

シミュレーションモデルによる PM2.5 濃度の変化に関する解析

PM2.5 対策の検討にあたっては、様々な測定データを用いて PM2.5 の高濃度事例の要因等に関する解析を進めていくとともに、シミュレーションモデルの高度化を進め、これまでに実施した対策効果に関する評価や追加的な対策の必要性に係る検討が必要とされている。

過年度の取組においてシミュレーションモデルの精緻化が一定程度進展していることから、現在の大气汚染物質の年次変化の傾向が将来も継続すると仮定したシナリオ (BaU : Business as Usual) のシミュレーション解析を実施し、令和 7 年 (2025 年) 度における大气汚染物質 (PM2.5 等) の環境基準値の達成状況の変化を推計し、大气汚染物質排出量の変化が大气環境濃度及び環境基準値の達成状況に与える影響を定量的に評価するための基礎的な検討を実施した。

1. 検討の概要

(1) 平成 30 年 (2018 年) 度における現況再現計算

最新の観測がまとめられている平成 30 年度を対象にシミュレーションを実施し、その計算結果と観測値と比較し、シミュレーションモデルの再現性を検証した。

再現性の検証は、観測地点における大气汚染物質の計算値と観測値を統計的に比較することで検証する。また、PM2.5 の成分分析が実施されている測定地点では、PM2.5 の成分割合の比較等も実施した。

(2) ベースラインシナリオの計算

BaU の考え方によって推計された令和 7 年度排出インベントリを使用して、「高位」「低位」の 2 つのシナリオを作成し、シミュレーション計算を実施する。

2. 計算条件

(1) 計算基準年の設定

本解析では計算基準年度を平成 30 年度と設定した。一方、過年度に実施した光化学オキシダントの濃度推計では、計算基準年度を平成 27 年度と設定している。

計算基準年度を変更した理由は、濃度低下傾向が継続している PM2.5 の将来濃度を推計するには、最新の値がある平成 30 年度を計算基準年度とするのが適していると考えたためである。

(2) シミュレーションモデルの基本設定

シミュレーションは、気象モデルの結果を化学輸送モデルに取り込むことで実施される。これらのシミュレーションコード及びそのモデル設定は環境研究総合推進費 5-1601 「大気中の二次汚染物質に対する発生源寄与推計と対策立案に資する規範的モデルの確立」と同様の設定で計算を実施した。なお、濃度の境界条件には、オープンデータである CAM-Chem を使用した。気象モデル WRF の設定を参考資料の表 I に、化学輸送モデル CMAQ の設定を参考資料の表 II に示した。

(3) 排出インベントリの設定

本解析で使用する排出インベントリの構成を表1に示す。

表1 本解析で使用する排出インベントリ

対象地域	対象排出源及び対象年度	インベントリ名	計算基準年度への排出量年次補正
国外人為起源	2015年度計算 国外人為起源	船舶以外：REAS v3.2 ¹ 船舶：EDGAR ²	文献値 ³ より2018年度に補正 (中国のみ) 他の地域は2015年度固定
国内人為起源	2015年度 人為起源陸上 (自動車以外)	環境省 PM2.5 排出インベ ントリ (2015年度版)	環境省インベントリ (2015年度版) をそのまま使用 但し NH ₃ の発生源に関しては、伊 藤ら(2020)による、施肥や人の発汗 等について、EAGrid-Japan2010 から 更新したものを使用 ⁴ 。
	2015年度 人為起源陸上 (自動車)	環境省 PM2.5 排出インベ ントリ (2015年度版)	H30年度 PM2.5 インベントリ報告書 ⁵ の都道府県別排出量より都道府県別 に補正係数を算出し、年次補正を実 施
	2015年度 人為起源海上	GLIMMS-AQ ⁶	年次補正なし
自然起源	2018年度 森林火災起源	GFED ⁷ ver. 4	2018年度を対象のインベントリのため年次補正なし
	2018年度 火山起源	気象庁ホームページ	2018年度を対象のインベントリのため年次補正なし
	2018年度 植物起源	MEGAN ⁸ v2	2018年度を対象のインベントリのため年次補正なし

¹ Kurokawa, J. and Ohara, T.: Long-term historical trends in air pollutant emissions in Asia: Regional Emission inventory in ASia (REAS) version 3, Atmos. Chem. Phys., 20, 12761-12793, <https://doi.org/10.5194/acp-20-12761-2020>, 2020.

² <https://www.eea.europa.eu/themes/air/links/data-sources/emission-database-for-global-atmospheric>

³ Zheng, B., Tong, D., Li, M., Liu, F., Hong, C., Geng, G., Li, H., Li, X., Peng, L., Qi, J., Yan, L., Zhang, Y., Zhao, H., Zheng, Y., He, K., and Zhang, Q.: Trends in China's anthropogenic emissions since 2010 as the consequence of clean air actions, Atmos. Chem. Phys., 18, 14095-14111, <https://doi.org/10.5194/acp-18-14095-2018>, 2018.

⁴ 伊藤 美羽, 櫻井 達也, 森川 多津子, 茶谷 聡: 大気質モデルによる PM2.5 硝酸塩の再現性向上を目的としたアンモニア排出量の更新, 大気環境学会誌, 55 巻, 4 号, 159-168 (2020)

⁵ PM2.5 排出インベントリ及び発生源プロファイル策定検討会事務局: 平成 31 年度 (令和元年度) PM2.5 排出 インベントリ及び発生源プロファイル策定委託業務報告書(2020)

⁶ Sakurai T., Ito, M., Hanayama S. (2021) Development of air pollutants emission inventories for ships around Japan on a high geographical resolution, Asian J. of Atmos. Environ., 15 (1), <https://doi.org/10.5572/ajae.2020.096>

⁷ Global Fire Emission Database (GFED) : <http://www.globalfiredata.org/>

⁸ Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature (MEGAN) : <https://bai.ess.uci.edu/megan>

3. 解析結果

(1) 基準年度計算の再現性の確認

① 空間分布の確認

本解析では基準年度計算を日本域計算（ドメイン2、15 km メッシュ）と関東域計算（ドメイン3、5 km メッシュ）について実施している。また、本章以降では、季節毎の解析では春季：3-5月、夏季：6-8月、秋季：9月-11月、冬季：12月-2月として整理している。

関東域計算の空間分布を図1に示す。関東域では、京浜工業地域が最も高濃度となっている。また関東域計算と日本域計算の比較では、両者とも大局的な分布は同様の傾向（東京湾、都心部、北関東で高濃度となる）を示しているものの、局所的には高濃度となっている地域が異なるため、局所的な濃度増減の振る舞いまでを調査をしたい場合は、高解像度のシミュレーションが必要になると考えられた。

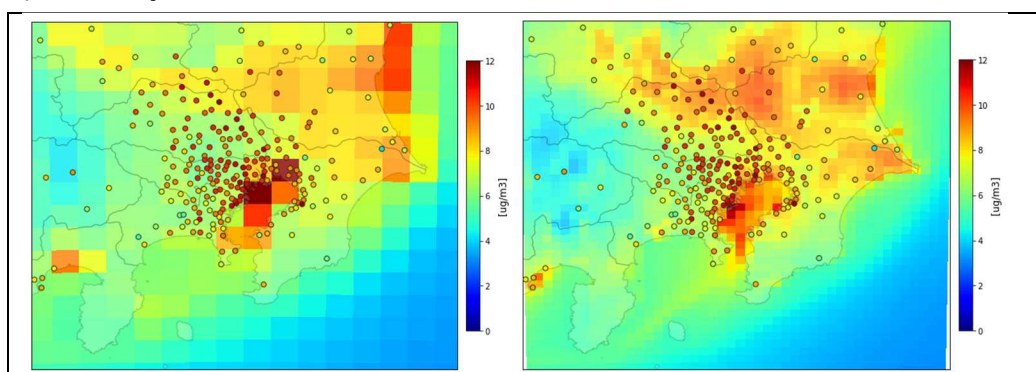


図1 関東のPM2.5年平均濃度

(左図：日本域計算(15 km メッシュ)、右図：関東域計算(5 km メッシュ))

② 常時監視局データとの比較

次に、常時監視局の測定値と化学輸送モデルによる計算値を比較し、シミュレーションモデルにおける主要な大気汚染物質要素の再現性を確認した。例として、東京都のPM2.5における比較結果の統計値を表2に示す。全体的に過小評価であったが、特に寒候期においては大きく過小評価となった。

表2 常時監視局データとシミュレーションの比較統計値

物質	季節	観測値	日本域計算	関東域計算	NMB		相関係数	相関係数
			15 km メッシュ	5 km メッシュ	日本域計算	関東域計算	日本域計算	(関東域計算)
PM2.5	年平均	12.31	7.34	7.18	-0.74	-0.73	0.65	0.70
	春	14.18	9.22	8.15	-0.59	-0.76	0.73	0.75
	夏	11.96	9.55	8.83	-0.35	-0.36	0.83	0.85
	秋	10.55	6.60	7.06	-0.64	-0.50	0.58	0.67
	冬	12.54	3.90	4.61	-2.28	-1.81	0.79	0.76

③ PM2.5 成分手分析データとの比較

PM2.5 の再現性の検証では、PM2.5 濃度の絶対値の比較と同様に PM2.5 を構成している成分の比較も重要である。そのため、成分手分析データと化学輸送モデルによる計算値を比較し、PM2.5 の構成成分の再現性を比較した。

暖候期の計算では、関東域計算と日本域計算の差異は小さかったが、寒候期では NO₃ の再現性が未だ過小評価ではあるものの、関東域計算では向上している。一方、OCM(Organic carbon mass)に関しては、どの領域の計算でも寒候期は未だに再現性が低く、課題の残る結果となった。

また、5 km 解像度でも、EC のような一次粒子を過小評価していること、冬季の大幅な OCM の過小評価は改善されなかった点などが課題として確認された。

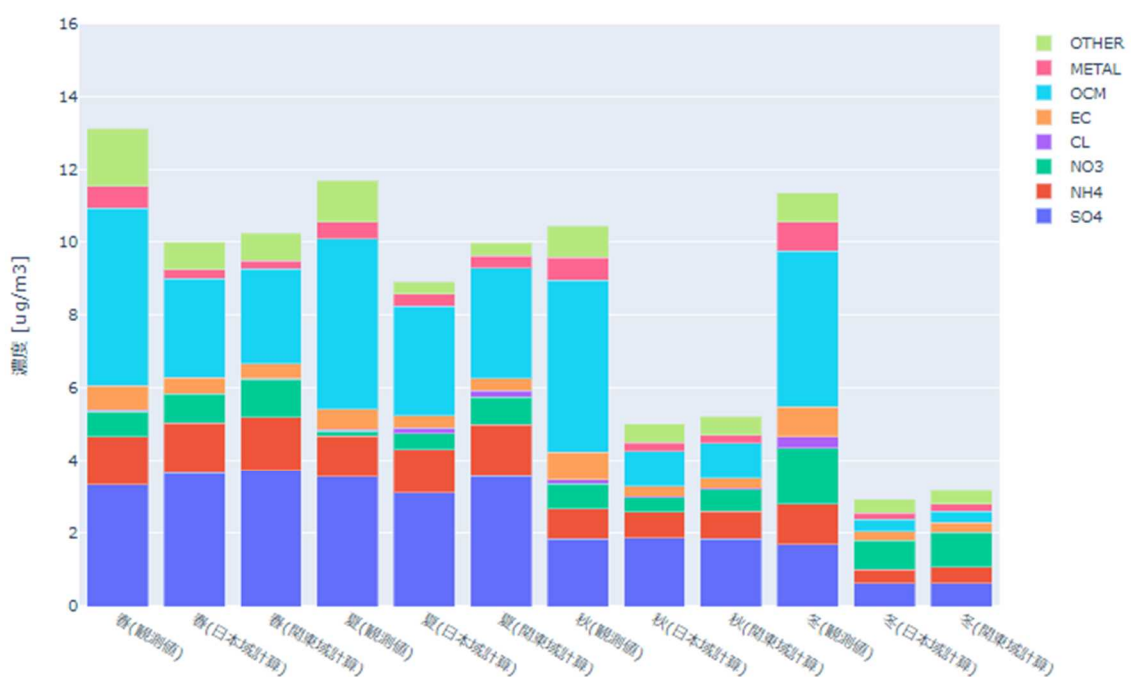


図2 関東のシミュレーション結果と観測値のPM2.5成分の比較
(左図：成分濃度、右図：成分割合)

表3 関東の成分手分析データとシミュレーションの比較統計値⁹

成分	季節	観測値 [μg/m ³]	日本域計算 15 kmメッシュ [μg/m ³]	関東域計算 5 kmメッシュ [μg/m ³]	NMB (日本域計算)	NMB (関東域計算)
SO ₄ ²⁻	春	3.34	3.67	3.75	0.09	0.11
	夏	3.56	3.13	3.58	-0.14	0.01
	秋	1.87	1.87	1.85	0	-0.01
	冬	1.7	0.63	0.64	-1.7	-1.67
NH ₄ ⁺	春	1.34	1.39	1.47	0.03	0.09
	夏	1.15	1.18	1.43	0.03	0.2
	秋	0.81	0.71	0.77	-0.13	-0.05
	冬	1.12	0.39	0.44	-1.85	-1.53
NO ₃ ⁻	春	0.68	0.79	1.05	0.14	0.35
	夏	0.13	0.46	0.74	0.71	0.82
	秋	0.7	0.39	0.59	-0.78	-0.19
	冬	1.56	0.79	0.95	-0.99	-0.64
CL	春	0.04	0.01	0.01	-2.57	-2.62
	夏	0.04	0.16	0.19	0.76	0.8
	秋	0.1	0.02	0.03	-3.93	-2.43
	冬	0.3	0.01	0.01	-29.95	-23.55
EC	春	0.68	0.44	0.41	-0.54	-0.65
	夏	0.55	0.32	0.33	-0.71	-0.69
	秋	0.79	0.29	0.3	-1.71	-1.67
	冬	0.82	0.25	0.26	-2.28	-2.11
OCM	春	4.88	2.72	2.59	-0.8	-0.89
	夏	4.68	3.02	3.02	-0.55	-0.55
	秋	4.7	1	0.97	-3.71	-3.86
	冬	4.26	0.32	0.31	-12.32	-12.74
METAL	春	0.61	0.23	0.23	-1.65	-1.62
	夏	0.48	0.33	0.34	-0.47	-0.41
	秋	0.64	0.22	0.22	-1.87	-1.89
	冬	0.83	0.19	0.2	-3.38	-3.27

(2) ベースラインシナリオにおける将来濃度の推計

① ベースラインシナリオの設定方法

ベースラインシナリオ設定の将来年度は、既存対策をある程度見通せる年として、令和7年度を選定した。以下にベースラインシナリオにおける、排出セクター毎のシナリオ案を示す。

■ 電気業

長期エネルギー需給見通し（資源エネルギー庁、2015）において、省エネ徹底とレファレンス（追加的な省エネ対策なし）の2ケースの総発電電力量が推計されていることから、これを基本として低位・高位のシナリオを検討する。

⁹ これらの統計値は関東地域の一般環境局の平均値である。

■ 製造業、家庭、業務

長期エネルギー需給見通し又は関連する報告書において、省エネ徹底とレファレンスの 2 ケースの最終消費エネルギー消費量が推計されていることから、これを基本として低位・高位のシナリオを検討する。

■ 自動車

排出ガス規制がある一方、次世代自動車の導入目標が掲げられている。両者を考慮した JATOPIII (石油エネルギー技術センター、2018) による推計結果をシナリオの基本とし、次世代自動車の導入量について低位・高位のシナリオを検討する。

■ 作業機械

排出ガス規制に伴うシナリオを検討する。

■ 固定蒸発 VOC

規制強化がないことから、高位シナリオとして「現状維持」を、低位シナリオとして「自主行動計画に伴う削減目標や排出量削減の努力が継続される」場合を想定する。

■ 船舶

2020 年の船舶燃料硫黄分規制強化を考慮したシナリオを検討する。

■ その他

その他の発生源については、基準年度に固定とする。

■ 国外人為起源

中国については 5 カ年計画や排出量の実績値等を踏まえシナリオを検討する。中国以外の地域の発生源については、基準年度固定とする。

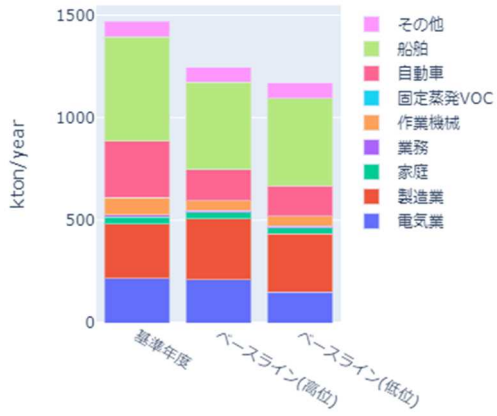
なお、固定燃焼発生源については、考慮されているのはエネルギーの対策のみであり、大気汚染対策の進展までを反映させた将来推計ではない点には注意が必要である。

また、今後は気候変動、EV 自動車や再生可能エネルギーへの転換の加速、諸外国の大気環境状況の変化など、排出源を推定するための環境が大きく変化すると考えられる。そのため、将来推計を行う上でもそれらの情報を取り込んでいくことが今後の課題である。

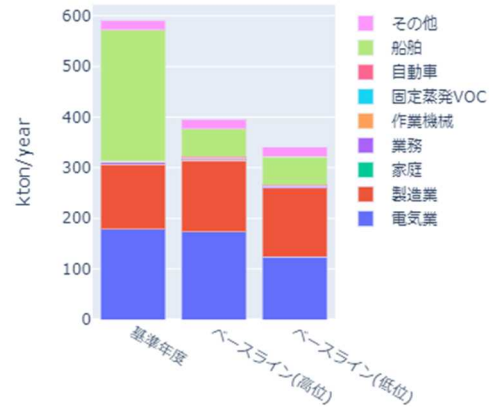
② ベースラインシナリオでの排出量の試算

上述した手法を用いて推計したベースラインシナリオにおける排出量を積み上げグラフで図 3 に示す。

排出量: NOx



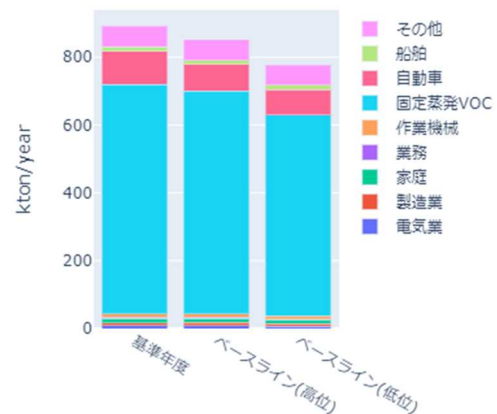
排出量: SOx



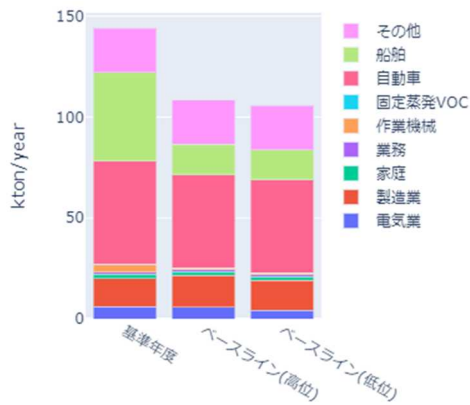
排出量: CO



排出量: VOC



排出量: PM



排出量: PM2.5



図3 基準年とベースラインシナリオ計算で使用した排出量

③ ベースラインシナリオにおける将来濃度推計の結果

前節までで述べた手法で実施したベースラインシナリオ計算の結果を図4に示す。PM2.5年平均値は、どの地域においても1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 程度の減少幅であると推計された。また、高位シナリオと低位シナリオの比較では、低位シナリオの方がより推計濃度が低くなることが示されたが、その違いは0.1~0.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 程度とわずかであった。

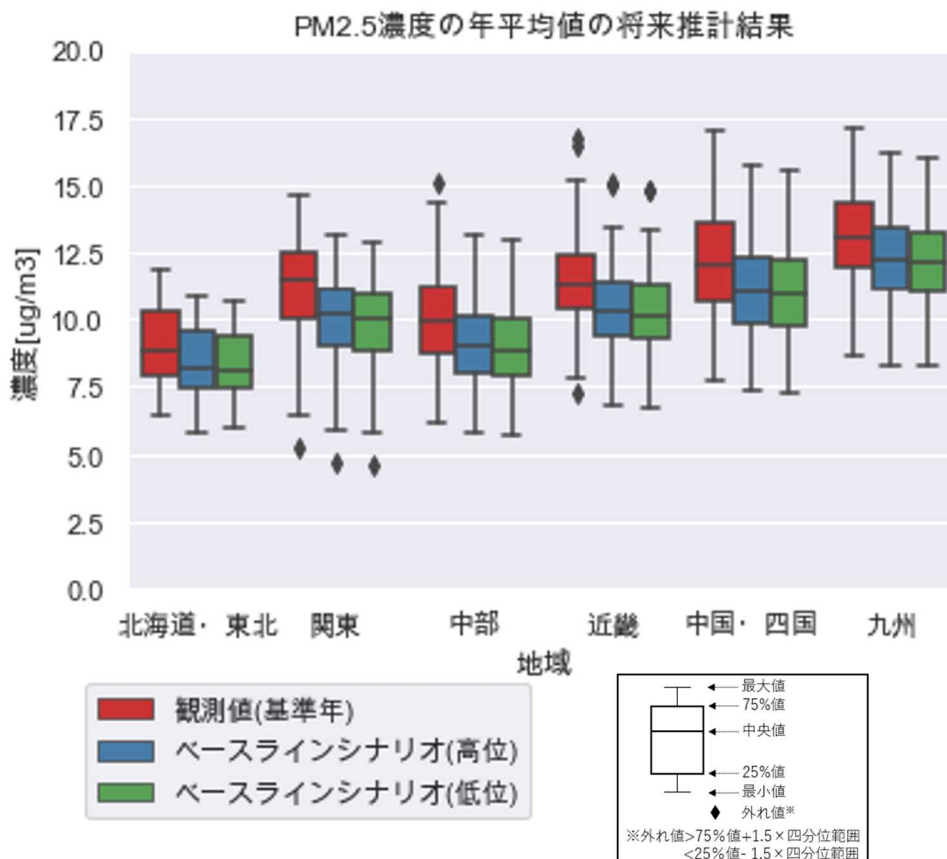


図4 ベースラインシナリオ計算での将来濃度推計（年平均値）

4. 今後の課題

(1) 計算基準年度におけるシミュレーションモデルの再現性の確認

PM2.5濃度に関しては年間平均値の7割から8割の再現性となっていることや、PM2.5の成分によっては過大評価となるもの（夏季の NO_3^- ）や過小評価になるもの（OCMや、寒候期の NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 NH_4^+ ）があった。成分自動測定機のデータなどを活用して、その年変動などの再現性も継続して分析していく必要があるほか、モデル適正化に関しては、現在も活発に研究がなされているため、今後も情報収集を継続し、再現性を向上するための検討を実施していく必要がある。

排出インベントリに関しても、最新の情報が反映されたインベントリを用いた濃度計算を継続的に実行し、その違いなどを考察しながらノウハウの蓄積が必要だと考えられる。

(2) ベースラインシナリオにおける環境基準値達成状況の推移予想

本解析で用いたベースラインシナリオには昨今の情勢の変化などは反映されていないため、起こりうる未来に対応した排出量の推計を実施していくために、例えば以下のような観点での検討が必要と考えられる。

- ・ 再生可能エネルギーや電気自動車の導入促進の影響
- ・ 気候変動対策や技術の進歩などによる大気汚染物質排出量の変化の影響
- ・ 中国・韓国をはじめとした諸外国の排出量の変化や今後の排出規制等の影響

表 I 気象モデル WRF のパラメータ設定

モデル	WRF Ver. 3.9.1	
投影法	ランベルト正角円錐図法	
計算領域	参考資料の図 I のシミュレーション計算領域に従う。	
格子設定 (解像度)	東アジア域	格子解像度 45 km
	中日本域	格子解像度 15 km
	関東	格子解像度 5 km
鉛直層	31 層 (最下層の層厚: 約 22 m)	
気象の境界条件	NCEP-FNL ¹⁰	
積雲対流モデル (積雲の発達・減衰、それに伴う対流による上昇・下降気流などを計算)	Grell 3D Ensemble モデル	
雲微物理モデル (雲粒・雨粒、雪などの成長を計算)	Morrison 2-moment	
短波・長波放射モデル (太陽・地球放射による熱の変動を計算)	RRTMG / RRTMG モデル	
大気境界層モデル (境界層内の乱流の生成・衰退などを計算)	MYNN モデル	
陸面モデル (陸面の状態、陸面の大気への影響を計算)	Noah LSM モデル	
解析値ナッジング	一部あり	
海面温度更新	あり	
ネスティング	1 way	

表 II 化学輸送モデル CMAQ の計算設定

モデル	CMAQ Ver. 5.2	
気象データ	気象モデル WRF の計算結果	
計算領域	参考資料の図 I のシミュレーション計算領域に従う。	
格子設定 (解像度)	東アジア域	格子解像度 45 km
	中日本域	格子解像度 15 km
	関東	格子解像度 5 km
濃度の境界条件	CAM-Chem の計算結果を適用 日本域・関東域: 親領域の計算結果を適用	
移流モデル	Yamo	
水平拡散モデル	Multiscale	
鉛直拡散モデル	acm2	
光解離定数	inline	
反応ソルバー	Ebi	
エアロゾル化学モデル	AER06	
気相モデル	SAPRC07	
液相モデル	cloud_acm_ae6	
沈着モデル	Aero_depv2	

¹⁰ NCEP Global Tropospheric final (FNL) analyses <http://rda.ucar.edu/>

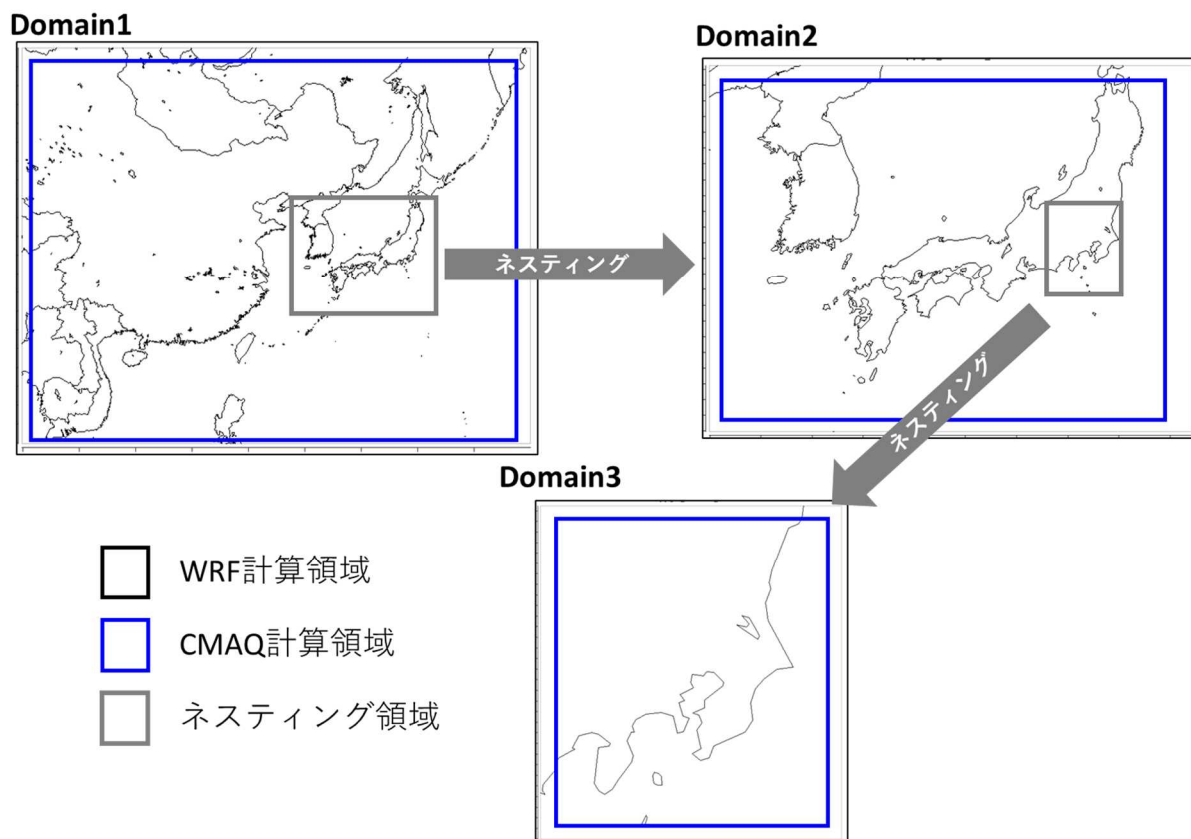


図 I シミュレーション計算領域