

## 第7章 大気汚染気象予測モデル\*

### 7.1 はじめに

光化学スモッグは、窒素酸化物（NO<sub>x</sub>）と揮発性有機化合物（VOC）が光化学反応を起こして生成される高濃度の光化学オキシダントを含む大気汚染物質により視程が悪くなる現象で、その発生や継続には、風が弱い、日射が強い、気温が高いなどの気象条件が大きく影響する。

このため、気象庁では都道府県と大気汚染に関する協定を結び、主に統計的手法により求めた、気象条件による光化学スモッグの発生の可能性を示す大気汚染気象ポテンシャル（0：光化学オキシダント濃度80ppb未満相当、1：80ppb以上～120ppb未満相当、2：120ppb以上相当の3段階）を「大気汚染気象通報」として都道府県に提供している。また、光化学スモッグが発生しやすい気象状況が予想される場合には、「スモッグ気象情報」を発表して、一般住民や都道府県に注意を促している。さらに、関東地方と九州北部地方においては、移流拡散モデル（高野，2008）を用いて光化学スモッグの発生しやすい地域（最小単位は一次細分区域）や時間帯（1時間単位）を予測する、詳細な「スモッグ気象情報」の発表も行っている。

一方、都道府県は、光化学オキシダント濃度が120ppb以上になり、気象条件からみてその状態が継続すると認められる場合に光化学オキシダント注意報を、また、240ppb（一部の県は200ppb）以上で、気象条件からみてその状態が継続すると認められる場合に光化学オキシダント警報を発令し、一般住民に対して周知を行うとともに、工場・事業所などに対してはばい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を実施している。なお、光化学オキシダント注意報・警報は、都道府県をかなり細かい地域に分割して発令している（例えば、東京都では8区分）。

近年、これまで光化学スモッグの発生がほとんどなかった九州西部や北陸、東北地方などで光化学オキシダント注意報が発令されるようになってきている。これらの地方では大気汚染物質の排出量が少ないと考えられるため、光化学スモッグが発生する原因としては大陸からの大気汚染物質の移流の可能性が指摘されている（大原ら，2008）。

このような状況を踏まえ、気象庁では、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ため、気象研究所が開発した全球大気汚染気象予測モデル（MRI-CCM2, Deushi and Shibata, 2011、以下「全球モデル」という）を導入した。これにより、平成22年8月からは広域に光化学スモッグが発生しやすい気象状況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ため、全般スモッグ気象情報の発表を開始した。

最近、気象研究所は水平解像度が約20kmの領域大気汚染気象予測モデル（NHM-Chem、以下「領域モデル」という）を新たに開発した。大気汚染気象予報業務で必要とされる詳細な予測に対応するため、気象庁は全球モデルにネスティングさせた領域モデルを平成26年度末に導入し、さらなる情報の改善を図る予定である。

本章では、大気汚染気象予測モデルの概要およびモデルやガイダンスの精度検証結果に加え、領域モデルやそのガイダンスを用いた実際の予報例や今後の改善計画について述べる。

なお、大気汚染気象予測モデルの精度検証の結果、領域モデルの水平解像度は約20kmであり、全球モデルの約110kmに比べて細かいため、都道府県別の日最大の地上オゾン濃度の再現性が良くなった。また、領域モデルの各格子とも地上オゾン濃度の日変化や日々の変動を良く再現しており、領域モデルは全球モデルに比べて高濃度のオゾン分布を良く表現していた。また、ガイダンスについては、春季（4月～5月）と夏季（6

\*池上 雅明、鎌田 茜（気象庁地球環境・海洋部環境気象管理官付）、中務 信一（気象庁予報部予報課大気汚染気象センター）

月～9月)を通じて、領域モデルによるガイダンスの方が全球モデルのガイダンスに比べ適中率、補足率ともに成績が改善した。

## 7.2 大気汚染気象予測モデルの概要

全球モデルは、大気大循環モデル(以下「気象モデル」という)にMRI-AGCM3(Mizuta et al., 2006)を用い、そこで求めた気象場を用いて化学輸送モデルでオゾンなどの大気微量成分の化学反応による生成・消滅および輸送を計算し、大気微量成分の空間分布と変動を予測する。気象場計算においては、現実の気象場から大きく離れないように、風向・風速についてGSM解析値・予報値を用いて時定数6時間でナッジングを行っている。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」と呼ばれる大気汚染物質の排出量推計を地理的・時間的に配分した一覧表に基づき、地表境界面から境界値として毎時モデル内に与えられる。気象場および化学場の初期値は、前イニシャル時刻の予測値を引き継いでいる。

一方、領域モデルは、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化学輸送モデル(RAQM2, Kajino et al., 2012)でオゾン濃度などを計算する。気象場計算におけるナッジングは行っていないが、気象場の初期値と境界値にGSM解析値・予報値を用いることで、現実の気象場から大きく離れないようにしている。化学場の境界値には全球モデルで計算された値を用いることで、大気汚染物質の境界からの移流を考慮している。排出インベントリについても、全球モデルと同様に、地表境界面から境界値として与えられる。

全球モデルと領域モデルの主なスペックを第7.1表に示す。

第7.1表 大気汚染気象予測モデルの主なスペック

気象モデル	全球モデル	領域モデル
力学フレーム	全球スペクトルモデル	非静力学モデル
気象モデル名	MRI-AGCM3 (GSMUV)	JMA-NHM
解像度	水平約 110km, 鉛直 48 層 (TL159L48, ~0.01hPa)	水平 20km, 鉛直 40 層 (~約 40hPa)
時間積分	セミ・インプリシット法	スプリット-イクスプリシット法
移流スキーム	鉛直保存セミラグランジアン法	4 次フラックス形式、移流補正
積雲対流	Yoshimura	Kain-Fritsch、相対湿度に依存するトリガー関数
放射過程	2 方向近似 (JMA2004R1)	北川 (2000)、藪ほか (2005)
乱流拡散	Mellor-Yamada (Level2)	改良 Mellor-Yamada (Level3)
ナッジング	全球解析・予報値 (u, v)	なし
化学輸送モデル	全球モデル	領域モデル
解像度	水平約 110km, 鉛直 48 層 (~0.01hPa)	水平 20km, 鉛直 18 層
化学種	90 種 (長寿命 64、短寿命 26)	72 種
化学反応	247 反応	214 反応 (SAPRC99; Carter, 2000)
放出源	EDGAR v2.0, GEIA, REAS1.1 など	REAS1.1, GFED3, MEGAN2
乾性沈着	抵抗モデル	抵抗モデル
湿性沈着	雲内除去、降水除去	雲内除去、降水除去
移流	鉛直保存セミラグランジアン法	MPMAA (Walcek and Aleksic, 1998)

### 7.3 大気汚染気象予測モデルの精度検証

大気汚染気象予測モデルの精度検証に用いたデータは、2009年～2013年の期間において各都道府県など（大気汚染防止法上の政令市を含む）の大気汚染常時監視測定局（以下「測定局」という）で測定された光化学オキシダントの1時間値である（2009年～2011年は有効なデータかどうか検証するデータスクリーニング済みの確定値、2012年～2013年は速報値を気象庁でデータスクリーニング済み）。ここで、大気汚染気象予測モデルの予測要素はオゾンだが、測定局で測定される光化学オキシダントのほとんどはオゾンと考えられるため、過去の先行研究（大原ら、2008；環境省、2012）と同様に、光化学オキシダントをオゾンとみなして精度検証を行った。

大気汚染気象予測モデルの精度検証の結果、領域モデルの水平解像度は約20kmであり、全球モデルの約110kmに比べて細かいため、都道府県別の日最大の地上オゾン濃度の再現性が良くなった。また、領域モデルの各格子とも地上オゾン濃度の日変化や日々の変動を良く再現しており、領域モデルは全球モデルに比べて高濃度のオゾン分布を良く表現していた。

#### 7.3.1 大気汚染気象予測モデルの精度検証の結果

全球モデルと領域モデルの予測精度を比較するために、両モデルの日別の地上オゾン濃度の予測値について精度検証を行った。なお、精度検証の期間は2009年4月～2013年9月である。

各都道府県に対応するモデル格子の日最大の地上オゾン濃度の予測値（全球モデルは対象となる都道府県に最も近い格子の値、領域モデルは対象となる都道府県に含まれる格子の中の最大値）と、都道府県内の測定局で測定された日最大の光化学オキシダント濃度を比較した。

検証期間について、各モデルにおける都道府県別の日最大の地上オゾン濃度の精度検証結果の全国平均を第7.2表に示す。

全球モデルに比べて領域モデルは平均誤差と平方根平均二乗誤差は小さく、相関係数は大きかった。領域モデルの水平解像度は約20kmであり、全球モデルの約110kmに比べて細かいため、都道府県別の日最大の地上オゾン濃度の再現性が良くなった。

第7.2表 各モデルにおける都道府県別の日最大の地上オゾン濃度の精度検証結果の全国平均

モデル名	平均誤差 (ppb)	平方根平均二乗誤差 (ppb)	相関係数
領域モデル	+0.3	13.5	0.74
全球モデル	-12.3	19.9	0.62

#### 7.3.2 領域大気汚染気象予測モデルの地上オゾン濃度の時系列変化の再現性

全国で高濃度の光化学オキシダントが発生しやすい地域（東京、名古屋、大阪）に対応する領域モデルの各格子の地上オゾン濃度の時別の予測値と、測定局で測定された光化学オキシダントの領域平均した時別値（位置ずれを考慮し、領域モデル格子を中心とする40km四方の範囲内にある測定局の1時間値の平均、以下「実況値」という）の時系列を第7.1図に示す。

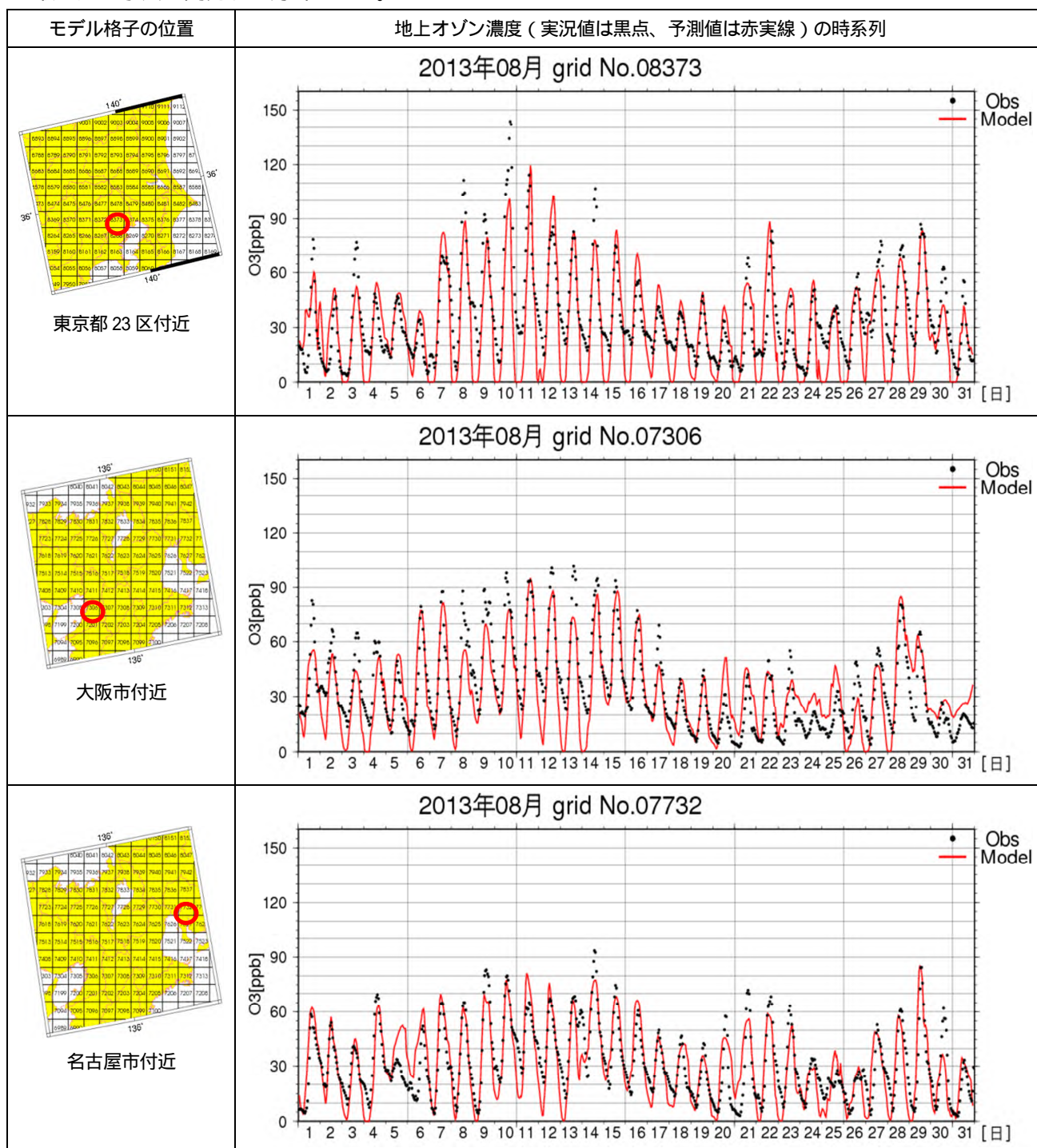
領域モデルの各格子の地上オゾン濃度の時別の予測値は、日変化や日々の変動を良く再現している。

ただし、東京都23区付近の格子で言えば2013年8月10日など、各格子で日最大の実況値を領域モデルでは予測できていない事例が見られる。これは、大気汚染物質の排出量に実況値ではなく排出インベントリを用いているため、大気汚染物質の排出量や蓄積量が実際と大きく異なってしまったためと考えられる。

また、東京都23区付近の格子は2013年8月10日～18日、大阪市付近は8月11日～14日の期間を中心に、領域モデルによる夜間の地上オゾン濃度の予測値が実況値に比べてかなり小さくなっている。これは、お盆

期間で工場・事業所などからの窒素酸化物 (NOx) の排出量は少なかったにもかかわらず、領域モデル内では通常の期間と同量の窒素酸化物 (NOx) が排出されたことにより、一酸化窒素 (NO) によるタイトレーション効果 (一酸化窒素 (NO) がオゾンと反応して二酸化窒素 (NO2) になることで同量のオゾンを減少させること) が効きすぎたことが一因として考えられる。

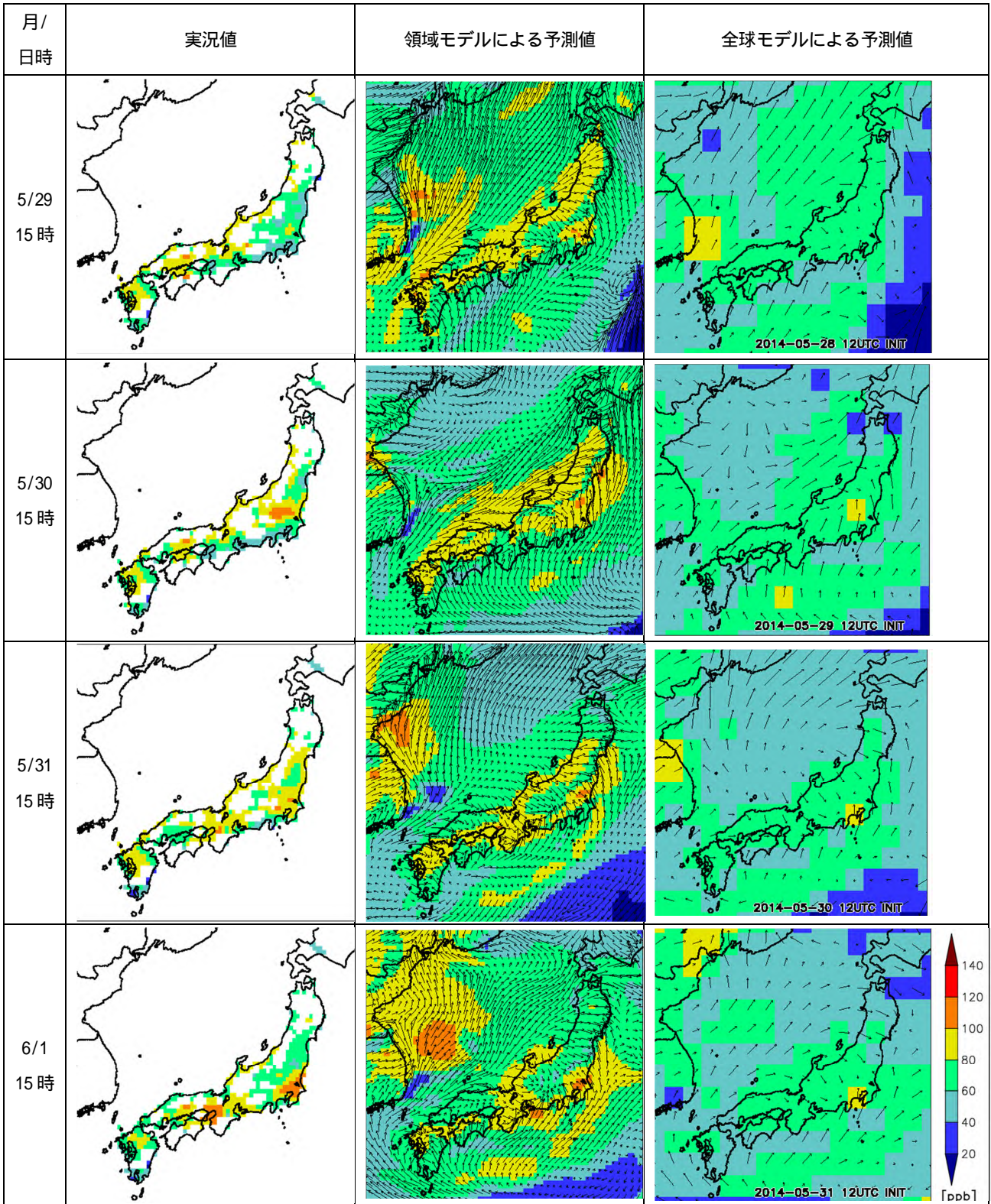
このように、大気汚染物質の排出パターンが通常と異なった場合、結果として地上オゾン濃度をうまく予測できない場合がある。このため、今後、化学輸送モデルの初期場に測定局で測定された大気汚染物質の値を取り込む手法を開発する方針である。



第 7.1 図 領域モデルの各格子の地上オゾン濃度の実況値 (黒点) と予測値 (赤実線) の時系列図

### 7.3.3 光化学オキシダント高濃度事例におけるモデルの地上オゾン濃度分布の再現性

2014年5月29日から6月2日にかけて全国的に光化学オキシダント濃度が上がり、多くの地方で100ppb以上の濃度を測定した事例について、測定局で測定された光化学オキシダントの領域平均した時別値（実況値、作成手法は7.3.2と同様）領域モデルと全球モデルの地上オゾン濃度の予測値を第7.2図に示す（6月2日については省略）。なお、5月26日から6月2日にかけては日本各地に黄砂も飛来していた。



第7.2図 2014年5月29日から6月1日の15時における地上オゾン濃度分布図

例示した全ての期間において、日本海側や東海、近畿、中国地方などでは、実況値に見られる 80ppb 以上（黄色）の高濃度域の分布を領域モデルは全球モデルに比べて良く表現している。関東地方においても、領域モデルは全球モデルより高解像となったことから、100ppb を超える高濃度域の分布の予測が改善されていることが確認できた。

#### 7.4 領域大気汚染気象予測モデルのガイダンス

モデルでは、格子内の平均的な地上オゾン濃度を予測する。一方、大気汚染気象予報現業では、気象条件による高濃度な光化学スモッグの発生の可能性を示す大気汚染気象ポテンシャル（以下「ポテンシャル」という）の形で予測する。このため、領域モデルによる地上オゾン濃度の予測値からポテンシャルに翻訳するガイダンスを都道府県別に作成した。なお、春季（4月～5月）と夏季（6月～9月）を通じて、領域モデルによるガイダンスの方が全球モデルのガイダンスに比べ適中率、補足率ともに成績が改善した。

##### 7.4.1 領域大気汚染気象予測モデルのガイダンス作成方法

都道府県別のガイダンスを、光化学スモッグが発生しやすい暖候期（4月～9月）について月別に作成し、光化学スモッグがほとんど発生しない寒候期については、1月～3月は4月を、10月～12月は9月のガイダンスを適用することとした。

ガイダンスの目的変数は、都道府県内の測定局で測定された日最大の光化学オキシダント濃度のうちの最大値（以下「実況値」という）とした。説明変数は、領域モデルの地上オゾン濃度の日最大の予測値のうち、対象都道府県に含まれる格子の中の最大値とした。係数は、ガイダンス作成期間である 2009 年～2013 年について統計的に求めた。ただし、この係数を求める際に、実況値の頻度分布と領域モデルが予測する地上オゾン濃度の日最大値の頻度分布が大きく異なっていたため、頻度バイアス補正を用いた。頻度バイアス補正では、ガイダンス作成期間の実況値を 80、100、120ppb を閾値とする 4 つのカテゴリに分けて、それぞれのカテゴリの頻度を求め、モデルの地上オゾン濃度の日最大値が実況で求めたカテゴリの頻度と同じになるように閾値を決めた。なお、それぞれのカテゴリ内では線形を仮定して係数を求めた。

##### 7.4.2 大気汚染気象予測モデルのガイダンスの精度検証結果

スモッグ気象情報の発表基準であるポテンシャル 2 を閾値として、2（光化学オキシダント濃度 120ppb 以上相当）及び 2 未満（光化学オキシダント濃度 120ppb 未満相当）のそれぞれの場合について、各都道府県における領域モデルのガイダンスと実況値を比較し、春季（4月～5月）と夏季（6月～9月）に分けて全国で集計した統計結果を第 7.3 表に示す。統計期間は 2009 年～2013 年で、表中の値は、当該事例延べ日数（日数×都道府県数）を示す。

第 7.3 表 春季および夏季における、ガイダンスのポテンシャル 2 を閾値とした分割表

ガイダンス 実況		春季（4月～5月）		夏季（6月～9月）	
		ポテンシャル 2	ポテンシャル 2 未満	ポテンシャル 2	ポテンシャル 2 未満
ポテンシャル 2		34	82	290	411
ポテンシャル 2 未満		82	14,132	411	27,520

また、現在運用中の全球モデルによるガイダンスについても同様に集計を行い（表は省略）それぞれのモデルによるガイダンスの適中率および補足率（適中率とは、ポテンシャルを 2 と予測したときに実況がポテ

ンシャル2となった割合。捕捉率は、実況がポテンシャル2となったときに、ポテンシャル2を予測していた割合)を求めた(第7.4表)。

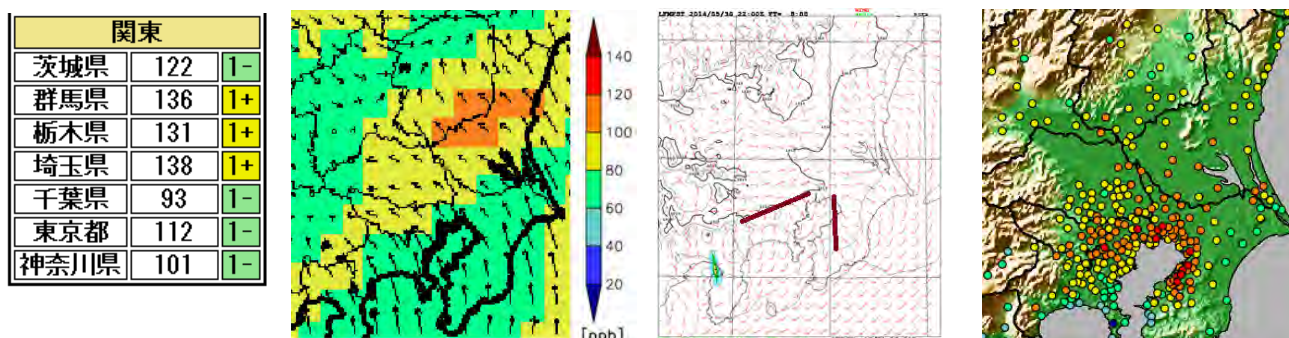
春季、夏季を通じて、領域モデルによるガイダンスの方が全球モデルのガイダンスに比べ適中率、補足率ともに成績が改善した。

第7.4表 領域および全球モデルのガイダンスによるポテンシャル2の適中率と補足率

ガイダンス	春季適中率	夏季適中率	春季捕捉率	夏季捕捉率
領域モデル	29%	41%	29%	41%
全球モデル	21%	30%	28%	34%

## 7.5 領域大気汚染予測モデルやそのガイダンスを用いた予報例

これまで、領域モデルやそのガイダンスが全球モデルより予測精度が向上したことを示してきた。しかし、気象モデルが現業天気予報で用いられるMSMやLFMほど詳細でなく、排出インベントリを用いていることで、領域モデルも地上オゾン濃度の予測に位置ずれ・時間ずれが生じることが多く、都道府県別のガイダンスをそのまま採用できない場合がある。2014年5月31日の関東甲信地方の実際の予報においても、ガイダンスは関東北部を中心に120ppb以上でポテンシャル1+を予測し、領域モデルも関東北部で高濃度の地上オゾン予測していた(第7.3図)。ここでは、領域モデルやそのガイダンスに含まれる位置ずれに留意して、実況や統計的手法によるガイダンス、過去知見、LFM資料を予報担当者が総合的に判断し、ガイダンスで高濃度と予想した関東北部を中心とした地域を関東南部に修正して適中させた予報例を紹介する。



第7.3図 (左から)2014年5月31日を対象としたガイダンスと15時の領域モデルの地上オゾン濃度分布図、LFM風予測図(実線は風向シアー) 光化学オキシダント濃度の実況値(色調は領域モデルの地上オゾン濃度分布図と同じ)

前日の光化学オキシダント濃度は関東甲信地方で100ppb程度まで上がり、茨城県や群馬県では120ppb以上のところがあった。また、予報発表直前の9時の実況は、光化学オキシダントを含めた大気汚染物質の濃度が前日9時よりも高く(図略)前日以上に光化学オキシダント濃度が高くなる可能性があった。統計的手法によるガイダンスも、関東南部を中心に120ppb以上となる可能性が高いことを示していた(表略)。

一般的に、気温や日射量が光化学オキシダント濃度が高くなる条件を十分に満たしている場合、その濃度分布は風に大きく影響を受ける。この日の気温や日射量は条件を十分満たす予想だった。東京湾周辺(関東甲信地方の主な大気汚染物質の排出源)の風の場の予測を利用して、関東甲信地方のどの地域で光化学オキシダント濃度が高くなるかをパターン化して予測する過去知見(0x 高濃度の風による分布特性)によると、この日は関東南部で高くなるパターンに該当する。また、第7.3図の15時のLFM風予測図では、鹿島灘からの東よりの風と相模湾や東京湾からの南よりの風、及び東京湾東岸の西よりの海風で形成される風向シアーが東京都から千葉県に形成され、関東南部で風が淀む予測になっている。ただし、神奈川県西部から山梨県にかけての南東風は弱く、山梨県では光化学オキシダント濃度が高くなりにくい。このように、LFM風予測

図の風向シアーや風向・風速などの予測をもとに、領域モデルやそのガイダンス、統計的手法によるガイダンスなどから得られた比較的大まかな地域の予測を都道府県単位に絞り込むことができる。これらを予報担当者が総合的に判断した結果、関東南部を中心にポテンシャル2と予報し適中させた。

今回、領域モデルやそのガイダンスが導入されるが、これまでの統計的手法によるガイダンスや過去の調査知見は引き続き必要であり、風の場の予測には最新イニシャルの LFM を活用し、予報担当者が総合的に判断することが不可欠である。

## 7.6 まとめと領域大気汚染気象予測モデルの今後の改善計画

気象庁では、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ため、全球モデルにネスティングさせた領域モデルやそのガイダンスを平成 26 年度末に導入する。これにより、詳細な地上オゾン濃度の分布や大陸からの大気汚染物質の移流などを把握できるようになるとともに、モデルで現象を詳しく解析することが可能となり、今後の情報改善につながるモデルの予測精度の改善を計画的に行うことができるようになることを期待される。

ただし、測定局で測定された光化学オキシダント濃度でなく排出インベントリを用いていることや、空間解像度が 20km と MSM や LFM に比べまだ粗いことから、現状の領域モデルの予測精度は十分とはいえない。これらの問題点を改善するため、平成 28 年度には測定局で測定される光化学オキシダント濃度を領域モデルの初期場に取り込み、次期 NAPS 更新後には空間解像度を 20km から 5km に高解像度化することを計画している。

## 参考文献

- Carter, W., 2000: Documentation of the SAPRC-99 chemical mechanism for VOC reactivity assessment. Final report to California Air Resources Board, Rep. Univ. of Calif. Riverside, 92-329
- Deushi, M. and Shibata, K., 2011: Development of an MRI Chemistry-Climate Model ver.2 for the study of tropospheric and stratospheric chemistry, papers in Meteor. Geophys., **62**, 1-46.
- 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, S. Hatakeyama, 2012: Development of an aerosol chemical transport model RAQM2 and prediction of Northeast Asian aerosol mass, size, chemistry, and the mixing type. Atmos. Chem. Phys., **12**, 11833-11856.
- 北川裕人, 2000: 放射過程. 数値予報課報告・別冊, **46**, 気象庁予報部, 16-31.
- 環境省, 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, [http://www.env.go.jp/air/osen/pc\\_oxidant/conf/chosa.html](http://www.env.go.jp/air/osen/pc_oxidant/conf/chosa.html).
- Mizuta, R., K. Oouchi, H. Yoshimura, A. Noda, K. Katayama, S. Yukimoto, M. Hosaka, S. Kusunoki, H. Kawai and M. Nakagawa, 2006: 20-km-mesh global climate simulations using JMA-GSM model – mean climate states –. J. Meteor. Soc. Japan, **84**, 165-185.
- 大原利真, 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.
- 高野功, 2008: 大気汚染物質へのメソ移流拡散モデルの応用. 数値予報課報告・別冊, **54**, 229-233.
- Walcek, C. J., and N. M. Aleksic, 1998, A simple but accurate mass conservative peak preserving, mixing ratio bounded advection algorithm with fortran code, Atmos. Environ., **32**, 3863-3880, doi:10.1016/S1352-2310(98)00099-5.
- 藪将吉, 村井臣哉, 北川裕人, 2005: 晴天放射スキーム. 数値予報課報告・別冊, **51**, 気象庁予報部, 53-64.