特集

大気中への物質拡散被害の予測・再現

中国におけるPM_{2.5}の現状と研究動向

Report on the Situation and Research Progress of PM_{2.5} in China

黄 弘^{*1} 屈 克思^{*2}

Hong HUANG, Kesi QU

1. はじめに

PM_{2.5}は、空気動力学径が概ね2.5 μm 以下の大気浮遊粒子物質を指す。2013年2月28日、中国国家科学技術用語審定委員会は、PM_{2.5}の「微小粒子状物質」という中文名称を正式に命名した。粒子径が小さく、比表面積が大きいため、PAH、重金属粉塵等有害物質はその上に吸着することが非常に容易である。さらに人体の呼吸器はこれらの粒子を効果的にろ過できないため、人体に有害物質が多量に進入してしまう¹⁻³⁾。PM_{2.5}の沈降速度が遅く、空気における浮遊時間が長いこと、ヘイズ(煙霧)の発生を引き起こしやすく、大気の長距離輸送により、環境汚染の範囲も非常に大きい^{4,5)}。

中国ではPM_{2.5}による大気汚染は深刻である。CCTV(中国中央テレビ局)の統計によると、2011年10月から、全国90%の省都におけるPM_{2.5}の濃度は基準値以上になっている。新華ネットによると、2013年1月、北京のヘイズ天気は25日間に達し、同年1月29日には全国でヘイズ天気の被害を受けた地域は130万平方キロもあり、国土面積の約1/7を占めた。

PM_{2.5}は世界的な問題である。アメリカ、EU、日本などでは、PM_{2.5}の濃度値を下げるため、数年前から基準を作

成して措置を取った。中国では2011年から、環境保護部より『環境空気PM₁₀とPM_{2.5}の重量測定法』、国務院より新しく改正した『環境空気質基準』(GB3095-2012)を公表し、PM_{2.5}を強制性汚染物の検査項目に含めた。本稿では、中国におけるPM_{2.5}汚染の現状と特徴、数値シミュレーション、予防対策等の観点から中国の研究動向を報告する。

2. PM_{2.5}汚染の現状と特徴

2013年の年明けに中国のいくつかの地域はヘイズ天気の被害を受けた。2013年1月13日まで、全国74箇所のPM_{2.5}観測都市のうち、33都市の一部観測箇所に測定された空気質指数(AQI(Air Quality Index))は300以上となり、空気がひどく汚染されたことを示した。1月13日、北京気象台はヘイズオレンジ警報を歴史の中で初めて出した。一部の観測箇所におけるPM_{2.5}毎時最大値は900 μm^3 に達し、空気質日平均基準(75 μm^3)の10倍以上、AQI日嚴重汚染レベル(500 μm^3)の約1倍を超えた。図1は嚴重汚染日の写真である。AQIは、国家環境保護部の作成した空気質指数であり、下式より計算する。

$$AQI = \max\{IAQI_1, IAQI_2, \dots, IAQI_n\}$$

IAQI : 空気質分指数

*1 中国清華大学工程物理専攻 / 公共安全研究院 教授
Professor, Institute of Public Safety Research, Department of Engineering Physics, Tsinghua University, China

*2 中国清華大学工程物理専攻 修士課程
Master Student, Department of Engineering Physics, Tsinghua University, China

図 1 嚴重汚染日の写真

n : 汚染物項目

詳細の説明は表 1、表 2 を参照されたい。

分析の結果によると、石炭、自動車、工業、粉塵等汚染源がヘイズを発生する主な原因となる。空気に浮遊する大量の粒子と気象条件の相互的な作用により、ヘイズ天气が形成した。原因は主に三つが考えられる：

1) 水平方向の静穏状態の増加 都市の建物がますます高くなり、遮断効果により空気の流れが弱くなる。静穏状

態が多くなるため、大気中の浮遊粒子の拡散と希釈に不利で、都市と都市周辺の地域で容易に蓄積してしまう。

2) 鉛直方向の気温逆転の発生 気温逆転層は、大気層低空における空気の鉛直運動を制限し、空気中の浮遊粒子は上空に拡散することが困難で低空と地表面付近に留まる。

3) 空気中の浮遊粒子の増加 都市人口の成長と工業発展に伴い、自動車が激しく増え、汚染物の排出と浮遊物質が大幅に増加した。

PM2.5 の汚染特性は、主に地理、気象条件と関連し、ひどく汚染された地域は、北京、上海、天津、南京等中東部の大都市や工業都市に集中している。深圳、香港等地域の汚染レベルは比較的低い。図 2 に中国の各地におけるヘイズ天气となる日数を示す。図のように、中国の大気汚染は東側に集中しており、これは大都市や人口密度の分布にかなり合致している。PM2.5 の濃度は季節により違い、冬や春の濃度値は夏や秋より明らかに高い。また、鉛直方向での濃度変化は、気象条件、境界層の厚さと安定性に密接に関連しており、水平方向に有意な変化は認められなかった⁵⁻⁹⁾。

表 1 空気質分指数及びそれに対応する汚染物項目の濃度制限値

空気質分指数 (IAQI)	汚染物濃度制限値									
	二酸化硫黄 (SO ₂) 24 時間平均 (μm/m ³)	二酸化硫黄 (SO ₂) 1 時間平均 (μm/m ³)	二酸化窒素 (NO ₂) 24 時間平均 (μm/m ³)	二酸化窒素 (NO ₂) 1 時間平均 (μm/m ³)	粒子物 (粒径は 10 μm 以下) 24 時間平均 (μm/m ³)	一酸化炭素 (CO) 24 時間平均 (μm/m ³)	一酸化炭素 (CO) 1 時間平均 (μm/m ³)	オゾン (O ₃) 1 時間平均 (μm/m ³)	オゾン (O ₃) 8 時間移動平均 (μm/m ³)	粒子物 (粒径は 2.5 μm 以下) 24 時間平均 (μm/m ³)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50	50	150	40	100	50	2	5	160	100	35
100	150	500	80	200	150	4	10	200	160	75
150	475	650	180	700	250	14	35	300	215	115
200	800	800	280	1200	350	24	60	400	265	150
300	1600		565	2340	420	36	90	800	800	250
400	2100		750	3090	500	48	120	1000		350
500	2620		940	3840	600	60	150	1200		500

表 2 空気質指数(AQI)

空気質指数	空気質指数レベル	空気質指数類別及び表示色		健康への影響
0～50	レベル 1	非常に良い	緑色	空気質が非常に良く、空気汚染がほとんど無い
51～100	レベル 2	良い	黄色	空気質が良い、一部汚染物はごく少数の敏感者の健康に弱い影響を及ぼすかもしれない。
101～150	レベル 3	軽微汚染	オレンジ色	敏感者の症状は少し激化され、健康者は刺激症状が現す。
151～200	レベル 4	中程度汚染	赤色	敏感者の症状がさらに激化され、健康者の心臓、呼吸器に影響を及ぼすかもしれない。
201～300	レベル 5	重度汚染	紫色	心臓病と肺病患者の症状が明らかに激化され、運動能力が低下し、ほとんどの健康者も症状が出る。
>300	レベル 6	嚴重汚染	あずき色	健康者の運動能力が低下し、強烈な症状があり、一部の病気が早めに発生する。

図2 ヘイズ日数分布図

都市におけるPM2.5濃度の汚染特性が研究されている。施ら¹⁰⁾は、北京及び周辺地区の霧天気を分析することにより、北京冬季の霧天気は、北京における汚染物の排出以外に、北京周辺の天津、河北、山東等地域における大気汚染物の遠距離輸送に関連を持つことを明らかにした。従って、北京のヘイズ天気及び関連大気汚染のコントロールについて、局地の汚染物の排出を削減するとともに、区域大気汚染の協力管理を行う必要がある。朱ら¹¹⁾は、広州における2008～2010年のPM2.5濃度及び気象条件のタイプを分析することにより、PM2.5と各要素間との関連

を得た。PM2.5は視認性との関連性が一番大きく、温度と正の相関、また、風速、相対湿度、降雨量等と負の相関を示した。

3. PM2.5に関する数値シミュレーション

PM2.5に関する数値シミュレーションに取り組んでいる研究はまだ少ないが、主にMM5-Models-3/CMAQ空気質モデルを用いたいくつかの試みがなされてきた。

馬ら¹²⁾は、2005年1、4、7と10月をシミュレーション期間とし、MM5-Models-3/CMAQ空気質モデルを用いて中

図3 河北省におけるPM2.5濃度計算例¹³⁾

図4 発生源の寄与率¹⁵⁾

国地区におけるSO₂、NO₂とPM等大気汚染物質の濃度をシミュレーションし、衛星リモートセンシングデータを利用してNO₂濃度とエアロゾル光学厚み(AOD)等の結果を検証した。モデルは中国における大気汚染物質の特性に対して良いシミュレーション能力があると実証した。

北京を囲んでいる河北省は最もヘイズ汚染のひどい地域の一つである。趙ら¹³⁾はModels-3/CMAQ空気質モデルを用いて河北省周辺におけるPM2.5の濃度を予測した。2007年12月11日の結果例を図3に示す。北京、天津、石家庄では250 μm/m³以上になることがわかる。王ら¹⁴⁾は、MM5-Models-3/CMAQ空気質モデルを用いて北京、天津、河北におけるPM2.5濃度分布を計算した。それぞれBrute Force法とDDM-3D(Decoupled Direct Method in 3 Dimensions)法を利用し、北京と石家庄におけるPM2.5の発生源の寄与率を検討した。北京を例にすると、北京市内の発生源の寄与率は平均50%で、河北北部の寄与率は平均20%程度であった。魏ら¹⁵⁾は、2007年12月を対象に、MM5-Models-3/CMAQモデルを用いて、河北地区における4つの主要都市(石家庄、邢台、邯郸、保定)のヘイズ汚染源を検討した。石家庄の例(図4)では、工業排出と民用燃焼源の寄与率が最も高かった。

4. PM2.5の予防対策

中国ではPM2.5の予防対策について大いに検討されている。全体から言うと、PM2.5の予防は技術的問題だけではなく、管理上も工夫しなければならない。

1. 技術レベルと基準の向上とPM2.5の排出削減 研究によると、自動車排ガスはPM2.5への寄与値は38%に達し、PM2.5発生源のトップである¹⁶⁾。従って、ガソリンの品質を向上させ、厳しい排出基準を実施する必要がある。なお、積極的に工業粉塵、炭塵等に対する技術革新を行

い、新しい粉塵削減技術等¹⁷⁻¹⁸⁾を検討することも非常に有用である。

2. PM2.5観測システムの確立 全国的で健全なPM2.5観測システムを確立し、PM2.5の様々な性質を深く分析し、PM2.5の汚染メカニズムを把握する。

3. 区域の連携予防 北京オリンピック期間、上海世界博覧会期間において、周辺省市は協力して様々な排出削減措置を取ることににより、オリンピック期間、世界博覧会期間の北京と上海の空気質を保証し、良い効果が得られた。しかし、残念なことに、このような連携はその後に廃止された。各省市間の協力がなければ、効果的にPM2.5をコントロールすることができない。

4. 経済発展と環境保護の両立 中国では排出削減措置を多く取っているが、削減率は、経済発展によるエネルギーの消費率よりはるかに低い。一方、環境保護部門は十分な執行権限を持っていないため、多くの場合、経済発展に譲らなければならない¹⁹⁾。経済発展と環境保護の両立ができるよう、解決案を探る必要がある。

技術と管理手段を高めることにより、PM2.5を良く予防することができると望まれる。

参考文献

- 1) 鄭志俠, 吳文, 汪家權, 「大気颗粒物中重金属污染研究进展(大気粒子物中の重金属汚染に関する研究動向)」, 现代农业科技(現代農業科学技術), 第3号, pp. 241-243, (2013)
- 2) 劉潔嶺, 蒋文举, 「PM2.5的研究现状及防控对策(PM2.5研究の現状及び予防対策)」, 广州化工(広州化工), 第23号, pp. 22-24, (2012)
- 3) 昌艶萍ら, 「大気中PM2.5の現状分析及新的思考(大気中PM2.5の現状分析及び新しい思考)」, 环境科学

- 与技术（環境科学と技術），第S1号，pp. 151-154, (2012)
- 4) 黄小欧，「PM2.5的研究现状及健康效应（PM2.5研究の現状及び健康影響）」，广东化工（広東化工），第5号，pp. 292-293, (2013)
 - 5) 楊洪斌ら，「大气环境中PM2.5的研究进展与展望（大気環境中のPM2.5の研究進展と展望）」，气象与环境学报（気象と環境学報），第28卷，第3号，pp. 77-82, (2012)
 - 6) 黄怡民，付川，「我国PM2.5污染特征的研究进展（我が国PM2.5の汚染特性に関する研究進展）」，重庆三峡学院学报（重慶三峡学院学報），第3号，pp. 105-109, (2013)
 - 7) 郝吉明，「中国PM2.5来源、污染特征与控制策略（中国PM2.5の発生源、汚染特徴と制御）」，中国地球物理学会第二十八届年会（中国地球物理学会第二十八回年会） 中国北京, (2012)
 - 8) 郭曉澤，单思行，「针对PM2.5的综述（PM2.5に関するレビュー）」，能源与节能（エネルギーと省エネ），第11号，pp. 58-59, (2012)
 - 9) 張睿，蔡旭暉，宋宇，「北京地区大气污染物时空分布及累积效应分析（北京地区大気汚染物時空分布及び累積効果の分析）」，北京大学学报(自然科学版)（北京大学学報(自然科学版)），第6号，pp. 930-938, (2004)
 - 10) 施曉暉，徐祥德，「北京及周边气溶胶区域影响与大雾相关特征的研究进展（北京及び周辺エアロゾル区域の影響と霧の関連特徴に関する研究）」，地球物理学报（地球物理学報），第10号，pp. 3230-3239, (2012)
 - 11) 朱倩茹ら，「广州PM2.5污染特征及影响因素分析（広州PM2.5汚染特性及び影響要素の分析）」，中国环境监测（中国環境観測），第2号，pp. 15-21, (2013)
 - 12) 馬芳，王麗濤，潘雪梅，「基于MM5-Models-3/CMAQ的中国地区大气污染模拟（MM5-Models-3/CMAQに基づく中国地区の大気汚染シミュレーション）」，河北工程大学学报(自然科学版)（河北工程大学学報(自然科学版)），第4号，pp. 46-51, (2010)
 - 13) 趙秀娟ら，「应用CMAQ 模型解析河北南部城市的霾污染来源（CMAQを用いた河北南部におけるヘイズ汚染解析）」，环境科学学报（環境科学学報），第10号，pp. 2559-2567, (2012)
 - 14) 王麗濤ら，「CMAQ-DDM-3D在细微颗粒物(PM2.5)来源计算中的应用（微小粒子物(PM2.5)発生源の計算におけるCMAQ-DDM-3Dの応用）」，环境科学学报（環境科学学報），第5号，pp. 1355-1361, (2013)
 - 15) 魏巍ら，「河北城市霾污染来源的模拟研究（河北都市ヘイズ汚染発生源に関するシミュレーション）」，环境科学与技术（環境科学と技術），第2号，pp. 116-119, (2013)
 - 16) 馬昌盛，「PM2.5治理更需打一組“組合拳”（PM2.5の制御に対して，“組合せ拳”が必要）」，节能与环保（省エネと環境保護），第2号，pp. 36-37, (2013)
 - 17) 柯小民，張麗麗，「有效减少PM2.5排放的凝聚型静电除尘技术的试验研究（PM2.5の排出を効果的に削減する縮合型粉塵静電除去技術の試験と研究）」，第十四届中国电除尘学术会议（第十四回中国粉塵電器除去学術會議），中国重慶, (2011)
 - 18) 王劍波，陳招妹，尹得仕，「一种有效减少PM2.5排放的微粒聚合器的性能研究（PM2.5の排出を効果的に削減する微粒子アグリゲータの性能研究）」，电力科技与环保（電力科学技術と環境保護），第1号，pp. 22-23, (2013)
 - 19) Zhang, Q., K. He and H. Huo, “Cleaning China's air”, Nature, 484, pp. 161-162, (2012)