

# 令和6年度酸性雨調査結果

【大気・地球環境室】

山本 彩夏、田中 卓実<sup>1)</sup>

## 1 はじめに

化石燃料の燃焼等により大気中に放出された窒素酸化物( $\text{NO}_x$ )や硫黄酸化物( $\text{SO}_2$ )を起源とするこれらの酸性物質が雲や雨に取り込まれ、「酸性雨」が生成する。酸性雨は、地表へ降り注ぎ、水系や土壌等を酸性化させ生態系を破壊するなど環境への影響が懸念されている。

そこで、本県での酸性雨の状況を把握するため、昭和62年度(1987年度)から降水のモニタリング調査(湿性沈着調査)を実施し、乾性沈着調査についても平成15年度(2003年度)から実施(2020年度から2023年度は新型コロナウイルス感染症感染拡大のため未実施。)している。本報では令和6年度の調査結果を報告する。

## 2 調査方法

本調査は、全国環境研協議会・酸性雨広域大気汚染調査研究部会酸性雨全国調査実施要領<sup>(1)</sup>に従って実施した。

### 2.1 調査地点

試料は、東伯郡湯梨浜町南谷(当所屋上、以下「湯梨浜」という。)(図1)で採取した。今回の調査期間は、令和6年3月25日から令和7年3月31日までとした。



●：湯梨浜（鳥取県衛生環境研究所）

図1 調査地点

### 2.2 捕集方法

#### 2.2.1 湿性沈着調査

湿性沈着調査には、降水時開放型捕集装置(Wet-only サンプラー：ANEOS(株))を用いて採取した降水を用いた。採取期間は2週間とし、

サンプリングは原則2回/月の頻度で行った。

#### 2.2.2 乾性沈着調査

乾性沈着調査は、パッシブサンプラー(小川商会)を用いて、大気中のオゾン( $\text{O}_3$ )を捕集し試料とした。パッシブサンプラーは、大気中 $\text{O}_3$ と亜硝酸ナトリウム( $\text{NaNO}_2$ )との反応を利用したもので、 $\text{O}_3$ をフィルター上に硝酸ナトリウムの形で捕集できる。採取期間は1ヶ月間とし、毎月サンプリングを行った。

また、5段ろ紙(フィルターパック法、以下「FP法」という。)を用いて大気中ガス成分の捕集を行った(図2)。表1に各ろ紙上で捕集される成分と分析対象となるイオン成分を示す。採取期間は2週間とし、サンプリングは原則2回/月の頻度で行った。

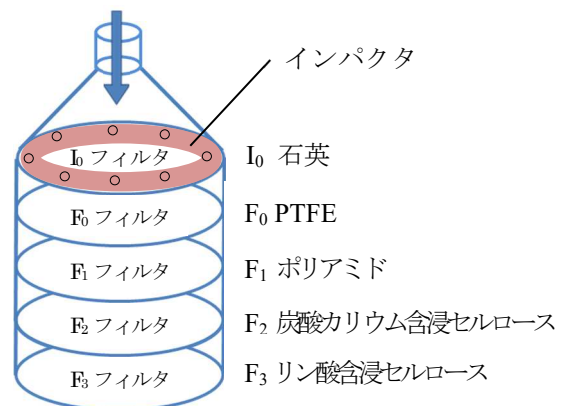


図2 フィルターパック法模式図

表1 フィルターごとの捕集成分及び分析項目

| 番号             | 捕集成分                                                             | 分析項目                                                                                                                                         |
|----------------|------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| I <sub>0</sub> | 粒子状物質<br>(粗大粒子)                                                  | $\text{SO}_4^{2-}$ , $\text{NO}_3^-$ , $\text{Cl}^-$<br>$\text{Na}^+$ , $\text{K}^+$ , $\text{Ca}^{2+}$ , $\text{Mg}^{2+}$ , $\text{NH}_4^+$ |
| F <sub>0</sub> | 粒子状物質<br>(微小粒子)                                                  | $\text{SO}_4^{2-}$ , $\text{NO}_3^-$ , $\text{Cl}^-$<br>$\text{Na}^+$ , $\text{K}^+$ , $\text{Ca}^{2+}$ , $\text{Mg}^{2+}$ , $\text{NH}_4^+$ |
| F <sub>1</sub> | $\text{SO}_2$ , $\text{HNO}_3$ ,<br>$\text{HCl}$ , $\text{NH}_3$ | $\text{SO}_4^{2-}$ , $\text{NO}_3^-$ , $\text{Cl}^-$<br>$\text{NH}_4^+$                                                                      |
| F <sub>2</sub> | $\text{SO}_2$ , $\text{HCl}$                                     | $\text{SO}_4^{2-}$ , $\text{Cl}^-$                                                                                                           |
| F <sub>3</sub> | $\text{NH}_3$                                                    | $\text{NH}_4^+$                                                                                                                              |

### 2.3 測定方法

#### 2.3.1 湿性沈着

採取した降水は、採取量、pH、電気伝導率(EC)

1) 令和7年3月31日付退職

を測定した後、イオンクロマトグラフ分析装置（ICS-2100）を用いてイオン成分（ $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ ）の分析を行った。分析方法は「湿性沈着モニタリング手引き書（環境省）」に準拠した。なお、項目毎の測定値の1ヶ月分（2回分）を降水量で加重平均した値を経月変化（季節変化）の評価に用いた。

### 2.3.2 乾性沈着

パッシブサンプラーのフィルターを超純水中に浸漬し、 $\text{NO}_3^-$ を抽出した。抽出液中の  $\text{NO}_3^-$  濃度をイオンクロマトグラフにより定量し、得られた  $\text{NO}_3^-$  濃度から大気中  $\text{O}_3$  濃度へ換算した。

試料の前処理の詳細は、「短期暴露用拡散型サンプラーを用いた環境大気中の  $\text{NO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{O}_3$  及び  $\text{NH}_3$  濃度の測定方法（全国環境研協議会 酸性雨調査研究部会）」を参照されたい。

FP 法のフィルターは、 $\text{F}_2$  は  $0.03\%\text{H}_2\text{O}_2$  で、その他は超純水で抽出を行い、イオンクロマトグラフを用いて含有イオン成分を定量した。

## 3 結果

### 3.1 湿性沈着

令和6年度に採取した降水 pH の経月変化を図3に示す。湯梨浜の年間最低値は、pH4.59（8月）、また年間の変動範囲は、pH4.59～5.43であった。

加重年平均値（降水量で重み付けした平均値）は pH5.04 となり、この値は令和5年度の国内の長期モニタリング観測地点で得られた観測値の年加重平均値 pH5.03<sup>(2)</sup> とほぼ同等の値であった。図4に年平均値（加重平均値）の経年変化を示す。pH5.6を下回る「酸性雨」が継続的に観測されているが、最近 pH 値が上昇傾向にあり、酸性度が緩和されつつあると考えられる。

降水の pH は主に大気中の  $\text{NO}_x$  及び  $\text{SO}_2$  を前駆体とする酸性物質の取り込みにより酸性となるため、降水中の  $\text{NO}_3^-$  及び非海塩性  $\text{SO}_4^{2-}$ （ $\text{nss-SO}_4^{2-}$ ）の濃度の経月変化（季節変動）に着目した（図5、図6）。 $\text{NO}_3^-$  は、6月に最も低い値を示し、その後、徐々に上昇し、1月に最も高い値を示した。

$\text{nss-SO}_4^{2-}$  は、9月に最も低い値を示し、その後、1月に最も高い値を示した。

また、降水の pH の中和に寄与する  $\text{NH}_4^+$  と非海塩性  $\text{Ca}^{2+}$ （ $\text{nss-Ca}^{2+}$ ）の濃度の経月変化に着目したところ（図7、図8）、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{nss-Ca}^{2+}$ とも1月に最も高い値を示した。

そこで、主な酸性物質の総当量濃度

（ $[\text{NO}_3^-] + [\text{nss-SO}_4^{2-}]$ ：単位  $\mu\text{eq/L}$ ）と主な塩基性物質の総当量濃度（ $[\text{NH}_4^+] + [\text{nss-Ca}^{2+}]$ ：単位  $\mu\text{eq/L}$ ）の経月変化（季節変動）を図9に示す。降水中の酸性物質濃度が高くなった月に塩基性物質濃度も高くなっていたことから pH の低下が比較的抑えられたと考えられる。

※ $\text{nss}$ : non sea salt 非海塩由来

※ $\text{nss-SO}_4^{2-} = \text{SO}_4^{2-} - 0.0607 \times \text{Na}^+$ ； $\text{SO}_4^{2-}$  は海塩由来と非海塩由来を分けるため、 $\text{Na}^+$  は全て海塩由来として、 $\text{Na}^+$  濃度と海水中でのモル濃度比（ $\text{SO}_4^{2-}/\text{Na}^+$ ）とを用いて算出したもの。

※ $\text{nss-Ca}^{2+} = \text{Ca}^{2+} - 0.0224 \times \text{Na}^+$ ； $\text{Ca}^{2+}$  は海塩由来と非海塩由来を分けるため、 $\text{Na}^+$  は全て海塩由来として、 $\text{Na}^+$  濃度と海水中でのモル濃度比（ $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ ）とを用いて算出したもの。

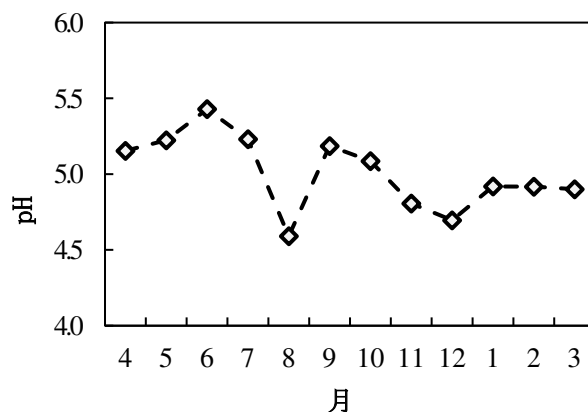


図3 降水 pH の経月変化

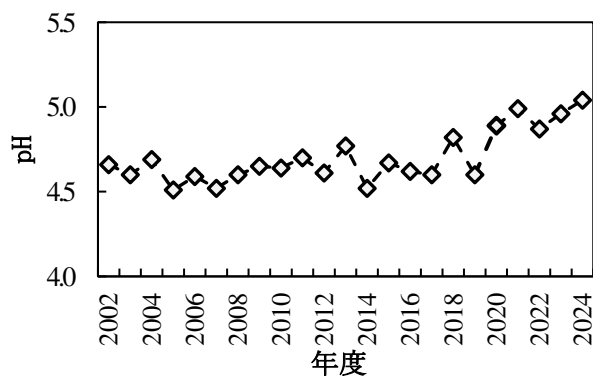


図4 降水 pH 年加重平均値の経年変化

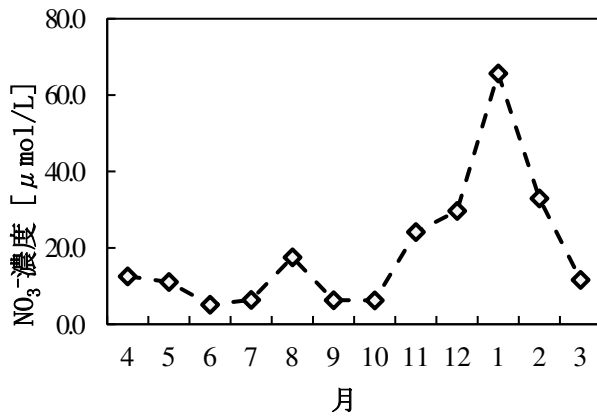


図5 降水中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>濃度の経月変化

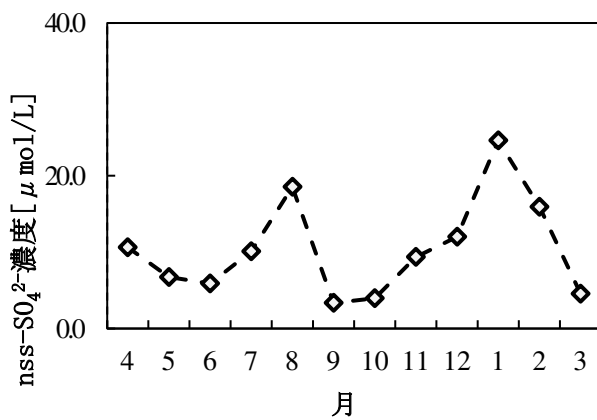


図6 降水中 nss-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>濃度の経月変化

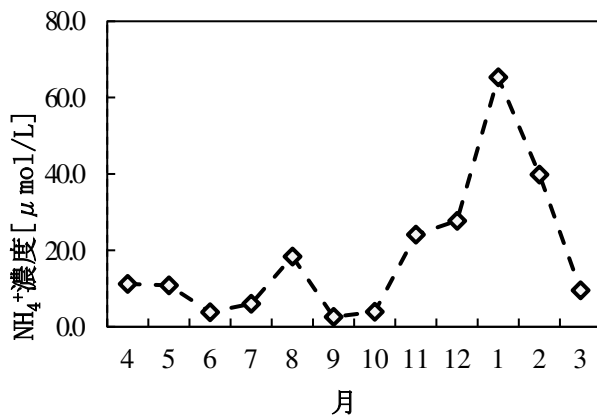


図7 降水中の NH<sub>4</sub><sup>+</sup>の経月変化

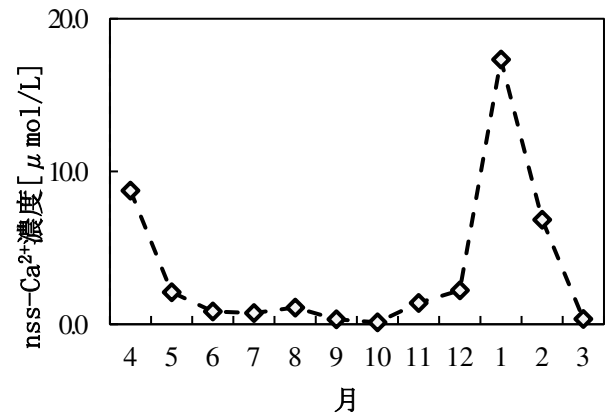


図8 降水中の nss-Ca<sup>2+</sup>の経月変化

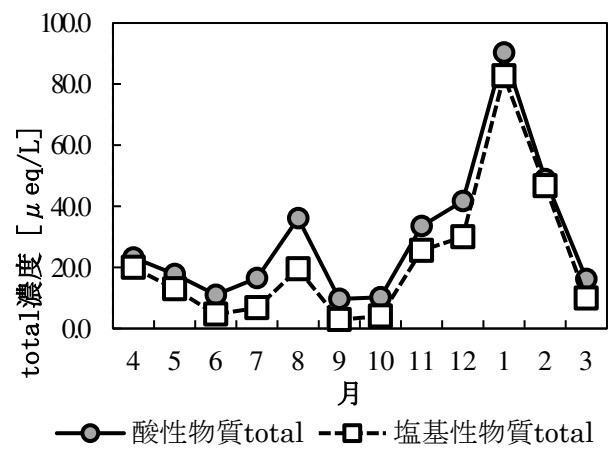


図9 降水中の酸性物質濃度及び塩基性物質濃度の経月変化

### 3.2 乾性沈着

パッシブ法によって測定した O<sub>3</sub> 年平均値の経年変化を図 10 に示す。年平均値については平成 21 年度（2009 年度）から濃度に大きな変化は観察されていない。

年間の濃度の変動は、3～6 月にかけて濃度が高くなっており、5 月に最高値を示した。（図 11）

図 12 に FP 法による 5 段ろ紙の石英フィルター及び PTFE フィルター（粒子状物質）から抽出したイオン成分濃度の経月変化を示す。Na<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup> の変化はほぼ一致しており、海塩粒子由来のものだと考えられる。

FP 法で得られた酸性ガス状成分及び塩基性ガス状成分の経月濃度変化を図 13、14 にそれぞれ示す。HCl は 6 月に高くなった。塩基性ガス状成分の NH<sub>3</sub> については、3 月に高くなった。

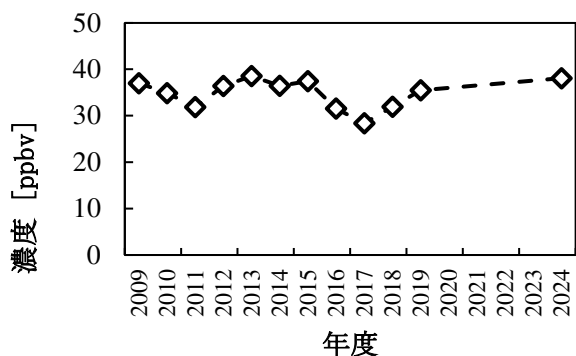


図 10 乾性沈着オゾン ( $O_3$ ) 濃度の経年変化

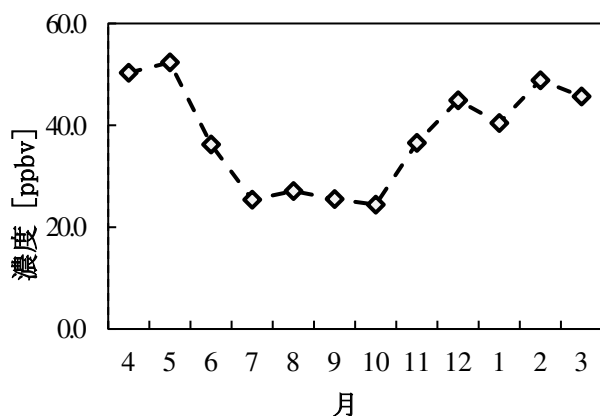


図 11 乾性沈着オゾン ( $O_3$ ) 濃度の経月変化

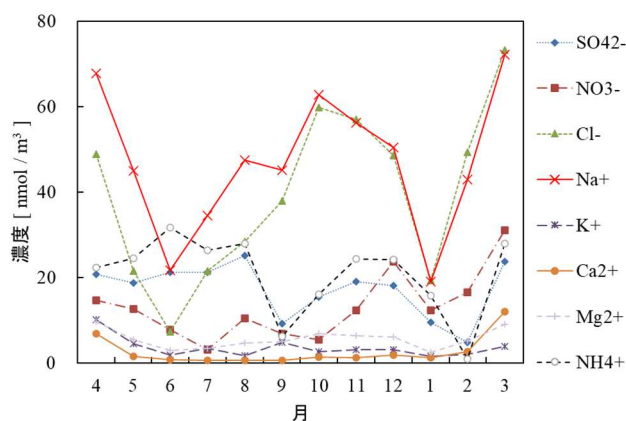


図 12 粒子状物質のイオン成分濃度の経月変化

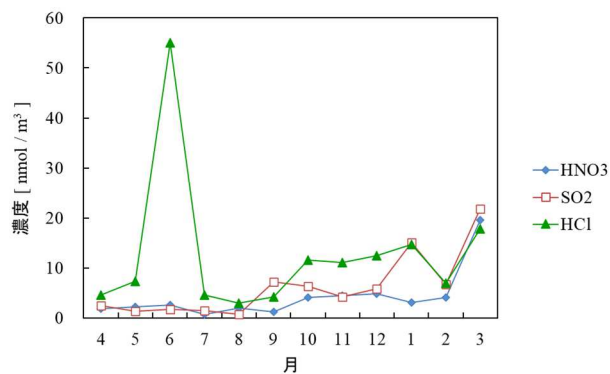


図 13 酸性ガス状成分の経月変化

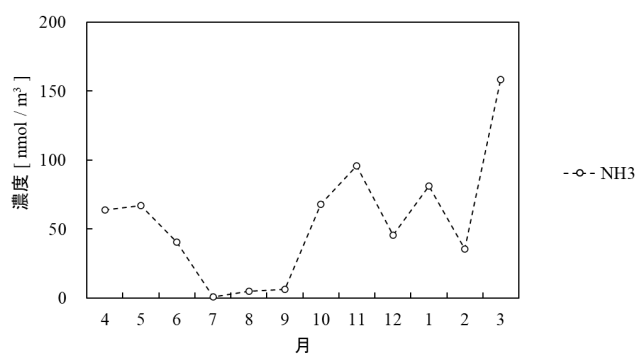


図 14 塩基性ガス状成分の経月変化

## 4 まとめ

(1) 湯梨浜で採取した降水の pH は、国内の長期モニタリング観測地点と同様に酸性化した状態であった。また、経年変化はやや上昇傾向にある。  
 (2) 例年、降水中の  $NO_3^-$  と  $nss-SO_4^{2-}$  が上昇すると pH が低下する傾向がみられるが、今年度は中和に寄与する  $NH_4^+$  と  $nss-Ca^{2+}$  も同時に高くなる傾向がみられたため、pH の低下が抑えられたと考えられる。

(3) 大気中の酸性ガス状成分である  $HNO_3$ 、 $SO_2$  及び  $HCl$  の濃度が高くなっても降水の pH が低くはならなかった。理由は現在のところ明らかではないが、ガス状成分の濃度がただちに降水の pH に影響するわけではないことが分かった。

## 5 その他

参考として、湿性沈着調査の測定結果を表 2、乾性沈着調査におけるパッシブ法の測定結果を表 3、FP 法の測定結果を表 4 に示す。

## 6 参考文献

- (1) 全国環境研協議会・酸性雨広域大気汚染調査研究部会 酸性雨全国調査実施要領 (R5. 2)
- (2) 環境省：令和 5 年度酸性雨調査結果について, (2023)

表 2 湿性沈着法の測定結果

| 期間       | pH   | 導電率  | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | Cl <sup>-</sup> | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> | Na <sup>+</sup> | K <sup>+</sup> | Ca <sup>2+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | H <sup>+</sup> | nss-SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | nss-Ca <sup>2+</sup> |
|----------|------|------|-------------------------------|------------------------------|-----------------|------------------------------|-----------------|----------------|------------------|------------------|----------------|-----------------------------------|----------------------|
|          |      | mS/m | μmol/L                        |                              |                 |                              |                 |                |                  |                  |                |                                   |                      |
| 2024年4月  | 5.15 | 1.46 | 13.3                          | 12.6                         | 48.2            | 11.2                         | 44.3            | 1.7            | 9.7              | 5.6              | 7.0            | 10.6                              | 8.7                  |
| 2024年5月  | 5.22 | 1.36 | 9.8                           | 11.1                         | 57.3            | 10.8                         | 49.8            | 1.8            | 3.2              | 5.7              | 6.0            | 6.7                               | 2.1                  |
| 2024年6月  | 5.43 | 0.36 | 6.0                           | 5.1                          | 2.9             | 3.8                          | 2.3             | 1.0            | 0.9              | 1.1              | 3.7            | 5.9                               | 0.8                  |
| 2024年7月  | 5.23 | 0.50 | 10.3                          | 6.4                          | 4.5             | 6.0                          | 3.6             | 1.0            | 0.8              | 0.9              | 5.9            | 10.1                              | 0.7                  |
| 2024年8月  | 4.59 | 1.63 | 19.8                          | 17.5                         | 19.4            | 18.4                         | 20.0            | 1.2            | 1.5              | 2.2              | 25.7           | 18.5                              | 1.1                  |
| 2024年9月  | 5.19 | 1.36 | 7.3                           | 6.3                          | 78.8            | 2.6                          | 64.5            | 1.3            | 1.8              | 6.9              | 6.5            | 3.4                               | 0.3                  |
| 2024年10月 | 5.09 | 2.14 | 10.8                          | 6.3                          | 133.8           | 3.9                          | 113.3           | 2.5            | 2.7              | 12.4             | 8.2            | 4.0                               | 0.1                  |
| 2024年11月 | 4.81 | 5.03 | 25.1                          | 24.1                         | 304.6           | 24.1                         | 259.9           | 6.5            | 7.2              | 29.0             | 15.6           | 9.4                               | 1.4                  |
| 2024年12月 | 4.70 | 7.33 | 35.9                          | 29.7                         | 460.4           | 27.7                         | 394.5           | 9.2            | 11.1             | 44.2             | 20.2           | 12.0                              | 2.2                  |
| 2025年1月  | 4.92 | 8.43 | 50.9                          | 65.7                         | 501.8           | 65.3                         | 433.0           | 11.5           | 27.0             | 49.8             | 12.1           | 24.6                              | 17.3                 |
| 2025年2月  | 4.92 | 9.74 | 48.3                          | 32.9                         | 621.0           | 39.8                         | 533.7           | 13.5           | 18.8             | 60.4             | 12.1           | 15.9                              | 6.9                  |
| 2025年3月  | 4.90 | 3.73 | 16.3                          | 11.6                         | 230.7           | 9.5                          | 192.8           | 4.5            | 4.7              | 21.3             | 12.6           | 4.6                               | 0.3                  |
| 加重平均     | 5.04 | 3.13 | 18.7                          | 16.3                         | 180.5           | 15.5                         | 154.7           | 4.1            | 6.8              | 17.6             | 9.2            | 9.3                               | 3.3                  |

表 3 乾性沈着調査(パッシブ法)の測定結果 (単位: ppb)

| 期間       | O <sub>3</sub> | NH <sub>3</sub> | NO <sub>2</sub> | NO <sub>x</sub> |
|----------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 2024年4月  | 50.32          | 0.42            | 0.75            | 1.67            |
| 2024年5月  | 52.38          | 0.63            | 0.44            | 1.67            |
| 2024年6月  | 36.24          | 0.91            | 0.72            | 1.20            |
| 2024年7月  | 25.40          | 4.44            | 0.48            | 0.91            |
| 2024年8月  | 27.10          | 0.89            | 0.49            | 0.98            |
| 2024年9月  | 25.53          | 0.71            | 0.53            | 1.08            |
| 2024年10月 | 24.42          | 0.20            | 0.38            | 0.70            |
| 2024年11月 | 36.55          | 0.15            | 0.65            | 0.85            |
| 2024年12月 | 44.91          | ND              | 0.39            | 0.70            |
| 2025年1月  | 40.46          | ND              | 0.41            | 0.54            |
| 2025年2月  | 48.87          | ND              | 0.46            | 0.46            |
| 2025年3月  | 45.67          | 0.43            | 0.86            | 0.86            |
| 最小       | 24.42          | 0.15            | 0.38            | 0.46            |
| 最大       | 52.38          | 4.44            | 0.86            | 1.67            |
| 平均       | 38.07          | 0.69            | 0.55            | 0.98            |

表 4 乾性沈着調査(フィルターパック法)の測定結果 (単位: nmol / m<sup>3</sup>)

| 期間       | Total Particle (I0+F0)        |                              |                 |                 |                |                  |                  |                              | Gas (F1+F2+F3)   |                 |       |                 |
|----------|-------------------------------|------------------------------|-----------------|-----------------|----------------|------------------|------------------|------------------------------|------------------|-----------------|-------|-----------------|
|          | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | Cl <sup>-</sup> | Na <sup>+</sup> | K <sup>+</sup> | Ca <sup>2+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> | HNO <sub>3</sub> | SO <sub>2</sub> | HCl   | NH <sub>3</sub> |
| 2024年4月  | 20.76                         | 14.56                        | 48.92           | 67.79           | 10.16          | 6.83             | 9.67             | 22.33                        | 1.81             | 2.46            | 4.61  | 64.07           |
| 2024年5月  | 18.64                         | 12.67                        | 21.54           | 45.03           | 4.50           | 1.53             | 5.34             | 24.42                        | 2.20             | 1.37            | 7.37  | 67.11           |
| 2024年6月  | 21.29                         | 7.73                         | 7.30            | 21.65           | 1.77           | 0.74             | 2.87             | 31.75                        | 2.62             | 1.74            | 55.06 | 40.50           |
| 2024年7月  | 21.20                         | 3.09                         | 21.55           | 34.49           | 3.35           | 0.58             | 3.32             | 26.32                        | 0.77             | 1.53            | 4.55  | 1.07            |
| 2024年8月  | 25.09                         | 10.35                        | 28.36           | 47.53           | 1.71           | 0.59             | 4.66             | 27.90                        | 1.96             | 0.71            | 2.98  | 5.06            |
| 2024年9月  | 9.11                          | 6.81                         | 37.89           | 45.18           | 4.83           | 0.54             | 4.99             | 6.18                         | 1.18             | 7.16            | 4.18  | 6.21            |
| 2024年10月 | 15.41                         | 5.47                         | 59.86           | 62.76           | 2.61           | 1.28             | 6.81             | 16.12                        | 4.05             | 6.38            | 11.53 | 67.82           |
| 2024年11月 | 19.07                         | 12.28                        | 57.04           | 56.30           | 3.13           | 1.20             | 6.32             | 24.32                        | 4.42             | 4.25            | 11.13 | 96.09           |
| 2024年12月 | 18.03                         | 23.71                        | 48.54           | 50.49           | 3.03           | 1.77             | 6.07             | 24.14                        | 4.88             | 5.89            | 12.50 | 45.86           |
| 2025年1月  | 9.42                          | 12.27                        | 19.26           | 19.02           | 1.55           | 1.16             | 2.40             | 15.78                        | 3.09             | 15.05           | 14.66 | 81.21           |
| 2025年2月  | 4.85                          | 16.60                        | 49.43           | 42.93           | 2.01           | 2.52             | 5.04             | 0.82                         | 4.09             | 6.68            | 6.93  | 35.72           |
| 2025年3月  | 23.69                         | 31.06                        | 73.29           | 72.17           | 3.82           | 12.04            | 9.03             | 27.93                        | 19.57            | 21.81           | 17.82 | 158.29          |