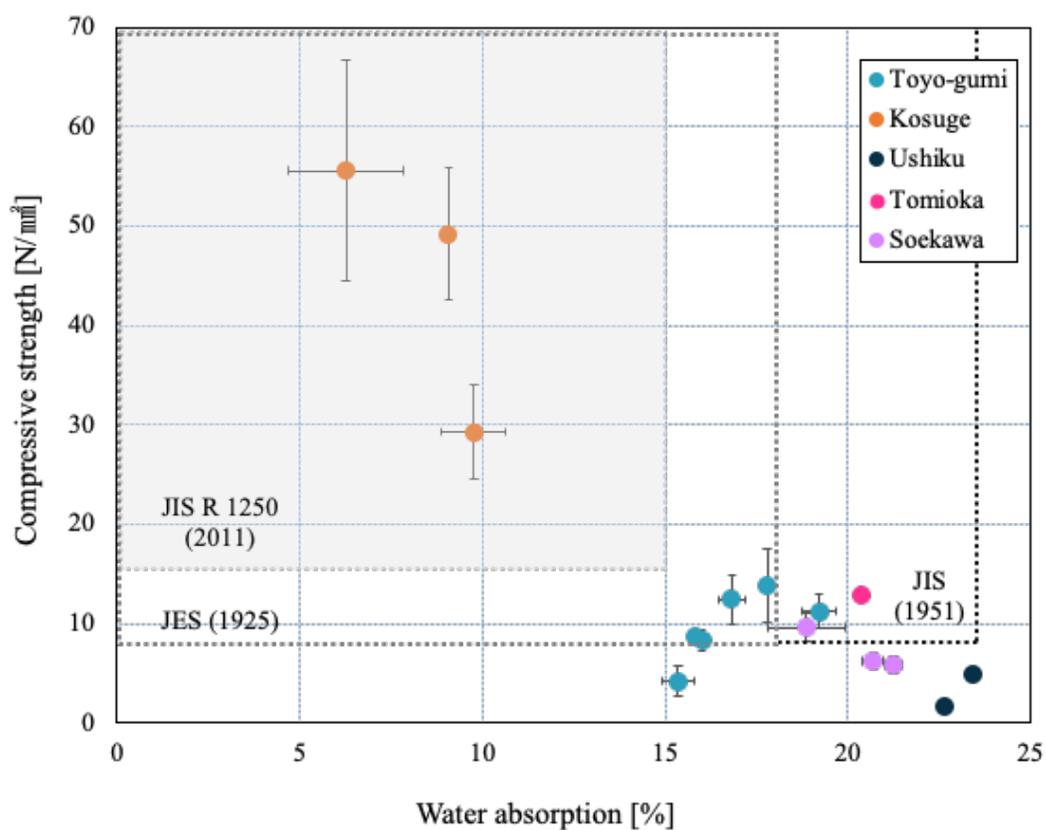


図 2.6 吸水率及び圧縮強度試験結果

表 2.2 吸水率及び圧縮強度試験結果

	試験体番号	直径 [mm]	高さ [mm]	圧縮強度 [N/mm <sup>2</sup> ]	吸水率 [%]
東洋組	s1-1	32.7	50.1	8.88	17.04
	s1-2	33.3	54	13.65	16.3
	s1-3	32.9	45.3	14.74	17.13
	s2-1	33.5	53.7	9.13	15.73
	s2-2	33.3	50.8	6.82	16.22
	s2-3	33.4	49.5	8.9	16.06
	s3-1	33	43.1	10.2	17.91
	s3-2	32.7	49.6	17.58	17.66
	s4-1	32.9	49.2	13.28	18.93
	s4-2	33	52.5	7.95	18.98
	s4-3	32.9	46	11.49	19.83
	s4-4	32.9	48.9	11.41	19.68
	s4-5	32.7	50.5	12.16	18.65
	s5-1	32.5	57.2	3.79	14.7
	s5-2	32.9	57.8	3.48	15.9
	s5-3	32.7	55	2.78	15.64
	s5-4	32.8	66.9	6.88	15.16
	s6-1	33	52.4	8.18	15.87
	s6-3	32.9	49	8.51	15.79
s6-4	33.2	48.7	9.6	15.81	
小菅集治監	c1-1	33	50.62	22.58	11
	c1-2	33	46.96	32.83	9.2
	c1-3	33	45.72	32.43	9.1
	c2-1	33	49.38	57.36	5
	c2-2	33	52.47	41.17	8.5
	c2-3	33	49.89	68.26	5.3
	c3-1	33	47.81	56.27	9
	c3-2	33	50.2	51.01	9.1
	c3-3	33	50.57	40.41	9.1
添川瓦工 場窯跡	i1-1	33	54.29	5.14	20.9
	i1-2	33	55.67	6.86	20.9
	i1-3	33	54.36	6.73	20.3
	i2-1	33	57.77	7.61	18.5
	i2-2	33	55.62	11.02	20.3
	i2-3	33	56.3	10.32	17.8
	i3-1	33	46.52	4.98	21.4
	i3-2	33	50.55	5.51	21.4
	i3-3	33	50.86	7.15	20.9

以上の結果を踏まえ、歴史的煉瓦の特性をより詳細に把握するためには様々な地域の煉瓦や異なる時代に製造された煉瓦の物性と比較する必要がある。そこで本章で実施した物性試験結果に加えて、明治期、大正期、昭和期の煉瓦や各時代に建設された煉瓦造建造物に関する報告書等より煉瓦の圧縮強度及び吸水率の情報を抽出し図 2.7 と図 2.8 を作成した。その結果、歴史的煉瓦のうち明治期に製造された煉瓦は吸水率が約 8%~30%と広範囲に分布しており、特に 15%~25%の範囲に集中していることがわかる(図 2.8)。圧縮強度は約 3N/mm<sup>2</sup>~20 N/mm<sup>2</sup>の範囲に多く分布しているが一部の煉瓦は圧縮強度が 40 N/mm<sup>2</sup>を超えており、物性試験を行った小菅集治監製煉瓦は明治期の煉瓦の中でも非常に堅固な煉瓦であることが改めてわかる。次に明治期の煉瓦を製造地域で比較すると、東日本地域で製造された煉瓦は西日本地域で製造された煉瓦よりも高い吸水率を有し、圧縮強度もやや低い傾向にあることを把握した。

大正期になるとそれまで広範囲に分布していた吸水率は約 7%~17%の範囲内にとどまるが、圧縮強度は最大 90 N/mm<sup>2</sup>のものが見られ、強度が非常に高い良質な煉瓦が製造可能になったことが伺える。また図 2.7 における大正期の煉瓦はいずれも JES 規格が制定される以前の 1914 年~1922 年の間に製造された煉瓦であるがそのほとんどが吸水率、圧縮強度ともに JES 規格を満たしていることから、大正期に突入すると煉瓦製造技術が向上し、良質な煉瓦のみが建築部材として使用されていた可能性が考えられる。

昭和期の煉瓦においては大正期と比較すると吸水率は高くなり、圧縮強度は明治期の煉瓦の分布

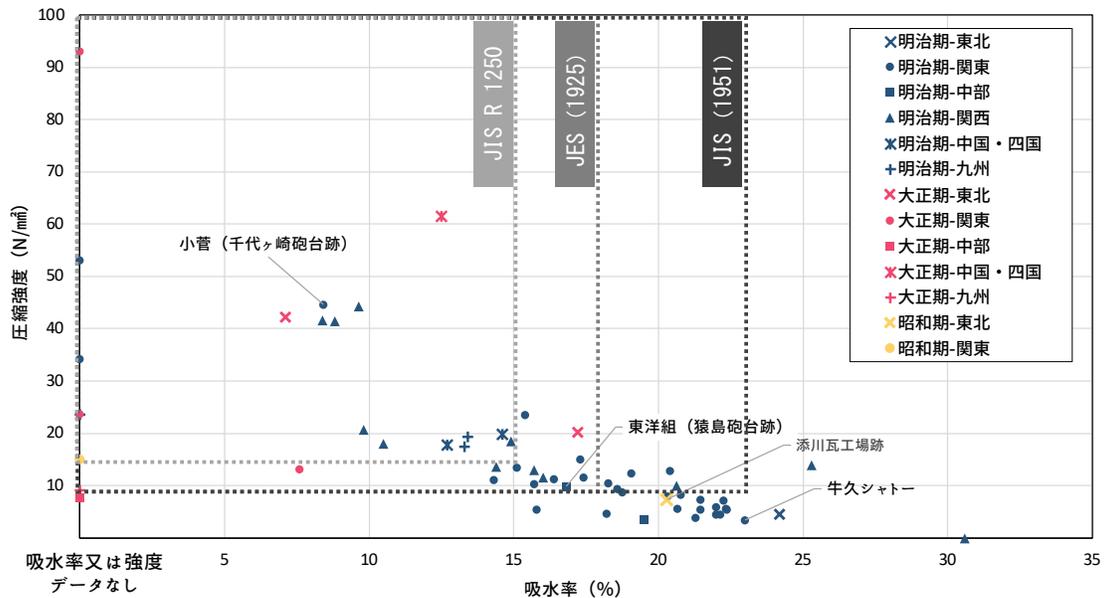


図 2.7 明治期から昭和期における煉瓦の吸水率及び圧縮強度分布



する情報が非常に乏しいことが現状である。昭和期の煉瓦は明治期の一部の煉瓦と物性が類似している可能性があり、したがって明治期の煉瓦に見られるように昭和期に製造された煉瓦にも塩類風化等の劣化が生じる可能性が予測される。そのため、今後は昭和期の煉瓦にも着目し調査を進めるべき段階にあると考える。

次に上記の結果を踏まえ、歴史的煉瓦の中でも明治期の煉瓦の物性にばらつきが生じた要因について検討していく。先述したように明治期という同時代に製造された煉瓦にも関わらず吸水率や圧縮強度にばらつきが見られた要因として①煉瓦が使用されていた建造物、構造物の種類の違い、②煉瓦が焼成された方法(焼成窯)の違いが考えられる。まず前者について吸水率試験及び圧縮強度試験を行った煉瓦を基に検討していく。物性試験が実施された煉瓦のうち、東洋組煉瓦及び小菅集治監製煉瓦はともに東京湾要塞である猿島砲台跡(神奈川県横須賀市)、千代ヶ崎砲台跡(神奈川県横須賀市)といった軍事施設の建築用煉瓦として製造された。猿島砲台跡は明治14年～明治17年にかけて建設され、千代ヶ崎砲台跡は明治25年～明治28年にかけて建設されている。一方で牛久シャトーは明治34年～明治36年にかけて建設された国内で最初の本格的な葡萄酒醸造所である。そのため使用された煉瓦は葡萄酒醸造所や貯蔵庫の建築用煉瓦として用いられた。ここで建造物または構造物の種類が国の軍事施設と貯蔵庫といった民間または個人施設と異なる。軍事施設の建設にあたっては、明治14年に『砲臺建築仕法通則』という仕様書が制定されている。この仕様書には軍事施設の建設に関して施工方法や設計、使用する建築資材に関する規則が記されており、明治27年に改正後、仕様書の強制力は高かったことが指摘されている<sup>35</sup>。このように軍事施設の建設に関する規則が明治期に存在していた一方でその他の煉瓦造建造物や構造物に使用される煉瓦に関する規則や規格は大正末期に至るまで定められていなかった。そのため、牛久シャトーで用いられた煉瓦は東洋組煉瓦及び小菅集治監製煉瓦よりも吸水率が高く、強度も低い煉瓦が使用されていたことが考えられる。これらのことから、同時期に製造された煉瓦の物性に見られるばらつきと煉瓦が使用された建造物または構造物の種類や目的には関係性があると考えられる。つまり、軍事施設に用いられた煉瓦は明治期に製造された煉瓦の中でも比較的強度が高く、良質な煉瓦が選定された一方で、軍事施設以外で使用されていた煉瓦は、品質に留意することなく建築資材として使用されていた可能性が高い。

煉瓦の使用目的により煉瓦の物性値にばらつきがあると述べたが、東洋組煉瓦と小菅集治監製煉瓦は、ともに軍事施設の建築資材としての煉瓦という共通点があるにも関わらず、図2.6にあるようにその物性は大きく異なっている。このような結果になった要因として先に述べた『砲臺建築仕法通則』の改

---

<sup>35</sup> 中島康雄、飛ヶ谷潤一郎、“明治要塞の開口部の建築規則と以降の比較”日本建築学会大会：建築歴史・意匠、金沢工業大学、2019年

正が影響していることが考えられる。明治 27 年の改正後の『砲基建築仕法通則』には第十條に煉瓦に関する規則があり、そこには「煉瓦石ハ専ラ東京形ニシテ其質上等ナルモノヲ撰用スヘシ」<sup>36</sup>と記載されている。さらに前述したように改正後の仕様書の強制力が強まったことで、建設中に仕様書の改正が見られた千代ヶ崎砲台跡では吸水率が高く、強度も非常に強い、より品質の高い煉瓦が使用されるようになったことが考えられる。しかし仕様書には大きさや良質の煉瓦を用いることが記されていたことに留まり、現代の JIS 規格に見られるような吸水率や圧縮強度に関する詳細な規則の記載は見られなかったため、この時期の煉瓦は寸法と外観のみが特に重要視されていた可能性が高い。そのため、同じ小菅集治監製の煉瓦であっても吸水率や圧縮強度などの物性値にばらつきが見られる結果になったのではないかと推測する。次に②煉瓦が焼成された方法の違いによって物性に差が生じた可能性について検討していくが、この点については第5節の熱分析結果と併せて次節で考察する。

## 第5節 熱分析

熱分析とは、温度を低速で昇降温させながら試料の物性を連続的に測定する方法で、熱分析には、熱重量測定 (TG)、微分熱重量測定 (DTG)、示差熱分析 (DTA) 示差走査熱重量測定 (DSC) などが代表的な測定法として認知されている。

荒川によると TG は、ある試料を一定速度で加熱しながらその重量変化を連続的に測定する方法で、得られる減量曲線から種々の情報を得ることができる。TG 分析により、試料の熱反応の過程を知ることができ、また熱分解、蒸発、昇華を利用した個体混合物の分析に用いられている。そして DTA とは、定速昇降温過程で試料と基準物質との熱挙動の差によって生ずる温度差を、時間または温度に対して記録する技法とされている。この分析方法からは DTA 曲線が得られる。そしてこの DTA 曲線は温度によって試料に見られる吸熱や発熱反応の特徴を示す。図 2.9 は DTA 分析における発熱と吸熱ピークの起因をまとめたものである<sup>37</sup>。これら試料の吸熱、発熱反応を見ることで結晶の転移や二次転移を知ることができ、また物質の分解、酸化還元、固相反応などの研究に活用されている<sup>38</sup>

<sup>36</sup> 陸軍省工兵方面本署、「砲基建築仕法通則」、明治 27 年 5 月改正、現代本法築城史第 1 部第 2 卷 (第 2 章第 3 章) 築城期間及業務、国立国会図書館所蔵、1943 年

<sup>37</sup> 島津製作所、「熱分析の基礎 4 章 TG-DTA とは?」、SHIMADZU、2022、<https://www.an.shimadzu.co.jp/ta/support/faq/fundamentals/tg-dta.htm>、(閲覧日 2022/05/20)

<sup>38</sup> 荒川剛、「熱分析法」，“機器分析のてびき (増補改訂版) 3,” 化学同人, p.1-12, 1992

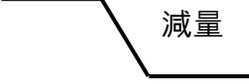
TG曲線	DTA曲線	反応
	 吸熱	分解・脱水・還元
	 発熱	燃焼
	 吸熱	昇華・蒸発
	 発熱	酸化
	 吸熱	転移・融解
	 発熱	結晶化
	 ベースラインシフト	ガラス転移

図 2.9 TG と DTA 曲線と発熱・吸熱ピークの起因（島津製作所 HP より引用・一部編集）

熱分析は様々な研究分野で活用されており、例えば考古学の分野では日本における古代土器について TG と DTA を用いることで当時の焼成温度の推測が行われた<sup>39</sup>。また梅田甲子郎によると熱分析とともに化学分析やX線回折を併せて行うことで土器に含まれる鉱物や熱分析に見られる化学反応が何に起因しているのかまでの解明が可能となったことが報告されている。このことから、古代土器に含まれている鉱物である粘土鉱物や長石を含む煉瓦にも熱分析による焼成温度の推定が出来得るのではないかと考えた。そこで本節では熱重量測定 (TG) と示差熱分析 (DTA)、これら熱分析前後の粉末X線回折 (XRD) による物質の同定を行い、明治期に製造された国産煉瓦の物性における特徴を把握した。そして熱分析により推定される焼成温度の違いが煉瓦の物性に与える影響と、それらが煉瓦の劣化に関係性が見られるのか検討することを目的とした。

<sup>39</sup> 梅田甲子郎 1967「日本古代土器の熱的性質について（その1）」『奈良教育大学紀要・自然科学』15(2), p.61-67

### 2.5.1 装置と測定条件

TG および DTA は Seiko Instruments Inc 製 EXSTAR7000: TG/DTA7300 を用いて行った(図 2.10)。測定条件は 50°C~1000°Cとし、加熱速度は 20°C/min とした。また測定温度が 1000°Cを越えるため、測定時には Pt-PAN を使用した。熱分析前後に行った XRD 分析は BrukerAXS 社製 D8 ADVANCE を用いて実施した。分析試料は崩落物をメノウ製の乳鉢と乳棒を用いて十分に粉砕し、粉砕された試料をガラス製のホルダーにセットし測定を行った。測定条件は対陰極を Cu とし、管電圧を 40kV、管電流を 40mA に設定した。測定範囲は 5° から 90°、測定速度 0.1 sec/step にて 6000 ステップとした。

### 2.5.2 煉瓦試料

分析に用いた煉瓦試料は明治期に製造された国産煉瓦である東洋組煉瓦 1 点、小菅集治監製煉瓦 1 点、牛久シャトーで使用されていた煉瓦 1 点の計 3 点である。東洋組煉瓦はにぶい橙色、小菅集治監製煉瓦は暗い茶褐色を呈し、牛久シャトーの煉瓦は赤みの強い橙色であった。これらの煉瓦試料を裁断し煉瓦内部から煉瓦片を採取した。そして採取された煉瓦片はそれぞれ瑪瑙製鉢と乳棒を用いて粒径 75  $\mu$ m に粉砕され、粉砕された各試料は約 10mg の量が Pt-PAN に取り分けられ、それらを分析試料として使用した。

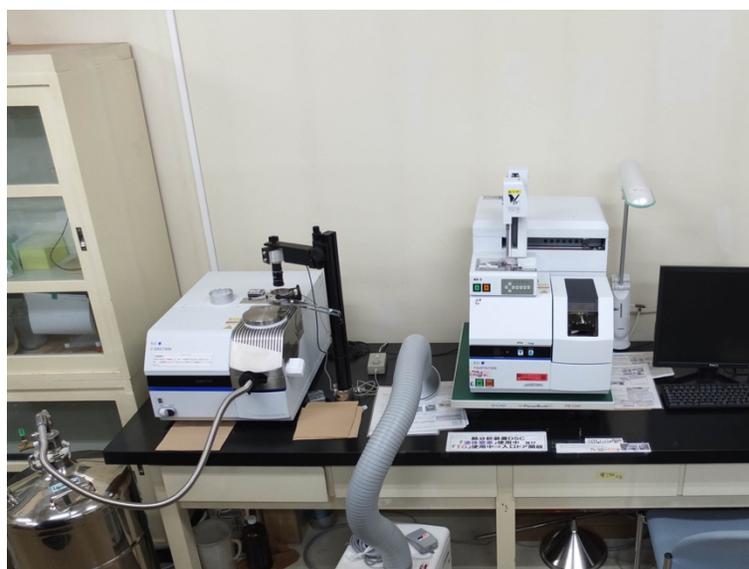


図 2.10 熱分析装置 (筑波大学 HP より引用)

### 2.5.3 結果と考察

熱分析より得られた TG 曲線及び DTA 曲線を図 2.11 に示す。図 2.11 は特に DTA 曲線上に反応が見られた箇所を拡大したものであり、横軸が温度を表し左軸は TG より得られた減量曲線を、右軸は DTA により得られた DTA 曲線を表す。まず TG における重量変化では東洋組煉瓦には約 7%の減量、小菅集治監製煉瓦には 4.3%の減量、そして牛久シャトーで使用された煉瓦は 3.9%の減量が見られた。東洋組煉瓦は他の煉瓦と比較してやや減量率が高い結果となった。次に DTA 曲線において、東洋組煉瓦では 450°C～500°C、550°C～600°C 付近に吸熱反応が見られた。小菅集治監製煉瓦では 600°C 付近と 960°C 付近に吸熱反応を確認し、牛久シャトーで使用された煉瓦は 600°C 付近に吸熱反応を確認した。下田によると雲母鉱物のうち、イライトと黒雲母は 500°C 付近や 500°C～600°C で吸熱反応が認められることが報告されており<sup>40</sup>、東洋組煉瓦の XRD 分析の結果からは熱分析後に雲母鉱物の消失が見られた(図 2.12)。また瀬川によると煉瓦を構成する粘土類は600°C位から吸熱を伴って結晶水の脱水が起こる<sup>41</sup>ことが言及されていることから、500°C～600°C 付近で確認された吸熱反応は煉瓦内に含まれる雲母鉱物による吸熱反応または粘土類の脱水によるものである可能性が考えられる。しかし分析を行った煉瓦はいずれも熱分析前の XRD 分析において 900°C～1000°C の温度に達した際に形成されることが知られているムライトの形成は見られなかったことから熱分析を行った煉瓦試料 3 点はいずれも

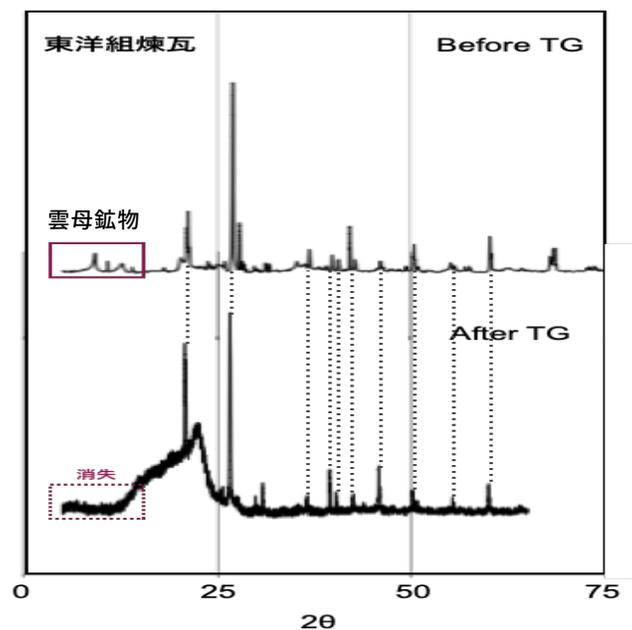


図 2.12 東洋組煉瓦の熱分析前後における XRD 分析結果

<sup>40</sup> 下田右, “粘土鉱物の示差熱分析”, *粘土科学*, 11(4), p.174-187, 1971

<sup>41</sup> 瀬川清, “耐火煉瓦の焼成条件と熱経済の研究 (第 1 報) 粘土煉瓦の焼成”, *窯業協會雑誌*, 57(638), p.83-85, 1949

900℃以下の温度で焼成されることが推測され、特に煉瓦中心部(内部)の焼成温度は東洋組煉瓦の場合 500℃以下、小菅集治監製煉瓦と牛久シャトーで使用された煉瓦は 600℃以下であった可能性が考えられる。

以上の結果を踏まえて第 4 節で述べた②煉瓦が焼成された方法の違いによって物性に差が生じた可能性について検討していく。先述したように、熱分析を行った試料のうち小菅集治監製煉瓦のみがホフマン窯によって焼成されたとされている<sup>42</sup>。一方で東洋組煉瓦はだるま窯又は登り窯、牛久シャトーの煉瓦は登り窯で焼成されたと記録されている。上記にあるようにホフマン窯で焼成された小菅集治監製煉瓦はその他 2 点の煉瓦試料の物性とは大きく異なっていたことから焼成に使用された窯が物性に影響を与えていたと仮定したが、本章での熱分析の結果からは、3 点の試料間における焼成温度の明確な差を見出すことはできなかったことから、熱分析より得られた結果に煉瓦の焼成温度は関係しないと言える。しかし、熱分析結果が類似していた小菅集治監製煉瓦と牛久シャトーの煉瓦はいずれも関東地域で製造されていたことから同質の原材料が使用されていたことが熱分析より示唆された。

---

<sup>42</sup> 水野信太郎, “日本煉瓦史の研究”, 法政大学出版局:東京, 1999

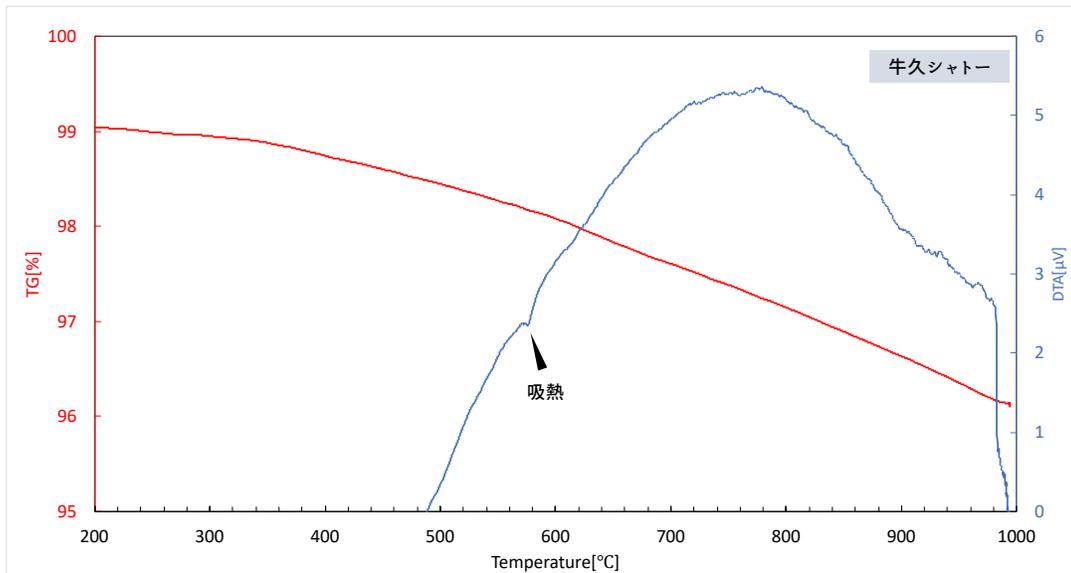
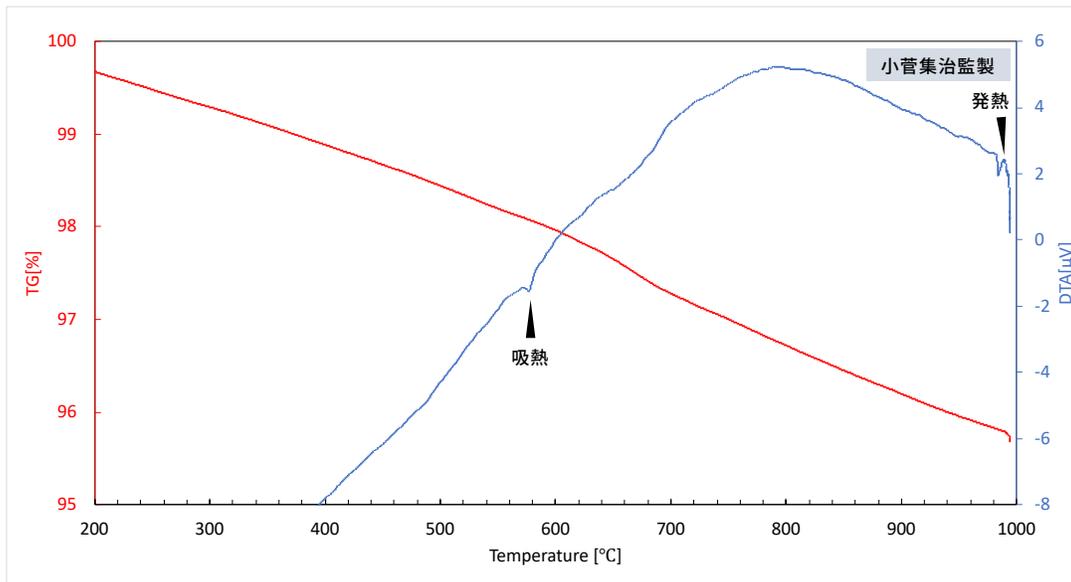
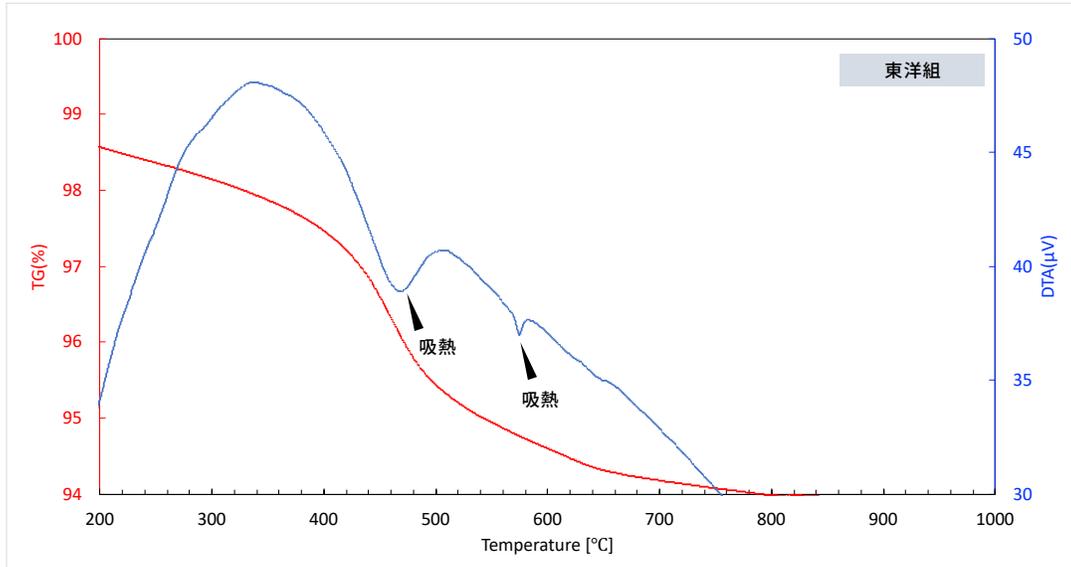


図 2.11 TG・DTA 曲線の拡大図 (上：東洋組煉瓦、中：小菅集治監煉瓦、下：牛久シャトー煉瓦)

## 第6節 物性の違いが煉瓦の劣化に与える影響

本章を通して歴史的煉瓦の中でも特に明治期に製造された煉瓦には吸水率及び強度に大きなばらつきがあることを把握したが、本節では実際の遺跡にて煉瓦に見られる物性の差が劣化に及ぼす影響について検討を行った。現地調査は東洋組煉瓦と小菅集治監製煉瓦が使用されている猿島砲台跡（横須賀市）で実施した。対象遺跡は明治期に建設された砲台であり、2015年に国指定史跡に登録されている。遺跡の詳細情報については第3章にて記載する。現地調査は東洋組煉瓦と小菅集治監製煉瓦それぞれが使用されている構造物の煉瓦表面状態及び劣化状況の目視観察を主とした。

目視観察の結果を東洋組煉瓦の状態から述べてゆく。図 2.13 は猿島砲台跡遺跡入口から直線距離で約 100m 地点に位置する第二砲台棲息掩蔽部 (e2) の外壁の状態を示したものである。東洋組煉瓦はにぶい橙色を呈していることが知られているが、写真からはそれらの煉瓦表面が粒状に崩壊し、一部は内部に向けて侵食が進んでいることが分かる。またこのような表面の崩壊が見られた煉瓦は広範囲にわたって確認された。図 2.14 は異なる煉瓦構造物である南側弾薬元庫北建屋内の2階壁面に使用されている東洋組煉瓦の状態を示したものである。これら屋内の煉瓦においては屋外に晒されている煉瓦ほど侵食や後退などの劣化は見られなかったが、多くの煉瓦表面に剥離や崩落、粉状化を確認した。



図 2.13 屋外に見られる東洋組煉瓦（著者撮影）



図 2.14 屋内に見られる東洋組煉瓦（著者撮影）

次に小菅集治監製煉瓦の状態について言及していく。猿島砲台跡において小菅集治監製煉瓦は史跡入り口付近に位置する電気灯機関舎で使用されている。この構造物は現在も稼働している状態である。図 2.15 及び図 2.16 は電気灯機関舎の外壁と内壁に使用されている煉瓦の状態を示したものである。まず外気に晒されている煉瓦は表面の一部に剥離が見られ、僅かであるが塩類の析出を確認した。しかし、東洋組煉瓦に見られたような煉瓦の侵食や後退は見られなかった。屋内の煉瓦においても一部の煉瓦に表面剥離や剥離した部分が粒状となって崩壊していることを確認したが、東洋組煉瓦と比較すると崩壊が見られた煉瓦の量は少なく、全体的に煉瓦の表面状態は接触しても表面が崩落しないなど堅固で良好であるものが多く見受けられた。しかし、小菅集治監製煉瓦の場合は煉瓦の劣化よりも目地の崩壊、後退の方が進行していた。

以上のことから、吸水率が低く圧縮強度が非常に高い小菅集治監製煉瓦は東洋組煉瓦と比較して劣化の種類と劣化状況が異なることが分かった。つまり、煉瓦の物性と劣化状況には関係性が見られることが示唆された。しかし煉瓦の劣化は煉瓦が置かれている環境によって引き起こされている場合が多いため、小菅集治監製煉瓦のような堅固な煉瓦であっても周辺環境によって劣化の程度や進行速度は変化することが予測される。そのため、続く第3章にて煉瓦が置かれている環境と劣化状況の把握及びそれらの関係性について追究する。



図 2.15 屋外に見られる小菅集治監製煉瓦  
(著者撮影)

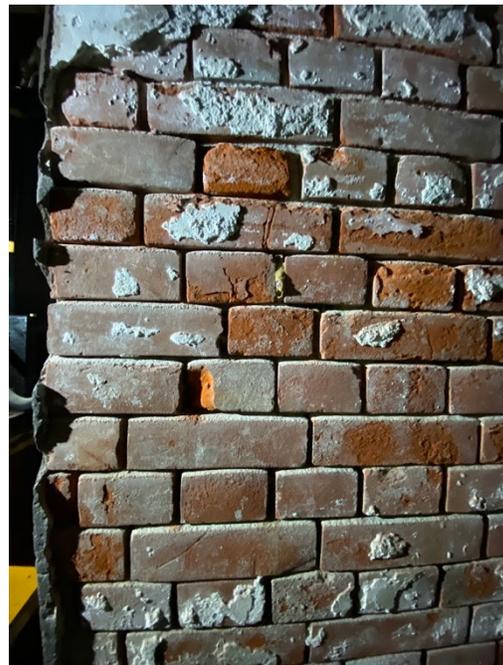


図 2.16 屋内に見られる小菅集治監製煉瓦  
(著者撮影)

## 第3章

### 長期的な現地調査による劣化の現状把握と要因の特定

### 第3章 長期的な現地調査による劣化の現状把握と要因の特定

煉瓦造の文化財は屋外にさらされている場合が多く、日本国内では都市部や沿岸周辺など多様で特異な環境下に置かれている。そのため、遺跡周辺における環境の影響により塩類風化などによる煉瓦の劣化が国内各地で確認されている。また第2章で述べたように明治期に製造された歴史的煉瓦は煉瓦の種類によって物性に差があり、特に吸水率が高く圧縮強度も低い煉瓦は表面崩壊が進行しやすい可能性があることが分かった。このことを踏まえ、塩類風化等による劣化に対する保存処理方法を検討するためにはまず現況調査を通して遺跡における劣化状況を詳しく把握し、劣化要因を明確にすることが不可欠である。また劣化要因の解明を行うためには数年にわたる長期的な現地調査が必要である。しかし、実際の遺跡における劣化状況に関する報告や数年にわたる実測データは少なく、長期間の温湿度変動や煉瓦内の水分挙動は不明瞭である。

そこで第3章では特異な環境下に晒されている近代化遺産の一つであり、歴史的煉瓦である東洋組煉瓦が使用されている猿島砲台跡(神奈川県横須賀市)において約3年間に及ぶ長期的なモニタリング調査を行った。モニタリング調査では煉瓦造構造物内の温湿度調査、煉瓦崩落量の測定、煉瓦崩落物の粉末X線回折、そして煉瓦壁面の水分率測定を行い、歴史的煉瓦造の遺産が置かれている環境や劣化の現状を詳しく把握し劣化要因の解明と劣化が最も進行する時期の特定を行い、それらを踏まえて歴史的煉瓦に対して適した保存処置方法に関する知見を得ることを目的とした。また本章で用いた調査方法が歴史的煉瓦造の遺跡での現況調査や劣化の特定方法として適しているのか検討を行った。

#### 第1節 猿島砲台跡

横須賀市教育委員会により2014年に発行された報告書によると、猿島砲台は1881(明治14)年11月5日に起工し、1884(明治17)年6月30日に竣工した明治初期の沿岸砲台であり(図3.1)、2015年に国指定史跡に登録されている。砲台が建設された猿島は現在無人島であり、横須賀新港から沖へ向かって約1.7km地点に位置する。猿島砲台跡は東京湾要塞の一つとして観音埼・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約20年間に渡り行われ砲台としての諸機能が整備されていった<sup>43</sup>。そのため遺跡内の煉瓦構造物には明治10年代に建設された構造物の組積方法であるフランス積と明治20年代以降に建設された構造物に見られる組積方法であるオランダ積の2つの組積方法(図3.2)が混在している。これらの煉瓦造構造物は現在においても築城当初の姿を良好にとどめていることから猿島砲台跡は日本における近代の政治、土木技術を理解する上で重要な遺跡の一つとされている。

<sup>43</sup> 横須賀市教育委員会 2014『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』



図 3.1 猿島（著者撮影）

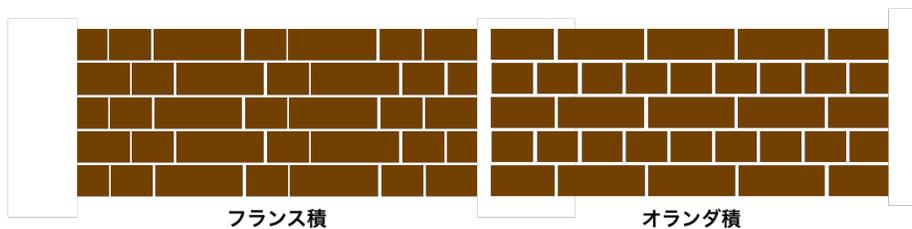


図 3.2 煉瓦の組積法（著者により作成）

遺跡内に建設された明治期の砲台は戦後全て撤去されたため現存しないが、砲座は現在も良い状態で現存している。また砲座周辺には煉瓦造である弾薬庫や棲息掩蔽部が配置されており、崩落の恐れがなく安全な構造物は一部一般公開されている。しかしいくつかの弾薬庫は戦後爆弾による破壊作業が行われたため壁面が大きく崩壊している場所が見られる。また遺跡内をさらに北に進むとフランス積で建設された長さ 88.66m の隧道が現れる(図 3.4)。隧道内西側には弾薬元庫が南北の2ヶ所に配置されており、北側弾薬元庫は一層、南側弾薬元庫は二層構造となっている。南側弾薬元庫一階は保存状態が良好であることに対して、二階は壁の一部が崩壊しており<sup>1</sup>、煉瓦の劣化も著しい。

## 第2節 猿島砲台跡の煉瓦に見られる劣化の現状

猿島砲台跡内で使用されている東洋組煉瓦の物性は第2章にあるように、吸水率が  $17.0 \pm 1.6\%$ 、圧縮強度は  $9.5 \pm 3.8 \text{ N/mm}^2$ と現代の煉瓦や同遺跡で使用されている小菅集治監製煉瓦よりも吸水率は高く、強度も低い物性を有していることが分かっている。このことを踏まえて現況調査では東洋組煉瓦に見られる劣化状況の把握を行うために目視による煉瓦壁面の観察、そして劣化要因を解明するために煉瓦造構造物内における温湿度測定及び、煉瓦壁面からの煉瓦の崩落量測定を2017年6月から2020年3月にかけて実施した。さらに煉瓦崩落物内に含まれる物質を特定するために粉末X線回折による定性分析を行った。

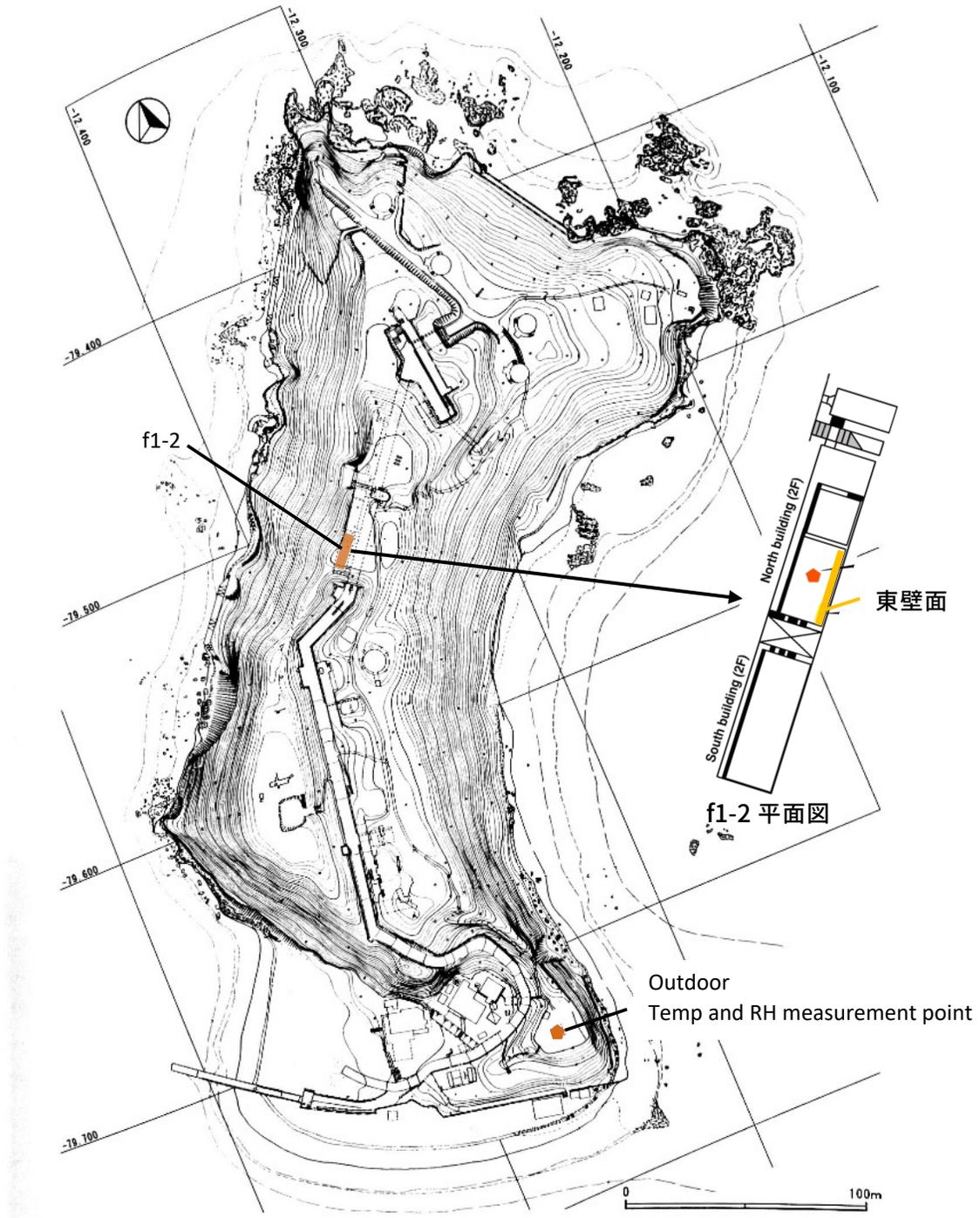


図 3.3 猿島砲台跡地図（横須賀市 2014 より引用）

### 3.2.1 調査対象地点

遺跡内に現存する煉瓦構造物の中で特に煉瓦の劣化が著しい構造物内にて環境調査、崩落物測定を行なった。調査対象とした煉瓦造構造物は隧道内の地下施設である南側弾薬元庫北建屋の2階 (f1-2)である。この構造物は2階天井面が地表から約6m下に位置し、壁面には東洋組煉瓦が使用されている(附録-図1)。f1-2 内部の面積は 4.28m×13.56m の規模であり、床面から天井までの高さは3.67m でヴォールト構造となっている(図 3.5)。天井は煉瓦の上に漆喰が塗られているが、漆喰が一部剥がれている箇所を確認した。f1-2 内部には窓がないが、入口付近に屋外に通じる窓が1つ存在し、f1-2 の入口には扉がないため、この窓とトンネルから f1-2 内部への通路を通じて外気が流入している可能性が考えられる。f1-2 内は南側脚壁と西側脚壁に平行する間仕切り壁がオランダ積であり、東側および西側脚壁はフランス積である。この間仕切り壁は砲台建設後に増築されたことが分かっている。また西側脚壁に平行する間仕切り壁は弾薬収納室に湿気の流入を防ぎ、室内に滞留した湿気を外部へ排出する目的で建設された防湿・排湿施設と考えられている。f1-2 では南側の壁面が大きく崩壊しており、東側の壁面では煉瓦表面より煉瓦の崩落を確認した。調査が行われた f1-2 は、現在一般公開されていないため、調査時以外に人の出入りはほとんどない。



図 3.4 北口から撮影した隧道 (著者撮影)

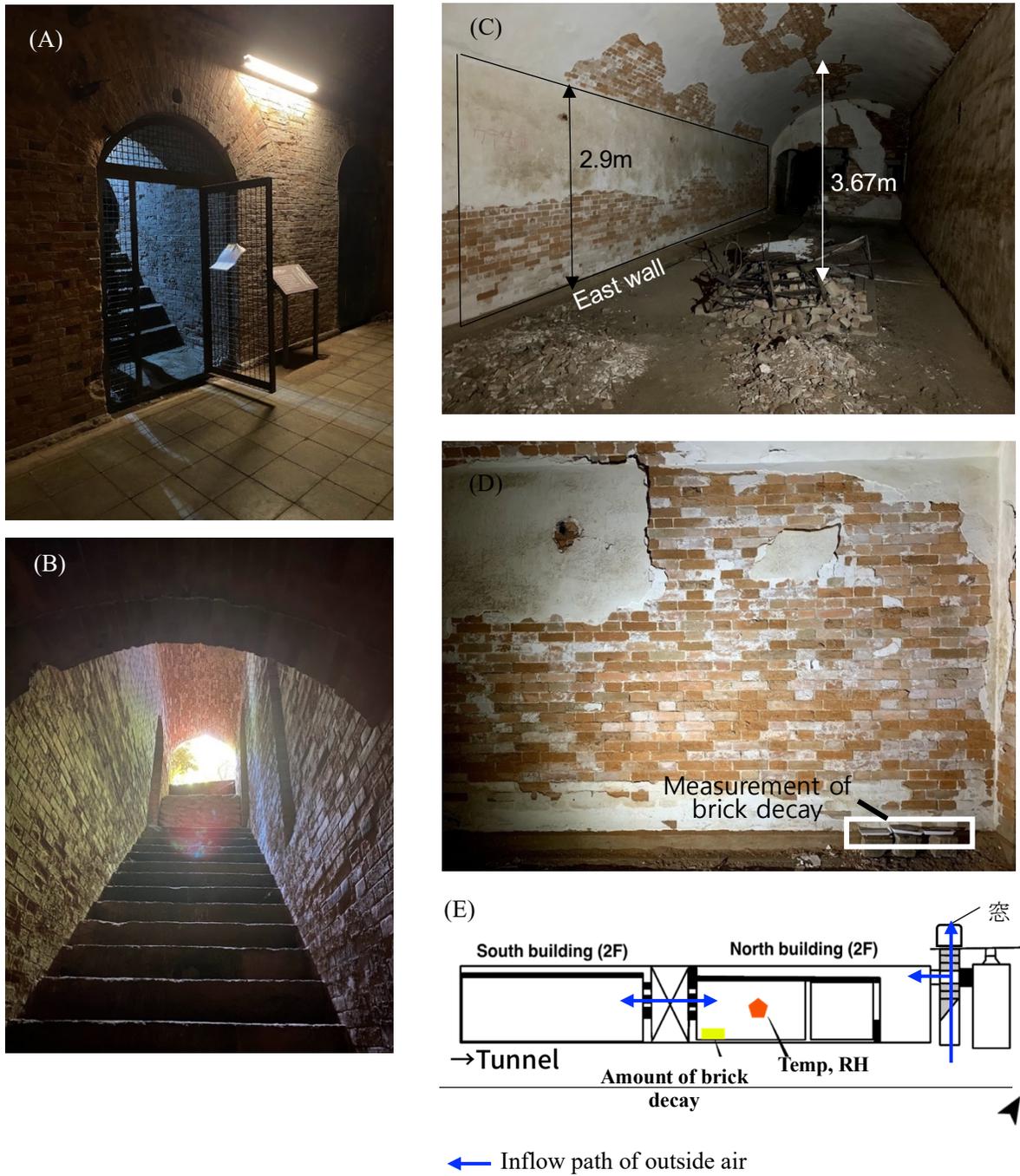


図 3.5 (A) 隧道から f1-2 への入口, (B) f1-2 入口付近の窓, (C) f1-2 内部の様子, (D) 東側壁面, (E) f1-2 の平面図 (著者作成.)

### 3.2.2 温湿度調査

温湿度調査は Onset 社製 Hobo U23-001 屋外用温湿度データロガー(図 3.6)を用いた。データロガーは f1-2 の中央、床から約 100cm の高さに設置した。温湿度の測定は毎 30 分間隔で記録した。また比較対象として屋外においても同様に温湿度データロガーを設置し、毎 30 分間隔での記録をおこなった(図 3.3)。



図 3.6 温湿度データロガー (著者撮影)

### 3.2.3 崩落物測定

煉瓦壁面からの崩落量の測定は底面積が 140 cm<sup>2</sup>のトレイを 3 個煉瓦壁面に接するように設置して測定を行った(図 3.7)。使用したトレイ(アズワン株式会社製ディスポトレイ)はポリプロピレン製で、幅 20cm、深さ 7cm にカットしたものをを用いた。測定は 2017 年 6 月～2020 年 3 月にかけて実施した。得られた崩落物は1ヶ月または2ヶ月に1回の頻度で回収し、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ったため、各測定期間における 30 日間あたりの崩落量として換算した。



図 3.7 崩落物測定の様子 (著者撮影)

### 3.2.4 崩落物の同定

崩落物測定にて各時期に採取された崩落物の中に劣化を引き起こしていると考えられる物質が含まれているかを探るために粉末 X 線分析 (XRD) による含有物の同定を行った。分析装置には Bruker AXS 社製 D8 ADVANCE を用いた。分析試料は崩落物をメノウ製の乳鉢と乳棒を用いて十分に粉砕し、粉砕された試料をガラス製のホルダーにセットし測定を行った。測定条件は対陰極を Cu とし、管電圧を 40kV、管電流を 40mA に設定した。測定範囲は 5° から 90°、測定速度 0.1 sec/step にて 6000 ステップとした。

### 3.2.5 結果と考察

表 3.1 は 2017 年 6 月から 2020 年 3 月までに f1-2 内及び屋外において計測した温湿度の結果をまとめたものである。また、図 3.8 は屋外及び f1-2 内における約 3 年間の温湿度挙動を示したものである。モニタリング結果から約 3 年間煉瓦構造物内の温湿度に大きな変化はなく、同様な温湿度環境が保たれていることがわかる。構造物内は屋外に比べると 1°C~2°C ほど低く、変動幅もやや小さい。しかし相対湿度は屋外よりも高く、温度、相対湿度ともに最も高くなる時期である 6 月~8 月においては相対湿度が 100% に到達するなど非常に高湿な環境になることがわかった。さらに年間の温湿度の挙動を見るために 2018 年の 1 年間の温湿度データよりクリモグラフを作成した (図 3.9)。色付けされたマーカーは f1-2 内の各月の温湿度の分布を表し、点線で囲まれた範囲は屋外の温湿度の分布範囲を示す。やはり屋外と比較すると全体的に温度は低く高湿であることが読み取れる。また温湿度は 1 月から 2 月の冬季が最も低く、春季である 3 月以降に徐々に上昇していく。そして雨季の 6 月から 7 月にかけて相対湿度は 100% に到達し 9 月まで高湿な環境を保ち、その後は 12 月までにかけて温湿度共に徐々に低下していくという挙動を示している。そしてこの挙動は屋外の温湿度挙動と連動していた。以上のことか

表 3.1 各年の温湿度結果

Year		2018		2019		2020	
Place		f1-2	Outdoor	f1-2	Outdoor	f1-2	Outdoor
Temperature [°C]	Average	15.7±5.67	16.9±7.11	15.4±5.53	17.1±6.53	15.8±5.19	16.2±5.66
	Max	24.3	27.37	24.23	27.85	23.9	24.53
	Min	6.79	6.76	8.25	7.83	9.17	8.76
Relative Humidity [%]	Average	92.9±7.73	76.1±9.93	91.1±8.64	76.9±10.17	91.2±8.06	78.4±9.31
	Max	99.99	89.17	100	92.85	99.99	94.1
	Min	78.23	59.79	73.17	56.03	77.15	63.56

ら f1-2 内の温湿度は屋外の温湿度挙動と連動して変化するが、屋外に比べてやや低温で高湿な環境になるということがわかった。これは f1-2 入口付近には外気が流入する窓が設けられているため、この窓を通して構造物内に流入した外気の影響を受けたものであると考えられる。

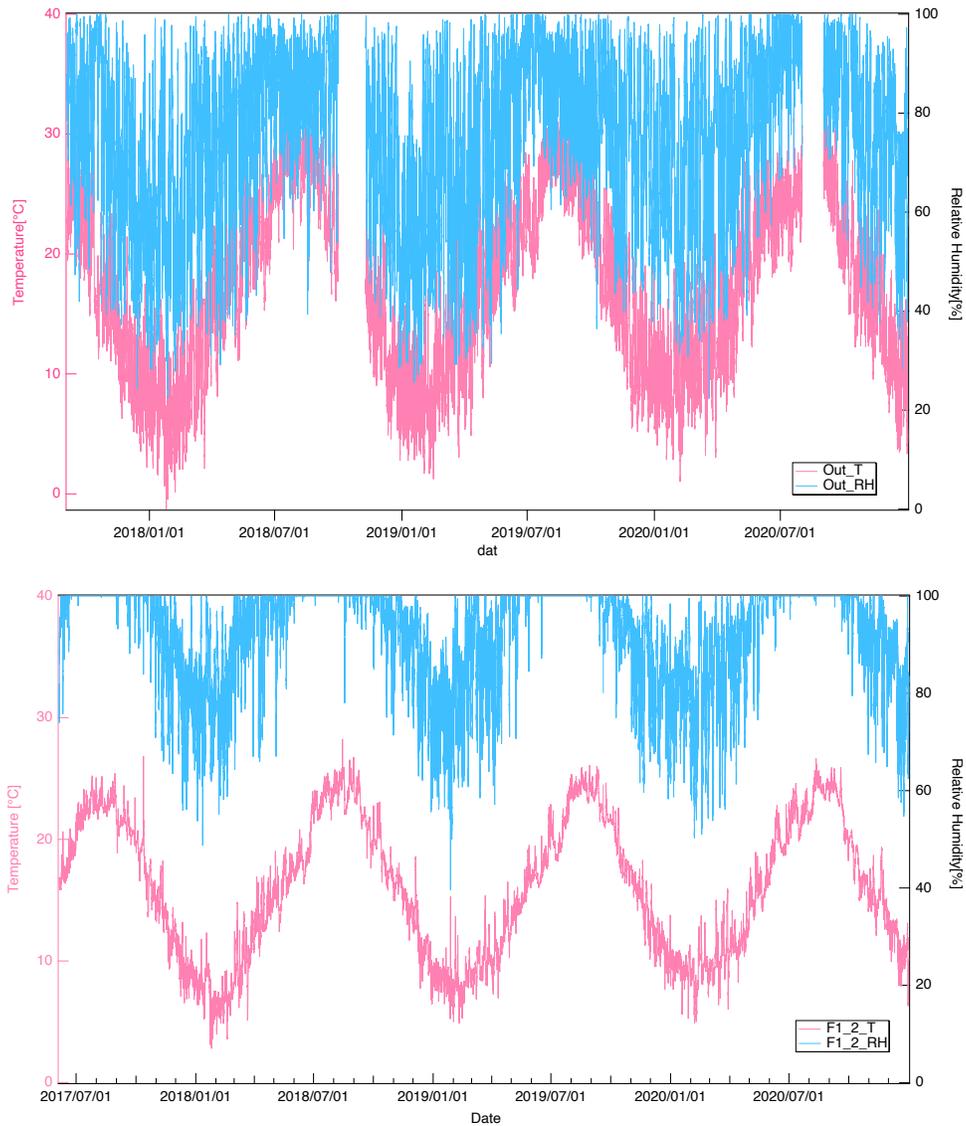


図 3.8 (a) 屋外の温湿度挙動、(b) f1-2 内の温湿度挙動

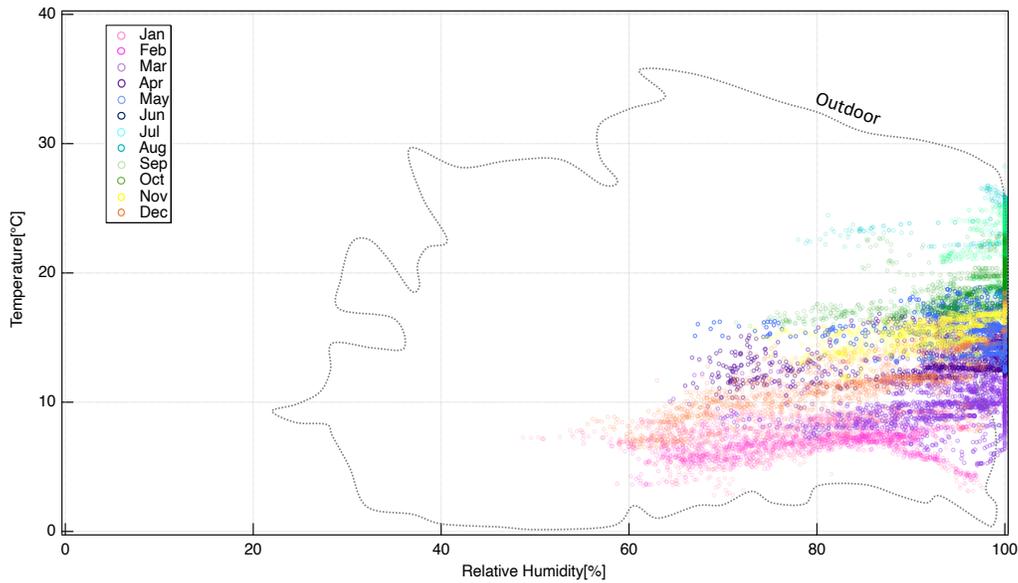


図 3.9 屋外及び f1-2 内における各月の温湿度挙動

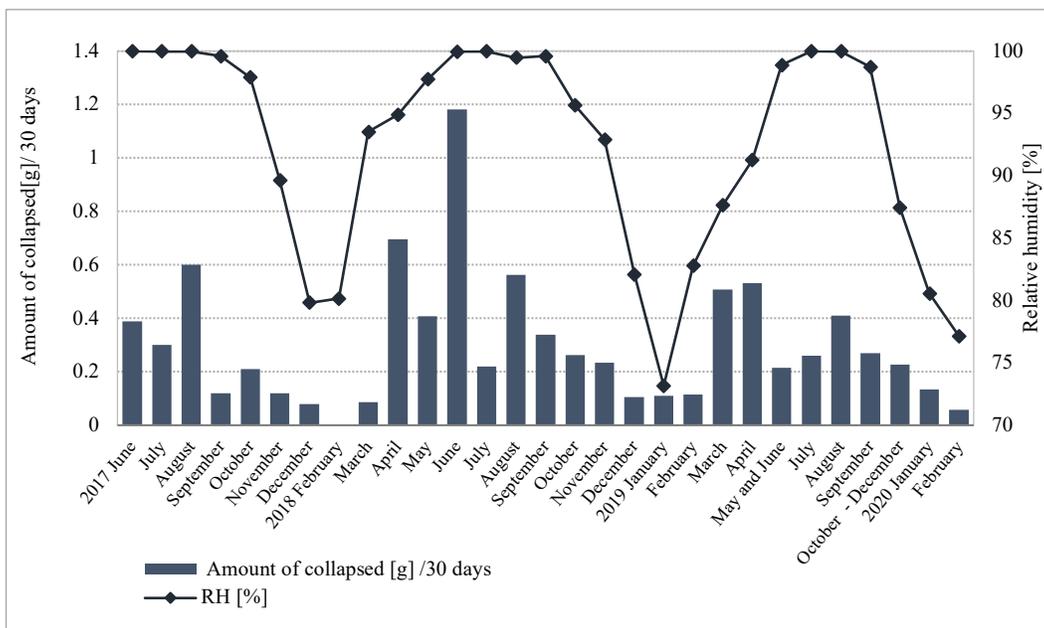


図 3.10 f1-2 内における相対湿度と崩落量の挙動

次に構造物内の環境を踏まえた上で煉瓦の劣化状況について述べていく。図 3.10 は f1-2 内の煉瓦壁面からの崩落量と相対湿度の変動を示したものである。f1-2 内の煉瓦の崩落量は日本の春季にあたる 4 月と雨季から夏季にあたる 6 月から 8 月にかけて増加することがわかった。特に 2018 年 6 月に崩落量が急増していたが、これは崩落物内に粒状になって崩落した煉瓦に加え、直径約 1cm~1.5cm の煉瓦の剥離片がその月の崩落量全体の約 50%の量含まれていたことが原因である。また崩落量が増

加する時期は構造物内の相対湿度が上昇する時期と約 100%と高湿になる時期に一致していた。しかし、2018年7月の調査時にトレイを確認したところトレイが転倒しており、正確な測定結果を得ることができなかった。一方、8月以降から冬季の間では崩落量が減少傾向にあり、特に毎年1月と2月においては煉瓦壁面からの崩落はほとんど見られず、崩落量が減少する時期は相対湿度が低下する時期と一致していた。小口らによって行われた旧下野煉瓦窯での調査結果によると、崩落した煉瓦片の重量は春先から夏の終わりにかけて多くなっており、これらの崩落が引き起こされる時期は湿度が上昇して既存の塩類が潮解する時期であることが報告されている<sup>44</sup>。猿島砲台跡の煉瓦構造物内でも同様の時期に崩落量の増加が見られた。また相対湿度は温度と密接に関係しており、崩落量が増加する時期の温度を確認したところ春季は温度が上昇し始める時期であり、夏季は構造物内の温度がその年の最も高くなりかつ相対湿度が約 100%に到達することが分かった。

さらに各時期に得られた崩落物の XRD 分析の結果を表 3.2 に示す。崩落物からは主に煉瓦を構成していたと考えられる長石類や雲母類の鉱物のほか、年間を通して難溶性塩類である Gypsum( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )や Calcite( $\text{CaCO}_3$ )が検出された。また崩落量が増加した 2018年4月及び5月にはこれまで検出されていた塩類に加えて Thenardite( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )、Epsomite( $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ )、そして Sylvite(KCl)が検出された。ここで Thenardite の水和物である Mirabilite( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ )が検出される可能性もあったが、検出されなかった要因として硫酸ナトリウムは温湿度条件によって安定相である Thenardite または Mirabilite として存在する<sup>45</sup>が、煉瓦崩落物を採取してから実験室で分析するまでの郵送過程において温湿度変化が生じ、Thenardite へ変化してしまったことが考えられる。Thenardite や Epsomite は可溶性塩類であり、他の塩と比較して破壊力が大きく、危険な塩類として知られている。その中でも Thenardite は 20°C で相対湿度 70~100%に変化するときに Mirabilite へ相変化するが、その際に生じる圧力は 50MPa になることがわかっている<sup>46</sup>。1MPa は縦1m、横1m の範囲に約 102t の重さが作用する圧力であるため、Thenardite が Mirabilite へ相変化する際に生じる50MPa は非常に大きな圧力であり、煉瓦を破壊するには十分な圧力である。さらに Mirabilite の溶解度は温度に強く依存することが知られており、温度が 32.38°Cより低い場合には温度が下がるにつれて塩が安定となる相対湿度範囲が拡大する。例えば、25°C、80%RH、あるいは 0°C、60.7%RH の環境下で Mirabilite に転移することが報告されている<sup>47</sup>。また

<sup>44</sup> Oguchi C, Matsukura Y, Kuchitsu N, “Environmental and Seasonal Influences on the Spatial Distribution of Salt Efflorescence and Weathering on Brick Kiln Walls”, *地形*, vol.23, no.2, pp.335-348, 2002

<sup>45</sup> Steiger M, Asmussen S, “Crystallization of sodium sulfate phases in porous materials: The phase diagram  $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$  and the generation of stress”, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol.72, no.17, pp.4291-4306, 2008

<sup>46</sup> E. M. Winkler, Wilhelm E.J. “Salt Burst by Hydration Pressures in Architectural Stone in Urban Atmosphere,” *GSA Bulletin*, vol.81, no. 2, pp.567-572, 1970, doi: 10.1130/0016-7606(1970)81[567:SBBHPI]2.0.CO;2.

<sup>47</sup> Robert J. Flatt., 2002, Salt damage in porous materials:how high supersaturations are generated, *Journal of Crystal Growth*, 242, 435-454

川野らの調査によると、石窟遺構に見られる塩類風化において、テナルダイトの析出時に塩類の結晶が岩石表面を破壊し岩石を粉状化しており、特に塩類が溶出する湿潤期に表面が弱くなり粉状に崩壊することが分かっている<sup>48</sup>。この表面が粉状に崩壊することについて、実際に現地で行った目視観察から煉瓦の場合にも生じている可能性は高い。

以上のことから、硫酸ナトリウムが煉瓦内に存在する場合に最も危険であるのは、硫酸ナトリウムが Thenardite として析出、溶解し Mirabilite として析出が生じる状況である<sup>49</sup>。さらに高湿な環境下でこれらの塩類が潮解し煉瓦表面が弱くなることで煉瓦の崩壊が誘発されていることが考えられる。調査を行った f1-2 内の温湿度は、年間を通して約 7℃～28℃、50%RH～100%RH の範囲で変動している。さらに雨季から夏季にかけては 100%RH の状態が維持され、非常に高湿な環境となる。このように、構造物内の環境は Thenardite から Mirabilite への相変化が生じ、さらにこれらが析出と潮解を繰り返す条件を満たしている。このような現象が繰り返し生じたことで煉瓦表面の崩壊が促進されたと考える。すなわち、猿島砲台跡における東洋組煉瓦の劣化を誘発している要因は構造物内の温湿度環境及びその挙動と煉瓦内に含まれている塩類である可能性が高いと言える。

---

<sup>48</sup> 川野辰康、小坂和夫、“中世石窟遺構の塩類風化—鎌倉のやぐらの例—”、応用地質、vol.43、no.3、pp.124-133、2002

<sup>49</sup> 水谷悦子、小椋大輔、石崎武志、佐々木淑美、安福勝、“ハギア・ソフィア大聖堂の屋内外環境が壁劣化に及ぼす影響—相図による塩析出環境条件の検討—”、保存科学、vol.59、pp.89-101、2020

表 3.2 崩落物からの検出物

Year	Month	Moisture absorption/ desorption conditions of bricks	Detected materials					
			Feldspar	Mica	Gypsum (CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O)	Calcite (CaCO <sub>3</sub> )		
2017	June	Retention	Feldspar	Mica	Gypsum (CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O)	Calcite (CaCO <sub>3</sub> )		
	July	Retention	Feldspar	Mica	Gypsum	Calcite		
	August	Retention	Feldspar	Mica	Gypsum	Calcite		
	September	Retention	Feldspar	Mica	Gypsum	Calcite		
	October	Desorption	Feldspar	Mica	Gypsum	Calcite		
	November	Desorption	Feldspar		Gypsum			
	December	Desorption	Feldspar		Gypsum			
	2018	March	Adsorption	Feldspar				
		April	Adsorption	Feldspar			Calcite	Thenardite (Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )
		May	Adsorption	Feldspar	Mica	Gypsum	Calcite	Epsomite (MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O)
		June	Retention	Feldspar	Mica	Gypsum	Calcite	Epsomite Sylvite
		March	Adsorption	Feldspar		Gypsum	Calcite	
May		Adsorption	Feldspar	Mica	Gypsum	Calcite		
2019	July	Retention	Feldspar		Gypsum	Calcite		
	September	Retention	Feldspar	Mica	Gypsum	Calcite		
	December	Desorption	Feldspar		Gypsum	Calcite		
	February	Adsorption	Feldspar	Mica	Gypsum	Calcite		

次にこれらの結果から、構造物内の温湿度環境と煉瓦に含まれている塩類が煉瓦の崩壊を誘発しているということを実証すべく、実際に塩を含有させた単体の煉瓦試験体(縦 5cm、横 3.5cm、高さ 6cm)9 点を2022 年 8 月 9 日から1ヶ月間に渡り f1-2 内に設置した。試験体は東洋組煉瓦と物性が類似するものを使用し、それら 3 点ずつを濃度 1mol/L と 0.25mol/L に調整した  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  水溶液にそれぞれ 24 時間浸漬させ、その後 48 時間以上乾燥させたものを試験体として使用した。各試験体の物性値は付録-表 2 に示す。また塩を含まない試験体も 3 点用意した。これらの試験体は f1-2 内に設置する際に、床面や壁面からの水分供給の影響を受けないようにポリプロピレン製のトレイの上に静置させた(図 3.11)。そして、試験体を設置してから1ヶ月後に崩落が起きているのかその有無を確認した。

その結果、塩を含有していない試験体は 3 点とも試験体からの崩落等は見られなかった。一方で塩を含有させた試験体は 濃度 1mol/L の  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  水溶液に浸漬させた試験体のうち 1 体の試験体に大きな崩落を確認した(図 3.12)。濃度 0.25mol/L の  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  水溶液に浸漬させた試験体には崩落がやや見られたが、濃度が 1mol/L の塩水溶液で作成した試験体と比較すると崩落の程度は小さい結果であった。以上のことから f1-2 内では煉瓦が塩を含んでいる場合、温湿度の挙動により煉瓦の崩落が誘発されることが実証され、猿島砲台跡における東洋組煉瓦に見られる煉瓦表面の崩壊などの劣化は屋内の温湿度環境と煉瓦内に存在する塩類が最大の要因であることを明確にした。



図 3.11 煉瓦試験体の設置様子



図 3.12 1mol/L の  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  水溶液で作成した煉瓦試験体に見られた崩壊

### 第3節 東洋組煉瓦に含まれる塩類の起源の解明

第2節にて煉瓦の崩壊を誘発する要因の一つとして東洋組煉瓦内に存在する塩類が挙げられたが、塩類が外部から供給されたものであるのかまたは煉瓦が製造された時点から本来煉瓦内に存在していたものであるのか、その起源については不明である。そこで本節ではこの塩類の起源を解明すべく遺跡内で確認された漏水の水質調査及び東洋組煉瓦内部の硫酸イオン濃度を調査した。

#### 3.3.1 遺跡内漏水のIC分析

モニタリング調査を行った f1-2は隧道内に位置する地下施設であるが、この地下施設の外壁側すなわち隧道からは漏水が見られ、特に雨季から夏季の時期には煉瓦壁面が濡れ色に変化するほど隧道上部からの漏水が確認されている(図 3.13)。塩の成分である  $\text{SO}_4^{2-}$  などの陰イオンが外部から供給されたものであると仮定した場合、この壁面を滴る漏水が塩類の起源である可能性が考えられる。そこでイオンクロマトグラフ(IC)を用いて隧道内の漏水の水質を確認した。漏水は2018年に横須賀市により行われた隧道内煉瓦壁面のコア抜き作業でできた穿孔より放出していたものであり、同年5月から11月にかけて大量の漏水が放出され、その後2022年3月に至るまで漏水量は大幅に減少し、僅かに見られる程度であった(付録-図2)。2018年5月にこの漏水が見られた箇所より



図 3.13 隧道に見られる漏水の様子

45mlの漏水試料を2点採取した。採取した漏水試料は実験室内にて約5mlを穴径0.45 $\mu\text{m}$ の濾過フィルター(sartorius社製 Minisart RC4)に通した後にICに直接注入して測定を行なった。分析装置にはMetrohm社製、883 Basic IC plusを用いた。分離カラムMETRO A Supp 5 25/4.0 (6.1006.530)を使用し、流量0.70 mL/minとした。

#### 3.3.2 東洋組煉瓦内部の硫酸イオン濃度分布調査

次に塩の成分である  $\text{SO}_4^{2-}$  などの陰イオンは煉瓦が製造された時点から東洋組煉瓦に含まれているものであるのか否かを確認するために猿島砲台跡 f1-2 内で採取された完形の東洋組煉瓦を外側から煉瓦内部(中心部)に向けて2.5cm ずつ切断し煉瓦の外側から内側に向けての  $\text{SO}_4^{2-}$  の濃度変化から塩類の起源を検討した。 $\text{SO}_4^{2-}$  の濃度変化はIC分析を用いて評価を行った。分析試料である完形の東洋

組煉瓦(図 3.14)は短辺 110mm、長辺 230mm、厚さが 55mm であった。また二面ある長手面のうち片方の長手面には漆喰が塗られた形跡が見られたことから、この面が外側であり、この長手面に対向するもう一つの長手面が壁面内側にあつたと考えた。このことを踏まえて、分析に用いる抽出液の作成にあたり、完形の煉瓦を図 3.15 にあるように①外側の長手面から内側に向けて 2.5cm ずつ裁断したものと、②小口面から煉瓦中心部に向けて 2.5cm ずつ裁断したもののそれぞれの裁断面から煉瓦粉末を採取し、瑪瑙製乳鉢と乳棒で粉碎した。そしてそれらを超純水に投入後 48 時間震盪させ、その後 24 時間静置し抽出液を作成した。煉瓦粉末に対して超純水の量は煉瓦粉末量の 1000 倍の量とした。作成した抽出液は穴径 0.45  $\mu$ m の濾過フィルター(sartorius 社製 Minisart RC4)を用いて濾過させた後に、陰イオン分析を行った。分析装置には Metrohm 社製、883 Basic IC plus を用いた。分離カラム METRO A Supp 5 25/4.0 (6.1006.530)を使用し、流量 0.70 mL/min とした。



図 3.14 東洋組煉瓦 (平手面)

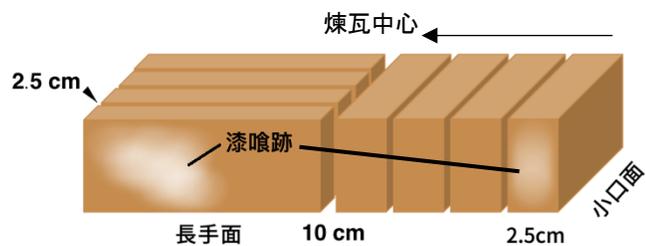


図 3.15 煉瓦試料の裁断位置

### 3.3.3 結果と考察

まず史跡内に見られた漏水の陰イオン分析結果から検討していく。漏水の陰イオン分析結果を表 3.3 に示す。表 3.3 は遺跡内で採取した漏水試料 2 点より得られた分析結果の平均値を表したものである。分析の結果、隧道内の漏水からは塩化物イオン ( $\text{Cl}^-$ ) と  $\text{SO}_4^{2-}$  が検出された。しかし隧道内の漏水に含まれる陰イオンの濃度はいずれも飲料水や湧水に含有されている陰イオン濃度と同等であり、塩類風化を引き起こす程の濃度ではない。そのため猿島砲台跡で見られた漏水は塩類の起源ではないと判断した。

表 3.3 漏水の陰イオン分析結果

採取日	Cl <sup>-</sup> (ppm)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (ppm)
2018. 5.14	16.7	24.8

次に東洋組煉瓦内の SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>濃度分布について検討していく。図 3.16 は IC 分析結果を表したものである。薄く漆喰が付着していた外側の長手面から内側すなわち煉瓦中心部に向けて SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>濃度は徐々に低下していることがわかる(図 3.16 a)。しかし外側の長手面から中心に向かって 7.5cm 地点においても SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>濃度は 7000ppm を超えており、全体的に高濃度であると言える。図 3.16 b は小口面から煉瓦中心への SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>濃度分布を表したものであり、小口面から 10cm 地点が煉瓦中心部に値するが、小口面から煉瓦中心にかけての SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>濃度は、7500ppm～8000ppm という結果であり中心部に向かって大きな濃度変化は見られなかった。煉瓦の性質に関する研究において、素木によると建築用煉瓦は水溶性の塩を多少含有していると報告されており、また煉瓦内に硫酸塩が生成される要因として煉瓦の原料に本来から含まれていた場合や、煉瓦を焼成した際の燃料に含まれていた硫黄が考えられると述べている<sup>50</sup>。これらのことから、東洋組煉瓦は外側から煉瓦中心部にかけて大きな SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>濃度変化が見られず、煉瓦内にほとんど均一の状態では SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>が存在していたため、猿島砲台跡における東洋組煉瓦に含まれていた塩類の起源は史跡内の漏水ではなく、煉瓦が製造された工程上にある可能性が示唆された。しかし、その起源が煉瓦の原料であるのか焼成時の燃料であるのかまでは明確にできていない。また猿島砲台跡は戦後 GHQ によっていくつかの煉瓦構造物が爆破処理されたと報告されているため爆破処理による影響や爆破された環境に数年晒された煉瓦はどれほどの SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>が付着、流入するのかを確認する必要があることや、長期間付着していた目地の影響など、この塩類の起源についてはより慎重に再検討する余地がある。

<sup>50</sup> 素木洋一、1963、セラミック外論(40)、窯業協會誌、71(813)、p.C470-C476。Doi: [https://doi.org/10.2109/JCERSJ1950.71.813\\_C470](https://doi.org/10.2109/JCERSJ1950.71.813_C470)

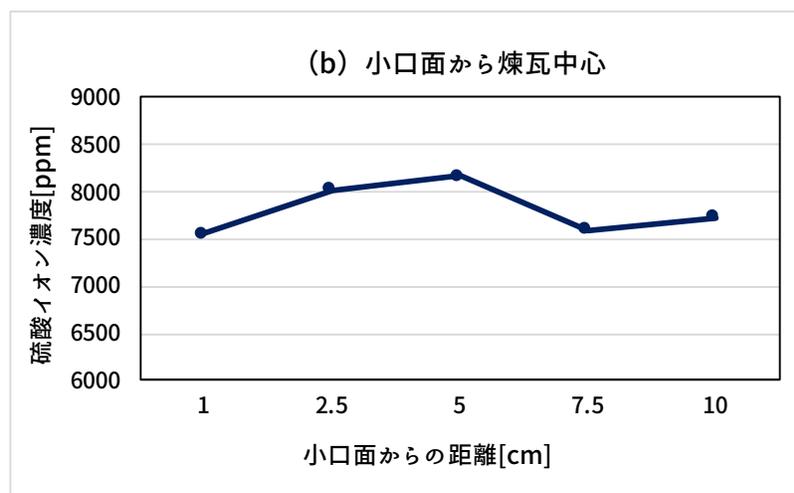
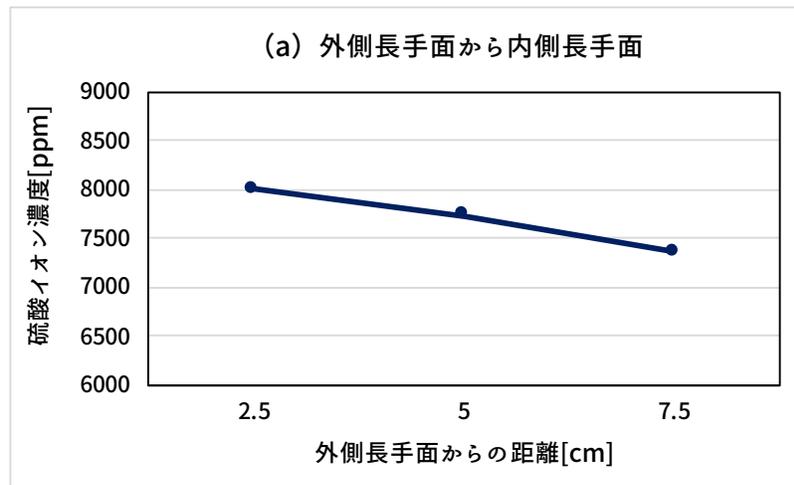


図 3.16 (a) 外側長手面から煉瓦中心にかけての  $\text{SO}_4^{2-}$  濃度分布  
 (b) 小口面から煉瓦中心にかけての  $\text{SO}_4^{2-}$  濃度分布

#### 第4節 煉瓦壁面の水分率変動がもたらす劣化への影響

東洋組煉瓦内に塩類が存在することから、劣化が進行する要因の一つとして煉瓦内の水分状況も考慮する必要がある。タイ・アユタヤの煉瓦造建造物の事例では雨季による多量の水分が煉瓦内に流入し、その後乾季に煉瓦表面から水分が蒸発することに伴って、塩類風化現象が発生したことが報告され

ている<sup>51</sup>。また非破壊による含水率測定で塩類風化の劣化進行に水分が影響を与えていることがわかっている<sup>52</sup>。最近では建築環境工学的な観点から煉瓦壁体内の水分挙動のシミュレーションやそれらを用いて劣化原因の特定を行うなどの研究が進展している<sup>53, 54</sup>。これらの先行研究を踏まえ、煉瓦壁面の水分率変動と煉瓦壁面の劣化状況を併せて考察することによってその関係性を明確にすることが期待できる。そこで本節では 2018 年 8 月から 2019 年 12 月までの 17 ヶ月にわたり煉瓦水分率の実測データを収集した。

### 3.4.1 測定方法

水分率測定の装置として Kett 社製のコンクリート・モルタル水分計 HI-520 を用いた。この水分計は検出部を煉瓦表面に押し当てることで煉瓦表面から深さ最大 40mm までの煉瓦の水分による高周波容量の変化を検出して、水分を測定することができる<sup>55</sup>装置である。本調査では高周波容量モードを使用したため、水分計には高周波容量に匹敵する値(D 値)が示される。この時示される D 値は水分が多いものほど大きな値となる。そして、この D 値から煉瓦の水分率を求めるために実験室内にて半完形の東洋組煉瓦 3 点を用いて水分計のキャリブレーションを行なった。さらにその結果から検量線を作成し、水分率の値を算出する式を作成した。キャリブレーションはまず煉瓦試料を水中に 24 時間完全に浸水させ、浸水から 24 時間後にそれらを取り出し実験室内で乾燥させた。乾燥開始から毎 12 時間の間隔で水分計を用いた煉瓦表面の測定と煉瓦の質量計測を行い、煉瓦の水分率を算出した。水分率は式 3.1 を用いて求めた。図 3.17 に誘電率と水分率の関係を示す。そして図 3.17 から式 3.2 を東洋組煉瓦に対する較正式とした。

$$u = \frac{Ww}{Ws+Ww} \quad (3.1)$$

ここで、 $u$  は水分率 (%)、 $Ww$  は水分量、そして  $Ws$  は煉瓦の乾燥重量である。

$$y = 27.502x + 198.36 \quad (3.2)$$

<sup>51</sup> 石崎武志、西浦忠輝、ユッカ シムネック、マルチヌス ヴァンゲニヒテン、“タイ国スコータイ遺跡の大仏中の水分移動解析”，保存科学, vol.39, pp.43-50, 2000, doi: <http://id.nii.ac.jp/1440/00003557/>

<sup>52</sup> 内田悦生，“石が語るアンコール遺跡—岩石学からみた世界遺産—”，早稲田大学出版部, 2011

<sup>53</sup> 鉢井修一，“建築環境工学からみた文化財保存に及ぼす水分の影響”，日本生気象学会雑誌, vol.55, no.1, pp.3-8, 2018, doi: [10.11227/seikisho.55.3](https://doi.org/10.11227/seikisho.55.3)

<sup>54</sup> 高取伸光、小椋大輔、脇谷草一郎、安福勝、桐山京子，“覆屋の改修が石仏の塩類風化に与える影響の熱水分移動解析による評価—元町石仏の保存に関する研究 その 2—”，日本建築学会環境系論文集, vol. 85, no. 768, pp. 137-147, 2020, doi: <http://doi.org/10.3130/aije.8>

<sup>55</sup> 株式会社ケツト科学研究所，“コンクリート・モルタル水分計 HI-520 取扱説明書”，株式会社ケツト科学研究所, 2022/05/19, [https://www.kett.co.jp/wp-content/uploads/2018/09/hi-520\\_manual\\_rev0302\\_web.pdf](https://www.kett.co.jp/wp-content/uploads/2018/09/hi-520_manual_rev0302_web.pdf) (閲覧日:2022 年 5 月 19 日)

### 3.4.2 測定範囲と測定条件

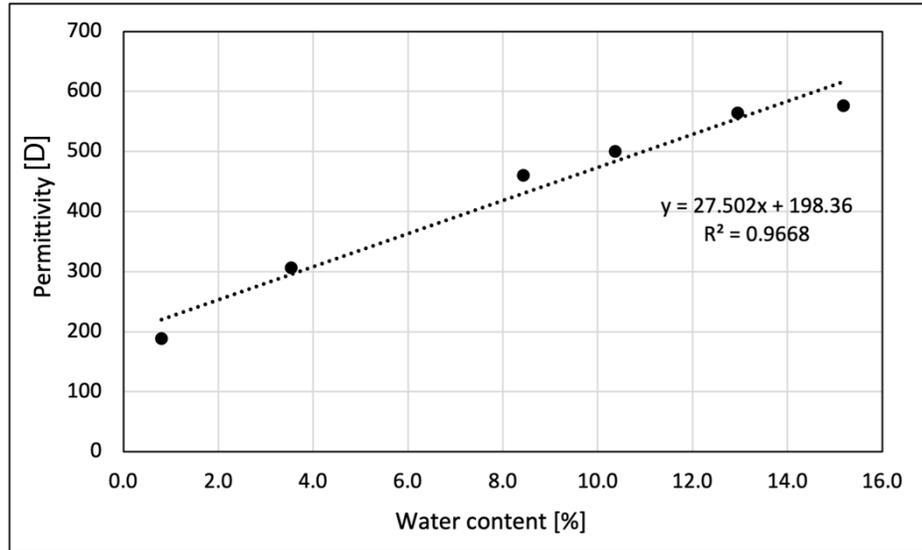


図 3.17 D 値と水分率の関係



図 3.18 煉瓦壁面の水分率の測定範囲

煉瓦壁面の水分率測定は f1-2 内東面(図 3.18)の一部で行った。壁面範囲は高さ 104.5cm、幅 245cm であり、煉瓦総数は 215 個であった。測定条件は、高周波容量モード(D.MODE)、厚さ 40mm、温度は AUTO mode に設定した。測定は 2018 年 8 月、10 月、11 月、12 月、2019 年 4 月、6 月、7 月、8 月、9 月、そして 12 月の 17 ヶ月間にわたり合計 10 回行った。

### 3.4.3 結果と考察

水分計による計測で得られた実測値をもとに図 3.19 を作成した。図 3.19 は煉瓦壁面の水分率の挙動を示したものであり、水分率が低い箇所は寒色に、一方で水分率が高くなるにつれて暖色になるように色分けをした。図内の数値は水分率を表す。

まず図 3.19 からは一つの壁面上に水分率が 3%以下と低い煉瓦と水分率20%を超える高い水分率の煉瓦が混在していることがわかる。次にこの水分率の変動について言及していく。水分率測定を開始した 2018 年 8 月以降、煉瓦壁面の水分率は壁面上部の煉瓦から徐々に上昇し冬季にあたる 11 月に最も高くなる。その際に水分率の高い煉瓦は壁面の南側に集中していることがわかった。その後春季である 4 月には壁面全体の水分率は最も低下し、2018 年 11 月の平均値が 16.4%であったことに対し 2019 年 4 月は平均値が 10.0%と 6.4%低くなっていることが分かった。その後は雨季である 6 月にかけて水分率が徐々に上昇するが、雨季後の 7 月には全体の水分率が低下する。そして夏季である 8 月から冬季にかけて再度水分率が徐々に上昇していくことがわかった。このことから水分率の推移には季節性が見られ、このようなサイクルを毎年繰り返していることが考えられる。

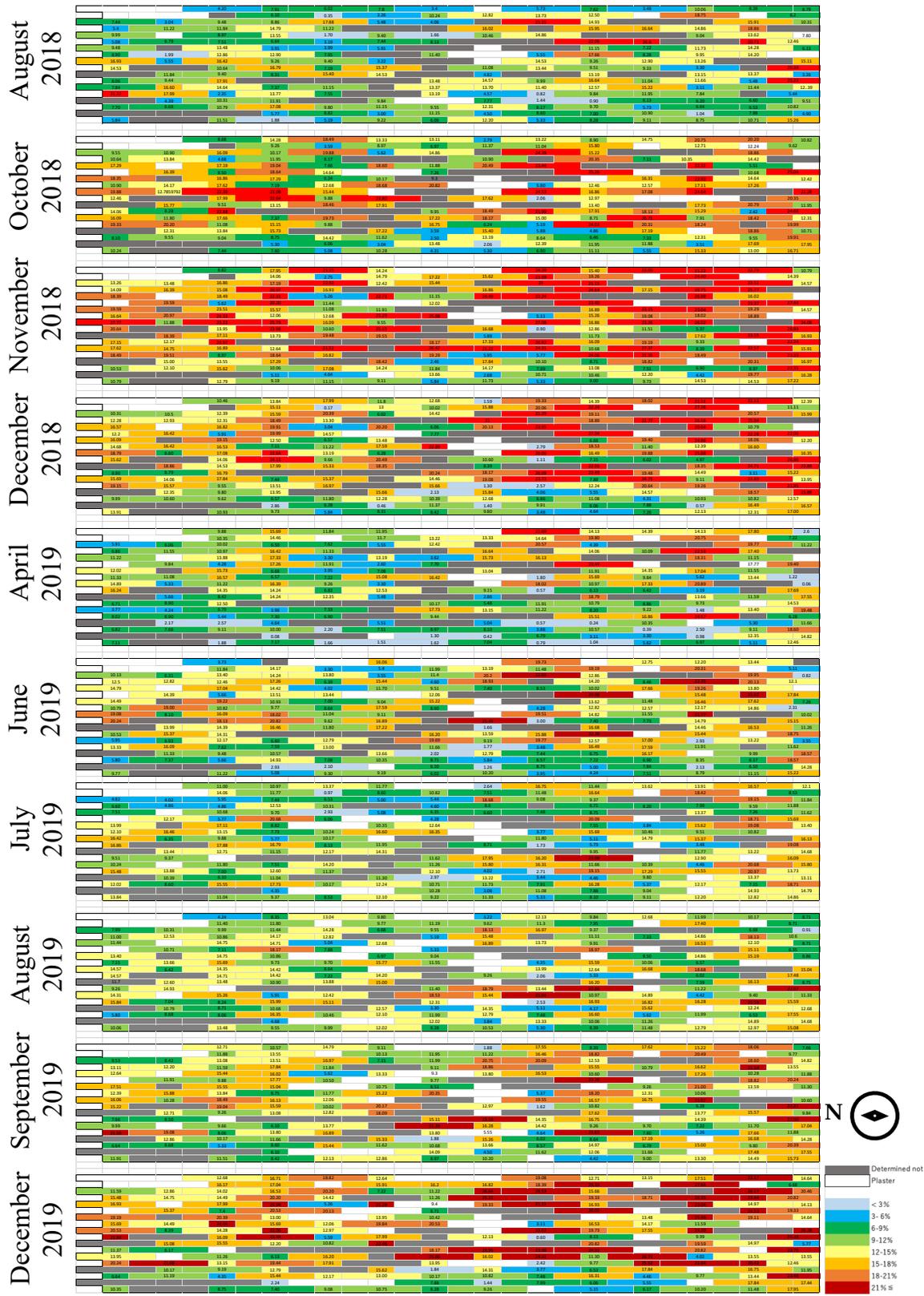


図 3.19 f1-2 煉瓦壁面における水分率の挙動

このようなサイクルを繰り返すことは、猿島砲台跡で使用されている東洋組煉瓦が持つ水分吸放湿特性に影響しているためであることが考えられる。図 3.20 は北海道大学大学院環境システム工学研究室のご協力のもと 25℃の条件下で実施された水分吸脱着試験結果を表す。東洋組煉瓦の場合、相対湿度が 80%を超えると吸湿が進み煉瓦内に含まれる水分量が増加する。その後相対湿度の低下とともに放湿されるが、放湿過程では少量の放湿量では含水率が低下しないため、放湿が継続的に起こる。この特性と構造物内の環境を併せて考えると、相対湿度が 75%以上に上昇する 2 月～6 月にかけて煉瓦は水分を吸湿する。そして構造物内の相対湿度が 100%に達する 6 月～9 月の間は水分を煉瓦内に保持する。その後相対湿度が低下し始める 10 月～1 月にかけて水分が放湿されると考えられる。しかし図 3.20 から、東洋組煉瓦には同じ相対湿度環境下であっても放湿過程では吸湿過程よりも水分を多く保持する特性が見られる。そのため壁面の水分率が全体的に最も高い 11 月は構造物内の相対湿度は低下し始めるものの、依然として相対湿度 90%を超える状態であり、放湿量は少ないことが考えられる。ゆえに煉瓦内に水分を多く保持した状態となり煉瓦壁面の水分率が高いままの状態であった可能性が考えられる。さらに図 3.10 で示した煉瓦の崩落量と併せて考察すると、崩落量が著しく増加する 4 月は吸湿過程に値するため、煉瓦が水分を吸湿する際に崩落が引き起こされていると言える。

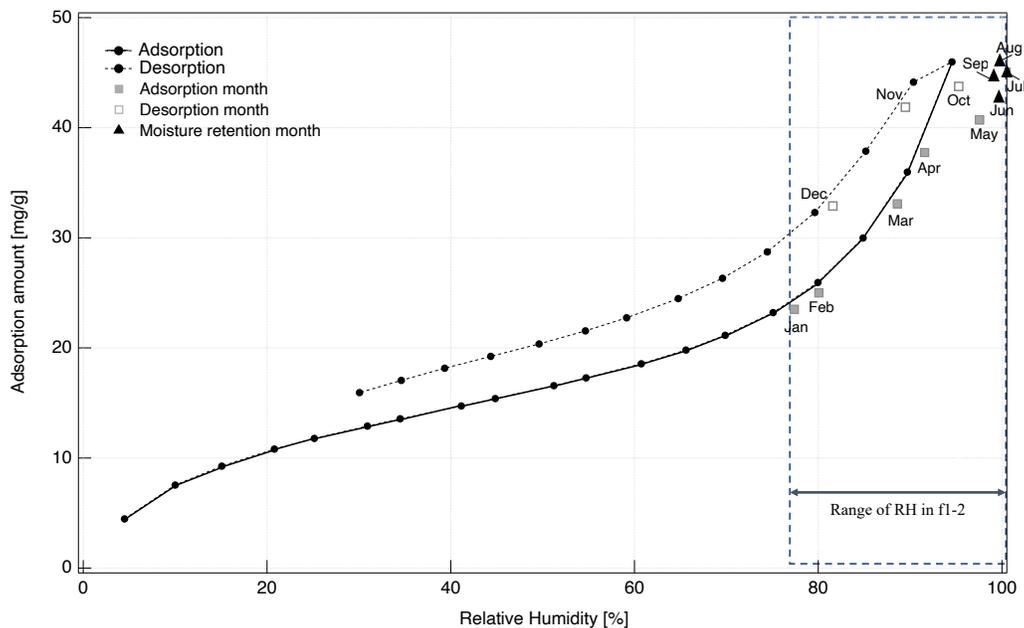


図 3.20 東洋組煉瓦の水蒸気吸脱着等温線

次に、水分率の変動が見られた煉瓦の位置及びどのような変動パターンを有しているのかを解明するために、測定月間で3%以上水分率の変動が見られた煉瓦の位置追跡を行った。その結果を図 3.21 に示す。使用した装置のキャリブレーション時における偏差が約2%であったため測定値3%以上を「水分率が変動した」と判断した。

図 3.21 では前回測定月より3%以上水分率が上昇した煉瓦は橙色に、一方で水分率が3%以上低下した煉瓦は青色に色付けした。さらに9%以上の水分率変動が見られた煉瓦はそれぞれ濃い橙色、青色に色付けをした。まず測定開始した2018年8月と比較して同年10月に測定した煉瓦全体のうちの154個の煉瓦に3%以上の水分率変動が見られた。変動が見られた154個の煉瓦のうち約80%の煉瓦に水分率の上昇が見られ、約20%の煉瓦は水分率が低下していた。また図 3.21-a より、水分率が9%以上と大きく変動している煉瓦が多数見られることが分かる(図 3.21-a)。翌月の11月では壁面全体の水分率が最も高くなるが、前回測定月と比較して3%以上の変動が見られた煉瓦は86個であり、その内の95%は水分率が上昇した煉瓦であり、変動した煉瓦のほとんどは水分率が上昇していたことがわかった。その後12月にはこれまで水分率が上昇していた煉瓦が多く見られていたことに対し、水分率変動が見られた煉瓦の約80%は水分率が低下し、一部の煉瓦のみ水分率が上昇していることがわかった(図 3.21-c)。壁面の水分率が最も低くなる春季である4月には122個の煉瓦に水分率の変動が見られ、その内93%は水分率が低下した煉瓦であった(図 3.21-d)。その後雨季の6月は水分率が変動した煉瓦のうち82%は水分率が上昇し、18%は水分率が低下する(図 3.21-e)。夏季の8月以降は冬季にかけて変動した煉瓦は全体の約30%と多くはないが、その内の約60~80%の煉瓦は水分率が上昇し、約20~30%の煉瓦は水分率が低下していた。つまり水分率が上昇する煉瓦と低下する煉瓦が混在していることが分かる(図 3.21-g, h, i)。

以上の結果から、壁面に使用されている煉瓦には煉瓦の水分率が a)9%以上変動し上昇と低下を短期間で繰り返すものと、b)水分率変動は3%以下にとどまり徐々にゆっくりと変動していくもの c)水分率はほとんど変化しないものの3パターンに分類できることが分かった(図 3.22)。さらに a のパターンをもつ煉瓦表面の状態を確認したところ、表面は粒状に崩壊しており、剥離なども観察され、顕著な劣化が見られる煉瓦が多い傾向にあった。また表面は手で触れると崩壊してしまうほど脆弱であった。パターン b においても煉瓦表面が粒状に崩壊しているものを確認したが、パターン a のような大きな剥離は見られず劣化の程度も a のものよりは軽度であった。一方で水分率がほとんど変化しないパターン c の煉瓦は、表面に漆喰が薄く残っており、これが影響している可能性が考えられるが、煉瓦表面の状態は良好であり崩壊等はほとんど見られなかった(図 3.23)。これらのことから、水分率挙動が上昇と低下を短期間で繰り返すパターン a の煉瓦は劣化の進行が速い傾向にあるため、最も注意すべき煉瓦であり、優先的

に処置を行うべき煉瓦であると言える。その次パターン b の煉瓦に注意する必要がある。また測定開始時期から終始、煉瓦表面に濡れなどは確認できなかったことから、これらの水分率変動は構造物外からの漏水や地下水などの影響ではなく、外気からの湿度が影響を及ぼしている可能性が考えられる。そのため、本章を通して考えられる煉瓦の崩落を抑制するための対策として、煉瓦内から塩類を除去(脱塩)することや、煉瓦の吸湿や水分の流入を制御すること、または構造物内の温湿度環境を制御することなどの方法が挙げられる。

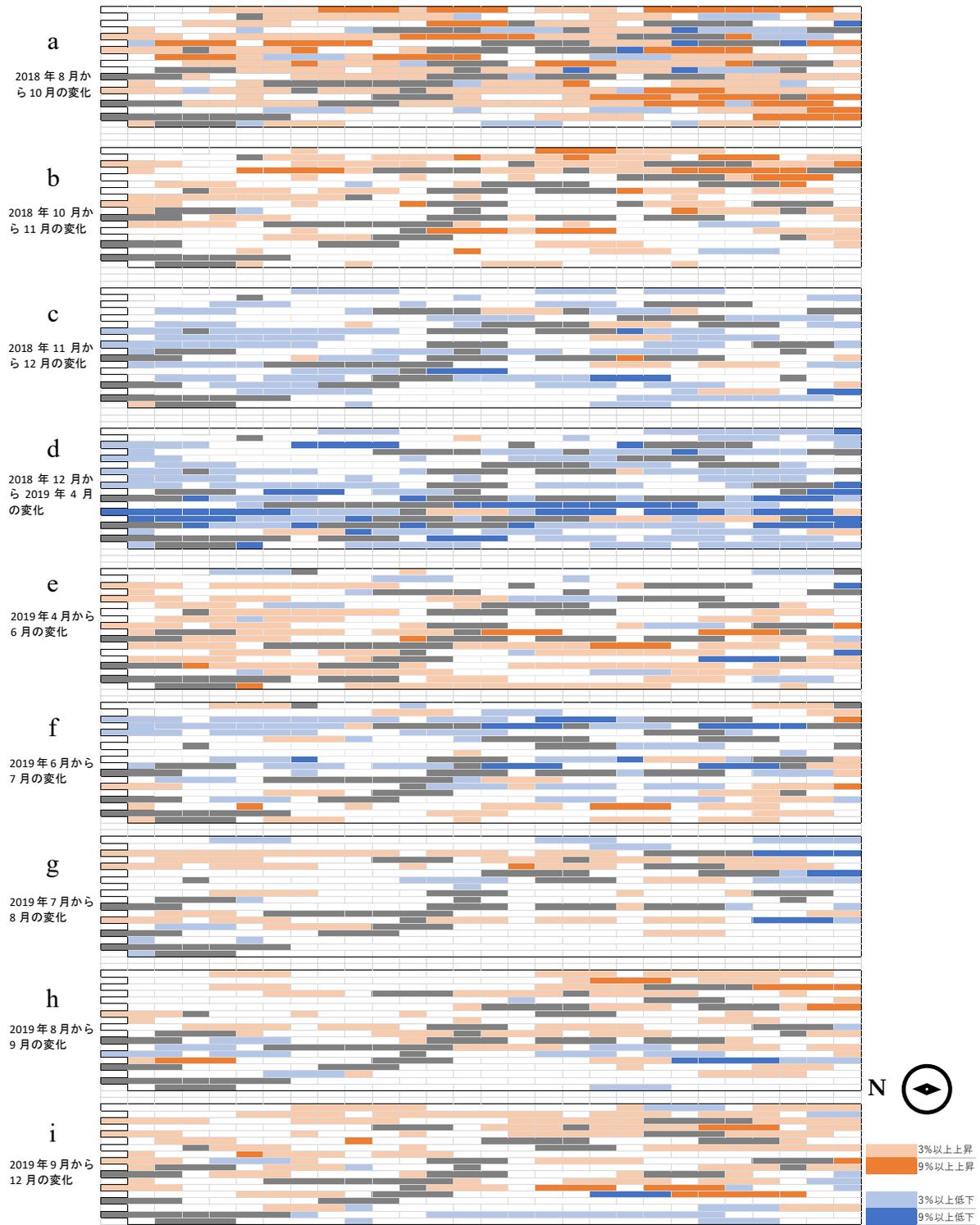


図 3.21 f1-2 煉瓦壁面における水分率の変動

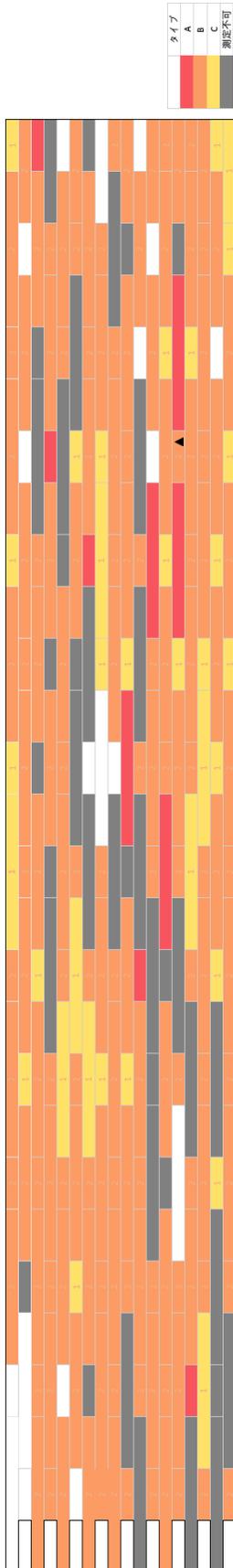


図 3.22 f1-2 東壁面における水分率挙動のパターン

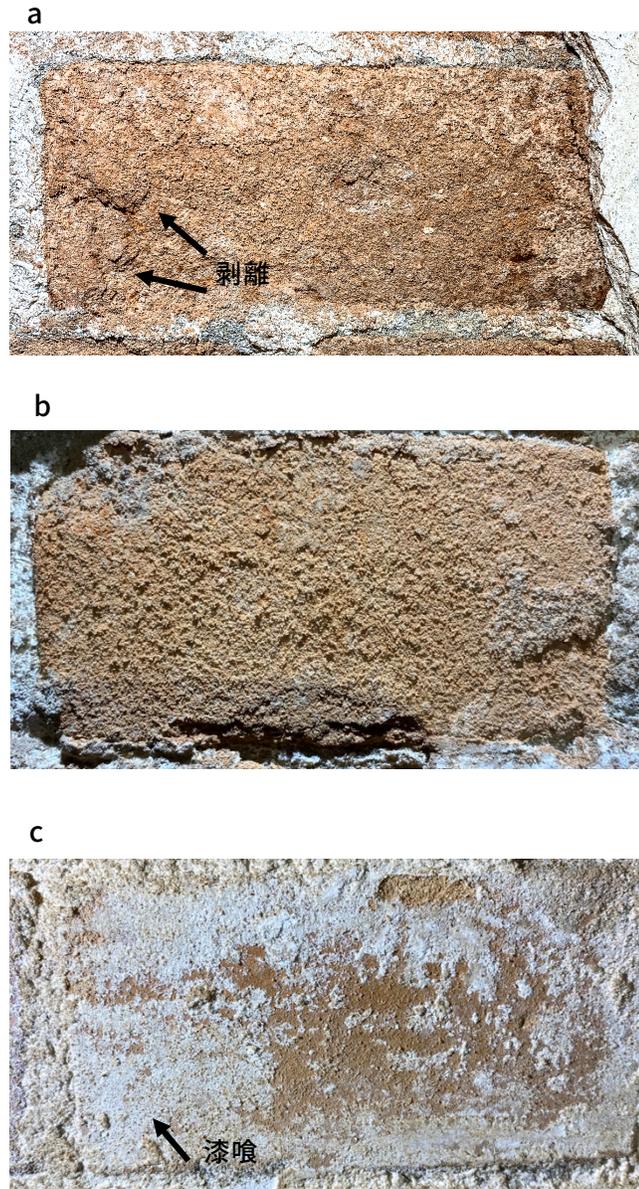


図 3.23 パターン別煉瓦の表面状態 (a : 剥離や表面の崩壊が見られるパターンaの表面、b : 表面が粒状に崩壊しているパターンbの表面、c : 表面の崩壊がほとんど見られないパターンcの表面)

## 第4章

### 電気化学的脱塩工法を用いた煉瓦の脱塩

## 第4章 電気化学的脱塩工法を用いた煉瓦の脱塩

第3章にて猿島砲台跡における東洋組煉瓦の劣化の現状及びその要因について説明を行い、東洋組煉瓦に見られた煉瓦表面の崩壊は遺構内の温湿度変化に伴う煉瓦の水分率の変動による塩類風化であることがわかった。塩類風化は煉瓦に見られる代表的な劣化現象の一つであり、一般的に地下水や風雨などにより煉瓦や目地内部に侵入した水分が気化する際に、水分に溶解した塩類が煉瓦内の空隙部や表面で結晶化することで煉瓦を破損させる現象であるとされている(図 4.1)。この際に塩類が及ぼす応力が煉瓦の引っ張り強度を上回ると煉瓦の破壊が発生する<sup>56, 57</sup>。塩類風化により劣化した煉瓦からは  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ (thenardite) や  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (epsomite) など様々な種類の塩類が検出されており、これらの塩類が析出と潮解を繰り返すことで煉瓦の劣化を進行させる。しかし、朽津らは煉瓦に見られる塩類風化は必ずしも室外から供給される水分によってもたらされるとは限らないことを指摘している。朽津は事例として江戸東京博物館で屋内展示されている「銀座煉瓦街遺構」に見られる塩類風化を挙げており、当該施設では煉瓦の含水率が季節変動し、それに伴って煉瓦表面が崩壊していたことを明らかにした<sup>58</sup>。第3章の結果から猿島砲台跡における東洋組煉瓦の場合は朽津らが指摘したように構造物内の温湿度環境によって煉瓦の含水率が変動し、それに伴って塩類風化による煉瓦表面の劣化が発生していたと言える。

この劣化現象に対する保存処置に関してこれまでいくつか研究が行われている。朽津らは塩類風化を引き起こす要因の一つである水分の侵入を抑制させることを目的に親水性樹脂の塗布を試験的に行った<sup>59</sup>。その他にも相川によって浸透性コーティング剤を用いた煉瓦の処理が試みられ、塩類風化の抑

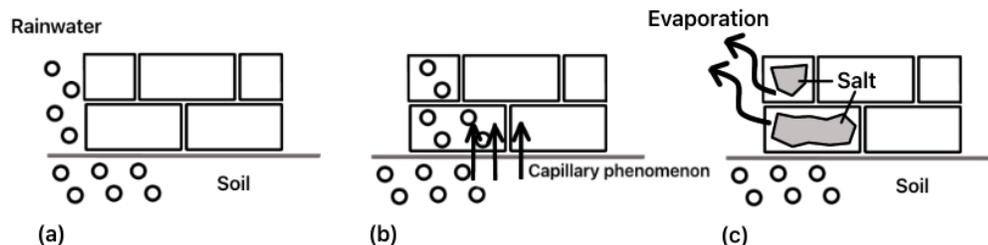


図 4.1 塩類風化の発生過程 (著者作成)

<sup>56</sup> 沢田正昭, 文化財保存科学ノート(東京: 近未来社, 1997)

<sup>57</sup> 東京文化財研究所, 未来につなぐ人類の技 17 煉瓦像建造物の保存と修復, 東京文化財研究所, 2017

<sup>58</sup> 朽津信明, 森井順之, “江戸東京博物館「銀座煉瓦遺構」の劣化と保存”, 保存科学, No.43, pp.55-61, 2003.

<sup>59</sup> 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, Vol.40, p.35-46, 2001

制に効果が見られた<sup>60</sup>と報告されている。さらに最近では環境工学の観点から、数値解析やシミュレーションを用いて温湿度環境を調整することで塩類風化の発生を予防する方法<sup>61,62</sup>や、塩類風化の発生要因の一つである水分の発生源を断つための工事<sup>63</sup>、劣化した煉瓦部分を修復材により修復する方法などの研究、開発が行われている<sup>64</sup>。その他にも、親水性樹脂や浸透性塗料を用いた塩類風化に対する処理が研究されてきたが、いずれも試験段階であり、煉瓦の保存方法は未確立であることが現状である。

本章では煉瓦の劣化に対する解決策の一つとして電気化学的脱塩工法(ED)を用いた煉瓦の脱塩モデルを作成し、ED 試験を通してその効果を検討した。また ED モデルの作成にあたっては、より扱いやすく入手し易い素材の選定を行なった。さらに日本の煉瓦造の文化財の場合、すべての煉瓦壁面が塩類風化で劣化しているわけではなく、劣化が見られる箇所は散在していることが多い。そのため、壁面全体を処理するのではなく、劣化が見られる部分のみを処理することで、保存処理の時間やコストを削減できると考える。しかし、必要な箇所のみ脱塩については、従来検討されてこなかったことから、個々の煉瓦を対象とした簡易かつ設置が容易な ED モデルの開発を試みた。電極には入手が容易な素材である銅板と炭素棒を用いてそれぞれの素材が脱塩に与える効果を検討した。また、通電条件を変えて試験を行い通電後の煉瓦表面を観察することで、ED モデルの脱塩効果を確認するとともに、実用化に向けた知見を得ることを目的とした。

---

<sup>60</sup> 相川悠, "煉瓦の吸水放湿特性にみる塩の影響及び保存修復材料の検討," (修士論文, 筑波大学大学院, 2013).

<sup>61</sup> S.Hokoi, "Influence of moisture on conservation of cultural properties from an architectural environmental engineering viewpoint," *Japanese journal of biometeorology*, vol.55, no.1, pp.3-8, 2018, doi: 10.11227/seikisho.55.3

<sup>62</sup> N. Takatori, D. Ogura, S. Wakiya, M. Abuku, K. Kiriya, "Numerical Evaluation of the Influence of Salt Damage by Improvement of the Shelter – Study on the conservation of a stone Buddha carved into a cliff at Motomachi PART 2 –," *Transactions of AIJ. Journal of environmental engineering*, vol. 85, no. 768, pp. 137-147, 2020, doi: <http://doi.org/10.3130/aije.8>

<sup>63</sup> 東京文化財研究所, *未来につなぐ人類の技 17 煉瓦像建造物の保存と修復*, 東京文化財研究所, 2017

<sup>64</sup> A.V. Skopintsev, G.E. Shapiro, "Comparative analysis of the materials' choice for the brick restoration technologies in the cultural heritage sites' facades," *Materials Science and Engineering*, vol.913, pp.1-7, 2020, doi: 10.1088/1757-899X/913/3/032016

## 第1節 電気化学的脱塩(ED)

電気化学的脱塩(ED)とは、外部から電気を流すことで対象となる試供体中に存在する塩化物イオン( $\text{Cl}^-$ )や硫酸イオン( $\text{SO}_4^{2-}$ )などのイオンを電気泳動によって移動させ、除去または低減させる方法である。この方法は主にコンクリート構造物の脱塩工法として確立され、実際に用いられてきた。コンクリートの劣化現象は中性化や塩害などが挙げられるが、これらはコン

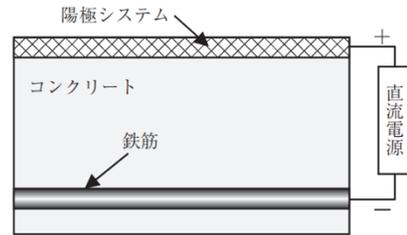


図 4.2 コンクリートに対する電気化学的補修工法概念図 (山本 2017 より引用)

クリート中に二酸化炭素や塩化物イオン、水分などの劣化を引き起こす物質が移動することによって生じると考えられている<sup>65</sup>。コンクリート構造物に対して、電気化学的手法の一つである脱塩工法を用いる場合、コンクリート表面に設置した陽極システムを直流電源装置の陽極側、コンクリート内部鉄筋を陰極側に接続し、コンクリートを介して内部鉄筋に直流電流を供給する。そしてコンクリート内部の塩化物イオンをコンクリート表面に設置した陽極側へ引き寄せ外部に除去することを目的としている<sup>66</sup>(図 4.2)。またコンクリート構造物にこの工法を適用する場合、各種イオンを強制的に移動させる必要があるため、 $1 \text{ A/m}^2$ 程度の直流電流が数ヶ月程度供給される<sup>11</sup>。国内では 1992 年からコンクリート構造物に対して実際に適用され、その効果が報告されている<sup>67</sup>。この方法を応用し、煉瓦においても通電による脱塩の効果が期待できる一方で、歴史的建造物における煉瓦の脱塩に用いられた事例は日本国内ではほとんど無い。一方、海外では煉瓦を対象とした ED 試験が活発に行われてきた。Ottosen や Paz-García らによって行われた試験では数種類の塩を脱塩の対象とし、その結果、塩化物や硝酸塩は ED によって 99% まで除去できることが報告されている<sup>68, 69</sup>。その一方で硫酸塩は他の塩に比べて完全に除去することが難しく除去率は 89%にとどまると述べられている<sup>70</sup>。

<sup>65</sup> 横関康祐、取違剛、“コンクリートの含水状態および空隙構造が塩分浸透に与える影響”、*セメント・コンクリート論文集*, No.71(1), pp.367-372, 2020, DOI: <https://doi.org/10.14250/CEMENT.71.367>

<sup>66</sup> 山本誠、“コンクリート分野で活用する電気化学的手法の基礎 ③コンクリート構造物の電気防食工法”、*コンクリート工学*, No.55(12), pp.1061-1065., 2017, doi:<https://doi.org/https://doi.org/10.3151/coj.55.12.1061>

<sup>67</sup> 徳光卓, 芦田公伸, 古賀裕久, “電気化学的脱塩工法による塩害補修の留意点”, *コンクリート工学*, vol. 48, no.5, pp. 115-18, 2010, doi: 10.3151/COJ.48.5.115.

<sup>68</sup> L. M. Ottosen, A. J. Pedersen, and I. Rørig-Dalgaard, “Salt-Related Problems in Brick Masonry and Electrokinetic Removal of Salts,” *Journal of Building Appraisal*, vol. 3, no.3, pp. 181-194, 2007, doi:10.1057/PALGRAVE.JBA.2950074/FIGURES/9

<sup>69</sup> Paz-García, J.M., B. Johannesson, L.M. Ottosen, A.B. Ribeiro, and J.M. Rodríguez-Maroto, “Simulation-Based Analysis of the Differences in the Removal Rate of Chlorides, Nitrates and Sulfates by Electrokinetic Desalination Treatments,” *Electrochimica Acta*, vol. 89, pp. 436-444, 2013, doi:10.1016/j.electacta.2012.11.087.

<sup>70</sup> S. Gry, L. M. Ottosen, P. E. Jensen, and J. M. Paz-García, “Electrochemical Desalination of Bricks - Experimental and Modeling,” *Electrochimica Acta*, vol. 181, pp.24-30, 2015, doi:10.1016/j.electacta.2015.03.041.

## 第2節 銅板を用いた ED 試験

煉瓦に対する ED の効果を検討するために第2節から第3節にかけて局所的に煉瓦の脱塩が可能な ED モデルを作成し、異なる2つの素材を電極とした脱塩試験を行った。本節では電極として銅板を用いて行った ED 試験について言及していく。

### 4.2.1 試験体

試験体として用いた煉瓦は、明治 20 年以前(1870 年代)に国内生産された富岡製糸場で用いられた煉瓦の物性を模して作成された煉瓦を使用した。第2章で述べたように、明治 20 年以前に作られた煉瓦は、ばらつきが見られ、現代の煉瓦の規格と比較して吸水率は高く、圧縮強度は低く、現代の煉瓦の JIS 規格を満たしていないものが多いことが分かっている。また、日本国内で初めて煉瓦の規格が定められたのは 1924 年であったため、それ以前に製造された煉瓦の物性は不安定であったことが考えられる。試験では上記の煉瓦を縦 5 cm、横 5 cm、高さ 11 cm に切断し(図 4.3)、各試験体を 35.5 g/L (0.25 M)の濃度に調整した  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  水溶液に 5 日間浸漬させ、試験体の水分率が 0.05% 未満になるまで乾燥させたものを試験体として用いた。 $\text{Na}_2\text{SO}_4$  は煉瓦に影響を及ぼす代表的な塩類の一つであり第 3 章にて述べたように塩類の中でも特に危険性が高い塩類である。さらに、第1節で述べたように、他の塩と比較して煉瓦からの除去が困難な塩である。これらの理由から、本試験では  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  水溶液を使用した。

$\text{Na}_2\text{SO}_4$  水溶液の濃度は、予備試験を通して試験体作成時に煉瓦表面が過度に崩壊せず、通電後の試験体の表面状態の評価に影響を及ぼさない濃度であったことから  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  水溶液の濃度を 0.25M に設定した。表 4.1 には各試験体の物性値を示す。

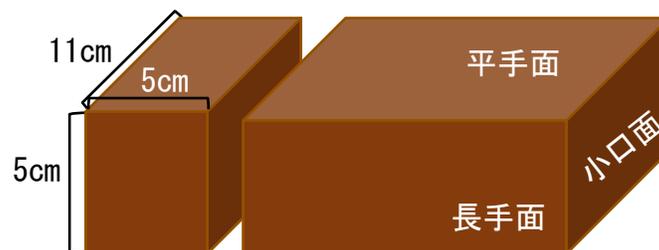


図 4.3 煉瓦試験体の切断方向

表 4.1 試験体の物性

No.	Absolute dry weight[g]	Water absorption[%]	Volume[cm <sup>3</sup> ]	Dry density[g/cm <sup>3</sup> ]	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> content[g]
control	592.45	17.91	275	2.15	5.14
A1	556.29	18.44	275	2.02	3.19
A2	621.96	18.80	275	2.26	4.86
B1	581.75	18.87	275	2.12	4.03
B2	589.41	18.65	275	2.14	5.55
C1	586.42	18.81	275	2.13	5.70
C2	606.06	17.91	275	2.20	4.51
C3	625.6	17.33	275	2.27	4.25

## 4.2.2 ED モデル

試験に用いた ED モデルを図 4.4 及び図 4.5 に示す。電極には粉末セルローズ(Holland Gwabo 社製 Arbocel BC1000)と銅板(幅 15 mm、長さ 45 mm、純度 99.96%)を使用した。アーボセルは本来、岩石やフレスコ画の洗浄、湿布の調整用の不活性充填剤として使用されているものであり、親水性で水に不溶性の性質を持つ<sup>71, 72</sup>。そのため電極設置時に煉瓦表面を傷つけることなくかつ水分を必要な量だけ含有させることができるためアーボセルを電極素材として用いた。電極部の作成にあたり、まず乾燥したアーボセル 25g に、電気抵抗率 18.2M $\Omega$ /cm の超純水を、試験体乾燥重量に対して 20%の量を加え混合した。水分量は試験体の乾燥を防ぐことができる重量に設定した。湿潤させたアーボセルは試験体の側面2面と下面に貼り付け、さらに側面に貼り付けたアーボセル中に銅板を挿入した。この時、銅板が試験体の表面に接触しないようにした。試験は煉瓦の小口面(縦 5cm、横 5cm)を天地とし、電極は2側面の上部に設置した。なお、アーボセルの乾燥を防ぐために表面をプラスチックフィルムで被覆した。

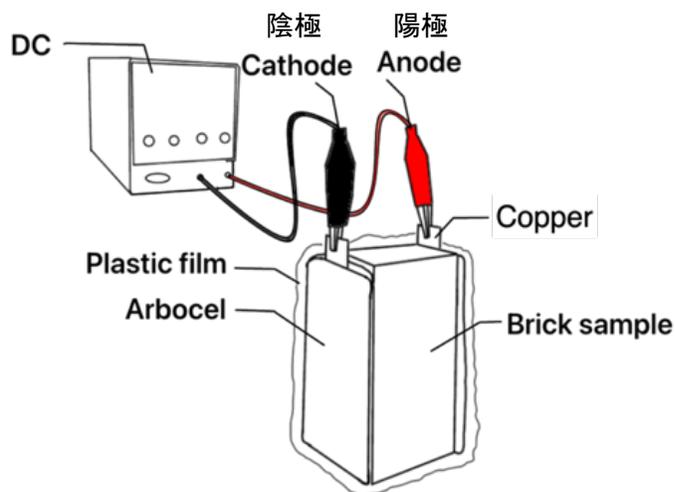


図 4.4 ED モデル (著者作成)

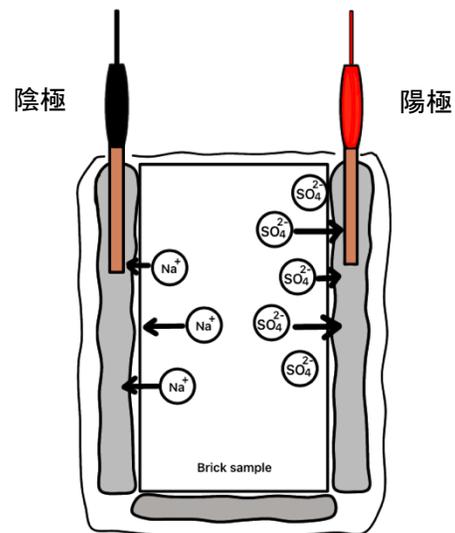


図 4.5 ED モデルの断面図 (著者作成)

<sup>71</sup> P.Bosch-Roig, G.Lustrato, E.Zanardini, G.Ranalli, " Biocleaning of Cultural Heritage stone surfaces and frescoes: which delivery system can be the most appropriate? ," *Annals of Microbiology*, vol. 65, pp.1227-1241, 2015, doi:10.1007/s13213-014-0938-4

<sup>72</sup> IN SITU Museum and Archive Services, "ARBOCEL BC1000 powderd cellulose", [https://www.insituconservation.com/en/products/resin\\_additives/arbocel\\_bc1000](https://www.insituconservation.com/en/products/resin_additives/arbocel_bc1000), (Reading date: 2022/04/11)

### 4.2.3 試験方法

試験手順を図 4.6 に示す。試験体に電極を設置後、直流安定化電源を用いて通電した。またコントロールとして無通電の試験体も用意した。各試験体に加えた電圧および電流条件を表 4.2 に示す。ED 試験における通電期間は全て8日間とし、通電 4 日目には試験体の乾燥を防ぐために両極に設置したアークセルに超純水を追加した。追加した超純水の量は試験体の乾燥重量の20%の量とした。通電終了後はハンマーと鑽を用いて試験体を図 4.7 に示したセクション位置で切断した。切断後はイオンクロマトグラフによる  $\text{SO}_4^{2-}$  濃度の定量評価を行うために図 4.7 に示す位置から約3g の煉瓦粉末を採取した。試験後はイオンクロマトグラフ (IC) 分析による  $\text{SO}_4^{2-}$  濃度の定量評価と目視観察により脱塩の評価を行った。

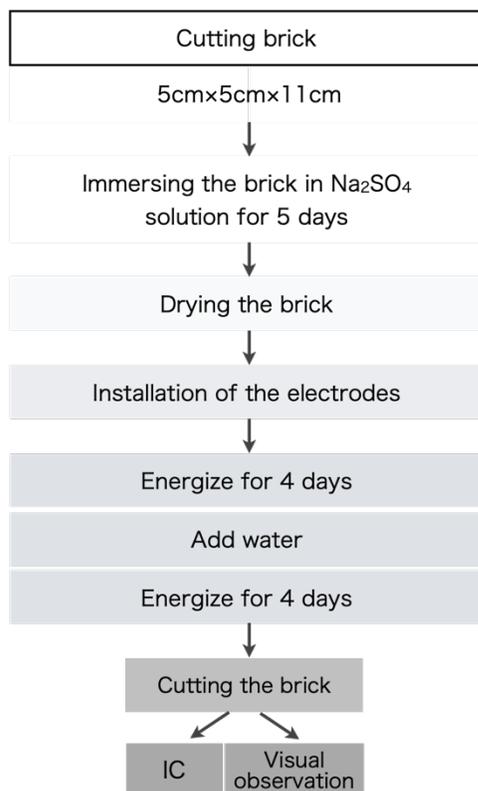


表 4.2 各試験体の通電条件

No.	Voltage[V]	Current[A]	Additional water supply
control	0	0	×
A1	5	0.1	○
A2	5	0.1	○
B1	5	0.5	○
B2	5	0.5	○
C1	5	1	○
C2	5	1	○
C3	5	1	○

○ 水の供給あり  
× 水の供給なし

図 4.6 試験のフローチャート

#### 4.2.4 評価方法

試験の評価にはイオンクロマトグラフ(IC)分析による $\text{SO}_4^{2-}$ 濃度の定量評価および煉瓦表面の目視観察を行った。IC分析に使用する抽出液は、採取した煉瓦粉末を瑪瑙製乳鉢と乳棒で粉砕し、それらを超純水に投入後48時間震盪させた後に24時間静置させ、その上澄み液を抽出液とした。煉瓦粉末15mgに対して超純水の量は1.5mlとした。抽出液は孔径 $0.45\mu\text{m}$ の濾過フィルター(sartorius社製 Minisart RC4)を用いて濾過させた後に、陰イオン分析を行った。分析装置はMetrohm社製、883 Basic IC plusを用いた。分離カラムMETRO A Supp 5 25/4.0 (6.1006.530)を使用し、流量 $0.70\text{ mL/min}$ とした。

また試験終了後に試験体を乾燥させ、塩類の析出の有無を目視観察により確認した。より詳細な煉瓦表面の状態観察はKEYENCE社製 Digital microscope VHX 900を用いた。目視観察では特に通電後の煉瓦表面の状態に焦点を当て、通電後において塩の析出は見られるか、またその場合どのような形態で析出しているのか、また煉瓦表面における剥離や粉状化のような劣化の有無に着目しながら観察を行った。

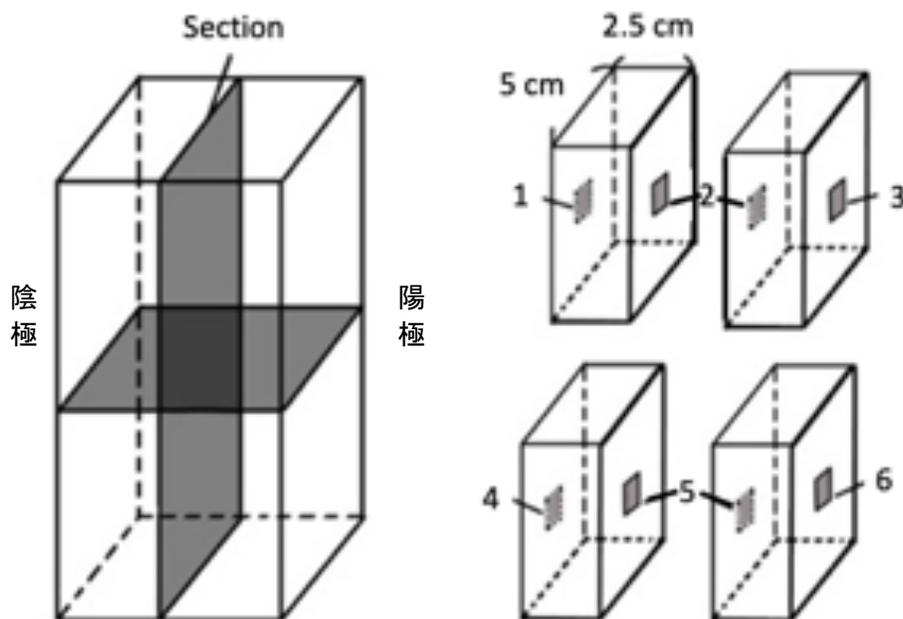


図 4.7 試験体の切断位置と煉瓦粉の採取箇所

#### 4.2.5 結果と考察

IC 分析結果を図 4.8 に示す。また分析結果は試験体の上部と下部に分けて説明する。まず試験体上部において通電条件が 0.1A 以上の場合、試験体上部全体の  $\text{SO}_4^{2-}$ 濃度が荷電しなかったコントロールの試験体に比べて減少していた。特に、通電条件が 0.5A および 1A の場合に、陰極側から中間部にかけて  $\text{SO}_4^{2-}$ 濃度の低下が顕著に現れていることがわかった。しかし、図 4.8 に示されるように、陽極側の  $\text{SO}_4^{2-}$ 濃度が高いことから、煉瓦中の  $\text{SO}_4^{2-}$ は陰極側から陽極側に向かって移動し、煉瓦外部の陽極側に設置したアーボセル及び銅板へ移動することで煉瓦内から除去されるが、一部の  $\text{SO}_4^{2-}$ は煉瓦内に残留していることが考えられる。

一方、試験体下部ではコントロールの試験体では  $\text{SO}_4^{2-}$ 濃度の低下は見られなかったが、0.1A 以上の電流を流すと陰極側の  $\text{SO}_4^{2-}$ 濃度が低下し、陽極側の  $\text{SO}_4^{2-}$ 濃度が上昇することがわかった。さらに、0.5A や 1A の電流を流すことで、陰極側だけでなく中間部においても  $\text{SO}_4^{2-}$ 濃度の低下が見られた(図 4.7)。これらの結果から電圧 5V 時に、0.5A または 1A の条件下で通電すると、試験体上部と同様に試験体下部においても陰極側に存在していた  $\text{SO}_4^{2-}$ が陽極側に移動することがわかった。しかし、試験体上部に対して下部では  $\text{SO}_4^{2-}$ 濃度の低下が見られず、脱塩効率は上部よりも低下している可能性が考えられる。

次に目視観察の結果を表 4.3 に示す。表 4.3 において「陽極側上部写真」(表内 1 段目)として撮影された試験体写真は図 4.7 において煉瓦粉を採取するために試験体が切断された際の陽極側上部(右上)の煉瓦ピースである。通電しなかったコントロールの試験体は全体的に塩の析出が見られた。また試験体表面上の剥離を確認した。さらに顕微鏡観察では析出していた塩は針状の形態をしており、塩の周囲を取り巻くように粒状となった煉瓦が付着していることがわかった。通電条件 5V, 0.1A の試験体はコントロールのものと同様に表面全体に塩が析出しており、塩の析出に伴って表面が粒状となり崩落していたことが顕微鏡画像から確認された。しかし、コントロールのものと比較すると剥離等は見られず、表面状態の崩壊程度はやや抑制されていた。一方で通電条件が 0.5A 以上の試験体は塩の析出はごく僅かの状態または、全く析出していない状態であった。僅かに塩の析出が確認された試験体を顕微鏡で観察したところ、析出した少量の塩は皮膜を形成するように析出していたが、試験体表面は良好な状態であり、剥離や粉化などの劣化は認められなかった。目視観察の結果から、電極に銅板を用いて 5V, 0.5A 以上の条件下で通電した場合、煉瓦に対して通電後の経過観察においても塩が析出しないまたは表面の崩壊が進行しない程度の脱塩効果が得られることがわかった。

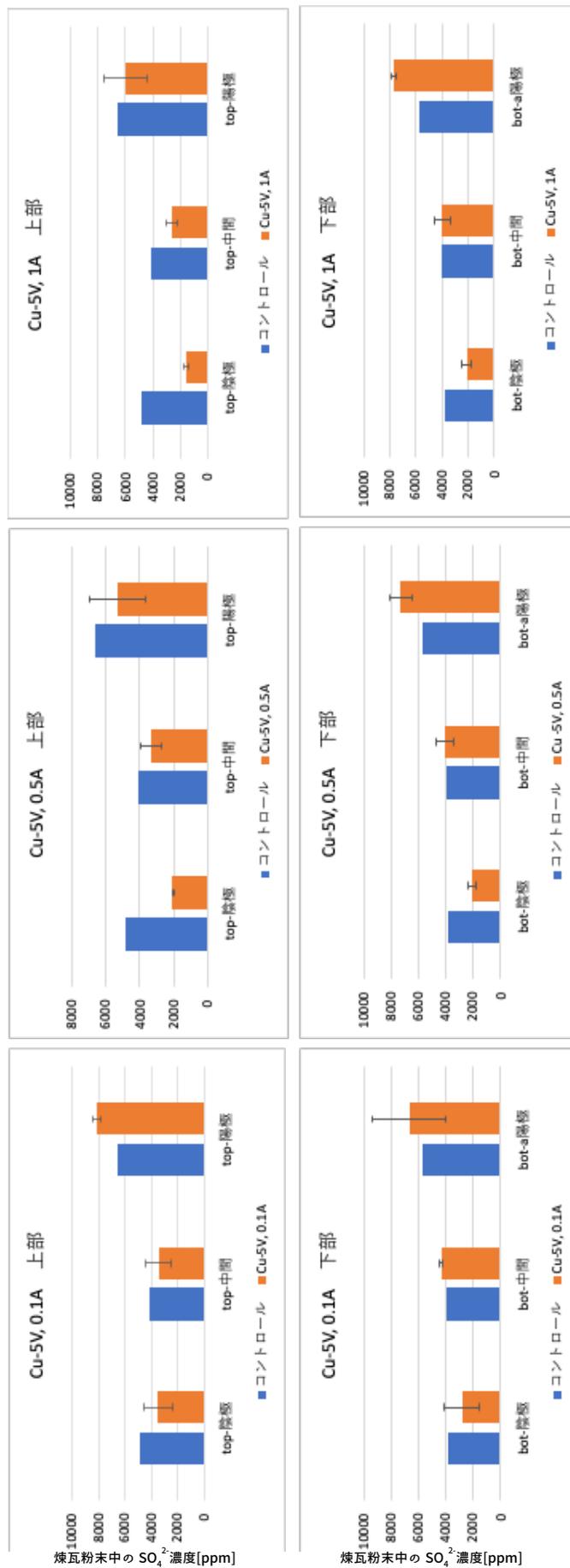
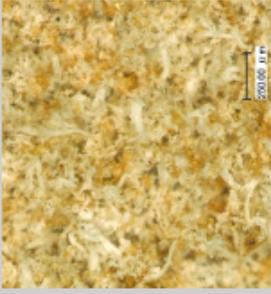
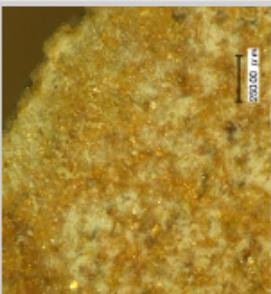


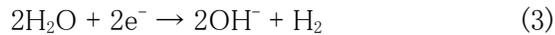
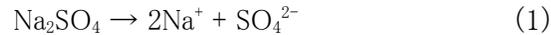
図 4.8 銅板を電極として通電した場合の SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>濃度変化

表 4.3 銅板を電極として通電した場合の目視観察結果

	Control	0.1A	0.5A	1A
陽極側上部写真				
顕微鏡画像				
表面の状態	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Salt was deposited on the entire test piece.</li> <li>• Peeling</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Salt was deposited on the entire test piece.</li> <li>• Peeling</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No salt precipitation.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Salt was slightly deposited on the entire test piece except the anode side.</li> </ul>

しかし、脱塩効果が認められる一方で、これらの煉瓦には黒色部分が形成されることが判明した。この黒色部分に関しては第4節の試験体暴露試験の結果と合わせて言及する。

以上の通電条件下における ED 試験及び目視観察の結果から、塩を含有させた煉瓦に通電を行うことで煉瓦内に存在していた  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  は(1)の反応が試験体内で発生し、さらに陽極では銅を電極として用いていたため(2)の反応が、陰極では(3)の反応が起きていることが考えられる。



脱塩の効果が見られた 5V, 5A 以上の通電条件下で通電した試験体には僅かに塩が析出していることを確認したが、析出していた塩の XRD 分析による同定を行ったところ、 $\text{Na}_2\text{SO}_4$  に加えて  $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$  (thermonatrite) が検出された。この thermonatrite は相対湿度 70% で潮解し、水溶性の塩である。しかしこれまでにこの種類の塩が煉瓦に析出したという事例報告は見られないため、ED によって生成された可能性が高い。しかし、 $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$  が生成されたということは、すなわち通電により一度分離した  $\text{SO}_4^{2-}$  が一部は試験体外へ移動し除去されたことを表す。そして一部の  $\text{SO}_4^{2-}$  が除去されたことによって試験体内に残留した  $\text{Na}^+$  が  $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$  という異なる種類の塩として析出したと推察される。また試験体内の  $\text{SO}_4^{2-}$  濃度の低下は、通電によって  $\text{SO}_4^{2-}$  が陽極側に移動し、試験体外部に設置した陽極の銅板上に  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  として固定されたことに起因すると考えられる。そしてこれが銅板を用いた場合の  $\text{SO}_4^{2-}$  の除去プロセスである。

また銅板を電極とした ED の生成物として  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  が電極上に生成されたため、通電前後のアーボセル及び銅板の重量変化と  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  の分子量から試験体外に移動した  $\text{SO}_4^{2-}$  量を算出し、その結果より試験体中の  $\text{SO}_4^{2-}$  の除去率を算出した。その結果、試験体に十分な水を供給した場合、通電条件が 5V, 0.5A では試験体中の  $\text{SO}_4^{2-}$  が約 64% 除去され、さらに通電条件が 5V, 1A では 73% の  $\text{SO}_4^{2-}$  が除去されることがわかった(図 4.9)。0.5A の電流を流した場合、通電しなかった場合に比べて  $\text{SO}_4^{2-}$  の除去率が約 5 倍に増加した。しかし、電流を 1A にすると、除去率は 0.5A で通電を行なった場合の結果とほとんど大差なかった。したがって、電流が 0.5A までは除去率が大きく上昇するが、0.5A 以上では除去率の増加は鈍る。しかし現時点における ED 試験では試験を行った全体の試料数が少ないため、今後は試料数を増やし、その後の考察が必要である。また今回得られた除去率は先行研究の結果よりも低いものであるが、目視観察では ED による脱塩後も塩の析出や煉瓦表面の劣化を抑えること

ができていたため、煉瓦の電気化学的脱塩方法は塩類風化による劣化を抑制することに対して有効な方法の一つであると判断する。同時に、着脱が容易な粉末状のセルロースを電極に用いることで、通電時の給水量を調整でき、煉瓦表面を傷つけずに脱塩できることから、物性にばらつきのある日本の歴史的煉瓦に適した ED モデルであると考え。また、陽極の銅板に  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  が定着し続けることで、電極に設置した粉末セルロースまで青く変色し、通電中に  $\text{SO}_4^{2-}$  が電極に移動していることを目視で確認することができた。これは、銅板を電極として使用するメリットの一つである。なぜならば専門家がいな場合この ED モデルを現地でインストールする際に、現地スタッフが目視で脱塩の確認をすることに繋がるからである。

しかし、脱塩効果が確認された通電条件では、試験体下部での脱塩効率が低かったことから、電極の長さが試験体に対して不足していたことが考えられる。さらに、通電条件が同じであるにもかかわらず、通電後の目視観察では、わずかに塩が析出しているものと全く塩が析出していなかったものが混在していたため、試験の再現性が不十分である。これらの課題が現時点で抽出されたため、今後さらなる改善を目指して繰り返し試験を行う必要がある。

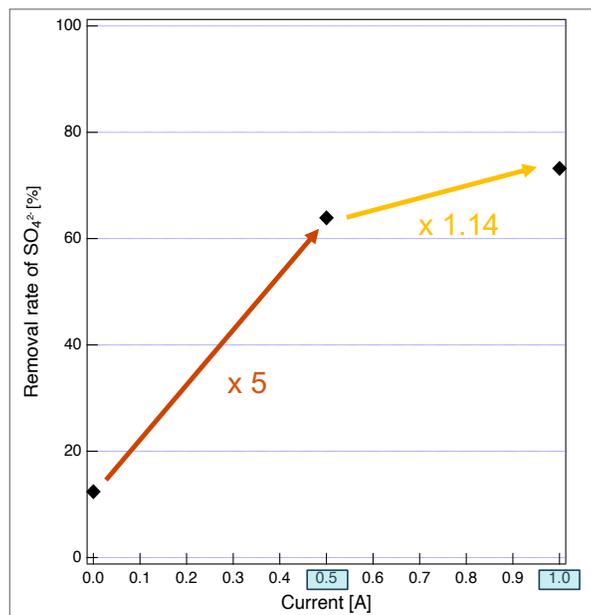


図 4.9  $\text{SO}_4^{2-}$  の除去率の変化と電流値の関係

### 第3節 炭素棒を用いた ED 試験

次に電極に炭素棒を用いて ED 試験を実施した。本節で行なった試験に用いた試験体は 4.2.1 と同様の方法で作成した。また試験には第2節と同様の ED モデルを電極部分のみ炭素棒(長さ 4.5cm)に取り替えて用いた。また、第2節にて通電条件が5V、0.5A 以上の時に脱塩の効果が見られたことから、本試験では通電条件を5V、0.5A のみに設定し ED 試験を行い、電極が銅板の場合との比較を行った。

#### 4.3.1 試験方法

第2節と同様の試験手順の下、試験を実施した。試験体に設置した電極にはアーボセル(Holland Gwabo 社製)と直径10mm、長さ 4.5cm に切断した炭素棒(Keenso 社製)を使用した。使用した炭素棒の材質は純度 99.9%のグラファイトである。電極を設置後、直流安定化電源を用いて電圧5V の条件下で電流値が 0.5A になるように調整した。またコントロールとして荷電しない、無通電の試験体も用意した。そのため、無通電のコントロールの試験体を含め、計 4 点の試験体で試験を行った。各試験体の物性を表 4.4 に示す。ED 試験における通電期間は全て8日間とし、通電 4 日目には両極に設置したアーボセルに超純水を追加した。通電終了後は第2節と同様の方法で I C 分析および目視観察による評価を行った。

表 4.4 試験体の物性

No.	Absolute dry weight[g]	Water absorption[%]	Volume[cm <sup>3</sup> ]	Dry density[g/cm <sup>3</sup> ]	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> content[g]	Additional water supply
control	589.0	19.5	275.0	2.1	5.0	×
E1	597.1	18.7	275.0	2.2	5.0	○
E2	594.3	19.4	275.0	2.2	5.0	○
E3	600.3	17.9	275.0	2.2	4.5	○

### 4.3.2 結果と考察

IC 分析の結果を図 4.10 に示す。試験体上部では陰極側から中間部分にかけて  $\text{SO}_4^{2-}$  濃度の低下が顕著に見られた。特に試験体上部の陰極側ではコントロールのものと比較すると  $\text{SO}_4^{2-}$  濃度の低減率は 94%と高い。しかし陽極側で  $\text{SO}_4^{2-}$  濃度が非常に高くなっていることがわかる。一方下部では、上部と同様に陰極側での  $\text{SO}_4^{2-}$  濃度の低下は確認されたが、中間部分から陽極側にかけては  $\text{SO}_4^{2-}$  濃度が上昇していた。これらのことから電極に炭素棒を用いた場合は、 $\text{SO}_4^{2-}$  は陰極側から陽極側に向かって移動し陰極側には  $\text{SO}_4^{2-}$  はほとんど残留しない。しかし移動した  $\text{SO}_4^{2-}$  は試験体外部の電極部まで移動するのではなく試験体内の陽極側で滞留してしまっている可能性が高い。炭素棒を電極として用いた場合、電極上に生成物が見られなかったため、使用したアーボセルの陰イオン分析を行い、試験体内からの  $\text{SO}_4^{2-}$  の除去率を算出した。抽出液の作成にあたり、通電後のアーボセル全量に対して 500 倍の量の超純水を加え、よくかき混ぜ 24 時間静置させた。24 時間経過後、上澄み液を分析用の抽出液として使用した。抽出液は穴径  $0.45 \mu\text{m}$  の濾過フィルター(sartorius 社製 Minisart RC4)を用いて濾過させた後に、

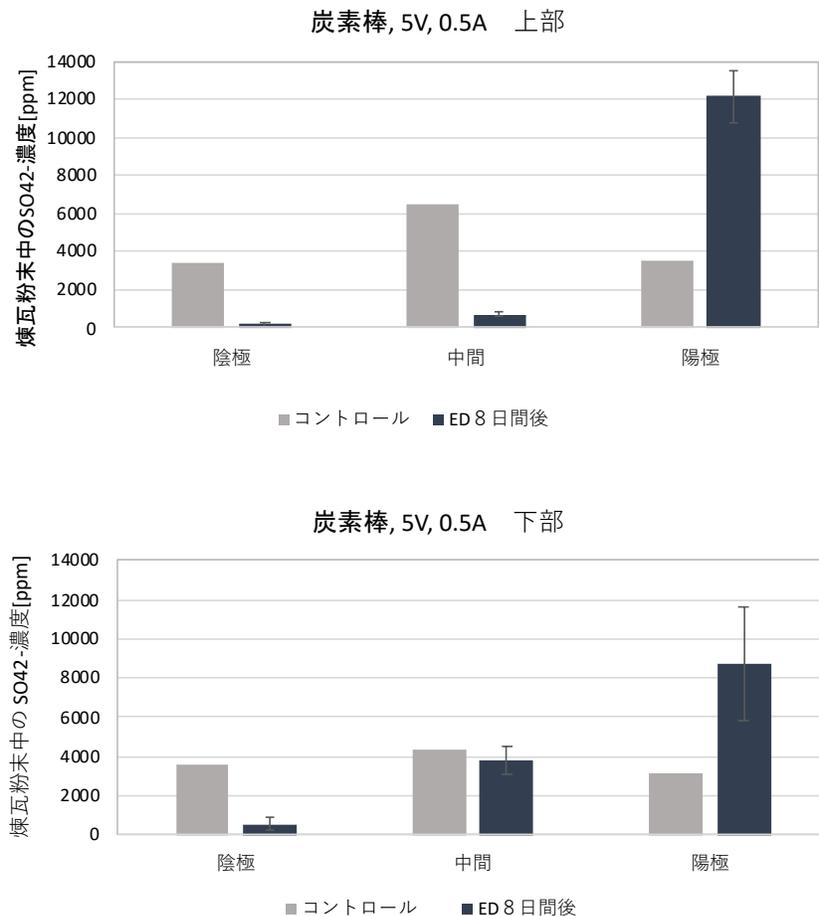


図 4.10 炭素棒を電極として通電した場合の  $\text{SO}_4^{2-}$  濃度変化

陰イオン分析を行った。分析装置は Metrohm 社製、883 Basic IC plus を用いた。分離カラム METRO A Supp 5 25/4.0 (6.1006.530)を使用し、流量 0.70 mL/min とした。その結果、炭素棒を電極とした際の  $\text{SO}_4^{2-}$  の除去率は  $39.6 \pm 6\%$  と低いことから  $\text{SO}_4^{2-}$  が試験体内の陽極側で滞留していることが濃厚である。

次に ED 試験後の試験体を自然乾燥させ、塩の析出の有無や煉瓦表面の状態を確認するために目視観察を行った。コントロールの試験体は全体的に大量の塩が析出し、煉瓦表面は粒状となり崩壊していることを確認した(図 4.11)。一方で通電条件 5V、0.5A で通電を行った試験体は 3 点のうち 2 点の試験体で塩の析出がほとんど見られず、一部または陰極側に塩の析出が見られた(図 4.12)。図 4.12 は通電後評価のために裁断した試験体のうち陰極側上部の側面から撮影したものである。塩が析出している箇所は通電時にアーボセルと接していた箇所である。塩の析出が見られた試験体において、コントロールと比較してその析出量は大きく減少していることがわかる。塩が析出していない煉瓦の表面状態は一部粒状となり崩壊している箇所が見られたが、大部分は良好であった。また通電した試験体の表面を観察したところ、陽極側が濃い茶褐色に変色していることを確認した(図 4.13)。図 4.13 は試験体陽極側上部であり、図に示された変色が見られた箇所はアーボセルが接していなかった部分である。この部分を XRD 分析による同定を行ったところ、炭素棒の成分であるグラファイトが検出された。白石によると炭素材料は化学的に安定しており、電気化学反応によっては変化しないことが分かっている<sup>73</sup>。しかし XRD 分析の結果から通電により炭素棒が分解され、グラファイトとして煉瓦内に流入、分散した可能性が考えられる。またこの炭素が流入した箇所は ED 後においても塩の析出が見られず煉瓦表面状態も良好であった。前述したように  $\text{SO}_4^{2-}$  の除去率が約 40%にとどまるにも関わらず、炭素が流入した部分において塩類が析出しなかった要因や通電により炭素が試験体内に流入するメカニズムについて解明するために今後さらなる研究が必要である。

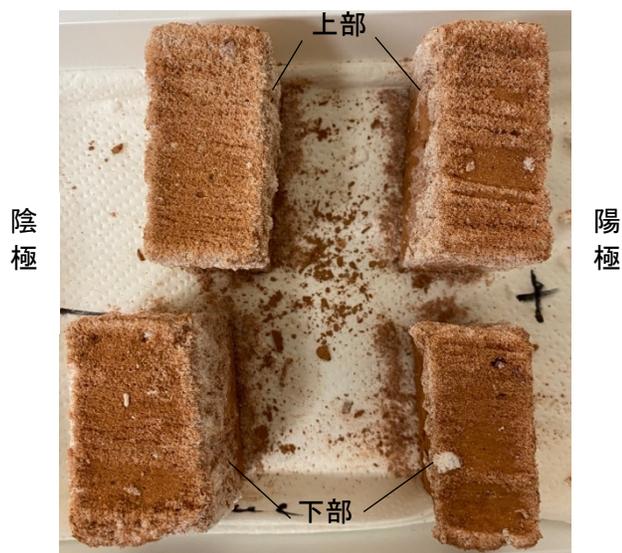


図 4.11 通電後のコントロールの試験体

<sup>73</sup> 白石壮志, “炭素材料の電気化学的特性の評価法 1.電気化学測定的基础とサイクリックボルタンメトリー”, 炭素, No.193, 2000

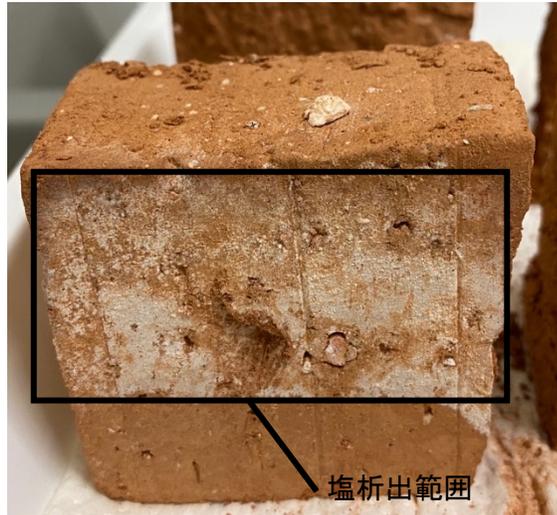
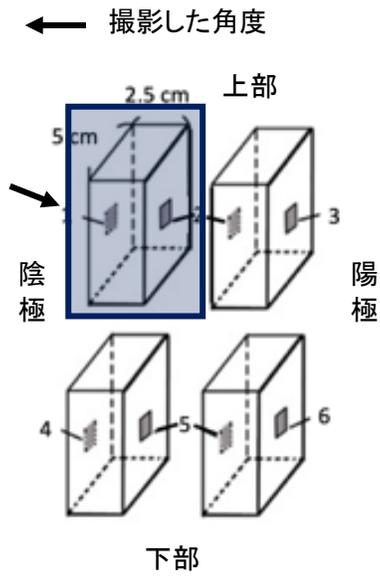


図 4.12 5V, 0.5A で通電した試験体の陰極側上部

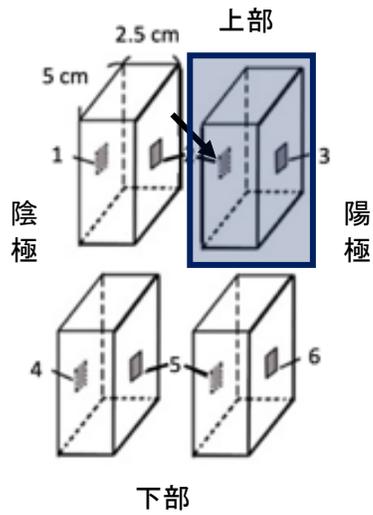


図 4.13 陽極側上部に見られた変色

#### 第4節 ED 試験後の試験体暴露試験

次に ED による処理を行った試験体の暴露試験を行った。本試験では脱塩処理を施した試験体を一定環境下で暴露させることで、煉瓦表面状態に変化があるのか、塩類の析出の有無などの確認および ED による脱塩効果の継続性を確認することを目的とした。

##### 4.4.1 試験体

試験体は 4.2.1 と同様に富岡製糸場で使用された煉瓦の物性を模した煉瓦を縦 5 cm、横 4 cm、高さ 5cm に裁断し、35.5 g/L (0.25 M)の濃度に調整した  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  水溶液に 5 日間浸漬させ、試験体の水分率が 0.05% 未満になるまで乾燥させたものを用いた。表 4.5 に暴露試験に用いた試験体の物性値を示す。

表 4.5 試験体の物性

No.	Absolute dry weight[g]	Water absorption[%]	Volume[cm <sup>3</sup> ]	Dry density[g/cm <sup>3</sup> ]	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> content[g]
Cu-control	147.8	18.1	100.0	1.5	1.6
Cu-I	143.2	18.3	100.0	1.4	1.6
Cu-II	161.3	18.2	100.0	1.6	2.0
C-control	165.7	18.8	100.0	1.7	1.4
C-I	176.0	18.4	100.0	1.8	1.5
C-II	183.0	18.9	100.0	1.8	1.2

#### 4.4.2 試験方法と評価方法

本試験では上記の ED 試験と同様の手順で通電後、温度 25°C、相対湿度 60%の環境下に7日間試験体を暴露させその後煉瓦表面状態の目視観察を行った。通電条件は全て5V、0.5A とし、通電期間は8日間とした。また通電 4 日目に超純水を追加したものと通電期間中は水を与えなかったものを用意した。また電極には銅板と炭素棒の2種類をそれぞれ用いた。各試験体の試験条件を表 4.6 に示し、暴露試験のフローチャートを図 4.14 に示す。

表 4.6 試験体の通電条件

No.	Voltage[V]	Current[A]	Additional water supply
Cu-control	0	0	×
Cu-I	5	0.5	○
Cu-II	5	0.5	×
C-control	0	0	×
C-I	5	0.5	○
C-II	5	0.5	×

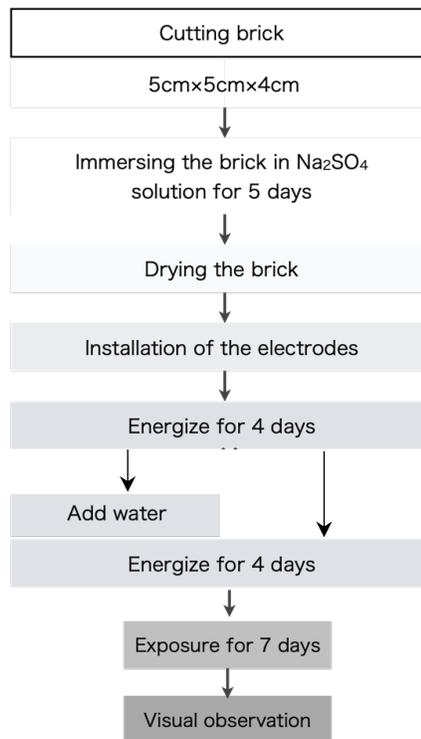


図 4.14 暴露試験のフローチャート

#### 4.4.3 結果と考察

暴露試験の結果を表 4.7 と表 4.8 に示す。まず電極に銅板を用いた場合、試験中に水を加えた試験体では第2節でも述べたように、陽極側から中間部分にかけて黒色部分が形成されていることを確認した。また黒色部分から陽極側へ向かって表面に塩が析出していた。しかし、陰極側から黒色部分にかけての範囲では塩の析出は見られず、表面状態は良好であった。また、試験中に水を追加しなかった試験体では、黒色部分の形成は確認されなかったが、コントロールの試験体と比較して塩の析出は減少しているものの、試験体全体にやや塩が析出していた。このことから、電極に銅板を用いた場合は通電中に加水したものが通電後の目視観察では脱塩の効果が最も高いと判断した。

表 4.7 暴露試験の結果（銅板）

Cu	Immediately after energization	Day 7
control		
	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 全体的に針状の塩の析出あり</li> <li>・ 剥離と崩壊あり</li> </ul>	
Cu- I (水の追加)		
	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 黒色部分から陽極にかけて塩の析出あり</li> <li>・ 表面状態は良好</li> </ul>	
Cu- II (水の追加なし)		
	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 全体にやや塩の析出あり</li> <li>・ 表面状態は良好</li> </ul>	

銅板を電極とし、試験体に十分な水分を供給して通電を行った場合に生成される黒色部分(図 4.15)について考察していく。この黒色部分を走査型電子顕微鏡(SEM)で観察した結果、図 4.16 に示すように、粒子と思われる物体が観察された。また、この部分の XRD 分析を行ったところ、 $\text{Cu}_2\text{O}$  (cuprite) が検出された。河西によると、 $\text{Cu}_2\text{O}$  は室温付近の中性水溶液中で生成される<sup>74</sup>ことが分かっている。黒色部分が形成された部分の pH は 6.2 であり、中性に近いことが判明した。さらに、石原は電気化学的なプロセスにおいて、金属表面で金属の溶出が起こることを指摘している<sup>75</sup>。

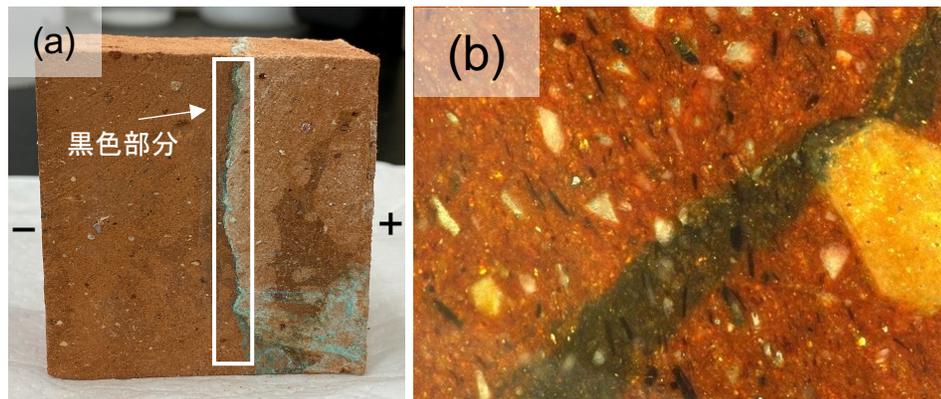


図 4.15 (a) 黒色部分が見られた試験体、(b) 黒色部分の拡大写真

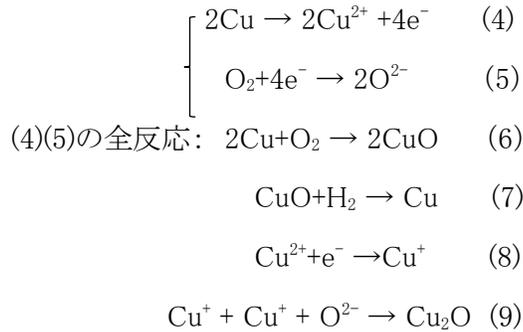


図 4.16 黒色部分の SEM 画像

<sup>74</sup> 河西正隆、丹野和夫、浅井治、古谷保正、川島夏樹、“各種環境下における金属の腐食性生物”, *日立評論*, vol.52, no.11, 1970.

<sup>75</sup> 石原只雄、“最新・腐食事例解析と不濁診断法”, テクノシステム:東京、2008

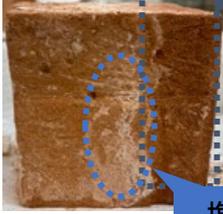
以上のことから、黒色部分が形成された過程では試験体内にて以下の反応がそれぞれ起こった可能性が考えられる。



すなわち、試験体に加水し通電したことと銅の酸化反応により電極として使用した銅板から  $\text{Cu}^{2+}$  が溶出し、試験体内に流入する。その後銅の還元反応を経てさらに  $\text{Cu}^{2+}$  は電子を受け取り  $\text{Cu}^{+}$  が形成され、このイオンが陰極側に移動する過程で、湿潤した両極ではなく中性域になっていた箇所  $\text{Cu}_2\text{O}$  を主成分とする黒色部分が形成されたと考えることができる。また、黒色部分から陽極側にかけては脱塩効率が低く、塩の析出も見られたため黒色部分の特性や影響について解明した上で、この黒色部分が生成されないための工夫やまたは黒色部分を後から除去する方法など対策を考える必要がある。

次に電極を炭素棒とした場合の結果について述べる(表 4.8)。暴露試験後、通電しなかったものは銅板で試験をした時と同様に全体的に針状の塩の析出が見られ、煉瓦表面は粒状となり崩壊が見られた。一方で通電を行った C-I、C-II は共に陽極側から中間部に向けて 1.5cm~2cm 程度、試験体の色がやや濃い茶褐色に変色していた。しかしいずれも濃い茶褐色の部分に塩の析出は見られず、表面状態は良好であった。水を加えた試験体には変色部分以外の箇所に塩の析出が見られたが、コントロールと比較するとその量は少ない。水を加えなかった試験体においても同様に変色部分以外の部分に僅かであるが塩の析出を確認し、陰極側下部の方で煉瓦表面が粒状になって崩壊しているのを確認した。また陽極部分に見られた変色部分の一部を XRD 分析したところグラファイトが検出されたことから、通電により電極として用いた炭素棒が分解され、それらが試験体内に分散する形で流入している可能性が考えられる。しかし現時点においては試験体内に分散してしる炭素の影響で暴露試験後も塩が析出なかったのかその関係性や流入した炭素が煉瓦の物性にいかなる影響を与えるのか評価できないため、今後の課題として検討する必要がある。

表 4.8 暴露試験の結果（炭素棒）

C	Immediately after energization	Day 7
control	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <span>陰極 -</span>  <span>陽極 +</span> </div>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 全体的に針状の塩の析出あり</li> <li>・ 剥離と崩壊あり</li> </ul>		
C- I 加水あり		
<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 陽極側がやや黒く変色</li> <li>・ 陰極側から中間にかけてやや塩が析出</li> </ul>		
C- II 加水なし		
<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 表面に崩壊は見られず、塩の析出も非常に僅か</li> </ul>		

変色部分

塩の析出

## 第5節 ED 処理後における試験体の水の吸い上げ試験

本章におけるこれまでの試験結果を踏まえ、ED 処理後の煉瓦に水が供給された場合の ED の効果を確認すること、また ED が煉瓦試験体の物性にいかなる影響を与えているのか検討することを目的に水の吸い上げ試験を行った。

### 4.5.1 試験方法と評価方法

試験体は第2節～第4節で扱ってきたものと同様に富岡製糸場で使用された煉瓦の物性を模した煉瓦を縦 5 cm、横 4 cm、高さ 5cm に裁断し、4 点用意した。4 点中 3 点を 35.5 g/L (0.25 M) の濃度に調整した Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 水溶液に 5 日間浸漬させ、試験体の水分率が 0.05% 未満になるまで乾燥させた。塩を含有させた試験体 3 点のうち 1 点は脱塩処理を施さず、残る 2 点は炭素棒と銅板をそれぞれ用いて ED 処理を施した。通電条件はいずれも 5V、0.5A とし、8 日間通電を行った。また通電 4 日目には試験体に加水した。このようにして塩を含まないコントロールの試験体 1 点、塩を含まないが脱塩処理を施していない試験体 1 点、ED 処理を施した試験体 2 点の合計 4 点を準備した。表 4.9 は本試験に用いた試験体の物性値を表す。

準備した試験体をまずプラスチック製コンテナ(縦 8cm、横 7cm、高さ 4cm) 内に入れ、純水を約 30g～35g 投入した。純水の量は試験体の容積含水率から体積の約 30% の量に設定した。その後投入した水が完全に吸い上げられることを待った。この時、吸水過程において炭素棒による ED 処理を施した試験体を除く 3 点の試験体が完全に吸水するまでに要した時間は約 90 分であった。一方で炭素棒を用いて ED 処理を行った試験体は完全に吸水するまでに約 180 分を要した。水が吸い上げられたことを確認した後に 4 日間室内で乾燥させた。そして 4 日経過後に目視観察による煉瓦表面状態の確認、脱塩の効果が継続しているのか確認を行った。また吸水後試験体の重量を計測し、放湿過程における試験体の体積含水率の変化を記録した。

表 4.9 水の吸い上げ試験に用いた試験体の物性

No.	Absolute dry weight[g]	Water absorption[%]	Volume[cm <sup>3</sup> ]	Dry density[g/cm <sup>3</sup> ]
コントロール (塩なし)	168.7	19.4	100.0	1.7
未脱塩	195.9	18.2	100.0	2.0
ED炭素	175.5	18.8	100.0	1.8
ED銅板	189.4	19.0	100.0	1.9

#### 4.5.1 結果と考察

試験の結果を表 4.10 に示す。コントロールの試験体は塩を含有していないため、吸水後乾燥させたものの試験体表面には何の変化も見られなかった。一方で脱塩処理を施さなかった試験体は、吸水試験後試験体の上部全体、特に上面(蒸発面)に多量の塩の析出が確認された。さらに塩が析出していた表面状態は煉瓦が粒状となって崩落していた。これは一般的な塩類風化発生のメカニズムで水分が気化する際に、水分中に溶け出していた塩類が試験体上部で結晶化したものであると推察される。

次に電極に銅板を用いて ED処理を施した試験体では陰極側から中間部分にかけて試験体に塩の析出はほとんど見られなかった。また塩が析出していなかった部分の煉瓦表面に崩壊等の劣化も確認されなかった。これは ED による脱塩の効果であると判断する。しかし、陽極側から  $\text{Cu}_2\text{O}$  を主成分とする部分が形成されていた箇所においては緑青色を呈した物性が生成されていた。これは XRD 分析の結果、通電時に電極で生成されていた物質である、 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  であることが分かった。以上のことから、銅板を電極として用いた場合は、通電時に十分に水分を供給した場合は通電後も、ED によって  $\text{SO}_4^{2-}$  が除去された箇所で脱塩の効果が継続し、塩類風化をもたらす要因である水分が侵入しても脱塩された箇所では塩が析出しないという結果を得ることができた。また通電後に電極に設置したアーボセルの含水量を計測したところ約 10g であった。これは加水する前の乾燥状態のアーボセルの重量の 4 倍に当たる数値であり、このアーボセルの含水量が脱塩時に  $\text{SO}_4^{2-}$  を含むことができる最大容量になると考えられる。しかし本試験ではアーボセル量を変化させた試験やアーボセルを通電途中で交換するといった条件下では試験を実施しなかったため、今後この EDモデルの実装化にあたり、アーボセルの量や扱い方にも着目した試験を組み立てる必要性があることを見出した。

電極に炭素棒を用いて ED処理を施した試験体は、上面及び陰極側からわずかであるが塩が析出していた。塩の析出が確認された箇所の煉瓦表面は粒状に崩壊し始めていた。しかし炭素が流入したと考えられる陽極側付近では塩の析出は見られなかった。また塩が析出しなかった陽極付近の煉瓦表面状態は良好であった。また析出していた塩の析出形態が脱塩を行わなかった試験体のものと異なっていたため、XRD 分析を行ったところ試験体に見られた塩は thermonatrite ( $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) であることが分かった。電極に炭素棒を用いたこれまでの試験結果を踏まえると、 $\text{SO}_4^{2-}$  の除去率は銅板を用いた場合と比較して低く、ED 後も試験体内の特に陽極側に  $\text{SO}_4^{2-}$  が集中していたにも関わらず、脱塩後に外部から水が侵入しても  $\text{SO}_4^{2-}$  が多く残留しているはずの陽極側で塩類の析出が全く見られず、陰極側に thermonatrite が析出していたことから、通電によって分離した  $\text{SO}_4^{2-}$  は陰極側にはほとんど残らず、通電後も結合せずにイオン化したまま試験体内の特に陽極側に残存している可能性が考えられる。そして陽極側で塩が析出しなかったこと、 $\text{SO}_4^{2-}$  がイオン化したまま煉瓦内に存在していることは煉瓦内に流入

した炭素が関係している可能性が高い。

表 4.10 水の吸い上げ試験結果

	吸水前		吸水→乾燥4日目	
	正面	上面	正面	上面
コントロール (塩なし)				
未脱塩 (塩あり)				
ED 炭素	陰極 			
ED 銅板	陰極 			

次に本試験を通して ED処理が煉瓦試験体の物性に与える影響の検討を行った。図 4.17 は吸水後放湿過程における各試験体の含水率の変化を示したものである。図からは、ED処理を行った試験体は2点とも塩を含まない試験体及び脱塩処理を施していない試験体に比べて含水率が高く、放湿に時間がかかっていることが分かる。つまり ED を施した試験体は多くの水分を含むものへと物性が変化したことがうかがえる。また前述したように、特に炭素棒を用いて ED処理を行った試験体は吸水にも長時間を要していたことから、脱塩処理によって水分の吸放湿時間が伸び、緩やかに変化した可能性があり、ED処理によって煉瓦の物性に变化が生じたと考えられる。また本試験では試験体作成後、通電の前後にエコーチップ硬さ試験機を用いた表面反発硬度試験も行ったが、硬さにおいて通電の前後で大きな差は見られなかった。しかし、強度に関しては圧縮強度試験機を用いた試験やその他の試験方法を試す必要があり、慎重に検討する必要がある。また EDによる物性への影響に関する調査は不十分であり通電により流入した電極成分がもたらす影響も含めて不明瞭なことがまだ多く残存している。そのため、今回の簡易的な調査だけでなく EDによる物性への変化にも着目した研究が今後は必要となり、今後の課題として残された。

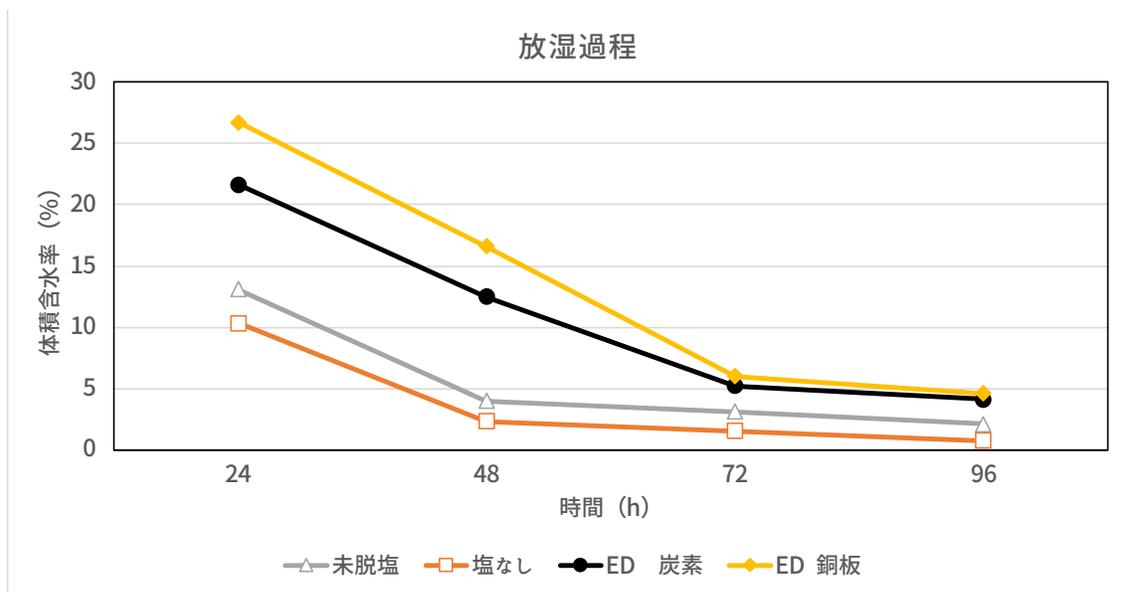


図 4.17 各試験体の放湿過程における含水率の変化

## 第5章

### 総括

## 第5章 総括

昨今、近代化遺産や産業遺産がユネスコ世界文化遺産に登録されるなど国内における煉瓦造の文化財に対する関心は高まりつつある一方で歴史的煉瓦の特性はまだ不明瞭な点が多く、またこれらの保存処理方法も確立していないことが現状である。第一章では煉瓦造の文化財に関するこれまでの研究動向から、煉瓦造の文化財が抱える課題を抽出した。煉瓦造の文化財は屋外にさらされている場合が多く、周辺環境の影響により塩類風化などによる煉瓦の劣化が日本国内各地で報告されている。これまでに塩類風化という現象に関する研究は既に行われており、現象の発生メカニズムや塩類の特性、危険度については既に解明されてきた。しかし国内の煉瓦造の近代化遺産においては、遺跡における劣化状況の詳細に関する報告は少なく、また塩類風化に対する保存処理方法も未確立であることを把握した。保存処理方法を検討するためにはまず歴史的煉瓦の物性を把握する必要があり、実際に遺跡での長期的な現況調査を行うことで劣化状況を詳しく把握し、その要因を明確にすることが重要である。また煉瓦造の文化財は、劣化の進行だけでなく、煉瓦造の文化財に関する専門家不足や文化財を管理する自治体や団体の人員不足、保存を行うための予算不足などの課題も抱えているため、煉瓦造の文化財に対する保存方法として、より簡易的に扱うことができ、かつ効果的な方法が求められることについて言及した。

本研究では日本国内で煉瓦の規格化が行われる 1925 年(大正14年)以前の煉瓦を「歴史的煉瓦」と位置づけ、第1章で提示された歴史的煉瓦が抱える課題を解決するためにまず第2章では自然科学的手法を用いた歴史的煉瓦の物性調査を行った。物性調査は明治期の国産煉瓦である東洋組煉瓦、小菅集治監(東京集治監)製煉瓦、牛久シャトーで使用された煉瓦に対して実施した。調査の結果、東洋組煉瓦の吸水率は  $17.0 \pm 1.6\%$ 、圧縮強度は  $9.5 \pm 3.8 \text{N/mm}^2$ 、小菅集治監製煉瓦は吸水率が  $8.4 \pm 1.5\%$ 、圧縮強度は  $44.7 \pm 11.2 \text{N/mm}^2$  という結果であった。小菅集治監製煉瓦を除いた、東洋組煉瓦、牛久シャトーで使用されていた煉瓦は現代の煉瓦の規格を吸水率、圧縮強度共に満たしておらず、ばらつきがあることが分かった。一方で小菅集治監製煉瓦は煉瓦の規格化が開始する以前の明治25年に建設された千代ヶ崎現代砲台跡で使用されていた煉瓦であるが、現代煉瓦の規格を満たし、圧縮強度  $60 \text{N/mm}^2$  を超過する強度が非常に高いものも存在した。さらに歴史的煉瓦の特性をより詳細に把握するために明治期から昭和期にかけての煉瓦造建造物や構造物に関する調査報告書より使用された煉瓦の物性情報を抽出した結果、歴史的煉瓦には以下の特性があることを把握した。

- ③ 歴史的煉瓦の中でも明治期の煉瓦は製造地域や種類によって物性にばらつきが見られ、吸水率は約 8%～30%の範囲に圧縮強度は  $3 \text{N/mm}^2 \sim 53 \text{N/mm}^2$  の範囲に分布し、特に吸水率は大正期や昭和期の煉瓦と比較すると広範囲に分布することがわかった。このように同時代に製造され

た煉瓦や同じ種類の煉瓦においても物性に大きな差が生じる場合があるため、煉瓦に対する保存処置を施す場合はこの点に留意する必要がある。

- ④ 大正期に突入すると、煉瓦の吸水率の分布範囲は狭まり、圧縮強度は  $90\text{N}/\text{mm}^2$  を超過する煉瓦が確認されたことから、この時代になると煉瓦の製造技術が向上し良質な煉瓦が製造可能になったことが考えられる。
- ⑤ JIS 制定後に製造された昭和期の煉瓦に関しては、1951 年から現在の JIS 規格に改正される期間に製造された煉瓦は吸水率が高く、圧縮強度も低い煉瓦が多く存在する可能性が考えられる。しかし、昭和期の煉瓦は時代が新しく、重要文化財に指定されている件数もごく僅かであることから物性調査に関する情報が非常に乏しいことが現状である。昭和期の煉瓦は明治期の一部の煉瓦と物性が類似している可能性があり、したがって明治期の煉瓦に見られるように昭和期に製造された煉瓦にも塩類風化等の劣化が生じる可能性が予測される。そのため、今後は昭和期の煉瓦にも着目し調査を進めるべき段階にある。

このように歴史的煉瓦の物性値にはばらつきが見られ、それらが建築資材として当時使用されていたことから、煉瓦が規格化される以前は品質には特に留意することなく煉瓦が製造され建築資材として使用されていた可能性が高いことが示唆された。煉瓦の物性にばらつきが生じていた要因として、建設された建造物や構造物の種類の違い、及び建設に関わる規則の有無が影響を与えていた可能性が考えられる。また物性にばらつきのある歴史的煉瓦の中で異なる物性の東洋組煉瓦と小菅集治監製煉瓦が用いられている史跡にてその物性と劣化状況の関係性について目視観察による評価を行ったところ、煉瓦の物性と劣化の程度または劣化の進行速度には関係性があることが示唆された。

歴史的煉瓦の物性、また吸水率が高く強度が低い煉瓦は劣化しやすい可能性があるということを踏まえて第3章では東洋組煉瓦が使用されている猿島砲台跡(神奈川県横須賀市)にて約 3 年間にわたる長期的な現況調査を行い、劣化の現状を把握し、劣化要因の解明をおこなった。長期的な現況調査の結果、猿島砲台跡の煉瓦造構造物内の温湿度は屋外の温湿度挙動と連動して変化するが、屋外に比べてやや低温で高湿な環境になるということがわかった。また日本の春季にあたる 4 月と雨季から夏季にあたる 6 月から 8 月にかけて煉瓦の劣化が進行することが分かったが、この時期は構造物内の相対湿度が上昇する時期と一致していることが分かった。さらに崩落物からは異なる数種類の塩類が検出され、特に崩落量が増加した時期に危険性及び破壊力が高いと考えられている thenardite が検出され、遺跡内の水質調査や煉瓦内の硫酸イオン分布調査から、塩類の起源は煉瓦が製造される工程上にあることが示唆された。以上のことから猿島砲台跡の煉瓦構造物に見られる劣化の要因は構造物内の温湿度環境と煉瓦内に存在する塩類であることを特定した。また、特に温湿度上昇がトリガーとなり煉瓦表

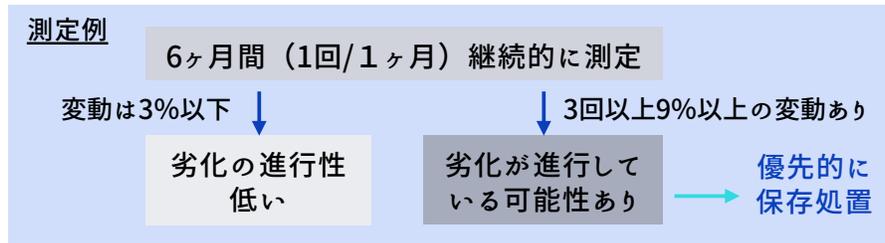


図 5.1 提案される水分率測定の測定例

面の崩落を誘発していることが分かった。このように、簡易的な手法を用いて長期的に継続して調査を行うことで遺跡内の環境把握、劣化進行の詳細を把握し劣化進行の特徴とその要因の特定を行うことができ、本調査で用いた手法は現況調査や劣化要因の特定方法として適していることが示唆された。

さらに、壁面の水分率測定では壁面に使用されている煉瓦には煉瓦の水分率が外気の影響により a) 大きく変動し上昇と低下を短期間で繰り返すものと、b) 徐々にゆっくりと変動していくもの c) 水分率はほとんど変化しないものの3パターンあることが分かった。特にパターン a をもつ煉瓦すなわち水分率挙動が上昇と低下を短期間で繰り返す煉瓦は劣化の進行が速い傾向にあることを見出した。また本調査における水分率測定の結果から、図 5.1 に示されるような測定例の提案が考えられ、長期モニタリングとして水分率調査を行う際の参考として活用されることが期待できる。これら第三章で得られた知見は今後煉瓦造の文化財を保存するにあたり適した温湿度環境の提示や保存処置を行うに適した時期の提示に繋げ得ることが期待できる。しかしこれらの劣化要因の特定に対して、本研究では劣化対策のための具体的な温湿度の提示などを検討するまでには至らなかったため、これらの具体的な数値の提示が今後の課題の一つである。

第2章から第3章にて歴史的煉瓦の特性や実際の劣化状況についての現状把握や劣化要因の解明をおこなってきた。これらの結果から得られたことを踏まえ、劣化を抑制させる対策として、煉瓦自体には手を加えない環境のコントロールまたは煉瓦に手を加え内質的な改質を行うことが挙げられる。本来はこれらを組み合わせて保存対策を検討することが望ましいが、文化財の周辺環境や条件によっては実際に屋内環境のコントロール等の実施が困難である場合がある。そこで本研究では煉瓦の内質的改質、その中でも劣化要因である塩自体を取り除く方法を第4章にて検討した。脱塩方法にはいくつかの手法があるが、その中でも本研究では電気化学的脱塩工法を用いた局所的な脱塩モデル(ED モデル)の開発をおこなった。ED モデルには電極として銅板、炭素棒といった入手しやすくかつ安価な素材を採用し、それぞれの素材が脱塩に与える効果や影響を検討した。銅板を電極とし、通電条件 5V、0.5A または 1A の下 8 日間通電を行うと最大 73%の  $\text{SO}_4^{2-}$  が煉瓦内から除去されることがわかった。また、陽極の銅板に  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  が定着し続けることで、電極に設置した粉末セルロースまで青く変色し、通電中

に  $\text{SO}_4^{2-}$  が電極に移動していることを目視で確認することができ、これは銅板を電極として使用するメリットの一つであると言える。なぜならば専門家がない場合にこの ED モデルを現地でインストールする際に、現地スタッフが目視で脱塩の確認をすることに繋がるからである。また通電後の水の吸い上げ試験結果からは、銅板を電極として脱塩処理を行った場合、外部から水が供給された場合においても試験体広範囲において塩の析出が見られなかったことから、脱塩効果の持続性があることを確認した。しかし銅板を電極として通電した場合、通電により電極として使用した銅板から  $\text{Cu}^+$  が溶出し、試験体内に流れ込み、 $\text{Cu}_2\text{O}$  を主成分とする黒色部分が形成され、黒色部分から陽極側にかけては脱塩効率が低かったため、アーボセルの量や電極の設置箇所など黒色部分が生成されないような工夫、あるいは生成された場合にも脱塩効率を上げるための条件の見直しが必要である。

一方で電極に炭素棒を使用し通電条件が 5V、0.5A の場合、 $\text{SO}_4^{2-}$  は陰極側にほとんど残留しないことが分かった。しかし移動した  $\text{SO}_4^{2-}$  は陽極側の煉瓦内に滞留していることが示唆された。また  $\text{SO}_4^{2-}$  の除去率は  $39.6 \pm 6\%$  と銅板と比べて低い結果であるが、通電後の目視観察及び暴露試験の結果、通電を行なった試験体は塩の析出を大幅に減少させることができていたことから塩の析出を抑制させるためには十分な除去率であることが考えられる。しかし、通電した試験体の陽極側に変色が見られ、変色部分からグラファイトが検出されことから、通電により電極として用いた炭素棒が分解され、それらが試験体内に流入した可能性が考えられる。しかし、現時点においては試験体内に流入した炭素の影響で暴露試験後もその箇所において塩が析出しなかったのか、その関係性や流入した炭素が煉瓦の物性にいかなる影響を与えるのか解明が不十分であるため、今後の課題として流入の要因解明と併せて検討していく必要があり、解明されることでさらに効果的で持続性の高い脱塩方法の開発につなげ得ることが期待される。

本研究で得られた電極が銅板、及び炭素棒である場合の  $\text{SO}_4^{2-}$  除去率の結果は先行研究の結果よりも低いものであったが、目視観察では ED による脱塩後も塩の析出や煉瓦表面の劣化を抑えることができていたため、煉瓦の電気化学的脱塩方法は塩類風化による劣化を抑制することに対して有効な方法の一つであると判断する。同時に、着脱が容易な粉末セルロースを煉瓦に接する部分に用いることで、通電時の給水量を調整でき、煉瓦表面を傷つけずに脱塩できることから、物性にばらつきのある日本の歴史的煉瓦に適した ED モデルであると言える。しかし現時点では再現性が不十分である点や、電極として使用した素材の成分が電気化学的プロセスにおいて煉瓦内に流入することでもたらされる影響が未解明である点、そして現地での実装実験にまで到らなかった点など、これらは今後の課題として残されている。また更なる試験を通して ED による脱塩効果が持続する最大年数なども見出す必要がある。

国内に現存する煉瓦造の文化財は明治期から大正期にかけての限られた 70 年間に建設されたもの

であり、当時の技術や政治を知るための情報や歴史的価値、学術的価値を有している。そしてこれらの文化財は今後様々な形態で活用されていくことが予想され、構造物や建造物としての保存に留まらず、煉瓦表面の美しさや意匠性など煉瓦個々も長期的に保存していく方法を検討すべき段階であると言える。本研究では自然科学的手法によって歴史的煉瓦の持つ物性や歴史的煉瓦の遺跡における劣化の特徴を把握し、劣化をもたらす要因を特定することができた。そして煉瓦造の文化財を取り巻く環境を理解した上で、歴史的煉瓦に適した保存処置方法の一つとして簡易的な電気化学的脱塩による処置方法が塩類風化による劣化抑制の効果をもたらすことを見出した。現段階では室内での試験段階であるが本研究で得られた知見は実践的試験に移行するための重要なデータになることが期待できる。しかし、歴史的煉瓦の保存対策、劣化抑制の方法として電気化学的脱塩方法だけでなく強化剤処理やその他の脱塩方法など遺跡の状況に応じて適した保存処置方法が選択できるように保存処置の選択肢を増やしていく必要性があり、歴史的煉瓦の保存処置に関する更なる研究の発展が必要である。

## 参考文献

### 第1章

- [1] 文化庁、“「登録の日」「近代化遺産の日」と一斉公開事業”、文化庁、2019年5月、  
<https://www.bunka.go.jp/seisaku/bunkazai/hogofukyu/koukai/index.html#:~:text=%E8%BF%91%E4%BB%A3%E5%8C%96%E9%81%BA%E7%94%A3%E3%81%A8%E3%81%AF,%E3%81%AB%E4%BF%82%E3%82%8B%E5%BB%BA%E9%80%A0%E7%89%A9%E3%81%A7%E3%81%99%E3%80%82>（閲覧日：2022/05/27）
- [2] 上代庸平、野口健格、林晃大、“欧州における産業遺産の保存と利活用のための法制度”、武蔵野法学、vol.12, pp.202-165, 2020
- [3] 東京文化財研究所、“未来につなぐ人類の技⑰ 煉瓦造建造物の保存と修復”、2017
- [4] 富岡市、“世界遺産富岡製糸場”、しるくるとみおかー富岡市観光ホームページ、2022年5月、  
<http://www.tomioka-silk.jp/tomioka-silk-mill/preserve/>（閲覧日：2022/05/24）
- [5] 水野信太郎 1999『日本煉瓦史の研究』法政大学出版局：東京
- [6] 朽津信明、森井順之 2004「O-242 碓氷峠鉄道施設における煉瓦の塩類風化と凍結破砕の比較（30. 応用地質学一般）」『日本地質学会学術大会講演要旨』p.146
- [7] 長谷川哲也、畑中重光、PRINYA Chindaprasirt、THANUDKIJ Chareerat 2006「タイ国アユタヤー遺跡の劣化調査と修復方法の提案」『日本建築仕上学会 2006年大会学術講演会』p.191-194
- [8] 朴東熙 2015『クメール煉瓦造遺構の修復技術に関する研究』早稲田大学、博士論文
- [9] 朽津信明 2005「文化財材料としての煉瓦の劣化」『マテリアルライフ学会誌』17(1)
- [10] Chiraporn . A (2001) Salt weathering of monumental building materials in Thailand, 平成10年度～平成12年度科学研究費補助金 研究成果報告書 タイ国・アユタヤ遺跡の保存修復に関する研究
- [11] 石崎武志、朽津信明、西浦忠輝、青木繁夫 2005「タイの歴史的レンガ建造物の保存に関する研究」『土と基礎』566, 53(3)
- [12] 佐々木淑美、吉田直人、小椋大輔、安福勝、水谷悦子、石崎武志 2015「ハギア・ソフィア大聖堂をはじめとした歴史的建築物の内壁の劣化と材料に関する調査」『保存科学』54, p.215-226
- [13] 朽津信明、早川典子 2001「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, p.35-46
- [14] 相川悠, “煉瓦の吸水放湿特性にみる塩の影響及び保存修復材料の検討,” (修士論文, 筑波大学大学院, 2013).
- [15] L. M. Ottosen, A. J. Pedersen, and I. Rørig-Dalgaard, “Salt-Related Problems in Brick Masonry and Electrokinetic Removal of Salts,” *Journal of Building Appraisal*, vol. 3, no.3, pp. 181-194, 2007, doi:10.1057/PALGRAVE.JBA.2950074/FIGURES/9
- [16] Paz-García, J.M., B. Johannesson, L.M. Ottosen, A.B. Ribeiro, and J.M. Rodríguez-Maroto, “Simulation-Based Analysis of the Differences in the Removal Rate of Chlorides, Nitrates and Sulfates by Electrokinetic Desalination Treatments,” *Electrochimica Acta*, vol. 89, pp. 436-444, 2013,

- [17] S. Gry, L. M. Ottosen, P. E. Jensen, and J. M. Paz-Garcia, "Electrochemical Desalination of Bricks - Experimental and Modeling," *Electrochimica Acta*, vol. 181, pp.24-30, 2015, doi:10.1016/j.electacta.2015.03.041.

## 第2章

- [18] 斎藤進、“考古学が語る日本の近現代”、同成社:東京、2007
- [19] 永井彰一郎 1931「獨逸に於ける窯業製品の工業規格に就て(其一)」『大日本窯業協會雑誌』39(460), p.240-246
- [20] 日本煉瓦製造株式会社社史編集委員会編 1990『日本煉瓦 100 年史』日本煉瓦製造株式会社
- [21] JIS R 1250:2011 普通れんが及び化粧れんが (HP:kikakurui.com/r1/R1250-2011-01.html)
- [22] 石田真弥、関崇夫，“煉瓦寸法の変遷と組積技術の関連性に関する研究”，*前橋工科大学研究紀要*, vol.22, pp.13-22, 2019
- [23] 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*, vol.59, pp.2729-2730, 1984
- [24] 横須賀市 横須賀市埋蔵文化財調査報告書第9集 猿島遺跡群(猿島遺跡・猿島洞穴・猿島台場跡・猿島砲台跡), 2002
- [25] 西原義文、渡辺貴介、村田尚生，“明治以降の日本における刑務所配置特性に関する研究”，*都市計画論文集*, vol.30, pp.469-474, 1995
- [26] 水野信太郎，“*日本煉瓦史の研究*”，法政大学出版社:東京，1999
- [27] 野口孝俊、浦本康二、鈴木武“明治期に建設された東京湾砲台群における煉瓦の調達に関する一考察-第二海堡跡煉瓦構造物調査-”，*土木学会論文集 D2(土木史)*, vol.71, No.1, pp.1-10, 2015.
- [28] 公共財団法人たましん地域文化財団，“*多摩のあゆみ*”，株式会社ぎょうせい，2015
- [29] 公益財団法人文化財建造物保存技術協会，オエノンホールディングス株式会社，“*重要文化財シャトーカミヤ旧醸造場施設保存修理工事(災害復旧)報告書*”，有限会社シンセイ:茨城. 2016
- [30] 日本産業標準調査会，“JIS R 1250 普通れんが及び化粧れんが”，日本産業標準調査会、2021、  
<https://www.jisc.go.jp/app/jis/general/GnrJISNumberNameSearchList?toGnrJISStandardDetailList>、(閲覧日:2022/05/24)
- [31] 中島康雄、飛ヶ谷潤一郎，“明治要塞の開口部の建築規則と以降の比較”*日本建築学会大会: 建築歴史・意匠*、金沢工業大学、2019 年  
陸軍省工兵方面本署、“砲臺建築仕法通則”、明治 27 年 5 月改正、*現代本法築城史第 1 部第 2 卷(第 2 章第 2 章第 3 章)築城期間及業務*、国立国会図書館所蔵、1943 年
- [32] 島津製作所，“熱分析の基礎 4 章 TG-DTA とは?”、SHIMADZU、2022、  
<https://www.an.shimadzu.co.jp/ta/support/faq/fundamentals/tg-dta.htm>、(閲覧日 2022/05/20)
- [33] 荒川剛，“熱分析法”，“*機器分析のてびき(増補改訂版)3*”，化学同人，p.1-12, 1992

- [34] 梅田甲子郎 1967「日本古代土器の熱的性質について(その1)」『奈良教育大学紀要・自然科学』15(2), p.61-67
- [35] 下田右, “粘土鉱物の示差熱分析”, *粘土科学*, 11(4),p.174-187, 1971

### 第3章

- [36] 横須賀市教育委員会 2014 “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:神奈川県
- [37] 横須賀市教育委員会 2022 “史跡東京湾要塞跡整備関連調査報告書 史跡東京湾要塞跡猿島砲台跡：史跡整備事業に伴う資料収集調査”、横須賀市教育委員会:神奈川県
- [38]
- [39] Oguchi C, Matsukura Y, Kuchitsu N, “Environmental and Seasonal Influences on the Spatial Distribution of Salt Efflorescence and Weathering on Brick Kiln Walls”, *地形*, vol.23, no.2, pp.335-348, 2002
- [40] 朽津信明, “文化財材料としての煉瓦の劣化”, *マテリアルライフ学会誌*, vol 17, no.1, pp.7-11, 2005
- [41] E. M. Winkler, Wilhelm E.J. “Salt Burst by Hydration Pressures in Architectural Stone in Urban Atmosphere,” *GSA Bulletin*, vol.81, no. 2, pp.567-572, 1970, doi: 10.1130/0016-7606(1970)81[567:SBBHPI]2.0.CO;2.
- [42] 石崎武志、西浦忠輝、ユッカ シムネック、マルチヌス ヴァンゲニヒテン, “タイ国スコータイ遺跡の大仏中の水分移動解析”, *保存科学*, vol.39, pp.43-50, 2000, doi: <http://id.nii.ac.jp/1440/00003557/>
- [43] 内田悦生, “石が語るアンコール遺跡—岩石学からみた世界遺産—”, 早稲田大学出版部, 2011
- [44] 銚井修一, “建築環境工学からみた文化財保存に及ぼす水分の影響”, *日本生気象学会雑誌*, vol.55, no.1, pp.3-8, 2018, doi: 10.11227/seikisho.55.3
- [45] Robert J. Flatt., 2002, Salt damage in porous materials:how high supersaturations are generated, *Journal of Crystal Growth*, 242, 435-454
- [46] 川野辰康、小坂和夫, “中世石窟遺構の塩類風化—鎌倉のやぐらの例—”, *応用地質*, vol.43, no.3, pp.124-133, 200
- [47] 水谷悦子、小椋大輔、石崎武志、佐々木淑美、安福勝, “ハギア・ソフィア大聖堂の屋内外環境が壁劣化に及ぼす影響—相図による塩析出環境条件の検討—”, *保存科学*, vol.59, pp.89-101, 2020
- [48] 高取伸光、小椋大輔、脇谷草一郎、安福勝、桐山京子, “覆屋の改修が石仏の塩類風化に与える影響の熱水分移動解析による評価 —元町石仏の保存に関する研究 その 2—”, *日本建築学会環境系論文集*, vol. 85, no. 768, pp. 137-147, 2020, doi: <http://doi.org/10.3130/aije.8>
- [49] 株式会社ケツト科学研究所, “コンクリート・モルタル水分計 HI-520 取扱説明書”, 株式会社ケツト科学研究所, 2022/05/19, [https://www.kett.co.jp/wp-content/uploads/2018/09/hi-520\\_manual\\_rev0302\\_web.pdf](https://www.kett.co.jp/wp-content/uploads/2018/09/hi-520_manual_rev0302_web.pdf) (閲覧日:2022年5月19日)

### 第4章

- [50] 沢田正昭, *文化財保存科学ノート*(東京: 近未来社, 1997)
- [51] 東京文化財研究所, *未来につなぐ人類の技 17 煉瓦像建造物の保存と修復*, 東京文化財研究所, 2017
- [52] 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*, Vol.40, p.35-46、2001
- [53] 相川悠, “煉瓦の吸水放湿特性にみる塩の影響及び保存修復材料の検討,” (修士論文, 筑波大学大学院, 2013).
- [54] S.Hokoi, “Influence of moisture on conservation of cultural properties from an architectural environmental engineering viewpoint,” *Japanese journal of biometeorology*, vol.55, no.1, pp.3-8, 2018, doi: 10.11227/seikisho.55.3
- [55] N. Takatori, D. Ogura, S. Wakiya, M. Abuku, K. Kiriya, “Numerical Evaluation of the Influence of Salt Damage by Improvement of the Shelter— Study on the conservation of a stone Buddha carved into a cliff at Motomachi PART 2 —,” *Transactions of AIJ. Journal of environmental engineering*, vol. 85, no. 768, pp. 137-147, 2020, doi: <http://doi.org/10.3130/aije.8>
- [56] 東京文化財研究所, *未来につなぐ人類の技 17 煉瓦像建造物の保存と修復*, 東京文化財研究所, 2017
- [57] A.V. Skopintsev, G.E. Shapiro, “Comparative analysis of the materials’ choice for the brick restoration technologies in the cultural heritage sites’ facades,” *Materials Science and Engineering*, vol.913, pp.1-7, 2020, doi: 10.1088/1757-899X/913/3/032016
- [58] 徳光卓, 芦田公伸, 古賀裕久, “電気化学的脱塩工法による塩害補修の留意点”, *コンクリート工学*, vol. 48, no.5, pp. 115-18, 2010, doi: 10.3151/COJ.48.5\_115.
- [59] L. M. Ottosen, A. J. Pedersen, and I. Rørig-Dalgaard, “Salt-Related Problems in Brick Masonry and Electrokinetic Removal of Salts,” *Journal of Building Appraisal*, vol. 3, no.3, pp. 181-194, 2007, doi:10.1057/PALGRAVE.JBA.2950074/FIGURES/9
- [60] Paz-García, J.M., B. Johannesson, L.M. Ottosen, A.B. Ribeiro, and J.M. Rodríguez-Maroto, “Simulation-Based Analysis of the Differences in the Removal Rate of Chlorides, Nitrates and Sulfates by Electrokinetic Desalination Treatments,” *Electrochimica Acta*, vol. 89, pp. 436-444, 2013, doi:10.1016/j.electacta.2012.11.087
- [61] S. Gry, L. M. Ottosen, P. E. Jensen, and J. M. Paz-Garcia, “Electrochemical Desalination of Bricks - Experimental and Modeling,” *Electrochimica Acta*, vol. 181, pp.24-30, 2015, doi:10.1016/j.electacta.2015.03.041.
- [62] P.Bosch-Roig, G.Lustrato, E.Zanardini, G.Ranalli, “Biocleaning of Cultural Heritage stone surfaces and frescoes: which delivery system can be the most appropriate? ,” *Annals of Microbiology*, vol. 65, pp.1227-1241, 2015, doi:10.1007/s13213-014-0938-4
- [63] IN SITU Museum and Archive Services, “ARBOCEL BC1000 powderd cellulose”, [https://www.insituconservation.com/en/products/resin\\_additives/arbocel\\_bc1000](https://www.insituconservation.com/en/products/resin_additives/arbocel_bc1000), (Reading date: 2022/04/11)

- [64] 白石壮志, “炭素材料の電気化学的特性の評価法 1.電気化学測定の基礎とサイクリックボルタンメトリー”, 炭素, No.193, 2000
- [65] <sup>1</sup> 河西正隆、丹野和夫、浅井治、古谷保正、川島夏樹, “各種環境下における金属の腐食性生物”, 日立評論, vol.52, no.11, 1970.
- [66] 石原只雄, “最新・腐食事例解析と不濁診断法”, テクノシステム:東京, 2008

付録

第二章図 2.7 の作成にあたり用いた参考文献及び各史跡、煉瓦の基本情報を付録-表 1 としてまとめた。

付録-表 1 第 2 章にて扱った報告書及び煉瓦情報一覧

No.	名称	年代	時代区分	エリア	地域	構造	吸水率 (%)	圧縮強度 (N/㎠)	参考文献
1	函館ハリストス正教会復活聖堂	1916	大正	北海道	北海道	煉瓦造	13.3-21.0	12.4-28.2	文化財建造物保存技術協会編、「重要文化財日本ハリストス正教会復活聖堂(ニコライ堂)保存修理工事報告書」、日本ハリストス正教会教団：東京、1998
2	岩手銀行旧本店本館	1911	明治	東北	岩手	煉瓦造	24.4±0.02	4.38±0.18	文化財保存計画協会編、「重要文化財岩手銀行(旧盛岡銀行)旧本店本館保存修理工事報告書」、岩手銀行：岩手、2016
3	山形県旧県庁舎及び県会議事堂	1916	大正	"	山形	煉瓦造	4.8-9.3 (表面欠けてるもの： 15-17.9%)	42.2	文化財建造物保存技術協会編、「重要文化財山形県旧県庁舎及び県会議事堂保存修理工事報告書」、山形県生活福祉生活文化課：山形、1991
4	旧下野煉瓦製造会社煉瓦窯	1889	明治	関東	栃木	煉瓦及び木造	-	16.1-40.2	重要文化財旧下野煉瓦製造会社煉瓦窯保存修理工事報告書
5	誠之堂	1916	大正	"	"	煉瓦造	-	93.2	林 暲二、松波 秀子、宮谷 慶一 「歴史的建造物の保存修理における研究開発の課題とその考察」、清水建設研究報告、Vol. 86、p.43-50、2007
6	旧岩崎家住宅 煉瓦塀	1896	明治	"	"	煉瓦造	14.9-15.9	15.2 (土接するもの)、2 3.6 (土に接しないもの)	文化財建造物保存技術協会編、「重要文化財旧岩崎家住宅(洋館)塀球室・大広間・附煉瓦塀)保存修理工事報告書」、文化庁：東京、2005
7	旧近衛師団司令部庁舎	1910	明治	"	"	煉瓦造	-	34.2	文化庁編、「重要文化財旧近衛師団司令部庁舎保存整備工事報告書」、文化庁：東京、1978
8	慶應義塾図書館	1911	明治	"	"	煉瓦造	-	53.2±15.2	文化財保存計画協会編、「重要文化財慶應義塾図書館保存修理工事報告書」、慶應義塾：東京、2019
9	東京海上ビル旧館	1914	大正	"	"	コンクリート一部煉瓦 使用	-	23.7	東洋一、加藤勉、伊藤勝、山相昭、 「東京海上ビル旧館の振動および破壊実験(その1)」コンクリートジャーナル、vol. 6、no. 5、pp. 18-29、May 1968、doi: 10.14826/COJ1963.6.5_18.
10	帝国ホテル旧館	1922	大正	"	"	RC一部れんが	7.6	13.1	依田彰彦、「構造物の劣化と耐久性向上の対策- 建築物-」コンクリート工学、vol. 15、no. 9、pp. 80-85、Sep. 1977、doi: 10.3151/COJ1975.15.9.80.

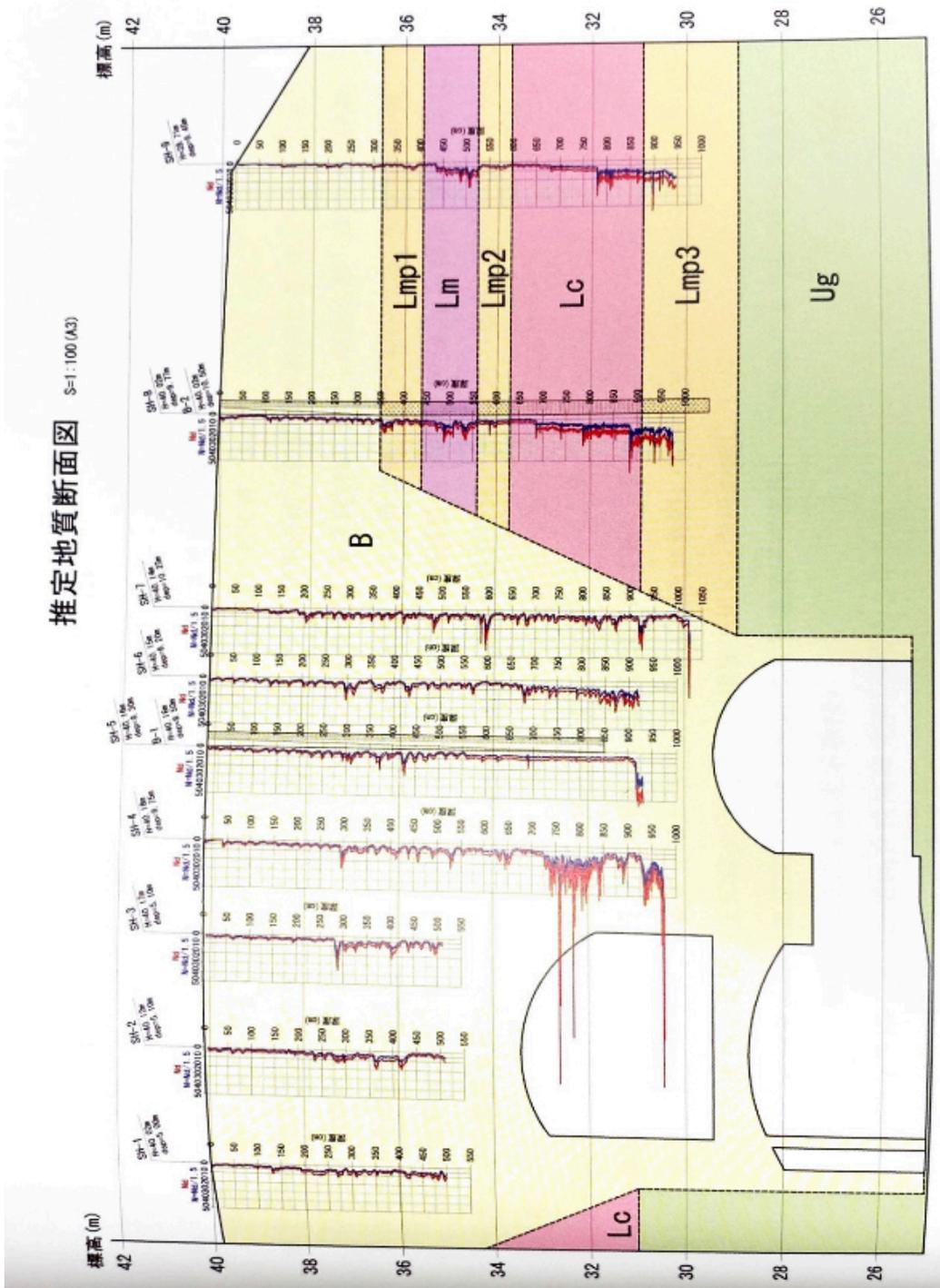
No.	名称	年代	時代区分	エリア	地域	構造	吸水率 (%)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	参考文献
11	安乗嶋灯台	1872	明治	中部	三重	煉瓦造	19.5	3.6	J. Horiguchi, "5048 明治5年に建築された三重県安乗嶋灯台台舎に用いられた煉瓦について(歴史・意匠)," 日本建築学会論文報告集, vol. 69.2, no. 0, pp. 857-860, Oct. 1961, doi: 10.3130/AJISAXX.69.2.0_857.
12	旧名古屋控訴院地方裁判所区裁判所庁舎	1922	大正	"	"	煉瓦及び鉄筋コンクリート造	-	4.4-12.4 (平均7.7)	文化財建造物保存技術協会編, "重要文化財旧名古屋控訴院地方裁判所区裁判所庁舎保存修理工事報告書 本文", 名古屋: 愛知, 1989
13	旧神戸居留地15番館	1880または 1881	明治	近畿	兵庫	木骨煉瓦造	25.3	13.97	文化財建造物保存技術協会編, "重要文化財旧神戸居留地十五番館災害復旧工事報告書", ノゾワ: 兵庫, 1998
14	旧トーマス住宅	1909	明治	"	"	煉瓦及び木造	-	35.066	今井成亨, "神戸洋館の耐震復旧工事重要文化財 神戸居留地十五番館と旧トーマス住宅の復旧工事," 建築史学, vol. 30, pp. 137-148, 1998, doi: 10.24574/ISAHJ.30.0_137.
15	旧奈良監獄	1901	明治	"	"	煉瓦造	14.8-17.2	6.6-16.4	清水建設株式会社編, "重要文化財旧奈良監獄北倉庫耐震対策工事報告書", 旧奈良監獄保存活用: 奈良, 2020
16	龍谷大学 旧守衛所	1879	明治	"	京都	煉瓦造	30.6	-	京都府教育庁指導部文化財保護課編, "重要文化財龍谷大学本館並びに附守衛所保存修理工事報告書", 京都府教育委員会: 京都, 1997
17	同志社 彰栄館	1884	明治	"	"	煉瓦造	20.62	10	京都府教育庁指導部文化財保護課編, "重要文化財同志社彰栄館修理工事報告書", 京都府教育委員会: 京都, 1981
18	野田セメント製造株式会社小野田徳	1883	明治	中国・四国	山口	煉瓦造 堅窯	14.6 (14-16%) 12.7(10-14%)	14-25.8 13.6-22	R. KAWAHARA, A. MORI, and T. DAINOBU, "小野田徳利窯に用いられた煉瓦品質の変遷," 日本建築学会構造系論文集, vol. 71, no. 602, pp. 87-94, Apr. 2006, doi: 10.3130/AJIS.71.87_2.
19	旧美敷水源地下水道施設 接合井	1915 (大正 4)	大正	"	鳥取	煉瓦造及びコンクリート造	12.5%以下	43.2-79.7	文化財建造物保存技術協会編著, "重要文化財旧美敷水源地下水道施設保存修理工事報告書", 鳥取市教育委員会: 鳥取, 2018
20									

No.	名称	年代	時代区分	エリア	地域	構造	吸水率 (%)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	参考文献
21	旧長崎税関下り松派出所	1898	明治	九州	長崎	煉瓦造	13.4	19.4	文化財建造物保存技術協会編著、「重要文化財旧長崎税関下り松派出所保存修理工事報告書」、長崎市：長崎、2002
22	旧香港上海銀行長崎支店	1904	明治	"	"	煉瓦及び石造	-	13-34.1	文化財建造物保存技術協会編、「重要文化財旧香港上海銀行長崎支店保存修理工事報告書」、長崎市：長崎、1996
23	旧日本生命保険株式会社九州支店	1909	明治	"	福岡	煉瓦造	13.3	17.5	文化財建造物保存技術協会編、「重要文化財旧日本生命保険株式会社九州支店附耐震対策工事報告書」、福岡市教育委員会：福岡、2022
24	三井石炭工業株式会社三池炭鉱旧万田坑施設第一整坑巻揚機室	1909	明治	"	熊本	煉瓦造	-	11.06±1.6	文化財保存計画協会執筆 編纂、「重要文化財三井石炭工業株式会社三池炭鉱旧万田坑施設第一整坑巻揚機室ほか1基保存修理工事報告書」、荒尾市教育委員会：熊本、2010
25	旧第一銀行熊本支店	1919	大正	"	"	煉瓦造と鉄筋コンクリート	-	9.1	日本イコモス国内委員会、「2016年熊本地震 日本イコモス報告書 文化財の被害状況と復旧復興への提言」、2019
26	日本煉瓦製造株式会社	1912年測定 (明治末~大正元年)	関東	埼玉	"	並焼一等	17.3	15.1	庄右衛門大高 徳政谷口. "煉瓦の品質と隣道問題". 大日本窯業協会雑誌, No.20(236), p.311-316, 1912. <a href="https://doi.org/10.2109/jcersj.1892.20.236_311">https://doi.org/10.2109/jcersj.1892.20.236_311</a>
27						並焼二等	18.25	10.5	
28						並焼三等	18.57	9.3	
29						極上	19.05	12.4	
30						並上	20.32	8	
31						並中	22.25	7.1	
32						並下	22.37	5.4	
33						撰極上	16.38	11.3	
34						極上	18.76	8.8	
35						並上	21.44	7.4	
36	並中	22.34	5.6						
37	並下	21.46	5.4						
38	極上	15.78	5.4						
39	並上	18.2	4.6						
40	並中	22.14	4.5						
41	並下	21.29	3.9						
42	上焼	14.31	11.1						
43	極上	15.69	10.3						
44	並上	17.41	11.6						
45	並中	20.65	5.6						
46	並下	21.98	5.9						
47	上	15.1	13.4						
48	中	20.78	8.3						
49	下	22	4.5						
50	堺煉瓦株式会社	近畿	"	大阪	上等	8.8	41.5		
51					中等	14.9	18.5		
52	日本煉瓦株式会社	"	"	大阪	上等	9.8	20.7		
53					中等	14.4	13.6		
54	岸和田煉瓦株式会社	"	"	大阪	上等	10.5	18.1		
55					中等	15.7	13		
56	大阪窯業株式会社	"	"	"	上等	3.4	41.7		
57					中等	9.7	44.3		

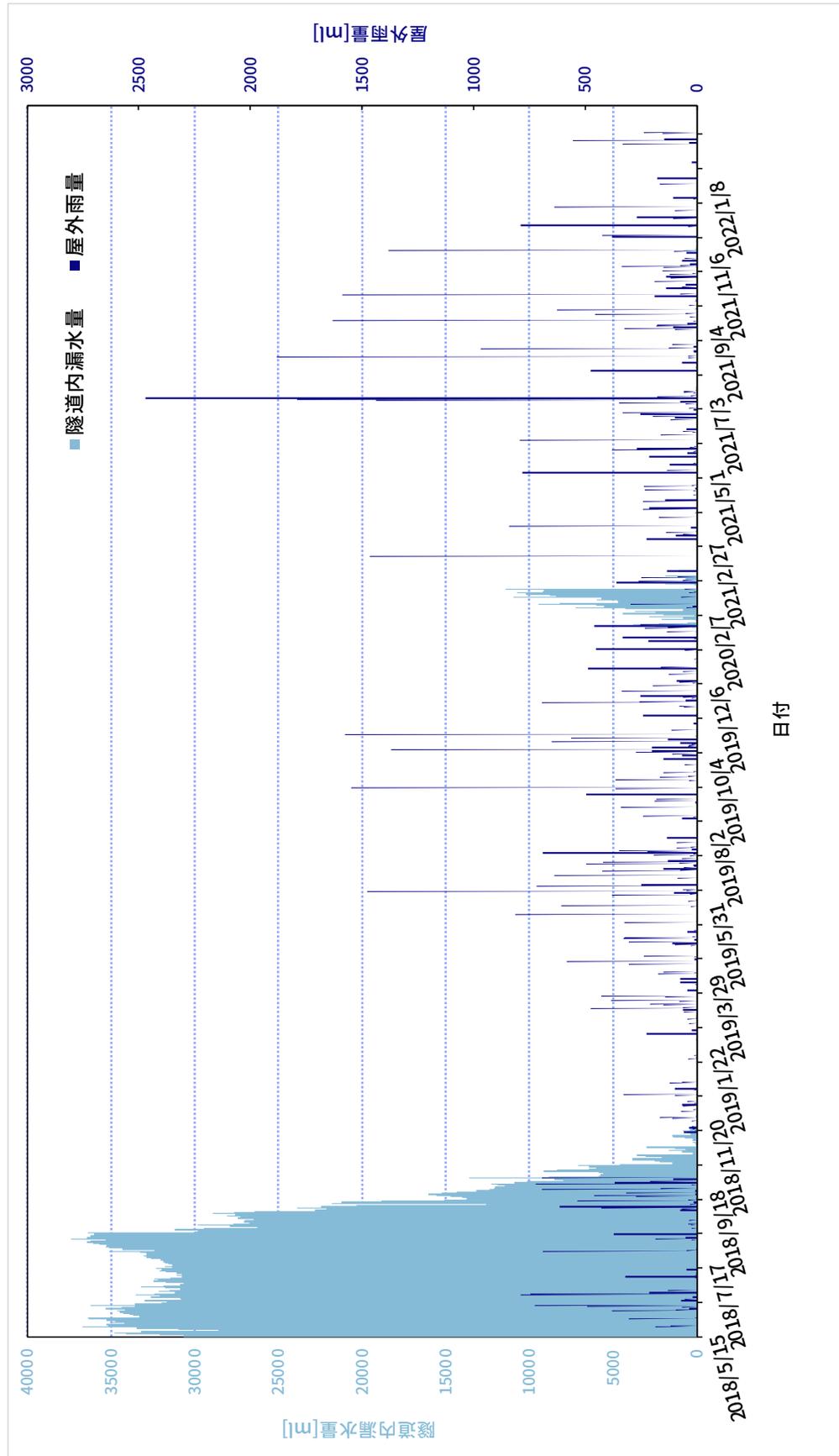
※「-」は報告書内にデータ記載なし

付録一表 2 第3章2節で実施した実証試験に用いた試験体の物性値

No.	乾燥重量 [g]	重量含水比 (%)	体積 [cm <sup>3</sup> ]	乾燥密度 [g/cm <sup>3</sup> ]
Blanc-1	181.34	18.72	120	2.15
Blanc-2	208.75	18.36	120	2.02
Blanc-3	155.38	18.34	120	2.26
0.25M-1	159.94	17.78	120	2.12
0.25M-2	188.67	19.60	120	2.14
0.25M-3	215.44	18.55	120	2.13
1M-1	233.2	12.34	120	2.20
1M-2	252.02	14.05	120	2.27
1M-3	191.2	15.47	120	1.48



付録-図 1 隧道の推定地質断面図 (横須賀市 2022 年より引用)



付録-図2 猿島砲台跡隧道内の漏水量及び屋外雨量の推移

## 謝辞

終わりに、本研究の遂行にあたり約 6 年間という長期に渡りご指導ご鞭撻を賜りました松井敏也教授に心から感謝の意を表します。文化財保存科学という分野において必要な知識や技術だけでなく、研究する上でコアとなる部分の築き方や研究に取り組む姿勢、そして研究に携わる方々に対してのコミュニケーションの進め方など多くのことを学ぶことができました。この 6 年間で学び得たものは、これから研究者として第一歩を踏み出す際に大きな助けになると思います。

銚井修一教授、上北恭史教授、下田一太准教授には本研究にあたり異なる研究分野の視点から多くのご助言を賜りましたこと、深く御礼申し上げます。

横須賀市教育委員会様、牛久市文化芸術課様、京都文化博物館様、飯豊町教育委員会様には貴重な歴史的煉瓦試料の提供にご協力して頂きましたこと、厚くお礼申し上げます。

長期的な現地調査にご同行・ご協力して頂きました横須賀市教育委員会・川本様、物性調査にご協力していただきました株式会社鴻池組技術研究所・高松様、成島様、水分吸脱着試験を実施してくださいました北海道大学大学院工学研究院長野教授及び環境システム工学研究室の皆様には心から感謝いたします。

本研究の他様々な実験の補助をして頂きました筑波大学大学院保存科学研究室の後輩たちに感謝すると共に、今後益々の活躍をお祈りします。

そして、研究活動や柔道家としての活動、学生生活等をいつも応援し、温かく見守ってくれた両親には心から感謝しています。家族の支えや存在は研究や研究と並行して続けてきた柔道におけるそれぞれの目標を達成させるためのモチベーションであり、家族という大きな心の支えがあったからこそ本研究の遂行、同時にオリンピック出場という大きな二つの目標を達成させることができました。これから少しずつ恩返しできるように努めてまいります。

最後に皆様のご協力、多大なご助言のもと本研究を無事に遂行することができました。この場を借りて深謝の意を表し、謝辞といたします。

筑波大学大学院  
人間総合科学研究科 世界文化遺産学専攻  
深見 利佐子  
令和5年2月10日