

東アジアの大気環境問題と 環境モニタリングの役割

大歳 恒彦

はじめに

わが国では、高度経済成長に伴う収入や生活レベルの向上とともに、大気や河川の環境汚染を経験してきた。今、その環境汚染への反省とともに、低成長社会を迎えるにあたって、生活の質をどのように高めていくかというオプションのひとつとして、「よりよい環境の保全」があげられる。そこそこの個人の自由が優先される社会において、安全・安心で快適な生活を達成する重要なキーワードとして「環境」は欠かせない。一方で、現在めざましい経済成長がすすむ東アジア諸国においては、開発に伴う環境破壊が顕在化することもめずらしくなく、環境問題はまさに生活に直結する課題となっている。

「環境モニタリング」は、われわれが生活している、このようにかけがいのない環境、すなわち大気、河川、湖沼、土壌などの状態を測定・観測し、その結果をもとに現状を評価し、今後の対策などのために役立てることである。振り返れば、環境モニタリングに通常用いられている手法から、地球環境問題を理解することもできる。例えば、空気中の二酸化炭素濃度の測定を行うには、ある波長の赤外線（熱）をあてて、その吸収量をはかればよい。すなわち、二酸化炭素の温室効果ガスとしての特徴である熱の吸収を利用して環境モニタリングが行われている。一方、空気中のオゾン濃度の測定には、やはり特定波長の紫外線をあてて、その吸収量をはかればよい。これは成層圏のオゾン層が生物には有害な紫外線を吸収するのと同じオゾンの性質を利用して環境モニタリングを行っているのである。このように、環境モニタリングの手法は地球温暖化やオゾン層の破壊などの地球環境問題が騒がれるようになる以前からこれらのガス状物質の特徴を利用してきた。

大気環境の問題には、このような二酸化炭素やオゾンなどのガス状物質だけ

でなく、大気中に浮遊する粒子状物質に関するものもあり、自然現象である黄砂や、人為的に発生する金属成分などの測定は環境モニタリングの重要なテーマである。浮遊粒子中の元素の測定には、従来は原子吸光法や放射化分析法などが用いられてきたが、その後PIXE分析法を経てICP質量分析法による超高感度分析の時代となってきた¹⁾。

よりよい環境を実現するためには種々の規制や対策、経済的な措置などが必要なのはいうまでもないが、ここでは、環境モニタリングを中心に、それがどのような役割を果たしてきたか、また、今後、果たしていくべきなのかについての考察を、主に東アジア地域の国々の大気環境を例として試みる。

1. 環境問題の認識と環境モニタリング

それまでの開発や経済成長とならんで、環境の重要性が認識されるようになってきたのは、国際的には1972年のストックホルムにおける国連人間環境会議であり、我が国でも1970年代初頭の公害国会や環境庁設立の時期であり、いずれも先進国における産業型公害の深刻化がその背景にあった。一方、当時、開発途上国にとっては貧困こそが環境問題の最大の原因であり、「もっと開発と援助を…」という議論が主流を占めていた²⁾。

21世紀の環境と開発に関する世界各国の高度な政治的意思を結集し、持続可能な社会の構築を目指して国際社会が取るべき方策について具体的な方針を示そうとしたのが、1992年にリオで開催された国連開発環境会議（UNCED、地球サミット）である。この会議ではリオ宣言やアジェンダ21など、地球環境の状況に関する危機意識に裏打ちされた多くの提言がなされた。27の原則からなるリオ宣言は、第1原則において「持続可能な開発」の重要性について述べ、「人々は自然と調和しつつ健康で生産的な生活を営む権利を有する」としている。また、第4原則では、持続可能な開発を達成するために「環境保護は、開発過程の不可分の一部をなし、それから分離しては考えられない」としている。さらに、第15原則では「予防的原則」として「深刻なまたは回復しがたい被害のおそれが存在する場合」には、「科学的確実性の欠如」がある程度あったとしても、「環境悪化を防止するための対策を延期する理由」にしてはなら

ないとしている。このように、UNCEDにおいて提案された環境に関する取り組みの姿勢は、現在においても規範となるものである。

そもそも「環境」とは「空間と時間の経過のなかで、主体をとりかこむすべてのものとその状態」というような定義³⁾があるように、広い範囲の事象をさしているとともに、現在の状態だけではなく、過去から未来にわたる時間軸において評価されるべきものである。環境モニタリングについても、現状をとらえるだけではなく、過去から現在までの環境の状況を把握するとともに、予測を含めた将来の環境に関する配慮が必要になってくる。環境モニタリングについて、「環境」の時間軸を意識した役割が重要であるといえる。

2. 大気汚染が深刻な地域

発展途上国における主要な環境問題として、都市大気汚染があげられる。WHOとUNEP（国連環境計画）は世界中の先進国および開発途上国の主要35都市の1990年代前半における大気汚染モニタリングデータを収集した。図1に示すように、24の巨大都市（2000年に人口1,000万人以上）のうち、深刻な健康影響が懸念される大気汚染レベルにある20都市が報告されている⁴⁾。はじめに気づくことは、大気汚染がこれらの巨大都市に広がる共通の問題であり、特に開発途上国の都市において最も深刻なことである。しかし、先進国においても、WHOの健康ガイドライン値の超過が、その程度はわずかではあるがみられる。これらのうち20都市では、いずれもガイドライン値を少なくとも1項目以上超過している。また、14都市では2項目、7都市では3項目のガイドライン値を、それぞれ超過している。東アジア諸国で、このような大都市に該当するのは、北京、上海、東京、ソウル、ジャカルタ、マニラ、バンコックの7都市であり、上海以外はそれぞれ中国、日本、韓国、インドネシア、フィリピンおよびタイなどの国々の首都である。二酸化硫黄（SO₂）と浮遊粒子状物質（SPM）の汚染が共通にみられるのは、中国、韓国などの北東アジアの国で、石炭燃焼によるものと考えられる。東南アジアの国々ではSPMに加えて、鉛（Pb）や一酸化炭素（CO）など自動車排気に関連する大気汚染が深刻であることがわかる。また、わが国では大気環境基準の達成率が全国的に低い光化

学オキシダント（O₃、オゾンが主成分）が東京の主な大気汚染物質としてあげられている。

都市名 \ 汚染項目	SO ₂	SPM	Pb	CO	NO ₂	O ₃
バンコク	○	●	●	○	○	○
北京	●	●	○	○	○	●
ボンベイ	○	●	○	○	○	○
ブエノスアイレス	○	●	○	○	○	○
カイロ	○	●	●	●	○	○
カルカッタ	○	●	○	○	○	○
デリー	○	●	○	○	○	○
ジャカルタ	○	●	●	●	○	●
カラチ	○	●	●	○	○	○
ロンドン	○	○	○	●	○	○
ロサンゼルス	○	●	○	●	●	●
マニラ	○	●	●	○	○	○
メキシコシティ	●	●	●	●	●	●
モスクワ	○	●	○	●	●	○
ニューヨーク	●	●	○	●	●	●
リオデジャネイロ	●	●	○	○	○	○
サンパウロ	○	●	○	●	●	●
ソウル	●	●	○	○	○	○
上海	●	●	○	○	○	○
東京	○	○	○	○	○	●

図1 モニタリングデータおよび排出源インベントリーの評価に基づく、
20巨大都市の大気質の概要⁴⁾

- 深刻な汚染。WHOガイドラインを2倍以上も超過している。
- 中程度から軽度の汚染。WHOガイドラインの2倍までの濃度（一部の地点では短期間ガイドラインを恒常的に超過）。
- 軽度の汚染。通常はWHOガイドラインに適合。（場合によって、短期間ガイドライン超過）。

3. 環境モニタリングシステムの大気保全への貢献

環境モニタリングは初期の環境保全政策の一部をなすものである。東アジアの新興開発途上国の中でも優等生といわれるマレーシアの例では、政府は大気質ガイドライン、大気汚染インデックス、ヘイズ（Haze, 主に森林火災による大気汚染といわれる）行動計画などを設定した。最初の長期大気モニタリングプロジェクトは浮遊粒子状物質およびSO₂に重点を置いて環境局および気象局の協力のもと、首都圏のペタリンジャヤ周辺の工業・住宅地域で1978年に実施された。当時の調査の結果、浮遊粒子状物質濃度は、基準値である0.1mg/m³（24時間値）を工業地域および住宅地域においてそれぞれ90%以上の時間帯において超過していることがわかった。現在では、全国31カ所で大気モニタリングが行われており、そのうち10カ所は1996年に設置された自動測定器によるテレメータシステムであり、マレーシアの大気環境保全に多いに貢献している⁵⁾。

我が国でも、環境モニタリングのシステムは産業公害などによる環境汚染の進行とともに発達してきた。その最も深刻な例として、四日市市において1960年代初頭に石油化学コンビナートの稼働を開始し、1963～1964年には大気汚染レベルは最悪となった。当時、重油中の硫黄含有量はおおよそ3%もあり、四日市市からのSO₂排出量は年間13～14万トンと推定された。このため、この地域における大気中SO₂濃度は年平均値で0.075ppm（現在の環境基準値の約4倍）であった。1961年以降、住民の喘息様症状の訴えが始まった。多くの症状のうち、呼吸困難などとSO₂濃度との相関関係が明らかになった。統計によると、「四日市喘息」とよばれる患者の数は1,738名に達した⁶⁾。我が国において、国設の大気汚染モニタリングネットワークによる測定が東京および大阪圏などの大気汚染のひどい3カ所でスタートしたのは1965年のことである。ネットワークはその後、全国数十ヶ所に広がり、ガス状汚染物質濃度だけでなく、浮遊粒子濃度およびその成分についても測定を続けた。大気汚染の自動測定器が威力を発揮したが、当初はいずれの測定器も測定感度や精度が満足できるものは少なかった。例えば、SO₂濃度は徐々に減少し（SO₂濃度の全国年平均値は、1973年に0.030ppmであったが、1987年には0.010ppmとなっ

た)、濃度の低下に伴って、高感度型の測定器が開発されてきた。また、SO₂濃度の減少とともに、次第に他の汚染物質である窒素酸化物や微小な浮遊粒子による大気汚染に焦点が当てられるようになった。ネットワークは全国をカバーした測定を継続するとともに、有害大気汚染物質を含む新たな成分の測定を通じて大気環境の保全に大きく寄与しているといえる。現在は全国の自治体による測定が整備されて、SO₂および窒素酸化物をはかる一般環境大気測定局はそれぞれ約1,400ヶ所以上となっている⁷⁾。

4. 大気環境の改善事例

多くの国が自動車燃料として、有機鉛化合物を添加したガソリンを使用し、その結果、深刻な大気汚染に直面した経験を持つ。テトラアルキル鉛はガソリンに添加することによって、最も経済的かつ簡単にすべての種類のガソリンについてオクタン価を上げることができる。一方で、鉛は人の健康に有害な重金属であり、特に子供や妊娠した女性への影響が大きいといわれている。主な症状は精神的発達（たとえば読解力や学習能力障害）、肝臓機能、心臓機能、血液化学への影響、集中力の欠如、および難聴などである。例えば、インドネシアにおける疫学的な調査の結果によると、有鉛ガソリンの排気に曝露される機会の多い交通警察官や運転手の血液中の鉛濃度は一般人と比較して高いだけでなく、血液中のデルタアミノレブリン酸脱水素酵素（ALA-D）の生成能力が落ちていることがわかった⁸⁾（図2）。我が国においても、1968年に東京の交通量の多い区域で「牛込柳町における鉛中毒」として取り上げられた。

タイの場合、大気汚染はバンコク首都圏においては重要な環境問題のひとつである。バンコクの大気汚染は経済が急激に発展した1992年頃に最も深刻になり、浮遊粒子濃度は環境基準の10倍、一酸化炭素や鉛濃度も基準値を数倍超過した⁹⁾。しかし、1995年からは建設活動への法的規制、排出基準の強化、鉛ガソリンの廃止や公共キャンペーンをより効率的に行ったことにより、大気質は徐々に改善された。特に、有鉛ガソリンは健康に有害であることから、タイ政府は段階的にガソリンへの鉛添加を廃止することを決定した。タイにおけるガソリン中の鉛濃度は1989年に0.45g/ℓから0.40g/ℓに削減され、その後

徐々に1992年までに0.15g/lに減らされた。その後、1994年に無鉛プレミアムガソリンが導入され、1997年には無鉛ガソリンの使用が義務化された。この結果、バンコクにおける大気中鉛濃度は図3に示すように、大幅に減少した。

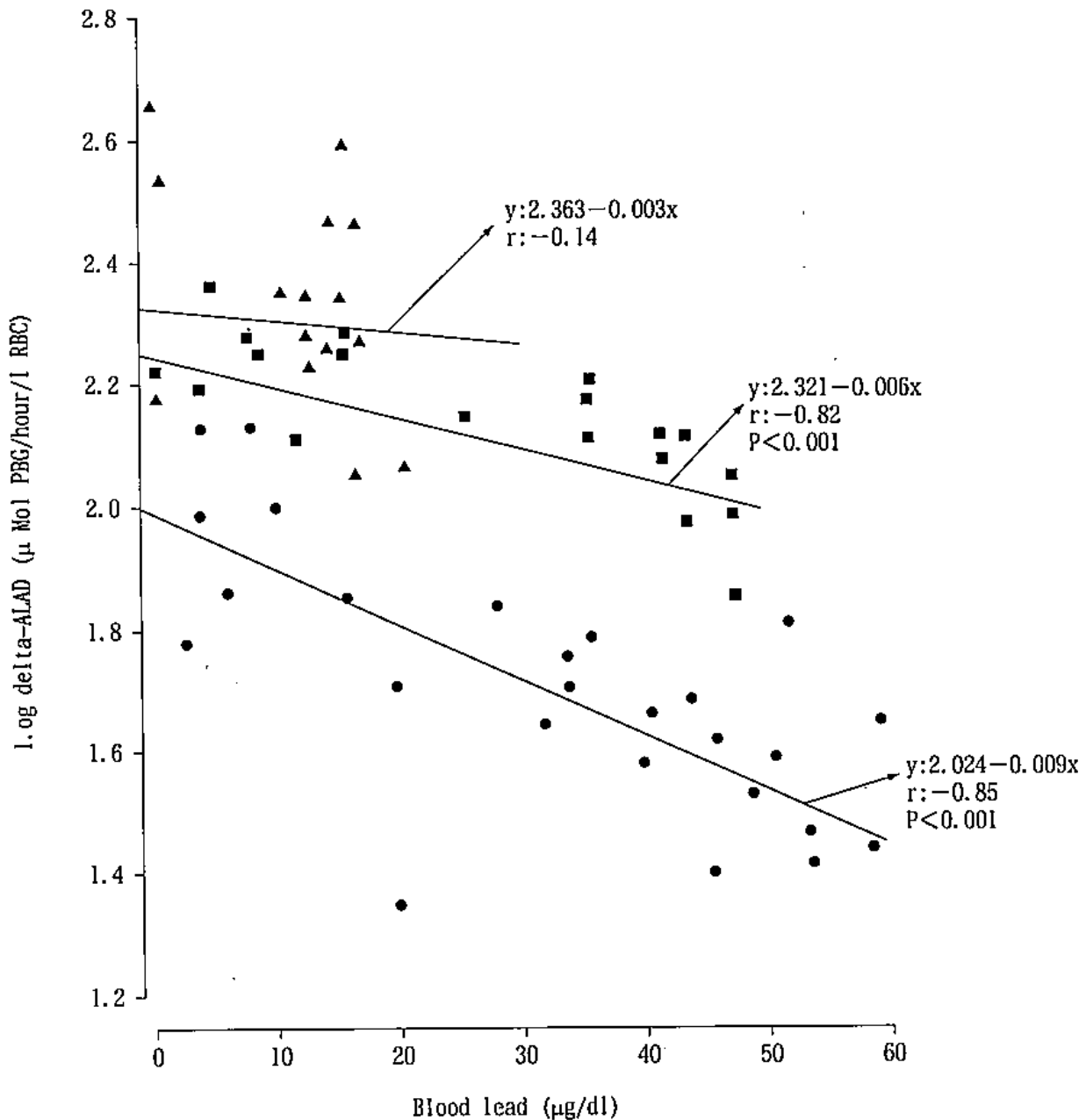


図2 血液中の鉛濃度とALA-D濃度の関係(バンドン、1983-84年)⁸⁾

(▲: 地域住民、 ■: 運転手、 ●: 警察官)

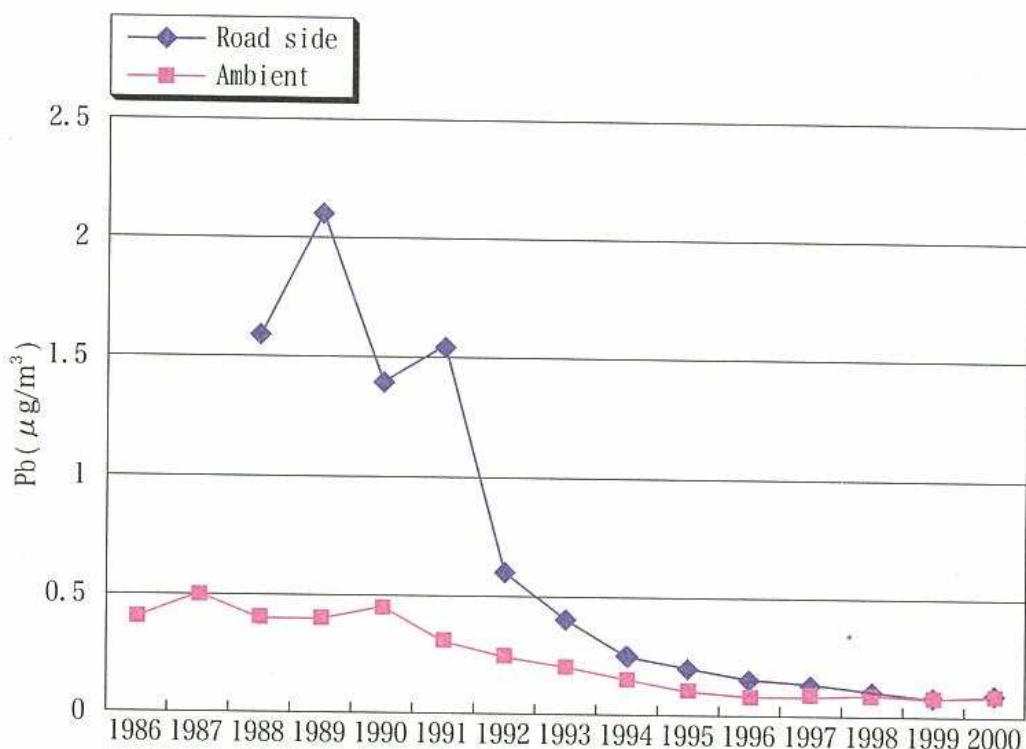


図3 バンコクにおける大気中鉛濃度の変遷(1986-2000年)⁹⁾

5. 発ガンの可能性がある有害元素のモニタリング

東アジアの7カ国（中国、韓国、日本、フィリピン、インドネシア、タイ、マレーシア）の放射化分析の研究者が2002年から協力して大気中の多元素分析を行っている¹⁰⁾。各国それぞれ1～2ヶ所の測定地点において毎月1回、同様な方法によって大気中の浮遊粒子をフィルターに捕集し、放射化分析を行っている。フィルター試料はそれぞれの国の研究用原子炉において、熱中性子の短時間および長時間照射後、生成する放射性核種の測定をGe半導体検出器によって行った。分析対象となる元素は、主に土壌に由来するアルミニウム (Al)、スカンジウム (Sc) や海塩に由来するナトリウム (Na)、塩素 (Cl)、人為的な発生源によるヒ素 (As)、臭素 (Br)、アンチモン (Sb)、セレン (Se)、バナジウム (V) などに分類できる。参加国のうちには、発展途上国が多く、特に工業地域と分類される測定地点にはかなり高濃度の元素濃度を示すところもある。ここでは将来の健康上の影響を考慮するため、発ガンの可能性があるいくつかの元素についてのWHOのリスク評価を引用する¹¹⁾。これら元素の長期の曝露による健康影響の可能性が懸念されている。

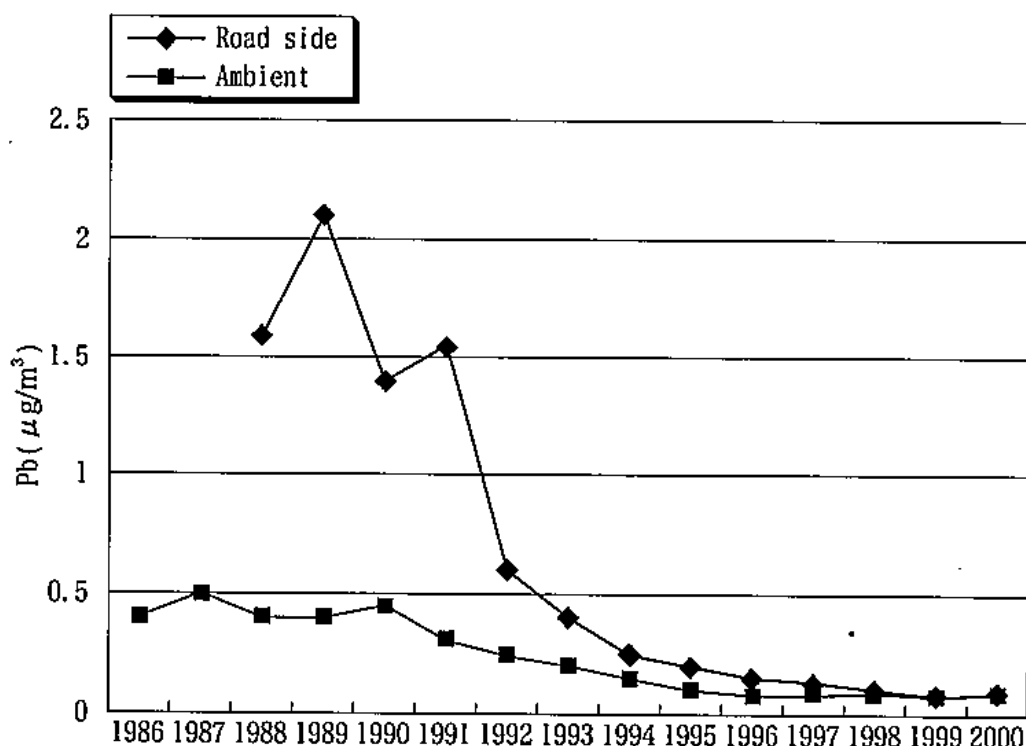


図3 バンコクにおける大気中鉛濃度の変遷(1986-2000年)⁹⁾

5. 発ガンの可能性がある有害元素のモニタリング

東アジアの7カ国(中国、韓国、日本、フィリピン、インドネシア、タイ、マレーシア)の放射化分析の研究者が2002年から協力して大気中の多元素分析を行っている¹⁰⁾。各国それぞれ1~2ヶ所の測定地点において毎月1回、同様な方法によって大気中の浮遊粒子をフィルターに捕集し、放射化分析を行っている。フィルター試料はそれぞれの国の研究用原子炉において、熱中性子の短時間および長時間照射後、生成する放射性核種の測定をGe半導体検出器によって行った。分析対象となる元素は、主に土壌に由来するアルミニウム(Al)、スカンジウム(Sc)や海塩に由来するナトリウム(Na)、塩素(Cl)、人為的な発生源によるヒ素(As)、臭素(Br)、アンチモン(Sb)、セレン(Se)、バナジウム(V)などに分類できる。参加国のうちには、発展途上国が多く、特に工業地域と分類される測定地点にはかなり高濃度の元素濃度を示すところもある。ここでは将来の健康上の影響を考慮するため、発ガンの可能性があるいくつかの元素についてのWHOのリスク評価を引用する¹¹⁾。これら元素の長期の曝露による健康影響の可能性が懸念されている。

ヒ素の健康影響について検討すると、大気中のヒ素は火山などの自然発生源、金属精錬、特に低品質の褐炭など化石燃料の燃焼、および一部農薬などの人為的発生源の両方から発生する。高い濃度のヒ素に曝露される可能性の高いグループとしては、労働環境で曝露される者、異常に高い濃度のヒ素を含む飲料水を飲む者、および銅製錬所に隣接する住民達の3つのグループがあげられる。無機ヒ素化合物が人間の皮膚ガンおよび肺ガンの原因物質とされる十分な証拠が存在する。現在のリスク推定は米国およびスウェーデンにおいて高い濃度に曝露された集団の調査に基づいている。線形の量-反応関係を仮定すると、呼吸器からの曝露による安全値を推奨することはできず、ヒ素の $1\mu\text{g}/\text{m}^3$ に対する生涯リスクは 1.5×10^{-3} である。ここから、ヒ素の生涯リスク10万分の1に相当する大気中のヒ素濃度は $6.6\text{ng}/\text{m}^3$ と推定される。

東アジア各国において2002年に実施された大気調査の結果¹²⁾を上記のWHOガイドラインと比較すると、ニッケル、バナジウムなどについて、環境濃度はリスク評価からも問題とされる濃度ではないが、ヒ素については生涯リスク10万分の1に相当する濃度に近い値が出現していることがわかった。環境モニタリングの役割として、従来は環境の現状の把握が主なものであったが、将来の健康影響に関する予防的な役割としては、このような点について指摘し、改善のための方策を検討していくべきと考える。

表1 発ガン性物質によるリスクと東アジア地域の濃度例¹²⁾

項目	WHOガイドライン	FNCA (工業地域)	FNCA (都市部)	FNCA (郊外)	備 考
As	$6.6\text{ng}/\text{m}^3$ (1:100,000 リスクレベル)	$5.3\text{ng}/\text{m}^3$	$2.7\text{ng}/\text{m}^3$	$3.5\text{ng}/\text{m}^3$	
Ni	$25\text{ng}/\text{m}^3$ (1:100,000 リスクレベル)	—	—	—	$25\text{ng}/\text{m}^3$ (日本指針値)
V	$1,000\text{ng}/\text{m}^3$	$19\text{ng}/\text{m}^3$	$7.3\text{ng}/\text{m}^3$	$2.3\text{ng}/\text{m}^3$	
Cr (VI)	$0.25\text{ng}/\text{m}^3$ (1:100,000 リスクレベル)	—	—	—	

注) FNCA:「アジア地域における原子力協力事業」の一環として得られた2002年の大気環境モニタリングデータ。工業地域としてテジョン(韓国)、都市部としてバンコク(タイ)、郊外として酒田(日本)などの都市で測定されている。

ま と め

ここでは主に大気に関する環境モニタリングの実例を示し、よりよい環境を目指すための役割について考えてきた。環境モニタリングの手法は、現状の環境を把握するための鏡となったが、対象となる物質の種類と濃度の変遷に従って発展してきたともいえる。その典型的な例がSO₂の測定であり、1960～70年代の公害の時代には高濃度で測定そのものは容易であったが、1時間毎の自動測定器は満足のいくものではなかった。また、自動測定の技術が発達するとともに、対策の結果低くなってきたSO₂濃度にも対応できる機器の高感度化が達成された。現在、ほとんどの先進国では、火山地帯などの例を除き、健康影響上の問題となるようなSO₂濃度は出現しなくなりつつある。有鉛ガソリンによる大気の鉛汚染は、住民の健康影響と大気中重金属の関係が最も深刻に問われるものであった。SO₂や鉛の環境モニタリングのデータは疫学研究とも連携し、よりよい環境に向けた取り組みの足がかりになるだけでなく、対策がどの程度効率的に実施されているかを検討するための指針にもなった。

環境を正しく評価するには、時間軸に沿って過去から現在を超えて、将来の危険性についても考慮しなくてはならない場合がある。その例として、大気中のヒ素のように、現在、健康被害が顕在化していなくとも、そのリスクについて検討することが必要とされるような項目もある。環境モニタリングはこのような物質について今後、より多くの物質についての有益な情報を提供していくであろう。

引用文献

- 1) 橋本芳一、大歳恒彦：放射化分析法・PIXE分析法、共立出版（1986）、その他
- 2) ヨハネスブルグサミットからの発信、「エネルギーと環境」編集部編、エネルギージャーナル（2003）、
- 3) 橋本道夫、公務員研究双書一環境政策、ぎょうせい（1999）、
- 4) David Mage et al., Urban air pollution in megacities of the world, *Atmospheric Environment*, 30(5), 681-686(1996).
- 5) Rafia Afroz et al., Review of air pollution and health impacts in Malaysia,

Environmental Research, 92, 71-77(2003).

- 6) 日本の大気汚染経験、日本の大気汚染経験検討委員会編、公害健康被害補償予防協会.
- 7) 環境省、環境白書（平成17年版）、ぎょうせい（2005）.
- 8) Shosuke Suzuki, Health effects of lead pollution due to automobile exhaust: findings from field survey in Japan and Indonesia, *J.Human Ergol*, 19, 113-122(1990).
- 9) Thailand State of Environment The Decade of 1990s, Pollution Control Department, Ministry of Natural Resources and Environment.
- 10) M.Ebihara et. al., Collaborative monitoring study of airborne particulate matters among seven Asian countries, *J.Radioanal. Nucl. Chem.*, 269, 259-266(2006).
- 11) WHO air quality guideline for Europe 2nd edition, WHO regional office for Europe(2000).
- 12) Tsunehiko Ootshi, Evaluation of 2002 NAA Data on Particulate Matters Collected by the FNCA Network, Report on FNCA Workshop on the Utilization of Research Reactor (2005).

ABSTRACT

Air Pollution of East-Asian Countries and Environmental Monitoring

Generally, highly populated and/or industrialized areas face serious air pollution. Particularly in developing countries in east-Asian region, without effective measure to control emission from automobiles and industries, millions of people will be exposed to unhealthy and dangerous levels of air pollution.

State of the environment can be assessed by the good quality of monitoring data, and environmental monitoring is a part of initial strategy in the pollution prevention program. In these days, monitoring parameters include newly focused heavy metals as well as traditional air pollutants such as SO₂, NO₂, CO, SPM, O₃, and Pb. Environmental monitoring often traces improvement of air quality, and will prevent future health risk of carcinogen, such as As in some in polluted areas.