

研究ノート

2009年2月3日山形県大蔵村で観測された雪面汚染現象

阿部 修¹⁾, 柳澤文孝²⁾

要 旨

2009年2月3日山形県大蔵村において雪面の汚染現象が見られた。翌日、大蔵村から北東へ約23kmの範囲、11カ所において雪面付近の積雪を採取し、融解後、pH、電気伝導度、固体粒子の濃度および粒度分布を測定した。その結果、汚染領域は北緯38.7°より南側であったと推定した。当時の天気図、肘折（大蔵村）および新庄（新庄市）におけるアメダス気象データ、光化学オキシダント濃度などから判断すると、この汚染物質は大陸から飛来したヘイズ（大気汚染物質）である可能性が高い。

キーワード：汚染物質、地域分布、大蔵村

Key words: impurities, local distribution, Ohkura village

1. はじめに

東アジア地域においては、近年の経済成長に伴い大気汚染物質の排出量が増加しており、日本の大気環境への影響が懸念されている（環境省編，2008）。東北地方における長期定点観測では、岩手県綾里（石川ら，1998）や山形県新庄（赤田ら，2009）などにおいて、湿性沈着でもたらされる汚染物質により降水のpHが低下傾向にあることが報告されている。また、柳澤ら（1996）、本山ら（2000）および赤田ら（2002）により、季節風が卓越する冬季間のエアロゾル、降雪および着雪氷には大陸から飛来する人為起源の大気汚染物質が含まれていることが報告されている。しかし、湿性沈着による個々のイベントの局所的な地域特性に関しては、柳澤ら（2001）による黄砂現象についての報告があるものの、大気汚染物質については塚原ら（2000）の報告など少数しかない。

筆者の一人は、2009年2月3日10時ごろ、山形県大蔵村の雪面が異常に汚染されていることに気がついた。同日、北側の新庄市ではこのような

汚染は見られなかった。そこで、この原因および分布範囲を調べるために、翌日、大蔵村から新庄市にかけて、11カ所において雪面付近の積雪を採取し、融解後、pH、電気伝導度（EC）、固体粒子の濃度および粒度分布を測定した。また、気象庁による当時の天気図、大蔵村の肘折および新庄市の新庄におけるアメダスデータ、環境省による地上光化学オキシダント濃度、宇宙航空研究開発機構/東海大学のエアロゾルの光学的厚さの衛星画像および九州大学のエアロゾルの数値シミュレーション結果との関連について調べた。

2. 調査方法

2.1 対象地域

山形県最上郡大蔵村は月山の北側に位置し、我が国でも有数の豪雪地帯として知られている。雪面の汚染物質を調査した地点は、主に国道458号沿線の大蔵村から新庄市にかけての南西-北東方向の延長約23kmの線上にあり、出羽丘陵と奥羽山脈に挟まれた地域である（図1）。表1の左側に地点番号（＃）とGPSで測定した北緯、東経および標高を示した。このうち標高が最も高いのは＃1で435m、最も低いのは＃7で47mであり、これ以降は再び高くなり、最後の＃11では128mである。

1) 防災科学技術研究所雪氷防災研究センター新庄支所
〒996-0091 新庄市十日町1400

2) 山形大学理学部地球環境学科
〒990-8560 山形市小川町1-4-12

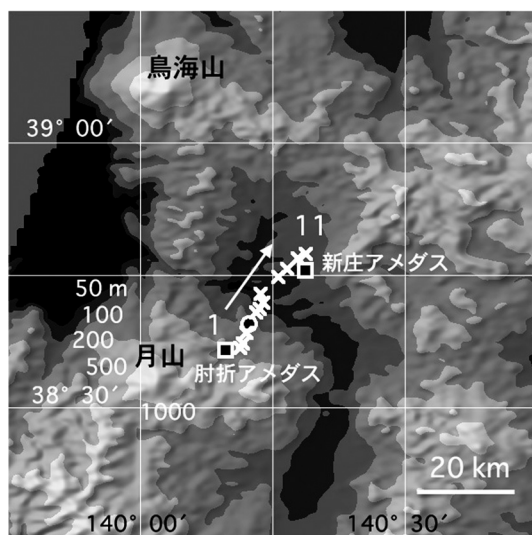


図 1 対象地域.

×: 試料採取地点 (11 は雪氷防災研究センター新庄支所), ○: 2 月 3 日の汚染雪観察地点, □: アメダス観測点. 地形データは国土地理院 1 km メッシュによる.

表 1 試料採取位置と測定結果.

#	北緯 (°)	東経 (°)	標高 (m)	積雪深 (cm)	粒子濃度 (個 mm ⁻²)	pH	EC (mS m ⁻¹)
1	38.612	140.189	435	202	31985	4.76	5.99
2	38.621	140.194	397	197	38730	4.31	6.10
3	38.641	140.201	260	152	18748	4.34	5.79
4	38.679	140.219	67	70	17093	4.72	1.00
5	38.686	140.225	80	83	19830	4.66	2.12
6	38.698	140.233	50	64	6401	4.86	1.09
7	38.714	140.227	47	68	7520	4.84	1.62
8	38.746	140.262	77	68	11137	4.79	1.30
9	38.760	140.277	96	68	8211	4.69	1.66
10	38.782	140.297	112	67	10325	4.71	1.54
11	38.790	140.312	128	74	8990	4.66	1.58

2.2 試料採取

2009 年 2 月 4 日 10:23~12:50 に上に示した 11 カ所において雪面付近の雪試料を採取した. 車両の影響をできるだけ排除するため, 道路から冬期季節風の風上側の西に約 100 m 離れた所を採取地点に選んだ. 単位面積当たりの汚れ具合を調べるために, 図 2 のように断面積 42 cm² の円筒サンプラーで雪面から深さ 10 cm (#3 のみ 5 cm) までの積雪層を採取した. このとき, 雪面が凹んで水みちが出来ていない場所を選び, 1 地点につき 2 個の雪試料を採取するとともに, 測深棒により積雪深を測定した. なお, #1 では汚染さ



図 2 雪試料の採取方法. 用具は円筒サンプラー, 雪べら, 折尺, 測深棒, GPS および筆記用具.



図 3 黒い筋状に見える汚染物質.

左側に上り斜面が続いており, 平地との境目が特に汚れている (2009 年 2 月 3 日 14:38 撮影).

れていない雪 (非汚染雪) のうち深さ 10~20 cm の試料も採取した.

2.3 積雪・汚染状況

最初に雪面の汚れに気付いた, 2009 年 2 月 3 日 10 時ごろ, 大蔵村塩台 (図 1 ○印, 標高 283 m) では雨やみぞれが降っていた. しかし, 視界が遮られるほどではなく, 視程は 1 km 以上あったと推測される. 同日午後には融雪が進み雪面に雪えくぼが見られ, その凹みに融雪水とともに黒色の物質が濃集していた (図 3). しかし, 同日 15:35 雪氷防災研究センター新庄支所 (#11) に戻ったときには雪面の汚れは確認できなかった.

図 4 は試料採取時における雪面付近の積雪断面写真である. 標高の低い #4~11 (標高 47~128 m) では融解が進み, 新たに積もった雪 (黒矢印

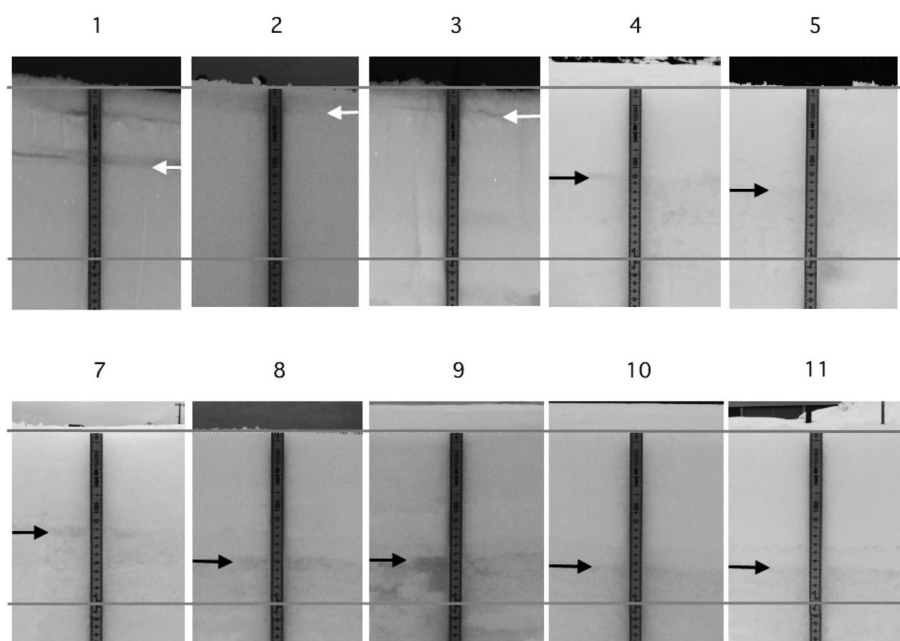


図 4 試料採取時の雪面付近の断面写真。

＃6 は撮影しなかった。2 本の平行線は上が雪面，下が深さ 10 cm の所を示す。白矢印は新雪が部分的に融解してざらめ雪に変化した層の下限，黒矢印は全てざらめ雪に変化した新しい積雪層の下限を表す。

より上層) も完全にざらめ雪となっており，汚染物質の一部は融雪水とともに流下した恐れがある。しかし，標高の高い＃1～3 (260～435 m) では，このようなことはなく，雪面付近の汚染物質はそのまま採取できた。

2.4 分析方法

採取した試料は直ちに融解し，翌日に pH メータと電気伝導度計により pH と EC の測定を，シスメックス製 FPIA-2000 により粒子解析 (測定可能粒径範囲 0.6～40 μm) をそれぞれ行った。このとき，融解した液体試料には黄砂のような沈殿物は見られず，ビニール袋の内側にスス状のものが付着していたので，それらをすすぎ落とすようにして 50 ml のポリ瓶に移し，それぞれ測定した。なお，粒子濃度は上述したように単位面積当たりの粒子数で表した。ただし，厳密に言えば，雪試料の厚さが異なるもの (＃3) があるので，その影響を取り除く必要があるが，ここでは高濃度の粒子数を問題にしたので，このような補正は行わなかった。また，＃1～3 の試料は非汚染雪とともに採取・融解したので，pH と EC については

汚染物質が希釈されて測定されたことに注意する必要がある。

3. 結果と考察

3.1 試料分析結果

表 1 および図 5 に分析結果を示した。それぞれ 1 地点につき 2 個採取した試料の平均値である。なお，図 5 中の * 付きの測定値は，＃1 において採取した雪面より 10～20 cm 下層の非汚染雪のものである。

EC は＃1～3 で高くなっており，非汚染雪の値と比べ 14 倍となっている。また，pH は＃1 ではさほど低下していないものの，2, 3 では大きく低下している。非汚染雪の pH は 5.05 で他の全ての地点のものより高くなっていた。上述したように，＃1～3 の雪試料は融解時に非汚染雪により希釈されたことから，汚染雪本来の EC や pH はさらに異常な値を示していたと考えられる。以上のことから，＃1～3 では黒色物質とともに雪を酸性化させる化学物質が少なからず含まれていたことが示唆される。ただし，＃4～11 では雪面付近の積

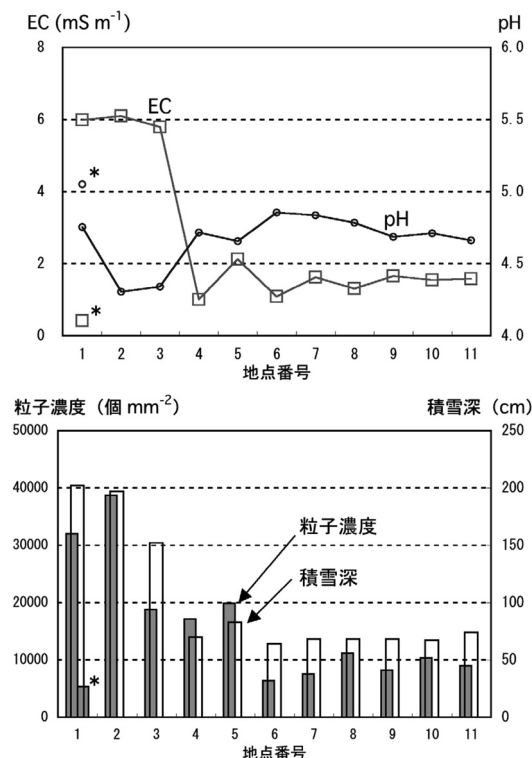


図 5 融解した雪試料の EC と pH (上段) および粒子濃度と積雪深 (下段). * 付きは非汚染雪.

雪がざらめ化していたことから、水溶性物質の一部はすでに流下しており、EC や pH の測定結果にもこの影響が反映され、大きな異常値が現れなかったものと推察される。

一方、粒子濃度は#1~5 で高くなっており、EC や pH のように#1~3 のみが異常値を示しているとは異なっている。この原因は、非水溶性の固体粒子の場合は融雪水とともに流出されることなく、雪面付近の積雪層にかなり残っていたものと推察される。図 6 は、#1~11 の雪試料と黄砂を含んだ降水の固体粒子の粒度分布を比較したものである。本図から次のことがいえる。

- (1) #1~5 および黄砂では粒径 $1\sim3\mu\text{m}$ の頻度が高くなっており、ピークは $2\mu\text{m}$ にある。
- (2) #7~11 では $1.5\sim4\mu\text{m}$ の頻度が高くピークは $2.5\sim3\mu\text{m}$ にある。
- (3) #6 では両者の特徴を併せもった分布となっている。

以上のように、粒子濃度の高い#1~5 の粒度分布はそれ以外の試料に比べて小粒径の物質を多く

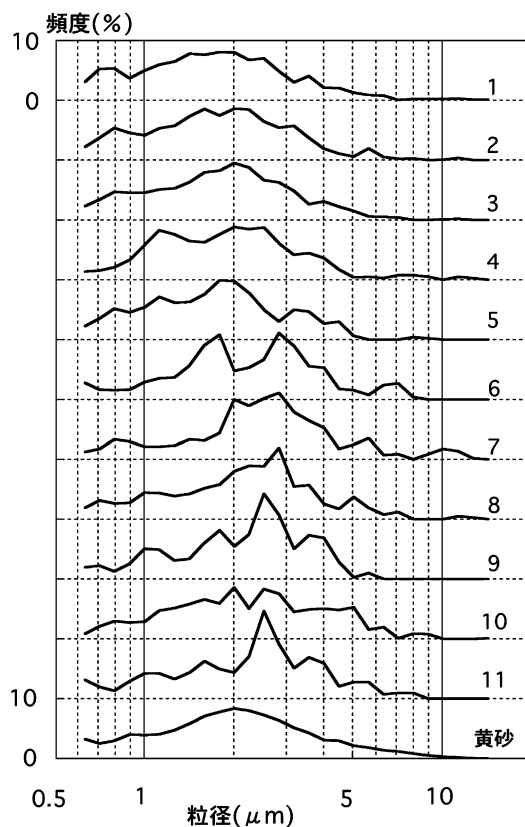


図 6 汚染物質と黄砂 (2007.4.2 採取) の粒度分布。

含んでいることがわかる。一般に雪面付近に含まれている固体粒子は融解により小粒径のもののほど速く流下するといわれている (鴻野・前野, 1979)。しかし、すでにざらめ化が進んでいた#4, 5においても、小粒径の頻度が高くなっているのは、試料採取時に小さな粒子でもまだ雪面付近に残っており、ざらめ化しなかったならば、粒子濃度はさらに高かった可能性がある。以上のことから、黒色物質の汚染領域は#4, 5の範囲まで及んでおり、その境界は#6の付近であったと推定される。なお、黄砂を含んだ降水試料は、山形地方気象台 (2007) で黄砂現象が観測された、2007 年 4 月 2 日 9 時に雪氷防災研究センター新庄支所で採取したものである。

3.2 気象データとの比較

図 7 は、2009 年 2 月 1 日~3 日の天気図 (日本気象学会, 2009) である。1 日 9 時には西高東低の気圧配置になっているが、東方海上の低気圧が北東へ移動するにつれ、2 日 9 時には中国地方に中

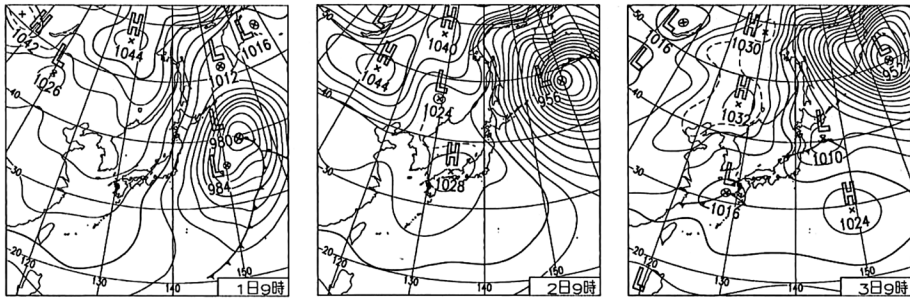


図 7 2009 年 2 月 1 日～3 日の 9 時の天気図 (日本気象学会, 2009)。

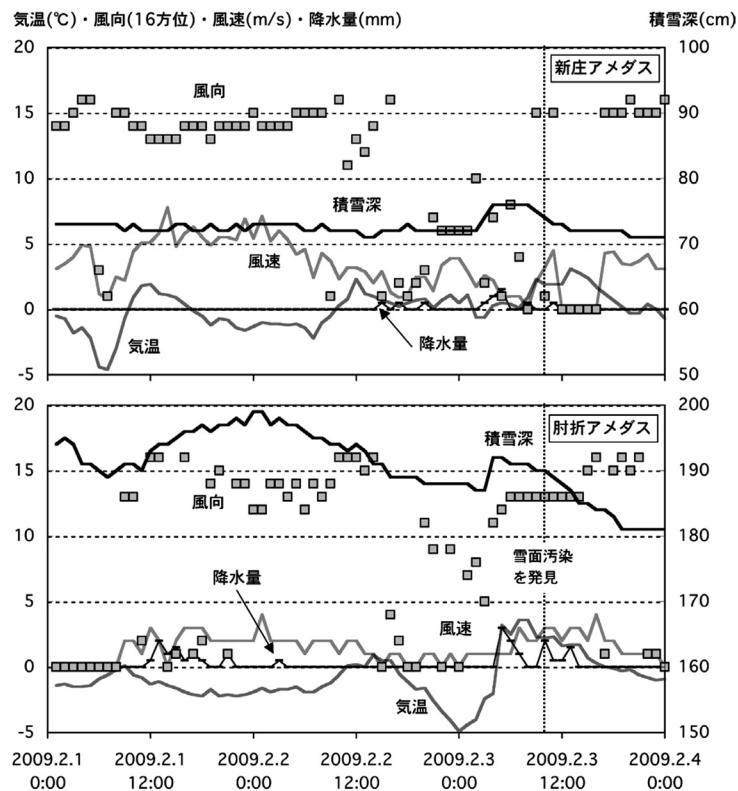


図 8 新庄 (上段) と肘折 (下段) におけるアメダス気象データ。

心をもつ高気圧が本州を通過しつつあり、さらに 3 日 9 時には東北地方の東方にある低気圧から伸びた寒冷前線が山形県の上空を通過したことがわかる。図 8 に新庄と肘折のアメダス観測点における 2 月 1 日～3 日の気象データを示した。両観測点の位置は図 1 の通りである。肘折 (下段, 標高 330 m) では 2 月 1 日 12 時から積雪深が増加し始め、2 月 2 日 0 時にピークとなり、その後は減少に転じている。この同じ時間帯に新庄 (上段, 標

高 105 m) の積雪深にはほとんど変化が見られない。ところが、汚染雪が見られた日の、肘折における 2 月 3 日 4 時からの積雪深の増加の際には新庄でも同様に増加している。また、降水量については肘折では同日 5 時から、新庄ではこれより早い 3 時から記録されている。上述したように、大蔵村塩台付近では 10 時頃には雨やみぞれが降っていたことから、この降雪は気温の上昇により、途中みぞれや雨に変わったものと判断される。

このとき、もし汚染物質が降雪中、恒常的に湿性沈着したなら、汚染された積雪層はある厚さをもつはずであるが、今回汚染された層は雪面のごく薄い部分（厚さ約 1 cm）であったことから、汚染物質は 2 月 3 日早朝に通過した寒冷前線による降水の後半にもたらされたものと考えられる。しかし、同時刻に新庄でも降水が観測されたのにも関わらず、汚染が見られなかったことから、局所的な現象であったと推察される。

3.3 地上光化学オキシダント濃度との比較

地上における光化学オキシダント（OX）濃度は人為起源の大気汚染物質と密接な関係があることが知られている（秋元ら，2002）。そこで、山形県内の OX 濃度から汚染物質の飛来の可能性について検討した。図 9 は、山形県内の OX 濃度観測点の位置と 2009 年 2 月 1～3 日における OX 濃度の時間変化を示したものである。観測点の符号 A～J は、汚染雪発見当時の肘折アメダス観測点の風向が西北西であるので、これに直交する北北東から南南西方向に順番に付けた。OX は光化学反応によって生じるため、外部からの移流がないとすれば、一日の中で朝（6～9 時）が最も濃度が低く、昼過ぎに最も高くなるはずである。2 月 1 日と 2 日にはこの傾向が認められた。一方、2 月 3 日では、B, C, D, I のように朝に低くならないか、あるいは、E, F, J のように朝に高い値を示している地点がある（図中四角枠内参照）。また、B, D, E および I においては 50 ppb を超える OX 濃度が記録されている。これらのことから、3 日の朝に外部から高濃度の OX が飛来したことが推定される。これに対して、同時刻、A および G では高濃度の OX は観測されなかった。G 地点は西寄りの風の風上側にある月山および朝日連峰の地形の影響を受けやすい場所にあり、大気汚染物質の流入が妨げられたものと考えられる。なお、同地点は高野（2009）の 3 次元熱流体数値モデルによるシミュレーション結果でも風が弱まる場所として示されている。以上のことから、高濃度の汚染物質が、大蔵村付近（北緯 38.7°）を北限として、山形県上空を通過した可能性が高いと推察される。

なお、山形地方気象台（2009）によれば 2 月 3 日前後に山形県に飛来した黄砂は記録されておらず、雪試料融解時にも黄砂のような沈殿物は確認され

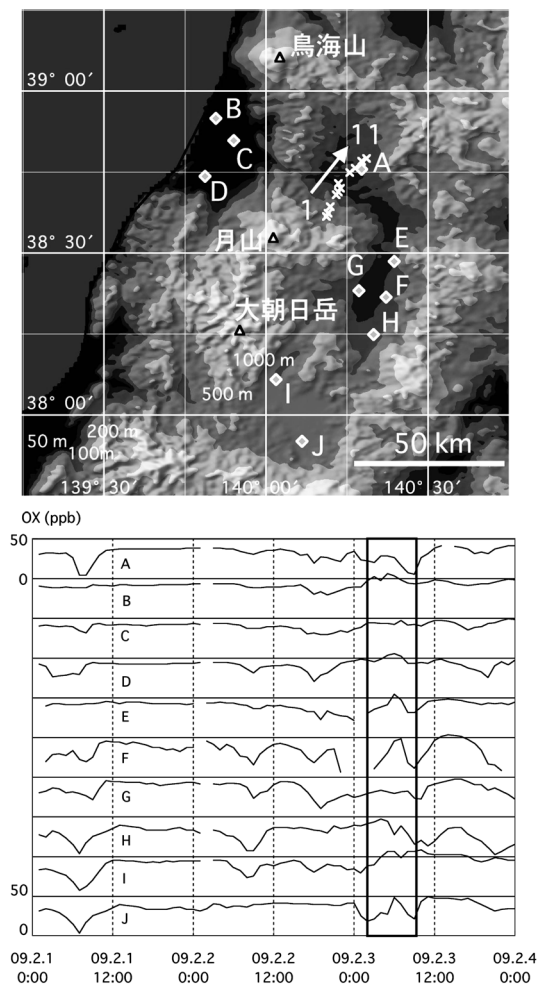


図 9 山形県内の OX 観測点の位置（上段）と 2009 年 2 月 1～3 日における各地の OX 濃度の時間変化（下段）。

なかった。また、2 月 2 日に浅間山が噴火したが、この時期は西寄りの風が卓越しており、北上するような気流は存在しなかったことから、この影響は排除された。さらに、試料採取を行った周辺域および近隣の風上地域で広範囲に大気汚染物質を排出するような施設等は存在しない。以上のことから、黒色化した積雪表面に含まれていた粒子は、人為起源の越境大気汚染物質（ヘイズ）と判断される。

以上が、積雪試料の分析結果、気象データおよび光化学オキシダント濃度分布から得た結論であるが、以下にこれを裏付けると考えられる他機関によって得られた観測事実および数値シミュレーション結果を示す。

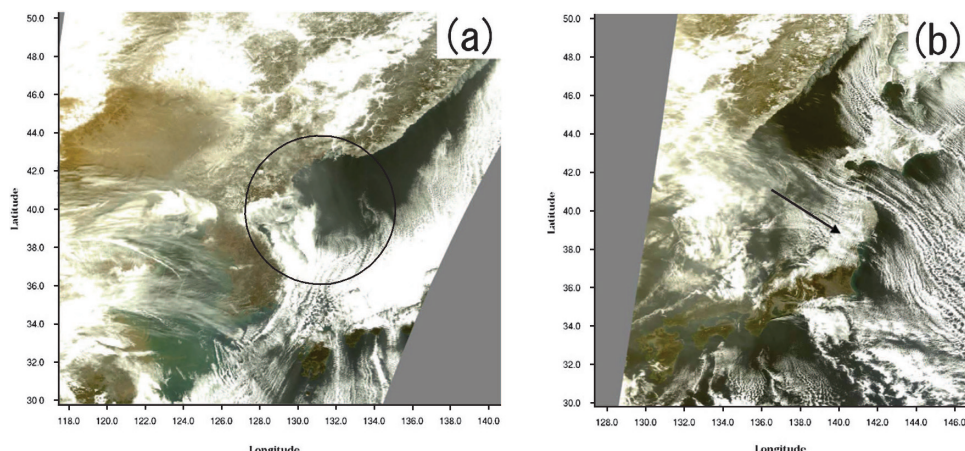


図 10 エアロゾルの光学的厚さ (宇宙航空研究開発機構/東海大学).

(a): 2009 年 2 月 1 日 2 時 24 分 (A2GL10902010224OD1_ONLTE_03398_03927_RcRefI.jpg),
 (b): 同 2 月 2 日 1 時 28 分 (A2GL10902020128OD1_ONLTE_03414_04409_RcRefI.jpg).

3.4 エアロゾルの光学的厚さの衛星画像

宇宙航空研究開発機構と東海大学から提供されている、東アジアにおけるエアロゾルの光学的厚さの衛星画像 (http://kuroshio.eorc.jaxa.jp/ADEOS/mod_nrt_new/index.html) によれば、2 月 1 日 2:24 に朝鮮半島の東側にエアロゾルと推定される灰色の塊 (図 10○印) が認識される。このときの雲はこの灰色の塊からほぼ南へ伸び、九州に達している。翌日 1:28 の画像では、日本海に発達している筋状の雲は東南東へ伸びて東北地方を横切っている (矢印)。その後は低気圧から伸びた寒冷前線の雲に覆われ詳細は不明であるが、継続して西寄りの風が吹き、この傾向は 2 月 4 日頃まで継続していた。なお、エアロゾルの光学的厚さは NASA 地球観測衛星に搭載されている MODIS の 749 および 865 μm の波長を用いた標準大気補正アルゴリズムにより求められたものであり、特に海上における判別の信頼性は高い (岸野ら, 2002)。

3.5 エアロゾルの数値シミュレーション

九州大学ではエアロゾルの数値モデル (SPRINT-ARS) によるシミュレーション結果を公表している (竹村, 2009; <http://sprintars.riam.kyushu-u.ac.jp/archivej.html>)。そこで、2009 年 2 月 1~3 日におけるアジア地域のエアロゾル質量鉛直濃度および地上濃度の分布を参照した (図は省略)。質量鉛直濃度では、2 月 1 日に上記の灰色の塊に相

当する箇所に中国大陆から伸びた黒色炭素、有機炭素および硫酸塩からなる高濃度のエアロゾルが見られる。その後、上記のエアロゾルは南東へ延び、近畿地方を中心とする日本列島上空を通過したことが示されている。地上濃度でもほぼ同様の傾向であるが、2 月 3 日の分布では北に行くほど濃度が低下していることがわかる。土壌粒子および海塩粒子についてはこのような傾向は見られなかった。

以上のことから、2 月 1 日に朝鮮半島の東側にあった大気汚染物質と見られるエアロゾルが 2 月 3 日頃に東北地方を北限として日本列島上空を横切った可能性が高く、#1~5 のみで黒色の汚染が確認されたのは、この地域が汚染物質の移動経路に当たっていたためと推定される。

4. おわりに

本報告では、直線距離約 23 km の区間、11 ヶ所で採取した雪面付近の雪試料の分析結果、アメダス気象データおよび光化学オキシダント濃度から黒色物質の汚染範囲を推定し、これが主として湿性沈着によってもたらされた人為起源の越境大気汚染物質であると判断した。また、これを裏付けるものとして、エアロゾルの光学的厚さの衛星画像およびエアロゾルの数値シミュレーション結果を示した。しかし、上空の大気汚染物質の湿雪沈着のメカニズムや地形の影響については未解明な

点が多い。これらの問題を解明するためにはより広域の面的な調査が必要である。

積雪はその白さゆえに汚染物質の検出に有効であることを改めて知らされた。従来、黄砂現象については注目されてきたが、今後、どのような事態が生じるか予断を許さないことから、我々雪氷関係者は積雪を注意深く観察する必要がある。

謝 辞

山形県環境科学研究センターの皆川秀司、渡邊英治両氏にはオゾン濃度のデータを提供していただいた。宇宙航空研究開発機構 (JAXA)/東海大学 (TSIC/TRIC) が提供しているエアロゾルの光学的厚さの衛星画像を使用した。また、九州大学の竹村俊彦氏が開発したエアロゾル数値モデル (SPRINTARS) によるシミュレーション結果を参考にした。気象研究所の千葉 長氏には 2009 年 2 月 2 日の浅間山噴火当時の気流について調べていただいた。当センター新庄支所長の佐藤 威博士には本原稿に対する有益なコメントをいただいた。雪試料の採取および分析は鈴木克彦・新野孝健両氏のサポートにより行われた。データ整理は五十嵐恵さんによる。なお、地形図の作図には SimpleDEMViewer を使用した。以上、ここに記して謝意を表するものである。

文 献

- 赤田尚史・柳澤文孝・本山玲美・川端明子・上田 晃, 2002: 日本の湿性降水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**, 173-184.
- 赤田尚史・柳澤文孝・奥村信貴・鈴木伸一郎・阿部修・佐藤 威・小杉健二・望月重人・佐藤篤司, 2009: 山形県新庄市における降雪の化学組成の特徴および酸性雪の経年変化 (1991/92 年~2002/03 年). 雪氷, **71**, 253-262.
- 秋元 肇・河村公隆・中澤高清・鷲田伸明編, 2002: 対流圏大気の化学と地球環境. 東京, 学会出版センター, 223pp.
- 石川百合子・大野卓也・大山準一・小川 完・原 宏, 1998: 綾里における 1976~1994 年の降水の酸性化. 天気, **45**, 351-360.
- 環境省編, 2008: 平成 20 年版環境・循環型社会白書. 東京, 財務省印刷局, 416pp.
- 岸野元彰・福島 甫・虎谷充浩・陳 文忠・田中昭彦, 2002: 海洋リモートセンシング. 日本リモートセンシング学会誌, **22**, 336-354.
- 鴻野繁和・前野紀一, 1979: 融雪による積雪内固体粒子の移動. 低温科学, 物理篇, **38**, 81-92.
- 本山玲美・柳澤文孝・小谷 卓・川端明子・上田 晃, 2000: 山形のエアロゾルと湿性降水物に含まれる非海塩硫酸イオンの硫黄同位体比. 雪氷, **62**, 215-224.
- 日本気象学会, 2009: 日々の天気図. No. 84 2009 年 2 月, 天気, **56**, 54-55.
- 高野哲夫, 2009: 3 次元熱流体数値モデルの独自開発—山形県置賜地方の冬季局地風への適用—. 天気, **26**, 471-476.
- 竹村俊彦, 2009: 大気エアロゾル予測システムの開発. 天気, **26**, 455-460.
- 塚原初男・飯田俊彰・上木勝司・山谷 睦・福島 純・武田能拓・猪飼啓文・安国起世・下井田領子・祢津 陽, 2000: 本州北部日本海側のイオン沈着量の局地的集中. 雪氷, **62**, 255-264.
- 山形地方気象台, 2007: 2007 年 4 月の天候 (山形県). 1-10.
- 山形地方気象台, 2009: 2009 年 2 月の天候 (山形県). 1-10.
- 柳澤文孝・中川 望・安部博之・矢野勝俊, 1996: 山形県蔵王の積雪と着氷の化学組成. 雪氷, **58**, 393-403.
- 柳澤文孝・奥村信貴・本山玲美・松本寿子・山下千尋・赤田尚史・阿部 修, 2001: 2001 年 1 月と 3 月に東北地方に降った「赤い雪」の特徴. 寒地技術論文報告集, **17**, 310-316.

Haze deposition observed on snow surface in Ohkura village, Yamagata prefecture, on February 3, 2009

Osamu ABE¹⁾ and Fumitaka YANAGISAWA²⁾

*1) Shinjo Branch, Snow and Ice Research Center, National
Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention
1400 Tokamachi, Shinjo 996-0091*

*2) Faculty of Science, Yamagata University
1-4-12 Kojirakawa, Yamagata, 990-8560*

Abstract: A snow surface covered by some black impurities was accidentally found in Ohkura village, Yamagata prefecture, on February 3, 2009. However, on the same day, such a surface was not observed in Shinjo city, which is located toward the north of Ohkura village. To investigate this event, the top layer of the snow cover was sampled on the next day at 11 points along a route from Ohkura village to Shinjo city. Each snow sample was immediately melted, and the melt water was analyzed to measure pH, electrical conductivity (EC), and solid particle concentration. Lower pH and higher EC were observed at three points, and denser solid particle concentration was observed at five points including points located at a latitude higher than the three points, which are located toward the southern part of 38.7°N. Two days before this event (February 1, 2009), a satellite image revealed the presence of a big aerosol parcel over the Sea of Japan, and in the morning of February 3, 2009, a cold front passed over Yamagata prefecture. At the same time, high photochemical oxidant concentration was observed at several monitoring stations around the areas where the impurities were found. Consequently, we assume that this event was related to the air parcel containing pollutants that originated from continental Asia.

(2009 年 6 月 26 日受付, 2009 年 9 月 25 日改稿受付, 2009 年 11 月 2 日再改稿受付,
2009 年 11 月 8 日受理, 討論期限 2010 年 7 月 15 日)