Kobe University Repository : Kernel

PDF issue: 2025-07-09

# 瀬戸内海沿岸部におけるPM2.5高濃度現象の解明に関する研究

中坪, 良平

(Degree)
博士（工学）
(Date of Degree)
2020-03-25
(Date of Publication)
2021-03-01
(Resource Type)
doctoral thesis
(Report Number)
甲第7802号
(URL)
https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1007802

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。

（別紙様式 3）

# 論文内容の要旨

氏　　名　中坪　良平

専　　攻　海事科学専攻

論文題目（外国語の場合は，その和訳を併記すること。）

瀬戸内海沿岸部における $PM_{2.5}$ 高濃度現象の解明に関する研究

指導教員　平木　隆年



人への健康影響が指摘され、我が国では 2009 年に環境基準が設定された大気中微小粒子状物質（$PM_{2.5}$）については、観測網の整備が進むに従って、その時間・空間分布の特性が明らかになってきた。2013 年度から 2016 年度までの長期的な濃度推移の特性としては、一貫して西高東低の傾向を保ちつつ、全体的な濃度レベルは年々低下していく傾向がみられている。特に、冬季（1～3 月）は他の季節よりも低下幅が大きいことから、中国大陸からの長距離輸送の影響が低下したと考えられている。

一方、環境省によれば、2017 年度の $PM_{2.5}$ の年平均値の上位 10 測定局のうち 8 局を瀬戸内海沿岸部の測定局が占めており、長距離輸送の影響が低下するに伴い、瀬戸内海沿岸部で $PM_{2.5}$ が高濃度になりやすい傾向が明らかになった。瀬戸内海沿岸部では、中国からの長距離輸送だけでなく、瀬戸内海特有の気象条件に加え、周辺工業地帯、船舶等ローカルな汚染要因が関係していると考えられ、その科学的解明が待たれている状況である。

そこで本研究では、瀬戸内海沿岸部における $PM_{2.5}$ の高濃度現象を解明することを目的に、観測データを基本とした各種解析により、瀬戸内海沿岸部で $PM_{2.5}$ が高濃度になる原因を考察するとともに、$PM_{2.5}$ に及ぼす発生源、特に船舶排出に主眼をおいて、その影響を定量的に評価した。

第 1 章では、本研究の背景として、日本の大気汚染の状況や $PM_{2.5}$ 等大気中粒子状物質の物理・化学的特性や時間・空間分布の特性をまとめるとともに、本研究に関連する既往研究の状況を紹介した上で、本研究の目的及び方法、本論文の構成について述べた。

第 2 章では、本研究の基本となる $PM_{2.5}$ の成分測定手法及び精度管理手法の概要を概説して注意点をまとめた。また、近年導入の進んでいる大気中粒子状物質の化学成分連続自動分析装置の測定原理を紹介し、筆者らが実施した標準測定法との比較結果を示した。加えて、成分測定データを活用して発生源を推定するレセプターモデルの一種である PMF モデルについて、数学的取り扱いやモデルへ投じるデータセットの作成、因子（発生源）数の決定方法と解析結果の妥当性評価方法をまとめた。さらに、発生源の位置を推定するための CPF や CPBF、後方流跡線解析等の気象解析手法の概要をまとめた。

第 3 章では、瀬戸内海沿岸部に位置する兵庫県神戸市において 大気エアロゾル化学成分連続自動分析装置（ACSA-14）により 1 時間単位で $PM_{2.5}$ 成分濃度を 2 年間連続測定し、先駆ガス状物質濃度や気象要素との比較検討を行った結果を示した。各成分濃度の解析から、光学的ブラックカーボン（OBC）は、NOx 及び直近の幹線道路を走行する大型自動車交通量と類似の日内変動を示し、大気の静穏な状況下に高濃度となりやすいことから、直近の幹線道路を走行する大型自動車の影響を強く受けていると考えられた。$NO_3^-$ については、大型自動車の影響が示唆されるとともに、特異的な夜間の高濃度化が冬季にみられた。水溶性有機化合物（WSOC）は、夏季には Ox と類似の日内変動を示したことから光化学二次生成の影響を受け、冬季には大気安定化によっても濃度上昇したと考えられた。また、

$PM_{2.5}$質量濃度に占める割合が最も高い$SO_4^{2-}$濃度は、$SO_2$排出量マップと風向風速データを用いたCPF解析から、海風時に船舶からの排気ガスの影響を受けて高濃度になると考えられた。本研究から、日本の$PM_{2.5}$を考えるうえで中国大陸からの長距離輸送の影響は無視できないが、瀬戸内海沿岸部における$PM_{2.5}$濃度の日内変動の支配要因としては、ローカルな大気汚染や局地的な気象現象の影響が強いと考えられた。近年の中国における大気汚染対策の効果により、長距離輸送の影響はここ数年以内に急速に低下すると考えられるため、今後、より顕在化するローカルな$PM_{2.5}$汚染の影響を正しく評価するためには、本研究のような1時間単位の成分測定データによる解析が有効である。

第4章では、兵庫県南部の輻輳海域（明石海峡）周辺の3地点で観測された$PM_{2.5}$の成分測定結果を解析し、船舶排出の指標元素（V及びNi）の特徴を評価するとともに、PMF法による発生源解析により船舶排出等の発生源寄与率を定量的に求めた。観測期間における後方流跡線のクラスター解析により、3地点では中国からの大規模な長距離輸送だけでなく、観測地点周辺の国内発生源の影響によっても$PM_{2.5}$濃度が高濃度になることが分かった。船舶排出の指標元素とされるVとNiの濃度について、国内や海外の観測結果と比較したところ、3地点のV濃度は日本の工業地帯周辺や都市部のV濃度よりも高く、中国の大規模港湾周辺のV濃度に近かった。また、3地点のV/Ni比は、船舶排出の指標とみなされる範囲内にあり、加えて海風時に高くなったため、明石海峡周辺を航行する船舶の影響を強く受けていると考えられた。さらに、PMF法により推計した$PM_{2.5}$に対する船舶排出の寄与濃度は2.5～2.7 $\mu g/m^3$（寄与割合では17.3～21.4%）であり、中国からの長距離輸送の影響を表す因子である石炭燃焼起源硫酸塩に次いで高かった。そのため、瀬戸内海沿岸部では、船舶の排気ガスが$PM_{2.5}$の主要な発生源であると考えられた。

本研究では、1時間単位で長期間連続的に観測した$PM_{2.5}$の化学成分データの詳細な解析により、瀬戸内海沿岸部で$PM_{2.5}$が高濃度になる原因を考察するとともに、主要な発生源として船舶排出の寄与が重要であることを明らかにした。一方で、船舶から排出される大気汚染物質を削減するため、2020年1月から舶用燃料油中の硫黄含有量の上限値が現行の3.5%から0.5%へと強化される。そのため、2020年以降は船舶からの大気汚染物質の排出量の減少が見込まれ、瀬戸内海沿岸部においても$PM_{2.5}$濃度の低下が期待される。今後は、船舶燃料油規制の効果を確認するため、また、瀬戸内海沿岸部における大気環境の変化を明らかにするために、引き続き$PM_{2.5}$及び化学成分の観測を行い、瀬戸内海沿岸部の大気環境をより深く理解するための研究に取り組む必要がある。

（2,564文字）

（別紙１）　　論文審査の結果の要旨

| 氏名 | 中坪　　良平 | | |
|---|---|---|---|
| 論文題目 | 瀬戸内海沿岸部における $PM_{2.5}$ 高濃度現象の解明に関する研究 | | |
| 審査委員 | 区　分 | 職　名 | 氏　　名 |
| | 主　査 | 客員教授 | 平木　隆年 |
| | 副　査 | 教授 | 段　智久 |
| | 副　査 | 准教授 | 山地　一代 |
| | 副　査 | | 印 |
| | 副　査 | | 印 |

要　　旨

大気中微小粒子状物質（$PM_{2.5}$）は人への健康影響が指摘され、我が国では 2009 年に環境基準が設定された。大気中の濃度レベルは 2013 年度から 2016 年度まで低下傾向がみられており、特に、冬季（1～3 月）は他の季節よりも低下幅が大きいことから、中国大陸からの長距離輸送の影響が低下したと推定している。一方で、地理的特徴として、一貫して西高東低の傾向を示し、2017 年度の $PM_{2.5}$ の年平均値の上位 10 測定局のうち 8 局を瀬戸内海沿岸部の測定局が占めており、長距離輸送の影響が低下するに伴い、相対的に地域汚染の影響が鮮明になり、瀬戸内海沿岸部で $PM_{2.5}$ が高濃度になりやすい傾向を明らかにしている。瀬戸内海沿岸部では、瀬戸内海特有の気象条件に加え、周辺工業地帯、船舶等ローカルな汚染要因が関係していると考え、その科学的解明を試みている。

論文では、瀬戸内海沿岸部における $PM_{2.5}$ の高濃度現象を解明することを目的に、観測データを基本とした各種解析により、瀬戸内海沿岸部で $PM_{2.5}$ が高濃度になる原因を考察するとともに、$PM_{2.5}$ に及ぼす発生源、特に船舶排出に主眼をおいて、その影響を定量的に評価している。

第 1 章では、本論文の背景として、日本の大気汚染の状況や $PM_{2.5}$ 等大気中粒子状物質の物理・化学的特性や時間・空間分布の特性をまとめるとともに、本論文に関連する既往研究の状況を紹介した上で、本論文の目的及び方法、論文の構成について記述している。

第 2 章では、本論文で用いた手法について解説しており、観測の基本となる $PM_{2.5}$ の成分測定手法及び精度管理手法の概要を概説して要点をまとめている。また、本研究の特徴として実施した大気中粒子状物質の化学成分連続自動分析装置による実測調査に関して、用いた装置の測定原理を紹介し、本論文で標準測定法との比較測定を行い、その測定精度を明らかにしている。さらに本論文で用いた大気汚染物質の発生源解析手法であるレセプターモデルの一種である PMF モデルについて、数学的取り扱いやモデルへ投じるデータセットの作成、因子（発生源）数の決定方法と解析結果の妥当性評価方法を解説している。さらに、発生源の位置を推定するための CPF や CPBF、後方流跡線解析等の気象解析手法の概要についても解説している。

第 3 章では、瀬戸内海沿岸部に位置する兵庫県神戸市において 大気エアロゾル化学成分連続自動分析装置（ACSA-14）により 1 時間単位で $PM_{2.5}$ 成分濃度を 2 年間連続測定し、先駆ガス状物質濃度や気象要素との比較検討を行った結果を示している。各成分濃度の解析から、光学的ブラックカーボン（OBC）は、NOx 及び直近の幹線道路を走行する大型自動車交通量と類似の日内変動を示し、大気の静穏な状況下に高濃度となりやすいことから、直近の幹線道路を走行する大型自動車の影響を強く受けていることを明らかにしている。$NO_3^-$ については、大型自動車の影響が示唆されるとともに、特異的な夜間の高濃度化が冬季にみられることを明らかにしている。水溶性有機化合物（WSOC）は、夏季には Ox と類似の日内変動を示したことから光化学二次生成の影響を受け、冬季には大気安定化によっても濃度上昇したと推定している。また、PM2.5 質量濃度に占める割合が最も高い $SO_4^{2-}$ 濃度は、$SO_2$ 排出量マップと風向風速データを用いた CPF 解析から、海風時に船舶からの排気ガスの影響を受けて高濃度になることを明らかにしている。本論文では、日本の $PM_{2.5}$ を考えるうえで中国大陸からの長距離輸送の影響は無視できないが、瀬戸内海沿岸部における $PM_{2.5}$ 濃度の日内変動の支配要因としては、ローカルな大気汚染や局地的な気象現象の影響が強いと推定している。近年の中国における大気汚染対策の効果により、長距離輸送の影響はここ数年以内に急速に低下すると考えられるため、今後、より顕在化するローカルな $PM_{2.5}$ 汚染の影響を正しく評価するためには、本研究のような 1 時間単位の成分測定データによる解析が有効であると結論付けている。

| 氏名 | 中坪　良平 |
|---|---|

第 4 章では、兵庫県南部の輻輳海域（明石海峡）周辺の 3 地点で観測された $PM_{2.5}$ の成分測定結果を解析し、船舶排出の指標元素（V 及び Ni）の特徴を評価するとともに、PMF 法による発生源解析により船舶排出等の発生源寄与率を定量的に解析している。観測期間における後方流跡線のクラスター解析により、3 地点では中国からの大規模な長距離輸送だけでなく、観測地点周辺の国内発生源の影響によっても $PM_{2.5}$ 濃度が高濃度になることを明らかにしている。船舶排出の指標元素とされる V と Ni の濃度について、国内や海外の観測結果と比較し、3 地点の V 濃度は日本の工業地帯周辺や都市部の V 濃度よりも高く、中国の大規模港湾周辺の V 濃度に近いことを明らかにしている。また、3 地点の V/Ni 比は、船舶排出の指標とみなされる範囲内にあり、加えて海風時に高くなったため、明石海峡周辺を航行する船舶の影響を強く受けていることを明らかにしている。さらに、PMF 法により推計した $PM_{2.5}$ に対する船舶排出の寄与濃度は 2.5～2.7 $\mu g/m^3$（寄与割合では 17.3～21.4%）であり、中国からの長距離輸送の影響を表す因子である石炭燃焼起源硫酸塩に次いで高かった。そのため、瀬戸内海沿岸部では、船舶の排気ガスが $PM_{2.5}$ の主要な発生源であると結論づけている。

本論文は、1 時間単位で長期間連続的に観測した $PM_{2.5}$ の化学成分データの詳細な解析により、瀬戸内海沿岸部で $PM_{2.5}$ が高濃度になる原因を考察するとともに、主要な発生源として船舶排出の寄与が重要であることを明らかにしている。一方で、船舶から排出される大気汚染物質を削減するため、2020 年 1 月から船用燃料油中の硫黄含有量の上限値が現行の 3.5%から 0.5%へと強化される。そのため、2020 年以降は船舶からの大気汚染物質の排出量の減少が見込まれ、瀬戸内海沿岸部においても PM2.5 濃度の低下が期待されるとしている。

本論文は船舶の燃料規制が一般大気環境の改善に貢献することを学的に解析した、社会貢献度の高いものとなっている。

本研究は地域環境科学について，その環境大気中の $PM_{2.5}$ の発生源について研究をしたものであり船舶排ガスの影響について重要な知見を得たものとして価値のある集積である。提出された論文は海事科学研究科学位論文評価基準を満たしており、学位申請者の中坪　良平は、博士（工学）の学位を得る資格があると認める。