

---

 報 告
 

---

## 気象庁領域大気汚染気象予測モデルへの 地上オゾン観測データ同化

池上 雅明<sup>1</sup>・鎌田 茜<sup>1</sup>・梶野 瑞王<sup>2</sup>・出牛 真<sup>1</sup>

### 要 旨

気象庁では、光化学スモッグが発生しやすい気象状態が予測される場合、スモッグ気象情報を発表している。この情報作成のための支援資料として、東アジア域を対象とした領域大気汚染気象予測モデルの予測結果を利用している。今回、大気汚染常時監視測定局で観測された地上オゾン濃度を自動で品質管理し、これを領域大気汚染気象予測モデルにナッジング手法によりデータ同化する仕組みを開発した。2015年4月～9月の期間の全国の観測点が存在する格子についてモデルの地上オゾン濃度時別値の予測精度検証を行ったところ、前日21時から当日3時まで6時間同化をした場合は、しなかった場合と比べて、9時（同化終了から6時間後）では二乗平均平方根誤差の比で10%予測精度の向上が確認できた。しかし、日最大オゾン濃度の出現が多い15時（同12時間後）では、二乗平均平方根誤差の比は2%と精度向上は僅かであった。今後は、日最大オゾン濃度予測精度の向上を目指して、夜間だけでなく日中の観測データもできるだけ同化することや、同化手法の高度化が課題となる。

### 1. はじめに

光化学スモッグは、自動車や工場から排出される二酸化窒素に太陽からの紫外線が反応して発生するオゾンを中心とする光化学オキシダントが高濃度になる現象で、晴れて気温が高く、風が弱い場合に発生しやすくなる。人体には目や喉の痛みを引き起こし、重症の場合は呼吸困難や失神することもある。このため、気象庁では、都道府県と協定を結び、光化学スモッグの発生しやすい気象条件か否かを大気汚染気象ポテンシャルの表現で通報する「大気汚染気象通報」を都道府県に提供するとともに、当日及び翌日に光化学スモッグ

が発生しやすい気象状態が予想される場合に「スモッグ気象情報」を、翌日に日本の広い範囲で光化学スモッグの発生しやすい気象状態が予想される場合には「全般スモッグ気象情報」を発表し住民に注意喚起を行っている。また、都道府県は、光化学オキシダント濃度が120ppbを超えた場合には光化学スモッグ（オキシダント）注意報を、240ppb（一部の県は200ppb）を超えた場合には警報を発令し、住民に注意喚起を行うとともに、工場・事業所などに対しては煤煙や揮発性有機化合物の排出量削減、自動車の使用者に対しては運転の自主的制限を求めるなど大気汚染緊急時対策

---

<sup>1</sup> 地球環境・海洋部環境気象管理官付（気象研究所環境・応用気象研究部 併任）

<sup>2</sup> 気象研究所環境・応用気象研究部

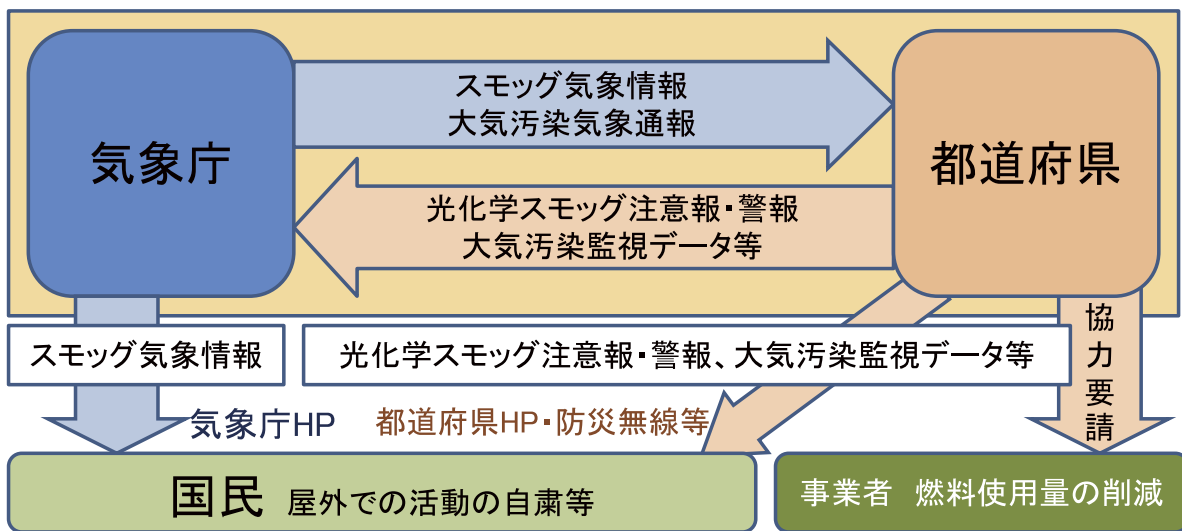
（平成30年1月15日発行）

を実施している（第1図）。

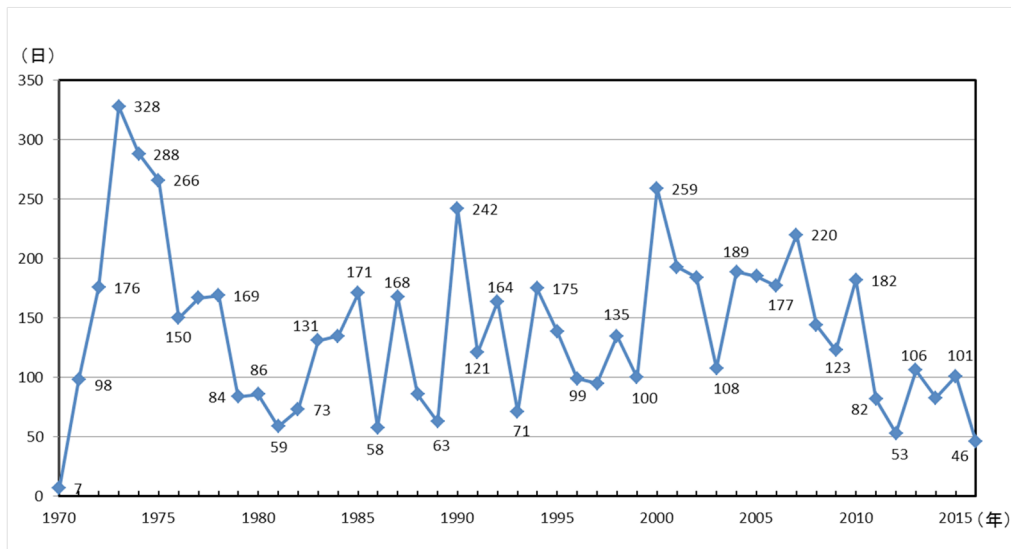
国内の光化学スモッグ（オキシダント）注意報等発令延べ日数は、1973年に328日とピークに達した後に減少に転じたが、1980年過ぎ頃からは増減を繰り返しながらも100日を超える高い頻度が継続している（第2図）。このような中で2007年5月9日に関東から九州にかけての広い範囲で光化学オキシダントが高濃度になり、多くの都府県で光化学スモッグ（オキシダント）注意報が発令される事例があり、新潟県と大分県では

初の発令事例となった。このように大都市や工業地帯だけでなく、普段は高濃度にならないような地域でも光化学オキシダントの高濃度事例が近年増えてきており、初発令の事例が相次いでいる（第1表）。これら広範囲に及ぶ大気汚染現象の原因には、アジア大陸からの移流の可能性が指摘されている（大原ほか、2008）。

このような状況から、2007年6月には九州知事会から気象庁長官に対して、「光化学スモッグ（高濃度光化学オキシダント）の原因究明及び対



第1図 光化学スモッグ対策における気象庁の役割



第2図 国内の光化学スモッグ（オキシダント）注意報等発令延べ日数（環境省水・大気環境局大気環境課，2017）

策に関する緊急要望」, 福岡市議会から国土交通大臣に対して「光化学スモッグ及び黄砂に対する取組を求める意見書」等の要望があった。また, 2007年, 2008年, 2009年の各年に熊本県から気象庁予報部長に対して提出された「国の施策等に関する提案」や, 2010年8月に日本海沿岸地帯振興連盟から各省庁へ提出された「日本海沿岸地帯振興に関する提案・要望書」の中でも広域的な光化学スモッグに対する原因究明・対策を行うことを求められた。

そこで国として対策を行う中で, 気象庁では大気汚染気象予報を改善するべく, これまでの統計的手法に代わって力学的手法を基本とした大気汚染気象予報業務を実施することで, 広域的な光化学スモッグに対応することとし, 気象研究所が開発した全球化学輸送モデル (Deushi and Shibata, 2011) を 2010年2月に気象庁大気汚染気象予報現業に導入した。これにより, 2010年8月から広域に光化学スモッグが発生しやすい気象状態が予想される場合に, 事前に広く周知して注意を喚起する「全般スモッグ気象情報」の発表を開始した。さらに, 2015年3月には, 新たに気象研究所で開発された領域大気汚染気象予測モデルを

全球化学輸送モデルにネスティングしたシステムを導入し, 同情報の改善を行った (池上ほか, 2015)。また, 現業利用だけでなく, 領域大気汚染気象予測モデルを用いた事例検証も行い, 例えば 2013年6月の大雨時に北陸地方で観測された地上オゾン高濃度においては, 低気圧後面で生じる成層圏オゾンの乾燥貫入の影響が示唆される (鎌田ほか, 2016) など現象理解に役立ててきた。

しかし, これら数値モデルではオゾン等大気汚染物質を予測するにあたり, 過去の統計上求められた排出インベントリ<sup>3</sup>のみを地表面境界値に用いていることから, 即時的な現象には十分に対応できないという問題点があった。そこで, モデルのオゾン濃度値を観測値で修正することによりこの問題に対処するため, 大気汚染常時監視測定局<sup>4</sup>で観測された光化学オキシダント濃度を領域大気汚染気象予測モデルにデータ同化する仕組みを開発し, 2017年3月から現業運用を開始した。なお, 大気汚染常時監視測定局で観測される要素名は「光化学オキシダント」であるが, 中性ヨウ化カリウム溶液を用いた吸光光度計法によるオキシダント濃度の測定は1割程度にとどまり, 9割は紫外線吸収法によるオゾン濃度の測定であ

第1表 1991年以降, 光化学スモッグ (オキシダント) 注意報の初発令があった県 (環境省, 2017)

年	県
2006年	長崎県 熊本県
2007年	大分県 新潟県
2008年	長野県 佐賀県
2009年	山形県 鹿児島県
2011年	高知県

<sup>3</sup> 大気汚染物質の排出量推計値を地理的・時間的に配分した一覧表

<sup>4</sup> 大気汚染防止法に基づき, 環境大気汚染状況を常時監視 (24時間測定) する測定局。

る（光化学オキシダント調査検討会, 2012）ため、本稿での表記はオゾンに統一する。

本稿では、このオゾン濃度観測値の同化手法に関する概要と、地上オゾン濃度予測値及び県別日最大オゾン濃度ガイダンス値の精度検証結果について報告する。

## 2. 大気汚染気象予報に用いる数値モデルの概要と運用方法

領域大気汚染気象予測モデルは、計算領域を大陸からの大気汚染物質の移流を考慮してアジア大陸東岸を含む東アジア地域としており、気象モデルに気象庁非静力学モデル（JMA-NHM）を用い、そこで計算した気象場を用いて領域大気質・降水質予測モデル（RAQM2；Kajino *et al.*, 2012）でオゾン濃度などの大気微量成分の化学反応による生成・消滅及び輸送を計算し、大気微量成分の空間分布と変動を計算する。領域大気汚染気象予測モデルの主なスペックを第2表に示す。

気象場の初期値には気象庁全球解析値を、境界値には気象庁 GSM 予報値を用いる。さらに、上部対流圏と成層圏の大規模場成分について、スペクトルナッジング<sup>5</sup>により GSM 予報値の長波長

成分を同化することによって、現実の気象場から大きく乖離しないような工夫を施している。化学場は、前回の予測結果を初期値としている。境界値には全球化学輸送モデルで計算された値を用いることで、大気汚染物質のモデル側面境界からの移流を考慮している。化学場の下部境界条件となる、人為・自然起源による化学種の大気への排出量は、排出インベントリに基づき、地表境界面から境界値として逐次モデル内に与えられる。

今回、化学場のオゾン濃度値を地上オゾン観測データで修正するためのデータ同化手法を新たに導入した。同化に使用する観測データは、大気汚染常時監視測定局（約 1,200 地点）の地上オゾン観測の 1 時間平均値である。この観測値を、後述するナッジング手法でモデルに同化する。

気象庁大気汚染気象予報現業における領域大気汚染気象予測モデルによる計算ジョブは毎日 04 時（日本時間）に開始される。これは、毎朝の大気汚染気象予報現業作業に確実に計算結果が間に合うように設計されているためである。この時のモデルの計算初期時刻は前日の 21 時である。そこで、前日の 21 時から観測データの入手可能な 03 時までの 6 時間分について地上オゾン観測値

第2表 領域大気汚染気象予測モデルの諸元

気象モデル	JMA-NHM
解像度（格子数）	水平 20km（210×150）、鉛直 18 層
計算領域	およそ東経 100 度～東経 145 度、北緯 23 度～北緯 50 度
化学種	72 種
化学反応	214 反応（SAPRC99）
放出源	REAS1.1, GFED3, MEGAN2
乾性沈着	抵抗モデル
湿性沈着	雲内除去、降水除去

<sup>5</sup> ある特定の水平規模以上の気象擾乱成分に対してのみナッジングする手法

の同化を実施する。03 時以降は観測値が無い予報計算となり、翌々日まで 3 日間 (72 時間) の予測計算を行う。

### 3. データ同化に係る手法

#### 3.1 地上オゾン観測データの品質管理

モデルの化学場へのデータ同化に用いる地上オゾン観測データは、大気汚染常時監視測定局のうち、自動車排出ガス測定局を除く一般大気環境測定局 (以下「測定局」) による観測値である。環境省では、測定局において観測された地上大気汚染物質濃度の 1 時間値を地方自治体から収集し、環境省大気汚染物質広域監視システム (<http://soramame.taiki.go.jp/>) で速報値を公開している。これらのデータは明らかな異常値を判断する限界値チェックが施されているが、それでも異常値を含む可能性が十分あるため、地方自治体によるデータ検証を経て国立環境研究所より約 2 年後に確定値が公開される。調査研究等でのデータ解析に利用する際は確定値を用いることが推奨されている。しかし、気象庁の日々の予報においては、即時的に入手が可能な速報値を利用せざるを得ない。他方、地上オゾン観測データを領域大気汚染気象予測モデルに同化する際、異常値が紛れ込むと同化解析精度に悪影響を与え、予測精度にも悪影響を及ぼす。このため、今回のデータ同化システム構築にあたっては、速報値から異常値を除去する品質管理を即時的に自動で行えるようにした。

地上オゾン観測データの速報値に適用する品質管理手法は、明らかな異常値を判断する限界値チェック ( $QC_L$ )、近隣の測定局との相違を確認する空間チェック ( $QC_{S1}$ ,  $QC_{S2}$ )、及び、前時間値からの変化量に閾値を設ける時系列チェック ( $QC_{T1}$ ,  $QC_{T2}$ ) (観測部計画課情報管理室, 2011) を組み合わせたもの ( $QC_{ALL}$ ) である (第 3 図)。まず、 $QC_L$  で限界値 250 ppb を超えるデータを異常値と判定する。次に測定局の半径 50km 以内に存在するデータ (近い順に 6 ~ 10 地点を抽出) の平均値  $\mu$  との差が標準偏差  $\sigma$  の 5 倍以上の場合 (空間チェック  $QC_{S1}$ ) や、1 時間前からの濃度変化が 90ppb 以上の場合 (時系列チェック  $QC_{T1}$ )

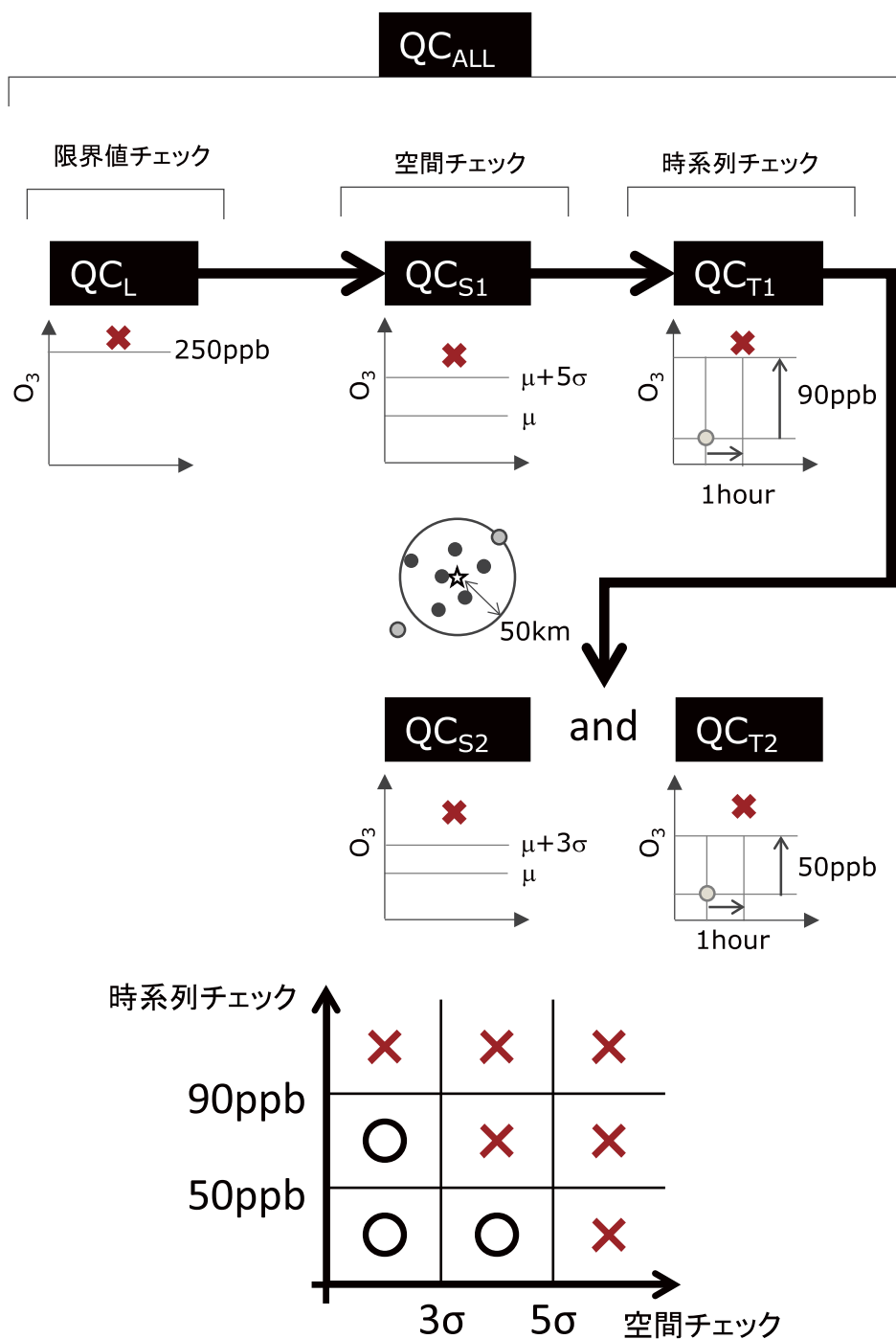
にも異常値と判定する。さらに、 $\mu$  との差が  $\sigma$  の 3 倍以上の場合 (空間チェック  $QC_{S2}$ ) で、かつ、1 時間前からの濃度変化が 50ppb 以上の場合 (時系列チェック  $QC_{T2}$ ) も異常値と判定する。

このような品質管理を速報値に施すことにより、どの程度異常なデータを除去できたかを調べるため、第 3 表のように、(A) 品質管理の判定結果と約 2 年後に国立環境研究所から公開される確定値がともに正常と判定されたもの、(B) 品質管理の判定結果は正常であるが確定値では異常と判定されたもの、(C) 品質管理の判定結果は異常であるが確定値では正常と判定されたもの、(D) 品質管理の判定結果と確定値がともに異常と判定されたもの、に分類し、 $(B + C) / \text{total}$  ( $\text{total} = A + B + C + D$ ) がどの程度 0 に近づくかで評価した。品質管理手法を適用することで全て正確に正常もしくは異常であると判定できた場合 (確定値の判断と全く同じに判定できた場合)、理想的には、B 及び C はともに 0 となる。評価に使用した速報値及び確定値は 2010 年 4 月 ~ 2013 年 3 月に一般環境大気測定局 1,191 地点で観測された地上オゾン観測データ及びその品質管理情報である。このうち、データ同化に使用される前日 21 時 ~ 当日 03 時の観測データのうち、特に初期値解析及び予報への影響が大きいと考えられる 80ppb 以上を抽出した。さらに速報値と確定値で値が異なるデータを除外し、残る 4,423 例について解析した結果を第 4 表に示す。速報値そのままの場合、 $(B + C) / \text{total}$  は 9.7% であったが、 $QC_{ALL}$  後には 2.6% まで減少した。また、 $QC_{ALL}$  は  $QC_{S1}$ ,  $QC_{T1}$  単独よりも適切な品質管理であることがわかる (第 4 表)。

品質管理後、領域大気汚染気象予測モデルの各格子内に存在する品質管理 ( $QC_{ALL}$ ) 後の観測値を平均し、格子点値化した。ここではモデル格子点と測定局との距離を考慮した加重平均ではなく、測定局数を分母とする算術平均を用いた。各格子領域に含まれる測定局数を、第 4 図に示す。

#### 3.2 観測データ同化手法

地上オゾン観測値を同化する手法として、今回ナッジング手法を導入した。ナッジング手法は、



第 3 図 品質管理手法模式図

QC<sub>L</sub>は観測値が250 ppb以上であれば異常値とする限界値チェックを示す。QC<sub>S1</sub>(S<sub>2</sub>)は測定局から半径50km以内の測定局から近い順に6~10地点以内の濃度平均値 $\mu$ から標準偏差 $\sigma$ の5(3)倍以上であれば異常値とする空間チェックを示す。QC<sub>T1</sub>(T<sub>2</sub>)は1時間前の観測値との差が90(50)ppb以上であれば異常値とする時系列チェックを示す。QC<sub>ALL</sub>はQC<sub>L</sub>, QC<sub>S1</sub>, QC<sub>T1</sub>, QC<sub>S2</sub>, QC<sub>T2</sub>を組み合わせた総合チェックである。

予報値をある時定数で観測値に近づけるための強制項を，その予報変数の時間発展を解く微分方程式に追加して時間積分する手法である．ナッジング計算は各モデル格子点上で行われるため，あらかじめ観測値も格子点値化しておく．ただし今回導入したナッジング手法では，その計算を鉛直方

向にも拡張して，大気境界層内にあるモデル格子点値について，次式に示すナッジング強制項により同化修正を行っている．

$$\gamma \left( x_{obs} \frac{x_{mdl,k} - x_{mdl,1}}{x_{mdl,1}} - x_{mdl,k} \right)$$

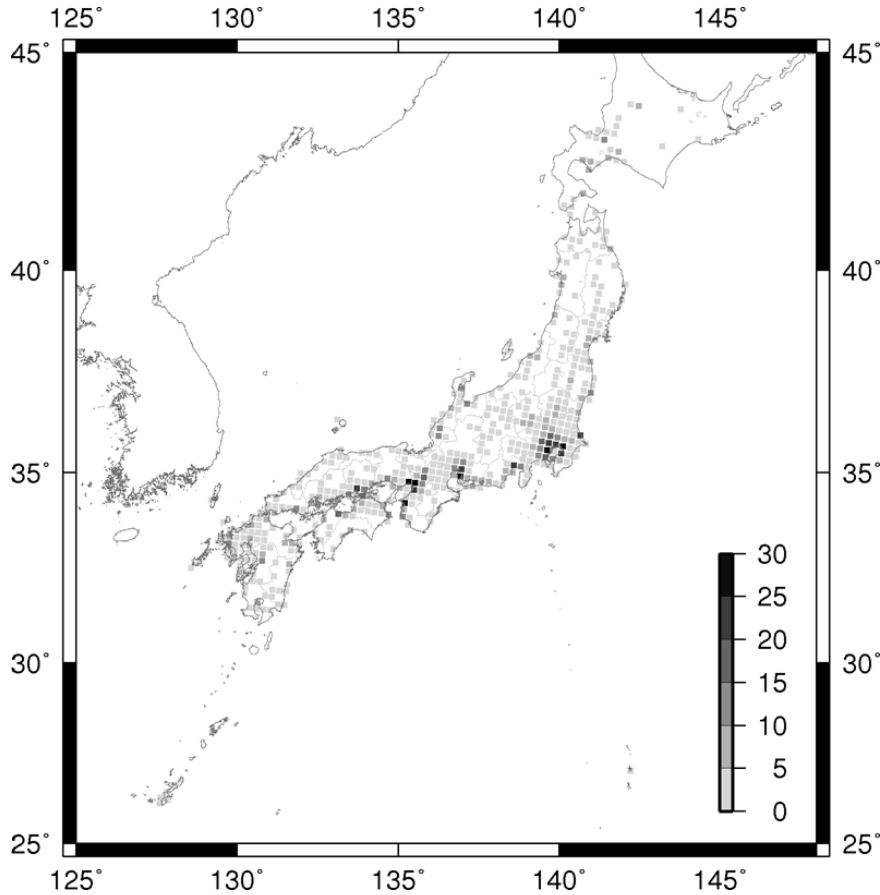
ここで， $x_{obs}$ は要素の観測値， $x_{mdl,1}$ はモデル鉛直

第 3 表 観測データの分類

		確 定 値	
		正 常	異 常
品 質 管 理 後	正 常	A	B
	異 常	C	D

第 4 表 各手法別品質管理結果

	A	B	C	D	(B+C)/total
QC なし (速報値)	3957	428	0	38	9.7%
QC <sub>S2</sub>	3875	286	82	180	8.3%
QC <sub>T2</sub>	3954	291	3	175	6.7%
QC <sub>ALL</sub>	3899	48	68	418	2.6%



第4図 領域大気汚染気象モデルの各格子内に含まれる一般大気環境測定局数

1層目（最下層）の要素のモデル値、 $x_{mdl,k}$ はモデル鉛直k層目の要素のモデル値、 $\gamma$ はナッジング係数である。 $\gamma$ は、いくつか感度実験を実施した後  $1.0 \times 10^{-3} [s^{-1}]$ と設定した。境界層の高さはJMA-NHMによって診断的に計算され、その求め方は、仮温位の鉛直プロファイルを見て、仮温位が大気最下層の仮温位を上回る高度を境界層の高さとする方法を取っている。

#### 4. 地上オゾン観測値の同化がモデル予測結果に与えるインパクト調査

##### 4.1 モデルの検証

モデルの地表面オゾン濃度について、地上オゾン観測値の同化の有無による検証を行った。検証期間は2015年4月～9月である。検証用データとして、測定局で観測されたオゾン濃度の1時間値を使用した。検証期間における、観測のある全格子において、モデルの地上オゾン濃度について

検証したところ、同化終了後から高いオゾン濃度が出現しやすい時刻までの期間（04時から20時）の平均では、同化の有無の違いによって、平均誤差は+8.9ppbから+6.6ppbに、2乗平均平方根誤差（RMSE）は15.7ppbから13.7ppbに、相関係数は0.61から0.69に、いずれも改善した（第5表）。

次に、同化の有無によるRMSEの比を用いて、次式のように改善率を定義し、その時間推移について調べた（第5図）。

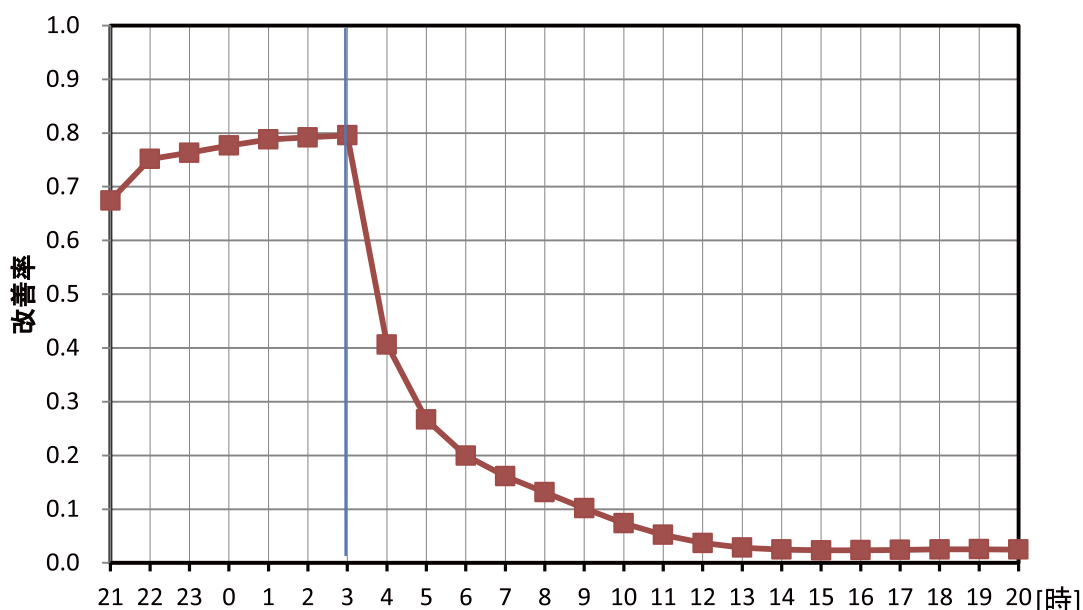
$$\text{改善率} = 1 - \frac{RMSE_{\text{同化あり}}}{RMSE_{\text{同化なし}}}$$

前日21時から当日03時まで6時間同化をした場合は、しなかった場合と比べて、9時（同化終了から6時間後）ではRMSEの比で10%の予測精度向上が確認できた。しかし、日最大オゾン濃度の出現が多い15時（同12時間後）では、RMSEの比は2%と精度向上は僅かであった。



第 5 表 領域大気汚染気象予測モデルの検証結果

モデル	平均誤差	RMSE	相関係数
同化なし	8.9 ppb	15.7 ppb	0.61
同化あり	6.6 ppb	13.7 ppb	0.69



第 5 図 地上オゾン観測値の同化の有無によるオゾン濃度予測の改善率の時別値 (2015 年 4 月から 9 月における観測のある全格子の平均)

#### 4.2 県別日最大オゾン濃度ガイダンスの検証

2013 年～2016 年の暖候期 (4 月から 9 月) について計算したモデル結果を用いて得られたガイダンス値の検証を行った (ガイダンスの作成手法については、付録参照)。スモッグ気象情報では、120ppb を超える予測の有無を発表の基準にしている。このため、光化学オキシダント濃度 120ppb をしきい値として現象の有無を区別した際のスレットスコアをもとめた。

その結果、期間中のスレットスコアの全国平均は、同化を行った場合は 0.33、同化しなかった場合は 0.32 と予測の改善は微増にとどまった。

#### 5. まとめと今後の課題

領域大気汚染気象予測モデルに地上オゾン観測値をナudging手法により同化する改善を実施した。その結果、地上オゾン濃度の予測精度の向上が得られた。ただし、日最大オゾン濃度の予測精度向上は僅かであったため、大気汚染気象予報現業作業で用いられる、県別日最大オゾン濃度ガイダンスの予測精度向上も小さかった。これは、同化を実施した時間帯が、一般的にオゾン濃度の低い夜中 (前日 21 時～当日 03 時) のみであったため、日中に新たに生成されるオゾンモデルに同化できず、日中の最高濃度の予測精度を十分に向上させることができなかつたためと考えられる。

また、ナッジング手法を用いたため、同化が行われるモデル格子は観測値の存在する格子のみに限られ、空間的に十分な広がりを持って修正されていない点も挙げられる。さらに、同化要素がオゾンのみであったことも、対流圏の光化学反応過程を考慮すると十分ではなかった。

今後は、日最大オゾン濃度の予測精度を向上させるため、夜間のデータだけでなく濃度の上昇する日中のデータも同化できるようにしたい。そのために、現在の日に1回のモデル実行頻度を増やし、日中にも実行した場合について、調査する予定である。また、2次元変分法などへ同化手法を高度化することや、オゾン以外の関連する汚染物質の同化についても課題になる。

### 謝辞

本研究の一部はJSPS 科研費 16H04051 の助成を受けたものです。

### 参 考 文 献

Deushi, M., and K. Shibata (2011): Development of a Meteorological Research Institute Chemistry Climate Model version 2 for the Study of Tropospheric and Stratospheric Chemistry. *Papers in Meteorology and Geophysics*, **62**, 1-46.

池上雅明・鎌田茜・中務 信一 (2015) : 第7章 大気汚染気象予測モデル. 量的予報技術資料 (予報技術研修テキスト), 133-140.

Kajino, M., Y. Inomata, K. Sato, H. Ueda, Z. Han, J. An, G. Katata, M. Deushi, T. Maki, N. Oshima, J. Kurokawa, T. Ohara, A. Takami, and S. Hatakeyama, (2012): Development of the RAQM2 aerosol chemical transport model and predictions of the Northeast Asian aerosol mass, size, chemistry, and mixing type. *Atmos. Chem. Phys.*, **12**, 11833-11856.

鎌田茜・直江寛明・池上雅明・出牛真・梶野瑞王・眞木貴史 (2016) : 梅雨前線による大雨時に北陸地方で観測された光化学オキシダント高濃度事例: 成層圏オゾンの乾燥貫入に関する考察. *大気環境学会誌*, **51**, 144-152.

環境省水・大気環境局大気環境課 (2017) : 平成28年光化学大気汚染の概要. (<http://www.env.go.jp/>

[press/files/jp/105422.pdf](http://www.env.go.jp/press/files/jp/105422.pdf), 2017年10月2日参照)

環境省 (2017) : 各都道府県における注意報等発令延日数及び発令都道府県数の推移. ([http://www.env.go.jp/air/osen/oxidant/days\\_adv.pdf](http://www.env.go.jp/air/osen/oxidant/days_adv.pdf), 2017年10月2日参照)

光化学オキシダント調査検討会 (2012) : 光化学オキシダント調査検討会報告書—今後の対策を見ずえた調査研究のあり方について—. ([https://www.env.go.jp/air/osen/pc\\_oxidant/conf/chosa/rep201203/01.pdf](https://www.env.go.jp/air/osen/pc_oxidant/conf/chosa/rep201203/01.pdf), 2017年10月2日参照)

大原利眞・鶴野伊津志・黒川純一・早崎将光・清水厚 (2008) : 2007年5月8, 9日に発生した広域的な光化学オゾン汚染—オーバービュー—. *大気環境学会誌*, **43**, 198-208.

観測部計画課情報管理室 (2011) : 部外雨量データの収集と利用について—他機関観測データ収集・高度利用装置の概要—. *測候時報*, **78**, 141-161.

### 付録

1. 県別日最大オゾン濃度ガイダンス作成手法  
気象条件による光化学オキシダント高濃度大気汚染の発生可能性を各都道府県別に予測するために、47都道府県別にガイダンスを作成した。本ガイダンスの手法として、モデルが予測した各都道府県領域を含むモデル格子の地上オゾン濃度の日最大値 (県別モデル日最大値) を説明変数、各都道府県内の測定局で観測されたオゾン濃度の日最大値 (県別観測日最大値) を目的変数とした頻度バイアス補正を用いている。

頻度バイアス補正は、頻度分布が異なるモデルと観測のオゾン日最大濃度値の関係性を適切に求めるために導入している。県別観測日最大値について80ppb以下、80～100ppb、100～120ppb、120ppb以上の4つのカテゴリの出現頻度をあらかじめ統計的に求める。別途、県別モデル日最大値を低濃度から高濃度まで4つの濃度領域に分けた場合に、それぞれの出現頻度が県別観測日最大値の各カテゴリの出現頻度と同じになるよう、県別モデル日最大値のカテゴリしきい値を求めることで、頻度バイアス補正の係数 (ガイダンス係数) を得る。なお、オゾン濃度の日最大値の出現傾向

は季節性があるため、ガイダンスは月別に作成する。