

日本の酸性雨の状況について

～全国環境研協議会酸性雨全国調査結果から～

1. はじめに

酸性雨という言葉がマスコミを賑わし始めてから 30 年近くの年月が経ちます。当初は、健康被害や建築物、樹木への影響など様々な情報がありましたが、現在では、多くの方にとって、何となく知っているけれど、あまり身近に感じる事のない言葉ではないかと思います。この間、環境省をはじめ、各都道府県等の研究機関が酸性雨の実態について様々な研究を積み重ねてきています。ここでは、全国の地方環境研究所が共同で研究したデータを基に、日本における酸性雨の現状についてご説明します。

2. 酸性雨とは

2.1 どうして雨が酸性になるのでしょうか？

石油・石炭などの燃焼によって大気中に放出される排ガスの中には、硫黄酸化物 (SO_2) や窒素酸化物 (NO_x) などの大気汚染物質が含まれています。これらは大気中で紫外線によって、硫酸や硝酸などの酸性物質となり、雲 (水蒸気) に取り込まれ、酸性の雨となります。(図1)

2.2 酸性雨問題の発端

19 世紀のイギリスでは、産業革命の進展により大量の石炭やコークスが消費されるようになりました。そのため、排ガスの影響によって、すでに降水が酸性化していたことが分かっています。

1960 年代になって、スウェーデンの科学者オーデンは、スカンジナビア地域の降水が酸性化し、環境に悪影響を及ぼしていること、その原因がイギリスやヨーロッパ各地で排出された大気汚染物質であることを示し、酸性雨が広域的な環境問題であることを明らかにしました。

日本では 1973～75 年に関東地方に酸性度の強い雨が降り、多くの人に目の痛みなどの健康被害が発生しました。このころから酸性雨問題が表面化し、多くの自治体で酸性雨の観測が始まりました。

2.3 酸性雨による影響とは何でしょう？

量の少ない降水に多くの酸が取り込まれると高濃度の酸になり、過去には霧雨などによる住民の健康影響が懸念されました。また、濃度が低くても多くの酸が地表に降り注ぐと大きな影響を与える場合があり、北欧などで報告されているように河川や湖沼、土壌などの酸性化による生態系への被害が懸念されるどころです。

日本では生態系への明確な酸性雨の被害はまだ報告されていませんが、伊自良湖 (岐阜県) の流入河川、中部山岳地帯の河川などでの酸性化が報告されており、酸性雨の影響について検討がすすめられているところ。そのため、引き続き観測を行なっていくことが大変重要となっています。

3. 現在の酸性雨調査

3.1 溶けているイオンが問題

pH は、降水の中の水素イオン濃度 (H^+) を示す指標であり、低いほど H^+ 濃度が高くなり、pH が 1 違うと H^+ 濃度が 10 倍違うこととなります。 H^+ 濃度は、取り込まれた酸性物質と塩基性物質 (農業活動由来のアンモニアや土壌粒子由来の CaCO_3 など) で決まります。取り込まれた物質はイオン成分になり、この陰イオンと陽イオンのバランスで H^+ 濃度が決ります。そのため、酸性物質を大変多く取り込んでいても塩基性物質も多く取り込んだ pH 5 の水があるかと思えば、塩基性物質がほとんど取り込まれず、酸性物質の量に直接相当する pH 3 の水もあります。しかし、土壌や湖沼の酸性化を調べるためには、塩基性物質も重要となります。また発生源の寄与を調べるには酸性物質の量全体も必要となることから、pH だけでなく、降水の中に含まれているイオンの種類と量を知る必要があります。

現在、国や多くの地方公共団体が実施している酸性雨の調査では、pH だけでなく硫酸イオン、硝酸イオンをはじめとした多くの汚染物質を測定しています。(図2)

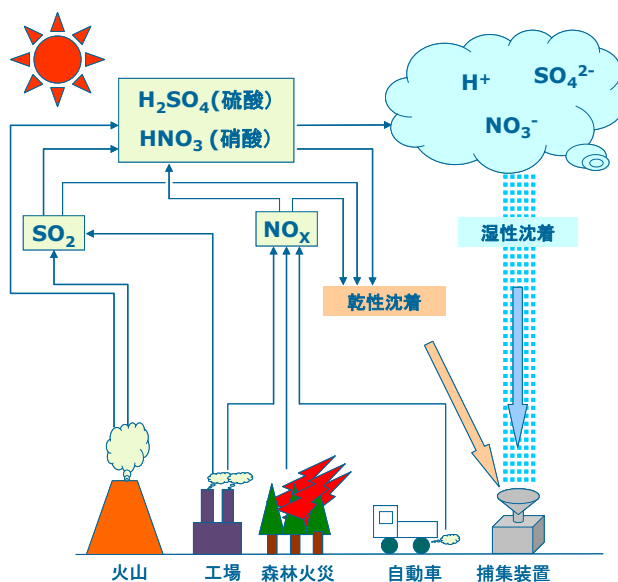


図1 大気中での酸の生成と沈着

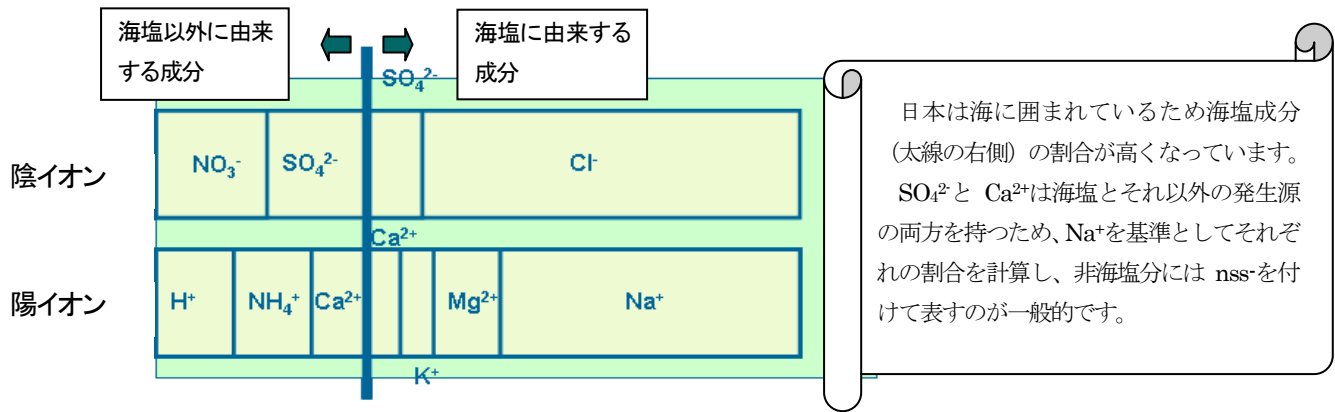


図2 降水のイオン組成 (仮想)

3.2 湿性沈着と乾性沈着

ここで、ある湖について考えてみましょう。地域にもよりますが、たとえば年間に100日雨が降るとします。湖や周辺の山に降った雨が川などを経て湖に流れ込み、一定期間滞留した後、河川を通じて流れ出てゆきます。このとき、雨によって、湖に新たに打ち込む汚染物質（酸性物質や塩基性物質）の量は、1年間にどれだけの雨が降り、その中にトータルでどれくらいの汚染物質が含まれているかを調べることで把握できるはずですが、しかし、年間265日の雨が降らないときは何が起きているのでしょうか。雨の中の汚染物質は、もともと空気中の汚染物質が雲や雨粒に溶け込んでできたものですから、雨雲のない時でも汚染物質は空中を漂っているはずですし、一定量は地上に落ちてきていることが予想されます。

こうした雨によらずに地上にもたらされる現象を「乾性沈着」と言います。同様に降水などによって地上にもたらされる場合を「湿性沈着」と言います(図1参照)。この乾性沈着を調べてみると、地域にもよりますが、驚いたことに湿性沈着と同じ程度の汚染物質が、微小な粒子やガスとして地上にもたらされていることがあると分かってきました。

4. 全国酸性雨調査

地方公共団体の環境研究所による組織、全国環境研協議会(以下、全環研)では、全国酸性雨調査を平成3年度から共同で行ってきました。(表1)

全環研の調査は、地域の状況、特に都市部や田園地帯における酸性雨の状況を明らかにすることを目的としており、環境省による調査(日本海側の離島などの遠隔地での観測が多い)の目的である越境大気汚染の状況把握等の目的とはやや異なります。そのため、両方の調査結果とも重要となっています。

表1 全環研第4次酸性雨全国調査の概要

調査対象	湿性沈着	乾性沈着	
調査手法	降水時開放型装置による1週間単位の降水試料捕集	フィルターパック法による1週間単位のガス及び粒子状成分の採取	パッシブ法による月単位のガス状成分捕集
調査地点数	H15: 61 地点 H16: 61 地点 H17: 62 地点 H18: 57 地点 H19: 61 地点	H15: 32 地点 H16: 34 地点 H17: 35 地点 H18: 28 地点 H19: 28 地点	H15: 59 地点 H16: 61 地点 H17: 59 地点 H18: 39 地点 H19: 34 地点
データの公表	国立環境研究所地球環境研究センターホームページに掲載		
報告書の公表	全国環境研会誌 30, No.2 (2005); 31, No.3-4 (2006); 32, No.3-4 (2007); 33, No.3 (2008)		



図3 地域区分

平成15年度に開始された全環研の第4次調査では、(表1)

①湿性沈着調査(乾性沈着と区別するため、降水時のみ蓋が開く、降水時開放型採取装置を用いる)、

②乾性沈着調査(ガスおよび粒子状汚染物質濃度を測定するフィルターパック法やパッシブ法が用いられる)、

③乾性沈着量及び湿性と合わせた総沈着量の評価を行っています。以下にその一部を紹介します。

表2 降水pHの全国の年平均値

年度	H15	H16	H17	H18	H19
pH	4.63	4.70	4.58	4.63	4.62

4.1 湿性沈着調査

平成 15-19 年度の降水 pH の全国年平均値は表 2 のとおりです。

また、湿性沈着の地域別特性を表 3 に示しました。

このほか、経年変動では、西部及び日本海側で冬季における nss-SO₄²⁻沈着量の増加傾向が認められ、中国等からの越境汚染の影響が増大している可能性が示唆されています。

表3 湿性沈着の地域別特性(H15~H19)

成分 \ 地域	北部	日本海側	東部	中央部	西部	南西部
降水量	少ない	冬季多い	夏多冬少	夏多冬少	夏多冬少	中~多い
pH	中程度	冬季低い	中程度	中程度	冬季低い	高い
H ⁺ 沈着量	少ない	冬季多い	春夏多い	夏多冬少	夏多冬少	少ない
nss-SO ₄ ²⁻ 濃度	春季高い	冬季高い	春夏高い	夏低冬高	夏低冬高	低い
nss-SO ₄ ²⁻ 沈着量	少ない	冬季多い	春夏多い	夏多冬少	夏多冬少	少ない
NO ₃ ⁻ 濃度	春季高い	冬季高い	春夏高い	夏低冬高	夏低冬高	低い
NO ₃ ⁻ 沈着量	少ない	冬季多い	春夏多い	夏多冬少	夏多冬少	少ない

4.2 大気中の汚染物質濃度

汚染物質のガス状成分や粒子状成分は、フィルターパック法で継続的に観測しています。図 4 に、観測地点の経度と粒子状 nss-SO₄²⁻濃度の関係 (2007 年度) を示します。西から東へと、大陸から遠く離れるほど濃度が低くなる傾向が現れていることから大陸の影響を受けているものと考えられます。図 5 に、粒子状 nss-SO₄²⁻濃度について、月平均濃度 (2003 年度~2007 年度の 5 年間、ただし南西部は辺戸岬の 3 カ年) を示します。大陸に近い西部では、季節変動を繰り返しながらも、次第に粒子状 nss-SO₄²⁻濃度が増加しています。その他の 5 地域は明確な傾向はみられませんが、中国等からの越境汚染の影響が増大していると考えられ、今後の推移を注目すべき状況にあります。

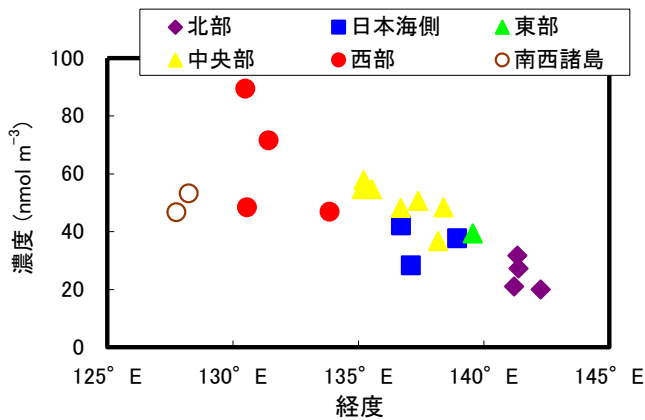


図4 経度と粒子状 nss-SO₄²⁻濃度の関係

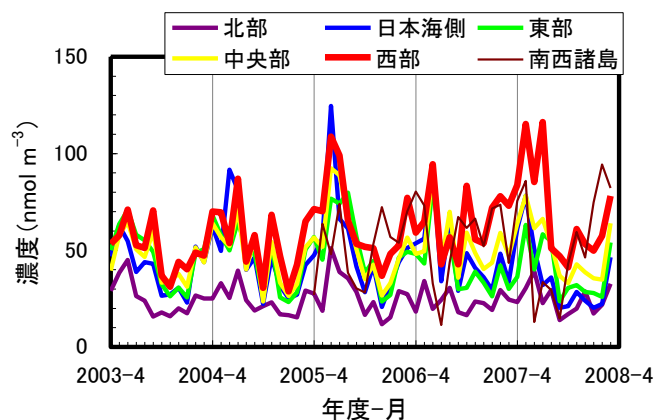


図5 地域区分ごとの粒子状 nss-SO₄²⁻濃度の推移

4.3 総沈着量 (湿性+乾性) の評価

①硫酸成分 (SO₂、粒子状 SO₄²⁻)、

②硝酸成分 (HNO₃、粒子状 NO₃⁻)、

③アンモニウム成分 (NH₃、粒子状 NH₄⁺)

の大気濃度から、乾性沈着速度推計ファイル Ver.3-2 を用い (*1)、乾性沈着量を評価しました (図 6)。

その結果、概ね湿性沈着量が乾性沈着量より多くなっています。

また、乾性沈着量に占める割合は、ガス成分が粒子成分より大きくなっています。

特に硫酸成分は湿性沈着の寄与が大きい傾

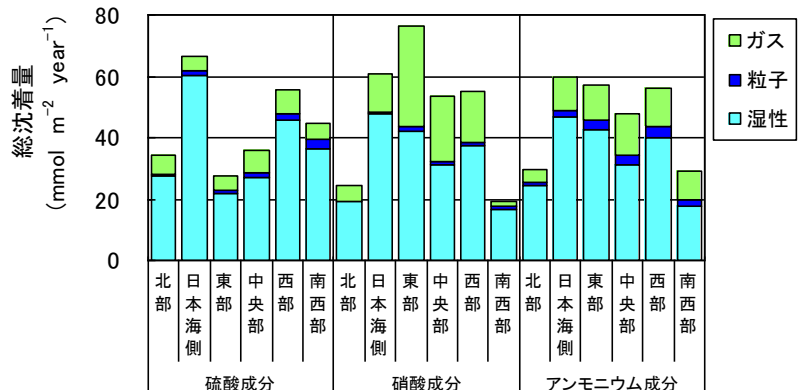


図6 地域区分別総沈着量

向にあります。硝酸成分及びアンモニウム成分は、硫酸成分に比べてガスによる乾性沈着の寄与が大きく、乾性が湿性沈着より多くなる地点も存在しました。

総沈着量を地域区分で比較すると、硫酸成分は湿性沈着の多い日本海側、西部で多く、硝酸成分とアンモニウム成分は北部と南西部を除く4地域で多い傾向にありました。

4.4 他のネットワークデータとの比較・統合

この調査は、環境省の調査と同じく国際標準の方法を用いていますので、観測結果を比較しました。

湿性沈着について図7に示します。図は横軸が年降水量、縦軸が年平均濃度（降水量で加重した平均値）を示し、さらに曲線は沈着量（濃度×降水量）が等しい範囲を示しています。

酸性成分などの湿性沈着量は、降水中の濃度と降水量の積によって求められるので、このような図を使うことにより、酸性成分の沈着量の大小について降水量と濃度の双方の影響を考慮しながら評価することができます。

これら3つの図は平成15年度から平成18年度の4年間に実施された全環研調査のデータ及び、同期間に実施された環境省による酸性雨調査のデータを示したものです。

環境省調査の地点には、主に東アジアからの越境汚染の評価を目的とした遠隔地点が多く含まれています。これに対し、全環研調査は、それらの越境汚染に局地的な汚染も加わった一般的な環境（都市や田園）に多くの地点を配しています。

したがって、両者の差分を求めることによって越境汚染の評価が、また、両者を合わせて検討することによって現状での日本の酸性雨の状況をより的確に把握することができます。

4.4.1. nss-SO₄²⁻ (国内状況)

図7を見ると、nss-SO₄²⁻では、濃度としては市原（千葉県）が最も高いですが、比較的高い濃度と多量の降水のために、本州日本海側の地点で多くの沈着量が観測されていることが分かります。

4.4.2. NO₃⁻ (国内状況)

NO₃⁻では、nss-SO₄²⁻の場合と同様に本州日本海側で多くの沈着量が観測されているのに加え、北関東の地点で非常に高い濃度による多くの沈着量が観測されています。

4.4.3. H⁺沈着量 (国内状況)

また、年平均pHは安中（群馬県）で最も低い値が観測されていますが、正味の酸の沈着量（H⁺沈着量）としてみると、nss-SO₄²⁻やNO₃⁻の場合と同様に低いpHと多くの降水量のため、本州日本海側の地点で多くの沈着量を示しています。

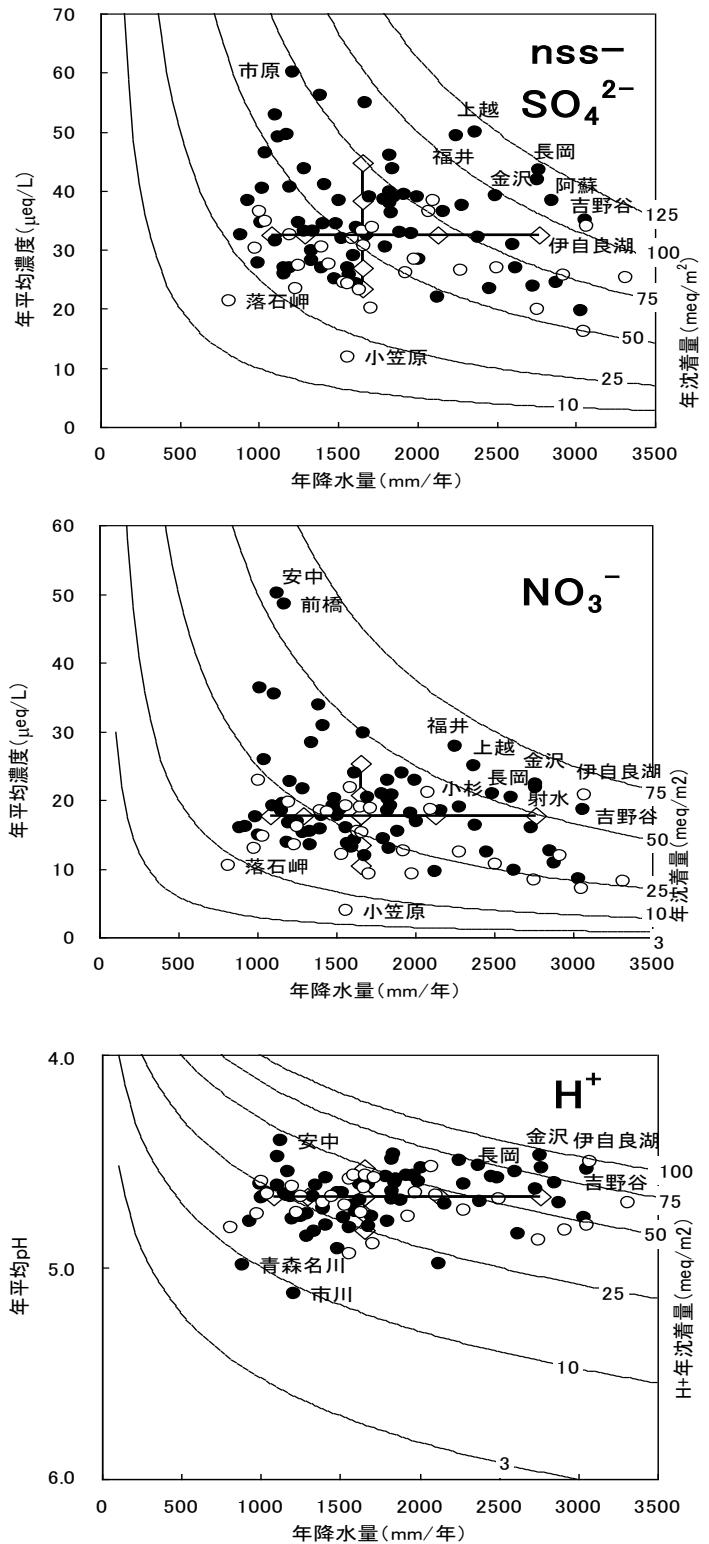


図7 湿性沈着量の比較 (国内)

平成15年度から平成18年度

●は全環研調査 (n=67)、○は環境省調査 (n=30)

4.4.4. nss-SO₄²⁻ (国際比較)

全環研と環境省の調査結果を合わせて同様に国際標準の方法を用いて得られた海外の観測データと比較したのが図8図です。

日本の降水量は中央値で1650mm程度で、北米や欧州よりそれぞれ2～3倍多い傾向にあります。

nss-SO₄²⁻濃度も、日本が北米や欧州に比べて高いので、結果として、日本のnss-SO₄²⁻沈着量は欧州や北米に対して3倍程度多くなっています。

また、中国の観測地点の濃度が非常に高いことも特徴的で、最高濃度の300μeq/Lは日本の中央値の10倍以上に相当します。中国の観測地点の降水量は比較的少ないですが、濃度が高いために沈着量は最大で日本の中央値の6倍にも相当します。

4.4.5. NO₃⁻ (国際比較)

NO₃⁻濃度は欧州が最も高く、日本はその7割程度です。しかしながら、日本は降水量が多いために、沈着量は日本が欧州や北米に比べて2倍程度多くなっています。また、中国と韓国で日本の分布範囲を超えた高い濃度が観測されています。中国の地点は比較的降水量が少ないですが、高い濃度のために日本の中央値の2倍程度の多くの沈着量を示しています。

4.4.6. H⁺沈着量 (国際比較)

降水酸性度 (H⁺濃度) については、日本は北米や欧州に比べて約2倍高く、その結果、正味の酸の沈着量であるH⁺沈着量を中央値と比較すると、日本が欧州や北米の6倍及び3倍程度多いこととなります。また、非常に多くの酸性成分の沈着量が観測されている中国と比較しても、日本のH⁺沈着量が多いことが分かります。この原因は、降水量が多いことに加え、日本の降水は欧州や中国に比べて中和の程度が非常に低いためと考えられます。

5. おわりに

人の活動に由来して排出された大気汚染物質が環境中でどのように変化・移動し、現実の生態系や人にどのような影響を与えるかについて、私たちは常に監視する責務を負っているのだと思います。

これらの成果は他の様々な調査・研究の成果と融合され、将来の環境に対する負荷を軽減するための方策の決定のために活用されるべきものであり、そのために私たちは信頼性の高いデータを継続して提供していくことが大切と考えています。

全環研では、ご紹介した調査結果以外にも多くの測定データがありますし、様々な解析も行っています。

これらの多くは最後に紹介しています文献やホームページでご覧頂けます。また、さらに詳しくお知りになりたい方は、最寄りの地方環境研究所にお問い合わせ下さい。

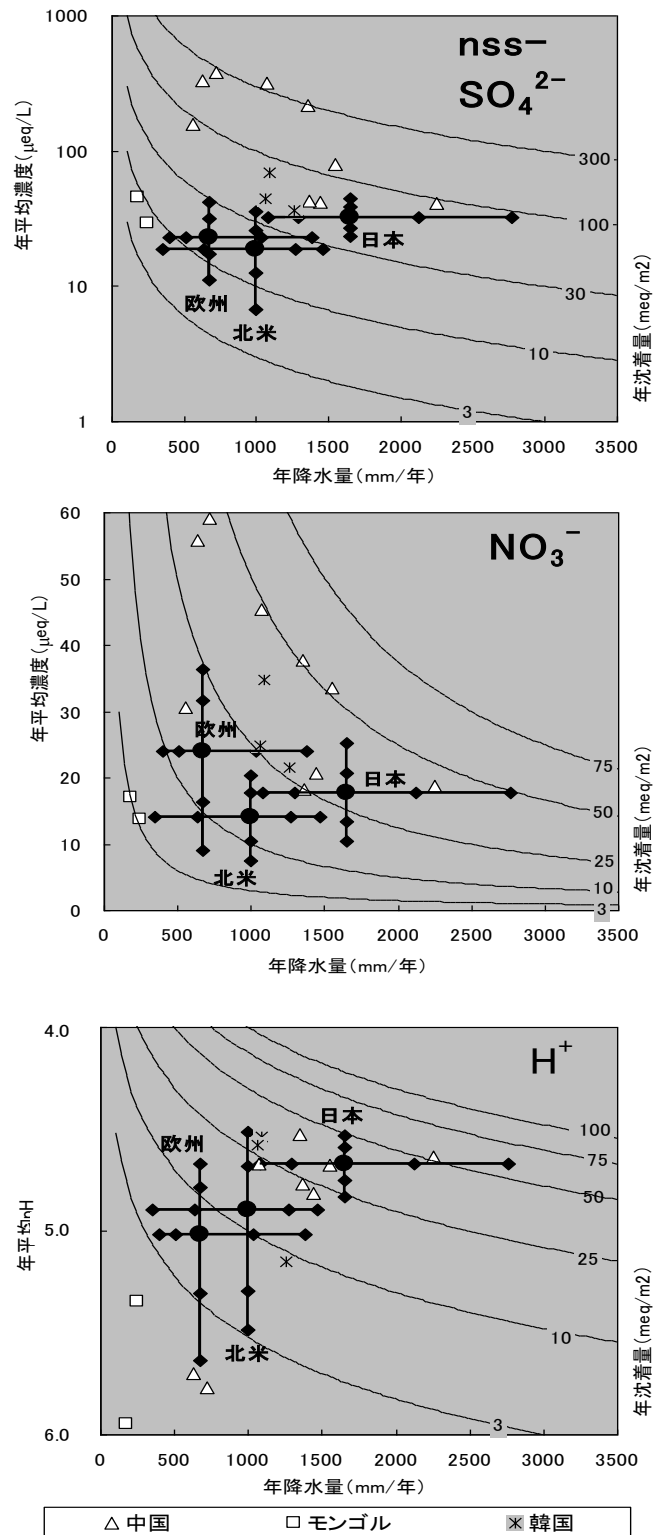


図8 湿性沈着量の比較
(平成15年度から平成18年度、ただしNADP、EMEP及びEANETは暦年)
1) 日本は全環研調査+環境省調査 (n=97)、北米はNADP (n=250)、欧州はEMEP (n=97)
2) 中国、モンゴル及び韓国はEANETデータ
3) 日本、北米及び欧州は、降水量と濃度の分布を10、25、50、75及び90パーセンタイル値で表記

文献等

- 1) 全国環境研協議会、第4次酸性雨全国調査報告書（平成15年度）、全国環境研会誌、30(2)、19-37、2005
- 2) 全国環境研協議会、第4次酸性雨全国調査報告書（平成16年度）、全国環境研会誌、31(3)、13-33、2006
- 3) 全国環境研協議会、第4次酸性雨全国調査報告書（平成17年度）、全国環境研会誌、32(3)、3-31、2007
- 4) 全国環境研協議会、第4次酸性雨全国調査報告書（平成18年度）、全国環境研会誌、33(3)、2-72、2008
- 5) 北米のデータはアメリカの“国家大気沈着プログラム（NADP: National Atmospheric Deposition Program）”のweb site (<http://nadp.sws.uiuc.edu/>)より入手
- 6) 欧州のデータは“欧州モニタリング評価プログラム（EMEP: The Cooperative Programme for Monitoring and Evaluation of Long-range Transmission of Air Pollution in Europe）のChemical Coordinating Centerのweb site (<http://www.nilu.no/projects/ccc/>)より入手
- 7) Network Center for EANET, Acid Deposition Monitoring Network in East Asia (EANET) Data Report 2003, 2004, 2005, and 2006.
- 8) 平成13年以前の全環研全国調査（第1次～第3次）は下記のHPで詳細なデータが公開されています。
http://db.cger.nies.go.jp/ja/database_B2.html
(*1) 当該推計ファイルは以下のHPで公開されています。
(URL:http://www.hokkaido-ies.go.jp/seisakuka/acid_rain/kanseichinchaku/kanseichinchaku.htm)

酸性雨関係用語説明

○pH（ピーエッチ、ペーハー）

酸である H^+ 濃度を示す指標。 H^+ 濃度は溶けている他のイオンのバランスにより決ります。 H^+ 濃度は当然のことながら生態系や建築物などに対して影響するのでわかりやすい指標ですが、 H^+ だけが影響を及ぼすわけではありません。例えば NH_3 が降水に取り込まれると、pHを上昇させる（ H^+ 濃度を低下させる）こととなりますが、この成分は土壌においては酸化される過程で H^+ を放出するため、土壌の酸性化を促進する働きがあります。このようなことから、pHの値だけでなく、他の成分濃度や降ってくる総量（沈着量）を評価しなければなりません。

なお、酸性雨の目安に良く用いられるpH5.6とは、もともと大気中に存在する二酸化炭素が蒸留水に溶け込んだ場合、pHは5.6程度を示すことが知られているため、これ以下の場合は大気汚染物質などによる酸性化が起こったと考えられるため目安となっています。

○nss（non-sea salt 非海塩由来）

降水成分を評価する場合、工場の煙や車の排気ガスなど化石燃料の燃焼に由来する成分であるかどうかなど、その由来を調べることが大変重要になります。しかし、成分によっては海などの自然発生原由来の成分と区別しにくいものがあり、特に海に囲まれた日本ではその影響が大きくなります。そこで、ナトリウムイオンが全て海塩由来と仮定し、各イオンの海水における比率をかけて海塩由来分を求め、その分を差し引いた残りを非海塩由来成分として評価を行っています。非海塩由来硫酸イオン（ $nss-SO_4^{2-}$ ）や非海塩由来カルシウムイオン（ $nss-Ca^{2+}$ ）などがあり、前者は硫酸化物に由来する分を、後者は黄砂など土壌成分由来する分を評価する場合に用いられます。

○窒素酸化物（NO_x）

一酸化窒素（NO）や二酸化窒素（NO₂）の総称あるいは総和です。森林火災や雷、土壌中の微生物活動などからも生成されますが、都市部では自動車排ガスの寄与が大きいと考えられています。生成においては、化石燃料中の窒素分や空気中の窒素ガスが空気中の酸素と結合して生成されます。降水中では硝酸イオン（NO₃⁻）となります。

○硫黄酸化物（SO_x）

一酸化硫黄（SO）や二酸化硫黄（SO₂）などの総称あるいは総和ですが、一般環境では主としてSO₂を指す場合が多く見られます。火山などからも放出されますが、化石燃料中の硫黄分と空気中の酸素と結合して生成されます。

降水中では、硫酸イオン（SO₄²⁻）となりますが、海塩成分と区別し、 $nss-SO_4^{2-}$ となります。

○フィルターパック法

ろ紙（フィルター）を数段に分けてセットし、ポンプで吸引することによって、大気汚染物質を捕集する方法。1段目で粒子状物質、2段目以降でガス成分を捕集する。捕集後は各種成分を分析する。ろ紙は目的成分に応じて、素材や含浸されている試薬が異なる。全環研では吸引量は毎分1-5L、1週間～2週間ごとに採取を行っています。

○パッシブ法

雨雪や風の影響を除外するカバーと覆いをつけて、ガス成分を捕集するための試薬が含浸されたろ紙を晒し、大気中のガス成分を捕集する方法。電源がいらず、簡易であるが、ろ紙に付着する量は少ないため、長期間晒しておく必要がある。また、粒子状成分は測定できない。ろ紙に付着したガス成分あるいは付着したガスによってろ紙に含まれる成分が変化した量から濃度を求める。ろ紙の覆いとして、テフロンフィルターを用いるN式と、専用のサンプラーを用いるO式がある。全環研では大気中に1ヶ月さらしたのち回収し分析する。