

# 山 口 の 酸 性 雨

大前 貴之\*・今村 主税・伊原 靖二

## Acid Rain in Yamaguchi

Takayuki OHMAE\*, Chikara IMAMURA, Yasuji IHARA

### 要 旨

近年の急速な都市化による山口市の自然環境の変化の実態を解明すると同時に、自然環境と調和しながら山口市が県都として継続的な発展を実現するための方策を探ることを目的として、酸性雨を始めとするさまざまな環境情報の収集を開始した。本報では、2002年2月から2002年7月末までの6ヶ月の間に本学屋上で採取した降雨試料24点について測定した、pHと導電率を報告する。また一部の試料については、各種イオンの濃度を測定した結果も報告する。

### 緒 論

近年、環境問題に関する報道の多くは温暖化や環境ホルモンに集中し、あたかも酸性雨の問題は解決された過去の問題であるかのような印象さえ受ける状況になっている。また山口県においては、環境庁が全国規模で実施した酸性雨の調査結果<sup>1)</sup>が良好であったこともあってか、酸性雨の問題に対する市民レベルの目立った取り組みが見られない。しかしながら、「酸性雨」という名称が単に雨水のpHが5.6以下になるという現象をさしているのではなく人間のさまざまな活動にともなって排出される酸性汚染物質の大气循環による地球の酸性化を象徴的に表した名称であることを考えると<sup>2)</sup>、人間の生活がある限り「酸性雨」の問題は完全には解決することのできない宿題のひとつである。従って、この問題が他の多くの環境問題と同じく、環境と調和した人間の生活のあり方を確立するためには継続的に取り組まなければならない重要課題であることは明らかであろう。

幸いにして我々の住む山口市は県都であるにも関わらず過度の開発を免れている緑豊かな都市であり、

酸性雨問題を始めとする多くの環境問題はまだ危機的な状況にはない。しかしながら環境問題の多くはしばしば顕在化した時点では回復不可能な場合が多く、現在の状況に安住し続けることは座して死を待つに等しい行為と言える。実際、図1に示したように本学の構内でも酸性雨水柱の生成が観察されており、静かにではあるが着実に我々の生活環境は悪化していると考えられる。

そこで我々は、今後も県都である山口市が環境と調和した発展を実現するための論理的かつ現実的な方策を探ることを目的に、自然水の水質、騒音、電磁波、雨水、生態系などの、基礎的な環境情報の資料を収集する総合的な調査を本年から開始した。本報では、雨水の調査結果と簡単な考察を報告する。

なお、本調査は今後も継続的に実施する予定であり、複数年の資料を基に考察することで、山口市ひいては地球上のすべての都市の、環境と調和した継続的発展の現実的な方策が策定できるものと期待される。

### 試料の採取方法と測定法

降り止んでから次の降り始めまでの間隔が6時間未満の降雨は1回の降雨とし、本学（山口市桜島3-2-1）の屋上においてレインゴーランドAR-8Ⅱ（（株）堀場製作所）を用いて雨水を採取した。採取した雨水のpHと導電率は、それぞれTwin pH計 B-212（（株）堀場製作所製）とTwin 導電率計 B-173（（株）堀場製作所）を用いて測定した。また、採取試料の一部について実施した各種イオン濃度の測定には、パーソナルイオンアナライザPIA-1000（（株）島津製作所）を用いた。

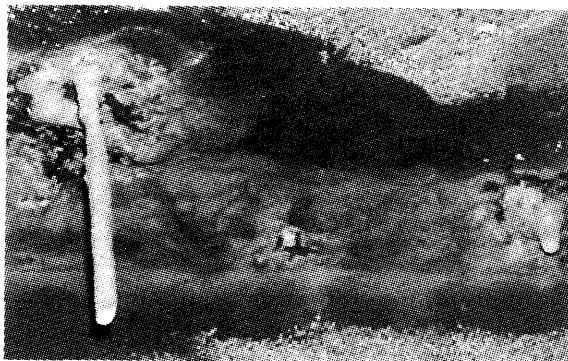


図1 山口県立大学の渡り廊下にできた酸性雨つらら

測定結果と考察

全試料の各cupごとのpHと導電率、またさらに平均pHとcup 7以内のpHの平均値 (pHini) と採水量等の結果を表1に示した。ただし、採水量に換算して約1mmに相当する各cupごとのイオン濃度の測定を念頭に置いて調査を実施したため、導電率の平均値<sup>3)</sup>の測定は行わなかった。

表1の採水量を換算すれば解るように、我々が測定した雨水の量は降水量に換算すると415.8mmであり、これは今回の調査期間中の総降水量<sup>4)</sup>の43.2%に相当する。このように、試料の総降水量に対する比率が50%に充たなかったことの原因として、1) 試料採取に用いたレインゴーランドの自動フタ開け器が少量の降雨では作動しないこと、2) 1回に採取できる雨水の量が約28mm<sup>5)</sup>と限られていること、3) 試料採取期間中の台風によって装置が故障したこと、等が考えられ、今後、調査結果の信頼性を増すため

に採取方法の改良を検討することとした。また、総降水量に対する試料の比率が低かったため、H<sup>+</sup>降下量に関するデータの信頼性は著しく低いものであると考え、考察の対象とはせず参考資料として表中に掲載するにとどめた。しかしながら、雨水中の化学成分濃度はウォッシュアウトによって指数関数的に減少すること<sup>6)</sup>から、平均pH、pHini、cup1からcup 7までの各pHと導電率およびイオン濃度データは調査期間中の降雨の化学的性質の傾向を知る上で有意のものであると考え、以下、各項目ごとに簡単な考察を行うこととした。

山口市における降雨のpH 表1に示したデータをもとに計算した平均pH、pHiniおよびcup 1のpHの各月ごとの平均値を図2に示した。今回の報告は半年間という短期間のデータによるものであるため、各指数の顕著な季節変動はどのグラフからも帰納できなかった。しかしながら、春から夏にかけて、どの

表1 2002年2月から7月の間に山口市に降った雨の酸性度と導電率の測定結果

		cup1	cup2	cup3	cup4	cup5	cup6	cup7	cup8以降	平均pH	pHini	採水量 (ml)	H <sup>+</sup> 降下量 (μg/cm <sup>2</sup> )
試料1	pH	4.8	4.9	4.9	*	*	*	*	*	4.85	4.85	12	0.003390
(02/2/21)	導電率 (μS/cm)	21	19	18	*	*	*	*	*				
試料2	pH	4.6	4.5	4.9	5.3	5.1	5.1	5.2	5.1	4.91	4.86	47	0.011565
(02/2/27)	導電率 (μS/cm)	26	28	16	10	11	7	11	9				
試料3	pH	4.5	4.1	4.1	4.1	3.9	3.8	4.0	5.3	4.52	4.03	145	0.087579
(02/3/5)	導電率 (μS/cm)	49	49	57	59	67	71	77	11				
試料4	pH	4.2	4.3	4.4	4.3	4.5	4.6	4.6	4.6	4.55	4.39	140	0.078915
(02/3/14)	導電率 (μS/cm)	72	38	34	38	24	16	14	21				
試料5	pH	3.9	4.3	4.4	4.8	4.9	*	*	*	4.33	4.33	30	0.028064
(02/3/26)	導電率 (μS/cm)	61	25	18	10	7	*	*	*				
試料6	pH	4.5	4.5	4.6	4.5	4.6	4.5	4.9	4.7	4.66	4.57	148	0.064758
(02/3/29)	導電率 (μS/cm)	48	32	20	21	19	20	9	13				
試料7	pH	4.5	4.2	4.1	4.1	4.3	4.2	4.4	4.4	4.35	4.24	149	0.133112
(02/4/6)	導電率 (μS/cm)	36	36	36	43	22	24	20	18				
試料8	pH	5.3	5.2	5.2	4.6	4.5	4.9	4.8	4.3	4.40	4.83	148	0.117840
(02/4/15)	導電率 (μS/cm)	8	5	7	15	15	8	10	35				
試料9	pH	4.4	4.2	4.2	4.4	4.3	4.4	4.4	4.7	4.55	4.32	147	0.082860
(02/4/16)	導電率 (μS/cm)	46	52	52	47	45	40	37	16				
試料10	pH	5.9	5.7	5.4	5.1	5.2	5.4	5.5	5.1	5.18	5.39	125	0.016517
(02/4/20)	導電率 (μS/cm)	7	3	3	5	5	4	4	7				
試料11	pH	*	*	*	*	*	*	*	4.3	4.3	*	105	0.105249
(02/4/23)	導電率 (μS/cm)	*	*	*	*	*	*	*	23	23			
試料12	pH	4.5	4.2	4.1	4.1	4.4	4.2	4.1	4.6	4.34	4.20	72	0.065821
(02/4/30)	導電率 (μS/cm)	27	40	44	45	25	32	36	13				
試料13	pH	4.0	4.0	4.1	4.2	4.1	4.1	4.2	4.7	4.27	4.10	67	0.071962
(02/5/10)	導電率 (μS/cm)	28	38	32	26	32	32	21	10				
試料14	pH	5.2	5.4	5.1	5.0	5.3	5.4	5.5	5.0	5.05	5.24	148	0.026381
(02/5/15)	導電率 (μS/cm)	7	3	5	5	3	0	0	5				
試料15	pH	4.1							4.10	4.10		1	0.001589
(02/5/16)	導電率 (μS/cm)	58											
試料16	pH	3.6							3.60	3.60		2	0.010048
(02/5/22)	導電率 (μS/cm)	98											
試料17	pH	4.1	4.1	4.1	3.9				4.06	4.06		20	0.034839
(02/5/28)	導電率 (μS/cm)	41	32	27	43								
試料18	pH	3.8							3.80	3.80		2	0.006340
(02/6/10)	導電率 (μS/cm)	66											
試料19	pH	3.5	3.9	3.9	3.6	4.1			3.75	3.75		28	0.099584
(02/6/10)	導電率 (μS/cm)	96	33	41	63	23							
試料20	pH	4.6	4.6	4.2	4.4	4.6	4.0	3.8	4.5	4.38	4.20	126	0.105051
(02/6/20)	導電率 (μS/cm)	19	13	20	15	9	23	37	11				
試料21	pH	4.4	4.6	4.6	4.6	4.8	4.9	4.9	4.5	4.54	4.65	148	0.085367
(02/6/24)	導電率 (μS/cm)	31	9	7	6	5	5	5	7				
試料22	pH	4.2	4.4	4.5	4.6	4.9	5.0	5.0	4.8	4.52	4.56	148	0.089391
(02/6/29)	導電率 (μS/cm)	26	12	8	7	3	3	3	7				
試料23	pH	4.4							4.40	4.40		6	0.004777
(02/7/8)	導電率 (μS/cm)	15											
試料24	pH	3.6	3.5	3.7	3.8	3.9	3.9	3.9	3.6	3.64	3.70	115	23.0mm
(02/7/13)	導電率 (μS/cm)	67	54	29	22	20	19	19	36				

グラフにおいてもpHの値が漸減する傾向が明らかに見られた。この傾向は、黄砂現象など<sup>7)</sup>でよく知られているように中国大陸からのアルカリ成分の飛来によるものであると考えられる<sup>8)</sup>。このように黄砂などのアルカリ成分の飛来によって雨水の酸性度が中和されることで酸性雨による種々の被害が軽減されることについては先日の新聞報道<sup>9)</sup>などでもとりあげられたが、山口県には秋吉台などアルカリ成分を土壤中に豊富に含むと考えられる地域があり、環境庁の調査結果に現れたように山口県の雨水のpHの値が高かったことと山口県の土壌の性質との間に因果関係が存在するか否かを明らかにすることは興味深い検討課題である。そこで、今後は調査範囲を拡大して、山口県の土壌の性質と酸性雨のpHの値との関連も検討することとした。

さて、山口市における降雨のpHの値の季節変動については今後の調査に期待することとして、次にpHの値そのものについて注目してみよう。ウォッシュアウトによって大気中の汚染物質の多寡をもっともよく反映していると考えられるcup1の平均値を始めとして、すべての平均値が酸性雨の判定基準とされる5.6を下回っていることが表1から解る。しかしながら、我々の実実験として、山口市周辺で深刻な酸性雨被害を目にすることは少ない。この経験と測定データとの乖離の原因としてまず考えられることは、酸性度の強い雨が降り始めに降っても酸性汚染物質の量が少ない場合には降り終わりにはウォッシュアウトによって清浄になった雨によって植物などの表面が洗い流され、その結果深刻な酸性雨被害が顕在化しないままになっているという場合が想定される。実際、後に見るように導電率の測定結果を見ると、降り始めから数mmで山口市における降雨は清浄な雨と判定される水準になることから、上述の想定はもっともらしい原因のひとつの候補と考えられる。しかしながら、cup1のpHの測定結果から容易に想像できるように、山口市においても酸性汚染物質による大気汚染は確実に進行しており、ここで想定されるようにその量が少ない場合でも酸性霧や環境ストレス<sup>10)</sup>などによって、今後深刻な森林被害などが顕在化する可能性がある事を忘れてはならない。現在、酸性霧の調査は本プロジェクトの対象外となっているが、今後、酸性霧の簡易測定法の考案を進め、酸性霧の実態とこれによる環境被害も調査項目に含めて行く予定である。さらにもう一つ、この経験と調査結果の乖離の考え得る原因として、緩衝能の小さい雨水のpHを従来から用いられている測定法で測定したために真値よりも小さな値が測定されたという場合が想定できる。本調査でも用いたガラス電極を用いるpHの測定法が雨水試料のように緩衝能の低い試料に対して不十分なものであることは以前から知られているが<sup>11)</sup>、これに代わる測定法と

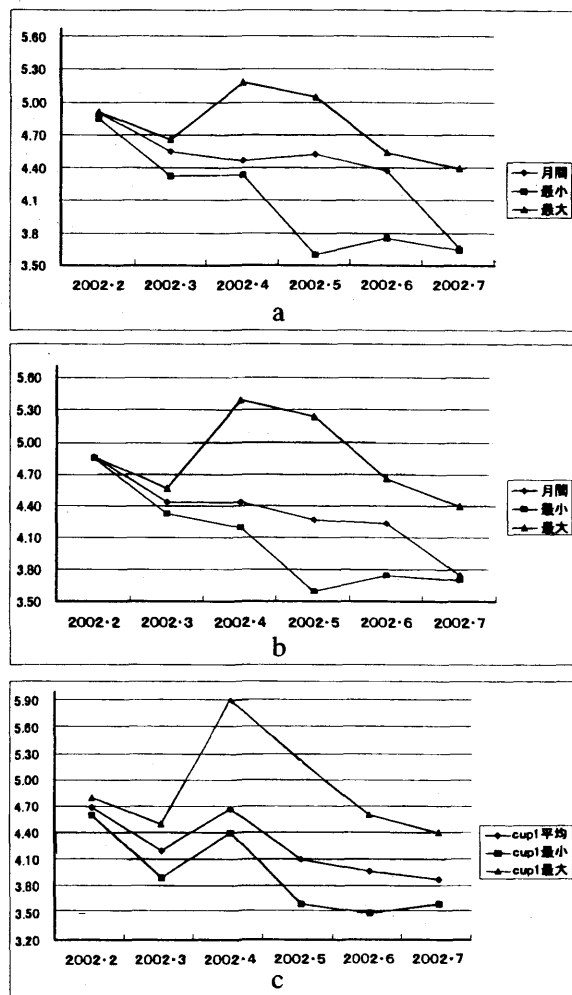


図2 山口市に降った雨水の各月ごとの酸性度  
a: 平均値, b: pHini, c: cup1の平均値

してはフローpH測定法のような高価な装置を用いる方法しか現在知られておらず、低緩衝能水溶液の簡易で信頼性の高いpH測定法の確立は環境化学における重要な研究課題に今後なると考えられる。

**山口市における降雨の導電率** 前節でもすでに指摘したとおり、酸性雨の実態調査においてはpH測定と同時に導電率の測定を行うことが望ましいとされており、本調査でもこれに従って各cupごとの導電率を測定した。表1に示した測定結果から、まず、降水量に換算して8mm以上の試料のcupごとの導電率の変化を図3に示した。これから解るように、ほとんどの試料では降雨の進行に従って導電率の値が低下する。この現象は表1から解るとおりpHにおいてもおおむね成立しており、いわゆるウォッシュアウトによるものであると考えられる。この効果によって、降水量に換算して約5mmの降水があった場合にそれ以後の雨水、すなわちcup6以後の試料の導電率は清浄な雨とされる数 $\mu\text{S}/\text{cm}$ の値になったが、ウォッシュアウトの効果は風による酸性降下物の移動や降水強度の影響<sup>6)</sup>を大きく受けるため、図

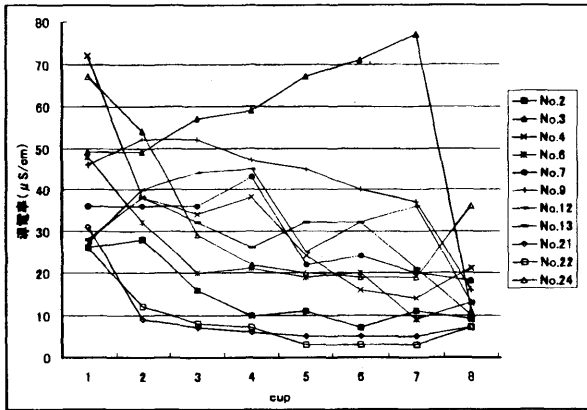


図3 降雨の進行に伴う導電率の変化

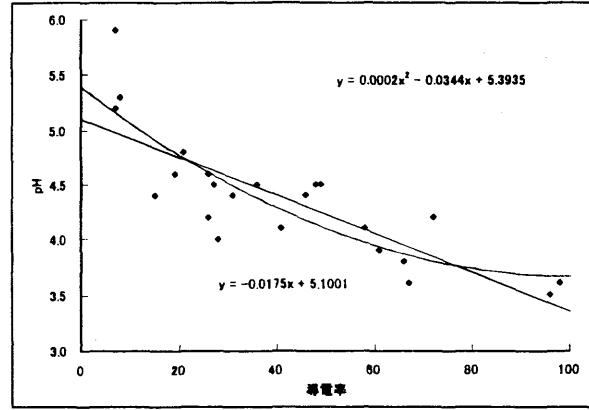


図4 酸性度と導電率の相互関係

3から一般的な傾向やその傾向からのずれの原因をこれ以上議論することは困難であった。今後、風向や風力のデータも採取し上述の効果を考慮したシミュレーションと観測データの対比から、導電率やpHの経時変化に及ぼす主要因の抽出を試みる予定である。

次に、pHの値と同様に導電率の値でもcup 1の値が大気汚染の程度をもっともよく反映していると考えられるので、全試料のcup 1の導電率の測定データに注目してみた。すると、表1に示したデータから、山口市における降雨の降り始めから約1mmの時点での試料の導電率は数10 $\mu$ S/cmであり、大都市圏の雨水の導電率の値<sup>8)</sup>と比較して1桁小さいことが解った。これは本調査期間中の山口市における大気汚染の程度が都市部に比べて軽度であることを示唆するものと考えられる。しかしながら、測定法に原理的な不備があるとはいえpHの測定値は前節で見たように動植物に直接被害を与えかねないほどにまで低下しており、環境との調和を前提とした開発を実践すると同時に市民のライフスタイルを環境調和型に改革するための参加型の環境教育を早急に展開することを怠ると、さまざまな環境ストレスを引き金にして一気に生活環境の悪化が進行することも予想される。

最後に、雨水中に含まれるイオン種が季節ごとに変動することから、一般的には成立しないと考えられている導電率とpHとの関係を図4に示した。調査期間が半年間と短期間であったことと導電率の測定データの双方から示唆されるように、雨水中のイオン種の量が少なくその種類も比較的均一であったためか、我々のデータでは導電率とpHの値の間には図4に示したように一次または二次曲線によって記述できる明らかな関連が見られた。現在も継続中の観測データも含めて、今後、年間または季節ごとの雨水の導電率とpHの関係が明らかになれば、緩衝能の小さな雨水試料のpHを直接測定することなく導電率の測定値から推定できることになり、本知見は酸性雨観測の有用な手法の開発につながる可能性を秘め

たものであると考えられる。

山口市における降雨に含まれるイオン種 本調査期間中の全試料の中で、イオン種の検出を試みた5試料の各種イオン濃度を表2に、また、このうちイオンバランス (IB) がほぼ1であった試料の相対的なイオン分布を図5にそれぞれ示した。山口市の大気汚染の程度は導電率の測定値から示唆されるようにまだ軽微なものであると考えられるが、表2のSO<sub>4</sub><sup>2+</sup>とNO<sub>3</sub><sup>-</sup>の等量比 (S/N) の値が試料24をのぞいて1程度であることや図5に示したイオン分布のパターンの類似性から、都市型の大気汚染<sup>12, 13)</sup>が山口市において進行していることが推定できたことは興味深い。このことは、周辺地域に工業地帯や大規模な農業地帯を持たない山口市における大気汚染の主要な原因が人や物の移動と市民生活にともなうエネルギー消費にあることを示唆しており、道路交通網や高速通信網の整備といった都市開発と同時進行で公共交通の整備や地産地消運動の推進などを通してエネルギー消費の抑制をはかることが、山口市の美しい風土をひいては健康的で快適な市民生活を守るための現下の急務であると考えられる。このようなエネルギー消費抑制のための運動は一見地域活性化の流れに逆行しているようにも思われがちだが、実際には商店街の活性化、休耕農地の有効利用および特産物による観光客数の増加などの効果が期待される施策であり、県都山口の活性化策のひとつの選択肢として大いに検討されるべき課題であると考えられる。

なお、雨水中に含まれるイオンの種類と濃度が解れば導電率は理論的に予測可能であることが知られており<sup>13)</sup>、簡単なイオン種同定の方法と濃度測定の方法が確立できれば、測定値に不確定要素の多い酸性度の測定を行うことなく酸性雨の市民レベルでのモニタリングが可能になると期待できることから、現在、試験紙を用いたイオン種の種類と濃度の簡易測定法の開発を検討中である。

表 2 山口市に降った雨に含まれるイオン種の濃度

イオン種	μ eq/l		イオン種	μ eq/l			
	cup1	cup8		cup1	cup8		
試料13	Cl	79.371	0.700	試料21	Cl	77.856	0.282
	NO <sub>3</sub>	28.046	5.803		NO <sub>3</sub>	30.715	5.075
pH(cup1)	SO <sub>4</sub>	61.959	10.872	pH(cup1)	SO <sub>4</sub>	54.060	5.775
4.0	nss-SO <sub>4</sub>	57.138	10.281	4.4	nss-SO <sub>4</sub>	49.299	4.908
pH(cup8)	NH <sub>4</sub>	7.811	8.620	pH(cup8)	NH <sub>4</sub>	66.236	4.751
4.7	K	6.138	0.000	4.5	K	6.844	0.000
	Na	40.126	4.915		Na	39.626	7.221
	Ca	22.282	0.000		Ca	20.959	0.000
	nss-Ca	20.532	0.000		nss-Ca	19.232	0.000
	IB	1.041	1.927		IB	1.067	3.916
	S/N	2.209	1.874		S/N	1.760	1.138
試料14	Cl	45.235	0.471	試料24	Cl	12.983	7.613
	NO <sub>3</sub>	6.877	3.471		NO <sub>3</sub>	29.330	5.685
pH(cup1)	SO <sub>4</sub>	9.818	4.345	pH(cup1)	SO <sub>4</sub>	130.076	46.165
5.2	nss-SO <sub>4</sub>	8.478	3.358	3.6	nss-SO <sub>4</sub>	123.536	44.671
pH(cup8)	NH <sub>4</sub>	4.707	4.269	pH(cup8)	NH <sub>4</sub>	55.576	14.292
5.0	K	0.000	0.000	3.6	K	7.146	0.000
	Na	11.161	8.217		Na	54.442	12.436
	Ca	0.000	0.000		Ca	88.118	0.000
	nss-Ca	0.000	0.000		nss-Ca	85.745	0.000
	IB	0.358	2.713		IB	2.648	4.674
	S/N	1.428	1.252		S/N	4.435	8.120
試料20	Cl	54.845	1.077				
	NO <sub>3</sub>	24.174	4.125				
pH(cup1)	SO <sub>4</sub>	29.712	13.849				
4.6	nss-SO <sub>4</sub>	26.674	12.396				
pH(cup8)	NH <sub>4</sub>	12.529	7.867				
4.5	K	0.000	0.000				
	Na	25.281	12.097				
	Ca	36.344	0.000				
	nss-Ca	35.242	0.000				
	IB	0.913	2.708				
	S/N	1.229	3.357				

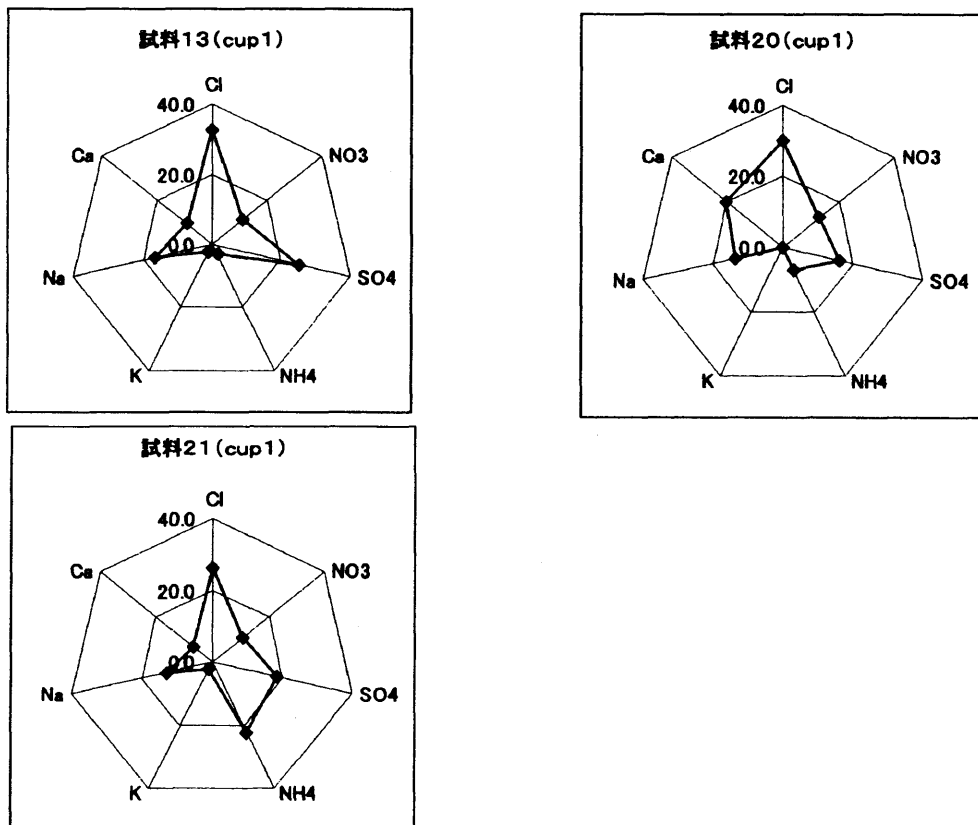


図 5 山口市の雨水に含まれるイオン種の分布

## 結 論

降水の酸性度、導電率およびイオン種の種類と濃度の測定結果から、山口市の大気汚染の程度は危機的状況にはないものの都市型の大気汚染パターンを示しており、今後、エネルギー消費抑制のための有効な施策の立案及び実施を急がなければならないことが明らかになった。

本調査を実施するに当たり、本学、生活環境科学研究室の卒業研究生の方々には雨水中のイオン濃度分析等の協力を賜りました。また、本調査はイオングループ環境財団の助成によって実施されたものであることをここに記して感謝します。

## 参考文献

- 1) [http://www.adorc.gr.jp/jpn/acid\\_f.html](http://www.adorc.gr.jp/jpn/acid_f.html).
- 2) (社)日本化学会・酸性雨問題研究会編、原 宏、“身近な地球環境問題”、コロナ社 (1997) p.3。
- 3) 酸性雨調査プロジェクト研究会編、国重 誠之、“みんなのためす酸性雨調査大作戦”、合同出版 (2002) p.35。
- 4) 下関地方気象台、山口県気象月報、(2)、7 (2002)、(3)、7 (2002)、(4)、7 (2002)、(5)、7 (2002)、(6)、7 (2002)、(7)、7 (2002)。
- 5) (株)堀場製作所、“酸性雨測定キットKITpH 5.6II測定マニュアル”。
- 6) (社)日本化学会・酸性雨問題研究会編、田中 茂、“身近な地球環境問題”、コロナ社 (1997) pp.18-24。
- 7) 野村健太郎、“酸性雨と酸性霧”、裳華房 (1993)、pp.79-80。
- 8) 酸性雨調査プロジェクト研究会編、山下 雅文、“みんなのためす酸性雨調査大作戦”、合同出版 (2002) pp.50-68。
- 9) 毎日新聞、2002年5月10日、東京朝刊；  
<http://www.mainichi.co.jp/eye/china/jitsuzo/1/07.html>。
- 10) (社)日本化学会・酸性雨問題研究会編、森川 靖、“身近な地球環境問題”、コロナ社 (1997) pp.132-141。
- 11) 佐竹 健一編、松本 光弘、“酸性雨研究と環境試料分析”、愛智出版 (2000) pp.9-27。
- 12) 片岡 正光、竹内 浩士、“酸性雨と大気汚染”、三共出版 (1998) pp.48-53。
- 13) 酸性雨調査プロジェクト研究会編、中根 周歩、中村 孝夫、“みんなのためす酸性雨調査大作戦”、合同出版 (2002) pp.69-79。