

# 論文 富岡製糸場内 RC 造煙突の劣化調査と保存方法の基礎的検討

井野 黎来\*1・今本 啓一\*2・木野瀬 透\*3・江尻 憲泰\*4

**要旨:** 建設後 80 年以上経過した RC 造煙突について、これまでの調査から煙突内部の耐火煉瓦層によって劣化進行が抑制されていることが示唆された。本研究で温度履歴解析を用いて、コンクリートにかかる熱応力を検討した結果、耐火煉瓦によって熱応力がひび割れ発生強度以下となり、表面のひび割れを抑制していることが確認された。また、煙突外側表面のポップアウト現象は、雨水による水分が要因の 1 つであると考えられるため、重要文化財における水分浸透防止策としてシラン系表面含浸材の試塗を行った。試塗の結果、外観を変化させることなく、水分の浸透が抑制できていることが確認された。

**キーワード:** 鉄筋コンクリート, 煙突, 調査, 耐火煉瓦, 温度履歴解析, 二水石膏, 表面含浸材

## 1. はじめに

2014 年に世界遺産に登録された富岡製糸場は、1872 年に明治政府によって設立された日本初の模範器械製糸場である。富岡製糸場建造物群の 1 つに鉄筋コンクリート造煙突がある。製糸場における生産システムの一つとして欠かせないボイラーの排煙を目的とした設備であるが、現存する煙突(写真-1)は、建設から既に 80 年以上経過しており劣化が進行している。特に煙突頂部内側においてコンクリートの剥落による鉄筋の露出や鉄筋の崩落が認められ、現在は崩落防止のための炭素繊維シートカバーが設置されている。富岡市では、文化財として富岡製糸場建造物群を継承することを目的として保存修理事業を行っている。筆者らはその一環として、煙突の劣化状況を把握し、保存・補修方法を検討するための調査を行った<sup>2)</sup>。調査の結果、上記の劣化は、ボイラー稼働時の排煙に含まれる硫黄成分と水分が反応することで硫酸が生じ、コンクリートの溶脱・剥落が発生している可能性が示唆された。

本研究では、煙突外側表面の劣化要因について着目し、ボイラー稼働時における熱的影響について温度履歴解析を用いた検討を行うとともに、今後の補修方法の提案として、含浸材試塗による劣化抑制効果の検討を行った。

## 2. 建築物概要

### 2.1 対象構造物

対象である煙突の概要を表-1に示す。煙突内側には、小口積みで厚さ 108mm の耐火煉瓦が積まれている。コンクリートと耐火煉瓦の間には約 100mm の空気層が設けられている。調査報告書<sup>3)</sup>によると、コンクリート厚さは煙突頂部で 100mm、底部で 273mm と示されている。



↑炭素繊維  
シートカバー

写真-1 煙突外観

表-1 建築物概要

竣工年	1939 年(昭和 14 年)
構造	鉄筋コンクリート造
寸法	煙突高さ:37.5m
	耐火煉瓦高さ:12.1m

### 2.2 圧縮強度

煙突南側、地上から高さ 10.6m の位置から採取したコア供試体の圧縮強度は、28.4N/mm<sup>2</sup>であった。既往の研究より、45 年経過した普通ポルトランドセメントの強度は材齢 28 日強度の約 1.7 倍であった<sup>4)</sup>ことから、本煙突に使用されたコンクリートの材齢 28 日強度は、16.7N/mm<sup>2</sup>程度であったと推測される。

### 2.3 調合推定

当時の仕様書によると、コンクリートの調合割合はセメント 50kg に対し、川砂 2.5 切(=70L)、砂利 4 切(=112L)と示されている。また、当時のコンクリートにおける圧

\*1 東京理科大学大学院 工学研究科建築学専攻(学生会員)

\*2 東京理科大学 工学部建築学科教授 博士(工学)(正会員)

\*3 (一財)日本建築総合試験所 試験研究センター 材料部 材料試験室 博士(工学)(正会員)

\*4 日本女子大学 建築デザイン学部建築デザイン学科教授

表-2 推定した調合

	W/C [%]	単位量 [kg/m <sup>3</sup> ]				
		セメント	水	細骨材	粗骨材	空気量
春～秋	59.7	241	144	507	892	125
冬		279	166	469	902	119

縮強度と水セメント比の関係<sup>5)</sup>より、水セメント比は59.7%であると推測される。これらより推定した調合表を表-2に示す。調合推定では、普通ポルトランドセメント（密度：3.16g/cm<sup>3</sup>）と仮定し、川砂・川砂利の単位容積質量を1650kg/m<sup>3</sup>とした。

#### 2.4 骨材率

採取したコアの断面の一部（写真-2）をトレースし、骨材の占める面積を計算することで骨材率を算出した。算出した結果、粗骨材率は53.2%であった（写真-3）。推定した調合表より求められる粗骨材率は54.4%であり、仕様書の調合割合通りに施工されていたと考えられる。

### 3. コンクリート熱劣化解析

本研究では、煙突1日稼働時の推定排煙温度によるコンクリートへの熱影響と耐火煉瓦による熱低減効果について解析的に検討を行った。

#### 3.1 解析モデル

温度履歴解析にはコンクリートの温度応力解析ソフト（ASTEAMACS）を使用した。図-1に有限要素メッシュ図を示す。解析は煙突の1層分の断面で行い、耐火煉瓦のない煙突頂部と、耐火煉瓦のある煙突底部の2箇所を対象のモデルとした（図-2）。それぞれの厚みは、調査報告書<sup>3)</sup>とコア供試体の全長より推定したコンクリート厚さ<sup>2)</sup>より設定した。表-3に本解析で使用した物性値を示す。それぞれの材料特性（熱伝導率、密度、比熱）については、構造設計指針<sup>6)</sup>をもとに設定した。

#### 3.2 熱伝達境界面及び境界温度条件

図-3に熱伝達条件を示す。煙突外側表面の熱伝達率を23.3W/m<sup>2</sup>°Cとし、煙突内側表面の熱伝達率を40.4W/m<sup>2</sup>°Cとした。外側表面の熱伝達率は指針<sup>6)</sup>をもとに設定し、内側表面の熱伝達率hは式(1)<sup>6)</sup>より算出した。

$$h = \frac{0.0542 \times \lambda}{D} \left( \frac{V \times D}{\nu} \right)^{0.8} \quad (1)$$

ここに、λ：排ガスの熱伝導率（=0.0412kcal/mh°C）

V：排ガス流速（=10m/s） D：煙突内径

ν：排ガスの動粘性係数（=0.619×10<sup>-4</sup>m<sup>2</sup>/s）

煙突稼働時、煙突内側表面には排煙によって高温が与えられる。そのため、排煙温度を煙突内側表面の境界温度として指針<sup>6)</sup>をもとに設定した。設定排煙温度は、本煙突が重油と石炭を主燃料としたボイラーの排煙設備<sup>7)</sup>であることを考慮した。



写真-2 コア断面

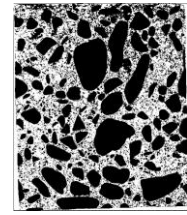


写真-3

コア断面の二値化画像

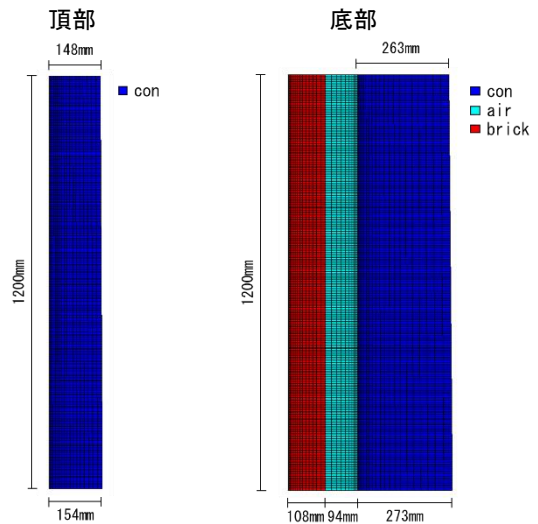


図-1 有限要素メッシュ図

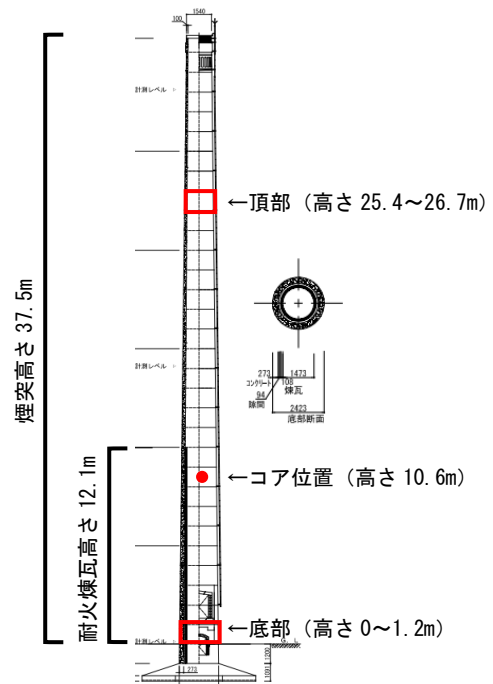


図-2 煙突概形図<sup>3)</sup>および解析位置

表-3 物性値

	コンクリート	空気層	耐火煉瓦
熱伝導率[W/m°C]	2.600	0.568	1.160
密度[kg/m <sup>3</sup> ]	2300	1	1800
比熱[kJ/kg°C]	1.15	1.00	1.00
初期温度[°C]	20		

### 3.3 検討項目

解析による検討項目は、煙突断面における各材料の内部温度とした。煙突断面の半径方向における熱応力分布については、コンクリート部分の温度履歴解析結果をもとに次節に示す熱応力算出式より求めた。

### 3.4 熱応力算出式

熱応力  $\sigma$  は、熱によるクリープの影響を考慮した有効ヤング係数  $E'$  を用い、式(2)、(3)より算出した。

$$E' = \frac{E}{1+\phi} \quad (2)$$

$$\sigma = \alpha \times (T_1 - T_2) \times E' \quad (3)$$

ここに、 $E$ :ヤング係数 ( $N/mm^2$ )  $\phi$ :クリープ係数 (=2.0)  
 $\alpha$ :コンクリートの線膨張係数 ( $\times 10^{-6}/^\circ C$ )

$T_1$ :内側表面温度 ( $^\circ C$ )  $T_2$ :中立軸上の温度 ( $^\circ C$ )

ヤング係数については、コア圧縮強度試験の結果より、JASS5 に示されるコンクリートの圧縮強度とヤング係数の関係式により算出した。クリープ係数に関しては、高温時のコンクリートのクリープに関する実験研究を行っている常世田らの研究<sup>8)</sup>より、本煙突における排煙温度の想定最大温度である  $200^\circ C$  以下において、大きな差が生じないと判断できる。したがって、本研究では排煙温度に関わらずクリープ係数を 2.0 とした。また、中立軸の算出については、鉄筋の影響は考慮していない。

## 4. 解析結果

### 4.1 温度履歴解析結果

煙突頂部（耐火煉瓦なし）の解析結果を図-4 に、煙突底部（耐火煉瓦あり）の結果を図-5 に示す。図-5 のコンクリート部分を抽出し、図-6 として作成した。本解析は耐火煉瓦の効果を相対的に評価することを意図している。図-5 における内側表面からの距離 0 mm と 200 mm（コンクリート表面）の断面温度を同一時間ごとに比較すると、耐火煉瓦によって、コンクリートに伝わる温度が最大約 60% 減少（24 時間後）している。耐火煉瓦の物性値は表-3 に示す一般値を用いたが、当時の品質との違いや供用時の含水状態などにより解析結果は実際の状況を必ずしも正確に表すものではないが、耐火煉瓦による温度低減効果はそれなりにあったのではないかと推測される。また、底部では頂部よりも高い排煙温度であるにも関わらず、コンクリートに伝達される温度が頂部よりも低い温度となった。解析開始から 24 時間後のコンクリート断面における温度勾配を比較すると、煙突頂部は煙突底部の約 3 倍の勾配となり、コンクリート部分における内外温度差が大きくなった（図-4、図-6）。

### 4.2 応力分布結果

4.1 の温度履歴解析結果を基に、式(2)、式(3)より算出した熱応力のコンクリート断面における分布図を図-7、

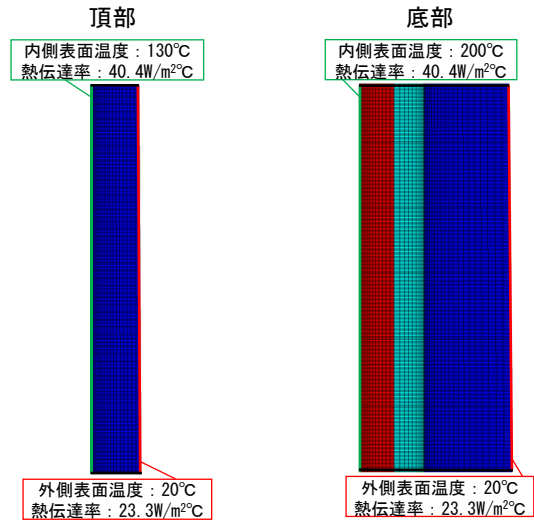


図-3 熱伝達境界温度条件

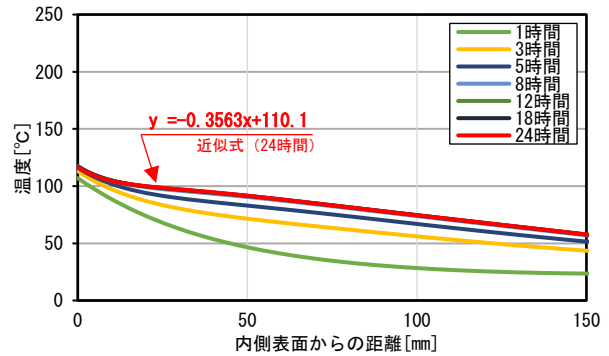


図-4 煙突頂部の断面温度分布

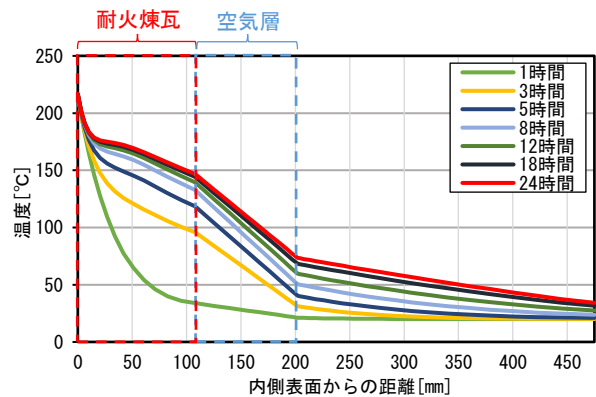


図-5 煙突底部の断面温度分布

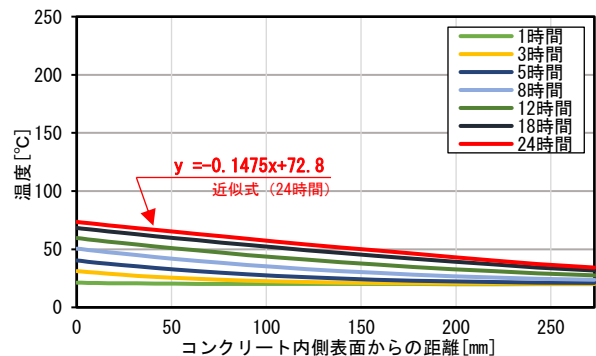


図-6 煙突底部の断面温度分布（コンクリート部）

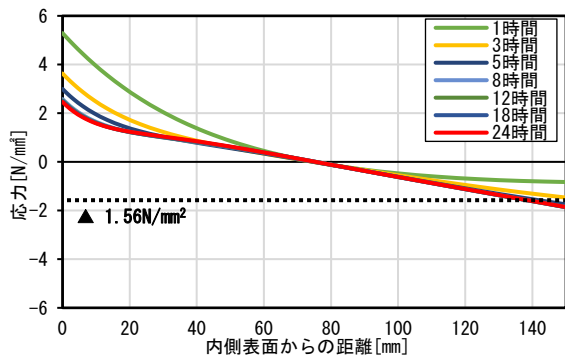


図-7 煙突頂部の断面応力分布

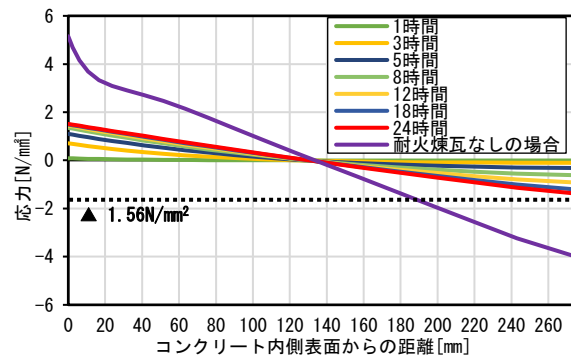


図-8 煙突底部の断面応力分布

図-8 に示す。示方書<sup>9)</sup>をもとに 2.2 で示したコア供試体の圧縮強度より算出した引張強度は、 $2.23\text{N/mm}^2$ である。引張側のひび割れ発生強度<sup>10)</sup>をこの値の 0.7 倍と仮定すると、本煙突におけるひび割れ発生強度は  $1.56\text{N/mm}^2$ となる。図-7 より、煙突頂部外側表面ではボイラー稼働 3 時間後でひび割れ発生強度に到達する。一方、図-8 に示す煙突底部外側表面では、ボイラー稼働 24 時間後でもひび割れ発生強度に達していない結果となった。

図-8 に煙突底部に耐火煉瓦が存在しないと想定した場合の 24 時間後の応力分布を合わせて示す。耐火煉瓦がないと想定した場合と、耐火煉瓦がある場合の 24 時間後の応力分布を比較すると、最大引張応力( $X=273\text{mm}$  地点)が約 70%減少しており、耐火煉瓦の熱劣化抑制効果が確認できた。既往調査<sup>2)</sup>において実施した煙突外側表面のひび割れ調査結果を図-9 に示す。耐火煉瓦のある層のひび割れ数が耐火煉瓦のない層のひび割れ数の 1/2 程度まで減少しているとともに、耐火煉瓦のライニングがある下部では縦ひび割れの発生はほとんど見られないのに対して、ライニングのない箇所は縦ひび割れが多く発生している。これらは、耐火煉瓦によってコンクリートへの熱伝達が抑制され、熱応力が低くなったためであると考えられる。なお、本論文では煙突 1 層分の熱応力のみを算出した結果であり、上下の層による拘束の影響等は考慮できていない。温度解析とともに煙突稼働時に生じていた熱応力については引き続き検討を行う予定である。

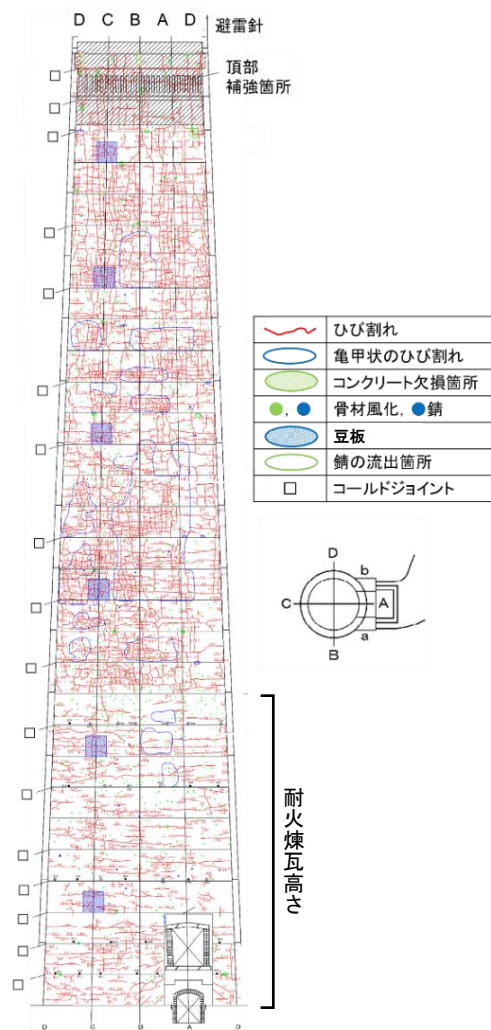


図-9 ひび割れ発生状況<sup>再掲載<sup>2)</sup></sup>

### 5. 煙突外側表層のポップアウトについて

煙突外側表面の一部では、写真-4 に見られるようなポップアウトが生じている場所が確認された。ポップアウト部分底面では、ほとんどの場合、骨材が割れている痕跡が確認された。煙突東面および西面から採取したポップアウト内部の骨材を対象とした粉末 X 線回折 (XRD) による粉末 X 線回折試験の結果を図-10、図-11 に示す。これらより、両面ともに石英やカルサイト、白雲母および曹長石といった骨材に含まれる鉱物の他に、二水石

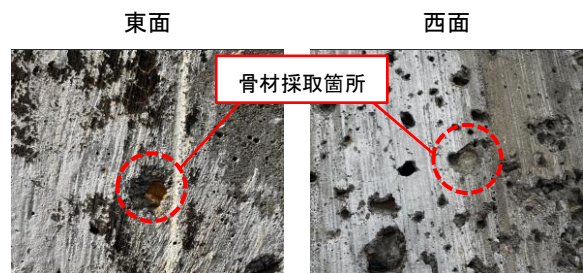


写真-4 表層ポップアウトの様子

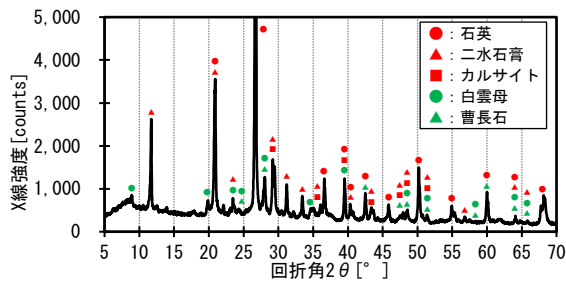


図-10 東面採取骨材 XRD 試験結果

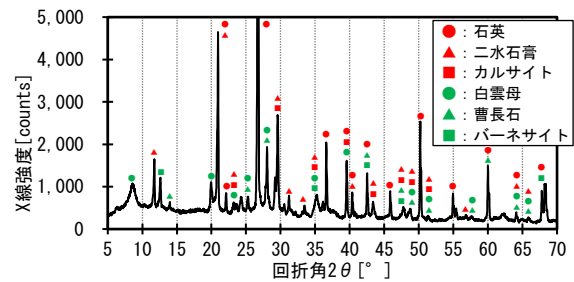


図-11 西面採取骨材 XRD 試験結果

膏が検出された。この二水石膏は、骨材成分であるカルサイト (CaCO<sub>3</sub>) と硫酸の反応によって生成されたと考えられる。このことから、二水石膏の結晶成長圧によって骨材が膨張し、抜け落ちたような現象が生じていると推測できる。前述の硫酸は、本煙突の環境条件下において、風により煙突外側表面に付着した排煙に含まれる硫酸成分と雨水によって生じたと推測<sup>2)</sup>されるため、二水石膏生成の抑制には水分浸透の阻止が効果的と考えられる。

## 6. 煙突表面含浸材塗布試験

### 6.1 試験概要

前章より、煙突外側表面で生じているポップアウトにはコンクリートへの水分浸入を防ぐことが有用であるとされる。シラン系表面含浸材（以下、含浸材）は、コンクリート表面から内部へ吸水防止層を形成することで外部からの水分浸入を抑制する効果があるとされている。そのため、本煙突において含浸材の試塗を行い、含浸材の効果と外観への影響の検証を行った。

試験箇所を写真-5 に示す。使用した含浸材について表-4 に示す。試験は煙突西側の地下1層と1層目（地上部分）にまたがる箇所とし、2週間に1回測定を行った。測定期間は11/26~12/23の1か月間とした。

### 6.2 測定項目

測定は既往の研究<sup>11), 12)</sup>を参考に含浸材塗布部、無塗布部それぞれで行った。

#### (1) 色差・光沢度

色差は色差計を用いて、L\*a\*b\*表色系 (JIS Z 8729) に準じた値を測定した後に、式(4)より色差を算出した。

$$\Delta E = (\Delta a^2 + \Delta b^2 + \Delta L^2)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

光沢度は、JIS Z 8741 に準拠したハンディ光沢計を用いて、測定した。

#### (2) 静電容量

コンクリート・モルタル水分計を用いて、静電容量を測定した。

#### (3) 表面含水率

1分間噴霧器にて試験範囲内に水を噴霧し、その後1分間静置して水を浸透させた上で表面を拭き取り、電気抵抗式モルタル水分計を用いて、3箇所ずつ測定を行った。

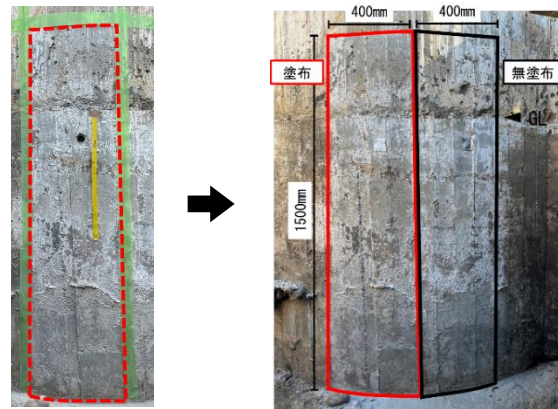


写真-5 含浸材塗布試験箇所概要

表-4 使用した表面含浸材

主成分	有効成分濃度[%]	塗布量
アルキルアルコキシシラン	95~100	600ml/m <sup>2</sup>

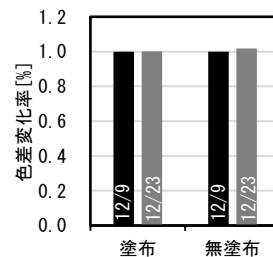


図-12 色差

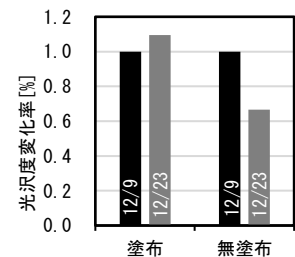


図-13 光沢度

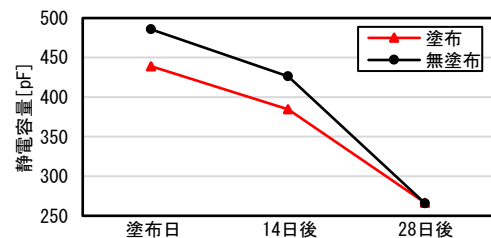


図-14 静電容量

測定は拭き取り後、0秒、30秒、60秒、90秒、2~5分で1分ごととした。

### 6.3 測定結果

#### (1) 色差・光沢度

色差・光沢度の結果を図-12、図-13に示す。どちらも含浸材の塗布によって大きな差異は生じておらず、含浸材が煙突表面の外観に与える影響はないといえる。

## (2) 静電容量

静電容量測定結果を図-14に示す。塗布後14日までは、含浸材塗布部分の測定値の方が小さく、含浸材塗布によってコンクリートの水分浸透抑制効果が確認できた。塗布後28日において、塗布部と無塗布部の静電容量が同程度の値となったのは、測定期間中、降雨が全くなく乾燥していたことで、無塗布部分の水分が減少したためであると考えられる。

## (3) 表面含水率

表面含水率測定結果を図-15に示す。含浸材の塗布によって、表面含水率を抑えられることが判明した。また、無塗布部は14日後と28日後で同程度の表面含水率であるのに対し、塗布部は塗布からの日数が経つにつれ、表面含水率が低下する結果となった。

## 7. まとめ

本研究は、前回調査結果より示唆された耐火煉瓦によるコンクリートへの熱的影響の抑制効果について、温度履歴解析を用いて、煙突稼働中のコンクリート内の温度を想定し、稼働当時の温度状況を検討した。その結果、耐火煉瓦によって排煙温度による煙突内側表面からの温度を最大で60%程減少させ、コンクリートの内外温度差を縮小する効果がある可能性を示した。これにより、耐火煉瓦層の熱応力はひび割れ発生強度以下となり、耐火煉瓦があることでひび割れが大きく減少している可能性が考えられる。

また、既往研究<sup>2)</sup>より煙突外側表面におけるポップアウトを引き起こした要因と考えられる二水石膏の生成を抑制するためには、水分浸透を抑制することが有用であると示唆された。煙突コンクリートに浸透する水分は表面から浸透すると考えられ、実際に煙突表面に含浸材を塗布した結果、含浸材による撥水効果と表面含水率の低減効果から、本煙突における表面からの水分浸透が塗布により抑制されていることが確認された。含浸材塗布による外観変化もほとんどない結果となったため、現在の外観を変化させることなく劣化の進行を抑制することができると考えられる。

今回の測定期間では、降雨がなく、実際に雨が降った際の効果を検討するまでに至らなかった。今後も測定を継続して行い、検討を深め、更なる劣化を抑制するための補修方法の1つとして提案していきたい。

## 謝辞

本調査は、富岡市より有限会社江尻建築構造設計事務所が業務委託を受けた富岡製糸場内の煙突保存整備調査の事業の一環として行われたものである。

調査の実施および含浸材塗布試験にあたり、富岡市と

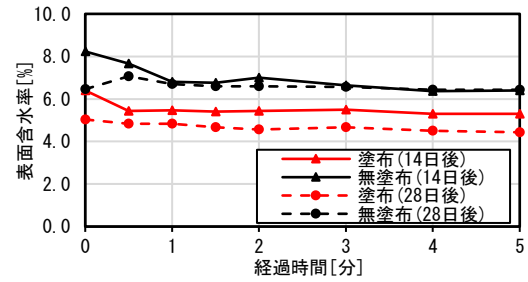


図-15 表面含水率

シーカ・ジャパン株式会社 花房賢治氏にご協力およびご助言をいただいた。実施にあたりご協力いただいた関係各位に謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 公益財団法人文化財建造物保存技術協会：旧富岡製糸場建造物群調査報告書，富岡市教育委員会，2006
- 2) 井野黎来ほか：富岡製糸場内の鉄筋コンクリート造煙突の劣化調査，コンクリート工学年次論文集，Vol.46，No.2，pp.955-960，2024.6
- 3) 有限会社江尻建築構造設計事務所：平成28年度史跡旧富岡製糸場煙突保存整備調査業務委託調査報告書，2017.6
- 4) 植木康知ほか：45年経過した混合セメントコンクリートの長期強度発現性について，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.2，pp.71-79，2012.5
- 5) 濱田稔：コンクリート應圧強度に関する研究（強度の理論と配合方法），建築雑誌，Vol.492，pp.141-184，1927.2
- 6) 日本建築学会：鉄筋コンクリート煙突の構造設計指針，1978.7
- 7) 結城雅則：富岡製糸場における煙突及びボイラーの変遷について—昭和20年代以降の工事記録の分析を中心に—，令和4年度富岡製糸場総合研究センター報告書，pp.1-41，2022
- 8) 常世田昌寿ほか：700℃までの一定温度下におけるコンクリートのクリープに関する実験的研究，構造工学年次論文集，Vol.50B，pp.1-8，2004.3
- 9) 土木学会：コンクリート標準示方書[設計編]，2012
- 10) 日本コンクリート工学会：マスコンクリートのひび割れ制御指針2016，2016.11
- 11) 御園麻衣子ほか：表面含浸材と表面コーティング材によるコンクリート躯体保護性能に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，No.35，Vol.1，pp.1693-1698，2013.
- 12) 御園麻衣子ほか：国立西洋美術館本館躯体の保全に向けた表面保護材の特性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，No.36，Vol.1，pp.1942-1947，2014.