

とやまと自然

第36巻冬の号

No.144 2013

富山に^ふ降る雨や雪の^{すいしつ}水質研究をふりかえる
—^{ないりくこうか}内陸効果と^{こうどこうか}高度効果—

朴木 英治



■科学博物館屋上から見た立山連峰^{れんぽう}

カメラを向けた方向は冬の季節風の風下方向にあたります。中央に立山有料道路^{せっち}が設置されているなだらかな斜面^{しゃめん}の弥陀ヶ原^{みだがはら}台地が見えます。館の屋上には酸性雨観測器^{さんせいうかんそく}を設置しており、ここでの観測値^ちを基準^{きじゆん}にして他の場所と観測値^{ちが}の違いを調べます。

富山に降る雨や雪の水質研究をふりかえる

—内陸効果と高度効果—

朴木英治（富山市科学博物館 化学担当）

1. はじめに

科学博物館の前身の科学文化センターを開設する準備事務局に採用され、学芸員が行うさまざまな仕事の一つとして富山の水の水質に関する研究を開始しました。最初は呉羽丘陵の谷水や川の水、雨や雪の水質などいろいろ調べてみました。その結果として、富山を流れる水の出発点である雨や雪の水質に関する研究を行うことにしました。

テーマの一つは、雨や雪に含まれる塩分の濃度に見られる内陸効果や高度効果の調査です。内陸効果とは、陸地に降る雨や雪の塩分濃度が海から離れるにつれて低くなる現象です。高度効果とは、立山などの高山で標高が高くなるにつれて雨や雪の塩分濃度が低くなる現象です。これは富山の河川水質に直接関わる現象です。

研究を進めると、アジア大陸から運ばれてきた酸性雨の原因物質にも内陸効果や高度効果が見られることが分かってきました。酸性雨の原因物質の影響を調べることも、もう一つの大きなテーマとなりました。

これまでの研究をふりかえりながら、富山の雨や雪の塩分濃度などに見られる内陸効果や高度効果について紹介します。

2. 季節による雨や雪に含まれる塩分の濃度変化

1987年～89年に館の屋上でバケツを使って雨や雪を連続的に採取し、月単位で雨・雪の水

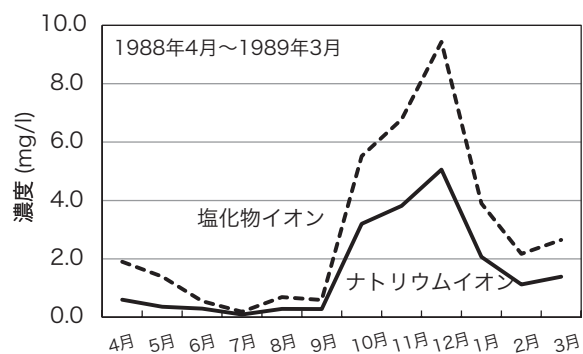


図1 降水中のナトリウムイオン濃度と塩化物イオン濃度の月別変化

質変化を調べたのが本格的な降水研究の始まりです。

図1は科学文化センター研究報告書第13号(1990年)に掲載したデータから作成したグラフです。雨や雪には海から運ばれてきた塩分(主にナトリウムイオンと塩化物イオン)が含まれています。その濃度には夏に低く、冬に高くなる季節変化があり、4月から9月までを夏、10月から翌年3月までを冬としてそれぞれの平均濃度を比較すると、夏にくらべて冬の期間は、ナトリウムイオンでは9.3倍、塩化物イオンは6倍も高くなることがわかりました。

1988年からは一週間に1回程度の頻度で容器にたまった雨を回収して分析しました。この観測で気がついたことは、秋から冬の期間、上空に強い寒気が来ると雨や雪の塩分濃度が高くなるという現象でした。また、上空の寒気の温度が同程度の場合、雪が多く積もる1月・2月よりも11月・12月の方が雨や雪の中の塩分濃度が高くなることがわかりました。図1でも12月の濃度が最も高くなっています。これは寒気の温度だけでなく海水温も関係するのだろうと考えました。

そこで、雨や雪が降っていた日について、海水温と上空の気温の差と、雨や雪のナトリウムイオン濃度を対比させてみました。海水温は舞鶴海洋気象台が日本海ブイロボットで観測していた値を、上空の気温は輪島上空850hPaの位

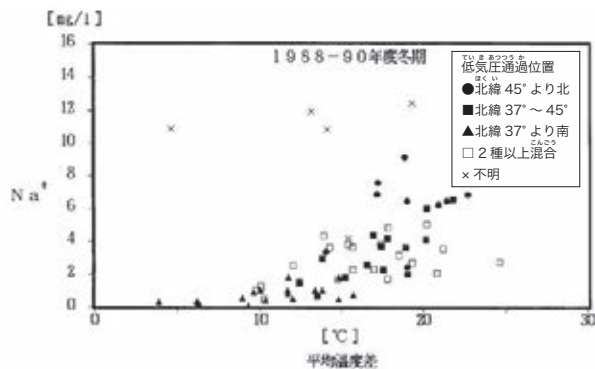


図2 降水時の日本海の海水温と輪島上空850hPaの気温との差に対するナトリウムイオンの濃度

置での観測値を使いました。すると、この温度差が大きいほどナトリウムイオン濃度が高くなることが分かりました。図2は科学文化センター研究報告書第16号(1993年)に載せた解析グラフです。プロットの種類は低気圧が通過した位置によってグループ分けしたもので、特に、■のプロットは低気圧が北緯37°～45°を通過し、明確に冬型の気圧配置になった時のものです。■のプロットについて上空の寒気と海水の温度差とナトリウムイオン濃度の間で回帰式を計算すると、

$$\text{ナトリウムイオン濃度} = 0.433 \times \text{温度差} - 4.073$$

となりました。この回帰式からナトリウムイオン濃度が0になる温度差を計算すると9.4℃になります。この温度差の意味ですが、気圧850hPaの位置は高度1,500m程度の所で、上空に100m昇る毎に気温が0.6℃低下するとすれば、高度1,500mの気温は海面上よりも9℃低いことになります。つまり、上空の寒気と海水温との温度差が9.4℃の場合、海水温と海面上の気温がほぼ同じであることを意味しています。温度差が9.4℃よりも大きくなると、海水温と海面上の気温との間の温度差も大きくなり、降水中の塩分濃度も高まることになります。富山の冬に降る雨や雪の塩分濃度に上空の気温や日本海の海水温などの気象の要素が関わっていることはたいへんおもしろい現象です。上記の回帰式を使うと、過去の冬の雨や雪の塩分濃度を、当時の上空の寒気の温度と海水温の記録から計算できます。

3. 海岸線からの距離による水質変化(内陸効果)

内陸効果を調べるなら、雨や雪の塩分濃度が高くなる冬に調べると分かりやすくなるはずで、1994年にイオンクロマトグラフという酸性雨研究で使用される高性能な分析機を手に入れ、内陸効果の調査を1995年の冬から開始し2002年の春まで行いました。

3.1 平野部での内陸効果

調査にあたっての問題は、富山市から見た場合、内陸効果の起点となる海岸線は、すぐ近くにある富山湾の海岸線なのか、それとも北西方



図3 調査で大活躍のイオンクロマトグラフ

試料を注入して22分後には、陽イオン成分(5成分)と陰イオン成分(4成分)の分析が完了する便利な分析機です。導入して20年目の現在も手入れしながら使用しています。

向の石川県羽咋市あたりの海岸線なのかということでした。雨や雪が雲の底を抜けて地上に落ちてくる間に塩分を捕まえる場合は富山湾の海岸線となりますが、雲の中で起きている雪の成長やアラレの形成によって雪やアラレが雲の中の塩分を集める場合は、石川県羽咋市の海岸線になります。

この研究ではアジア大陸起源の酸性物質にも内陸効果があるのかどうかということも合わせて調べるため、石川県羽咋市の海岸線を起点と考え、海岸線から内陸に向かって季節風の風向に沿って数カ所から10カ所程度で新雪のみを集めました。

富山で雪が降る時は、寒冷前線や低気圧の通過後に寒気が来て冬型の気圧配置になる場合が多いようです。前線や低気圧の通過の際には比較的気温が高く、雨が降る場合が多く、寒気ややって来て雪に変わります。もともとあった積雪は最初の雨でザラメ雪に変わります。このザラメ雪の上に積もった新雪だけを集めることで、アジア大陸起源の酸性物質や海水起源の塩分の内陸効果の様子をより正確に調べることができます。

新雪調査は1995年～2001年まで6年間続け、50回以上も羽咋市に行きました。しかし、羽咋市内は富山県内と比べて暖かく、氷見市と



図4a 新雪採取地点。調査地点図の各ボックスは10km × 10km。

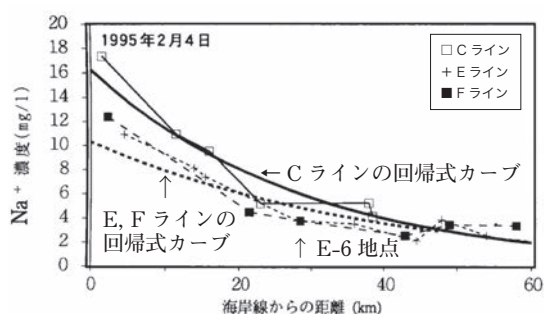


図4b 海岸線からの距離に対する新雪中のナトリウムイオン濃度

羽咋市の境界の峠道を羽咋市側に下ると積雪がなくなってしまうことが多くありました。このため、羽咋市の海岸線から富山市まで連続して積雪試料が得られたのは通った回数の1/3程度でした。図4abは科学文化センター研究報告第19号（1996年）に載せた調査地点と解析図で、1995年2月4日に集めた試料のデータです。採取地点とその北西方向の石川県の海岸線までの距離が大きくなるほど塩分（ナトリウムイオン）の濃度が低下していることが分かります。また、海岸線からの距離に対する濃度の低下の様子は場所やそのときの気象によって異なるようですが、20km～33km離れる毎に塩分の濃度が1/2になることが分かりました。

ところで、図4aのE-6の調査地点は富山新港の近くで、富山湾に非常に近いのですが、氷見市の観測点よりも濃度は下がっています。Eのライン全体で見ると、羽咋市で濃度が高く富山市に向けて濃度が低下する内陸効果がきれいに見えます。富山県内では冬型気圧配置になると上空では北西の風が吹いていても平野部では南よりの風となり、陸から富山湾に向かって風

が吹くことになります。このため、富山湾で海が荒れたとしても、波しぶきは沖に運ばれ、陸上には富山湾起源の塩分の影響が出ないのです。これは富山の自然のたいへん不思議でおもしろい点です。

同じ試料のデータを使って、アジア大陸から季節風に乗って運ばれてきた酸性雨の原因成分の内陸効果を調べたところ、海岸線からの距離に対する濃度の減少率は塩分と全く同じであることが分かりました。これらの結果から、富山県内では北西季節風の風上側に位置する石川県と比べると、富山湾に面しているけれども内陸的で、塩分と同様、アジア大陸の酸性物質の影響も弱まることが分かりました。

3.2 高山域を含む内陸効果

冬の季節風によって雨や雪と共に運ばれてくる塩分やアジアから運ばれてきた酸性物質の濃度が、立山を越えるときにどのように変わるのかを調べることは、常願寺川など、立山を源流域とする河川の源流の水質を考える上でも参考になります。

しかし、立山は冬の期間に雪の採取に行くことができないので、いくつかの試料を組み合わせ考えてみました。

この解析には1999年12月1日から2000年3月17日までの雨や雪の試料を使いました。試料を採取するため、羽咋市柴垣海岸から富山市までは、主に図4aのEのライン上のいろいろな施設に観測器を置かせてもらい、定期的に試料を集めました。立山山麓には、当時、環境省の観測施設があったのでそのデータを利用しました。室堂平では富山大学元教授の川田先生（雪氷学）とその学生さんや立山カルデラ砂防博物館の飯田さんに、春先の積雪を表面から最下層まで、8m以上あるボーリングコアとして掘り出してもらい、これを使って解析しました。立山の向こう側の雪は、大町エネルギー博物館にお願いして観測器を置かせてもらい、月に1度回収に行きました。このようにすることで、羽咋市の海岸線から富山平野をわたり、富山市の風下側の立山・後立山連峰を越えた大町市まで、距離にして110km程の区間で、10kmから20km間隔で試料を集めることができました。

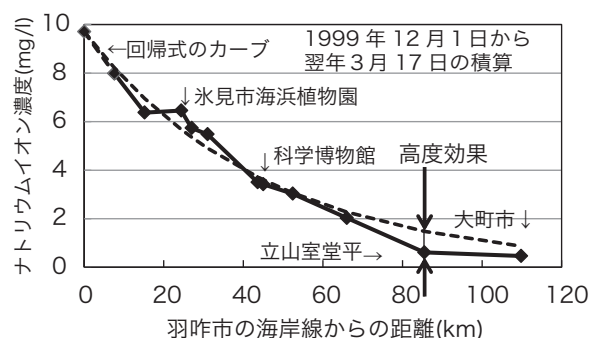


図5 羽咋市の海岸線からの距離に対する雨や雪の中のナトリウムイオン濃度

これらの観測から作成した、期間中の雨と雪すべてを合わせた試料中のナトリウムイオン濃度の、海岸線からの距離に対する変化が図5です。図中の点線は、平野部での観測値から求めた、海岸線からの距離に対するナトリウムイオン濃度の回帰式のカーブを示したものです。羽咋市柴垣の海岸線近くに置いた観測器には波しぶきが入り、測定されたナトリウムイオンの濃度は予想された値の数倍以上にもなったため、羽咋市の値はグラフに示してありません。これに対し、氷見市海浜植物園もすぐ近くに島尾海岸がありますが、冬に吹く地上の南寄りの風のおかげで、一冬とおしての観測でも富山湾から来る塩分の影響は小さいことが分かりました。

図5を見ると、平野部での観測値は回帰式のカーブとかなり似た値を示しています。これに対して、室堂平では回帰式と比べて濃度がかなり低くなることがわかりました。

この現象は、標高が高くなるにつれて塩分などの濃度が低くなる高度効果によるものです。しかし、立山の向こう側の大町市では、室堂平と比べると標高が低くなり、雨や雪の中の塩分濃度は回帰式に近い値になっていました。

3.3 塩分濃度に季節変化が現れる理由

2章で、富山の雨や雪の中の塩分濃度は夏に低く、冬に高くなる現象を紹介しましたが、この原因を内陸効果で説明することができます。

図5から、富山市で塩分濃度が高くなる冬の雨や雪でも、海岸線から風下側に100km以上も離れた大町市では、塩分濃度は海岸線での濃度の1/10以下になってしまいます。

富山では、夏の雨の場合、日本の南の太平洋

から大気と水蒸気^{すいじょうき}がやってくるので、塩分が運ばれてくる海岸線は富山から遠く離れた太平洋側の海岸になります。このため、内陸効果が大きく現れて雨の塩分濃度が低くなると考えることができます。一方で冬の雨や雪の場合、海岸線は3章で考えたように富山市から少し離れていますが、太平洋の海岸線よりは近い石川県の海岸と考えることができるので、夏と比べて冬の雨や雪の塩分濃度は高くなります。

このように、富山に降る雨や雪に見られる塩分濃度の季節変化には、季節による上空の風向^{ちが}の違いが関わっていると考えられます。この現象は富山に限らず、日本海側の地域^{かき}に共通した特徴のように思われます。

なお、富山の内陸効果を中心とした海塩輸送と谷水や河川水の塩化物イオン濃度^{かん}との関係については、とやまと自然第33巻秋の号(2010年)に詳しく書いてあります。

4. 標高による雨や雪の水質変化(高度効果)

図5のグラフの作成に合わせて、アジア大陸から運ばれてきた酸性物質について同様のグラフを作ってみたところ、酸性雨の成分にも高度効果が見られましたが、塩分ほどは濃度が下がらないことが分かりました。また、2001年の8月から10月頃まで、室堂平の立山自然保護センターの当時の所長の加藤さんから施設で採取された雨をいただき、分析したところ、いろいろな成分の濃度は低いにもかかわらず酸性雨の原因成分の一つの硫酸イオン^{りゅうさん}の濃度は比較的高いことが分かり、なぜ違うのかを調べたいと考えました。



図6 室堂平に設置している酸性雨の観測器(手前)と霧観測器(奥)

2003 年から、富山県立大学に赴任された渡辺さん（現在は環境工学科教授）と共に、立山を利用した高度効果に関する調査を始めました。

図 6 は、標高が最も高い観測点の室堂平に設置させてもらっている酸性雨観測器と霧観測器の様子です。現在、酸性雨の観測器は、立山有料道路の入り口ゲートの桂台（標高 668m）から室堂平（標高 2,450m）まで 10 カ所に設置させてもらい、各観測器の標高差は 140m から 300m になるようにしてあります。観測は許可を得てから始めます。7 月上旬から雪が降る直前頃まで観測します。気温が平地よりも 15℃ 低い室堂平では 10 月上旬には機材を撤収します。10 月下旬以降、標高 1,930m の弥陀ヶ原の観測器の撤収から始まり、順に標高の低い方に向かって機材を撤収し、11 月中旬には観測を終了します。

4.1 降水量にみられる高度効果

図 7 は 2011 年の観測結果です。これは、科学博物館研究報告書 36 号（2012 年）に掲載した観測点標高に対する降水量のグラフです。縦軸が観測点の標高を示し、横軸が降水量を示します。図 7 のグラフでは、富山市内（科学博物館、標高 13m）で降水量が少なく、立山では多くなります。しかも、立山では標高が高くなるほど降水量が多くなっていきます。このようなパターンのグラフは立山の観測ではよく見られます。この年の観測では、室堂平の降水量は富山市内の 2 倍から 4 倍にもなりました。また、月別に比べると 8 月は 10 月の 2 倍程度の降水量がありました。各観測点に設置した雨量計の記録を比較すると、まとまった雨が降る場合、富

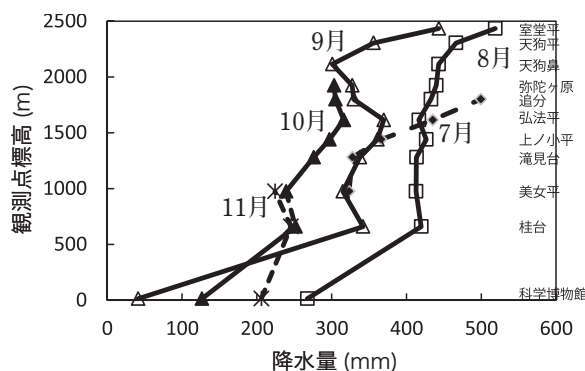


図 7 富山市と立山の降水量変化

山市内から室堂平まで、多少の時間のズレはありますが、ほぼ同じ時間帯に雨が降っており、標高が高くなるほど降水量が多くなるのは、1 時間に降る雨の量が多くなるためです。なお、標高が高くなるにつれて降水量が多くなる現象も高度効果と呼ばれています。これは山の斜面を大気が昇るときに雲が発達するためと考えられています。

4.2 海塩成分の高度効果

図 8 は図 7 と同様、2011 年の観測結果をもとに作成した観測点標高に対する雨の中の海塩成分のナトリウムイオンの濃度です。雨の中のナトリウムイオンの濃度は、降水量のグラフとは反対に、降水量が少ない平野でかなり高く、降水量が多い立山で低くなります。しかも、立山では標高が高い場所ほど濃度が低くなります。

雨の中の成分濃度に見られる高度効果は、標高が高くなって降水量が増えることによる希釈効果により濃度が低くなると言われています。図 7 と図 8 を比較すると、確かに、どの月も、立山では観測点の標高が高くなると降水量が増え、ナトリウムイオン濃度は低下します。これは、一般的な高度効果の説明に合っているようにも見えます。しかし、8 月と 9 月を比べると、標高 2,000m 以下の観測点での濃度はかなり違うのに、標高 2,000m 以上の観測点ではほぼ同です。他の年の観測でも標高が 2000m をこえる観測点では、月ごとの違いが少なくなるので不思議に思っています。この原因についてはまだ仮説の段階ですが、海塩の粒子は比較的大きいため、日本周辺の海から上空に昇ったものは、高度 2,000m ぐらいのところまで存在し、

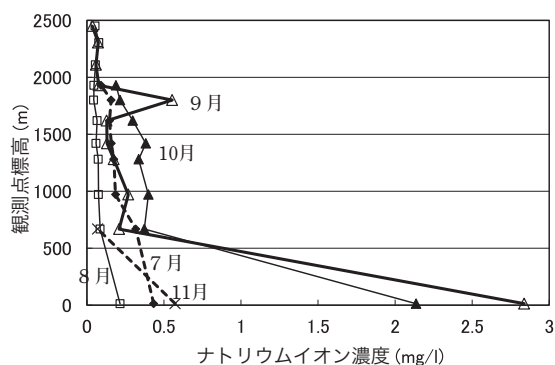


図 8 富山市と立山の雨の中のナトリウムイオン濃度

標高 2,000m 以上の観測点の雨に含まれる塩分は、別の仕組みでもっと上空まで昇った海塩ではないかと考えています。

4.3 酸性雨の原因物質の高度効果

酸性雨に関係する硫酸イオンを非海塩性硫酸イオンと呼びます。硫酸イオンは海水中にも含まれますが、海起源のものは酸性雨の効果に影響がないため、硫酸イオンの分析値から海起源の分を差し引いて求めます。酸性雨に関係する硫酸イオンの起源として、人間活動が起源のものでは、国内の火力発電所や工場、中国を中心としたアジア大陸から運ばれてきたものが、自然起源のものでは火山の噴気や海洋の微生物が作る硫黄を含んだ物質を起源とするものがあります。

図9は2011年の観測データから作成した非海塩性硫酸イオンの高度効果を示すグラフです。観測点の標高が高くなるにつれて降水量は大きく増えているのに、非海塩性硫酸イオンの濃度はそれほど低くなりません。8月の場合、降水量は標高 1,500m 以上でやや大きく増えているのに、非海塩性硫酸イオンの濃度も上がっています。非海塩性硫酸イオンの場合、高度効果の一般的な説明が当てはまらないようです。

さて、グラフを月別に比べると、8月の非海塩性硫酸イオン濃度は、他の月と比べて高くなっています。夏の場合、雨が降る時にはたいへい太平洋から大気がきます。しかし、上空の大気の動きを調べてみると2011年の8月にはアジア大陸から大気がやってきていたようです。これに対して、9月の雨では、太平洋から大気がやって来ていたようで、非海塩性硫酸イオン濃度は低くなっています。

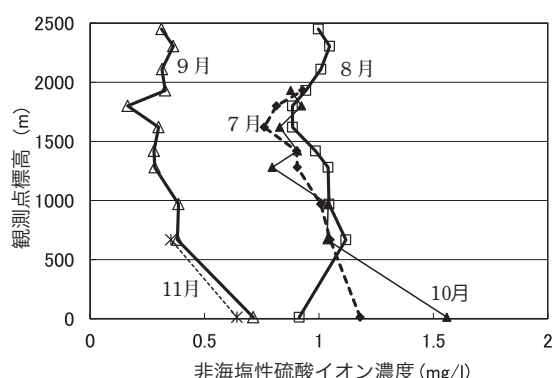


図9 富山市と立山の雨の中の非海塩性硫酸イオン濃度

これまでの観測では、標高が最も高い室堂平での非海塩性硫酸イオンの濃度の大小は、降水量の多い少ないよりも、雨が降っている時の大気が太平洋側から来たものかアジア大陸からきたもので大きく変わるようです。特に、アジア大陸から大気が来ている場合は、室堂平をはじめ、標高の低い観測点や富山市内でも非海塩性硫酸イオンの濃度が高まり、酸性雨も強くなる傾向があります。

4.4 標高が高くなるほど降水量が減る場合はどうか

過去11年間の立山での試料の回収は100回を超えます。そんな試料の中には、同じ時間帯に雨が降っていたにもかかわらず、標高が高くなるほど降水量が減っていく場合もありました。高度効果のこれまでの説明から考えると、このような場合は観測点の標高が高くなるほど様々な成分の濃度が高まるように思えます。しかし、この試料のイオン成分を分析してみると、どの成分にも観測点標高が高くなるにつれて濃度が低下する通常の高度効果が見られました(図10)。念のため、この雨水の水分子の酸素の安定同位体比を富山大学理学部の上田教授に調べてもらいました。その結果、安定同位体比の変化も、やはり通常の高度効果の場合と同様な変化を示しました。このような事例に出会うと、雨の中のイオン成分に高度効果が現れる理由は、降水量の増加による希釈の効果だけではなく、別の理由も考えてみる必要があります。高度効果が起きる仕組みを別の方法で説明するとしたら、雨が降っている時に雨粒が雲の中の物質をどれだけ集めて運んでくるのかを考えれば良いだろうと思っています。この研究は、富

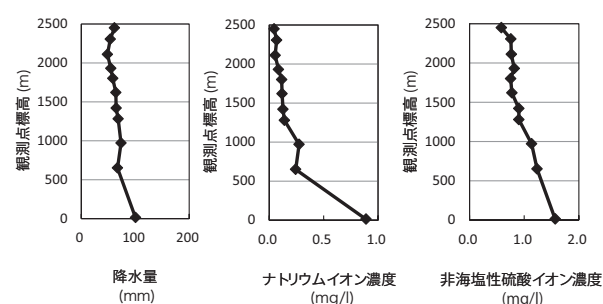


図10 観測点標高が高くなるにつれて降水量が少なくなるときの成分変化(2012年9月18日~27日)

山市上空で酸性雨が作られるメカニズムの解明にもつながると考えています。

4.5 上空大気の観測タワーとしての立山

立山有料道路沿いでは同一の斜面上の標高1,000m～2,450mで10カ所程の観測ができます。このような観測は他ではあまり行われていません。これまでの観測では、標高2,000m以下の場所では、標高が低くなるほど富山平野など地元から発生した酸性雨成分の影響が大きくなることが分かってきました。これに対して標高が2,000mを越える場所では、地上では観測できないアジア大陸から直接運ばれてきた物質の影響が大きく見えるときがあります。高度1,400m～2,000mほどのところに平野の上を覆う大気と上空の大気との境目ができ、この境目の所に雲海ができることがあります(図11)。アジア大陸上空からやってくる大気はこの大気の境目の上側を渡ってくるため、大気の境目の上側に位置することが多い室堂平ではアジア大陸から渡ってきた風が直接吹きます。このような時、室堂平では強い酸性の霧がかかることがあります。また、このような時に雨が降ると、図9でも見られたように、非海塩性硫酸イオン濃度が富山市の市街地まで高くなり、酸性雨も強まります。

さて、立山で雨を調べていて考えることは、標高2,000mを越える場所の雨の中に含まれる各成分の濃度は、より上空の大気中の微粒子の各成分の量に関係しているのではないかということです。両者の間の関係がうまく数式化できると、雨を調べることで上空の大気中の微粒子の存在量が推定できるかもしれません。

また、雨の試料の分析から、地上では黄砂が観測されない夏から秋にかけて、標高1,400m～2,000mの所を黄砂が頻繁に通過し



図11 立山の天狗平付近から見る雲海(遠く島のように見える山は石川県の白山)

ていることが分かってきましたので、立山での黄砂の観測を新たな研究テーマとして行っています。

黄砂を含め、上空の微粒子は酸性雨に直接影響するだけでなく、地上に届く太陽光のエネルギーにも影響するので、雨の観測から上空の微粒子の存在量についても解析できれば、館の研究報告書に毎年報告している立山での酸性雨観測データは地球温暖化の解析にも役立ってくるかもしれません。

5. おわりに

雨や雪の中の塩分濃度のように、不規則に起きているように見える自然現象が一定の法則の下で起き、簡単な数式で表すことができるということが分かり、それに関連して雨や雪について様々な研究を行ってきました。ここで紹介した内陸効果と高度効果は全く違う現象のようにも思えますが、水平方向に見るか垂直方向に見るかの違いだけなので、両者の間には何らかの接点があるはずです。そう考えて、現在解析を進めています。

謝辞

これらの研究には市費の他、文部科学省科学研究費補助金奨励研究B(平成1年、平成6年、平成9年、平成15年)、富山県博物館協会美術館・博物館研究補助金(平成8年、平成17年)、文部科学省科学研究費補助金基盤研究(課題番号18310022、22310022、24501301(各3年間))、および、笹川科学研究助成(研究番号21-811G)を利用しました。

内陸効果の研究では、ビーチ能登、旧グリーンウッド能登、山岸氏(旧押水町)、行忍寺、氷見市海浜植物園、鴨の郷、射水土地改良区、富山市八幡地区センター、富山市三郷地区センター、富山市水道局流杉浄水場、大町エネルギー博物館のお世話になりました。立山での研究では、環境省中部地方環境事務所、環境省立山自然保護官事務所、林野庁富山森林管理署、富山森林管理署立山森林事務所、富山県自然保護課、富山県立山土木事務所、富山県道路公社、富山警察署、立山センター、富山県警山岳警備隊、立山黒部貫光(株)立山運営所・美女平駅、および、室堂平駅、立山貫光ターミナル(株)弥陀ヶ原ホテルの各皆様のお世話になりました。ここに厚くお礼申し上げます。

とやまと自然 第36巻第4号(冬の号)(通算144号)平成26年1月5日発行
発行所 富山市科学博物館 〒939-8084 富山市西中野町一丁目8-31
TEL 076-491-2125 FAX 076-421-5950 URL <http://www.tsm.toyama.toyama.jp/>
発行責任者 南部久男 印刷所 中央印刷株式会社 TEL 076-432-6572
付属施設 富山市天文台 富山市三熊49番地4 TEL 076-434-9098