

雪雲の移動に伴う降水中の nss-硫酸イオン濃度の変化*

朴木 英治

富山市科学文化センター

Attenuation of nss-SO₄²⁻ Concentration of Precipitation by Drift of Snow Cloud

Hideharu HONOKI

Toyama Science Museum

The phenomenon which concentration of nss-SO₄²⁻ in precipitation increases in winter time is observed in an area on the side of the Sea of Japan. On 1995 February 4th, in order to examine this cause, a snow cover was picked toward inland from the seashore that snow cloud lands. Relation of a distance from the coast line and concentration of nss-SO₄²⁻ was analyzed using a picking snow cover. As a result, 2 function, $CSO_4 = 2.71 \exp(-0.0309 \cdot L)$ ($R = 0.99$) and $CSO_4 = 1.77 \exp(-0.0107 \cdot L)$ ($R = 0.999$) were got. CSO₄ is a concentration of nss-SO₄²⁻ in precipitation. L is a distance from the coastline.

Key words : Acid rain, nss-SO₄²⁻, Na⁺.

冬期の北西季節風に乗って中国大陸から輸送されてきた非海塩性硫酸イオンの濃度が、日本に上陸後どのような挙動を示すのかを知る目的で、石川県の海岸線から雪雲の移動経路に沿って新雪を採取し分析を行った。その結果、強い冬型になってまとまった降雪があった場合は、海岸線から離れるにつれて濃度が減少した。その回帰式は調査地点によって異なったが、海岸線からの距離をLとした場合、濃度は $CSO_4 = 2.71 \exp(-0.0309 \cdot L)$ または、 $CSO_4 = 1.77 \exp(-0.0107 \cdot L)$ で表された。前者の式の指数部分は、河川水質の海塩成分データから求められた式（角階，1991）に近いものであった。また、弱い冬型気圧配置による雪では、富山県内で非海塩性硫酸イオン濃度が増大する現象が見られた。

キーワード：酸性雨、非海塩性硫酸イオン、長距離輸送、ナトリウムイオン、陸上輸送。

はじめに

日本海側の各地では冬期降水中の非海塩性硫酸イオン濃度が夏期に比べて高まる現象が見られ、中国大陸から季節風に乗って長距離輸送される硫黄酸化物が原因と考えられている。富山県内における酸性雨観測結果も同様な傾向を示し、冬期降水による非海塩性硫酸イオンの沈着量は夏期に比べて増大している（朴木 1990, 1991, 1994, 1996, 富山県 1995）。北村ら（1993）は金沢市における降水中の硫酸イオンの硫黄同位体比の季節変化を調べ、中国大陸からの輸送を指摘している。しかし、富山県の場合、地理的な位置関係から北西の季節風に対しては石川県の風下に位置しており、冬期降水によって年間沈着量の 8 割以上が輸送される海塩成分の冬期の沈着量は、1990 年度のデータの比較

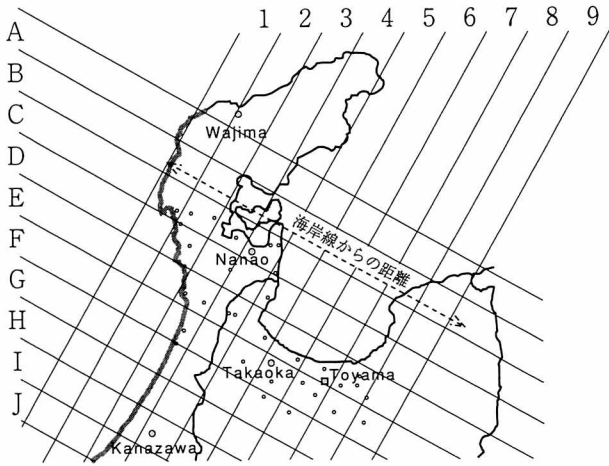


図 1 試料採取地点

* 富山市科学文化センター研究業績第163号

表 1 積雪による調査の長所・短所

長所	冬型気圧配置に先立つ前線通過時の降水には国内汚染源からの成分を含むと考えられるが、北陸の平野部では雨となる場合が多く、冬型気圧配置による雪と自然に分離される。また観測容器と設置場所の準備が不要である。
短所	北陸では気温が高く、日射があると、時間の経過と共にザラメ雪に変化してしまい、成分が流出するおそれがある。

表 2 調査期間の降水量(mm)

1995年	1 月				2 月			
日	28	29	30	31	1	2	3	4
(富山県)								
富山市	1	15	19	6	3	1	-	-
高岡市伏木	4	21	20	6	3	-	2	-
(石川県)								
富来	11	14	-	1	5	3	2	-
羽咋	21	5	9	4	5	2	6	-

表 3 調査期間の降雪深さ(cm)

1995年	1 月				2 月			
日	28	29	30	31	1	2	3	4
(富山県)								
富山市	0	15	35	6	1	0	0	-
高岡市伏木	1	18	31	4	1	0	0	-
(石川県)								
富来	1	10	4	1	1	0	0	1
羽咋	0	7	9	3	5	2	0	0

では、金沢市など石川県内の都市と比べて富山県内の都市の方が少ない。これに対して、富山市の非海塩性硫酸イオンの沈着量は金沢市より若干少ない程度であった(朴木1993)。この両者の成分の沈着挙動の違いが何に起因するものかを解明するため、雪雲の上陸する海岸線を起点に季節風の流線に沿って積雪(新雪)を採取し、非海塩性硫酸イオン濃度の変化を調査したので報告する。

調査方法および分析方法

石川県能登地方から富山県の平野部にかけて一辺10 kmのメッシュを設定し、そのメッシュを代表すると思

われる地点の積雪(新雪)を採取した(図 1)。自動車を移動手段に利用したため、積雪の採取は道路近傍で行ったが、融雪剤の影響を避けるため、平野部では主風向の風上側の道路から少し離れた地点で、山間部では道路交通の妨げとならないよう待避所やチェーン装着所などで積雪を採取した。積雪の採取は、新雪表面から積雪中に最初に現れるザラメ雪層までの雪を、四角柱状に掘り出すか、または、パイプを使って採取した。四角柱状の試料を採取した場合はその上面の2辺から採取表面積を求め、パイプで採取した場合はその内径から採取表面積を求めた。試料は室温で融解して、降水量を求めるために重量を測定後、pH、電気電導度を測定し、イオンクロマトグラフ(除去カラムなし)でイオン成分を分析した。

観測に積雪を利用した場合の長所と欠点は表 1 のとおりである。

積雪採取日

積雪の採取は1995年1月27日と2月4日に行った。表 2 はまとまった降雪のあった1月28日から2月4日までの降水量を、表 3 は降雪深さ合計を示したものである。2月4日に採取した積雪は富山県・石川県とも1月29日から2月1日までの降雪と考えられる。石川県では2月2日以降の降水量も多かったが、山地では雪となっており、目的とした積雪とはザラメ雪の層で境界が形成されていたため分離が可能であった。しかし、石川県の平野部の積雪は全てザラメ雪に変化していたため、グラフ中には点を表示したが、解析のためのデータとしては使用しなかった。

結 果

各試料の分析結果を表 4、5 に示す。この結果をもとに、海岸線からの距離と積雪中のナトリウムイオン濃度との関係を示したものが図 2 (1月27日)、および、図 3 (2月4日)である。1月27日は降水量、降雪深さ合計が少なく弱い冬型と言える。ナトリウムイオン濃度は海岸線から離れるにつれて低下している。しかし、海岸線から20km以上も離れた富山県内では濃度の低下が少なかった(図 2)。これに対して2月4日の試料では、降水量、降雪深さ合計とも多く、かなり強い冬型であったと言える。C,E,F の3つの調査ラインともナトリウムイオン濃度は海岸線から離れるにつれて減少している様子が見られた(図 3)。また、調査結果からナトリウムイオンの濃度と海岸線からの距離との間に次のような関係式が得られた。

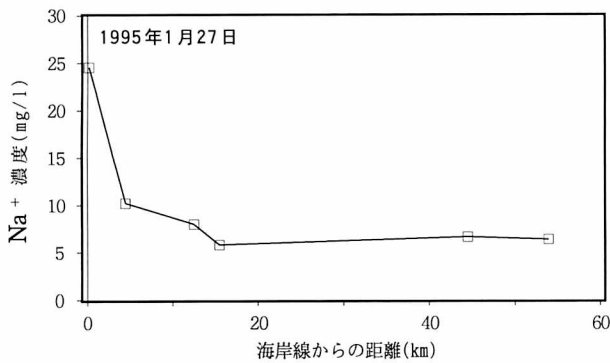


図2 海岸線からの距離と Na⁺濃度との関係

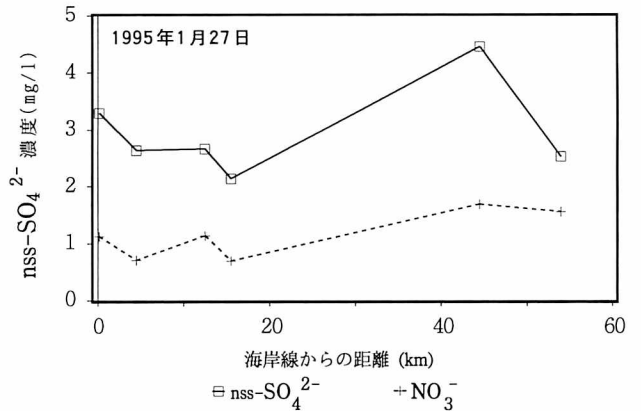


図4 海岸線からの距離と nss-SO₄²⁻、NO₃⁻濃度との関係

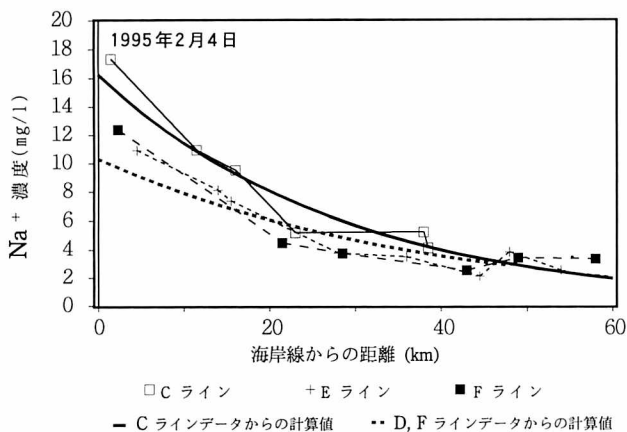


図3 海岸線からの距離と Na⁺濃度との関係

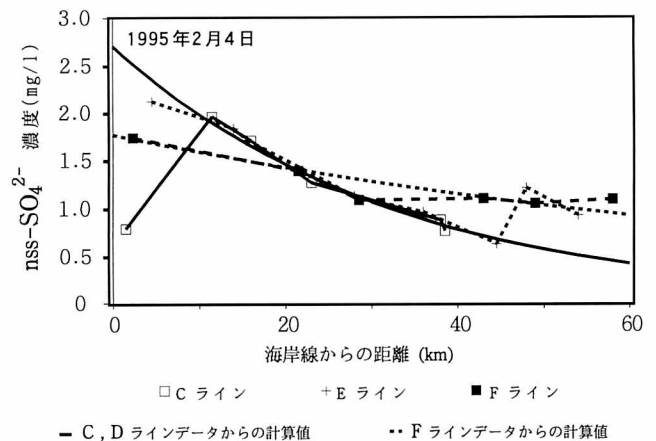


図5 海岸線からの距離と nss-SO₄²⁻濃度との関係

$$CNa = 16.28 \exp(-0.0352L) \quad R = 0.94 \quad (C \text{ LINE}) \quad (1)$$

$$CNa = 10.31 \exp(-0.0265L) \quad R = 0.89 \quad (EF \text{ LINE}) \quad (2)$$

CNa: 積雪中のナトリウムイオン濃度

L : 海岸線からの距離

海水に起源を持つ降水中のナトリウムイオン濃度は海岸線から離れるにつれて減少することが知られており(角階1991), 今回の観測でも同様の結果が得られ, 富山県内に雪をもたらす雲は石川県の海岸線から上陸後, 石川県内を通過して富山県に到達することが確認できた。

次に, 非海塩性硫酸イオン濃度の変化を示したものが図4(1月27日), 図5(2月4日)である。弱い冬型の場合, 非海塩性硫酸イオン濃度は石川県内では低下しているが, 富山県内では増加している調査地点もあった。また, 硝酸イオン濃度も同様な傾向を示していた(図4)。一方, 強い冬型の積雪を採取した2月4日では, 硫酸イオン濃度が海岸線から離れるにつれて低下しており, 図にはプロットしていないが硝酸イオン濃度も比較的低濃度の観測点が多かった。CラインとEラインのデータ, および, Fラインのデータから非海塩性硫酸イオン濃度と海岸線からの距離との関係

の回帰式を求めると(3)(4)となった。

$$CSO_4 = 2.71 \exp(-0.0309L) \quad R = 0.99 \quad (C+E \text{ LINE}) \quad (3)$$

$$CSO_4 = 1.77 \exp(-0.0107L) \quad R = 0.999 \quad (F \text{ LINE}) \quad (4)$$

CSO₄: 積雪中の非海塩性硫酸イオン濃度

L : 海岸線からの距離

考 察

2月4日調査分のデータから求めたナトリウムイオンの回帰式(1)と非海塩性硫酸イオンの回帰式(3)の指数部分の値は似ており, 強い冬型気圧配置による降水では, 雪雲の陸上移動に伴う非海塩性硫酸イオン濃度の減衰挙動はナトリウムイオンの挙動と似ているものと考えられる。岩波(1993)によれば, 雪雲の形成に際して, 乾燥して重い寒気と熱と水蒸気を含んだ軽い下層の大気との間に激しい対流活動が起きて温度, 水蒸気量, 風の一様な対流混合層が出来, その厚さは日本海沿岸で2000~3000mに達するため, 中国大陸から輸送された硫黄酸化物と, 日本海から水蒸気と共に供給される海塩成分が雪雲の中で均一に混合されていたと考えることができる。しかし, Fラインで非海塩性硫酸イオン濃度の変化とナトリウムイオン濃度の変化

表 4

採取地点	採 取 年/月/日	採取時間 時：分	マッシュボード 距離(km)	降水量換算 試料量(mm)	pH	電気電導度 (μ S/cm)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	NH ₄ ⁺ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	NO ₂ ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	nss-Ca ²⁺ (mg/l)	nss-SO ₄ ²⁻ (mg/l)
羽咋市福水	'95/01/27		E3	4.5	6.15	84.1	10.25	0.47	1.08	1.27	0.34	18.40	0.000	0.71	5.21	0.69	2.64
羽咋市千里浜	'95/01/27	13:25	E3	0.2	5.87	183	24.58	1.14	1.9	2.75	0.00	44.22	0.006	1.13	9.47	0.97	3.30
水見市谷屋	'95/01/27	12:14	E4	16	5.64	49.4	5.82	0.24	0.81	0.72	0.30	10.13	0.000	0.70	3.6	0.59	2.14
水見市天狗林 運動公園	'95/01/27		E4	13	5.39	68.7	8.02	0.37	0.97	1.01	0.47	14.41	0.000	1.14	4.68	0.67	2.67
富山市四方荒屋	'95/01/27	10:14	E7	45	5.66	64.2	6.70	0.36	0.97	0.84	1.17	11.41	0.000	1.69	6.14	0.72	4.46
常願寺川公園	'95/01/27	9:39	E8	54	5.79	59.8	6.41	0.37	0.74	0.89	0.76	11.21	0.006	1.56	4.14	0.50	2.53
押水除雪マシーン	'95/01/27		F3	2.3	5.88	102.7	13.47	0.84	1.36	1.67	0.00	24.06	0.000	0.23	6.06	0.85	2.68
高松インター近	'95/01/27	14:10	G3	1.5	5.96	56.2	7.13	0.30	1.39	0.77	0.00	12.48	0.000	0.00	3.92	1.12	2.13
小矢部市くりから峠	'95/01/27	14:50	G5	14	5.72	55.0	6.96	0.28	0.82	0.69	0.51	12.13	0.007	0.97	3.18	0.56	1.43
津幡町東荒屋	'95/01/27		H4	10	5.57	23.7	2.58	0.14	0.42	0.32	0.27	4.40	0.000	0.57	1.81	0.32	1.16

表 5

採取地点	採 取 年/月/日	採取時間 時：分	マッシュボード [*] 距離(km)	海岸からの 距離(km)	降水量換算 試料量(mm)	pH	電気電導度 (μ S/cm)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	NH ₄ ⁺ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	NO ₂ ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	nss-Ca ²⁺ (mg/l)	nss-SO ₄ ²⁻ (mg/l)
富来町立病院前	*95/02/04	14:29	C1	0.1	21.8	6.58	83.5	9.54	0.27	3.48	1.22	0.00	16.97	0.01	0.15	3.19	3.12	0.80
富来町荒屋峠	*95/02/04	14:50	C2	1.5	42.2	6.77	124.5	17.35	0.58	0.99	1.56	0.00	30.72	0.00	0.37	5.15	0.33	0.80
中島町上町	*95/02/04	13:34	C2	16	31.1	5.18	75.1	9.53	0.31	0.52	1.13	0.00	17.21	0.00	0.44	4.10	0.16	1.71
富来町虫が峰	*95/02/04	13:53	C2	12	42.3	4.90	88.0	11.0	0.4	0.5	1.3	0.00	19.9	0.0	0.5	4.7	0.10	1.96
田鶴浜町	*95/02/04	13:13	C3	23	30.7	5.14	43.3	5.17	0.32	0.40	0.66	0.46	9.30	0.00	0.33	2.57	0.20	1.27
七尾市百海	*95/02/04	11:59	C4	38	15.2	5.50	41.2	5.23	0.16	0.31	0.62	0.00	9.35	0.00	0.25	2.20	0.11	0.89
七尾市谷口	*95/02/04	12:21	C4	35	21.6	5.52	71.3	9.21	0.43	0.81	0.99	0.70	16.59	0.00	0.54	3.85	0.46	1.54
七尾市花園	*95/02/04	11:17	C5	39	15.7	5.28	34.1	4.14	0.10	0.23	0.49	0.00	7.45	0.00	0.17	1.81	0.07	0.77
鳥屋町田坂	*95/02/04	12:49	D3	19	24.3	5.22	62.0	7.77	0.29	0.45	0.94	0.00	14.04	0.00	0.45	3.56	0.15	1.61
志賀町大世	*95/02/04	15:02	D3	5	28.7	5.41	86.0	10.70	0.53	0.70	1.34	0.43	19.55	0.00	0.52	4.83	0.29	2.14
水見市大境	*95/02/04	10:50	D5	29	37.1	5.33	42.7	4.03	0.20	0.25	0.50	0.26	7.30	0.00	0.28	2.04	0.10	1.03
羽咋市滝町	*95/02/04	15:25	E3	0.3	13.5	6.07	62.0	7.93	0.35	0.82	1.00	0.28	14.67	0.00	0.19	2.87	0.52	0.88
羽咋市福水	*95/02/04	16:45	E3	5	35.9	5.40	87.7	10.93	0.35	0.81	1.29	0.00	19.74	0.00	0.52	4.87	0.39	2.13
水見市上能無	*95/02/04	16:59	E4	14	58.0	5.03	66.7	8.13	0.26	0.52	0.92	0.00	14.42	0.00	0.50	3.88	0.21	1.84
水見市谷屋	*95/02/04	17:11	E4	16	38.1	4.86	63.4	7.37	0.27	0.38	0.88	0.00	13.23	0.00	0.41	3.57	0.10	1.72
高岡市太田山岸	*95/02/04	10:15	E5	28	50.1	5.71	32.6	3.78	0.22	0.26	0.47	0.34	6.89	0.00	0.31	2.08	0.12	1.13
新湊市泰興の江	*95/02/04	09:34	E6	36	44.0	5.86	29.9	3.52	0.11	0.27	0.43	0.00	6.25	0.00	0.33	1.85	0.14	0.97
富山市四方荒屋	*95/02/04	09:08	E7	45	37.1	6.26	19.6	2.13	0.08	0.19	0.27	0.05	3.91	0.00	0.22	1.17	0.11	0.64
富山市長江	*95/02/04	08:19	E8	48	39.8	5.91	40.9	3.84	0.12	0.28	0.46	0.01	6.90	0.00	0.46	2.18	0.13	1.22
常願寺川公園	*95/02/04	08:35	E8	54	20.7	6.12	23.5	2.54	0.17	0.20	0.32	0.33	4.69	0.00	0.39	1.57	0.10	0.93
押水除雪マシーン	*95/02/04	16:24	F3	2.3	28.2	5.16	94.5	12.39	0.37	0.70	1.41	0.00	22.20	0.00	0.43	4.85	0.23	1.74
高岡市手洗野	*95/02/04	17:46	F5	22	68.5	5.20	38.8	4.49	0.15	0.32	0.55	0.00	8.08	0.00	0.38	2.52	0.15	1.39
大門町小泉	*95/02/05	12:42	F6	29	38.9	5.43	32.2	3.74	0.11	0.31	0.44	0.00	6.59	0.01	0.36	2.03	0.17	1.09
婦中町連星	*95/02/05	11:24	F7	43	39.7	6.24	23.7	2.55	0.08	0.40	0.31	0.00	4.71	0.02	0.35	1.75	0.30	1.11
富山市月岡	*95/02/05	10:54	F8	49	47.6	5.84	29.0	3.43	0.13	0.30	0.42	0.01	6.15	0.01	0.46	1.92	0.17	1.06
立山町岩くら寺	*95/02/05	10:22	F9	58	57.7	5.06	31.9	3.35	0.12	0.26	0.41	0.00	6.17	0.00	0.51	1.94	0.13	1.10
能登自動車道高松 ハーフ	*95/02/04	15:45	G3	0.3	32.5	5.25	196.2	26.91	0.83	1.34	3.16	0.00	48.61	0.00	0.40	8.29	0.32	1.54
山田村外輪野	*95/02/05	11:44	G7	38	64.6	5.25	44.1	5.31	0.17	0.32	0.64	0.00	9.44	0.04	0.37	2.40	0.12	1.07
砺波市東保	*95/02/05		F66	29	45.0	5.27	34.2	3.99	0.13	0.28	0.47	0.00	7.04	0.00	0.37	2.10	0.13	1.10

が食い違った原因は不明である。

一方、1月27日分のデータからは、弱い冬型の場合、富山県内で非海塩性硫酸イオン、および、硝酸イオン濃度が上昇する傾向が見られた。富山県内では冬型気圧配置時には地上付近では内陸から富山湾に向けて南西よりの風が吹くが、この調査の場合、ナトリウムイオン濃度が富山県内で若干上昇している点から考えて、富山湾から内陸に向けて北よりの風が吹いた可能性もある。

さて、図6は富山県内の石油製品の販売量の月別変化を示したものであるが、冬期には暖房需要に起因すると考えられる販売量の増加が見られ、これが県内で消費された場合、当然、排出される硫黄酸化物の量も増大すると考えられる。弱い冬型の場合、これらの地元で排出された硫黄酸化物などの捕捉率が高まるために降水中の濃度が増大するのではないかと考えられる。

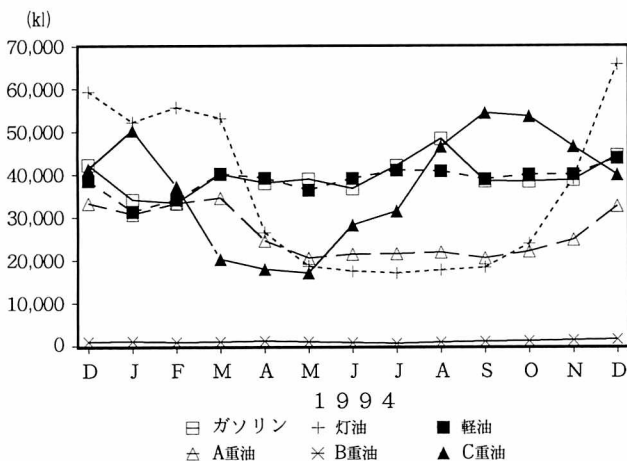


図6 富山県内における石油製品の販売量（資源エネルギー庁統計）

まとめ

今回の調査では、強い冬型気圧配置時の降水中の非海塩性硫酸イオン濃度が季節風の移動方向に沿って海岸から内陸に向かうにつれて減少し、その減衰様式は海塩成分のナトリウムイオン濃度の減衰様式とよく似た挙動を示す現象が見られた。その原因として、雪雲

内で非海塩性硫酸イオンと海塩成分が均一に混合されていたことが考えられる。また、データ数は少なかったが、弱い冬型気圧配置時には富山県内で近隣汚染の影響を受けている可能性のあるデータを得た。

謝 辞

積雪の採取法に関して富山大学理学部の対馬勝年教授のご指導をいただいた。また、試料の採取に関しては富山の雪研究会の皆様のご協力もいただきました。

また、掲載した図の製作にあたっては、科学文化センターの石井佐代子臨時職員のご協力をいただきました。ここに厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 岩波越, 1993. 日本海側の降雪の仕組み, 第18回雪氷防災研究会「酸性雪とその影響」梗概集, 長岡雪氷防災実験研究所
- 資源エネルギー庁, 1995. エネルギー生産需給統計月報
- 角階静男, 1991. 大気-海洋系の地球化学的研究, 地球化学(25):1-16
- 富山県, 1995. 公害白書
- 朴木英治, 1990. 富山市における降下物量と主要溶存成分の月別変化II (1988年4月～1989年3月), 富山市科学文化センター研究報告(13):157-164
- 朴木英治, 1991. 富山市の降下物の分布観測, 富山市科学文化センター研究報告(14):155-165
- 朴木英治, 1994. 富山市における降下物量の分布観測結果II, 富山市科学文化センター研究報告(17):123-132
- 朴木英治, 1996. 酸性雨観測記録 (1991年4月～1995年12月), 富山市科学文化センター研究報告(19):75-78.
- 朴木英治, 1993. 富山における硫酸イオンの湿性沈着とその起源, 環境科学会1993年会講演要旨集 p 48
- 富山地方气象台, 富山県気象月報, 1月-2月, 1995
- 石川地方气象台, 石川県気象月報, 1月-2月, 1995