

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)

Chemical Characteristic Analysis of PM_{2.5} in the Ambient Air on Kawasaki City (2013)

平山 学	Manabu HIRAYAMA
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 (以下、PM_{2.5}) 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PM_{2.5}のサンプリングを各季節2週間実施し、PM_{2.5}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、金属成分の分析を行った。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、2013年度のPM_{2.5}年平均濃度は田島16.5 µg/m³、高津16.9 µg/m³、池上19.4 µg/m³であった。PM_{2.5}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、炭素成分は、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ったが、元素炭素は道路沿道で濃度が高かった。また、発生源寄与率の推定結果では、一次粒子が約4割、二次生成粒子が約6割を占めていた。

キーワード：PM_{2.5}、成分組成、寄与率

Key words: PM_{2.5}, Chemical composition, Contribution rate

1 はじめに

環境基本法では、大気中の粒径10 µm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 µm以下(50%カット)のPM_{2.5}の環境基準が「1年平均値15 µg/m³以下であり、かつ1日平均値35 µg/m³以下であること」と定められた。PM_{2.5}の対策を推進するうえで、PM_{2.5}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(PM_{2.5})の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(PM_{2.5})成分測定マニュアル」(以下、成分測定マニュアル)を策定、さらに2013年6月に成分測定マニュアルを一部改訂し、PM_{2.5}の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2.5~10 µmの粗大粒子とPM_{2.5}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いる¹⁾。

2013年度の調査では、FRM2025iサンプラー(FRM認証機)を用い、各季節で2週間によるPM_{2.5}のサンプリングを実施した。

本稿では、本市におけるPM_{2.5}の実態を把握するため、PM_{2.5}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、金属成分を分析し、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局仮設局(以下、田島)、高津一般環境大気測定局(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

PM_{2.5}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、金属成分の測定用として、四ふつ化エチレン樹脂製であるテフロンフィルタ(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、石英繊維フィルタ(Pall社製

Pallflex 2500QAT-UP) を使用した。

2.3 調査期間

2013 年度の春夏秋冬で各 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。

高津（石英繊維フィルタ）：7 月 30 日

池上（テフロンフィルタ）：7 月 27～29 日

表 1 2013 年度の調査日程

	春季	夏季	秋季	冬季
1 日目	5 月 8 日	7 月 24 日	10 月 23 日	1 月 22 日
2 日目	5 月 9 日	7 月 25 日	10 月 24 日	1 月 23 日
3 日目	5 月 10 日	7 月 26 日	10 月 25 日	1 月 24 日
4 日目	5 月 11 日	7 月 27 日	10 月 26 日	1 月 25 日
5 日目	5 月 12 日	7 月 28 日	10 月 27 日	1 月 26 日
6 日目	5 月 13 日	7 月 29 日	10 月 28 日	1 月 27 日
7 日目	5 月 14 日	7 月 30 日	10 月 29 日	1 月 28 日
8 日目	5 月 15 日	7 月 31 日	10 月 30 日	1 月 29 日
9 日目	5 月 16 日	8 月 1 日	10 月 31 日	1 月 30 日
10 日目	5 月 17 日	8 月 2 日	11 月 1 日	1 月 31 日
11 日目	5 月 18 日	8 月 3 日	11 月 2 日	2 月 1 日
12 日目	5 月 19 日	8 月 4 日	11 月 3 日	2 月 2 日
13 日目	5 月 20 日	8 月 5 日	11 月 4 日	2 月 3 日
14 日目	5 月 21 日	8 月 6 日	11 月 5 日	2 月 4 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²⁾に準拠して実施した。なお、水溶性有機炭素は 2013 年度において成分測定マニュアルが策定されていないため、本市で独自に検討した方法で分析した。

2.4.1 フィルタの秤量

テフロンフィルタは、温度 21.5 ± 1.5 °C、相対湿度 35 ± 5 %の恒温室内で 24 時間以上静置して恒量とした後、METTLER TOLEDO 社製 電子天秤 MX5（春季・夏季）及び XP6（秋季・冬季）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、同時にブランクフィルタを 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。

石英繊維フィルタ 1/2 試料を栓付三角フラスコに入れ、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レンジに取り、メンブレンフィルター（アドバンテック社製 PTFE 0.20 μm ）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 メタンサルホン酸
流量	1.0 mL/min	1.0 mL/min
サプレッサー 電流	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）及び元素炭素（以下、EC）は、石英繊維フィルタを 1 cm² に打ち抜いたものを分析用試料とし、Chow ら³⁾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 Model）を用いた IMPROVE A 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	140	He
OC2	280	He
OC3	480	He
OC4	580	He
EC1	580	98%He+2%O ₂
EC2	740	98%He+2%O ₂
EC3	840	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、石英繊維フィルタ 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 金属成分

金属成分 28 項目（Na、Al、K、Ca、Sc、Ti、V、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、As、Se、Rb、Mo、Sb、Cs、Ba、La、Sm、Hf、Ta、W、Pb、Th）は、テフロンフィルタ 1/2 試料を分解容器に入れ、硝酸 2.5mL、フッ化水素酸 1 mL、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（analytikjena 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 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 質量濃度の年平均濃度を表4に、季節変化を図2に、濃度推移を図3に示す。

PM2.5 質量濃度の年平均濃度は一般環境より道路沿道で高かった。季節変化をみると、最も高濃度を示したのは秋季、次いで高濃度を示したのは冬季であった。日平均値推移において濃度が高かったのは秋季 11 日及び 12 日目、冬季 4 日及び 12 日目であり、これはこの期間にNO₂濃度が高く、夜間の高湿度下においてNO₃⁻が生成し、NO₃が高濃度となったためと考えられる。また、秋季 11 日目及び 12 日目においては、西日本か

表4 PM2.5 質量濃度の年平均濃度(μg/m³)

	一般環境		道路沿道
	田島	高津	池上
質量濃度	16.5	16.9	19.4

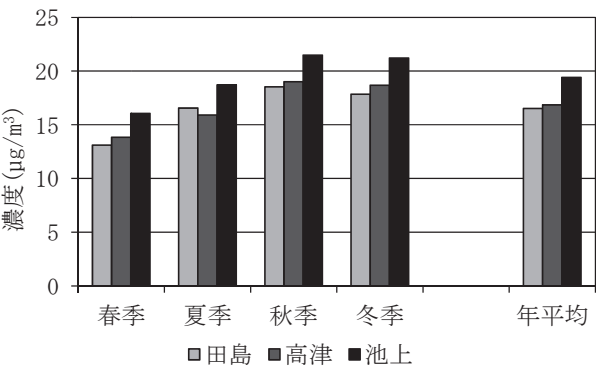


図2 PM2.5 質量濃度の季節変化

ら関東地域への汚染気塊の移流(図4に後方流跡線を示す)もみられており、これらの高濃度が秋季及び冬季平均濃度を上げたものと推測される。最も低濃度を示した季節は春季であった。いずれの季節においても、年平均濃度同様に一般環境より道路沿道が高濃度を示した。

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5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NH₄⁺、SO₄²⁻、NO₃⁻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、NH₄⁺は田島 2.4μg/m³、高津 2.4μg/m³、池上 2.8μg/m³、SO₄²⁻は田島 4.6μg/m³、高津 4.4μg/m³、池上 4.9μg/m³、NO₃⁻は田島 2.7μg/m³、高津 2.8μg/m³、池上 3.2μg/m³であり、いずれも道路沿道で高かった。また、その他全ての成分も道路沿道で高かった。

表5 水溶性イオン成分の年平均濃度(μg/m³)

	一般環境		道路沿道
	田島	高津	池上
Cl ⁻	0.39	0.43	0.51
NO ₃ ⁻	2.7	2.8	3.2
SO ₄ ²⁻	4.6	4.4	4.9
Na ⁺	0.13	0.11	0.14
NH ₄ ⁺	2.4	2.4	2.8
K ⁺	0.16	0.16	0.18
Mg ²⁺	0.022	0.019	0.027
Ca ²⁺	0.072	0.057	0.097

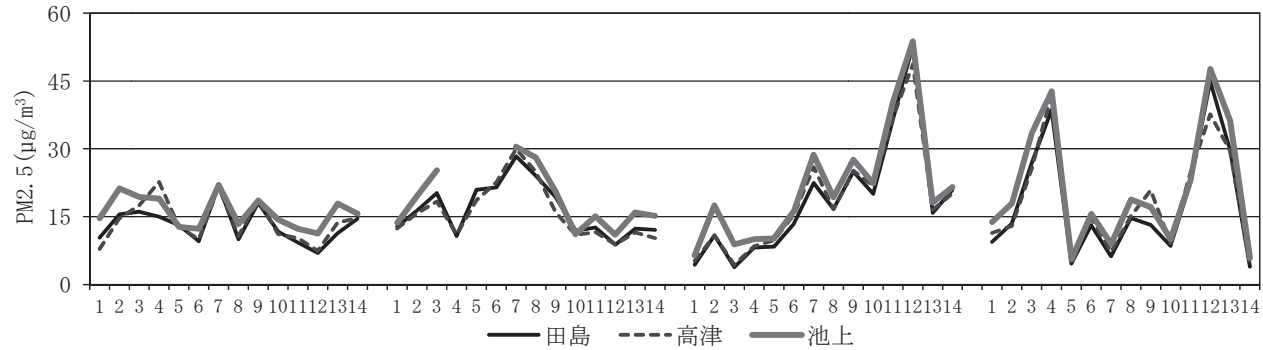


図3 PM2.5 質量濃度の日平均値推移



図4 11月2日及び3日(秋季11日及び12日目)24時の後方流跡線(過去72時間)

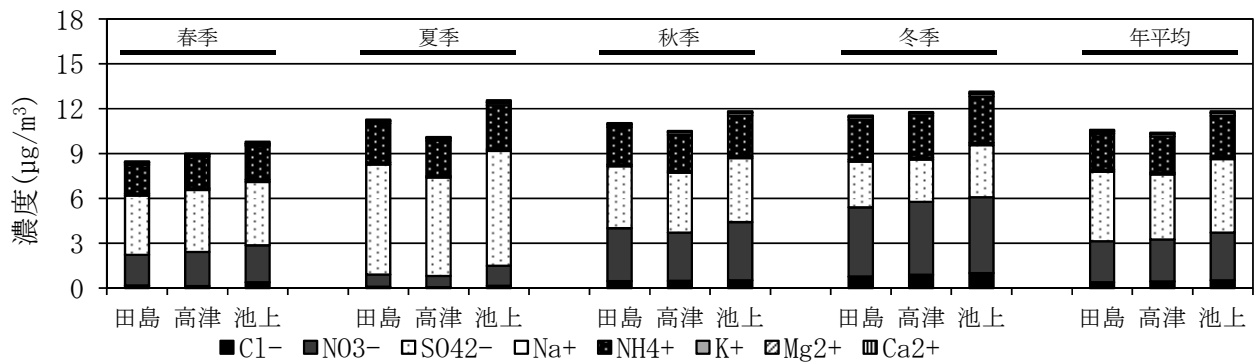


図5 水溶性イオン成分濃度の季節変化

PM_{2.5} 中の総イオン濃度は、冬季に高く、春季に低くなる傾向を示した。また、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 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。

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 6 に示す。また、季節ごとの char-EC (EC1-PyroOC)/soot-EC (EC2+EC3) 比を表 7 に示す。

PM_{2.5} 中の OC の年平均濃度は、田島 $3.4\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、高津 $4.1\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、池上 $3.9\mu\text{g}/\text{m}^3$ であり、EC は、田島 $1.7\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、高津 $1.7\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、池上 $3.4\mu\text{g}/\text{m}^3$ 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秋季及び冬季に高く、夏季に低くなる傾向を示した。秋季及び冬季に高くなる要因として、他の季節よりも char-EC/soot-EC 比が高いことから、バイオマス燃焼の寄与による影響が考えられる。関東における過去の同季節でも、バイオマス燃焼が原因のひ

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	3.4	4.1	3.9
EC	1.7	1.7	3.4

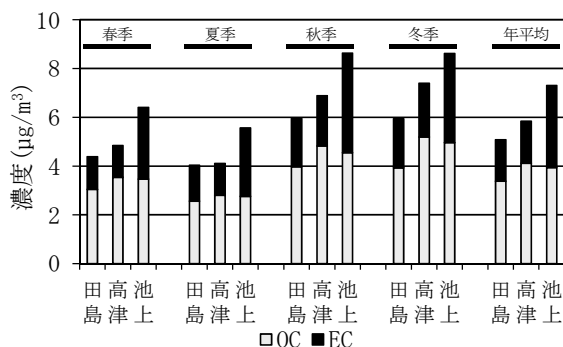


図6 炭素成分濃度の季節変化

とつとみられる高濃度事例が報告されている⁴⁾。夏季に低くなる要因として、気温が高いことから半揮発性成分がガス化することが考えられる。

EC 濃度の変化をみると、季節ごとの変化は OC に比べ小さかった。

表7 季節ごとの char-EC/soot-EC 比

	一般環境		道路沿道
	田島	高津	池上
春季	1.5	1.2	3.3
夏季	1.7	1.2	2.8
秋季	2.3	2.2	3.5
冬季	2.2	2.2	3.8
年平均	1.9	1.7	3.4

3.4 水溶性有機炭素成分

PM_{2.5} 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 8 に、季節変化を図 7 に、OC 中の WSOC と WIOC の割合を図 8 に示す。

WSOC の年平均濃度は、田島 $2.7\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、高津 $3.3\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、池上 $3.1\mu\text{g}/\text{m}^3$ であった。季節ごとの WSOC の変化をみると、最も高濃度を示したのは秋季であり、最も低濃度を示したのは夏季であった。WIOC は、秋季から冬季に濃度が高くなる傾向を示した。

OC 中の WSOC と WIOC の割合をみると、WSOC の割合は田島 80%、高津 79%、池上 80%であり、一般環境と道路沿道に差異はみられなかった。

表8 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	3.3	3.1
WIOC	0.67	0.83	0.80

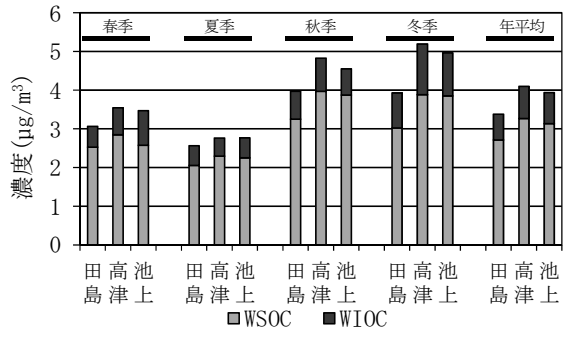


図7 WSOC 濃度と WIOC 濃度の季節変化

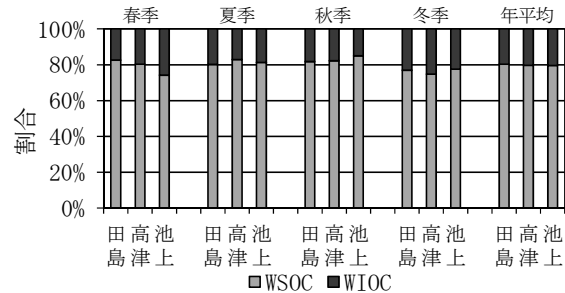


図8 WSOC と WIOC の割合

3.5 金属成分

各調査地点における金属成分の年平均濃度を表9に示す。

年平均濃度が高かったのはNa、K、Ca、Feであった。これらの金属は、自然発生源由来である海塩粒子（Na、K）や土壌粒子（Ca、Fe）に多く含まれており、他の金属と比べて環境中に多く存在しているため、濃度が高くなったと考えられる。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Cu、Zn、Sb、Baは移動発生源の影響を受けたものと推測される^{5)~7)}。

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、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。

4 発生源寄与率の推定

4.1 CMB法

2013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。環境省の公表している報告書のプロファイル⁸⁾から、道路粉じん、海塩粒子、鉄鋼工業、石油燃焼、廃棄物焼却、自動車排気、ブレーキ粉じんの7種を抜き出し、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⁹⁾。

CMB法による解析の対象となるのは一次粒子のみで

表9 金属成分の年平均濃度（ng/m³）

	一般環境		道路沿道
	田島	高津	池上
Na	87	64	110
Al	24	23	30
K	91	95	120
Ca	46	29	55
Ti	3.2	2.9	3.3
V	8.1	3.9	8.7
Cr	3.0	1.1	4.5
Mn	10	5.6	18
Fe	150	87	230
Co	0.094	0.051	0.13
Ni	4.0	1.4	4.8
Cu	4.8	2.9	6.4
Zn	39	27	44
As	0.86	0.80	0.86
Se	1.0	0.90	1.2
Rb	0.29	0.28	0.40
Mo	3.3	0.77	4.6
Sb	1.0	1.1	1.4
Cs	0.041	0.035	0.068
Ba	2.8	3.2	4.9
La	0.083	0.073	0.12
W	0.52	0.20	0.65
Pb	7.6	6.6	11

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、算出した一次粒子に加え、[Cl⁻]+[NO₃⁻]+[SO₄²⁻]+[NH₄⁺]を二次生成粒子とみなし、発生源寄与に加え、寄与率（図9）を算出した。

図9をみると、二次生成粒子の寄与が最も大きく、自動車排気の寄与がそれに次いで大きい結果を示していた。特に池上では自動車排気が大きな寄与を示した。また、石油燃焼は池上と田島において比較的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。結果として、一次粒子（二次生成粒子及びその他以外）の寄与率は約40%、二次生成粒子の寄与率は約60%であった。

4.2 PMF法

2013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が必要とせずに発生源解析が可能である¹⁰⁾。また、CMB法では困難である二次生成粒子の寄与を含めて解析ができる。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を用いた¹¹⁾。なお、ソフトウェアは2014年7月にPMF5.0に更新されている。

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⁻、NO₃⁻、SO₄²⁻、NH₄⁺、K⁺、Mg²⁺、

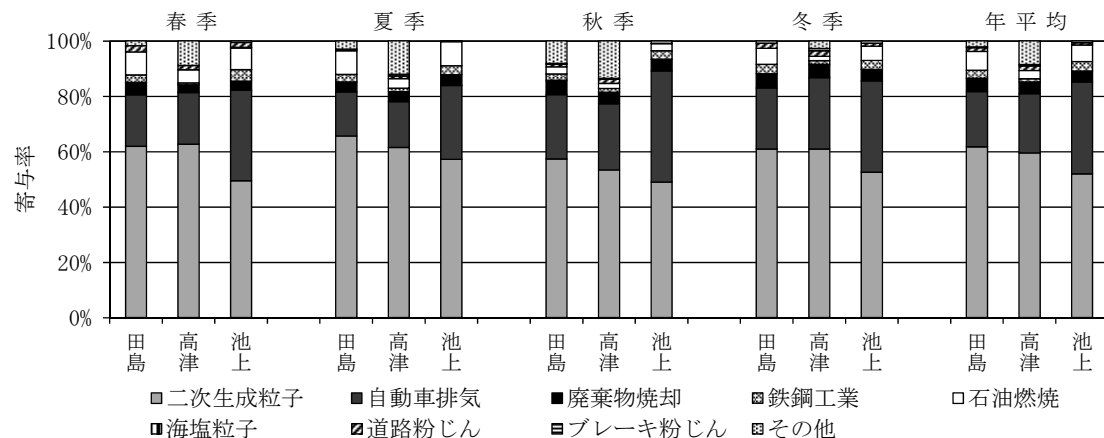


図9 CMB法による発生源寄与率

Ca²⁺、OC、EC、Na、Al、V、Mn、Fe、Cu、Zn、As、Se、Rb、Cd、Sb、Ba、La、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、鉄鋼工業、廃棄物焼却、ディーゼル車、ブレーキ粉じん、海塩粒子とした。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 7 種類に決め、発生源プロファイルを作成し、寄与率（図 10）を算出した。

図 10 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＋有機系粒子と重油燃焼が、秋季及び冬季は硝酸系二次粒子＋塩化物系二次粒子とディーゼル車＋ブレーキ粉じんが大きい寄与を示した。また、各調査地点における特徴としては、池上ではディーゼル車＋ブレーキ粉じんと重油燃焼、田島では重油燃焼の寄与が大きかった。結果として、一次粒子（廃棄物焼却、鉄鋼工業、重油燃焼、ディーゼル車＋ブレーキ粉じん、海塩粒子）の寄与率は約 37%、二次生成粒子の寄与率は約 57%であった。

4.3 発生源寄与率の推定結果及び考察

CMB 法と PMF 法の結果を併せてみると、一次粒子と二次生成粒子の寄与率は同様の結果が得られた。また、寄与率に差異がみられる発生源があるものの、石油燃焼（重油燃焼）や自動車排気（ディーゼル車＋ブレーキ粉じん）などは、季節及び調査地点における特徴が類似する傾向を示し、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推測される。

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コンタミ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が、今回の結果につながったものと推測される。

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 法では上述した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

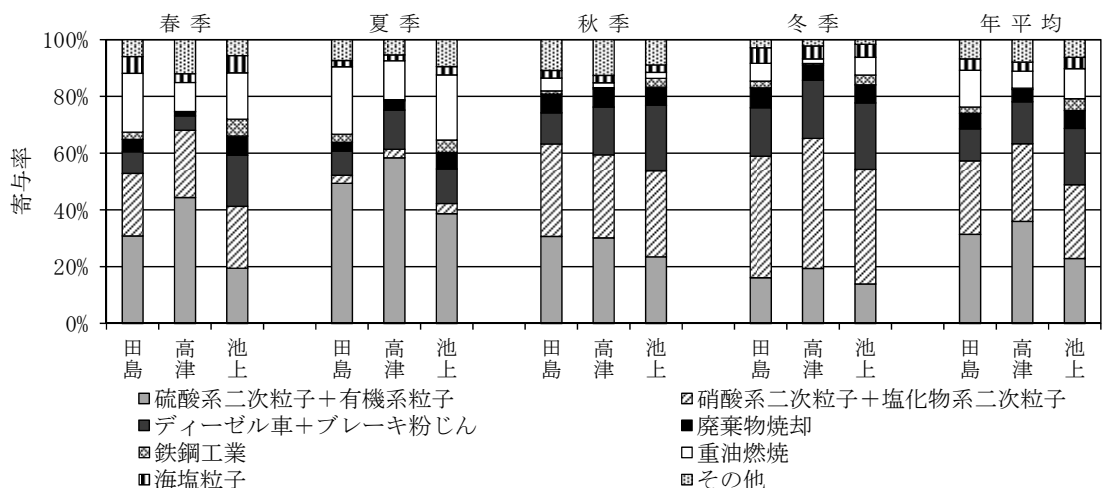


図10 PMF法による発生源寄与率

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思われる。

5 まとめ

- (1) 2013 年度における市内 3 地点の PM_{2.5} 年平均濃度は、田島 16.5 µg/m³、高津 16.9 µg/m³、池上 19.4 µg/m³であり、道路沿道で濃度が高かった。
- (2) PM_{2.5} 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) PM_{2.5} 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ったが、EC は道路沿道で濃度が高かった。季節変化をみると、OC は秋季及び冬季に濃度が高くなる傾向がみられたが、EC は季節ごとの変化は小さかった。
- (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、秋季に濃度が高く、夏季に低い傾向であった。
- (5) PM_{2.5} 中の金属成分は、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) PM_{2.5} の発生源寄与率の推定では、石油燃焼や自動車排気などにおいて、本市の発生源寄与の特徴が確認された。一次粒子の寄与率は約 4 割、二次生成粒子の寄与率は約 6 割であった

文献

- 1) 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）、川崎市公害研究所年報、第 31 号、71～77（2004）
- 2) 環境省：大気中微小粒子状物質（PM_{2.5}）成分測定マニュアル
<http://www.env.go.jp/air/osen/pm/ca/manual.html>
- 3) 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）
- 4) 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：2011 年 11 月に関東で観測された PM_{2.5} 高濃度の解析、第 53 回大気環境学会年会講演要旨集、497（2012）
- 5) 溝畑朗、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）
- 6) 日置正、中西貞博、向井人史、村野健太郎：降水中微量金属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）
- 7) 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）
- 8) 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）
- 9) <http://rhanaishi.world.coocan.jp/CMB.html>
- 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) アメリカ合衆国環境保護庁
<http://www.epa.gov/heasd/research/pmf.html>