View metadata, citation and similar papers at core.ac.uk
brought to you by CORE
provided by Okayama University Scientific Achievement Repository

環境制御 (Environment Research and Control), 33, 13-19 (2011)

論　文

# 中部山岳地域における積雪中の非溶解性微粒子の地域分布

遠山　和大 [1*]・松本　絵菜 [2]・川田　邦夫 [3]・佐竹　洋 [4**]

[1] 岡山大学学務部，〒700-8530 岡山県岡山市北区津島中 2-1-1

[2] 富山大学理学部，〒930-8555 富山県富山市五福 3190

[3] 富山大学極東地域研究センター，〒930-8555 富山県富山市五福 3190

[4] 富山大学理工学研究部，〒930-8555 富山県富山市五福 3190

(平成 24 年 1 月 11 日受理)

# Areal distribution of water-insoluble particles in snow covers of the central mountainous area, Japan

**TOYAMA Kazuhiro[1*], MATSUMOTO Ena[2], KAWADA Kunio[3] and SATAKE Hiroshi[4**]**

Academic Affairs Department, Okayama University, 2-1-1 Tsushima-Naka, Kita-ku, Okayama-shi, Okayama-ken 700-8530, JAPAN[1]
Faculty of Science, University of Toyama, 3190 Gofuku, Toyama-shi, Toyama-ken 930-8555, JAPAN[2]
Center for Far Eastern Studies, University of Toyama, 3190 Gofuku, Toyama-shi, Toyama-ken 930-8555, JAPAN[3]
Graduate School of Science and Engineering, University of Toyama, 3190 Gofuku, Toyama-shi, Toyama-ken 930-8555, JAPAN[4]

**Abstract:** The vertical snow samples collected from 6 locations (Iou-zen: 800m A.M.S.L; the nearest site from the Sea of Japan, Kongoudou-zan: 1300m, Nishi-Hodaka-Dake: 2200m; the Northern Japan Alps, Hachimori-yama: 2100m, Kiriga-mine: 2000m, Yatsuga-take: 2200m; the most inlying site) in the central mountainous area, Japan, during early spring season 2004, were analyzed for size-separated concentrations of water-insoluble particles in snow layers to investigation of long-range transportation of chemical substances from the Asian continent to high mountainous areas in Japan.

Most of particles are less than 30 μm in diameter, the greater part of particles observed at the 6 locations were considered to be transported from the Asian continent sources as Asian dust (KOSA). The variation patterns of the vertical profiles of particle concentrations in snow layers were corresponding among each location. The concentrations of particles with less than 30 μm was gradually increased with increasing distance from the Sea of Japan to the Japan Alps, although, sharply-decreased at 3 sites located the monsoon-leeward of the Japan Alps, suggesting that the particles transported with monsoon were gradually removed from air and deposited in snow cover when the air parcel pass through the Japan Alps.

**Key words**: snow, mountainous area, particle, KOSA, long-range transportation

## 1.　はじめに

大気中にはさまざまな粒径の固体微粒子（以下，単に粒子と呼ぶ）が浮遊している。これらの粒子の主要な起源のひとつは中国西部の乾燥地域（ゴビ砂漠・タクラマカン砂漠など）や黄土高原であり，これらの地域において強風により巻き上げられた多量の土壌がモンスーンによって運ばれ，中国国内はもとより朝鮮半島や日本などにも到達している。日本国内では，特に冬季から春季にかけて，上空 3000 m 程度の高度を運ばれてきたこれらの粒子が多く観測され，黄砂現象と呼ばれる。こうした黄砂粒子の挙

*連絡先, Corresponding author　　**故人, Deceased

動は，大気化学や気候変動などの観点から環境と深い関わりがあると考えられ，日本をはじめとする北東アジア地域の環境を評価する上で注目される。

黄砂をはじめとする大気中の粒子に関する研究は様々な視点から行われているが，本研究では，北アルプスをはじめとする中部山岳地域の積雪に含まれる粒子に着目した。中部山岳地域は冬季モンスーンの影響による世界的な豪雪地であり，積雪は低温の環境下，春先まで解けることなく保存される[1]。その積雪層には，冬季の数ヶ月間にわたる降水や大気に関する情報が地面から表面にかけて時系列的に記録されており[2, 3]，その中には雪とともに積もった大気中の粒子も含まれている。また，冬季にはモンスーンの影響により，アジア大陸からの様々な化学物質の長距離輸送が増加することが知られており，その中には黄砂だけではなく，硫酸イオン（$SO_4^{2-}$）のような環境汚染物質も多く含まれている[4-6]。周囲に大規模な人為的汚染源が存在しない山岳地は，こうしたアジア大陸からの物質輸送状況を観測する上でも好適な環境といえよう。

中部山岳地域における粒子の観測は，これまでにも北アルプス立山周辺を中心に行われてきた[7-9]。しかし，モンスーンによって運ばれた粒子が北アルプスの山脈を越え，日本の内陸部へと輸送される過程で，各地にどの程度の量が運ばれているのかという事は明らかではない。このような背景から，筆者らは 2003/04 年冬季に，北アルプス周辺での粒子輸送状況を調べるための積雪調査を行った。調査の範囲は，日本海の海岸線付近から北西-南東という季節風の経路に沿って，150 km 以上はなれた内陸部の八ヶ岳に及んだ。この測線上に位置する 6 つの地点で，ほぼ同時期の積雪中に含まれる非溶解性粒子数を計測し，地域的な分布状況を明らかにするとともに，内陸部への物質輸送状況を検討した。

## 2.　積雪の断面観測と試料採取

### 2.1.　観測地点

2004年2～3月に，日本海に近い医王山から北アルプスを横断して八ヶ岳に至る約150 kmにわたる北西-南東方向の測線に沿う，以下の6地点（Fig. 1）において積雪の状態を観測し，試料採取を行った。

a) イオックスアローザスキー場上部: 海抜 800 m, 積雪深255 cm，2月19日採取。以下「医王山」と記述する。

b) スノーバレー利賀スキー場上部: 海抜 1300 m, 積雪深 360 cm，3月8日採取。以下「金剛堂山」。

c) 新穂高ロープウエー山頂駅: 海抜2200 m，積雪深309 cm，3月22日採取。以下「西穂高岳」。

d) 信州野麦峠スキー場上部: 海抜 2100 m，積雪深106 cm，3月29日採取。以下「鉢盛山」。

e) 鷹山スキー場上部: 海抜 2000 m，積雪深 88cm，3月25日採取。以下「霧ヶ峰」。

f) 八ヶ岳・縞枯山: 海抜 2200 m，積雪深 79 cm，3月15日採取。以下「八ヶ岳」。

これらの地点では，なるべくその地域の積雪深を代表すると思われる平坦な場所で，かつ周囲の樹木・建造物・人の侵入による攪乱が無いと判断される場所を選んで観測・試料採取を行った。

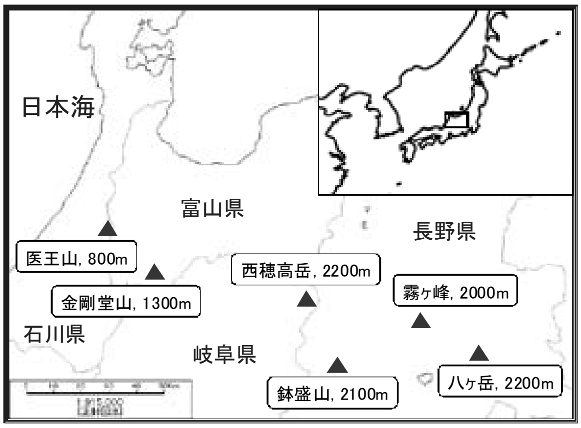


**Fig. 1**　観測・試料採取地点

### 2.2.　積雪の観測と試料採取

各地点では，積雪表面から地面に達する雪壕を作成し，その壁面を積雪層の序列が乱れないように整形して，積雪の状態（雪質・汚れ層の有無）の観察と試料採取を行った。

試料採取の際には，地面から積雪表面まで完全に連続するよう 3～2 cm ごとにブロック状の雪を切り出した。これらの試料はひとつずつポリ袋に密封し，温度上昇によって微生物が繁殖しないよう零下に保冷して持ち帰り，-20℃の低温庫に保管した後，測定直前に融解させた。

### 2.3.　粒子数測定

粒子数の測定は，測定中に空気中の塵や埃が混入するのを防ぐため，クリーンルーム内で行った。

低温庫で保管しておいた積雪試料を融解させ，200 ml のポリ瓶に移し替えた後によく振り混ぜ，試料中の粒子を充分に攪拌させた。攪拌後，すぐにマイクロピペットで 10 ml 計量し，真空ポンプを用いた濾過装置を用いて濾過した。使用したマイクロピペット内に粒子が残らないよう，試料を計量した後，蒸留水でマイクロピペット内を洗浄し，洗浄水も同時に濾過した。濾紙は Membrane Filters (Toyo Roshi Kaisha, Ltd.)を使用した。この濾紙の直径は 47 mm，粒子保持能は 0.1 μm である。また，濾過部分の直径は 35 mm，面積は約 1000 $mm^2$ である。試料を濾過し

た濾紙はピンセットで取り出し，プラスチックケースに入れて，粒子数計測までの間，デシケータ内で保管した。

濾紙に捕捉された試料中の非溶解性粒子の粒子数計測は偏光顕微鏡（Optiphot-pol, Nikon）を用い，10×10 倍の倍率で目視計測によって行った。顕微鏡の接眼レンズ上にある 0.85×1.20 mm（面積: 1.02 $mm^2$）の枠の中に存在する粒子数を，ひとつの試料につき 10 箇所測定し，その平均値をその試料の代表値とした。また，接眼レンズ上には 1 目盛 10 µm のスケールがある。粒子数を計測する際このスケールをもとに，粒子を 10 µm 未満，10～20 µm 未満，20～30 µm 未満，30～40 µm 未満，40～50 µm 未満，50～60 µm 未満，60 µm 以上の 7 段階に分類した。計測できる最小粒径はおよそ 0.5 µm である。

## 3.　結果と考察

### 3.1. 積雪の状態

Fig. 2 に各地点の積雪の状態を図示した。医王山の観測は 2 月に行ったが，標高が低いために，融解水によって形成された「ざらめゆき」の層が表面付近と地面付近にあった。しかし，中間部はほぼ，融解が無かったことを示す「しまりゆき」層であった。内陸部に位置する金剛堂山と西穂高岳では，大部分は「しまりゆき」や「こしもざらめゆき」等の，融解が無かったことを示す雪質であった。また，さらに内陸部に位置する鉢盛山から八ヶ岳にかけては，大部分が「しもざらめゆき」と呼ばれる，霜状の構造を持つ積雪が特徴的であった。こうした「しもざらめゆき」は主に，零度を大きく下回る気温の環境下で形成される場合が多く，積雪層の融解が有ったとは考えにくい。このように，本研究で試料を採取した各地点では，積雪が全層にわたって融解したことを示す痕跡はなく，沈着した粒子が融解水により洗い流されずに保存されていたと考えられる。

また，金剛堂山・西穂高岳・鉢盛山・霧ヶ峰においては，目視で観測することができた汚れ層（周囲の積雪層と較べて暗い色調の部分）の位置を図中に記入した。これらの汚れ層は，黄砂などの粒子が多く飛来した際に形成され，積雪中に保存されていたものであると考えられる。

### 3.2. 積雪中の粒子数

各地点積雪における，粒径別粒子数の鉛直プロファイルを Fig. 3 に示す。これらのうち，医王山の 0～12 cm・117～120 cm，金剛堂山の 0～6 cm・327～337 cm・345～351 cm，西穂高岳の 0～6 cm・300～309 cm，鉢盛山の 72～74 cm・92～94 cm，霧ヶ峰の 0～2 cm，八ヶ岳の 0～5 cm は，粒子数測定に必要とする充分な試料量が確保できなかったため，欠測した。また，霧ヶ峰の 54～58 cm では植物片が多く含まれていたため，粒径 60 µm 未満の粒子数を計測することできなかったが，60 µm 以上の粒子数として，これらの植物片も含めた粒子数を計測した。

粒子数の鉛直プロファイルは，層によって数 10～数 1000 倍に及ぶ差があり，一冬の間にきわだって高くなるピークがスパイク状に見られた。粒径別に見ると，ほぼ全ての地点において，10 µm 未満の粒子数が圧倒的に多く，続いて 20～30 µm 未満，10～20 µm 未満の粒子数が高い値を示した。

黄砂粒子の粒径は直径 1.0～30 µm の範囲に分布

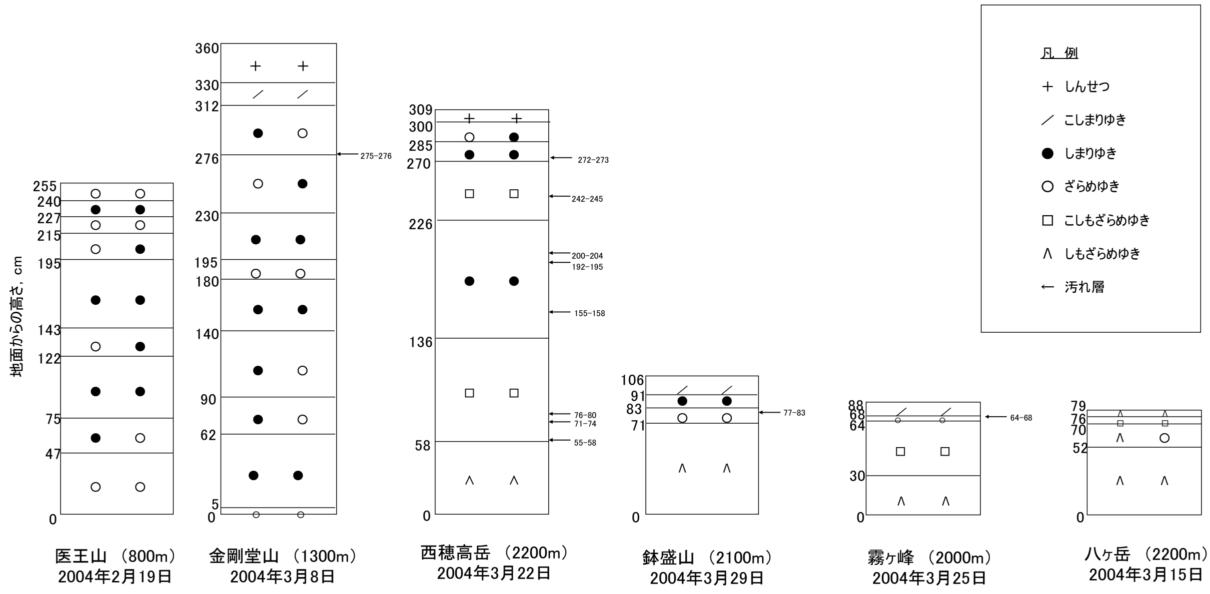


**Fig. 2**　積雪の構造図

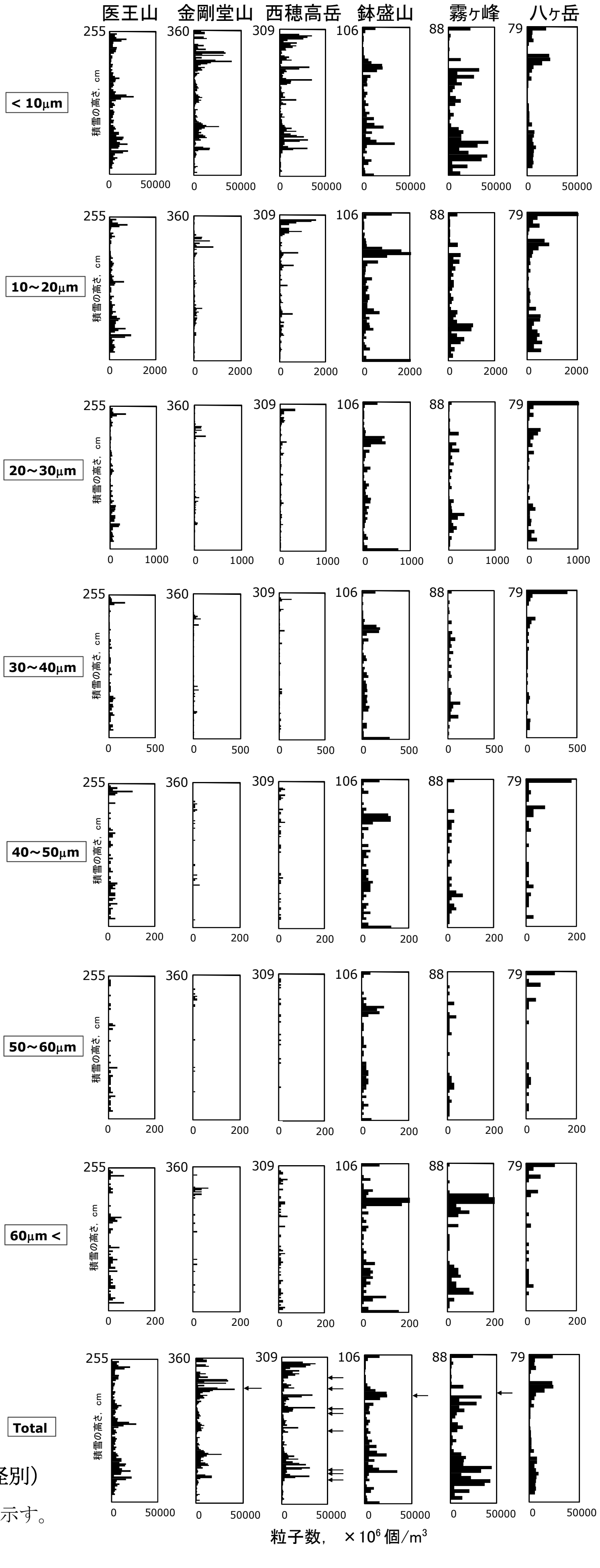


**Fig. 3**　粒子数の鉛直プロファイル（粒径別）

Total の右端にある矢印は，汚れ層の位置を示す。

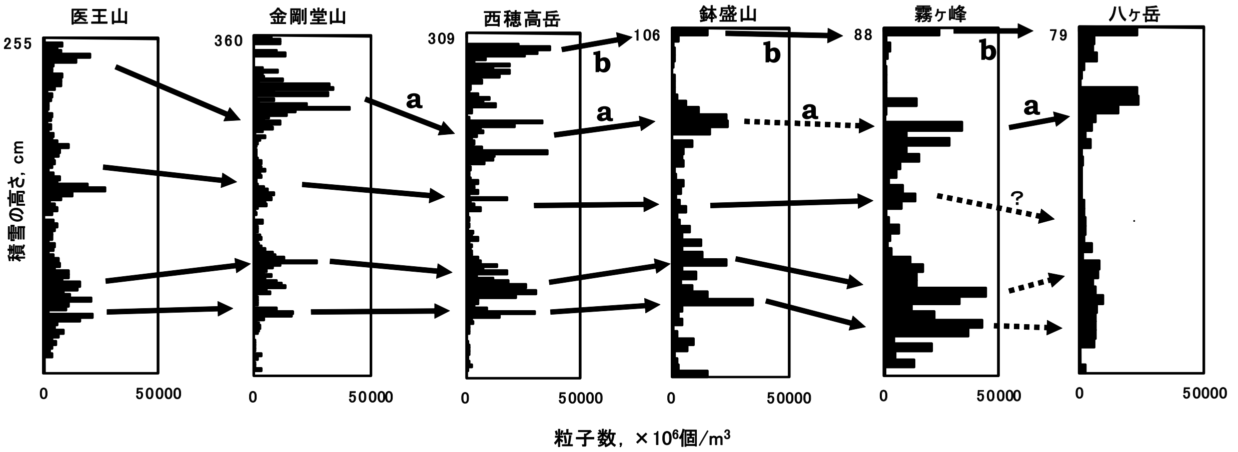


**Fig. 4　観測地点間の粒子数鉛直プロファイルの対応**

「a」で示した矢印は 2004 年 2 月 26～29 日の黄砂イベントに対応するピーク（群）と考えられる。また，「b」で示した矢印は 2004 年 3 月 11～17 日にかけての黄砂イベントに対応するピーク（群）と考えられる。

し，4 μm 付近の粒径が最も多い[10]。積雪中に含まれていた粒子の大部分が 30 μm 以下の粒径であったことは，これらの粒子の多くは黄砂を起源に持つことを示唆している。Fig. 3 中の総量を示す鉛直プロファイルには，黄砂が飛来した際に形成されたと考えられる汚れ層の位置も記入したが，これらの汚れ層と，粒子数のピークはよい一致を示す。こうしたことから，気象条件により大陸からの黄砂が多く輸送された時に，粒子数が多くなるピークが形成されたと考えられる。しかし，目視によって汚れ層が観測されなかった層であっても，粒子数のピークが見られる場合も多かった。

一方，30 μm 以上の粒径を持つ粒子は，30 μm 未満の粒子と較べて非常に少なかった。また，日本海より 100 km 以上内陸に位置し，北アルプスから見てモンスーンの風下側にあたる鉢盛山・霧ヶ峰・八ヶ岳の 3 地点においては，風上側の 3 地点（医王山・金剛堂山・西穂高岳）と比較して 30 μm 以上の粒径を持つ粒子数が多く観測された。風下側に位置する内陸部の地域は一般に積雪量が少ない。これら比較的大粒径の粒子は，地元起源の土壌粒子などが近距離を輸送されてきたものであると考えられる。

## 3. 3.  地点間での粒子数プロファイルの対応

積雪中における粒子数の鉛直プロファイルのパターンは，地点間で完全に一致するわけではないものの，一定の対応関係が見られた。この対応関係は，10 μm 未満のプロファイルにおいて特に顕著であった。Fig. 4 に，総粒子数のプロファイルにおいて，各地点間で対応すると思われるピーク（群）を線でつないだものを示した。同じ積雪試料について，溶存化学組成を計測した研究[11]によれば，積雪に含まれる化学物質の鉛直プロファイルも各地点間での対応関係が見られるが，本研究で計測した粒子数においても同様の結果が得られた。このように，日本海の海岸線から 150 km 離れた内陸に向かって，気塊と共に粒子が移流している様子がうかがえた。

気象庁[12]による黄砂観測日の記録では，これらの積雪が形成されたと考えられる期間（2003 年初冬～2004 年早春）には，2004 年 2 月 26～29 日に那覇から彦根にかけての西日本 8 地点で，2004 年 3 月 11～17 日に徳島から旭川にかけての全国 33 地点で，合計 2 回にわたる黄砂飛来イベントが観測された。2 月 11 日に採取した医王山の積雪には，これらの黄砂イベントは記録されていないと見られるが，Fig. 4 中に「a」で示した矢印（金剛堂山の 300 cm 付近→西穂高岳 200 cm 付近→鉢盛山 80 cm 付近→霧ヶ峰 64 cm 付近→八ヶ岳 65 cm 付近）は 2 月 26～29 日の黄砂イベントに対応するピーク（群）と考えられる。また，Fig. 4 中に「b」で示した矢印（西穂高岳から八ヶ岳にかけての表面付近）は 3 月 11～17 日にかけての黄砂イベントに対応するピーク（群）と考えられる。こうした，気象台などでの黄砂目視観測に対応すると考えられるピーク（群）以外にも，積雪中には粒子数が多い層が存在する。これらの層が形成されたであろう 12 月～2 月にかけての厳冬期においても黄砂は日本上空に飛来しており，積雪層中にはその粒子が含まれていると見られる。

## 3. 4.  粒子の総沈着量

Table 1 に，各地点の粒子総沈着量を小粒径（30 μm 未満）・大粒径（30 μm 以上）・全粒子に分けて示した。また，Fig. 5 には日本海の海岸からの距離と粒子沈着量の関係を小粒径（30 μm 未満）及び大粒径（30 μm 以上）に分けて示した。大陸から輸送されてきたと見られる黄砂が主成分であると考えられる小粒径の粒子は，日本海から最も近い医王山（7881 $\times 10^6$ 個/m$^2$）より距離とともに沈着量が増加し，最

も標高の高い西穂高岳での沈着量が最多（11367×$10^6$ 個/m$^2$）であった。北アルプスの山脈を越えた 3 地点では，日本海側の地点と較べて沈着量が少なく，モンスーンが北アルプスを越える際に多くの粒子が降下し，粒子が大気中から除去されていることが考えられる。一方，大粒径の粒子は鉢盛山・霧ヶ峰での値がやや高いものの，全体を通して 20～90×$10^6$ 個/m$^2$ 程度の範囲に収まった。

**Table 1　粒子の沈着量，×$10^6$ 個/m$^2$**

| | (海岸からの距離, km) | < 30 μm | > 30 μm | 総量 |
|---|---|---|---|---|
| 医王山 | 21 | 7881 | 57 | 7938 |
| 金剛堂山 | 48 | 10593 | 21 | 10615 |
| 西穂高岳 | 100 | 11367 | 31 | 11398 |
| 鉢盛山 | 118 | 3543 | 63 | 3607 |
| 霧ヶ峰 | 143 | 4858 | 86 | 4943 |
| 八ヶ岳 | 162 | 2089 | 23 | 2112 |

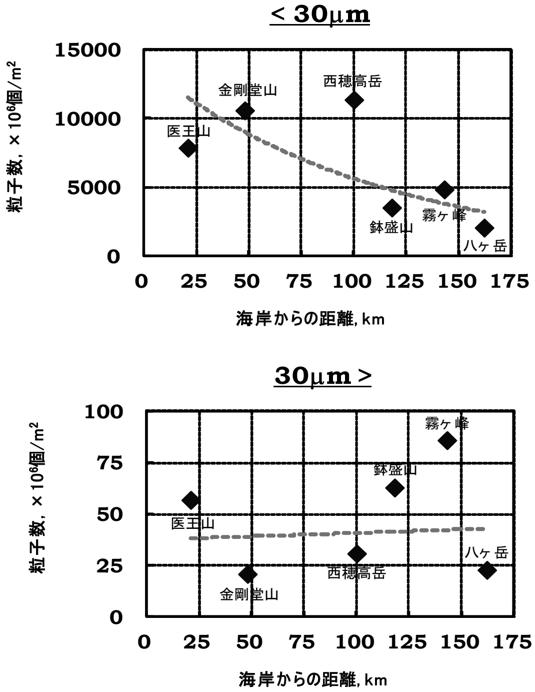


**Fig. 5　海岸からの距離と粒子沈着量の関係**

## 4.　おわりに

ほぼ同時期に，日本海に近い医王山から内陸の八ヶ岳にかけて，6 箇所の積雪を地面から雪面まで連続的に採取し，積雪層中の不溶性粒子数を計測した。地点間での比較を行った結果，冬季の中部山岳地域での物質輸送について以下のような知見を得た。

i. 日本海近くから内陸にいたる各地の積雪に含まれる粒子の大部分は 30 μm 以下の粒径であり，その中でも 10 μm 以下の粒径を持つものが多くを占めた。粒子の多くは大陸より飛来した黄砂であるとみられ，黄砂が多く飛来する条件下で形成された積雪中の粒子数は極大値をとる。

ii. 各地点での粒子数の鉛直プロファイルを比較すると，その変動傾向は各地点間で一定の対応関係がみられ，日本海の海岸から内陸にかけて大気とともに粒子が移流して行く状況が明らかになった。北アルプスを越えて輸送された粒子は，関東平野にも近い八ヶ岳にまで到達していた。

iii. 粒径 30 μm 以下の粒子沈着量は海岸から北アルプス山脈にかけて増加し，北アルプスを越えた内陸部では減少した。モンスーンが北アルプスの山脈を越えるとき，大気中の粒子が除去されながら減少していたと考えられる。

iv. 内陸に位置する鉢盛山・美ヶ原・八ヶ岳では，周辺の地域から近距離輸送されてきたと考えられる粒径 30 μm 以上の粒子が日本海側の地点よりも多く沈着していた。

以上のように，中部山岳地域の広範囲な積雪調査を通じて積雪に含まれる粒子の分布状況の一端が明らかとなり，冬季の日本周辺におけるアジア大陸からの物質輸送・沈着状況を解明する上での手がかりとなった。

日本海を挟んだ東アジア地域では急速な経済発展が続いており，これらの地域からのいわゆる越境汚染の動向は今後とも注視していく必要がある。冬季の日本上空を輸送される物質について，さまざまな情報を記録している山岳地域の積雪には，こうした諸問題を解決するために必要なデータが含まれている。これは単に山岳地域の環境を解明するということにとどまらず，アジア大陸から日本海を越えてどのように物質が輸送されているのかという，日本海を取り巻く環境を明らかにして行く上での基礎データとなるであろう。

## 参考文献

1. 中川正之，川田邦夫，立山室堂平の積雪の雪氷学的調査，中部山岳国立公園立山黒部地区学術調査報告，91-106 (1976).
2. 木戸瑞佳，長田和雄，矢吹裕伯，飯田肇，瀬古勝基，幸島司郎，對馬勝年，立山・室堂平における積雪層の堆積時期の推定，雪氷，59, 3, 181-188 (1997).
3. 遠山和大，鈴木悟郎，佐竹洋，川田邦夫，飯田肇，酸素同位体比を用いた山岳地積雪の堆積時期推定，雪氷，67, 4, 319-330 (2005).
4. H. Satake, T. Yamane, Deposition of non-sea salt sulfate observated at Toyama facing the Sea of Japan for the period of 1981-1991, Geochemical Journal, 26, 299-305

(1992).
5. 赤田尚史，柳澤文孝，本山玲美，川端明子，上田晃，日本の湿性降下物に含まれる非海塩性硫酸イオンの硫黄同位体比，雪氷, 64, 2, 173-184 (2002).
6. K. Toyama, H. Satake, S. Takashima, T. Matsuda, M. Tsuruta, K. Kawada, Long-range transportation of contaminants from The Asian Continent to The Northern Japan Alps, recorded in snow cover on Mt. Nishi-Hodaka-Dake, Bulletin of Glaciological Research, 24, 37-47 (2007).
7. M. Kido, K. Osada, K. Matsunaga, Y. Iwasaka, Diurnal variation of ionic aerosol species and water-soluble gas concentrations at a high elevation site in the Japan, Journal of Geophysical Research, 106, 17335-17345 (2001).
8. K. Osada, H. Iida, M. Kido, K. Matsunaga, Y. Iwasaka, Mineral Dust Layers in Snow at Mt. Tateyama, Central Japan: Formation Processes and Characteristics, Tellus, 56B, 382-392 (2004).
9. 青木一真，渡辺幸一，立山連峰における大気エアロゾル観測，エアロゾル研究, 24, 2, 112-116 (2009).
10. 石坂隆，小野晃，角脇怜，日本上空に飛来した砂塵の性状とその発源地，天気, 28, 10, 47-61 (1981).
11. 遠山和大，佐竹洋，松田隆弘，松本絵菜，川田邦夫，冬季の中部山岳地域における長距離輸送物質の降下・沈着状況，海洋，号外 47, 36-56 (2008).
12. 気象庁，［地球環境のデータバンク］黄砂，http://www.data.kishou.go.jp/obs-env/kosahp/kosa_data_index.html (2011).

## 謝　辞

富山大学雪氷学講座及び環境化学計測第Ⅱ講座の方々には，各地点における非常に厳しい気象条件の中での積雪調査や，膨大な量の試料分析を手伝って頂いた。また，積雪調査時には各地のスキー場・ロープウエイ職員の皆様に便宜を図って頂いた。ここに記してお礼を申し上げる。著者の一人である，富山大学の佐竹洋教授は 2009 年 11 月 22 日に逝去された。心より哀悼の意を表する。