

PM2.5 シミュレーションによる発生源寄与割合の推計結果

1 概要

大気環境改善策の検討調査（PM2.5 シミュレーションの構築）を実施した。調査では、大気汚染物質排出量の推計、PM2.5 シミュレーションの結果を用いた PM2.5 発生源別寄与割合の算出を行った。

2 大気汚染物質排出量の推計結果

表 1,2 に、大気汚染物質排出量の推計に用いたデータの一覧を示す。表 3,4 と図 1 に名古屋市内の大気汚染物質排出量の推計結果を示す。排出量の推計対象年は、平成 27 年度（2015 年度）である。推計対象年と推計に用いたデータの年が異なっていた場合には、統計データ等を用いた年次補正を実施した。

表 1 基礎とするデータ（資料）及び公開インベントリ・データベース（名古屋市内）

発生源種類	インベントリ・データベース または基礎データの出典	作成機関	対象 年度	備考
工場・事業場、家庭、小規模事業場、建設機械・産業機械・農業機械	「平成 27 年度 大気汚染物質の発生源情報の整備業務報告書」	名古屋市	2012 年度	市による整備対象 ¹⁾ 以外の物質及び VOC 発生源については、下記の JEI-DB を使用する。
船舶	「平成 24 年度 排出規制海域（ECA）設定による大気環境改善効果の算定事業」における「2010 年船舶排出データベース」 ²⁾	海洋政策研究財団	2010 年	わが国の陸地から 200 海里以内の領域の発生源が 3 次メッシュまたは 2 次メッシュで作成されている。
自動車	JEI-DB（JATOP Emission Inventory-Data Base）（2014）	JATOP	2010 年度	全国分が 3 次メッシュで作成されている。
人為発生源（船舶、自動車以外）	JEI-DB（JATOP Emission Inventory-Data Base）（2014）	JATOP	2010 年度	関東・関西地方は 3 次メッシュ、他の地域（名古屋市含む）は 2 次メッシュで作成されている。 市の整備対象以外の発生源、物質及び VOC 発生源に使用する。
人為発生源（船舶、自動車以外）の分布	EAGrid2010-Japan（2014）	国立環境研究所	2010 年	JEI-DB の排出量（自動車以外）を 3 次メッシュに分配する指標に使用する。
植物	MEGANv2.10（2014）	NCAR	対象期間	植物からの VOC 等の排出量を計算するモデル。

1) 対象発生源からの NO_x、PM、SO_x、HCl、HC の排出情報が整備されている。

2) 国内の船舶発生源データベースは、ボートレースの交付金による日本財団の平成 24 年度助成事業 排出規制海域（ECA）設定による大気環境改善効果の算定事業において海洋政策研究財団が作成したデータによる。

表 2 基礎とするデータ（資料）及び公開インベントリ・データベース（国内・中日本域及び国外・東アジア域）

対象範囲	発生源種類	インベントリ・データベース または基礎データの出典	作成機関	対象 年度	備考
国内	船舶	「平成 24 年度 排出規制海域（ECA）設定による大気環境改善効果の算定事業」における「2010 年船舶排出データベース」 ¹⁾	海洋政策研究財団	2010 年	わが国の陸地から 200 海里以内の領域の発生源が 3 次メッシュまたは 2 次メッシュで作成されている。
国内	船舶以外の人為発生源	JEI-DB (JATOP Emission Inventory-Data Base) (2014)	JATOP	2010 年度	自動車は 3 次メッシュで作成されている。自動車以外は関東・関西地方で 3 次メッシュ、他の地域は 2 次メッシュで作成されている。
国内	人為発生源（船舶、自動車以外）の分布	EAGrid2010-Japan (2014)	国立環境研究所	2010 年	JEI-DB の排出量（自動車以外）を 3 次メッシュに分配する指標に使用する。
国内	火山	火山活動解説資料（2015～2016）	気象庁	対象期間	活火山の月別 SO ₂ 排出量データベースを作成。
国外	船舶以外の人為発生源	MIX v1.1 (2017)	清華大学	2010 年 ²⁾	0.25° × 0.25° メッシュで作成されている。
国外	バイオマス燃焼	GFED4s (2017 更新版)	NASA	対象期間	0.25° × 0.25° メッシュで作成されている。
国内、国外	植物	MEGANv2.10 (2014)	NCAR	対象期間	植物からの VOC 等の排出量を計算するモデル。

1) 国内の船舶発生源データベースは、ボートレースの交付金による日本財団の平成 24 年度助成事業「排出規制海域（ECA）設定による大気環境改善効果の算定事業」において海洋政策研究財団が作成したデータによる。

2) アンモニアについては 2008 年のインベントリを基礎資料に使用する。

表 3 名古屋市内の 2015 年度年間排出量

(トン/年)

No.	発生源	NOx	SOx	CO	NH3	NMVOC	PM	備考
1	自動車	4,236.1	9.6	13,835.5	126.4	1,691.0	384.5	JEI-DB自動車
2	船舶	1,628.3	1,307.1	234.6	—	133.0	212.0	OPRF船舶発生源
3	固定発生源	2,002.7	91.8	14,599.6	41.0	186.5	79.2	※1
4	固定 VOC 発生施設	—	—	—	—	11,157.6	—	※2
5	作業機械	2,135.3	1.1	7,605.3	—	199.7	109.0	※3
6	野焼き	2.8	0.5	46.1	1.4	3.8	4.8	JEI-DB野焼き
7	その他人為起源発生源	1,557.0	26.1	2,540.1	1,400.3	438.1	604.1	※4
8	自然発生源	21.4	—	333.8	0.6	2,494.3	—	※5
	人為起源合計	11,562.2	1,436.1	38,861.3	1,569.2	13,809.7	1,393.6	1～7の合計
	自然起源合計	21.4	—	333.8	0.6	2,494.3	—	8の合計
	合計	11,583.6	1,436.1	39,195.1	1,569.8	16,304.0	1,393.6	1～8の合計(名古屋市内の合計)

※1 名古屋市調査分(工場事業場)、JEI-DB(電気、地域熱供給、都市ガス製造、農林業、水産業、鉱業、建設業、製造業、廃棄物焼却)の合計

※2 JEI-DB(工業プロセス 食料品等(発酵)、燃料蒸発(製油所・潤滑油、給油所)、塗料、インキ、接着剤、工業用洗浄剤、クリーニング用洗剤、ゴム用溶剤、粘着剤・剥離剤、ラミネート用接着剤、コンバーティング溶剤、コーティング溶剤、湿し水、洗浄用シンナー、リムーバー、道路舗装、くん蒸剤、農薬、殺虫剤、漁網防汚剤、防虫剤・消臭剤)の合計

※3 名古屋市調査分(農業機械、建設機械、産業機械)の合計

※4 名古屋市調査分(家庭、業務)、JEI-DB(小型焼却炉、家畜、肥料施肥、喫煙、人の発汗・呼吸、ペット犬、化学肥料製造、排水処理、調理)の合計

※5 JEI-DB(土壌)とMEGANの合計

表 4 名古屋市内の 2015 年度年間排出量

[トン/年]

発生源	データ	内容	NOx	SOx	CO	NH3	NMOC	PM
1.自動車	JEI-DB		4,236	10	13,836	126	1,691	384
2.船舶	OPRF		1,628	1,307	235	—	133	212
3.固定発生源	名古屋市調査分	工場事業場	2,003	92	—	—	—	79
	JEI-DB	電気	—	—	13	9	24	—
	JEI-DB	地域熱供給	—	—	8	—	2	—
	JEI-DB	都市ガス製造	—	—	212	—	22	—
	JEI-DB	農林業	—	—	3	—	1	—
	JEI-DB	水産業	—	—	0	—	0	—
	JEI-DB	鉱業	—	—	0	—	0	—
	JEI-DB	建設業	—	—	82	—	27	—
	JEI-DB	製造業	—	—	12,137	32	77	—
	JEI-DB	廃棄物焼却	—	—	2,145	—	34	—
	小計		2,003	92	14,600	41	186	79
4. 固定 VOC 発生施設	JEI-DB	工業プロセス	—	—	—	—	705	—
	JEI-DB	工業プロセス 食料品等(発酵)	—	—	—	—	611	—
	JEI-DB	燃料蒸発 製油所・原油	—	—	—	—	—	—
	JEI-DB	燃料蒸発 製油所・潤滑油	—	—	—	—	11	—
	JEI-DB	燃料蒸発 石油精製・貯蔵出荷施設	—	—	—	—	—	—
	JEI-DB	燃料蒸発 天然ガス貯蔵	—	—	—	—	—	—
	JEI-DB	燃料蒸発 給油所	—	—	—	—	1,684	—
	JEI-DB	塗料	—	—	—	—	5,005	—
	JEI-DB	インキ、接着剤、工業用洗浄剤、クリーニング用洗剤、ゴム用溶剤	—	—	—	—	2,122	—
	JEI-DB	粘着剤・剥離剤、ラミネート用接着剤、コンパネティング溶剤、コーティング溶剤、湿し水	—	—	—	—	366	—
	JEI-DB	洗浄用シンナー、リムーバー、道路舗装、くん蒸剤、農業、殺虫剤、漁網防汚剤	—	—	—	—	605	—
	JEI-DB	防虫剤・消臭剤	—	—	—	—	48	—
	小計		—	—	—	—	11,158	—
5.作業機械	名古屋市調査分	農業機械	1	0	—	—	0	0
	名古屋市調査分	建設機械	1,227	1	—	—	98	71
	名古屋市調査分	産業機械	907	0	—	—	102	38
	JEI-DB	作業機械	—	—	7,605	—	—	—
	小計		2,135	1	7,605	—	200	109
6.野焼き	JEI-DB		3	1	46	1	4	5
7.その他人為起源発生源	名古屋市調査分	家庭	639	7	—	—	—	26
	名古屋市調査分	業務	906	18	—	—	—	448
	JEI-DB	家庭	—	—	959	—	219	—
	JEI-DB	業務	—	—	1,352	—	162	—
	JEI-DB	小型焼却炉	1	1	9	—	7	2
	JEI-DB	家畜	—	—	—	22	—	—
	JEI-DB	肥料施肥	—	—	—	48	—	—
	JEI-DB	喫煙	10	1	220	—	50	57
	JEI-DB	人の発汗・呼吸	—	—	—	691	—	—
	JEI-DB	ペット犬	—	—	—	429	—	—
	JEI-DB	化学肥料製造	—	—	—	189	—	—
	JEI-DB	排水処理	—	—	—	21	—	—
	JEI-DB	調理	—	—	—	—	—	71
	小計		1,557	26	2,540	1,400	438	604
8.自然発生源	JEI-DB	土壌	—	—	—	1	—	—
	MEGANの推計	自然起源排出量	21	—	334	—	2,494	—
	小計		21	—	334	1	2,494	—
合計			11,584	1,436	39,195	1,570	16,304	1,394

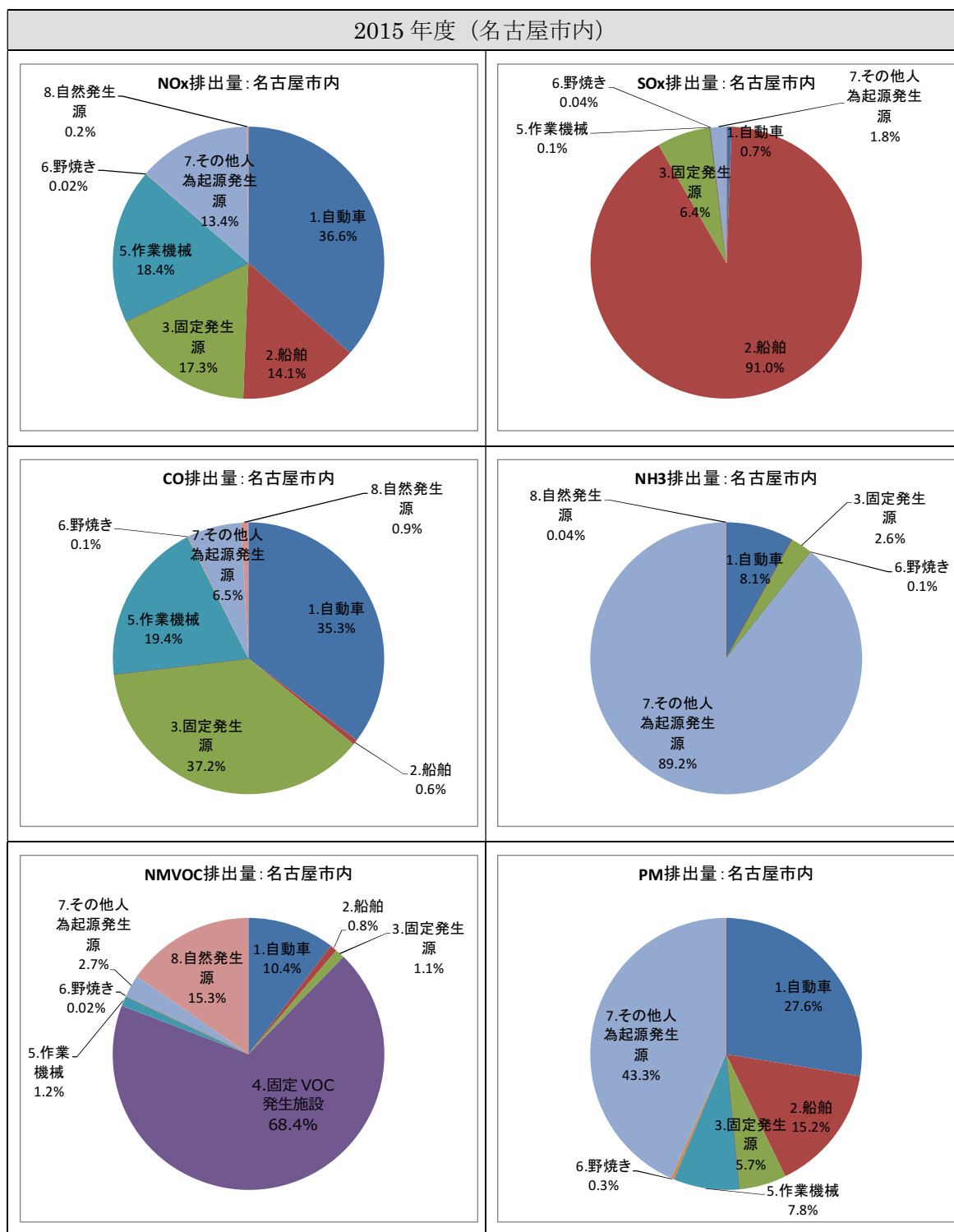


図 1 名古屋市内の 2015 年度年間排出量の物質別構成率

3 PM2.5 発生源別寄与割合の算出結果

(1) PM2.5 発生源別寄与割合の算出に用いたゼロアウト法の概要

表 1、2 に示した排出量を用いて、PM2.5 シミュレーションを実施し、名古屋市内の PM2.5 発生源別寄与割合の算定を行った。PM2.5 発生源別寄与割合の算定は、表 3 に示した 8 つの発生源カテゴリ別に、ゼロアウト法を用いて行った。ゼロアウト法とは、「対象とする発生源をゼロにして計算した濃度」とすべての発生源を用いて計算した「現況再現濃度」との濃度差をその発生源の PM2.5 への寄与とみなす考え方である。

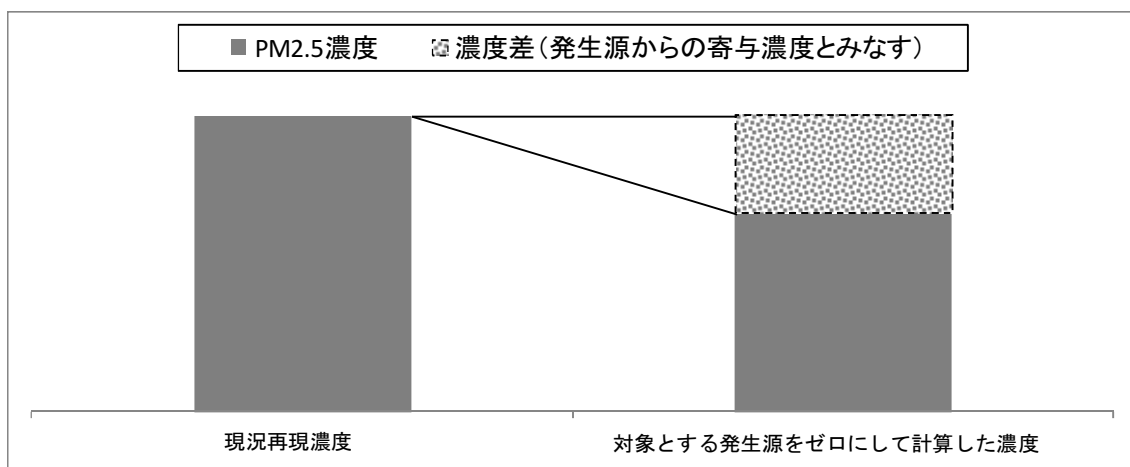


図 2 PM2.5 を対象としたゼロアウト法の概念図

(2) PM2.5 シミュレーション結果の成分測定結果との比較

図 3 に PM2.5 シミュレーション結果と成分測定結果との比較を示す。名古屋市内の対策を考慮していることから、名古屋市内全域の年平均濃度を対象として評価を行った。

PM2.5 シミュレーションの結果は、成分別に再現性の差があった。成分測定結果に比べて、硝酸イオンが過大評価、有機エアロゾルが過小評価であった。

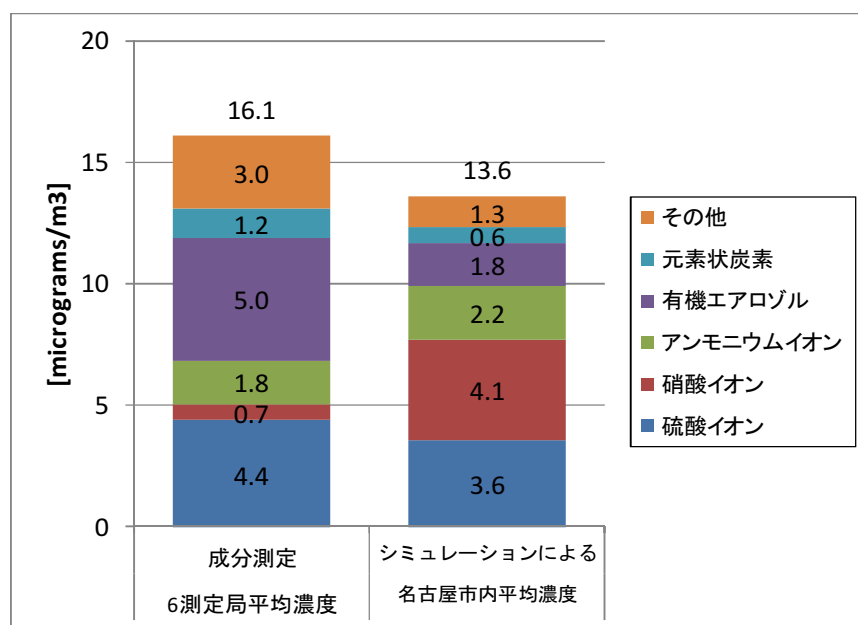


図 3 PM2.5 成分別年平均値の比較（2015 年度）

（３）PM2.5 発生源別寄与割合の算出方法

PM2.5 シミュレーションの結果は、成分別に再現性の差があった。そこで、PM2.5 成分測定結果を用いて、PM2.5 成分別にシミュレーション結果の補正を行ってから PM2.5 寄与割合を算出した（算式 1,2,3 参照）。

PM2.5 成分別補正係数

$$= \text{成分測定の成分別平均濃度} \div \text{シミュレーションの成分別平均濃度}$$

（算式 1）

発生源別成分別寄与濃度

$$= \text{ゼロアウト法で算出した成分別寄与濃度（発生源別）} \times \text{PM2.5 成分別補正係数}$$

（算式 2）

発生源別寄与濃度

$$= \text{「発生源別成分別寄与濃度」のすべての成分の合計}$$

（算式 3）

(4) PM2.5 発生源別寄与割合の結果

図 4 に PM2.5 発生源別寄与割合の算定結果を示す。PM2.5 発生源別寄与割合は、「名古屋市域外の寄与、非線形効果の補正」が約 85%で最も多く、次が「その他人為起源発生源」、「船舶」、「自動車」、「作業機械」の寄与が大きかった。

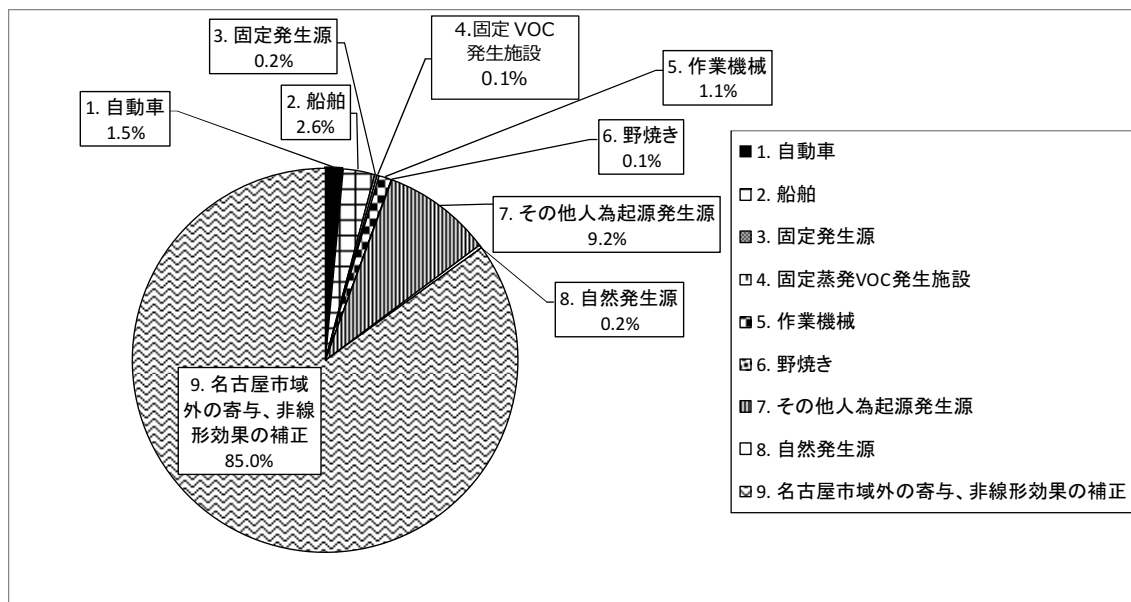


図 4 ゼロアウト法で求めた名古屋市内の PM2.5 発生源別寄与割合

名古屋市外からの影響は、現況再現濃度と 8 ケースの寄与濃度の合計値の差で評価した。また、一般に、PM2.5 は、排出量と濃度との関係が非線形であるため、ゼロアウト法で求めた個々の発生源からの寄与濃度の合計値は、すべての発生源を考慮して求めた濃度（現況再現濃度）と一致しない。ゼロアウト法では、この非線形効果も、現況再現濃度と 8 ケースの寄与濃度の合計値の差に含まれている。そこで、現況再現濃度と 8 ケースの寄与濃度の合計値の差は、「名古屋市域外の寄与、非線形効果の補正」として考慮した。

補正係数適用の有無による PM2.5 寄与割合の差について

1 概要

PM2.5 発生源別寄与割合の算定では、PM2.5 成分別に補正係数を用いた評価を行っている。この補正係数の適用の有無による PM2.5 寄与割合の差を確認した。

2 補正係数適用の有無による PM2.5 寄与割合の差

図 1 に、補正係数適用の有無による PM2.5 寄与割合の差を示す。補正係数適用の前後で、全体的な PM2.5 の寄与割合の傾向に大きな変化はみられなかった。

図 2 に、PM2.5 成分別の寄与濃度を示す。PM2.5 の成分別には、補正係数適用の前後で寄与濃度の差が生じていた。とくに、「7. その他人為起源発生源」の硝酸イオンと有機エアロゾルの寄与濃度の変化が他と比べて大きかった。補正係数適用の有無による寄与濃度の変化は、シミュレーション結果と PM2.5 成分測定結果との差が影響していると考えられた。

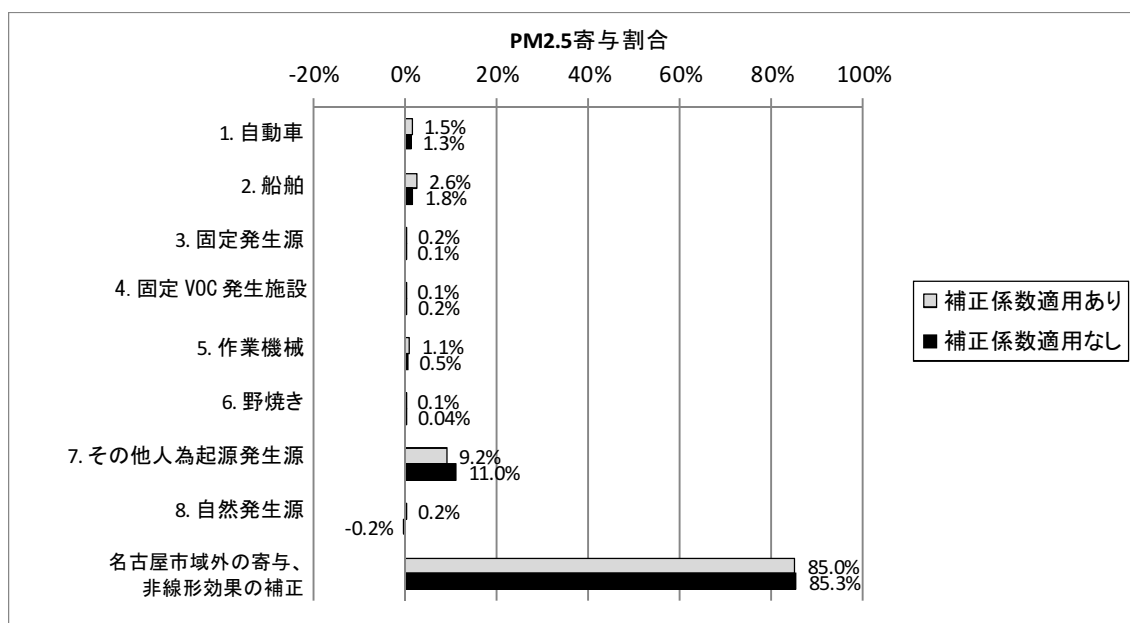


図 1 補正係数適用の有無による PM2.5 寄与割合の差

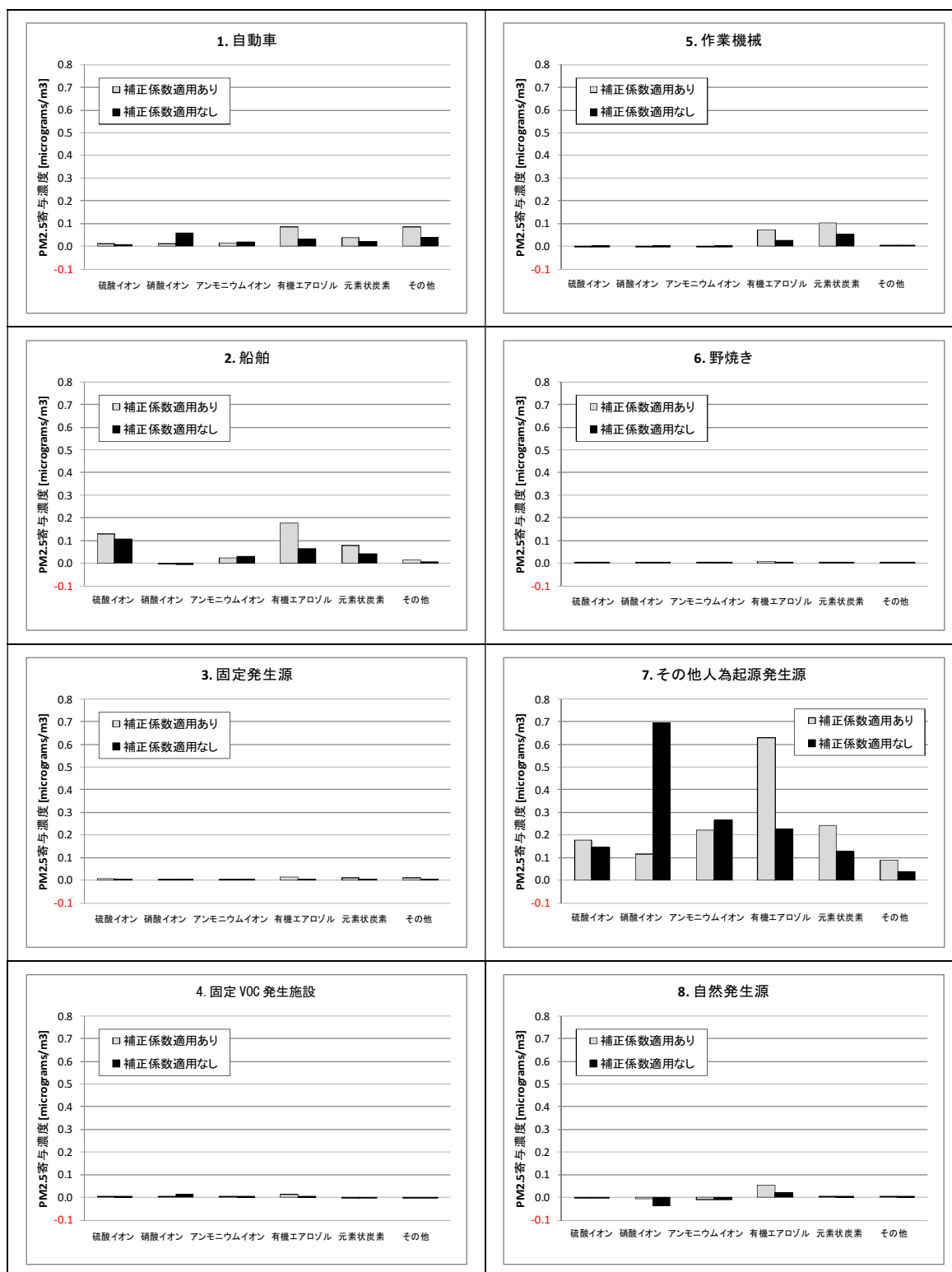


図 2 PM2.5 成分別寄与濃度

解析解型モデルで使用する評価手法の適用結果

1 実測値と計算値の比較結果（現況再現）

名古屋市内の大気汚染常時監視測定局の PM2.5 年平均濃度（2015 年度）と、PM2.5 シミュレーションの現況再現結果との比較を行った。比較は、解析解型モデルで用いられる一般的な評価基準を用いて実施した。

図 1 に、比較結果を示す。計算値は、PM2.5 発生源別寄与割合の算定で用いた補正係数で補正する前と後の両方を示した。

表 1 実測値と計算値の比較結果（PM2.5）

測定局		計算値		実測値(※3)
		補正前(※1)	補正後(※2)	
		[micrograms/m3]	[micrograms/m3]	
一般局	八幡中学校	13.5	16.0	13.9
	富田支所	13.8	16.4	14.3
	守山保健所	12.4	14.7	13.9
	天白保健所	13.5	15.9	13.2
	国設名古屋	12.9	15.3	12.8
	愛知工業高校	13.1	15.5	13.4
	中村保健所	13.8	16.4	14.2
	滝川小学校	13.5	15.9	13.2
	惟信高校	14.0	16.6	14.8
	白水小学校	14.2	16.8	15.4
	大高北小学校	14.2	16.8	13.0
自排局	千竈	14.4	17.0	14.2
	元塩公園	14.2	16.8	15.0
	上下水道北営業所	13.2	15.7	14.2
	名塚中学校	13.1	15.5	16.0
	テレビ塔	14.3	17.0	14.3
	熱田神宮公園	14.3	17.0	11.2
	港陽	14.6	17.3	14.9

※1 各測定局の位置するメッシュのPM2.5計算結果の年平均値である。

※2 補正前の値に、PM2.5寄与割合の算定で用いた補正係数を適用した結果である。

※3 「平成27年度大気汚染常時監視結果 平成28年6月 名古屋市環境局」の表-3より引用した。

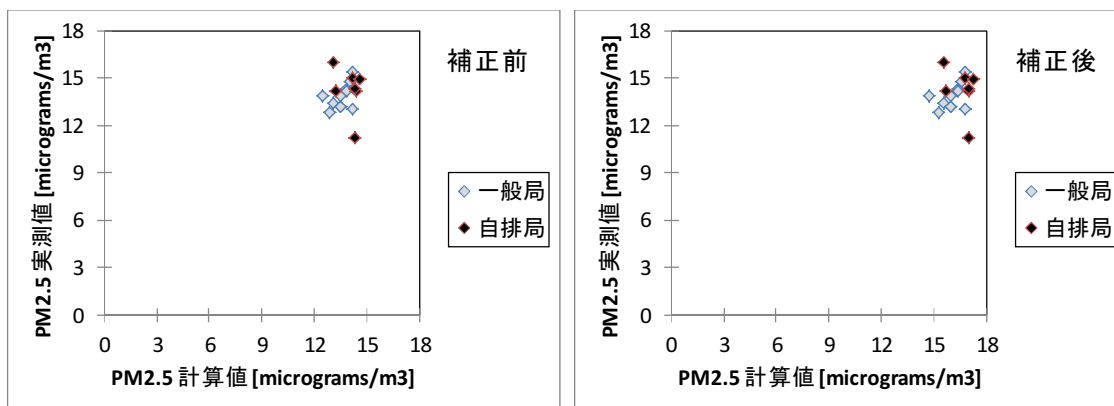


図 1 実測値と計算値の比較結果（PM2.5）

2 精度ランクの判定

計算値と実測値の整合性について判定した。解析解型モデルで用いられる一般的な評価基準での評価結果について確認するため、判定は、「窒素酸化物総量削減マニュアル（新版）」に基づいて実施した。表2と表3に計算値と実測値の整合性の判定に用いた条件や精度ランクについて示す。尚、今回実施したPM2.5シミュレーションは、名古屋市域外の十分に広い領域の発生源の影響を含めて行っており、植物や国内の火山も考慮しているので、想定されていない発生源からの影響は十分に小さいと考えられる。そのため、自然界のバックグラウンド値等（BG）は0と設定した。

表2 計算値と実測値の整合性に係る個別条件

①	$a_0 \leq \frac{1}{3}(\bar{Y} - BG) + BG$
②	$a_0 \leq \frac{2}{5}(\bar{Y} - BG) + BG$
③	回帰直線の傾きが0.8から1.2の範囲内でできるだけ1に近く、かつ、相関係数が少なくとも0.71以上であり、可能な限り0.8以上であること。
④	$s'/\bar{Y} \leq \frac{1}{5}$
⑤	$s'/\bar{Y} \leq \frac{1}{4}$
⑥	$s'/\bar{Y} \leq \frac{1}{3}$
$\bar{Y}$ ：測定局についての実測値の平均値	
$\bar{X}$ ：測定局についての計算値の平均値	
$a_0 := \bar{Y} - \bar{X}$	
BG：自然界のバックグラウンド値等	
$s'/\bar{Y}$ ： $\bar{Y} = \bar{X} + a_0$ からの変動係数	

※「窒素酸化物総量削減マニュアル（新版）」の表2-5-1より

表3 計算値と実測値の整合性に係る精度ランク

(ア) Aランクの条件
①と③と⑤、又は①と④の条件を満足すること。
(イ) Bランクの条件
②と⑤を満足すること。
(ウ) Cランクの条件
②と⑥を満足すること。

※「窒素酸化物総量削減マニュアル（新版）」の表2-5-2より

表4にPM2.5の整合性の判定結果を示す。補正係数適用前と後のどちらの結果も、評価はAランクであった。

表4 PM2.5 に対して解析解型モデルの評価手法を適用した時の判定結果（注）

項目		補正前	補正後
実測平均値 [micrograms/m ³]		14.0	14.0
計算平均値 [micrograms/m ³]		13.7	16.2
差 [micrograms/m ³]		0.3	-2.3
相関係数		0.08	0.08
回帰式		$y = 0.148x + 11.969$	$y = 0.125x + 11.969$
標準偏差s'		1.177	1.226
推定誤差比s'/ $\bar{Y}$		0.084	0.088
計算条件の適合性の有無	①	○	○
	②	○	○
	③	×	×
	④	○	○
	⑤	○	○
	⑥	○	○
評価ランク		A	A

（注）解析解型モデルで用いられる一般的な評価手法を適用した一事例である。

3 留意点

PM2.5 シミュレーション結果に、解析解型モデルで用いられる一般的な評価手法を適用して評価を行った。ただし、この結果については、以下の点に留意して評価する必要がある。

1. 評価に用いた手法が解析解型モデルに適したものであること

PM2.5 シミュレーションは、数値解型モデルを用いている。本資料の結果は、解析解型モデルの評価手法を数値解型モデルの結果にそのまま適用して評価している点に留意する必要がある。

2. PM2.5 質量濃度のみの判定であること

PM2.5 の計算結果は、成分別に再現性の差があった。そのため、PM2.5 のトータルの質量濃度がAランク判定であったとしても、成分ごとの再現精度は保証されない点に留意する必要がある。

4 参考

平成 29 年度に実施した PM_{2.5} シミュレーションは、非定常の数値解型モデルを用いて行った。数値解型モデルは、対象領域の大気を立体的な格子（計算メッシュ）で区切り、格子間の大気汚染物質の流れを数値的に解いて計算するモデルである。そのため、計算メッシュのサイズよりも小さいスケールの濃度勾配や分布・較差は、計算対象としない。二次生成などの反応過程も含む数値解型モデルを用いて、年間など長期間の計算を十分な解像度で行うためには大きな計算容量を要するため、近年まではこのようなモデルの実用的な運用は困難であった。高性能な計算機の普及などを受けて、現在では適用例や研究成果が蓄積されつつあるものの、数値解型モデルの行政での適用事例はまだ少なく、国内における一般的または公的な精度の評価手法や評価基準は定まっていない。

これに対してわが国では、長年にわたり、定常解析解型のモデルが大気質の評価や予測に用いられてきている。解析解型モデルは、一様・定常な気流の中で発生源から排出された大気汚染物質が拡散した場合、濃度の分布（距離減衰）が正規分布に従うことを仮定した比較的簡易なモデルである。二次生成や地形・地物の影響などを扱うには原理的に適さないものの、比較的小さな計算容量で年平均濃度など長期を対象とした指標値が得られるため、環境アセスメントや行政の評価における豊富な運用実績があり、広く合意された精度評価手法・判定基準が確立している。たとえば「窒素酸化物総量削減マニュアル（新版）」には、解析解型モデルによる SO₂ や NO_x の長期シミュレーション結果の精度評価基準が示されている。

表 4 は、このような解析解型モデルによる SO₂・NO_x シミュレーションのために提唱された精度評価の手法及び基準を、数値解型モデルによる PM_{2.5} シミュレーションの結果に適用して精度の判定を試みた結果である。

全窒素の比較結果

1. 概要

常時監視測定局の窒素酸化物濃度の測定結果と、名古屋市環境科学調査センターで実施されている酸性雨の測定結果を用いて、PM2.5 シミュレーションに関する全窒素の比較を行った。

2. 比較の内容

観測で得られた一酸化窒素 ($\text{NO}(\text{g})^*$)、二酸化窒素 ($\text{NO}_2(\text{g})^*$)、ガス状硝酸 ($\text{HNO}_3(\text{g})^*$)、粒子状硝酸イオン ($\text{NO}_3^-(\text{P})^*$) 濃度を合計し、全窒素を算出した。観測の一酸化窒素と二酸化窒素濃度は、名古屋市南区の一般環境大気測定局の白水小学校の測定結果を用いた。観測のガス状硝酸と粒子状硝酸イオン濃度は、名古屋市南区の名古屋市環境科学調査センターの酸性雨調査の測定結果のうち、フィルターパック法による測定結果を用いた。

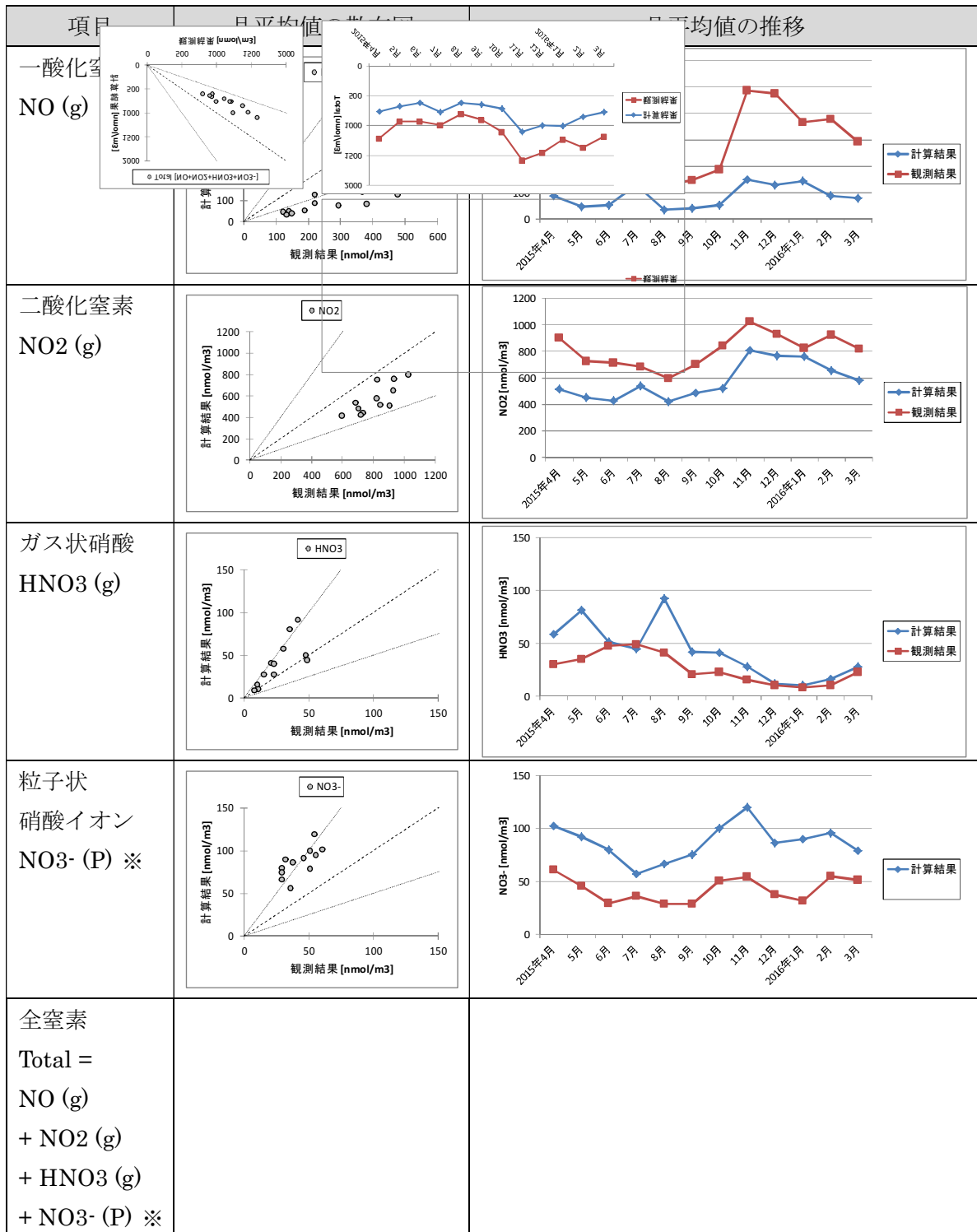
次に、PM2.5 シミュレーションの結果（計算結果）から、名古屋市環境科学調査センターの位置するメッシュの一酸化窒素、二酸化窒素、硝酸、硝酸イオン粒子濃度を抽出した。全窒素として、一酸化窒素、二酸化窒素、硝酸、硝酸イオン粒子濃度の合計値を算出した。酸性雨調査の測定結果は分粒していないため、PM2.5 よりもサイズの大きい粗大粒子を含んでいる。そこで、計算結果の粒子状硝酸イオンの値も、粗大粒子を含むようにして評価を行った。観測結果と計算結果を散布図や時系列図で比較した。

※ (g) とは、ガス状の物質を表し、(P) とは粒子状の物質を表す。

3. 結果

- $\text{NO}(\text{g})$ は観測の 0.2～0.6 倍程度、 $\text{NO}_2(\text{g})$ は観測の 0.5～1 倍程度、 $\text{HNO}_3(\text{g})$ は観測の 1～2 倍程度、 $\text{NO}_3^-(\text{P})$ は観測の 1.5～3 倍程度であった。全窒素としては、概ね、観測結果の 0.5～1 倍の範囲に収まっていた。

図1 全窒素の比較結果



※計算結果の粒子状硝酸イオンの値は、PM2.5 よりも粒径が大きい粗大粒子の値を含んでいる。