

<報文>

## 鳥取県及び韓国江原道における黄砂粉じんの成分特性について\*

鳥山恵介\*\*・湊沙花\*\*・中山めぐみ\*\*・山添良太\*\*・有田雅一\*\*・大呂忠司\*\*・  
崔承奉\*\*\*・金旻洙\*\*\*・申正澈\*\*\*

キーワード ①黄砂 ②粉じん ③後方流跡線 ④因子分析 ⑤韓国

### 要 旨

中国及びモンゴルの砂漠地域で発生する黄砂は、近隣諸国に影響を与えている。鳥取県及び韓国江原道（カンウォンド）では、2014年から2016年、両地域の黄砂日等における大気粉じん中の金属及びイオン成分の分析を行った。その結果、黄砂日における総粉じん（TSP）の平均濃度は、鳥取県で111  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、江原道春川（チュンチョン）で 153  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ であった。大気粉じん中のFe, Mg, Al濃度の黄砂日/非黄砂日の比は、春川で6.1, 6.2, 3.3であり、鳥取県では6.6, 5.5, 5.7であった。Cd, Pd, Zn濃度は春川の方が高く、Ni濃度は鳥取県の方が高かった。黄砂による影響は、鳥取県より春川の方が大きいと考えられ、因子分析の結果、土壌粒子、燃焼由来粒子、海塩粒子に関連づけられる3つの因子が抽出された。

### 1. はじめに

鳥取県衛生環境研究所及び韓国江原道保健環境研究院は、両地域の黄砂の特性を把握するため、試料採取方法、金属及びイオン成分の前処理方法を統一し、黄砂日及び非黄砂日の総粉じん（TSP）、金属、イオン成分の濃度比較を行うとともに、成分分析結果を用いて因子分析等を行い、両地域における黄砂粉じんの特性について調査した。

誘導結合プラズマ質量分析装置（ICP-MS）又は誘導結合プラズマ発光分光分析装置（ICP-AES）により定量した。

イオン：水で振とう抽出し、イオンクロマトグラフ又は分光光度計により定量した。

#### (5)測定項目

金属:Fe, Mn, Cr, Cd, Pb, Ni, Al, As, Co, Zn, V  
イオン:Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>

### 2. 調査の概要

調査は、既報<sup>1)</sup>に従い、次のとおり実施した。

(1)調査期間：2014年～2016年（3月～5月）

(2)試料採取地点（図1）

鳥取県：鳥取県衛生環境研究所屋上（鳥取県東伯郡湯梨浜町）

江原道：江原道保健環境研究院屋上（韓国江原道  
春川市）

(3)試料採取方法

ハイボリウムエアサンプラー（流速：1,000L/min, 石英ろ紙）を用い、TSPを24時間採取した。

(4)前処理及び測定方法

金属：マイクロウェーブ分解装置で加熱分解し、誘



図1 試料採取地点

\*The Characteristics of the Asian dust observed in Gangwon-do in Korea and Tottori Prefecture.

\*\*Keisuke Hatakeyama, Sayaka Minato, Megumi Nakayama, Ryouta Yamazoe, Masakazu Arita, Tadashi Oro (鳥取県衛生環境研究所) Tottori Prefectural Institute of Public Health and Environmental Science

\*\*\*Choi Seung-Bong, Kim Min-Su, Shin Jung-Chul (韓国江原道保健環境研究院) Institute of Health and Environment, Gangwon-do in Korea

### 3. 結果及び考察

#### 3.1 気流流入分析

両地域における黄砂の気流特性を把握するため、同一時期に観測された黄砂 (2014. 5. 28~5. 31) について、後方流跡線分析 (NOAA HYSPLIT Trajectory Model) を実施した。流跡線分析は、各黄砂発生日を対象に、地上1,500m地点を通過する気流について4時間間隔で6回 (合計24時間) の資料を検討した。

春川で観測された黄砂は、内モンゴル高原とゴビ砂漠方面からの気流がホルチン砂漠、中国青島市、上海市を通過後、春川市に流入した (図2)。鳥取県では、28日から30日夕方にかけて、内モンゴル方面の気流が青島市、上海市、山東半島を通過後、主に海上を経由し流入したが、30日夜から31日は韓国を経由した気流が流入した (図3)。

連続観測された黄砂であったが、様々な経路で到達しており、到達時間も差が大きかった。

#### 3.2 黄砂日と非黄砂日のTSP及び金属濃度の比較

春川及び鳥取県の黄砂日と非黄砂日の金属濃度の比較を行った。比較には、春川は、2014年:8日、2015年:5日、

2016年:6日の合計19日の黄砂日の測定結果を用いた。黄砂日の試料捕集基準は春川の大気測定網のPM-10が濃度  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  以上で2時間以上持続されるときとし、非黄砂日はTSPが  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  以下である日に限定 (2014年:9日、2015年:12日、2016年:2日:合計23日) した (表1)。鳥取県の黄砂基準は、黄砂のため視程が10km未満になるか、視程が10 km以上でも黄砂現象が明らかな場合であり、黄砂日は12日 (2014年:5日、2015年:3日、2016年:4日)、非黄砂日は64日 (2014年:14日、2015年:24日、2016年:26日) の測定結果を用いた (表2)。

両地域のTSP及び金属は、黄砂日が非黄砂日より高く観測された。黄砂日の平均TSPは、春川が  $153 \mu\text{g}/\text{m}^3$  で、非黄砂日 ( $32 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) より4.7倍高く、鳥取県は黄砂日 ( $111 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) が非黄砂日 ( $36 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) より3.1倍高かった。黄砂日に春川 (中央路:都市大気測定所) で観測したPM-10は  $128 \pm 33 \mu\text{g}/\text{m}^3$  であり、春川のTSP ( $153 \pm 40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) の80%のレベルだった。

土壌由来の元素に分類されるFe, Mn, Alは、黄砂日が非黄砂日より春川はそれぞれ6.1倍、6.2倍、3.3倍、鳥取県は、6.6倍、5.5倍、5.7倍高かった。人為的な汚染元素であるPb, Ni, Asは春川では6.1倍、2.0倍、2.9倍、鳥取

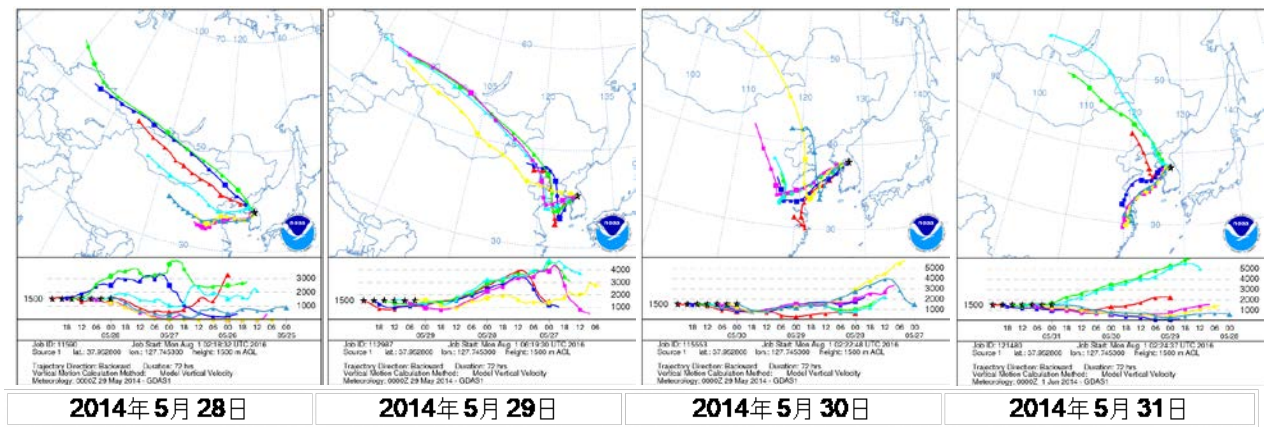


図2 春川の後方流跡線分析 (2014. 5. 28~31)

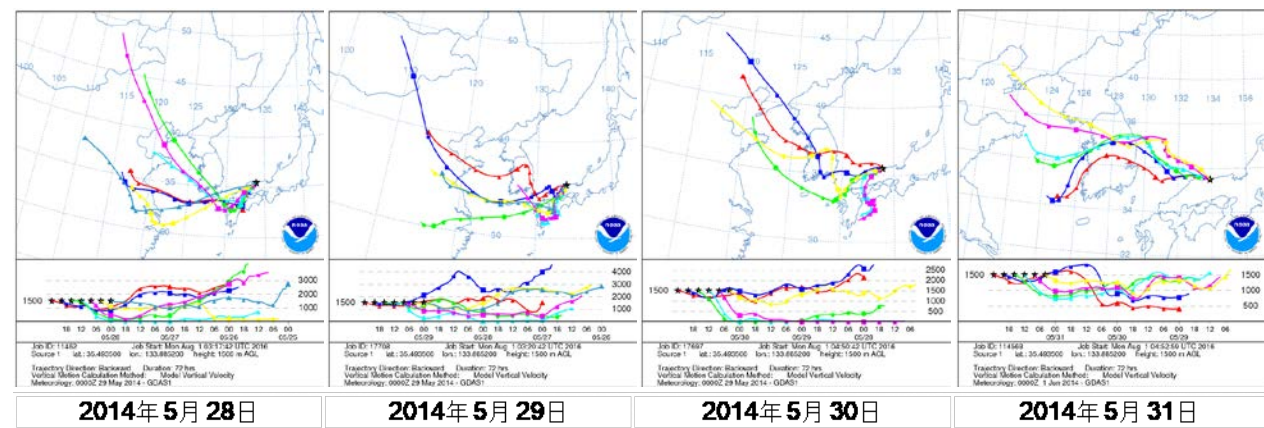


図3 鳥取県の後方流跡線分析 (2014. 5. 28~31)

県では2.8倍, 3.6倍, 3.8倍高かった。両地域で黄砂日/非黄砂日の比は全般的に土壌由来元素が人為的汚染元素より高かった。

### 3.3 黄砂日と非黄砂日のイオン成分濃度の比較

春川及び鳥取県の黄砂日と非黄砂日のイオン成分濃度を比較するため, 利用した試料は3.2の金属の場合と同じである。

黄砂日/非黄砂日の比が高いイオン成分は, 春川ではNO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>で, それぞれ5.6倍, 4.3倍, 3.2倍であり, 鳥取県ではCa<sup>2+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Mg<sup>2+</sup>でそれぞれ4.7倍, 2.3倍, 1.6倍であった。黄砂日/非黄砂日の比が比較的低いイオン成

分はCl<sup>-</sup>とNa<sup>+</sup>で, 春川はCl<sup>-</sup>が1.5倍, Na<sup>+</sup>が2.0倍であり, 鳥取県はそれぞれ0.8倍, 0.9倍であった(表3, 表4)。

### 3.4 黄砂日の両地域の金属濃度

春川及び鳥取県の黄砂日の金属濃度の比較を行った。比較には, 3.2と同様, 春川は19日(2014年:8日, 2015年:5日, 2016年:6日), 鳥取県は12日(2014年:5日, 2015年:3日, 2016年:4日)の測定結果を用いた(表5)。黄砂の影響は, 移動経路, 気象因子等により左右され, 発生地域に近い春川の方が鳥取県に比べ影響を多く受けていると考えられる。

表1 春川の黄砂日と非黄砂日のTSP及び金属濃度

Item		(unit: ng/m <sup>3</sup> , TSP, Fe, Al: µg/m <sup>3</sup> )												
		TSP	Fe	Mn	Cr	Cd	Pb	Ni	Al	As	Co	Zn	V	PM-10
黄砂日(a) (n=19)	Avg	153	3.0	92	11	1.5	53	7.0	4.4	7.3	1.7	143	9.8	128
	STD	40	1.5	41	4.8	0.63	41	3.6	3.2	2.1	1.0	64	4.1	33
	C.V	26%	49%	45%	44%	43%	79%	51%	72%	29%	62%	45%	42%	26%
非黄砂日(b) (n=23)	Avg	32	0.49	15	4.7	0.42	8.6	3.6	1.3	2.5	0.48	36	1.6	-
	STD	13	0.39	11	4.2	0.37	4.9	3.9	0.90	1.8	0.54	45	0.85	-
	C.V	40%	80%	76%	90%	88%	57%	110%	67%	73%	113%	125%	53%	-
濃度比(a/b)		4.7	6.1	6.2	2.3	3.5	6.1	2.0	3.3	2.9	3.5	4.0	6.1	

表2 鳥取県の黄砂日と非黄砂日のTSP及び金属濃度

Item		(unit: ng/m <sup>3</sup> , TSP, Fe, Al: µg/m <sup>3</sup> )											
		TSP	Fe	Mn	Cr	Cd	Pb	Ni	Al	As	Co	Zn	V
黄砂日(a) (n=12)	Avg	111	3.7	94	12	0.62	25	23	4.6	7.6	1.5	81	12
	STD	54	2.0	49	8.0	0.35	15	24	1.7	6.0	0.75	51	6.7
	C.V	48%	54%	53%	67%	57%	59%	104%	36%	79%	50%	63%	55%
非黄砂日(b) (n=64)	Avg	36	0.56	17	2.8	0.28	8.9	6.5	0.81	2.0	0.23	30	3.6
	STD	18	0.56	15	3.2	0.25	7.1	12	0.90	1.6	0.23	23	3.0
	C.V	50%	101%	90%	115%	91%	79%	192%	112%	80%	98%	77%	83%
濃度比(a/b)		3.1	6.6	5.5	4.3	2.2	2.8	3.6	5.7	3.8	6.5	2.7	3.4

表3 春川の黄砂日と非黄砂日のイオン成分濃度

Item		(unit: µg/m <sup>3</sup> )							
		TSP	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>
黄砂日(a) (n=19)	Avg	153	0.77	14	14	1.7	0.49	0.36	2.7
	STD	40	0.46	11	7.4	1.7	0.15	0.16	1.5
	C.V	26%	60%	76%	52%	99%	32%	45%	55%
非黄砂日(b) (n=23)	Avg	32	0.51	2.5	4.1	0.87	0.16	0.11	0.64
	STD	13	0.49	1.8	2.4	1.5	0.076	0.054	0.33
	C.V	40%	96%	72%	59%	169%	49%	49%	52%
濃度比(a/b)		4.7	1.5	5.6	3.5	2.0	3.1	3.2	4.3

表4 鳥取県の黄砂日と非黄砂日のイオン成分濃度

Item		(unit: µg/m <sup>3</sup> )							
		TSP	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>
黄砂日(a) (n=12)	Avg	111	1.6	3.9	8.3	1.5	0.58	0.34	1.7
	STD	54	2.7	2.9	4.1	1.6	0.61	0.22	1.4
	C.V	48%	164%	75%	49%	108%	104%	65%	82%
非黄砂日(b) (n=64)	Avg	36	2.1	1.7	5.7	1.8	0.45	0.21	0.37
	STD	18	3.2	1.4	3.9	1.8	0.54	0.17	0.39
	C.V	50%	154%	81%	69%	102%	121%	82%	106%
濃度比(a/b)		3.1	0.8	2.3	1.5	0.9	1.3	1.6	4.7

TSPは、春川が $153 \pm 40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、鳥取県が $111 \pm 54 \mu\text{g}/\text{m}^3$ で春川が1.4倍程度高かった。春川が鳥取県に比べ高かった金属は、Cd ( $1.5 \text{ ng}/\text{m}^3$ )、Zn ( $143 \text{ ng}/\text{m}^3$ )、Pb ( $53 \text{ ng}/\text{m}^3$ )でそれぞれ2.4倍、1.8倍、2.1倍であり、同程度であった金属は、Fe (0.8倍)、Mn (1.0倍)、Al (1.0倍)、As (1.0倍)、Co (1.1倍)、Cr (0.9倍)、V (0.8倍)であった。春川が低かった金属は、Ni (0.3倍)であった。

### 3.5 黄砂日の両地域のイオン成分濃度

黄砂日における春川の $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ はそれぞれ $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $2.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ であり、鳥取県の $3.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $8.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $1.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ に比べ3.7倍、1.7倍、1.6倍高く、 $\text{Na}^+$ と $\text{Mg}^{2+}$ は1.1倍で同程度であった。Cl<sup>-</sup>は鳥取県が高く、海の影響を受けていると考えられる。

表5 黄砂日の春川と鳥取県のTSP及び金属濃度

Item	(unit: $\text{ng}/\text{m}^3$ , TSP, Fe, Al: $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )											
	TSP	Fe	Mn	Cr	Cd	Pb	Ni	Al	As	Co	Zn	V
春川 (n=19)	153	3.0	92	11	1.5	53	7.0	4.4	7.3	1.7	143	9.8
鳥取県 (n=12)	111	3.7	94	12	0.62	25	23	4.6	7.6	1.5	81	12
春川/鳥取県	1.4	0.8	1.0	0.9	2.4	2.1	0.3	1.0	1.0	1.1	1.8	0.8

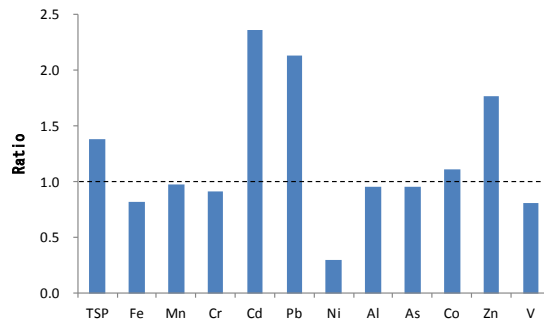


図4 金属濃度の比 (春川/鳥取県)

表6 黄砂日の春川と鳥取県のイオン成分濃度

Item	(unit: $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )							
	TSP	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>
春川 (n=19)	153	0.77	14	14	1.7	0.49	0.36	2.7
鳥取県 (n=12)	111	1.6	3.9	8.3	1.5	0.58	0.34	1.7
春川/鳥取県	1.4	0.5	3.7	1.7	1.1	0.8	1.1	1.6

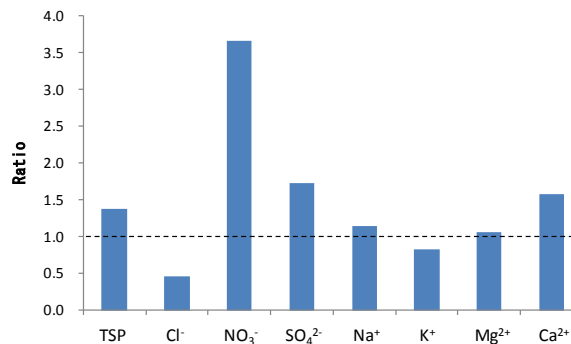


図5 イオン成分濃度の比 (春川/鳥取県)



### 3.6 成分分析結果を用いた因子分析による両地域のTSPの特徴比較

次に成分分析の結果を用いて因子分析を行い、飛来する大気粉じんの由来を推定することを試みた。本稿中の統計解析は全てR3.3.3 (R Development Core Team, 2017) を用いて行った。

因子分析に用いる成分分析結果は、あらかじめ標準化した。因子数を決定するため平行分析を行い、その結果から因子数を3とし、因子抽出法は重み付き最小二乗法とした。また、各成分間に相関があると考えられるため、因子軸の回転はプロマックス回転の条件で行った。

両地域の因子プロファイルを図6及び7に示す。Factor1は、土壌由来の元素の負荷が高く、土壌粒子の影響を示す因子であると考えられる。Factor2は、Pbなど化石燃料燃焼由来の元素の負荷が高いこと、 $SO_4^{2-}$ の負荷が高いことから、化石燃料燃焼と二次粒子生成に関連した因子であると思われる。Factor3は、 $Na^+$ 、 $Cl^-$ 、 $Mg^{2+}$ の負荷が高

いことから海塩粒子の影響を示す因子であると思われる。TSPに対する海塩粒子に起因する因子の寄与は、春川(約6%)が鳥取県(約16%)に比べ小さく、これはイオン成分濃度の測定結果(3.5)からの推論とも一致する。

次に因子分析で得られる因子得点を使って重回帰分析を行い、黄砂日における各因子の寄与濃度を算出した<sup>2)</sup><sup>3)</sup>。その結果を表7, 8に示す。春川において、海塩の影響はあまり見られない。また鳥取県と比較すると、燃焼由来粒子の寄与が高いことがわかった。これは、春川が大陸の大規模排出源により近いこと、燃焼による人為汚染の指標であるPbの黄砂日/非黄砂日の濃度比が鳥取県に比べ高い(3.2表1, 2)こととあわせて考えると、春川で観測される黄砂は大陸の排出源の影響をより強く受けていることを示している。

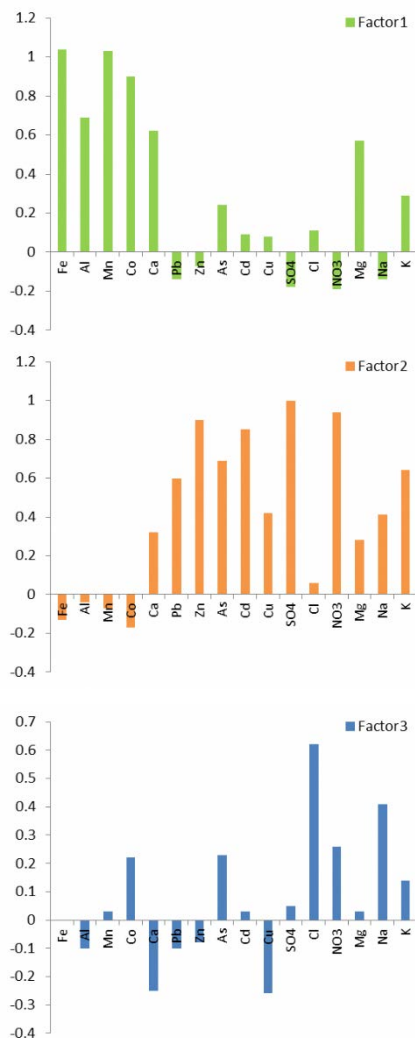


図6 因子プロファイル (春川)

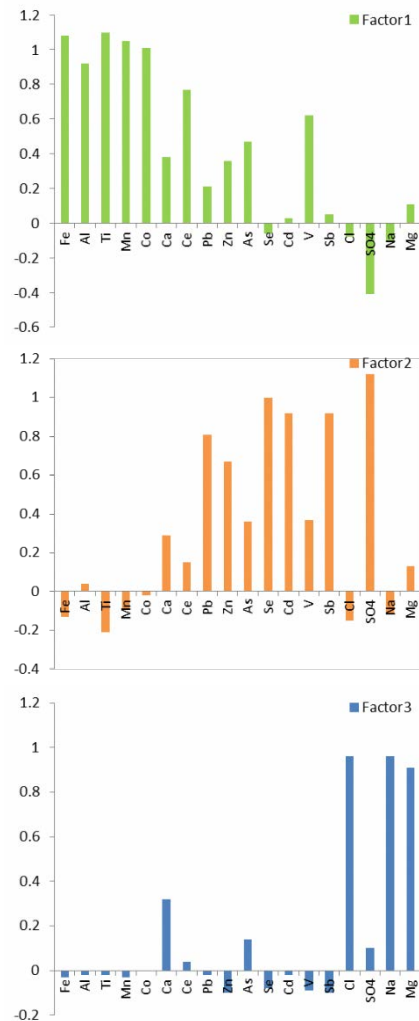


図7 因子プロファイル (鳥取)

表7 各因子の寄与割合（春川）

	Soil	Combustion	Sea salt	Others
2014.3.17	39.0	49.6	<1	10.4
2014.3.18	69.6	27.6	<1	1.8
2014.5.26	62.8	27.8	<1	8.5
2014.5.27	59.8	31.5	3.2	5.5
2014.5.28	53.4	38.8	2.2	5.6
2014.5.29	50.5	38.3	2.6	8.6
2015.3.20	63.5	28.6	<1	6.9
2015.3.22	72.7	20.4	<1	6.0
2015.3.30	63.2	31.3	<1	4.6
2015.5.14	38.1	57.7	<1	3.3
2015.5.15	39.1	48.9	1.2	10.8
2016.4.22	51.4	45.3	<1	2.3
2016.4.23	78.2	18.4	<1	2.4
2016.4.25	55.9	33.7	<1	9.4
2016.4.26	56.8	32.9	<1	9.3
2016.5.25	27.6	66.3	<1	5.1
2016.5.26	25.3	69.7	<1	3.9

(%)

表8 各因子の寄与割合（鳥取）

	Soil	Combustion	Sea salt	Others
2014.5.28	88.2	7.7	3.0	1.1
2014.5.29	86.6	8.7	3.4	1.3
2014.5.30	86.3	10.3	2.3	1.2
2014.5.31	89.4	7.3	2.2	1.1
2014.6.1	89.6	6.5	2.4	1.5
2015.3.22	77.5	6.9	14.4	1.3
2015.4.17	86.6	2.0	9.5	1.9
2015.4.18	85.0	6.7	4.1	4.2
2016.4.23	92.0	4.2	3.0	0.7
2016.4.24	89.6	5.9	3.3	1.1
2016.4.25	89.3	5.2	3.1	2.3
2016.5.8	90.9	2.7	3.9	2.5

(%)

#### 4. まとめ

黄砂の到達経路は様々であり、到達時間も差が大きかった。

両地域のTSP及び全ての金属は、黄砂日が非黄砂日より高かった。黄砂日の平均TSPは、非黄砂日より春川は4.7倍、鳥取県は3.1倍高かった。

黄砂日に春川で観測したPM-10は、TSPの80%のレベルであった。

土壌由来の元素に分類されるFe, Mn, Alは、黄砂日の方が非黄砂日より高く、春川ではそれぞれ6.1倍、6.2倍、3.3倍、鳥取県では6.6倍、5.5倍、5.7倍であった。

人為的汚染元素であるPb, Ni, Asは、黄砂日が非黄砂日より高く、春川が6.1倍、2.0倍、2.9倍、鳥取県が2.8倍、3.6倍、3.8倍であった。黄砂日/非黄砂日の比は、全般的に土壌由来元素が人為的汚染元素より高かった。

黄砂/非黄砂日の比が高いイオン成分は、春川ではNO<sub>3</sub><sup>-</sup> (5.6倍)、Ca<sup>2+</sup> (4.3倍)、Mg<sup>2+</sup> (3.2倍)の順で、鳥取県はCa<sup>2+</sup> (4.7倍)、NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (2.3倍)、Mg<sup>2+</sup> (1.6倍)であり、比が比較的低いイオン成分はCl<sup>-</sup>とNa<sup>+</sup>で春川はCl<sup>-</sup>が1.5倍、Na<sup>+</sup>が2.0倍であり、鳥取県はそれぞれ0.8倍、0.9倍だった。

黄砂日のTSPは、春川が鳥取県より1.4倍高かった。

黄砂日に春川が鳥取県より高かったのは、Cd (2.4倍)、Pb (2.1倍)、Zn (1.8倍)であり、同程度であ

った金属は、Fe (0.8倍)、V (0.8倍)、Mn (1.0倍)、Cr (0.9倍)、Al (1.0倍)、As (1.0倍)、Co (1.1倍)であり、Ni (0.3倍)は低かった。

黄砂日に春川が鳥取県に比べNO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Ca<sup>2+</sup>は3.7倍、1.7倍、1.6倍高く、Na<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>はそれぞれ1.1倍と同程度であったが、Cl<sup>-</sup> (0.5倍)とK<sup>+</sup> (0.8倍)は低かった。

成分分析結果を用いた因子分析から、春川における黄砂は鳥取県と比較すると、大陸の大規模な人為的汚染源の影響を強く受けているものと考えられる。

#### 5. 引用文献

- 1) 吉田篤史, 盛山哲郎, 福田拓, 松本範夫, 洞崎和徳: 鳥取県における過去3年間の黄砂飛来実態に関する調査について. 鳥取県衛生環境研究所報, **48**, 15-18, 2007
- 2) Yu Song, Shaodong Xie, Yuanhang Zhang, Limin Zeng, Lynn G. Salmon, Mei Zheng: Source apportionment of PM2.5 in Beijing using principal component analysis / absolute principal component scores and UNMIX. *Science of the Total Environment*, **372**, 278-286, 2006
- 3) 唐澤正宜, 水田均, 川合祐三, 伊藤宏, 小木曾毅: 大気浮遊粒子の発生源推定. 豊田中央研究所R&Dレビュー, **29**(2), 23-34, 1994