特集・環境科学は環境保全のために何をなし得たか

酸性雨と環境科学

原 宏*

1. はじめに

酸性雨は気候変動、オゾン層破壊などと並んで、地球環境問題として広く社会的な関心を集め、この問題がテレビ、新聞などのメディアで毎日のように取り上げられている。酸性雨はヨーロッパで認識され、魚類など湖沼の生物の消滅、巨大な森林の枯死など環境の破壊をもたらす環境問題として、緑のベスト、空中鬼などとも呼ばれている。この酸性雨はわが国および東アジアの地域で今後ますます重要になってくる環境問題である。ただし、酸性雨を「雨が酸性になること」であるとか「水素イオン指数が5.6以下の雨」などと雨に捕われてしまってはならない。酸性雨とは大気の大酸化、環境の大酸化のことであり、この大酸化による環境影響のことであり、もちろん、雨水の大酸化の指標である水素イオン指数、pHが低くなること自体大変な問題である。しかし、pHだけの問題にしてしまうと問題のかなりの部分を見落としてしまうことになる。このことは機会のある毎に強調してきた。

「酸性雨」のことは自体、ひとつの象徴的なものであると思うが、一般に「雨が酸性になること」などという認識が定着している観がある。これはそれなりの必然性があり、環境教育、あるいは環境科学の立場から考えても、種々の問題点が浮かび上がってくる。「酸性雨」の問題がどう認識されたかを考察していくと、環境問題を認識するときに共通する問題点が見えてくるように思われる。

酸性雨の研究者の立場から、酸性雨と環境教育との関わりを考えているが、先日シンポジウムではその一端を紹介した。ここでは、当日の本来のテーマであった環境科学と、酸性雨について考察する。理解が混乱している酸性雨問題をきちんと紹介することから始め

る。そのうえで「酸性雨」を環境科学、特に化学、あるいは環境化学の立場から考えてみたい。

2. 酸性雨問題とは

酸性雨は石油や石炭を燃焼することで始まる。燃焼に伴って二酸化硫黄、窒素酸化物などの汚染物質が大気中に放出される。これらの物質は酸そのものではないが、気流によって輸送されるとき、光化学反応などの化学過程により硫酸や硝酸に変わる。こうして大気が酸性化される。これらの酸は大気中に数日間滞留し、最終的に地上に沈着する。この沈着した酸は、生活環境を含む生態系を酸性化する。その結果、森林、土壌、湖沼、文化財を始めとする器物・建造物に種々の影響をあたえる。この「放出」から「影響」までの一連の過程が酸性雨の現象であり、先に述べた大気の大酸化、環境の大酸化など、「酸性化」と呼ぶべき内容である。

さて、大気中で生成した硫酸や硝酸はその後どうなるのであろうか。硫酸や硝酸はそれぞれ大気中ではそれぞれ微粒子やガスの形で存在している。これらの酸が地上に沈着するときの経路は二つある。一つは雨や雪、霧などに溶け込んだ状態で地上に到達する湿性沈着で、いわゆる酸性雨として知られている経路である。大気中の酸が雨滴に溶け込むと雨滴は酸性化しそのpHは4-5、あるいはそれ以下になり強い酸性を示すことがある。これが「酸性雨」の名の起こりである。もう一つの経路はそれぞれ微粒子やガスの形で大気中に存在している硫酸や硝酸がそのまま、風によって地上に到達し、植物の葉や、器物・建造物など種々の表面に付着、吸収される乾性沈着である。この過程は晴雨に関わらず進行し、いわば「目に見えない酸性雨」である。しかし、この乾性沈着による沈着量を実測する適当な方法がなく正確に見積るのが困難である。理論的に見積ってみると、乾性沈着量は湿性沈着量と同じ程度である。つまり、地上に沈着する酸の量の半分

*国立公衆衛生院 Hiroshi HARA

は雨によるものではない。この乾性沈着の存在は酸性雨という語からは想像しにくいだけにその存在を強調しておきたい。

次に、雨の pH だけでは表せない問題を挙げてみたい。「酸性雨」の影響を考えると酸の濃度 (pH) という視点と、その酸がどれだけ地上に負荷されたかという沈着量の視点の両方が必要である。湿性沈着の沈着量は酸の濃度とその時の降水量を掛け合わせたものである。pH が高く、酸の濃度が低い雨でも降水量が多ければ沈着量は少なくはないだろう。わが国の降水量は欧米に比べるとかなり多いので湿性沈着量も酸性雨を考えるときの大切なポイントである。また、pH が低く、酸の濃度が高い雨滴でも、大気中に存在するアンモニアガスなどのアルカリ性物質が溶け込むと、酸の一部は中和される。すると、pH は上昇し、非常に薄い酸と同じレベルになることさえある。つまり、ほとんど酸性化していないような pH の雨でも、この中和が起こる前の pH は相当低かったと思われるものがよくある。

ここで具体的な方法を詳しく述べる余裕はないが、中和が全くなかったと仮定したときの pH や、中和前の硫酸や硝酸の濃度と pH を併せて考えると、雨の化学的な特徴がくっきりと浮かび上がってくる。

大気中では酸を中和し酸性雨を和らげたアンモニアにも注意が必要である。アンモニアが土壌に沈着してしまうとそこにいる微生物の作用により酸に変わっていく。ややこしい話であるが、これも雨の pH だけでは分からないことである。

これで酸性雨を「雨が酸性になること」と考えるとどういう問題が生じるのかおわかりいただければ幸いである。

3. 環境科学

3.1 環境科学, 社会, 基礎科学

酸性雨と環境科学との関係を考察する前に、環境科学とは何かということを考えてみたい。

環境科学あるいは、Environmental Science、という名称ないしそれと同等である概念がいつごろ、どうやってできたのか。そのときはどんな内容の学問分野を示していたのか。何をもちいて環境科学の成立と見るのか。これらの問題自体、科学史の研究テーマであり、環境科学の研究者の観点からもじっくり考察する必要がある。

しかし、ここでは環境科学とは社会と基礎科学をつ

なぐものであるとして出発したい。

このときの基礎科学, 社会, 環境科学をどう考えているのか説明していきたい。

3.1.1 基礎科学

ここでいう基礎科学とは分かりやすく言えば物理学を典型とし、化学などの学問分科を指す。これらは19世紀のドイツの大学で発展を遂げ、そのめざましい発展により定着した、科学のための科学という理念に裏付けられていることが特徴である。現在でも社会とは直接関係をもたず、環境科学とほとんど同じようなことをしていてもその分科では環境科学であると考えてはいないことがよくある。

3.1.2 社会

ここで社会というのは、基礎科学の研究者以外の世界とでもいうべき人の集団である。一般公衆や行政、産業界、教育、メディアなどを示すと考えればよいだろう。

3.1.3 環境科学の特徴

さて、ここで環境科学が出てくるが、社会と基礎科学をつなぐものであるといえよう。環境問題は人間活動によって引き起こされた種々の現象であり、人間生存を脅かす問題である。環境科学はその影響を未然に防止し、有効な対策を立てるための政策決定などのための科学的知見を得るための学問分科である。それは基礎科学の方法や成果を応用するものであるが、基礎科学とはいくぶん異なり、情報が不十分であってもそれなりの記述ないし予測が求められるものである。社会的、行政的な対策を立てるときの科学的基礎を与えるものである。このような意味で、環境科学は社会と基礎科学の両方に片足ずつ突っ込んで、これらの間に立つ学問分科である。つまり基礎科学の手法を用いながら、影響の評価、対策の基礎資料の整理など、程度の差こそあれ予測ということをする必要がある。

環境科学の成立等については、これからの環境問題を考えていくうえで重要であり、今後改めて考察してみたいと考えている。

4. 環境科学としての酸性雨：現状の吟味

酸性雨は「雨が酸性になること」と認識されてしまうにはそれなりの必然性がある。気候変動やオゾン層

の問題と違って、雨は目に見え、触れることもできる。それ以上にわが国では台風、梅雨などおなじ雨といってもさまざまな雨が降り、降水量の多さとも相俟って人々の生活、さらにはわが国の文化にまで大きな影響を与えている。俳句で雨は重要な季語であり、源氏物語の「雨夜の品定め」は名高い。白秋の「城ヶ島の雨」以来、歌謡曲と雨は切っても切れない関係にある。また、われわれは雨を、季節や降り方などで微妙に区別する多くの語を持っている。「酸性雨」と言ってしまう、聞いた人はだれでも「この雨が酸性になる」と思うのはむしろ自然なことである。

4.1 基礎科学とのかかわり

酸性雨の調査・研究には基礎科学、なかでも気象学と地球化学・分析化学の成果と方法論を借用している。わが国の降水化学の研究は1930年代から始まり、一時は世界をリードする学説を出していたこともある。しかし、その説が否定されて以来大きな流れを作るには至っていないように思われる。降水中の硫酸塩を工場からの煙との関連で考察した仕事はあるが、このような人間活動が降水にあたえる影響を指摘した仕事はないようである。基礎科学の特徴として、自然現象を中心としており、むしろ人間活動の影響のないような条件での研究が思考されたのではないかと考える。「Air and Rain: the beginning of chemical climatology」の著者として、酸性雨の研究の元祖と目される英国の Angus Smith の場合は、人間活動の影響が余りにも大きかったことなどが、降水の化学と人間活動を結び付けて新しい仕事に結実したのかも知れない。

しかし、しかしである。本章のはじめにじっくり強調しておいたように、雨はわが国の文化、生活の中に深く入り込んでいたのではなかったのか、もし、そうであるならばどうして世界をリードするような降水化学の研究が生まれなかったのだろうか。むしろ、次の節で触れるが、酸性雨が問題になり行政調査を実施しようとしたとき、研究者の側では調査手法の基礎を提供することができなかった。このギャップはどう説明されるものでしょうか。わが国の科学史の問題としても興味ある課題ではなからうか。現在は人も金も昔とは比較にならないほどかけて、調査・研究が行われている。しかし、現在でも研究のレベルの点では同じような問題があるような気がしてならない。

同様にわが国の文化にも影響を与えている温泉や地震についての科学ないし化学の研究の、世界全体で見てどのような水準にあるかと、降水化学のそれと比べ

てみるとさらに興味深いものが出てくるような気がする。

4.2 社会との関わり

まず酸性雨と言う名前に引っ張られ過ぎて雨が酸性になることという認識が一般公衆の間はもちろん周辺領域の専門家にまで広まってしまった。このような専門家がその領域の雑誌に解説するとき「pH5.6以下の雨」などと説明することになる。また、この名前がこれがメディアと結び付いたとき pH の値が必要以上に強調されることになる。

さらに pH の簡易測定法と結び付き市民や児童、生徒の観測網が形成されることになった。これは、酸性雨における pH の位置を正確に認識さえすれば問題はなく、むしろその関心の高さは評価されるべきであろう。

酸性雨の名に引っ張られたのは行政も程度の差こそあれ同様であった。しかし、酸性雨の行政調査を行おうとしたとき、研究者の側が酸性雨に関して適切な手法を十分に開発しておらず、行政調査を行いながら手法を検討するという状況が続く。

4.3 環境科学としての酸性雨の研究の現状

最近でこそそうでなくなってきたが、一時は降水の pH が話題の中心であった。また、酸性雨の各過程の専門家による総合的な共同研究が遅れており、いま始まったばかりといえよう。それどころかおなじ大気科学的現象であり、降水とも密接な関係のあるガス、エアロゾルなどと関連させた研究さえも極めて限られる。

もう一つの問題は調査・研究の成果を客観的に整理して学術論文として発表することが少ない。特に国際的な場での発表、討論や、国際雑誌への投稿はさらに限られている。

5. 環境科学としての酸性雨の今後の発展に向けて

前節で酸性雨についての調査・研究の現状を環境科学として点検してみた。これらの調査・研究がさらに発展することが望まれるが、これまでの成果を整理したうえで一度ゆっくりと見直すことが必要である。これまでの延長線ではなく、次の段階を目指して新たな方向に進むことが大切である。いくつかの観点から今後の方向を考えてみたい。

5.1 学際的な総合

5.1.1 酸性雨を環境科学の中に位置づける

A. 酸性雨の環境科学

まず、酸性雨という環境問題を科学的に整理、体系化して、環境科学の中に「酸性雨の科学」とでもいうべき新しい分野を拓くことが第一の課題であろう。

先にも述べたように、酸性雨は、放出、輸送・変換、沈着、影響のこの一連の4つの過程からなる現象である。沈着までの3つの過程は物理と化学で基本的に記述できると思われるが、今後は物理と化学をもっと融合した形の整理とともに、影響と絡めた体系化が必要であろう。さらに影響を考察するための生物学的な面からの整理が必要である。これまでの各学問分科、それぞれからの考察を、統合とは行かないまでも、各分科を相互乗り入的に学際的に整理して、学問的な基礎を作ることが必要である。言い換えればそれぞれの学問分科の立場毎に、酸性雨の4つの過程を通した理解をして整理することである。たとえば、輸送の専門家であっても種々の受容体に沈着する酸性物質等の影響を考えることである。もちろん影響の専門家とは異なる理解であろうが、理解や整理そのものがポイントである。異なる専門家のこうした全体の理解についての意見を交換することが環境科学としてはもっとも大切なことではなかろうか。

B. ディシプリンとしての整備

酸性雨が環境科学の中にでも科学として成立するため条件はいわゆる制度化されることである。制度化とは、その分野の学問体系が組織化されひとつの体系を形成することであり、かつその専門家の需要があって職を得ることができ、さらにその分野の専門家さらに後継者の養成システムが社会にできることといえよう。つまり、大学の中に環境科学の学科あるいは講座などができて、その分野を専攻したいものが学習するシステムが整備され、教育や研究ができることである。もちろん専門の学会ができ、専門の論文誌が定期的に発行されることなど学界として成熟する必要がある。

このような条件で考えると、現在、環境科学を内容とする学科や専攻が大学にはあり、「環境科学会」はもちろん、環境科学を含む学会や、各分野ごとの学会が活動しており、十分制度化していると見ることもできる。

しかし、制度化の象徴である標準的な教科書ができていないと考えている。ここでいう標準的とは、量子力学の例で言うと、ランダウとリフシツ、シッフ、メシアあるいは朝永などそれぞれ個性的ではあるがこれをきちんと勉強すればその哲学、論理体系、基礎的な道具立てをマスターできるというような書物である。

物理化学であれば、ムーア、パーロー、アトキンスなどの標準的な教科書がある。有機化学、生化学、あるいは解析学など科学の他の分野でも同様に書名を挙げるのは簡単なことだろう。

もちろん環境科学の教科書あるいは酸性雨についての解説書や教科書は少なからず書店に並んでいる。しかし、それぞれの分野の研究者の見た酸性雨のいわば寄せ集めであり、管見の限りでは統一的な記述がとられるに至ってはいない。つまり、標準的な教科書はこれから書かれるものである。そのためには、基本的なそれぞれの概念が異なる分野から総合的に吟味され、共通の認識として合意される過程が不可欠である。これは「言うは易く行ふは難し」の見本みたいなものになろう。

しかし、酸性雨に関わる学問分科は多岐にわたり、整理し、統一していくのは非常に困難なことであろう。しかし、学際的な分野が成立するためには避けて通ることはできない。また、この困難は学際的な学問分野である証でもある。

C. 用語などの標準化への努力

制度化、特に標準的教科書の整備において用語の問題は想像以上に重要なものである。ことばを通して思考するのでその言葉の一つ一つがきちんと相互に整理されていなければならないのはいうまでもないだろう。一方で、ことばというのは個人の存在基盤に関わる大きな問題でもあるので最終的には用語は個人の思想、信条に委ねられる問題である。これらを考慮しても意思の疎通、さらには後継者の育成のためには改めて見直し、標準的な用語を推奨することが必要である。このときいくつか考慮すべきポイントがある。まず、これまで使用されてきた用語は、その使用実績が考慮されねばならない。分野で用語が異なっても、それはそれなりの必然性があることだと思われるからである。そして、その時点での概念や理解をその語が必要にして十分表しているか、関連分野、特にある分野の成果や手法を応用しているような場合はその分野の用語法を重視、尊重し、相互に統一が取れていないと学習するものが混乱する。また、用語が混乱しているとそのようなものは学問としての整理が不十分であるとの印象を他の分野の研究者などに与えるので慎重に検討することが大切である。また、日常の言葉と大きくかけ離れていないか、字面だけではなく聞いて容易に判別がつかなくとも大切である。

したがって、調査・研究に携わっているものばかり

でなく関連分野の研究者、教育関係者、さらに国語学の専門家も交えて検討することが必要である。

特に、環境問題としての酸性雨という名はわが国では雨が生活に密着しているだけに、雨が酸性になることとの認識が定着し過ぎ、さらに科学的な解説もこの認識を訂正することができないほどである。そのため、乾性沈着の存在自体がほとんど理解されないで最近まで来てしまったと考えている。乾性沈着の評価それ自体難しいことであり、今後の本格的な取り組みが必要な課題であるが、乾性沈着に対する認識と取り組みの遅れの一端はこの名称にあるのではないだろうか。もしそうであれば、メディアあるいは行政の名称をそのまま受け入れるのではなく、科学的な名称にある段階からでも変更することが必要であったことになる。幸い、乾性沈着が重要であることが広く認識され始めているので、今後は名前の付け方についても十分議論をしていかなければならない。

欲を言えば、用語だけではなく単位、記号の標準的なものの推奨もゆくゆくは必要になってくる。特に国際的な交流が多くなってくるので英訳とも併せ、きちんとした論理をもって国際的な場で主張することが大切である。

化学でいうと IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry, 国際純正および応用化学連合) で定数の値や、単位、記号について定常的に検討しているが、物理学でも同様な組織がある。このように成熟している学問分野では用語だけではなくさまざまな整備が行われている。

5.1.2 基礎科学へのフィードバック

酸性雨に関わる調査・研究から得られたデータは、地球物理学、地球化学などの基礎科学にとっても大変有用なものである。また最近、気象学、大気科学と地球化学・化学反応を親として新しく大気化学という、物理と化学にまたがる学問分野が成長しつつある。この中の対流圏化学、降水化学などの対象と課題はこれまで述べた酸性雨の科学と大きく重なる。したがって、これらの基礎科学の方法論、成果等を応用すると同時に、これらの基礎科学に対しても酸性雨の調査・研究の成果をフィードバックすることが大切である。さらに温暖化、オゾン層の破壊など他の大気環境問題と有機的に関連づけて考察していくことが不可欠である。そうして、酸性雨の科学の一部は大気化学と一体化していくことにもなるだろう。

大気以外の酸性雨の各分野も同様に関連する基礎科

学へのフィードバックが必要であり、やはりこれら基礎科学の関連部分と一体化するようになると思われる。

5.1.3 社会へのフィードバック

社会へのフィードバックについては、情報をわかりやすく、しかも正確に整理して提供することが大きな課題の一つである。これは環境教育でもあり、同時に環境対策の基礎としても機能すると思われる。

技術的な点では種々の方法論を基礎科学としても確立し、環境科学として行政ニーズをはるかに先取りしていなければならない。また、市民運動などに対しても専門家として協力することが望ましい。この問題の啓発をはかるとともに、専門家としての調査・研究にもヒントが得られる可能性もおおいにあるだろう。

5.2 「2000 年」

これから 4、5 年の間、つまり西暦 2000 年までに大きく研究を進めるべき課題には以下の項目の評価ないし確立が含まれるだろう：1) 乾性沈着 2) 窒素化合物の循環過程、3) 重金属の沈着、4) 臨海負荷量など、影響の定量的、総合的な評価方法。

ちょうどこの西暦 2000 年に実施が計画されている大きな二つの国際的な動きがある。

5.2.1 国際酸性雨会議

1995 年 6 月に第 5 回国際酸性雨会議 the 5th International Conference on Acidic Deposition が Sweden の Gothenburg で開催された。この会議は 5 年ごとに開かれ、酸性雨に関連するすべての分野を対象とする最大規模の国際会議である。今回の会議の Acid Reign'95? というものはこの会議の準備段階で付けられたニックネームとでもいうべきもので、1995 年にもまだ酸性雨が君臨しているのか? という疑問文であった。

閉会式における回答は Yes であった。ストックホルム大学の Rodhe 教授いわく、「中国等の国々において硫黄化合物の排出量が劇的に増加していること、そして世界の多くの地方で窒素化合物やアンモニアの排出量も増加している。したがって状況は悪化していると結論された。政策的な観点から言うと、まだ多くの不確定要素はあるものの硫黄化合物や窒素化合物の排出量を削減するためにおおいに努める必要は十分認識できる。アジア諸国での排出量減少のためのプロトコルが必要である。政策決定は、酸性化だけを考慮するのではなく富栄養化、オゾン、気候変動も考慮して、総合的なものである必要がある。

今回のこの会議は西暦 2000 年にわが国で開かれる

ことになった。Rodhe のこのような総括を踏まえて、わが国が次の国際会議のテーマをどう設定し、閉会式にどう総括するのか？これはアジア各国の研究者、行政担当者なども交えて解答を用意すべき問題である。もちろん学会での専門論文の発表などわが国の酸性雨の調査・研究の総力を挙げて取り組むことが不可欠である。

5.2.2 東アジア酸性雨モニタリングネットワーク

前項とも関連してくる問題であるが、わが国の環境庁が表記ネットワークを実現すべく 1993 年から国際専門家会合を開いている。これはアジアの酸性雨問題を解決するために大気、土壌・植生、陸水などの国際的なモニタリングから始めようというものである。このモニタリングを西暦 2000 年にスタートさせるべく努力が重ねられている。

ここで大切なことは、先達である欧米の研究者たちが欧米でやったこと、やろうとしていることを単に場所を変えてアジアでやったとしてはならない。

まず東アジアの自然条件を考えただけでもこの地域に特徴的な課題があるだろう。少なくとも次の 4 つの要素がこの地域の酸性雨問題にどう関わっているのかという間に答えていかねばならない：1) 黄砂、2) 海洋、3) 火山、4) 森林。1) 黄砂はアルカリ性のダストとして酸を中和しているのか？また、硫酸の生成反応の場を提供して酸性化に寄与しているのか？これらを定量的に評価する必要がある。2) 海洋上の降水量をはじめとする気象要素は？そして、その化学は？海塩粒子は硫酸化物、窒素酸化物の輸送や変換にどう関わっているのか？また、海洋から発生するガスとその量は？3) この地域の火山からどんな成分がどのくらい放出されているのか？4) 森林はこれまで「被害者」としての面が強調されてきたように思えるが、植物体から発生するガスなどの物質は酸性雨に関わっていないのか？バイオマスバーニングも含めるとどうなるのか？

そして、これらの研究はあらゆる枠を取り払ってアジアの研究者が取り組むことは当然であるが、欧米の研究者とも協力して進めていかねばならない。国内の省庁間の「壁」はもとより、国、地方自治体、大学などの「壁」を作ることは論外である。大きな国際共同事業に向かって国内の研究者、技術者、行政担当者、メーカーなど関連する人達の大きな協力なしでは到底できることではない。鼎の軽重が問われるとはこのことのような気がする。

6. ま と め

酸性雨の研究を始めて以来、考えていたこと、気になっていたことなどをこの機会にまとめることを試みた。ここに挙げたことのほとんどはさらに考察すべき問題であり、今後の調査・研究の課題であり、今後多くの、しかも異なる立場、観点の方たちとの討論や共同作業が必要である。本稿はそのための叩き台であり、改めて書き直したいと考えている。

そして、いま、もっとも大切なことは、酸性雨に関心を持つ全ての人々、研究、行政、エンジニア、経済界、教育、メディア、そして一般市民のかたがた、とにかくこの環境問題に関心を持つ全ての人々がそれぞれの立場、観点から、酸性雨の全体像をきちんと描くことである。そしてそのなかに自分の関心を位置づけてみて、もう一度全体とのつながりを問い直すことが必要なことである。そして、その認識をもう一段深めて、そこから酸性雨の本質に執拗に迫っていかねばならない。それがこの問題の解決に対しても、もう一歩近づくことになると考えている。

謝辞

この稿をまとめるについて多くの文献を参照した。しかし、ここでは事情により引用文献として挙げるのは割愛することにする。多くを教示いただいた文献の著者に感謝の意を表する。