

第2章 都内大気中 PM 中の硫酸水素アンモニウムの実態調査

I 目的

本研究では、PM 中の硫酸水素アンモニウム濃度を把握することを目的として、1年間実態調査を実施した。硫酸水素アンモニウム濃度と大気汚染物質濃度等との関係についても解析を行った。気象要素については、当該物質が黄砂などの越境汚染による影響が示唆されているため¹⁾、黄砂が都内で確認された日との関連についても調査した。

II 方法

1 都内大気中 PM 中硫酸水素アンモニウムの連続測定

(1) 採取装置

採取装置（以下インパクターと略す）は、慣性衝突式分粒装置（NWPS-35HS、柴田科学社製）を用いた。これは2段の衝突板（上中段）及び1段のバックアップ（下段）から構成され、2.5 L/min で通気することで粒子を3区分できる構造である（図1左）。上段で SPM 以上、中段で SPM から PM_{2.5} までの粒子（以下 SPM-PM_{2.5} と略す）（10 μm を 100%カット）、下段で PM_{2.5}（2.5 μm を 50%カット）が分粒可能であり、上中段には直径 25 mm、下段には直径 35 mm のフィルターを設置した。採取用フィルターは、石英繊維フィルター（2500QAT-UP、東京ダイレック社製）を用いた。

また、分粒せず PM 全てを採取する PM 採取法についても前述のインパクターを用いた。PM 採取の場合には、上中段の衝突板は除き、下段にのみフィルターを設置する構成とし、捕集速度は 2.5 L/min とした（図1右）。

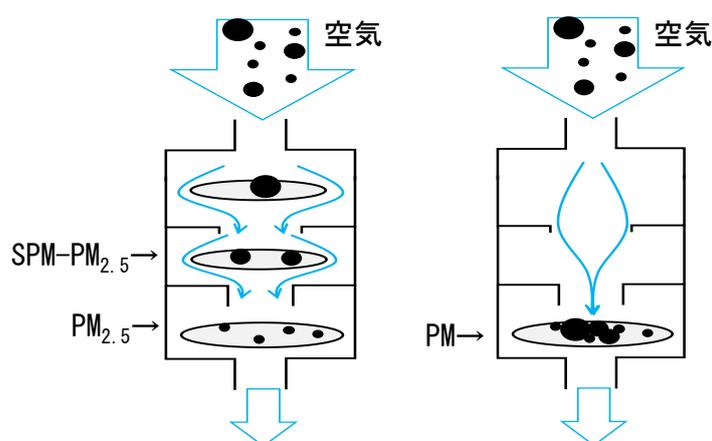


図1. 慣性衝突式分粒装置の構成図

左は PM_{2.5} 及び SPM 採取法、右は PM 採取法

(2) 都内大気中 PM の採取

大気採取は、東京都健康安全研究センター敷地内（東京都新宿区）の地上一

か所において、令和4年8月3日から令和5年8月2日の期間に、1週間採取を連続して行った。

SPM-PM_{2.5}及びPM_{2.5}の採取には、2台のインパクターを用い、SPM-PM_{2.5}中の物質濃度は中段のフィルター計2枚を、PM_{2.5}中の物質濃度は下段のフィルターをそれぞれ半分に切断した計4片(n=2)を用い、後述の分別定量法に従い算出した。

PMの採取についても2台のインパクターを用い、物質濃度は下段のフィルター計2枚を用い、分別定量法に従い算出した。なお、PM採取については令和4年9月28日から開始した。

解析に使用する大気汚染物質濃度は環境省大気汚染物質広域監視システム的一般局(中野区若宮)の測定値を、気象要素である気温、相対湿度、降水量、風速及び風向は東京都健康安全研究センターにおける測定値を利用した。黄砂については気象庁が目視で観測した日を飛来日とした。

(3) 硫酸水素アンモニウムの分別定量法

硫酸水素アンモニウムの定量は、既存研究において確立した方法を用いて行った²⁾。すなわち、大気中物質を採取したフィルター1枚を半分に切断した計2片、又は2台の装置で採取した計2枚について、片方を110°Cで30分間加熱処理、もう片方を150°Cで30分間加熱処理した後、それぞれをポリプロピレン製試験管に入れた。試験管に蒸留水を加え、超音波で20分間抽出した後、ろ過した抽出液中のNH₄⁺濃度をイオンクロマトグラフで分析した。分析条件を表1に、混合標準溶液のクロマトグラムを図2に示す。

次に、得られたNH₄⁺濃度を用いて、次の算出方法に従い、各物質の1週間平均濃度を算出した。硫酸アンモニウム濃度については、110°Cと150°Cの加熱処理で生じたNH₄⁺量の差を硫酸アンモニウムにおけるNH₄⁺の半量とし、式量の比及び採取空気量から硫酸アンモニウム濃度を算出した。硫酸水素アンモニウム濃度については、110°C加熱処理後のNH₄⁺量から硫酸アンモニウム由来のNH₄⁺量を減算し、これを硫酸水素アンモニウム由来とし、式量の比及び採取空気量から硫酸水素アンモニウム濃度を算出した。算出に用いた式量は、硫酸水素アンモニウムが115.11、硫酸アンモニウムが132.14、NH₄が18.04である。

表1. 陽イオン用イオンクロマトグラフ分析条件

装置	AQUION (サーモフィッシャーサイエンティフィック社製)
カラム	Dionex IonPac CG12A(2×50 mm) & GS12A(2×150 mm)
移動相	20 mMメタンサルホン酸
カラム温度	30°C
流量	0.25 mL/min
検出器	電気伝導度(サプレッサーCDRS600、2 mm)
電流値	20 mA
導入量	5 µL

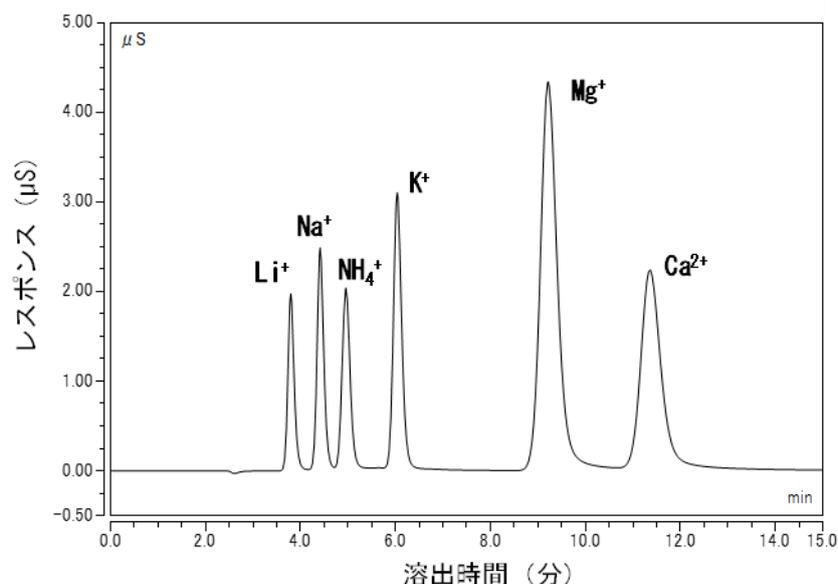


図 2. 混合標準溶液のクロマトグラム

Ⅲ 結 果

1 都内大気中 PM 中硫酸水素アンモニウムの連続測定

硫酸水素アンモニウムの測定結果を表 2 及び図 3 に示す。

PM_{2.5} 中濃度は、n=2 のうちいずれかが定量下限値である 0.2 μg/m³ 以上で、かつ平均濃度が 0.2 μg/m³ 以上であった場合を検出とした。平均濃度については、定量下限値未満（以下 ND と略す）の場合には 0.1 μg/m³ を代入して算出した。

表 2 より、PM_{2.5} からの検出率は 27%（52 回中 14 回）、SPM-PM_{2.5} からは 0%、PM からは 14%（43 回中 6 回）であった。検出した 14 回又は 6 回の平均濃度（±標準偏差）については PM_{2.5} 中濃度が 0.6±0.5 μg/m³、PM 中濃度が 0.5±0.3 μg/m³ であり、硫酸水素アンモニウムは PM_{2.5} 以上の粗大粒子ではなく PM_{2.5} 中に存在することが分かった。以上の結果から、以降の解析には PM_{2.5} 中濃度を用いることとした。

また、検出された時期については、令和 4 年 8 月及び令和 5 年 5 月から 7 月であり、春から夏に検出され、9 月から 3 月の期間には検出されなかった（図 3）。

表 2. PM 中硫酸水素アンモニウム濃度

	PM _{2.5}	SPM-PM _{2.5}	PM
検出率	27% (14/52week)	0% (0/50week)	14% (6/43week)
平均濃度±標準偏差*	0.6±0.5 μg/m ³		0.5±0.3 μg/m ³
最小-最大濃度*	0.2-1.9 μg/m ³		0.3-1.0 μg/m ³

*検出された14回又は6回の測定値を使用した

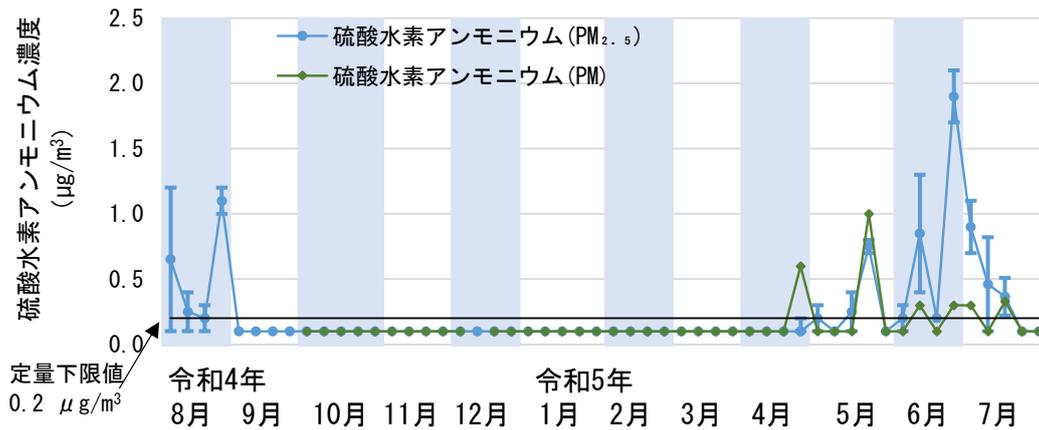


図 3. PM 中硫酸水素アンモニウム濃度の推移

PM_{2.5} 中濃度のプロットは週平均濃度、エラーバーは n=2 で得られたそれぞれの濃度を示した

2 PM_{2.5} 中硫酸水素アンモニウムと大気汚染物質等との関連

(1) 大気汚染物質等（硫酸アンモニウムを含む）濃度の推移

硫酸水素アンモニウム測定時に得られた PM 中硫酸アンモニウム濃度（週平均値）の推移を図 4 に、主な大気汚染物質（SO₂、NO_x、SPM、PM_{2.5} 及び Ox）の推移を図 5 に示す。大気汚染物質は、若宮測定局における 1 時間値の週平均値を算出した。

硫酸アンモニウムは、PM_{2.5} から 52 回中 51 回、PM から 43 回中 43 回検出され、それぞれの平均濃度は $1.2 \pm 0.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 及び $1.3 \pm 0.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ であった。両濃度はほぼ同程度であったことから、硫酸アンモニウムは PM_{2.5} 以上の粗大粒子ではなく、主に PM_{2.5} 中に存在することが分かった。また季節による傾向については、6 月から 7 月は比較的高く、10 月から 1 月は低めになる傾向が見られた。

SO₂、SPM 及び PM_{2.5} は、年間平均値がそれぞれ $0.47 \pm 0.21 \text{ ppb}$ 、 $12.8 \pm 3.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 及び $8.7 \pm 2.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ で季節的な傾向は見られなかった。NO_x の年間平均値は $12.7 \pm 7.1 \text{ ppb}$ で冬季に高くなる傾向が、Ox は $31.1 \pm 9.6 \text{ ppb}$ で春季及び夏季に高くなる傾向が見られた。

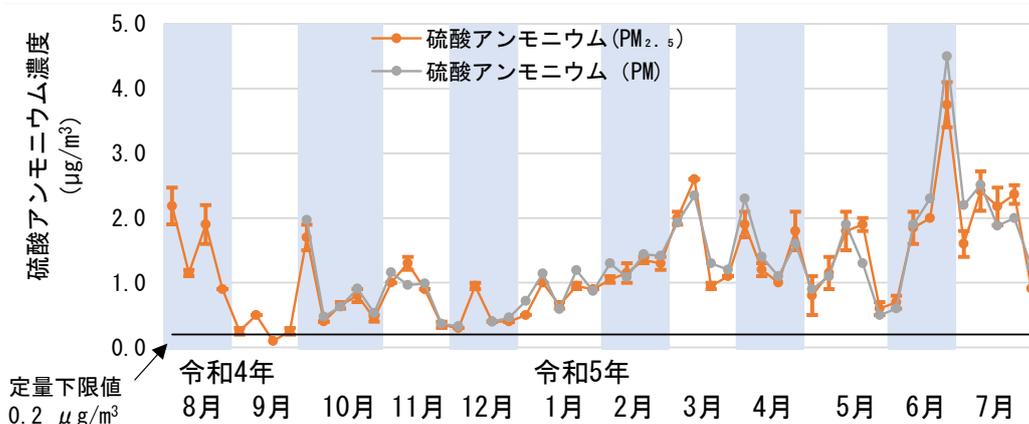


図 4. PM 中硫酸アンモニウム濃度の推移

PM_{2.5} 中濃度のプロットは週平均濃度、エラーバーは n=2 で得られたそれぞれの濃度を示した

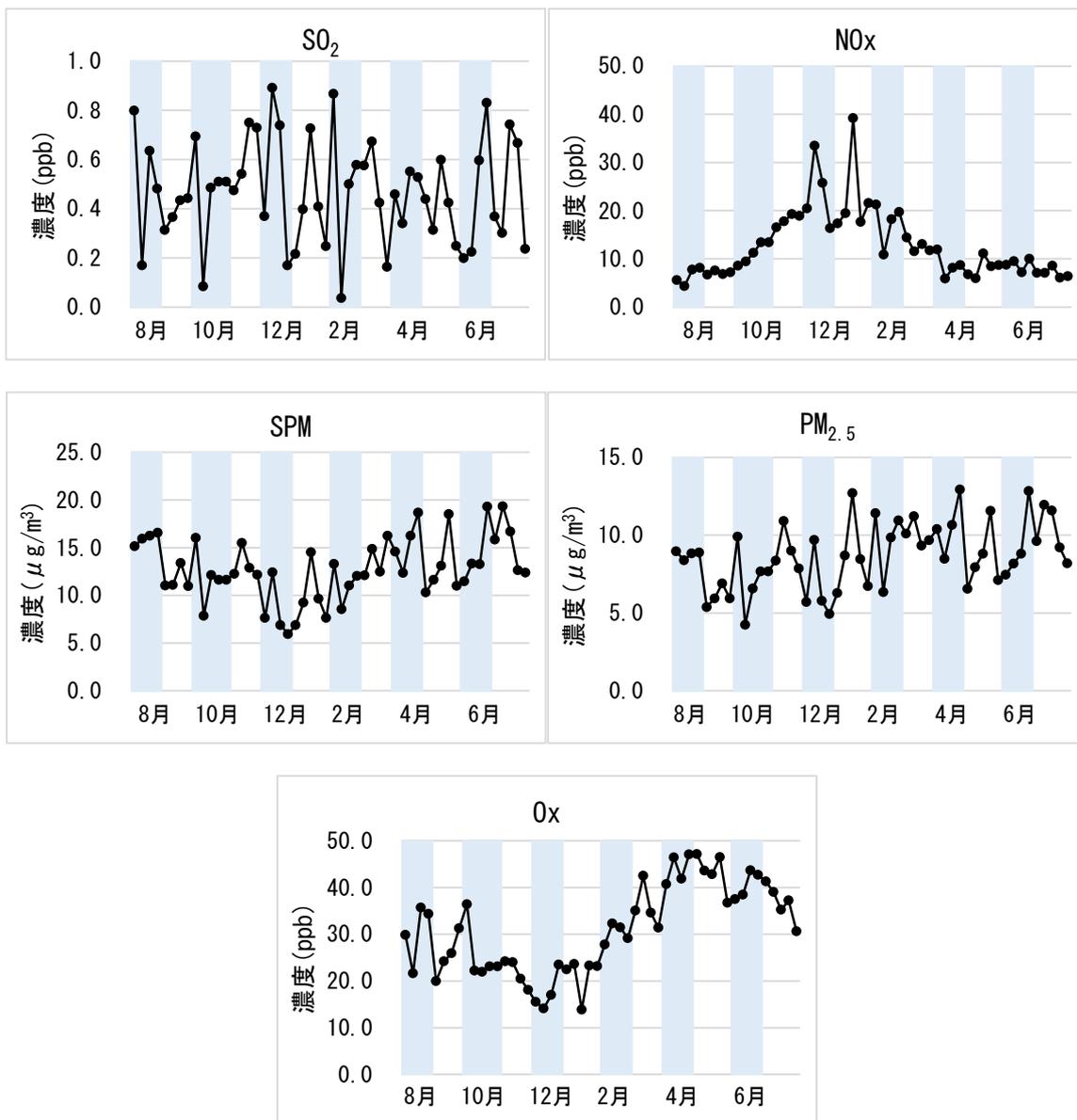


図 5. 大気汚染物質濃度の推移

(2) 大気汚染物質等（硫酸アンモニウムを含む）濃度との関連

硫酸水素アンモニウム濃度と、大気汚染物質等（硫酸アンモニウムを含む）の濃度との単相関係数を表 3 に示す。解析には、硫酸アンモニウムは 1 週間平均濃度を、ほか物質は 1 時間値の週平均値及び週最大値を用いた。また、硫酸水素アンモニウム濃度との関連のほか、検出の有無との関連も調査するため、検出された場合を 1、ND を 0 として、各物質の週平均値との単相関係数を算出した。

硫酸水素アンモニウム濃度と平均濃度（平均値）との間に相関が見られたのは、硫酸アンモニウム及び SPM であり、Ox 及び PM_{2.5} とは非常に弱い相関が見られた。最大値との間では Ox との相関が平均値との場合よりもやや強くなった。

硫酸水素アンモニウム検出の有無との関連については、硫酸アンモニウム、Ox 及び SPM との間に弱い正の相関が、NO、NO₂ 及び NO_x との間に弱い負の相関が見られた。

また、同じ硫酸塩である硫酸アンモニウムについても大気汚染物質の週平均値との相関係数を算出した。その結果、相関が見られたのは Ox、SPM 及び PM_{2.5} でであった。

表 3. PM_{2.5} 中硫酸水素アンモニウムと大気汚染物質濃度との相関係数

	PM _{2.5} 中硫酸水素アンモニウム濃度		PM _{2.5} 中硫酸水素アンモニウム ¹⁾	PM _{2.5} 中硫酸アンモニウム濃度
	I	II	I	I
PM _{2.5} 中硫酸アンモニウム	0.573 **	—	0.466 **	—
SO ₂	0.149	0.216	0.046	0.351
NO	-0.229	-0.284 *	-0.328 *	-0.275
NO ₂	-0.250	-0.284 *	-0.443 **	-0.204
NO _x	-0.251	-0.299 *	-0.417 **	-0.237
Ox	0.351 *	0.476 **	0.462 **	0.572 **
SPM	0.508 **	0.262	0.488 **	0.635 **
PM _{2.5}	0.333 *	0.147	0.223	0.684 **

** p<0.01、* p<0.05

I 大気汚染物質濃度は各採取週における1時間値の週平均値を用いた

II 大気汚染物質濃度は各採取週における1時間値の週最大値を用いた

1) 硫酸水素アンモニウムは定量下限値以上の濃度を1、定量下限値未満の濃度を0とし、大気汚染物質濃度は各採取週における1時間値の週平均値を用いて解析した

(3) PM_{2.5} に占める濃度割合

硫酸水素アンモニウムが PM_{2.5} に占める濃度割合を図 6 に示す。あわせて、硫酸アンモニウムの濃度割合も示した。

硫酸水素アンモニウムについては、検出された 14 回の平均割合が 6.0±4.2%、最大では 14.8% であった。硫酸アンモニウムについては平均割合が 13.3±6.1%、最大では 29.2% で、両物質が最大割合を示したのは同じ採取週であった。

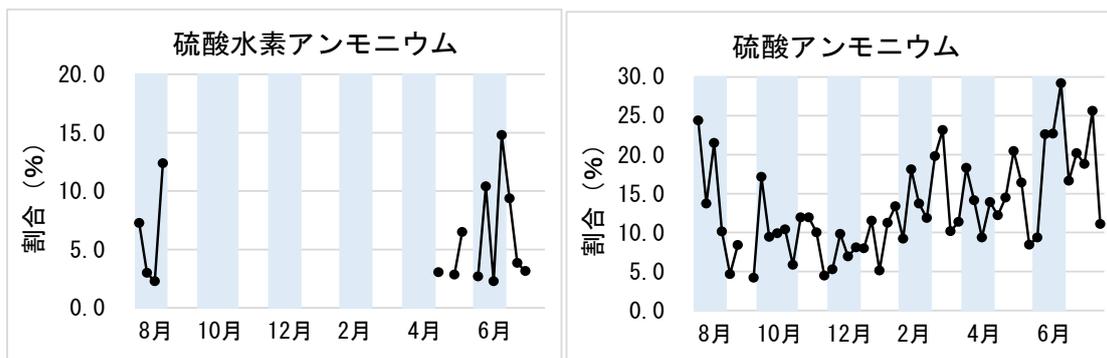


図 6. 硫酸水素アンモニウム等が PM_{2.5} に占める割合

3 PM_{2.5} 中硫酸水素アンモニウムと気象要素及び黄砂との関連

(1) 気象要素の推移

大気採取期間中の気温、相対湿度、降水量及び風速の推移を図 7 に、月別風向の割合を図 8 に示す。気温、相対湿度及び風速は 1 時間値の週平均値を算出、降水量は 1 週間の総量とした。風向については 1 時間毎の風向を用い月別の傾向を示した。

各気象要素の年間平均値は、気温が 18.0±8.0℃、相対湿度は 63.5±12.5%、降水量は 23.3±40.7 mm、風速は 1.1±0.2 m/s で、降水量が 100 mm を超えたのは令和 4 年 9 月と令和 5 年 6 月に計 3 回あった。

風向は、令和 4 年 9 月から令和 5 年 2 月の秋季及び冬季に南寄りの風が多く (図 8 上段)、令和 5 年 3 月から 7 月及び令和 4 年 8 月に北寄りの風が多かった (図 8 下段)。特に、硫酸水素アンモニウムが検出された 5 月から 8 月は北北東の風が多い傾向であった。

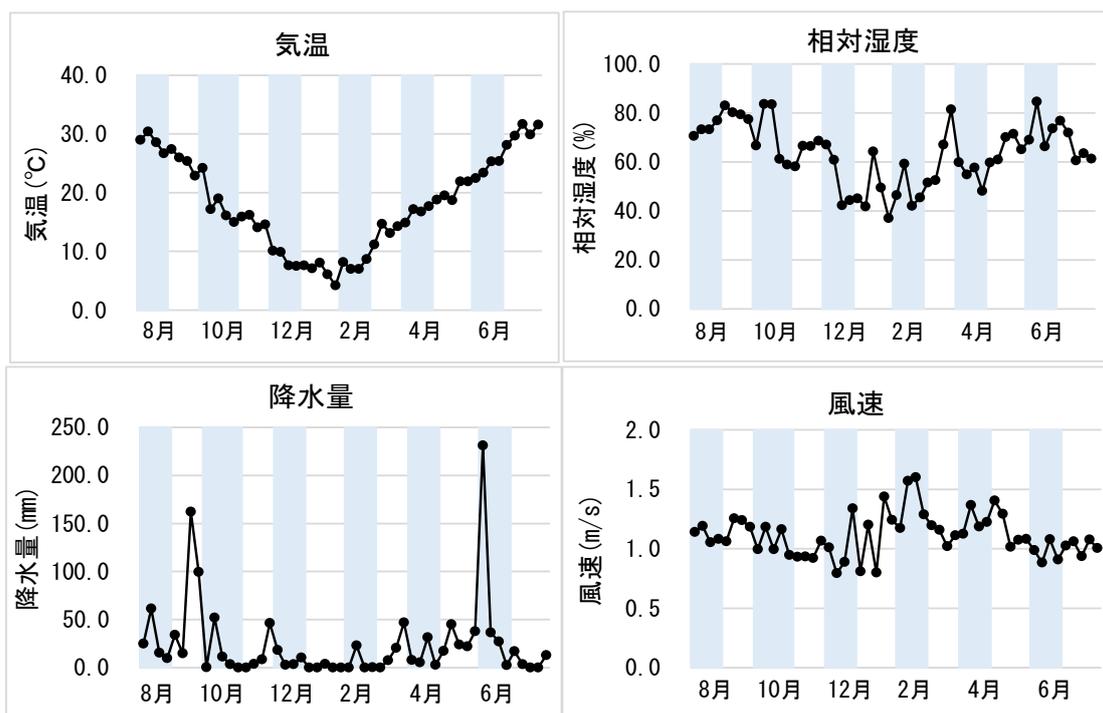


図 7. 気温、相対湿度、降水量及び風速の推移

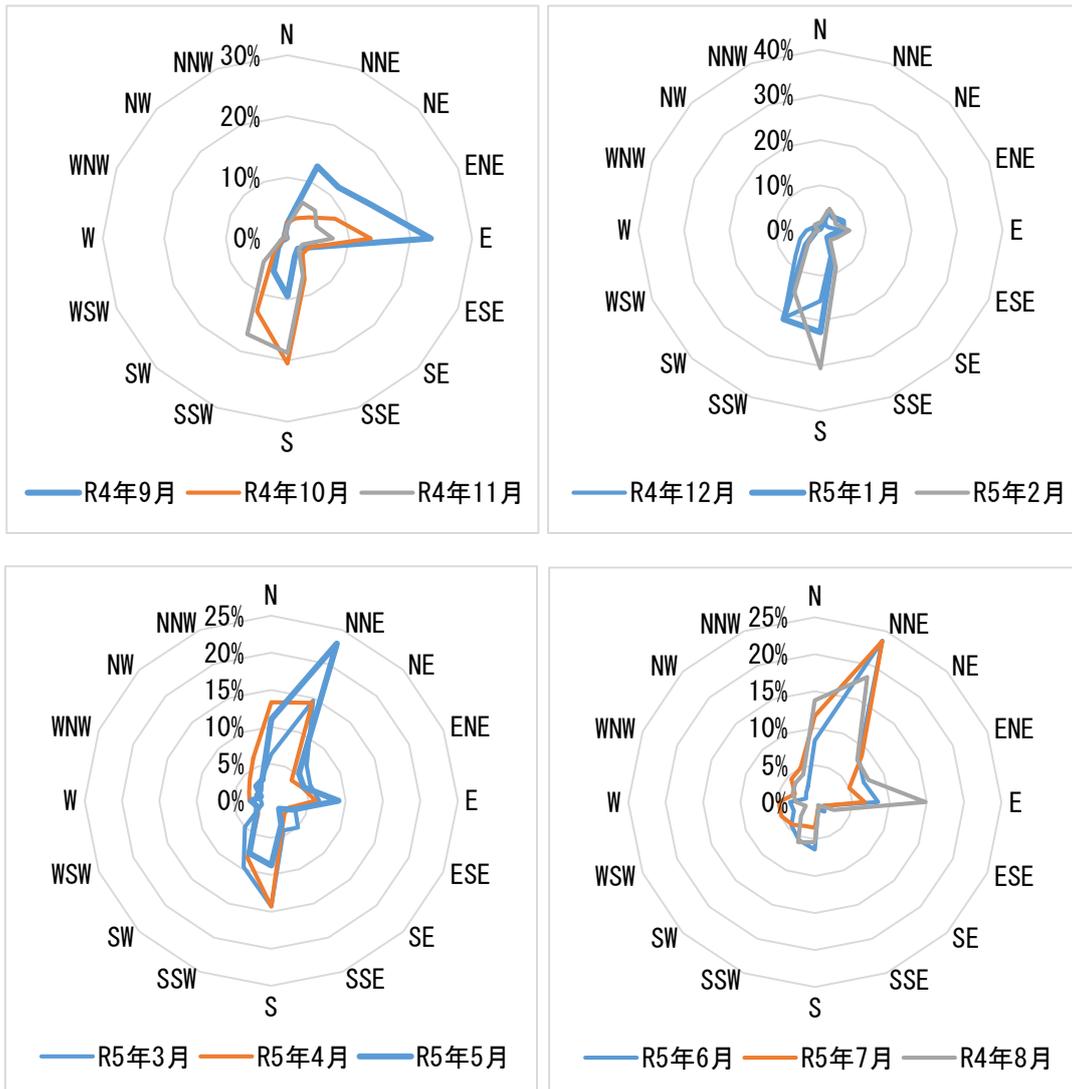


図 8. 令和 4 年 8 月から令和 5 年 7 月における月別風向の割合

(2) 気象要素との関連

図 7 に示した気象要素との単相関係数を表 4 に示す。解析は 2 (2) と同様に、硫酸水素アンモニウム濃度と気象要素の 1 時間値の週平均値及び週最大値、硫酸水素アンモニウムの検出の有無と週平均値との間で行った。

硫酸水素アンモニウム濃度と気象要素の平均値との間で相関が見られたのは、気温及び相対湿度であり、最大値の間では気温との相関が認められた。また、気温及び相対湿度については、硫酸水素アンモニウム検出の有無との間で相関が認められ、気温が高いほど検出率が増加することが示唆された。

また、硫酸アンモニウムとの関連については、気温との間に弱い正の相関が、降水量との間に弱い負の相関が見られた。

表 4. PM_{2.5} 中硫酸水素アンモニウムと気象条件との相関係数

	PM _{2.5} 中硫酸水素アンモニウム濃度		PM _{2.5} 中硫酸水素アンモニウム ¹⁾	PM _{2.5} 中硫酸アンモニウム濃度
	I	II	I	I
気温	0.408 **	0.438 **	0.592 **	0.298 *
相対湿度	0.345 *	0.188	0.381 **	0.009
降水量	-0.050	—	0.179	-0.302 *
風速	-0.228	-0.251	-0.171	-0.070

** p<0.01、* p<0.05

I 降水量は1週間の総量、ほかの気象要素は各採取週における1時間値の週平均値を用いた

II 気温、相対湿度及び風速は各採取週における1時間値の週最大値を用いた

1) 硫酸水素アンモニウムは定量下限値以上の濃度を1、定量下限値未満の濃度を0とし、降水量は1週間の総量、ほかの気象要素は各採取週における1時間値の週平均値を用いて解析した

(3) 黄砂との関連

大気採取期間中に黄砂が検出された時期と硫酸水素アンモニウム濃度を表5に示す。あわせて、黄砂飛来時にはSPM中のCa²⁺濃度が高くなることから、SPM中Ca²⁺の1週間平均濃度を図9に示した^{3,4)}。なお、Ca²⁺濃度については110°C又は150°Cで加熱処理したフィルターから抽出し、大気中濃度を算出した。SPM中Ca²⁺については、主に炭酸カルシウム及び硫酸カルシウム由来であるが、これらの揮発性は低いため、110°C又は150°Cで加熱してもフィルターからの損失は少ないと判断した^{2,5)}。

黄砂は令和5年4月13日から14日及び令和5年5月22日から23日の2回確認され、Ca²⁺濃度についても、それぞれ0.75 µg/m³及び0.52 µg/m³と、年間平均値(0.32 µg/m³)よりも高い濃度であった。

硫酸水素アンモニウムについては、4月の黄砂飛来時にはND、5月は0.8 µg/m³で、これは平均濃度(0.6 µg/m³)よりは高濃度だが、最大濃度(1.9 µg/m³)の約4割程度であった。また、硫酸水素アンモニウムが検出された14回のうち13回については、SPM中Ca²⁺濃度は年間平均値と比べて特に高くなく、黄砂飛来はなかったと考えられた。なお、表5に示した期間以外で、黄砂飛来時と同レベルのSPM中Ca²⁺濃度(0.5 µg/m³以上)を示したのは1月、3月及び4月に計4回あったが、いずれも硫酸水素アンモニウムはNDであった。

表 5. 硫酸水素アンモニウム濃度と黄砂との関連

採取期間	PM _{2.5}		SPM	黄砂
	硫酸水素アンモニウム	Ca ²⁺	Ca ²⁺	
R4, 8/3-8/10	0.7	ND	0.09	
R4, 8/10-8/17	0.3	0.10	0.25	
R4, 8/17-8/24	0.2	0.07	0.20	
R4, 8/24-8/31	1.1	0.11	0.31	
R5, 4/12-4/19	ND	0.28	0.75	4/13~4/14
R5, 4/26-5/3	0.2	0.12	0.41	
R5, 5/10-5/17	0.3	0.06	0.27	
R5, 5/17-5/24	0.8	0.20	0.52	5/22~5/23
R5, 5/31-6/7	0.2	0.09	0.32	
R5, 6/7-6/14	0.9	0.07	0.23	
R5, 6/14-6/21	0.2	0.17	0.36	
R5, 6/21-6/28	1.9	0.07	0.29	
R5, 6/28-7/5	0.9	0.09	0.26	
R5, 7/5-7/12	0.5	0.11	0.40	
R5, 7/12-7/19	0.4	0.11	0.40	
平均濃度±標準偏差		0.11±0.06	0.32±0.14	

ND：定量下限値未満、単位 (μg/m³)

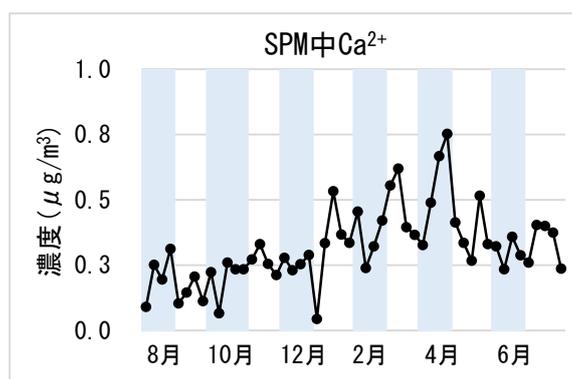


図 9. SPM 中 Ca²⁺濃度の推移

Ca²⁺は 110℃又は 150℃に加熱したフィルターから抽出した

IV 考察

大気 PM 中硫酸水素アンモニウムの実態を調査するため、令和 4 年 8 月から令和 5 年 7 月の 1 年間 (52 回測定)、都内 1 か所における連続測定を実施した。その結果、硫酸水素アンモニウムは PM_{2.5} 中から 52 回中 14 回検出され、14 回の平均濃度は 0.6 μg/m³、最大では 1.9 μg/m³ であった。PM_{2.5} 以上 SPM 以下の粒径からは検出されず、硫酸水素アンモニウムは主に PM_{2.5} の微小粒子径にのみ存在することが分かった。

検出時期は 5 月から 8 月の夏季に集中しており、これは硫酸塩が夏季に高いという一般的な傾向と一致していた⁶⁾。

硫酸水素アンモニウム濃度について、硫酸アンモニウムを含む大気汚染物質及

び気象要素との相関を調査した結果、PM_{2.5} 中硫酸アンモニウム、Ox、SPM 及び PM_{2.5} の各濃度、気温及び相対湿度との間に有意な正の相関が見られ、特に Ox 濃度及び気温については、各採取週における 1 時間値の週最大値との関連も見られた。加えて、Ox と気温は、硫酸水素アンモニウム検出の有無との相関も見られた。

(表 3 及び表 4 より)。以上の結果から、同じ硫酸塩である硫酸アンモニウムとは平均濃度、検出ともに関連が見られ、そのほかの要因としては、特に Ox 濃度及び気温が関連しており、さらには週最大値による影響が大きいことが示唆された。

そこで、両要素における週最大値の推移を図 10 に、硫酸水素アンモニウム検出の有無との関連を図 11 に示す。図 11 における解析は Dannett の方法を用いた。

図 10 より、Ox の週最大値は 3 月から 8 月に高く、環境基準値の 60 ppb (1 時間平均値) を超えたのが 29 回 (約 56%)、そのうち 8 回は 100 ppb を超えたことが分かった。

硫酸水素アンモニウム検出の有無との関連では、Ox 濃度 (週最大値) との間に有意差が見られ、ND 時の Ox 最大濃度は 59 ± 19 ppb、検出時は 96 ± 20 ppb であった。ND 時の平均値+標準偏差の濃度は 78 ppb ($59+19$)、検出時の平均値-標準偏差の濃度は 76 ppb ($96-20$) であることから、約 77 ppb 前後で検出に差が見られる可能性が考えられた。そこで、Ox の最大濃度が 77 ppb 未満と 77 ppb 以上での硫酸水素アンモニウム検出率を算出した結果、77 ppb 未満では約 9% (3 回/33 回)、77 ppb 以上では約 58% (11 回/19 回) であった。このことから、1 時間値が約 77 ppb を超えると検出率が増加する傾向があることが示唆された。

最高気温については、平均気温と同様の推移を示し、最高気温の方が約 10°C 高かった。検出の有無との関連では正の有意差が見られ、最高気温の平均値±標準偏差は、ND 時は $22 \pm 7^\circ\text{C}$ 、検出時は $33 \pm 5^\circ\text{C}$ であった。それぞれの平均値+標準偏差及び平均値-標準偏差は、 29°C ($22+7$) 及び 28°C ($33-5$) であったことから、約 28°C で検出に差が見られる可能性が考えられた。そこで、最高気温が 28°C 未満と 28°C 以上での検出率を算出した結果、 28°C 未満では約 6% (2 回/33 回)、 28°C 以上では約 63% (12 回/19 回) となり、1 時間値が約 28°C を超えると検出率が増加する傾向が見られた。

このことから、硫酸水素アンモニウムが検出される要因の一つとして、Ox の最大濃度が高いこと及び最高気温が高いことが考えられた。

なお、Ox 濃度との相関が最も高い気象要素としては、日積算日射量、いわゆる紫外線量が報告されている⁷⁾。Ox が生成される際には、大気中の窒素酸化物や非メタン炭化水素 (NMHC) 等の前駆体物質による光化学反応が必須であり、紫外線は光化学反応を生じさせる要素である。本調査では、日射量の調査を実施していないが、Ox 濃度と同様、硫酸水素アンモニウムとの間に正の相関が見られる可能性が示唆された。

一方、硫酸水素アンモニウムと負の相関が見られた物質としては窒素酸化物 (NO、NO₂ 及び NO_x) があつた。これは、前述したとおり窒素酸化物は Ox の生

成の前駆体物質であり消費されたためと推測される⁷⁻⁹⁾。今回の調査においても、Ox 濃度と窒素酸化物濃度の単相関係数は、1 時間値の週平均値で-0.62 から-0.64、週最大値で-0.61 から-0.66 と、いずれも有意な負の相関 ($p < 0.01$) が見られた (データは示していない)。これは、硫酸水素アンモニウムとの相関 (-0.229 から-0.443) よりも強い関連があったことから、窒素酸化物は Ox 生成に関与したことで、硫酸水素アンモニウムとの間に関連が見られたと考えられた。

なお、硫酸や三酸化硫黄の原因となる SO₂ は硫酸水素アンモニウムの生成に直接関与すると考えられるが^{8,9)}、季節的変動が見られず、夏季に検出率が増加した硫酸水素アンモニウムとの関連は低かった。

しかし、SO₂ については工場や自動車等、発生源からの影響が考えられ、風向による影響を調査した。検出率が増加した 5 月から 8 月は、特に北北東の風が多かった。しかし、採取場所とした当センターの付近に工場等はなく、自動車等についても、東西南北 1km 以内を、それぞれ明治通り、小滝橋通り、大久保通り、早稲田通りに囲まれており、風向による影響は小さいと考えられた。

そのほかの要因としては、黄砂等の越境汚染が考えられている¹⁰⁾。平成 29 年から平成 30 年に実施した都内における硫酸アンモニウムの実態調査においても、硫酸水素アンモニウムが検出された 4 回中 3 回でライダーによる黄砂が確認されていた¹¹⁾。そこで本研究においても黄砂との関連を調査した結果、都内で黄砂が目視された 2 回のうち 1 回で硫酸水素アンモニウムが検出されたが、この時の濃度は 0.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ であり、調査期間中の最大濃度 (1.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) よりも低い値であった。

都内においては黄砂の飛来が少なく、黄砂との関連が十分に考察することができなかつたため、黄砂飛来と関連のある SPM 中 Ca²⁺濃度を調べた。その結果、硫酸水素アンモニウムが検出された 14 回のうち 13 回の SPM 中 Ca²⁺濃度は年間平均値と比べて特に高くなく、黄砂飛来の可能性は低いと考えられた。したがって、都内における硫酸水素アンモニウムについては、黄砂飛来時の濃度は特に高くなく、黄砂による影響は小さいと推測された。

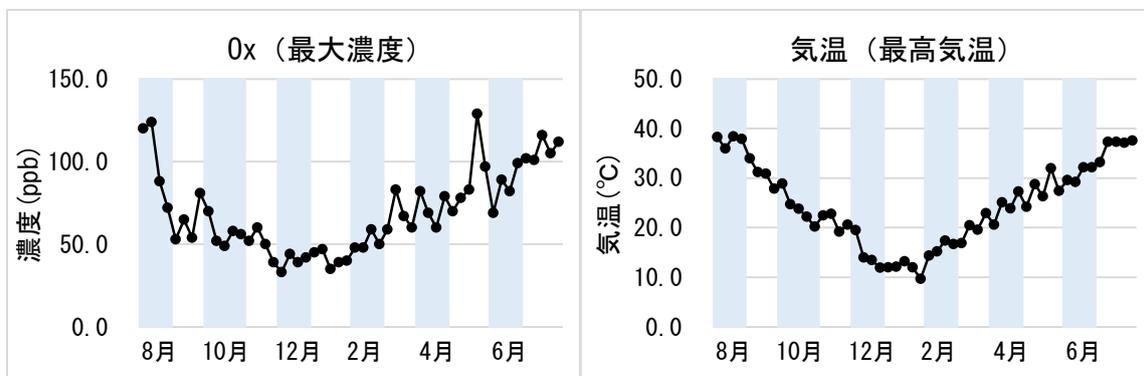


図 10. Ox 及び気温における最大 (高) 値の推移

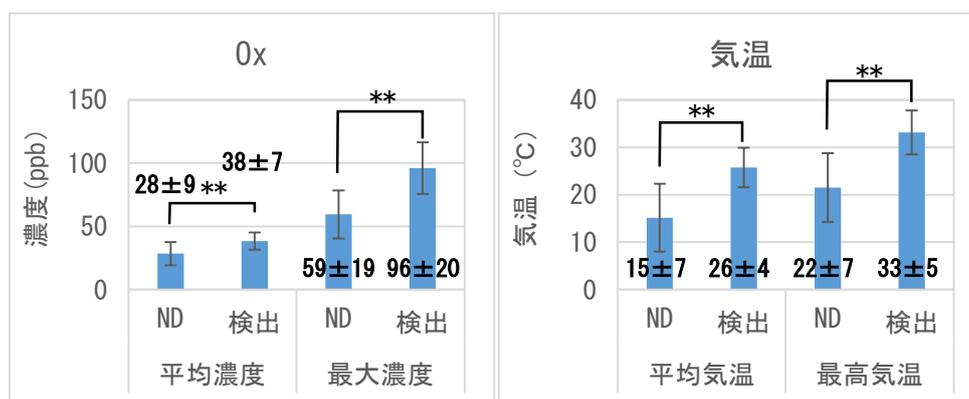


図 11. 硫酸水素アンモニウム検出の有無と各要素の平均値及び最大（高）値との関連
図内の数値は平均±標準偏差を示す

V 文献

- 1) 畠山史郎：ながれ， **34**, 33-40, 2015.
- 2) 斎藤育江，角田徳子，大貫 文，他：大気環境学会誌， **53**, 207-218, 2018.
- 3) 杉山広和，信森達也，前田 泉：岡山県環境保健センター年報， **32**, 11-16, 2008.
- 4) 大平武俊，角田 寛，三原利之：岐阜県保健環境研究所報， **15**, 21-28, 2007.
- 5) 三好拓郎、高橋嘉夫、東 将之、他：日本地球化学会第 55 回年会講演要旨集、2008.
- 6) 東京都環境局：令和 5 年度大気環境モニタリングに関する検討会，2023.
https://www.kankyo.metro.tokyo.lg.jp/basic/conference/air/monitoring/index.files/R5_02_siryou2.pdf (2024 年 2 月 9 日現在. なお本 URL は変更または末梢の可能性がある)
- 7) 東京都環境局：光化学オキシダント対策検討会報告，平成 17 年 2 月.
https://www.kankyo.metro.tokyo.lg.jp/basic/conference/air/photochemical_ox/index.files/oxhoukoku.pdf (2024 年 2 月 9 日現在. なお本 URL は変更または末梢の可能性がある)
- 8) 東京都環境局：平成 29 年度 第 2 回大気中微小粒子状物質検討会，2017.
https://www.kankyo.metro.tokyo.lg.jp/basic/conference/air/particulate_29_30/study_committee_29_02.html (2024 年 2 月 9 日現在. なお本 URL は変更または末梢の可能性がある)
- 9) Li, L., Kumar, M., Zhu, C., *et al.*: *J. Am. Chem. Soc.*, **138**, 1816-1819, 2016.
- 10) Shimohara, T., Oishi, O., Utsunomiya, A., *et al.*: *Atmos. Environ.*, **35**, 667-681, 2001.
- 11) 東京都福祉保健局：大気汚染物質と健康影響に関する調査研究報告書—基礎的実験的研究—（平成 28 年度から令和元年度まで），2020. *J. Am. Chem. Soc.* 2016,