

豊かな恵みと大気汚染物質を運ぶ北西季節風

佐瀬 裕之

（アジア大気汚染研究センター）

日本では、冬になると北風が吹いてきます。日本の北西方向、ユーラシア大陸のシベリアから吹き付ける冬季の季節風は、私たちに豊かな恵みをもたらす一方で、大陸で発生した大気汚染物質を運んできます。その様子が、複数の元素の同位体を測定することで、より詳しく分かってきましたので、ここでご紹介します。

1. 米どころ新潟

私が働くアジア大気汚染研究センター（ACAP）は、新潟県新潟市に所在しています。新潟県は、豪雪と美味しいお米で有名ですが、それらは密接に関係しています。肥沃な大地や気候条件はもちろんですが、豊富な雪解け水が美味しいお米に大きく貢献していると言われています。では、その雪はどこから来るのでしょうか？

雪は、冬の北風によってもたらされます（図1）。シベリアから吹き付ける冬季の季節風は、最初は寒冷で乾いています。ところが日本と大陸の間には暖流の対馬海流が流れる日本海があるため、冷たく乾いた風が吹くと暖かい日本海から水蒸気が空に昇っていきます。このように日本海から供給された水蒸気を蓄えた季節風が雲となり、日本列島の山脈に向かって吹き付けることによって、山

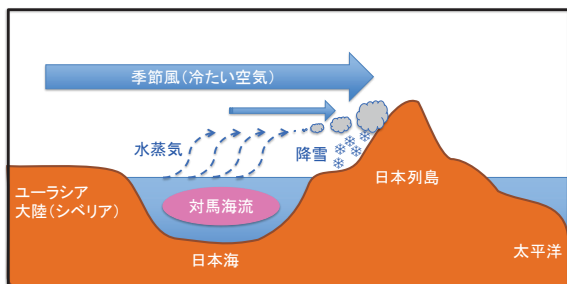


図1. 日本海側に雪が降る仕組み（十日町市のホームページを参考に筆者が作図）

脈の日本海側に大雪をもたらします。豪雪で有名な十日町市のホームページに分かりやすく解説されていますので、こちらをご参照ください。

<http://www.city.tokamachi.lg.jp/yukiguni/Y004/index.html>

このように、冬季に北西季節風が吹くことが、日本海側での豪雪やその豊富な雪解け水による美味しいお米を生み出すのです。ここで覚えておいていただきたい点が2つあります。

- ・冬の季節風はユーラシア大陸からやってくる。
- ・雪となる水蒸気は日本海から供給される。

2. 日本海を越えて運ばれてくる大気汚染

越境大気汚染という言葉聞いたことがあるでしょうか？周辺諸国から国境を越えて運ばれてくる大気汚染のことです。一時期、中国のPM2.5¹⁾の濃度が著しく高くなり、日本にも影響しているとの報道があったことを覚えている方もいると思います。日本では、中緯度地域で年間を通して西側から偏西風が吹いています。その上、冬季には上述した北西季節風も吹くため、大陸から物質が運ばれてくることは容易に想像が付きまします。そのため、日本では、色々なアプローチで調査・研究が行われ、越境大気汚染を示す結果が得られてきました。例えば、環境省では全国20地点以上で降水の化学特性を測定していますが、そこに含まれる非海塩性の硫酸イオン²⁾は、山陰や本州中北部の日本海側で、冬季にその濃度や量が多くなることが報告されています（環境省2019）。また、コンピュータを用いたシミュレーション・モデルでは、大陸で発生した大気汚染が日本列島に輸送

される現象が再現されています。

このように、大陸からの越境大気汚染は確かにあるようなのですが、今、ここに降る雨に越境してきた大気汚染物質がどのくらい含まれているかを知ることはなかなか難しいものです。例えば冬季に高濃度の硫酸イオンが検出されても、どこ産であるという「しるし」がついている訳ではないので、物証という意味では弱いのです。じゃあ、その「しるし」を見つけられないかということで、同位体測定を活用するというアイデアが出てきました。

3. 越境大気汚染のしるし

環境省のモニタリングや私たちの研究サイト等で得られた試料を使って、その「しるし」を見つけることにしました。すでにイオン濃度など基本的なデータが得られているため、同位体測定を取り入れることによって、新しい視点が得られやすいという利点もありました。

まずは、硫黄（S）の同位体を測定することにしました。原子番号16番の元素である硫黄の原子量は32.065です。主成分（95.02%）である質量数が32のものに加え、質量数が異なる34（4.21%）、33（0.75%）、36（0.02%）などの安定同位体があります（これらはそれぞれ、 ^{32}S 、 ^{34}S 、 ^{33}S 、 ^{36}S と表記されます）。そのうち、存在比率が多い、 ^{32}S と ^{34}S の割合が指標として用いられています。硫黄の場合は、 ^{32}S に対する ^{34}S の割合を、標準物質であるキャニオン・ディアブロ隕石に含まれる鉄の硫化鉱物（Canyon Diablo Troilite, CDT: FeS）中の存在割合と比較して、 $\delta^{34}\text{S}$ として千分率（‰、パーミル）で表しています³⁾。 $\delta^{34}\text{S}$ 値は、燃料となる石炭や石油の産地によって異なるため、降水中に含まれる硫酸イオンの起源（発生源）を推定するために有効であると考えられています。また、降水と河川・湖沼水の $\delta^{34}\text{S}$ 値を比較することにより、生態系内での循環・蓄積、大気以外の地質などからの影響などについて、情報を得ることも可能となります。

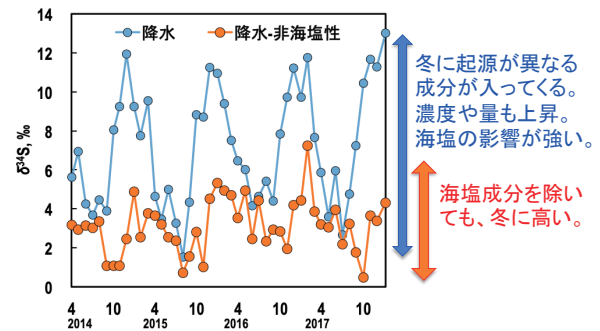


図2. 加治川試験地（新発田市）での硫黄同位体比の季節変化

新潟県の森林地域の降水に含まれる硫酸イオンの $\delta^{34}\text{S}$ 値は、大きな季節変動を示し、冬季に北西季節風が吹く時期には、濃度や量とともに上昇しました（図2）。北西季節風によって、夏季とは起源が異なる硫酸イオンが入ってきていると考えられます。季節風によって日本海を越えてもたらされる雨や雪には、海塩成分が多く含まれ、その硫酸イオンの $\delta^{34}\text{S}$ 値は、+20.3‰という非常に高い値を持っています。これが冬季に $\delta^{34}\text{S}$ 値が上昇する原因の一つですが、その影響を除いた非海塩性の成分の $\delta^{34}\text{S}$ 値を算出しても、やはり夏季よりも高い値が見られます。海塩由来だけでなく、化石燃料等の燃焼に由来する硫酸イオンが、季節風によって日本海の向こうから運ばれてくることが分かりました。中国で燃料として利用されている石炭は、日本で主に使われている中東地域の石油よりも $\delta^{34}\text{S}$ 値が高いことから、その起源として有力であると考えられました。それらに由来する $\delta^{34}\text{S}$ 値は、平均的には、それぞれ+6.6‰と-2.7‰程度と考えられています。これらの同位体比と硫酸イオンの量を考慮したバランス計算によると、新潟のこの森林地域では、海塩由来、越境大気汚染由来、国内発生源由来の寄与は、それぞれ22%、48%、30%程度であると推計されています（Inomata et al. 2019）。この地域の降水に含まれる硫酸イオンの約半分が越境大気汚染由来でした。

4. 北西季節風の二面性

最初に述べたように、豊富な雪解け水が米どころ新潟を支えています。そして、その雪は、冬季の北西季節風によって、日本海から蒸発した水蒸気に由来するものです。これも同位体測定で「しるし」を見つけることができます。ここでは詳しく述べませんが、降水 (H_2O) の水素 (H) と酸素 (O) の安定同位体比を測ると、冬季に得られる降水 (雪) の同位体比は、確かに夏季の降水とは大きく異なっていて、違う起源の水蒸気による雨であることが分かります。そして、河川水にも、その冬季の降水の影響が大きく残っているようです。

このように、冬季の北西季節風は、厳しい冬ではありますが、日本海側に雪解け水とそれを用いた美味しいお米という豊かな恵みをもたらしています。一方で、その季節風によって、越境大気汚染という、招かれざる客も運ばれてきます。このような、冬季の北西季節風の二面性が、硫黄と水の酸素・水素の同位体を測定することによって、より詳しく分かりました。

5. おわりに

現在、私たちは、有害な重金属である鉛 (Pb) や黄砂の指標となるストロンチウム (Sr) の同位体も同時に測定し、日本周辺の大気汚染の状況やその生態系内での役割について、より詳しく知ろうとしています。既存のモニタリング試料に、複数の同位体測定を取り入れていくというのは、新しい試みであり、私たちをより広い世界に案内してくれるものと思います。近年、中国における大気汚染物質の発生量は減少に転じたと言われていいます。今後は、大気環境の改善や、それに伴う生態系の応答 (回復?) も見られる可能性があります。その時に、単に量的な変化でなく、確かに中身が変わりつつあるということについて、同位体測定は確かな「しるし」を示してくれると期待できます。

なお、上記の結果は、EANET ネットワークセンター研究及び環境省越境大気汚染・酸性雨長期モニタリングの一環として行われたものであり、以下の同僚たちの努力の賜物です：大泉毅、猪股弥生 (現：金沢大学)、齋藤辰善 (現：新潟県)、高橋雅昭、諸橋将雪、山下尚之 (現：森林総合研究所) (敬称略)。

注釈

- 1) 大気中に浮遊している $2.5 \mu m$ 以下の小さな粒子：微小粒子状物質
- 2) 降水に含まれる硫酸イオン (SO_4^{2-}) のうち、海塩に由来する成分を差し引いた、化石燃料等の燃焼により発生した SO_2 に由来すると考えられる成分。いわゆる酸性雨の主成分の一つ。
- 3) 安定同位体比は、直接比率を表すのではなく、標準となる物質に存在する安定同位体の割合と試料中に存在する安定同位体の割合を比較して、標準物質からどの程度ずれているかをデルタ (δ) 値として、千分率 (‰, パーミル) で表されることが多い。

文献

Inomata Y, Ohizumi T, Saito T, Morohashi M, Yamashita N, Takahashi M, Sase H, Takahashi K, Kaneyasu N, Fujihara M, Iwasaki A, Nakagomi K, Shiroma T, Yamaguchi T. (2019) Estimate of transboundary transported anthropogenic sulfate deposition in Japan by using the sulfur isotopic ratio. *Science of the Total Environment*, 691: 779-788.

十日町市役所 (2016) 「雪がふるしくみ」, 雪国とおかまち, 十日町市ホームページ
<http://www.city.tokamachi.lg.jp/yukiguni/Y004/index.html>

環境省 (2019) 越境大気汚染・酸性雨長期モニタリング報告書 (平成 25 ~ 29 年度)

著者情報



佐瀬裕之 一般財団法人日本環境衛生センター アジア大気汚染研究センター生態影響研究部長。1965年生まれ。千葉大学大学院博士課程修了、博士（学術）。東アジア13カ国による東アジア酸性雨モニタリングネットワーク（EANET）のネットワークセンターとして設立された酸性雨研究センター（現：アジア大気汚染研究センター）に1998年に入所、2010年より現職。

（2020年3月31日掲載）
（2020年4月7日改版）