

大里村の降水のイオン組成成分について

金城義勝・比嘉尚哉・長嶺弘輝・城間 勇・与儀和夫・田代 豊・洲鎌久人・宮城良一・野間田隆稔

Characteristics of Acid Rain at Ozato Village, Okinawa from Apr.1991 to Mar.1995

Yoshikatu KINJO, Naoki HIGA, Koki NAGAMINE, Isamu SHIROMA, Kazuo YOGI
Yutaka TASHIRO, Hisato SUGAMA, Yoshikazu MIYAGI and Takatoshi NOMADA.

要旨: 1991年4月から1995年3月までの降水のpH, ECおよびイオン組成成分について検討した。4年間の降水のpHは4.20~7.50の範囲に分布し, 平均値は5.47であった。ECは2.7~532 $\mu\text{S}/\text{cm}$ の範囲にあり, 平均値は46.2 $\mu\text{S}/\text{cm}$ であった。また, ECは海塩組成成分の Na^+ , Cl^- 等と相関関係がみられた。イオン組成成分の年平均濃度は Cl^- ; 281 $\mu\text{eq}/\text{l}$ > Na^+ ; 236 $\mu\text{eq}/\text{l}$ > Mg^{2+} ; 56.6 $\mu\text{eq}/\text{l}$ > SO_4^{2-} ; 49.0 $\mu\text{eq}/\text{l}$ > Ca^{2+} ; 30.6 $\mu\text{eq}/\text{l}$ > NH_4^+ ; 20.0 $\mu\text{eq}/\text{l}$ > NO_3^- ; 8.44 $\mu\text{eq}/\text{l}$ > K^+ ; 7.44 $\mu\text{eq}/\text{l}$ > H^+ ; 6.01 $\mu\text{eq}/\text{l}$ であった。降水のイオン成分の中で Na^+ , Cl^- , Mg^{2+} は海水組成にほぼ一致した相関係数がみられた。また, 非海塩性の各種イオン降下量から'91年の降水のpH低下の要因は火山の影響によるものと考えられた。特に台風や低気圧は進路や規模によって降水のイオン成分比に影響を与え, 大気汚染物質の浄化とともに長距離輸送の役割も担っていた。

Key words: 酸性雨, pH, アニオン, カチオン, 海塩組成成分

I はじめに

環境庁は国内の酸性雨の実態状況を調査するために, 昭和58年度から昭和62年度までの5年間にわたって「第一次酸性雨調査」¹⁾を実施した。それによると我が国の酸性雨の降下状況も欧州諸国に近い状況で, しかも清浄地域と目される屋久島においてもpHの低い降水結果が得られた。一方, 各地方衛生研究所および公害研究所においても第一次酸性雨調査結果を踏まえ, 地方研究所間の共同調査研究が盛んとなり, 九州地方でも平成元年度から梅雨期に限定した九州・沖縄地方酸性雨共同調査研究^{2,3,4,5)}を行うようになった。当研究所では1985年10月から日毎の降水のpH^{6,7)}を計測していたが, 1991年4月(平成3年度)より九州・沖縄地方酸性雨共同調査研究が通年調査に発展したのを契機に通年で行うようになった。今回は1991年4月から1995年3月(平成6年度)までのイオン組成成分および年降下量について検討した。

II 調査方法

1. 降水の採取方法

降水の採取は環境庁方式の簡易型ろ過式降水捕集装置を作り, '91年4月から'93年3月までは口径20cm×31cmを, '93年4月以降は口径21cm×31cmのポリエチレン製ロートを用いて行った。

採取期間は原則として一週間単位とし, 毎月曜日の午前9時に10リットル用のポリエチレン製容器を交換回収した。回収した降水試料は実験室で計量し, 貯水量が30ml以下の時は液温を25℃に調整したのちpH, ECだけを

計測し, 30ml以上得られた場合は上回った分量を250ml用のポリプロピレン製容器に入れ冷蔵保存しイオン分析試料に供した。

ポリプロピレン製の容器は中性洗剤で洗浄後, 水道水で一次洗浄したのち純水で3回以上洗浄し自然乾燥させてから試料保存に使用した。なお, 洗浄方法については試料保存に用いる容器に純水を入れ, 振とうしたのちイオン分析を行い容器のブランクチェックを行った。また, 長時間経過した純水は環境中の NH_4^+ イオン等の吸収を受ける恐れがあるため, 酸性雨調査用に使用した純水は純水製造装置で製造したての純水を用いた。

2. 使用分析機器

pHは堀場pHメータ(model M-13)にガラス電極(1066 A-10C), 比較電極(2660A-10T), 温度補償電極(4163-10T)を組み合わせて計測した。ECは堀場製導電率計に3552セルを組み合わせて使用した。イオン分析のアニオン成分は島津イオンクロマトグラフ(カラム: IC-GA1, IC-A1)を'91年4月から'94年3月までの間は使用し, '94年4月からはDIONEX model-AQ1110イオンクロマトグラフ(カラム: AS-12)で行った。カチオン成分の分析は'91年4月から'94年3月にかけて島津原子吸光光度計(model-AA6500F)を用い, '94年4月からDIONEXイオンクロマトグラフ(カラム: CS-12)に切り替えて行った。なお, イオン組成の成分分析はアニオン成分が Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} を, カチオン成分は Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} を対象項目とした。

3. 調査地点の環境条件

調査地点は沖縄本島南部の東側に位置し、大里村にある県衛生環境研究所の2階屋上で降水の採取を行った(図1)。

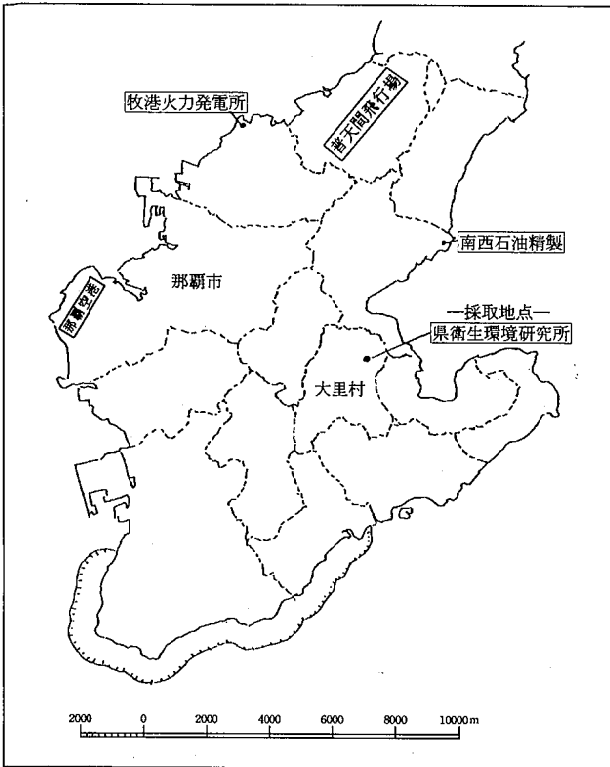


図1. 降水採取地点

環境条件として、調査地点は農村地域の標高109mの小高い丘の上であり、周囲は畑地で約2km離れた北側に国道329号が西側の那覇市から東側の与那原町へと通じている。調査地点を中心とした約12kmの円周内には西側に県都那覇市および那覇空港、北側には県内最大の発電量を誇る沖縄電力の牧港火力発電所(約55万kW)および普天間米軍飛行場がある。東側から時計回りで西側

にかけては太平洋側に位置し、大きな発生源もなく、最も近い海岸までは約3kmの距離がある。

III 結果および考察

'91年4月から'95年3月までの調査結果を表1に示す。

1. 降水量, 降水のpHおよびEC

各年度毎の降水量とpH推移をみてみると、図2に示すように沖縄近海を通過した台風の数^{8,9)}が多く、また規模も大きかった^{8,9)}'91年と'92年の年降水量は1907mm(0~308.5mm), 2002mm(0~342.2mm)とほぼ同量の降水推移を示し、台風の数が比較的少なかった^{10,11)}'93年,'94年の年降水量は1508mm(0~162.3mm), 1690mm(0~170.6mm)と少雨傾向がみられた。

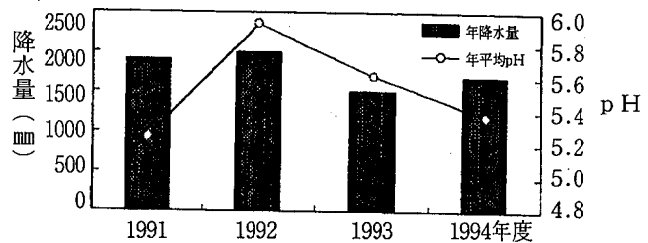


図2. 各年度毎の降水量およびpH平均推移。

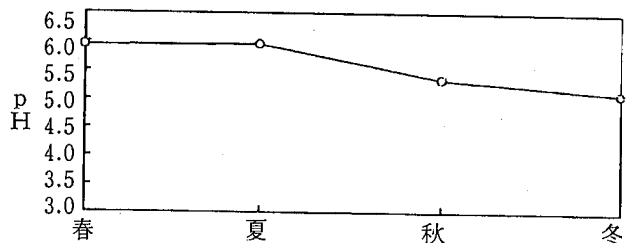


図3. 降水のpHの季節変動。

表1. 1991年4月から1995年3月までの降水量, 降水のpH, EC及びイオン当量濃度。

(イオン当量濃度: $\mu\text{eq/l}$)

	降水量 ¹⁾	pH ²⁾	EC ³⁾	H ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	nss-K ⁰⁾	nss-Ca ⁰⁾	nss-Mg ⁰⁾	nss-Cl ⁰⁾	nss-SO ₄ ⁰⁾
4/91-3/92	最小値 0	4.20	5.2	0.03	20.0	0.00	1.51	9.58	6.42	27.5	0.00	10.0	0.43	6.15	-5.07	-79.4	-0.12
年降水量	最大値 308.5	7.49	532	63.10	1576	131	41.1	180	373	1834	76.5	189	15.2	178	32.4	72.5	141
1906.8	加重平均 1906.8	5.24	85.8	10.9	470	14.7	13.3	52.1	116	566	7.69	81.1	3.36	31.6	8.90	18.5	24.7
4/92-3/93	最小値 0	4.33	6.0	0.04	10.0	3.11	0.512	3.99	2.63	14.2	0.16	10.2	-3.39	3.40	-9.13	-108	1.20
年降水量	最大値 342.2	7.43	280	46.8	1682	141	34.0	286	374	1994	146.6	245	14.0	277	7.4	35.0	220
2002.2	加重平均 2002.2	5.93	33.8	2.35	166	15.7	4.93	24.1	37.6	195.6	7.36	35.6	1.41	16.8	-0.37	1.89	15.6
4/93-3/94	最小値 0	4.64	5.7	0.05	13.04	4.00	0.767	6.48	2.47	17.63	1.13	10.2	0.34	4.14	-11.3	-68.0	3.41
年降水量	最大値 162.3	7.32	226	22.9	1348	145	51.2	219	379	1676	92.7	206	42.7	208	71.2	106	182
1507.7	加重平均 1507.7	5.62	40.2	3.65	193	29.3	7.51	29.9	49.9	233	9.81	45.0	3.41	21.4	5.80	7.75	21.8
4/93-3/95	最小値 0	4.36	2.7	0.03	4.35	6.11	0.51	2.99	0.00	5.63	0.00	3.25	-0.30	1.11	-28.2	-441	1.32
年降水量	最大値 170.6	7.50	204	43.7	1133	293	154	176	231	1272	84.0	238	149	127	21.3	20.1	115
1689.8	加重平均 1689.8	5.37	21.7	7.18	90.8	22.6	3.75	14.9	18.1	103	9.34	32.3	1.82	10.9	-2.59	-4.00	21.4
4/91-3/95	最小値 0	4.20	2.72	0.03	4.35	0.00	0.51	2.99	0.00	5.63	0.00	3.25	-3.39	1.11	-28.2	-441	-0.12
年降水量	最大値 2002.2	7.50	532	63.1	1682	293	154	286	379	1994	147	245	149	277	71.2	105.7	220
1776.7	加重平均 1776.7	5.47	46.24	6.01	235.5	20.0	7.44	30.6	56.6	280.6	8.44	49.0	2.46	20.4	2.90	6.20	20.8

1)降水量: mm(貯水量をロート面積で除して得た値を降水量とした。)

2)pH:単位なし

3)EC:導電率($\mu\text{S/cm}$)

4)nss:non sea salt(取りあえずNa⁺は海塩寄与成分とみなし, Na⁺を基準にもちいて海塩補正をおこなった非海塩成分。)

pHは'91年が4.20~7.49の範囲に分布し年平均値は5.24と4年間で最も低い値であった。'92年は4.33~7.43と'91年とはほぼ同様なpHの範囲を示したが、年平均値は5.93と高い値が得られ、降水の酸性度に回復した兆しが見られた。しかし、'93年は4.64~7.32(年平均値5.62)、'94年が4.36~7.50(年平均値5.37)と徐々にpHの年平均値に低下が見られた。なお、4年間のpHは4.20~7.50の範囲に分布し、平均値は5.47であった。また、pHと降水量に相関関係(n=215)は認められず、pHとH⁺に危険率1%での相関関係(n=215, r=-0.700)が認められた。pHの季節変動は図3に示すように黄砂の影響を受けやすい春から夏にかけて高くなり、季節風の影響を受ける秋から冬にかけて低くなる傾向が見られた。

沖縄の降水のECは、採取期間中に受けた気象条件を知るためのパラメータとして使用され、特に台風や低気圧の影響の度合いによっては数100 μS/cmまでの数値を示す。また、海塩組成成分のNa⁺やCl⁻等との相関関係もよく、EC値が高い時の降水はNa⁺やCl⁻等の濃度も高い¹²⁾。

'91年のEC値は5.2~532 μS/cm(年平均値85.8 μS/cm)の範囲にあり、年最高値は台風12号の影響を受けた降水であった。その時の降水量は0.5mmと少なく、台風の進路も太平洋側から屋久島を通過して東シナ海側へと抜け、韓国に上陸した進路をとっており⁹⁾、降水のpHは4.93と低い値を示した。'92年は6.0~280 μS/cm(年平均値

33.8 μS/cm)の範囲にあり、年最高値は台風3号の影響を受けた降水であった。この時の台風は宮古島から沖縄本島南部地域を台風の目が通過し、房総半島方面を抜けて三陸海岸洋上で熱帯低気圧に変わった進路を取っており⁹⁾、降水量は78.6mm、pHは6.63であった。'93年は5.7~226 μS/cm(年平均値40.2 μS/cm)の範囲にあり、年最高値は台風13号の影響を受けた降水であった。この時の台風は宮古島から東シナ海の久米島西海上を通過して鹿児島に上陸する進路を取っており¹⁰⁾、降水量が117.4mm、pHは6.55であった。'94年は2.7~204 μS/cm(年平均値21.7 μS/cm)の範囲にあり、年最高値は台風31号、32号がルソン島と沖ノ島島間で同期間中に発生し、長期間停滞した時の影響を受けており¹¹⁾、降水量は3.7mmと少なく、pHが6.01であった。このように台風の影響を受けた降水は一般的にECが高く、台風の通過進路によって降水のpHも影響を受けた。ちなみに、ECは海塩組成成分のNa⁺(r=0.975)、Mg²⁺(r=0.970)、Cl⁻(r=0.965)およびSO₄²⁻(r=0.827)と危険率1%での相関関係(n=215)を示す。なお、4年間のECの値は2.7~532 μS/cmの範囲に分布し、平均値は46.2 μS/cmであった。

2. 降水のイオン組成成分(イオン当量濃度: μeq/l)

各年度毎のイオン組成成分の割合を図4~図7に、'91年から'94年までの4年間の平均イオン組成を図8に示した。

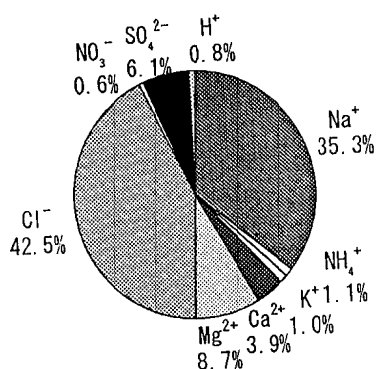


図4. 1991年の降水の平均イオン組成比 (μeq/l) .

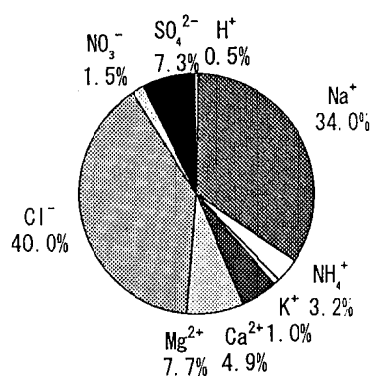


図5. 1992年の降水の平均イオン組成比 (μeq/l) .

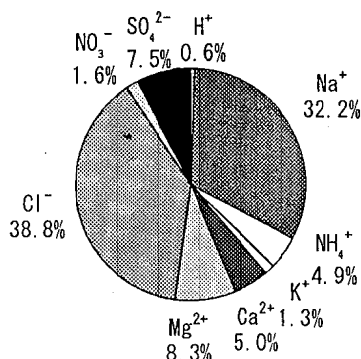


図6. 1993年の降水の平均イオン組成比 (μeq/l) .

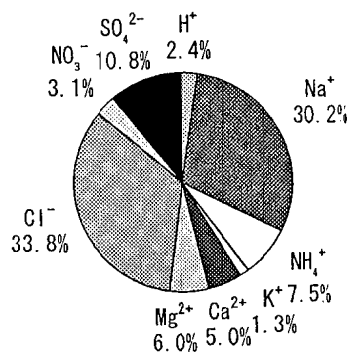


図7. 1994年の降水の平均イオン組成比 (μeq/l) .

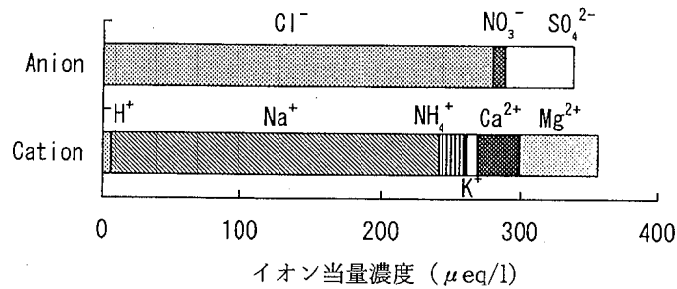


図8. 1991年4月から1995年3月までの降水の平均イオン組成.

'91年から'94年までの海塩組成成分のNa⁺, Cl⁻が全組成成分の約64%('94年)~78%('91年)を占めているのが特徴である.'91年の平均組成成分はNa⁺:35.3%, Cl⁻:42.5%とNa⁺, Cl⁻が全組成成分の77.8%を占め, 次いでMg²⁺(8.7%)>SO₄²⁻(6.1%)>Ca²⁺(3.9%)>NH₄⁺(1.1%)>K⁺(1.0%)>H⁺(0.8%)>NO₃⁻(0.6%)の割合であった(図4). '92年の平均組成成分はNa⁺:34.0%, Cl⁻:40.0%とNa⁺, Cl⁻が全組成成分の74.0%を占め, 次いでMg²⁺(7.7%)>SO₄²⁻(7.3%)>Ca²⁺(4.9%)>NH₄⁺(3.2%)>K⁺(1.0%)>NO₃⁻(1.5%)>H⁺(0.5%)の割合で, '91年の平均組成成分に比べNa⁺, Cl⁻, Mg²⁺, H⁺の組成比が減少し, 他のイオン成分の割合に増加がみられた(図5). '93年の平均組成成分はNa⁺:32.2%, Cl⁻:38.8%とNa⁺, Cl⁻が全組成成分の71.0%を占め, 次いでMg²⁺(8.3%)>SO₄²⁻(7.5%)>Ca²⁺(5.0%)>NH₄⁺(4.9%)>NO₃⁻(1.6%)>K⁺(1.3%)>H⁺(0.6%)の割合で, '92年の平均組成に比べNa⁺, Cl⁻の組成比が減少し, 他のイオンの割合に増加がみられた(図6). '94年の平均組成成分はNa⁺:30.2%, Cl⁻:33.4%とNa⁺, Cl⁻が全組成成分の63.6%を占め, 次いでSO₄²⁻(10.8%)>NH₄⁺(7.5%)>Mg²⁺(6.0%)>Ca²⁺(5.0%)>NO₃⁻(3.1%)>H⁺(2.4%)>K⁺(1.3%)の割合で, '93年の平均組成に比べNa⁺, Cl⁻の組成比が減少し, 他のイオン成分の割合に増加がみられた(図7). なお, '91年から'94年までの4年間の平均組成成分はCl⁻(40.4%)>Na⁺(33.9%)>Mg²⁺(8.2%)>SO₄²⁻(7.1%)>Ca²⁺(4.4%)>NH₄⁺(2.9%)>NO₃⁻(1.2%)>K⁺(1.1%)>H⁺(0.9%)の割合からなり, この組成成分でのpHは5.47, ECは46.2 μS/cmであった(図8). また, イオン組成成分間ではNa⁺とMg²⁺にr=0.992, Na⁺とCl⁻にr=0.991, Na⁺とSO₄²⁻にr=0.717, Cl⁻とMg²⁺にr=0.993, Mg²⁺とSO₄²⁻にr=0.707, Ca²⁺とNO₃⁻にr=0.730, Ca²⁺とSO₄²⁻にr=0.729およびNO₃⁻とSO₄²⁻にr=0.704の相関関係(n=215)がみられた.

3. 海塩組成成分としてのNa⁺, Cl⁻, Mg²⁺の検討

海水の組成成分¹³⁾としてCl⁻, Na⁺, Mg²⁺等があり, その割合はCl⁻/Na⁺=1.16(μeq/l), Mg²⁺/Na⁺=0.228

(μeq/l)となる.

降水の組成成分であるNa⁺, Cl⁻, Mg²⁺について得られた全データを対象に検討してみると, Cl⁻(μeq/l) = 1.147 × Na⁺(μeq/l) + 0.82362(n=215, r=0.992), Mg²⁺(μeq/l) = 0.239 × Na⁺(μeq/l) - 0.97212(n=215, r=0.992)の係数が得られ, 海水の組成成分とほぼ一致する. このことから沖縄の降水に検出されるNa⁺, Cl⁻, およびMg²⁺は, 海塩由来と考えられた(図9, 10).

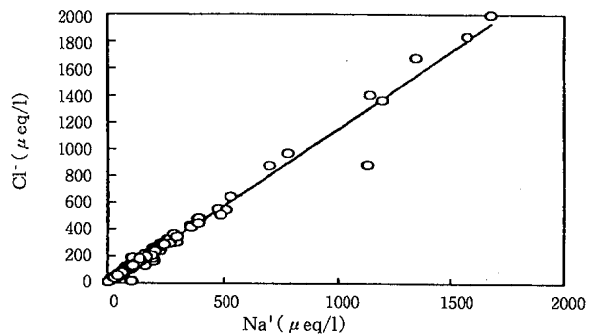


図9. NaイオンとClイオンの相関関係(n=215).

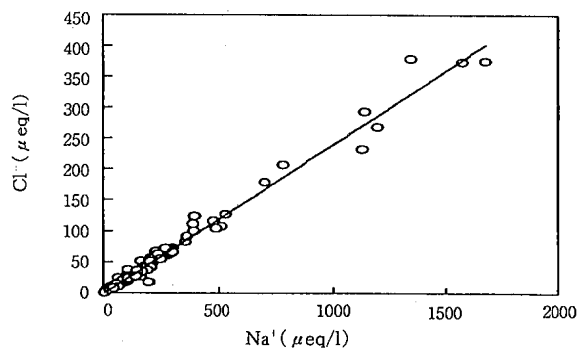


図10. Na⁺とMg²⁺の相関関係(n=215).

4. 降水の非海塩組成成分(イオン当量濃度: μeq/l)

降水のCl⁻, Na⁺およびMg²⁺は辺戸岬¹²⁾においても海水の組成成分と係数がほぼ一致する. このため, 沖縄の降水データの海塩補正にはCl⁻, Na⁺, Mg²⁺のいずれを基準に用いても差し支えないものと思われる. ただ, 我が国では全国共同調査¹⁴⁾および環境庁の酸性雨調査¹⁾において便宜上Na⁺を基準とした海塩補正(non sea salt-)を行っ

ており、今回のデータの海塩補正も全国調査に準じて Na^+ を基準に使用した。

各年度毎の非海塩組成成分の割合を図11～図14に、'91

年から'94年までの4年間の平均イオン組成を図15に示した。

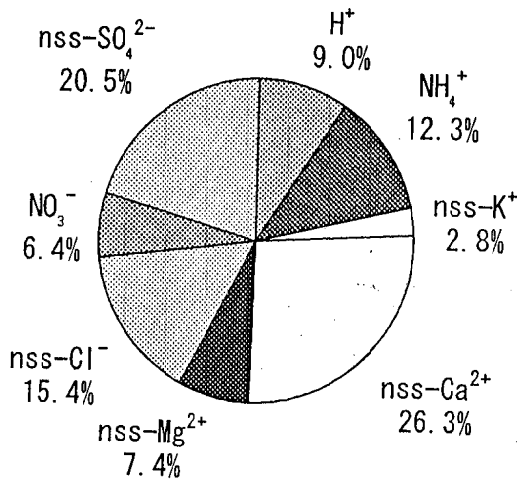


図11. 1991年の降水の非海塩組成成分比 ($\mu\text{eq/l}$).

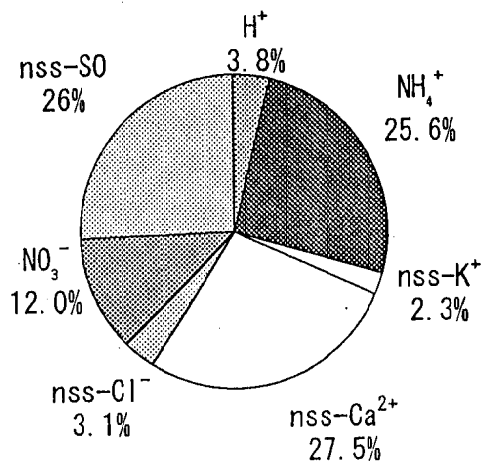


図12. 1992年の降水の非海塩組成成分比 ($\mu\text{eq/l}$).

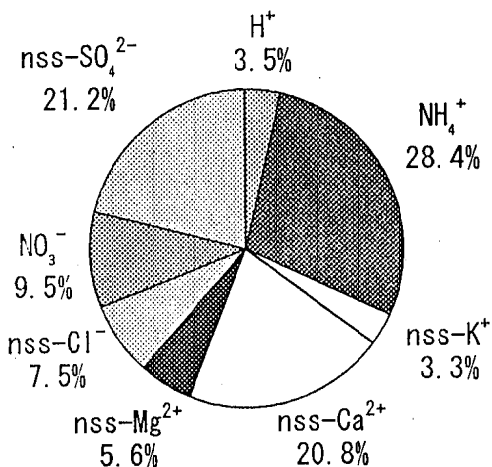


図13. 1993年の降水の非海塩組成成分比 ($\mu\text{eq/l}$).

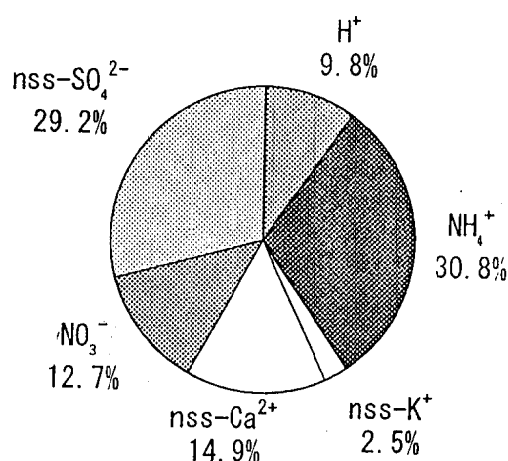


図14. 1994年の降水の非海塩組成成分比 ($\mu\text{eq/l}$).

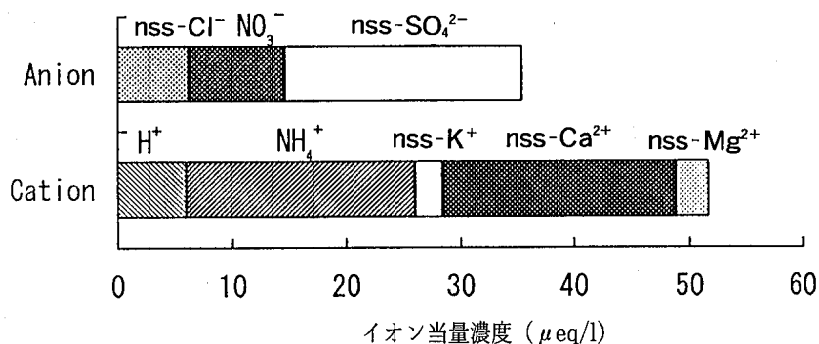


図15. 1991年から1994年までの非海塩成分の平均イオン組成.

'91年の平均組成比はnss-Ca²⁺(26.3%)>nss-SO₄²⁻(20.5%)>nss-Cl⁻(15.4%)>NH₄⁺(12.3%)>nss-Mg²⁺(7.4%)>NO₃⁻(6.4%)>H⁺(9.0%)>nss-K⁺(2.8%)の成分割合であった(図11)。
 '92年の平均組成比はnss-Ca²⁺(27.5%)>nss-SO₄²⁻(25.6%)>NH₄⁺(25.6%)>NO₃⁻(12.0%)>H⁺(3.8%)>nss-Cl⁻(3.1%)>nss-K⁺(2.3%)>nss-Mg²⁺(0%)の成分割合で、'91年に比べNH₄⁺、NO₃⁻、nss-SO₄²⁻およびnss-Ca²⁺の組成比に増加がみられ、他のイオン成分の割合は減少した(図12)。
 '93年の平均組成比はNH₄⁺(28.4%)>nss-SO₄²⁻(21.2%)>nss-Ca²⁺(20.8%)>NO₃⁻(9.5%)>nss-Cl⁻(7.5%)>nss-Mg²⁺(5.6%)>H⁺(3.5%)>nss-K⁺(3.3%)の成分割合となり、'92年に比べnss-Mg²⁺、nss-Cl⁻、NH₄⁺、nss-K⁺の組成比が増加し、他のイオン成分の割合に減少がみられた(図13)。
 '94年の平均組成比はNH₄⁺(30.8%)>nss-SO₄²⁻(29.2%)>nss-Ca²⁺(14.9%)>NO₃⁻(12.7%)>H⁺(9.8%)>nss-K⁺(2.5%)の成分割合で、'93年に比べnss-SO₄²⁻、H⁺、NO₃⁻、NH₄⁺の組成比が増加し、他のイオン成分の割合が減少した(図14)。
 なお、'91年から'94年までの4年間の平均組成比はnss-SO₄²⁻(23.8%)>nss-Ca²⁺(23.4%)>NH₄⁺(22.9%)>NO₃⁻(9.7%)>nss-Cl⁻(7.1%)>H⁺(6.9%)>nss-Mg²⁺(3.3%)>nss-K⁺(2.8%)の割合で、アニオン成分40.6%に対しカチオン成分が59.4%と過剰きみであった(図15)。このようなカチオン成分の過剰に対し、黄砂時のエアロゾルは弱塩基性を示すととも陽イ

オンの過剰分に相当するHCO₃⁻の存在が示唆されており¹⁵⁾、HCO₃⁻の寄与も推察された。ちなみに、nss-K⁺とK⁺にr=0.948、nss-Ca²⁺とCa²⁺にr=0.968、nss-SO₄²⁻とSO₄²⁻にr=0.781、また、nss-Ca²⁺とNO₃⁻にr=0.763およびNO₃⁻とnss-SO₄²⁻にもr=0.857の相関関係(n=215)がみられた(図16)。

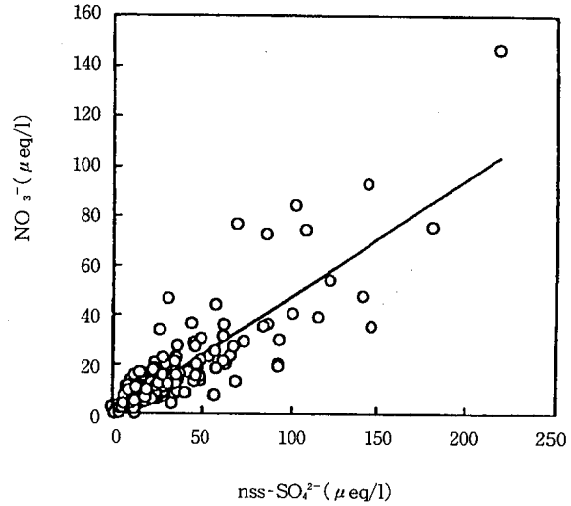


図16. nss-SO₄²⁻とNO₃⁻の相関関係(n=215)。

5. イオン組成成分の年降水量(meq/m²)

各年度毎の降水のイオン組成成分の年降水量を表2に示す。

表2. 各年度毎の降水のイオン組成成分降水量.

降水量	pH	EC	年降水量														
			H ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	nss-K ⁺	nss-Ca ²⁺	nss-Mg ²⁺	nss-Cl ⁻	nss-SO ₄ ²⁻	
1991年度	1906.8	5.24	85.8	10.9	896	18.0	25.4	99.3	221.3	1079	14.7	155	6.40	60.3	17.0	35.3	47.0
				10.9	20602	324	992	1992	2689	38298	909	7430	250	1209	206	1254	2260
1992年度	2002.2	5.93	33.8	2.4	333	31.3	9.9	48.2	75.2	392	14.7	71.3	2.82	33.7	-0.732	3.79	31.3
				2.4	7657	564	386	967	914	13903	914	3427	110	676	-8.89	135	1505
1993年度	1507.7	5.62	40.2	3.7	292	44.2	11.3	45.0	75.3	351	14.8	67.9	5.14	32.3	8.74	11.7	32.9
				3.7	6709	795	443	903	915	12478	917	3263	201	648	106	415	1579
1994年度	1689.8	5.37	21.7	7.2	153	38.2	6.3	25.2	30.6	172	15.8	54.7	3.08	18.5	-4.376	-6.76	36.2
				7.2	3530	688	248	505	372	6107	978	2627	121	371	-53.2	-240	1741
加重平均	1776.7	5.47	46.2	6.0	433	34.8	13.5	55.8	104	515	15.0	89.0	4.34	36.9	5.16	11.4	37.0
				6.0	9948	627	528	1118	1261	18292	929	4276	170	740	62.7	405	1780

nss: non sea salt (非海塩成分)

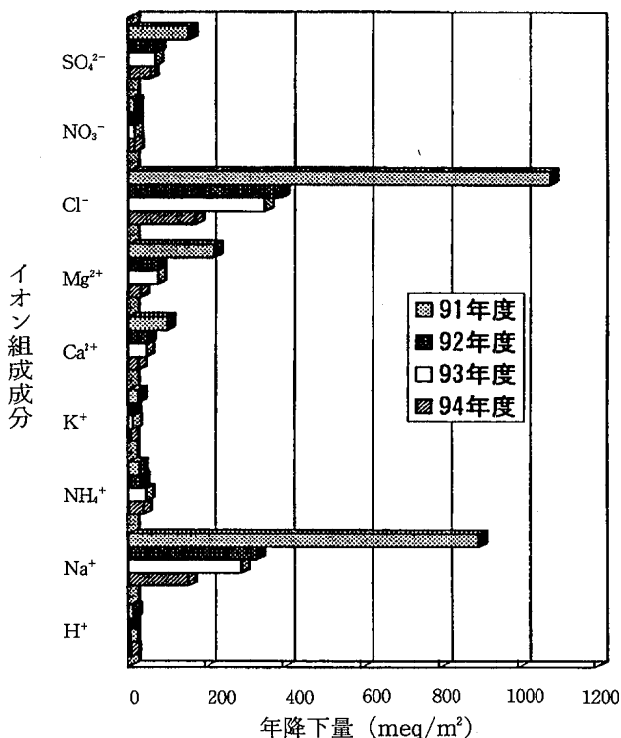


図17. 降水のイオン組成成分の年降下量.

(1) イオン組成成分の年降下量 (meq/m²)

降水のイオン組成成分の年降下量を図17に示した.

'91年は沖縄近海を9個の台風および熱帯低気圧が通過しており、特に9月の台風19号は日本列島を縦断し九州、中国、東北地方で人的被害を出した。このように、影響の大きい台風等が近海を通過したため、降水のイオン組成成分も海塩成分の影響を大きく受け、Na⁺(896meq/m², 20.6g/m²), Cl⁻(1079meq/m², 38.3g/m²), Mg²⁺(221meq/m², 2.7g/m²), SO₄²⁻(155meq/m², 7.4g/m²), Ca²⁺(99.3meq/m², 1.9g/m²), K⁺(25.4meq/m², 1g/m²) およびH⁺(10.9meq/m², 11mg/m²)の年降下量がみられ、その値は'92年の各イオン成分の約1.7倍から2.7倍であった。海塩の組成成分であるNa⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, Mg²⁺, Ca²⁺, K⁺について'91年から'94年までの年降下量推移をみると、'93年は'92年に比べ僅かながら減少し、'94年の年降下量は'92年の約50%程度である。ちなみに、沖縄近海を通過した台風との関連を調べてみると、'92年には3個、'93年には6個、'94年は4個の台風が通過していることから、降水への影響の度合いは通過した台風の個数だけではなく、台風の通過進路(太平洋側か、東シナ海側か)とともに規模等によっても作用が異なることが推察された。海塩組成成分以外のNO₃⁻の年降下量は'91年から'94まで15~16meq/m²(0.9~1g/m²)と、ほとんど年降下量推移に変動がみられない。しかし、NH₄⁺の場合は'91年から'93年にかけて増加を示し、'94年には

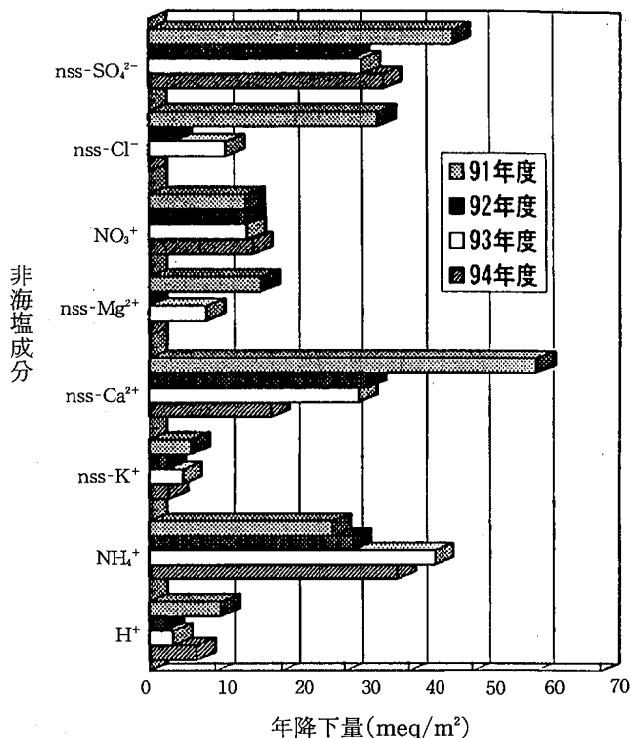


図18. 非海塩成分の年降下量.

'93年に比べ僅かながら減少がみられた.

(2) 非海塩成分の年降下量 (meq/m²)

図18に海塩組成成分の寄与を差し引いた場合の各年度毎の非海塩組成成分の年降下量推移を示した.

'91年はnss-SO₄²⁻(47.0meq/m², 2.3g/m²), nss-Cl⁻(35.3meq/m², 1.3g/m²), nss-Ca²⁺(60.3meq/m², 1.2g/m²), nss-Mg²⁺(17.0meq/m², 0.2g/m²), nss-K⁺(6.40meq/m², 0.3g/m²) およびH⁺(10.9meq/m², 11mg/m²)の年降下量が4年間の中で最も多く、特にnss-Cl⁻, H⁺, nss-Ca²⁺, nss-SO₄²⁻に顕著な降下量がみられる。一方、桜島の火山活動に伴うHClの放出量はSO₂放出量の約1/10程度と見積もられているが¹⁰⁾、火山灰が降水に洗浄された時の低pH降水のイオン成分としてはnss-Cl⁻の他にnss-SO₄²⁻, nss-Ca²⁺の寄与も多くなることが報告⁵⁾されていることから、'91年の降水は台風や低気圧によって運ばれた火山性由来のHClやH₂SO₄等の影響によるものと考えられた。'92年にはnss-SO₄²⁻(31.3meq/m²), H⁺(2.4meq/m²)とも'91年の年降下量の約67%, 22%まで減少がみられるが、'93年から'94年にかけて両イオンとも増加傾向を示すことから、pHへの寄与が推察された。nss-Ca²⁺とNH₄⁺の場合はnss-Ca²⁺が'91年から'94年にかけて減少しているのに対し、NH₄⁺の降水への寄与は'91年から'94年にかけて増加傾向を示しているものと思われた。nss-Cl⁻, nss-Mg²⁺, nss-K⁺の年降下量推移はほぼ似た増減傾向を示しており、特にnss-Cl⁻の降下

量は火山性の寄与によるものと推察されるが、 nss-Ca^{2+} および NH_4^+ の年降水量推移とともに検討する必要があると思われる。 NO_3^- の年降水量推移は'91年から'94年まで $14.7\text{meq/m}^2 \sim 15.8\text{meq/m}^2$ と各年度ともほぼ一定の降水量推移がみられることから地域的な影響が考えられた。

IV まとめ

'91年4月から'95年3月までに得られた降水のpH, EC, およびイオン組成, 年降水量について年度毎に検討した。

(1) 降水のpHは'91年が $4.20 \sim 7.49$ (平均 5.24), '92年は $4.33 \sim 7.43$ (平均 5.93), '93年は $4.64 \sim 7.32$ (平均 5.62), '94年が $4.36 \sim 7.50$ (平均 5.37)で, 4年間の平均は 5.47 であった。季節的には春から夏に高く, 秋から冬にかけて低くなる傾向を示した。

(2) ECは $2.7 \mu\text{S/cm} \sim 532 \mu\text{S/cm}$ の範囲に分布し, '91年の平均が $85.8 \mu\text{S/cm}$, '92年が $33.8 \mu\text{S/cm}$, '93年が $40.2 \mu\text{S/cm}$, '94年が $21.7 \mu\text{S/cm}$ であった。4年間の平均は $46.2 \mu\text{S/cm}$ で, 台風や低気圧等の影響を受けた降水のECは~数 $100 \mu\text{S/cm}$ までの範囲で変動した。

(3) 降水のイオン組成はその年の気象条件によって異なり, 特に台風や低気圧の進路および規模によって降水のイオン組成に大きな変化を与えた。また, 沖縄の降水の特徴として, 海塩組成成分の Na^+ , Cl^- が降水のイオン組成成分の約 $70\% \sim 80\%$ を占め, Na^+ , Cl^- , Mg^{2+} 間に海水組成とほぼ一致した相関係数が得られた。

(4) 沖縄近海を通過する台風や低気圧は地球的規模での大気の浄化作用の役割を果たすとともに, 汚染物質の長距離輸送の役割も担い, 沖縄の降水にも火山の影響が認められた。

V 参考文献

- 1) 酸性雨対策検討大気分科会 (1990) 酸性雨対策調査報告書.
- 2) 九州衛生公害技術協議会大気分科会 (1990) 平成元年度 九州・沖縄地方酸性雨共同調査報告書.
- 3) 九州衛生公害技術協議会大気分科会 (1991) 平成2年度 九州・沖縄地方酸性雨共同調査報告書.
- 4) 九州衛生公害技術協議会大気分科会 (1992) 平成3年度 九州・沖縄地方酸性雨共同調査報告書.
- 5) 九州衛生公害技術協議会大気分科会 (1994) 平成4年度 九州・沖縄地方酸性雨共同調査報告書.
- 6) 沖縄県. 平成6年度 環境白書. p13-14
- 7) 金城義勝, 金城里美 (1990) 降水のpH変動について. 第21回沖縄県公衆衛生学会総会発表抄録集. p54
- 8) 日本気象協会編. 1992年度版, 気象年鑑
- 9) 日本気象協会編. 1993年度版, 気象年鑑
- 10) 日本気象協会編. 1994年度版, 気象年鑑
- 11) 天気図日記, 1994年1月~1995年3月, 日本気象協会編
- 12) 金城義勝, 比嘉尚哉, 村野健太郎, 畠山史郎 (1994) 辺戸岬の雨水特性について. 第35回大気汚染学会講演要旨集: p387.
- 13) 海洋観測指針(気象庁編): 海水の化学分析(1975) 日本気象協会. p145
- 14) 平成3年度 全国酸性雨調査結果報告書, 平成5年3月 全国公害研協議会酸性雨調査研究部会
- 15) 早川友邦, 坂本和彦 (1989) 炭素成分の分析, 黄砂エアロゾルに関する調査研究: p21-29
藤田楨一火山活動と環境の酸性化. 大気汚染学会誌, (1993) Vol. 28(2): p72-90