

2-3 排出インベントリ

PM_{2.5}の将来濃度を予測し、対策を検討するためには、PM_{2.5}の原因物質の発生源と排出実態を明らかにする必要がある。PM_{2.5}の原因物質の排出目録(インベントリ)の整理に当たっては、今回調査した発生源調査結果も含め、既存の排出原単位及び工場等の操業状況や自動車の運行状況、家庭での調理時間などの活動量データを可能な限り収集し、排出係数を更新した。また、想定されるすべての発生源も考慮した。

ただし、排出原単位や活動量データについては、植物起源やアンモニア発生源など不確実性が高い発生源が多く、本報告の排出インベントリは、まだ改善の余地があり、今後、追加、見直しをしていく必要がある。特に、PM_{2.5}の排出量については、多くの測定は「ばいじん(自動車排出ガスの場合にはPM)」として行われているため、粒径分布の知見からPM_{2.5}/ばいじん(PM)比率を設定した。しかし、全ての施設・燃原料種類別の係数設定が困難であったため、類似施設の係数を代用しているものがあり、今後、データの充実が望まれる。

排出インベントリを推計したところ、PM_{2.5}の原因物質に含まれる発生源について、次のようなことが明らかとなった。

- PM_{2.5}原因物質の排出源は多岐にわたること
- 主要な発生源である工場などの産業・業務部門、自動車などの運輸部門の他に、タバコや調理など、家庭部門からの排出が無視できない割合であったこと
- 植物からの揮発性有機化合物(VOC)の蒸発や火山ガスに含まれる硫黄酸化物(SO_x)など、自然起源も多くあること

次に、東京都と関東地方全体からの排出量を比較した(図2-6、7、8)。

SO_xは、東京都、関東地方ともその他が約9割を占めているが、これらは火山(浅間山と三宅島雄山)からの排出が大半を占めていると推定された。人為発生源は、東京都では運輸部門の排出量の方が、産業・業務部門より多くなっているが、関東全体では産業・業務部門の排出量の方がわずかに多くなっていた。

窒素酸化物(NO_x)、PM及びPM_{2.5}は、東京都では、運輸部門からの排出量が大きくなっているが、関東全体では運輸部門と産業・業務部門の差は少なくなっている。

非メタン揮発性有機化合物(NMVOC)は、東京都では、ほとんどが産業・業務部門からの排出であったが、関東地方全体では、産業・業務部門のほか、その他からの排出も多かった。これは、植物由来のものと推定された。

アンモニア(NH₃)も、東京都、関東地方ともその他が約9割を占めているが、これらは農業・畜産等からの排出が多くを占めていると推定された。

その他が大部分の排出量を占めるものもあったが、今後の対策を考える上では人為起源の排出が重要であると考えられる。

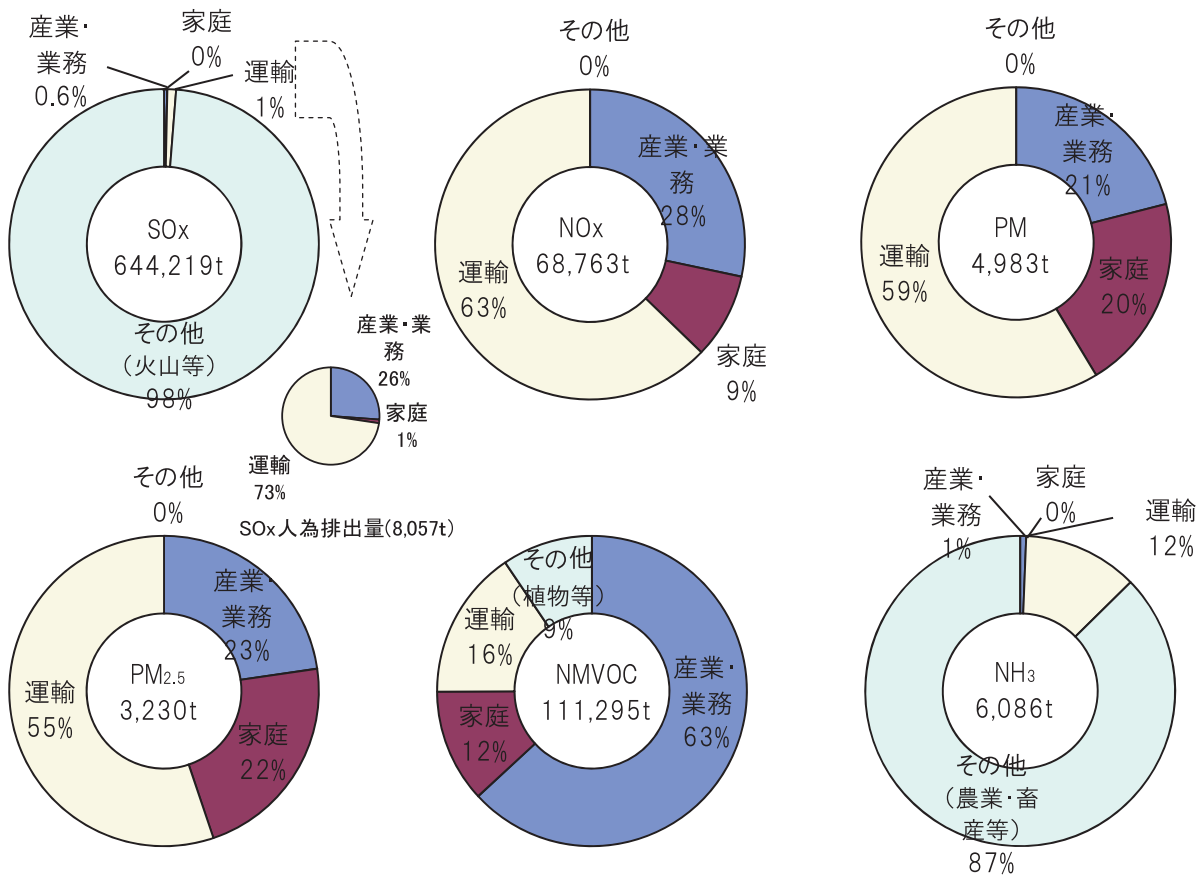


図 2-6 東京都における PM_{2.5} 等の大気汚染物質排出量(平成 20 年度)

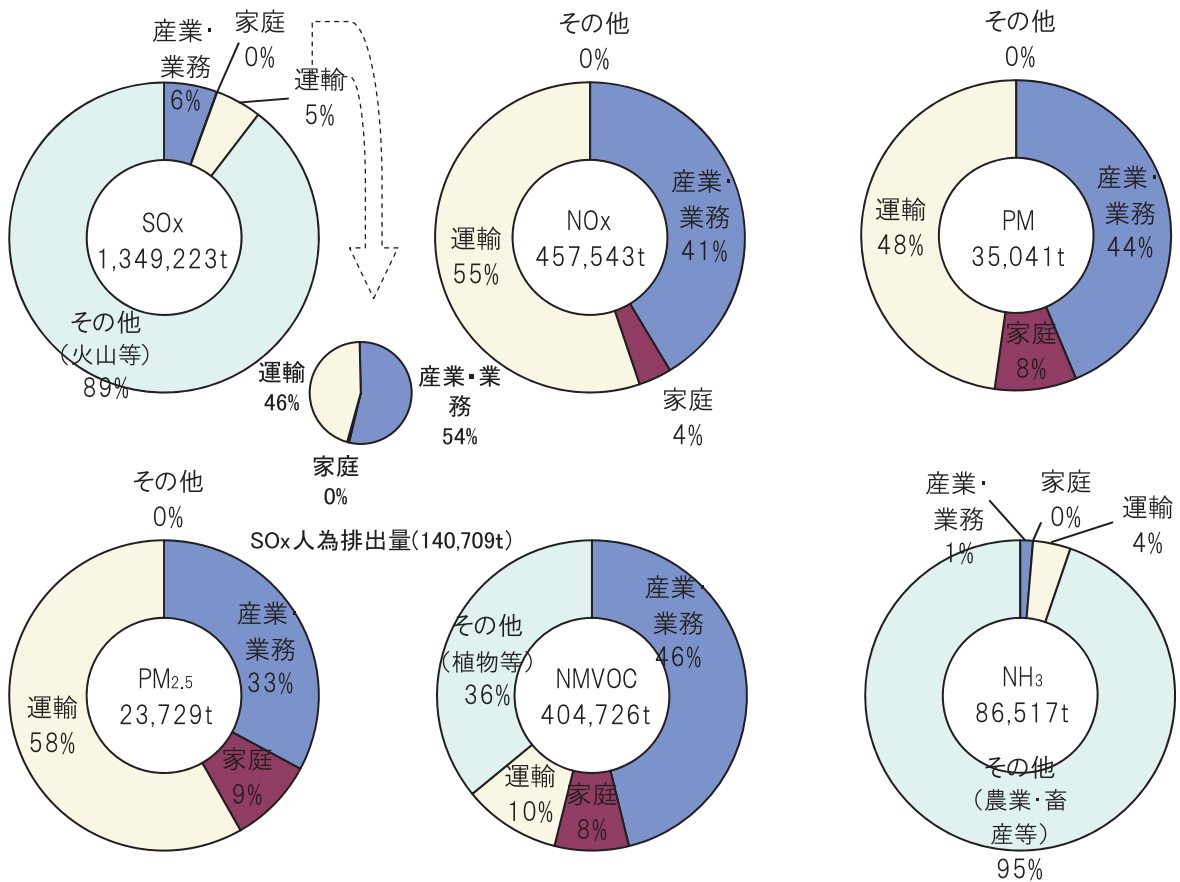
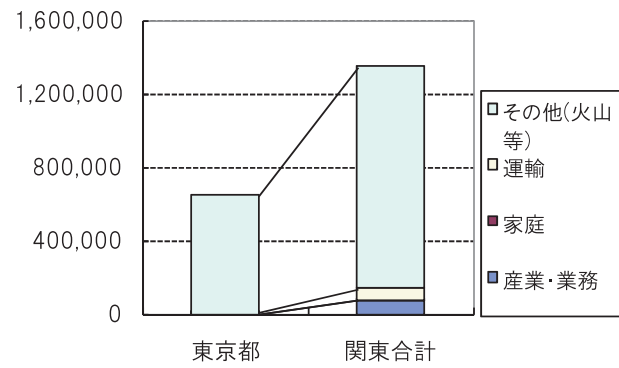


図 2-7 関東地方における PM_{2.5} 等の大気汚染物質排出量(平成 20 年度)

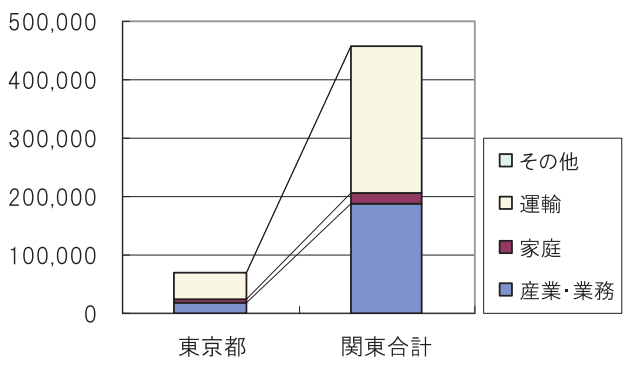
(SOx)

(t/y)



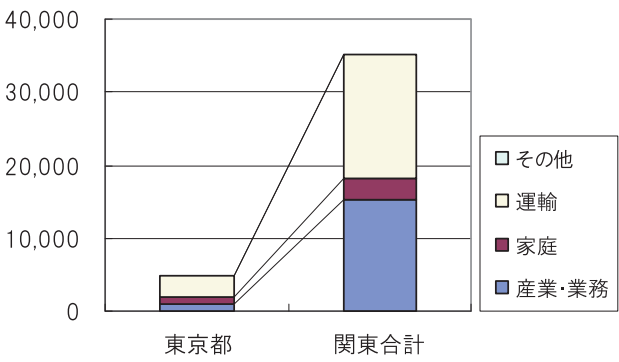
(NOx)

(t/y)



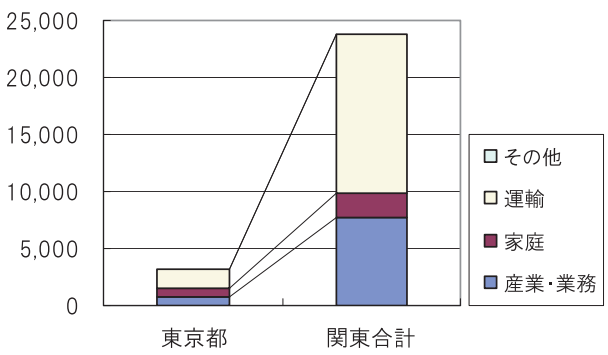
(PM)

(t/y)



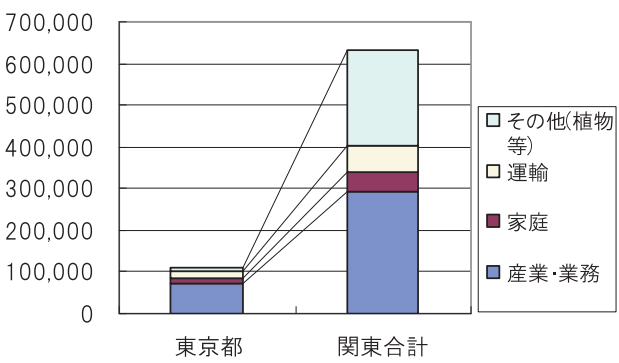
(PM2.5)

(t/y)



(NMVOC)

(t/y)



(NH₃)

(t/y)

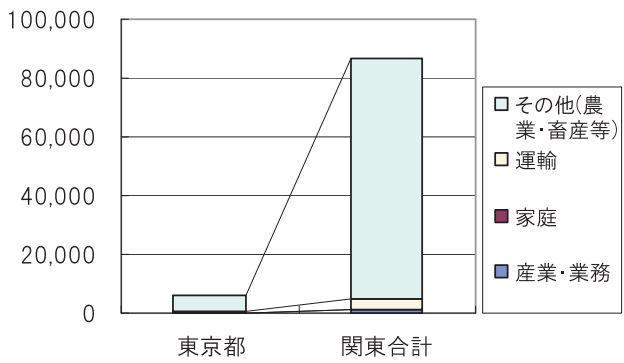


図 2-8 東京都と関東地方における PM_{2.5} 等の大気汚染物質排出量の比較(平成 20 年度)

第3章 発生源寄与解析と将来濃度予測について

3-1 レセプターモデルによる発生源寄与解析

レセプターモデルとは、環境大気の測定結果から、辿って発生源寄与濃度を推定する手法である。ここでは、多変量モデルの一つである PMF (Positive Matrix Factorization) モデルと CMB (Chemical Mass Balance) モデルについて検討を行った。

レセプターモデルによる PM_{2.5} 発生源寄与割合推定の作業フローを次に示す(図 3-1)。

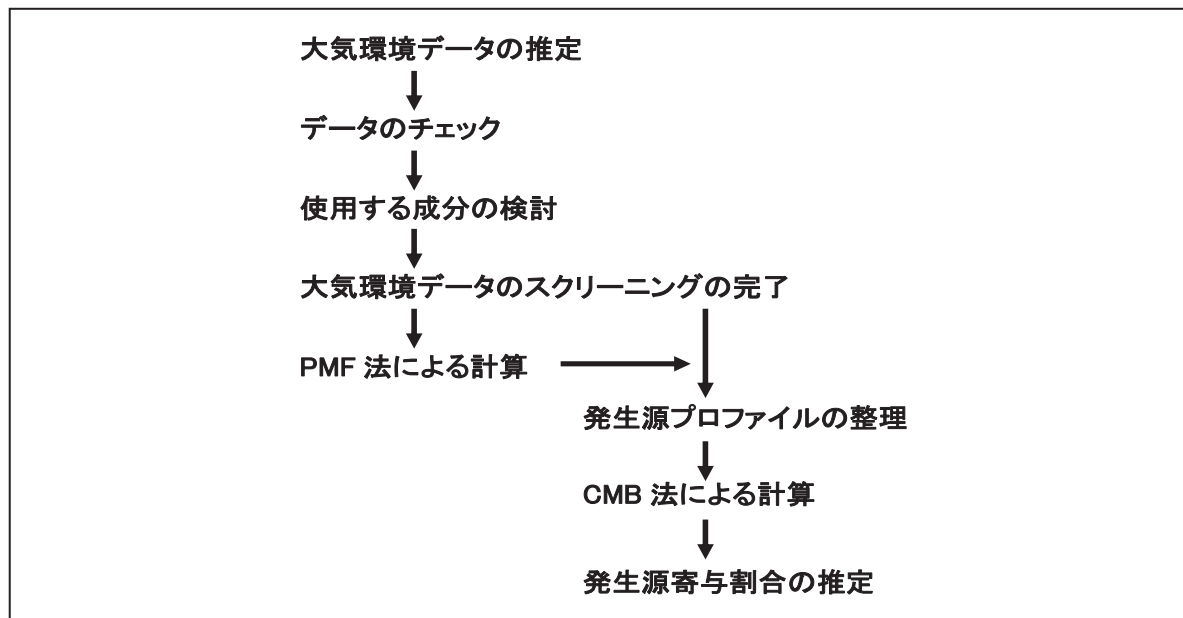


図 3-1 レセプターモデルによる作業フロー

3-1-1 PMF 法による解析結果

PMF モデルとは、発生源のデータを必要とせず、環境データの変動に着目して解析を行う方法である。レセプターワーキンググループによる検討の結果、平成 20 年度大気環境調査全データ(一般環境・道路沿道計 17 地点・四季各 2 週間・24 時間採取)について、因子数 5 が最適と考えられ、PM_{2.5}の質量濃度平均 21.0 μg/m³に対する各因子の寄与率は表 3-1 のようになった。各因子について指標元素や季節変動などから推定された発生源等も表 3-1 に示した。

各因子において、明確に発生源の分離ができなかったが、自動車排出ガスその他の寄与は約 13%と考えられた。また、バイオマス燃焼(野焼き等)と考えられる寄与が相当程度あり、これら未把握の発生源の影響が無視できないと考えられた。

表 3-1 各因子の寄与率と推定される発生源・成分等

因子	寄与率*	指標元素から推定される発生源等
I	13.0%	バイオマス燃焼(野焼き等)
II	17.0%	硝酸アンモニウム、塩化アンモニウム、海塩粒子
III	7.5%	土壌・道路粉じん
IV	22.6%	硫酸アンモニウム、重油燃焼
V	12.9%	自動車排出ガス、ブレーキ粉じん、鉄鋼

* 計算に使用していない成分は含まれていないので 100%とならない。

3-1-2 CMB による解析結果

CMB モデルも、発生源の寄与を推定する手法の一つで、環境データと発生源プロフィールと呼ばれる発生源粒子の化学成分データを用い、指標となる成分を関連付けて解析を行う方法である。

検討の結果、PMF モデルで新たな発生源として示唆された野焼き等を主体としたバイオマス燃焼を追加し、既存の7つの発生源プロフィール(土壌・道路粉じん、海塩粒子、鉄鋼、重油燃焼、廃棄物焼却、自動車排出ガス、ブレーキ粉じん)と合せて計算を行った。その結果、次のようなことが明らかとなった。

(1) 一般環境と道路沿道の比較

全データを一般環境と道路沿道に分類した。自動車排出ガスとブレーキ粉じんが、一般環境に比べて道路沿道で高いという結果となった(図 3-2、4)。なお、図中の v-OC とは、大気環境調査の有機炭素(OC)濃度から一次粒子として割り当てられた OC 濃度を差し引いて 1.4 倍*したもので、主として二次有機粒子であると考えられるので二次有機粒子等としている。

* 1.4 とは、有機炭素の質量から、酸素や水素を含む有機物の質量への変換係数である。

(2) 過去の調査(平成 13 年度ディーゼル車排出ガス関連環境調査)との比較

全データを一般環境と道路沿道に分類した。このうち、自動車排出ガスの寄与濃度は、

- ・平成 20 年度(PM_{2.5}) : 全データ 3.07 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、一般環境 2.35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、道路沿道 4.15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
 - ・平成 13 年度(PM_{2.1}) : 全データ 16.26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、一般環境 10.22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、道路沿道 22.30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
- であった。平成 20 年度の PM_{2.5} 濃度は平成 13 年度の PM_{2.1} 濃度と比べて、大きく減少しており、自動車排出ガスの寄与濃度が特に小さくなっていることがわかった(図 3-2~5)。

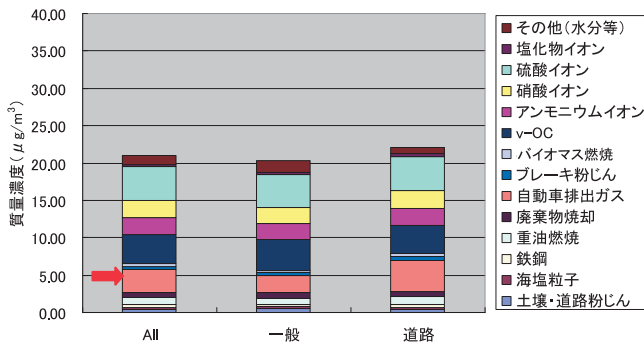


図 3-2 平成 20 年度寄与濃度の比較

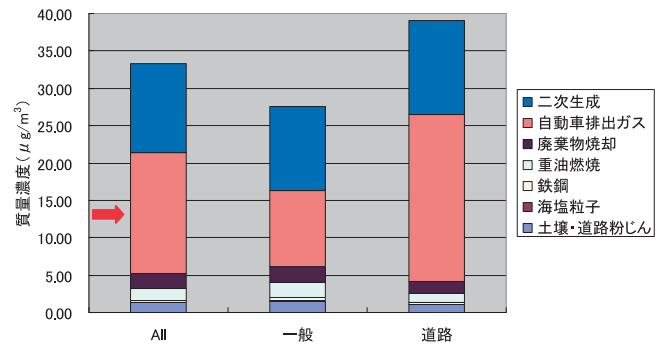


図 3-3 平成 13 年度寄与濃度の比較

※ 土壌・道路粉じんからバイオマス燃焼までが一次粒子、v-OC から塩化物イオンまでが主として二次粒子である。

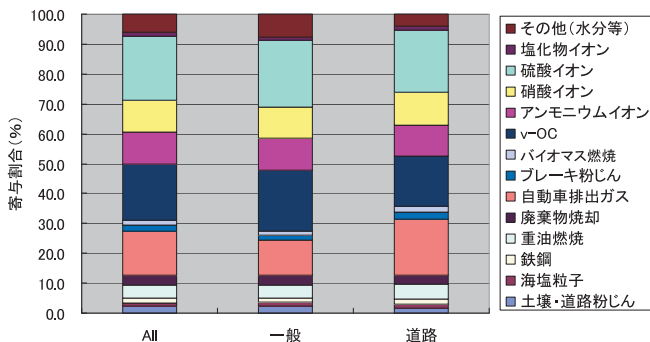


図 3-4 平成 20 年度寄与割合

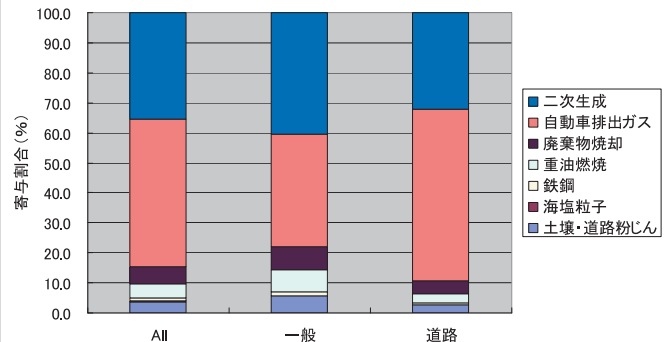


図 3-5 平成 13 年度寄与割合

※ 平成 13 年度の調査は PM_{2.1} を対象としている。炭素分析の方法も平成 20 年度の調査と異なる。また、ブレーキ粉じんの指標元素である Sb(アンチモン)が分析されていない。

(3) 区部と多摩部の比較

一般環境のデータを区部と多摩部に分類した。

重油燃焼は区部が高く(区部で6.0%、多摩部で2.9%)、バイオマス燃焼は多摩部が高い(区部で0.7%、多摩部で2.5%)結果となった(図3-6、7)。

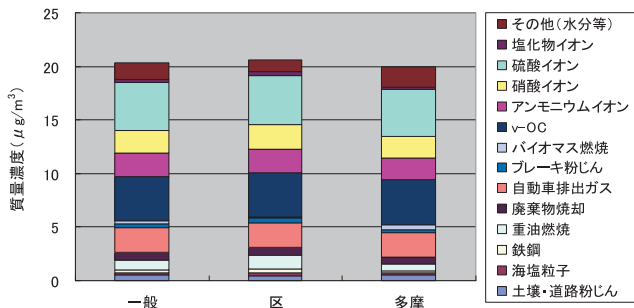


図3-6 地域別寄与濃度の比較

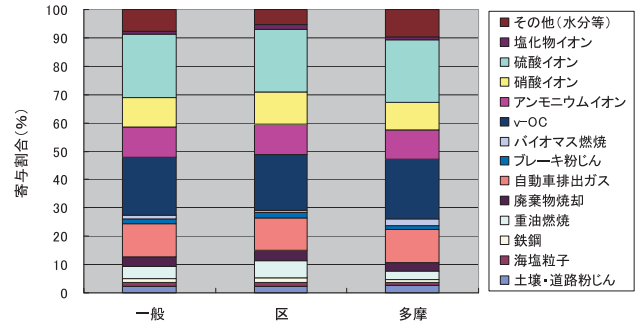


図3-7 地域別寄与割合の比較

※ 使用したデータは、平成20年度のPM2.5大気環境調査結果であり、対象とする成分は炭素成分、イオン成分、金属成分すべてとした(16成分、135データ)。

3-1-3 まとめ

東京都における平成20年度のPM2.5大気環境調査結果を用いて、レセプターモデル(PMF法、CMB法)により発生源寄与割合を推定した。

PMF法では、因子の分離が十分できなかったが、自動車排出ガスその他の寄与は約13%とCMB法と大きな差異はなかった。また、バイオマス燃焼と考えられる寄与が相当程度あり、これら未把握の発生源の影響が無視できないと考えられた。

そこで、CMB法による計算では、PMF法で新たな発生源として示唆されたバイオマス燃焼を発生源プロフィールに追加した。

CMB法による計算結果において一般環境と道路沿道を比較したところ、道路沿道では自動車排出ガスやブレーキ粉じんの寄与が大きく、また、区部と多摩部を比較したところ、区部では重油燃焼、多摩部ではバイオマス燃焼の寄与が大きかった。

また、平成13年度に行われた調査結果と比較したところ、平成20年度は粒子状物質の濃度が大きく減少していた。これは、自動車排出ガスからの寄与濃度が減少したためであった。一方、二次生成粒子の寄与割合が大きくなっており、PM2.5全体の2/3を占めていた。

3-2 シミュレーションモデルによる予測結果

シミュレーションモデルとは、未測定地点や将来の環境濃度を予測する手法で、発生源からの汚染物質排出量のデータを仮想の空間内で移流・拡散・反応させ、計算するものである。現在の天気予報も同じ数値型シミュレーションモデルの手法を利用しており、レセプターモデルに対してフォワードモデルともいわれる。また、発生源からの汚染物質の影響を解析し、発生源寄与を推測することも可能である。シミュレーションワーキンググループによる将来濃度予測及び発生源寄与推定の作業フローを次に示す(図3-8)。

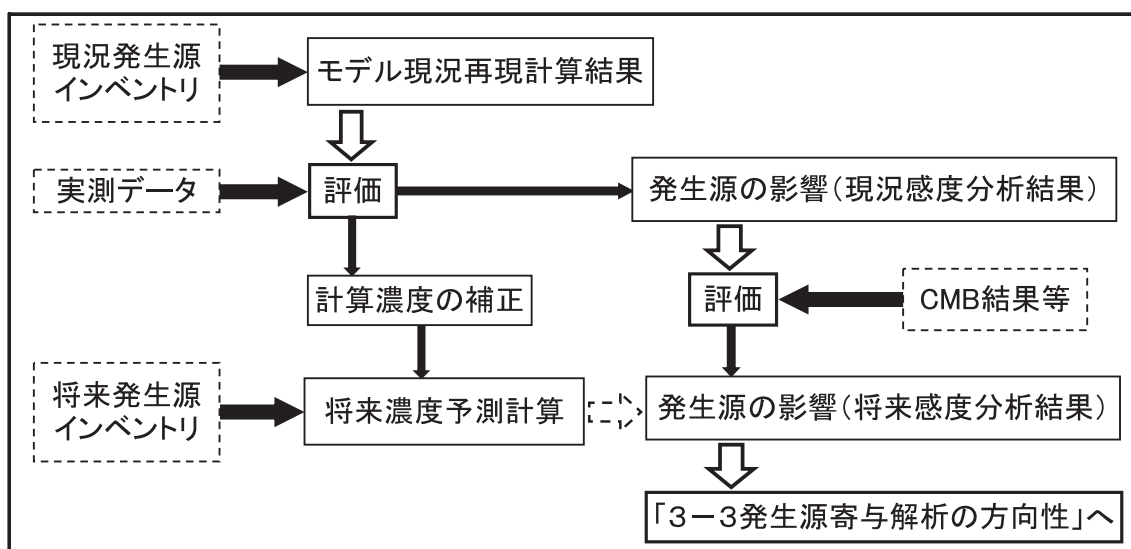


図3-8 シミュレーションモデルによる作業フロー

(1) モデルの構成

今回構築した数値型シミュレーションモデルの概要を表3-2及び図3-9に示す。

表3-2 シミュレーションモデルの条件と構成

項目	内容
現況年度	平成20年度
将来年度	平成28年度
計算対象期間	東京都PM2.5大気環境調査期間(四季14日計56日)
計算対象領域	関東地方(図3-9のとおり)
評価地点	東京都PM2.5大気環境調査地点(一般環境9地点)
気象モデル	MM5v3.7.4
大気モデル	CMAQv4.6
インベントリ	東京都PM2.5等排出インベントリ、JATOP*、EAGrid-Japan-2000**
拡散モデル	ACM2
化学反応モデル	SAPRC-99
粒子化モデル	Aero4
境界条件	東アジア域シミュレーション結果(国立環境研究所提供)より
初期条件	計算対象日の48時間前から計算を開始

* 財団法人石油産業活性化センターの許諾を得て使用。 ** EAGrid-Japan-2000 データ管理者の許諾を得て使用。

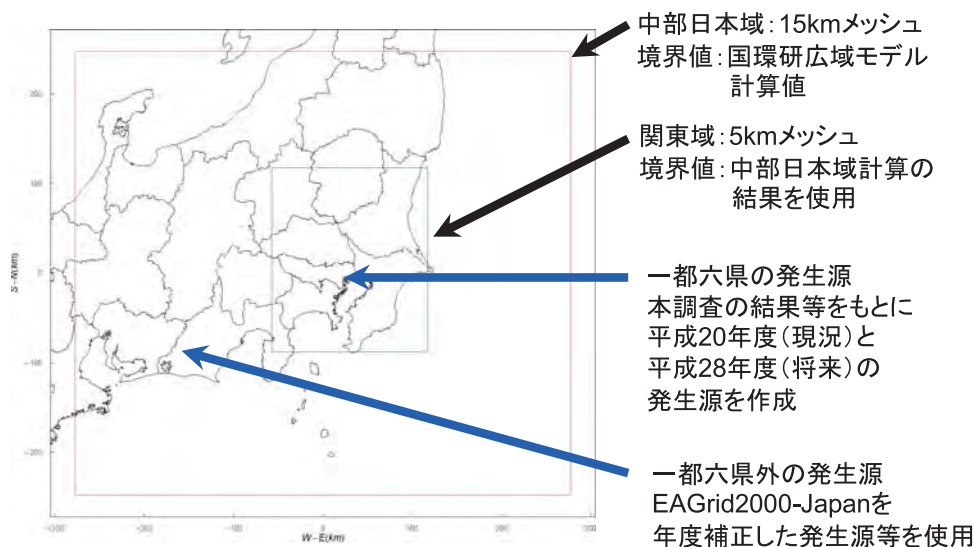


図 3-9 計算対象領域

(2) 現況(平成 20 年度)環境濃度の再現

季節別・成分別の実測濃度(obs)と計算濃度(CMAQ)を比較したものを図 3-10 に示す。年平均値で見ると、計算値は、PM_{2.5}全体では実測濃度の 60%強、FINE(その他の粒子)を除く成分の合計では実測濃度の 75%程度を再現している。FINE を除く各成分については、NITR(硝酸イオン)に過大評価傾向が認められるものの、他の成分のバランスや季節変化の特徴が再現されており、既往の数値型シミュレーションモデルの結果と同程度の再現精度が得られたと考えられる。なお、計算値の FINE には、水分が計算されず、海塩・土壌の計算が完全でない点に注意が必要である。また、PM_{2.5}の実測地点は少ないが、濃度は都内、関東地域全体で過小評価傾向にあった。

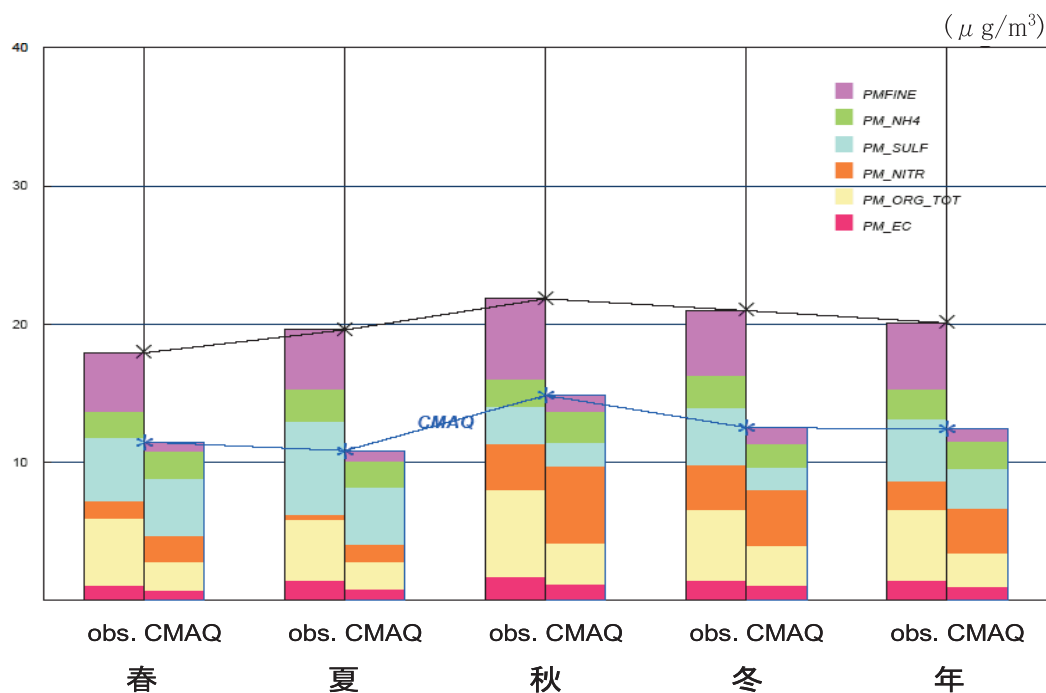


図 3-10 PM_{2.5} 季節別・成分別・実測値と計算値の比較

※ obs は実測濃度、CMAQ は数値型シミュレーションモデルによる計算濃度である。

(3) 数値型シミュレーションモデル計算濃度の補正

都内の PM_{2.5} 実測濃度 (obs) と数値型シミュレーションモデルによる計算結果 (CMAQ) を比較して示した (図 3-11)。実測濃度に対して計算濃度が過小であるため、この計算結果を将来予測や対策効果予測などの定量的な検討に使用するためには、計算濃度を実測濃度に基づいて補正することが必要である。ここでは、実測濃度 (元素状炭素 (EC)、有機炭素 (ORG_TOT)、硝酸イオン (NITR)、硫酸イオン (SULF)、アンモニウムイオン (NH₄)) については計算濃度との比率に基づく成分ごとの補正係数 (CF) を用いることとし、単一成分ではない実測濃度の FINE (その他の粒子) 分は、数値型モデルで計算可能な成分を分離して CF を求め補正することとした。

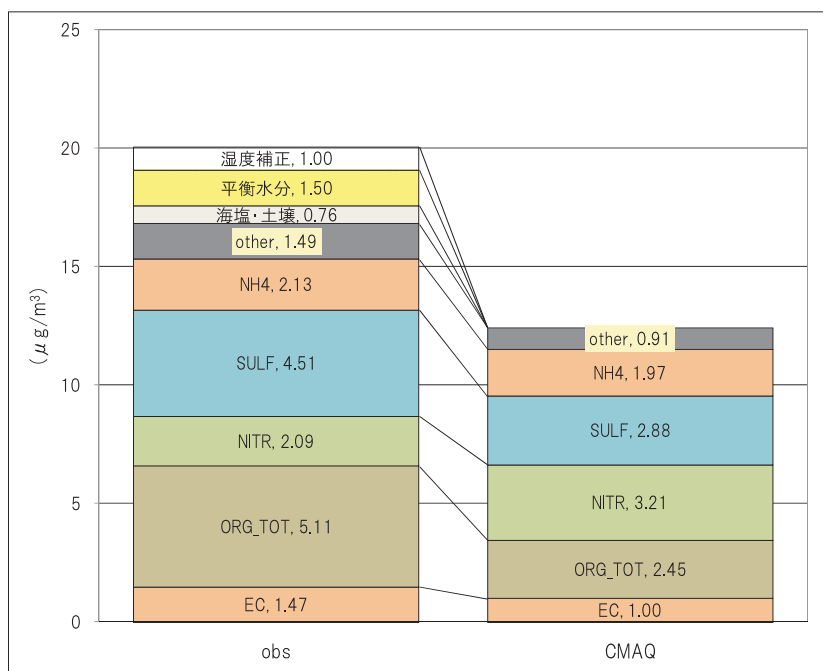


図 3-11 実測値と計算値の成分別濃度の対応 (2008 年度・一般環境・四季平均値)

※ obs は実測濃度、CMAQ は数値型シミュレーションモデルによる計算濃度

数値型モデルで計算した各成分濃度に CF を乗じ、これに水分及び海塩・土壌濃度を加算して補正值とする (CF は季節別に求め、季節別の補正結果を平均して年平均の補正值とした。)。このようにして補正した年平均濃度の内訳及び CF を表 3-3 に示した。

表 3-3 測定濃度、計算濃度、補正係数 (年平均値)

	$\mu\text{g}/\text{m}^3$ 50%秤量 obs	$\mu\text{g}/\text{m}^3$ CMAQ	比率 obs/CMAQ	$\mu\text{g}/\text{m}^3$ 補正後 CMAQ
PM _{2.5}	20.08	12.42		20.08
EC	1.47	1.00	1.48	1.47
ORG_TOT	5.11	2.45	2.09	5.11
NITR	2.09	3.21	0.65	2.09
SULF	4.51	2.88	1.56	4.51
NH ₄	2.13	1.97	1.08	2.13
成分計	15.32	11.51		15.32
FINE	4.76			4.76
Other	1.49	0.91	1.65	1.49
海塩・土壌	0.76			0.76
平衡水分	1.50			1.50
湿度補正	1.00			1.00
PM _{2.5} (35%秤量)	19.07			19.07

※ 比率は季節別に補正した結果の平均値を計算値の年平均値で割ったもの
 ※ obs は実測濃度、CMAQ は数値型シミュレーションモデルによる計算濃度
 ※ ORG_TOT は有機炭素 (OC) に有機物の質量への変換係数 1.4 を乗じた値である。
 ※ 海塩・土壌は CMB モデルによる計算濃度を使用した。
 ※ 平衡水分は E-AIM サイト MODEL II により求めた 35%秤量条件下での硝酸イオン、硫酸イオン、アンモニウムイオンと平衡にある水分である。
 ※ 湿度補正は湿度 50%と 35%での秤量値の差である。

(4) 将来(平成 28 年度)環境濃度の予測

数値型シミュレーションモデルによる現況と平成 28 年度単純将来濃度*の予測結果(補正後)を図 3-12 に示す。単純将来においては、PM_{2.5}濃度が約 17 μg/m³という予測結果となっており、既定の対策に加えた対策を講じなければ、都内においては一般局でも環境基準の達成が難しいと考えられる。

* 自動車のポスト新長期規制、建設機械のオフロード規制など既定の対策が実施された場合

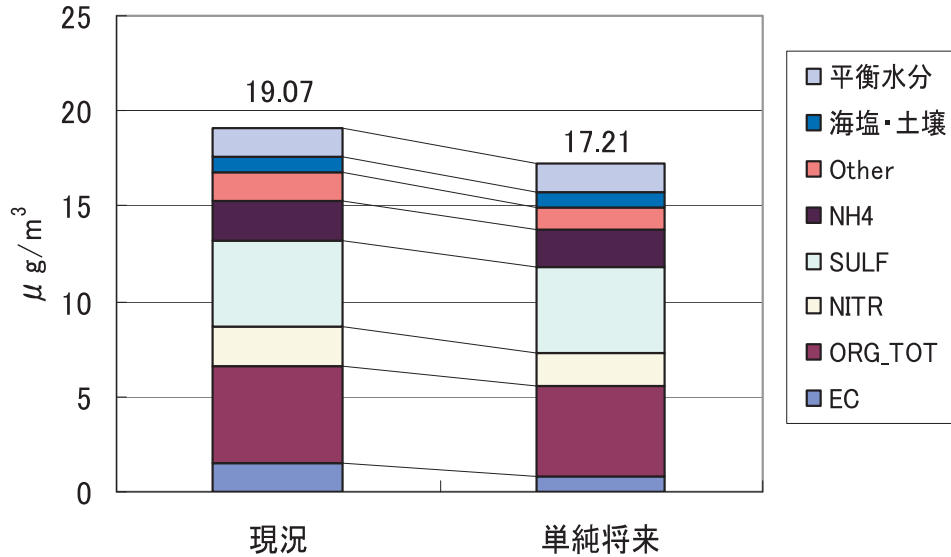


図 3-12 都内 PM_{2.5} 現況と将来濃度予測結果(補正後)

※ 現況は平成 20 年度(2008 年度)、単純将来は平成 28 年度(2016 年度)である。
 ※ 予測結果は、CMAQ の計算値を相対湿度 35% 秤量に補正した値である。

(5) 発生源による影響(感度解析)

発生源を 8 種類(自動車、船舶、大規模固定発生源、業務・家庭、建設機械(建機)、VOC 発生施設、その他の人為発生源、アンモニア発生源及び自然発生源)に分類し、発生源別の影響を推定するために排出量に対する感度解析を行った。都内及び関東地方の当該発生源の排出量をゼロとした場合の濃度*(現況との差が感度になる。)を表 3-4 に示す。表中の上段が当該発生源の排出量をゼロとした濃度、下段が感度に相当する値である。(以下(3)濃度補正後の値を使用する。)

* 数値型モデル(CMAQ)で予測した硝酸イオン(NITR)濃度は感度解析によると排出量低減と非線形性が強い為、本計算結果から対策効果を予測することは避けるべきである。

表 3-4 都内及び関東地方の発生源別ゼロアウト計算に対する寄与濃度

	補正後 (μg/m ³)	現況	自動車out	船舶out	大規模固定 out	家庭・業務 out	建機out	その他 人為out	VOC施設 out	アンモニア・ 自然out
東京都	PM _{2.5}	19.07	17.94	18.65	18.95	18.44	18.54	18.30	19.01	17.86
	現況-outケース		1.13	0.43	0.12	0.63	0.53	0.78	0.06	1.22
関東地方	PM _{2.5}	19.07	16.62	17.70	17.91	18.10	18.21	17.70	18.87	14.64
	現況-outケース		2.46	1.37	1.16	0.97	0.86	1.37	0.20	4.43

※ 2008 年度東京都 PM_{2.5} 大気環境調査期間(四季)、一般環境調査 9 地点の平均である。

※ 人為発生源は、自動車、船舶、大規模固定発生源、業務・家庭、建設機械、VOC 発生施設、その他の人為発生源の 7 種類である。

都内の大気環境中の PM_{2.5} 濃度への都内人為発生源による影響はいずれも小さく、最大の自動車でも 1.13 μg/m³であった。これに対して、関東地方の人為発生源による影響は、自動車の影響が最大で 2.46 μg/m³、次いで船舶 1.37 μg/m³、その他人為起源 1.37 μg/m³であった。

人為発生源のうち VOC 発生施設の排出量をゼロとした場合の濃度低減が非常に小さく、排出量から考えると寄与の評価が過小になっているため、この結果を用いて排出量削減の影響を検討するのは適切ではない。一般的に、現状の CMAQ モデルによる有機エアロゾル(OA)の濃度予測は同様な傾向にあるため、OA の寄与を推定するにはシミュレーション以外の情報も利用することが必要である。また、アンモニア発生源及び自然発生源の影響が非常に大きく表れているのは、排出量と濃度が線形*でなくなり、寄与濃度が過大に評価された可能性がある。

* 排出量と濃度が線形とは、排出量の増減に比例して濃度が増減する関係をいい、反応性の低い一次排出物質で成り立つ。二次生成物質では、排出量の増減に比例して濃度が増減しない非線形の場合がある。

同様の手法で PM_{2.5} の成分別に発生源別寄与濃度を推定した結果を、表 3-5 に示した。非線形効果により、寄与濃度が負になる成分・発生源があるが、特に大きいのは硝酸イオン(NITR)のケースである。この原因は、アンモニア発生源の削除に対する硝酸イオン(NITR)の減少が過大で、それを補償するためにマイナス側へ出たと考えられるが、この結果をもって削減対策の効果を判断することは不適切であり、取扱いには十分注意する必要がある。

表 3-5 ゼロアウト計算結果に基づく発生源別・成分別寄与濃度の推定(現況)

	自動車 out	船舶 out	大規模 固定 out	家庭・ 業務 out	建機 out	その他 人為 out	VOC 施設 out	アンモ 自然 out	関東以外の 寄与・非線形 性の補正
EC	0.91	1.24	1.42	1.40	1.09	1.42	1.47	1.49	0.13
ORG_TOT	4.61	4.62	4.98	4.52	4.76	4.31	4.94	3.58	0.53
NITR	1.52	1.95	1.89	2.07	2.01	2.02	2.06	0.50	-0.64
SULF	4.53	4.24	4.25	4.38	4.52	4.49	4.52	4.18	3.54
NH4	1.86	1.98	1.96	2.09	2.09	2.09	2.12	1.11	0.36
FINE	0.93	1.42	1.15	1.38	1.49	1.12	1.50	1.52	0.06

※ 2008 年度東京都 PM_{2.5} 大気環境調査期間(四季)、一般環境調査 9 地点の平均である。

硫酸イオン(SULF)への域外の寄与が大きいことや硝酸イオン(NITR)へのアンモニア発生源の寄与が大きいことなど、この推定結果は、既往の評価事例*との共通点が多い結果となっている。

* 茶谷ら:3次元大気シミュレーションによる2005年度日本三大都市圏PM_{2.5}濃度に対する国内発生源・越境輸送の感度解析, 大気環境学会誌, 46, 2011)

(6) 単純将来濃度の発生源感度解析結果

単純将来濃度について、(5)の 8 種類の発生源について都内及び関東地方で発生源別の感度解析を行った結果を表 3-6 に示した。

表 3-6 都内及び関東地方の発生源別ゼロアウト計算に対する濃度の影響(単純将来)

	補正後 (μg/m ³)	現況	自動車out	船舶out	大規模固定 out	家庭・業務 out	建機out	その他 人為out	VOC施設 out	アンモニア・ 自然out
東京都	PM _{2.5}	17.21	16.65	16.71	17.08	16.53	17.03	16.50	17.15	16.12
	現況-outケース		0.56	0.50	0.13	0.68	0.18	0.71	0.06	1.09
関東地方	PM _{2.5}	17.21	16.04	15.67	15.80	16.10	16.95	15.95	17.01	13.15
	現況-outケース		1.17	1.54	1.41	1.12	0.26	1.26	0.20	4.06

※ 2008 年度東京都 PM_{2.5} 大気環境調査期間(四季)、一般環境調査 9 地点の平均である。

都内の大気環境中のPM_{2.5}の都内人為発生源による影響は、現況と同様にいずれも小さく1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 未満であった。これに対して、関東地方の人為発生源による影響は、船舶の影響が最大で1.54 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、次いで大規模固定1.41 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、その他人為起源1.26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、自動車1.17 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ である。

現況との違いは、都内では、自動車と建機の影響は大幅に減少したが、船舶と業務・家庭の影響はやや増加している。これに対して、関東地方では、自動車と建機の影響は大幅に減少したが、大規模固定煙源、船舶の影響が増加している。

現況と同様にPM_{2.5}の成分別に発生源別寄与濃度を推定した結果を表3-7に示した。現況と同様、非線形効果により寄与濃度が負になる成分・発生源があり、NITRでその値が最大であることは現況と同様である。原因は現況と同様であるが、原因物質の削減効果を予測する際にはNITRの取扱いには十分注意する必要がある。

表 3-7 ゼロアウト計算結果に基づく発生源別・成分別寄与濃度の推定(単純将来)

	自動車 out	船舶 out	大規模 固定 out	家庭・ 業務 out	建機 out	その他 人為 out	VOC 施設 out	アンモ 自然 out	関東以外の 寄与・非線形 性の補正
EC	0.64	0.52	0.72	0.69	0.66	0.71	0.77	0.78	0.11
ORG_TOT	4.27	3.92	4.31	3.86	4.37	3.74	4.29	3.00	0.46
NITR	1.31	1.57	1.37	1.64	1.71	1.67	1.72	0.44	-0.76
SULF	4.58	4.26	4.28	4.43	4.57	4.54	4.58	4.23	3.52
NH4	1.77	1.80	1.72	1.90	1.96	1.94	1.97	1.08	0.32
FINE	0.96	1.11	0.88	1.10	1.17	0.89	1.17	1.19	0.27

3-3 発生源寄与解析の手法

レセプターモデルによる解析結果及びシミュレーションモデルの計算結果を統合して、平成 20 年度及び平成 28 年度の PM_{2.5} の発生源寄与を試算した。

(1) レセプターモデル(CMB モデル)とシミュレーションモデル(数値型モデル)の統合について

両モデルとも、現段階では発生源寄与の解析について確実性が高いとはいえないレベルにある。しかし、PM_{2.5} 環境濃度が将来においても大気環境基準を超える可能性が高いと考えられること、そのための低減対策を検討する必要があることから、現時点で可能な発生源寄与の解析方法を検討した。

具体的には、以下に示す考え方でモデルを統合し、発生源別寄与割合を試算することとした(図 3-13)。

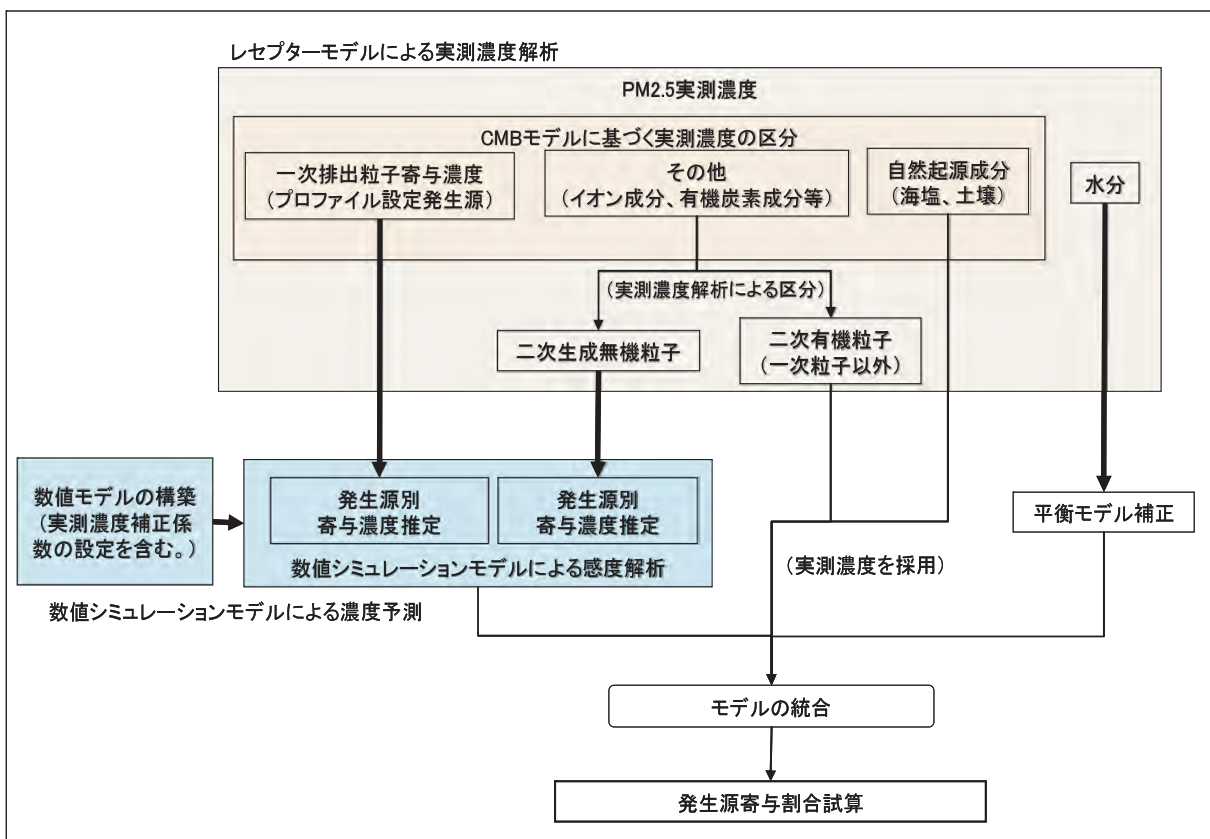


図 3-13 レセプターモデルとシミュレーションモデルの統合の考え方

- ① 自然起源の成分(海塩・土壌)は CMB モデルによる計算濃度をそのまま使用する。
- ② 水分は平衡モデル(E-AIM モデル*)による計算した量を使用する。
* <http://www.aim.env.uea.ac.uk/aim/aim.php>
- ③ 一次粒子全体の寄与濃度は CMB モデルにより解析した結果を採用する。発生源別寄与割合は、数値型モデルの感度解析結果で配分する。
- ④ 二次生成粒子(NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 NH_4^+)については、数値型モデルの感度解析結果を用いて、寄与濃度を求める。
- ⑤ 二次有機粒子については数値型モデルの感度が低く、妥当な発生源別寄与濃度を求める

ことは困難であるため、CMB モデルで推定した寄与濃度(v-OC)を使用する。

- ※ CMB モデルによる発生源区分は、例えば「ディーゼル車の発生源プロフィールに似通った発生源」の寄与濃度を表す。したがって、厳密な意味での特定の発生源の寄与濃度を示すものではないことに留意する必要がある。
- ※ これに対し、シミュレーションモデルは、個別発生源のインベントリに基づく寄与濃度であるため特定の発生源、例えば「大規模固定」からの寄与濃度を推定している。もちろん、感度解析に基づく推定であるため、これも厳密には直接推定しているわけではない。
- ※ CMB モデルでは、使用した発生源プロフィールでは現状の大気環境濃度の 1/3 程度しか説明できないことやプロフィールの選択によって大幅に寄与率が変動することがある。
また、数値型モデルでは、不確実性が高いインベントリを使用せざるを得ないことに加え、現況環境濃度の再現では全体に過小評価である。また、発生源別の寄与濃度を推定するためにゼロアウト感度解析を行っているが、この方法は、あくまでも寄与濃度(寄与率)に類似する「目安の量」と考えるべきである。なお、二次生成有機粒子に対する感度が低いことも指摘されている。

(2) 発生源別寄与割合の試算について

これまでの知見を整理すると、PM_{2.5} の環境基準を達成するためには、一次粒子とともに二次生成粒子対策の重要性が大きいことは明らかである。これら PM_{2.5} の原因物質と発生源を明らかにし、その寄与割合を推定することは、削減対策を検討する上で重要な知見を与える。

ここでは、上記の検討を踏まえて、シミュレーションモデルによる感度解析結果、レセプターモデルによる発生源寄与の推定結果等の検討結果を統合し、発生源寄与割合を推定することを試みた。

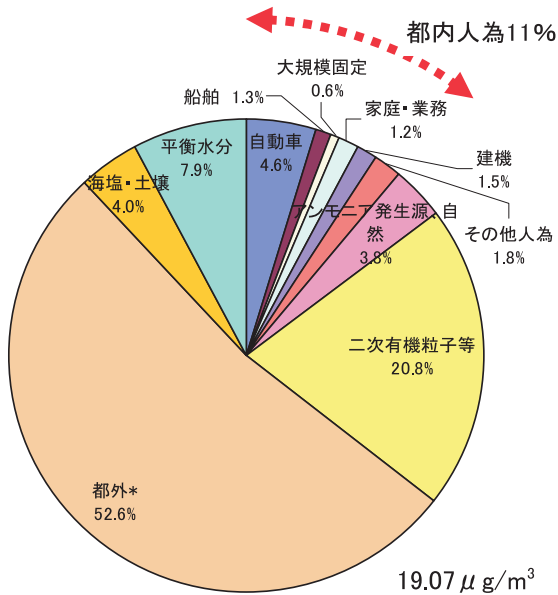
現況(平成 20 年度)の東京都の大気環境中 PM_{2.5} の都内発生源別寄与割合を図 3-14 に示す。人為的発生源が約 11%、自然発生源等(アンモニア発生源、自然)が約 4%、都外*が約 53%であった。人為的発生源について詳細を見ると自動車(4.6%)、建設機械(1.5%)、船舶(1.3%)であった。

一方、東京都の大気環境中 PM_{2.5} の関東地方発生源別寄与割合を図 3-15 に示す。人為的発生源による寄与割合は約 34%、自然発生源等が約 15%、関東外*が約 18%であった。人為的発生源について詳細を見ると自動車(11.5%)、船舶(6.6%)、大規模固定発生源(6.5%)であった。なお、水分、海塩・土壌、二次有機粒子等については発生源を区別することが困難であった。

単純将来予測(平成 28 年度)の東京都の大気環境中 PM_{2.5} の都内発生源別寄与割合を図 3-16 に示す。人為的発生源が約 8%、自然発生源等が約 4%、都外*が約 53%であった。現況と比較すると人為的発生源のうち、自動車、建設機械の寄与が低減し、相対的に船舶の寄与が増加している。

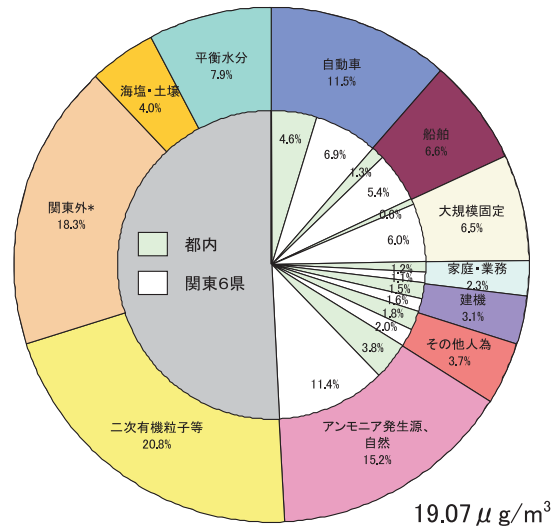
一方、東京都の大気環境中 PM_{2.5} の関東地方発生源別寄与割合を図 3-17 に示す。人為的発生源による寄与割合は約 30%、自然発生源等が約 15%、関東外*が約 20%であった。人為的発生源のうち、自動車、建設機械の寄与が低減し、相対的に船舶、大規模固定発生源の寄与が増加している。なお、現況と同様に水分、海塩・土壌、二次有機粒子等については発生源を区別することが困難であった。

* 排出量の増減に比例して濃度が増減しない非線形の場合に、感度解析(ゼロアウト法)による各発生源の寄与濃度を合計しても実測濃度にならない場合がある。その場合の過不足分を非線形性のため生じた濃度と考える。特に、硝酸イオン(NITR)と二次有機粒子(v-OC)で注意が必要である。都外、関東外にはこの補正が含まれている。



* 都外には、シミュレーションモデルの誤差が含まれる。

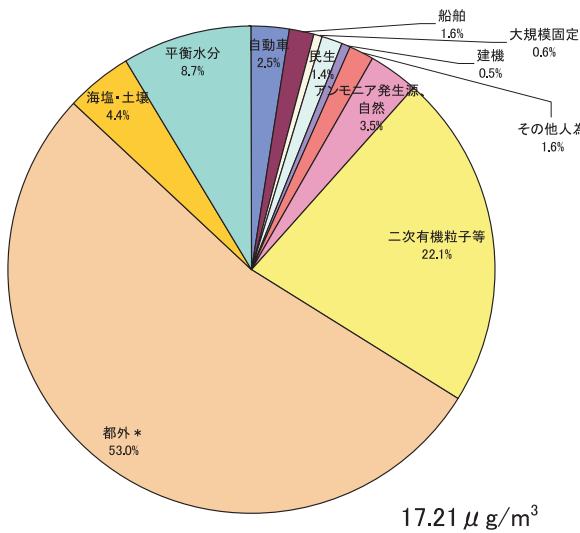
図 3-14 都内の PM_{2.5} 濃度に対する
都内の発生源別寄与割合
(現況・平成 20 年度)



* 関東外には、シミュレーションモデルの誤差が含まれる。

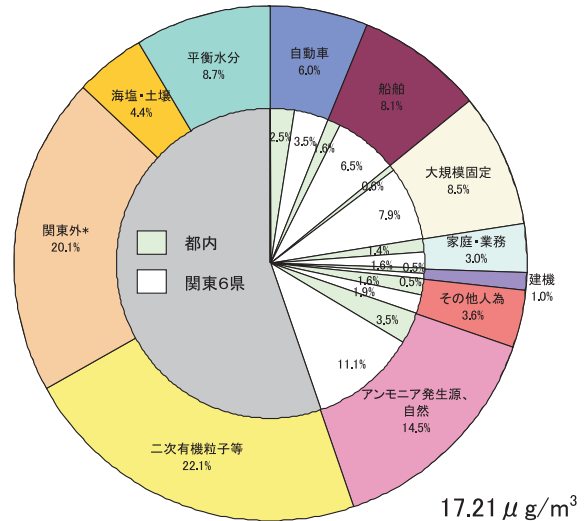
図 3-15 都内の PM_{2.5} 濃度に対する
関東地方の発生源別寄与割合
(現況・平成 20 年度)

※ 自動車、船舶、大規模固定、家庭・業務、建機、その他人為、アンモニア発生源、自然、都外、関東外の寄与分には二次有機粒子等が含まれない。



* 都外には、シミュレーションモデルの誤差が含まれる。

図 3-16 都内の PM_{2.5} 濃度に対する
都内の発生源別寄与割合
(単純将来・平成 28 年度)



* 関東外には、シミュレーションモデルの誤差が含まれる。

図 3-17 都内の PM_{2.5} 濃度に対する
関東地方の発生源別寄与割合
(単純将来・平成 28 年度)

※ 自動車、船舶、大規模固定、家庭・業務、建機、その他人為、アンモニア発生源、自然、都外、関東外の寄与分には二次有機粒子等が含まれない。

(3) その他

① 一次粒子と二次生成粒子の割合の推定について

一次粒子と二次生成粒子の割合を推定するために、実測濃度と CMB モデルの結果から成分ごとの濃度を算出した。ここで、元素状炭素 (EC)、一次有機エアロゾル (Primary Organic Aerosol: POA)、その他 (Other)、海塩・土壌を一次粒子、二次有機粒子等 (v-OC)、硝酸 (NITR)、硫酸 (SULF)、アンモニア (NH₄) を二次生成粒子、平衡水分をその他とした。結果として、一次粒子が 25%、二次生成粒子が 67%、その他が 8% となった。

表 3-8 一次粒子と二次生成粒子の割合

	EC	POA	二次有機 粒子等	NITR	SULF	NH ₄	Other	海塩・ 土壌	平衡 水分	計 μg/m ³	計 %
一次粒子	1.47	0.98					1.49	0.76		4.7	25
二次生成粒子			4.13	2.09	4.51	2.13				12.86	67
その他									1.5	1.5	8

※ 今回 CMB モデルに使用した発生源プロファイルは、平成 20 年度環境省調査結果を都の発生源調査結果を踏まえて若干修正したものであるが、環境省調査のデータは長期間更新されていないものが多いため、POA と二次有機粒子等の割合については現状と乖離がある。

② 国外の影響について

PM_{2.5} 濃度に対する国内発生源・越境輸送の感度解析の結果から、大阪・兵庫圏では国外の人為発生源の感度が 48% と高いが、愛知・三重圏、首都圏の順に低くなり、東京 23 区では 26% にまで減少しているという報告がある*。

* 茶谷聡, 森川多津子, 中塚誠次, 松永壮: 3 次元大気シミュレーションによる 2005 年度日本三大都市圏 PM_{2.5} 濃度に対する国内発生源・越境輸送の感度解析, 大気環境学会誌, 46(2), p101-110 (2011)

第4章 まとめ

4-1 知見の整理・統合

本検討会の目的は、都内の微小粒子状物質(PM_{2.5})の実態、原因物質や生成メカニズムを明らかにし、削減対策に資することである。ここでは、約3年にわたる調査・検討結果から得られた知見の整合性を確認し、整理・統合する。

(1) 大気中 PM_{2.5} の実態

① 環境基準との比較

近年では、都内全ての測定局においてSPMの環境基準を達成しているが、フィルタ振動法による長期観測結果から、都内PM_{2.5}濃度は、環境基準を超過している可能性があると考えられていた。これは、平成20年度に実施したフィルタ法による詳細な大気環境調査の結果、都内PM_{2.5}濃度の年平均値は、一般環境で20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、道路沿道で22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、全地点平均で21 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ であったことにより明らかとなった。

また、関東地方合同調査の結果では、関東甲信静の夏季平均は19.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ であり、地域による大きな差は認められず、多くの調査地点で環境基準を超過している可能性が示された。

② PM_{2.5} の成分構成

PM_{2.5}の主な成分は、有機炭素(OC)、硝酸イオン(NO₃⁻)、硫酸イオン(SO₄²⁻)、元素状炭素(EC)及びアンモニウムイオン(NH₄⁺)であり、その成分構成は、季節により異なっていることがわかった。特にOCとECは秋季が高く、SO₄²⁻は夏季に高かった。また、NO₃⁻と塩化物イオン(Cl⁻)は、秋季と冬季に高かった。この傾向は、他の観測結果とも一致するものであった。

③ 過去の大気環境調査結果との比較

PM_{2.5}の質量濃度は、過去調査の質量濃度(PM_{2.1}相当)と比較すると、大きく低減していた。成分ごとに見ると、大きく低減していたのは、EC、Cl⁻及びOCで、この要因としては、ディーゼル車規制、廃棄物焼却炉対策、揮発性有機化合物(VOC)排出抑制対策の進展などが考えられる。

また、放射性炭素同位体研究の結果では、一般局ではPM_{2.5}に含まれる全炭素(TC)のうち、半分以上(約55%)がバイオマス起源のものであるとしていることや、CMB法による発生源寄与解析では、過去の解析結果と比較すると自動車排出ガスの寄与は大きく低減していることなどから、現在はその他の発生源が相対的に重要になってきていることを示唆している。

④ バイオマス燃焼(野焼き等)による影響

バイオマス燃焼由来の指標であるレボグルコサンの季節変化をみると、春季・夏季が低濃度、秋季・冬季においては顕著に高濃度で推移しており、季節によって大きく異なっていることが明らかとなった。また、レボグルコサン濃度は、各観測地点間で高い相関があり、測定地点近傍の局所的な事象よりも、広域的な事象がレボグルコサン濃度の変動に影響していると推測されている。このことから、都市大気においても季節によっては、バイオマス燃焼により生成した粒子の影響を受けている可能性があるものと考えられる。この考え方は、放射性炭素同位体研究やJATOPの広域観測の結果とも一致している。

(2) 原因物質

① 多岐にわたる原因物質

PM_{2.5}などの粒子状物質は、一次粒子と二次生成粒子に分類される。一次粒子の主な原因物質としては、燃焼に伴い排出されるばいじんや自動車排出ガス由来のPMなどが挙げられる。二次生成粒子の原因物質としては、燃焼に伴い排出されるSO_xやNO_x、さらに溶剤の蒸発などによるVOC、自然起源のアンモニア(NH₃)、植物から蒸発するVOCなどの気体状の大気汚染物質が考えられている。

このため、排出インベントリ調査の対象とした排出源は多岐にわたるものとなった。

また、二次生成粒子の原因物質として、関東地方全域ではSO_xは火山からの排出が約90%と大半を占め、植物から蒸発するVOCが約36%を占めるなど、無視できない自然起源も多くあることが判明した。VOCは、東京都では、ほとんどが産業・業務部門からの排出であったが、関東地方全体では、産業・業務部門に次いで自然由来(植物)の排出が多いと推定された。一方、ほとんどが人為発生源由来であるNO_x及びPMについては、関東全体では産業・業務部門と運輸部門がほぼ同じ割合なのに対し、東京都では、運輸部門からの排出割合が大きくなっている。

発生源から直接排出されるPMのうち、粒径が2.5μm以下の粒子について、主として既存の粒径分布データを基に、PM_{2.5}排出量を集計した。その結果、排出割合についてはPM排出量と同様な傾向であった。これは、燃焼に伴い発生する粒子の粒径はほとんど2.5μm以下であることから妥当な結果であると考えられる。ただし、各発生源におけるPM中の粒径分布のデータが乏しく、PM_{2.5}のインベントリは不確実性が高い。また、PM_{2.5}の排出原単位については、多くの発生源について不足しており、精度の高い排出係数はあまり存在しないことを前提にした中での推計であることを考慮する必要がある。

② 既存施策の対策効果によるPMの減少

PM排出量について、過去の調査結果と比較した結果、焼却炉(都市ごみ)、自動車排出ガスで大幅に減少していたことが明らかとなった。これは、大気環境濃度において、EC、OC及びCIが大きく減少していたこと、CMB法による推計の結果、平成13年度と比べて、自動車排出ガスの寄与濃度が小さくなっていたことなどからも、ディーゼル車規制や廃棄物焼却炉対策が着実に効果を上げていることが分かる。

③ 未把握であった発生源の調査結果

「野焼き」、「タバコの煙」、厨房・家庭台所における「調理」などこれまで未把握であった発生源からの排出についても、実測調査を行った。この結果をもとに排出原単位を設定し、それぞれの活動量に基づき排出量を推定したところ、主要な発生源である産業・業務部門、運輸部門に対して、これらの発生源からの排出が無視できない割合となった。

また、煙突の中では高温であるためにガス状であるが、煙突から排出された直後に外気により急冷されて凝縮する粒子(凝縮性ダスト)も大気中に排出されていることがわかった。この凝縮性ダストの主成分は有機粒子であった。

これらの新たに検討された発生源については、不確実性が高いものの無視できるレベルではないことから、排出インベントリに算定することとした。既存の発生源からの排出量が大幅に低減しているところから、相対的にこれらの発生源のインベントリに占める割合は増加しており、凝縮