

## 2007年度に発生した黄砂と風じんの解析

## Analysis of yellow dust and sand storm in 2007.

山田 大介	Daisuke	YAMADA
中松 弘明	Hiroaki	NAKAMATSU
盛田 宗利	Munetoshi	MORITA

## 要旨

2008年2月23～24日は、低気圧の影響で強風が吹き、東京都では風じん（強風により地面から砂やちりが吹き上がる現象）が2年ぶりに観測された。同時にSPMも増加し、時間当たりのSPMが $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ を超過する地点も複数現れた。また、2007年4月1～3日（黄砂1）及び2008年3月17～19日（黄砂2）には黄砂により、SPM濃度が増加した。そこで、国内で発生する風じん由来の粉じんと、中国やモンゴルから飛来する黄砂現象の粉じんとを区別化し、それぞれに含まれる有害成分の実態を調査するため、川崎市公害研究所屋上でそれぞれの粉じんを粒径 $2.5\mu\text{m}$ ～ $10\mu\text{m}$ の粒子であるPM(2.5-10)と粒径 $2.5\mu\text{m}$ 以下の粒子であるPM2.5に分類して捕集し、それらの成分を分析した。その結果、黄砂1ではPM(2.5-10)の濃度が高くなり、成分としてはNa、Al、Ca、K、Feといった金属成分濃度が高くなった。黄砂2は、黄砂1と同様にPM(2.5-10)濃度が高くなり、成分としてはNa、Al、Ca、K、Feといった金属成分濃度が増加し、さらに $\text{NO}_3^-$ をはじめとするイオン成分濃度が増加していた。また、PM2.5濃度も高くなっており、成分としては $\text{SO}_4^{2-}$ をはじめとするイオン成分濃度が増加していた。風じんでは、粒径不明ながら、Al、Ca、Feの濃度が増加していた。

キーワード：黄砂、風じん、PM(2.5-10)、PM2.5

Key words : yellow dust, sand storm, PM(2.5-10)、PM2.5

## 1 はじめに

近年、川崎市では浮遊粒子状物質（SPM）濃度が低下傾向を示しており、SPMの環境基準を達成する常時監視測定局が大きく増加した。特に、2003年度以降は、ディーゼル車運行規制や $\text{NO}_x$ ・PM法、市内の固定発生源を対象としたバスケット規制等によりSPMが低下し、2004、2005年度は、市内全常時監視測定局で環境基準を達成した。ところが、2006年度は6～7月にかけてSPMの日平均濃度が $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ を超える高濃度現象が3回発生し、連続2日続いた自動車排出ガス測定局4地点で環境基準非達成となった。このSPMの高濃度現象は、 $\beta$ 線SPM自動計測器のろ紙を用いて分析した結果、市内の広範囲で $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NH}_4^+$ が増加したことによって生じたことが判明した<sup>1)</sup>。また、黄砂によってもSPMの高濃度現象が発生することがあり、2002年春季には一度の高濃度かつ広範囲にわたった黄砂のために、連続2日間のSPMの高濃度現象が生じ、全国の環境基準達成率の大幅な低下をもたらした<sup>2)</sup>。

そこで、2007年度は、2006年度に発生したようなSPMの日平均濃度が $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ を超える高濃度現象等の特異現象を確実に捉えて実態調査を行うことを目的とし、公害研究所の屋上で1週間を捕集期間の単位として1年間継続捕集した。さらに、PM(2.5-10)及びPM2.5の濃度及びそれらに含まれる水溶性イオン成分、炭素成分を分析した。

2007年度は、日平均濃度が $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ を超えるようなSPMの高濃度現象は発生しなかったが、光化学スモッグ

注意報発令日は計13日あった。また、黄砂が2007年4月1日～3日と2008年3月17日～19日に飛来し、それぞれの期間でSPMが増加した。さらに、2008年2月23～24日は、低気圧の影響で強風が吹き、東京都では風じん（強風により地面から砂やちりが吹き上がる現象）が2年ぶりに観測され、SPMが増加した。粒径 $10\mu\text{m}$ 以下の粒子であるPM10の濃度が $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ を超えたのは、これら2回の黄砂と風じんの期間のみであったため、これらの3期間の粉じんに着目して分析を行った。

## 2 調査方法

## 2.1 調査期間

全サンプリング期間：

2007年4月2日～2008年4月4日

（基本的に、7日単位でサンプリング）

特異現象は、次のとおり。また、()内は特異現象が発生した日または期間を示す。

①：黄砂1

2007年4月2日～6日 (4/1～3)

②～⑧：光化学スモッグ注意報発令日を含む期間。

②：2007年5月4日～11日 (5/9)

③：2007年6月15日～22日 (6/19)

④：2007年7月22日～29日 (7/26、27)

⑤：2007年8月10日～17日 (8/10、11、16、17)

⑥：2007年8月17日～24日 (8/20)

⑦：2007年8月24日～31日 (8/25、26、28)

⑧：2007年9月21日～28日(9/22)

⑨：風じん

2008年2月22日～29日(2/23～24)

⑩：黄砂2

2008年3月14日～21日(3/17～19)

また、⑩の黄砂2では、黄砂期間に合わせて2008年3月17～19日に捕集した試料も、分析を実施した。

## 2.2 調査地点

川崎市南部の臨海工業地帯に隣接した住宅地域にある川崎市公害研究所屋上を、調査地点とした。

## 2.3 試料採取

大気中の粒子状物質の捕集には、ニールサンプラーを用いた。採集用フィルターは石英繊維フィルター(Pallflex2500 QAT-UP)を使用し、20L/minの空気吸引量で7日間連続捕集した。分析用試料は、2段目フィルターをPM(2.5-10)として用い、3段目のバックアップフィルターをPM2.5として用いた。

## 2.4 分析方法

### (1) フィルターの秤量

石英繊維フィルターは、気温20°C、湿度50%の恒温室で48時間放置して恒量とした後、精密天秤(メトラール・トレド(株)製XP-205)で0.01mgまで正確に秤量した。秤量は、捕集前後に1回ずつ行った。また、ブランクロ紙を、同時に5枚秤量し、誤差を修正した。

### (2) 水溶性イオン成分

水溶性イオン成分8項目の分析は、イオンクロマトグラフィーで行った。試料中のイオン成分は、2005年度の報文に従って抽出した<sup>3)</sup>。分析条件の詳細は表1に示した。

表1 イオンクロマトグラフィーの分析条件

陰イオン	
カラム	IonPac AS14
溶離液	3.0 mM Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> /1.0 mM NaHCO <sub>3</sub>
流量	1.2 mL/min
サプレッサー電流	50 mA
サンプル注入量	100 μL
陽イオン	
カラム	IonPac CS12A
溶離液	20 mM メタンシルホン酸
流量	1.0 mL/min
サプレッサー電流	100 mA
サンプル注入量	100 μL

### (3) 炭素分析

ヤナコ分析工業(株)製CHNコーダーMT-6により、試料1/8を用いて分析した。He気流中燃焼炉600°Cで揮発した有機物から生成したCO<sub>2</sub>量から求めた炭素量を有機炭素量(OC)とした。また、別な試料を950°C、He-O<sub>2</sub>気流中で燃焼して生成したCO<sub>2</sub>量から求めた炭素量を全炭素量(TC)とし、TCからOCを差し引いたものを元素状炭素(EC)とした。

### (4) 金属分析

金属成分14項目(Na, Mg, Al, K, Ca, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Cd, Pb)について、ICP質量分析装置(横河Agilent社製Agilent 7500C)で分析した。

分級捕集した試料を2005年度の報文と同様にしてフッ酸・過塩素酸分解し、ICP質量分析装置で各金属成分を定量した<sup>3)</sup>。

### (5) 走査電子顕微鏡を用いた粒子の直接観察

竹内らは、PTFEろ紙に捕集した浮遊粒子状物質を直接炭素蒸着し、熱電子放射型の走査電子顕微鏡を用いて浮遊粒子状物質の直接観察及び元素分析を行い、SPM粒子の分析に有効であることを報告している<sup>4)</sup>。今回の調査では、竹内らの手法と同様に、粉じんを捕集した石英繊維ろ紙のろ紙捕集面を直接炭素蒸着し、熱電子放射型の走査電子顕微鏡(日本電子製、JSM-6390LA)を用いて観察した。測定条件は、加速電圧15kVとした。

## 3 結果及び考察

### 3.1 粒子状物質濃度

図1に、2007年度のPM(2.5-10) (○)、PM2.5 (●)、PM10 (■)の濃度推移を示す。①～⑩は、それぞれ特異現象が発生した期間であり、①は黄砂1、②～⑧は光化学スモッグ注意報が発令された期間、⑨は風じん、⑩は黄砂2を示す。

PM(2.5-10)の濃度推移をみると、①の黄砂1と⑩の黄砂2で大きく増加していた。また、5月25日～6月1日の期間でも増加していたが、この時期にも黄砂が市内に到達していたことが原因と考えられる(5月26日～27日)。

次に、PM2.5をみると、⑨の風じんで大きく増加し、40μg/m<sup>3</sup>を超過した。光化学スモッグ注意報発令時には、オキシダントによってガス状のNO<sub>x</sub>やSO<sub>x</sub>が化学反応を起こして、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>やSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>となり、二次生成粒子が増加したためPM2.5が増加したことが予想されたが、②の5月4日～11日以外の期間では、PM2.5の顕著な増加はみられなかった。

また、図2の風じんの写真をみると、PM2.5に粒径2.5μm以上の粒子が多数含まれていることが判明した。これは、風じん時の強風があまりに強かったため(サンプリング地点の2/23 12時～2/24 24時の平均風速は6.1m/s)、分級がうまくいかず、本来ならPM(2.5-10)やPM>10(粒径が10μm以上の粒子)に分級されるべき粒子が、バックアップフィルターに捕集されるPM2.5部分に捕集されたものと考えられる。対照的に、図3の黄砂2のPM2.5の写真では、概ね粒径2.5μm以下の粒子が捕集されていた。



図1 PMの濃度推移。○はPM(2.5-10)、●はPM2.5、■はPM10の濃度推移を示す。○つき数字は、特異現象が発生した週を示す。

黄砂発生日：①(4/1~3)、⑩(3/17~19)

光化学スモッグ注意報発令日：②~⑧(②5/9、③6/19、④7/26、27、⑤8/10、11、16、17⑥8/20、⑦8/25、26、28、⑧9/22)

風じん発生日：⑨(2/23~24)

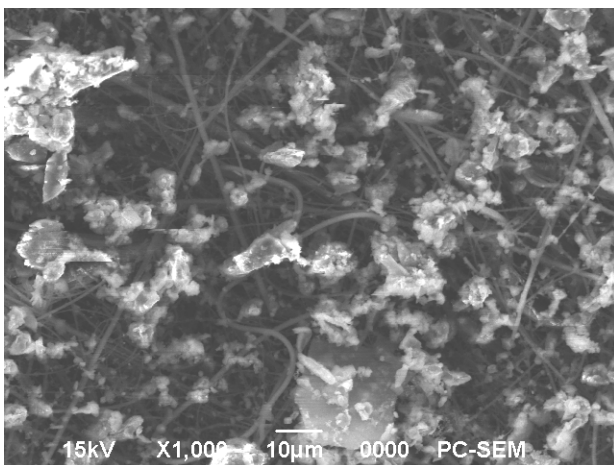


図2 風じんのPM2.5のSEM写真。倍率は1000倍。繊維は、石英ろ紙フィルターの繊維。

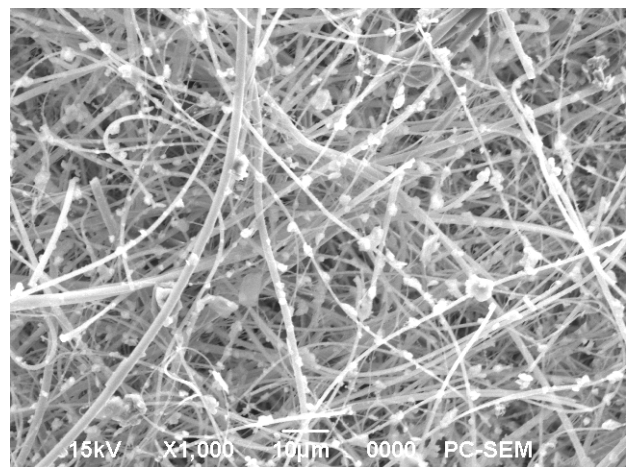


図3 黄砂2のPM2.5のSEM写真。倍率は1000倍。繊維は、石英ろ紙フィルターの繊維。

### 3.2 水溶性イオン成分濃度

PM(2.5-10)のイオン成分の濃度推移を図4に、PM2.5のイオン成分の濃度推移を図5に示した。

PM(2.5-10)の濃度推移をみると、①の黄砂1及び⑨の風じんでは、イオン成分の増加はみられなかった(図4)。しかし、⑩の黄砂2では、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>をはじめとするイオン成分の顕著な増加がみられた。⑩のNO<sub>3</sub><sup>-</sup>の濃度は、2.9µg/m<sup>3</sup>であり、PM(2.5-10)の11%を占めていた。ま

た、イオン成分は9.2µg/m<sup>3</sup>であり、PM(2.5-10)の36.7%を占めていた。

次に、PM2.5の濃度推移をみると、①の黄砂1及び⑨の風じんでは、イオン成分の増加はみられなかった(図5)。しかし、⑩の黄砂2ではSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>の顕著な増加がみられた。SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>の濃度は7.2µg/m<sup>3</sup>であり、PM2.5の28.2%を占めていた。イオン成分の合計は14.8µg/m<sup>3</sup>

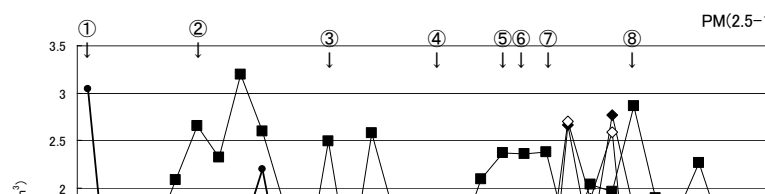


図4 PM(2.5-10)に含まれるイオン成分濃度の推移。◆はCl<sup>-</sup>、■はNO<sub>3</sub><sup>-</sup>、▲はSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、◇はNa<sup>+</sup>、□はNH<sub>4</sub><sup>+</sup>、△はK<sup>+</sup>、○はMg<sup>2+</sup>、×はMg<sup>2+</sup>の推移を示し、濃度は左軸に記した。また、●はPM(2.5-10)の推移を示し、右軸に濃度を記した。○つき数字は、図1を参照のこと。

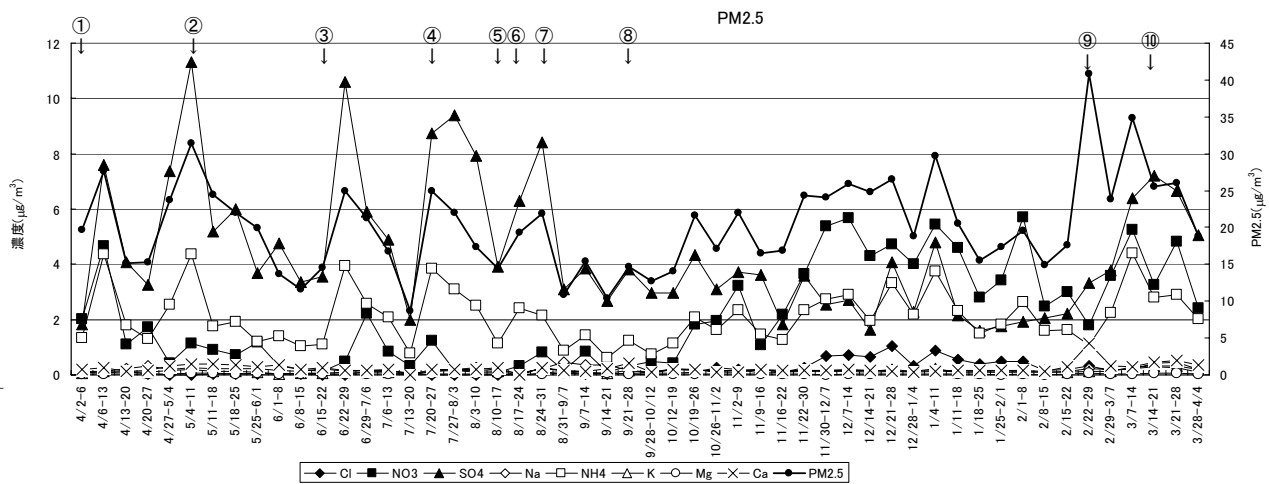


図5 PM2.5に含まれるイオン成分濃度の推移。◆はCl<sup>-</sup>、■はNO<sub>3</sub><sup>-</sup>、▲はSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、◇はNa<sup>+</sup>、□はNH<sub>4</sub><sup>+</sup>、△はK<sup>+</sup>、○はMg<sup>2+</sup>、×はMg<sup>2+</sup>の推移を示し、濃度は左軸に記した。また、●はPM2.5の推移を示し、右軸に濃度を記した。○つき数字は、図1を参照のこと。

となり、PM2.5の57.9%を占めていた。

さらに、風じんと黄砂のイオン成分濃度を粒径ごとに比較した。黄砂2では、黄砂期間中の3/17~19に合わせて捕集した試料を用いた。また、風じん及び黄砂の比較対象として、平成19年度の田島測定局の年平均値(図6中の平均)を用いた。

図6をみると、PM(2.5-10)もPM2.5も、風じんと黄砂1の総イオン濃度は、平均の総イオン濃度と比べて同等かそれ以下であった。しかし、黄砂2では平均よりも非常に高く、その総イオン濃度はPM(2.5-10)で4.1倍、PM2.5で2.6倍となった。PM(2.5-10)のイオン成分のうち、最も濃度が高かったNO<sub>3</sub><sup>-</sup>は5.1μg/m<sup>3</sup>であり、PM(2.5-10)の10%を占めた。次にNa<sup>+</sup>の3.1μg/m<sup>3</sup>、そしてCl<sup>-</sup>の2.9μg/m<sup>3</sup>が続いた。また、黄砂に付着して日本に移流するといわれているSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>も2.1μg/m<sup>3</sup>であり、平均の0.45μg/m<sup>3</sup>よりも高い濃度を示した。

PM2.5のイオン成分では、最も濃度が高かったSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>は10.8μg/m<sup>3</sup>であり、PM2.5の31%を占めた。次に、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>の3.5μg/m<sup>3</sup>、そしてNO<sub>3</sub><sup>-</sup>の3.0μg/m<sup>3</sup>が続き、二次生成粒子成分が高濃度を示していた。

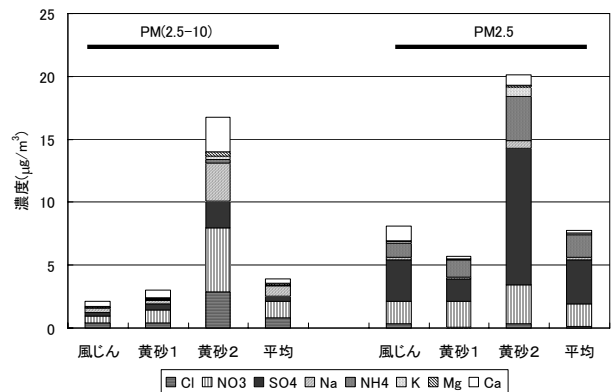


図6 風じん及び黄砂中のイオン成分の比較

### 3.3 風じん及び黄砂の金属成分濃度

風じん、黄砂1、及び黄砂2の金属成分の分析結果

を図 7 に示す。黄砂 2 では、黄砂期間中の 3/17~19 に合わせて捕集した試料を用いた。また、風じん及び黄砂の比較対象として、平成 19 年度の田島測定局の年平均値（図 7 中の平均）を用いた。

PM(2.5-10)をみると、風じん中の総金属濃度は、平均の総金属濃度とあまり変わらなかった。一方で、黄砂 1 と黄砂 2 の総金属濃度は、平均の総濃度と比べて非常に高く、黄砂 1 は 4.5 倍、黄砂 2 は 5.8 倍となった。金属成分のうち、濃度が高くなったのは黄砂 1、2 とともに Na、Al、K、Ca、Fe であった。黄砂 1 では、Na は  $0.8\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、Al は  $2.7\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、K は  $1.4\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、Ca は  $1.0\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、Fe は  $1.6\mu\text{g}/\text{m}^3$  であり、黄砂 2 では、Na は  $1.6\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、Al は  $2.2\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、K は  $2.6\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、Ca は  $1.4\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、Fe は  $1.4\mu\text{g}/\text{m}^3$  であった。

一方、PM2.5 では、平均の総金属濃度と比較すると、風じんの総金属濃度が 4.5 倍となっており、黄砂 1 の 2.6 倍や黄砂 2 の 1.9 倍よりも高くなっていった。風じんでは濃度が高くなったのは、Al、Ca、Fe であり、Al は  $1.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、Ca は  $1.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、Fe は  $1.4\mu\text{g}/\text{m}^3$  であった。図 2 より、風じんの PM2.5 は実際には PM(2.5-10) を反映している可能性が高いため、風じんの PM2.5 の金属成分と黄砂 1、黄砂 2 の PM(2.5-10) の金属成分を比較すると、風じんでは Na と K が減少していた。

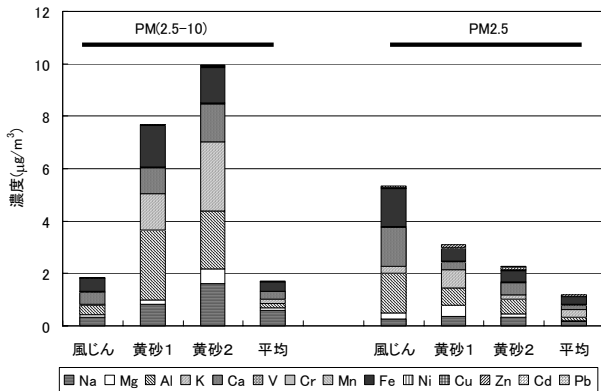


図 7 風じん及び黄砂中の金属成分の比較

次に、風じんと黄砂の金属のうち、アレルギーの原因となる Ni と Cd について比較した。

Ni をみると、PM(2.5-10)中の黄砂 2 での濃度が高く、平均の 5.2 倍の濃度を示した（図 8）。また、PM2.5 では風じんも黄砂も平均と同等ないしそれ以下であり、濃度の増加はみられなかった。

Cd でも、PM(2.5-10)では黄砂 2 が平均の 3.7 倍と高くなり、PM2.5 では 2.3 倍となった（図 9）。風じんでは PM(2.5-10)でも PM2.5 でも 0.9 倍と低くなり、黄砂 1 では PM(2.5-10)で 1.8 倍、PM2.5 で 1.3 倍と平均よりやや高かったが、黄砂 2 ほどの増加ではなかった。

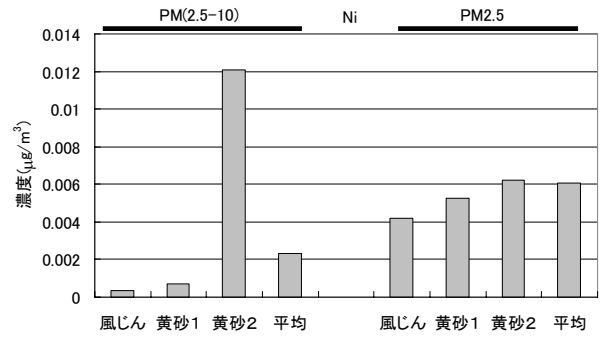


図 8 風じんと黄砂中の Ni 濃度

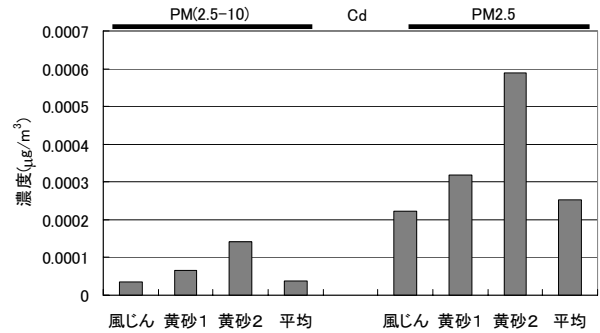


図 9 風じんと黄砂中の Cd 濃度

### 3.4 風じんと黄砂の各成分の組成

風じんと黄砂の組成について、濃度の比較を図 10 に、割合の比較を図 11 に示した。

PM(2.5-10)の総濃度をみると、風じんは平均とほぼ同等であるが、黄砂 1 は 3.4 倍、黄砂 2 は 5.0 倍の濃度となっていた（図 10）。各成分のうち、黄砂 1 では金属濃度が高くなっており、黄砂 2 では金属濃度に加えて陽イオン濃度及び陰イオン濃度が増加していた。

PM2.5 の総濃度をみると、黄砂 1 は平均とほぼ同等であるが、風じんは 2.3 倍、黄砂 2 は 1.9 倍の濃度となっていた。各成分のうち、風じんでは金属濃度が高く、黄砂 2 では金属濃度に加えて陽イオン濃度及び陰イオン濃度が増加していた。風じんは、3.1 で述べたように、粒径  $2.5\mu\text{m}$  より大きい粒子が PM2.5 に捕集された可能性があり、正確に PM2.5 の成分を反映していない可能性がある。

この結果から黄砂 1 では PM(2.5-10)中の金属成分が増加し、黄砂 2 では PM(2.5-10)の金属成分とイオン成分、PM2.5 の金属成分とイオン成分が増加した。また、風じんでは粒径は不明ながら、粒子中の金属濃度が増加したものと思われた。

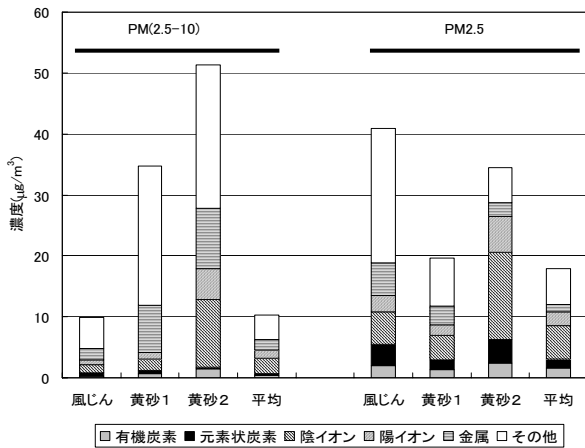


図 10 風じんと黄砂の各成分の濃度の比較

### 3.5 黄砂の経路

黄砂 1 と黄砂 2 で、同じ黄砂にもかかわらず含有成分に大きな違いがあることから、川崎市への移流経路に違いがあるのではないかと考え、METEXを用いた後方流跡線解析を実施した<sup>5)</sup>。期間は 10 日間とし、高度は川崎市上空 1,000m とした。

黄砂 1 では、ゴビ砂漠上空を通過し、中国の工業地帯である渤海湾の北側を通過し、朝鮮半島の北側を通過して川崎市に到達していた (図 11)。一方で、黄砂 2 では、やはりゴビ砂漠上空を通過し、渤海湾の北側を通過し、朝鮮半島の北側を通過して川崎市に到達していた (図 12)。黄砂 1、黄砂 2 ともに川崎市への移流経路、特に渤海湾の北側に到達してからは、同様の経路をたどっていた。

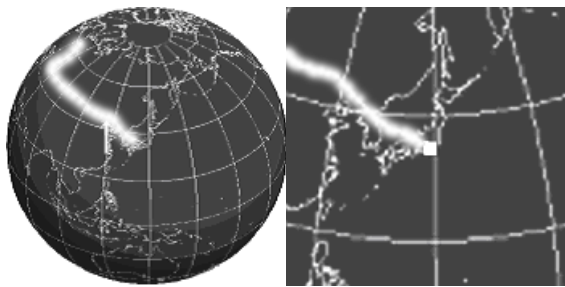


図 11 黄砂 1 の経路 (2007 年 4 月 2 日 12 時)  
左図の矢印は、3 日前の地点。右図は、左図の日本周辺を拡大したもの。

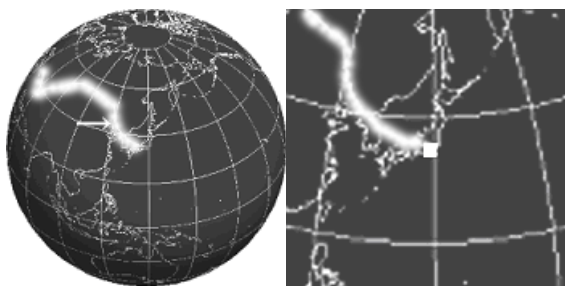


図 12 黄砂 2 の経路 (2008 年 3 月 18 日 12 時)  
左図の矢印は、3 日前の地点。右図は、左図の日本周辺を拡大したもの。

## 4 考察

2007 年度に発生した風じんと黄砂について調査した結果、それらの含有成分に大きな違いがあることがわかった。

風じんは、PM<sub>2.5</sub> の金属成分濃度が増加していたが、PM<sub>2.5</sub> の粒子を SEM で観察すると粒径が 2.5 $\mu$ m よりも大きく、実際には PM(2.5-10) や PM<sub>10</sub> が大半を占めているものと思われた。PM(2.5-10) は土壌粒子や海塩粒子といった自然発生源由来粒子が大半を占めており、風じんの金属成分に多く含まれていた Al、Ca、Fe は土壌粒子に多く含まれている。従って、風じんは、主に強風によって巻き上げられた土壌粒子で構成されたものと思われる。

黄砂 1 は、PM(2.5-10) の金属成分が大きく増加していた。増加した金属成分は、風じんと同様に Al、Ca、Fe が増加していたが、さらに Na と K も増加していた。Na は、おそらく日本海上空を通過した時に海塩粒子が混ざったのではないかと考えられる。

黄砂 2 も、PM(2.5-10) では黄砂 1 と同様の金属成分が増加していた。平均と比べて大きく増加した Al、Ca、K、Fe は、黄土の標準物質にも多く含まれていた成分であり、黄砂 1、黄砂 2 ともに黄砂の特徴を示していた<sup>6)</sup>。

黄砂 2 の PM(2.5-10) 中では、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>をはじめとするイオン成分及び Ni や Cd といったアレルギーの原因となる金属成分が増加していること、PM<sub>2.5</sub> でも SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> や NH<sub>4</sub><sup>+</sup> といった二次生成粒子の主体となるイオン成分が増加していたことから、黄砂に汚染物質が付着した可能性が高いと考えられる。また、黄砂に SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> や NO<sub>3</sub><sup>-</sup> が付着する場合、輸送過程において粗大粒子に含まれる土壌起源系粒子表面で様々な化学反応を生じ、吸着されることが示唆されている<sup>6)</sup>。今回の調査では、黄砂 2 において PM(2.5-10) からは高濃度の NO<sub>3</sub><sup>-</sup> と共に SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> が検出され、PM<sub>2.5</sub> からは高濃度の SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> が検出された。このことから、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> が NH<sub>4</sub><sup>+</sup> と塩を作って多くの PM<sub>2.5</sub> 粒子を形成したあと、その一部が土壌粒子に付着し、残りの大半が黄砂中の土壌粒子に吸着されないままで、川崎市に移流した可能性もあると思われる。

同じ黄砂でも、黄砂 1 と黄砂 2 では、金属成分はよく似ていたが、イオン成分や Ni、Cd の含有量が大きく異なっていた。同様に、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 濃度は飛来した黄砂によって異なることが、2007 年に発行された環境省の黄砂実態解明調査中間報告書で報告されている<sup>7)</sup>。この成分の違いの一因に、移流経路の違いがあるのではないかと考え、後方流跡線解析から、黄砂 1 と黄砂 2 の川崎市への流入経路を調べたが、ほぼ同様の経路をたどっていた。

今後は、今回の解析は 2007 年度に発生した 2 回の黄砂現象及び風じんのデータにより実施したため、さらにデータを積み重ねていくことにより、詳細な検討ができるものと考えられる。

## 文 献

- 1) 山田大介、竹内浄、原久男、井上俊明、テープろ紙を用いた 2006 年初夏における川崎市内の高濃度 SPM 解析、全国環境研会誌、33、27～34(2008)
- 2) 早崎将光、菅田誠治、大原利眞、若松伸司、宮下七重、1992-2004 年度の SPM 環境基準達成率に対する黄砂現象の影響、大気環境学会誌、42、188～199(2007)
- 3) 山田大介、鈴木隆生、高橋篤、井上俊明：川崎市における粗大粒子 (PM<sub>2.5-10</sub>) 及び微小粒子 (PM<sub>2.5</sub>) の成分組成(2004 年度)、川崎市公害研究所年報、第 32 号、9～18(2005)
- 4) 竹内浄、井上俊明：電子プローブマイクロアナライザーを用いるテープろ紙、分析化学、56、885～889(2007)
- 5) 国立環境研究所地球環境研究センター、CGER METEX、<http://cgermetex.nies.go.jp/metex/>
- 6) 大気エアロゾルの計測手法とその環境影響評価手法に関する研究、国立環境研究所特別研究報告、SR-43、3～46(2001)
- 7) 環境省、黄砂実体解明調査中間報告書(2007)