

# 黄砂降下量の推定と黄砂による酸性雪中和の効果について

【大気・地球環境室】

田中卓実・吉田篤史・尾田喜夫・最首信和\*

About the effect of the estimation of Asian dust descent quantity  
and the acid snow neutralization by Asian dust

Takumi TANAKA, Atsushi YOSHIDA, Yoshio ODA, Nobukazu SAISHU\*

## Abstract

Asian dust was added in laboratory experiment in the snow, after an average amount of descent of Asian dust sloop of 1 time in Tottori Prefecture was estimated on the basis of SPM (suspended particulate matter) concentration in Asian dust sloop from April, 1993 for 10 years in March, 2003, and the progress of change of the acidity of snowmelt runoff and neutralization was observed. As the result, an amount of descent (the dry deposition flux) of yellow sand 1 time it is non-precipitation is 0.2~1.8ton/km<sup>2</sup>, an average amount is about 1.0ton/km<sup>2</sup>, when of descent of this Asian dust sloop of 1 time in Tottori Prefecture for the 10 years was estimated. Meanwhile, amount of descent (the moist + dry deposition flux) in the precipitation was about 5.2ton/km<sup>2</sup> in the average. The snowmelt experiment in the indoor put the snow (fastened snow) collected on the basis of this result in Mt. Hyonoson in a Dewar flask, and Asian dust standard of an average amount of descent 6mg/(57cm<sup>2</sup>) by Asian dust (in non-precipitation) of 1 time was added to the inside, it carried out it. As the result, calcium carbonate Asian dust snow acidic product quantity it little each out acidic product. This fact would remain, if Asian dust deposits in the once snow, in the long term, and the counteraction seemed to be working effectively for acid snow which fell in the back.

## 1 はじめに

黄砂現象は、春先にしばしば観測される、我が国を含む東アジア特有の気象現象の一つである。黄砂の研究は、古くから行われており、気象学、地球科学などの分野で数々の報告がある。(例えば、溝畑・真室、1978；Kadowaki, 1979；Duce et al., 1980；石坂ら、1981；Uematsu et al., 1983；Iwasaka et al., 1983, 1988；田中他、1986；Arao and Ishizaka, 1986)。黄砂現象は突発的に起きる現象であるため、全ての黄砂現象を捉え、大気中の黄砂濃度等を測定することは非常に困難である。また、当研究所では黄砂による酸性雪(積雪)中和の効果把握するため、晩冬に山岳地域の積雪に沈着した黄砂を採取し

て、その降下量(沈着量)の実態把握を行っているが、黄砂の飛来は3月から4月の2ヶ月間に集中しているため、積雪が無かったり、あっても黄砂以外の降下物が多く混合した状態で沈着しており、黄砂のみの降下量を算出することは非常に困難であることがわかった。そのため、その他の方法による推定が必要であるが、西川等<sup>1)2)</sup>は、全国の一般環境大気測定局の浮遊粒子状物質濃度(以後SPM濃度という)のデータより大まかに全国各地域の黄砂一回当たりの降下量、年間降下量を推定していることから、本県における黄砂一回当たりの降下量を今回、西川等が行った手法と同様の手法を用いて推定した。そのうえで、デュワー瓶の断面積に相当する黄砂量を算出し、その量を実際デュワー瓶に詰めた雪に添加し

\* 保健衛生室所属

て黄砂による酸性雪中和の効果を検証した。

## 2 方 法

### 1) 黄砂降下量の推定

推定するうえで対象とした黄砂は1993年4月から2003年3月の10年間に鳥取県に飛来した黄砂のうちFig. 1に示した一般環境大気測定局3地点のSPM濃度が同様に高濃度を示し、いずれかの地点で100  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上の値を観測したものであり、ほぼ同一の空気塊が少なくとも3地点のうち2地点を通過したと考えられるものについて検討した。

環境科学分野では、粒径10 $\mu\text{m}$ 以下の大気浮遊塵を浮遊粒子状物質と規定しており、一般環境大気測定局において、 $\beta$ 線吸収法か光散乱法あるいは圧電天秤法により毎正時の連続測定が行われている。このうち $\beta$ 線吸収法が最も一般的であり当県での測定もこの方法によって行われている。しかしながら、 $\beta$ 線吸収法による対象は粒径10 $\mu\text{m}$ 以下の大気浮遊塵に限られることから、この方法による測定値は黄砂濃度を正確に示していない可能性がある。西川らは黄砂現象時に、ハイボリウムエアサンプラーを用いて測定した大気浮遊塵濃度とその同一捕集時間における $\beta$ 線吸収法によるSPM濃度とを比較し、その関係を求めており、

$$Y = 3.3X - 33 \quad [X: \beta \text{線吸収法による濃度} (\mu\text{g}/\text{m}^3), Y: \text{ハイボリウムエアサンプラーによる濃度} (\mu\text{g}/\text{m}^3)]$$

という一次の近似式を得ている。(Fig. 2) 当県でのデータもほぼ同様の関係があることが確認できたので、この式を用いて黄砂飛来時の大気SPM濃度から黄砂の大気中濃度を算出することとした。過去に飛来した黄砂について、米子市と鳥取市の上空を通過した黄砂量を①式、米子市と鳥取市の間で単位面積の地表に降下(沈着)した量を②式により算出した。なお、ここで言う通過量は地面に対して垂直に立った幅1 km×高さ2 kmの平面を1黄砂現象中に通過した黄砂量とし、米子市と鳥取市における通過量の差を米子-鳥取間の距離で割り1 km四方の地表に降下した量を黄砂降下量とした。黄砂通過量、黄砂降下量の算出方法の概要はFig. 3のとおりである。

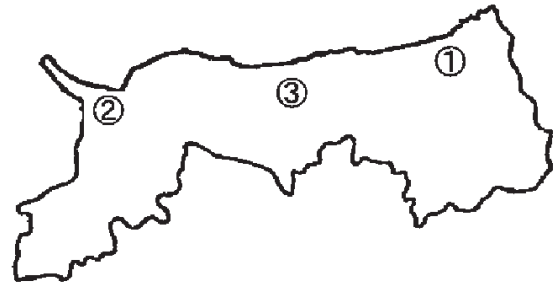


Fig.1 The air pollution monitoring station site.  
①Tottori city ②Yonago city ③Kurayoshi city

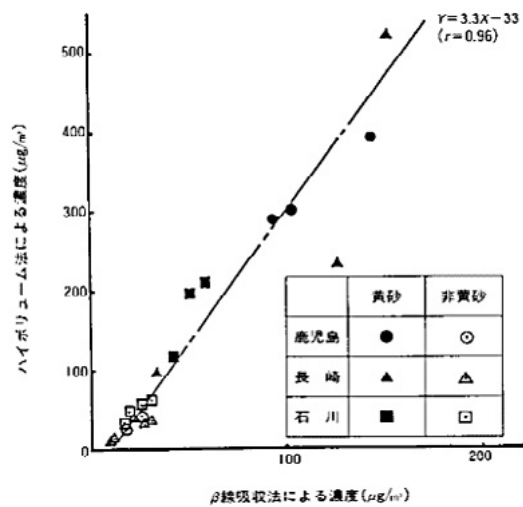


Fig.2  $\beta$ 線吸収法によるSPM濃度とハイボリウム法による大気浮遊塵濃度の比較(文献1)より抜粋)

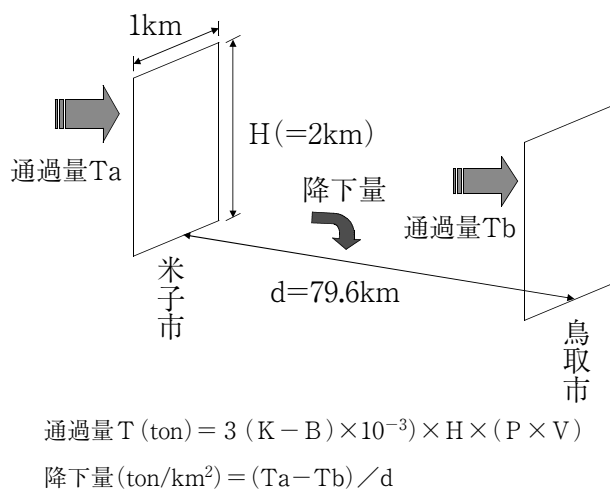


Fig.3 The estimation method of a yellow sand amount of descent by the SPM concentration.

$$T(\text{ton}) = 3((K-B) \times 10^{-3}) \times (H \times L) \times (P \times V) \dots \textcircled{1}$$

$$F(\text{ton}/\text{km}^2) = (T_a - T_b) / d \dots \textcircled{2}$$

ここで、T；通過量 (ton) (T<sub>a</sub>は米子市、T<sub>b</sub>は鳥取市の通過量)

K；黄砂時の平均SPM濃度 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

B；SPMのバックグラウンド濃度 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

H；黄砂の空気塊の厚み(km)

(Iwasakaら (1983) の値、笹野、林田 (1989) のライダーの観測結果を参考にして2 kmとした)

L；黄砂の移動方向に対する幅、1 kmとした

P；黄砂現象の出現期間 (hr)

V；空気塊の平均移動速度 (km/hr)

F；黄砂降下量 (ton/km<sup>2</sup>)

d；2 地点間の距離 (km)

とする。黄砂の実際の空間濃度分布や移動速度を正確に把握することは困難であり、次のような仮定を行った。

黄砂を運ぶ空気塊は、

a 地上から2,000mまで上下方向に均一に分布していてそのまま水平に移動する。

b 黄砂現象の現れた地域の気圧が800mbと850mbにおける平均風速 (高度1700m~1800m付近) で空気塊が移動するとし、この付近で唯一高層気象観測を行っている米子測候所の米子市上空の風速データを使用して平均風速を計算した。

また、2 地点をほぼ同一の空気塊が通過したかどうかの判断は気圧が800mまたは850mbにおける風向と2 地点間の方位を比較することにより行いその差が30度以内の期間について計算を行った。

## 2) 黄砂の酸性雪中和の効果

デュワー瓶(内径85mm×深さ220mm)を2ヶ用意し、山岳地域(鳥取県若桜町にある氷ノ山中腹)で平成16年1月30日に採取した積雪(しまり雪)を一定量(50~200g)ずつ同様に詰め、一方に1)から推測される1回の黄砂飛来に伴う単位面積当たりの降下量からデュワー瓶の断面積に換算した相当量を添加、他方は無添加の条件(コントロール試料)で融雪させた。(Fig.4)デュワー瓶はコルク栓を半分ほど開放し、雪と外気(15℃程度)を接触させ上層から融雪させた。瓶壁面からの融雪の影響とガラスからの



Fig.4 The aspect of the snowmelt experiment in the indoor.

Na<sup>+</sup>溶出の影響を小さくするため、瓶の内径に対する雪の厚みの比が小さくなるよう雪量を制限して実験を行った。融雪水は瓶の底からポンプによってフラクションコレクターに送液し、雪量に応じて5~10ml程度ずつ分取した。分取液はpH測定後、孔径0.45 $\mu\text{m}$ のフィルターで濾過しイオンクロマトグラフィーにより陽イオン5種、陰イオン3種について測定した。

## 3 結果および考察

Fig.5は過去10年間の鳥取市の黄砂日の日数を示したものである。1998年度頃から黄砂飛来増加

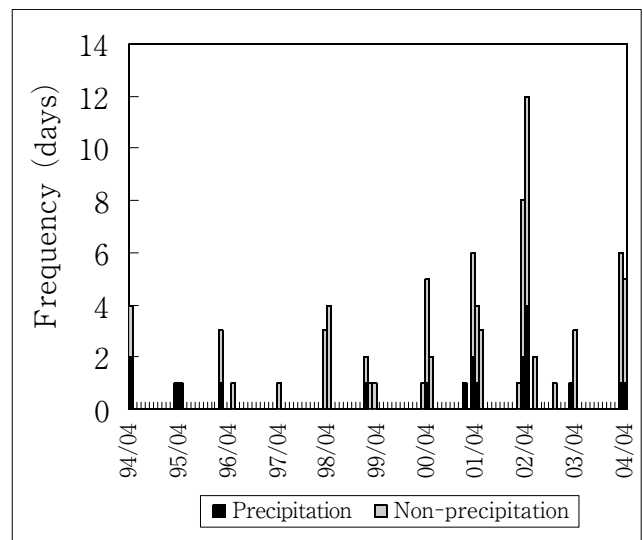


Fig.5 Monthly days of the yellow sand day in the Tottori City. (1994.4~2001.6)

の傾向（ただし、2002年度は減少）が見られるが、SPM濃度が $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上の規模の大きい黄砂は比較的少なく、最近では2002年11月12～13日に飛来した黄砂がある。そこでまずこの黄砂を例に降下量を推測してみた。Fig. 6はこの時の飛来経路を国立環境研究所のMetexで計算解析したものであるが、鳥取県を西から東に縦断していることがわかる。Fig. 7は、この時の鳥取市、倉吉市、米子市のSPM濃度の時間的推移を示したものであるが、倉吉市は他の2地点とはやや推移の傾向が違うためこれを除き、米子市と鳥取市の2地点を比較すると風上の米子市から濃度上昇が始まり1時間程度遅れて鳥取市の濃度上昇が始まっている。また濃度のピークや濃度降下も同様に1～2時間の時間のずれが見られ、同一のフラックスが通過したものと推測された。この場合の米子市、鳥取市上空の幅1km×高さ2kmの平面を通過した黄砂量をSPM濃度を基に計算すると米子市の場合が430ton、鳥取市の場合が338tonであり、この差から単位面積当たりの黄砂降下量は $1.2\text{ton}/\text{km}^2$ と推測された。（Fig. 8）

これと同様に1993年度から2002年度の10年間に当県に飛来した黄砂のうち、上記（2方法）で示した条件に合う黄砂について非降水時の降下量を算定したものがTable 1である。ただし、計算上、風向等の条件が合わない期間がある場合はその期間を除外した上で、一度単位時間当たりの降下量を算出した後、その値に黄砂の継続時間をかけて降下量（Table 1では推定降下量）を算定している。その結果、平均降下量は $1.0\text{ton}/\text{km}^2$ と推定された。同様に2地点間で降水の影響が認められた場合について計算する

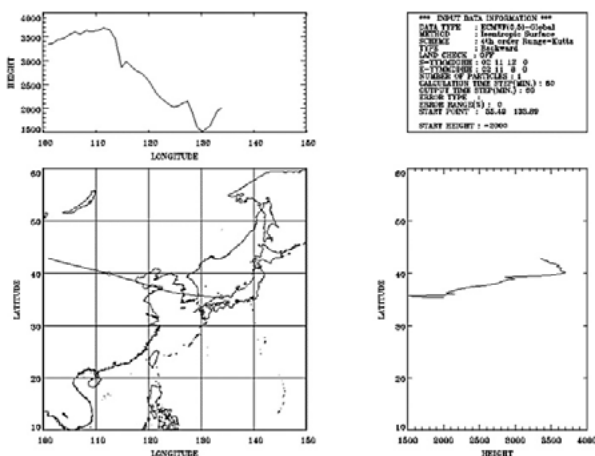


Fig.6 Swoop route in the yellow sand. (2002.11.12)

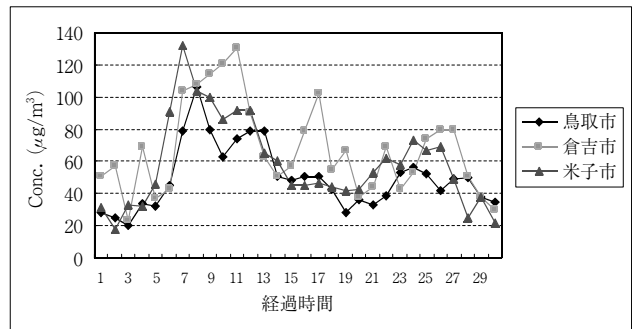


Fig.7 SPM concentration in the yellow sand swoop of the each point.

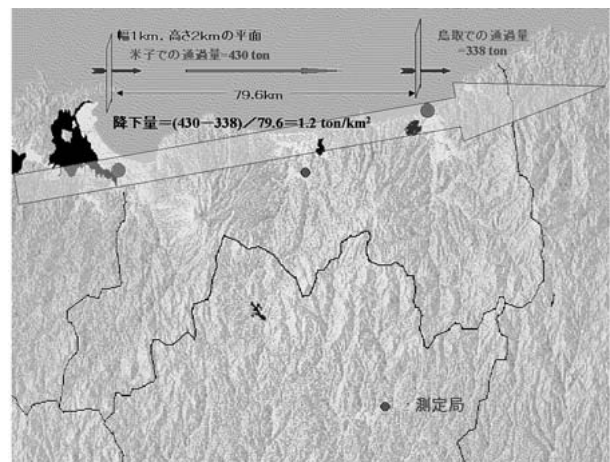


Fig.8 Passage quantity and amount of descent of the yellow sand.

と平均降下量は $5.2\text{ton}/\text{km}^2$ となり非降水時に比べかなり多いことが確認された。

また、これら比較的大規模な黄砂の飛来回数がここ10年間では非降水時に16回、降水時に4回程度であることから、これらを基に年間平均降下量を算定すると非降水時で $1.6\text{ton}/\text{km}^2$ 、降水時で $2.1\text{ton}/\text{km}^2$ 、計 $3.7\text{ton}/\text{km}^2$ となった。なお、SPM濃度が $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ 未満の黄砂の飛来による年間降下量はそれらに比べかなり多いことが予想されるが実際のどの程度か不明であり、今後、算定手法を検討する必要がある。

## 2) 黄砂の酸性雪中和の効果

Fig. 9は1)で算出した1回の黄砂（非降水時）による平均降下量 $6\text{mg}/(57\text{cm}^2)$ の黄砂標準品をしまり雪 $50\text{g}$ （積雪深約 $2.7\text{cm}$ ）、 $100\text{g}$ （積雪深約 $5.4\text{cm}$ ）、 $200\text{g}$ （積雪深約 $11\text{cm}$ ）に添加した時の積算融雪水量に対する融雪水中の成分濃度、中和の進行度の指標となる $[\text{H}^+]/([\text{nss-SO}_4^{2-}] + [\text{NO}_3^-])$ を示したものである。積雪深約 $2.7\text{cm}$ の場合は黄砂無添加の

Table1 Calculation table of a non-precipitation yellow sand amount of descent. (1993.4~2003.3)

日時	計算時間 t(h)	平均風速 v(km/h)	通過量 T a (ton)	通過量 T b (ton)	降水量 F (ton/km <sup>2</sup> )	F/t (ton/km <sup>2</sup> ·h)	継続時間 tc (h)	推定降水量 (ton/km <sup>2</sup> )
93/04/01	13	51.6	139	124	0.19	0.015	13	0.2
93/04/02	5	35.1	40	30	0.13	0.026	23	0.6
93/04/19	13	18.6	90	57	0.41	0.032	29	0.9
97/04/14	16	45.6	231	190	0.51	0.032	22	0.7
98/03/30	24	36.4	272	171	1.27	0.053	24	1.3
99/03/02	8	41.4	141	87	0.68	0.085	8	0.7
00/04/22	16	66.6	298	257	0.91	0.057	16	0.9
01/03/22	12	36.0	234	172	0.79	0.066	27	1.8
02/04/08	19	37.8	513	460	1.17	0.062	19	1.2
02/04/09	25	28.4	449	398	1.48	0.059	25	1.5
02/11/12	24	58.3	430	338	1.16	0.048	24	1.2
Average	15.9	41.4	257.9	207.6	0.79	0.049	20.9	1.0
Max	25	66.6	513	460	1.48	0.085	29	1.8
Min	5	18.6	40	30	0.13	0.015	8	0.2

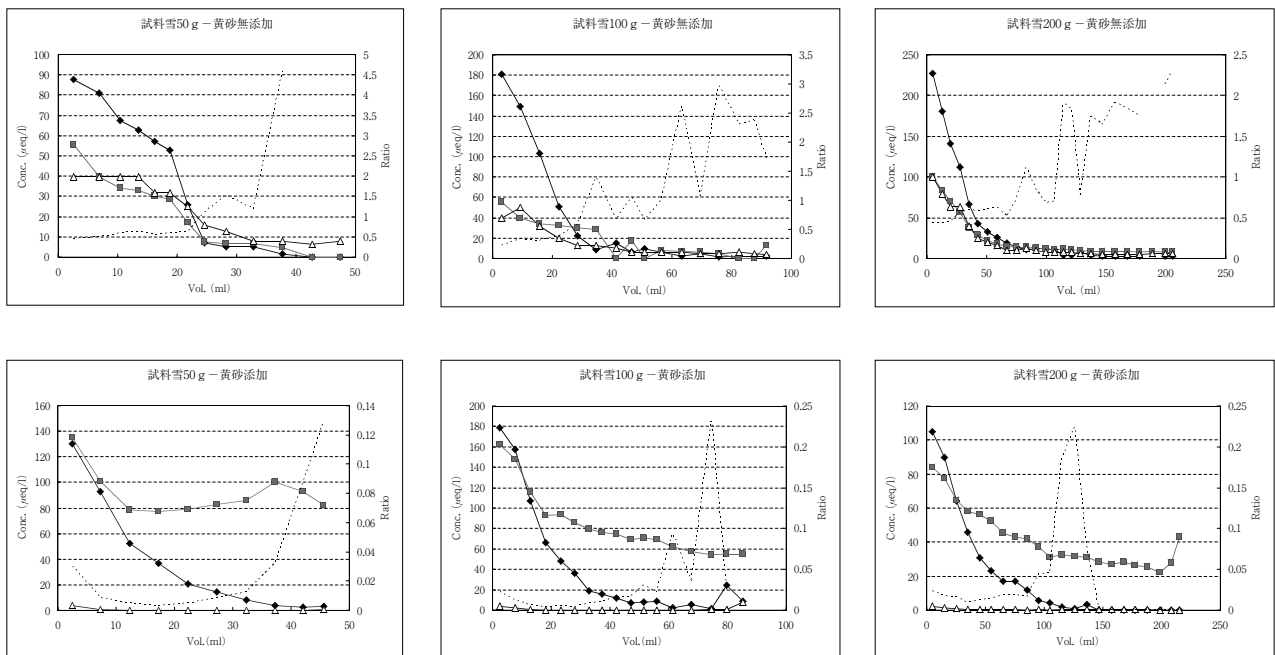
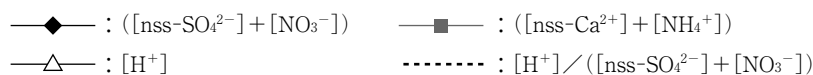


Fig.9 The transition of component concentration in the snowmelt runoff by the snowmelt experiment, etc. (top: Yellow sand free bottom: Yellow sand addition the left snow quantity 50g 100g, 200g).



条件では  $([\text{nss-SO}_4^{2-}] + [\text{NO}_3^-])$ 、 $([\text{nss-Ca}^{2+}] + [\text{NH}_4^+])$ とも積算流出量の増加に伴い、大きな減少が見られるのに対し、黄砂添加の条件では  $([\text{nss-Ca}^{2+}] + [\text{NH}_4^+])$ は傾向として横ばいの推移を示した。また、その影響により、黄砂無添加の条件での融雪水のpHが4.4~5.1であるのに対し、黄砂添加の

条件では初期の融雪水からpH5.4と高く5.4~6.4の範囲で推移した。積雪深約5.4cm、約11cmの場合も同様に  $([\text{nss-Ca}^{2+}] + [\text{NH}_4^+])$ の減少率は  $([\text{nss-SO}_4^{2-}] + [\text{NO}_3^-])$ のそれに比べて小さく、黄砂に含有する炭酸カルシウムが少量ずつ溶出して酸性雪を中和していることがわかった。

これまでに0.6mg/(57cm<sup>2</sup>)の黄砂標準品をしまり雪100g(積雪深約5.4cm)に添加した場合でもある程度中和効果を認めており、添加量6mg/(57cm<sup>2</sup>)の条件に単純に換算して考えると1回の飛来黄砂で少なくとも50cm程度のしまり雪の積雪に対して有効であると推定された。また、流出した総成分量について黄砂添加、黄砂無添加の条件を比較し、両条件での成分流出量の差を求めた。(Table 2)その結果、積雪深によらず  $[H^+] / ([nss-SO_4^{2-}] + [NO_3^-])$  は0.02~0.03程度、 $([nss-Ca^{2+}] + [NH_4^+]) / ([nss-SO_4^{2-}] + [NO_3^-])$  は約2であった。このことから、黄砂に含有する炭酸カルシウムが積雪中の酸性物質質量に応じて少量ずつ溶出し、酸性物質を中和しているものと推測された。また、黄砂を添加することにより  $nss-SO_4^{2-} + NO_3^-$ 、 $NH_4^+$ の流出量が減る現象が積雪深11cmの場合に見られ、黄砂への吸着等何らかの作用がはたらいっている可能性が示唆された。

Table2 Component outflow by the snowmelt experiment.

(μeq)			
積雪深 2.7cm	黄砂添加	無添加	差
H <sup>+</sup>	0.03	1.08	-1.05
A (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> +nss-SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	1.78	1.59	0.19
B (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> +nss-Ca <sup>2+</sup> )	4.28	0.96	3.32
nss-Ca <sup>2+</sup>	3.60	0.34	3.26
H <sup>+</sup> /A	0.02	0.68	
B/A	2.40	0.60	
積雪深 5.4cm	黄砂添加	無添加	差
H <sup>+</sup>	0.11	1.40	-1.29
A (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> +nss-SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	3.62	3.56	0.06
B (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> +nss-Ca <sup>2+</sup> )	7.02	1.68	5.34
nss-Ca <sup>2+</sup>	5.68	0.59	5.10
H <sup>+</sup> /A	0.03	0.39	
B/A	1.94	0.47	
積雪深 11cm	黄砂添加	無添加	差
H <sup>+</sup>	0.10	4.25	-4.15
A (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> +nss-SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	4.19	7.30	-3.11
B (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> +nss-Ca <sup>2+</sup> )	8.98	4.71	4.27
nss-Ca <sup>2+</sup>	7.54	1.42	6.13
H <sup>+</sup> /A	0.02	0.58	
B/A	2.14	0.64	

## 4 まとめ

鳥取県における黄砂飛来1回あたりの平均降下量を推定したうえで、室内実験において、黄砂を積雪に添加し、積雪中での酸性度の変化や中和の進行度を観察したところ、以下のような知見が得られた。

- 1) 比較的大規模な黄砂現象 (SPM濃度が100μg/m<sup>3</sup>以上の値を観測したもの) 1回あたりの平均降下量を推定したところ、非降水時の黄砂1回あたりの降下量 (乾性沈着量) は0.2~1.8ton/km<sup>2</sup>で平均約1.0ton/km<sup>2</sup>、一方、降水時の降下量 (湿性+乾性沈着量) は平均で約5.2ton/km<sup>2</sup>であった。
- 2) 比較的大規模な黄砂の飛来回数がここ10年間では非降水時に16回、降水時に4回程度であることから、これらを基に年間平均降下量を算定すると非降水時で1.6ton/km<sup>2</sup>、降水時で2.1ton/km<sup>2</sup>、計3.7ton/km<sup>2</sup>となった。
- 3) 黄砂に含有する炭酸カルシウムが積雪中の酸性物質質量に応じて少量ずつ溶出し、酸性物質を中和しているものと推測された。このことは黄砂が一度積雪内に沈着すれば長期間残留することになり、その後に降った酸性雪に対しても中和作用が有効に働くものと考えられる。
- 4) これまでの実験結果から1回の飛来黄砂で少なくとも50cm程度のしまり雪の積雪に対して有効であると算定した。
- 5) 黄砂の添加により積雪中の  $nss-SO_4^{2-} + NO_3^-$ 、 $NH_4^+$ の流出量が減る現象が一部の実験で見られ、吸着等何らかの作用がはたらいっている可能性が示唆された。

## 参考文献

- 1) 西川雅高, 溝口次夫他: 黄砂エアロゾルの降下量分布, "天気", 38(4), 39-46(1991)
- 2) 名古屋大学水圏科学研究所: 大気水圏の科学—黄砂, pp147-156(1991)