

短報 酸性雨調査 40 年の調査手法等の変遷について

小野勝義（横浜市環境科学研究所）

History of investigation method etc. of acid rain research 40 years

Katsuyoshi Ono (Yokohama Environmental Science Research Institute)

キーワード：酸性雨、鉛直分布、生成機構、屋外器物、長期モニタリング

要 旨

横浜市環境科学研究所における酸性雨調査は、開始から 40 年の節目を迎えた。これを機に、これまでの調査内容を振り返り、その経緯と変遷について整理した。主な調査としては、気球を用いた大規模な観測、酸性降下物の鉛直分布調査、器物・建造物への影響評価などが行われた。現在継続している酸性雨の長期モニタリング調査では、大気中の二酸化硫黄濃度の低下に伴い、降雨の pH 値が上昇する傾向（酸性度の緩和）が確認されている。このことから、本市が取り組んできた大気汚染物質に関する環境対策が、酸性雨の改善に寄与していると推察される。

1. はじめに

横浜市環境科学研究所では、1984 年に、酸性雨（大気中の二酸化炭素が、水に十分溶け込んだ場合の pH が 5.6 であるため、pH5.6 が酸性雨の一つの目安）の実態調査や生成機構の解明を目的とした調査研究を開始し、これまでに、酸性降下物の鉛直分布や雲底部（雲粒と雨滴）の化学組成、酸性雨の種類（pH 変化のパターン）、器物・建造物への影響、長期モニタリングによる pH の経年変化、降水成分など、いくつもの知見について報告を行ってきた。現段階では、我が国における酸性雨による生態系への影響は、必ずしも明確とはなっていないが、一般に酸性雨による土壌・植生、陸水等に対する影響は、長い時間を経て現れると考えられているため、酸性雨のモニタリング調査を長期に渡り継続している。

このたび、当研究所における酸性雨調査の開始から、40 年の節目を迎えたことから、本報告は、これまでの調査内容を振り返り、調査手法や調査結果について、その経緯等の変遷調査を行い、報告するものである。

2. 方法

これまでの研究成果をまとめた当研究所の調査報告書類^{1),2)}を基に、その調査期間や手法、結果について、その経緯等の変遷調査を行った。

この変遷調査の対象とした文献と、その調査結果（以下に述べる「結果小見出し」）の対比一覧を表 1 に示す。

3. 結果

3-1 酸性降下物の鉛直分布調査

1984 年から開始された平面分布調査と並行して、1985～1989 年に、横浜駅周辺の高層ビルの屋上を利用した酸性降下物（湿性+乾性降下物）の鉛直分布調査が行われた。その結果、地上付近の pH の方が、高層（約 100 m 上空）より高い傾向（酸性度が弱い傾向）にあることがわかった。

表 1 変遷調査の対象文献一覧

変遷調査の対象文献	本報告書の「結果小見出し」
酸性雨に関する調査研究報告書 III-4	3-1 酸性降下物の鉛直分布調査
酸性雨に関する調査研究報告書 VI-1～3	3-2 雲粒および雨滴に係る調査
酸性雨に関する調査研究報告書 IV-2	3-3 酸性雨の種類調査
酸性雨に関する調査研究報告書 (II)-酸性雨による器物影響-IV-3～6	3-4 酸性雨によるリーチング試験
酸性雨に関する調査研究報告書 (II)-酸性雨による器物影響-V-1～4	3-5 酸性雨による屋外器物等への影響調査
横浜市環境科学研究所報 第28号、第32号	3-6 長期モニタリング調査

また、主な酸性降下物量は、周囲のビル等の遮蔽物の影響を受け、地上付近の方が高層より少ない傾向を示した。ただし、Ca²⁺については、地上付近の方が多いという結果が得られている。

ここで、Ca²⁺が、土壌由来、道路ダスト由来のいずれに起因しているのか、濃縮係数（EF 値）を用いて検討を行った。EF 値は、各成分とアルミニウム成分の組成比を利用して、由来寄与率を求める手法で、土壌からの影響をみる際によく用いられる。

その結果、土壌由来ではなく道路ダスト由来の成分であると推測されたことから、地上付近の pH の方が、高層より高くなる原因（酸性度が弱くなる原因）は、自動車走行に伴う影響、即ち、道路ダストを起源とする Ca²⁺の影響と考えられた。

3-2 雲粒および雨滴に係る調査

大掛かりな機器を使用した調査として、1986～1987 年の梅雨期に、酸性雨の生成機構を解明するため、係留気球を用いて雲底部の雲粒や雨滴などの採取・分析の調査を行った。

その結果、同一高度の雲粒と雨滴の成分を比較すると、雲粒の方が、主な水溶性成分濃度が高く、酸性度は強いことがわかった。

雨滴は、雲粒が成長し落下することから、雨滴中の濃度は、それより上の雲粒の濃度ということになる。したがって、同一高度の雲粒と雨滴において、雲粒の濃度の方が高かったということは、雲の中では、底部の雲の方が上層部よりも汚染の割合が大きいことを示している。

また、雲底部の雨滴と地上の雨滴とを比較すると、主な水溶性成分の濃度は、ほぼ等しかったことから、地上での雨滴に含まれている物質の多くは、雲の中で取り込まれていることがわかった。地上で採取した雨の酸性化は、雲の中で概ね完了していることを示している。

一方、 NH_4^+ や Ca^{2+} は、多くが雲底部から地上までの間に取り込まれており、その結果、地上の雨滴の方が、雲底部の雨滴より pH が高くなる傾向が見られた。このことは、前述の「鉛直分布調査」の傾向と合致している。

3-3 酸性雨の種類調査

1987～1989年には、都市域に降る酸性雨の実態を明らかにするため、降水を降雨量 1 mm ごとに分画採取・分析して、その成分の変化の傾向を調べた。

その結果、横浜市に降る酸性雨は、その降水の pH の変化の傾向から、次の 6 つのパターンに分類することが出来た。

- ①「降り始めの pH は低く、その後上昇」
 - ②「降り始めの pH は高く、その後低下」
 - ③「降り始めの pH は一旦下がり、その後上昇」
- などの上昇や下降がみられる 3 種類と、
- ④「降り始めから pH はほぼ 5 以上」
 - ⑤「降り始めから pH はほぼ 4 から 5 の間で変動」
 - ⑥「降り始めから pH はほぼ 4 程度」
- などの pH が横ばいとなる 3 種類、合計 6 種類となっている。

雨の降り方や降水強度、気象要素などの影響により、必ずしも雨の降り始め（初期降雨）の pH が低く、その後上昇するといったパターンになるとは限らず、複数の pH 変化パターンが存在することがわかった。

出現頻度としては、①の「降り始めの pH は低く、その後上昇」するパターンと、⑤の「降り始めから pH がほぼ 4 から 5 の間で変動」するパターンが、それぞれ約 3 割を占め、残りの 4 つのパターンは、それぞれ 1 割程度を占めていた。

3-4 酸性雨によるリーチング試験

酸性雨による歴史的文化的財や建造物への影響が懸念されていたことから、1993～1997年には、銅やブロンズ（青銅）、大理石、コンクリートなどの試験板に酸性雨を滴下するリーチング試験が行われた。

その結果、銅板からは銅が、ブロンズ板からは銅、亜鉛、鉛が溶出され、その溶出量はいずれも、酸性雨の滴下量と非常に良い直線関係が示された。なお、銅板の表面には緑青色の塩基性硫酸銅が、ブロンズ板の表面には緑青色の塩基性硫酸銅と白色の非結晶スズの析出が確認された。

また、大理石板からは Ca^{2+} が、コンクリート板からは Ca^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} が溶出され、このうち、 Ca^{2+} の溶出量については、酸性雨の滴下量と非常に良い直線関係があることがわかった。

3-5 酸性雨による屋外器物等への影響調査

1993年から開始された酸性雨によるリーチング試験と並行して、1993～1997年に、銅葺屋根やブロンズ像、コンクリート建造物など、実際の屋外の器物・建造物が酸性雨の影響をどのように受けているのか調査を行った。

その結果、酸性雨により、銅葺屋根やブロンズ像から銅が溶出されていることが確認された。また、銅葺屋根直下の土壌の銅濃度が非常に高くなっていることから、屋外の銅製器物は、酸性雨により銅が溶け出し、周辺の土壌を汚染していると推測された。

さらに、ブロンズ像の表面が、雨だれに沿って青白く筋状に変色する、いわゆる「涙現象」、「汗かき現象」が各地で観察されたことから、この青白色物質を分析したところ、銅やスズ、鉛が主成分であることがわかった。前述の「試験板による酸性雨の影響調査」の結果などと総合的に考察した結果、ブロンズ像にみられた青白色の変色は、酸性雨によってブロンズ像から銅などが溶出し、白色の非結晶性スズや鉛が表面に析出したことにより青白色を呈したと考えられた。

また、高速道路の高架橋や橋げた、ビルの地下通路、トンネルなどのコンクリート建造物に関しては、つらら状の物質が見かけられるようになったため、当該物質の調査を行っている。このつららは、コンクリートの亀裂面に沿って生成しており、成分を分析した結果、主成分は炭酸カルシウムで、その他に微量の SO_4^{2-} 、 NO_3^- が含まれていることから、その生成は、まず亀裂から大気中の炭酸ガスが侵入してコンクリートが炭酸化され、さらに酸性雨がしみこんでこれを溶解したため生成したものと推測している。

3-6 長期モニタリング調査

一般に酸性雨による土壌・植生、陸水等に対する影響は、長い時間を経て現れると考えられているため、酸性雨長期モニタリング調査を、1984年から継続して行っている。その結果（pH 経年変化）を図 1 に示す。

この pH の経年変化について、回帰直線を求めたところ、決定計数（ R^2 ）が 0.5 以上と高いことから、回帰式が実際のデータによく当てはまっていることが分かる。

なお、この回帰式の傾きは、正の値となっており、経年的に pH は上昇傾向（酸性度が弱まっている傾向）にあることが示された。

また、酸性雨は、大気汚染物質である二酸化硫黄（ SO_2 ）などの酸性物質が、雲や雨に溶け込むことで、酸性度が強まる現象であり、当研究所によるこれまでの調査結果からも、酸性雨の主な原因成分として硫酸イオン（ SO_4^{2-} ）が挙げられている³⁾ことから、横浜市内における大気環境中の二酸化硫黄濃度（ SO_2 ）の経年変化⁴⁾とその回帰直線を求め、その結果を図 2 に示す。

この回帰直線の決定計数（ R^2 ）は 0.5 以上と高いことから、降雨 pH と同様に、回帰式が実際のデータによく当てはまっていることが示された。

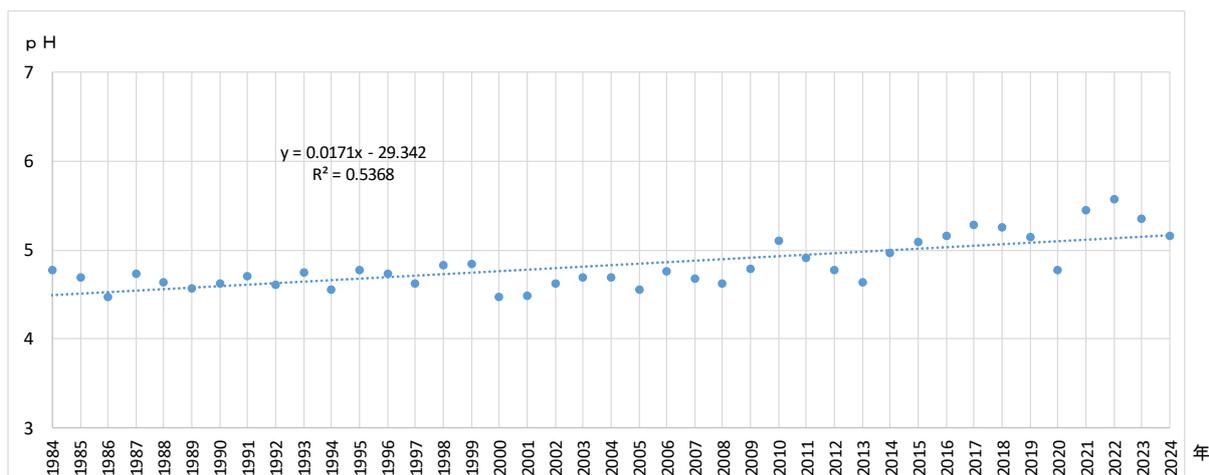


図1 pHの経年変化

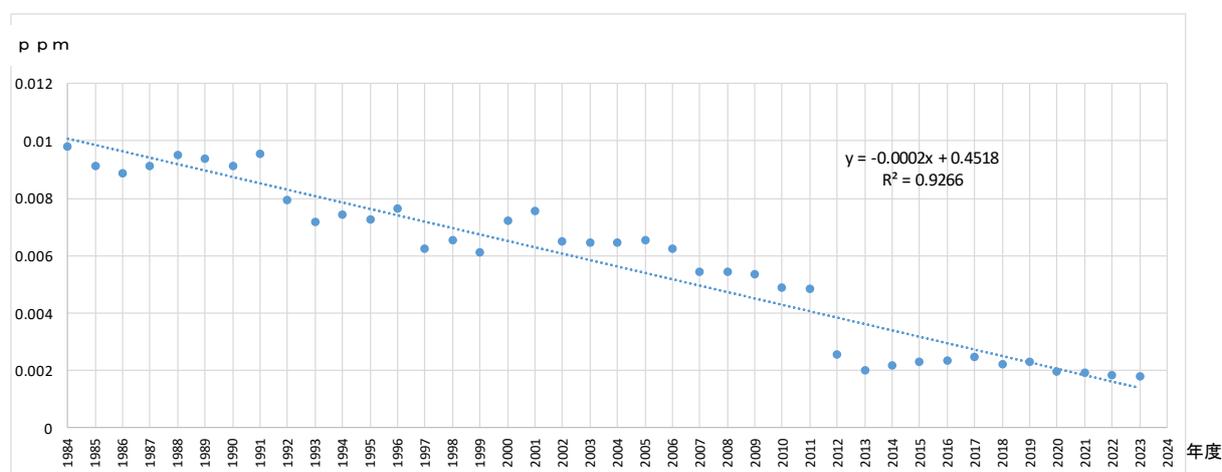


図2 二酸化硫黄濃度の経年変化

本市環境対策の寄与もあり、その回帰式の傾きは、負の値を示し、経年的に二酸化硫黄濃度（SO₂）は低下傾向にあることがよく分かる。

この二酸化硫黄濃度の低下傾向とともに、降雨 pH の上昇傾向（酸性度が弱まっている傾向）が見られることから、大気汚染物質に係る本市の環境対策が、酸性雨改善に貢献していると推察される。

4. おわりに

現状の降水は、pH5.6（気象庁等が自然の状態の目安として挙げている値）に近い範囲で推移しており、酸性雨による深刻な環境影響は観測されていない。

そのため、全国的に酸性雨に対する社会的な関心は低下し、近年、酸性雨調査をやめる自治体が増えている状況である。

こうした状況を踏まえ、機械的動作がないことにより、

装置の故障頻度が少なく、安価で長期間の測定が可能となる「常時開放型捕集装置（バルク式サンプラー）」を活用した降水調査について、今後、検討を行っていききたい。

文 献

- 1) 横浜市環境科学研究所：酸性雨調査に関する調査研究報告書、218pp.（1993）
- 2) 横浜市環境科学研究所：酸性雨調査に関する調査研究報告書(Ⅱ)－酸性雨による器物影響－、142pp.（1998）
- 3) 加藤善徳：横浜市における酸性雨モニタリング調査、横浜市環境科学研究所報、32、94-97（2008）
- 4) 横浜市：大気測定結果報告書、https://www.city.yokohama.lg.jp/kurashi/machizukuri-kankyo/kankyohozen/kansoku/kanshi_center/taikinpo.html（2025年12月時点）