

特集③

米国における大気中微小粒子・ ナノ粒子の健康影響に関する 研究戦略 —我が国との比較



客員研究官 新田 裕史*
環境・エネルギーユニット 浦島 邦子**

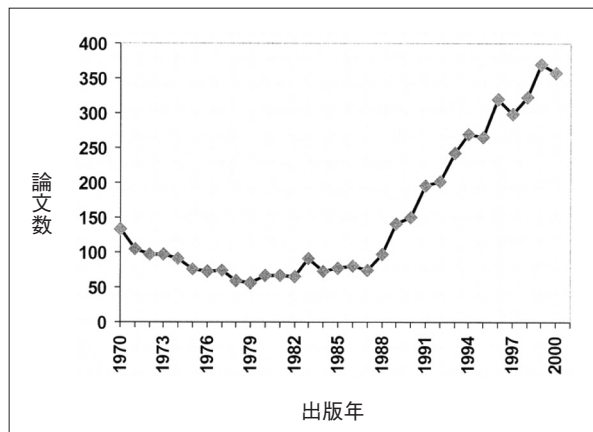
1. はじめに

国民の健康を守るために、大気汚染物質の健康影響を評価し、大気汚染物質濃度と健康影響の程度との量的関係に基づいて環境基準を定めることは、環境行政の中心的課題のひとつである。日本では約30年前に粒子状物質を含む5つの大気汚染物質（いわゆる伝統的大気汚染物質）の環境基準が定められ、現在に至っている。科学技術の世界からみれば、伝統的大気汚染物質の健康影響に関する科学的基盤はすでにほぼ確立したものであり、いわば「古い」研究領域であり、少なくとも日本では急速に発展しつつある研究領域とは無縁のものとみなされていた。

わが国同様、米国においても1970年代までには大気汚染防止対策の効果によって大気は清浄化されて、疫学研究の結果でも大気汚染に関連する大きな健康問題はなくなったと考えられていた。図表1に示されるように、医学文献データベースMEDLINEでの「大気汚染の疫学」に関する論文数の動向をみても、1980年代の後半までは漸減傾向にあった。しかし、その後は急激に論文数の増加がみられている¹⁾。

現在、当所では第3期科学技

図表1 MEDLINEでの大気汚染の疫学に関する論文数の推移¹⁾



術基本計画の策定に向けて、さまざまな技術予測調査を実施している。その1つとして、研究成果が主に学術論文として発表されるような基礎研究、あるいは科学の分野を対象にして、論文データベースを用いて最近数年間で急増している研究領域を定量的に分析した²⁾。この中で示されている51の領域の中に、「大気中粒子状物質の健康影響」が挙げられている。他の多くの領域がライフサイエンスなど、日本をはじめ世界各国がその振興に重点を置いている分野であるのに対して、本領域が急速に発展しつつある研究領域として抽出されたことは一般にはやや奇

異な印象を与えるかもしれない。しかし、このような結果となった直接の要因は、米国での粒子状物質の健康影響に関する研究の進展と環境基準という環境行政上の最も重要な施策決定という2つの軸の相互作用によるものである。

本年7月に米国環境保護庁(EPA)は、大気汚染と心臓血管疾患との関係に関する疫学研究について、これまでEPAが過去に科学研究として提供した中で最高額である3,000万ドル(32億円)の補助金をワシントン大学に提供することを発表した³⁾。本研究領域の発展が今後も続く気配をみせている。

* につたひろし ● 独立行政法人国立環境研究所 PM_{2.5}・DEP プロジェクト 疫学・曝露評価研究チーム 総合研究官
● <http://www.nies.go.jp/index-j.html>

2. 背景

2-1

大気中微小粒子の健康影響評価の歴史

大気中粒子状物質の人体に対する影響を我々に知らしめる契機となったのは、世界各国で発生した20世紀前半に起きた図表2に示すような事柄による。

2-2

健康リスク評価

一般に、大気汚染物質の健康リスクの評価は複数の研究手法に基づいて行われる。健康リスク評価において最もよく採用されるのは動物実験 (in vivo) と疫学研究による知見である。基本的に非実験科学である疫学研究は、人の集団における病気の発生頻度とさまざまな要因の関連性を調べる学問である。例えば、他の要因との関連性を考慮した上で、大気汚染物質へ高濃度に曝露される地域集団と低濃度曝露団との間で、気管支喘息発症率を比較するような疫学研究が実施される。毒性学では実験

動物などに特定の環境因子を一定条件下で曝露させて、様々な生体反応の発生状況やそのメカニズムを調べる。例えば、自動車排ガスをラットなどに吸入させて、どのような生体反応が現れるかを調べることが行われる。

大気中粒子状物質の健康影響に関する研究では、一般に疫学研究による知見が先行して発表され、これらの疫学的知見の提示した仮説を検証するために、実験研究がすすめられるという過程をとることが多かった。一般に信頼性の高い疫学的知見が入手可能である場合には、健康リスクの評価には動物実験データよりも疫学データが好ましいと考えられている。昨年示された中央環境審議会の答申の中で「環境目標値の設定に当たって数値の算定に必要となる有害性評価に係る定量的データは、主に疫学研究と動物実験から得られるが、このうち疫学研究はヒトから直接得られるデータであることから重要度が高く、これまで環境基準の設定の検討においても、原則として疫学研究などヒトのデータに基づいて設定されてきていると

ころである。一方、信頼し得るヒトのデータがない場合は、動物実験のデータをヒトへ外挿することにより数値を算出するのが一般的である」とされている⁴⁾。ただし、疫学データを好ましいとすること、1つ2つの数少ない疫学研究結果を重視することとは違う。疫学研究が基本的に観察研究であることから、環境分野では特に信頼性の高い結果の一致性、すなわち異なる集団で互いに一致する結果が得られているかどうかを重視している。

2-3

大気中粒子状物質の特徴と人体への影響

人の呼吸器は鼻腔および口腔から咽頭を經由して、気管から気管支へと約20数回枝分れしながら、最終的に肺胞に達する。気管は2cm弱の直径があり、気管支の末端では1mm以下となって肺胞につながっている。粒子が吸入されると、粒径^①の大きいものは衝突ないし沈降によって気道壁に沈着する。肺胞領域まで達した粒径の小さい粒子は拡散によって肺胞壁に沈着する。

一方、大気中粒子は粒径によってその生成機構が異なり、微小粒子の方が健康影響からみて問題が大きいと考えられる成分が多く含まれている。そのため、粒径はその呼吸器系への沈着と大気中での生成機構による成分の違いの両面から、健康影響に大きく関わって

図表2 大気汚染による被害

年	場所	事件名	被害
1930年	ベルギー	ミューズ川渓谷事件	リエージュの近くで石炭燃焼を行う鉄鋼業工場が多いムーズ川沿いの大気汚染で63人に上る死亡者がでた。当時は静穏な状態が続き、霧が発生したためSO ₂ の高濃度汚染となった。
1948年	米国ペンシルバニア州	ドノラ事件	渓谷にあった製鉄と亜鉛精錬工場からの排煙が原因で20人が死亡し、5,910人(住民の43%)が病気になった。
1950年	メキシコ	ボザ・リカ事件	工場において、天然ガスから硫黄を取り出す過程で硫化水素(H ₂ S)が誤って大気中に漏れた。300名余りが病院に収容され、22人が死亡。
1952年	英国	ロンドンスモッグ事件	約1週間にわたって粒子状物質と二酸化硫黄濃度が上昇して、約4,000人が死亡した。
1960年代	四日市	四日市喘息事件	喘息や気管支炎の被害が続出した。

用語説明

①粒径

粒子状物質を粒径によってものさして測った長さではなく、空気の流れの場の慣性に関わるもので、空気力学径と呼ばれている。

くることになる。

我が国では大気中粒子状物質のうち、粒径 $10 \mu\text{m}$ 以下の粒子（浮遊粒子状物質と呼ぶ。SPM と略称される）について環境基準が定められている。米国では PM_{10} と $\text{PM}_{2.5}$ の2種類の粒径特性を持つ粒子の環境基準が設定されている。 $\text{PM}_{2.5}$ は空気力学径が $2.5 \mu\text{m}$ 以下の粒子のことである。ただし、 $2.5 \mu\text{m}$ 以下の粒子といっても、 $2.5 \mu\text{m}$ 以下の粒子を100%含み、 $2.5 \mu\text{m}$ を越える粒子は全く含まれないというものではない。 $\text{PM}_{2.5}$

は捕集効率が50%となる空気力学径が $2.5 \mu\text{m}$ となる粒子のことである。同様に、 PM_{10} は捕集効率が50%となる空気力学径が $10 \mu\text{m}$ となる粒子のことである。一方、我が国のSPMは $10 \mu\text{m}$ を越える粒子が100%カットされている粒子のことである。SPMと PM_{10} は異なる粒径分布を持つものであり、平均粒径からいうと $\text{PM}_{2.5} < \text{SPM} < \text{PM}_{10}$ ということになる。

これらの粒径に基づく粒子状物質に関する名称以外にも、国の種々の法律や規制の中にさまざま

な粒子の名称が表れる。粉じん、ばいじん（煤塵）、ばい煙などである。さらに、粉じんの中にも浮遊粉じん、スパイクタイヤ粉じん、特定粉じん（石綿など）の種類がある。これらの多くは、生成過程に由来するもの、測定法に由来するもの、ないし発生源に由来する名称である。ディーゼル排気粒子は発生源に由来する名称の例である。また、大気科学の領域では大気中粒子状物質とほぼ同義でエアロゾルという用語が用いられることも多い。

3. 米国における大気中粒子状物質に関する90年代以降の研究戦略

3-1

PM_{2.5} 大気環境基準設定のインパクト

米国では、粒子状物質の大気環境基準は1971年に初めて定められ、その後1987年に改定され、さらに1997年に再改定された。1971年の環境基準はTSP（総浮遊粉じん）について定められたものである。1987年には PM_{10} について定められた。1997年の新しい環境基準では、 PM_{10} に加えて $\text{PM}_{2.5}$ の環境基準が追加された。TSPでは粒径についての規定はなかったが、標準測定法であったハイボリウムエアサンプラーの特性から実質的には約 $40 \mu\text{m}$ 以下の粒子が捕集されていた。したがって、米国の粒子状物質の環境基準は $40 \mu\text{m}$ から $10 \mu\text{m}$ 、さらに $2.5 \mu\text{m}$ と徐々に細かい粒子を視野に入れて改定されてきたといえる⁵⁾。

$\text{PM}_{2.5}$ の環境基準が設定されたのは、それまでの環境基準値以下のレベルでも死亡、疾病等の健康影響と大気中粒子濃度との関連性がみられることと、さらに PM_{10} よりも $\text{PM}_{2.5}$ の方が関連性が大きい可能性を考慮したものである。

環境基準は年平均値と24時間平均値それぞれについて定められている。成人の死亡率の上昇、子供の気管支炎の増加、子供の肺機能低下などの健康指標が長期曝露の影響として取り上げられている。また、急性死亡、入院増加、呼吸器症状増加、肺機能低下が、 $\text{PM}_{2.5}$ 濃度の日間変動などの短期的変動と関連することが示されている。その中で最も特徴的な知見は $\text{PM}_{2.5}$ 濃度の日平均値がその日ないし翌日の死亡と関連するというものである。しかも、ロンドンスモッグ事件のような高濃度現象に伴うものではなく、世界の大都市部で普通に観測される程度の日間変動範囲で認められるというものであり、それまでの「常識」を覆すものであった。

1980年に疫学の分野で最も権威ある学術雑誌のひとつである American Journal of Epidemiology に、英国の著名な疫学者らの粒子状物質の大気汚染による健康影響に関する総説が掲載された⁶⁾。その中で、一般の大気環境でみられる濃度範囲の粒子状物質と二酸化硫黄 (SO_2) によって、健康な人に死亡を引き起こすような証拠はないと結論づけた。この総説は米国の鉄鋼業界がスポンサーになっ

ていたために社会的な議論を引き起こしたが、結論は当時の学会の共通認識から大きく外れたものではなかった。多くの研究者は短期的な曝露で健康影響が生ずるような大気汚染はすでになくなり、低濃度の長期曝露によってのみ健康影響が起ころうと考えていた。

1987年の環境基準改定以降、コンピュータや統計解析手法の進歩により、新たな研究の展開が起こった。米国や欧州のいくつかの都市における日死亡と、大気中粒子濃度との正の相関を示す研究報告が続けて発表された。同時に、最も有名な大気汚染の健康影響に関する長期疫学研究のひとつであるハーバード大学研究グループの Six City Study による死亡に対する長期曝露影響に関する疫学研究成果が1993年に New England Journal of Medicine 誌に発表⁷⁾ され、大気中粒子の健康影響に対する関心が一気に高まった。先に述べた図表1で示される論文数の増加に転じたのは、このような時期に当たっている。そのような状況の中で EPA は1994年より環境基準の見直し作業を開始して、1997年に改定に至ったのである。

EPA は粒子状物質の環境基準改定と同時にオゾン (O_3) の

環境基準についても改定した。SPMやPM_{2.5}の生成には、ガス状大気汚染物質である窒素酸化物(NO_x)、硫黄酸化物(SO_x)、揮発性有機化合物(VOC)、および大気中でこれらが光化学反応を起こして生成するO₃が関係している(図表3)。したがって、微小粒子とオゾンの環境基準を達成するための規制はガス状大気汚染物質を含む多くの大気汚染物質の排出源に及ぶことになる。すなわち、微小粒子とオゾンの環境基準設定は、単に一次粒子の排出規制に留まらないインパクトを排出者に与えることになる。

環境基準の設定とそれに伴う規制は、利害の対立を生む。大気汚染の場合には曝露される人口が非常に多く、子供、高齢者、病弱者などの高感受者が含まれる。さらに、主要な大気汚染の発生プロセスは化石燃料の燃焼であるため、排出者は化石燃料を使用する産業界から消費者まで広範囲である。また、汚染防止対策や健康被害により経済的にも大きな費用を発生させる。EPAは1997年の環境基準改定時にRegulatory Impact Analysis⁹⁾を行い、環境基準を達成することによって1年当たり190億ドルから1,040億ドルの便益があり、一方、費用は86億ドルと推計した。便益には大気汚染

に関する死亡、病気、労働損失や活動制限の減少によるものが含まれる。費用の主なものは規制に対応するための大気汚染防止設備への投資である。

1997年の環境基準改定後、産業界等はこの大気環境基準の有効性等について裁判所に提訴した。訴えのポイントは環境基準改定が十分な科学的根拠なしに行われたというものであった。具体的には、PM_{2.5}が人の健康に与える影響のメカニズムは明らかとなっておらず、またEPAが基準の根拠とした疫学研究では、曝露と健康影響との間に強い統計的な関係が示されていたとしても、それが因果関係かどうかは明確ではなく、環境基準の根拠としては不適切であるというのが原告の訴えであった。この裁判は現在では一応決着し、基本的にEPAが勝訴して、PM_{2.5}については改定された環境基準が有効となっている。

3 - 2

優先課題の設定、予算措置

1997年の改定、特にPM_{2.5}の環境基準の追加は、複数の疫学研究に基づくものである。EPAは疫学研究結果の一致性を重視して環境基準を改定したが、裁判での争点となったように、これらの科学

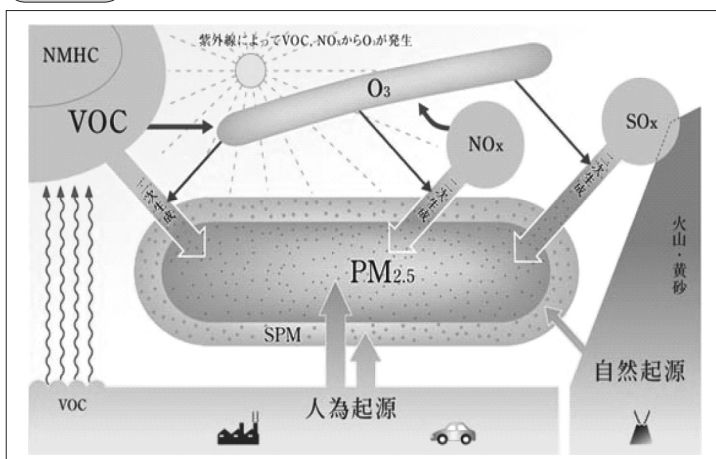
的知見には多くの不確実性が含まれていたことも事実である。このような科学的知見の不確実性をできるだけ減らすために、1998年に米国議会は大気中粒子状物質研究予算を倍増させるとともに、全米科学評議会(NRC)による大気中粒子状物質の研究推進・管理をEPA長官に指示した。NRCは議会の要望に応えるために、環境基準設定に必要と考えられる優先研究課題の選定、大気中粒子研究スキームの提示、研究進捗状況の監視のための委員会を設置した。

NRC委員会は大気中粒子状物質の排出から大気中の動態、人への曝露、体内への吸入、生体影響発現の5つの基本要素ならびに各要素間の関連性にいたる全ての過程の中で、科学的な不確実性をリストアップした¹⁰⁾。

環境基準の設定のためには当該汚染物質への曝露量と健康影響との量的関係(量-反応関係)に関する知見が必要であることはいうまでもないが、設定された環境基準を達成するための規制を公正かつ効率的に実施するためには、発生源から人への曝露に至る過程のすべてを科学的に解明しなければならない¹¹⁾(図表4)。そのため、米国の大気中粒子状物質の研究戦略は、環境行政上の要請である環境基準値の科学的根拠の不確実性を減少させるという直接的な目的に留まらず、大気汚染物質の排出から大気中の動態、人への曝露、体内への吸入、および生体影響発現に関わる医学、生物学、大気科学、計測技術などの関連する基礎科学までも含むものとなった。

大気中粒子研究の優先課題選定は科学的価値、政策決定における価値、および実行可能性とタイミングという3つの軸で評価された。タイミングについては当初2002年の環境基準の再検討時期が目標とされた。その結果、図表5

図表3 大気中での粒子状物質とオキシダントの生成⁸⁾



の10の優先課題が選定された。

これらの10課題について1998年から2010年まで13年間の研究ポートフォリオを提示した。EPAは具体的な研究推進のために、非競争的資金や競争的研究資金の枠組みであるSTARプログラム(The Science to Achieve Results Program)を活用して、大学などの外部研究機関やEPAの内部研究機関に研究費を投入した。1999年には議会の要請により、STARに基づき粒子研究センターを設置

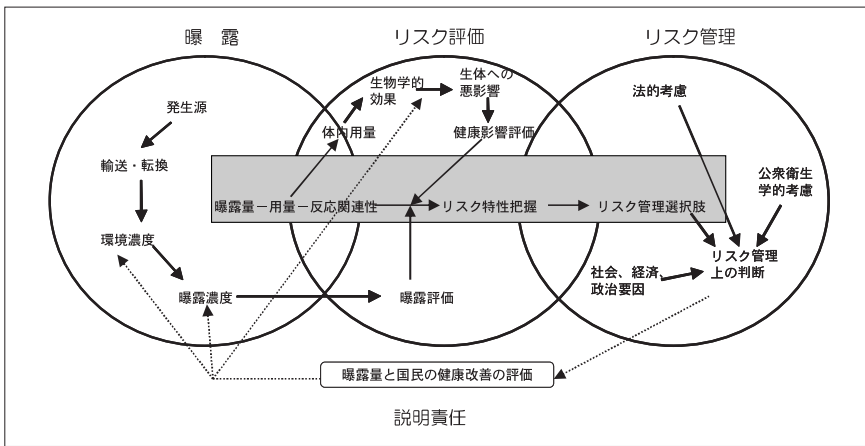
することになった。この研究センター募集には全米から20の応募があり、ハーバード大学、ニューヨーク大学、ワシントン大学、カリフォルニア大学ロサンゼルス校、ロチェスター大学の5大学がCOEに選ばれた。各研究センターには1999年から5年間で約800万ドルの研究費が助成された(なお、現在、第2期の研究センターが公募されている)。

EPAは1998年～2003年までに年間約6千万ドル、総額約

3億7千万ドルの研究費を大気中粒子研究に投入した(図表6)。このうち大学等の外部研究機関への研究予算は約32%であり、残りはEPAの附属研究機関等の内部研究予算であった。これらの研究費には上記10課題に関するもの他に、これらの研究の基礎となる大気中粒子状物質の標準測定法の検討、粒子中化学成分分析法の開発、スーパーサイトと呼ばれる全米7カ所に設置された高度モニタリングサイトの運営費、排出源データベース作成なども含まれる。

NRC委員会は、1999年と2001年の中間評価の報告書^{12,13)}で研究課題の若干の改定と研究進捗状況の評価を行った。2004年には1998年から2003年までの研究成果を評価した¹⁴⁾。同時にEPAは5年間の研究成果に関する報告書を公表した¹⁵⁾。この報告書には、EPAの研究助成による約700の文献と、EPA以外の関係省庁・団体の助成による約50の文献が示されている。

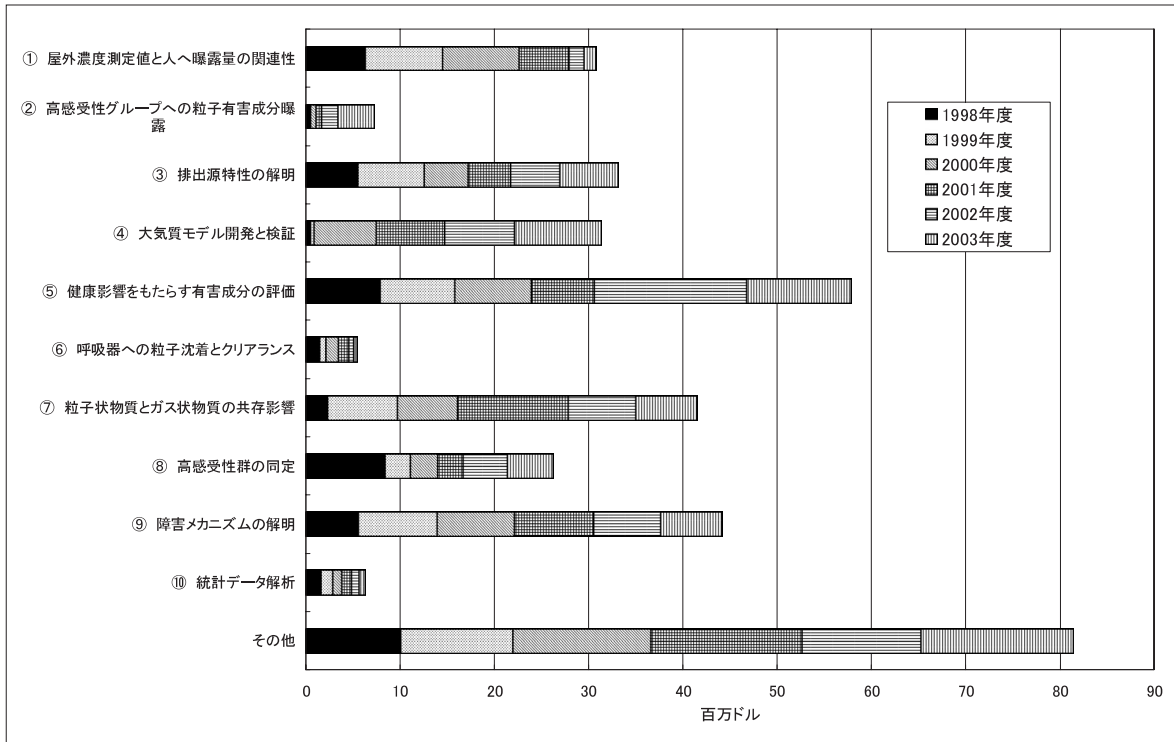
図表4 科学的な不確実性を抽出の元となった米国での大気中粒子状物質に関する研究の基本的な枠組み¹⁰⁾



図表5 米国における大気中粒子物質に関する優先課題

課題	内容
①屋外濃度測定値と人への真の曝露量の関連性	屋外固定測定局での測定データと実際の個人曝露量との定量的な関係はどのようなものか。多くの疫学研究において、対象集団への曝露の指標として屋外固定大気測定局のデータが代替使用されてきたということに対する批判を踏まえて実施される。
②高感受性グループへの粒子有害成分曝露	課題①を高感受性群と有害成分に特化したものである。基本的に課題⑤の成果をうけて進められる。
③排出源特性の解明	発生源における一次粒子排出量、粒径分布、化学組成、ならびに大気中で二次的に粒子化するガス状大気汚染物質排出量に関するインベントリの整備とそのための方法論の検討である。
④大気質モデル開発と検証	大気中での核生成、有機エアロゾル生成、大気化学反応、乾性沈着、垂直混合、気候モデルの影響、など種々の大気中粒子の生成、動態に関する過程のモデル化とその検証に関するものである。
⑤健康影響をもたらす有害成分の評価	人の健康に悪影響をもたらすのは大気中粒子のどのような物理化学成分であるかを評価する。
⑥呼吸器への粒子沈着と排出	高感受性者の呼吸器系(鼻咽頭、気管・気管支、肺)への粒子の沈着および沈着した粒子の排出速度と機構を検討する。
⑦粒子状物質とガス状物質の共存影響	粒子状物質の健康影響と他のガス状大気汚染物質による影響とをどのように分けることができるか、また両者が共存する大気中の曝露による影響をどのように解明するかということである。
⑧高感受性群の同定	どのような属性の集団が粒子状物質の曝露によってより強く影響をうける可能性があるかを明らかにする。
⑨障害メカニズムの解明	疫学研究で示された大気中粒子状物質曝露と死亡率および疾病率との関係を説明するメカニズムの解明に関するものである。
⑩統計データ解析	疫学研究で収集されたデータの解析のための統計的手法が粒子の健康リスク推計にどのような影響を与えるか、統計的手法の改善、大気汚染と健康の関連性を推計するにあたっての測定誤差と誤分類の影響はどの程度であるかを検討する。

図表6 EPA 大気中粒子状物質に関する研究費



4. 我が国の大気環境行政と研究動向

4 - 1

我が国における大気環境基準

我が国の大気中粒子状物質の環境基準は昭和47年に初めて定められたものである。翌48年には二酸化いおう、一酸化炭素、光化学オキシダント、二酸化窒素と合わせて、5つの大気汚染物質の環境基準が告示された。これら伝統的大気汚染物質のうち二酸化窒素については昭和53年に環境基準が改定された。我が国の大気中粒子状物質の環境基準の根拠とされている健康影響指標項目は、死亡率の上昇、気管支炎の増加、肺機能低下などであり、当時の米欧での疫学的知見に、我が国での知見を追加したものである。

粒子状物質の環境基準だけでなく、他の伝統的大気汚染物質の環境基準設定や大気環境行政上の重要な決定の際にも、米欧の多くの科学的知見に環境省(庁)が独自に実施した、数少ない調査結果

を加えたものを根拠する、という構図が採用されてきた。例えば、環境庁設置前の厚生省によって実施された「煤煙等影響調査」は、硫黄酸化物に係わる環境基準の設定の際に、重要な根拠となるとともに、公害健康被害補償法に基づく地域指定の基準作成の際にも重要な資料となった。昭和53年の二酸化窒素の環境基準改定の際の「複合大気汚染健康影響調査」、昭和61年の公害健康被害補償法の地域指定解除の際に、資料として提出された環境庁が実施した2つの調査などは、それぞれ重要な役割をもっていた^{16~19)}。いずれの調査においても環境省(庁)に検討会が設置され、大学や試験研究機関に所属する検討会メンバーが実質的に調査を担当する手法がとられていた。環境省では平成12年からPM_{2.5}の健康影響に関する調査を開始しているが、この調査も微小粒子状物質曝露影響調査検討会の下で実施されており、現在までこの構図に大きな変化はみら

れない。

4 - 2

旧来の公害問題、伝統的大気汚染に関わる研究資金

環境省が管轄する競争的研究資金の枠組みには、このような伝統的大気汚染物質の研究を提案できるものは、一部の例外(地球環境保全等試験研究費のうちの公害防止等試験研究費)を除いて含まれていない。この例外においても参加機関は各省庁の国立試験研究機関と独立行政法人試験研究機関に限られ、大学は除かれている。実質的には環境省における競争的研究資金は、地球環境、環境技術開発、廃棄物の分野に限定されている。米国におけるような競争的資金と非競争的資金の両者を活用した研究戦略を日本で実行することはできない。環境省における伝統的大気汚染に関する調査研究は、非競争的資金によって実施されてきた。

5. ナノ粒子の毒性に対する関心の高まり

ある物質の生体への影響を検討する際の最も基本となる考え方は、生体影響（毒性）は物質の量（重量）とともに単調に増加する、ということである。しかしながら、ナノ粒子の場合にはその基本的な考え方が適用できない場合があるのではないかという議論が行われている。ナノ粒子は重量が僅かであっても個数ないし表面積では寄与が大きく、それが健康影響とより関連しているのではないかという指摘である。ナノ粒子では、従来研究対象としてきた粒子とは異なる体内への取り込み経路、体内動態、生体防御機構の認識、毒性発現があり得るのではないかと懸念されている。

すでに米国の大気中粒子に関する研究戦略において、粒子状物質

の汚染指標としてどのような粒径範囲が適当であるかという観点から、PM_{2.5}よりも小さいPM_{1.0}やさらに小さい超微小粒子と呼ばれる0.1 μm以下の粒子（PM_{0.1}）の健康影響評価が組み込まれている。COEのひとつであるロチェスター大学は、超微小粒子の研究を主に担当している²⁰。また、ヨーロッパを中心に、自動車排ガス中のナノ粒子の計測法に関する検討²¹が開始されている。

我が国でも国立環境研究所において、自動車排ガス中のナノ粒子の健康リスク評価のための実験施設を建設中であり、近々動物実験等が開始されることになっている。このように、大気中粒子状物質の健康影響評価に関する分野ではすでに、ナノ領域の粒子を研究

対象に加えつつある。

一方、ナノテクノロジーの進展に伴って作り出される種々のナノ材料の毒性について、関心が高まりつつある。先頃、NIH（米国国立健康研究所）は、全米毒性プログラム（NTP）における毒性評価対象物質にナノ材料を加えた。当初の対象物質は単層ナノチューブ、二酸化チタン、量子ドット、フラーレン類となっている²²。また、EPA、NSF（全米科学財団）、およびNIOSH（全米労働安全衛生研究所）は、共同でナノ材料の環境影響と健康影響の研究に関する総額約700万ドルの研究公募を開始した²³。米国ではナノ材料の毒性研究が開始されようとしている。

6. 日本における研究の展望と課題および政策提言

これまで議論してきたよりも広域の東アジアスケールから、地球スケールの大気中エアロゾルの問題が地球環境問題との関連で注目されている。この問題は、科学技術動向2002年11月号（特集4エアロゾルの地球温暖化への影響の研究—残された課題への取り組み—）で詳しく解説されているが、環境省の地球環境研究推進費や文部科学研究費補助金などの競争的資金によって、研究の重点化がされている。一方、国内問題としての大気中粒子状物質に関する研究については、研究推進の基本的枠組みから検討する必要がある。

第一に、健康影響に関する日本独自の知見をどの程度持っている必要があるかを考えなければならない。米国や欧米の一部の国々を除く多くの国において、環境基準を設定するための科学的根拠は、他国での研究によるものであ

る。場合によっては世界保健機関（WHO）が示したガイドライン値をそのまま環境基準とすることもある。しかしながら、我が国における環境基準設定のためには我が国における大気中粒子に曝露される居住者の健康影響に関する知見が必要である。環境基準の科学的根拠として、これまで疫学的知見が重視されてきた。疫学は、現実世界での曝露とそれに引き続く健康影響をとらえることができる、という点で大きな長所を持っているが故に重視されてきた。しかしながら、現状では大気汚染に限らず環境汚染の関わる疫学研究の分野では研究を維持するための研究費、人材が圧倒的に不足している。この分野の競争的研究資金がないために、人材育成のための研究室を維持することは困難であり、人材が不足しているために競争的研究資金の枠組みを創出するだけの

パワーを持ち得ないという悪循環に陥っている。日本独自の知見を得るための短期的な研究資金投入と共に、人材育成を視野に入れた長期的な研究助成の枠組みを構築する必要がある。

一方、どの程度の研究投資が必要であるか、米国ほどの研究投資が必要であるかどうかについて十分に検討しなければならない。これについては米国EPAが実施したRegulatory Impact Analysisのように、大気汚染の影響を受ける人口、健康リスクの大きさ、対策効果と費用などを定量的に見積もり、他の環境汚染に係わる健康リスクとの対比において判断すべきである。

第二に、環境基準を達成するために、最も効率的な施策に必要な研究をどのように進めるかということである。米国の研究戦略で示されたように、行政上のミッショ

ンを達成するために、曝露量と健康影響との量的関係する知見に直結する研究のみならず、大気汚染物質の排出から大気中の動態、人への曝露、体内への吸入、および生体影響発現に関わる医学、生物学、大気科学、計測技術などの関連する基礎科学の推進が必要である。

第三として、ナノ粒子の毒性に関する研究については、日本におけるナノテクノロジーの研究開発戦略の中に位置づける必要がある。直接ナノテクノロジーに携わっている材料を中心とした研究者ばかりではなく、生物系、薬学系、疫学系、医学系の研究者も交えて研究を推進すべきである。この研究は米国でも検討が開始されたばかりである。わが国でも関連省庁ならびに研究機関がナノ材料のリスクに関する議論を始めている²⁴⁾。関係機関が一体となることにより、この分野におけるイニシアティブを取れる可能性は十分ある。

環境問題において予防的方策や予防原則といわれる考え方²⁵⁾が、国際的なコンセンサスを得つつある。これは、人の健康や生態系に対して深刻な、あるいは不可逆的な被害のおそれがある場合には、科学的証拠が不確実であることを、費用対効果の大きな対策を延期する理由として使ってはいけないということを表現している。予防的方策や予防原則に基づく政策決定は、有害性を明確に認識した上で、厳密に科学的な不確実性を評価しようとしている伝統的大気汚染物質の場合とは異なる考え方によるものである。もし、ナノ粒子が人や生態系に何らかの悪影響を及ぼすおそれが僅かでもあれば、予防原則の考え方に基づいて規制が進められると考えられる。したがって、そのことをいち早く捕まえた者が次の開発の主導権を握ることになるかもしれない。

米国ではすでに多くの環境問題において、「レギュラトリー・サイエンス」での評価手法が検討・実施されている。健康に影響するさまざまな規制は、あくまでも基礎研究に基づいた科学的根拠のみによって決定されるべきである。ナノ粒子に関わる問題点も、レギュラトリー・サイエンスに基づいて正しく実施され、国民生活の向上に反映されると同時に、今後の我が国の科学技術の発展に大きく寄与することが望まれる。

参考文献

- 1) Samet, JM : Air Pollution and Epidemiology: Déjà Vu All Over Again?, *Epidemiology*, 2002 ; 13 : 118 - 119.
- 2) 科学技術政策研究所：急速に発展しつつある研究領域調査 平成 15 年度調査報告書、平成 15 年 6 月
- 3) 米国環境保護庁プレスリリース、2004 年 7 月 29 日：
http://www.epa.gov/pmresearch/pm_grant/
- 4) 中央環境審議会：今後の有害大気汚染物質対策のあり方について（第七次答申）、2003：
<http://www.env.go.jp/council/toshin/t07-h1503/t07-h1503.pdf>
- 5) U.S. Environmental Protection Agency. Air quality criteria for particulate matter, EPA report no. EPA-600/P-95/001cF (1996).
- 6) Holland, WW, et al. : Health effects of particulate pollution: reappraising the evidence, *Am. J. Epidemiol.*, 1979 ; 110 : 527 - 659.
- 7) Dockery, D. et al. : An association between air pollution and mortality in six U.S. cities. *N. Engl. J. Med.* 1993 ; 329 : 1753 - 1759.
- 8) 国立環境研究所：VOC - 揮発性有機化合物による都市大気汚染、環境儀、NO.5、2002.
- 9) U.S. Environmental Protection Agency (1997) : Regulatory

Impact Analyses for the Particulate Matter and Ozone National Ambient Air Quality Standards and Proposed Regional Haze Rule, Research Triangle Park, NC.

- 10) National Research Council (1998). *Research Priorities for Airborne Particulate Matter : I. Immediate Priorities and a Long-Range Research Portfolio*. Washington, DC : National Academies Press. ISBN 0-309-06094-X.
- 11) Air Quality Research Subcommittee, Committee on Environment and Natural Resources : *Strategic Research Plan For Particulate Matter*, 2002.
- 12) National Research Council (1999). *Research Priorities for Airborne Particulate Matter : II. Evaluating Research Progress and Updating the Portfolio*. Washington, DC : National Academies Press. ISBN 0-309-06638-7.
- 13) National Research Council (2001). *Research Priorities for Airborne Particulate Matter : III. Early Research Progress*. Washington, DC : National Academies Press. ISBN 0-309-07337-5.
- 14) National Research Council (2004). *Research Priorities for Airborne Particulate Matter : IV. Continuing Research Progress*. Washington, DC : National Academies Press. ISBN 0-309-09199-3.
- 15) U.S. Environmental Protection Agency (2004). *Particulate Matter Research Program-Five Years of Progress*, EPA 600/R-04/058 Washington, DC.
- 16) 厚生省環境衛生局公害課：ばい煙等影響調査報告の概要、1964
- 17) 環境庁環境保健部：複合大気汚染健康影響調査 調査の概要及

- び主要調査結果のまとめ、1977
- 18) 環境庁環境保健部、質問表を用いた呼吸器疾患に関する調査
昭和61年4月、1986
- 19) 環境庁大気保全局、大気汚染健康影響調査報告書（昭和55～59年度）昭和61年3月、1986
- 20) University of Rochester School of Medicine & Dentistry, EPA Particulate Matter Center :
<http://es.epa.gov/ncer/centers/airpm/rochester/>
- 21) U.N. Economic Commission for Europe, Report of the GRPE Particle Measurement Programme (PMP) Government Sponsored Work Programmes, 2003.
- 22) Hood E. : Nanotechnology : Looking As We Leap, Environmental Health Perspective, 2004 ; 112 : A741 - A749.
- 23) Nanotechnology Research Grants Investigating Environmental and Human Health Effects of Manufactured Nanomaterials: A Joint Research Solicitation - EPA, NSF, NIOSH. :
http://es.epa.gov/ncer/rfa/2004/2004_manufactured_nano.html
- 24) http://www.aist.go.jp/aist_j/research/honkaku/symposium/nanotech_society/symposium.html
- 25) 環境省：環境政策における予防的方策・予防原則のあり方に関する研究会報告、2004 :
<http://www.env.go.jp/policy/report/h16-03/index.html>

