

川崎市における微小粒子状物質 (PM2.5) の成分組成 (2015 年度)

Chemical Characteristic Analysis of PM2.5 in the Ambient Air on Kawasaki City (2015)

田中 佑典 Yusuke TANAKA 鈴木 義浩 Yoshihiro SUZUKI 三澤 隆弘 Takahiro MISAWA

要旨

大気中の微小粒子状物質による汚染状況を把握するため、一般環境として田島及び高津の2地点、道路沿道として池上1地点の計3地点でPM2.5のサンプリングを各季節2週間実施し、PM2.5質量濃度、水溶性イオン成分、炭素成分、水溶性有機炭素成分、無機元素の分析を行った。また、成分分析データを用いてCMB法及びPMF法により、発生源寄与率の推定を試みた。その結果、2015年度のPM2.5質量濃度の年平均値は田島 $16.2\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、高津 $15.7\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、池上 $18.1\mu\text{g}/\text{m}^3$ であった。PM2.5中の水溶性イオン成分については、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 NH_4^+ といった二次生成粒子成分が大半を占め、炭素成分については、有機炭素は一般環境と道路沿道で大きな差異がみられなかつたが、元素状炭素は道路沿道で濃度が高かった。発生源寄与率の推定では、二次粒子が多くを占めており、他に本市の発生源の特徴である石油燃焼や自動車排気の寄与が大きかった。

キーワード：PM2.5、成分組成、寄与率

Key words : PM2.5, Chemical composition, Contribution rate

1 はじめに

環境基本法では、大気中の粒径 $10\mu\text{m}$ 以下(100%カット)の浮遊粒子状物質(SPM)について環境基準が定められており、2009年9月には、粒径 $2.5\mu\text{m}$ 以下(50%カット)の微小粒子状物質(以下、PM2.5)の環境基準が「1年平均値 $15\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下であり、かつ1日平均値 $35\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下であること」と定められた。

また、PM2.5の対策を推進するうえで、PM2.5やその前駆物質の大気中の変化等に関する知見が十分でないことから、環境省は2011年7月に「微小粒子状物質(PM2.5)の成分分析ガイドライン(以下、成分分析ガイドライン)」を、2012年4月に「大気中微小粒子状物質(PM2.5)成分測定マニュアル」(以下、成分測定マニュアル¹⁾)を策定、さらに2013年6月及び2014年7月に成分測定マニュアルを一部改訂し、PM2.5の質量濃度及び成分組成の実態把握を図っている。

本市では、2003年度からマルチノズルカスケードインパクターサンプラーを用いて粒径 $2.5\sim10\mu\text{m}$ の粗大粒子とPM2.5について分粒捕集を行い、粒子状物質濃度及び成分組成の調査を実施してきた²⁾。

2013年度以降は、環境省の「成分分析ガイドライン及び成分測定マニュアル」に従って、FRM2025iサンプラー(FRM認証機)を用い、各季節で2週間のPM2.5質量濃度及び成分組成のサンプリングを実施している³⁾。

本稿では、2015年度の本市におけるPM2.5の実態を把握するため、PM2.5質量濃度、水溶性イオン成分、炭素成分、水溶性有機炭素成分、無機元素を分析し、さらにその成分分析データを用いて発生源寄与率の推

定を試みたので、それらの結果について報告する。

2 調査方法

2.1 調査地点

調査地点を図1に示す。一般環境の調査地点としては、田島一般環境大気測定期局仮設局(以下、田島)、高津一般環境大気測定期局(以下、高津)の2地点とした。道路沿道の調査地点としては、池上自動車排出ガス測定期局(以下、池上)の1地点とした。

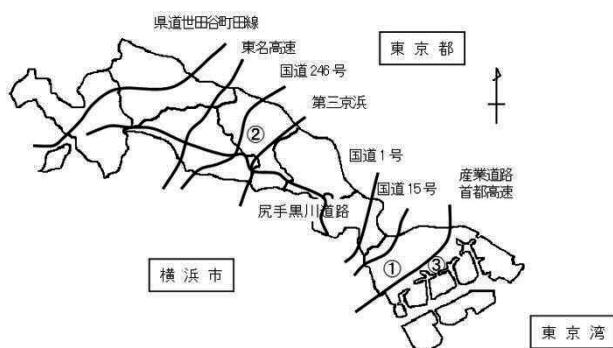


図1 調査地点
(一般環境:①田島、②高津、道路沿道:③池上)

2.2 試料採取

PM2.5の捕集には、FRM2025iサンプラー(Thermo Fisher Scientific社製)を用い、各調査地点に2台ずつ設置した。捕集用フィルタには、質量濃度、無機元素の測定用として、四つ化エチレン樹脂製であるPTFEフィルタ(Pall社製Teflo)を使用した。また、

水溶性イオン成分、炭素成分、水溶性有機炭素成分の測定用として、石英纖維フィルタ（Pall 社製 Pallflex 2500QAT-UP）を使用した。

2.3 調査期間

調査は、春夏秋冬で各2週間、年間で計56回のサンプリングを実施した。詳細な調査日程は表1のとおりであり、10時から翌日10時までの24時間サンプリングとした。なお、サンプラーの異常等により欠測とした期間は次のとおりである。

田島（PTFE フィルタ）：1月22日

表1 2015年度の調査日程

	春季	夏季	秋季	冬季
1日目	5月7日	7月22日	10月21日	1月20日
2日目	5月8日	7月23日	10月22日	1月21日
3日目	5月9日	7月24日	10月23日	1月22日
4日目	5月10日	7月25日	10月24日	1月23日
5日目	5月11日	7月26日	10月25日	1月24日
6日目	5月12日	7月27日	10月26日	1月25日
7日目	5月13日	7月28日	10月27日	1月26日
8日目	5月14日	7月29日	10月28日	1月27日
9日目	5月15日	7月30日	10月29日	1月28日
10日目	5月16日	7月31日	10月30日	1月29日
11日目	5月17日	8月1日	10月31日	1月30日
12日目	5月18日	8月2日	11月1日	1月31日
13日目	5月19日	8月3日	11月2日	2月1日
14日目	5月20日	8月4日	11月3日	2月2日

2.4 分析方法

分析は、環境省が示した成分測定マニュアルに準拠して実施した。

2.4.1 フィルタの秤量

PTFE フィルタは、温度 21.5 ± 1.5 °C、相対湿度 $35 \pm 5\%$ の恒温室で 24 時間以上静置して恒量とした後、METTLER TOLEDO 社製 電子天秤 XP6 を用い秤量した。なお、秤量は同条件で捕集前後に行った。また、ブランクフィルタを同時に5枚秤量し、捕集前後の秤量誤差を補正した。

2.4.2 水溶性イオン成分

水溶性イオン成分8項目 (Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+}) の分析はイオンクロマトグラフ法により行った。

石英纖維フィルタ 1/2 試料を栓付プラスチック試験管に入れ、超純水 10mL を加えた後、超音波抽出を 10 分間行った。その後、抽出液をディスポーザブルシリンジに取り、メンブレンフィルタ（アドバンテック社製 PTFE 0.20μm）で粒子状物質を除去したものを分析用試料とし、イオンクロマトグラフ装置（DIONEX 社製 ICS-2100/1600）で分析した。測定条件を表2に示す。

表2 イオンクロマトグラフ測定条件

	陰イオン (ICS-2100)	陽イオン (ICS-1600)
カラム	IonPac AS20 4×250 mm	IonPac CS16 5×250 mm
溶離液	15–50 mmol/L 水酸化カリウム	30 mmol/L メタンスルホン酸
流量	1.0 mL/min	1.0 mL/min
サプレッサー 電流値	130 mA	90 mA
試料注入量	100 μL	100 μL

2.4.3 炭素成分

有機炭素（以下、OC）及び元素状炭素（以下、EC）は、石英纖維フィルタを 1 cm² に打ち抜いたものを分析用試料とし、Chow ら⁴⁾の分析法を参考として、カーボンアナライザー（SUNSET Laboratory 社製 Lab Instrument Model1）を用いた IMPROVE プロトコルの反射光補正により分析した。測定条件を表3に示す。

表3 炭素分析の炭素フラクションと測定条件

フラクション	設定温度 (°C)	分析雰囲気
OC1	120	He
OC2	250	He
OC3	450	He
OC4	550	He
EC1	550	98%He+2%O ₂
EC2	700	98%He+2%O ₂
EC3	800	98%He+2%O ₂

2.4.4 水溶性有機炭素成分

水溶性有機炭素（以下、WSOC）は、水溶性イオン成分と同様に、石英纖維フィルタ 1/2 試料の抽出液の一部を全有機体炭素計（analytikjena 社製 multi N/C 3100）を用い、Non-Purgeable Organic Carbon 法（NPOC 法）で分析した。

2.4.5 無機元素

無機元素 29 項目（Na、Al、K、Ca、Sc、Ti、V、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、As、Se、Rb、Mo、Sb、Cs、Ba、La、Ce、Sm、Hf、Ta、W、Pb、Th）は、サポートリングを取り除いた PTFE フィルタ 1/2 試料を分解容器に入れ、硝酸 2.5mL、ふつ化水素酸 1mL、過酸化水素水 0.5mL を加え、分解容器を密閉したのちマイクロウェーブ試料分解装置（analytikjana 社製 TOPwave）を用いて加熱分解した。試料が分解されていることを確認し、分解容器ごとホットプレートで加熱し、試料が 1 滴程度になるまで蒸発させた。その後、2%硝酸で 20mL（冬季のみ 15mL）に定容したものを分析用試料とし、ICP 質量分析装置（Agilent 社製 7700x）で分析した。

3 分析結果及び考察

3.1 質量濃度

各調査地点におけるPM2.5質量濃度の年平均値を表4に、季節変化を図2に、日平均値推移を図3に示す。

PM2.5質量濃度の年平均値は、一般環境より道路沿道で高かった。平均値が最も高濃度を示した季節は全ての地点で夏季であった。最も低濃度を示した季節は全ての地点で冬季であった。各季節2週間ずつの調査であることから、気象状況等の影響により、各季節におけるPM2.5質量濃度の傾向は毎年異なる。

図3から、 $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ を超える濃度を示した日は、田島では夏5日目、高津ではなし、池上では夏5日目、夏10日目であった。

表4 PM2.5質量濃度の年平均値($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

	一般環境		道路沿道
	田島	高津	池上
質量濃度	16.2	15.7	18.1

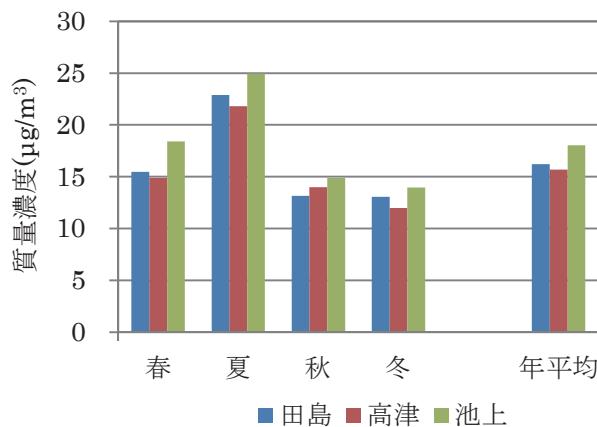


図2 PM2.5質量濃度の季節変化

3.2 水溶性イオン成分

各調査地点における水溶性イオン成分の年平均濃度を表5に、季節変化を図4に示す。

PM2.5中の水溶性イオン成分は、いずれの調査地点においても NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 NH_4^+ といった二次生成粒子を構成する主要成分が大半を占めており、年平均濃度をみると、 NO_3^- は田島 $1.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、高津 $1.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、池上 $1.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 SO_4^{2-} は田島 $4.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、高津 $4.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、池上 $4.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 NH_4^+ は田島 $2.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、高津 $1.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、池上 $2.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ であり、いずれもわずかに道路沿道で高かった。

PM2.5中の総イオン濃度は、全ての地点で夏季が高くなっている、陰イオンは、 SO_4^{2-} がそのほとんどを占めることから二次生成が活発であったと考えられる。二次生成粒子の代表的なイオン成分である SO_4^{2-} と NO_3^- を比較すると、夏季は上記の通り SO_4^{2-} が陰イオンのほとんどを占め、冬季では NO_3^- が SO_4^{2-} よりも濃度が高くなった。

表5 水溶性イオン成分の年平均濃度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

	一般環境		道路沿道
	田島	高津	池上
Cl^-	0.13	0.12	0.17
NO_3^-	1.3	1.3	1.6
SO_4^{2-}	4.8	4.4	4.9
Na^+	0.16	0.13	0.14
NH_4^+	2.0	1.9	2.1
K^+	0.10	0.10	0.13
Mg^{2+}	0.027	0.020	0.030
Ca^{2+}	0.063	0.044	0.11

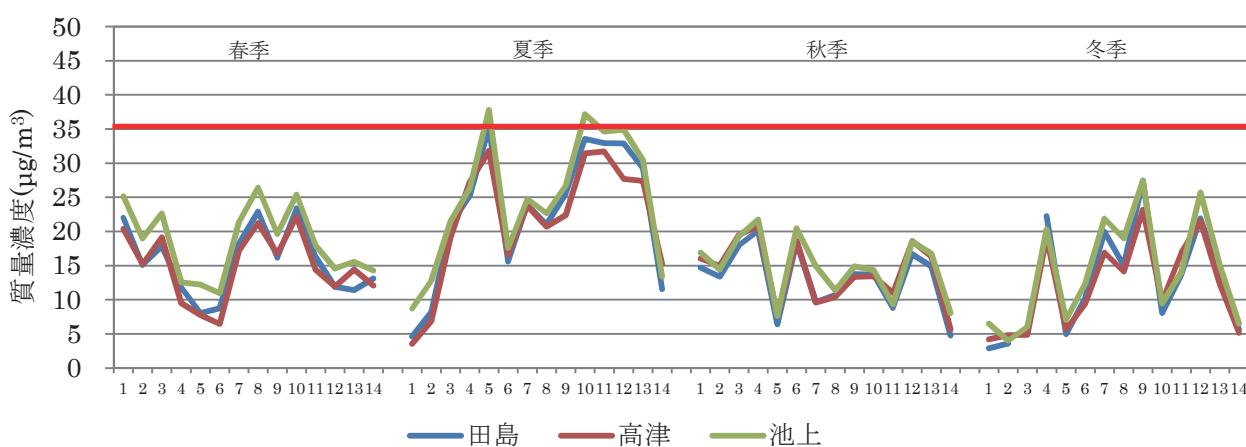


図3 PM2.5質量濃度の日平均値推移

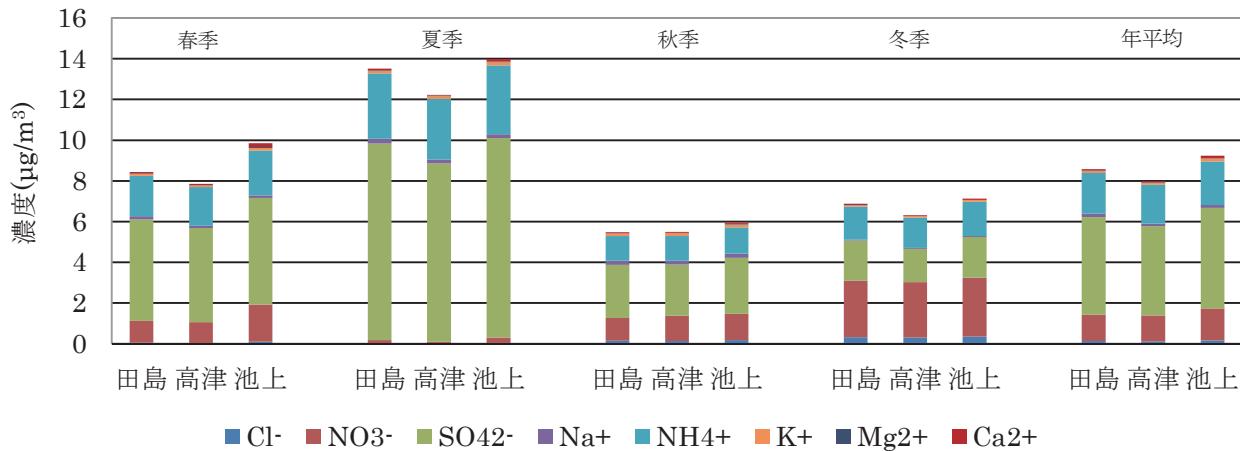


図4 水溶性イオン成分濃度の季節変化

3.3 炭素成分

各調査地点におけるOC及びECの年平均濃度を表6に、季節変化を図5に示す。

PM2.5中のOCの年平均濃度は、田島 $3.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、高津 $3.9\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、池上 $3.7\mu\text{g}/\text{m}^3$ であり、ECは、田島 $1.2\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、高津 $1.1\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、池上 $2.3\mu\text{g}/\text{m}^3$ であった。OCは一般環境と道路沿道で大きな差異はみられなかったが、ECは道路沿道で高かった。

季節ごとのOC濃度の変化をみると、いずれの調査地点においても夏季及び秋季に高い傾向を示した。

EC濃度の変化をみると、季節ごとの変化はOCに比べ小さく、季節による一貫した傾向はみられなかった。

表6 炭素成分の年平均濃度($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

	一般環境		道路沿道
	田島	高津	池上
OC	3.5	3.9	3.7
EC	1.2	1.1	2.3

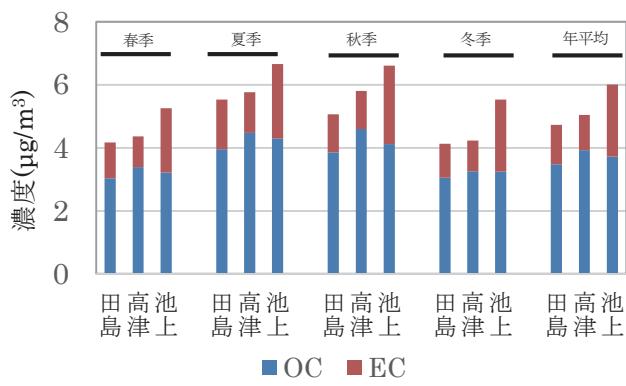


図5 炭素成分濃度の季節変化

3.4 水溶性有機炭素成分

PM2.5中の二次有機粒子の指標となるWSOCを定量し、OCからWSOCを差し引いたものを水不溶性有機炭素(以下、WIOC)とした。

各調査地点におけるOC中のWSOCとWIOCの年平均濃度を表7に、季節変化を図6に、OC中のWSOCとWIOCの割合を図7に示す。

WSOCの年平均濃度は、田島 $2.7\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、高津 $3.0\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、池上 $2.8\mu\text{g}/\text{m}^3$ であった。季節ごとのWSOCの変化をみると、いずれの調査地点においても夏季及び秋季に高い傾向を示した。夏季に高くなる要因としては、光化学反応により二次生成が活発化した影響、また、秋季に高くなる要因としては、野焼きなどのバイオマス燃焼による影響が考えられる⁵⁾。関東における過去の同季節でも、バイオマス燃焼が要因のひとつとみられる高濃度事例が報告されている⁶⁾。WIOCは、最も高濃度を示したのは冬季であった。WIOCは半揮発性物質を含むことから、気温の低い冬季に粒子化が促進したと考えられる⁵⁾。

OC中のWSOCとWIOCの割合をみると、WSOCの割合は田島78%、高津77%、池上74%であり、一般環境と道路沿道で差異はほとんどみられなかった。

表7 WSOCとWIOCの年平均濃度($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

	一般環境		道路沿道
	田島	高津	池上
WSOC	2.7	3.0	2.8
WIOC	0.78	0.91	0.95

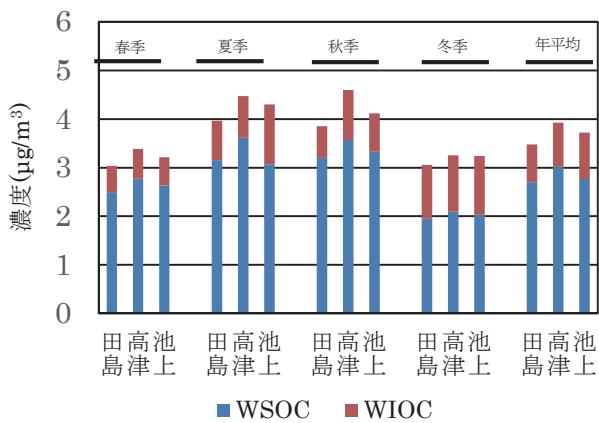


図6 WSOC濃度とWIOC濃度の季節変化

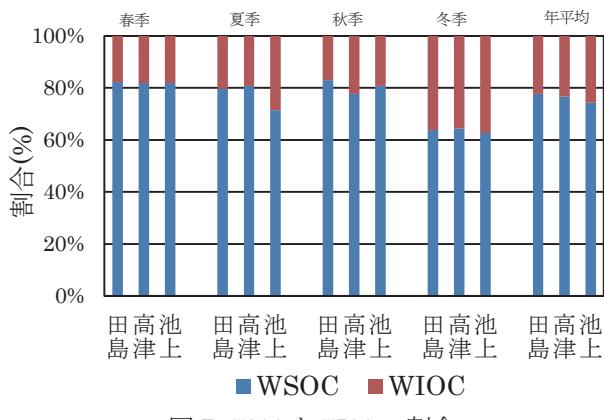


図7 WSOCとWIOCの割合

3.5 無機元素

各調査地点における無機元素の年平均濃度を表8に示す。

年平均濃度が高かったのはNa、K、Ca、Feであった。これらの元素は、自然発生源由来である海塩粒子（Na、K）や土壤粒子（Ca、Fe）に多く含まれており、他の元素と比べて環境中に多く存在しているため、濃度が高くなつたと考えられる。臨海部の池上と田島で濃度が高いV、Cr、Mn、Fe、Ni、Mo、Wは固定発生源の影響、道路沿道で濃度が高いZn、Sb、Baは移動発生源の影響を受けたものと推測される^{7)~9)}。

季節ごとの変化で特徴的であったのは、重油燃焼の指標であるV、Niで、南風が卓越する夏季において濃度が高くなる傾向がみられた。

なお、Sc、Cs、Sm、Hf、Ta、Thは含有量がごく少なく、大半が検出下限値未満であった。

3.6 発生源寄与率の推定

3.6.1 CMB法

2015年度のPM2.5成分分析データを用いて、CMB法（Chemical Mass Balance法）による解析を行った。CMB法は、発生源と環境の化学種の組成（発生源プロファイル）から、発生源の寄与を求める方法である¹⁰⁾。環境省の公表している報告書のプロファイル¹¹⁾から、道路粉じん、海塩粒子、鉄鋼工業、石油燃焼、廃棄物

表8 無機元素の年平均濃度 (ng/m^3)

	一般環境		道路沿道
	田島	高津	池上
Na	140	110	140
Al	28	25	40
K	90	96	120
Ca	38	22	74
Ti	3.6	3.3	4.8
V	11	5.0	13
Cr	2.5	0.86	4.5
Mn	10	4.9	15
Fe	170	87	250
Co	0.11	0.046	0.097
Ni	4.3	1.9	5.4
Cu	4.7	3.4	5.7
Zn	32	23	41
As	0.91	0.82	0.94
Se	1.1	0.98	1.2
Rb	0.26	0.23	0.38
Mo	1.8	0.66	3.1
Sb	0.92	0.93	1.2
Ba	2.8	3.3	4.6
La	0.077	0.065	0.11
Ce	0.13	0.11	0.19
W	0.35	0.17	0.54
Pb	5.7	4.9	7.9

焼却、自動車排気、ブレーキ粉じんの7種を抜き出し、さらに独自に二次生成粒子の主成分である硫酸アンモニウム、硝酸アンモニウム、有機炭素を追加し解析に用いた。ソフトウェアは、花石竜治氏が公開しているCMB8Jを用いた¹²⁾。

CMB法による解析の対象となるのは一次粒子のみであるが、PM2.5を構成する成分の多くは二次生成粒子であることから、先述のとおりプロファイルに追加し、寄与率（図8）を算出した。

図8をみると、二次生成粒子の寄与が最も大きく、それに次いで、石油燃焼、自動車排気の順で寄与が大きい結果を示していた。特に、池上では秋、冬に自動車排気が大きな寄与を示した。また、石油燃焼は臨海部からの風向である南風が卓越する春季及び夏季に池上と田島において大きな寄与を示しており、臨海部の発生源の影響を反映したものと推測される。

3.6.2 PMF法

2015年度のPM2.5成分分析データを用いて、PMF法（Positive Matrix Factorization法）による解析を行った。PMF法は、多くのデータを統計的に処理して発生源解析を行う手法で、発生源プロファイルを必要とせずに発生源解析が可能である¹⁰⁾。ソフトウェアは、アメリカ合衆国の環境保護庁が公開しているPMF3.0

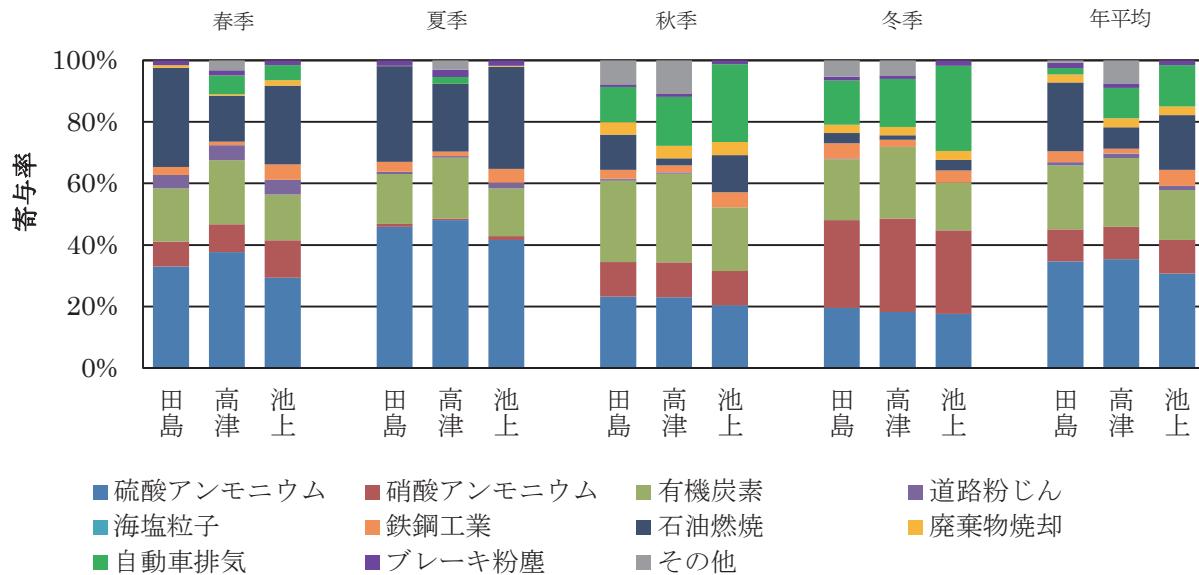


図8 CMB法による発生源寄与率

を用いた¹³⁾。

発生源解析には、今回測定した成分分析データのうち、指標元素となり得る Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、OC、EC、Na、Al、V、Mn、Fe、Ni、Cu、Zn、As、Se、Rb、Mo、Sb、Ba、Pb の 24 成分を用いた。検出下限値未満の値は、検出下限値の 1/2 として扱った。

発生源の要素は、硫酸系二次粒子、硝酸系二次粒子、塩化物系二次粒子、有機系粒子、重油燃焼、石炭燃焼、鉄鋼工業、バイオマス燃焼、ディーゼル車、海塩粒子、土壤粒子とした。また、発生源数は、発生源数ごとに割り振られた成分割合を比較した結果、最も妥当であろうと考えられる発生源 6 種類に決め、発生源プロファイルを作成し、寄与率（図9）を算出した。

図9から、発生源ごとの寄与割合の変動をみると、各季節における特徴として、春季及び夏季は硫酸系二次粒子、有機系粒子、重油燃焼が高くなる傾向がみられた。光化学反応により二次生成が活発化した影響及び南風が卓越し発生源の影響を受けたことが要因と考えられる。また、春季については、上記に加えて石炭燃焼及び土壤粒子が高くなる傾向が見られた。秋季及び冬季は硝酸系二次粒子+塩化物系二次粒子、ディーゼル車が高くなる傾向がみられた。気温の低下により、硝酸塩について粒子と気体の平衡が粒子側に傾いたことにより粒子化が促進した影響を受けたことが要因と考えられる。また、秋季については、上記に加え有機系粒子及びバイオマス燃焼が最も大きい寄与を示しており、野焼きの影響を受けたことが要因と考えられる。

調査地点による特徴としては、発生源が近傍にある田島及び池上では、高津に比べて、重油燃焼及び鉄鋼業の寄与が大きかった。また、道路沿道である池上ではディーゼル車の寄与が大きかった。

3.6.3 発生源寄与率の推定結果及び考察

今回行ったCMB法とPMF法による解析結果を併せてみると、寄与率を直接比較するには難があるものの、石油燃焼（重油燃焼）や自動車排気（ディーゼル車）などは季節及び地点における特徴が同様の傾向を示し、本市におけるPM2.5各発生源寄与の実態を少なからず反映していると考えられる。

2012年度調査までは種類の異なるサンプラーを用いていたことによるOC及びECの過大評価や、金属分析の前処理を開放系で実施していたことによる汚染及び成分損失の影響があり、PMF法において一次粒子と二次生成粒子の分離や各発生源の分離が不十分となることがあった。

2013年度以降の調査では、サンプラーの種類を統一し、また、研究所の移転により適切な分析環境を整備したことで、解析精度は向上している。しかし、CMB法では解析に用いる発生源プロファイルが本市の実態を反映しているとは限らないこと、PMF法では先述したように分離が不十分となることなど、いずれの解析法においても問題点があるため、それらを解決していくことで、より精度の高い発生源寄与率の推定ができるものと考えられる。

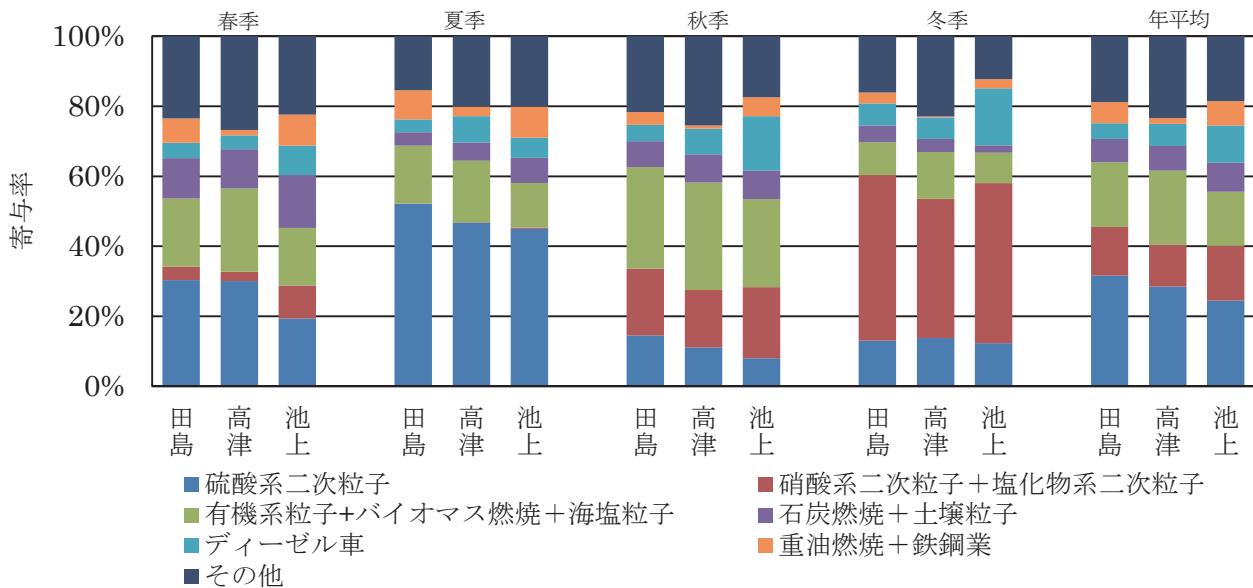


図9 PMF法による発生源寄与率

4まとめ

- (1) 2015年度における市内3地点のPM2.5年平均濃度は、田島16.2 µg/m³、高津15.7 µg/m³、池上18.1 µg/m³であり、道路沿道で濃度が高かった。
- (2) PM2.5中の水溶性イオン成分は、NO₃⁻、SO₄²⁻、NH₄⁺といった二次生成粒子成分が大半を占めた。夏季はSO₄²⁻が陰イオンのほとんどを占め、冬季ではNO₃⁻がSO₄²⁻よりも濃度が高くなった。
- (3) PM2.5中の炭素成分は、OCは一般環境と道路沿道で大きな差異がみられなかつたが、ECは道路沿道で濃度が高かった。
- (4) 二次有機粒子の指標となるWSOCは、道路沿道と一般環境でほぼ同じ濃度であった。季節変化をみると、夏季及び秋季に濃度が高い傾向であった。
- (5) PM2.5中の無機元素は、自然発生源由来であるNa、K、Ca、Feが多く含まれていた。測定地点によっては、固定発生源や移動発生源の影響がみられ、季節によっては風向の影響もみられた。
- (6) PM2.5の発生源寄与率の推定では、本市の発生源の特徴である石油燃焼や自動車排気の寄与が大きかった。

文献

- 1) 環境省：大気中微小粒子状物質（PM2.5）成分測定マニュアル
<http://www.env.go.jp/air/osen/pm/ca/manual.html>
- 2) 鈴木隆生、山田大介、米屋由理、高橋篤、井上俊明：川崎市における粗大（PM_{2.5-10}）、微小粒子（PM_{2.5}）の成分組成（2003年度）、川崎市

- 3) 平山学、鈴木義浩、三澤隆弘：川崎市における微小粒子状物質（PM_{2.5}）の成分組成（2013年度）、川崎市環境総合研究所年報、第2号、93～99（2014）
- 4) Chow J. C., Watson J. G., Crow D., Lowenthal D. H., Merrifield T. : Comparison of IMPROVE and NIOSH carbon measurements. Aerosol Sci. Technol., 34, 23–34 (2001)
- 5) Y. Kondo, Y. Miyazaki, N. Takegawa, T. Miyakawa, R. J. Weber, J. L. Jimenez, Q. Zhang, D. R. Worsnop : Oxygenated and water-solved organic aerosols in Tokyo. Journal of geophysical research, 112, D01203 (2007)
- 6) 長谷川就一、米持真一、山田大介、鈴木義浩、石井克巳、齊藤伸治、鴨志田元喜、熊谷貴美代、城裕樹：2011年11月に関東で観測されたPM_{2.5}高濃度の解析、大気環境学会誌、第49号、242～251（2014）
- 7) 潟畠朗、真室哲雄：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、第15巻、198～206（1980）
- 8) 日置正、中西貞博、向井人史、村野健太郎：降水 中微量元素濃度比と鉛同位対比による長距離輸送と地域汚染の解析、大気環境学会誌、第43号、100～111（2008）
- 9) Iijima A., Sato K., Yano K., Tago H., Kato M., Kimura H., Furuta N. : Particle size and composition distribution analysis of automotive brake abrasion dusts for the evaluation of antimony sources of airborne

- particulate matter, Atmos. Environ., 41,
4908–4919 (2007)
- 10) 飯島明宏:入門講座 大気モデル-第5講レセプタ
ーモデル-、大気環境学会誌、46 (4)、A53～
A60 (2011)
- 11) 環境省:平成22年度 微小粒子状物質成分分析業
務データ解析（発生源寄与濃度の推計）報告書
(2011)
- 12) CMB法解析マクロの紹介と颁布サイト
<http://rhanaishi.world.coocan.jp/CMB.html>
- 13) アメリカ合衆国環境保護庁
<http://www.epa.gov/heasd/research/pmf.html>