

大気環境改善のための費用対効果分析を活用した排出コントロール戦略
に関する調査研究

株式会社 環境情報コミュニケーションズ

大気環境改善のための費用対効果分析を活用した

排出コントロール戦略に関する調査研究

株式会社 環境情報コミュニケーションズ

【調査の目的】

平成 22 年度の NO_x、SPM の大気汚染濃度は近年緩やかな改善傾向がみられる。一方、平成 21 年に環境基準が設定された PM_{2.5} の環境基準達成率は平成 22・23 年度では低い傾向がみられる。全国における PM_{2.5} の年平均値は、基準値 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下に対し、一般環境大気測定局（一般局）で 15.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、自動車排出ガス測定局（自排局）で 16.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ であり、環境基準の達成が厳しい状況であることが明らかになった。また、最近の研究では、現行の大気汚染防止法や自動車 NO_x・PM 法による排出規制が着実に行われても、関東圏で 2020 年までに PM_{2.5} は環境基準以下にならない（達成 GAP が生じる）地域が多く残ることが示唆されている（JATOP 第 2 回成果報告、2012）。

東京都による調査研究では、PM_{2.5} などの粒子状物質は、汚染物質の排出量が少ない地域でも気象、周辺の排出実態・特性などから大気環境中濃度が高くなる場合があると推察されている。

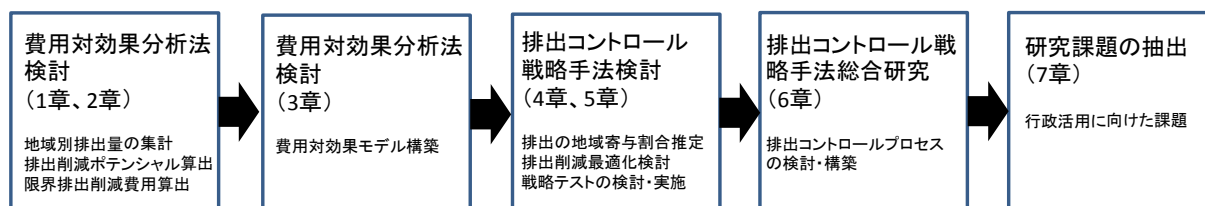
以上を踏まえると、PM_{2.5} の高濃度汚染地域の大気環境改善のための計画やコントロール戦略を費用対効果が高く、合理的に策定する場合には、広域の対策や削減計画を踏まえた上で局所的な汚染地域における有効な対策・計画を検討することが求められる。さらに、PM_{2.5} は多岐に亘る発生源があり、複数の前駆物質やその他の物質などが関与していることを考慮すると、着実に高濃度汚染地域の大気環境改善を行うためには、発生源毎に適切な排出規制の対策を講じる必要がある。また、排出対策は、限界費用の理由から地域によって限界があり、できるだけ効率的な方法で最大の効果を得る対策を選ぶことが望まれる。このためには、各々の汚染物質・発生源に対する排出削減対策ごとの費用対効果分析による定量的評価に基づいた、地域ごとの排出実態・地域特性に適した合理的な対策を立案する手法・アプローチを構築する必要があることが望ましい。

このような背景から、本研究では各汚染物質・発生源を考慮した大気汚染物質の削減対策に関する費用対効果分析の手法を研究し、この分析と GAP 分析に基づいた最適化手法を用いた局所的高濃度大気汚染地域を対象とする効率的かつ合理的排出コントロール戦略の検討手法を示すことを目的とした。これらの研究成果を取りまとめることにより、高濃度大気汚染地域を管轄する地方公共団体が、環境基準達成に向けて費用対効果の高い大気環境改善計画を適切に策定する際に役立つ手引となることを目指した。

【調査の方法】

平成 24、25 年の 2 年間で大気汚染物質（本研究では主に PM_{2.5} を扱う）の削減対策に関する費用対効果分析モデルの研究を行い、以下に提案する研究項目について、関東の汚染地域を対象に具体的な事例研究を行い、これらの研究成果に基づき費用対効果分析及び GAP 分析を用いた局所的な大気汚染地域における合理的な排出コントロール戦略手法を検討した。その成果を取り

まとめることにより、旧指定地域を中心とする地方公共団体で活用できるように合理的かつ効率的な大気環境改善の計画・対策を講じる手法の方向性を提示した。



この研究の報告に当たって、本研究は排出コントロール戦略に関する基礎的研究であることから、事例研究で得られる結果には科学的、システムのな不確実性が含まれている。そのため、行政にそのまま利用できる具体的な地域の排出コントロール戦略を示すものではないことを始めに言及しておく。今後、着実に科学的知見が集積され、この不確実性を小さくする研究を展開することにより、地域に適用可能な排出コントロール戦略を策定できるようにすることが望まれる。

本研究調査では、以下の研究に重点を置いて検討した。

- ① 大気汚染物質の削減対策の費用対効果分析モデルの構築
- ② 地域内における1次生成粒子と前駆物質の排出削減の最適化に関する検討
- ③ 域内と域外の排出削減を考慮した域内の排出コントロール戦略の検討
- ④ 局所的な大気汚染地域に対する、地域間寄与を考慮した「排出コントロール戦略手法」の総合研究

上記重点研究を行うために以下の研究を併せて実施した。

- ⑤ 関東圏の排出量（インベントリ）データの収集・集計
- ⑥ 地域内の削減ポテンシャル及び削減費用の推定に関する検討
- ⑦ 戦略効果テスト（最適化した削減対策の効果検証）

本研究成果を踏まえ、局所的な大気汚染地域や地方公共団体における大気環境改善の対策・計画、環境基準達成計画等への適用を図るため本研究成果の実用的活用方法の方向性を提示するとともに、将来本研究成果を具体的な計画・施策に活用されるよう調査研究終了後に整備すべき支援ツールや取り組むべき課題など提示し、本研究の展開を図るものとした。

1. 平成24年度

平成24年度は、費用対効果分析に用いるデータの収集、分析モデルを整備した。関東圏における大気汚染物質の高濃度汚染地域（以下「対象地域」という。）を研究対象地域として選定し、その地域とその地域の大気環境中濃度に寄与している周辺地域（茨城県、栃木県、群馬県、埼玉県、千葉県、東京都、神奈川県）におけるPM2.5（主に1次生成粒子）について、排出削減コントロールの費用対効果分析モデルを構築した。地域ごとに削減ポテンシャル及び限界削減費用を推定し、排出削減費用を抑制するための各地域における排出削減率を最適化させる手法について主に検討を行った。

以下に研究項目を示す。

- 1) 関東圏の排出量データの収集・整理
- 2) 1次生成粒子の削減対策DBの整備
- 3) 費用対効果分析モデルの研究
- 4) 1次生成粒子の排出抑制（排出削減率）の最適化に関する研究
- 5) 2次生成粒子の各地域への寄与割合の推定

2. 平成25年度

平成25年度は、平成24年度に実施したPM_{2.5}の2次生成粒子の寄与割合の検討結果に基づき、地域間の汚染影響マトリックスを推定した。1次生成粒子とともに2次生成粒子の前駆物質について、関東圏における各部門の成分ごとに削減ポテンシャル及び削減限界費用の推定を行い、その結果に基づき、対象地域の大气環境改善や大气環境基準の達成を実現させ、かつ最小費用で合理的に環境基準を達成するための排出削減率を最適化する分析モデル（以下「最適化」という。）について検討した。

最適化された1次生成粒子及び前駆物質の排出削減率に対し、対象地域での戦略効果テストを実施し、ギャップクロージャーアプローチを適用することにより環境基準の達成に必要な排出削減量を最適化する手法について、局所的な大気汚染地域で活用されることを想定し検討を行った。これらの研究成果に基づき、局所的な大気汚染地域での環境基準達成、大気環境改善を可能とする「排出コントロール戦略」の考え方・検討プロセスを検討し、将来地方公共団体が本研究の成果を活用できるよう調査研究成果のとりまとめを行った。

以下に研究項目を示す。

- 1) 汚染影響マトリックスの推定方法の検討とその推定
- 2) 2次生成粒子の前駆物質の削減対策DBの整備
- 3) 1次生成粒子と前駆物質を併せた排出削減の最適化に関する研究
- 4) 戦略効果テストの実施
- 5) ギャップクロージャーアプローチによる削減量の最適化
- 6) 排出コントロール戦略に関する総合研究
- 7) 調査研究の取りまとめと今後の課題の検討

3. 研究体制

本研究は、明治大学を研究代表とし、分担研究機関として早稲田大学、高崎経済大学、国士舘大学からなる「排出コントロール戦略研究チーム」を組織し、研究事務局を（株）環境情報コミュニケーションズに置き、本調査研究を実施した。また、独立行政法人産業技術総合研究所、財団法人石油産業活性化センター、一般財団法人日本自動車研究所の協力を得て研究を実施した。

調査研究の実施に当たり、研究の内容に関して助言・アドバイスを受ける目的で、5名の関連分野の専門家からなる検討会を設置した。

【調査の結果】

1. 関東圏の排出量データの収集・整理

1.1 排出インベントリの概要

本調査研究では、既存研究で作成された下記のインベントリを使用した。基本的には、JCAPII 及び G-BEAMS（以下「JATOP 推定値」という。）の排出量を使用した。

対象物質は、PM_{2.5} の 1 次生成粒子及び 2 次生成粒子（SO_x、NO_x）とした。VOC、NH₃ 等の前駆物質は排出源の違い、光化学反応過程の違いから対象としなかった。また、本調査研究で対象とする大気汚染物質は、発生源区分、物質ごとに 1 都 6 県（茨城県、栃木県、群馬県、東京都、神奈川県、千葉県、埼玉県）ごとに排出量の集計を行った。なお、排出インベントリは、「統計に用いる標準地域メッシュ及び標準地域メッシュコード」の第 3 次地域区画（GIS3 次メッシュ）ごとに集計し、2 段階集計法を用いて集計を行った。また、地方公共団体が対策を講じられない船舶、飛行機や火山などは本研究では検討しないこととした。インベントリの集計方法については、3 次メッシュの整備、JATOP 排出量データ（1 時間値）の集計、日排出量の算定、部門別・燃料別の年間排出量の算定、排出量の GIS 3 次メッシュデータの作成、1 都 6 県ごとに集計、各部門の排出割合の算定の順で行い、排出実態を把握する排出量データを作成した。

1.2 インベントリの集計結果

1.2.1 1次生成粒子

1.1 で述べた集計手順により求めた関東圏における 2000 年、2005 年の PM_{2.5} の排出量に換算する前の粒子状物質（PM）の排出量を集計し、排出量の経年変化や不確実性について検討を行った。

関東圏の対象地域から排出される PM の全量は、2000 年に 20,746 トン/年、2005 年に 22,621 トン/年となり、2000 年の 1 割程度増となったが、年間の PM 排出量は大きな変化を伴わず推移しているとして、本研究では 2005 年を戦略検討の基準年とした。

排出量が少ない県と多い県では 2000 年で 10 倍、2005 年で 7.5 倍の開きがある。このため排出抑制戦略上では、このような地域間の違いを考慮する必要があると考えられる。尚、部門別排出量のうち、農林水産業のそれが 2000 年と 2005 年で大きく違っているが、この間生産量や農林業の就労者はほとんど変わっていないことから、農林水産業は考慮しないこととした。

表 1 関東圏における 2000、2005 年の PM 排出量

県	製造業		非製造業		合計	
	2000	2005	2000	2005	2000	2005
茨城	2,867	2,875	1,406	2,387	4,273	5,262
栃木	210	266	484	760	695	1,026
群馬	162	164	455	735	618	900
埼玉	928	831	1,565	1,688	2,493	2,519
千葉	5,071	5,193	1,122	1,510	6,193	6,703
東京	1,601	1,499	2,415	2,342	4,016	3,840
神奈川	1,184	1,040	1,274	1,331	2,459	2,371
合計	12,024	11,867	8,722	10,753	20,746	22,621

※単位（トン/年）

1.2.2 戦略上対象とする部門の考え方と選定

本研究では、地域ごと、部門ごとの排出量から PM2.5 の汚染物質の現状の削減率、削減ポテンシャル及び削減限界費用を推定することが研究の基礎となる。一方、これらの推定には、時間と費用が掛かることから、排出コントロール戦略を検討する際はなるべく排出実態を考慮しながらも検討を簡略化することが求められる。そこで、関東圏における自動車以外の発生源について排出寄与が全排出量の 1%以上の部門（全体の排出量の 95.8%を占める）を解析対象とした。自動車に関する検討については本研究では実施せず、JATOP プロジェクトによる研究成果を引用した。

1.3 2次生成粒子の前駆物質

(1) 窒素酸化物 (NO_x)

2005 年に関東圏の対象地域から排出される NO_x の全量は、261,067 トン/年である。製造業が 109,828 トン/年であり、非製造業が 151,229 トン/年と、1 次生成粒子の排出量と異なり非製造業の方が多く窒素酸化物を排出している結果となった。地域別には、千葉県が最も多く 72,833 トン/年である。次に茨城県と東京が大きい。最も排出量が多い千葉県と最も小さい群馬県では、約 10 倍の差がある。しかしながら、内陸部でも PM2.5 の 2 次生成粒子は高い濃度が測定されており、この排出量と濃度の分布の違いが排出コントロール戦略の検討において重要となると考えられる。

(2) 硫黄酸化物 (SO_x)

2005 年に関東圏の対象地域から排出される SO_x の全量は、178,852 トン/年である。製造業が 97,505 トン/年であり、非製造業が 81,346 トン/年と、1 次生成粒子の排出量と同じく製造業の方が多く硫黄酸化物を排出している結果となった。地域別には茨城県が最も多く 61,894 トン/年である。次に千葉県と東京都、神奈川県が大きい。最も排出量が多い茨城県と最も小さい群馬県では、約 15 倍の差があり、NO_x と同じ結果である。排出量の GIS 解析により、工業地域、都市部に排出量が多い地域があり、発電所、鉄鋼、石炭・石油製品製造の排出量には非常に大きな局在性があった。本研究で解析したすべての汚染物質の排出量は、局在性があることが確認された。

表 2 関東圏における 2005 年の前駆物質の排出量 (左 : NO_x, 右 : SO_x)

県	排出量			県	排出量		
	製造業	非製造業	合計		製造業	非製造業	合計
茨城	23,162	32,159	55,322	茨城	31,952	29,942	61,894
栃木	3,017	5,725	8,741	栃木	2,384	3,643	6,027
群馬	1,956	4,970	6,926	群馬	1,242	3,001	4,244
埼玉	7,262	18,769	26,030	埼玉	6,723	8,376	15,099
千葉	47,847	24,986	72,833	千葉	35,770	10,653	46,423
東京	15,058	40,224	55,281	東京	12,977	11,481	24,458
神奈川	11,526	24,406	35,933	神奈川	6,457	14,249	20,707
合計	109,828	151,239	261,067	合計	97,505	81,346	178,852

※単位 (トン/年)

1.3.1 1次生成粒子と前駆物質の排出量の比較

(1) 年間排出量・排出寄与割合の比較

1次生成粒子とNOxの年間排出量については、ほとんどの部門でNOxの方が1～27倍多く排出をしている（図1）。部門によって排出量の差（倍率）に大きな違いがあることが分かった。1次生成粒子とSOxについても、同じ傾向を示しており、2～25倍SOxの方が多く排出している。

2005年の各部門のSOx、NOxの排出寄与割合について、NOxの割合が小さい方から順番に積算した寄与割合の累計曲線を求めた（図2）。排出寄与割合が1%以下の部門（なめし革・同製品・毛皮製造業～繊維工業）までは、1次生成粒子とほぼ同じような累計曲線が得られたことから、まずは1次生成粒子の排出寄与により選定した高排出量の部門の対策を優先して検討することが合理的であると考えられる。

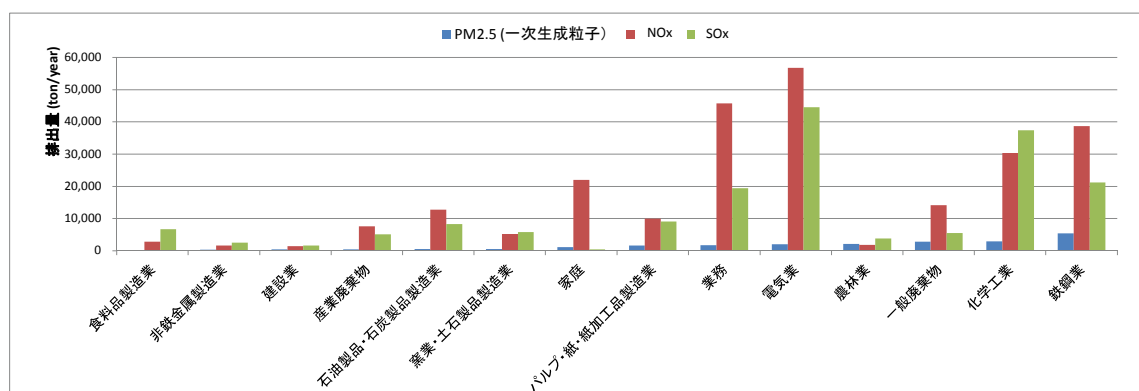


図1 1次生成粒子と前駆物質の年間排出量の比較

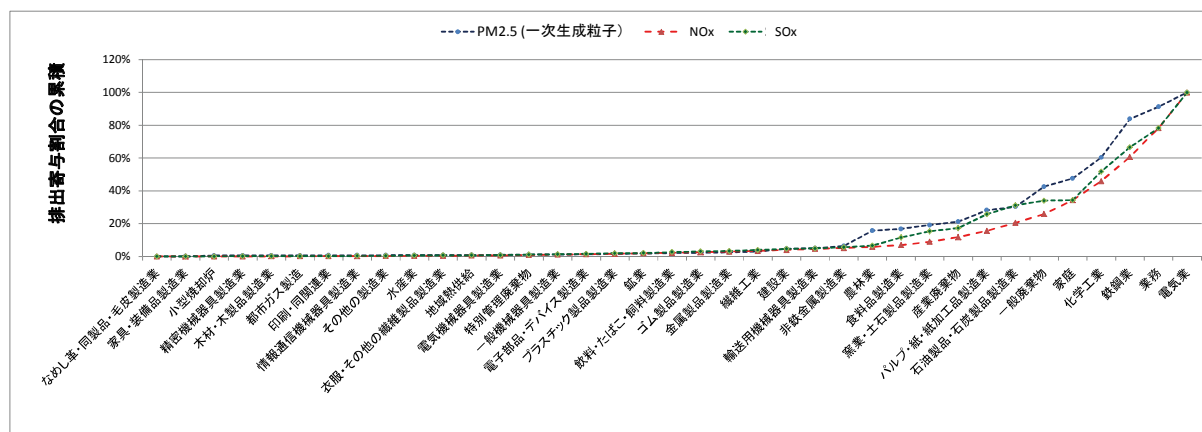


図2 排出寄与割合の累積曲線

(2) 関東圏における部門ごとの排出寄与割合

関東圏における自動車以外の各部門のSOxとNOxの排出寄与割合を求めた。ここで、着目する点としては、SOxとNOxの両方とも1次生成粒子と比較して排出量の大小の順序と各部門の寄与割合が大きく異なる点である。特に排出量が多い部門、ワースト10に入る部門がSOx及びNOxは1次生成粒子と大きく異なることが明らかになった。SOx、NOxを比較しても寄与割合が異なる部門が違うことも着目される。この違いは、各汚染物質の削減によるPM2.5対策の費用対効果分析及び排出コントロール戦略上では非常に重要となる。

2. 1次生成粒子・前駆物質の削減対策DBの整備

本研究では、国内外の信頼性の高い排出コントロールリストを用いて、発生源区分、物質ごとに適用可能な削減対策を整理した。また、限界削減費用を算出するため、排出される物質のうち1次生成粒子、SO_x、NO_xの排出削減ポテンシャル及び削減費用を併せて整理した。

2.1 削減対策と削減効果、費用データ

米国環境保護局（EPA）の固定発生源に関する削減対策と削減効果、費用、大気濃度への影響等のシミュレーション用システム Control Strategy Tool（CoST）に搭載されたデータベースである Control Measure Data Base が最も費用算定では精度が高いことから、1次生成粒子、SO_x、NO_xの発生源、発生源ごとの排出削減技術・手法、削減効果、削減費用など、削減対策 DB 作成に必要なデータを参照した。

2.2 1次生成粒子・前駆物質削減ポテンシャル・削減費用の推計

1次生成粒子・前駆物質の削減ポテンシャルは、以下の方法による算出する方法を導出した。

$$Q_{ij} = \sum_k C_k (J_{ijk} - E_{ijk} \times U_k \times (1 - R))$$

但し、 Q_{ij} : 地域 i 、産業 j 、燃料種 k の削減ポテンシャル、 C_k : 燃料種 k の PM_{2.5}/PM 換算係数¹、 J_{ijk} : 地域 i 、産業 j における燃料種 k 由来の各物質排出量、 E_{ijk} : 地域 i 、産業 j における燃料種 k の消費量、 U_k : 燃料種 k の削減技術非導入時の各物質排出係数、 R : BACT による各物質排出削減率。

地域、産業（部門）については、前章で述べたものを対象としている。燃料種は、JATOP 技術報告書「大気改善研究自動車以外排出量推計」の燃料種分類に従った。燃料種消費量は、「総合エネルギー統計」「石油等消費構造統計表」を参照した。各物質の排出係数は、2.1 で述べたデータを採用した。

1次生成粒子・前駆物質の削減技術を導入する費用は、以下の方法により算出した。

$$Cost_{ij} = \sum_k \left(\frac{B_{jk} \times Q_{ijk} \times R}{R - Q_{ijk} / E_{ijk} \times U_k \times C_k} \right)$$

但し、 B_{jk} : 産業 j 燃料種 k の BACT 導入時の各物質の削減重量当たりのコスト

算出した1次生成粒子削減・前駆物質ポテンシャル並びにその削減費用の空間的配分（3次メッシュ：1kmメッシュ）データは各物質のインベントリの3次メッシュ配分比率に従って配分している。

2.3 1次生成粒子・前駆物質削減ポテンシャル・削減費用の推計結果

1次生成粒子、SO_x、NO_x削減ポテンシャルの推計結果を表3に示す。1次生成粒子削減ポテ

¹ 前駆物質の場合は、不要である。

ンシヤル合計は 8,271 トン/年（農業部門を除く）、SOx は 142,500 トン/年、NOx が 136,346 トン/年（ともに農業部門、家庭部門、建設部門、非鉄金属部門を除く）であった。化学工業は、排出に対する削減ポテンシヤルが高めになっている。

表 3 1 次生成粒子・前駆物質削減ポテンシヤルの推計結果

	PM2.5		SOx		NOx	
	年間排出量 (t/年)	削減ポテン シヤル推定値 (t/年)	年間排出量 (t/年)	削減ポテン シヤル推定値 (t/年)	年間排出量 (t/年)	削減ポテン シヤル推定値 (t/年)
食料品製造業	156	153	6,631	6,408	2,762	1,738
非鉄金属製造業	192	181				
建設業	245	235				
廃棄物(産業)	259	69	5,088	4,834	7,582	3,412
石油製品・石炭製品製造業	286	268	8,243	6,033	12,774	10,381
窯業・土石製品製造業	284	254	5,789	5,319	5,123	3,318
家庭	923	841				
パルプ・紙・紙加工品製造業	1,035	613	8,976	8,448	9,920	7,461
業務	1,398	793	19,406	16,222	45,682	30,732
電気業	1,972	929	44,557	39,865	57,418	28,078
廃棄物(一般)	1,556	790	5,492	0	14,107	6,772
化学工業	1,821	1,737	37,350	36,369	30,375	26,791
鉄鋼業	2,986	1,409	21,188	19,002	38,631	17,664
計	13,114	8,271	162,720	142,500	224,374	136,346

1 次生成粒子ならびに前駆物質削減費用の推計結果を表 4 に示す（農林水産部門、家庭部門、建設部門、非鉄金属部門を除く）。1 次生成粒子の総ポテンシヤル削減費用は最小費用を適用した場合で約 94.9 億円、SOx、NOx の削減ポテンシヤルそれぞれ最小費用を適用した場合で 1782.2 億円、785.3 億円であった。削減費用の部門間の差異が非常に大きい。

表 4 1 次生成粒子・前駆物質削減費用の推計結果

	推定削減費用(¥100万/年)					
	PM2.5		SOx		NOx	
	最小	最大	最小	最大	最小	最大
食料品製造業	3		4,683	10,602	2,120	6,543
非鉄金属製造業	4					
建設業	7					
廃棄物(産業)	289	1,823	952	1,989	484	484
石油製品・石炭製品製造業	14		9,743	22,643	2,691	8,876
窯業・土石製品製造業	10		6,538	13,528	1,445	1,498
パルプ・紙・紙加工品製造業	15		1,988	4,751	3,270	10,769
業務	366		33,680	80,754	32,599	88,832
電気業	3,944		68,284	159,349	20,823	66,716
廃棄物(一般)	1,366		0	0	392	392
化学工業	19		17,742	42,491	8,209	26,388
鉄鋼業	3,458		34,616	118,958	6,494	17,053
計	9,494	11,028	178,225	455,066	78,527	227,551

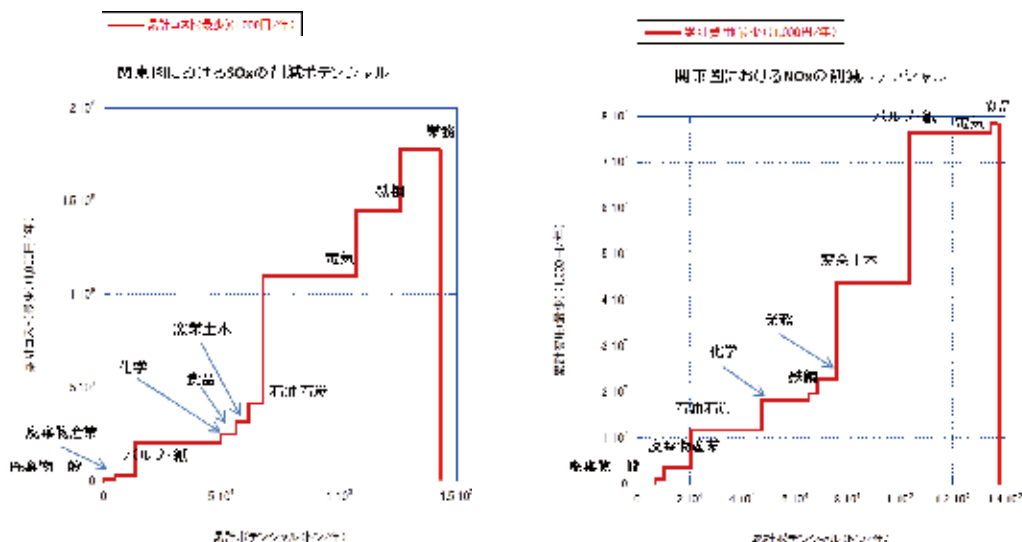
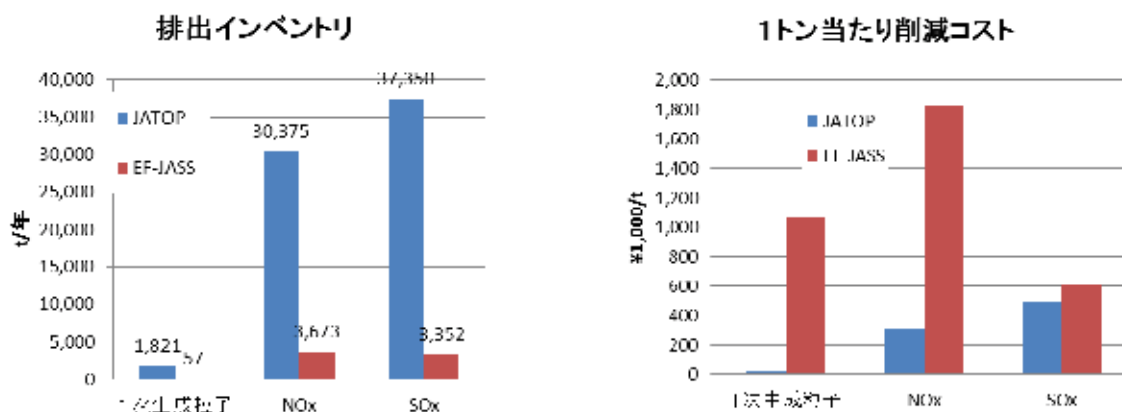


図 3 関東圏における SOx、NOx の削減ポテンシャルおよび費用の累積曲線

2.4 排出削減ポテンシャル並びに削減費用推計の不確実性

本研究で推計した 1 次生成粒子、SOx、NOx の削減ポテンシャルと削減費用の推計における不確実性要因として、排出インベントリが考えられる。本研究で使用した JATOP インベントリは、発生源を部門別燃料別に分類した排出係数を使用しているが、他の排出係数例ではさらにボイラー等にまで細分化している。そこで、(独) 国立環境研究所で整備されたインベントリ用排出係数 EF-JASS の化学工業部門について、燃料種ごとに 5% タイル以下に出現する排出係数の平均値を用いた 1 次生成粒子、2 次生成粒子前駆物質のインベントリを作成し、この値を基に削減ポテンシャル並びに削減コスト（最少）を本研究で推計したものと比較した（図 4）。この結果、排出量は、各物質とも元の排出量の 3-12% となり、削減量 1 トン当たりの費用は 1.2 倍から 44.7 倍まで大きく変動した。このことから、燃料によってはインベントリの不確実性が大きいものがあることから、今後固定発生源の各排出源の詳細なインベントリの整備が望まれる。



左棒：JATOP による算定，右棒：EF-JASS による算定

図 4 排出インベントリの変動によるトン当たり削減コストへの影響

3. 費用対効果分析モデルの研究

汚染物質の1単位削減に必要な追加的費用（限界削減費用）が均等化すると費用が最小になることが知られており、環境政策もこの視点から議論されていることが多い。このような効率性の視点からの検討による事前の政策評価が適切に行われることにより、より効率よく、少ない費用で、環境保全目標が達成できることが報告されている。

ここでは、PM2.5の排出削減を効率よく達成するための政策を検討する事例として、1次生成粒子の排出量削減にフォーカスし、排出削減ポテンシャルと削減費用から費用対効果を明らかにする。

3.1 分析データの概要と分析メッシュ

2章に記載した削減ポテンシャル対象の11部門の関東地方におけるPM2.5排出量について削減費用対効果の検討を行った。費用対効果分析は、ポテンシャル解析と同様関東圏について3次メッシュデータ（1kmメッシュ）に細分化したもので行った。解析結果については、1、2章同様関東地方の12都県市の地方公共団体ごとに集計を行っている。

PM2.5排出の原因となる燃料種一覧は表5にまとめた。1つの業種では通常複数の燃料種が使われている。これら燃料種によってPM2.5の排出量、削減可能な量、削減のための費用が異なっている。

表5 燃料種一覧

原油	潤滑油	コークス炉ガス	廃タイヤ
NGL(天然ガス)	アスファルト	高炉ガス	木材
ナフサ	他重質油・パラフィン等	転炉ガス	再生油
ガソリン	LPG(液化石油ガス)	電気炉ガス	RDF(廃棄物固形燃料)
ジェット燃料油	石油コークス	製油所ガス	廃棄物
灯油	石炭	MXG(混合ガス)	RPF
軽油	原料炭	天然ガス	感染性廃棄物
重油	一般炭	LNG(液化天然ガス)	分類なし
A重油	石炭コークス	都市ガス	
C重油	コールタール	回収黒液	

3.2 排出削減量（トン/年）と削減費用（円/年）

本研究では各業種の燃料種によって異なる費用と排出量を比較することによって分析をすすめた。図5は費用対効果分析モデルの構造を表している。

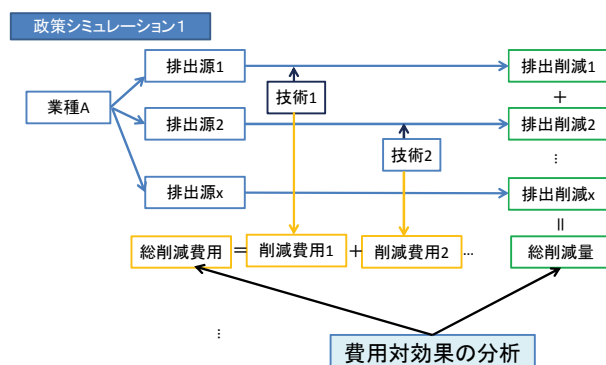


図5 固定発生源の費用対効果分析モデル

例えば業種 A のある 1 メッシュ地域 (1km メッシュ) には、いくつかの排出源が存在する。この削減費用は 1 つの排出源で使用されている 1 燃料種ごとに異なっている。排出源ごとに可能な削減量と、その削減のために必要な技術の費用とをそれぞれ集計して比較することで費用対効果を概観することが可能となる。分析では、1 つのメッシュの 1 業種の燃料ごとの排出源を 1 つの排出源として扱う。表 6 に各業種での PM2.5 排出源数、総排出量 (トン/年)、排出源当たりの平均排出量 (トン/年)、削減可能な総量 (トン/年)、その際にかかる総削減費用 (円/年)、1 トン当たり削減費用 (円/トン) についてまとめた。1 トン当たり費用で比較すると最も高いのが産業廃棄物部門の 15,405 (千円/トン) で、最も低いのが非鉄金属部門の 28 (千円/トン) であった。

表 6 業種別集計データ

部門	排出源数	総排出量 (トン/年)	排出源当たり 平均排出量(トン/年)	削減可能総量 (トン/年)	総削減費用 (百万円/年)	1トン当たり費用 (千円/トン)
電気	9	1,904	212	332	2,828	8,520
食品	37,482	244	0.007	150	5	35
パルプ	14,848	1,118	0.075	952	318	334
化学	6,358	2,671	0.420	1,661	55	33
石油石炭	1,371	448	0.326	264	17	66
窯業	40,813	419	0.010	241	32	132
鉄鋼	14,302	2,790	0.195	1,272	2,674	2,102
非鉄金属	13,832	286	0.021	180	5	28
業務	219,197	1,398	0.006	793	473	596
一般廃棄物	3,051	1,556	0.510	790	4,242	5,370
産業廃棄物	3,098	259	0.084	68	1,055	15,405
11部門合計	354,361	13,094	0.037	6,703	11,703	1,746

3.3 限界削減費用 (円/トン)

次節で行うモデル分析では、各部門のそれぞれの燃料種ごとの排出源で PM2.5 を削減するのに必要な費用を 1 トンあたりに換算した費用 (限界費用) (千円/トン) の大きさの比較が重要となる。削減を効率的に行うには、限界費用が低い技術から使用することが望ましい。図 6 に化学部門と鉄鋼業部門での燃料種ごとの限界削減費用 (千円/トン) のグラフを示した。縦軸が 1 トン当たりの限界削減費用 (千円/トン) であり、横軸は累積削減量を示している。仮にこの 2 部門の合計値として 2,000 トン削減しなければならないとすると、鉄鋼業部門で 400 トン分、化学部門で 1,600 トン分を限界削減費用が低い技術から優先的に使用することで、全体での削減費用を小さくすることができる。次節以降のシミュレーションはこの考えのもと進めている。

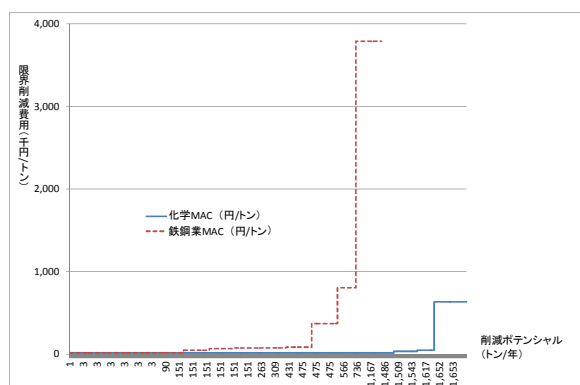


図 6 化学部門と鉄鋼業部門の燃料種別限界削減費用 (千円/トン) 比較

3.4 業種別、地域別50%削減目標

第1の政策シナリオは、業種別に削減を行って目標を達成するケースである。削減量の目標を最小費用で達成すると仮定し、各業界団体が50%の削減をすることで、全体でも削減可能な総量のうち50%削減を達成することができる。

表7に、業種別削減目標のシミュレーションの結果を示す。各業界が目標を達成した場合には全体で年当たり3,466トンの削減効果があることが分かった。そのための削減費用は4,851百万円であることが分かった（1トン当たり費用でみると1,400千円であった）。

表7 業種別削減費用：各業種50%削減ケース

部門	排出源数	総削減量 (トン/年)	削減費用 (百万円/年)	1トン当たり費用 (千円/トン)
電気	9	171	1,346	7,862
食品	37,482	75	1	18
パルプ	14,848	478	1	3
化学	6,358	836	15	18
石油石炭	1,371	133	3	19
窯業	40,813	121	5	43
鉄鋼	14,302	736	641	872
非鉄金属	13,832	90	2	17
業務	219,197	397	186	469
一般廃棄物	3,051	395	2,123	5,370
産業廃棄物	3,098	34	528	15,405
11部門合計	354,361	3,466	4,851	1,400

第2の政策シナリオは、各地方公共団体がそれぞれで削減目標を達成する場合のシミュレーションである。関東地方における12都県市それぞれの地方公共団体が目標を達成することで、全体でも削減可能な総量の50%を削減することができる。表8には、地域別削減目標シミュレーションの結果を示す。12都県市それぞれの結果の合計値についてみると、各地方公共団体が目標を達成した場合に全体で年当たり3,363トンの削減効果があることが分かった。そのための削減費用は198百万円であることが分かった。1トン当たり費用でみると59千円であることが分かった。

表8 地域別削減費用：各地域50%削減ケース

地域	排出源数	総削減量 (トン/年)	削減費用 (百万円/年)	1トン当たり費用 (千円/トン)
茨城県	74,046	782	21	27
栃木県	44,825	90	8	89
群馬	38,229	73	15	206
埼玉県	58,774	227	39	173
千葉県	63,449	1,195	13	11
東京都	31,496	352	76	215
神奈川県	22,446	301	3	11
さいたま市	4,110	22	9	404
千葉市	1,335	7	5	720
相模原市	2,801	23	0.2	10
川崎市	3,760	94	1	13
横浜市	9,090	197	8	41
12都県市合計	354,361	3,363	198	59

業種や地方公共団体の区切りはなく全体で50%削減を達成するケースのシミュレーション結果を表9に示す。このケースでは、50%削減目標時に達成される総削減量3,421トン/年を削減するために55百万円/年の費用がかかることが分かる。費用を1トン当たりに換算すると16千円と、低コストでの削減が可能となった。これは、より削減費用が低い部門から削減を行うことで、削減費用が高い部門での削減の必要がなく目標を達成することができることを示している。

表9 全体で50%削減ケース

部門	排出源数	総削減量 (トン/年)	総削減量/削減 ポテンシャル	削減費用 (百万円/年)	1トン当たり費用 (千円/トン)
電気	9	0		0	
食品	37,482	147	98%	5	31
パルプ	14,848	944	99%	1	1
化学	6,358	1,625	98%	32	20
石油石炭	1,371	153	58%	3	21
窯業	40,813	186	77%	6	30
鉄鋼	14,302	189	15%	4	19
非鉄金属	13,832	177	99%	4	24
業務	219,197	0		0	
一般廃棄物	3,051	0		0	
産業廃棄物	3,098	0		0	
全体	354,361	3,421		55	16

3.5 地域別費用負担均等化

地域間での費用負担均衡化を考慮に入れたモデルを考える。実際に排出削減を実施するのであれば、現実的には地方公共団体からの助成が必要となることも考えられ、削減費用が各地方公共団体から得られる助成額の大きさに依存することが考えられる。そこで全体での削減を達成するための費用を、地方公共団体の財政規模を考慮したモデルによる分析を行った。12都県市全体での削減費用を案分する方法として、各地方公共団体別の歳出額を使用している。

表10に地域別費用負担均衡化のケースのシミュレーション結果を示す。最も年当たり削減量が多かったのが千葉県で1,301トンであり、最も削減量が少なかったのは千葉市で6トンであった。案分した削減費用を見ると、最も高い東京都の年当たり削減費用（56百万円）は、最も削減費用が少ない千葉市と相模原市の28倍であった。1トン当たりの削減費用にすると、最も高いさいたま市は、最も安い千葉県の約28倍であった。削減費用に対して削減量が最も多い千葉県は、1トン当たりの削減費用が他よりも低い。全体で見た場合、目標達成時の削減量3,352トン/年を削減費用153千円/トンで行われ、1トン当たりの費用に換算すると46千円である。

表10 地域負担均等化で50%削減ケース

地域	排出源数	削減量 (トン/年)	削減費用 (百万円/年)	1トン当たり費用 (千円/トン)
茨城県	74,046	636	10	15
栃木県	44,825	88	7	82
群馬	38,229	58	7	125
埼玉県	58,774	180	15	85
千葉県	63,449	1,301	15	11
東京都	31,496	315	56	177
神奈川県	22,446	384	17	45
さいたま市	4,110	13	4	303
千葉市	1,335	6	2	283
相模原市	2,801	28	2	75
川崎市	3,760	136	5	40
横浜市	9,090	207	13	61
12都県市合計	354,361	3,352	153	46

3.6 考察

業界別に PM2.5 の削減ポテンシャルのうちの 50%削減を行った場合、業界全体では 1 トン当たり 1,400 千円の費用がかかった。一方で 12 都県市別に 50%の削減を行った場合、全体では 1 トン当たり 59 千円の費用がかかった。「全体で 50%削減達成」ケースのシミュレーションでは、削減ポテンシャルの 50%削減を達成する場合 1 トン当たり 16 千円の費用となり、非常に小さい額である。業界の壁や地方公共団体の壁がなければ、削減費用の低い業種や地域から優先的に削減を行うことができるため、全体で削減に取り組むことによって経済学的には最も効率がよく削減目標を達成することができることが示された。現実的な政策の実施を想定して、各地域の財政規模を考慮し、地域負担が均等になるような条件のもとで削減目標を達成させる「地域別費用負担均等化」ケースの場合、1 トン当たり 46 千円の費用がかかり、「全体で 50%削減達成」ケースの 3 倍近い値であるが、業界別地域別で得た 2 つのシミュレーション結果に比べると小さい額であることが分かる。業界別または地域別に削減するよりも、各地域での費用負担が均等になるよう考慮しながら全体で削減を行った方が効率の良いことが示された。

4. 2次生成粒子の各地域への寄与割合の推定

4.1 関東圏の成分別寄与濃度割合

PM2.5 の排出コントロール戦略を検討する場合、広域の 1 次生成粒子や 2 次生成粒子の前駆物質の排出量が局所的地域の PM2.5 濃度にどの程度寄与しているかを把握することが非常に重要となる。本研究では、2 次生成物質の成分分析結果や大気化学輸送モデルを用いた PM2.5 の寄与濃度の研究結果に基づき、前駆物質 (SO_x、NO_x) の PM2.5 濃度寄与について検討を試みた。

図 7 に、2 次生成粒子 (SO_x、NO_x) の関東地域の代表的な地域の寄与濃度割合を示す。寄与濃度割合には地域ごとに若干の違いがあるもののほぼ同じ傾向を示していることが分かる。地域別に各汚染物質の排出量に局在性があるが、寄与濃度割合はほぼ同じ程度になっていることが着目される。

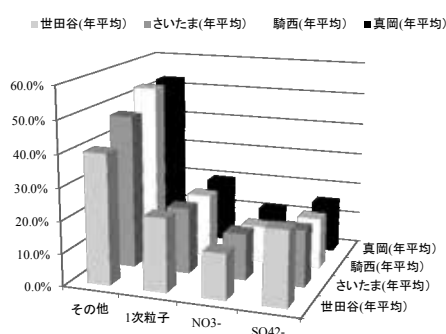


図 7 関東圏の成分別寄与濃度割合

4.2 2次生成粒子の排出濃度寄与率とコスト補正係数

4.1 で求めた寄与濃度割合を用いて関東圏における排出量のうち PM2.5 濃度への寄与分を示す補正排出量や排出濃度寄与率とコスト補正係数を計算することが出来る。コスト補正係数は、1

次生成粒子と2次生成粒子を同じ濃度低下させる場合に必要となる費用の比率の目安となる指標である。

補正排出量（トン／年）

$$CPE_{SO_x, NO_x, i} = PE_{SO_x, NO_x, i} \times \frac{\sum_i PE_{SO_x, NO_x, i} / CR_{SO_x, NO_x, j} \times 100}{\sum_i PE_{PM2.5, i} / CR_{PM2.5, j} \times 100} \quad (\text{定義式 1})$$

排出濃度寄与率（％）

$$CRE_{SO_x, NO_x, i} = \frac{CPE_{SO_x, NO_x, i}}{\sum_i CPE_{SO_x, NO_x, i}} \quad (\text{定義式 2})$$

コスト補正係数

$$CRC_{SO_x, NO_x, i} = \frac{1}{CRE_{SO_x, NO_x, i}} \quad (\text{定義式 3})$$

但し、PE：各汚染物質の排出量（トン／年）、i:地点・地域、j:部門、CR: 寄与濃度割合(%)

(1) SOx と NOx の補正排出量

関東の各地域の補正排出量を算出すると、関東のほとんどの地域で PM2.5 濃度に寄与している前駆物質の排出量（補正排出量）は、ほとんど1次生成粒子の排出量と同程度まで少なくなるという結果が得られた。

(2) 排出濃度寄与率（％）とコスト補正係数

SOx、NOx 及び1次生成粒子の排出量を仮に同量削減しても、PM2.5 濃度に対して同じ効果が得られない。そこで、その効果を示す指標である排出濃度寄与率、コスト補正係数を求めた。その結果を表11に示す。1次生成粒子の排出量を削減するのと同じ効果となる前駆物質の排出量の削減に掛かる費用は、1次生成粒子の6.2～33.7倍となった。対策費用を検討する場合、この費用の違いは重要であり、各成分の排出がある地域の成分濃度にどの程度寄与するかを示す濃度寄与マトリックスを推定する必要があることが分かった。

表 11 関東圏における各地域の排出濃度寄与率，コスト補正係数

地域	PM (一次生成粒子)	NOx (補正前)	NOx (補正後)	排出濃度寄与率 NOx	SOx (補正前)	SOx (補正後)	排出濃度寄与率 SOx	地域	コスト補正係数 NOx	コスト補正係数 SOx
都市部	22,621	261,083	7,342	2.8%	178,859	28,968	16.2%	都市部	35.6	6.2
都市部			8,269	3.2%		24,688	13.8%	都市部	31.6	7.2
埼玉、群馬			9,363	3.6%		20,889	11.7%	埼玉、群馬	27.9	8.6
北環境			7,760	3.0%		19,634	11.0%	北環境	33.6	9.1
北環境			7,750	3.0%		18,860	10.5%	北環境	33.7	9.5

※単位：PM、NOx、SOx（補正前、補正後）は、トン／年，コスト補正係数は無次元

4.3 地域間の汚染影響マトリックスの推定

上述したとおり、各成分の寄与濃度を考慮した費用対効果分析を行うためには、離れた地域で排出された PM2.5 の1次生成粒子及び前駆物質が移流・拡散、光化学反応等により PM2.5 濃度にどのくらい寄与するか定量的に求める必要がある。本研究では、各地域（県ごと）の各成分（1次、SOx、NOx）の全排出量を削減した場合に低下する PM2.5 濃度の関係を示す「濃度寄与マトリックス」を定義し、ADMER-PRO を用いて関東圏を対象とし1次生成粒子及び2次生成粒子の広域の大気化学輸送計算を行い、そのマトリックスを推定した。

濃度観測地域

排出地域

	茨城県	栃木県	群馬県	埼玉県	千葉県	東京都	神奈川県
茨城県	0.89	0.31	0.03	0.09	0.37	0.02	0.03
栃木県	0.47	1.51	0.13	0.08	0.02	0.05	0.06
群馬県	0.16	0.68	1.66	0.33	0.03	0.08	0.09
埼玉県	0.19	0.17	0.34	1.46	0.04	0.13	0.06
千葉県	0.64	0.41	0.10	0.61	1.22	0.25	0.10
東京都	0.09	0.07	0.08	0.63	0.15	1.16	0.26
神奈川県	0.04	0.05	0.07	0.38	0.20	1.00	1.48
濃度低下	2.48	3.20	2.42	3.58	2.03	2.69	2.06

	茨城県	栃木県	群馬県	埼玉県	千葉県	東京都	神奈川県
茨城県	0.38	0.13	0.01	0.04	0.14	0.01	0.01
栃木県	0.20	0.64	0.06	0.04	0.01	0.02	0.02
群馬県	0.07	0.29	0.70	0.15	0.01	0.03	0.03
埼玉県	0.05	0.05	0.10	0.36	0.01	0.03	0.02
千葉県	0.27	0.17	0.04	0.27	0.44	0.12	0.04
東京都	0.04	0.03	0.03	0.23	0.05	0.31	0.09
神奈川県	0.02	0.02	0.03	0.17	0.07	0.40	0.54
	1.02	1.33	0.97	1.26	0.74	0.93	0.75

※単位は、 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

図 8 PM2.5 の濃度寄与マトリックス（上：1 次生成粒子，下：2 次生成粒子（SOx））²

5. 排出抑制（削減量）の最適化に関する研究

本章では汚染物質の越境移動も含めた 1 次生成粒子、SOx、NOx の排出削減による環境基準の達成最適シナリオを考える。

5.1 排出抑制モデル

PM2.5 の濃度基準を最小費用で達成する費用最小化の分析モデルは、3 章のモデル同様、排出源の位置と技術を詳細にとらえ、さらに大気中の汚染物質の地域移動と 2 次生成粒子も分析に取り入れる。各汚染物質それぞれの費用モデルに、PM2.5 濃度モデルを組み合わせ、排出削減量と費用、その際の各地域 PM2.5 濃度を推定することで、削減シナリオを評価する。

5.2 費用モデル

地域 i 産業 j において、燃料種 k ($k = 1, \dots, K_j$) の燃焼が原因の汚染物質 p を削減するために技術を導入する時の費用を C_{ijk}^p (円/トン) で表す。削減技術導入の有無を表すダミー変数を D_{ijk}^p とする。各地域において、削減率 r_i^p を実現するための最小費用を費用関数 $RC_i^p(D_{ijk}^p)$ で定義すると、ある削減率 r_i^p が与えられたときに求められる最適な費用となる。そこで費用関数を以下のように r_i^p の関数として記述する。

$$RC_i^p(r_i^p) = RC_i^p(D_{ijk}^p)$$

5.3 濃度推定モデル

汚染物質 p の削減によって低下した、汚染地域 o ($o=1, \dots, 7$) における濃度の変化分を ΔAQ_o とする。地域 i から排出された各成分 p を全量削減した場合、汚染地域 o における濃度低下の関係は、第 4 章で推計された濃度寄与マトリックスで表せる。これを w_{io}^p で表すと、各成分の排出を各地域

² PM2.5 の 1 次生成粒子の排出量を全量削減した場合の濃度低下を示す。横が対象の県の排出量を削減した場合の各県での成分濃度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) の低下を示す。関東圏ですべての PM2.5 の 1 次生成粒子を削減すると各県で最後の行に示す濃度低下が起こると推定できる。

で削減率 r_i^p だけ削減した場合の濃度変化は以下となる。

$$\begin{pmatrix} \Delta AQ_1 \\ \vdots \\ \Delta AQ_7 \end{pmatrix} = \sum a_{io}^p \times r_i^p$$

本研究では外部で削減する部分についても考慮することとし、移動排出源や関東圏外でも削減が行われることで、圏内のPM2.5濃度が全体的にある一定量低下したと仮定する。汚染地域 o ($o=1, \dots, 7$)におけるPM2.5濃度と環境基準との差を $\overline{GAP}_o$ 、外部削減によって実現する圏内各地域の濃度低下度を $\overline{EXD}_o$ とする。すると各地域が満たすべき条件は、以下のようになる。

$$\begin{pmatrix} \Delta AQ_1 \\ \vdots \\ \Delta AQ_o \\ \vdots \\ \Delta AQ_7 \end{pmatrix} \geq \begin{pmatrix} \overline{GAP}_1 - \overline{EXD}_1 \\ \vdots \\ \overline{GAP}_o - \overline{EXD}_o \\ \vdots \\ \overline{GAP}_7 - \overline{EXD}_7 \end{pmatrix} \quad 0$$

但し、 $\overline{EXD}_o \geq \overline{GAP}_o$ の場合

5.4 排出量

分析データには、JATOPの2005年における排出量データからのPM2.5の1次生成粒子、前駆物質のNO_x、SO_xの排出量データを用いた。部門としては、排出量が多く、かつ技術導入による削減量が多い部門に注目し、表12の部門、物質を分析対象とした。

表 12 3物質それぞれの分析対象部門（○が分析対象）

	電気	食品	パルプ	化学	石油 石炭	窯業	鉄鋼	非鉄 金属	一般廃 棄物	産業廃 棄物	業務
1次物質	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
NO _x	○	○	○	○	○	○	○		○		○
SO _x	○	○	○	○	○	○	○		○		○

表13は、関東における削減ポテンシャルが存在する固定排出源由来の各汚染物質の総排出量、削減可能総量、総削減費用を示しており、本研究の分析対象となる。

表 13 汚染物質別 総排出量、削減可能総量、総削減費用

汚染物質	排出源数	総排出量 (トン／年)	削減可能総量 (トン／年)	総削減費用 (億円／年)
1次物質	356,267	10,737	6,987	134
NO _x	141,936	180,129	132,820	1,642
SO _x	151,183	148,850	139,161	3,391
合計	649,386			5,167

5.5 関東圏におけるPM2.5濃度の状況

表 14 は、関東 7 都県毎に PM2.5 の年間濃度の状況をまとめたものである。

平均濃度 (①) から基準濃度 (②) と産業寄与濃度 (③) を引いた値を、表の下から 2 行目の GAPa に示している。表の最終行の GAPb は、GAPa からさらに自動車寄与濃度 (④) を引いた値である。関東 5 地域では域内の排出削減だけでは、環境基準を達成するのは困難なため、外部で汚染物質の削減 (外部削減) による関東圏内の汚染物質濃度を仮定する。外部削減による 4 段階の濃度低下を仮定し、これに伴い圏内で達成すべき削減率に変動するものとする (表 14)。

表 14 関東各地域における PM2.5 濃度と基準目標からの未達成 GAP (単位: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

	茨城	栃木	群馬	埼玉	千葉	東京	神奈川
①平均濃度	17.9	19.1	19.3	23.4	20.9	21.3	22.1
②基準濃度	15	15	15	15	15	15	15
③産業寄与濃度	2.9	2.8	2.1	3.8	2.4	2.9	2.4
④自動車寄与濃度	1.4	1.9	1.4	2.1	1	1.6	1.4
GAPa : ①- (②+③)	0.1	1.3	2.3	4.6	3.5	3.4	4.7
GAPb : GAPa-④	達成	達成	0.9	2.5	2.5	1.8	3.3

5.6 排出抑制シナリオ

本節では上記のモデルを用いて、排出削減のシナリオを考える。初めに各地域の一律削減ケース、次に最小費用で環境基準を達成する最適削減ケースの 2 つのケースを考える。

5.6.1 一律削減ケース

表 15 は、PM2.5 の濃度目標達成のための外部削減ケース別の一律削減率を表している。削減が最も困難な地域の削減率に合わせることになるため、神奈川県で目標達成を実現するために、比較的目標の達成が簡単な北関東では自地域の目標達成に必要な水準を大幅に上回る削減率となっている。

表 15 環境目標達成のための一律削減率 (%) と総削減費用 (億円/年) (外部削減ケース別)

圏外寄与度	一律削減率 (%)	茨城	栃木	群馬	埼玉	千葉	東京	神奈川	合計
3.5	95	1,285	149	114	363	1,081	625	547	4,164
4	75	483	93	71	178	513	254	135	1,728
4.5	55	413	42	31	77	211	159	132	1,065
5	30	132	11	7	16	72	34	37	310

5.6.2 濃度を考慮した最適削減ケース

削減費用最小化モデルにより 4 つの外部削減ケース別に、それぞれの場合の最適削減率における削減費用の分析を行った (表 16)。各外部削減ケースにおいて、どの地域も一律削減率より削減費用を軽減できることが分かる。

表 16 外部削減シナリオ別最適削減率と最適削減に必要な削減費用

外部削減 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	物質	茨城	栃木	群馬	埼玉	千葉	東京	神奈川	合計
最適削減 率(%)	1次物質	95	90	95	90	85	95	100	
	3.5 NOx	84	75	85	75	55	73	100	
	SOx	48	75	75	65	55	84	82	
	1次物質	55	65	85	100	85	77	95	
	4.0 NOx	15	25	55	35	30	30	84	
	SOx	5	0	35	30	5	26	42	
	1次物質	45	45	85	100	79	45	95	
	4.5 NOx	5	5	30	30	15	25	25	
	SOx	0	0	15	15	0	0	5	
	1次物質	45	35	65	75	70	55	61	
	5.0 NOx	0	0	25	15	10	0	0	
	SOx	0	0	5	0	0	0	0	
最適削減 に必要な 削減費用 (億/年)	1次物質	17	2	2.6	8.3	11	20	20	81
	3.5 NOx	136	34	37	48	78	84	237	652
	SOx	133	59	45	90	133	153	80	693
	合計	286	95	84	146	222	258	336	1,427
	1次物質	1	0.2	2	13	11	5	17	50
	4.0 NOx	7	1	5	8	10	8	52	92
	SOx	9	0	9	11	7	19	28	82
	合計	17	1	15	32	28	33	97	224
	1次物質	0.2	0.04	1.8	13.3	3	0.5	17	35
	4.5 NOx	1	0.1	1	5	4	6	5	22
	SOx	0	0	1	4	0	0	2	8
	合計	1	0.2	4	23	7	7	24	66
	1次物質	0.2	0.02	0.3	2.9	1	1	1	6
	5.0 NOx	0	0	1	2	2	0	0	4
	SOx	0	0	0.3	0	0	0	0	0.3
	合計	0.2	0.02	1	4	2	1	1	10

5.6.3 関東圏内、圏外の排出削減量の最適化の予備検討

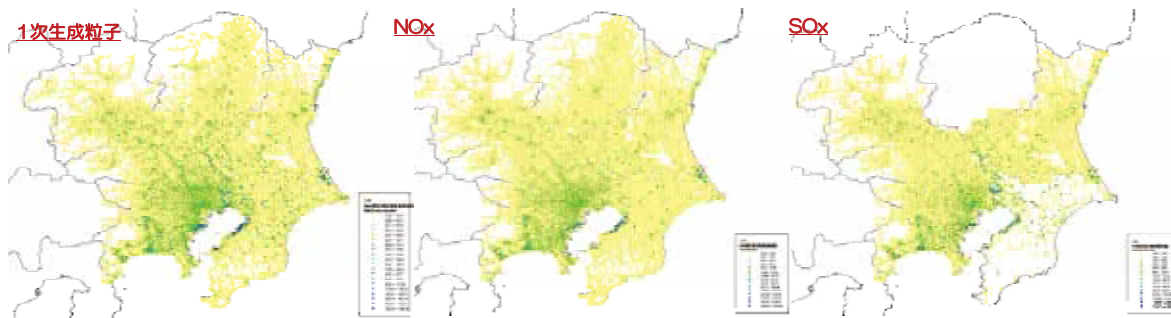
関東圏外での排出削減の費用に関して予備的な検討を行うため、関東圏外の産業構造が関東と同じような構造であると仮定し、関東圏外の排出量と関東圏外から移流してくる各成分の寄与濃度が線形関係と仮定した簡易的なモデルを用いて、関東圏外のPM2.5の削減対策の限界費用曲線を求めた。この限界費用曲線から、関東圏外からの寄与 $3.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ から $5\mu\text{g}/\text{m}^3$ を低減した場合の関東圏外の削減費用を求めた。この関東圏外の削減費用と5.6.2で削減率を最適化した場合の関東圏の削減費用(表16)を合計した結果を表17に示す。わが国での削減費用は、総費用で $3.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、一人当たりの削減費用で $4.0\mu\text{g}/\text{m}^3$ の周辺で合理的な削減戦略となることが示唆された。

関東圏外からの寄与 $4.0\mu\text{g}/\text{m}^3$ を低減した場合の関東圏における最適化した排出削減量をGIS解析した結果を図9に示す。各地域で、PM2.5の1次生成粒子の最適削減量が高くなっており、埼玉及び沿岸部で削減率が高くなる傾向が示された。一方、コスト補正係数の高いNOx、SOxの最適削減量は、費用対効果により最適化した結果1次生成粒子に比較して小さいものとなっている。SOxの削減は無対策に近い地域もあることから、成分別に考慮した排出削減コントロールの最適化は排出対策上非常に重要である。費用対効果のある合理的な政策立案にはその最適化から得られる戦略が欠かせないものであることが示唆された。

本検討は、圏域外について簡易的な限界費用モデルを使った計算であることから、科学的知見に基づいた結果ではないことを付け加えておく。今後、関東圏外の地域について、1章から5章で行った詳細解析を行った後、関東圏及び関東圏外の排出削減を最適化する必要がある。

表 17 わが国の PM2.5 の削減費用の予備検討結果³

わが国の総削減費用					
圏外削減濃度	関東圏での削減費用	圏外削減費用	総削減費用	人口当たり	面積当たり
$\mu\text{g}/\text{m}^3$	億円/年	億円/年	億円/年	億円/千人・年	円/ km^2
5	10	11,465	11,475	0.13	40.8
4.5	66	9,049	9,115	0.11	4.9
4	224	6,946	7,170	0.09	57.5
3.5	1,427	5,147	6,574	0.09	111.6
3	4,700	3,641	8,341	0.16	408.9



注：圏外からの寄与を $4.0\mu\text{g}/\text{m}^3$ 低減した場合。色濃淡は削減量の大きさを示す（深緑が、削減量が多い地域）

図 9 排出コントロール戦略（成分の違いを考慮し最適化した排出削減量）の結果

5.6.4 排出コントロールの戦略テスト

5.6.3 で予備的検討した全国規模の排出削減を考慮した関東圏における排出コントロール戦略について、大気化学輸送モデル（CMAQ）を用いて大気環境基準が達成されるかどうか戦略テストを行った。この戦略テストの手法は、EPA の SIP（State Implementation Plan）策定のための大気予測手法のガイドラインに従い、排出削減した場合の関東圏の PM2.5 濃度の予測を行い、現況予測値と比較して PM2.5 濃度の低下率を求め、その低下率を現在の PM2.5 濃度に乗じることにより、排出コントロール戦略が実施された場合の PM2.5 濃度（以下「戦略時濃度」という。）を推定する評価法を採用した。この戦略時濃度と大気環境基準と比較することにより、排出コントロール戦略の合理性が検証できる。本研究で用いた大気化学輸送モデルは、上述の通り EPA のガイドラインで推奨している以下のモデルである。

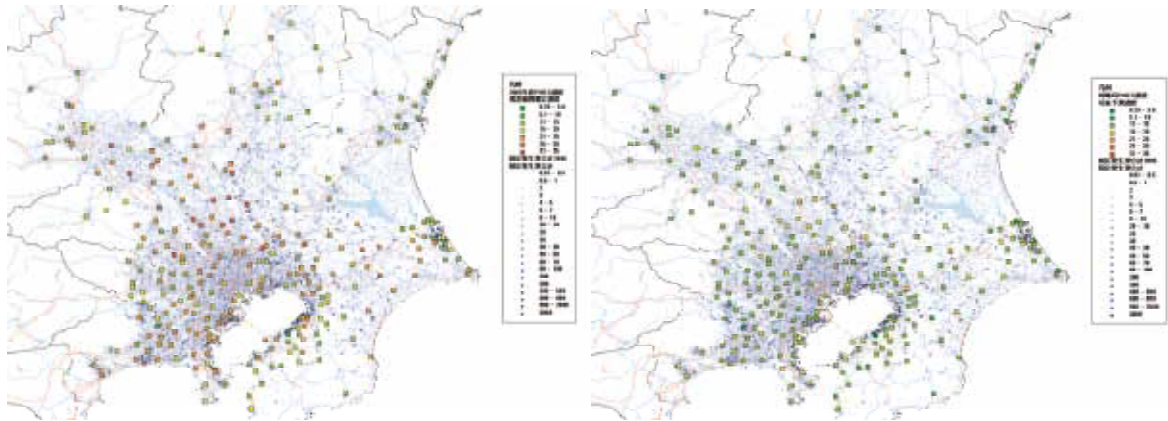
- 気象モデル：WRF
- 大気化学輸送モデル：CMAQ（バージョン 4.7.1）

計算期間については、長期基準の評価期間である 1 年間を計算するのが望ましいが、実施の策定時の作業負担を想定して、統計的処理により年間平均値が再現できる四季ごとの予測期間を検討し、期間の短縮化を図った。

CMAQ を用いて各測定地点の戦略時濃度を算定した結果を図 10 に示す。戦略テストの結果は、 $25\mu\text{g}/\text{m}^3$ を超える局所高濃度地域がなくなり、ほとんどの地点で環境基準を達成している。このことから、本研究で構築した排出コントロール戦略の検討手法により求められる最適削減率は、各地域、時に局所的な高濃度地域の達成ギャップを無くすための排出削減を合理的に検討できる

³圏外からの寄与を $4.0\mu\text{g}/\text{m}^3$ 低減した場合の関東圏での最適削減費用は近似曲線から求めた。

と示唆される。本研究で構築した地域間移流を考慮した排出コントロール戦略手法は、既に地域のギャップを無くすためギャップクローザーによる最適化機能が備わっていることがこの結果から示唆される。埼玉県、東京湾岸の一部の地域で長期環境基準をわずかに上回っているが、これらの局所地域については地域特性を考慮した排出コントロール戦略を検討することにより、環境基準を達成できる排出削減を検討できるであろう。



注：左；現況、右；戦略を実施した場合。ほとんど地域で環境基準以下の緑となっている

図 10 戦略テスト（排出コントロール戦略の合理性検証）の結果

5.6.5 経済的インセンティブによる環境基準の達成

汚染税による最適排出削減シナリオについて考える。

汚染税率 τ_i^p は、以下ようになる。ここで、 $MAC_{ij}^p(RE_{ij}^p)$ は限界削減費用を表し、 ER_{ij}^p は、排出地域 i の排出主体 j が排出する汚染物質 p の削減量、 $AC_{ij}^p(RE_{ij}^p)$ は ER_{ij}^p の削減に伴う汚染物質削減費用関数とする。

$$\tau_i^p = MAC_{ij}^p(RE_{ij}^p)$$

このモデルより、環境目標を達成するためには、最適削減率における限界削減費用を税率とすることが望ましいことが分かった。そこで一律削減率と最適削減率のもとでのそれぞれの限界削減費用をみたところ、外部削減 3.5 のケースでは、ほとんどの地域で一律削減率の場合より最適削減率を基にした限界削減費用が小さいことがわかった。

表 18 は最適税率のもとでの関東地方における税収を示したものである。外部削減は 3.5 ケースである。関東全体では、1 次生成粒子が 118 億円、NOx が 593 億円、SOx が 690 億円となり、合計で年間 1,401 億円の税収となることが分かった。全体的に 1 次物質からよりも NOx、SOx からの税収が大きいことが分かる。地域別にみた場合、茨城県が 477 億円で最も大きく、逆に少ないのは栃木県や群馬県でそれぞれ 67 億円、56 億円であった。

表 18 最適税率における税収（億円／年）（外部削減 3.5 ケース）

	1次物質	NOx	SOx	合計
茨城	35	211	231	477
栃木	2	35	29	67
群馬	4	30	22	56
埼玉	14	43	65	121
千葉	20	109	124	253
東京	35	83	110	228
神奈川	9	82	108	199
7都県合計	118	593	690	1,401

5.7 削減戦略検討のまとめと課題

PM2.5 の環境基準を達成するための削減戦略について検討を行ったところ最小費用戦略をとれば一律に規制する場合に比べて、大幅に費用を削減できることが明らかになった。最小費用を達成するための汚染税については、1 次生成粒子、2 次生成粒子（NOx、SOx）ごとの課税額、その際に得られる税収も示した。

各削減技術の費用に関する不確実性、今回対象としていない汚染物質の影響、外部削減の検討、2 次生成粒子の排出量と濃度の非線形性について検討がなされていないなど課題はあるものの、本研究は今後の PM2.5 対策に於いて効率的な削減戦略の重要性を示すものとして一定の意味を持つと考えられる。

6. 排出コントロール戦略手法に関する総合研究（本研究のまとめと制度設計に向けて）

1～5 章までの研究成果に基づき、地方公共団体等による局所的な大気汚染地域での環境基準達成、大気環境改善を可能とする排出コントロール戦略手法について検討を行い、地方公共団体が本研究成果を活用できるよう「排出コントロール戦略の策定・検討プロセス（手順）」を検討した。

6.1 排出コントロール戦略の考え方・検討プロセス

本研究で得られた成果により、地域の汚染実態（排出量）を反映し、削減機会に基づき排出削減費用を最適化させた合理的に大気環境基準を達成する「排出コントロール戦略」を検討できることが示された。本研究で構築した排出コントロール戦略の考え方（検討項目とその順序）を示し、検討プロセスを提示する。

【本研究の成果：排出コントロール戦略の考え方とプロセスの構築】

- 考え方 1：地域の達成 GAP を満たすように各成分の寄与濃度を低下させることが目的
- 考え方 2：飛行機、船舶、火山などは、地方公共団体が対策を行うことが困難であることから検討の対象外とする。これらの対策については国あるいは圏域の主体による検討を行い、検討結果を排出コントロール戦略の検討にインプットする。
- 考え方 3：自動車 NOx・PM 法で発生量の減少が見込まれる移動発生源である自動車の寄与濃度分を考慮し、移動発生源の削減後の達成 GAP を予測する。
- 考え方 4：残る固定発生源について、PM2.5 濃度に寄与する粒子及び前駆物質について成分ごと・燃料ごとに排出インベントリ・削減ポテンシャル・限界費用曲線とその濃度寄与マトリックスを求める。排出濃度寄与率は地域ごとに異なり、その比率の大小は全体の削減費用に大きく影響することから、排出削減とする対象物質をこの比率を用いて検討しても良い。
- 考え方 5：固定排出源のうち、排出寄与率・濃度寄与率や削減ポテンシャルを参考に費用対効果分析を行う排出削減する対象排出源・部門を選定する。
- 考え方 6：削減ポテンシャル・限界費用曲線とその濃度寄与マトリックスに基づき、費用効果分析モデルを用いて域内の固定排出量の削減量の最適化を行う。
- 考え方 7：域外と域内の汚染物質の排出削減費用を比較し、域内の各部門及び各成分の排出削減率及び削減費用を最適化し、その削減の政策手段の枠組みやその制度設計を行うことにより、「合理的な排出コントロール戦略」を検討する。
- 考え方 8：最適化した地域内の排出削減量（排出コントロール戦略）の合理性について戦略効果テストを行い、検証を行い、環境基準が達成できない地域については追加削減対策・プログラムの開発を行う。

本研究で構築した「排出コントロール戦略の策定・検討プロセス」を図 11 に提案・提示する。

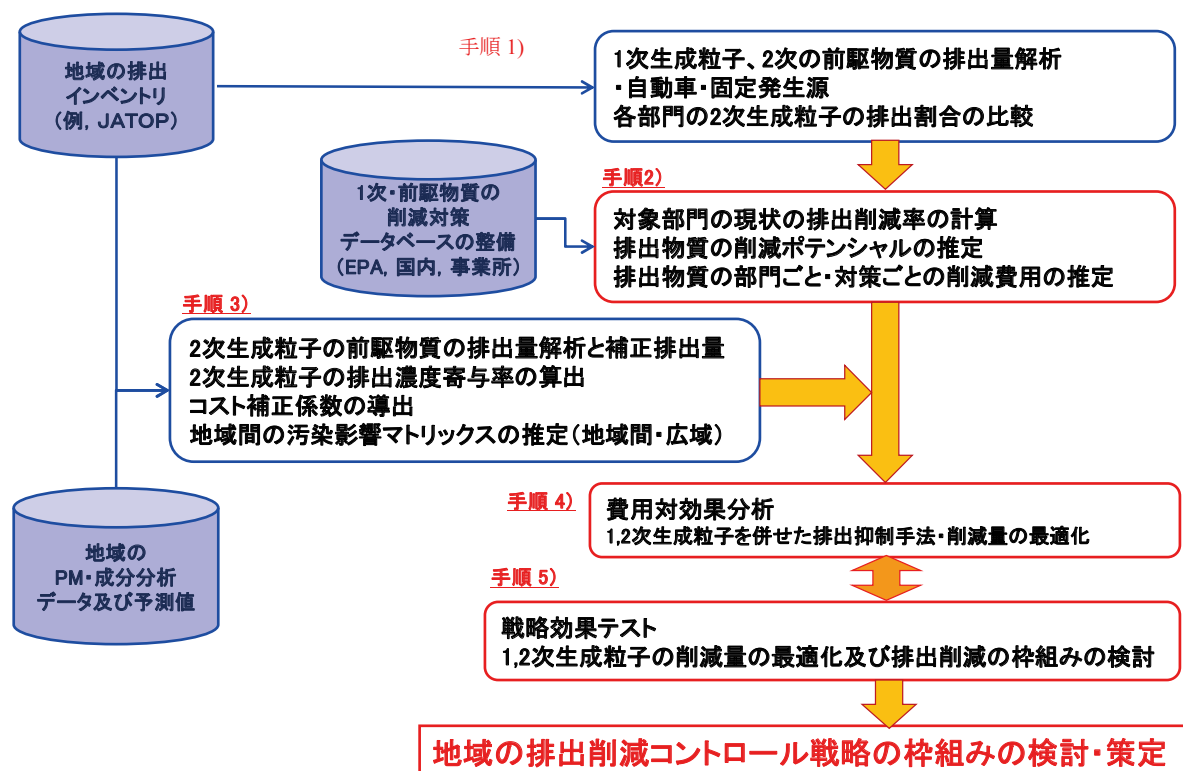


図 11 本研究で構築した排出コントロール戦略の策定・検討プロセス

7. 行政活用に向けた今後課題

本研究では関東圏を対象とした事例研究を行うことにより、今後取り組むべき課題や整備すべき支援ツールがあることが明らかになった。ここでは、これらの課題を示すとともに、課題を解決するために必要な主要な調査研究について示す。PM2.5 は多岐に亘る発生源があり、複数の前駆物質やその他の物質などが関与していることから、以下で示す課題以外にも多くの科学的知見を蓄積していくことがあり、これらの課題に着実に取り組み、PM2.5 等の大気環境基準を達成するための排出コントロール戦略の検討が近い将来可能になることが望まれる。

7.1 本研究を行政活用するための課題の整理

本研究で取り扱った大気汚染物質の排出コントロール戦略手法に関する課題、及びその行政活用に向けた課題に以下に整理する。

- 課題 1 排出係数の国内のデータベースの整備
- 課題 2 排出削減技術データベースの整備、各事業所の削減技術を評価ツールの整備
- 課題 3 各排出源の現状の Maximum Achievable Control Technology (MACT)まで考慮した削減ポテンシャルや限界削減費用曲線を算定する支援ツールの開発・整備
- 課題 4 本研究で対象としなかったアンモニア、VOC、その他成分の削減機会の考慮

- 課題 5 対象とする地域・圏域の削減コントロール戦略を検討する場合における圏域外の排出コントロール戦略の検討方法
- 課題 6 排出コントロール戦略を実現させる各政策の制度設計研究
- 課題 7 PM2.5 濃度を効率的に低下させる削減費用の小さいプログラムの開発手法の構築
- 課題 8 社会的便益を最大にする施策(健康被害影響の削減とその対策の費用推定が可能な場合)
- 課題 9 汚染地域の健康被害を明らかにし、その経済的評価をし、削減対策費用と比較することにより削減コントロール戦略の合理性や優先度を検討する研究

これらの課題を解決するために最も有効で、かつ速やかに取り組むべき調査研究は、本研究成果に基づく以下の通りである。

- 優先課題 1: 事業所レベルの排出源に対する排出コントロール策定支援ツールの構築
- 優先課題 2: 地域及び事業所レベルの排出削減コントロール戦略の策定に向けた全国レベルの排出削減の最適化手法の確立
- 優先課題 3: 2 次生成粒子の生成過程に基づく複数前駆物質の非線形な削減効果を考慮した排出削減の最適化の検討

7.2 排出コントロール戦略実現のためのポリシーミックスの検討（課題6）

上記の課題を解決し、圏域ごとに環境基準等の政策目標及び戦略が決定された場合、地方公共団体ごとにそれを実現する環境政策の体系の制度設計を行う必要がある⁴。このような環境政策手段の体系として、図 12 に示す環境政策手段が示され、「直接的手段」と「間接的手段」が区別されている。この体系を基に、本研究における課題であった排出コントロール戦略の実現に必要な政策群（ポリシーミックス）について検討した結果を以下に示す。

図 12 排出削減コントロール戦略で参考とする環境政策手段⁵

	公共機関による政策	排出を制御する政策	契約や自主性に基づく手段
直接的手段	環境設備の整備 環境保全型公共投資 公有化	直接規制 土地利用規制	公害防止協定 自主協定
間接的手段	研究開発 グリーン調達	課徴金 補助金 排出量取引 減税・免税 財政投融资 排出量届出制度	エコラベル グリーン購入 環境管理システム 環境報告書 環境監査 環境会計
基礎的手段	環境情報公開 共同体による取組 環境モニタリング（測定データ、ツール、各種データ） 環境情報データベース 環境責任ルール 環境負荷評価・削減量評価 環境教育		

※赤字は排出削減コントロール戦略を策定・実施するために必要な政策手段

⁴ 諸富徹編著「環境政策のポリシー・ミックス」, pp1-13, ミネルヴァ書房, 2009.

⁵ 同 p5, 表序-2 を引用, 一部を著者により修正.

(1) 排出を制御する政策手段

直接規制によって各排出源に削減技術の導入を義務づける（直接規制）ことによっても可能である。しかし、同時に、経済的手段によっても可能である。経済的手段は直接規制に比べ、規制当局の情報収集等の負担が少なく効率的な政策手段である。排出削減を最適にするためには、5章で検討した通り最適削減率における限界削減費用を税率とした検討等を行い、経済的手段の制度設計を行うことが必要となる。

(2) 公共機関による政策手段（研究開発）

地方公共団体が排出コントロール戦略の検討を行う場合には、多くの科学的知見の蓄積に向けた国、地方公共団体等による研究開発や研究開発費の助成による民間での研究開発とともに事業所・大学・研究機関が所有している科学知見の収集・整理が必要となる。

(3) 排出コントロール戦略の策定に必要な基礎的手段

地方公共団体や国が排出コントロール戦略を策定する場合、事業所レベルの成分ごとの排出量、削減ポテンシャル、削減費用を推定するか、あるいは情報を収集するなどして検討に資するデータを整備する必要がある。

また、化学物質移動量届出制度（PRTR）のように行政による各種データ及び推定法のマニュアル・支援ツールを公表・提供、事業所による排出量及び排出対策の届出制度等の基礎的手段を取ることにより、地域の排出コントロール戦略の策定に関する行政費用を小さくすることが可能となり、かつ不確実性を小さくした合理的な策定検討が可能となる。