

PM_{2.5} の健康影響と環境基準について

新田 裕史(独立行政法人国立環境研究所・環境健康研究センター)

1 はじめに

1980年代後半から米国を中心として、微小粒子状物質の健康影響に関する疫学研究成果が発表されるようになり、現在まで多くの知見が蓄積されてきた。米国では、1997年にPM₁₀(粒径が10 μ m以下の粒子)の環境基準に加えて、より粒径の小さいPM_{2.5}(粒径が2.5 μ m以下の粒子)の環境基準を追加した。さらに、2006年にはPM_{2.5}の短期影響に関する環境基準を、2013年にはPM_{2.5}の長期影響に関する環境基準を、それぞれより厳しくする改定を行った。我が国では2008年12月に中央環境審議会に環境基準専門委員会を設置して検討をすすめる、2009年9月に大気中の微小粒子状物質について環境基準の告示に至った。

2 大気中微小粒子状物質の健康影響研究の経緯

米国では1987年に粒子状物質の環境基準の指標を、粒径が数十 μ mの粒子を含むTSP(Total Suspended Particle)からPM₁₀に変更した。これは、健康保護の観点から人が吸入し、気道に沈着する粒径の粒子状物質(inhalable particle)を環境基準の対象物質とすることが妥当であるという考え方にもとづくものである。その前後からPM₁₀に関する多くの疫学研究成果が報告され始めた。特に注目されたのはPM₁₀日平均濃度と日死亡との関連性を示す短期影響に関する知見である。PopeとSchwartzは新しい統計モデルを用いて、米国の種々の地域における解析結果を発表した。これらの研究結果は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、世界の大都市部で通常観測される程度の日間変動範囲で、死亡との関連性が認められるというものであった。

そのような状況の中で、米国ハーバード6都市調査のデータを用いて、微小粒子の長期曝露と死亡との関連性に関する疫学研究成果が1993年に発表された

(Dockery ら、1993)。この調査は 1974 年に当時の米国の二酸化硫黄と粒子状物質に関する環境基準の妥当性を評価することを目的として開始されたが、当初から大気汚染物質の測定項目の中に微小粒子 ($PM_{2.5}$) が含まれていた。Dockery らの論文では、6都市の微小粒子状物質平均濃度と関連要因を調整した死亡リスクとの直線的な関係が示された。米国にはおいても当時は PM_{10} に比して $PM_{2.5}$ を測定している地域が限定されていたために、 $PM_{2.5}$ の健康影響に関する疫学知見も現在からみれば多くはなかったが、1997 年に米国は大気環境基準に $PM_{2.5}$ を追加する決定を行った。

3 PM の健康影響

大気汚染の健康影響を時間的な観点から分類すると、大気汚染物質にさらされてから影響があらわれるまでの時間が数時間から数日程度の場合を短期曝露影響、数か月から数年程度継続して大気汚染にさらされた場合にあらわれる場合を長期曝露影響として区別している。

3.1 短期曝露による健康影響

微小粒子状物質の健康影響指標として取り上げられているものとしては、死亡(全死亡、死因別死亡)、医療機関への入院・受診、循環器系イベント(虚血性イベント、不整脈、心拍変動)、呼吸器症状、肺機能変化などである。

この中で最も多くの研究報告があるのは、日死亡と粒子状物質濃度の関連性に関するものである。これは特定の地域における人口動態統計に基づく死亡数とその地域の大気汚染測定局での測定値との関連性を一般化線型モデルと呼ばれる統計モデルなどを用いて解析する。この解析では交絡因子となりうる気象要因を調整した上で大気汚染濃度が上昇した場合にどの程度死亡リスクが増加するかが検討される。 $PM_{2.5}$ 濃度が $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ 上昇すると事故を除く全死亡や呼吸器系、循環器系の死亡リスクが 1~2%程度増加すると推計されている。我が国における知見も含めて世界中で 100 を越える研究の大部分で、微小粒子濃度と日死亡との間には正の関連性が示されている。この種の研究が開始された初期には、単独の地域での研究報告がほとんどであったが、その後は複数地域での解析結

果を統合したメタアナリシスの結果が示されるようになった。

短期影響では日々の入院や救急受診に関する報告も多い。ある地域において呼吸器系疾患や循環器系疾患による入院や救急受診数と大気汚染濃度の関連性が報告されている。また、喘息患者等を対象としたパネル研究によって、種々の症状や機能変化との関連性についても検討されている。

我が国でも全国 20 地域の死亡データを統合した解析結果では呼吸器疾患死亡と PM_{2.5} 濃度との関連性がみとめられていた(Ueda ら、2009; 環境省 2007)。地域単独の解析においても、東京都 23 区など一部地域で統計的に有意な上昇がみられる場合があった。また、呼吸機能の変化と微小粒子状物質との関連性も示されていた。循環器系の健康影響指標との関連性に関する疫学知見も蓄積されてきている(Ueda ら、2009)。

4 長期曝露による健康影響

長期影響については、米国のハーバード6都市研究と米国がん学会 (ACS) 研究などの主としてコホート研究によって、大気汚染濃度の異なる地域での長期調査の結果が報告されている。ハーバード 6 都市研究では、オリジナル研究に加えて、再解析や感度分析、拡張研究が報告されている。オリジナル研究の追跡期間は 1991 年までの約 15 年であり、全死因、心肺疾患、肺がん、ならびに心肺疾患及び肺がん以外の死亡と微小粒子状物質の長期曝露との関連が調べられている。拡張研究では追跡期間を 1998 年まで延長し、1980 年から 1989 年期間とそれ以降の 1990 年から 1998 年に分けて微小粒子状物質濃度と死亡との関連を評価している。オリジナルの報告では、年齢、性、喫煙、教育、BMI などの因子を調整したところ、PM_{2.5} 濃度と全死亡および心肺死亡の相対リスクとの間に有意な正の関連性が認められている。拡張研究では、全死亡および心血管死亡の相対リスクには正の有意な関連性が認められた。

ACS 研究は、米国 50 州の 154 都市に居住する約 55 万人からなるが、151 都市の対象者は硫酸塩と死亡との関連を調べるために、また、50 都市の対象者(約 30 万人)は微小粒子状物質と死亡との関連を調べるために解析された。ACS 研

究では、対象者の健康状態、性、年齢、喫煙歴、飲酒歴、職業曝露に関する情報が把握されている。ACS 研究の追跡期間は 1989 年まで 7 年間で、全死因、肺がん、心肺、肺がん・心肺以外の死亡と微小粒子状物質との関連が調べられている。微小粒子状物質は 1979 年から 1983 年の年中央値の平均値を用いている。拡張研究では追跡期間を 1998 年まで延長し、大気汚染データを追加した結果を報告している。ACS 研究については、オリジナル研究、その再解析、また、拡張研究を通して、PM_{2.5} 濃度と全死亡、心肺疾患死亡との有意な関連性が一貫して認められたと報告されている。再解析では、職業曝露の補正、曝露データの追加、食事に関連する変数の考慮、喫煙などの個人的なリスク要因の補正、地域を考慮したモデル化などの検討を行った結果、PM_{2.5} と全死亡、心肺疾患死亡、肺がん死亡との関連性は、オリジナル研究と同様であることが確認された。

その他、WHI 研究などのコホート研究についても、主要な交絡要因を調整した後で死亡と大気汚染濃度との有意な関連性がみとめられ、特に循環器系疾患による死亡との関連性がみられている。

我が国でも 1983～1985 年にかけて宮城、愛知、大阪の三府県で粒子状物質の長期曝露影響に関するコホート調査が開始されて、15 年間の観察結果が報告されており肺がん死亡と SPM 濃度との関連性が示されている。また、多目的コホート研究(JPHC Study)のデータを用いて、SPM 濃度との関連性を検討した結果では、虚血性心疾患の死亡リスクとの関連は認められたが、統計的には有意でなく、逆に SPM 濃度の上昇によって脳卒中による死亡リスクは減少していたと報告されている。肺がん死亡との関連はみとめられなかった。NIPPON DATA 80 のデータに基づいて解析した結果では、循環器系疾患死亡と SPM 濃度との関連性はみとめられなかった。

5 微小粒子状物質の健康影響の定量的評価

微小粒子状物質に限らず環境汚染物質の健康影響評価はまず、その物質が健康に対して悪影響をもたらすか否かの検討(有害性の同定)を行い、次に曝露量－反応関係の検討と曝露量評価を組み合わせることにより健康リスク評価(定

量的評価)を行うことが一般的な手順となっている。

長期曝露影響について、まず微小粒子状物質の環境濃度と考慮すべきとされたエンドポイントとの定量的関連性を示す疫学知見を選択する。ここで、考慮すべきとされたエンドポイントは呼吸器系、循環器系などの症状や機能変化から死亡に至るまでの広範囲なエンドポイントが想定されている。また、疫学知見の選択は、対象者数、対象者地域、対象集団は適切か、微小粒子状物質および共存汚染物質の曝露評価は十分か、エンドポイントの評価は信頼性があり、適切か、交絡因子の調整等、解析手法は適切か、などの評価基準に基づいて行われる。

次に、選択された疫学知見それぞれについて、曝露量－反応関係の信頼区間に関する検討に基づいて、健康影響が生じることが確からしいとされる濃度水準を選択し、その濃度水準を、環境目標値を検討するための出発点とする。量的評価にあたっては、低濃度領域における曝露量－反応関係については、考慮すべきとされたエンドポイントに関する疫学知見の基盤となる疾病構造や微小粒子状物質のバックグラウンド濃度(人為発生源以外の発生源に由来する濃度)等の大気汚染状況の国内外の差異等の不確実性が大きいことを十分に考慮するべきであるとされている。

6 PM_{2.5} 環境基準

6.1 基本的考え方

大気汚染物質の環境基準設定においては、これまで、一般集団を対象とした疫学研究に基づく知見によって、その物質への曝露と健康影響との濃度－反応関係を把握するとともに、毒性学知見による曝露量－影響関係も踏まえて総合的に判断されてきた。PM_{2.5}の場合には、大気汚染物質の中で微小粒子状物質をひとつのカテゴリーとして取り上げることには合理的な理由があるものの、同一質量濃度であっても成分が変動することもあり、疫学知見に基づく評価において、集団における微小粒子状物質への曝露による健康影響に閾値の存在の有無を明らかにすることは難しい。このため、閾値の存在を前提とした環境基準値を定める考え方は採用できないと判断された。

このように PM_{2.5} の特性や疫学知見に伴う種々の不確実性のために、濃度－反応関係において明確なリスクの定量的評価ができない濃度領域が存在する。これらの低濃度領域を超える濃度領域においては比較的多くの疫学知見が存在するものの、閾値のない場合の環境基準値の定め方を形式的に PM_{2.5} に適用すれば、明確なリスクの定量的評価ができない濃度領域よりも遙かに低い環境目標値が導かれることになり、これは自然発生源のみの寄与による環境濃度よりもおそらく低いレベルとなる。このため、人の健康を保護するうえで望ましい基準という環境目標値としての意味を持ち得ないことになる。

6.2 指針値の選択

微小粒子状物質については、長期曝露による健康影響と短期曝露による健康影響の両者が示されているため、両者の指針値について検討が必要である。一方、地域における年平均値のような長期平均濃度と日平均値のような短期平均濃度の高濃度出現頻度との間には高い相関がみられる。すなわち、長期平均濃度又は短期平均濃度の高濃度出現頻度に関する一方の基準を定めて、一方の平均濃度をその基準以下に低減する対策を図ることにより、もう一方の平均濃度に関しても低減効果が一定程度作用し、濃度分布全体が引き下げられることが期待される。しかし、発生源、地理的条件及び気象条件等の違いにより、地域によっては高濃度出現時に健康への悪影響が観察される可能性があることから、長期基準と併せて短期基準を設定することにより、長期曝露による健康影響と短期曝露による健康影響の両者の低減を目指すという考え方が採用された。

環境基準専門委員会では長期基準について、国内における死亡および死亡以外の疫学研究から健康影響が観察されるとみなせる濃度水準は 20 µg/m³ であり、国内知見を重視すると、この水準が指針値を検討するための出発点となるが、知見が充実している国外、特に米国における疫学研究より健康影響が観察される濃度水準は 15 µg/m³ であり、この濃度水準も考慮すべきであるとしている。その上で、疫学知見に特有な不確実性が存在することも併せて総合的に評価した結果、長期基準として年平均値 15 µg/m³ が最も妥当であると判断した。

短期基準については、数時間曝露による影響を報告している研究はあるが、多くの微小粒子状物質への短期曝露の疫学研究では日平均値、もしくは数日平均に基づいたものである。日平均値基準によっても、それより短い平均化時間の曝露による健康影響からも一定程度保護できると考えられるなどから、短期基準として日平均値の高濃度出現頻度を採用することが妥当であると判断された。

7 おわりに

PM_{2.5}の環境基準設定にあたっては、我が国の微小粒子状物質の健康影響に関する知見が米国を中心とした国外の知見と比較して少ない状況を指摘した上で、死亡や死亡以外の様々なエンドポイントを対象に、感受性の高い者・脆弱性を有する者も含めた地域集団を対象とした国内知見の充実を図り、我が国における微小粒子状物質の環境大気中濃度の測定及び曝露による健康影響の現状を把握する必要があると指摘している。特に、長期基準以下の濃度範囲の地域も対象に加えた曝露濃度範囲の疫学研究、循環器疾患患者や循環器疾患に対するリスクの高い者も対象とした疫学研究、成分濃度の異なる様々な地域を対象とした成分組成の相違に着目した疫学研究の推進を提言している。

今後、これらの調査研究を着実に進めて、PM_{2.5}の健康影響に関する科学的知見を蓄積していく必要がある。