

栃木県における微小粒子状物質（PM_{2.5}）の濃度変動に及ぼす気象的要因の特性解析

大気環境部

佐藤 翔大 佐藤 安里紗 平野 真弘 向井 重徳¹ 大森 牧子²
 （¹ 現気候変動対策課）（² 現企画情報部）

要旨

夏季における南方向の風の流入頻度の増加に伴う PM_{2.5} 高濃度域の分布の推移に着目し、夏季の関東地方における光化学オキシダント高濃度時の気象パターン抽出事例に倣い、気象条件の場合分けと抽出を行い、各気象条件における県内 PM_{2.5} 常時監視結果の特徴等について考察した。これにより、PM_{2.5} 自動測定結果からは、夏季における関東南岸から海風等の南風が発達する気象条件下では、県南地域の PM_{2.5} 濃度が平常時に比べ上昇する傾向が示された。また、PM_{2.5} 成分分析結果からは、特定の発生源の指標成分である金属元素が、前述と同様の気象条件によって、有意に上昇する傾向が示された。

キーワード：PM_{2.5}、気象、自動測定、成分分析

1 はじめに

当県においては、県内の PM_{2.5} 成分の詳細を把握するために、「令和2年度 PM_{2.5} 大気環境調査結果」（以下「令和2年度調査」という。）¹⁾ に示すとおり、県内の常時監視測定、四季調査の成分分析及び発生源寄与推定解析を継続して実施している。

前報²⁾では、四季調査結果を濃度水準で区分し比較した場合、当県における PM_{2.5} の主要組成は、大気中での二次生成の寄与が大きく、高濃度化しても組成比が変化しなかったことから、特定発生源の影響の増大ではなく、季節性や気温等の気象条件の影響が大きいことを指摘した。また、真岡市における PM_{2.5} 濃度及び風向風速の常時監視データから、春季及び夏季では、南方向の風の流入頻度の増加に伴い、PM_{2.5} 濃度の風向風速別分布の高濃度域が南側にシフトすること、また、秋季及び冬季では、北寄りの微風時に高濃度域が広く分布することから、当県における PM_{2.5} 濃度上昇には、季節風が影響することを指摘した。

これらのことから、当県における PM_{2.5} 濃度上昇メカニズムの解明には、PM_{2.5} 成分及び前駆物質の濃度変動の解析に加え、気象要素による影響の評価が重要と考えられる。また、単一の気象要素のみが起因することは考えにくく、複数の気象要素が PM_{2.5} 濃度変動に寄与していると予想した。このため、県内で観測される個々の気象要素の関連性に加え、関東地方や全国にまたがるような気象条件と、当県における PM_{2.5} 濃度変動の関連性について考察する。

2 解析の基本方針

本報告では、夏季における南方向の風の流入頻度の増加に伴う PM_{2.5} 高濃度域の分布の推移に着目して解析を行う。さらに、県内における南方向の風の頻度増加を引き起こす夏季特有の気象条件が、PM_{2.5} 高濃度化に影響を及ぼすと仮定し、その気象条件の有無により、県内の PM_{2.5} 濃度変動パターンや成分の特異性について、違いがあるかどうかの解析を行う。なお、気象条件の抽出方法は、吉門³⁾による、夏季の関東地方における光化学オキシダント高濃度時の気象パターン抽出事例に倣う。

3 解析方法

3.1 気象条件の抽出方法

図1に、気象条件の抽出過程を示す。前述のとおり、気象条件の抽出には、吉門³⁾の報告にある“海風日”の抽出方法を用いた。この抽出方法は、光化学オキシダント高濃度日の出現しやすい気象条件の典型例の一つである「関東南岸から北に向けて海風系が発達する日」に着目し、特定の気象に関する数値（例えば風向風速や湿度）ではなく、特定の気象条件による抽出を試みたものである。具体的な解析方法としては、東京局及びさいたま局の気象庁アメダスデータ（日照時間及び風向風速）を利用し、①早朝は弱風か北寄りの風であること、②正午前後に日照があること、③日中に 2 m/s 以上の南寄りの風が 2 時間以上続くこと、の 3 つの条件を満たした場合を“海風日”とするものである。これらにより、東京局及びさいたま局で個別に“海風日”か否かが決定される。さらに、両方で“海風日”と判定された日のうち、東京局での開始時刻が 8～13 時で、さいたま局での開始時刻が、東京局より 0～5 時間遅れの“海風日”を「典型海風日」とし、これを単に海風日と呼ぶこととしている。これは、海岸から内陸にかけて海風が吹き込むという、通常概念と整合させるための処理であるとされている。

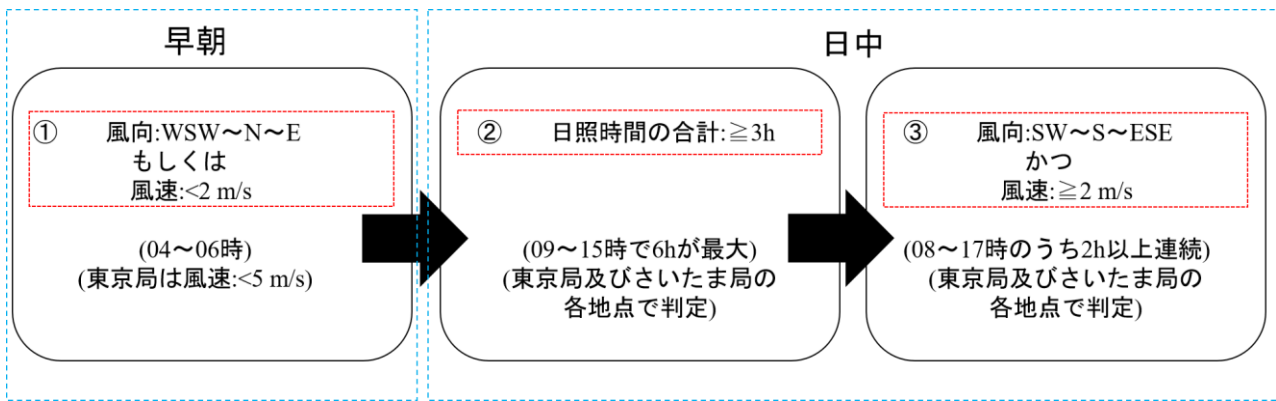


図1 “海風日”の抽出条件(吉門³⁾⁴⁾を基に作図)

3.2 解析対象地点の位置関係等

図2に、PM_{2.5}常時監視データ及び気象データ採取地点の位置関係を示す。常時監視データは、県南地域に位置する県安蘇庁舎(以下「佐野局」という。)、小山市役所(以下「小山局」という。)及び真岡市役所(以下「真岡局」という。)の3地点の結果を用いた。なお、令和2年度調査¹⁾においては、例年と同様、県北部に比べ、県南部でPM_{2.5}濃度が高い傾向がみられることが報告されており、県南地域を対象とすることで、当県におけるPM_{2.5}濃度上昇の影響を、より明確に捉えることができると考えた。気象データは、前述のとおり、吉門³⁾の報告に倣い、気象庁アメダスの設置地点である東京局及びさいたま局の結果を用いた。つまり、本報告における各地点の役割は、東京湾沿岸及び関東地方南部の地点では、海風日の判定、県南地域3地点では、県内のPM_{2.5}濃度推移の状況把握、となる。



図2 PM_{2.5}常時監視データ及び気象データ抽出地点 (□: PM_{2.5}常時監視結果、○: 気象庁アメダスデータ、太枠は成分分析結果をそれぞれ使用した)

3.3 解析に使用したデータ

解析期間は、平成24年度から令和元年度の夏季(7月及び8月)を対象とした。これは、当県におけるPM_{2.5}自動測定結果の遡れる限りでの年数という点に加え、複数年に及ぶ気候変動周期の影響

の低減という点を考慮したためである。PM_{2.5}自動測定結果は、県南地域3地点のPM_{2.5}質量濃度1時間値を使用した。なお、解析期間のうち、典型海風日の条件に合致しなかった日(計10日)は除外した。PM_{2.5}成分分析結果は、平成25年度から令和元年度の98日分のデータのうち、異常値を除いた89日分を解析に使用した。成分分析は、真岡局の1地点で実施しているため、そのデータを使用した。調査方法及び調査項目については、令和2年度調査¹⁾のとおりである。

3.4 高濃度日の定義

自動測定結果から、①3地点中2地点以上、②日平均値(1~24時)が20µg/m³以上、③日最高値が30µg/m³以上、をすべて満たした日を高濃度日とした。この基準については、特異的な高濃度事象の他に、県南地域のある程度広域での大気汚染を抽出することを目的とし、解析期間中における、各地点の箱ひげ図から、外れ値を除いた、PM_{2.5}質量濃度1時間値の最大値及び75%値を参考に設定したものである。

3.5 県内の風配の再確認

解析期間中の県内の風配について、前報²⁾と同様、夏季に特異性があるかどうかを調査する目的で、佐野市、小山市及び真岡市の3地点の気象庁アメダスデータ(風向風速)を使用し、風配の経月変化の再確認を行った。

4 解析結果及び考察

4.1 県南地域における風配の状況

図3に、県南地域3地点（佐野局、小山局及び真岡局）の風配の経月変化を示す。各地点の風配は、風向の1時間値を各風向毎（16方位）に積算し、風速の強さで5段階に色分けして示したものである。各地点の風配から、秋季から冬季（9～2月）に比べ、春季から夏季（3～8月）で南方向からの風の流入頻度の増加がみられ、本報告の解析対象期間においても、南方向からの風の流入頻度が増加していた。特に、各地点の当該期間の南方向の風は、2m/sから4m/sの比較的弱風域での頻度増加が顕著であった。なお、当県においては、同様の弱風域におけるPM2.5濃度上昇が観測されている²⁾。

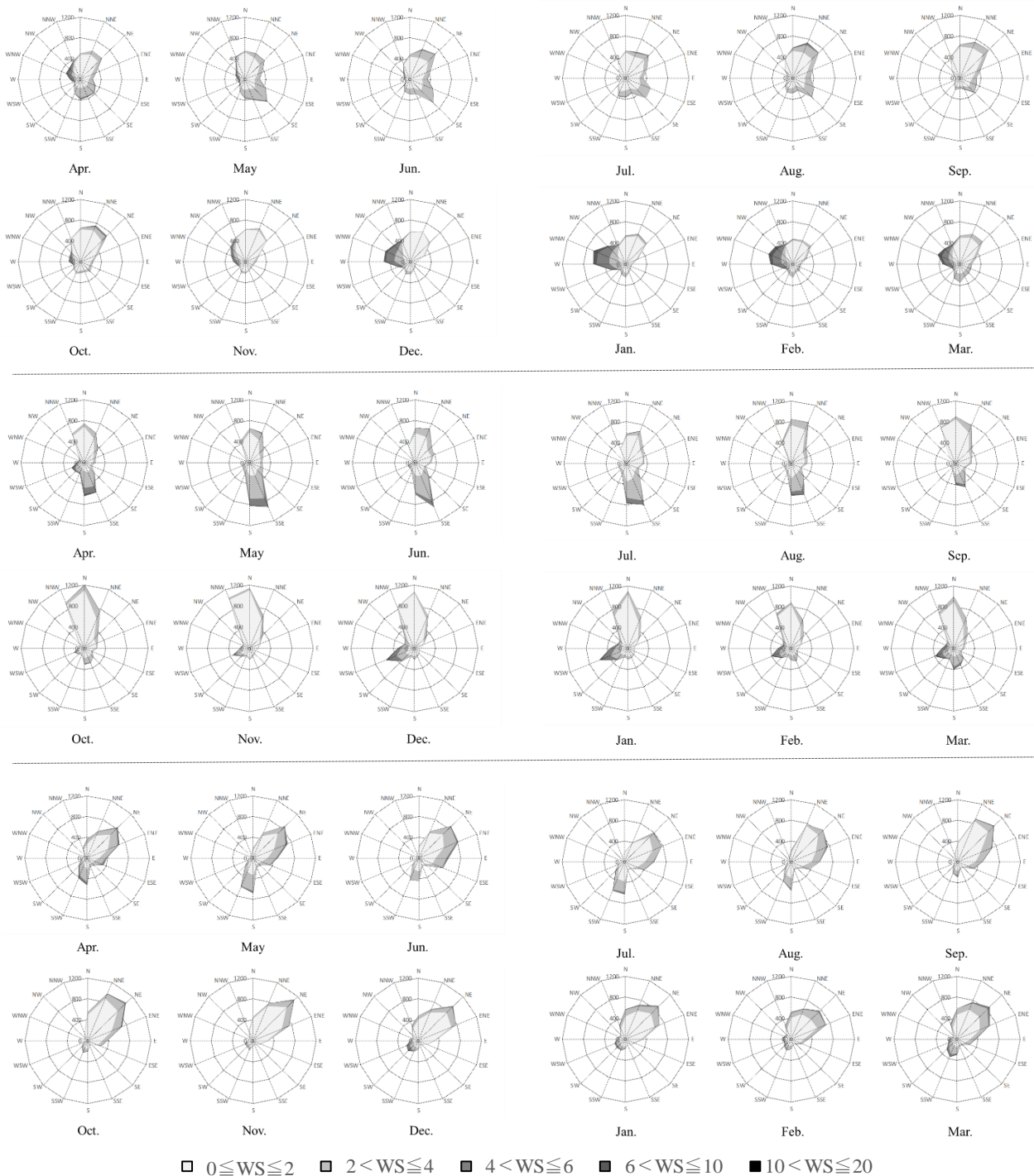


図3 県南地域3地点の風配図の経月変化
 (上段：佐野局、中段：小山局、下段：真岡局)
 (WSは風速 (m/s) を表す)

4.2 PM2.5 自動測定結果

4.2.1 高濃度日の発生状況

表1に、県南地域における高濃度日の発生状況を示す。海風日122日中50日、海風日と観測されなかった日(以下「非海風日」という。)364日中51日がそれぞれ高濃度日として観測された。高濃度日の発生日数は同程度であったものの、高濃度日の発生率は海風日が41%と非海風日の14%を大きく上回り、全観測日数に対する高濃度日の発生率(21%)と比較しても、特に、海風日に高濃度日となる割合が高かった。

なお、高濃度日の濃度変動については、後述の高濃度日以外の濃度変動パターンの解析結果とは異なる挙動を示し(例えば、前日の夜間から翌日の未明にかけて濃度が減少しない場合がある等)、海風日だけでは、高濃度日の濃度変動パターンを十分に説明できないことが分かった。したがって、PM2.5高濃度化には、海風日に加え、更に、別の気象条件等の寄与が予想されるため、従来の常時監視に加え、県内外の気象への注視の重要性が示唆された。

4.2.2 高濃度日以外の濃度変動パターン解析の概要

図4に、高濃度日以外の観測日(以下「平常時」という。)における、海風日及び非海風日の場合の県南地域3地点のPM2.5濃度の経時変化を示す。ここでは、海風日の発生によって、平常時のPM2.5濃度がどの程度変動するかを把握するため、海風日及び非海風日と観測された当日の24時間及び前日の24時間のPM2.5濃度についてそれぞれ抽出し、時間ごとのPM2.5濃度平均値をプロットした。これにより、おおよそ海風日の影響のみで、当県におけるPM2.5濃度変動パターンがどのように変化するかについて考察することができると考えた。なお、ここでいう海風日の影響とは、南方向からの移流といった物理現象によるものに加え、好天条件による光化学二次生成反応の促進等の化学反応によるものも含むことに注意が必要である。ここでは主に、【case1】:当日及び前日のいずれも非海風日だった場合、【case2】:当日が海風日で前日が非海風日だった場合、【case3】:当日及び前日のいずれも海風日だった場合、のケースについてそれぞれ示した。

4.2.3 平常時のPM2.5濃度変動の特性

平常時について、同じ地点で各濃度変動パターンを比較すると、非海風日が連続する【case1】及び海風日が連続する【case3】では当日の24時間の濃度変動パターン(以下、「ptnC」という)及び前日の24時間の濃度変動パターン(以下「ptnP」という)に差異はなく、同じ濃度変動パターンが繰り返されていた。

対照的に、当日と前日の気象条件が異なる【case2】では、10時以降は、海風日が連続する【case3】と一致した。ただし、【case2】及び【case3】のptnCの、未明から早朝(1時~6時)の濃度は、【case3】の方が大きかった。加えて、各地点で、【case2】のptnCに比べ【case3】のptnCの未明から早朝(1時~6時)の濃度が有意に上昇している時間もみられた。また、1日で見ると、海風日の場合の高い山及

表1 高濃度日の発生状況

	Observed day	High PM _{2.5} day	Incidence
Sea Brease day	122	50	41%
non Sea Brease day	364	51	14%
Total	486	101	21%

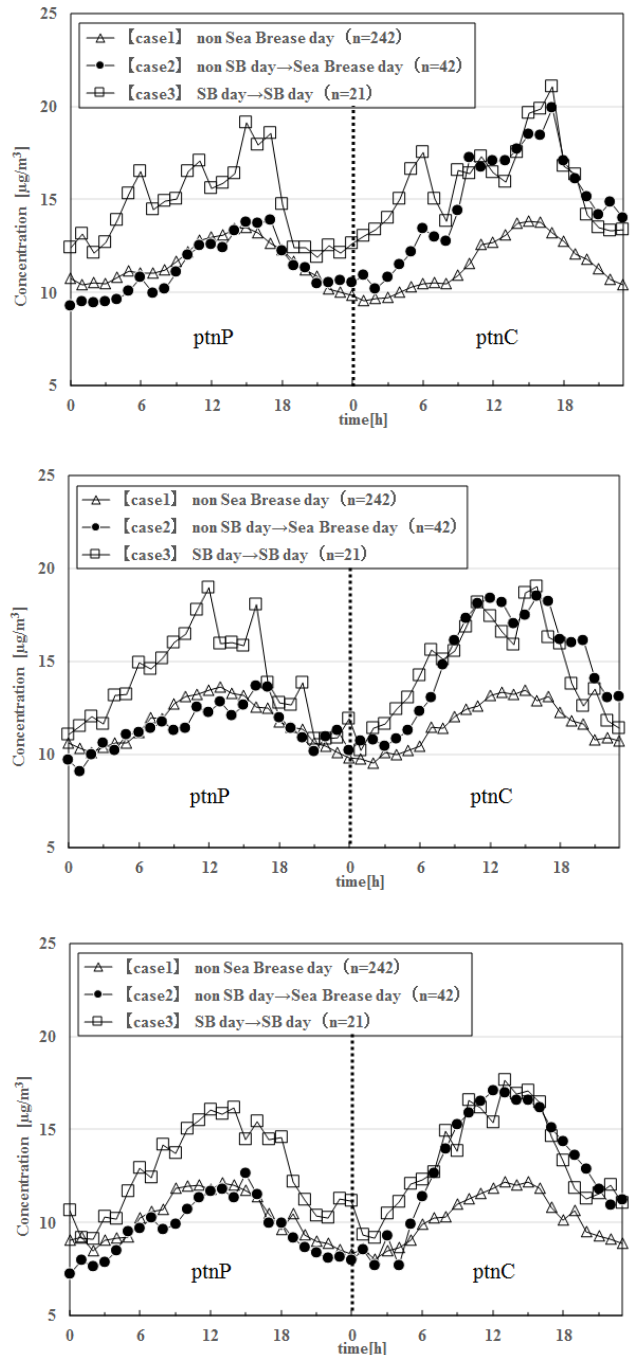


図4 各ケースの濃度変動パターン
(上段:佐野局、中段:小山局、下段:真岡局)
(SBは“Sea Brease”の略)

び非海風日の場合の低い山の各PM2.5濃度変動パターンは、地点ごとに再現性がみられた。したがって、海風日及び非海風日のそれぞれに、固有の濃度変動パターンがあり、おおそ気象条件のみで同様の濃度変動パターンが再現されるものの、海風日が連続する場合は、翌日の早朝に濃度差が生じる可能性が示唆された。

その他の特性として、【case2】及び【case3】の早朝（6時）の濃度差は、真岡局、小山局及び佐野局で、それぞれ約2.1、1.8及び4.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ となり、佐野局のみ、他の地点に比べ、特に濃度差が大きかった。加えて、各地点における【case2】のptnCは、真岡局はひと山型、小山局及び佐野局はふた山型であり、おおむね正午もしくは夕方（12時及び17～18時）にピークを示し、対照的に、ptnPでは正午過ぎから夕方（15～18時）にかけてピークを示した。

4.2.4 平常時のPM2.5濃度上昇の予測可能性

前述のとおり、“海風日”の判定条件③から、南寄りの風の判定時刻は、最も早くて8時であり、判定条件①から、その前に南寄りの風ではないことが示されている。したがって、海風日のような気象条件の場合、少なくとも県南地域においては、早朝からPM2.5濃度上昇が発生するような、「穏やかな気象場」である可能性が示唆される。実際に、吉門³⁴⁾の報告では、日照時間が十分に大きい海風日（5.1h以上）に限定した結果であるものの、関東南岸と東京都心内陸側の気温差が特に大きい場合、当日の天気図は、日本列島の南側に高気圧が広く張り出している状況が示されており、高気圧による大気拡散の抑制が、数日規模で続くものと予想される。

このことから、海風日の場合、風による拡散等の影響で急激な濃度変動を示すことは考えにくく、前述のPM2.5濃度変動パターンの特性と併せて、少なくとも平常時の場合、県内のPM2.5濃度変動パターンはある程度決まった変動を示すことが予想される。したがって、①前日の気象条件（海風日か否か）、②前日の濃度変動パターン、の2つを把握することで、当日が海風日かどうか判別できない段階でも、当日の10時時点のPM2.5濃度から、PM2.5濃度が上昇する可能性を示唆できることが期待される。

4.3 PM2.5成分分析結果

表2に、四季調査結果のうち、PM2.5質量濃度並びに主要成分である炭素成分及びイオン成分の計11項目について、表3には、微量成分である金属成分計28項目について、海風日及び非海風日の場合の平均値を示す。なお、測定値が検出下限値未満のデータについては検出下限値の半値を使用し、検出下限値未満の値が半数以上を占める場合は、表中の平均値を斜字で表記した。また、各成分の平均値には95%信頼区間を併記した。

加えて、海風日及び非海風日について、次の2つの要素を対象に統計解析を行った。

- ① 各項目（表2：Component、表3：Element）の濃度
- ② 主要成分、微量成分ごとに、各項目が属する各成分の総濃度（表2：Total components、表3：Total elements）で各項目の濃度を除した割合

具体的には、①及び②について、散布度の差を確認した後、有意差の検定を行った。単に有意差の検定のみを行わないのは、散布度の差が認められた場合、後の有意差の検定で第一種の過誤（偽陽性）の確率が上昇することが報告されているため⁵⁾である。散布度の差の確認には、有意水準を0.05としたシーゲル・テューキー検定を用い、後の有意差の検定には、有意水準を0.05としたマン・ホイットニーのU検定を用いた。U検定により、有意差が認められた成分について、いずれの日も斜字表記の成分を除きマーキング（①：*又は**、②：•又は●）した。なお、シーゲル・テューキー検定の結果、散布度の差が有意と認められた項目については、各項目名にマーキング（†又は‡）した。

表2 海風日及び非海風日におけるPM_{2.5}濃度及び主要成分濃度

	Sea breeze day	non Sea breeze day	
	Observed value	Observed value	
	(n=24)	(n=65)	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
PM _{2.5}	18.8±3.0	12.3±1.7	**
Component			$\mu\text{g}/\text{m}^3$
OC	4.2±0.6	2.4±0.3	**
EC	1.5±0.3	0.92±0.16	**
SO ₄ ²⁻	6.4±1.8	3.7±0.7	**
NO ₃ ⁻	0.17±0.04	0.20±0.07	
Cl ⁻	<i>0.017±0.006</i>	<i>0.033±0.017</i>	
NH ₄ ⁺	2.3±0.6	1.3±0.3	**
Na ⁺ †	0.12±0.03	0.12±0.03	
K ⁺	0.14±0.07	0.078±0.019	**
Mg ²⁺ ‡	0.016±0.007	0.015±0.004	
Ca ²⁺	<i>0.046±0.027</i>	<i>0.032±0.007</i>	
Total components	15±2.7	8.8±1.3	**

Uncertainties are 95% confidence level. †Calculation of the Siegel-Tukey test confirmed that the concentration of the component or element was significant. ‡Calculation of the Siegel-Tukey test confirmed that the percentage of the total concentration of these components or elements was significant. *P<0.05 in the Mann-Whitney U test used by the concentration of the component or element. **P<0.01 in the Mann-Whitney U test used by the concentration of component or element. ●P<0.05 in the Mann-Whitney U test used by the percentage of the total concentration of these components or elements. ●●P<0.01 in the Mann-Whitney U test used by the percentage of the total concentration of these components or elements.

主要成分については、各項目の濃度でみると、海風日の場合、非海風日に比べOC、EC、SO₄²⁻、NH₄⁺及びK⁺が有意に上昇していた。特に、ECとK⁺を除く3成分については、光化学二次生成反応が活発な場合に顕著な上昇を示すことが知られており、海風日の好天条件によって、この反応が促進された結果であると推察された。また、主要成分の総濃度に対する割合でみると、有意差が認められた項目はなかった。

微量成分については、各項目の量でみると、アルミニウム (Al)、バナジウム (V)、マンガン (Mn)、鉄 (Fe)、セレン (Se)、ルビジウム (Rb)、アンチモン (Sb)、バリウム (Ba)、ランタン (La)、タングステン (W) 及び鉛 (Pb) が有意に上昇していた。なお、Laについては、非海風日のデータの半数以上が下限値未満であったことから、参考値とした。これらのうち、主にV、Laは化石燃料系やその触媒⁶⁷⁾、Mn及びPbは鉄鋼業の指標成分であることが報告されており⁸⁾、当県においては、それらの発生源の影響が、海風日の場合に、顕著となる可能性が示唆された。また、微量成分の総濃度に対する割合でみると、上記のうちV、Mn、Se及びRbに加え、クロム (Cr) で有意差が認められた。Crについては、前述のLaと同様の理由から参考値とした。Crを除く項目については、海風日の場合、濃度が有意に上昇していることから、各項目の濃度の変化が総濃度の変化に比べ大きい可能性が示された。特に、PM2.5中のRbについては報告例が少なく、当県におけるPM2.5濃度上昇に関連する何らかの指標成分である可能性も示唆された。

PM2.5濃度の発生源の推定に有効な指標であると考えられるV/Mn比⁹⁾及びAs/V比¹⁰⁾は、海風日及び非海風日の平均値で、V/Mn比がそれぞれ1.2及び1.4、As/V比がそれぞれ0.20及び0.76であった。微小粒子のV/Mn比はおよそ0.21~0.28であることが報告されており¹¹⁾、この値と比べると、いずれの日についても大きい結果であった。また、石炭、重油及びガソリン燃焼由来の浮遊粉じんのAs/V比は、それぞれ4.8、0.02及び1.1であることが報告されており¹²⁾、海風日の場合、重油燃焼由来の粉じんのAs/V比に、より近づくことが示された。加えて、北京で観測されたPM2.5のAs/V比は8.5であったことが報告されており¹³⁾、越境輸送による可能性は低いことが示唆された。

5 まとめ

夏季(7月及び8月)における、8か年分のPM2.5常時監視結果(成分分析結果については7か年分)を光化学オキシダント高濃度時の気象パターン抽出事例に倣い、場合分けした後、各濃度変動パターンや特異性について解析した。

自動測定結果から、海風日の場合に、県南地域における高濃度日の発生率が顕著に上昇していることが分か

表3 海風日及び非海風日における微量成分濃度

Element	Sea brease day	non Sea brease day	ng/m ³
	Observed value	Observed value	
	(n=24)	(n=65)	
Be	0.098±0.016	0.080±0.011	
Al	29±10	20±3	*
Sc [‡]	0.17±0.12	0.092±0.026	
Ti	3.2±0.9	3.0±0.7	
V	4.2±1.4	2.2±0.4	** ●
Cr	0.76±0.22	0.80±0.17	●
Mn	3.5±0.7	1.9±0.3	** ●●
Fe [‡]	63±12	42±8	**
Co	0.086±0.074	0.094±0.047	
Ni	3.1±2.5	3.1±1.7	
Cu [‡]	3.1±1.8	2.4±0.5	
Zn	27±11	16±3	
As [‡]	0.71±0.25	0.92±0.33	
Se	1.3±0.4	0.66±0.13	** ●
Rb	0.20±0.06	0.098±0.020	** ●●
Mo [†]	0.88±0.49	1.2±0.4	
Cd [‡]	0.14±0.06	0.13±0.05	
Sb	1.0±0.6	0.73±0.18	*
Cs	0.031±0.008	0.022±0.004	
Ba	4.7±3.8	2.7±0.8	*
La	0.062±0.022	0.039±0.007	**
Ce	0.12±0.12	0.075±0.020	
Sm	0.047±0.010	0.038±0.006	
Hf	0.12±0.06	0.10±0.03	
Ta	0.22±0.11	0.27±0.08	
W	0.29±0.11	0.17±0.05	*
Th	0.055±0.017	0.038±0.009	
Pb [‡]	4.6±1.4	3.1±0.5	*
Total elements	152±35	103±14	**

Uncertainties are 95% confidence level.†Calculation of the Siegel-Tukey test confirmed that the concentration of the componet or element was significant.‡Calculation of the Siegel-Tukey test confirmed that the percentage of the total concentration of these components or elements was significant.*P<0.05 in the Mann-Whitney U test used by the concentration of the componet or element.**P<0.01 in the Mann-Whitney U test used by the concentration of component or element.●P<0.05 in the Mann-Whitney U test used by the percentage of the total concentration of these components or elements.●●P<0.01 in the Mann-Whitney U test used by the percentage of the total concentration of these components or elements.

った。加えて、平常時では、海風日及び非海風日それぞれに、固有の濃度変動パターンがあり、おおよそ気象条件によって、同様の濃度変動パターンが再現される可能性が示唆された。なお、PM2.5 高濃度化は、更に、別の気象条件等の影響が予想された。

また、成分分析結果から、光化学二次生成反応の促進に起因する成分の有意な濃度上昇や特定の発生源に起因する元素の構成の変化が確認され、当県においては、海風日の場合に、それらの影響が顕著となる可能性が示唆された。

本報告により、気象条件による大気汚染物質の高濃度化事例解析と PM2.5 濃度の常時監視とを組み合わせることで、県内の PM2.5 濃度上昇について、その発生メカニズムの詳細な把握と、将来的な濃度予測を行うことができる可能性を示せたと考える。

今後は、その他の季節についても解析を進め、当県における大気汚染に係る発生源対策と同様に、県内外の気象との関連性について注視し、広角的な大気汚染対策に生かしたい。

6 参考文献

- 1) 栃木県保健環境センター年報、26、77-84、2021.
- 2) 栃木県保健環境センター年報、25、73-79、2020.
- 3) Yoshikado H., Intense Summer Heat in Tokyo and Its Suburban Areas Related with Variation in the Synoptic-Scale Pressure Field: A Statistical Analysis, *J. Applied Meteor. Climat.*, **52**, 2065-2074, 2013.
- 4) 吉門ら、関東中央部における近年の高濃度オキシダントに関わる気候変化の解析、大気環境学会誌、49、59-67、2014.
- 5) Kasuya E., Mann-Whitney U test when variances are unequal, *Animal Behaviour*, **61**, 1247-1249, 2001.
- 6) Olmez et al., Rare Earths : Atmospheric Signatures for Oil-Fired Power Plants and Refineries, *Science*, **229**, 966-968, 1985.
- 7) Kitto et al., Rare Earth Distributions in Catalysis and Airborne Particles, *Environ. Sci. Technol.*, **26**, 1368-1375, 1992.
- 8) 溝畑ら、堺における大気浮遊粒子状物質中の諸元素の発生源の同定(I)、大気汚染学会誌、15、198-206、1980.
- 9) Mukai et al., Lead isotope ratios of airborne particulate matter as tracers of long-range transport of air pollutants around Japan, *J.Geophys.Res.*, **99** 3717-3726, 1994.
- 10) 日置ら、降水中微量金属元素濃度比および鉛同位体比による長距離輸送と地域汚染の解析、大気環境学会誌、43、100-111、2008.
- 11) 日置ら、松本、大阪、つくばで観測した浮遊粉じん中金属元素濃度比による長距離輸送と地域汚染特性の解析、大気環境学会誌、44、91-101、2009.
- 12) Arditsoglou, A., C. Samara, Levels of total suspended particulate matter and major trace elements in Kosovo: a source identification and apportionment study, *Chemosphere*, **59**, 669-678, 2005.
- 13) 米持ら、2013 年 1 月に中国北京市で採取した高濃度 PM2.5, PM₁ の特徴、大気環境学会誌、48、140-144、2013.

☆ 微小粒子状物質 (PM2.5) について

右図に PM2.5 生成の模式図について示す。PM2.5 の発生源は、人為起源及び自然起源に区分され、その発生メカニズムは、物質の燃焼や火山活動により直接排出される一次排出と、環境中に放出されたガス状物質が化学変化等により粒子化する二次生成に大別される。特に、人為起源によるものは、工場からの粉じん、自動車、船舶からのディーゼル粒子等の一次排出、及び環境中に放出された硫黄酸化物 (SOx)、窒素酸化物 (NOx)、揮発性有機化合物 (VOC) などの化学変化による二次生成などに起因するとされている。

そのため、PM2.5 は、多様な無機成分と有機成分により構成される。主に、無機成分は、硫酸イオン (SO₄²⁻) や硝酸イオン (NO₃⁻) のような水溶性イオンや金属酸化物、及びススなどに代表される元素状炭素 (EC) などが挙げられ、有機成分は、VOC の化学変化や半揮発性 VOC からエアロゾル化したもの等、多岐にわたることが知られている。

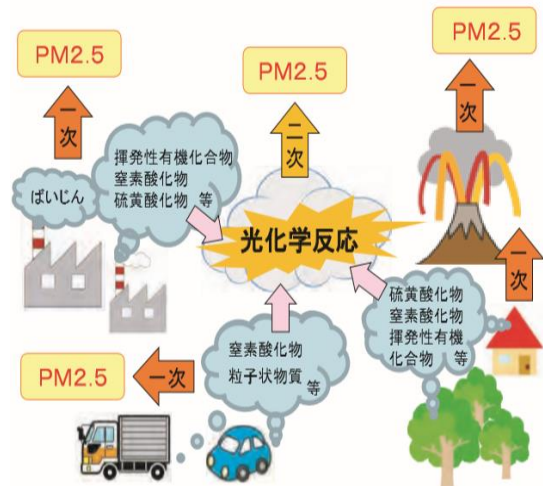


図 PM2.5 生成の模式図
(栃木県 HP より引用)