

今後の窒素酸化物対策について
窒素酸化物の大気環境シミュレーションモデルの検討

1 はじめに.....	2
1.1 目的.....	2
1.2 シミュレーションモデルが必要な理由.....	2
2 シミュレーションに求める内容.....	4
2.1 シミュレーションの基礎条件.....	4
2.2 シミュレーションに求める内容.....	5
3 シミュレーションモデルの選定.....	7
3.1 シミュレーションモデルの種類.....	7
3.2 シミュレーションモデルの検討結果.....	10

1 はじめに

1.1 目的

千葉県の大気環境は、二酸化窒素(NO₂)の環境基準が未達成の局が少なからず残っていること及び本県が独自に設定した「二酸化窒素に係る県環境目標値」の達成率が低いといった課題が残されており、今後とも窒素酸化物の排出削減を進めていく必要がある。

このため、今後の窒素酸化物対策に係る基礎資料を得るために、将来の環境濃度予測を実施するものである。

1.2 シミュレーションモデルが必要な理由

大気環境中の汚染物質の濃度は、次のプロセスを経た後に到達する地点における、汚染物質の量により決定される。

- ① 汚染物質の大気中へ放出(排出)
- ② 風に流され(移流)
- ③ 風の乱れにより広範囲に散らばり(拡散)
- ④ 化学反応により他の物質に変化し(反応)
- ⑤ 地面や建物への付着や雨に洗い流されて大気中から消滅(沈着)
- ⑥ 汚染物質の到達(環境濃度)

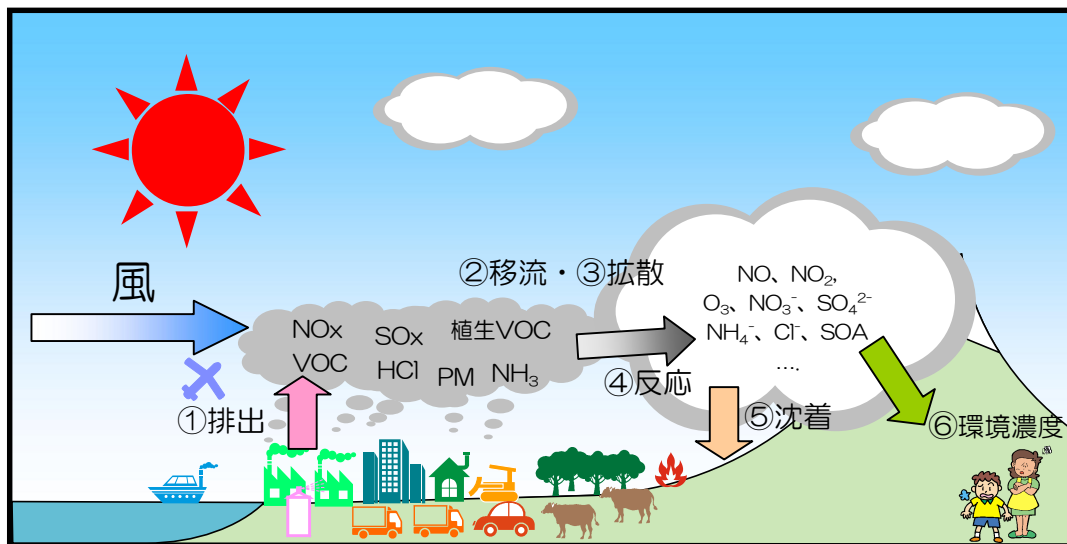


図 1-1 大気汚染の模式図

このため、大気環境中での汚染物質濃度を良好な状態に維持し、さらによりよい状態に改善するためには、これらのプロセスを再現して大気汚染物質の排出量から環境濃度を求める手法が必要になる。大気環境シミュレーションモデルは、この手法のひとつであり、大気汚染物質の排出量を元に、モデル化した①～⑥のプロセスを経て環境濃度を予測するものである。よって、将来における大気汚染物質の排出量の変化に対し、環境濃度がどのように変化するかを把握することを可能とする手法である。

一方、環境の指標（環境基準や環境目標値）は、環境中の大気汚染物質の濃度で示されるが、大気汚染防止のための規制は、大気汚染物質の濃度ではなく、その原因となる大気汚染物質の排出量である。大気汚染物質の排出量の変化に応じた環境中の大気汚染物質の濃度を予測できる手法（モデル）がなければ、適切な環境行政を進めることは困難になる。

本資料では、千葉県における将来の環境中の窒素酸化物濃度を予測するために、大気環境シミュレーションモデルの実績、最新の研究状況、モデルの特徴などを整理し、検討を行った。

2 シミュレーションの概要

2.1 シミュレーションの基礎条件

2.1.1 対象地域

シミュレーションにより解析する地域は、千葉県全域を対象とする。なお、隣接する都県からの影響も考慮するために、周辺地域の発生源やその影響についても考慮する。

表 2-1 対象地域

地域	対象地域
対象地域	千葉県全域
周辺地域	東京都、神奈川県、埼玉県、茨城県

2.1.2 対象物質

シミュレーションの対象物質は窒素酸化物とし、二酸化窒素濃度を予測する。

表 2-2 対象物質

項目	物質
対象物質	窒素酸化物(二酸化窒素)

2.1.3 対象年度

大気汚染物質の排出状況を把握する年度は、以下のとおりとする。

表 2-3 対象年度

項目	対象年度	備考
現状	平成 20 年度	今年度調査で算定する。
将来	平成 32 年度	来年度調査で算定予定である。

2.1.4 対象発生源

発生源別の窒素酸化物排出量は、工場・事業場、一般家庭、自動車、船舶、航空機、群小発生源、建設機械類などの発生源区分毎に、把握する。

表 2-4 対象とする発生源

No	発生源区分	対象発生源
①	工場・事業場	工場・事業場に設置されたばい煙発生施設
②	一般家庭	一般家庭で使用される燃焼器具
③	自動車	幹線道路及び細街路を走行する自動車
④	船舶	千葉港、木更津港を利用する船舶
⑤	航空機	成田国際空港を離発着する航空機
⑥	群小発生源	事業所に設置された小型の燃焼器具や小型焼却炉
⑦	建設機械類	建設機械、産業機械、農業機械
⑧	隣接都県	茨城県、埼玉県、東京都、神奈川県が発生源

2.2 シミュレーションにより解析する必要のある事項

大気環境シミュレーションにより解析する必要のある事項を表 2-5 に整理した。

表 2-5 シミュレーションにより解析する必要のある事項

番号	内容
(1)	現状及び将来における二酸化窒素環境濃度 ア 現状濃度の再現性(モデルの確認) イ 将来濃度の予測
(2)	発生源区分別の寄与濃度
(3)	発生源対策実施時の環境濃度

(1) 現状及び将来における二酸化窒素環境濃度

ア. 現状濃度の再現性

発生源区分別に求めた現状の窒素酸化物排出量を用いて、大気環境シミュレーションを行う。その際には、このシミュレーションモデルが、どの程度、現在の大気環境を再現するか(再現性)を把握する必要がある。

再現性の確認方法については資料2-2 3章に示す。

シミュレーションモデルの再現性は、予測した将来の二酸化窒素の濃度の確からしさを確認する上で重要であり、県民や事業者に今後の対策等について理解と協力を得るために重要である。そのため、モデルの再現性を評価する指標が、わかりやすい形で定量化され、評価されていることが必要となる。

評価の定量化の方法としては、例えば、「窒素酸化物総量規制マニュアル」では、評価方法及び評価指標が明記され、さらに窒素酸化物のシミュレーションにおいてはその指標を満足することが必須条件として記されている。

イ. 将来濃度の予測

大気環境シミュレーションモデルでは、推定した排出量を用いていることから不確実性を含んでおり、どのモデルを採用するにしても同程度の影響がある。一方で、モデルの不確実性は、モデルの種類によって大きく異なる。この点で、モデルの不確実性の程度（言い換えれば、モデルの限界）を理解し、将来の予測濃度の精度を考慮したうえで、検討していく必要がある。

(2) 発生源区分別寄与濃度の把握

発生源対策は、大気環境濃度に対して、それぞれの発生源がどの程度の寄与をしているかを把握し検討する必要がある。

例えば、排出量が小さな発生源であっても、大気濃度に与える影響が大きい（寄与濃度が高い）発生源は、その対策効果が大きい。逆に排出量が大きくとも、寄与濃度が低い発生源は、対策効果が得にくい。

発生源区分別寄与濃度を把握することにより、県全体における対策だけでなく、地域ごとに異なった対策を検討することができ、より効果的な対策を進めることが可能になる。

(3) 発生源対策時における環境濃度の把握

将来濃度を推定した後、環境基準や環境目標値を達成できない地点や地域においては、様々な対策を検討していく必要がある。

これまでの大気中の二酸化窒素においては、自動車寄与が大きかったが、今後、規制が進むに従ってその寄与は低下していくことが考えられる。今後は、自動車を含め、様々な発生源に対してより効果的な対策を検討していく必要がある。

発生源毎の対策の効果を把握するためのシミュレーションに必要な時間が短ければ、より多くの対策を検討することが可能となる。

これまでの利用実績から、解析解モデルは計算時間が短く、数値解モデルは長くなることが知られているが、本県の検討においては、より多くの対策を検討していきたいと考えており、より多くの検討ができるモデルを選定する必要があると考える。

3 シミュレーションモデルの選定

3.1 シミュレーションモデルの種類

3.1.1 シミュレーションの種類と例

拡散モデルにより大気汚染をシミュレーションする方法は、解析解モデルと数値解モデルがある。この例を表 3-1 に示す。

シミュレーションモデルの検討にあたっては、解析解モデルとして窒素酸化物総量規制マニュアル方式のモデル(NO_xマニュアルモデル)、数値解モデルとして化学物質輸送モデル(CMAQ など)を例に行った。

窒素酸化物総量規制マニュアル方式のモデル(NO_xマニュアルモデル)は解析解モデルの代表的なモデルのひとつである。このモデルは、行政上の対策検討や環境影響評価における大気汚染予測に用いられ、本県においても、これまでの窒素酸化物対策等の検討で利用してきたモデルであることから、検討するモデルとして選定した。

化学物質輸送モデル(CMAQ)は、数値解モデルのひとつであり、数値気象モデル(WRF、MM5、RAMS など)と組み合わせて利用されているものである。数値解モデルの中でも、特に CMAQ は、国内における大気汚染の研究実績が増えてきており、また、行政機関においても対策等の検討で利用が始まりつつあることから、検討するモデルとして選定した。

以下では、この2つのモデルを例にモデルの概要や特徴、実績等について整理し、本県の今後の窒素酸化物対策検討に用いるモデルの選定を行った。

3.1.2 解析解モデルの概要

解析解モデル(プルームモデル)の模式図を図 3-1 に示す。プルームモデルは、煙突から排出された煙(汚染物質)が、風に流されながら正規分布に従って広がる様子を計算式で表したものである。濃度の計算は、煙突の高さなどの情報や煙突から排出される大気汚染物質の量(排出量)を入力し、煙突からの距離を指定すると自動的に濃度が求まる。この計算を煙突毎(発生源毎)に繰り返し、足し合わせることで環境濃度を計算する。

このモデルは、年平均値などの長期的な平均濃度の予測に適したモデルである。また、計算する点の間隔(距離、位置)は自由に設定ができるが、精度は排出量を整理した格子サイズ(500m～1km メッシュ)に依存する。発生源の対象とする物質は、NO_x、SO_x、SPM などの都市汚染で卓越する物質である。このモデルは、歴史が長く、計算方法もマニュアルなどで整理されており、これまで国・地方自治体の大気汚染対策の検討や、環境アセスメントにおける大気汚染予測の標準的な手法として採用されている。

3.1.3 数値解モデルの概要

数値解モデル(オイラー型拡散モデル)の模式図を図 3-2 に示す。オイラー型拡散モデルは、大気汚染物質の拡散を表す微分方程式をコンピュータにより数値的に解析することにより濃度を得る方法である。計算する範囲をブロック状の格子で分割し、ブロック間の大気汚染物質の移動を計算することで時々刻々と変化する濃度を計算することができる。

以前は、スパコンなどの高性能なコンピュータで長時間計算する必要があったが、コンピュータの発達に伴いパソコンなどでも計算ができるようになった。しかしながら、解析解モデルに比べれば長時間の計算時間を必要とする。工場・事業場などによる大気汚染を計算する場合の格子の大きさは、実用上 5km 程度となる。これより小さい場合はさらに長時間の計算時間が必要となり、実用性は低下する。時間の経過に伴う変化が重要な大気汚染、風の変化や地形の影響、隣国からの影響、複雑な化学反応を伴う大気汚染などを予測する場合は、このモデルが適している。研究機関などでの研究実績は急速に増加しているところであるが、行政上の検討に使われる例はまだ少ない。

表 3-1 大気環境予測モデルの例

項目	解析解モデル	数値解モデル
広域モデルの例	窒素酸化物総量規制マニュアルモデル	CMAQ
	硫黄酸化物総量規制マニュアルモデル	CAMx
	浮遊粒子状物質汚染予測マニュアルモデル	WRF-Chem
	METI-LIS モデル	UAM
	ADMER	ANEMOS-AERO

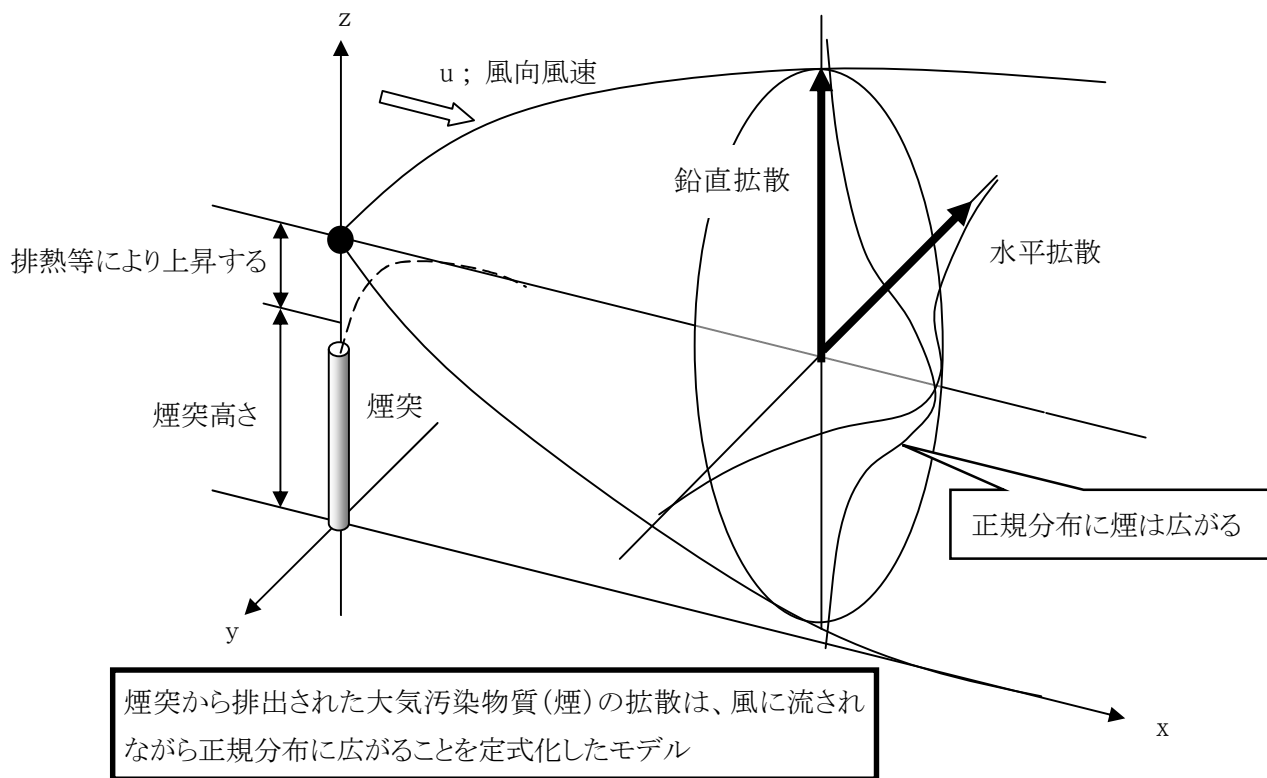


図 3-1 解析解モデルの模式図

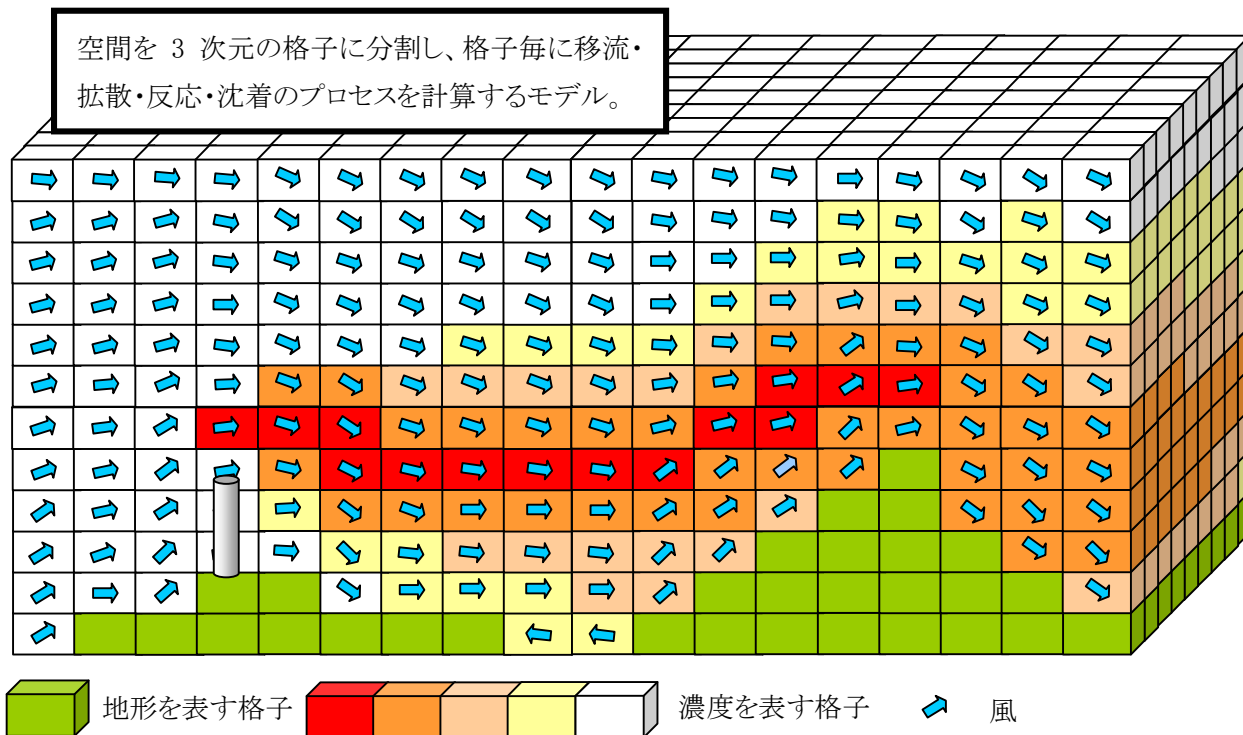


図 3-2 数値解モデル(オイラー型モデル)の模式図

3.2 シミュレーションモデルの検討結果

シミュレーションモデルには、対象とする大気汚染の時間・空間スケールや化学反応など、様々な種類があるが、千葉県における窒素酸化物の濃度をシミュレーションするために次のモデルについて検討を行った。

- ① 解析解モデル:窒素酸化物総量規制マニュアル方式のモデル(NO_x マニュアルモデル)
- ② 数値解モデル:化学物質輸送モデル(CMAQ) + 数値気象モデル(WRF)

3.2.1 大気汚染モデルの利点等の整理

解析解モデルの代表例として NO_xマニュアルモデル、数値解モデルとして CMAQ を取り上げ、利点・欠点について評価した。この結果を表 3-2 と表 3-3 に整理した。

表では、適用性が高い場合は○、工夫することで適用可能は△、適用できない・困難な場合を×として表記している。

(1) モデル自身の評価

本県の窒素酸化物濃度を予測するためのモデルとしての評価を表 3-2 に示す。NO_x マニュアルモデルは、沿道近くの汚染(局地汚染)から千葉県全体や関東地方全域などの比較的広い範囲(都市スケール汚染)を予測することが可能なモデルである。一方、隣接都県や国外からの大気汚染物質の影響などを再現することはできない。

大気汚染物質の排出量と濃度がほぼ比例する汚染(一次汚染)や比較的単純な化学反応を伴う汚染(NO₂ 反応など)については、比較的よく再現できる。一方、大気中の化学反応により発生する光化学オキシダントなどは再現できない。二酸化窒素については、窒素酸化物から二酸化窒素の化学変化を表すモデル(NO_x-NO₂変換モデル)によって計算される。この反応により作られる二酸化窒素は光化学オキシダントに影響される。近年、全国的に光化学オキシダント濃度は増加する傾向があり、この関係が変化する恐れがある。シミュレーションを行う際には、この点に注意しながら解析を行う必要がある。

計算する地点の間隔(計算する格子の間隔)は、排出量を整理する大きさに依存する。家庭や小規模な事業所では、1km 程度のメッシュ統計データを基にしているため、その大きさは1km 程度となる。大気汚染の対策を検討する場合には工場や道路の影響をある程度細かく検討する必要があり、格子間隔は1km 程度を必要とする。

NO_x マニュアルモデルは長期間の平均濃度を予測するためのモデルであり、期別・時間帯別(春・夏・秋・冬、朝・昼・夜・深夜など)を最小単位として、年平均値を予測する。

環境基準を評価するためには、日平均値の年間98%値¹を計算する必要がある。NO_x

¹日平均値の年間98%値とは、日平均値を低い順に並べ低いほうから数えて98%目に該当する日平均値である。365

マニュアルモデルでは、測定値における年平均値と98%値との関係式から、98%を推計する方法がとられる。近年、大気汚染の発生源に対する規制の効果から窒素酸化物の排出量や成分が大きく変化し、この関係は変化しつつあることから、将来推計においては注意が必要である。

大気汚染の対策を検討する上で必要となる環境濃度に対する各発生源の寄与割合(発生源別寄与濃度)は、容易に求めることが可能である。

このほか、NO_x マニュアルモデルは、平坦地の拡散をモデル化したものであるため、複雑な気流や地形の影響については、通常では対応できず、特別なモデルを組み込む工夫が必要となる。

NO_x マニュアルモデルの欠点については、CMAQ では解決されている点が多い。ただし、実用上の計算格子間隔は5km 程度であり、また計算に必要な時間が長い点が最大の課題である。また、対策を検討するために必要となる発生源別寄与濃度については、全発生源の予測濃度から対象発生源を差し引いたときの予測濃度の差によって求められる。しかしこの方法では、対象とする発生源毎に計算を繰り返す必要があるために、計算時間がより長くなってしまう。

本県は、二酸化窒素について検討することとしており、NO_x マニュアルモデルには若干の課題は残されているが、工夫を行うことにより適用可能と考えられる。

日の日平均値がある場合は、低いほうから98%目の日すなわち358番目の日の濃度が98%値となる。

表 3-2 大気環境予測モデルの利点及び欠点

評価項目	窒素酸化物総量規制マニュアル方式		CMAQ + WRF	
	評価	特徴	評価	特徴
局地汚染(沿道など)	○	JEA 式を利用	×	別モデルが必要
都市汚染(千葉県)	○		○	
隣県からの輸送	○		○	
長距離輸送(国内、国外)	×	越境汚染などは評価できない。	○	ネスティング技術により評価可能
従来型汚染 (一次汚染、単純な化学反応)	○	NO _x 、SO _x 、一次粒子など	○	NO _x 、SO _x 、一次粒子など
複雑な汚染 (複雑な化学反応)	△	O _x は計算できない。 二次粒子推定可能	○	O _x 、二次粒子とも計算可
空間分解能	○	特定地点まで可能	△	格子サイズまで可能
短期評価 (1 時間値、日平均値)	×	長期予測モデルのため不可	○	1 時間値を直接評価
長期評価 (季別平均、年平均)	○	年平均値を直接評価	△	長期予測を行った場合は可能
日平均値の年間 98%値	△	実測値の統計結果から推定	△	長期予測を行った場合は直接評価できる。
バックグラウンド濃度 の評価	△	越境汚染などの長距離輸送は困難。(BG として与える)	○	ネスティング技術により評価可能
発生源別寄与濃度	○	容易	△	ゼロアウト法では発生源数分の計算が必要
化学反応	△	簡易な反応のみを扱う。	○	複雑な反応が扱える。
O ₃ 変化への対応	△	NO ₂ 変換式で考慮	○	標準で可能
海陸風循環、風向変化、 長時間滞留	×	モデルの性能上不可。BG として評価する。	○	数値気象モデルの結果を利用できる。
複雑な地形	△	別モデルが必要 (例 ERT-PSDM など)	○	格子サイズまでの地形を考慮可能
特殊な気象状況	△	別モデルが必要 (例 EPA-OC ₂ D モデルなど)	○	数値気象モデルの再現可能な現象
○の集計		7		12
△の集計		7		4
×の集計		3		1
モデル自身の評価		△		○

(2) 大気環境予測モデルの利用上の評価

大気環境予測モデル利用上の評価を表 3-3 に示す。

NO_x マニュアルモデルは、計算はシンプルでわかりやすく、計算も容易なことが特徴となっている。また、研究実績、利用実績共に歴史が長く、その基本性能が把握されている点から利用上の限界がわかりやすい。NO_x マニュアルモデルを利用するためのマニュアルも整備され、性能評価の方法がマニュアルに明記されているなど行政利用上の観点から使いやすいモデルとなっている。

CMAQ は、計算は複雑で中身を理解することが専門家や研究者以外には難しい。また、解析解モデルに比べ計算に必要な時間(計算時間)が長く、長期的評価を行うためには膨大な計算時間が必要となる。しかし、数値解モデルの研究は盛んに行われており改良が加えられ、最新の研究成果が導入されたモデルである。行政上での利用は、計算時間の長さや、コスト的に割高、モデルの複雑さから利用する事例はまだ少ないが、今後は増加していくと思われる。

表 3-3 大気環境予測モデルの利用上の利点及び欠点

評価項目	窒素酸化物総量規制マニュアル方式		CMAQ+WRF	
	評価	特徴	評価	特徴
計算のしやすさ	○	拡散式がシンプル	×	計算は複雑
わかりやすさ	○	拡散式がシンプル	×	計算は複雑
モデルの限界	○	古くから利用され性能が把握されている。	×	発展途上。
費用	○	計算時間が短く、低コスト	△	計算時間が長く、高コスト
計算時間	○	計算時間が短い。	△	年間計算では計算時間が膨大となる。
実績	○	歴史が長く研究実績、行政目的の利用実績共に豊富にある。	△	研究は盛んに行われているが、行政利用は少ない。
先進性	△	解析解型モデルの研究は少なくなっている。	○	数値解モデルを利用した研究が盛んに行われている。
モデル評価	○	マニュアルに基準がある	△	EPAにおいては、他の事例と比較して評価を進めている。
標準化 (マニュアル化)	○	マニュアルが整備され、解説本も多い	×	国内でのマニュアル整備は進んでいない。
○の集計	8		1	
△の集計	1		4	
×の集計	0		4	
行政利用上の評価	○		△	

(3) モデルの検討結果のまとめ

モデル自身の評価としては、解析解モデルの課題を解決できる数値解モデルの方がよいと考えられる。しかしながら、利用上の評価においては、実績や扱いやすさの点から解析解モデルの方がよく、本県の検討に用いるモデルとしてこれらの点を総合的に判断すると、本県の対策調査において用いるモデルは、解析解モデルである窒素酸化物総量規制マニュアル方式のモデルが適していると考ええる。

ただし、利用に際しては、光化学オキシダントとの関係や、環境基準等に相当する年平均値の推定方法などには注意して解析を行う必要がある。

なお、CMAQなどの数値解モデルは、複雑なモデルが組み込まれ、複雑な汚染を解析するには適している。OxやPM_{2.5}などの対策を検討する場合にはこのようなモデルの活用も検討すべきと考ええる。

表 3-4 大気環境予測モデルの検討結果(まとめ)

評価項目	窒素酸化物総量規制マニュアル方式の モデル(解析解モデル)	CMAQ + WRF (数値解モデル)
	評価	評価
モデル自身の評価	△	○
利用上の評価	○	△
○の計	15	13
△の計	8	8
×の計	3	5
総合評価	◎	○