

黒部川源流域周辺の池塘の水と懸濁粒子の起源

朴木 英治¹⁾, 岩田 朋文²⁾, 藤田 将人²⁾, 吉岡 翼²⁾

¹⁾ 立山環境研究所 930-0952 富山市町村77-27

²⁾ 富山市科学博物館 939-8084 富山市西中野町一丁目8-31

The Origin of Water and Suspended Particles in Water of the Small Pond Called “Chito” Around the Headwaters of the Kurobe River

Hideharu Honoki¹⁾, Tomofumi Iwata²⁾, Masato Fujita²⁾ and Tasuku Yoshioka²⁾

¹⁾ 77-27 Machimura, Toyama 930-0952, Japan

²⁾ Toyama Science Museum, 1-8-31 Nishinakano-machi, Toyama 939-8084, Japan

Water samples were collected on August 26th and 29th, 2022 from the pond called “Chito” near the ridgeline at an altitude of about 2,500 m. This water was considered to be rainwater from ion concentration, pH value and Cl^- / Na^+ ratio of the sample. The concentration of particles suspended in the water of this “Chito” was ten to several tens of times higher than that of particles suspended in the rain falling on Murodo, which is in the same altitude zone. It is considered that the Asian dust was suspended. Therefore, backward trajectory analysis was performed for the airmass that passed over the “Chito”. As a result, from 21:00 on August 25th to 01:00 on August 26th and 15:00 on August 27th to 12:00 on August 28th, the airmass that passed above the “Chito” was coming from the arid regions of the Asian continent. However, this airmass passed through the areas with high human activity before this airmass arrived above the “Chito”, then aeolian dust in this airmass might contain not only the Asian dust but anthropogenic particles such as soot particles and fly ash.

Key words : ion concentration, eolian dust, alpine zone, ridgeline, Asian dust

キーワード : イオン濃度, 風成塵, 高山帯, 稜線, 黄砂

1. はじめに

立山連峰の亜高山帯から高山帯の緩斜面に「池塘」と呼ばれる水深が比較的浅い池が存在している。特に、立山の弥陀ヶ原周辺では、泥炭が形成されている場所の緩斜面に池塘が多く存在している。池塘の水の水質については調査データがほとんどなく、単に降水がたまっただけなのか、地下水が供給されているのかについても不明な点が多い。

富山市科学博物館の令和4年度の富山市山岳域自然調査では、飛騨山脈の稜線上と稜線付近の緩斜面の2か所で池塘の水試料を採取した。その試料を分析したところ、懸濁している粒子の個数が非常に多いことが分かった。

立山で夏期から秋期に行った標高別の酸性雨観測では、立山有料道路沿いに10か所の観測点を設置して観測していた。その際、まれに、特定の観測点で降水試料中に多数の粒子状物質が懸濁し、試料水が淡黄色を呈していた

事例が見られた(朴木・渡辺, 2019)。しかも、この観測点よりも標高が高い観測点と低い観測点では、このような状況が観察されず、夏期にはあまり観測されない黄砂輸送が、特定の標高帯でのみ起きた可能性が考えられた(朴木・渡辺, 2019)。しかし、黄砂輸送が起きた日時の特定ができず、これ以上の検討はできなかった。

今回採取された池塘の水は、前述のとおり、懸濁していた粒子個数が通常の降水と比べて多く、この水の主な起源が降雨であった場合、調査日程から黄砂輸送があった可能性のある日時が特定できる。そこで、この池塘の水のイオン成分濃度の特徴からその起源を検討し、懸濁していた粒子の起源についても検討した。

2. 調査方法

2022年8月26日に飛騨山脈の裏銀座縦走路沿いの烏帽子岳から南沢岳の中間付近で、稜線から東方向に18 mほ

表1 採水した池塘の位置と標高.

地点名	採水日	位置	標高 (m)
池塘1	2022/8/26	36° 29' 01.4"N 137° 39' 08.0"E	2,482
池塘2	2022/8/29	36° 35' 14.2"N 137° 43' 46.4"E	2,400

表2 採水日前後の降雨の状況.

観測地点 月日	白馬 ¹⁾	大町 ¹⁾	室堂 ²⁾
8月25日	29.5	7.5	35
8月26日	6	1.5	4
8月27日	0	0	19
8月28日	0.5	1	3
8月29日	0	0	0

1) 気象庁ホームページ
(<https://www.jma.go.jp/jma/index.html>) より

2) 国土交通省水文・水質データベース
(<http://www1.river.go.jp>) より

ど下った位置にある、池塘1の表面水を容器に採取した。また、2022年8月29日に後立山連峰の縦走路にある種池山荘の西側の稜線上に存在している池塘2についても同様な方法で採水した。それぞれの池塘の位置と標高を表1に示す。

採取した水試料を富山市科学博物館に持ち帰り、pHをガラス電極法で、電気伝導度を導電率計で計測した。

また、水試料の陽イオン成分濃度を島津社製HIC-6Aイオンクロマトグラフで、陰イオン成分濃度をダイオネクス社製IC-2000イオンクロマトグラフで、それぞれ、分析した。さらに、粒径範囲別の粒子個数濃度を液中微粒子計 (HIAC 9704+D) で計測した。

なお、調査地点の気象データがないので、池塘周辺での降雨の状況は不明である。参考データとして、アメダス観測地点である大町、白馬 (気象庁ホームページ) と室堂 (国土交通省水文・水質データベース) における8月25日から29日までの降水量を表2に示した。

池塘1の採水日前日の8月25日は、大町の降水量は少なかったが、白馬、室堂で、それぞれ、29.5 mmと35 mmの降水量があった。26日の降水は、3地点とも、25日の降雨が26日の1~2時まで継続したもので、26日の日中には降雨はなかった。27日は室堂だけ19 mmの降水量が観測された。28日は各地点で3 mm以下の降水量があり、29日は3地点とも降水はなかった (表2)。

表3 池塘の水のイオン成分濃度 (濃度の単位は $\mu\text{mol/L}$) .

	pH	電気伝導度 ($\mu\text{S/cm}$)	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	PO ₄ ³⁻	Cl ⁻ /Na ⁺
池塘1	5.58	2.08	2.69	2.43	1.43	0.66	0.55	2.43	0.96	0.38	0.000	0.91
池塘2	5.39	3.87	4.19	4.86	4.80	2.24	3.28	4.72	1.53	1.57	0.000	1.12
室堂平降水 ²⁾	5.58	4.84	1.81	0.09	14.85	1.04	0.73	2.96	10.96	3.10	-	1.06

1) 加藤 (2021) より。なお、観測期間は2020年6月30日から7月9日

表4 池塘の水に懸濁する粒子の粒径範囲別個数濃度 (単位は 個/ml) .

粒径範囲 (μm)	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0	8.0	10	20	30	40	50	60	80	100	合計
	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0	8.0	10	20	30	40	50	60	80	100	150	
池塘1	6,618	1,611	764	1,820	1,157	616	677	381	536	47	22	9	8	10	7	6	14,288
池塘2	34,702	8,206	3,772	7,357	3,449	1,379	1,085	509	538	57	20	8	1	4	6	1	61,094
室堂平降水 ¹⁾	535	153	63	147	105	51	53	32	42	4	1	1	0	0	0	0	1,188

1) 加藤 (2021) より。なお、観測期間は2020年6月30日から7月9日

3. 結果

3.1. 池塘の水のイオン成分濃度

表3に調査した2つの池塘の水質分析結果を示す。参考値として、標高2,450 mの立山室堂平で2020年6月30日から7月9日にかけて採取された降水の化学成分濃度（加藤, 2021）を示した。

立山での標高別の酸性雨観測では、観測点の標高が高くなるほど降水中のイオン成分濃度が低下する現象がみられる（朴木・渡辺, 2019）。表2の室堂平で採取された降水の電気伝導度は4.84 $\mu\text{s}/\text{cm}$ とかなり低い値であるが、池塘1、池塘2の電気伝導度はさらに低い値であった。また、池塘1、池塘2の各イオン成分濃度も K^+ と NO_3^- を除いて、室堂平の降水中のイオン成分濃度に比較的近い濃度であった（表3）。また、pHの値は弱酸性であった。さらに、 Cl^-/Na^+ 比の値は池塘1が0.91、池塘2が1.12で、標準海水のこの比の値である1.16に近い値であった。室堂平での降水の Cl^-/Na^+ 比の値は1.06であった。

3.2. 池塘の水の粒径範囲別の粒子個数濃度

表4に池塘1および池塘2の水に懸濁していた粒子の粒径範囲別の個数濃度を示す。参考値として、表3に示した室堂平の降水中に懸濁していた粒子の個数濃度を併記した。池塘1、池塘2の水に懸濁していた粒子の総個数は、室堂平の降水中に懸濁していた粒子の総個数の、それぞれ、12.0倍、51.4倍であった。

図1に、表4に示した試料の各粒径範囲における粒子個数の合計粒子個数に対する比率（以下、粒径範囲別の構成比とする）を粒径範囲の中心値に対してプロットした。なお、縦軸の構成比（%）の目盛りは対数目盛で示した。このため、室堂平の粒径50 μm 以上の粒子の個数はいずれも0個/mlで、このグラフではプロットできないことから、この部分の値は省略してある。

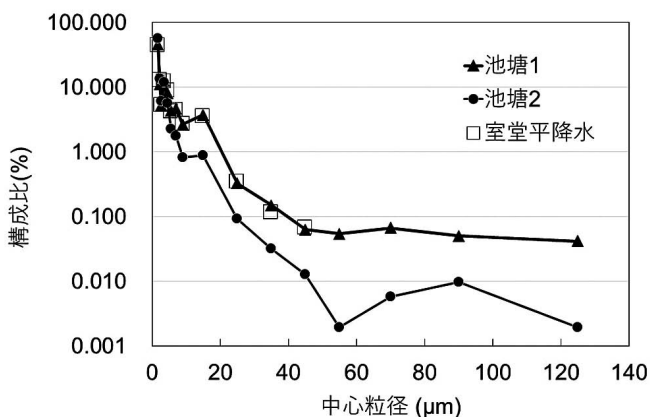


図1 池塘の水と室堂平の降水に懸濁していた粒子の粒径範囲別構成比の変化。

粒径1.5~2.0 μm 粒子の構成比は、池塘1、池塘2、室堂平の降水が、それぞれ、46.3%、56.8%、45.1%で、池塘1と室堂平の降水の構成比の値は非常に近い値であった。このほかの粒径範囲でも池塘1と室堂平の降水の構成比は同様な値であったため、図1では池塘1と室堂平の降水のプロットが重なっている。池塘2は池塘1や室堂平の降水と比べて粒径1.5~2.0 μm 粒子の構成比は大きな値を示し、粒径3.0~4.0 μm 粒子の場合は池塘1や室堂平の降水と同程度の12%台の値になった。しかし、これ以上の大きな粒径範囲では、池塘2の粒子の粒径範囲別構成比の値は、池塘1や室堂平の降水と比べて小さい値を示した。

4. 考察

4.1. 池塘の水の起源

池塘1、池塘2の水の電気伝導度やイオン成分濃度は室堂平で採取した降水と同程度であった。さらに、pHの値も降水と同程度の弱酸性で（表2）、中和作用をほとんど受けていないと考えられた。また、 Cl^-/Na^+ 比の値は標準海水の値（1.16）に近かった。一般に、降水中の塩化物イオンとナトリウムイオンの主な起源は海水と言われており、富山では冬型気圧配置時の降水でナトリウムイオンや塩化物イオンの濃度が高まり、この比の値は海塩の値とほぼ同じになる（朴木, 1990）。しかし、夏期の降水の場合は両者のイオン濃度は低く、ごみ焼却などによって発生する塩化水素の影響を受けることでこの比の値が1.16以上になる場合があるほか（朴木, 1990）、気塊中の化学反応によって塩化物イオンが塩素に酸化されることで塩化物イオン濃度が低下する塩素ロスが起き、この比の値が小さくなる場合もある（朴木英治, 未発表）。一方、地下水では、地下に浸透した降水由来の水が土壌中でカルシウムイオンやナトリウムイオンを溶出するため、 Cl^-/Na^+ 比の値は標準海水の値と比べてかなり小さな値となる。

池塘1、池塘2の水は、溶存しているイオン成分の濃度、pHの値、モル濃度で計算した Cl^-/Na^+ 比の値など、いずれも降水の値に近いことから、どちらの池塘の水も雨水が直接たまっただけか、これに、池塘外に降って土壌による中和作用を受けないまま池塘に流入した雨水が混合したものと考えられた。

4.2. 池塘に粒子を含んだ雨水が流入した日の推定

池塘の水に懸濁していた粒子の特徴を見ると、8月26日に採取した池塘1の水では、懸濁した粒子の粒径範囲別の構成比の値は参考値として示した室堂平での降水のそれらの値とほぼ同じであった（図1）。また、立山で行っ

た標高別の酸性雨観測の多くの観測例で、降水に懸濁している粒子のうち、粒径 $1.5\sim 2\ \mu\text{m}$ 粒子の構成比は40%台であることが多く（朴木英治，未発表），風成塵が捕捉されていると考えられる弥陀ヶ原の泥炭中の無機粒子の粒径 $1.5\sim 2\ \mu\text{m}$ 粒子の構成比の値も同程度であった（朴木・加藤，2021）。

これらの点から考えると、池塘1の水に懸濁していた粒子は降水中に懸濁していた粒子と考えられた。しかも、粒径分布が降水の場合と同じである点から（図1），池塘1の水は雨が降ってからあまり時間が経過しないうちに採水されたものと考えられ、調査日程と気象状況から25日夕方から26日の2時まで降った雨に粒子が懸濁していたものと推定した。

これに対して、8月29日に採取した池塘2の水では、イオン成分濃度などは降水と同等であるが、粒径 $1.5\sim 2.0\ \mu\text{m}$ 粒子の構成比が池塘1や室堂平の降水よりも10%程度大きくなったのに対し、大きな粒子の構成比は、逆に、小さくなった（図1）。この点から考えると、池塘2では雨が降ってから採取までに日数が経過し、粒径の大きな粒子が小さな粒子よりも湖底に早く沈降した結果、小さい粒子の比率が高まったものと考えられた。

池塘2の周辺で雨が降った可能性が高かった日を見ると、西に $12.4\ \text{km}$ ほど離れた室堂平でまとまった降水が観測されていた8月27～28日が候補として考えられた。そこで、この期間に黄砂を含んだ気塊が池塘2の上空を通過したものと推定した。

4.3. 黄砂が輸送された可能性を検討する

黄砂などの鉱物ダストは大気中では凝結核として機能し、海塩や硫酸塩、硝酸塩などの塩類を含むことでこの能力が高まり、生成する雲粒も大きく成長する（松木ほか，2020）ことから、黄砂を含んだ気塊が標高 $2,400\sim 2,500\ \text{m}$ の稜線を通過する際には雲が形成される可能性が高い。雲粒に含まれている黄砂などの鉱物ダストやイオン成分は、雲粒同士が併合・成長して雨滴となるか、落下してきた雨滴と併合することで地表に沈着する。

黄砂は一般には春先に観測されることが多いが、立山有料道路沿いで行った標高別の酸性雨観測においては、夏の時期であっても、今回と同様、降水中の粒子個数濃度が大きく増加する場合は観測されており（朴木・渡辺，2019），黄砂が輸送された可能性があった。しかし、これを確認するための手段の一つとして用いられる後方流跡線解析では、黄砂を輸送してきた気塊が目的地点上空を通過した日時の推定ができないと、作業量が膨大になる。

今回の事例の場合、降雨があった日時を推定できたため、NOAA Air Resources Laboratory が提供してい

るHYSPLIT Trajectory Model (<https://www.ready.noaa.gov/>) を利用して後方流跡線解析を行い、池塘の上空を通過した気塊が、黄砂の発生源であるアジアの乾燥地帯上空を通過してきた履歴があるのかどうかを検討した。池塘上空を通過した気塊が、アジアの乾燥地帯の上空を通過した履歴が全くなければ、黄砂が輸送されてきた可能性は0であり、通過した履歴があれば、黄砂が輸送されてきた可能性が出てくる。

解析は、池塘1の場合、池塘1上空の高度 $2,500\ \text{m}$ 、 $3,000\ \text{m}$ 、 $3,500\ \text{m}$ を通過した気塊が過去144時間前までにアジアの乾燥地帯付近の上空を通過していたかどうかを、2022年8月25日20時から8月26日1時まで、1時間毎に調べた。さらに、池塘1の上空、高度 $4,000\ \text{m}$ 、 $4,500\ \text{m}$ 、 $5,000\ \text{m}$ の場合についても同じ手法で調べた。

解析結果から、8月25日21時から26日1時にかけて池塘1の上空 $3,000\sim 4,500\ \text{m}$ を通過した気塊は8月21～22日にかけてアジアの乾燥地帯付近の上空を通過していたことが分かった。念のため、池塘2の上空についても同じ解析をしたところ、同様な結果が得られた。

次に池塘2について、池塘1の場合と同じ手法で、2022年8月27日12時から28日15時まで、3時間ごとに解析した。その結果、8月27日15時から28日12時にかけて、アジアの乾燥地帯付近の上空を8月22日から25日頃に通過した気塊が、高度 $2,500\ \text{m}$ から $5,000\ \text{m}$ の複数の高度で、通過していたことが分かった。

図2は2022年8月25日14時UTC（23時 JST）に池塘1の上空を通過した気塊の後方流跡線解析結果で、上図が高度 $4,000\ \text{m}$ 、 $4,500\ \text{m}$ 、 $5,000\ \text{m}$ を通過した気塊、下図が高度 $2,500\ \text{m}$ 、 $3,000\ \text{m}$ 、 $3,500\ \text{m}$ を通過した気塊である。また、図3は2022年8月28日0時UTC（9時 JST）に池塘2の上空を通過した気塊の後方流跡線解析結果で、上図、下図の解析高度は図2と同じである。なお、UTCは協定世界時、JSTは日本標準時である。

図2では、池塘1の上空、高度 $3,500\ \text{m}$ を2022年8月25日23時（JST）に通過した気塊は8月21～22日にかけてアジアの乾燥地帯付近の上空を通過していたことが分かった。また、池塘1の上空、 $4,500\ \text{m}$ を2022年8月25日23時（JST）（0時UTC）に通過した気塊は8月20～22日にかけてアジアの乾燥地帯の上空を通過していた。また、高度 $4,000\ \text{m}$ を通過した気塊も、一部、同じ地域を通過していた。

図3では、池塘2の上空を2022年8月28日9時（JST）（0時UTC）に通過した気塊は、高度 $2,500\sim 5,000\ \text{m}$ まで高度差 $500\ \text{m}$ ごとに設定した高度の全ての高度で、アジアの乾燥地帯付近を通過した気塊が通過していたことが分かった。

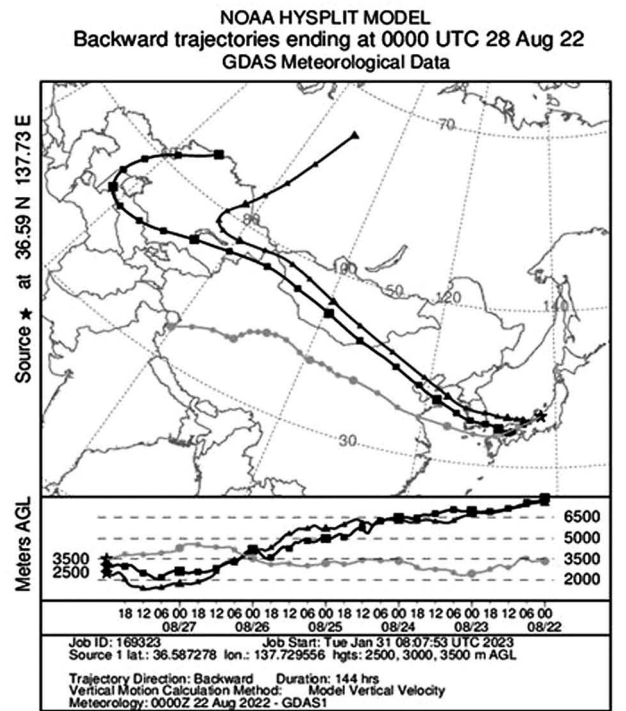
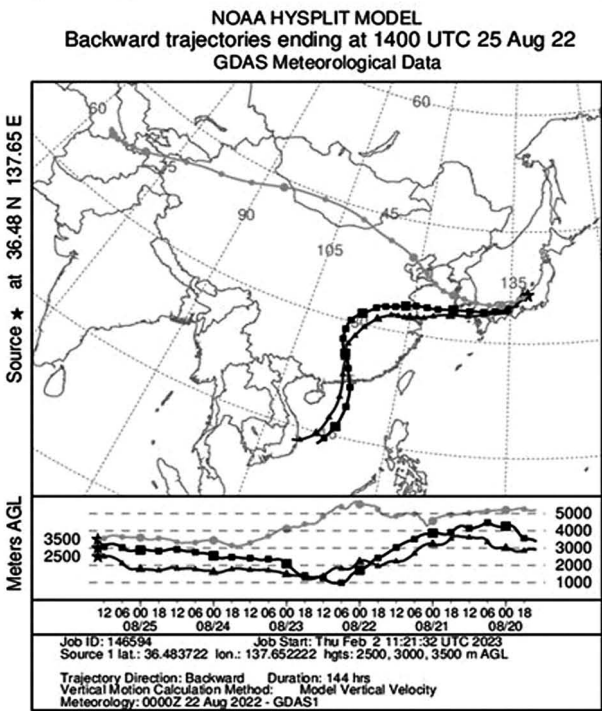
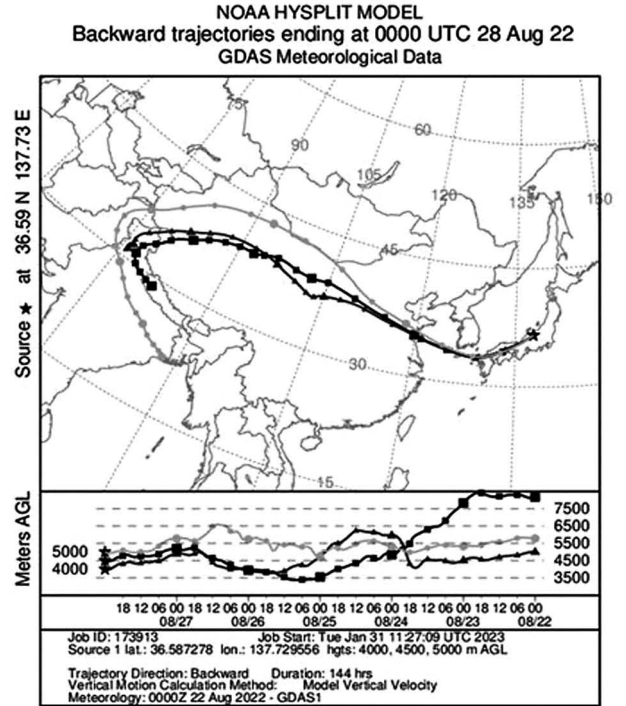
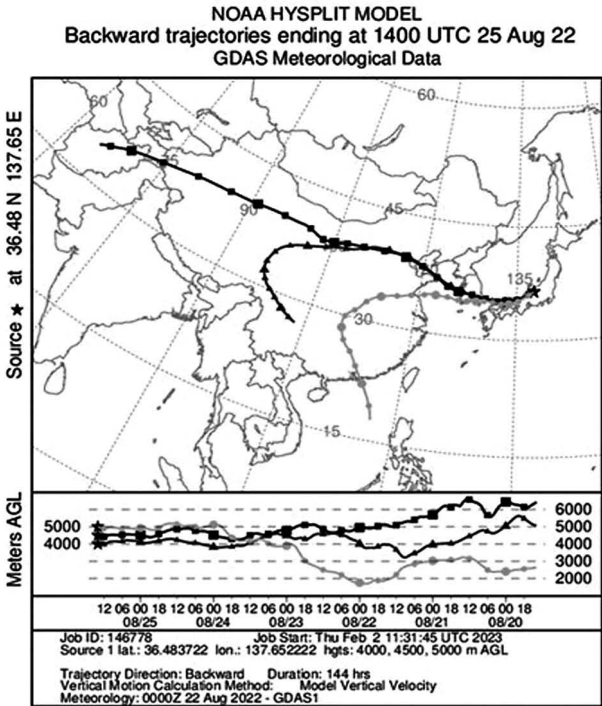


図2 池塘1上空を2022年8月25日14時UTC (23時 JST) に通過した気塊の後方流跡線解析。
上図：高度4,000m, 4,500m, 5,000mを通過。
下図：高度2,500m, 3,000m, 3,500mを通過。

図3 池塘2上空を2022年8月28日0時UTC (9時 JST) に通過した気塊の後方流跡線解析。
上図：高度4,000m, 4,500m, 5,000mを通過。
下図：高度2,500m, 3,000m, 3,500mを通過。

上記の経路をたどってきた気塊には黄砂粒子を含んでいる可能性があるが、これらの流跡線の経路をたどると中国の都市部付近や韓国の上空を通過し、さらに、日本の九州地方から近畿地方の上空を通過して池塘1, 2の上空に到達していることから、上記の気塊が実際に黄砂粒子を輸送していた場合、黄砂粒子以外の土壌粒子、さら

に、燃焼起源の炭素系粒子やフライアッシュなどの人為起源粒子も混合されている可能性が十分に考えられた。

5. 結論

2022年8月26日と8月29日に、それぞれ、烏帽子岳付近の池塘と種池山荘付近の池塘について水試料を採取し、

水質と懸濁粒子の分析を行った。

池塘の水のイオン成分濃度やpHの値、モル濃度で計算した Cl^-/Na^+ 比の値から、採取した水は池塘に直接降った降水か、これに、池塘外に降った雨がそのまま流入して混合したものと考えられた。また懸濁していた粒子の濃度は同程度の標高帯の室堂平に降る雨に懸濁している粒子の濃度の十～数十倍高く、黄砂をはじめとする風成塵粒子が懸濁していた可能性があった。そこで、烏帽子岳付近の池塘については降雨が観測された8月25～26日について、種池山荘付近の池塘については27～28日にかけて上空を通過した気塊の後方流跡線解析を行った。その結果、烏帽子岳付近の池塘では8月25日21時から26日1時にかけて上空3,000～4,500 mを通過した気塊が、また、種池山荘付近の池塘では8月27日15時から28日12時にかけて上空2,500～5,000 mを通過した気塊が、それぞれ、アジアの乾燥地帯付近の上空を通過していたことが分かった。しかし、これらの気塊は中国の都市部や韓国、さらに、日本の九州から関西地方の上空を通過していることから、風成塵が含まれていた場合、黄砂だけでなく、人為起源粒子など様々な起源の風成塵が混合して輸送されてきた可能性があると考えられた。

6. 謝辞

本調査を行うに際して、環境省立山公園管理官事務所および林野庁富山森林管理署の指導・許可をいただきました。また、後方流跡線解析のためにREADY Webサイトを提供していただいたNOAA Air Resources Laboratory (ARL) に感謝します。

7. 引用文献

- 朴木英治, 1990. 富山市における降水中の主要イオン相互, および, それらと気象要素との関連性. 富山市科学博物館研究報告, (13) : 151-155.
- 朴木英治・加藤 咲, 2021. 立山弥陀ヶ原における孤立した池塘の地下地形と成立時期. 富山市科学博物館研究報告, (45) : 25-36.
- 朴木英治・渡辺幸一, 2019. 立山における酸性雨観測結果 (2018). 富山市科学博物館研究報告, (43) : 47-51.
- 加藤 咲, 2021. 立山における酸性雨観測結果 (2020). 富山市科学博物館研究報告, (45) : 113-117.
- 松木 篤・岩田 歩・張 代洲・小島 知子・山田 丸・當房 豊, 2020. 黄砂の混合状態が持つ気候学的重要性—個別粒子観察の見地から—. エアロゾル研究, 35 (1) : 5-13.