

4 調査結果の解析

4.1 飛来状況の分類

本調査結果の解析において、採取した試料が黄砂を捕集したかどうかを判断するため、以下の複数の情報のもつ特徴を踏まえ、総合的に解析した。

① 気象庁黄砂観測情報

- ・ 気象観測の担当官が、視程距離を参考にしつつ、目視で黄砂と判断して発表（2005年現在全国103地点で観測）。黄砂観測地点を日本地図上で表示。
- ・ ただし、黄砂観測実況図中の黄砂観測地点には、（いわゆる黄砂ではない）局地的に舞い上がる砂や塵を観測した地点も含まれている。

② 浮遊粒子状物質（SPM）濃度

- ・ 地上に黄砂が達したとき、当該時期の平均的な濃度と比較して高濃度となる。
- ・ 常時監視項目であることから、既存のモニタリングデータが豊富であり、解析に供しやすい。
- ・ ただし、当該時期の平均的な濃度変動と比べて著しく増加している場合、その地域において何らかの大气現象が観察されたことを意味するが、その原因が黄砂によるものかどうかは、濃度情報のみでは判断できず、また、弱い黄砂の場合は、その他の外乱要因により黄砂の有無が判別できない。

③ ライダー（LIDAR）装置^{iv}による黄砂観測

- ・ 粒子状物質の形状の違いから、大气汚染エアロゾルと鉱物粒子を判別できるため、黄砂飛来を判断する最も確かな手法。
- ・ 現時点では、設置地点が限られている。
- ・ 上空に雲がある場合、雲水・雲氷にレーザー光が反射することから、雲の上空の黄砂の有無は判別できない。

④ CFORS モデル^vによる数値計算

- ・ 黄砂の飛来やその濃度を、コンピューター計算により予測・検証を行うプログラム。計算結果は、気象情報に利用されるほか、発生源の推定や将来の気候変動の影響の予測など、様々な目的に利用されている。（独）国立環境研究

^{iv} 電磁波の代わりにレーザー光を用いたレーザーで、上空を通過する黄砂を地上で計測できるリモートセンシング機器の一種。地上から放射したレーザー光は空中の微粒子により散乱されるため、この状況から黄砂の垂直方向の濃度分布や、その時間的な変化を知ることができる。

^v 解析メッシュ以下の局所的な気象条件は反映できない。飛来範囲及び濃度予測を行なう数値モデルは複数存在。実観測データをオンラインで取り込み解析できるデータは研究段階。また、解析メッシュ以下の局所的な気象条件は反映できない。

所では、九州大学応用力学研究所が開発した CFORS（Chemical Weather Forecasting System）を 2002 年より運用している。

以上の特徴を踏まえ、本調査結果の解析において、採取した試料が黄砂飛来状況下で捕集したものか否かの同定は、複数の関連情報を参照し、下記分類に従って判断した。

飛来状況の分類	判断方法
A 黄砂	<p>気象庁黄砂観測情報は、局所的な砂塵の記録の場合もあり、広域的な現象である黄砂と区別するために、近隣の複数の観測地点で観測された場合、黄砂と判断する。具体的には、調査地点と距離の近い 5 地点を選定し、その内 2 地点以上で黄砂とされている日時を「黄砂」飛来とみなす。表-7 に調査期間中の黄砂記録を示す。</p>
B 弱い黄砂	<p>気象庁黄砂観測情報で黄砂とされない日のうち、ライダー装置によって黄砂が観測された場合、「弱い黄砂」が飛来したとみなす。</p> <p>ライダー装置未設置地点については、SPM 濃度の上昇が確認^{vi}され、かつ最も近いライダー装置設置地点で黄砂が観測された場合、当該地点において「弱い黄砂」が観測されたものとみなす。</p> <p>判断に利用したライダー装置設置地点を表-6 に示す。</p>
C 非黄砂	<p>上記の気象庁黄砂観測情報やライダー装置において、黄砂が観測されなかった場合、「非黄砂」とみなす。</p>

なお、大規模な黄砂の場合は、黄砂モデルによる数値計算においても再現されている場合が多いので、(独) 国立環境研究所が運用している CFORS の計算結果も参照した。

^{vi} バックグラウンド濃度と比較して一定の期間だけ濃度が上昇していた場合、「SPM 濃度上昇が確認された」とした。

図-6 解析に使用したライダー観測地点

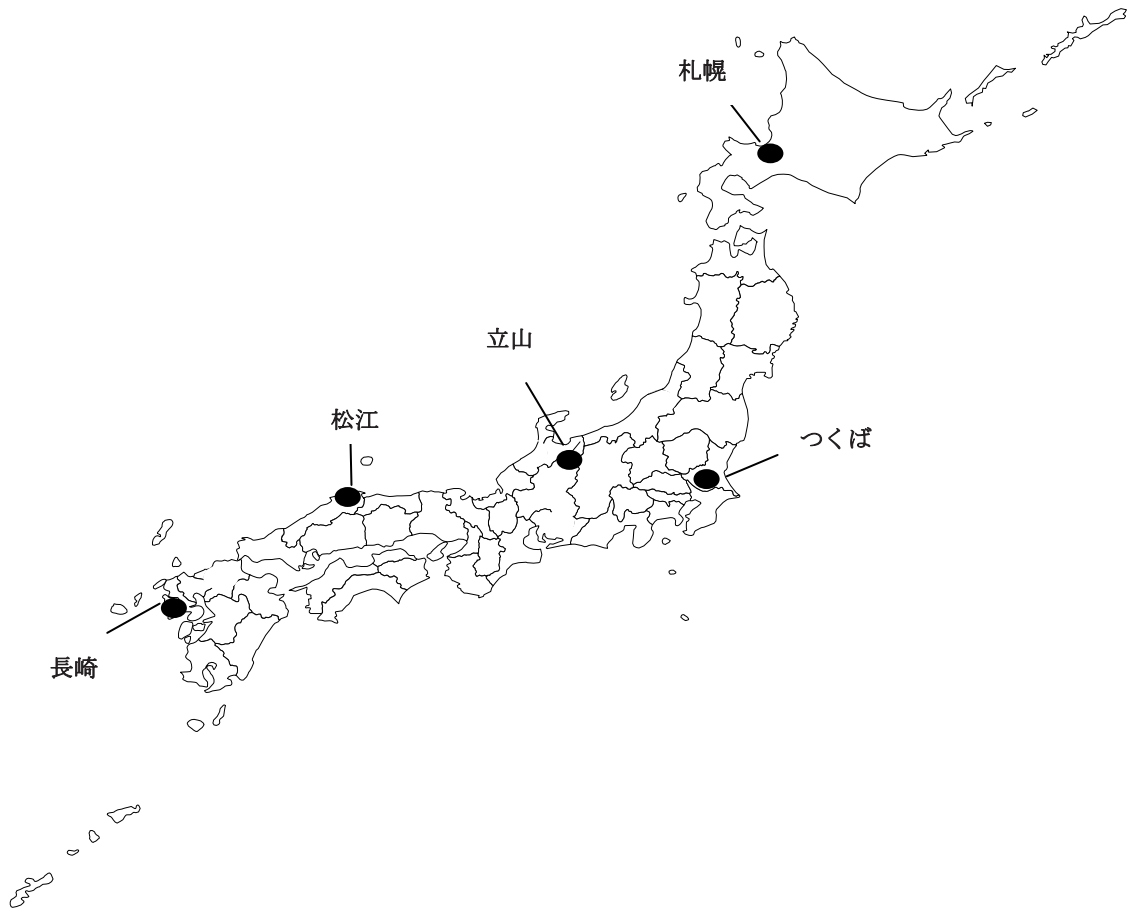


表-6 解析に使用したライダー観測地点

サンプリング地点	解析に利用したライダー地点
長崎	長崎
太宰府	
松江	松江
金沢	
犬山	
立山	富山
巻	
つくば	つくば
札幌	札幌

表-7 調査地点付近の気象庁黄砂観測の黄砂記録

地点名	気象官署	観測日 (サンプリング期間中 (足掛け2日) に1日でも黄砂が記録された日)																						
		2003			2004							2005							2006					
		3/25	3/30	3/31	2/24	2/25	2/26	3/10	3/11	3/30	3/31	4/23	4/24	5/7	3/18	3/29	3/30	4/7	4/14	4/21	4/28	3/11	3/28	
長崎	福江							○	○	○	○			○						○			○	
	熊本									○	○									○	○			○
	長崎							○	○	○	○	○								○	○			○
	佐賀							○	○			○		○						○				○
	福岡							○	○	○	○	○								○	○			○
太宰府	熊本									○	○									○	○			○
	長崎							○	○	○	○	○								○	○			○
	佐賀							○	○			○		○						○				○
	福岡							○	○	○	○	○								○	○		○	○
	下関							○	○					○						○	○			○
松江	広島	○						○	○	○	○	○		○	○					○				○
	浜田	○						○	○	○	○			○	○				○	○	○		○	○
	米子	○						○	○	○	○	○		○	○					○	○		○	
	松江	○						○	○	○	○			○					○	○	○		○	
	西郷	○						○	○					○	○				○	○	○		○	
金沢	岐阜		○	○					○	○	○			○	○									
	福井							○	○	○	○										○			
	富山							○	○	○	○	○									○			
	金沢							○	○	○	○			○							○			
	輪島							○	○	○	○										○			
犬山	彦根	○				○	○		○	○	○	○		○										
	津									○	○										○			
	飯田																							
	名古屋									○	○	○			○						○			
	岐阜		○	○					○	○	○			○	○						○			
立山	松本																							
	高田									○	○										○	○		
	長野									○				○										
	富山								○	○	○	○	○								○			
	金沢								○	○	○	○			○						○			
巻	高田									○	○										○			
	長野									○				○										
	新潟																							
	相川	○							○	○														
	若松																							
つくば	千葉																							
	東京																							
	館野																							
	水戸																							
	宇都宮																							
札幌	倶知安							○	○															
	室蘭							○	○															
	岩見沢							○	○															
	札幌							○	○															
	留萌							○	○															

表-8 黄砂・非黄砂の判定結果

調査日		長崎	太宰府	松江	金沢	犬山	立山	巻	つくば	札幌	JMA 発表
2003 3.25.10am -26.10am	JMA			●●●●●	⊗	●		●			近畿 中国 四国 19
	SPM	○	○	—	⊗	—	—	○	○	○	
	LIDAR	—	—	—	⊗	—	—	—	—	—	
	CFORS	—	—	—	⊗	—	—	—	—	—	
判定	C	C	A	⊗	C	C	C	C	C	C	
2003 3.30.12am -31.12am	JMA				⊗	●					1
	SPM	—	—	—	⊗	○	○	○	—	—	
	LIDAR	△	—	—	⊗	—	—	—	—	○	
	CFORS	—	—	—	⊗	—	—	—	—	—	
判定	B	C	C	⊗	C	C	C	C	C	B	
2003 3.31.12am -4.01.12am	JMA				⊗	●					1
	SPM	—	—	—	⊗	○	○	○	○	○	
	LIDAR	—	—	—	⊗	—	—	—	—	—	
	CFORS	—	—	—	⊗	—	—	—	—	—	
判定	C	C	C	⊗	C	C	C	C	C	C	
2004 2.24.10am -25.10am	JMA				⊗						0
	SPM	—	—	—	⊗	—	—	○	—	○	
	LIDAR	△	—	—	⊗	—	—	—	—	—	
	CFORS	—	—	—	⊗	—	—	—	—	—	
判定	B	C	C	⊗	C	C	C	B	C	C	
2004 2.25.10am -26.10am	JMA				⊗	●					近畿 四国 奄美 14
	SPM	○	○	○	⊗	○	—	○	○	—	
	LIDAR	○	—	—	⊗	—	◎	—	◎	○	
	CFORS	—	—	—	⊗	—	—	—	—	○	
判定	B	B	B	⊗	B	B	B	B	B	B	
2004 2.26.10am -27.10am	JMA				⊗	●					近畿 四国 奄美 14
	SPM	—	—	—	⊗	—	—	—	—	—	
	LIDAR	◎	—	—	⊗	—	—	—	○	—	
	CFORS	○	○	○	⊗	○	○	○	○	○	
判定	B	C	C	⊗	C	C	C	B	C	C	
2004 3.10.5pm -11.5pm	JMA	●●●●	●●●●	●●●●	⊗	●●	●			●●●●	全国 42
	SPM	○	○	○	⊗	○	○	○	○	○	
	LIDAR	◎	—	—	⊗	△	—	—	◎	◎	
	CFORS	○	○	○	⊗	○	○	○	○	○	
判定	A	A	A	⊗	B	A	B	B	A	A	
2004 3.11.5pm -12.5pm	JMA	●●●●	●●●●	●●●●	⊗	●●●	●●●	●●		●●●●	全国 56
	SPM	○	○	○	⊗	○	○	○	○	○	
	LIDAR	◎	—	—	⊗	—	◎	—	◎	—	
	CFORS	○	○	○	⊗	○	○	○	○	—	
判定	A	A	A	⊗	A	A	A	B	A	A	
2004 3.30.9am -31.9am	JMA	●●●●	●●●	●●●●	⊗	●●●●	●●●	●			西日本 36
	SPM	○	○	—	⊗	○	○	—	—	○	
	LIDAR	○	—	—	⊗	—	◎	—	△	—	
	CFORS	○	○	○	⊗	○	○	○	—	○	
判定	A	A	A	⊗	A	A	C	B	C	C	
2004 3.31.10am -4.01.10am	JMA	●●●●	●●●	●●●●	⊗	●●●●	●●●	●			西日本 36
	SPM	○	—	—	⊗	○	○	○	—	○	
	LIDAR	◎	—	—	⊗	—	◎	—	◎	—	
	CFORS	○	○	○	⊗	○	○	○	○	○	
判定	A	A	A	⊗	A	A	B	B	C	C	
2004 4.23.4pm -24.4pm	JMA	●●●	●●●	●●	⊗	●	●				中国 四国 九州 22
	SPM	○	—	—	⊗	—	—	○	—	—	
	LIDAR	○	—	—	⊗	—	—	—	○	—	
	CFORS	—	—	—	⊗	—	—	○	○	—	
判定	A	A	A	⊗	C	C	C	B	C	C	
2004 4.24.4pm -25.4pm	JMA				⊗						1
	SPM	○	—	—	⊗	—	—	—	—	—	
	LIDAR	○	—	—	⊗	—	—	—	—	—	
	CFORS	—	—	—	⊗	—	—	—	—	—	
判定	B	C	C	⊗	C	C	C	C	C	C	
2004 5.07.4pm -08.4pm	JMA	●●	●●	●●●●	⊗	●●	●●	●			西日本 25
	SPM	○	○	○	⊗	○	○	○	○	—	
	LIDAR	△	—	—	⊗	—	◎	—	○	—	
	CFORS	○	○	○	⊗	○	○	○	○	—	
判定	A	A	A	⊗	A	A	B	B	C	C	

調査日		長崎	太宰府	松江	金沢	犬山	立山	巻	つくば	札幌	JMA 発表
2005 3.18.5pm -19.5pm	JMA			●●●●●	●	●●					近畿 中国 四国 26
	SPM	—	○	—	—	—	—	○	○	—	
	LIDAR	—	—	—	—	—	○	○	○	—	
	CFORS	○	○	○	○	○	○	○	○	—	
	判定	C	C	A	C	A	B	B	B	C	
2005 3.29.3pm -30.3pm	JMA										5
	SPM	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	LIDAR	○	—	◎	—	—	—	—	—	—	
	CFORS	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	判定	B	C	B	C	C	C	C	C	C	
2005 3.30.3pm -31.3pm	JMA										1
	SPM	—	—	○	—	—	—	—	—	—	
	LIDAR	—	—	◎	—	—	—	—	○	—	
	CFORS	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	判定	C	C	B	C	C	C	C	B	C	
2005 4.07.10am -08.10am	JMA			●●●							中国 3
	SPM	—	—	○	○	—	○	—	—	○	
	LIDAR	△	—	○	—	—	○	—	◎弱	△	
	CFORS	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	判定	B	C	A	C	C	B	C	B	B	
2005 4.14.10am -15.10am	JMA	●●●	●●●●	●●●●							九州 中国 37
	SPM	—	○	○	—	—	—	—	—	—	
	LIDAR	△	—	○	—	—	◎弱	—	△	○	
	CFORS	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	判定	A	A	A	C	C	B	C	B	B	
2005 4.21.10am -22.10am	JMA	●●●●	●●●●	●●●●	●●●●	●●●	●●●	●			西日本 58
	SPM	○	○	○	○	○	—	○	—	—	
	LIDAR	△	—	◎	—	—	◎	—	○	○	
	CFORS	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	判定	A	A	A	A	A	A	C	B	B	
2005 4.28.10am -29.10am	JMA						●				6
	SPM	—	—	—	○	○	○	—	○	○	
	LIDAR	△	—	○	—	—	◎弱	—	◎弱	○	
	CFORS	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	判定	B	C	B	C	C	B	C	B	B	
2006 3.11.10am -12.10am	JMA		●	●●●●							中国 8
	SPM	○	○	○	○	—	○	○	—	—	
	LIDAR	○	—	◎	—	—	◎弱	—	—	△	
	CFORS	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	判定	B	C	A	C	C	B	C	B	B	
2006 3.28.10am -29.10am	JMA	●●●●	●●●●	●●							九州 中国 22
	SPM	○	—	○	—	○	—	○	—	○	
	LIDAR	○	—	◎雨	—	—	◎	—	—	○	
	CFORS	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	判定	A	A	A	C	C	B	C	B	B	

- ・網掛け：「黄砂」、「弱い黄砂」と判断された地点は網掛けで示した。
 - ・JMA：気象庁の近傍5観測地点のうち、黄砂とされた地点数を●で示した。
 - ・SPM：SPM濃度が上昇：○、期間中顕著な上昇見られず（黄砂によると思われるピークが判断できず）：—
 - ・LIDAR：地上付近と上空に黄砂観測：◎、地上付近：○、上空のみ：△、観測されず：—
 - ・CFORS：推定モデルによる概ねの予測がされた場合：○、それ以下：—
 - ・判定：黄砂A、弱い黄砂B、非黄砂C（判断方法はP25を参照）
 - ・JMA発表：気象庁により黄砂が記録された地域と、期間中（2日分）の黄砂記録地点数（全国103地点）を示した。
- *立山（富山）のライダー装置は2003年度から、松江のライダー装置は2004年度から稼働。

表－9に黄砂の飛来状況の分類を示した。本調査のサンプリング185回（ただし欠測や未分析項目などのため実際に解析に利用できるのは、浮遊粉じん濃度の解析用172回、金属・イオンの解析用178回、農薬の解析用168回）を、黄砂47回、弱い黄砂53回、非黄砂85回と分類した。

表－9 黄砂・弱い黄砂・非黄砂の分類

判断方法		ライダー観測情報とSPM濃度		計
		黄砂と判断	黄砂と判断せず	
気象庁 黄砂観測情報	黄砂と判断	37	10	47 「黄砂」
	黄砂と判断せず	53 「弱い黄砂」	85 「非黄砂」	138
計		90	95	185

4.2 飛来状況の解析

1) 黄砂時、弱い黄砂時、非黄砂時の浮遊粉じん濃度

先に分類した黄砂時、弱い黄砂時、非黄砂時について、それぞれの浮遊粉じん濃度の平均値を計算した。その結果、黄砂時 $91.3\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、弱い黄砂時 $66.7\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、非黄砂時 $51.4\mu\text{g}/\text{m}^3$ と計算された。これらの値の差は、何れも t-検定^{vii}の結果、有意水準 1% で有意であった。

表－10 黄砂時、弱い黄砂時、非黄砂時の浮遊粉じん濃度と差の検定

		黄砂時	弱い黄砂時	非黄砂時	計
延べ測定回数		43	49	80	172
浮遊粉じん濃度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) の平均値		91.3	66.7	51.4	65.7
t-値	黄砂時	—	3.07**	5.35**	
	弱い黄砂時	3.07**	—	3.04**	
	非黄砂時	5.35**	3.04**	—	

有意性検定:t-検定 (片側)、有意水準 1% で有意:**、有意水準 5% で有意:*

2) 黄砂時と非黄砂時の各分析項目濃度の違い

黄砂時、弱い黄砂時、非黄砂時に 3 分類した結果を利用し、各分析項目の濃度の違いを評価した。表－11 は、それぞれ黄砂時、弱い黄砂時、非黄砂時とされた試料の各分析項目の濃度を平均にしたものである。これによると、黄砂時には、ほとんどの項目の濃度が高くなることがわかる。

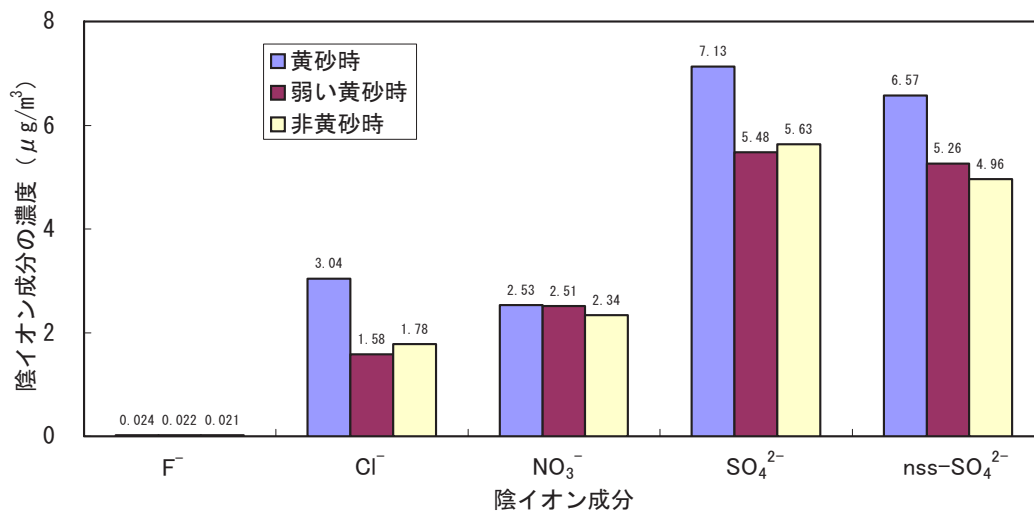
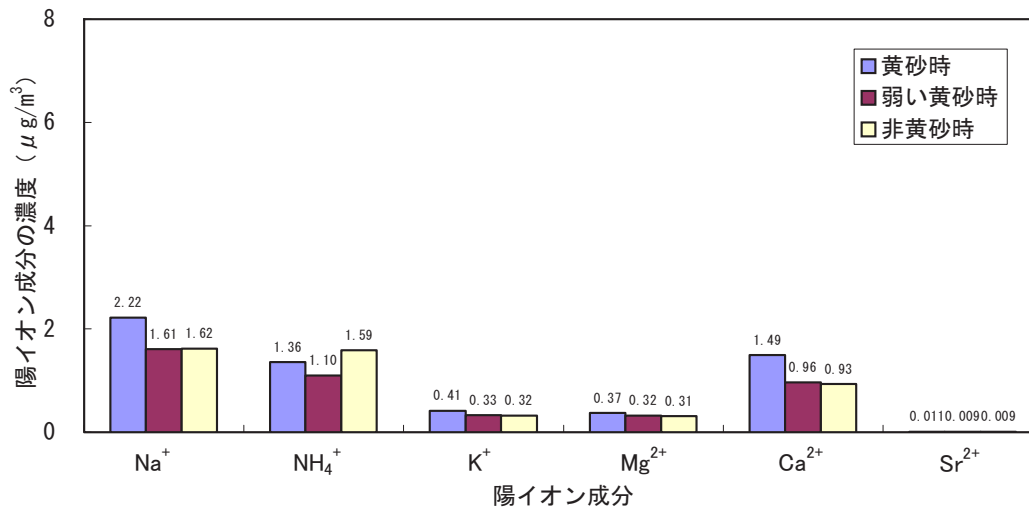
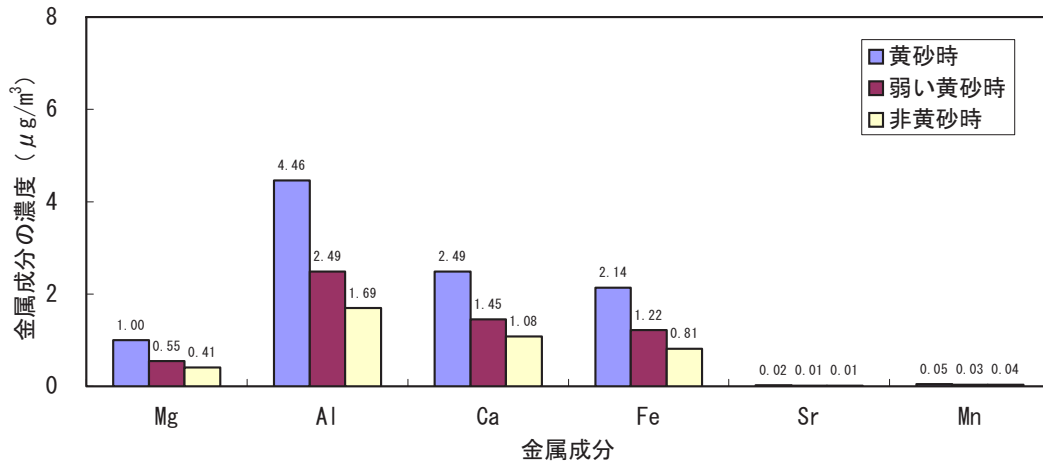
表－11 黄砂時、弱い黄砂時、非黄砂時の各分析項目の平均濃度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

	Mg	Al	Ca	Fe	Sr	Mn	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	nss-SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Sr ²⁺
A	1.00	4.46	2.49	2.14	0.02	0.05	0.024	3.04	2.53	7.13	6.57	2.22	1.36	0.41	0.37	1.49	0.011
B	0.55	2.49	1.45	1.22	0.01	0.03	0.022	1.58	2.51	5.48	5.26	1.61	1.10	0.33	0.32	0.96	0.009
C	0.41	1.69	1.08	0.81	0.01	0.04	0.021	1.78	2.34	5.63	4.96	1.62	1.59	0.32	0.31	0.93	0.009
AB	0.79	3.55	1.99	1.69	0.01	0.04	0.023	2.31	2.52	6.27	5.91	1.91	1.22	0.38	0.35	1.24	0.010
BC	0.46	1.95	1.21	0.96	0.01	0.04	0.021	1.71	2.42	5.58	5.07	1.61	1.40	0.33	0.31	0.95	0.009

注：A:黄砂時 B:弱い黄砂時 C:非黄砂時

^{vii} t-検定は、特に、試料数が少ない場合に、平均値に関して統計的に有意であるかどうかを判断をする手法。この場合では、2 つの調査結果の平均値の差が実際には無いにもかかわらず偶然出てきた可能性が 1% 未満、すなわち 99% 以上の確率で差があるといえる。

図-7 黄砂時、弱い黄砂時、非黄砂時の各分析項目の平均濃度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)



この平均値の差の有意性を t-検定により判断した結果を表-12に示す。この結果、黄砂時 (A) と非黄砂時 (C) では多くの分析項目で有意差が見られており、浮遊粉じんの構成成分に本質的な違いがあることが示唆された。また、黄砂時 (A) と弱い黄砂時 (B) においても、多くの分析項目で有意差が見られており、弱い黄砂時 (B) と非黄砂時 (C) では、あまり差はなく、Fe が有意水準 1% で有意差があった。鉱物由来と考えられる Mg、Al、Ca、Fe は、黄砂時 (A) と非黄砂時 (C) には共におおきな有意差が見られるのに対し、燃焼由来と考えられる SO_4^{2-} 、 NH_4^+ 、 K^+ などは両者の t-値が大きく異なっている。その中で、 NH_4^+ は、弱い黄砂時 (B) と非黄砂時 (C) の間におおきな有意差が見られるのに対し、 NO_3^- は逆に、全般的に有意差が見られず、対照的である。

従前の気象庁の黄砂判断による分類の場合、弱い黄砂 (B) と非黄砂 (C) の判別が出来ないためそれを合わせた計算を行わざるを得ない (表-12 A-BC 行)。そのため、 NO_3^- 、 NH_4^+ については有意な差が計算されないことになる。また、ライダー装置のみで黄砂を判別した場合には、黄砂 (A) と弱い黄砂 (B) が同じグループになるため、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 NH_4^+ などの特徴的な挙動を判断できなかった。ただし、nss- SO_4^{2-} は、他の組み合わせでは、ほとんど差がなかったが、検定では 5% で有意ではなかったもののある程度差異が検出されている。気象庁の記録とライダーデータの両者を活用して 3 分類を行うことにより、このような浮遊粉じんの構成成分の変化について知見を得ることができた。

表-12 各分析項目の黄砂時、弱い黄砂時、非黄砂時の有意差の検定

	Mg	Al	Ca	Fe	Sr	Mn	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	nss-SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Sr ²⁺
A-B	3.46	2.92	2.83	3.68	3.86	2.50	0.50	2.85	0.03	2.24	0.60	2.20	1.00	2.15	1.84	3.50	0.69
A-C	4.95	4.68	4.50	5.91	5.17	1.83	0.76	2.50	0.48	1.92	0.69	2.19	-0.74	2.34	2.12	3.83	0.80
B-C	1.83	1.89	1.45	2.63	1.22	-0.65	0.14	-0.53	0.43	-0.25	0.48	-0.04	-2.12	0.34	0.27	0.26	0.18
AB-C	4.71	4.50	3.97	5.64	4.29	0.47	0.57	1.38	0.52	1.05	1.57	1.39	-1.59	1.86	1.66	2.59	0.71
A-BC	4.58	4.27	4.14	5.32	4.92	2.44	0.72	2.83	0.32	2.20	0.66	2.39	-0.16	2.45	2.25	4.06	0.80

注：A:黄砂時 B:弱い黄砂時 C:非黄砂時

網掛けは、濃い色:1%で有意、薄い色:5%で有意、網掛けなし:有意差なし

4.3 化学的性質の解析

1) 分析項目間の単相関の計算

捕集した粒子状物質、金属（6項目）、イオン（10項目）の重量濃度の単相関係数を全ての試料、黄砂時、弱い黄砂時、非黄砂時に分けて計算した。結果を表-13（1）～（4）に示す。表中で網掛けで示した項目同士は、単相関係数が0.80以上あり、これらの元素・イオンが同一起源である可能性が示唆される。

全ての試料の相関については、次の特徴がみられた。

- 金属成分同士、金属と Ca^{2+} の相関が大きい。
- Cl^- 、 Na^+ 、 Mg^{2+} の相関が大きい。
- SO_4^{2-} と NH_4^+ 、 K^+ の相関が大きい。
- NO_3^- は、 F^- 、 NH_4^+ とやや相関がある。
- F^- は、 NO_3^- とやや相関がある。

次に、黄砂時、弱い黄砂時、非黄砂時の相関を比較すると、次の特徴がみられた。

- 非黄砂時、弱い黄砂時、黄砂時の順に、金属成分の相関が強まった。
- 黄砂時は、非黄砂時に比べて、 Cl^- 、 Na^+ と金属成分との相関がやや強くなった。
- SO_4^{2-} と NH_4^+ 、 K^+ の相関は、黄砂の飛来状況によらず強かった。
- Ca^{2+} と金属成分の相関は、黄砂の飛来状況によらず強かった。
- 非黄砂時は、浮遊粉じんと、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 、 K^+ の相関がみられた。

以上の結果から、

- ① 黄砂の成分である金属成分と Ca^{2+} に強い相関があり、非黄砂時、弱い黄砂時、黄砂時の順にその相関が強まった。
- ② 人為発生源と考えられる SO_4^{2-} 、 NH_4^+ 、 K^+ は、非黄砂時、弱い黄砂時、黄砂時とも相関が強く、また、非黄砂時において浮遊粉じん濃度と相関が強かったことから、黄砂の飛来によらず、国内の発生源の寄与が大きいと考えられる。
- ③ 海塩起源と考えられる Cl^- と Na^+ は、黄砂時、弱い黄砂時、非黄砂時とも同程度の相関を示し、いずれの場合も海塩粒子が存在することを示している。

表-13 (1) 分析項目毎の単相関係数 (全ての試料)

All	TSP	Mg	Al	Ca	Fe	Sr	Mn	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Sr ²⁺
TSP		163	150	161	163	143	50	52	125	169	172	158	157	125	72	116	19
Mg	0.78		154	164	166	145	51	51	120	164	168	155	154	124	73	114	21
Al	0.84	0.89		155	153	141	47	51	119	153	155	150	141	117	72	110	20
Ca	0.80	0.83	0.84		165	148	54	51	121	164	167	158	153	124	74	116	21
Fe	0.89	0.85	0.88	0.85		148	54	51	119	165	169	156	155	123	73	115	21
Sr	0.85	0.90	0.90	0.94	0.87		53	49	110	146	148	146	134	108	70	108	21
Mn	0.85	0.77	0.74	0.86	0.90	0.91		*	31	53	54	54	50	41	26	52	21
F ⁻	0.37	0.35	0.37	0.33	0.37	0.35	*		45	52	52	49	49	45	30	47	*
Cl ⁻	0.31	0.54	0.37	0.34	0.29	0.41	0.23	0.07		126	126	122	112	93	67	87	16
NO ₃ ⁻	0.33	0.15	0.10	0.24	0.22	0.31	0.34	0.51	-0.20		174	161	159	127	74	120	21
SO ₄ ²⁻	0.36	0.11	0.14	0.12	0.14	0.19	0.37	-0.05	-0.05	0.34		163	163	128	74	120	21
Na ⁺	0.28	0.51	0.27	0.31	0.25	0.40	0.26	0.12	0.90	-0.05	-0.01		149	122	74	117	21
NH ₄ ⁺	0.18	-0.12	-0.06	-0.06	-0.03	0.01	0.19	-0.04	-0.26	0.56	0.83	-0.26		122	66	112	17
K ⁺	0.29	0.14	0.10	0.12	0.14	0.19	0.41	-0.08	-0.09	0.29	0.77	-0.08	0.68		69	100	19
Mg ²⁺	0.36	0.51	0.31	0.30	0.32	0.34	0.59	0.08	0.73	-0.19	-0.02	0.87	-0.26	-0.04		64	18
Ca ²⁺	0.83	0.72	0.72	0.87	0.81	0.81	0.74	0.37	0.39	0.28	0.16	0.36	-0.01	0.16	0.44		21
Sr ²⁺	0.26	-0.15	-0.02	0.32	0.09	0.20	0.10	*	0.05	0.35	0.35	-0.02	0.40	0.45	0.10	0.30	

注1：網掛けは、単相関係数 0.8 以上

注2：対角の右上部分は、計算に使用した試料数

注3：*は、試料数が少なく計算不能

表-13 (2) 分析項目毎の単相関係数 (黄砂時)

A	TSP	Mg	Al	Ca	Fe	Sr	Mn	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Sr ²⁺
TSP		43	41	43	43	42	12	24	32	42	43	43	37	38	26	39	8
Mg	0.89		43	45	45	44	14	24	33	43	45	45	39	40	28	41	10
Al	0.91	0.94		43	43	43	13	24	32	42	43	43	37	38	27	40	10
Ca	0.93	0.89	0.91		45	44	14	24	33	44	45	45	39	40	28	40	10
Fe	0.94	0.90	0.91	0.94		44	14	24	33	44	45	45	39	40	28	41	10
Sr	0.94	0.91	0.94	0.98	0.95		14	24	32	43	44	44	38	39	27	41	10
Mn	0.88	0.79	0.79	0.81	0.91	0.88		*	10	14	14	14	11	12	9	14	10
F ⁻	0.60	0.62	0.63	0.59	0.66	0.63	*		20	24	24	24	21	23	17	24	*
Cl ⁻	0.58	0.70	0.55	0.62	0.53	0.58	0.53	0.02		33	33	33	27	30	26	31	8
NO ₃ ⁻	0.39	0.18	0.14	0.26	0.22	0.27	0.00	0.49	0.01		44	44	38	39	28	41	10
SO ₄ ²⁻	0.08	-0.11	-0.13	-0.08	-0.11	-0.07	0.12	-0.35	-0.07	0.41		45	39	40	28	41	10
Na ⁺	0.56	0.68	0.52	0.58	0.55	0.58	0.53	0.15	0.85	0.07	-0.12		39	40	28	41	10
NH ₄ ⁺	-0.04	-0.23	-0.24	-0.18	-0.22	-0.18	-0.36	-0.36	-0.08	0.44	0.88	-0.33		35	23	35	6
K ⁺	0.15	-0.07	-0.10	-0.02	-0.02	-0.04	0.28	-0.36	0.15	0.33	0.90	-0.19	0.86		28	37	9
Mg ²⁺	0.51	0.57	0.39	0.42	0.47	0.39	0.84	0.09	0.69	-0.15	0.10	0.88	-0.29	0.16		27	8
Ca ²⁺	0.92	0.72	0.76	0.88	0.84	0.85	0.66	0.68	0.38	0.41	0.04	0.43	-0.08	0.03	0.38		10
Sr ²⁺	0.60	-0.11	-0.02	0.57	0.30	0.38	0.05	*	0.03	0.55	0.58	0.13	0.49	0.70	-0.10	0.59	

注1：網掛けは、単相関係数 0.8 以上

注2：対角の右上部分は、計算に使用した試料数

注3：*は、試料数が少なく計算不能

表－13（3） 分析項目毎の単相関係数（弱い黄砂時）

B	TSP	Mg	Al	Ca	Fe	Sr	Mn	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Sr ²⁺
TSP		40	37	42	43	41	21	16	33	48	49	46	47	30	18	38	7
Mg	0.51		36	39	40	38	18	15	18	39	40	38	39	26	17	32	6
Al	0.70	0.82		37	37	36	16	15	28	37	37	36	36	26	17	30	5
Ca	0.60	0.76	0.74		42	41	21	15	29	42	42	41	41	27	18	34	6
Fe	0.74	0.66	0.83	0.73		41	21	15	29	42	43	41	42	27	18	34	6
Sr	0.66	0.91	0.85	0.87	0.69		21	15	28	40	41	40	40	27	18	33	6
Mn	0.84	0.71	0.88	0.89	0.96	0.90		*	12	20	21	21	21	13	8	19	6
F ⁻	-0.04	-0.13	-0.12	-0.11	-0.05	-0.12	*		14	16	16	15	16	11	8	14	*
Cl ⁻	0.14	0.45	0.21	0.12	-0.05	0.40	-0.20	-0.18		33	33	32	32	23	15	28	*
NO ₃ ⁻	0.18	0.14	0.05	0.28	0.15	0.22	0.28	0.62	-0.10		48	45	46	30	18	38	6
SO ₄ ²⁻	0.36	0.21	0.11	0.09	0.12	0.15	0.28	0.44	0.03	0.25		46	47	30	18	38	6
Na ⁺	0.00	0.35	-0.09	0.08	-0.16	0.29	-0.17	-0.03	0.85	0.14	0.17		45	30	18	37	6
NH ₄ ⁺	0.17	-0.16	-0.11	-0.10	-0.04	-0.14	0.30	0.51	-0.29	0.54	0.69	-0.19		30	18	38	6
K ⁺	0.06	0.04	-0.14	-0.04	0.00	-0.07	0.33	0.35	-0.11	0.33	0.70	0.03	0.62		17	28	5
Mg ²⁺	0.00	0.28	0.02	0.10	-0.12	0.30	0.11	-0.28	0.73	-0.34	-0.21	0.89	-0.46	-0.31		17	5
Ca ²⁺	0.63	0.68	0.64	0.89	0.74	0.74	0.72	-0.14	0.38	0.19	0.17	0.13	-0.04	0.14	0.08		6
Sr ²⁺	-0.25	-0.44	0.99	-0.51	-0.54	-0.46	-0.50	*	*	-0.26	-0.09	-0.52	0.11	0.54	0.63	-0.54	

注1：網掛けは、単相関係数 0.8 以上

注2：対角の右上部分は、計算に使用した試料数

注3：*は、試料数が少なく計算不能

表－13（4） 分析項目毎の単相関係数（非黄砂時）

C	TSP	Mg	Al	Ca	Fe	Sr	Mn	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Sr ²⁺
TSP		79	72	76	77	60	17	12	60	79	80	69	73	57	28	39	5
Mg	0.58		75	80	81	61	19	12	59	81	83	72	76	58	28	41	5
Al	0.66	0.73		75	73	62	18	12	59	74	75	75	68	53	28	40	5
Ca	0.62	0.68	0.70		80	63	19	12	59	79	80	72	73	57	28	41	5
Fe	0.81	0.70	0.74	0.67		63	19	12	59	81	83	72	76	58	28	41	5
Sr	0.72	0.80	0.75	0.91	0.69		18	10	50	63	63	62	56	42	25	35	5
Mn	0.90	0.82	0.71	0.82	0.82	0.92		*	9	19	19	19	18	16	9	19	5
F ⁻	0.37	0.26	0.30	0.43	0.14	0.42	*		11	12	12	10	12	11	5	9	*
Cl ⁻	-0.09	0.27	-0.03	-0.02	-0.12	0.06	-0.35	0.16		60	60	57	53	40	26	28	*
NO ₃ ⁻	0.55	0.21	0.15	0.29	0.34	0.46	0.71	0.50	-0.31		82	72	75	58	28	41	5
SO ₄ ²⁻	0.59	0.19	0.30	0.18	0.26	0.32	0.56	0.41	-0.13	0.36		72	77	58	28	41	5
Na ⁺	-0.04	0.32	-0.07	0.00	-0.12	0.14	0.10	0.24	0.94	-0.18	-0.08		65	52	28	39	5
NH ₄ ⁺	0.54	0.01	0.11	0.07	0.21	0.22	0.45	0.21	-0.29	0.64	0.88	-0.26		57	25	39	*
K ⁺	0.55	0.06	0.17	0.08	0.18	0.24	0.51	0.43	-0.28	0.29	0.89	-0.14	0.78		24	35	5
Mg ²⁺	0.04	0.21	-0.14	-0.11	-0.15	-0.08	0.53	-0.62	0.80	-0.18	-0.07	0.90	-0.23	-0.18		20	5
Ca ²⁺	0.74	0.60	0.53	0.78	0.72	0.66	0.75	0.55	0.00	0.39	0.25	0.12	0.13	0.32			5
Sr ²⁺	0.90	0.82	0.95	0.99	0.80	0.87	0.87	*	*	0.80	0.93	0.87	*	0.97	0.60	0.87	

注1：網掛けは、単相関係数 0.8 以上

注2：対角の右上部分は、計算に使用した試料数

注3：*は、試料数が少なく計算不能

2) 因子分析による捕集物質の推定

これまでの分析により浮遊粉じんの化学成分が、黄砂時と非黄砂時で異なった構成であることが明らかになった。この要因を探る目的で、単相関を計算した15項目について、多変量解析（因子分析）により、捕集された浮遊粉じんの構成物質を推定した。因子は、主因子法により固有値が1以上のものを抽出し、因子負荷量から因子の意味付けを行った。なお、入力の主成分ベクトルとし、軸の回転はバリマックス法によった。

計算の結果、3つの因子が抽出された。因子負荷量を図-8に示す。第1因子は、金属元素と Ca^{2+} が高い負荷量（0.85以上）を示しており、鉱物粒子由来を示す因子と推定された。第2因子は、 SO_4^{2-} 、 NH_4^+ 、 K^+ が高い負荷量を示しており、燃焼由来を示す因子と推定された。第3因子は Na^+ 、 Cl^- 、 Mg^{2+} が高い負荷量を示しており、海塩由来の因子と推定された。なお、 F^- 、 NO_3^- はいずれの因子についても負荷量が低く、上記3つの因子以外の要因で濃度が変動していることが推察される。

※注 因子分析とバリマックス回転

因子分析は、多変量解析の手法のひとつで、黄砂化学分析データのように直接観察される観測データに影響を与えている潜在的な変数（因子もその一つ）があると仮定し、その解を求める手法である。今回の解析では、特に大きく影響を与えている複数個の共通因子（黄砂の起源物質と推定）を、数学的な基準によって、固有値・固有ベクトルの形式で相関行列を分解する手法である主因子法により固有値（相関行列に内在している変数間の関連情報の中で、各変数を最も大きく関係付けさせることの出来る値）が1以上の因子を選択し、それら共通因子が個々の観測変数（黄砂の化学成分組成）に影響を与えている（負荷を与えている）という結果から、観測値の解釈を行った。

また、その解釈には、それぞれの因子が観測変数に与える負荷量について、各因子間に相関がないと仮定し因子軸（行列）の回転を行い、解析構造を単純化（因子負荷量の分散値が最大となるように）して解釈を行った。

图-8 (1) 因子负荷量 (第1因子-第2因子)

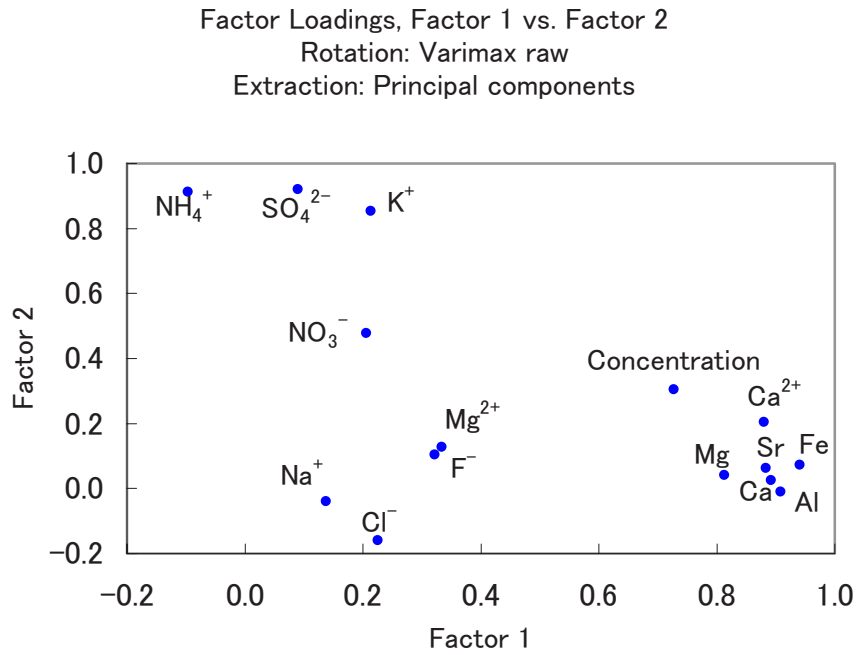
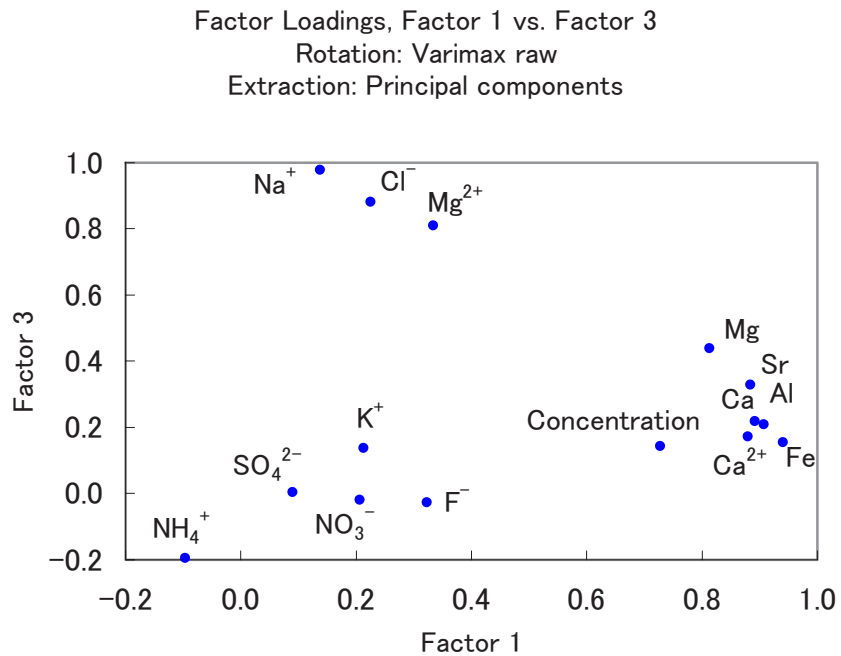


图-8 (2) 因子负荷量 (第1因子-第3因子)



3) 因子毎の濃度と合計濃度の推定

抽出された3因子は、浮遊粒子状物質を構成する物質の3つの起源を表すことが推定されたので、因子得点を用いて、各試料の上記3起源の成分構成を試算した。解析には、金属成分5項目とイオン成分9項目の14項目を利用した。

濃度と試算に当たっては、鉍物粒子、燃焼起源物質、海塩粒子の標準的な成分比率を設定した。

鉍物粒子は、(独) 国立環境研究所が中国大陸で収集した鉍物試料の元素構成として既報された論文から構成成分を引用した。ただし、Ca濃度は地域差が大きいので、今回の調査で得られた値を用いて補正した。

燃焼起源物質は、硫酸、硝酸、フッ酸のカリウム塩、アンモニウム塩から構成されているとして、今回の調査で得られた値を用いて構成比率を設定した。

海塩粒子は海水の成分比率から計算した。

上記3種類の標準物質構成成分を表-14に示す。

表-14 標準物質構成成分

名称	鉍物粒子		燃焼起源物質		海塩粒子	
	μg	%	μg	%	μg	%
濃度	100.0	100.0	30.0	100.0	3.43	100.0
Mg	1.60	1.60	0.0	0.0	0.1272	3.71
Al	6.05	6.05	0.0	0.0	0.0	0.0
Ca	3.93	3.93	0.0	0.0	0.0401	1.17
Fe	3.03	3.03	0.0	0.0	0.0	0.0
Sr	0.0265	0.0265	0.0	0.0	0.0008	0.023
F ⁻	0.0	0.0	0.05	0.17	0.00014	0.0041
Cl ⁻	0.0	0.0	0.0	0.0	1.898	55.34
NO ₃ ⁻	0.0	0.0	6.9	23.0	0.0	0.0
SO ₄ ²⁻	0.0	0.0	16.1	53.7	0.2649	7.72
Na ⁺	1.38	1.38	0.0	0.0	1.0556	30.78
NH ₄ ⁺	0.0	0.0	5.2	17.3	0.0	0.0
K ⁺	0.185	0.185	0.70	2.3	0.0	0.0
Mg ²⁺	0.160	0.160	0.0	0.0	0.1272	3.71
Ca ²⁺	1.97	1.97	0.0	0.0	0.0401	1.17
	出典：Nishikawa, M. <i>et. al.</i> : Preparation and evaluation of certified reference materials for Asian mineral dust, Global Environmental Research, 4(1) 103-113, 2000、ただしCa濃度は本論文の値の0.65倍とした。 Caは5割、MgとKは1割が溶出するとした		各項目の計算値が実測値を再現できるように設定した		出典：地球環境ハンドブック、朝倉書店、1994 Kは海面では消費されているとした	

表-14に示した標準物質と、全ての要素が0のデータを含めて、再度因子分析を行い、各試料の因子毎の因子得点を用いて濃度の計算を行った。因子分析は、試料の各濃度を因子の一次結合として表現する。そのため、各試料の因子得点は直線性が確保されている。従って、ゼロデータと標準物質データ間の当該因子についての差と標準物質の濃度から、因子軸のスケール値を計算し、それをもとに各試料の因子濃度を推計した。標準物質は、正確には因子軸とは完全に一致はしていないため、この設定にはある程度誤差が生じることは避けられないが、各因子得点を濃度の推計値として表現することにより、因子間の濃度の相対的な比較ができるようになる。

各試料の因子得点を図-9に示す。また、濃度0の因子量と各試料の因子量の差と、標準物質との関係から3因子の濃度を求めて合計した結果を図-10に示す。これを、実際の濃度との関係と比較したのが図-11である。計算値と実測値には良い相関が見られ、この結果から、この計算方法で浮遊粒子状物質の各因子成分の量を推定することが可能となった。ただし、FとNO₃は相関が低く、上記3因子以外の要因により濃度が変動するものと考えられる。これについては後述する。

図-10 (1) 因子毎の濃度計算結果 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) (地点毎)

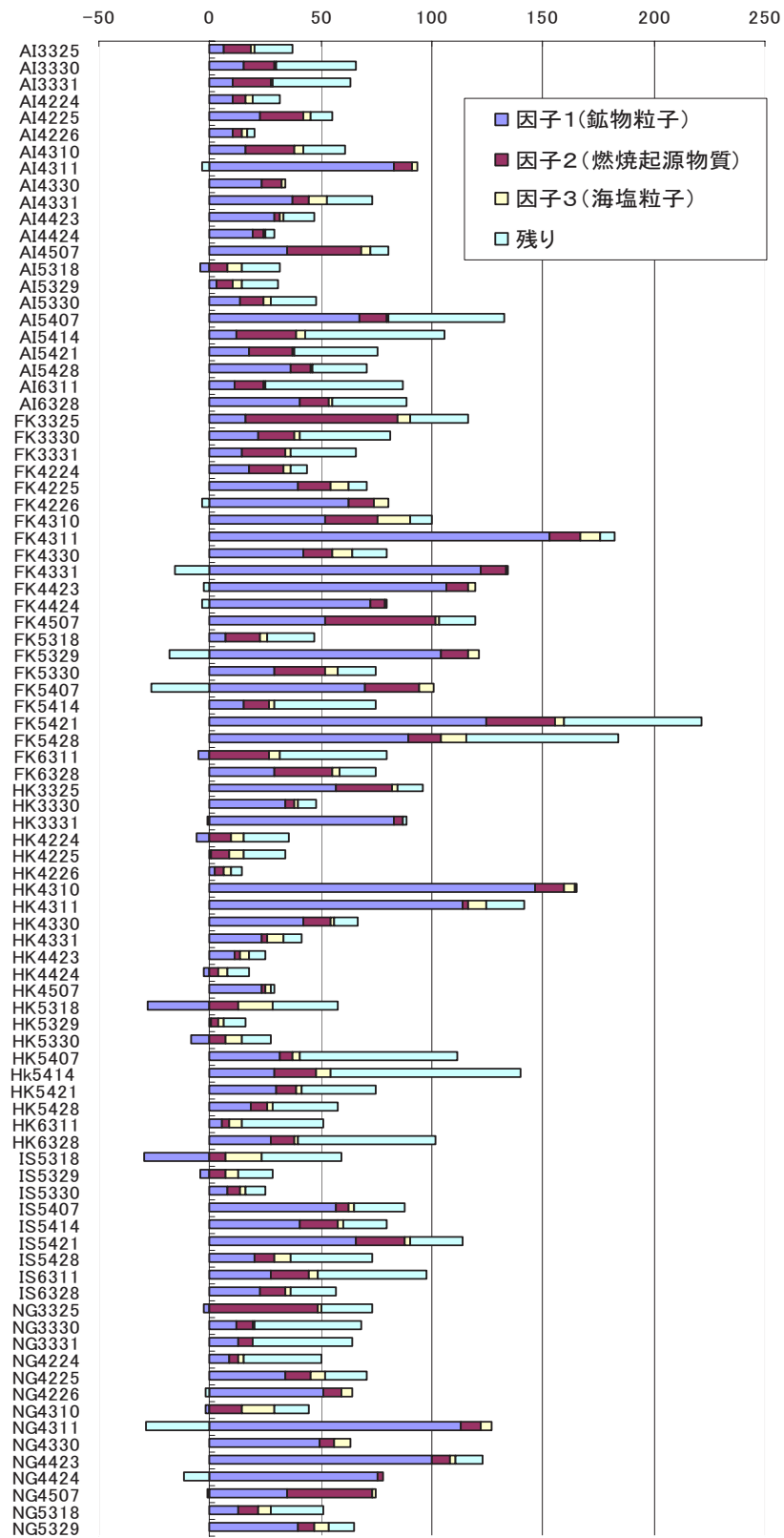
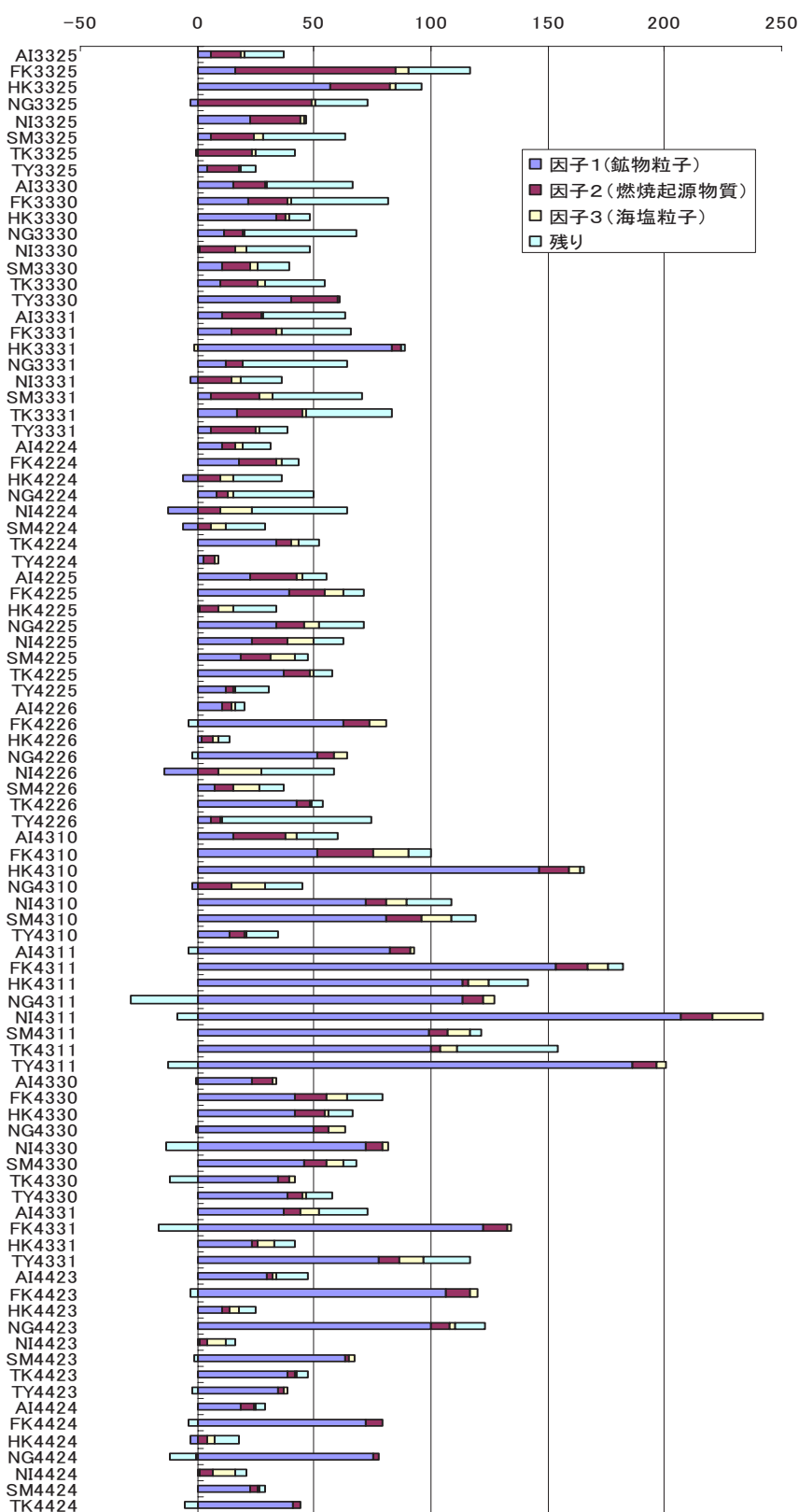


図-10 (2) 因子毎の濃度計算結果 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) (調査日毎)



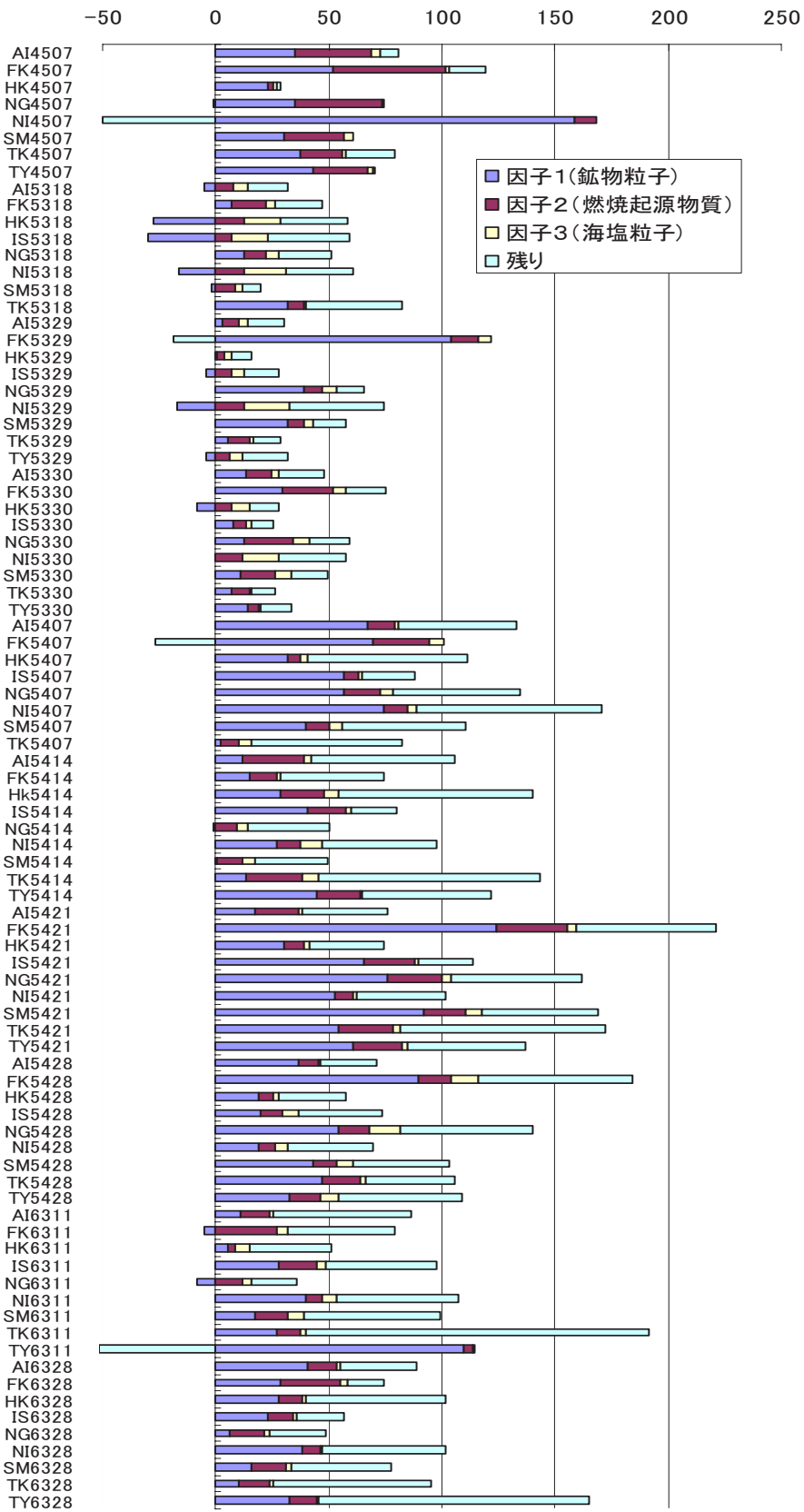


図-11(1) 濃度測定値と計算値の比較 (μg/m³)
(濃度、Mg、Al、Ca、Fe、Sr、F⁻、Cl⁻)

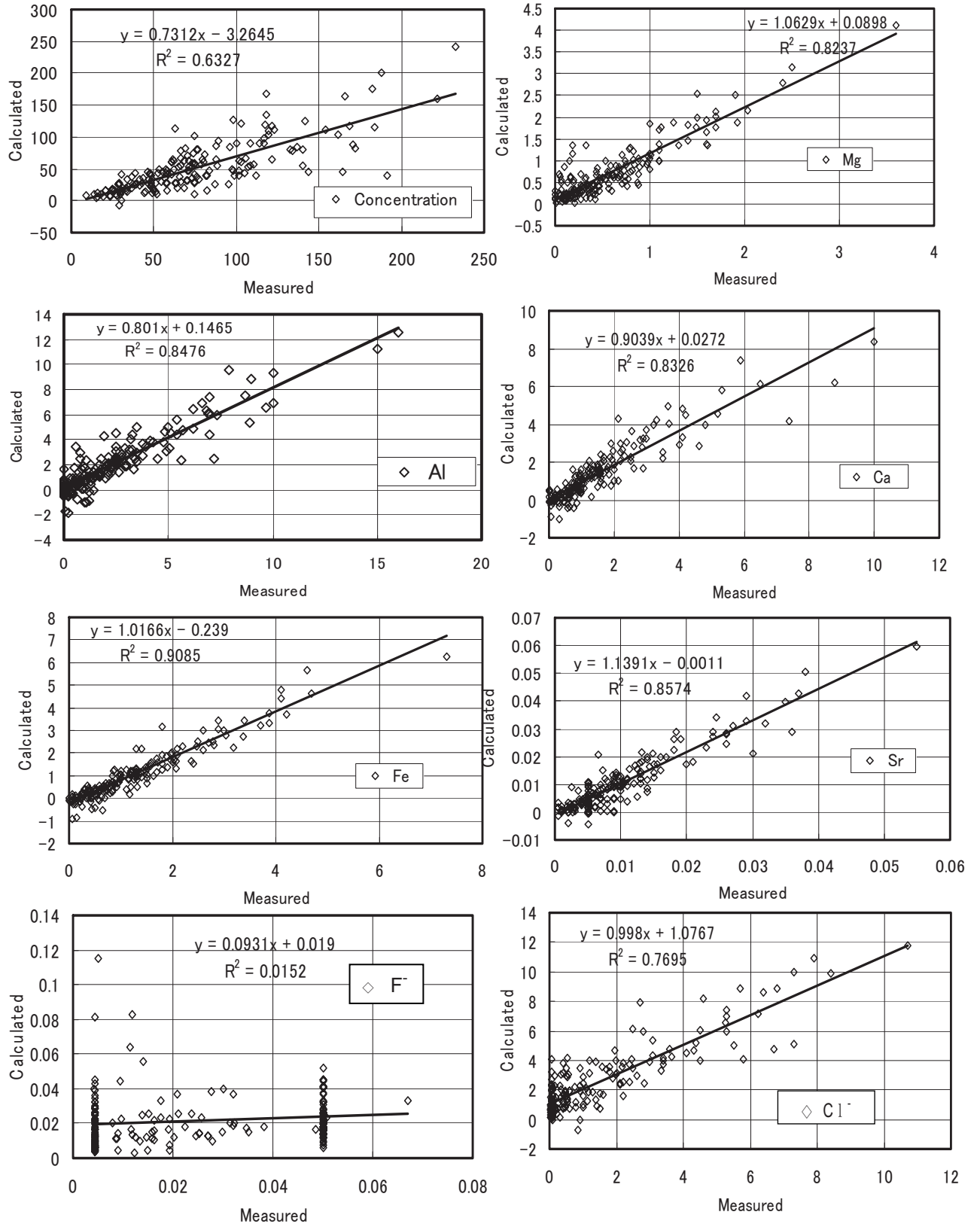
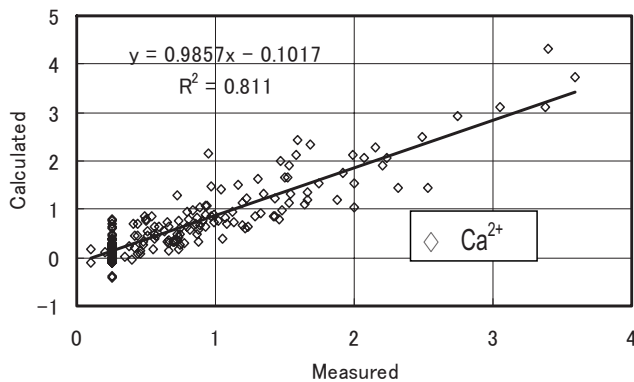
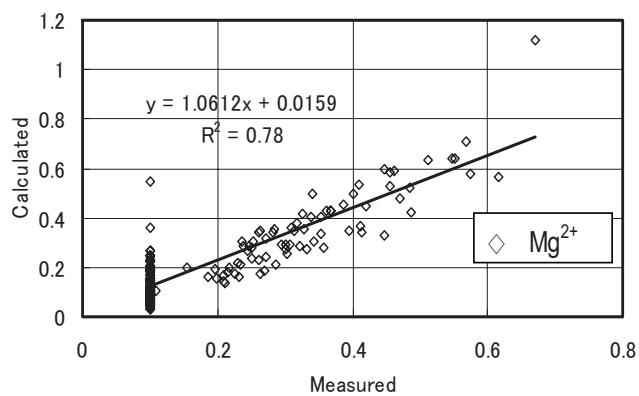
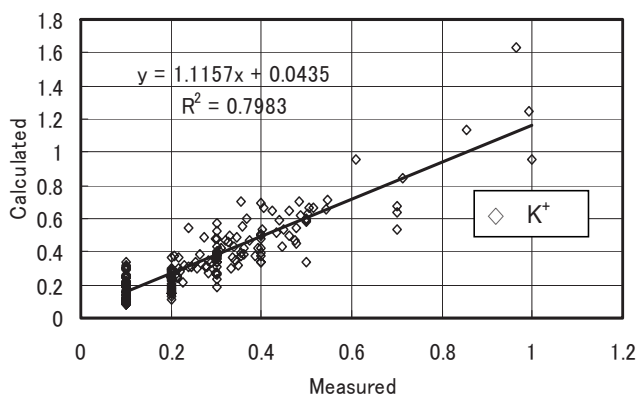
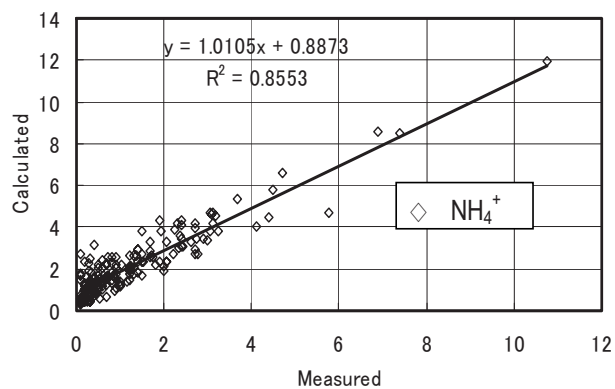
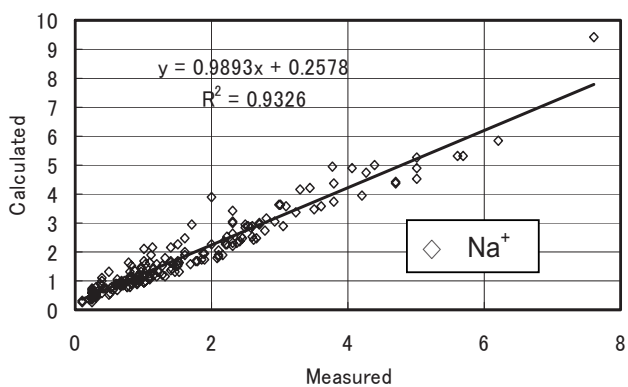
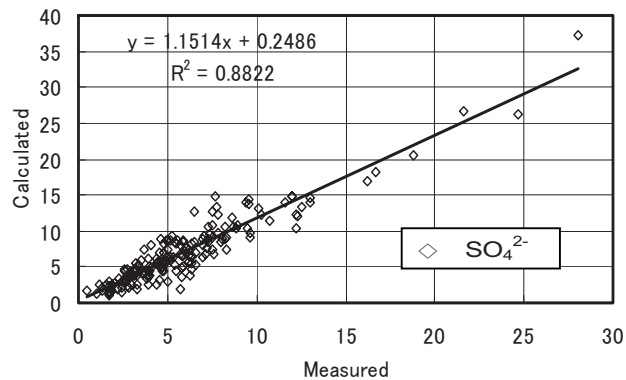
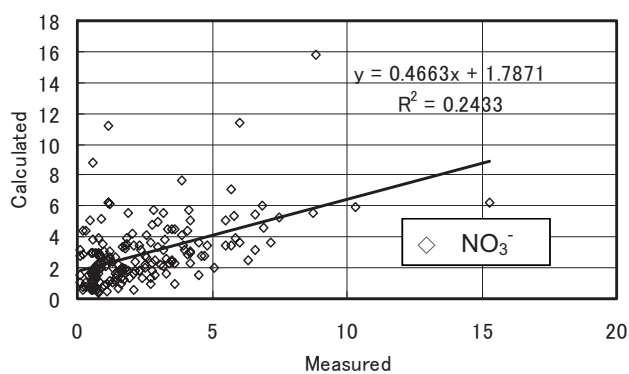


図-11(2) 濃度測定値と計算値の比較 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
 (NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+})



上記で計算された因子毎の濃度を地点毎、調査日毎に平均してその傾向を分析した。地点毎、調査日毎、黄砂の有無別の平均を表-15(1)、及び(2)に示す。

本調査の期間中に測定された浮遊粉じんの濃度については、平均的には、約45%が鉱物由来、約17%が燃焼由来、約6%が海塩由来、その他が約32%と計算された。

地点毎の比率を見ると、第1因子(鉱物粒子)は太宰府、長崎、立山、札幌などの日本海側の地点が高い傾向が見られた。第2因子(燃焼)については西日本、日本海側、首都圏、中京が高い傾向がある。第3因子(海塩)は日本海側(松江、巻)が高いが、その他の地点についても、札幌が高く、太平洋側(犬山、つくば)や高地(立山)などが低い傾向が見られた。

次に、黄砂の有無による分類を行った。第1因子は黄砂時には比率が高く、弱い黄砂時、非黄砂時になるに従って値が低くなっていった。一方、第2~3因子は、比率は黄砂の有無による差異はあまりない。このことより、黄砂/弱い黄砂/非黄砂の分類は、主に第1因子の違いによってもたらされたものといえることができる。

表-15(1) 調査地点毎の各因子の比率計算値

調査地点	因子1 %	因子2 %	因子3 %	その他 %
長崎	46.3	18.6	6.3	28.9
太宰府	56.7	21.2	5.2	16.8
松江	42.9	17.0	8.6	31.6
金沢	35.3	17.4	7.5	39.8
犬山	38.0	20.8	4.2	37.0
立山	54.8	14.5	3.1	27.6
巻	45.0	13.3	11.1	30.5
つくば	36.4	15.2	3.2	45.3
札幌	45.5	12.3	6.9	35.2
平均	45.1	16.8	6.2	31.8

注：因子分析を行った試料の平均から比率を求めたもので、すべての試料を用いている訳ではない。

それぞれの因子で、平均より大きくなった値を網掛けで示した