

# VOC 排出削減効果の定量的評価 に向けた検討等業務 報告書

令和元年度～令和3年度

経済産業省産業技術環境局環境管理推進室  
(業務実施者) 一般社団法人産業環境管理協会  
(共同実施者) 国立研究開発法人産業技術総合研究所  
(共同実施者) 東京都環境科学研究所

# 目次

1	目的	3
2	実施体制	3
3	結果要旨	4
4	計算方法、計算条件等	9
4-1	定量評価指標の定義	9
4-2	計算に用いるシミュレーションモデル	11
(1)	大気化学輸送モデル –ADMER-PRO–	11
(2)	シミュレーションを行う計算グリッドの設定	11
4-3	本事業で設定した主な計算条件	13
4-4	VOC等の前駆物質からオキシダント生成に至るメカニズム(既存の知見)	14
(1)	VOCとNO <sub>x</sub> の組成比の影響	14
(2)	NO <sub>x</sub> のタイトレーション	14
5	主要な結果	16
5-1	定量指標の基本計算	16
(1)	オゾン低減指標の基本計算	16
(2)	より狭い地域で前駆物質を削減した場合の低減指標の検討	18
5-2	排出場所の立地条件の影響	20
5-3	気象条件の影響	22
(1)	春季と夏季の比較検討	22
(2)	オゾン低減効率の季節変動に関する検討	23
5-4	前駆物質の大幅削減、および将来シナリオの検討	25
(1)	近年(2016年)をベースとして前駆物質を大幅削減した場合の低減指標の検討	25
(2)	将来のベース状態を仮定して、前駆物質を大幅削減した場合の低減指標の検討	27
5-5	BVOCの設定に関する検討	30
(1)	BVOCに関する知見の整理	30
(2)	BVOC排出量のボトムアップ推計の現状と課題	31
(3)	BVOC排出量のトップダウン推計の現状と課題	31
(4)	BVOC設定を変更した場合の指標値の検討	32
(5)	ADMER-PROにおけるBVOC設定の検討	33
(6)	都内の街路樹・公園樹木を加味した場合の低減指標への影響検討	34
(7)	BVOC設定を変更した場合の実測値との比較検討	35
6	まとめと今後の課題	37

## 1 目的

平成 18 年 4 月に大気汚染防止法 (昭和 43 年法律第 97 号) が改正され、揮発性有機化合物 (VOC) について、法規制と産業界による自主的取組の両輪 (ベストミックス) による排出削減により、平成 22 年度における VOC 排出量は、当初の目標 (平成 22 年度までに平成 12 年度比で 3 割程度削減) を超える 4 割以上の排出削減を達成した。

平成 23 年度以降は、少なくとも平成 22 年度比で悪化しないよう VOC 排出抑制のための自主的取組を継続している。直近の平成 30 年度実績では、平成 22 年度に比べて約 3 割削減するなど、更なる VOC 排出削減に貢献した。

これにより、光化学オキシダント注意報等の発令延べ日数の減少傾向や、新指標に基づく長期的な改善傾向が示唆されるなど、自主的取組は大気環境の改善にも一定の効果があったものと推測されるが、我が国大気環境中の光化学オキシダント (Ox) 濃度の環境基準達成状況は極めて低い水準で推移している。

事業者の努力により、VOC 自体は、かなりの排出削減実績を達成しており、今後も自主的取組による排出削減を図っていく場合、前駆物質の削減が、オキシダントの削減に効果的に資するような条件を見出していく必要がある。

本事業では、事業者における VOC や NOx 等の前駆物質の削減が、Ox 濃度の低減効果に資する効果を定量的に評価するための指標を定義し、地理的条件、気象条件、植物由来 VOC (BVOC) の設定、前駆物質の長期的な大幅削減を仮定した検討など、様々な条件を設定して調査事業を行った。

本事業を行う上で、有識者、産業界の委員等からなる検討会を組織し、実施内容や成果を検討し、意見を頂戴しつつ、事業を実施した。

## 2 実施体制

本事業は、経済産業省産業技術環境局環境管理推進室が発注し、業務請負先は一般社団法人産業環境管理協会 (産環協) である。定量評価に必要なシミュレーションおよび評価計算を、産環協から国立研究開発法人産業技術総合研究所 (産総研) に外注した。令和 3 年度については、BVOC に関する検討について、産総研の共同研究者として、東京都環境科学研究所 (都環研) にもご参画いただいた。

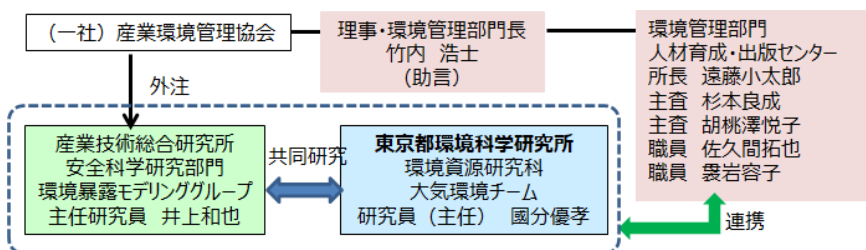


図 1 実施体制

本事業では、調査の背景及び目的の整理、調査対象の範囲や実施方法を明確化し、実際に各事業の検討を行うとともに、進捗管理、結果の取りまとめ方法について議論及び整理等をするため、有識者、業界団体等からなる検討会を設置した。

検討会メンバーについては、以下のとおりである。

表 1 検討会

氏名	所属	役職
◎梶井 克純	京都大学大学院 地球環境学堂および人間・環境学研究科	教授
金谷 有剛	国立研究開発法人 海洋研究開発機構 地球表層システム研究センター	センター長代理
亀屋 隆志	横浜国立大学大学院 環境情報研究院	教授
谷 晃	静岡県立大学食品栄養科学部環境生命科学科	教授
茶谷 聡	国立研究開発法人 国立環境研究所 地域環境研究センター 大気環境モデリング研究室	主任研究員
奈良 恒雄	一般社団法人 日本化学工業協会 VOC 検討SWG (～R3年9月)	主査
原川 浩美	一般社団法人 日本塗料工業会	常務理事
三浦 安史	石油連盟	安全管理部長
森川 多津子	一般財団法人 日本自動車研究所 エネルギー・環境研究部	主任研究員
森 二郎	一般社団法人 日本化学工業協会 VOC 検討SWG (R3年10月～)	主査

◎は委員長。五十音順。敬称略。

### 3 結果要旨

前駆物質 (VOC、NO<sub>x</sub>) の削減が、光化学オキシダント (主にオゾン) の低減に及ぼす効果を表す指標として、オゾン存在量低減効率、オゾン集団暴露量低減効率の2つを定義し (p.9 参照)、諸条件を様々に設定して、検討を行った。本報告書では、これら2つの指標を「オゾン低減効率等」ということとし、主に「オゾン存在量低減効率」を取り上げる。また、VOC を削減した場合の低減効率等を「VOC 削減指標」、NO<sub>x</sub> を削減した場合の低減効率等を「NO<sub>x</sub> 削減指標」ということにする。

検討結果について、主要な項目について、その結果の要旨を以下に示す。

#### 結果1：定量指標の基本計算

- ・関東、近畿、東北の3地方で比較すると、VOC 削減指標は関東>近畿>東北の順に大きく、NO<sub>x</sub> 削減指標はこの逆の順番となる。
- ・過去 (2005年ベース) と近年 (2016年ベース) 比較すると、VOC 削減指標は小さく、NO<sub>x</sub> 削減指標は大きくなっている。この傾向は、近年 (2016年) と将来 (2030年ベース) についても同様である。
- ・前駆物質を地方単位ではなく、狭い領域で削減した場合、VOC 削減指標は都市部>混在部>郊外部の順となり、NO<sub>x</sub> 削減指標はこの逆の順番となる。

#### 結果2：排出場所の立地場所の影響

- ・VOC 削減指標とMIR、VOC 削減指標と立地パラメータとの相関は低い、VOC 削減指標とこれらの積 (MIR × 立地パラメータ) との相関は非常に高い。すなわち、MIR だけでなく、排出場所 (=削減場所) の立地も、前駆物質削減によるオゾン低減効果を検討する上では考慮する必要がある。

#### 結果3：気象条件の影響

- ・夏季に高濃度オゾンが出現する気象パターン (地衡風=弱、日射=強) においては、VOC 削減指標<NO<sub>x</sub> 削減指標となる。
- ・春季と夏季を比較すると、夏季はNO<sub>x</sub> 律速、春季はVOC 律速が強まる傾向となる。NO<sub>x</sub> 削減が、VOC 削減に比べて優位となるのは夏季のみである。
- ・関東地方について、夏季は「VOC、NO<sub>x</sub> 削減指標とも正で、NO<sub>x</sub> 削減指標が大きい」、冬季は「VOC 削減指標がほぼゼロで、NO<sub>x</sub> 削減指標は負値」、春と秋は「VOC 削減指標は正值で小さく、NO<sub>x</sub> 削減指標は負値」となる。

#### 結果4：BVOC の設定の影響

- ・BVOC に関しては、測定値や排出量の推計方法に関して未だ知見が不足しており、今後も引き続き知見の充実が待たれる。

- ・BVOCの設定を変更すると、「オゾン低減効率等」は大きく変動する。
- ・ADMER-PROの現状におけるBVOC設定は、BVOCは排出量を若干高めに見積もっている可能性がある。

#### 結果5：将来外部排出シナリオを想定した場合のオゾン存在量低減効率の検討

- ・将来外部排出シナリオを想定した場合には、現状の排出量を想定した場合に比べ、オゾン低減に対する点源のNO<sub>x</sub>削減の効率性はより高く、点源のVOC削減の効率性はより低くなる。

本事業は令和元年度から令和3年度にかけて実施した。気象条件やBVOCに関する検討は、検討会での議論も踏まえ、年度を追うごとに継続的に内容を発展させ、複数年度を掛けて成果をまとめている。

上記の主要な結果に加え、計算結果の妥当性の検証や、検討会でのご意見を受けての追加計算など、細かな考察・検討なども実施している。

本事業における実施内容と成果の概要を、表2、表3に示す。本報告書では、紙幅の関係ですべての項目を説明することができないが、表2、表3により全体を概観することができる。

表 2 VOC 排出削減効果の定量的評価に向けた検討等業務(メイン検討項目)

大項目	年度	実施事項	結果	今後の課題
1. 前駆物質削減によるオゾン低減効率 (VOC 指標、NOx 指標) の計算	R1	1-1. VOC 指標の計算 時期：2005 (初期)、2016 (近年) 地方：関東、近畿、東北 気象：夏期高濃度	近年、VOC 指標は低下 VOC 指標は 関東>近畿>東北の順に大きい	
	R2	1-2. NOx 指標の計算	VOC 削減指標と逆の傾向を確認 近年、NOx 指標は上昇 NOx 指標は 東北>近畿>関東の順に大きい	
	R3	1-3. より狭い領域で前駆物質を削減した場合の指標値の変動	[夏期] 都市部、混在部、郊外部で大きく異なる NOx 削減指標は都市部<混在部<郊外部 VOC 削減指標は逆順 [春期] 狭地域の指標順番は夏とほぼ同じ NOx 削減指標 (近畿) は都市部と郊外部で正負が逆転	
2. VOC 指標の業種間変動要因の推定	R1	2-1. VOC 指標と MIR、立地パラメータの相関分析	個別の相関は低いが、(MIR×立地パラメータ) との積との相関は高い	・夏期高濃度でない気象パターンで、立地との相関はどうなるか? ・立地パラメータの整備 (他の地方、季節)
3. 他の気象パターンにおける低減効率の検討	R1	3-1. 夏期高濃度と、夏期頻出気象での指標値の比較 (関東)	オゾン集団暴露量低減効率は大きく変化し、オゾン存在量低減効率はあまり変化しない	
	R2	3-2. 春期の高濃度/再頻出、夏期の高濃度/再頻出、の 4 気象パターンでの検討	[関東及び近畿] 夏季 NOx 指標>VOC 指標 春季では逆。 [東北] 夏季及び春季とも NOx 指標>VOC 指標 →夏季には NOx 律速、春季には VOC 律速が強まる	ADMER-PRO では、51 時間助走計算を行った後に対照日の計算をしているが、この間の気象パターンが異なる場合に、差は生じるのか? 例えば、晴→晴→高濃度日のような条件と、雨→雨→高濃度日、のような条件では結果は異なるのか?
	R3	3-3. 年間を代表できる 12 気象パターンでの指標値算出	代表的な 2 業種の年間平均値として計算したところ、 VOC 指標：関東>近畿 VOC 指標>NOx 指標 cf. 夏期高濃度気象条件では、VOC 指標<NOx 指標であった。	

	R3	3-4. 年間気象パターンによる指標値の変動	<p>【関東】</p> <p>〔夏期〕 VOC、NO<sub>x</sub> 指標とも正值で大、VOC&lt;NO<sub>x</sub> 指標</p> <p>〔冬期〕 VOC 指標がほぼゼロでNO<sub>x</sub> 指標が負値</p> <p>〔春・秋〕 VOC 指標が正值で小さく、NO<sub>x</sub> 指標は負値</p> <p>【近畿】</p> <p>〔夏期〕 NO<sub>x</sub> 指標がVOC 指標より非常に大きい</p> <p>※NO<sub>x</sub> 削減が、VOC 削減に比べて優位となるのは夏のみ。</p>	
4. 前駆物質の大幅削減、および将来予測	R2	4-1. 前駆物質 (VOC、NO <sub>x</sub> ) をそれぞれ50%、100%削減した場合の指標計算	<p>NO<sub>x</sub> を大幅削減した方が、関東地域全体のオゾン低減効果が高い領域が増加</p> <p>大幅削減時、NO<sub>x</sub> 指標は大幅に上昇、VOC 指標は変わらない</p>	
	R3	4-2. 長期的な NO <sub>x</sub> 、VOC の削減検討	<p>2016 年ベースと将来の 2030 年排出量を設定した上で、固定発生源の VOC、NO<sub>x</sub> を削減して比較すると、</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・VOC 削減指標は小さくなり、NO<sub>x</sub> 削減指標が大きくなる。</li> <li>・BVOC 設定を 0.5 倍として同様に計算すると、前項よりは指標が VOC-Limited 側に変化するが、年代による定性的な傾向は変わらない。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・将来起こり得る排出量シナリオの検討 (電気自動車の普及、カーボンニュートラル、エネルギー転換、技術革新など)</li> <li>・オゾン低減、コスト、リスク低減の面で、排出削減シナリオの比較</li> </ul>
5. 植物起源 VOC の検討	R2	5-1. BVOC 推計の課題調査 (ヒアリング)	<p>基礎放出量データ (Bao et. al) は過大評価の可能性</p> <p>植物の活量による季節変化が未反映</p> <p>知見不足 (フラックスデータ、植生の細分)</p>	
	R2	5-2. BVOC のトップダウン推計	<p>米国では衛星 HCHO とイソプレンの計算値が合致するが、日本では合わない。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・近い将来、新たな衛星データの利用が期待できるようなのでキャッチアップする。</li> </ul>
	R2	5-3. BVOC 設定値の変動計算 (0.5 倍、1 倍、2 倍)	<p>BVOC 設定を大きくすると、NO<sub>x</sub> 律速が強まる。</p> <p>VOC 指標漸減、NO<sub>x</sub> 指標増加</p>	
	R3	5-4. BVOC 設定の課題抽出 (都環研)	<p>①広葉樹の BVOC 設定方法が粗い (提案: 樹種ごと基礎放出量の実装、植生マップ精緻化)</p> <p>②基礎放出量の季節変化を加味すべき</p> <p>③モノテルペンの放出量の光量依存性を加味すべき</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・植生分布データの整備 (外部)</li> <li>・基礎放出量の樹種別の分類を細分化</li> <li>・基礎放出量測定データの整備 (外部)</li> <li>・季節による植物の活量変動の加味</li> </ul>
	R3	5-5. 都環研データによる、ADMER-PRO の都市部 BVOC 基礎放出量データの更新 (都環研)	<p>都環研の街路樹基礎放出量データ、葉面積分布推定データから、ADMER-PRO の分類に合わせた基礎放出量データを更新。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ADMER-PRO における BVOC 設定の全体的な更新</li> </ul>
	R3	5-6. 前項 (5-5.) の設定更新後の指標値の算出	<p>BVOC 設定更新による指標の変動は軽微 (都市部街路樹の更新による総 BVOC 排出量の変動が小さいためと思われる)</p>	

表 3 VOC 排出削減効果の定量的評価に向けた検討等業務 (サブ項目)

大項目	年度	実施事項	結果	今後の課題
(1) 他の手法や調査、実測値との比較	R1	(1-1) 衛星観測との比較 (1-1.関係) 時期、地方による VOC 指標の傾向を衛星観測レジーム分析と比較	1-1.の結果と整合 (VOC 指標は関東>近畿>東北の順で近年低下)	・衛星観測で、VOC、PM2.5 研究に役立てられるリソースを整理しておくとうい。
	R1	(1-2) 環境省光化学オキシダント調査検討会報告書 (H29.3 月、CMAC モデル) と比較 (1-1.関係)	関東地方の VOC、NOx10%削減によるオゾン低減濃度が概ね整合する。	
	R2	(1-3) 予測と実測によるオゾン濃度経年変化地理分布の整合性検討	年代、地方別の VOC 指標、NOx 指標低減効率の傾向は、船舶排出量の設定、BVOC の設定、オゾン測定方法の変化 (乾式法の普及) 等を加味すれば、定性的に整合	
	R3	(1-4) 環境省 VOC 成分自動測定値との比較	・BVOC 設定が 0 倍、または 2.0 倍の場合、観測値と計算値の乖離が大きい。 ・BVOC 設定が 0.5 倍、または 1.0 倍の場合、観測値と計算値の一致性が高い。どちらが高いかは評価項目による。	・イソプレンの計算値の時間変動パターンに関する検討
(2) 指標値の性質、計算方法の確認	R1	(2-1) 指標値の線形性確認	VOC 削減率を 10%としても、実際の削減量に変えても VOC 指標は同じ	・線形性が崩れるのは、どこからか?
	R1	(2-2) 指標の加算性の確認	①VOC10%削減、②NOx10%削減、③VOC と NOx を同時に 10%ずつ削減では、指標値に①+②=③の関係が成り立つ。	
	R1	(2-3) オゾンの平均化時間の確認 指標の算出において、オゾン濃度を 1 時間値と 8 時間平均値とした比較	オゾン濃度が 1 時間値でも 8 時間平均値でも VOC 指標は同じ	
	R2	(2-4) オゾンの初期条件、境界条件が計算に与える影響の確認	オゾンの初期値を 0 と設定して指標値を計算したが、有意差は認められなかった。	
(3) 計算環境の整備	R1	(3-1) 排出量の 2016 年詳細インベントリの作成	排出量データを 2015 簡易版 (2005 年比 60%) と 2016 詳細版として指標値を比較したが、殆ど同じであった。	
	R2	(3-2) VOC 発生源の対象業種の拡大	R2 年度より 2 業種を追加し、環境省インベントリの上位 10 業種 (ただし洗濯業は除外) として計算	
(4) 費用対効果の試算	R2	(4-1) 費用対効果、費用対便益の計算	関東地方、VOC10%削減時、便益は+128 億円、NOx10%削減時、便益は+257 億円。 人口が多い南関東で便益大。	・オゾンの疫学的知見 (閾値及びその有無)、及び各種対策コストに関する情報が不足。 ・VOC、オゾン、PM2.5、NOx を横断的にリスク、費用、便益まで長期評価。



## 4 計算方法、計算条件等

### 4-1 定量評価指標の定義

VOC 排出削減の効果の定量的指標として、以下の 2 つの指標を定義し、指標値を試算して評価を試みた。この 2 つをまとめて「オゾン低減効率」と呼ぶこととする。

オゾン存在量低減効率は、地表付近の計算メッシュ内で、対象地域における前駆物質 1 トン削減あたりどの程度オゾン濃度が低減したか、を表す指標である。一方、オゾン集団暴露量低減効率は、オゾン濃度の低減量に、メッシュ内の人口を乗じて、対象領域内で積算したものである。同じ 1ppb の濃度を削減しても、計算セル内の人口が多いところでは、それだけ多くの人の暴露濃度を減じたことになり、人健康影響の改善度合いを表すことになるため、費用対便益効果やリスク削減効果を検討する上でも、有用な指標となる。

なお、本報告書では主に、オゾン存在量低減効率について記述している。オゾン集団暴露量低減効率については、人健康リスク評価の視点での指標であり、費用対便益などを試みているが、現状ではオゾンの疫学的知見や、対策費用に係る必要な知見が不足しており、十分な結論を得ていないためである。

#### 指標 1：オゾン集団暴露量低減効率

定義：
$$\frac{\text{VOC 対策により低減されたオゾン集団暴露量 (ppb} \cdot \text{人)}}{\text{対策により削減された VOC 排出削減量 (トン)}}$$

意味：計算を行った時期、地方について、VOC 削減 1 トンあたり、その地方に住む全人口について暴露濃度を低減した総和の度合いを表す指標。地表付近の計算セル内のオゾン低減濃度 (ppb) に、その計算セル内の人口 (人) を乗じ、地方全体の計算セルについて積算したのが分子のオゾン集団暴露量低減量で、これをその地方の VOC 排出削減量で割ったものがオゾン集団暴露量低減効率となる。

例：地表付近の計算セル内のオゾン低減量が 1.0ppb (計算値)、関東地方の人口が 4,261 万人<sup>\*1</sup>、関東地方の VOC 排出削減量 71,648 トン (2005 年→2010 年の削減量) とし、オゾン低減濃度、人口密度、VOC 削減量の分布がすべて関東地方内で均一と仮定した場合、オゾン集団暴露量低減効率 (2005 年、関東地方) は 594ppb・人/トンと計算される。

#### 指標 2：オゾン存在量低減効率

定義：
$$\frac{\text{VOC 対策により低減されたオゾン濃度 (ppb} \cdot \text{km}^2)}{\text{対策により削減された VOC 排出削減量 (トン)}}$$

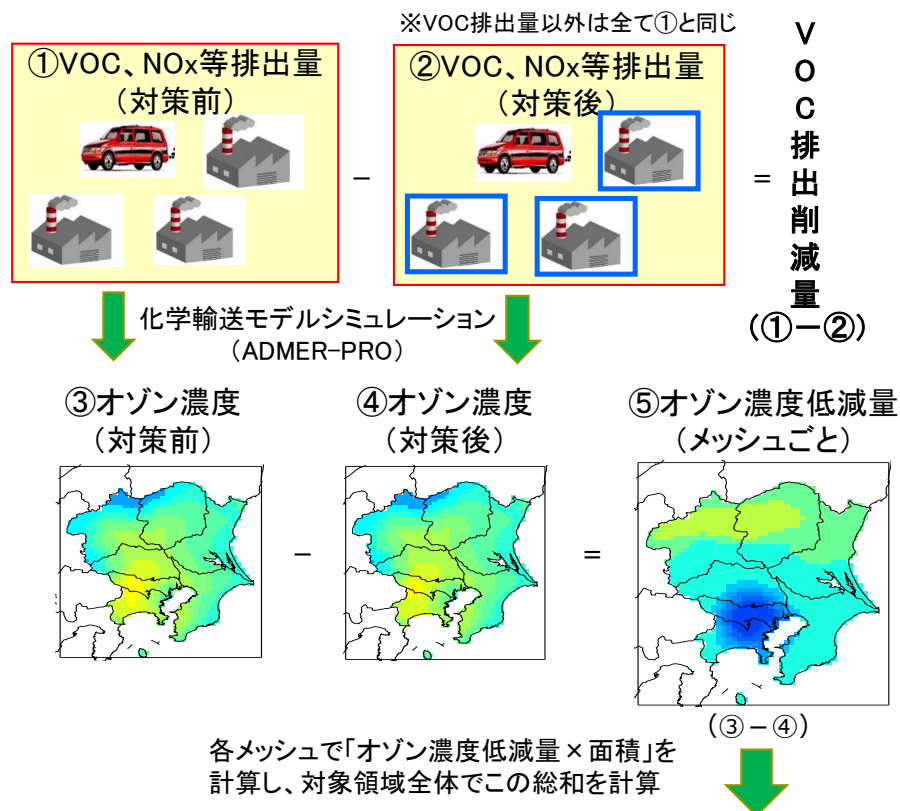
意味：計算を行った時期、地方について、VOC 削減 1 トンあたり、その地方のオゾン濃度を低減した総和の度合いを表す指標。地表付近の計算セル内のオゾン低減濃度 (ppb) に、その計算セルの面積 (25km<sup>2</sup> (5km × 5km)) を乗じ、地方全体の計算セルについて積算したものが分子のオゾン存在量低減量で、これをその地方の VOC 排出削減量で割ったものがオゾン存在量低減効率となる。

例：地表付近の計算セル内のオゾン低減量が 1.0ppb (計算値)、関東地方の面積が 32,420km<sup>2</sup> <sup>\*1</sup> 関東地方の VOC 削減量 71,648 トン (2005 年→2010 年の削減量) でオゾン低減濃度が関東地方内で均一と仮定した場合、オゾン存在量低減効率 (2005 年、関東地方) は 0.44 ppb・km<sup>2</sup>/トンと計算される。

※1：上記の関東地方の人口、面積は、各都道府県別の統計値であるが、ADMER-PRO での計算領域は図 4 に示すように矩形の計算領域であり、人口、面積はこれら数値とは異なる。

VOC や NO<sub>x</sub>、オゾンについて、排出量の設定や初期条件の詳細は 4-3 章で後述する。

指標計算の具体的な手順を図 2 に示す。固定発生源 (計算対象業種) の VOC 排出量のみを変更し、それによる対策前後のオゾンの濃度差を計算セルごとに計算し、これに面積を掛けて積算し、地方の VOC 排出削減量で割ればオゾン存在量低減効率が求められる。面積でなく人口分布を掛けて積算し、地方の VOC 排出削減量で割ればオゾン集団暴露量低減効率が求められる。



⑥オゾン存在量低減量

$$\text{オゾン存在量低減量}_{(\text{計算期間, 対象地方})} = \sum_{\text{対象領域}} (\text{オゾン濃度低減量} \times \text{面積}) \dots \text{(式A)}$$

↓

⑦オゾン存在量低減効率

$$\text{オゾン存在量低減効率}_{(\text{計算期間, 対象地方})} = \frac{\text{オゾン存在量低減量}_{(\text{⑥})}}{\text{VOC排出削減量}_{(\text{①-②})}} \dots \text{(式B)}$$

図 2 指標の算出手順

※上図において、前駆物質としてVOCではなくNO<sub>x</sub>を削減すれば、NO<sub>x</sub>削減に対するオゾン低減効率等の指標となる。

※本事業においては、仮想的に、対象業種等のVOCまたはNO<sub>x</sub>のみを削減して計算している。

## 4.2 計算に用いるシミュレーションモデル

### (1) 大気化学輸送モデル –ADMER-PRO–

シミュレーションに使用した大気化学輸送モデル (ADMER-PRO ; 井上&東野, 2015) の概要を図 3 に示す。図 3 の簡条書きで示した通り、ADMER-PRO には排出量データ (全国における 3 次メッシュ (約  $1 \times 1 \text{ km}^2$ ) 単位の 2005 年度排出量) が内蔵されている、気象パターン類型化機能が備わっており、ある期間 (例えば夏季) の代表日といった情報も提供される、など、シミュレーションを行うにあたって必要なデータや便利な機能が実装されているのが特徴である。

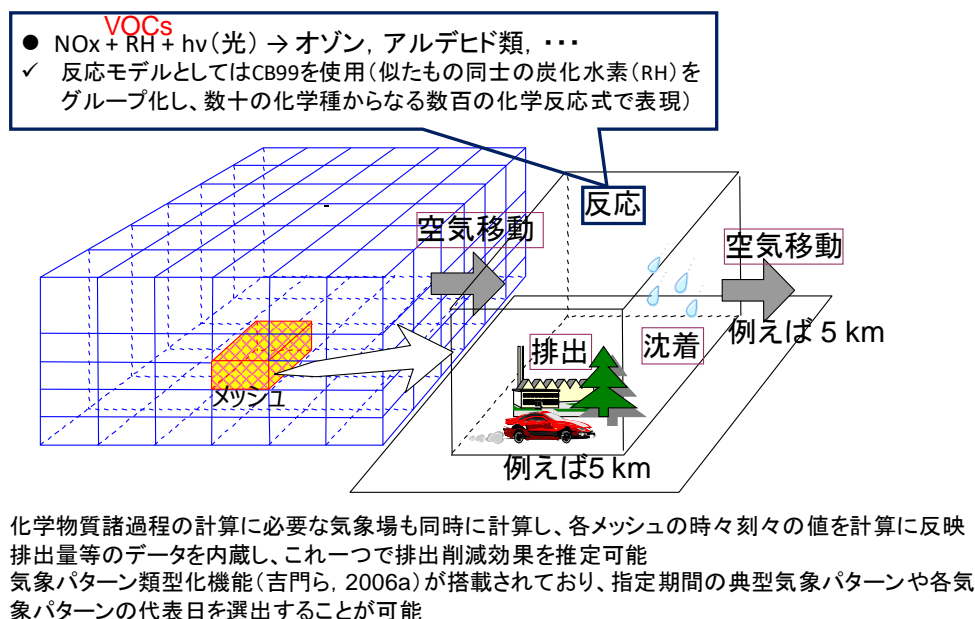


図 3 シミュレーションに供するモデル (ADMER-PRO; 井上&東野,2015)

### (2) シミュレーションを行う計算グリッドの設定

いずれの地方を対象とした計算においても、評価対象領域を詳細な空間解像度 ( $5 \times 5 \text{ km}^2$ ) でカバーする小領域グリッドと、より大きい領域をより粗い空間解像度 ( $20 \times 20 \text{ km}^2$ ) でカバーする大領域グリッドの入れ子構造を採用している (評価対象領域を関東とする場合のグリッド構造を図 4 に示す)。指標値の算出に用いるのは小領域グリッドの結果である。初期・境界条件についてはすべての計算ケースで同一とし、オゾン濃度は気象庁が実施している上空のオゾン濃度の高度分布データから配分、その他物質濃度はゼロと設定としている。上述の通り、対象領域より広い領域 (ほぼ本州全域) とのネスティング (入れ子格子) 計算を行っている。また、助走期間 (spin-up period) を設けるため、評価対象日の 51 時間前から計算を行うことにより、初期・境界条件の影響は十分低減されていると考える。その他の計算条件は基本的に井上&東野 (2015) と同一である。

ADMER-PRO は気象パターン類型化機能を有しており (吉門ら (2006b)), 類似した気象パターンをまとめて計算することでしたり、気象条件の代表日を選定することが可能である。

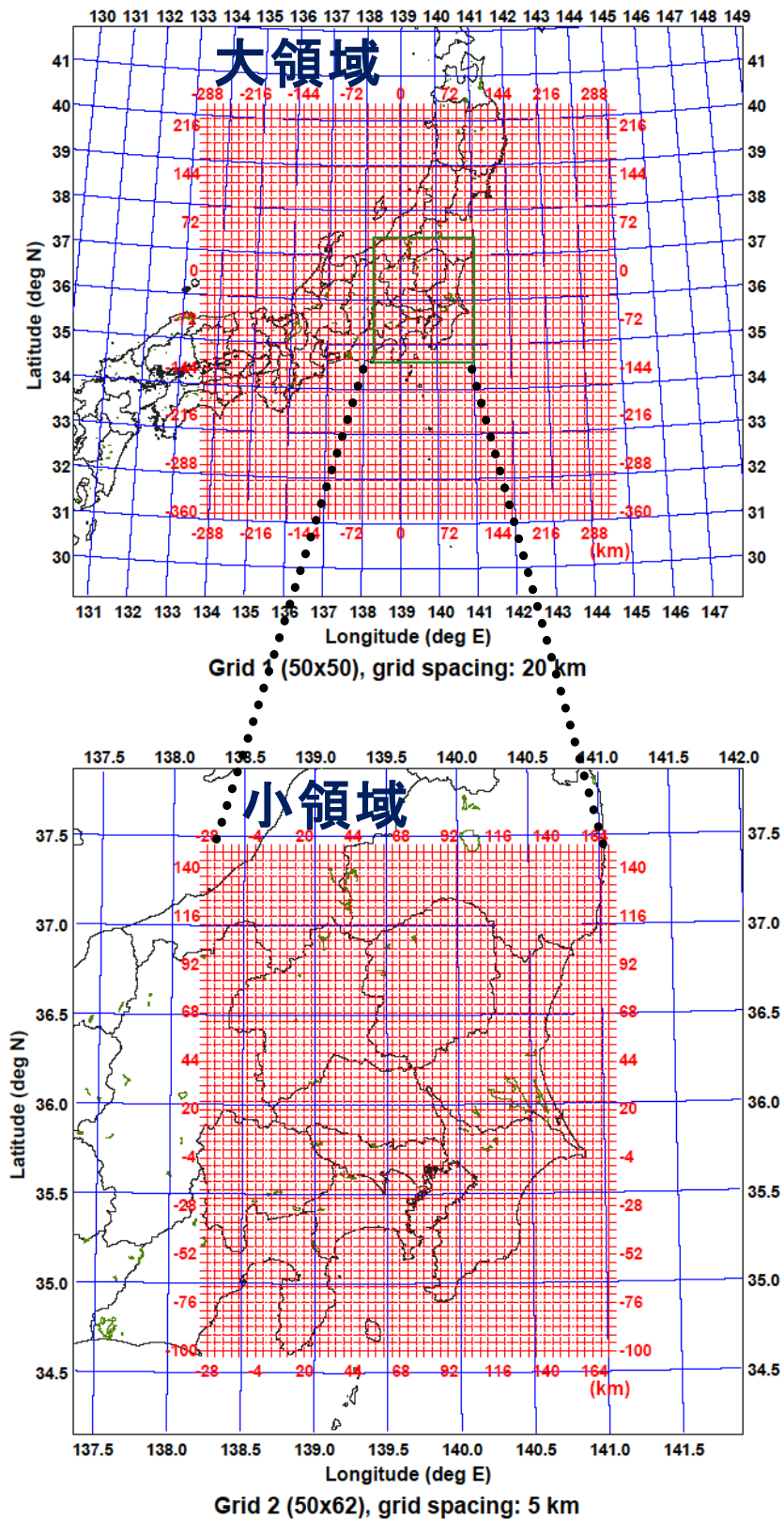


図 4 計算対象領域を関東とする場合のグリッド構造の例（評価対象領域を関東とする場合）

### 4.3 本事業で設定した主な計算条件

本事業で、低減指標を計算するにあたって設定した計算条件を網羅的に表 4 に示す。

表 4 計算条件

項目	計算条件
a. 計算対象時期 (排出量データ)	①初期の取組実施期間 (削減前：2005 年→削減後：2010 年) ②近年の期間 (削減前：2016→削減後：設定%削減) (簡易計算は 2015 年ベース)
b. 対象地方	3 地方 関東地方 (茨城県、栃木県、群馬県、埼玉県、千葉県、東京都、神奈川県) 近畿地方 (滋賀県、京都府、大阪府、兵庫県、奈良県、和歌山県) 東北地方 (岩手県、宮城県、秋田県、山形県)
c. 対象業種	VOC：環境省 VOC インベントリの平成 12 年度における上位 10 業種 ※10 業種に洗濯業は含めていない (配分が困難)。なお、R1 年度調査では上位 8 業種 NOx：大気汚染物質排出量総合調査 (2014 年度) の上位 4 業種、および 3 セクタ
d. 気象パターン	計算対象時期における、下記の気象条件を示す代表日 ・夏季 (7,8 月) のオゾンが高濃度になった典型的な気象パターン (日射強、地衡風弱) ・春季 (4,5 月) のオゾンが高濃度になった典型的な気象パターン ・夏季、春季で最も出現頻度が高かった気象パターン ・1 年間を通じ、出現頻度が高かった上位 12 気象パターン
e. 平均化時間	日中の 8 時間値 (10-18 時) で評価
f. 初期条件、境界条件	オゾン初期値は、計算領域で、ゾンデによる観測値を鉛直方向に配分して設定、その他の物質は初期値=0 とし、計算日の 51 時間前から助走計算を行う

#### <a. 計算対象時期>

計算対象時期の設定は、ベース (=前駆物質の削減前) となる排出量の状態が異なることにより、効率値の計算結果が異なって来ると考えられるためである。

初期の時期として、2005 年を設定した。これは、2011 年にリリースされた ADMER-PRO に内蔵されている 2005 年排出量データを利用できるからである。この時期は、VOC 規制に係る大気汚染防止法改正 (H16 改正、H18 施行) が行われ、法規制のスタートと共に、経済産業省がとりまとめる VOC 自主的取組の参加団体が出揃って、産構審小委員会がスタートし、各業界団体でも、平成 22 (2010) 年度の 3 割削減目標達成に向け、本格的に動き出した時期である。

一方、近年の期間は、2005 年排出量データと同様に、2016 年排出量データを整備した上で実施した。なお、R1 年度前半は、このデータ整備が完了していなかったため、簡易計算を実施した。2005 年と 2015 年の VOC、NOx の実測値を参考に、簡易計算では以下の設定とした。

2015 年の VOC 排出量=2005 年の VOC 排出量の 60%

2015 年の NOx 排出量=2005 年の NOx 排出量の 60%

#### <b. 対象地方>

対象地方は、関東、近畿、東北の 3 地方とした。関東地方は、都市化が進んだ広大な関東平野が広がっている点が特徴的である。中部地方は、平野と森林の割合や、風況が近畿地方と類似すると考え、計算ケース数の制約から、計算を実施していない。東北地方は、従来あまり VOC に関する検討が行われていない地域であるが、関東や近畿地方に比べて、森林面積が大きく、工場が立地する地域は散在している。また、NOx の発生源も同様で、固定発生源は散在し、移動発生源は東北自動車道など、大規模な道路の周辺に限られる。

### <c. 対象業種>

対象業種は、VOCについては環境省インベントリの上位業種から、NO<sub>x</sub>については大気汚染物質排出量総合調査の業種別データを用いている。業種単位で計算をしているのは、業種により、使用しているVOCの種類や立地特性が異なるためである。ただし、ここでは個別業種の比較を行うことが目的ではない。

なお、評価指標を計算する前に、風況（風向、風速）やオゾン濃度、NO<sub>2</sub>濃度等について実測分布との比較を行い、再現性を確認している。

#### 4.4 VOC等の前駆物質からオキシダント生成に至るメカニズム（既存の知見）

##### (1) VOCとNO<sub>x</sub>の組成比の影響

既往の研究によって（例えばSillman, 1999）、VOCとNO<sub>x</sub>の組成比によって、オゾンの生成速度が変わることが知られている。これを模式的に図5に示す。

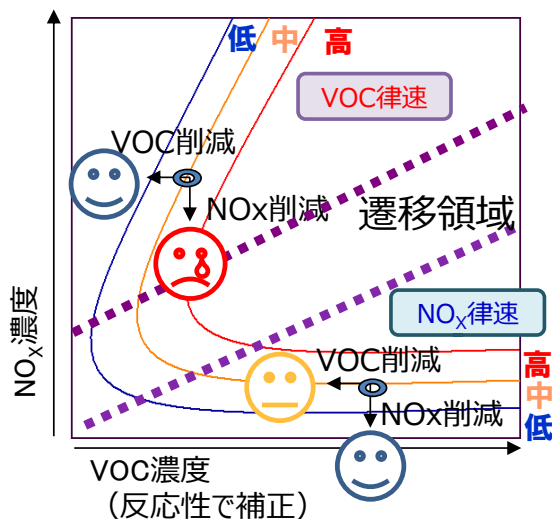


図5 VOCとNO<sub>x</sub>濃度の相関関係(オゾン生成量(濃度)の等値線図)

出所：産業環境対策小委員会（第6回）資料2-2のp.4

VOC/NO<sub>x</sub>比が低い領域、すなわち図5の左上のVOC律速の領域ではVOC削減を図るとオゾン濃度が下がり、NO<sub>x</sub>削減を図るとオゾン濃度が上がる。逆にVOC/NO<sub>x</sub>比が高い領域、すなわち図5の右下のNO<sub>x</sub>律速の領域ではVOC削減を図るとオゾン濃度が殆ど変化しない又は若干上がり、NO<sub>x</sub>削減を図るとオゾン濃度が下がる。これらの中間領域を遷移領域という。この関係をオゾンの感度レジームという。簡単に言えば、VOCとNO<sub>x</sub>のうち、少ない方が、オゾン低減に対して律速となる。

このため、定性的には、次のようなことが言える。

- ① 都市部では、樹木が少なく、VOC（固定発生源）、NO<sub>x</sub>（固定発生源、移動発生源）が共に多いため、山間部等に比べて、VOC<NO<sub>x</sub>の組成比になり、VOC律速になるケースがある。
- ② 山間部など森林が多く、人為発生源（固定発生源、移動発生源）が少ない地域では、BVOCを主因としてVOC>NO<sub>x</sub>となるため、NO<sub>x</sub>律速になりやすい。

##### (2) NO<sub>x</sub>のタイトレーション

一方、オゾン生成の反応メカニズムは図6のようなイメージである。

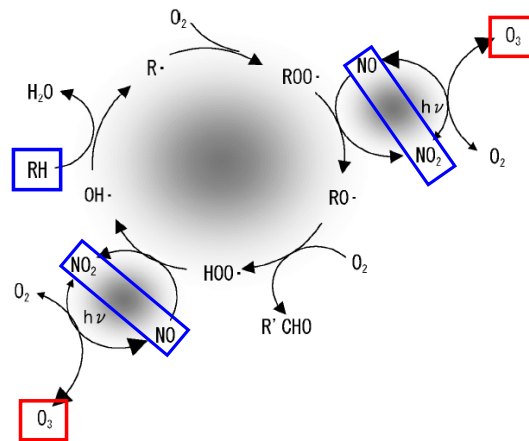
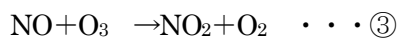


図 6 オゾンの生成機構の模式図

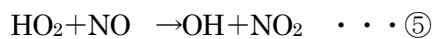
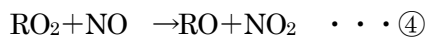
出所：産業環境対策小委員会（第6回）資料 2-2 の p.3（原出典：板野泰之,2006.都市大気における光化学オキシダント問題の新展開,生活衛生,50, pp.115-122.より作成）

VOC をはじめとする炭化水素が介在する場合としない場合では、反応式はそれぞれ以下ようになる。

(通常反応)



(炭化水素が介在する反応)



NO が O<sub>3</sub> を消費し、光化学オキシダントが減少する③の反応をタイトレーションという。炭化水素がない場合、①、②のオゾン生成反応と、③のタイトレーション反応が平衡し、オゾン濃度は一定に保たれる。一方、VOC に由来する炭化水素が存在すると、③に対して④や⑤の反応が競合し、NO が消費されて、タイトレーションが阻害される。

また、夜間には日射がないため、①と②によるオゾン生成反応が進行せず、タイトレーションによりオゾンは減少する。

## 5 主要な結果

### 5-1 定量指標の基本計算

#### (1) オゾン低減指標の基本計算

まず、前駆物質（VOC、NO<sub>x</sub>）の削減対策時期と、3つの地方において、オゾン低減効率等を算定し、比較検討を行った。その計算条件を表5、表6に示す。

表5 低減指標（VOC削減）の計算条件

a. 前駆物質の削減対策の期間 (排出量データ)	2 ケース ①初期の取組対象期間 (排出量：2005年ベース→2010年) ②3割目標年度以降近年の期間 (排出量：2015年ベース〔簡易推計版※〕→10%削減)
b. 対象地方	3 地方（関東、近畿、東北）
c. 対象業種	8 業種（2005年度 VOC 排出インベントリ（環境省）の上位8業種）
d. 気象パターン、 e. 平均化時間	1 パターン（夏季に高濃度オゾンが頻発する気象パターン（気圧傾度弱、日射量大）の2005年における代表日）、オゾン濃度は昼間の8時間（10-18時）値として計算

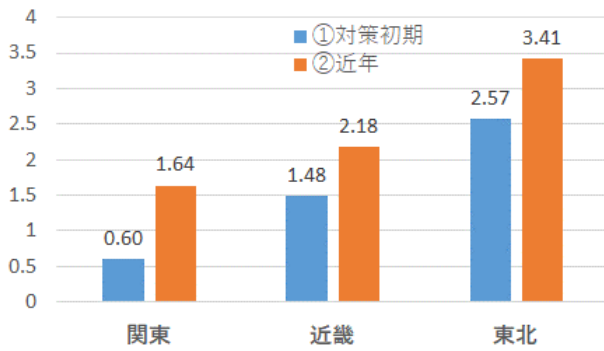
※2015年簡易推計版：近年のベースケース排出量として、VOC、NO<sub>x</sub>とも、実測値を参考に2005年排出量の60%と設定した。別途、2016年の詳細インベントリを作成して同様に計算した結果、殆ど変わらない結果を得ている。

※VOCやNO<sub>x</sub>等の削減率について、NO<sub>x</sub>を極端に大幅に削減した場合を除き、指標値は一定であることを確認している。

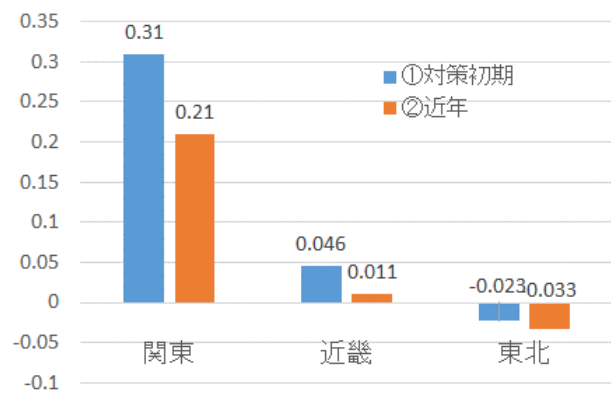
表6 低減指標（NO<sub>x</sub>削減）の計算条件

a. 前駆物質の削減対策の期間 (排出量データ)	2 ケース ①初期の自主的取組対象期間 (排出量：2005年ベース→10%削減) ②近年の期間 (排出量：2016年ベース→10%削減)
b. 対象地方	3 地方（関東、近畿、東北）
c. 対象業種	NO <sub>x</sub> ：大気汚染物質排出量総合調査（2014年度）の上位4業種
d. 気象パターン、 e. 平均化時間	1 パターン（夏季に高濃度オゾンが頻発する気象パターン（気圧傾度弱、日射量大）の2005年における代表日）、オゾン濃度は昼間の8時間（10-18時）値として計算





オゾン存在量低減効率(NOx)



オゾン存在量低減効率(VOC)

図 7 オゾン存在量低減効率の計算結果

図 7 より、低減効率について、以下の傾向があることが分かる。

- ①オゾン存在量低減効率 (VOC) は、2005 年より近年 (2015 または 2016 年) の方が低下しており、近年の方が、VOC の排出削減が、オゾン低減に効きにくくなっている。
- ②オゾン存在量低減効率 (VOC) を地方により比較すると、関東>近畿>東北の順である。特に東北地方においては、存在量低減効率は負値であり、地方全体の平均として、VOC を削減すると、オゾン濃度が上昇してしまう可能性を示している。
- ③オゾン存在量低減効率 (NOx) は、2005 年より近年 (2015 または 2016 年) の方が上昇しており、近年の方が、NOx の排出削減が、オゾン低減に効く方向に変化している。
- ④オゾン存在量低減効率 (NOx) の 3 地方の順位の傾向は、オゾン存在量低減効率 (VOC) とは逆順で、関東<近畿<東北の順である。

低減指標は、関東、近畿、東北と地方単位で大きく異なり、東北地方のように、VOC を削減しても、目的であるオゾンの低減に関して効率が悪い、あるいは場合によってはオゾン濃度が微増する可能性があることに留意する必要がある。また、どの地方でも、近年は VOC 削減がオゾン削減に効きにくくなっている傾向がある。

VOC 削減指標が近年低下していることから、VOC を同じように 1 トン減らしても、過去に比べてオゾンの低減に寄与しにくくなっている。加えて、事業者における VOC 対策は、一般的に、初期に低コスト-効果大の対策を講じ、徐々に細かい箇所の改善や希薄なガスの処理を試みる傾向になると考えられるため、対策コストは上昇する。これらのことから、企業における対策費用の確保が、難しくなってきた (または今後難しくなっていく) と考えられる。

## (2) より狭い地域で前駆物質を削減した場合の低減指標の検討

前項においては、オゾン存在量低減効率等を、関東、近畿といった地方単位で推計している。すなわち、前駆物質 (VOC、NOx) の削減を地方全体について行い、オゾン低減指標を求めている。これを、より狭い範囲において前駆物質を削減した場合、オゾン生成感度が大きく変動する可能性が指摘されている。

そこで、より狭い領域における前駆物質排出量削減に伴うオゾン存在量低減効率の算出を行った。まず、狭領域の設定方法と、低減効率の計算方法のイメージを図 8 に示す。

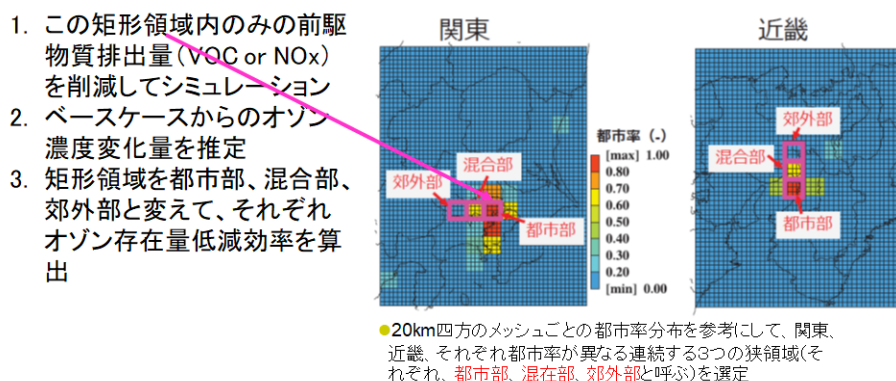


図 8 狭い領域で前駆物質を削減した場合のオゾン低減効率の計算イメージ

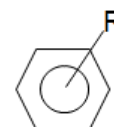
図 8 のように、20km メッシュについて都市率が大きく異なる 3 つの隣接した領域を選定し、このそれぞれの狭領域内で前駆物質を削減して、オゾン低減効率を計算した。隣接した領域を選んでいるのは、地理的な条件による影響を抑えるためである。なお、オゾンの生成・消滅等の反応を再現するには、一定の広さの反応場、つまり計算領域が必要である。このため、低減効率の計算は、関東、近畿等の地方単位で計算した。計算条件を表 7 に示す。

表 7 狭い領域で前駆物質を削減した場合のオゾン低減効率の計算条件

a. 前駆物質の削減対策の期間 (排出量データ)	近年 (自主的取組目標年度以降) (排出量: 2016 年度ベース) [2016 年度ベース排出量は、令和元年度事業にて推計した詳細推計版を使用]
b. 対象地方	2 地方 (関東、近畿)
c. 対象業種	VOC: 各選定狭領域における全発生源からのモノアルキルベンゼン類 <sup>※1</sup> (1 層目 <sup>※2</sup> )、削減率は 100% NOx: 各選定狭領域における全発生源からの NOx (1 層目 <sup>※2</sup> )、削減率は 100% ※それぞれ、都市部、混在部、郊外部の 20km セル内の発生源の排出量を削減設定。
d. 気象パターン、 e. 平均化時間	2016 (or 2015) 年度の 2 つの気象パターン (夏季、春季の高濃度オゾン生成)、オゾン濃度は昼間の 8 時間 (10-18 時) 値として計算

※1: モノアルキルベンゼン類: トルエンなど、ベンゼン環に 1 つのアルキル基が付いた構造の VOC (付図)。

※2: 1 層目: 地表に接した最下層の計算セル (地表から 0~50m)



ここでは、VOC の削減対象を、業種ごとの VOC でなく、モノアルキルベンゼン類としている。これは、業種の VOC は業種ごとに異なるため、MIR 等の差が生じるためである。狭い領域の設定による影響のみを検討する目的で、VOC の削減対象物質を揃えている。また、NOx については、発生源の高さ、つまり煙突高さが広く分布する可能性があるが、削減設定は計算セルの 1 層目のみとした。これも、発生源高さの影響を除くためである。また、比較のため、これまで対象としてきたのと同様に地方毎に全域で前駆物質を削減するケースも計算し、地方毎のオゾン存在量低減効率も算出した。

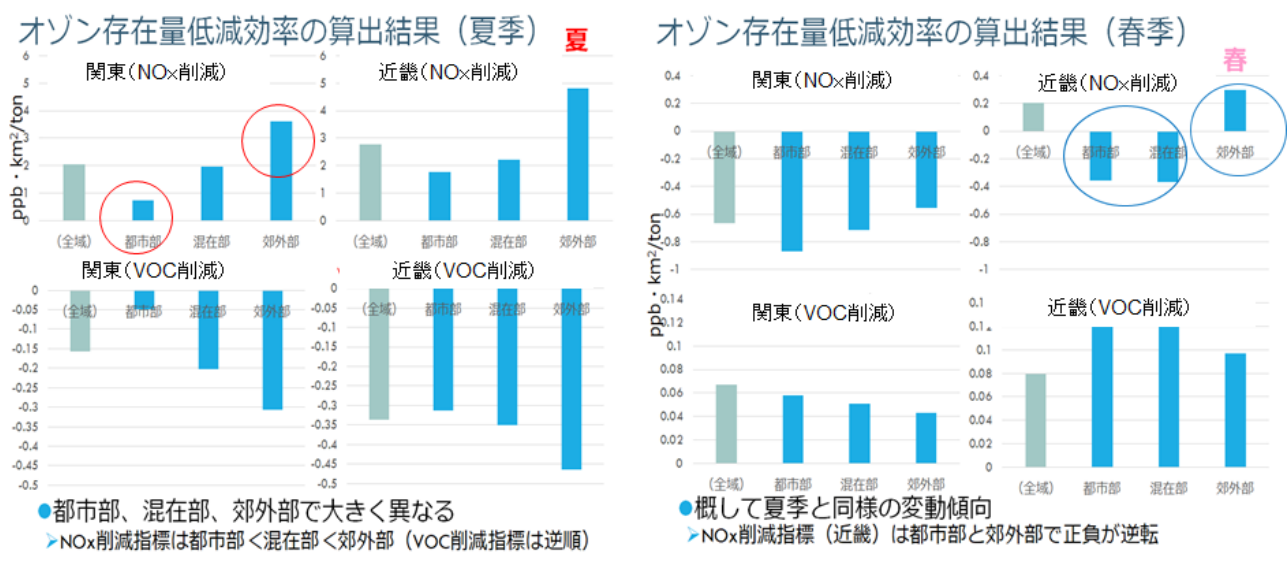


図 9 狭い領域で前駆物質を削減した場合のオゾン低減効率の計算結果

図 9 のように、都市部、混在部、郊外部での削減により、オゾン存在量低減効率は大きく異なる。都市部と郊外部で 4 倍程度の差が生じる場合（○印）や正負が異なる場合（○印）もある。

→どの場所で前駆物質を削減するかにより、オゾンの削減効果は大きく変動する。

NOx 削減指標は都市部<混在部<郊外部の順に大きくなり、VOC 削減指標はこの逆順となる。

春季は夏季と概ね同様の傾向であるが、近畿地方の NOx 削減指標は、都市部と郊外部で正負が逆転している。

## 5-2 排出場所の立地条件の影響

固定発生源における VOC 排出削減の今後の進め方として、光化学反応性 (MIR) が高い物質を使用している業種を優先的に削減してはどうか、という議論があるが、これに関して検討するために、次の 2 つのパラメータと、本事業において計算した低減効率の相関を検討した。

### ①VOC 組成 (反応性) に関するパラメータ (MIR)

各業種の排出 VOC 成分の比率に各 VOC 成分の MIR (Maximum Incremental Reactivity) ファクター (出典: CAMxUsersGuide\_v4.40) を乗じ、全 VOC 成分について足し合わせた指標を算出し、VOC 組成に関するパラメータとした。

### ②排出場所に関するパラメータ

既存研究 (Inoue et al., 2019) で推定された 20×20km メッシュごとのオゾン低減効率地理分布に各業種の該当メッシュにおける排出量の比率を乗じ、全メッシュについて足し合わせたもの算出した。図 10 に排出場所に関するパラメータの算出イメージを示す。オゾン低減効率地理分布は、図 10 の左図にあるように、関東地方を 20km メッシュに区分し、ある 20km メッシュで塗料組成の VOC を 1 トン削減した時、関東地方全体のオゾン濃度が何 ppt 下がるかを計算し、その分布を図示したものである。例えば、東京湾南部のピンクの領域 (A 点) で VOC を削減した場合が最も関東地方全体のオゾン低減に寄与し、北関東の青い領域 (例えば B 点) では関東地方全体のオゾン低減への寄与が負 (=オゾン濃度が増加) であることを示している。本業務に適用する場合、業種や組成は異なるが、分布としてはほぼ同じと考え、この成果を用いて地理的パラメータを計算した。

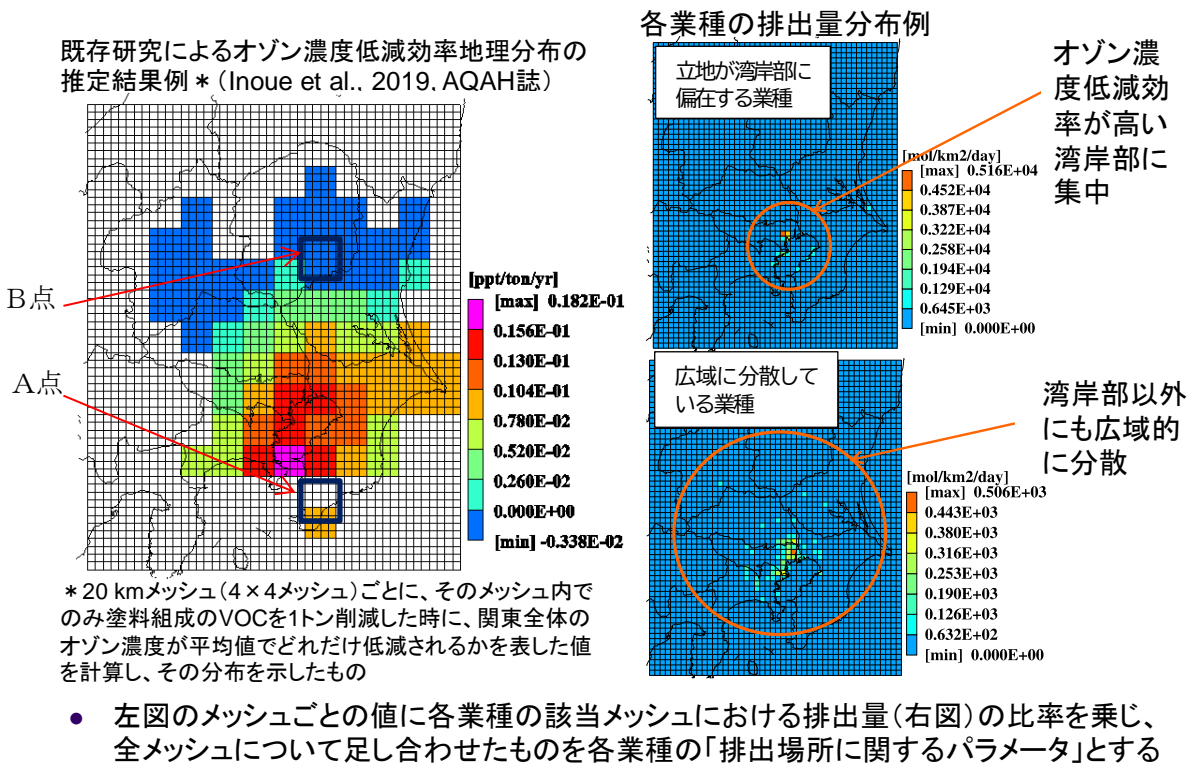


図 10 排出場所に関するパラメータの算出イメージ

これら二つのパラメータおよびそれらの積それぞれと、オゾン集団暴露量低減効率間の相関分析を実施した結果を図 11 に示した。これによると、MIR や排出場所に関するパラメータとオゾン集団暴露量低減効率との決定係数に対して、両パラメータの積とオゾン集団暴露量低減効率との決定係数は大きく上昇することがわかる (オゾン存在量低減効率についても、相関分析を行い、同様の結果となることを確認している)。このことから、業種間のオゾン低減効率等の変動要因としては以前から議論されてきた MIR だけでなく、排出削減場所 (立地) の影響も大きいことが示唆される。

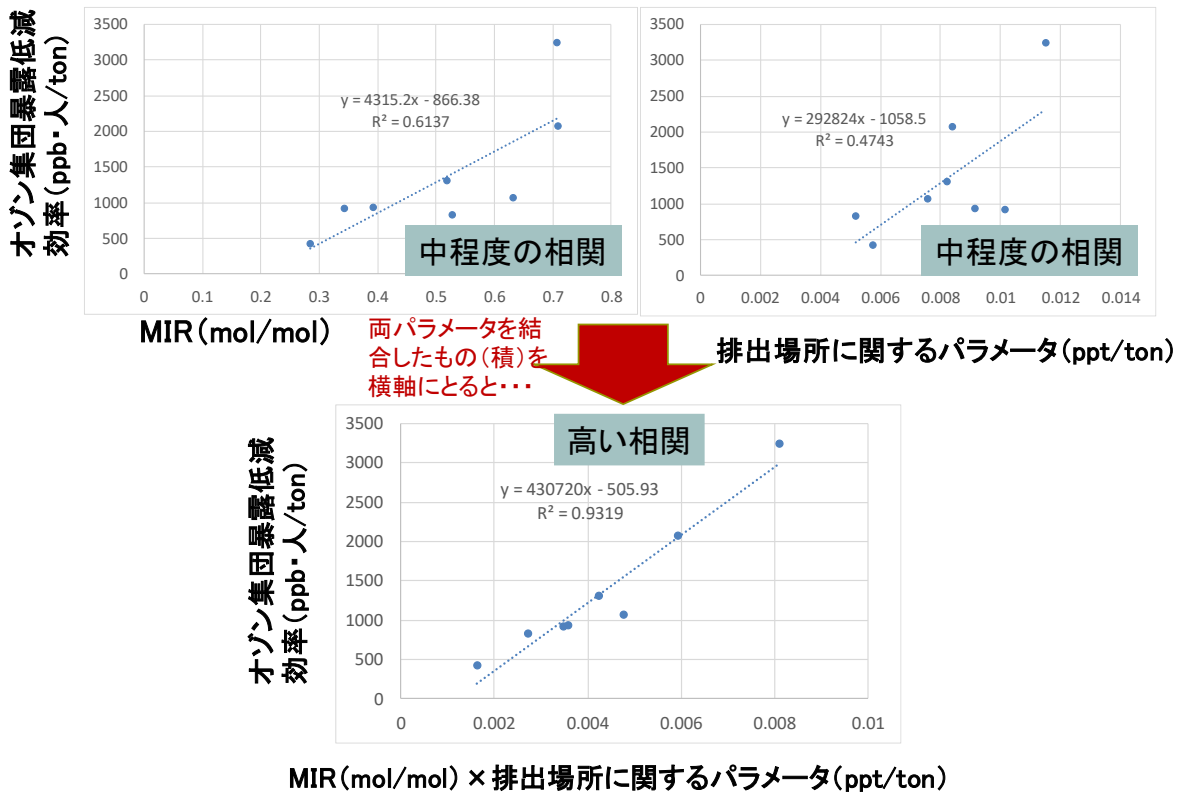


図 11 相関分析結果 (オゾン集団暴露量低減効率との相関)

すでに述べたように、立地場所によって、都市化率が異なり、したがって VOC (固定発生源、BVOC) と NO<sub>x</sub> (固定発生源、移動発生源) の組成比が異なる。また、立地場所により、気象条件も異なる。したがって、異なる場所で排出削減を行った場合、その場所での低減効率や、さらにはオゾン生成レジームが異なる場合もあると考えることが適当である。

自然発生源である BVOC は、地域性を左右する要因の 1 つである。都市部の街路樹や公園樹木の植生転換などの可能性を持っているにしても、基本的には VOC 排出削減の対象とはされない。しかし、VOC、NO<sub>x</sub>、光化学オキシダントの反応系には明確に関与し、固定発生源での前駆物質の削減が、オゾン低減に及ぼす効果に影響している。

以上のように、排出削減を行う場所の地域性も考慮して、VOC や NO<sub>x</sub> の排出削減効果を考える必要がある。

### 5-3 気象条件の影響

#### (1) 春季と夏季の比較検討

これまで、低減効率の計算においては、夏季に高濃度オゾンが発生しやすい気象条件、すなわち、日射が強く、地衡風が弱い条件（＝気圧傾度が小さい＝高気圧の等高線幅が広い）を設定して検討してきたが、春季にも、高濃度オゾンが観測されることが分かっている。

そこで、春季に高濃度オゾンが生成する気象条件を加えて比較検討を行った。この計算条件を表 8 に示す。

表 8 夏季と春季の高濃度気象パターンにおける違いを検討するための計算条件

a. 前駆物質の削減対策の期間 (排出量データ)	近年 (2016 年) 削減ケースでは、VOC または NOx を 10%削減
b. 対象地方	3 地方 (関東、近畿、東北)
c. 対象業種	対象業種 (VOC) : 立地特性の異なる 2 業種 (業種 A, B) 対象業種 (NOx) : 大規模燃焼点源の 2 業種 (業種 C, D)
d. 気象パターン、e. 平均化時間	2 パターン ①夏季に高濃度オゾン生成が頻発する気象パターン (気圧傾度弱、地衡風静穏、日射量大) の 2005 年における代表日 (地方ごと) ②春季に高濃度オゾン生成が頻発する気象パターン (気圧傾度弱、地衡風静穏または弱、日射量大) の 2005 年における代表日 (地方ごと) 平均化時間: オゾン濃度は昼間の 8 時間 (10-18 時) 値として計算

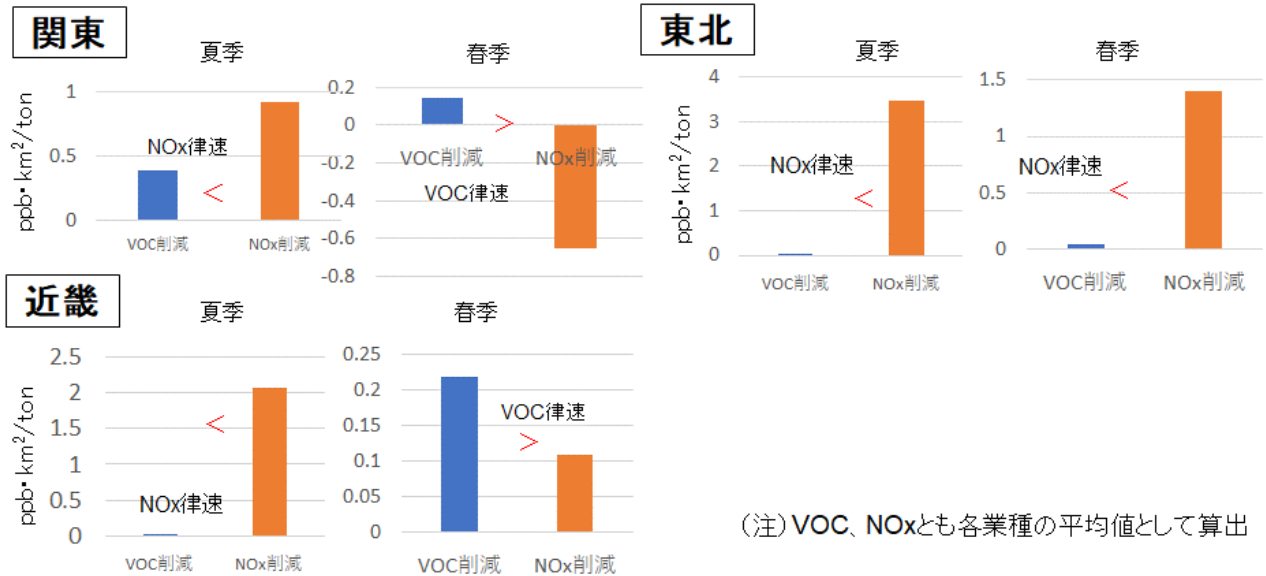


図 12 夏季と春季の高濃度気象パターンにおける低減効率の比較

図 12 より、夏季と春季の高濃度オゾン生成気象条件における指標値について、次のようになった。

- ①関東及び近畿では、夏季ではオゾン存在量低減効率 (NOx) > オゾン存在量低減効率 (VOC) となるが、春季では逆となった。
- ②東北では夏季及び春季ともオゾン存在量低減効率 (NOx) > オゾン存在量低減効率 (VOC) となった。  
→夏季には NOx 律速、春季には VOC 律速が強まる傾向となった。

## (2) オゾン低減効率の季節変動に関する検討

前項にて、夏季に加え、春季の気象条件でのオゾン低減効率について比較検討した。ここではさらに対象気象パターンを拡大し、1年間を通じた出現頻度の高い気象パターンについて、低減効率を計算し、その季節変動を検討した。ADMER-PRO に備えられている「気象条件類型化機能」により、年間の気象パターンのうち、出現頻度の高い上位 10 パターン程度（カバー率 24%）で計算しても、オゾン濃度の年間平均値を再現できる（決定係数  $R^2=0.87$ ）ことが分かっている。そこで、2005 年の年間気象条件のうち、出現頻度の高い上位 12 気象パターンを選定し、それぞれオゾン低減効率を計算した。計算条件を表 9 に、選定した気象条件を表 10 に示す。

表 9 オゾン低減効率の季節変動の検討における計算条件

a. 前駆物質の削減対策の期間 (排出量データ)	・近年（自主的取組目標年度以降） (排出量：2016 年度ベース) 〔2016 年度ベース排出量は、令和元年度事業にて推計した詳細推計版を使用〕
b. 対象地方	2 地方（関東、近畿）
c. 対象業種	VOC：環境省 VOC 排出インベントリ（2016）における上位業種のうち立地特性の異なる 2 業種、削減率は 10% 業種 A（湾岸地域に偏在） 業種 B（地理的に分散して立地） NOx：大気汚染物質排出量総合調査（2014 年度）の排出量上位業種のうち 2 業種、削減率は 10% 業種 C（大規模排出源、高度分布あり） 業種 D（大規模排出源、高度分布なし） ※計算結果の図においては、業種 D、業種 C の順になっていることがある。
d. 気象パターン、e. 平均化時間	2005 年度の 12 パターン（表 10）、オゾン濃度は昼間の 8 時間（10-18 時）値として計算

表 10 選定した気象条件

頻度 順位	関東地方							近畿地方									
	気象パターン			出現頻度 (%)	代表日	季節	平均気 温 (°C)	頻度 順位	気象パターン			出現頻度 (%)	代表日	季節	平均気 温 (°C)		
日射	風向	風速	日射						風向	風速							
1	C	NN	s	4.45	1/8	1	0.88	1	D	NN	s	4.34	12/26	冬	0.88		
2	C	SW	m	2.67	8/30	2	25.50	2	D	NE	s	4.05	2/12	冬	25.50		
3	C	NE	s	2.67	12/29	3	2.41	3	D	NN	m	3.47	1/8	冬	2.41		
4	D	NE	s	2.37	9/5	4	22.21	4	D	NE	m	2.31	2/15	冬	22.21		
5	D	NE	s	2.37	12/11	5	3.36	5	D	NW	s	2.31	12/23	冬	3.36		
6	B	SW	w	2.08	10/30	6	14.39	6	B	SW	w	2.02	8/4	夏	14.39		
7	D	SW	m	1.78	6/8	7	20.34	7	D	EE	m	2.02	10/11	秋	20.34		
8	C	NN	m	1.78	12/20	8	4.24	8	B	WW	m	1.73	4/5	春	4.24		
9	C	NE	w	1.78	12/1	9	7.61	9	C	EE	m	1.73	10/26	秋	7.61		
10	C	NE	m	1.48	6/5	10	21.16	10	D	EE	m	1.73	1/31	冬	21.16		
11	D	SE	m	1.48	5/11	11	14.84	11	D	NW	m	1.73	11/22	秋	14.84		
12	D	NW	w	1.48	6/30	12	25.53	12	B	XX	c	1.73	7/20	夏	25.53		
累積頻度（カバー率）				26.4%					累積頻度（カバー率）				29.2%				

凡例 日射：B=強、C=中、D=弱 風向：16 方位 風速：s=強、m=中、w=弱。風向 XX、風速 c は「静穏」の意味。

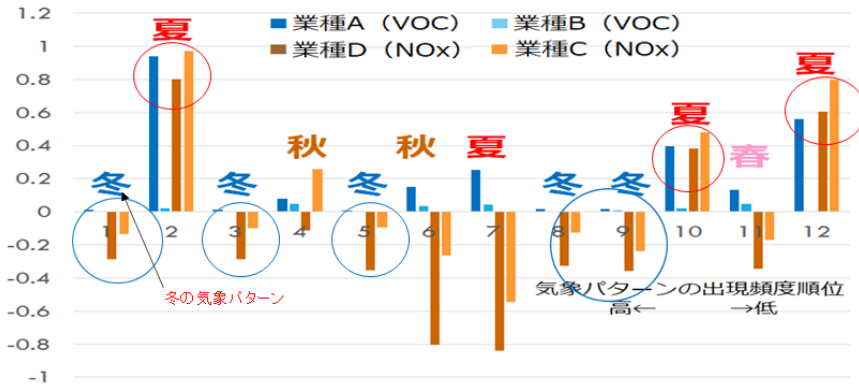


図 13 年間の出現頻度の高い 12 の気象パターンにおけるオゾン低減効率(関東)

関東地方における 12 の気象パターンでのオゾン存在量低減効率 (NOx) 及び (VOC) は図 13 のとおりである。

- ・夏の気象パターンでは、オゾン存在量低減効率 (VOC)、NOx とも大きく、オゾン存在量低減効率 (VOC) < オゾン存在量低減効率 (NOx) となる傾向 (○印)
  - 夏は VOC 及び NOx 削減ともオゾン濃度低減に寄与するが、NOx の方が効果が高い
- ・冬の気象パターンでは、オゾン存在量低減効率 (VOC) がほぼゼロで、オゾン存在量低減効率 (NOx) が負の値となる傾向 (○印)
  - 冬は VOC 削減がオゾン濃度低減に寄与せず、NOx を削減するとオゾン濃度は増加



図 14 年間の出現頻度の高い 12 の気象パターンにおけるオゾン低減効率(近畿)

- 近畿地方における 12 の気象パターンでのオゾン存在量低減効率 (NOx) 及び (VOC) は図 14 のとおり。
- ・夏の気象パターンでは、オゾン存在量低減効率 (NOx) が大きく、オゾン存在量低減効率 (VOC) <<< オゾン存在量低減効率 (NOx) となる傾向 (○印)
  - 夏は NOx 削減の効果が高い
- ・冬の気象パターンでは、オゾン存在量低減効率 (VOC) がほぼゼロで、オゾン存在量低減効率 (NOx) が負の値となる傾向 (○印)
  - 冬は VOC 削減がオゾン濃度低減に寄与せず、NOx を削減するとオゾン濃度は増加

冬季は関東、近畿で同じ傾向になっており、これは、冬にはどちらの地方でもオゾン濃度が、生成ではなく、NOx 排出による消失 (titration) に支配されているからと考えられる。また、夏季や春季の地方による傾向の違いは、BVOC 量の違いによる (生成量の違いによる) ところが大きいと考えられる。



#### 5-4 前駆物質の大幅削減、および将来シナリオの検討

##### (1) 近年 (2016 年) をベースとして前駆物質を大幅削減した場合の低減指標の検討

前駆物質 (VOC、NO<sub>x</sub>) をこれまでに検討した 10%削減ではなく、50%、あるいは 100%など大幅に削減した場合を仮定し、オゾン低減効率を検討した。大幅な削減を行った場合、指標値が線形性からはずれる可能性もある。

表 11 前駆物質の大幅削減を行った場合の指標値の計算条件

a. 前駆物質の削減対策の期間 (排出量データ)	近年 (2016 年) VOC、NO <sub>x</sub> それぞれにつき、10%、50%、100%の 3 段階
b. 対象地方	1 地域 (関東)
c. 対象業種	対象業種 (VOC) : 固定蒸発発生源の全業種 対象業種 (NO <sub>x</sub> ) : 大規模燃焼点源の全業種
d. 気象パターン、e. 平均化時間	2 パターン 夏季高濃度オゾン気象パターン (地衡風静穏、日射量大)、春季高濃度オゾン気象パターンのそれぞれ 2005 年における代表日 平均化時間: オゾン濃度は昼間の 8 時間 (10-18 時) 値として計算

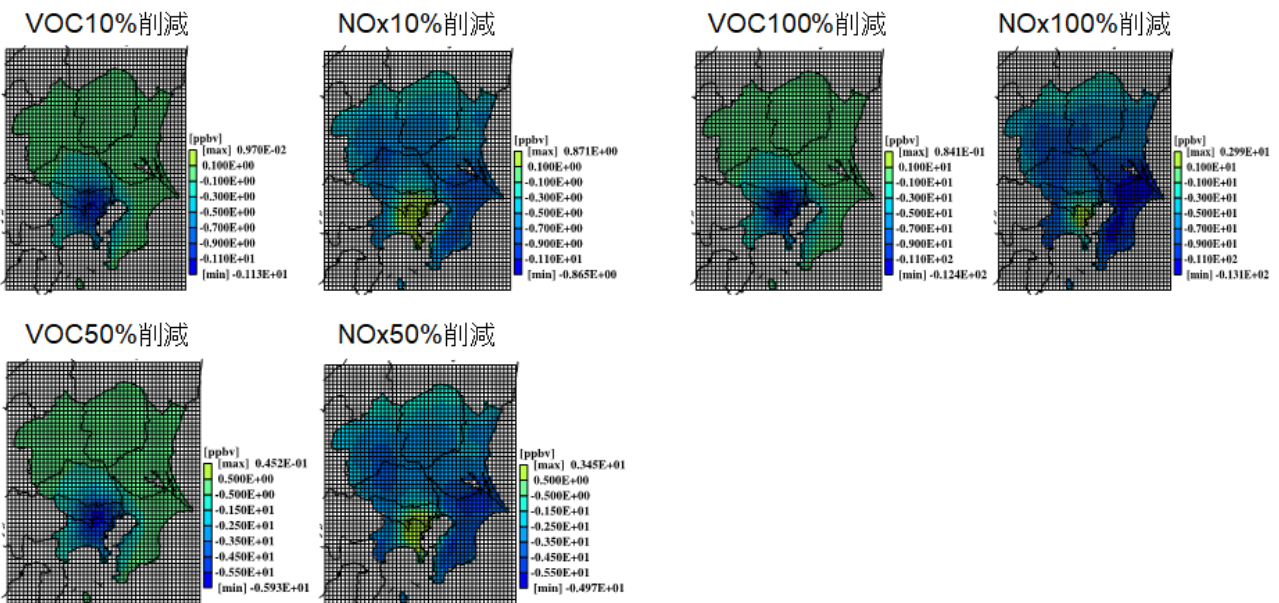


図 15 前駆物質を大幅に低減した場合のオゾン濃度の低減量の分布

NO<sub>x</sub> を 100%削減した場合、オゾン濃度は最大 13.1ppb 低下し、VOC を 100%削減した場合、オゾン濃度は最大 12.4ppb 低下する。

NO<sub>x</sub> を 10%削減した場合、オゾン濃度は最大 0.865ppb 低下し、VOC を 10%削減した場合、オゾン濃度は最大 1.13ppb 低下する。

→オゾンの最大削減量は大差はないが、NO<sub>x</sub> を大幅削減した方が、関東地域全体のオゾン低減効果が高い領域が増加する (青い領域が多い)。

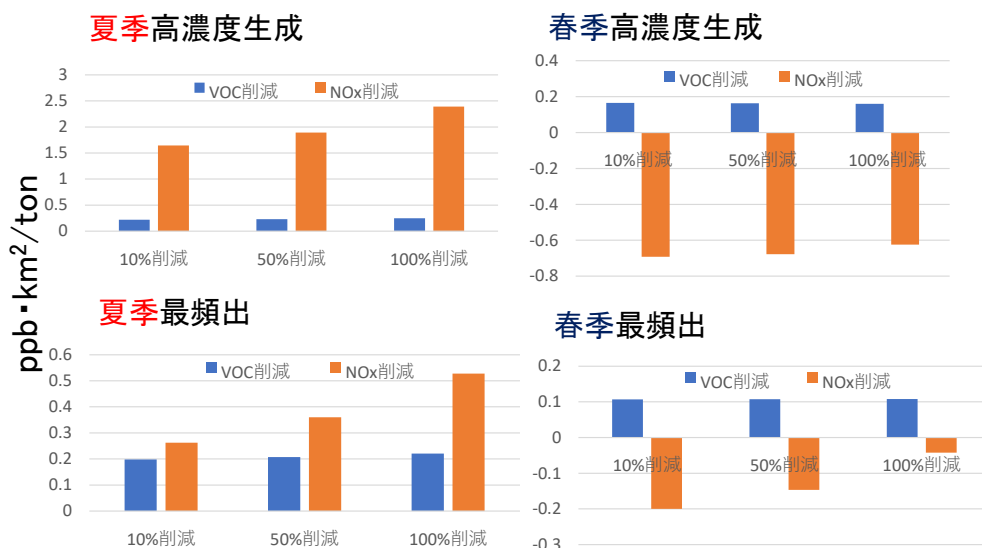


図 16 近年の状態をベースに前駆物質を大幅に低減した場合のオゾン低減効率の計算結果

次に、大幅削減時の低減効率について計算した結果を図 16 に示す。

・前駆物質を 10%削減した場合を基準とすると、大幅削減時（50%削減、100%削減）においては、オゾン存在量低減効率（NOx）が増大し、オゾン存在量低減効率（VOC）は殆ど増加しないという結果となった。

VOC の人為発生源を 100%排出削減しても、BVOC は残るため、VOC の人為発生源+自然発生源（BVOC）の和は、ゼロにはならない。これに対し、NOx の方は、人為発生源の NOx を削減すれば、大気中の NOx の量はかなり 0 に近づくため、オゾン生成レジームについての知見より、より NOx 律速に近づき、NOx 削減指標が上昇する（=NOx を削減した方が、オゾンの低減に資する）方向に指標値が大きくなるものと考えられる。

(2) 将来のベース状態を仮定して、前駆物質を大幅削減した場合の低減指標の検討

次に、将来のNOxやVOCの排出量が大きく変化した状態をベースとして、そこから人為発生源を削減した場合の低減効率を算出した。すでに5-1(1)に述べた通り、2005年をベースにVOCやNOxを削減した場合と、2016年度をベースにVOCやNOxを削減した場合とでは、低減指標が異なっている。これと同じことが、現在と比較して、例えば2030年ベースや、2050年ベースと言った将来についても言えると考えられる。そこで、将来のVOCとNOxのベース排出量を、東京都の報告書を参考に調整し、そこから固定発生源のVOCやNOxを削減した場合の効率指標を算出した。また、それぞれBVOC設定を0.5倍とした計算も行った。

表 12 将来シナリオを仮定した上での前駆物質削減効果の検討のための計算条件

a. 前駆物質の削減対策の期間 (排出量データ)	①2016年ベース排出量からVOCまたはNOxを10%、50%、100%削減 ①' ①に加え、BVOC設定を0.5倍とする ②2030年ベース排出量を設定(表13参照)し、VOCまたはNOxを10%、50%、100%削減 ②' ②に加え、BVOC設定を0.5倍とする
b. 対象地方	1地方(関東)
c. 対象業種	VOC: 固定蒸発VOC発生源(家庭を除く) NOx: 大規模固定燃焼発生源
d. 気象パターン、e. 平均化時間	夏季のオゾン高濃度生成気象パターンの2016年における代表日(8月5日)、オゾン濃度は昼間の8時間(10-18時)平均値

表 13 2030年のベース排出量の設定

	自動車	船舶・漁船	航空機	建設・産業・ 農業・機械	燃焼 家庭	燃焼 業務	蒸発 家庭
VOC	0.41	1.25	1.25	0.5	1.0	1.0	0.98*
NOx	0.33	1.02	1.17	0.38	0.69	0.86	1.0

※東京都大気中微小粒子状物質検討会報告書(令和元年7月)の「まとめ」の表4.2、表4.3より、民生部門の値を参照 [https://www.kankyo.metro.tokyo.lg.jp/air/air\\_pollution/torikumi/pm25\\_ox-report2019.files/1.4.pdf](https://www.kankyo.metro.tokyo.lg.jp/air/air_pollution/torikumi/pm25_ox-report2019.files/1.4.pdf)  
注: 数値は、2016年ベース排出量に対する比率。上記表に挙げていない発生源の排出量比率はすべて1.0に設定

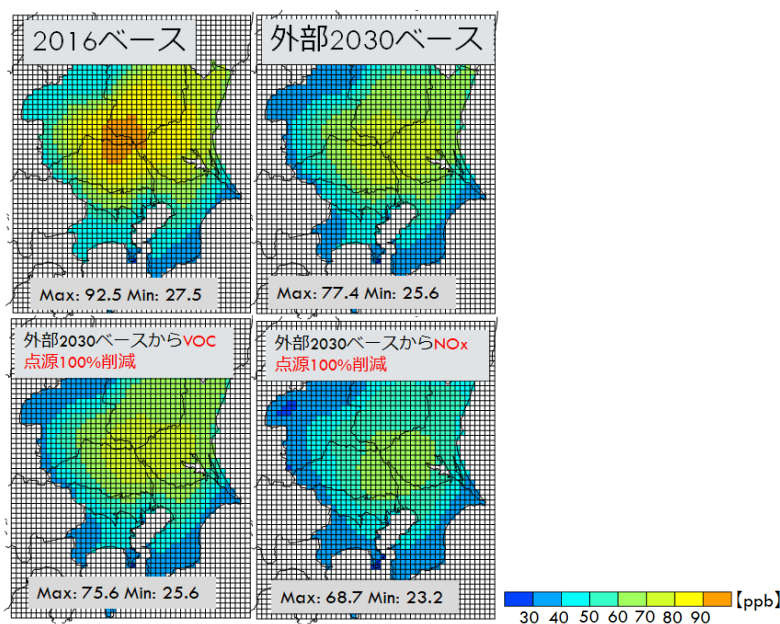


図 17 各ケースにおけるオゾン濃度の推定結果

図 17 のように、表 13 の外部シナリオに基づいて 2030 ベースの排出量を与えると、2016 ベースに比べてオゾン高濃度は大幅に低減する。そこからさらに VOC 点源排出量を 100%削減してもオゾン濃度はあまり変わらないが、さらに NOx 点源排出量を 100%削減すればオゾン濃度はさらに低減する。

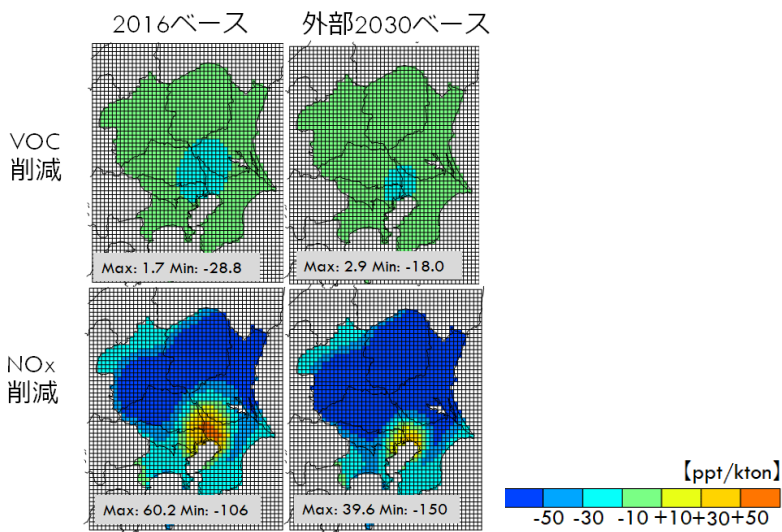


図 18 各年代ごとのオゾン低減感度

次に、前駆物質の単位削減量あたりのオゾン低減感度を求めると、2016 年から 2030 年になると、VOC 削減によるオゾン低減感度は低くなり、NOx 削減によるオゾン低減感度は高くなる (図 18)。

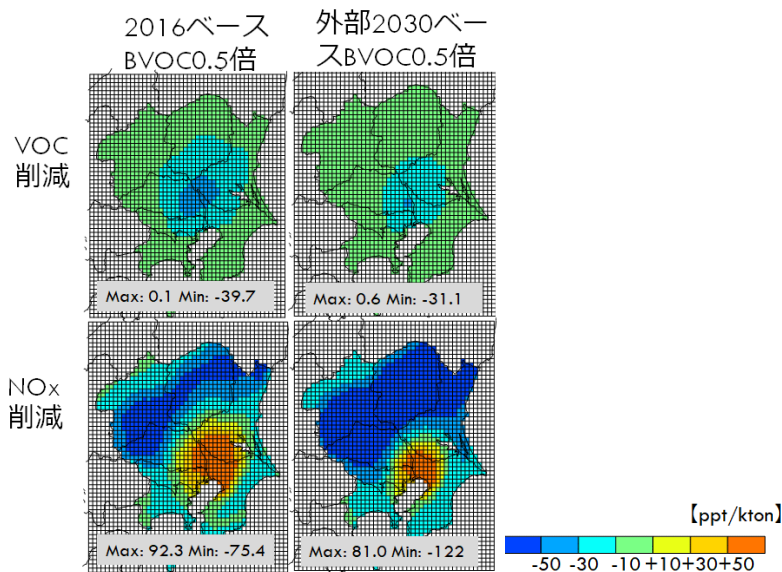


図 19 BVOC 設定を 0.5 倍にした場合の年代ごとのオゾン低減感度

図 18 と同様な計算を、BVOC=0.5 倍に設定して行くと (図 19)、2030 年には 2016 年より VOC 削減は効きにくくなり、NOx 削減は効きやすくなる。BVOC=1 倍の時と比べて、BVOC=0.5 倍の場合、VOC 削減は効きやすくなり、NOx 削減は効きにくくなる

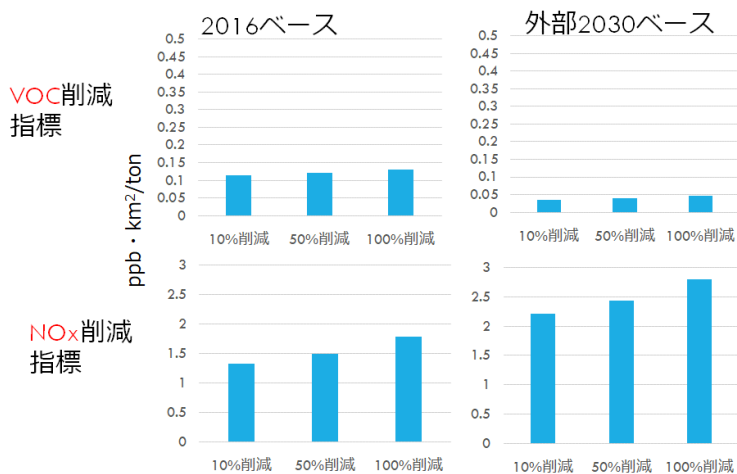


図 20 年代ごとのオゾン存在量低減効率

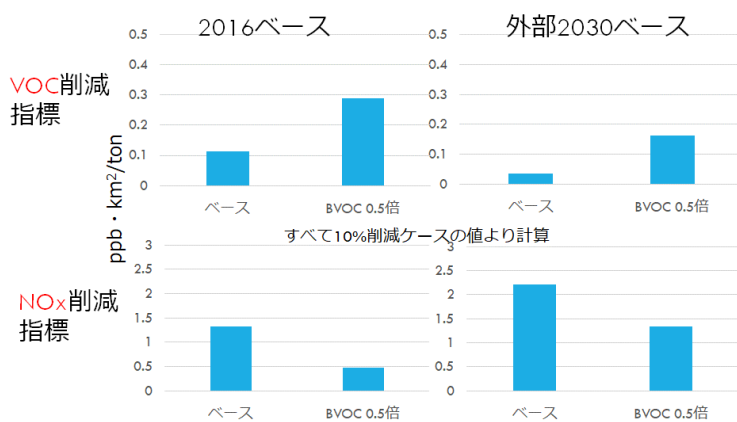


図 21 年代ごとのオゾン存在量低減効率(BVOC=0.5倍の場合)

オゾン存在量低減効率を計算すると(図 20)、2016年に比べて、2030年には、VOC削減指標はさらに小さくなり、NOx削減指標は大きくなる。すなわち、VOC削減よりも、NOx削減の方が、効率よくオゾン低減に繋がる傾向が強まる。

これを、BVOC設定を0.5倍として計算すると(図 21)、VOC削減指標は大きくなり、NOx削減指標は小さくなる。つまり、VOCが相対的にNOxに対して少なくなるため、図 20よりはVOC-Limited側に指標値が変化する。なお、年代比較として、2016年に比べて、2030年には、VOC削減指標はさらに小さくなり、NOx削減指標は大きくなること、2030年にはNOx削減指標の方が、VOC削減指標よりもずっと大きくなる傾向は、図 20と同じである。

## 5-5 BVOC の設定に関する検討

### (1) BVOC に関する知見の整理

BVOC は、植物から排出される VOC である。主要な BVOC はイソプレン、モノテルペン類、セスキテルペン類の 3 種類である (図 22)。モノテルペンは、イソプレンの 2 量体、セスキテルペンはイソプレンの 3 量体であり、この 2 つはそれぞれ多くの異性体がある。

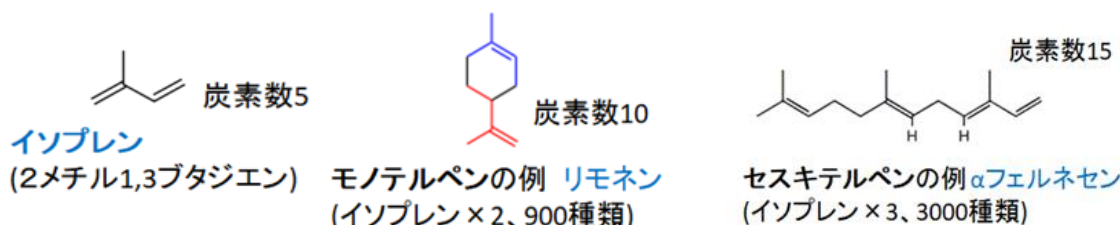


図 22 主要な BVOC の種類

出典: 中小企業等産業公害防止対策調査業務(光化学オキシダント等大気環境に係る科学的知見等に関する調査) 報告書

BVOC は、広葉樹、針葉樹等の森林樹木の他、農作物、街路樹、公園樹木など、様々な植物から排出され、その排出形態(排出の有無、排出物質、排出量)は多様である。我が国の代表的な優占 8 樹種の文献データでも、それぞれの BVOC を放出するもの、しないものがあり、放出するものに関しても、樹種により放出量には大きな開きがある。日本固有の樹種もある(表 14)。

表 14 国内優占 8 樹種の BVOC 放出

	イソプレン	モノテルペン類	セスキテルペン類
※スギ(針)	—	++	++
※ヒノキ(針)	—	+	—
コナラ(広)	++	—	—
イタヤカエデ(広)	—	—	—
※シナノキ(広)	—	—	—
チシマザサ(広)	—	—	—
ブナ(広)	—	—	—
ミズナラ(広)	++	—	—

凡例: ++:  $1 \mu\text{g/g} \cdot \text{h}$  以上、+:  $0 \sim 1 \mu\text{g/g} \cdot \text{h}$ 、—: 放出なし  
 単位は乾燥葉重量、単位時間あたり ※は日本固有種  
 出典: 松永ら、大気環境学会誌、Vo1.47, No.1, 2012 より編集

表 15 我が国の BVOC の総排出量の推計例

	VOC 総排出量	うち BVOC
Kannnari et al. (2007)	—	140 万 t/年
PM2.5 排出インベントリ (24 年度) *1	337 万 t/年	235 万 t/年 (69.7%)
PM2.5 排出インベントリ (27 年度) *2	307 万 t/年	213 万 t/年 (69.4%)
Chatani et al. (2015) *3	—	238~284 万 t
ADMER-PRO での設定値	—	330 万 t/年 (全国)

\*1 森川多津子, 2017. PM2.5 排出インベントリの最新状況と課題, 大気環境学会誌, Vol.52, A74-A78

\*2 30 年度 PM2.5 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、2019 年 3 月

\*3 Satoru Chatani, 2015. Estimate of biogenic VOC emissions in Japan and their effects on photochemical formation of ambient ozone and secondary organic aerosol, Atmos. Environ., 120, pp.38-50

我が国の BVOC の総排出量については、表 15 のように様々な推計結果がある。VOC の 7 割程度が BVOC と考えられているが、推計値には大きな開きがある。近年の知見を参照する限りにおいては、ADMER-PRO の

設定値である全国 BVOC 排出量 330 万トン、はやや大きめに見積もっている可能性がある。

森林からの BVOC は都市部のオゾン生成にも影響しているが、BVOC 排出量は十分に捉えられておらず、気象条件によっても変動する。

### (2) BVOC 排出量のボトムアップ推計の現状と課題

BVOC の排出量を、葉や枝レベルの測定値から積み上げて全体の排出量を推計する方法をボトムアップ推計と呼ぶ。それには下記のような様々なデータが必要であるが、現状では未だ知見が不足している。

- ①基礎放出量（標準条件下での葉、枝レベルの BVOC 放出量）
- ②資源量（樹種、葉重量、植生分布、葉の傾き・重なり）
- ③補正係数（日射、温度、季節、ストレス）

基礎放出量は、標準状態（光量（光合成有効光量子束密度 PPFD=1000 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、葉温 30 $^{\circ}\text{C}$ ）での BVOC の放出量である。葉や枝あたりの基礎放出量データについて、様々な樹種、地域、季節における実測データが少なく、これら測定値を土地面積当たりの BVOC 放出量に関連付けるための知見が不十分しているのが現状である。イソプレンは反応性が高く、1 つの樹木の低い位置と高い位置で測定しても、濃度が大きく変わることがある。植生分類は、優占樹種で分類されるため、実際の植生の詳細までは表せないことが多い。例えば分類上「ブナ林」であっても、実際にはブナが 50%程度で、残りは様々な樹木が混合しているような場合がある。

### (3) BVOC 排出量のトップダウン推計の現状と課題

そこで、トップダウン推計ができないか、試みた。トップダウン推計とは、衛星観測データから推計する方法であり、イソプレンから生成するホルムアルデヒド (HCHO) を衛星観測して、BVOC 排出量を推計する方法である。アメリカにおける既往研究の例と、我が国における衛星観測データと、ADMER を用いたシミュレーションによる BVOC 排出量推計結果をまとめて図 23 に示す。

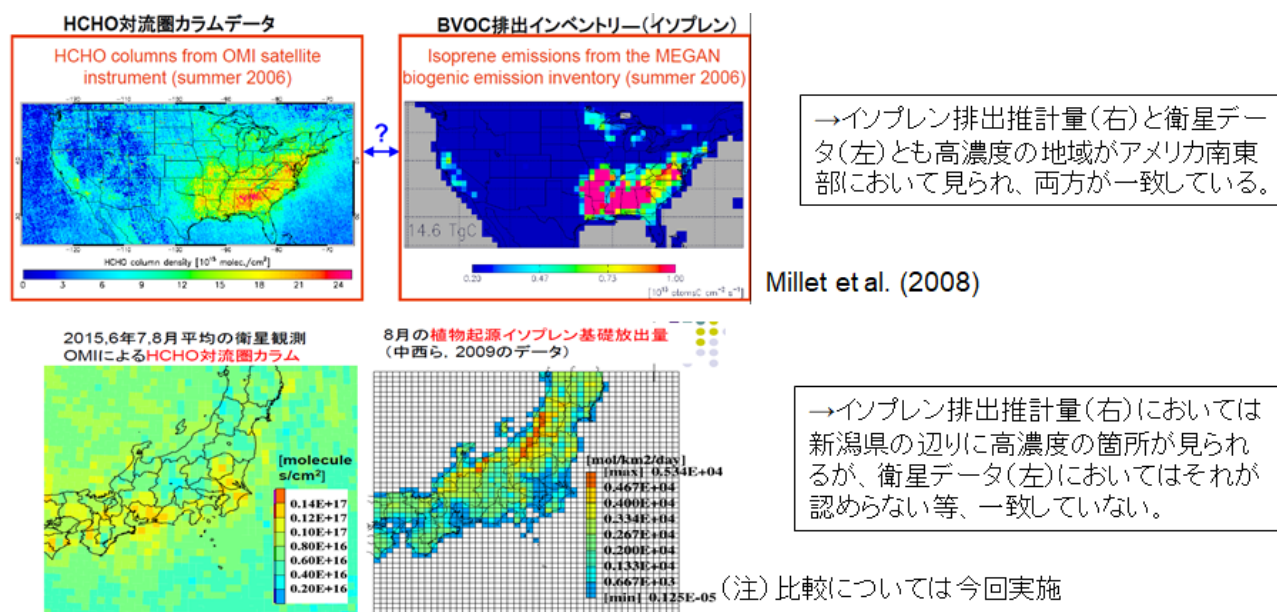


図 23 BVOC 排出量のトップダウン推計のアメリカでの既往研究と我が国に対する適用の試み

アメリカにおいては、図 23 のように、衛星観測によるホルムアルデヒド HCHO（イソプレンから生成）が、イソプレン排出量の計算値とおおむね合致する事例が報告されている。一方、日本における衛星による HCHO 観測データとイソプレン排出量の計算値を比較すると合致しない。これは、我が国における BVOC 放出量の計測値等の知見不足に加え、植生分類が優占樹種で表現されていることや、実際の植生が複雑で、BVOC の高精度な推計を行う上ではうまく合致していないことも要因の 1 つと考えられる。

#### (4) BVOC 設定を変更した場合の指標値の検討

前項までで述べたように、我が国での BVOC 排出量の推計値には大きな幅があり、ボトムアップ推計、トップダウン推計のいずれに関しても、現状では課題が多いことが明らかになった。BVOC の設定は、以下のような理由から、重要な検討項目と考えられる。

- ①BVOC は固定発生源以外の無視できない大きさの VOC の主要発生源であること
- ②BVOC の設定次第でオゾン生成レジームが変わってしまうこと
- ③未把握 BVOC 成分の存在（測定方法未確立、存在量・反応経路不明）

ADMER-PRO における BVOC の現在の設定（全国排出量として 330 万トン）が、実際の BVOC 排出量とどの程度異なっているのか、その不確実性の幅を推測することはできなかった。そこで、試みとして、BVOC 排出量の設定値を、基準の 1.0 倍から 2.0 倍、0.5 倍と変化させ、VOC を 10%削減、NOx を 10%削減とした場合のオゾン存在量低減効率を検討した。

表 16 設定を変更した場合のオゾン低減効率の検討(計算条件)

a. 前駆物質の削減対策の期間 (排出量データ)	近年(2016年) VOC、NOx それぞれにつき、10%削減 BVOC : ベースに対し 0.5 倍、1.0 倍、2.0 倍に設定
b. 対象地方	3 地域 (関東、近畿、東北)
c. 対象業種	対象業種 (VOC) : 固定蒸発発生源の 2 業種 (業種 A、業種 B) 対象業種 (NOx) : 大規模燃焼点源の 2 業種 (業種 C、業種 D)
d. 気象パターン、e. 平均化時間	1 パターン 夏季高濃度オゾン気象パターン (地衡風静穏、日射量大) の 2005 年における代表日 平均化時間 : オゾン濃度は昼間の 8 時間 (10-18 時) 値として計算

### オゾン存在量低減効率

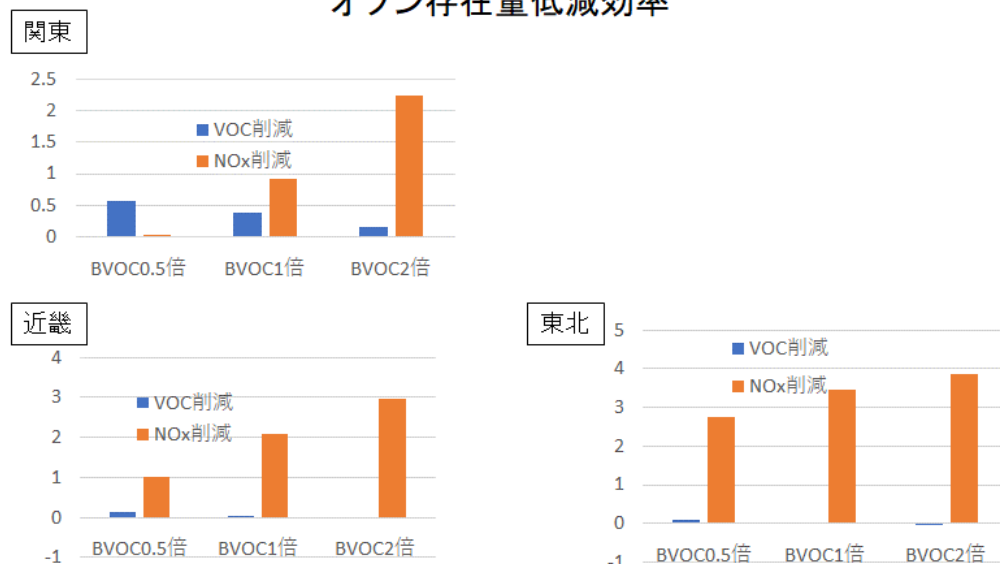


図 24 BVOC 排出量の設定を変更した場合のオゾン低減効率の変動

図 24 より、BVOC 排出量の設定によりオゾン存在量低減効率は大きく変わり、特に関東では VOC 削減と NOx 削減によるオゾン存在量低減効率の大小についても変わる。BVOC の排出量をどのように設定するかは今後も更なる検討が必要である。



### (5) ADMER-PRO における BVOC 設定の検討

ADMER-PRO のリリースは 2011 年であり、当時の最新知見を用いて計算方法やデータを整備しているが、その後の BVOC 関連の知見の進展を含め、ADMER-PRO の BVOC 算出に係る設定が、十分でない可能性がある。そこで、東京都環境科学研究所の國分優孝氏に、現状の ADMER-PRO の BVOC 算出に係る設定における改善課題を整理していただいた。

まず、ADMER-PRO における BVOC 排出量の計算フローを図 25 に示す。土地利用データと樹木や作物のデータから植生分類別面積を求める。ここに、表の Bao らのデータをもとに作成した植生分類別の基礎放出量（表 17、広葉樹、針葉樹、稲に対する ADMER-PRO の設定値はそれぞれ下段の数値）を乗じる。植物量は、広葉樹の落葉などによる植生量の変化を加味し、また、時々刻々の日射と気温の変動を加味して補正計算をしている。

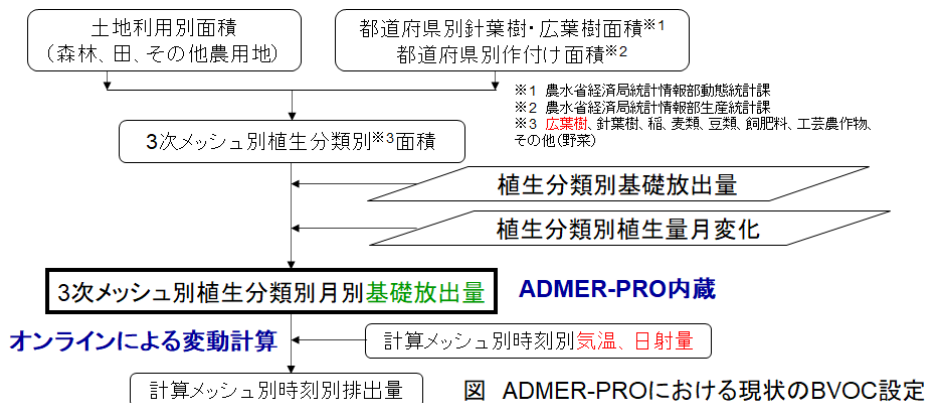


図 25 ADMER-PRO における BVOC 排出量の算出フロー

表 17 ADMER-PRO における植生分類別の基礎放出量の設定内容

表Ⅳ.3 Kannariら(2007)において各植生分類に対して設定された標準状態の植生面積あたり排出係数(落葉なしの状態)(神成と馬場 私信)と日本の植物種のデータ更新結果(太字)(単位:  $\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{h}$ )

植生分類	インプレシ	モンテルベン	その他のVOCs	NMVOC計
広葉樹	2,112	360	872	3,353
	<b>21,435</b>	<b>193</b>	<b>690</b>	<b>22,318</b>
針葉樹	1,548	1,565	1,038	4,150
	<b>0</b>	<b>3,886</b>	<b>1,234</b>	<b>5,120</b>
稲	102	255	153	510
	<b>0</b>	<b>567</b>	<b>2,410</b>	<b>2,977</b>
麦類	12	12	10	34
豆類	22	0	0	22
飼肥料	47	118	71	235
工芸農作物	0	59	235	294
その他	56	141	84	281

注: 太字は日本の植物種データを用いた更新結果であることを示す。

日本の植物種データとしてグロースチャンパー法によるBao et al. (2008)のデータを使用

現在の ADMER-PRO において用いている BVOC の計算方法と基礎放出量データについて、都環研にて検討いただき、課題と改善提案を整理していただいた。その結果を表 18 に示す。

表 18 ADMER-PRO で用いている BVOC の計算方法と基礎放出量データに関する課題と提案事項

	指摘内容	改善提案
指摘 1：広葉樹の分類の細分化	・広葉樹には、樹種により「放出するもの」と「全く放出しないもの」があり、さらに「放出するもの」でも、樹種により放出量と成分（イソプレン・モノテルペン）に大差がある。	・「広葉樹」という括りではなく、より精緻化した樹種ごとの放出量設定を推奨。 ・植生マップを精緻化する。
指摘 2：基礎放出量の季節変化について	・多くの樹種において、基礎放出量自体が季節変化する（気温と光量が同じでも、季節により異なる）。 ・ADMER-PRO の BVOC データは夏季の測定データであり、これを通年一定と見なして基礎放出量を設定している。	・夏以外の季節をシミュレーションする場合、季節変動も考慮して設定する。
指摘 3：モノテルペン放出量の光量依存性	・広葉樹から放出されるモノテルペン類は、温度だけでなく光量によっても放出量が増える。 ・ADMER-PRO では温度依存モデルが使われている。	・広葉樹のモノテルペン放出量推定に「温度光量依存モデル」を採用する。

ADMER-PRO における植生分類は、森林樹木は大きく「広葉樹」「針葉樹」と分類されているが、広葉樹の中でも樹種により BVOC 放出は大きく異なるため、より細かな分類ごとに放出量設定を行うことが望ましい。植生分類も、植生自体の精緻化ができなくても、例えば、放出する地域としない地域を設定するなどの方法も有効である。

ADMER-PRO では、日射と気温による変動は計算しているが、樹木そのものが季節により活量が異なるため、同じ日射と気温であっても春と秋で放出量が異なる。ADMER-PRO の設定の元になっている Bao らの測定データは夏季の 8 月に測定されたものであり、これを通年同じとして計算すると、夏以外の季節の BVOC 放出量を高めに算定している可能性がある。

広葉樹から放出されるモノテルペン類は、温度と光量の両方に依存する。ADMER-PRO では温度依存モデルが使われているが、温度光量依存モデルを採用することが望ましい。

(6) 都内の街路樹・公園樹木を加味した場合の低減指標への影響検討

次に試みとして、都環研が所有する既存の知見に基づいて、東京都内の BVOC の基礎放出量データを更新して、オゾン低減指標の算出を試みた。ADMER-PRO の現状の設定では、都市化率が高い地域では植生が殆どないが、都環研は街路樹や公園樹木の植生量調査や、これらからの BVOC 算定を行っており、これを加算した。



広葉樹・モノテルペンの更新例

図 26 東京都内の BVOC の基礎放出量データの更新例

表 19 東京都内の BVOC の基礎放出量データの更新結果

基礎放出量 (8月) 単位: kg/h		イソプレン		モノテルペン		その他 BVOC	
		多摩	23 区	多摩	23 区	多摩	23 区
広葉樹	更新前	6,497	61	60.9	0.6	210	2
	更新後	6,519	88	146	104	210	2
針葉樹	更新前	0	0	1,065	10	338	3.3
	更新後	0	0	1,067	12	340	5.5
その他	更新前	3.8	0.8	15	3	30	6
	更新後	7.3	4.7	15	3	6	6

表 19 のように、広葉樹のモノテルペンやその他樹木のイソプレンに関しては、基礎放出量が大幅に改善された。

次に、更新前後の基礎放出量の設定の下で、東京都内の狭領域、および都内全域平均として、VOC および NO<sub>x</sub> 削減によるオゾン低減効率を算出した (図 27)。結果として、低減指標はほとんど変化しなかった (下記は、夏季における計算結果であるが、春季も同様であった)。

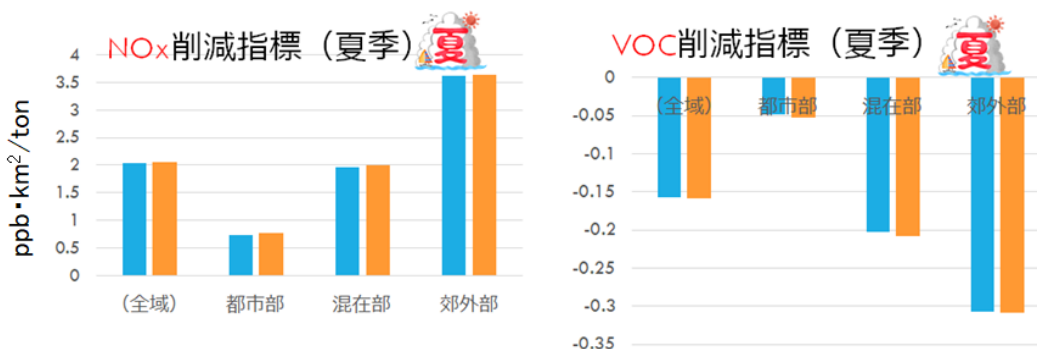


図 27 東京都内の BVOC 基礎放出量を変更した場合のオゾン低減効率の変動性の検討

ADMER-PRO における BVOC の設定は、近年の全国 BVOC 排出量の推計値との比較や、現行の基礎放出量設定の元となっている Bao らのデータが高めの設定 (夏季の測定値であり、植物の活量の変化に基づく季節変動を加味していない) となっていることから、BVOC 排出量を高めに算定している可能性が示唆される。一方では、都市圏での BVOC 排出量は、街路樹等を加味して上方補正する必要がある。

そもそも、植生データの精度は BVOC インベントリの詳細な算定に適するほどには精緻でなく、BVOC 測定値等の知見の不足など、多くの課題が残されている。しかしながら、BVOC 設定を 0.5 倍や 2 倍に設定して計算した結果では、BVOC 設定量が高いほど VOC 削減指標は若干低下し、NO<sub>x</sub> 削減指標は大きく増加する。したがって、もし真の BVOC 排出量が現状の ADMER-PRO の設定による計算値より若干低いと考えた場合、VOC 削減に基づくオゾン低減効果は少し低めに、一方で NO<sub>x</sub> 削減によるオゾン低減効果は、現在の計算結果よりも若干高めに見ておけばよいことになる。

#### (7) BVOC 設定を変更した場合の実測値との比較検討

(4) においては、BVOC 設定を 0.5 倍から 2 倍の範囲で変更した上で、固定発生源からの VOC や NO<sub>x</sub> を削減設定して、オゾン低減指標の変動について検討したが、ここでは、BVOC 設定のみを 0 倍、0.5 倍、1.0 倍 (ベース)、2.0 倍に変更したとき、オゾン濃度および VOC の実測値とどの程度整合性があるかを検証した。

表 20 BVOC 設定を変更した場合の実測値との比較検討(計算条件)

a. 前駆物質の削減対策の期間 (排出量データ)	近年 (2016 年) 固定発生源からの VOC、NO <sub>x</sub> 排出量は削減しない BVOC : ベースに対し 0 倍、0.5 倍、1.0 倍、2.0 倍に設定
b. 対象地方	1 地域 (関東)
c. 対象業種	—
d. 気象パターン、 e. 平均化時間	1 パターン 夏季高濃度オゾン気象パターン (地衡風静穏、日射量大) の 2017 年における代表日 (7/8) 平均化時間 : オゾン濃度は昼間の 8 時間 (10-18 時) 値として計算

オゾン濃度の実測値については、環境省の一般大気測定局のデータを用いた。また、BVOC の実測値については、イソプレンは 2017 年から開始された環境省の VOC 成分自動測定 (測定地 : 東京、埼玉、群馬、測定時間 : 2 時、14 時) の値を、ホルムアルデヒドは埼玉県環境科学国際センターによる文献値と比較した。

計算値と実測値の地理的な分布を比較する他、以下の3つの統計指標を用いて一致性を評価した。

- ①決定係数  $R^2$  (この値が大きければ相関性が高い)
- ②NMB (Normalized Mean Bias : この値が正であれば計算値が高めになっている)
- ③NME (Normalized Mean Error : この絶対値が小さければ一致性が高い)

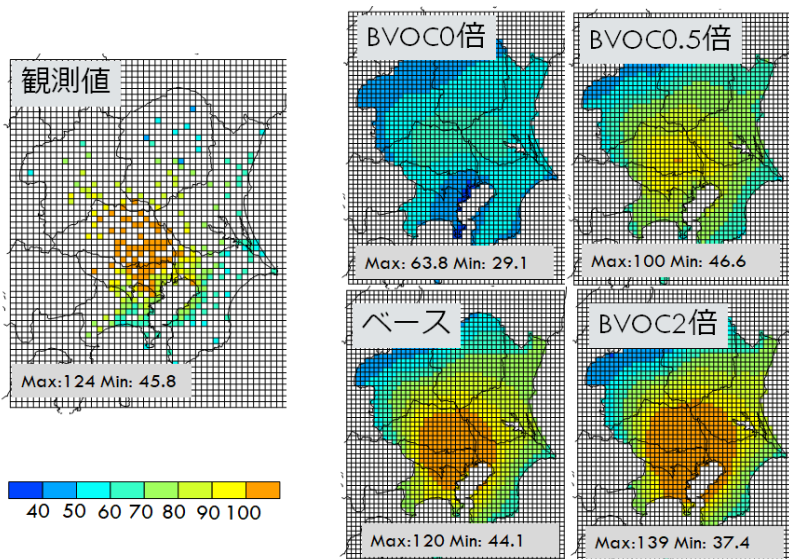


図 28 BVOC 設定を変更した場合のオゾン濃度の観測値と計算値の比較(地理分布)

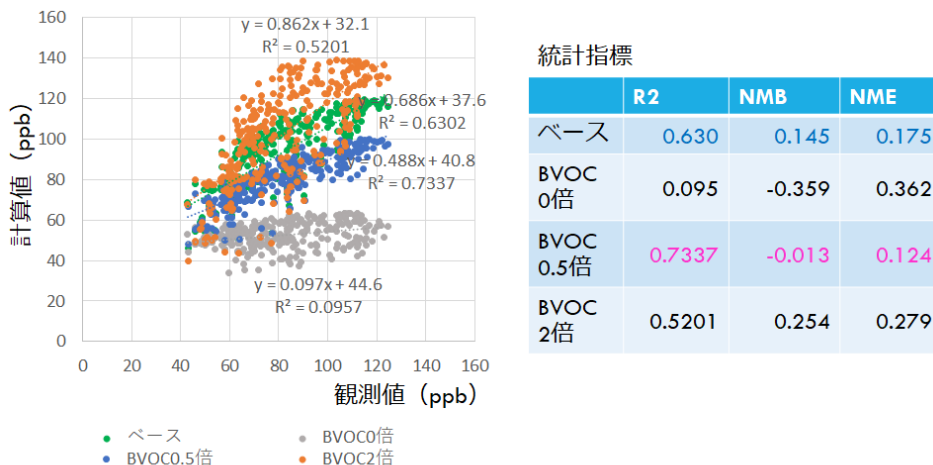


図 29 BVOC 設定を変更した場合のオゾン濃度の観測値と計算値の比較(統計指標)

まず、オゾン濃度の場合、地理分布からは、一致性が高いのはベースケース (図 28) であり、BVOC=0 倍や 0.5 倍では最高濃度が再現されない。一方、統計指標により評価すると、BVOC=0.5 倍の場合が最も一致性が高い (図 29)。この違いは、図 28 の最高値については、図 29 のグラフにおいて、BVOC=1.0 倍のベースの場合 (緑色のプロット)、観測値と計算値の最高値がともに 120ppb 付近にあって最高値が再現されているが、データ全体のばらつきは BVOC=0.5 倍 (青色のプロット) の方が小さい (回帰直線からの外れ方が小さい) ためと考えられる。

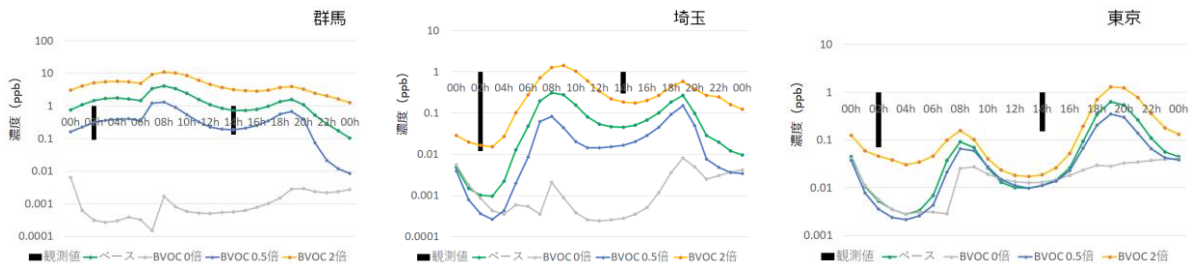
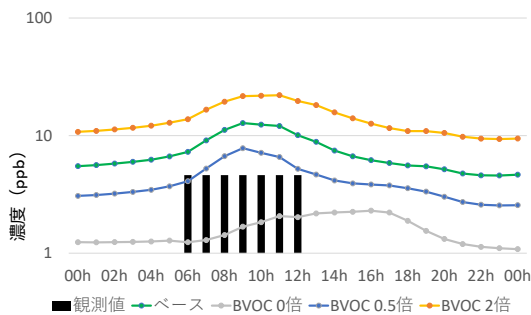


図 30 BVOC(イソプレン)の観測値と計算値の時系列変化の比較



注：観測値は細野ら（2016）の寄居における7，8月における昼間（6-18時）の3年間（2011-13年）平均値  
[https://tenbou.nies.go.jp/science/institute/region/journal/JELA\\_4102015\\_2016.pdf](https://tenbou.nies.go.jp/science/institute/region/journal/JELA_4102015_2016.pdf)

図 31 BVOC(ホルムアルデヒド)の観測値と計算値の時系列変化の比較

次に BVOC の観測値と計算値の比較については、イソプレンにおいては、群馬では  $BVOC=0.5$  倍、埼玉、東京の場合は  $BVOC=2.0$  倍のケースが実測値と計算値の一致性が相対的に高く、ホルムアルデヒドにおいては、 $BVOC=0.5$  倍の場合が実測値と計算値の一致性が相対的に高い。イソプレンについては、計算値が 8 時と 19 時にピークを示す時系列変化が 3 地点とも認められた。

この朝夕にピークを示し、昼間が少し濃度が低下する変動パターンは、経験とは異なる印象があるとの検討会委員のご意見があったが、混合層高さ、VOC 放出量、OH ラジカルの放出量のバランスによっては起こり得るとの文献も散見される。

全体的には、 $BVOC=0$  倍または 2 倍の場合には実測値と計算値が乖離している結果となることが多く、一致性が高いのは  $BVOC=0.5$  倍または 1.0 倍（ベース）の場合である。なお、0.5 倍と 1.0 倍のどちらが一致性が高いかについては、検証項目によって異なる。

## 6 まとめと今後の課題

本事業においては、前駆物質（VOC、NO<sub>x</sub>）を削減した際、オゾン濃度がどの程度、どのように低減するか等を定量的に評価することを目的として事業を実施した。

その結果、評価式を「オゾン存在量低減効率」として定量的な評価を行うことは可能であり、同式を用いることにより次が分かった。

- シミュレーションによる計算によれば、全国的には VOC より NO<sub>x</sub> の方がオゾン濃度の低減効果が高く、近年では特にその傾向が強い。
- 関東や近畿といった地方、それよりも狭い地域で前駆物質を削減した場合、季節による違いについても評価した。その結果、VOC と NO<sub>x</sub> のどちらの削減が有効かは、削減する場所や季節によっても異なる。

今後の光化学オキシダント対策の議論に際しては、上記の成果を踏まえた、前駆物質（VOC、NO<sub>x</sub>）の違いによるオゾン濃度の低減効果の差、前駆物質を削減する場所等も考慮した細かな検討とともに、更なる多角的検証が必要と考えられる。