

報告 富岡製糸場内の鉄筋コンクリート造煙突の劣化調査

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 年以上経過した鉄筋コンクリート造煙突について、目視調査や、富岡市教育委員会許可により、採取したコアを用いた EPMA および XRD による成分分析を行った。目視調査の結果、煙突上部の内側表面ではコンクリートの剥落や鉄筋の腐食、下部の外側表面では鉄筋の腐食によるひび割れ、表層にはスケーリングが確認された。成分分析の結果、排煙に含まれる硫黄成分がコンクリート内部に浸透し、内側表面では二水石膏の生成が認められた。したがって、煙突表面におけるスケーリングは、硫酸および硫酸塩の作用により生成した二水石膏の脆弱層が剥落したものと考えられる。

キーワード: 鉄筋コンクリート, 煙突, 調査, 二水石膏, 硫酸, 硫酸塩

1. はじめに

群馬県富岡市に位置する富岡製糸場は、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。設立後、長く製糸工場として活躍したものの、日本の製糸業の衰退とともに 1987 年に操業が停止された。日本の近代化と世界の絹産業の発展に大きく貢献したこと、19 世紀後半の官営工場建築がほぼ当時のままの状態で見られることから、2006 年には主な建造物が重要文化財に、2014 年 6 月には世界文化遺産に登録された。富岡製糸場建造物群で 37.5m という一番の高さを誇る鉄筋コンクリート造煙突は、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。現存する煙突は 1939 年に建設された 4 代目(写真-1)であるが、建設から既に 80 年以上経過しており、写真-1 に示すように一部に劣化箇所が認められ、その安全性が危惧されている。富岡市では、文化財として継承することを目的として富岡製糸場の保存修理活動を行っている。

そこで、本研究では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データを得ることを目的に各種調査を行った。

2. 調査概要

2.1 対象構造物

調査対象は、上述した 4 代目の煙突であり、煙突内側には、地上から高さ 12.1m までは小口積みで厚さ 108mm の耐火煉瓦が積まれている。表-1 に示すボイラーの変遷²⁾によれば、1939 年～1987 年までは 4 つのボイラーが稼働しており、主に重油と石炭が燃料に使用されていた。したがって、重油および石炭の燃料に含まれる成分^{3),4)}(表-2)がコンクリート内部に浸透していることが想定

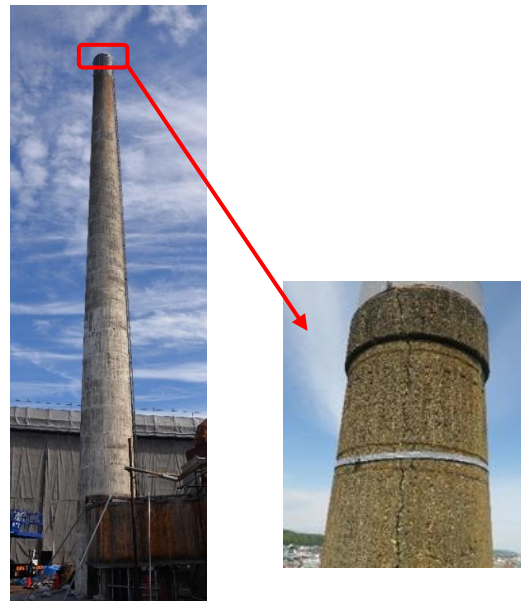


写真-1 煙突外観

表-1 ボイラーの変遷²⁾

	1960年代	1970年代	1980年代
1号	1956年10月～1886年3月稼働		
2号	1966年2月～1969年8月稼働		
	1969年8月～1987年3月稼働		
	1986年3月～1987年3月稼働		

◆:石炭, ◆:重油, ◇:木くず等

表-2 燃料成分^{3),4)}

種類	成分
石炭	炭素, 水素, 窒素, 酸素, 燃焼性硫黄 (0.8～2.0 質量%)
重油	炭化水素, 硫黄 (0.1～3.5 質量%), 無機化合物

*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 工博 (正会員)

*3 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 (正会員)

*4 日本女子大学 家政学部住居学科教授

される。外周部コンクリート表面には約 1.2m ごとに打ち継ぎ跡が 30 箇所確認でき、打ち継ぎ目から打ち継ぎ目までを 1 段とし、地上から 1 段、2 段、…30 段と称する。調査報告書⁵⁾によると、煙突の地上高は 125 尺 (37.875m)、頂部内径は 4 尺 2 寸 5 分 (1.28775m)、コンクリート厚さは頂部で 0.35 尺 (106mm)、底部で 0.9 尺 (約 273mm)、煙突内側には耐火煉瓦を 43 尺 (13.0295m) の高さまで積み上げ、コンクリートと耐火煉瓦の間に熱空間スペースを下部で 3 寸 5 分 (106.05mm)、上部で隙間の無いように設けることが示されている。

コンクリートの調合割合については、セメント：川砂：砂利＝1：2：4 と記されている。

2.2 調査概要

図-1 に、煙突の概形図⁵⁾および各種調査位置を示す。

(1) 目視および 3D 計測システムによる調査

高所作業車を用いた目視調査により煙突内外表面のひび割れやコンクリートの剥落などの劣化状態を確認した。また、3D 計測システム (3D レーザースキャナー) により煙突全体のひび割れの数および幅を計測した。

(2) 鉄筋調査

電磁波レーダーを用いて、外周表面から鉄筋の配筋間隔を非破壊にて計測した。計測箇所は高さの異なる北面 6 か所 (H-1~H-6) とした。また、南面 2 か所 (A, B) では研り調査を行い、土木学会コンクリート標準示方書⁶⁾に準拠した鉄筋の腐食区分により鉄筋の腐食グレードを 4 段階で評価した。

(3) コア供試体による耐久性調査

南面の煙突頂部 (No. 1)、耐火煉瓦のライニングが施されていない中部 (No. 2) およびライニングが施されている下部 (No. 3) の 3 か所において、直径 76mm で煙突の外側から内側にコンクリート部分を貫通するようにコア供試体を採取した (図-1)。No. 2, No. 3 のコア供試体について、JIS A 1152 に準拠して中性化深さを測定した。中性化深さ測定後のコアを用いて、燃料の燃焼に伴う排煙に含まれる成分 (特に SO_x) がどの程度コンクリート中への浸透しているか確認するため、硫黄 (S) を対象とした電子線マイクロアナライザ (EPMA) による面分析を行った。また、No. 2 では、煙突内側表面に付着した白色の析出物 (写真-2) を対象として粉末 X 線回折 (XRD) による粉末 X 線回折試験を行った。No. 2 では内側表面から 80mm までと、外側表面から 80mm までの 2 か所を分析試料とし、No. 3 では内側表面から 80mm までを分析対象とした。EPMA の分析条件は、加速電圧 15kV、照射電流 $1.0 \times 10^{-7}A$ 、ピクセルサイズ 200 μm 、ビーム径 150 μm 、測定時間 40msec/pixel である。XRD の分析条件は、管球 Cu、管電圧 40kV、管電流 15mA とした。

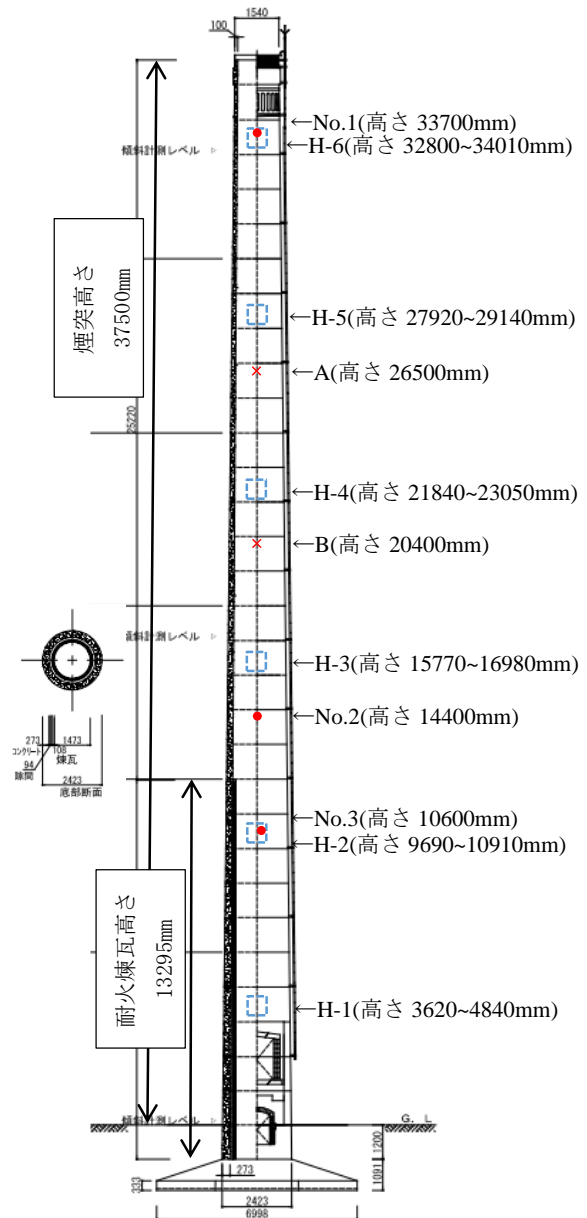


図-1 煙突概形図および各種調査位置



写真-2 No. 2 内側端面

3. 調査結果

3.1 目視および 3D 計測システムによる調査

目視調査の結果および 3D 計測システムによる煙突外側全体のひび割れ計測結果を図-2 に示す。中部では亀甲状のひび割れ (図-2 a) が、下部では横筋に沿った

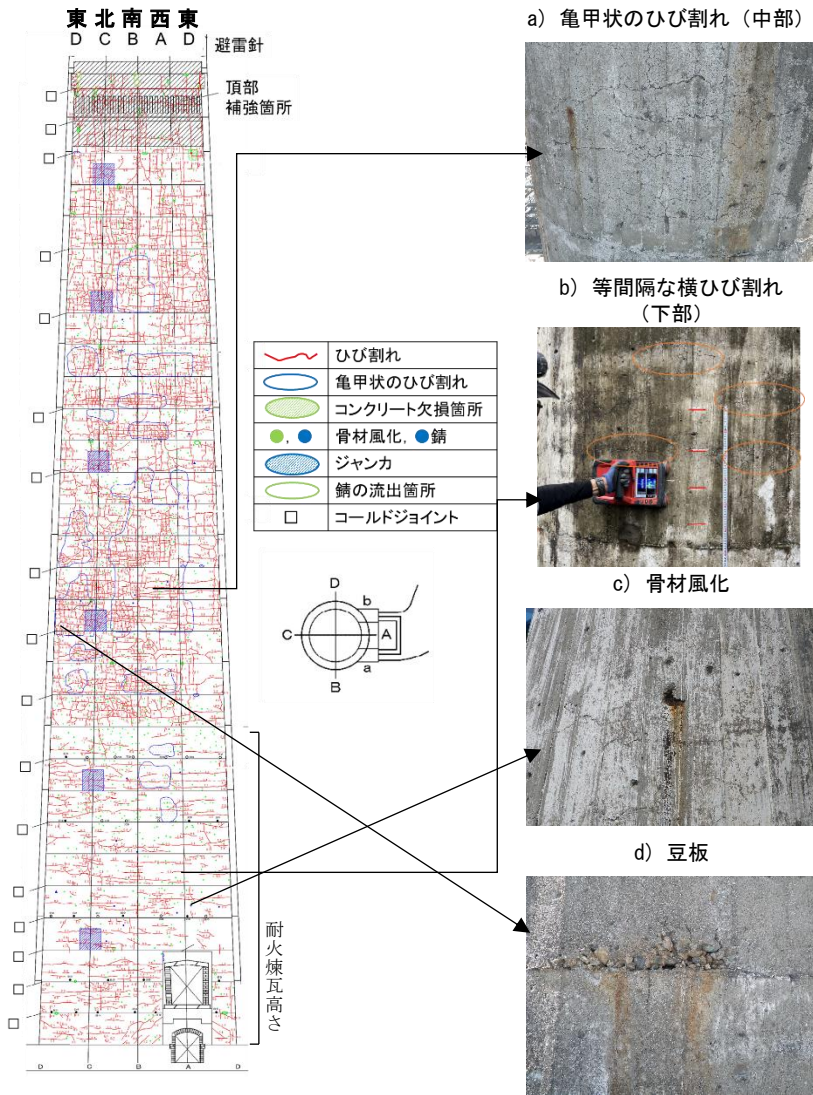


図-2 目視調査および3D計測システム⁵⁾

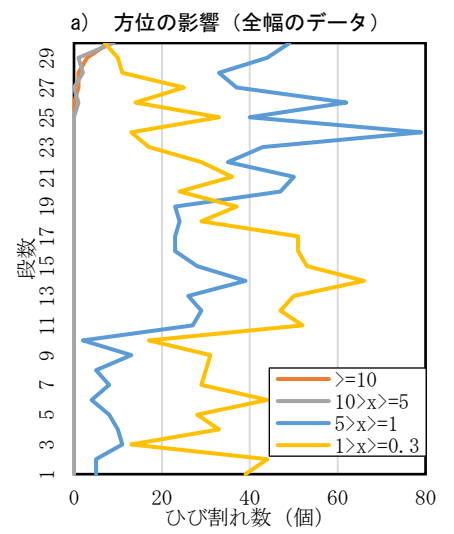
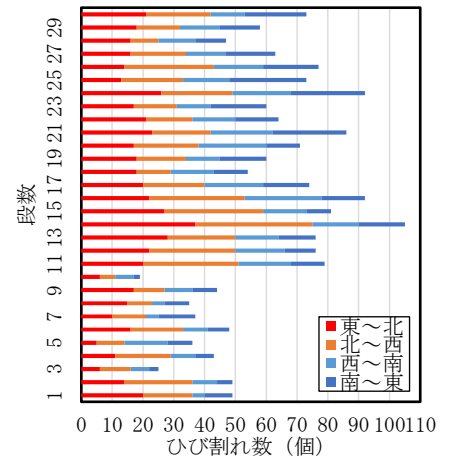


図-3 ひび割れ数と高さ(段数)の関係

等間隔のひび割れ(図-2 b))が、頂部ではひび割れ幅10mmを超える亀裂が多数認められ、コンクリートの断面欠損が生じていた。また、骨材脱落による小さい孔(図-2 c))が全体的にみられ、打ち継ぎ箇所では部分的に豆板(図-2 d))が確認された。

ひび割れ数、ひび割れ幅の測定結果を図-3に示す。同図のa)に方位の影響を、b)にひび割れ幅の影響をそれぞれ示す。図-3 a)より、いずれの高さにおいても南側半面に比べて北側半面の方でひび割れ数が多くなっている。気象庁の観測データ⁷⁾によると、群馬県では1年を通して北風が吹く割合が高いため、北側半面に雨掛かりが多い。雨掛かりが多いことでコンクリート中に水分が浸透し、内部の鉄筋腐食が進行しやすい環境となりひび割れが発生した可能性が推測される。また、内側に耐火煉瓦でライニングされている10段目以下に比べて11段目以上のひび割れ数が約2倍になっており、ライニングの有無により内側表面の燃焼に伴う排煙の吸収量が変化し、ひび割れ発生数に影響したと考えられる。図-3 b)



写真-3 煙突内部劣化状況

より高さといび割れ幅の関係を見ると、頂部では5mm以上のひび割れが多いが、下段に行くにつれて5mm以上のひび割れ数が減少した。これらの結果より煙突外部表面は、煙突頂部の方がひび割れ数および幅ともに大きく、頂部において顕著な劣化が進行していることが確認できた。また、目視観察では、煙突内側における煙突頂部や中部の一部では、コンクリートの剥落による鉄筋の露出や鉄筋の欠損による崩落が認められた(写真-3)。次節において、配筋およびかぶり厚さに関する調査結果を示す。

表-3 鉄筋間隔計測結果

測定位置		鉄筋間隔 (mm)					平均
		主筋	150	185	200	180	
H-1	3.6~4.8m	主筋	150	185	200	180	178.8
		帯筋	135	140	145	140	140.0
H-2	9.7~10.9m	主筋	180	160	160	220	180.0
		帯筋	145	195	195	155	172.5
H-3	15.8~17.0m	主筋	180	170	210	120	170.0
		帯筋	180	240	195	-	205.0
H-4	21.8~23.1m	主筋	110	175	165	-	150.0
		帯筋	200	200	205	185	197.5
H-5	27.9~29.1m	主筋	195	165	210	-	190.0
		帯筋	180	195	-	-	187.5
H-6	32.8~34.0m	主筋	330	255	-	-	292.5
		帯筋	210	205	180	-	198.3

3.2 鉄筋調査

(1) 配筋

表-3 に電磁波レーダーによる配筋間隔の計測結果を示す。計測結果より、主筋においては丸鋼φ19 が使用されており、H-6 を除き配筋間隔は 150~190mm (平均 180mm) であった。H-6 の主筋間隔が大きくなっているのは、目視調査の結果、頂部における鉄筋の崩落による影響であると考えられる (写真-3)。また、帯筋は丸鋼φ9 が使用されており、配筋間隔は 140~205mm となっており、下部付近の帯筋配筋間隔が短くなる傾向が見られる。同一範囲において計測値のばらつきが生じている要因として、施工誤差のほか、煙突の曲面に対して電磁波レーダーを適用したことが考えられる。

(2) かぶり厚さ

表-4 にコア供試体および研り調査から得られたかぶり厚さの測定結果を示す。煙突の高さ毎のコンクリート厚さは、煙突の高さ毎のコンクリート厚さは、3D 計測システムによって測定した煙突外径および建設当時の記録⁵⁾にある煙突頂部および底部の数値の直線近似より推定した。煙突外側表面からのかぶり厚さは、コア供試体と研り調査の実測値であり、内側表面からのかぶり厚さは、推定したコンクリート厚さから外側表面からのかぶり厚さと鉄筋径を引くことで推定した。

これによると、煙突外側表面から帯筋までのかぶり厚さは、高さ方向にかかわらず 90mm 程度、主筋までは 100mm 程度であった。地上からの高さが高くなるほど、コンクリートの厚さが薄くなるほど、煙突内側表面からのかぶり厚さは小さくなり、22 段目 (地上からの高さ 26.5m) では 30mm 程度となる。

(3) 鉄筋腐食状況

研り調査の結果を写真-4 に示す。高さ 26.5m の頂部 A の帯筋には大きな断面欠損が認められ、グレード 4 に分類した。一方、高さ 20.4m の中部 B では、主筋には斑点状に浮き錆が見られたためグレード 2、帯筋はグレード 1 の腐食状況であった。鉄筋の腐食状況からも煙突頂

表-4 かぶり厚さ一覧

段目	高さ (m)	測定箇所	かぶり厚さ (mm)
22	26.5	A	150(推定) 外 帯筋 31 内 93 102
17	20.4	B	176(推定) 外 帯筋 61 内 90 99
12	14.4	No. 2	186(推定) 外 帯筋 64 内 96 106
9	10.6	No. 3	200(実測) 外 帯筋 63 内 108 118

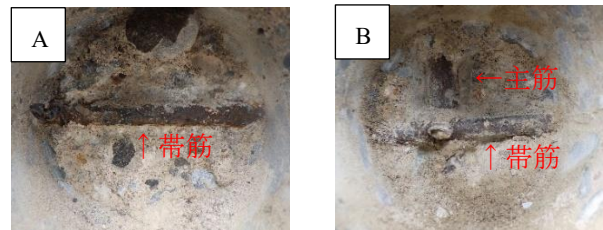


写真-4 研りによる鉄筋腐食状況調査



写真-5 コア試験体 No. 3 中性化測定状況

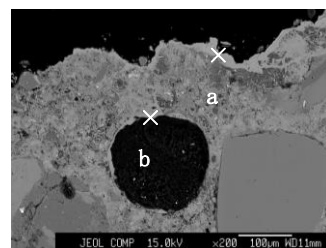


写真-6 EPMA 点分析位置

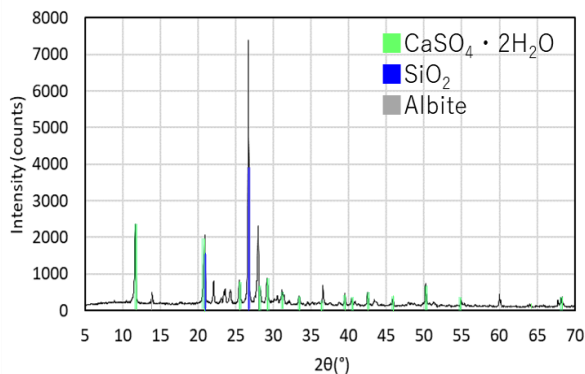


図-4 XRD 試験結果

表-5 EPMA による点分析結果

記号	CaO	Na ₂ O	SO ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cl	SiO ₂
a	48.2	0.01	48.6	0.05	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00	0.03
b	49.9	0.01	47.8	0.17	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00

部に近いほど煙突の劣化が顕著であることが確認できた。

3.3 中性化深さ

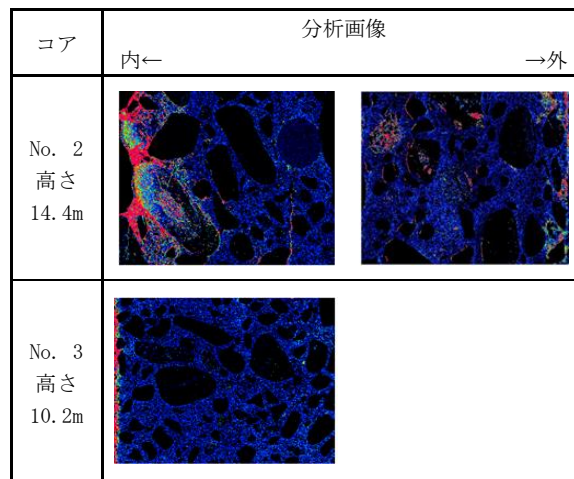
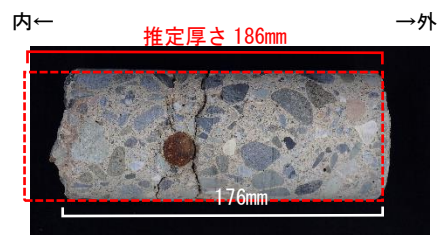
中性化深さの測定結果を写真-5 に示す。コア供試体 No. 3 では煙突外側から約 70.5mm, 煙突内側から約 75.3mm 中性化が進行しており, コア供試体 No. 2 では全断面で中性化していた。コア供試体 No. 3 のかぶり厚さは内側で 63mm, 外側で 108mm でありどちらのコア供試体においても中性化深さが鉄筋位置に到達していた。また, コア供試体 No. 3 は内側に耐火煉瓦があるため, 内側からの二酸化炭素の浸透が抑制され, コア供試体 No. 2 に比較し, 中性化進行が緩やかになったと考えられる。

3.4 成分分析

写真-2 に示すコア供試体 No. 2 の内側端面より, 黒色物質は, 煤による汚れであると考えられるが, 同部において白色物質が析出していた。この白色物質について, XRD により分析すると, 二水石膏 (CaSO₄ · 2H₂O), 石英 (SiO₂), 曹長石が検出された。このうち, 石英と曹長石はコンクリート中の骨材に由来する成分であり, 分析試料中の不純物と考えられる。また, EPMA により内側表面の反射電子像を観察し, 写真-6 に示す a, b の 2 点 (内側表層部分および空隙部) で点分析を行うとカルシウム (Ca) および硫黄 (S) の 2 成分の濃度が高かった (表-5)。なお, 本試料中にはエトリンガイトは認められなかった。

また, 建設当時の記録による推定コンクリート厚さは表-4 に示すように 186mm であるが, 実際に貫通抜き取りを行ったコア供試体の長さは 176mm であり, 10mm 程度剥落している可能性が考えられる。

写真-7 に EPMA による面分析結果を, 図-5 にコンクリート内側表面から外側方向における SO₃ 濃度を示す。



0 SO₃含有量(%) 10

写真-7 EPMA による面分析結果

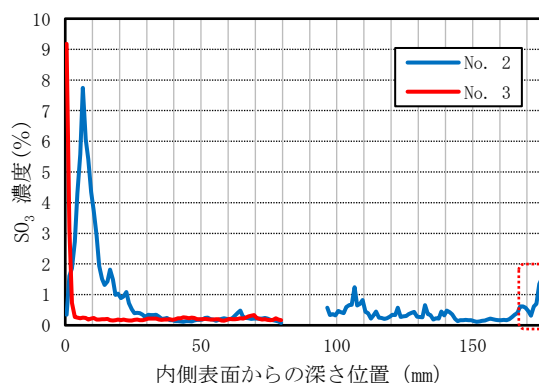


図-5 内側コンクリート表面からの SO₃ 濃度

コア供試体 No. 2 は, 内側表面から内部へ硫黄の浸透が認められた。外側表面においても表層部分から硫黄の浸透が認められたが, 内側と比較して低い濃度であった。これは煙突稼働 (煙排出) 時の降雨による表面からの浸透によるものと推察される。煙突内部においては表-2 に示すような硫黄成分を含む排煙が直接付着するため, 稼働時に表層に高濃度の硫黄成分が付着し, 非稼働時の雨天時に雨水が内部に侵入して, コンクリート内部に SO₃ が浸透し高濃度の SO₃ が検出されたと考えられる。一方, 耐火煉瓦でライニングされている位置のコア供試体 No. 3 では, 内側の表層部分のみ SO₃ の濃度が高く, 耐火煉瓦による SO₃ 浸透抑制効果も確認された。

3.5 劣化機構の考察

以上の調査結果より、煙突頂部に近くなるほど損傷が顕著で、耐火煉瓦によってライニングされている煙突下部では比較的劣化が穏やかであった。

成分分析結果より、検出された二水石膏の生成反応を式(1)に示す。



式(1)を本煙突の環境条件と照らし合わせると、硫酸は排煙に含まれる硫黄成分 SO_3 と水 H_2O の反応により生成され、 H_2O は雨水によるものであると推測できる。それらを成分として、コンクリート表層及び内部において二水石膏が生成されたものと考えられる。硫酸および硫酸塩の作用によるコンクリートの化学的侵食（ひび割れ、脆弱化、スケーリングなど）は、いずれも硫酸塩鉱物である二水石膏の形成による化学的变化に起因することが既往の研究⁸⁾で示されている。富岡製糸場の煙突では、二水石膏の生成が確認されているため、二水石膏の生成に伴う結晶成長圧による劣化現象が起きていると考えられる。実際に、外側表層の一部ではスケーリングが生じている場所が確認されている（写真－8）。

以上のように、硫酸塩の生成や二水石膏の生成には水の影響が大きく、雨水に曝される煙突頂部がより損傷が激しくなったものと考えられるが、今回の調査結果のみでは劣化メカニズムを解明するためのデータが少ないため、詳細なメカニズムの解明については今後の課題としたい。

4. まとめと今後の展望

本報告では、1939年に建設された富岡製糸場の鉄筋コンクリート造煙突の保存修理方法の確立に向けたデータを得るために、煙突の劣化調査を実施した。その結果、ボイラー稼働時の排煙に含まれる硫黄成分による硫酸および硫酸塩が原因である劣化現象が生じている可能性が示唆された。

現在も煙突の内外表層には雨水の影響などを受け、硫黄成分が浸透していることから、今後、これ以上硫酸および硫酸塩による劣化を進行させないためにコンクリートへの水の供給を阻む必要がある。現在煙突頂部に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（写真－9）。これはひいては煙突内部への降雨による水分浸透防止の役割も果たしており有効な対策と考えられる。また表面のスケーリングについても今後表面含浸材による水分浸透対策が有効であると考えられ、この点についても検討を進めてゆきたい。



写真－8 表層スケーリングの様子



写真－9 煙突頂部の炭素繊維シートカバー

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煙突保存整備調査の活動の一環として行われたものである。

また、調査の実施にあたり富岡市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る。

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) 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
- 3) ENEOS 石油便覧参照:
<https://www.eneos.co.jp/binran/part02/chapter01/section06.html> (閲覧日:2023年12月19日)
- 4) 一般社団法人日本機械学会 機械工学辞典参照:
<https://www.jsme.or.jp/jsme-medwiki/doku.php?id=10:1003746> (閲覧日:2023年12月19日)
- 5) 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
- 6) 土木学会:コンクリート標準示方書[維持管理編]、2018
- 7) 国土交通省気象庁過去の気象データ参照:
https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php?prec_no=42&block_no=47624&year=&month=&day=&view= (閲覧日:2023年12月19日)
- 8) 吉田夏樹、中山健一: H_2SO_4 および Na_2SO_4 の作用によるコンクリートの化学的侵食、土木学会論文集 E2, Vol.71, No.2, pp.97-106, 2015