

奈良県葛城市における
大気汚染による文化財影響調査報告書
2021 年度



(當麻寺東塔・西塔)

2022 年 3 月

奈良大学文学部文化財学科保存科学研究室

奈良県葛城市における 大気汚染による文化財影響調査報告書 2021年度

1 調査の経緯

2004年に當麻町と新庄町が合併して葛城市が発足した。葛城市では廃棄物の焼却を両町合併後も當麻クリーンセンターと新庄クリーンセンターで行ってきたが、2施設を統合して処理を行う新クリーンセンター建設を當麻クリーンセンター所在地に計画した。新クリーンセンター予定地の北側には麻呂子山の尾根を一つ隔てて當麻寺があり、東塔、西塔、鐘楼などの国宝、中之坊庭園の名勝など国指定の文化財が所在する。

クリーンセンターの廃棄物焼却に伴い発生する酸性大気汚染物質がこれら文化財に影響を与えることが懸念されるところであった。

奈良大学文学部文化財学科保存科学研究室(代表 西山要一)は葛城市の依頼を受けて、當麻クリーンセンターの稼働中(2011年4月～9月)、同センターの稼働停止・廃炉・新クリーンセンター建設中(2011年9月～2017年3月)、および新クリーンセンター(以下クリーンセンターと記す)の稼働開始後(2017年4月以降)の期間の大気汚染の文化財への影響、とりわけ、麻呂子山の尾根を隔てて北側に所在する當麻寺の国宝建造物など文化財への影響について調査を行うことになった。

本書は、調査11年目(2021年度)のクリーンセンター稼働開始後の大気汚染測定の結果を報告するものである。

2 大気汚染測定地点

大気汚染の測定地点は、當麻寺西塔(西塔南側・位置図の①)、當麻寺竹之坊(②)、クリーンセンター(2017年3月までは當麻クリーンセンターの敷地西側、2017年4月からはクリーンセンターの敷地東側③)、葛城市當麻庁舎(庁舎北側④)、博西神社(本殿北西側⑤)の5か所に設定した(図1 葛城市大気環境測定位置図、図2 葛城市大気環境測定シェルター設置状況)。

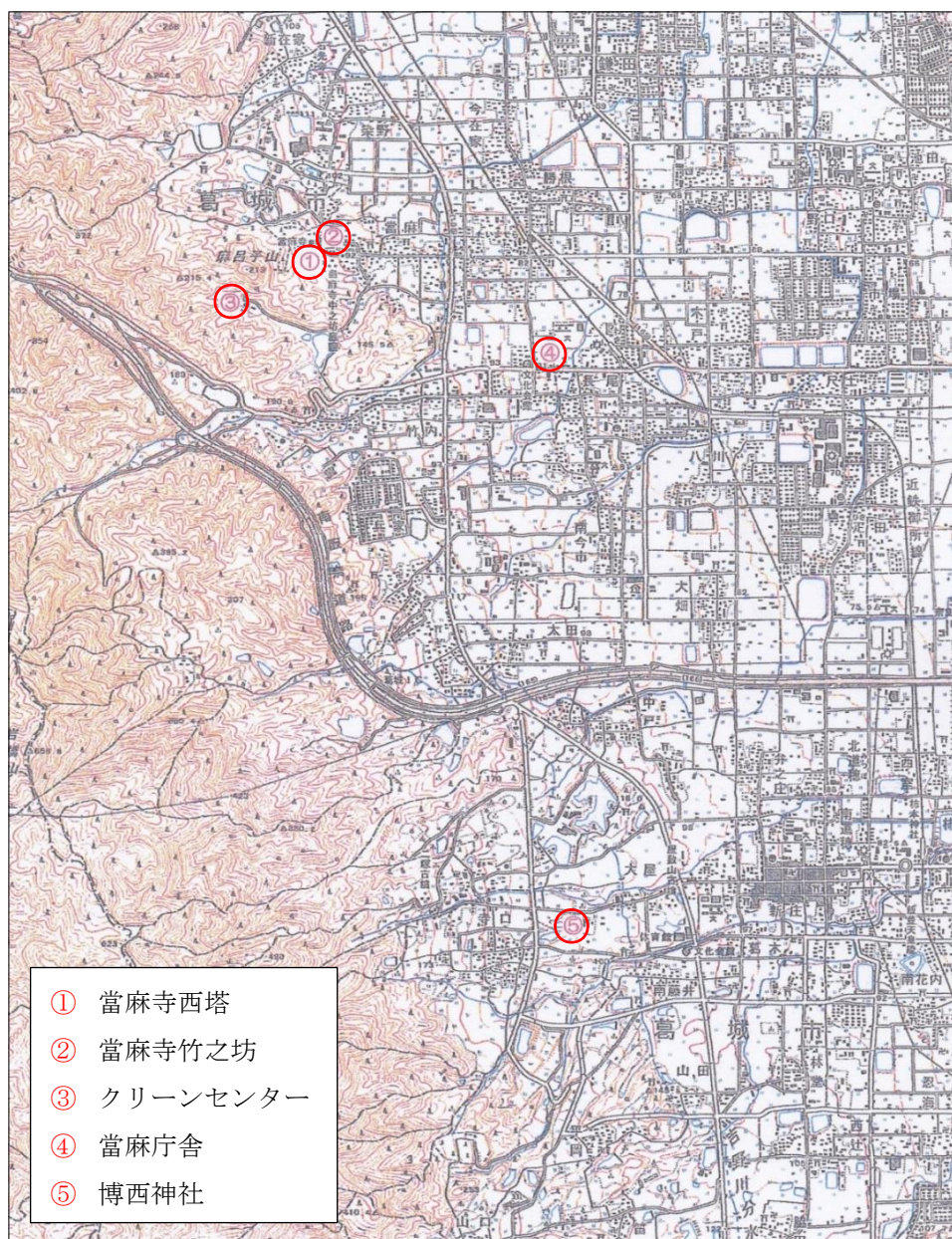
當麻クリーンセンター稼働中は同センターを大気汚染の発生源とみなし、また操業停止後は、バックグラウンドのデータを取得するために同センターを始め、當麻寺西塔、當麻寺竹之坊、當麻庁舎、博西神社で継続測定することとし、2017年4月のクリーンセンター稼働開始後も引き続き測定を継続した。本報告は

稼働5年目のデータであり、2011年3月以前、2011年4月～2017年3月との比較データとして、環境変化の有無を把握する上で極めて重要なデータとなる。

3 大気汚染測定方法

文化財所在地など多地点で継続的に大気汚染測定を行うためにトリエタノールアミン円筒濾紙法 (TEA-CF) を採用し測定点にシェルターを設置した。そして、とりわけ文化財に大きくかつ急激な損傷をもたらす酸性物質である二酸化硫黄 (SO_2)・二酸化窒素 (NO_2)・塩化物イオン (Cl^-) の3種類の濃度を測定した。

(図1) 葛城市大気環境測定位置図



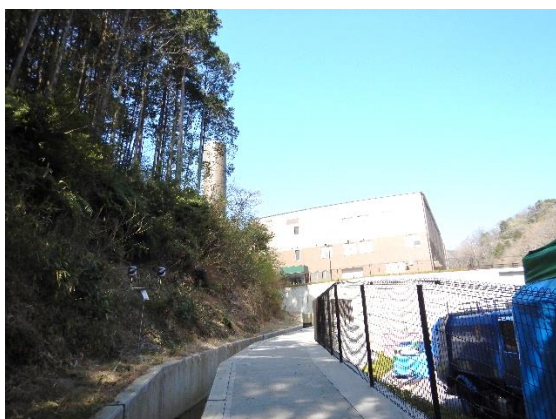
(図2) 葛城市大気汚染測定シェルター設置状況
 (2011年3月設置 2021年度現在も同地点で測定を継続している)



① 當麻寺西塔 (左の建物が西塔)



② 當麻寺竹之坊



③ クリーンセンター

(2011年4月~2017年3月には當麻クリーンセンター敷地西側で、2017年4月以降はクリーンセンター敷地東側(写真)で観測している。)



④ 當麻庁舎



⑤ 博西神社

大気汚染のサンプリングと分析は下記の通り（１）～（４）の工程で行った。

- （１）表面積 100cm² の円筒形の濾紙にトリエタノールアミンを含浸し、測定地点に設置したステンレス製シェルター（高さ 180cm）に装置し、およそ 1 か月間大気曝露したのち回収する（トリエタノールアミン円筒濾紙法・TEA-CF 法）。
- （２）回収した円筒濾紙から大気汚染物質を抽出し、分析試料とする。
- （３）試料をイオンクロマトグラフィーで分析し、汚染物質の濃度を計測する。
- （４）計測値を温度補正し 1 日当たりの濃度を算出する。二酸化硫黄(SO₂)の濃度は ppb/day、二酸化窒素(NO₂)の濃度は ppb/day、塩化物イオン(Cl⁻)の濃度は μg/100cm²/day で表示する。

4 大気汚染調査の結果

測定の結果を図 3-1～3-3 に、2021 年度大気汚染月変化グラフとして二酸化硫黄、二酸化窒素、塩化物イオンの大気汚染物質ごとに示した。また、あわせ参照として 2020 年度、2019 年度の月変化グラフを添付した。

また表 1 に 2021 年度大気汚染日平均値を示すとともに、図 4 には大気汚染の種類ごとに 2011 年度～2021 年度の経年変化グラフもあわせ掲載した。

當麻クリーンセンターは 2011 年 9 月に稼働を停止し、2017 年 4 月からはクリーンセンターが稼働を開始している。

各測定点の大気汚染濃度の平均値を比較すると、それぞれの地点の周辺環境の特徴が反影されていることがわかる（表 1）。

二酸化硫黄（SO₂）は主として石油などの化石燃料の燃焼で発生する。二酸化硫黄濃度は、當麻庁舎が 2.915ppb/day とやや高いのは市街地にあることに起因し、博西神社が 2.875ppb/day と低いのは樹木林に囲まれた清浄な環境であることを反映している。當麻寺西塔が 2.883ppb/day、當麻寺竹之坊が 2.890ppb/day と比較的低いのも當麻寺境内の木々と建物に囲まれているためである。クリーンセンターが 2.870ppb/day と低い値であることは焼却場における硫黄酸化物除去装置の効果であろう。いずれの測定地点も 2.870～2.915ppb/day と 2020 年度よりわずかに低く、奈良公園の文化財所在地（表 2）の春日大社（原生林内）と比較しても同等の低い値である。

二酸化窒素（NO₂）は主として自動車の排気ガスに含まれ、測定地点によって明らかな差がみられる。當麻庁舎は 5.972ppb/day とやや高いのは市街地で自動車通行量の多い道路と駐車場に面しているためである。博西神社は 5.250ppb/day と低く森林に囲まれた清浄環境にあることを示している。當麻寺西塔が 5.375ppb/day、當麻寺竹之坊が 5.253ppb/day で山林と広い境内に囲まれ自動車通行もわずかで、博西神社と同等に低い。クリーンセンターは

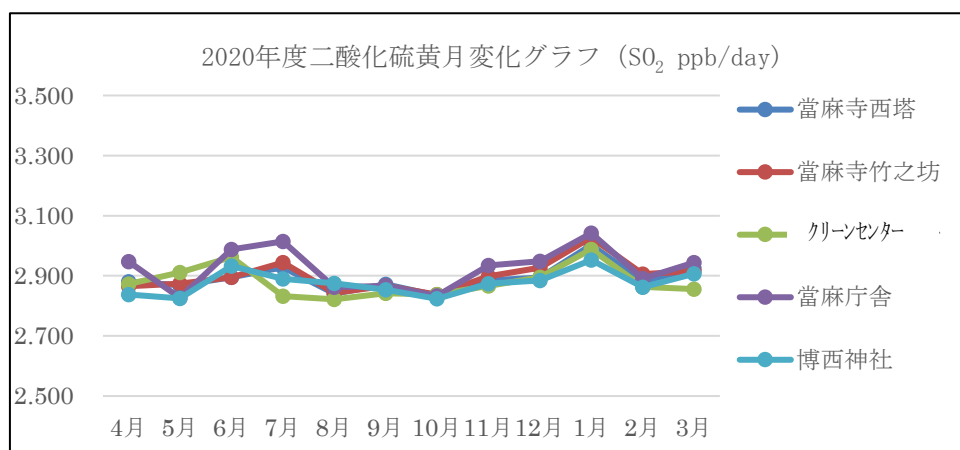
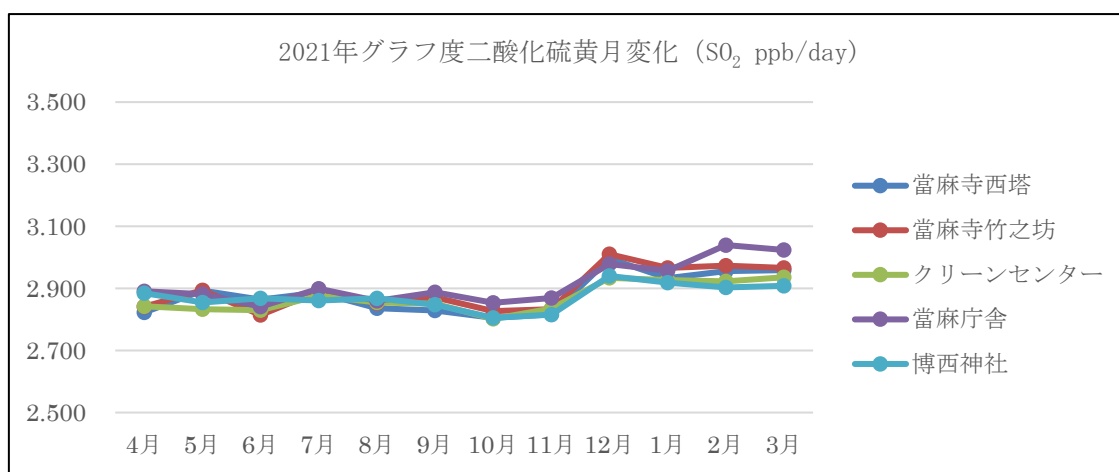
5.444ppb/day と比較的低いのは焼却装置の窒素酸化物除去装置の効果であろう。いずれの測定点も 5.250~5.972ppb/day で、博西神社を除くと 2020 年度よりわずかに低く、奈良北部所在文化財(表 3)の測定値に比較しても低い値である。

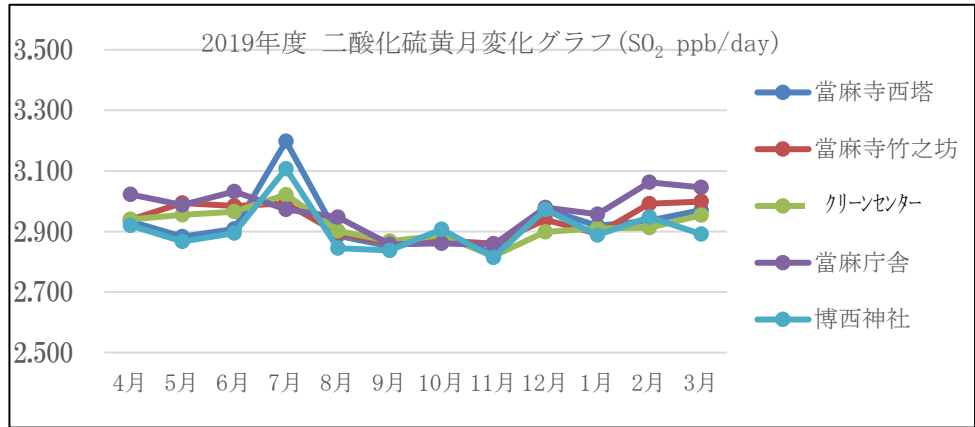
塩化物イオンは主としてプラスチックごみ焼却により発生する。市街地の當麻庁舎で $2.842 \mu\text{g}/100\text{cm}^2/\text{day}$ とやや高い。博西神社が $1.442 \mu\text{g}/100\text{cm}^2/\text{day}$ で木々に囲まれた清浄な地であることを示している。當麻寺西塔が $1.762 \mu\text{g}/100\text{cm}^2/\text{day}$ 、當麻寺竹之坊はやや高い $2.081 \mu\text{g}/100\text{cm}^2/\text{day}$ である。クリーンセンターは $1.731 \mu\text{g}/100\text{cm}^2/\text{day}$ で當麻寺に近い値である。當麻寺竹之坊を除いていずれの測定点も 2020 年度に比較すると $0.39\sim 0.62 \mu\text{g}/100\text{cm}^2/\text{day}$ 低い値を示している。塩化物イオンの濃度は観測点および月による変化が激しい特性がある。

2021 年度の硫黄酸化物、窒素酸化物、塩化物イオンともにその測定値は 2020 年度にくらべてやや下がっているか、ほぼ横ばいの状況である。

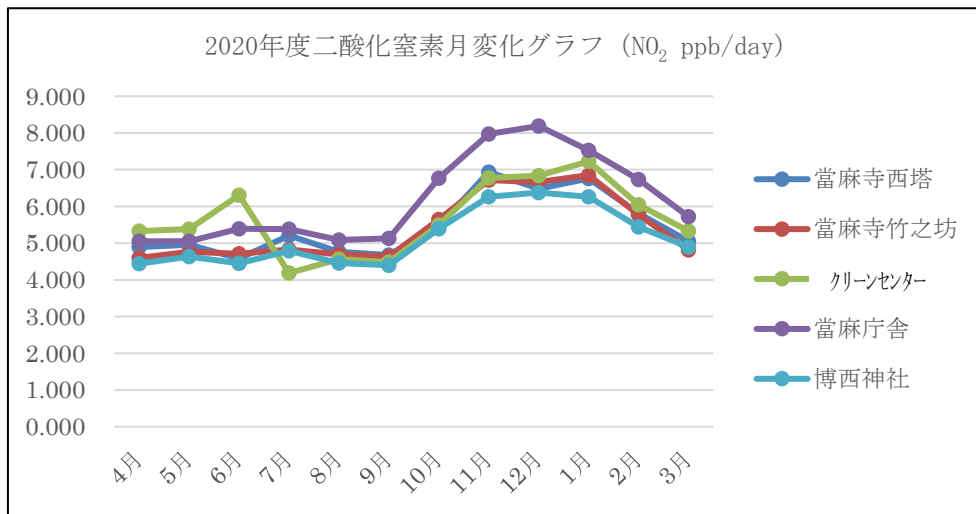
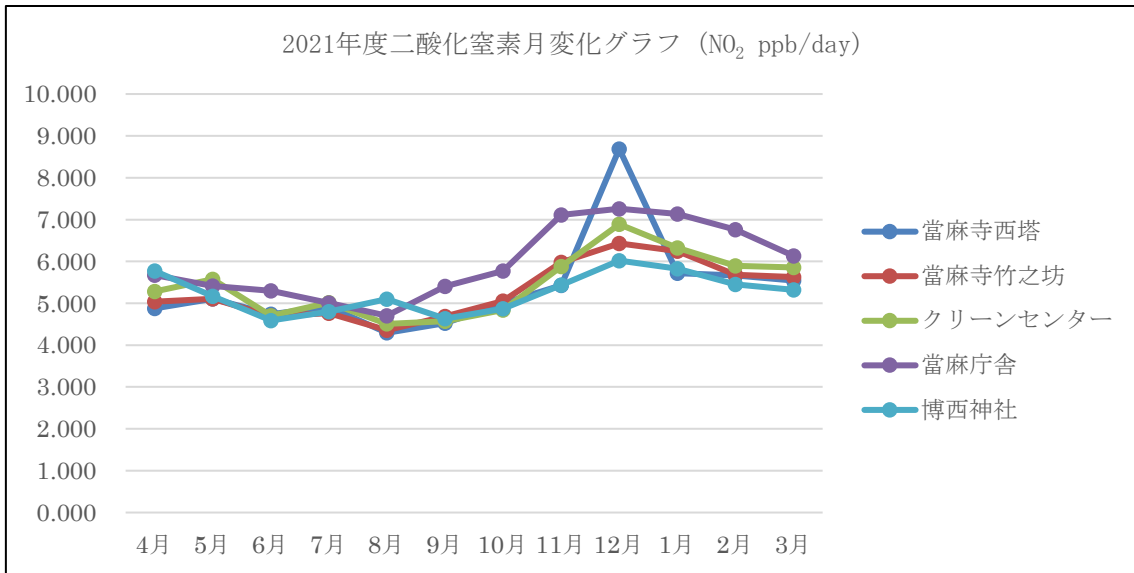
(図 3-1) 2021 年度 二酸化硫黄月変化グラフ

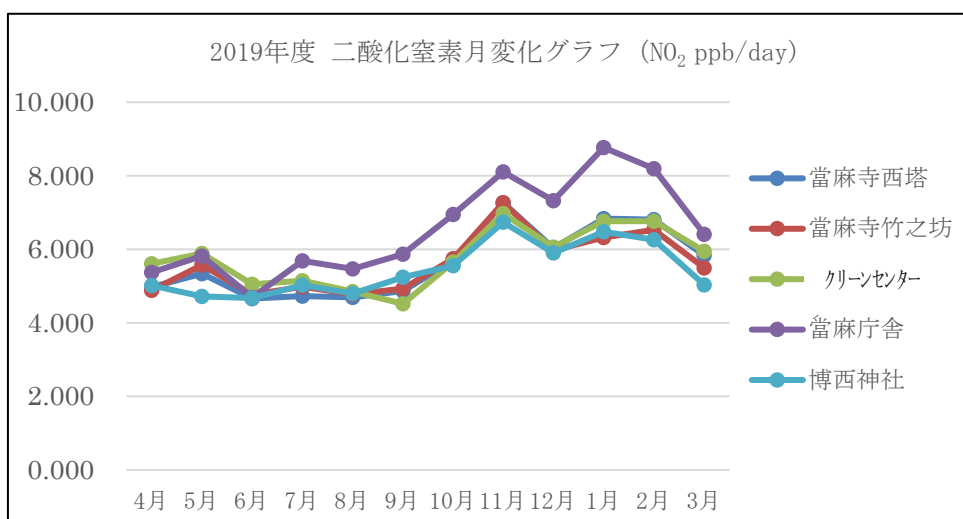
(2020 年度・2019 年度データを添付)



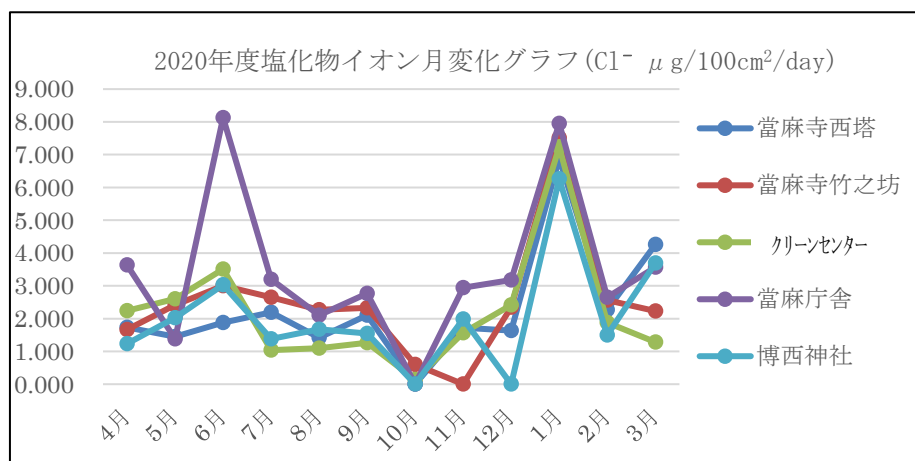
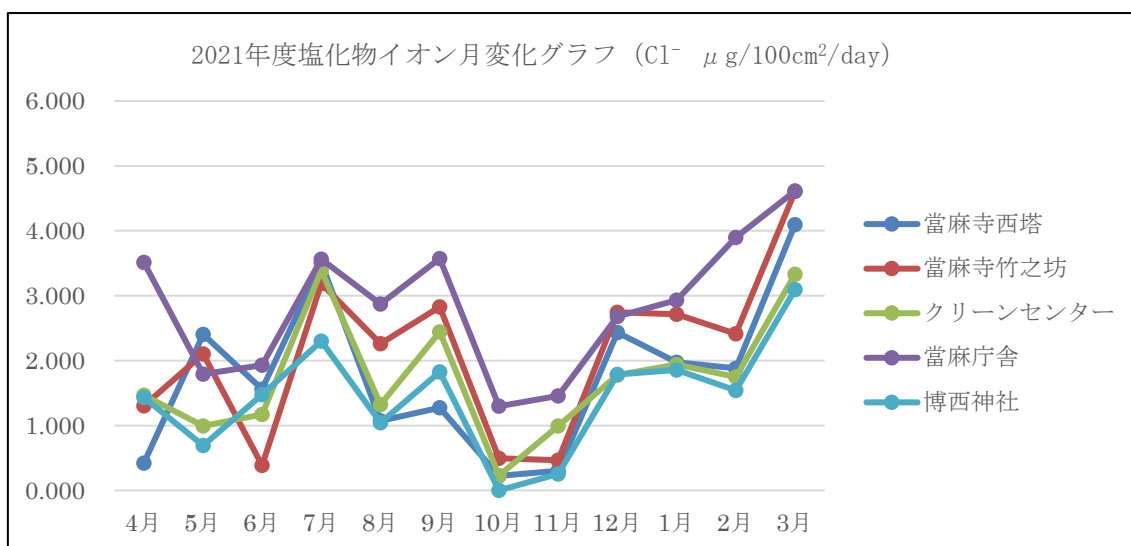


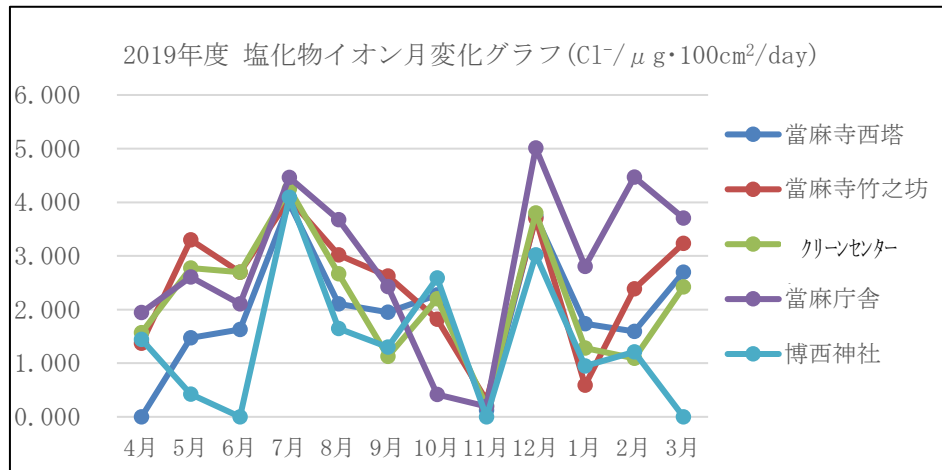
(図 3-2) 2021年度 二酸化窒素月変化グラフ
(2020年度・2019年度データを添付)





(図 3-3) 2021年度 塩化物イオン月変化グラフ
(2020年度・2019年度データを添付)



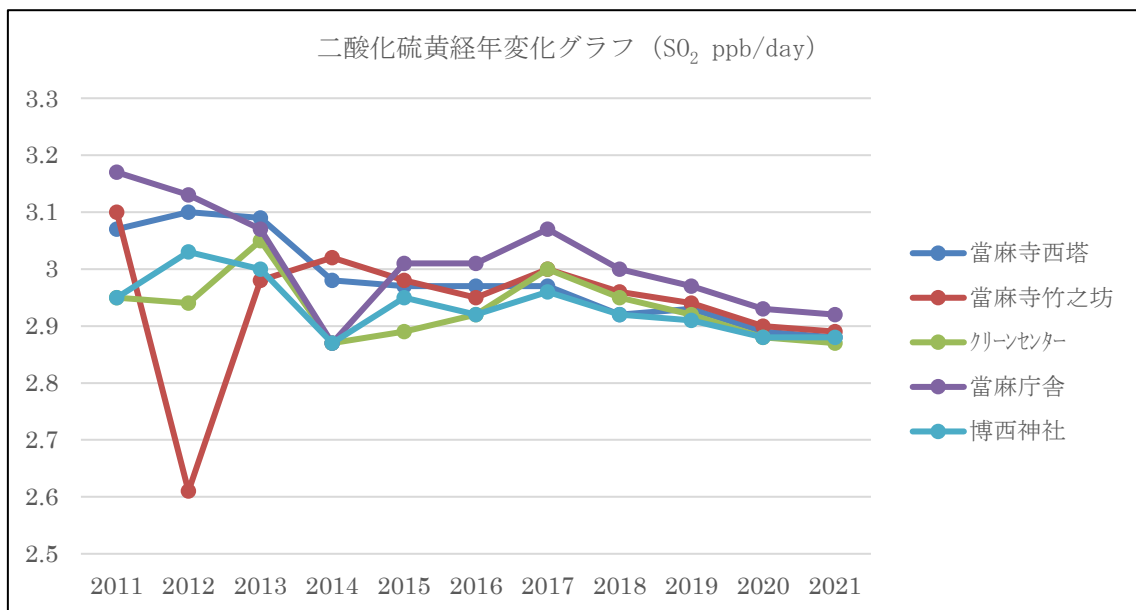


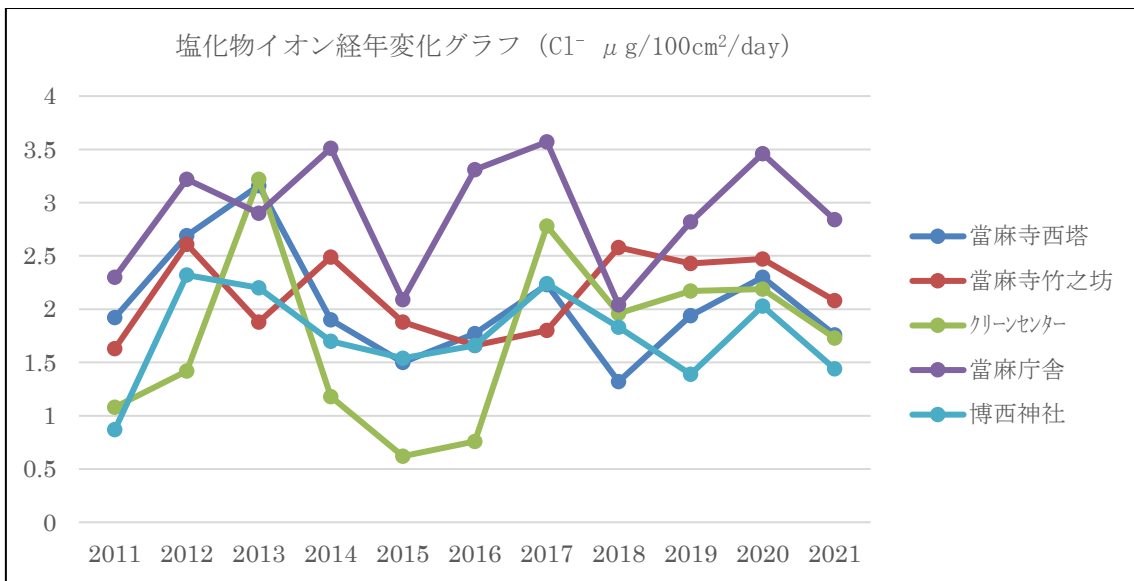
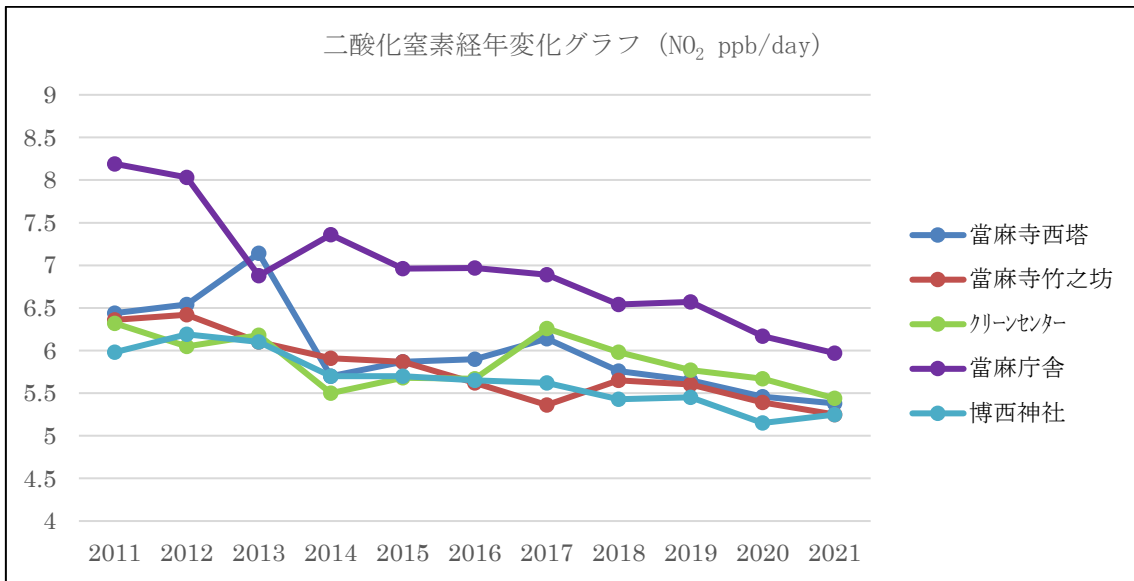
(表 1) 2021 年度 大気汚染日平均値

(2011~2021 年度経年変化グラフを添付)

測定地点	二酸化硫黄 (SO ₂) ppb/day	二酸化窒素 (NO ₂) ppb/day	塩化物イオン (Cl ⁻) μg/100cm ² /day
① 当麻寺西塔	2.883	5.375	1.762
② 当麻寺竹之坊	2.890	5.253	2.081
③ クリーンセンター	2.870	5.444	1.731
④ 当麻庁舎	2.915	5.972	2.842
⑤ 博西神社	2.875	5.250	1.442

(図 4) 大気汚染の 2011~2021 年度の経年変化





各測定点の社会的・自然的環境から見るならば、いずれの大気汚染データにおいても、当麻庁舎のような市街地では汚染濃度は高く、博西神社のように森林に囲まれた地点は汚染濃度が低い。当麻クリーンセンターは2011年9月に操業を停止し、また、2017年4月に新クリーンセンターの稼働後一時高くなったが、その後は博西神社と同程度に大気汚染濃度は低くなっている。

また、各測定点の大気汚染濃度の月変化は季節による変化が顕著で、二酸化硫黄と二酸化窒素は冬期に濃度が高くなり、塩化物イオンは夏期と冬期に濃度が高くなる。二酸化硫黄と二酸化窒素が冬期に高くなる傾向は一般的現象として全国で見られる季節変動であるが、塩化物イオンの季節変化は、プラスチックゴミの廃棄の多寡が一要因と思われるが、なぜ、夏期と冬期にプラスチックゴミが

多くなるのかは詳かではない。

當麻クリーンセンター稼働中の 2011 年度と稼働停止後の 2012～2016 年度、そしてクリーンセンターの稼働後の 2017～2021 年度の各大気汚染別の測定値を表 2-1、2-2、2-3 に示した。二酸化硫黄・二酸化窒素・塩化物イオンの各濃度は、稼働中のクリーンセンターが他の観測点に比べて必ずしも高いものではない。

しかし、これらを見ると 2017 年 4 月の稼働後はそれぞれの地点でやや濃度の上昇が見られたが、その後は平衡または減少傾向にあり、2021 年度には二酸化硫黄、二酸化窒素ともに濃度は低くなり、塩化物イオンは 2017 年度と 2020 年度に濃度が高くなっている。

(表 2-1) 二酸化硫黄(SO₂)の年度比較 (年度平均値 ppb/day, 小数点以下 3 位捨五入)

測定地点/年度	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
① 當麻寺西塔	3.07	3.10	3.09	2.98	2.97	2.97	2.97	2.92	2.93	2.89	2.88
② 當麻寺竹之坊	3.10	2.61	2.98	3.02	2.98	2.95	3.00	2.96	2.94	2.90	2.89
③ クリーンセンター	2.95	2.94	3.05	2.87	2.89	2.92	3.00	2.95	2.92	2.88	2.87
④ 當麻庁舎	3.17	3.13	3.07	3.12	3.01	3.01	3.07	3.00	2.97	2.93	2.92
⑤ 博西神社	2.95	3.03	3.00	2.94	2.95	2.92	2.96	2.92	2.91	2.88	2.88

(表 2-2) 二酸化窒素(NO₂)の年度比較 (年度平均値 ppb/day, 小数点以下 3 位捨五入)

測定地点/年度	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
① 當麻寺西塔	6.44	6.54	7.14	5.70	5.87	5.90	6.14	5.76	5.65	5.46	5.38
② 當麻寺竹之坊	6.36	6.42	6.10	5.91	5.87	5.62	5.36	5.65	5.60	5.39	5.25
③ クリーンセンター	6.32	6.05	6.18	5.50	5.68	5.67	6.26	5.98	5.77	5.67	5.44
④ 當麻庁舎	8.19	8.03	6.88	7.36	6.96	6.97	6.89	6.54	6.57	6.17	5.97
⑤ 博西神社	5.98	6.19	6.10	5.70	5.70	5.65	5.62	5.43	5.45	5.15	5.25

(表 2-3) 塩化物イオン(Cl⁻)年度比較 (年度平均値 μg/100cm²/day, 小数点以下 3 位四捨五入)

測定地点/年度	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
① 當麻寺西塔	1.92	2.69	3.16	1.90	1.50	1.77	2.23	1.32	1.94	2.30	1.76
② 當麻寺竹之坊	1.63	2.61	1.88	2.49	1.88	1.66	2.80	2.58	2.43	2.47	2.08
③ クリーンセンター	1.08	1.42	3.22	1.18	0.62	0.76	2.78	1.96	2.17	2.19	1.73
④ 當麻庁舎	2.30	3.22	2.90	3.51	2.09	3.31	3.57	2.04	2.82	3.46	2.84
⑤ 博西神社	0.87	2.34	2.20	1.70	1.54	1.66	2.24	1.83	1.39	2.03	1.44

5 クリーンセンターの焼却排気と當麻寺の文化財の環境

2011年9月までの當麻クリーンセンターにおける二酸化硫黄、二酸化窒素、塩化物イオンのいずれの測定値も、その後、稼働を停止し新クリーンセンター建設中であった2012～2016年度の測定値は、清浄地の博西神社や當麻寺と同等であった。周囲を山林に囲まれて樹木の大気汚染浄化作用もあいまって良好な環境であったといえよう。

そして、2017年4月からのクリーンセンターの稼働後は、2017年度をピークに二酸化硫黄、二酸化窒素はともに下降傾向にあり、一方、塩化物イオンは2017年度をピークに2018年は減少するが、その後2020年は再び増加傾向に転じている。

2021年度になってからも二酸化硫黄、二酸化窒素はわずかに減少し、塩化物イオンも減少していることが分かる。その要因について、2020年春からの新型コロナウイルス（Covid19）の感染拡大による社会生活・経済活動の自粛が一因と思われる。感染拡大は自動車通行の減少、工場などの稼働縮小をもたらし、これが二酸化硫黄と二酸化窒素の減少となって現れたものと思われる。また、ステイホームの要請によって食料品のプラスチック容器の利用・廃棄が急増したことが塩化物イオンの2020年の増加となって現れたものと推測できる。

葛城市の大気汚染値は、世界遺産「古都奈良の文化財」に登録されている社寺等の測定値(表3 奈良市所在文化財等における大気測定結果2010年度平均値)と比較すると、二酸化硫黄の濃度は、奈良の諸社寺の濃度にほぼ等しく、二酸化窒素は奈良の諸社寺の濃度をおおむね下回り、さらに塩化物イオンは、奈良の諸社寺の値にほぼ等しい。

このように奈良の諸社寺の値におおむね等しいか、やや低いことから、葛城市の文化財の劣化が急速に進行することはないと思われる。

しかしながら、當麻寺西塔の基壇化粧石の2019年の修理以前の損傷や塔頂部の金銅製相輪のうす緑色の錆は酸性雨や酸性大気などの長期にわたる大気汚染の影響によるものであり、緩やかではあるが劣化が進んでいるものとみられる。これは近隣から飛来する越境汚染などの広範囲かつ長期の環境悪化の影響と考えるのが合理的であろう(図5)。

葛城市の大気汚染濃度は、奈良の諸社寺と同程度であるものの、當麻クリーンセンター稼働停止の2016年度と比較するとクリーンセンター稼働後の2017年度には汚染濃度はやや上昇し、2018年度以降はおおむね大きな変化は見られないものの、大気汚染の現況把握やクリーンセンター焼却炉の汚染除去装置のメンテナンス等の管理の徹底が望まれる。今後も継続して観測を行なう必要がある。

(表3) 奈良所在文化財等における大気測定結果 2010 年度平均値

(2010 年 1 月～12 月 トリエタノールアミン円筒濾紙法)

観測地点	二酸化硫黄(SO ₂) ppb/day	二酸化窒素(NO ₂) ppb/day	塩化物イオン(Cl ⁻) μg/100cm ² /day
東大寺	3.00	7.94	2.67
興福寺	2.91	9.32	1.57
春日大社	2.90	6.83	1.67
元興寺	3.01	8.92	1.74
平城宮跡	3.17	10.00	4.21
唐招提寺	2.91	8.08	3.05
薬師寺	3.18	9.74	5.01
円成寺	2.90	5.48	1.27

6 あとがき

本調査は 2021 年度の 1 年間の環境測定の結果である。今後も、クリーンセンター稼働下で調査を継続することにより、葛城市の大気環境、なかんずく、當麻寺等の文化財保存環境を把握し、維持できるものとする。そして、奈良県下の文化財は、隣接する大阪など、さらにはより広い東アジア、そして地球全体を覆う大気汚染の影響を受けざるを得ないのが現状でもある。その事実は、葛城市でも當麻寺の西塔の先端を飾る金銅製相輪の錆や基壇の化粧石の急激な劣化・損傷に見ることができる。その他、奈良では東大寺金堂正面の金銅八角灯籠や興福寺南円堂の屋根頂部の金銅擬宝珠、室生・大野寺磨崖仏、海外では韓国や中国の石仏、イタリアやギリシャの石造建造物の損傷などを目の当たりにすると、今や地球上のすべての文化財が大気汚染によって日々損傷が進んでいることを認めざるを得ない。文化財保存のための継続的な環境改善と適正な文化財環境の国際的基準の策定が急がれる。

(図5) 参照一長期にわたり大気汚染が當麻寺西塔におよぼした影響

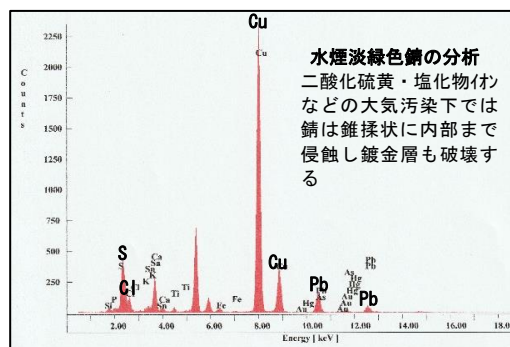
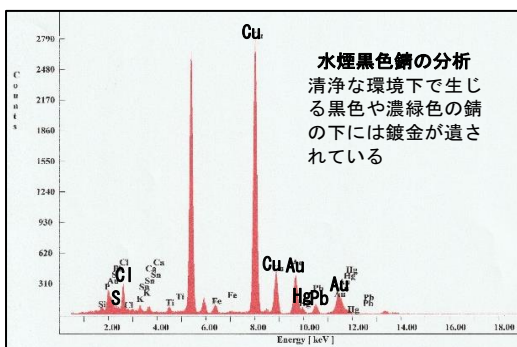
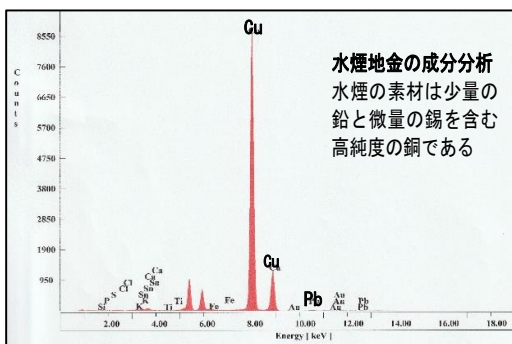


當麻寺西塔の基壇化粧石（二上山凝灰岩）の風化
(地下水の上昇・揮発と大気汚染が石材の風化を促進する)



當麻寺 西塔 相輪

相輪は黒色・濃緑色・淡緑色の錆に覆われている。水煙の創建当初部分の地金・黒色錆・淡緑色部分を化学分析した結果、大気汚染物質（硫黄(S)・塩素(Cl)）が検出された淡緑色錆部分では金鍍金が剥落し残されていないことがわかる。今後も劣化・損傷の進行が懸念される。



検出元素	珪素	リン	硫黄	塩素	カリウム	銅	カルシウム	チタン	鉄	銅	金	水銀	ヒ素	鉛
	Si	P	S	Cl	K	Sn	Ca	Ti	Fe	Cu	Au	Hg	As	Pb
地金	0.85	0.26	0.35	0.20	0.18	1.17	0.24	0.01	0.23	92.42	0.05	0.20	1.03	3.00
黒色錆	4.00	6.00	1.60	6.20	0.50	0.26	0.33	0.19	0.91	47.58	24.94	3.08	0.75	4.15
淡緑色錆	2.36	7.31	11.55	3.16	0.16	2.45	0.77	0.10	0.63	69.47	0.11	0.09	1.39	4.49

(分析データは西山要一「蛍光 X 線分析による成分分析調査」、奈良県『国宝 當麻寺西塔 修理工事報告書』、2020 年による)

本調査は、奈良大学名誉教授・西山要一がトリエタノールアミン円筒濾紙の設置・回収と本報告の執筆を行い、奈良大学文学部文化財学科卒業生・井上富美子が円筒濾紙の作製、分析およびデータの解析を担当した。

