

表－15（2） 黄砂／弱い黄砂／非黄砂砕の各因子の計算値

調査地点	因子1 %	因子2 %	因子3 %	その他 %
黄砂時	61.4	15.6	5.5	17.5
弱い黄砂時	41.4	13.3	5.7	39.6
非黄砂時	35.2	21.0	7.1	36.7

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。

#### 4.4 特徴的な黄砂現象の解析

##### 1) モデルによる黄砂現象の解析

サンプリング試料の濃度分布が特徴的な調査日について、CFORS による大気場の状況から、浮遊粒子状物質の起源を考察する。考察は以下の3調査日を取り上げた。2004年3月11日は全国的に強い黄砂が飛来し、多くの地点で高濃度の鉍物成分が測定されたが、燃焼起源物質濃度は平均濃度レベルであった。2003年3月25日は気象庁の黄砂の発表があるが、試料中に占める鉍物粒子の比率が低く、燃焼起源物質が多く見られた。2004年5月7日は鉍物粒子と燃焼起源物質の両方の濃度が高く、大陸由来の大気汚染物質が黄砂粒子と共に捕集されたことが想定された。この日のCFORSによる粒子状物質と硫酸塩の予想分布図を図－12に示す。

2003年3月25日には、CFORSでは大陸から汚染気塊の飛来が見られている。鉍物粒子（黄砂）の飛来もあるが高濃度域は日本列島に到達していない。2004年3月11日には、大陸からの大規模な黄砂飛来が計算されている一方で、CFORSでは汚染気塊の飛来は見られない。2004年5月7日には西日本に黄砂と大気汚染が共に到達している。以上の傾向は、今回の一斉サンプリング調査の結果と一致するものである。このように、気象条件等により、様々な飛来形態があることが分かった。

図-12 (1) CFORS による粒子状物質と硫酸塩の予想分布図 (2004年3月11日)

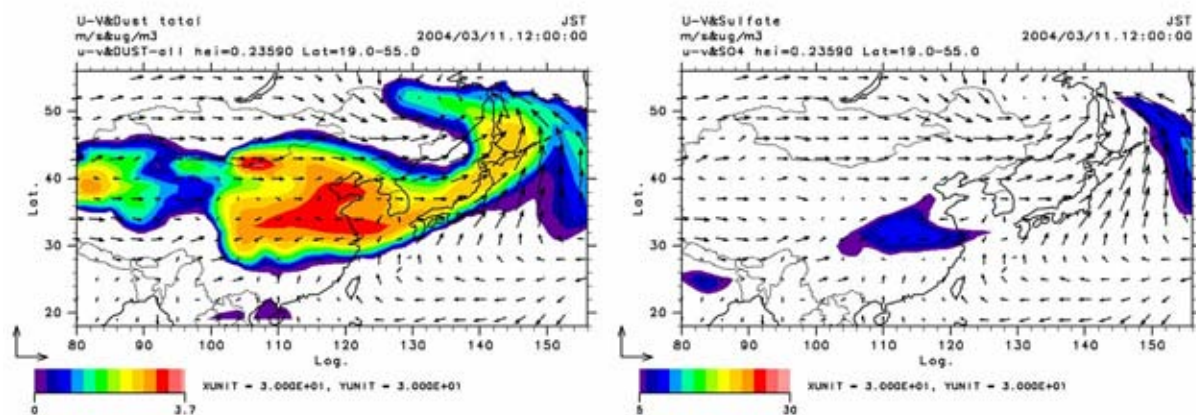


図-12 (2) CFORS による粒子状物質と硫酸塩の予想分布図 (2003年3月25日)

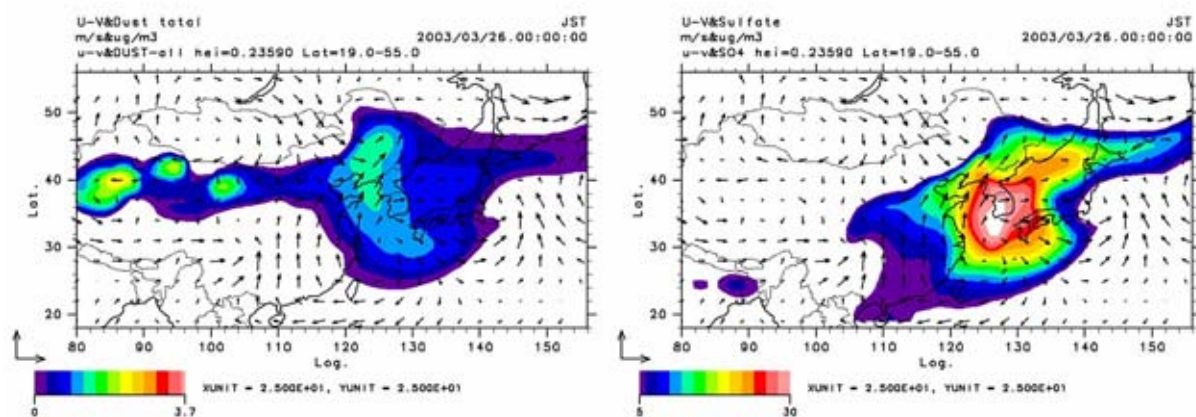
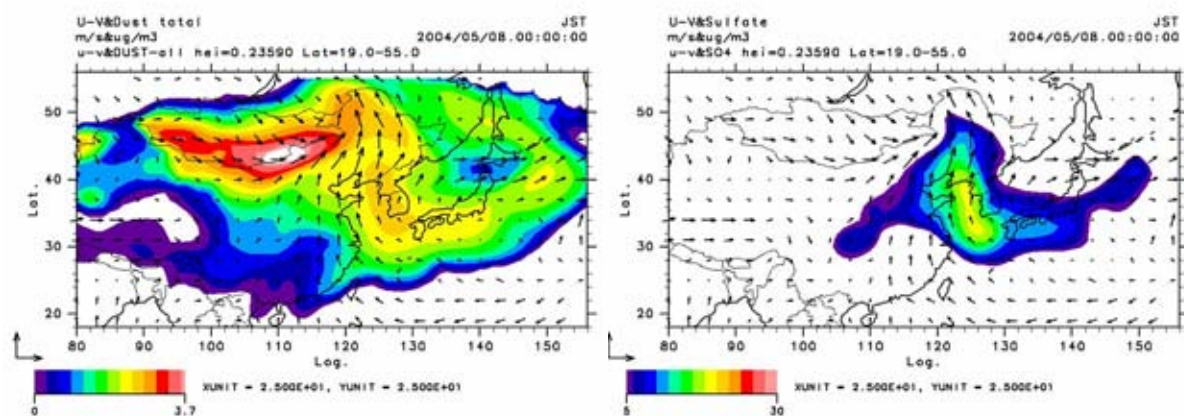


図-12 (3) CFORS による粒子状物質と硫酸塩の予想分布図 (2004年5月7日)



## 2) 燃焼起源物質の解析

燃焼により生成する物質の内、フッ素は石炭の燃焼に際して放出される。石油にはフッ素がほとんど含まれないことから、試料中のフッ素の量を分析することにより、燃料の種類を推定できる可能性がある。

燃焼により発生する二酸化硫黄より生成されたと考えられる  $\text{nss-SO}_4^{2-}$  と  $\text{nss-F}^-$  との関係を図-13 (1) に示した。同様に、 $\text{NO}_3^-$  と  $\text{nss-SO}_4^{2-}$  も図-13 (2) に示した。

この結果、特定の日の試料には、 $\text{nss-SO}_4^{2-}$  と  $\text{nss-F}^-$  に一定の比例関係があるように見える。その比例関係は、日によって大きく異なり、 $\text{nss-F}^-$  がほとんど検出されない日もある。このことから、この比を、到着した大気汚染物質が中国のどこを経由してきたかを知る指標として利用可能なことが示唆された。なお、図のプロットから、 $\text{nss-F}^-/\text{nss-SO}_4^{2-}$  は 0 から 0.01 の間で、 $\text{NO}_3^-/\text{nss-SO}_4^{2-}$  は 0 から 1.5 の間で変化する傾向が読み取れる。

次に、地点毎、調査日毎の  $\text{nss-F}^-$  及び  $\text{NO}_3^-$  と  $\text{nss-SO}_4^{2-}$  の比の平均値を表-16 (1) に示す。さらに、図-14 に、表-16 (2) で示した調査日毎の平均が特徴的な 2003 年 3 月 25 日、2004 年 3 月 11 日、2004 年 5 月 7 日の散布図を示す。 $\text{nss-SO}_4^{2-}$  と  $\text{nss-F}^-$  は、各調査日に関しては比較的直線性が高い傾向がある。 $\text{nss-SO}_4^{2-}$  と  $\text{NO}_3^-$  とは、2004 年 3 月 11 日のように比較的良い直線性を示すものもあるが、地点によるばらつきが大きい。試料間の直線性は、その試料の同一性を示唆し、直線性が高い場合、大陸から日本の広範囲に渡って飛来した物質である可能性がある。一方、国内の局地的な要因による物質については、直線性を示さないことが推定される。

図-13 (1) nss-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>と nss-F<sup>-</sup>との関係 (μg/m<sup>3</sup>)

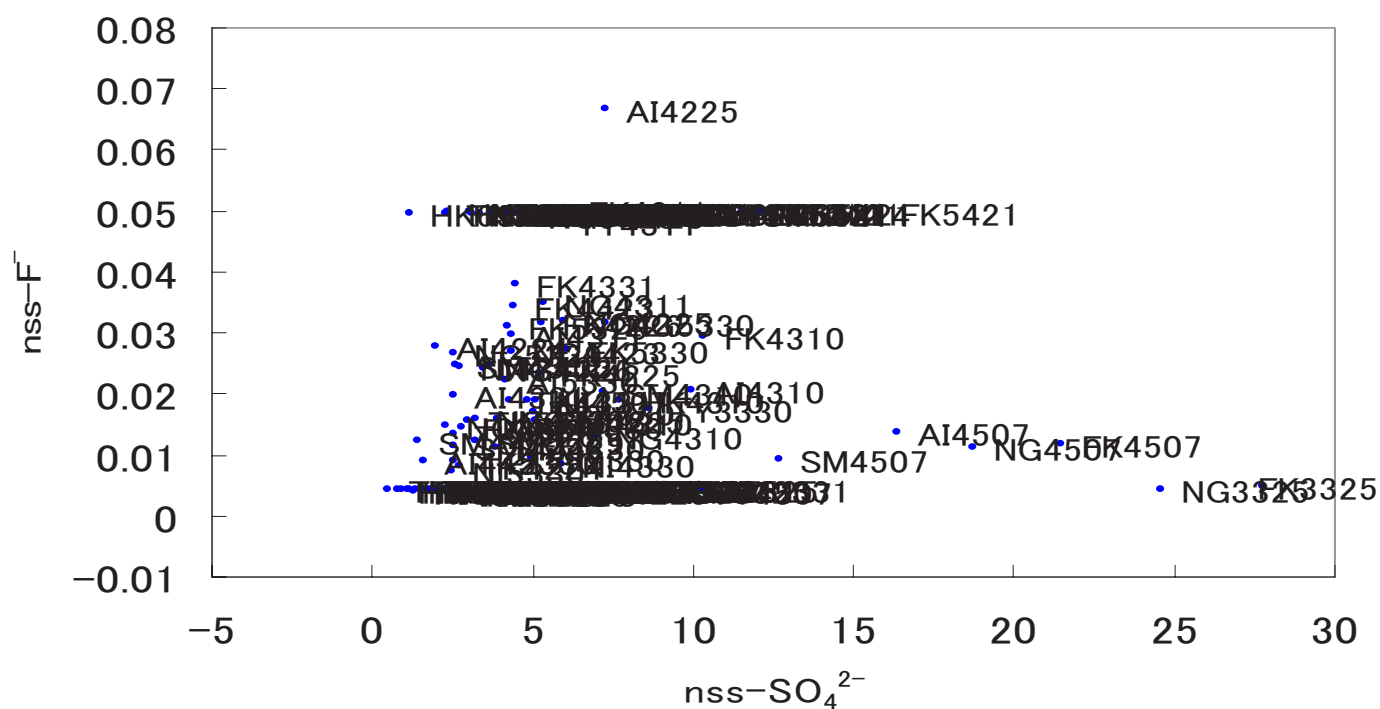
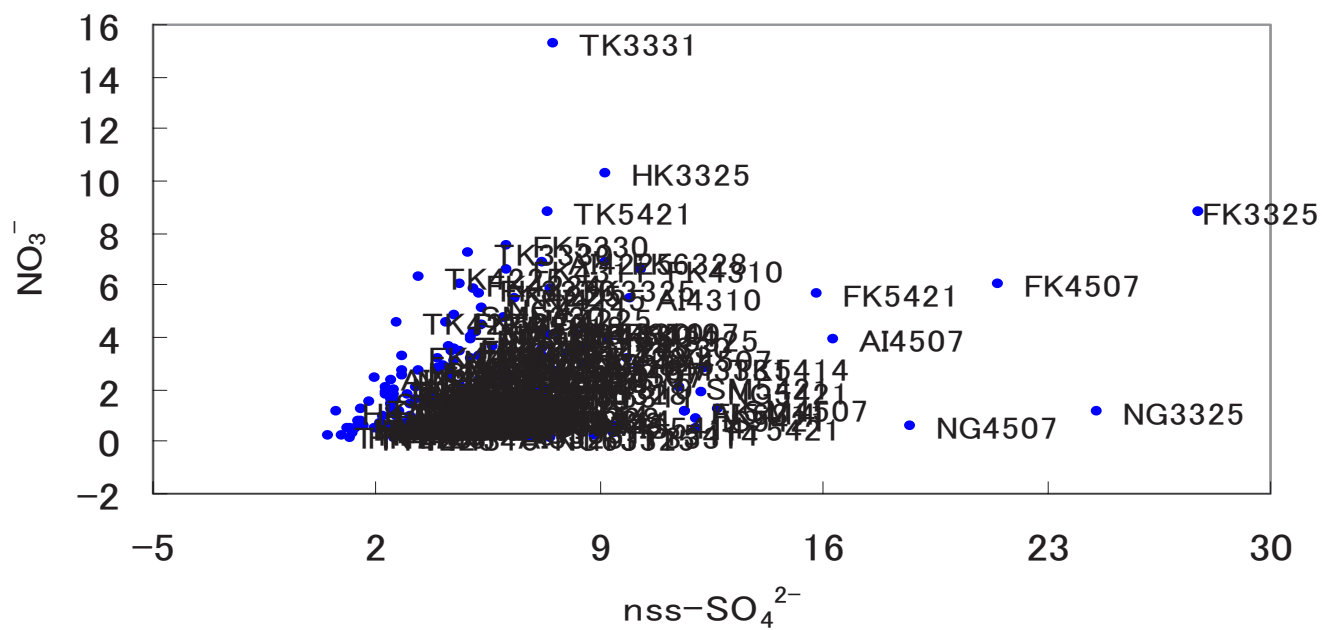


図-13 (2) nss-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>と NO<sub>3</sub><sup>-</sup>との関係 (μg/m<sup>3</sup>)



表－16（1）地点毎のnss-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>とnss-F<sup>-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>比の平均

地点	nss-F <sup>-</sup> /nss-SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /nss-SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
長崎	0.0050	0.4225
太宰府	0.0044	0.7101
松江	0.0045	0.4637
金沢	0.0062	0.2330
犬山	0.0052	0.4200
立山	0.0044	0.2646
巻	0.0054	0.4374
つくば	0.0046	0.7682
札幌	0.0066	0.5200
平均値	0.0051	0.4711

表－16（2）調査日毎のnss-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>とnss-F<sup>-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>比の平均

調査開始日		nss-F <sup>-</sup> /nss-SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /nss-SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
2003	3月25日	0.0005	0.3872
	3月30日	0.0013	0.7300
	3月31日	0.0007	0.5409
2004	2月24日	0.0032	0.9637
	2月25日	0.0043	0.9098
	2月26日	0.0039	0.4175
	3月10日	0.0024	0.3987
	3月11日	0.0072	0.6557
	3月30日	0.0021	0.4066
	3月31日	0.0062	0.4991
	4月23日	0.0052	0.4720
	4月24日	0.0034	0.6051
	5月7日	0.0016	0.4425
2005	3月18日	0.0021	0.3612
	3月29日	0.0036	0.4673
	3月30日	0.0033	0.6518
	4月7日	0.0118	0.4942
	4月14日	0.0067	0.1840
2006	4月21日	0.0062	0.3460
	4月28日	0.0112	0.2966
	3月11日	0.0131	0.2088
	3月28日	0.0093	0.3942
平均		0.0050	0.4924

図-14 (1) nss-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>と nss-F<sup>-</sup>との関係 (2003年3月25日)

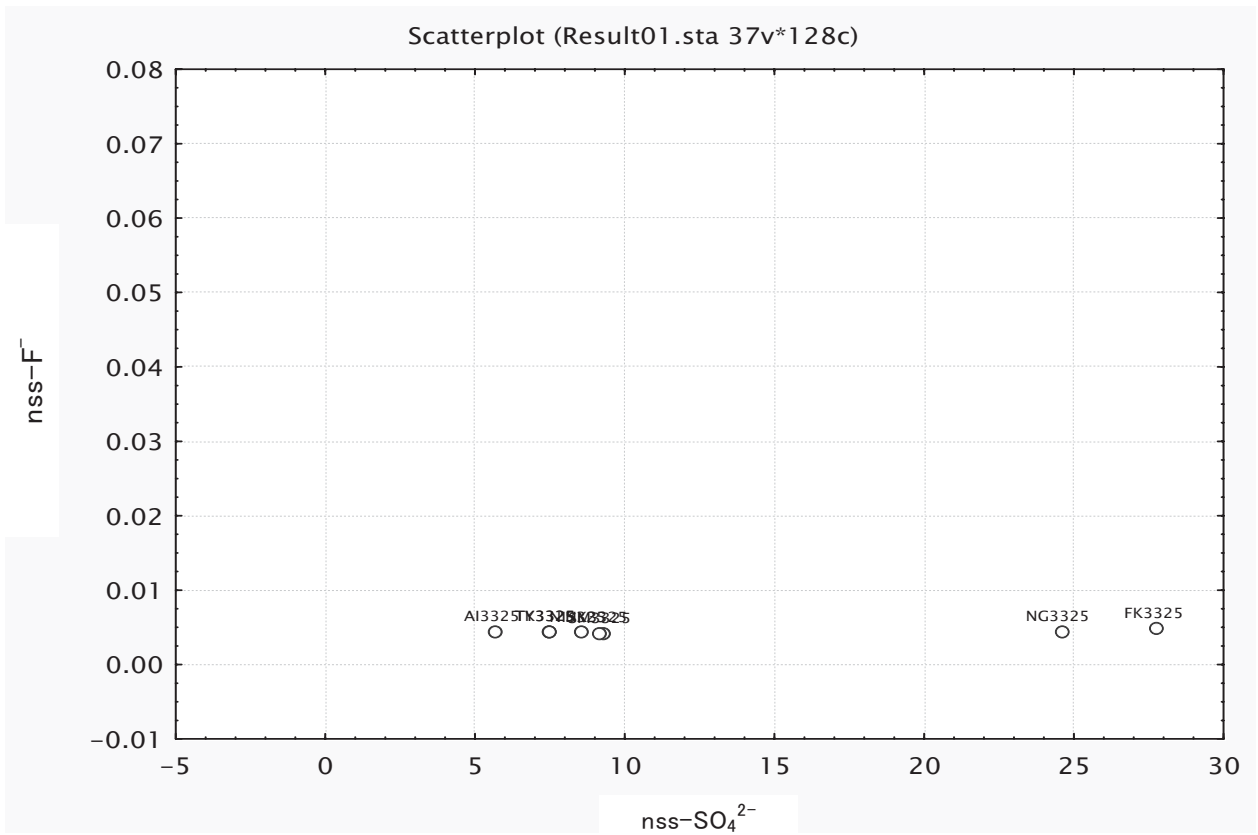


図-14 (2) nss-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>と nss-F<sup>-</sup>との関係 (2004年3月11日)

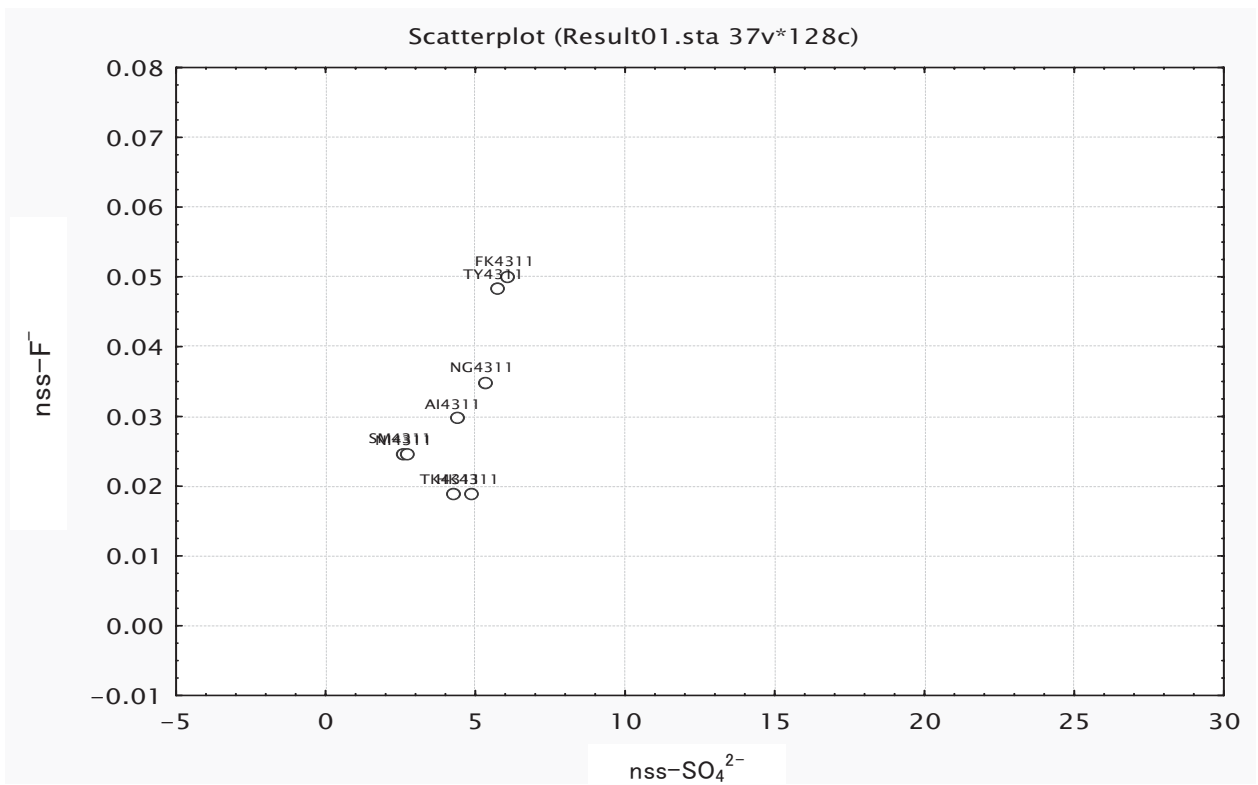


図-14 (3) nss-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>とnss-F<sup>-</sup>との関係 (2004年5月7日)  
Scatterplot (Result01.sta 37v\*128c)

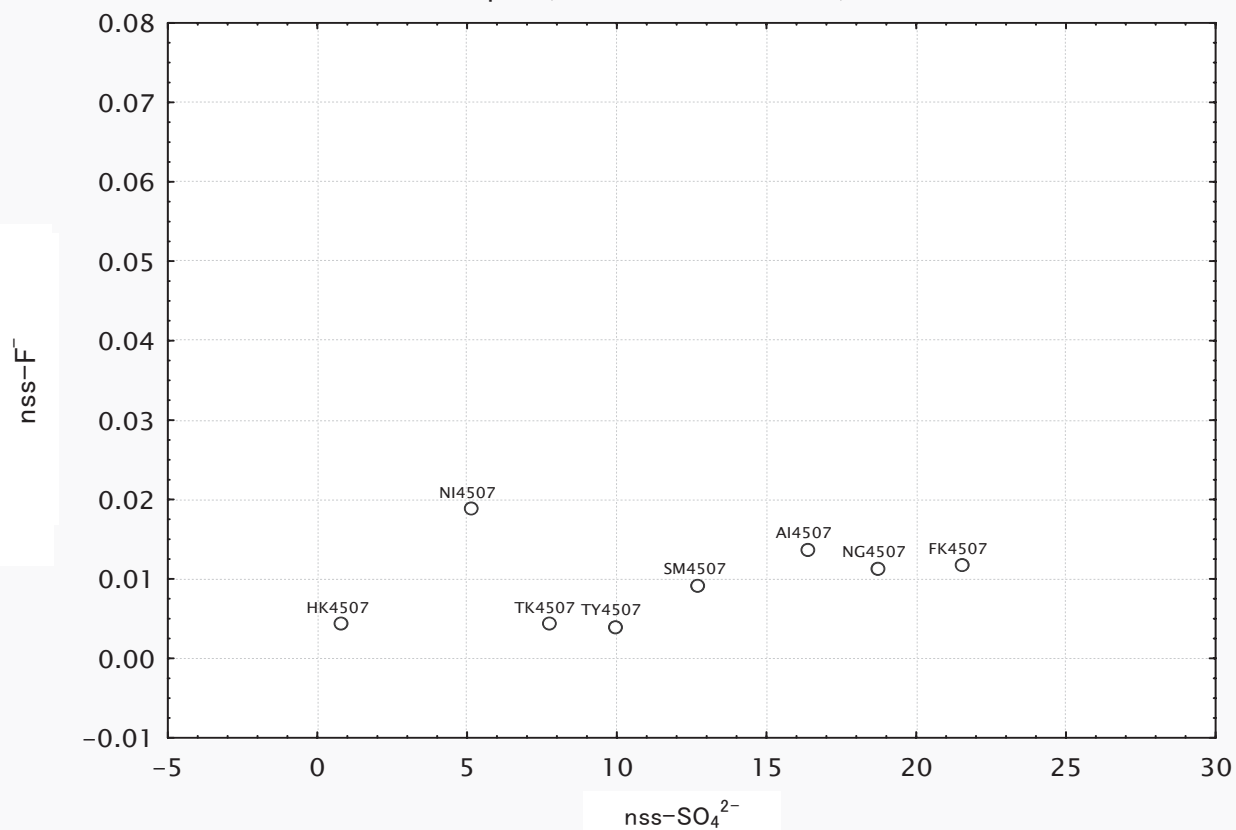


図-14 (4) nss-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>とNO<sub>3</sub><sup>-</sup>との関係 (2003年3月25日)

Scatterplot (Result01.sta 37v\*128c)

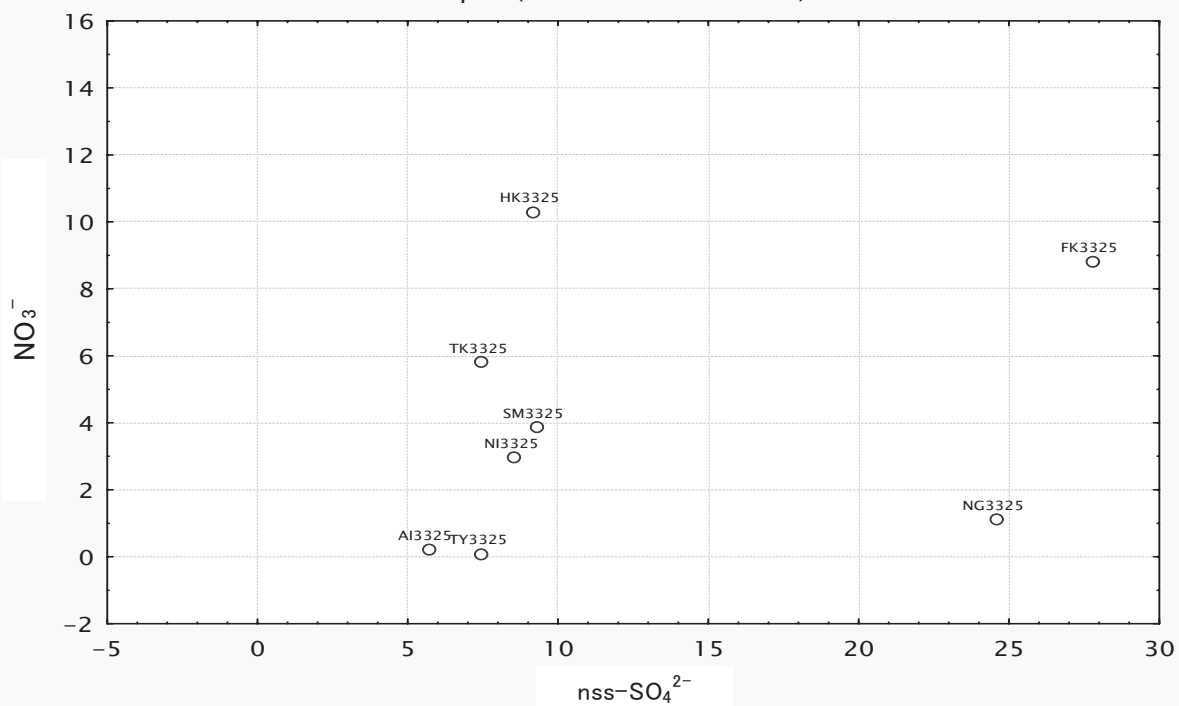


図-14 (5) nss-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>とNO<sub>3</sub><sup>-</sup>との関係 (2004年3月11日)

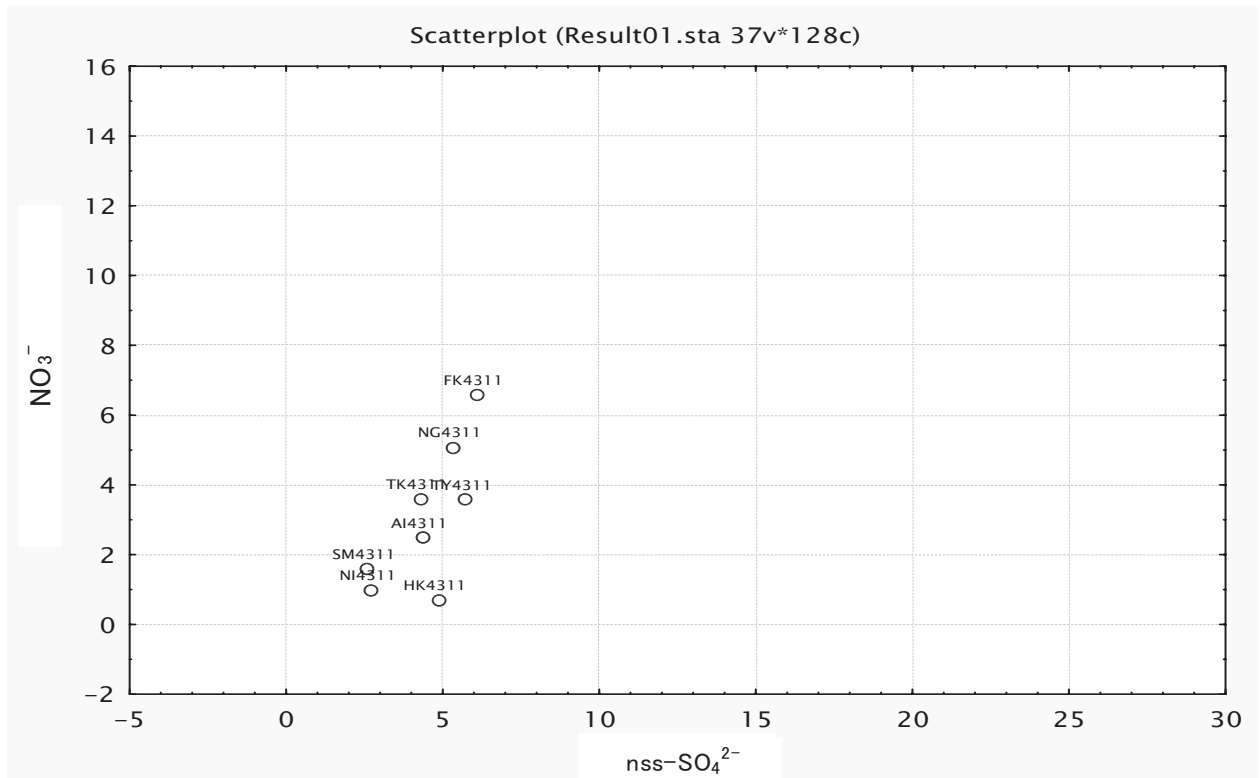
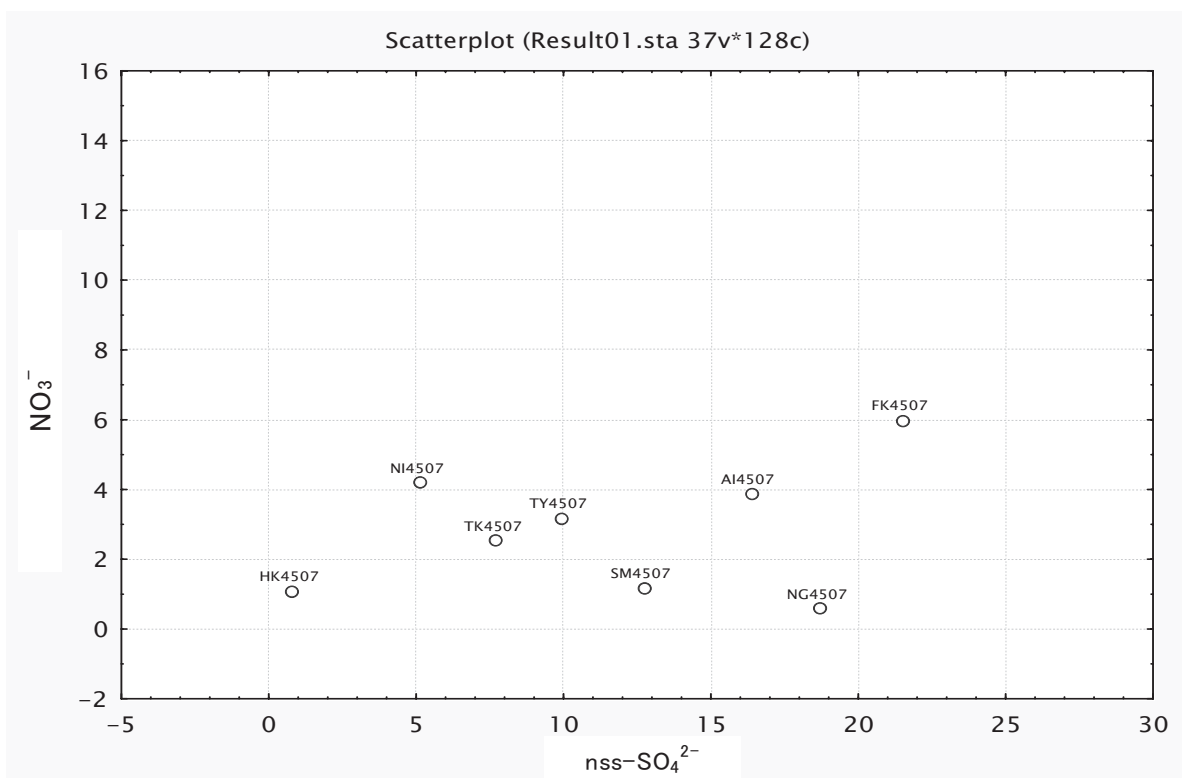


図-14 (6) nss-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>とNO<sub>3</sub><sup>-</sup>との関係 (2004年5月7日)





### 3) 鉍物起源物質の解析

鉍物中のカルシウム (Ca) は地域によって含有量が大きく異なり、その鉍物の産地を推定する指標になり得る元素である。特に日本の土壌は大陸に比べ Ca が少なく、その特徴を利用して大陸から飛来した鉍物粒子と日本国内で巻き上げられた鉍物粒子を判別する可能性が期待された。鉍物粒子内で安定的に存在する Al と nss-Ca の関係を図-15 (1) に示す。両者は、基本的には良い相関を示している。この中で、調査日毎に濃度比に特徴的な傾向が見られる場合 (nss-Ca/Al 比が大きくなる場合)、その試料は大陸から飛来したという可能性が高い。今回分析した試料の中で、鉍物粒子濃度の低い試料では、比の計算の誤差が大きくなるので、nss-Ca、Al がともに  $2\mu\text{g}/\text{m}^3$  以上の濃度を有する試料のみを見ると、nssCa/Al 比は 0.2 から 1.2 の間で変化していた。

一方、黄砂時と非黄砂時の差異をより明確に表すと言われている nss-Ca<sup>2+</sup> と Al の関係を図-15 (2) に示す。この結果からは、特定の日に nss-Ca<sup>2+</sup>/Al 比が高くなる傾向は見られず、鉍物粒子の発生が日本国内か大陸かを特定することはできなかった。

図-15 (1) Al と nss-Ca の関係 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

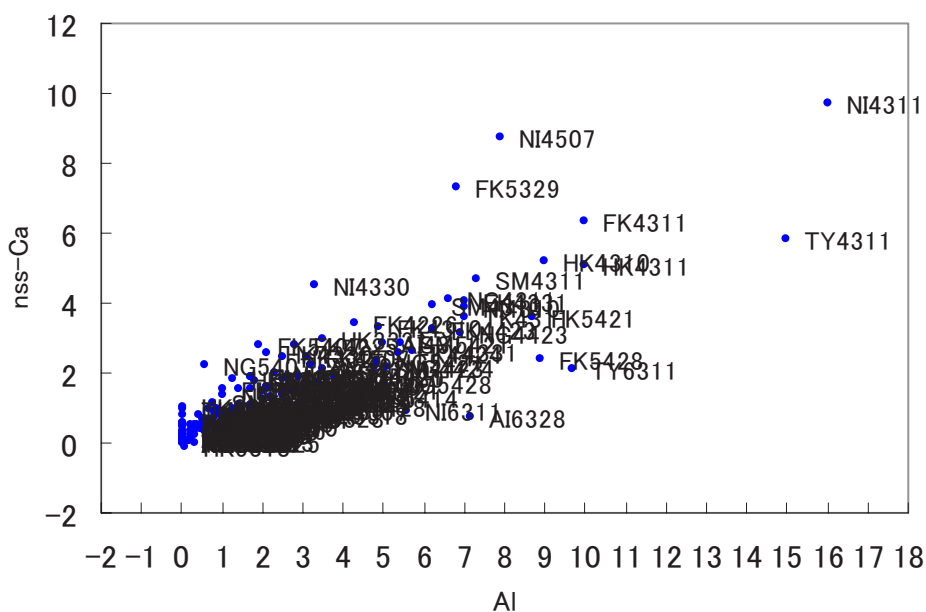
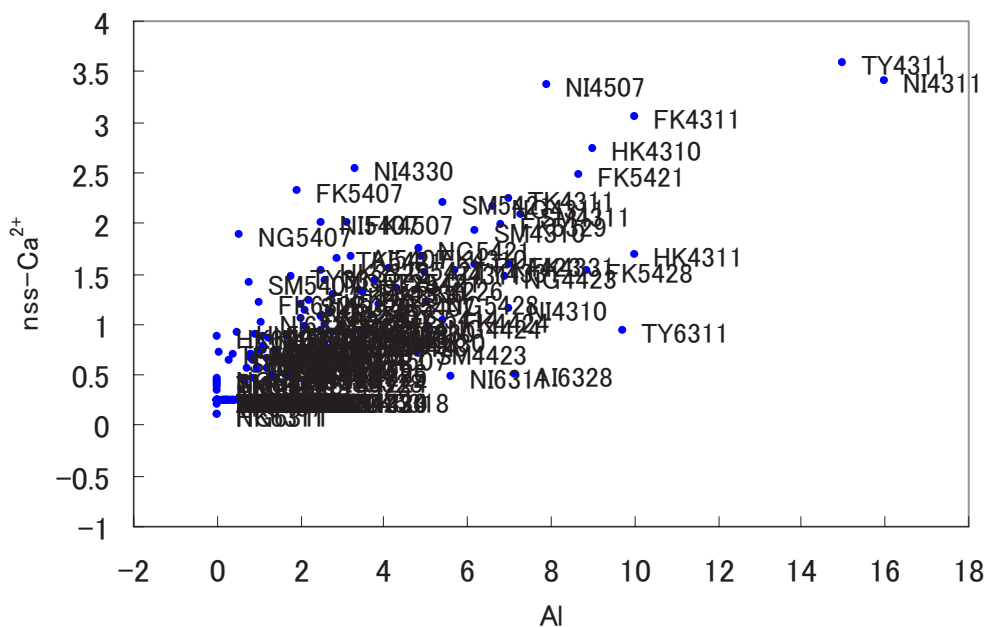


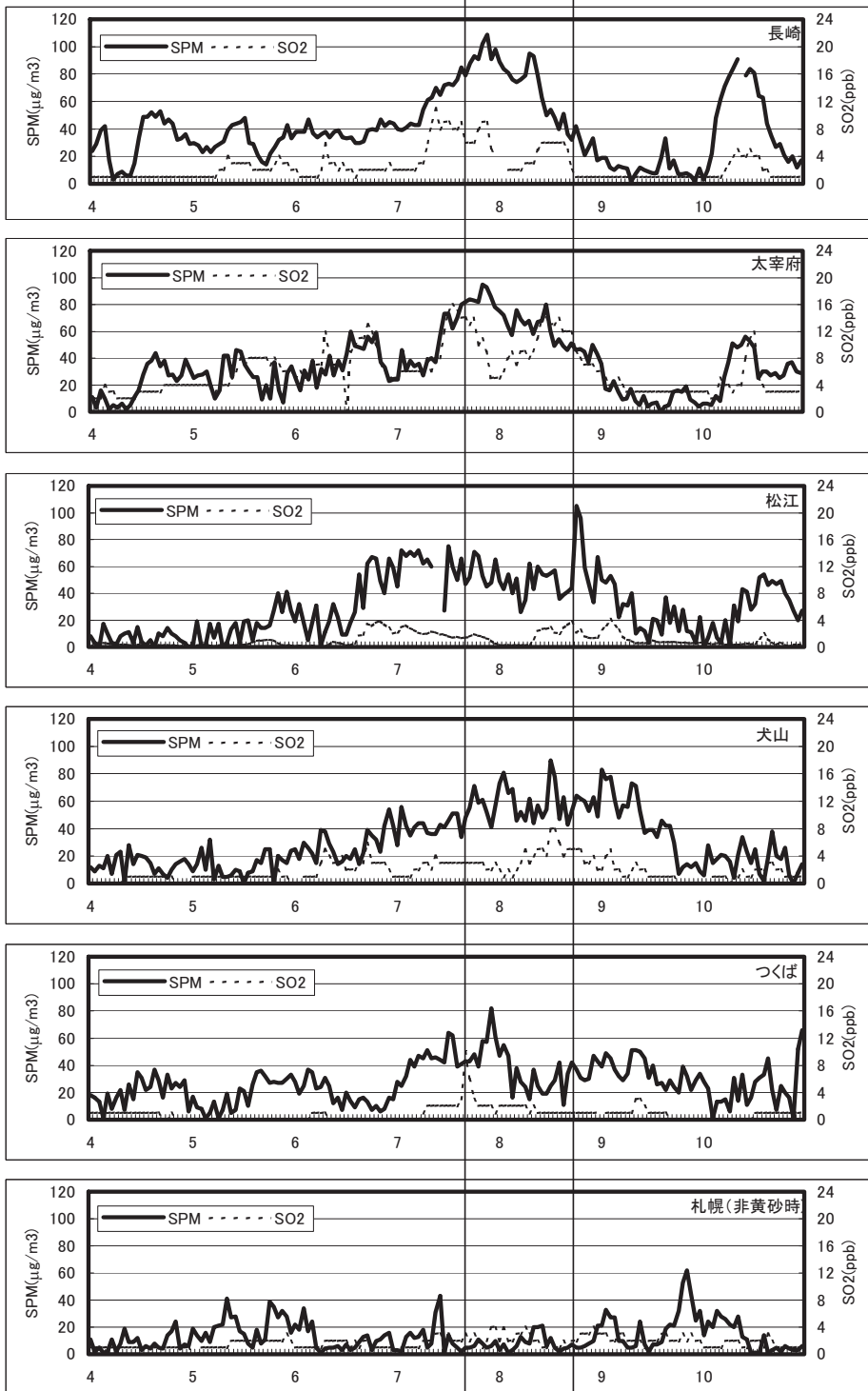
図-15 (2) Al と nss-Ca<sup>2+</sup> の関係 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )



#### 4) 二酸化硫黄との相互関係に関する検討

黄砂粒子は大気中の二酸化硫黄を粒子表面に吸着する性質があるといわれている。そこで、黄砂飛来時の浮遊粒子状物質（SPM）と二酸化硫黄（SO<sub>2</sub>）の濃度変化を分析し、黄砂と二酸化硫黄の相互作用を検討した。図-16には、黄砂と同時に大気汚染物質が飛来したとされる2004年5月7日～8日前後の大気環境測定所におけるSPM濃度とSO<sub>2</sub>濃度の時間経過を示す。これによると、西日本（長崎、太宰府、松江）の地点において、6日あるいは7日からSPM濃度が上昇し、9日に下がっていた。一方、SO<sub>2</sub>は途中の8日深夜付近に一旦低下する傾向が見られた。この時間帯に黄砂が飛来していたとすると、黄砂が周辺の大気汚染物質を吸着した可能性が示唆される。なお、この日、太平洋側の犬山とつくばではSO<sub>2</sub>の明確な減少が見られず、札幌は黄砂の飛来自体が見られなかった。このような傾向が常に見られるかどうかは更に検討する必要があるが、解析結果は、黄砂の相互作用の可能性を否定するものではなかった。

図-16 黄砂飛来時の浮遊粒子状物質、二酸化硫黄の変化の例



長崎： 稲佐小学校大気環境測定所  
 太宰府： 太宰府大気環境測定所  
 松江： 松江大気環境測定所  
 犬山： 国設犬山酸性雨測定所  
 つくば： (独) 国立環境研究所  
 札幌： 国設札幌大気環境測定所

#### 4.5 黄砂沈着量の試算

黄砂あるいは弱い黄砂が飛来したとされる日・地点において、黄砂濃度 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) と沈降速度から、単位面積あたりの沈着量を試算する。

まず、黄砂粒子の自由沈降（ストークス沈降<sup>viii</sup>）速度を試算する。ストークスの式を以下に示す。

$$v = \frac{g \cdot (\rho_s - \rho) \cdot d^2}{18\mu}$$

$v$ : 沈降速度 (m/s)

$g$ : 重力加速度 ( $9.8\text{m}/\text{s}^2$ )

$\rho_s$ : 粒子密度 ( $2400\text{kg}/\text{m}^3$ )

$\rho$ : 空気の密度（無視した）

$d$ : 粒径 (m)

$\mu$ : 粘性係数 ( $0^\circ\text{C}$  において  $17.1 \times 10^{-6}\text{Pas}$ )

つまり、沈降速度は、粒径の2乗に比例する。

粒径分布の分析（既報：黄砂検討会報告書（平成17年9月））結果から、黄砂粒子は平均粒径  $4\mu\text{m}$  の対数正規分布をすることが示されている。対数正規分布のデータセットの2乗の分布は、平均が2倍の対数正規分布となるので、沈降速度の計算のための代表径を  $8\mu\text{m}$  とした。その結果、黄砂粒子は1日あたり  $422\text{m}$  降下することが計算された。

$$v = \frac{9.8 \times (2400 - 0) \times (8 \times 10^{-6})^2}{18 \times 17.1 \times 10^{-6}} = 4.89 \times 10^{-3} \text{ (m/s)} = 422 \text{ (m/日)}$$

これに基づき、表-2の濃度から黄砂の沈着量を下式により推計した。

$$m = c \times v$$

$m$ : 沈着量 ( $\mu\text{g}/\text{m}^2\text{s}$ )

$c$ : 浮遊粉じん濃度 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

$v$ : 沈降速度 (m/s)

$$m = c \times 4.89 \times 10^{-3} \text{ (}\mu\text{g}/\text{m}^2\text{s)} = 0.422 \times c \text{ (kg}/\text{km}^2 \text{ 日)}$$

<sup>viii</sup> 重力の影響下で粒子が粘性流体（水・空気など）を落下する速度と粒径の関係を表すもの。ストークス沈降においては、重力と粘性抵抗が釣り合った状態で等速落下する。

結果を表－17に示す。実際の黄砂粒子の沈着には、自由沈降の他、輸送抵抗、高気圧による沈降、降雨による湿性沈着や凝集による沈着の促進などの様々な要因が影響を与えるため、この値はあくまで黄砂沈着の最小推定値を示したものであり、実際の黄砂の沈着量はもっと多いと考えられる。

表－17 黄砂の1日あたりの沈着量の推計 (kg/km<sup>2</sup>日)

調査開始日	長崎	太宰府	松江	金沢	犬山	立山	巻	つくば	札幌
2003.3.25	-	-	(27)	×	-	-	-	-	-
2003.3.30	(29)	-	-	×	-	-	-	-	(20)
2003.3.31	-	-	-	×	-	-	-	-	-
2004.2.24	(21)	-	-	×	-	-	-	(22)	-
2004.2.25	30	30	20	×	(23)	(13)	26	24	(14)
2004.2.26	(26)	-	-	×	-	-	-	(23)	-
2004.3.10	18	42	50	×	26	15	46	NA	70
2004.3.11	41	77	51	×	(38)	79	98	65	60
2004.3.30	26	(34)	29	×	(14)	24	-	(13)	-
2004.3.31	NA	(50)	NA	×	31	(49)	NA	NA	-
2004.4.23	(52)	(50)	(28)	×	-	-	-	(20)	-
2004.4.24	(28)	-	-	×	-	-	-	-	-
2004.5.07	31	50	26	×	34	30	50	33	-
2005.3.18	-	-	(8)	-	(11)	NA	(19)	(35)	-
2005.3.29	(28)	-	(24)	-	-	-	-	-	-
2005.3.30	-	-	21	-	-	-	-	(11)	-
2005.4.07	(9)	-	29	-	-	54	-	(51)	(14)
2005.4.14	(15)	NA	22	-	-	(39)	-	(25)	(29)
2005.4.21	40	NA	32	(27)	(39)	30	-	(22)	(31)
2005.4.28	(15)	-	(15)	-	-	33	-	38	39
2006.3.11	48	-	49	-	-	37	-	46	(21)
2006.3.28	47	54	30	-	-	(29)	-	28	(16)

注1：網掛け:黄砂、数字のみ:弱い黄砂、-:非黄砂、NA:データなし

注2：( ):SPM濃度から黄砂のピークを捕集できなかったと判断された日