資料２－２

VOC排出削減効果の定量的評価等に関する調査

令和3年2月8日

定量的評価に関する調査検討会

調査の背景と目的

（昨年度の事業）

- 今後も引き続きVOC排出抑制が求められる中、自主的取組については効率的に実施していく必要がある。
- このため、昨年度は、VOC排出削減による光化学オキシダントの低減効果を定量的に評価するための調査を行った。具体的にはVOCについて、排出削減前後のオゾン濃度(※1)を計算し、「オゾン存在量低減効率」により、効果を定量的に評価した。

（※1）光化学オキシダントの主成分はオゾンであり、以下では光化学オキシダント濃度はオゾン濃度と記載する。

（今年度の事業）

- 効率的な自主的取組の実施を目的として、今年度は以下の調査を実施した。

① 窒素酸化物（NOx）の排出削減による効果の定量的評価：昨年度に続き、もう一つの光化学オキシダントの前駆物質であるNOxを排出削減した場合の、オゾンの低減効果を定量的に評価した。

② 気象パターンによる変動：夏季及び春季における「オゾン存在量低減効率」を求め、季節による違いについて検証を行った。

③ 前駆物質の大幅削減の試算：VOC及びNOxの排出量を大幅削減した場合の「オゾン存在量低減効率」を計算した。

④ 植物起源VOCの評価：植物起源VOC（BVOC）について過去の調査を踏まえ、知見の整理を行った。又、BVOCの排出量推計値の違いが、「オゾン存在量低減効率」に与える影響についての検証を行った。

調査体制

- 調査体制としては以下のとおり。
- 有識者や産業界委員からなる検討会を設置。

定量的評価に関する調査検討会委員　（○：委員長、五十音順、敬称略）

事務局
（一社）
産業環境
管理協会

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	(国研)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
須貝　英生	一般社団法人 日本塗料工業会	常務理事
茶谷　聡	(国研)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	主査
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・環境研究部	主任研究員

外注

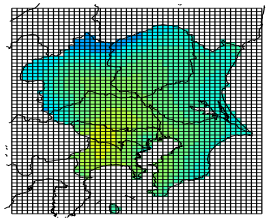
氏　名	所　属	役　職
井上　和也	(国研)産業技術総合研究所 安全科学研究部門	主任研究員

① NOxの排出削減による効果の定量的評価（評価・計算方法）

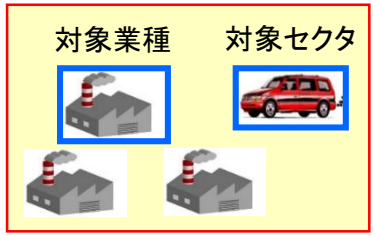
- 昨年度はVOCの排出削減がオゾン低減に及ぼす効果の定量的評価を行ったが、今年度はNOxについて、排出削減前後のオゾン濃度を計算し、オゾン低減効果を定量的に評価した。昨年度と同じく、評価式は「オゾン存在量低減効率」とし、シミュレーションモデルは「ADMER－PRO」とした。
- 具体的な計算方法は以下のとおり。

①VOC、NOx等排出量（対策前）

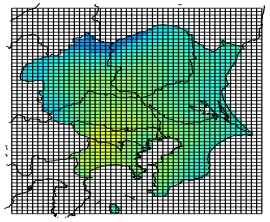
③オゾン濃度（対策前）



②VOC、NOx等排出量（対策後）

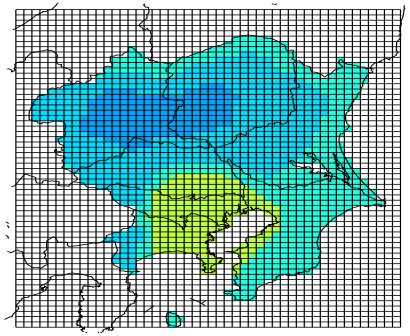


④オゾン濃度（対策後）



※NOx排出量以外は全て①と同じ
（対象業種、対象セクタのNOx排出量のみ変更）

⑤オゾン濃度低減量＝③−④（地表付近、メッシュごと）



各メッシュで「オゾン濃度低減量×セル面積」を計算し、計算対象領域全体でこの総和（オゾン存在量低減量＝式Aの分子）を計算

オゾン存在量低減効率（NOx）（計算期間,対象地方）

$$= \frac{\sum_{\text{計算対象領域}}(\text{オゾン濃度低減量} \times \text{メッシュ面積})}{\text{NOx排出削減量（①−②）}} \quad \cdots \text{（式A）}$$

（オゾン存在量低減効率（NOx）の意味）
NOx排出量を削減した場合、地表付近でオゾン濃度がどれだけ低減するか
→値が大きいほど、単位NOx削減量あたりのオゾン濃度の低減効果が高い

① NOx排出削減による効果の定量的評価（計算条件）

- 昨年度実施したVOC排出削減による計算結果と比較するため、期間及び対象地方等を下表としてオゾン存在量低減効率（NOx）（※1）を求めた。
- 今回はNOxによる削減効果を評価するため、NOxのみ対策前後の値を用いて計算することとし、光化学オキシダントのもう一つの原因物質であるVOCについては対策前後で値を変えていない。

1. NOx対策の期間（排出量データ）	①対策初期（対策初期の削減効果の評価のための計算） →対策前：2005年度の排出量（※2） 対策後：2005年度の排出の10%削減値 ②近年（近年の削減効果の評価のための計算） →対策前：2016年度の排出量（※3） 対策後：2016年度の排出の10%削減値
2. NOx固定発生源の範囲	大気汚染物質排出量総合調査（2014年度）の排出量上位4業種（電気業、窯業・土石製品製造業、鉄鋼業、化学工業）
3. 対象地方	3地域（関東、近畿、東北）
4. 気象パターン、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年度における代表日）、オゾン濃度は昼間の8時間（10-18時）値として計算

※1 オゾン存在量低減効率は、VOC削減によるものは「オゾン存在量低減効率（VOC）」、NOx削減によるものは「オゾン存在量低減効率（NOx）」と表記
※2 ADMER-PRO内蔵の排出量データ使用
※3昨年度事業にて推計した詳細推計データを使用

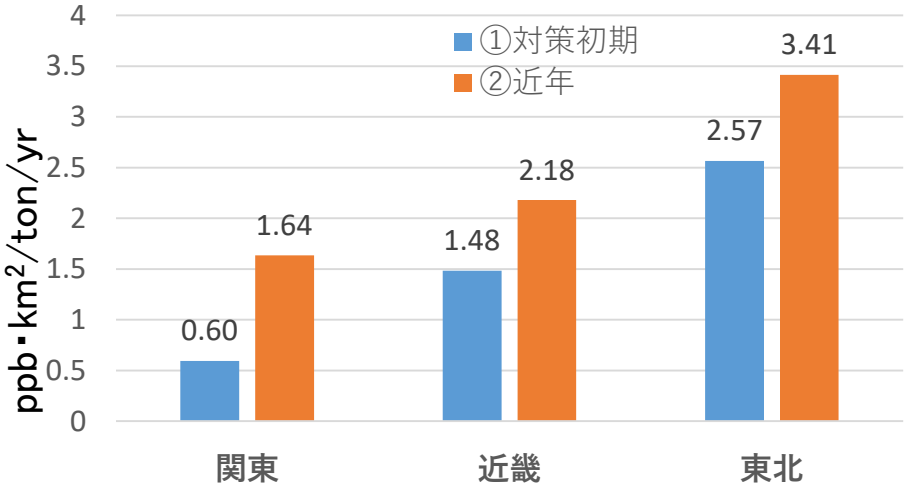
① NOx排出削減による効果の定量的評価（結果及び考察）

（NOx削減によるオゾン存在量低減効率の算出結果）

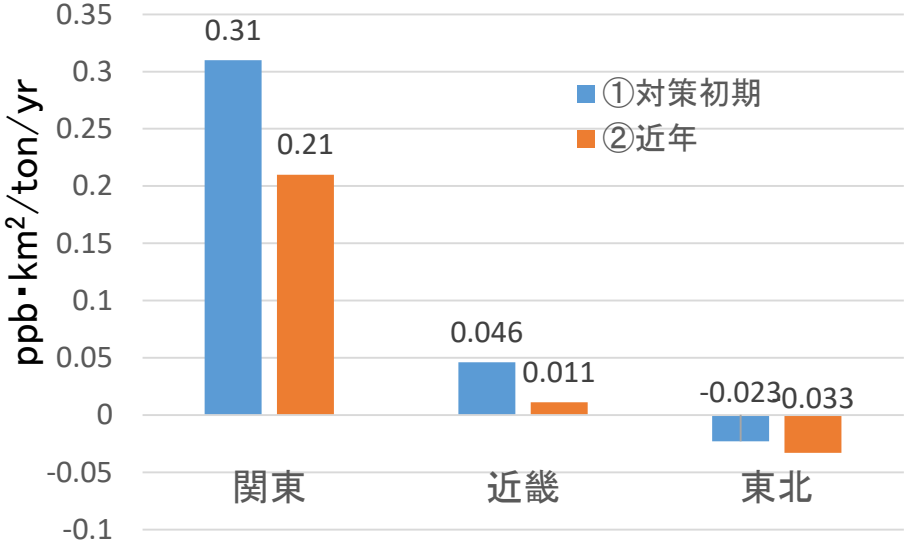
- 地方によりオゾン存在量低減効率（NOx）は大きく異なり、東北、近畿、関東の順となった。
  →NOxの削減がオゾン濃度の低減に寄与する度合いは東北が最も大きく、次いで近畿、関東となる。
- 関東及び近畿においても、近年ではオゾン存在量低減効率（NOx）は増加傾向にある。
  →近年では、NOxの削減がオゾン濃度の低減に寄与するようになってきている。

（VOC削減とNOx削減の効果の比較）

- VOCとNOx削減の効果を比較すると、地方及び時系列が全て反対となっている。



オゾン存在量低減効率（NOx）
（今年度の結果）



オゾン存在量低減効率（VOC）
（昨年度の結果）

（注） 本検討におけるオゾン存在量低減効率は、一定の条件下で算出した結果であることに留意する必要がある。

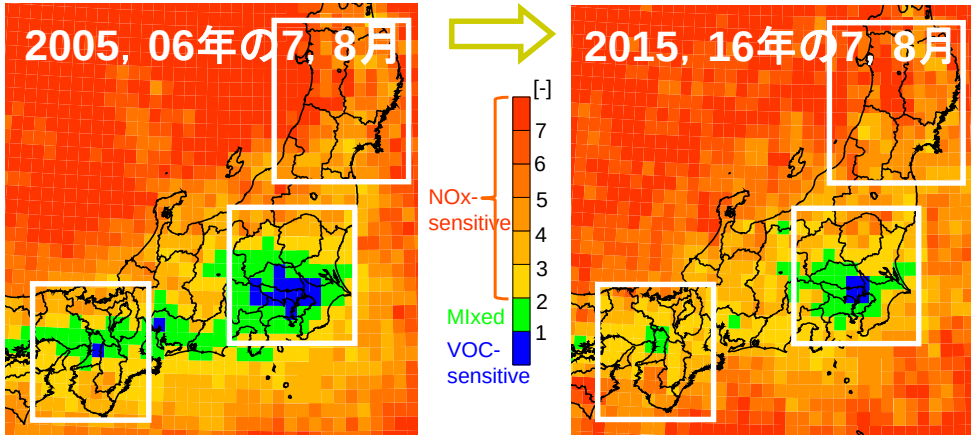
① NOx排出削減による効果の定量的評価（考察）

- 前ページのとおり、同量のNOxを削減した場合
  （イ）オゾン存在量低減効率（NOx）は、関東＜近畿＜東北の順に大きく、
  （ロ）初期より近年では関東と近畿でも、オゾン存在量低減効率（NOx）が大きくなっている。
- 衛星データにおける感度レジーム※1について、以下の事項が認められる。このため、シミュレーションと衛星データによる結果は、上記（イ）（ロ）の点で整合していると考えられる。
  - NOx律速の占める面積の割合が、関東、近畿、東北の順に大きくなっている。（上記（イ）を示す）
  - NOx律速の面積の割合が、近年、関東及び近畿でも増加傾向にある。（上記（ロ）を示す）

※1 オゾンの感度レジームは下記右図を参照のこと。

衛星データにおける感度レジーム

HCHO/NO_2対流圏カラム濃度比

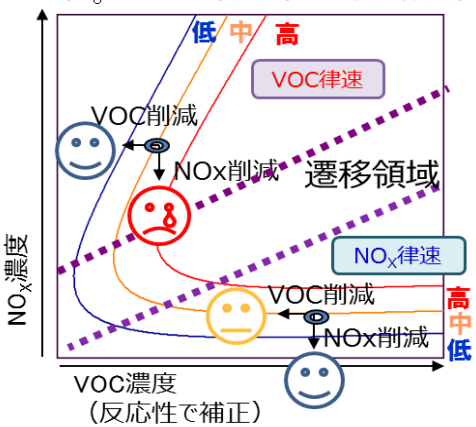


（注1） レジームの区分値はDuncan et al. (2010, AE)に基づく

（注2） 衛星データについては、オゾンの感度レジームの傾向の把握に用いることとし、政策的判断等に用いるには更なる検証を要する。

オゾンの感度レジーム（一般的傾向）

VOCとNO_xの濃度の相関関係
（O_3生成量（濃度）の等値線図）



VOC律速：VOCを減らすとオゾン濃度低下。
NOx律速：NOxを減らすとオゾン濃度低下。
出所：産業環境対策小委員会（第6回）資料2-2

② 気象パターンによる変動（計算条件）

- 近年のオゾン濃度の変化は夏季と春季で異なることが知られている。これは日射量や気温等の違いにより、光化学反応が影響を受けるためと考えられる。
- 昨年度及び今年度の①の事業において、夏季に高濃度オゾン生成が頻発する気象パターンを用いてオゾン存在量低減効率を検討してきたが、春季に高濃度オゾン生成が頻発する気象パターンにてオゾン存在量低減効率を計算し、比較を行った。

1. 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
2. 固定発生源の範囲	対象業種（VOC）：立地特性の異なる2業種 対象業種（NOx）：大規模燃焼点源の2業種
3. 対象地方	3地域（関東、近畿、東北）
4. 気象パターン、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※1、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

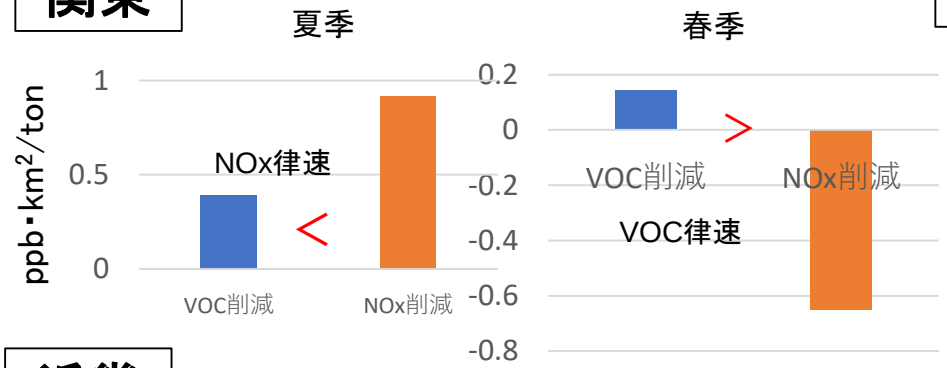
※1 関東は地衡風＝静穏、近畿、東北は地衡風＝弱

② 気象パターンによる変動（結果及び考察）

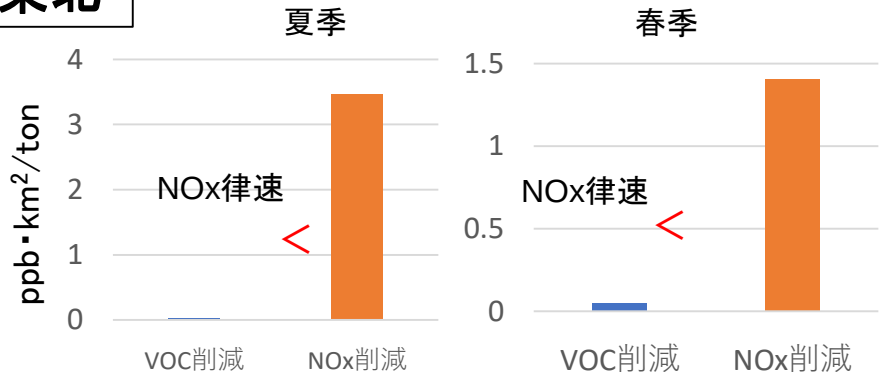
- VOC及びNOx削減時のオゾン存在量低減効率の結果は以下のとおり。
  - 関東及び近畿では、夏季ではオゾン存在量低減効率（NOx）＞オゾン存在量低減効率（VOC）となるが、春季では逆となった。
  - 東北では夏季及び春季ともオゾン存在量低減効率（NOx）＞オゾン存在量低減効率（VOC）となった。

  →夏季にはNOx律速（p.7参照）、春季にはVOC律速が強まる傾向となった。

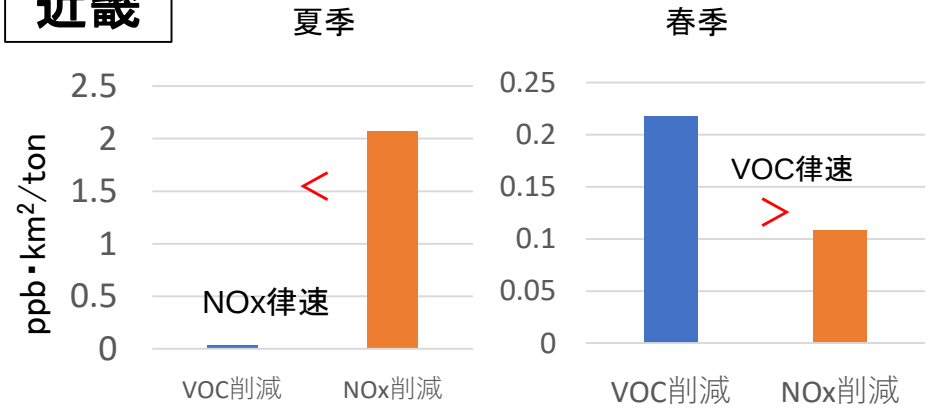
関東



東北



近畿



（注）VOC、NOxとも各業種の平均値として算出

② 気象パターンによる変動（考察）

- 前ページのとおり、

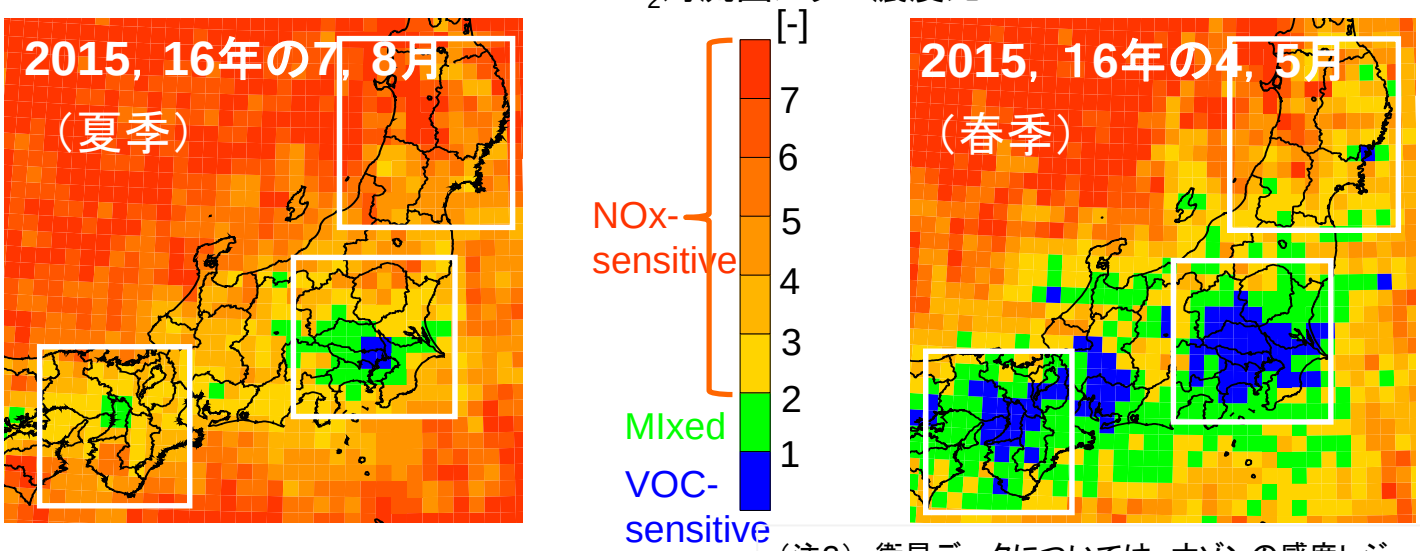
（イ）関東及び近畿では、夏季ではオゾン存在量低減効率（NOx）＞オゾン存在量低減効率（VOC）となるが、春季では逆となった。

（ロ）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）、という結果となった。

- 衛星データにおける感度レジーム(注)について、以下の事項が認められる。このため、シミュレーションと衛星データによる結果は、上記（イ）（ロ）の点で整合していると考えられる。
  - 関東、近畿では夏季に比べ、春季節にVOC律速の比率（面積）が大幅に増大。（上記（イ）を示す）
  - 東北では、夏季と春季でVOC律速のメッシュ比率は関東及び近畿と比較して大きな変化なし（上記（ロ）を示す）

衛星データにおける感度レジーム

$HCHO/NO_2$対流圏カラム濃度比



（注1）レジームの区分値はDuncan et al. (2010, AE)に基づく

（注2） 衛星データについては、オゾンの感度レジームの傾向の把握に用いることとし、政策的判断等に用いるには更なる検証を要する。

③ 前駆物質の大幅削減の試算（計算条件）

- 固定発生源のVOC及びNOx排出量を大幅に削減した場合のオゾン濃度の低減量及びオゾン存在量低減効率を計算し、小幅に削減した場合の結果と比較する。
- VOC及びNOxについて、それぞれを10%、50%、100%の3段階に削減した場合について計算した。

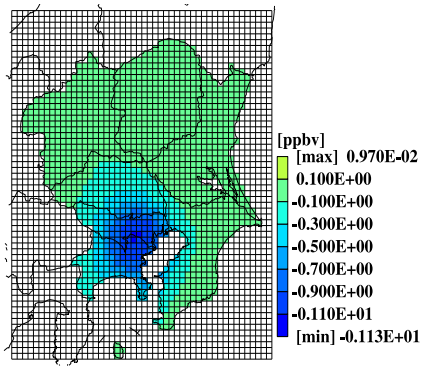
1. 対策の期間（排出量データ）	近年（2016年） VOC、NOxそれぞれにつき、10%、50%、100%の3段階
2. 固定発生源の範囲	対象業種（VOC）：固定蒸発発生源の全業種 対象業種（NOx）：大規模燃焼点源の全業種
3. 対象地方	1地域（関東）
4. 気象パターン、平均化時間	1パターン 夏季高濃度オゾン気象パターン（地衡風静穏、日射量大）の2005年における代表日） 平均化時間：オゾン濃度は昼間の8時間（10-18時）値として計算

③ 前駆物質の大幅削減の試算（結果及び考察）

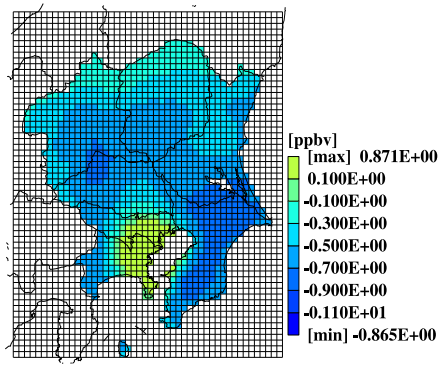
- NOxを100%削減した場合、オゾン濃度は最大13.1ppb低下し、VOCを100%削減した場合、オゾン濃度は最大12.4ppb低下する。
- NOxを10%削減した場合、オゾン濃度は最大0.865ppb低下し、VOCを10%削減した場合、オゾン濃度は最大1.13ppb低下する。

→オゾンの最大削減量は大差はないが、NOx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）。

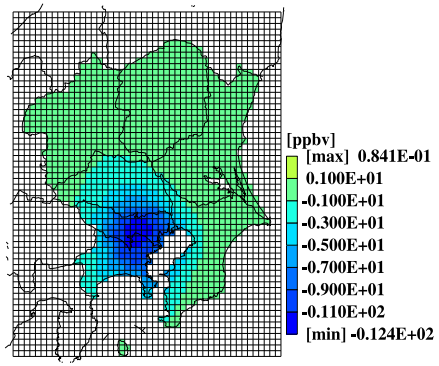
VOC10%削減



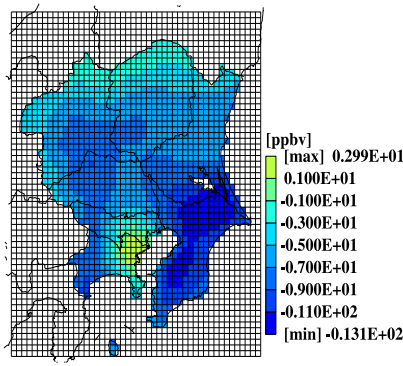
NOx10%削減



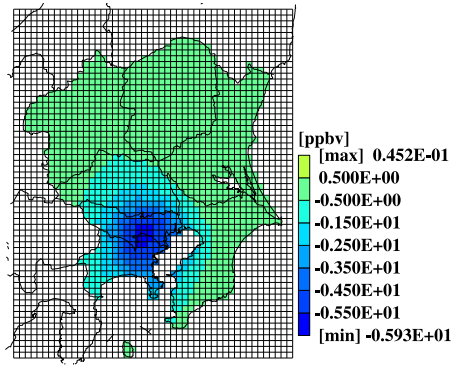
VOC100%削減



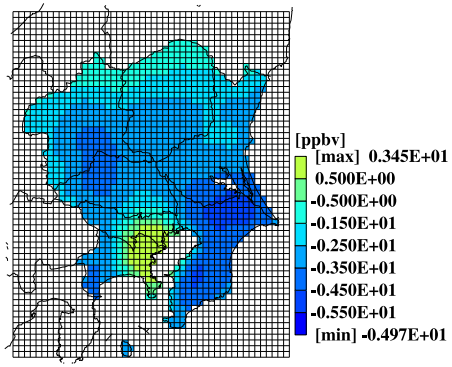
NOx100%削減



VOC50%削減

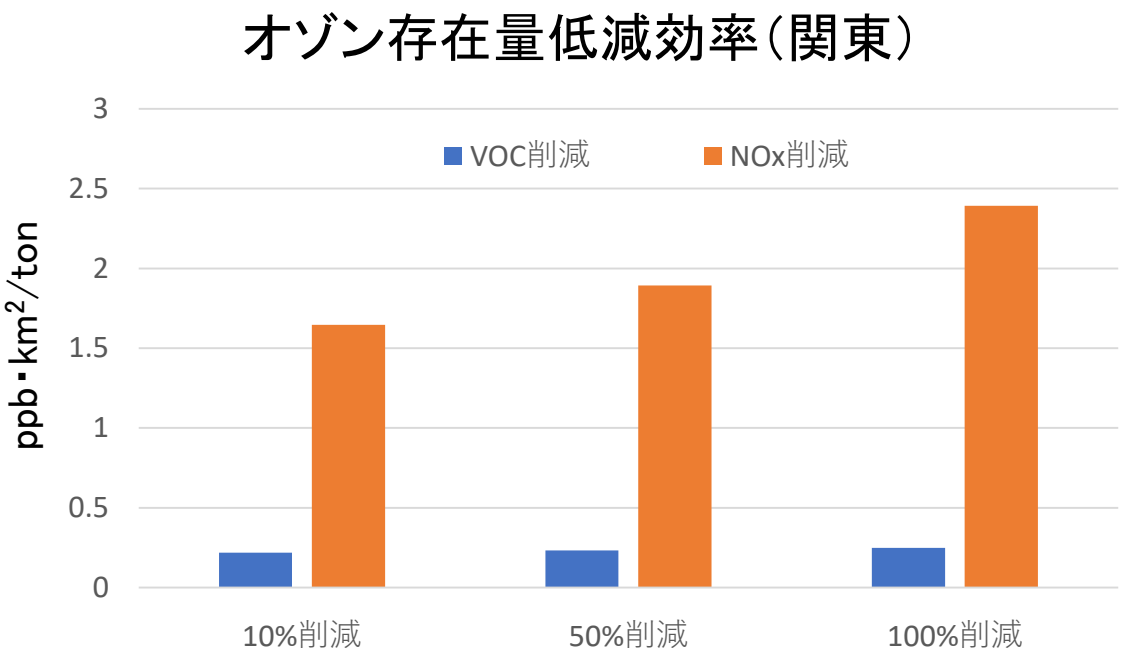


NOx50%削減



③ 前駆物質の大幅削減の試算（結果及び考察）

- VOC及びNOxを10%、50%及び100%削減した場合の、オゾン存在量低減効率は下のグラフのとおり。
- 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。



④ 植物起源VOC（BVOC）の評価（文献調査及びヒアリング）

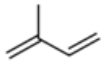
- 平成29年度に実施した調査事業の成果及び今回ヒアリングした植物起源VOC（BVOC）についての現状としては次のとおり。
  - 主要なBVOCはイソプレン、モノテルペン類、セスキテルペン類である。
  - 日本固有の樹種もある。
  - VOC排出全体のうち7割程度がBVOCと考えられているが、推計値には幅がある。
  - BVOC年間排出量は十分に捉えられておらず、気象条件によっても変動すると考えられる。
  - 森林からのBVOCは都市部のオゾン生成にも影響している。
- BVOC排出量のボトムアップ推計（葉や枝レベルの測定値から全体の排出量を推計）
  - 下記のような様々なデータが必要であるが、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）

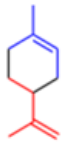
    ③補正係数（日射、温度、季節、ストレス）
- BVOC排出量のトップダウン推計（衛星観測データから推計する方法）
  - 日本においても衛星によるHCHO観測データからイソプレン排出量を推計する試みが行われたが、課題があることが明らかになった。

BVOCの物質例



炭素数5

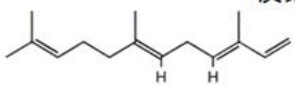
イソプレン
(2メチル1,3ブタジエン)



炭素数10

モノテルペンの例 リモネン
(イソプレン×2、900種類)

炭素数15



セスキテルペンの例αフェルネセン
(イソプレン×3、3000種類)

出典:29年度知見調査報告書(森川先生発表資料)

国内優占8樹種のBVOC放出

凡例:++:1μg/g・h以上、+:0～1μg/g・h、ー: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

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

出典:松永ら、大気環境学会誌、Vo1.47,No.1,2012より編集

既存のBVOC排出量ボトムアップ推計値の例

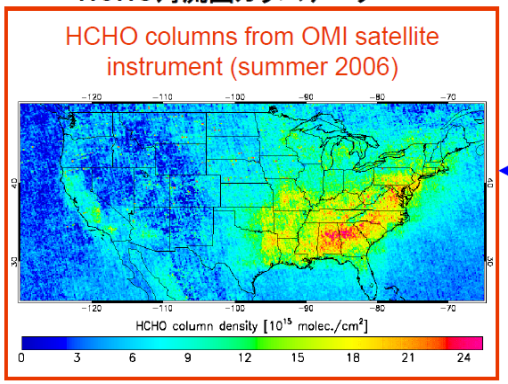
	VOC総排出量	うちBVOC
PM2.5排出インベントリ(24年度)*1	337万 t/年	235万 t/年(69.7%)
PM2.5排出インベントリ(27年度)*2	307万 t/年	213万 t/年(69.4%)
Chatani et al.(2015)*3	—	238～284万t
ADMER-PROでの設定値	—	330万t/年(全国)

*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

BVOC排出量のトップダウン推計の試み

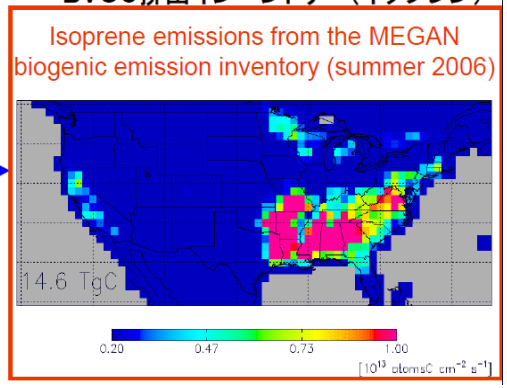
・BOVCの排出量の推計のため、衛星データを用いる方法が試みられている
・アメリカではHCHOの衛星データとイソプレン排出推計量の分布が概ね合致
・日本では夏季のHCHOの衛星データとイソプレン排出推計量の分布が合わない
→前頁のとおり従来のボトムアップ推計ではBVOC排出量に幅が生じるため、トップダウン推計も試みられているが日本では衛星データとイソプレン排出推計量（BVOCの一つであるイソプレンについてのボトムアップによる推計値）の傾向がそもそも一致しない。

HCHO対流圏カラムデータ



?

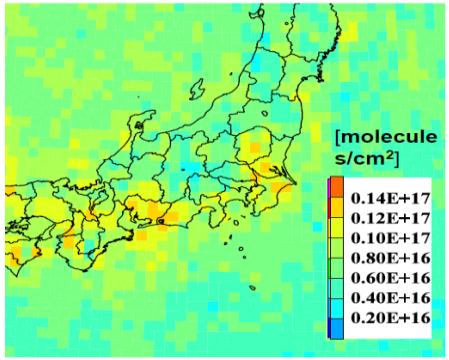
BVOC排出インベントリー（イソプレン）



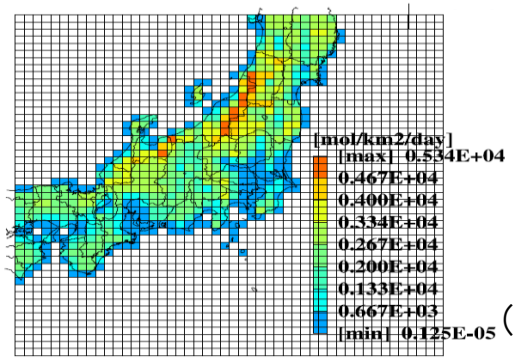
→イソプレン排出推計量（右）と衛星データ（左）とも高濃度の地域がアメリカ南東部において見られ、両方が一致している。

Millet et al. (2008)

2015,6年7,8月平均の衛星観測
OMIによるHCHO対流圏カラム



8月の植物起源イソプレン基礎放出量
（中西ら，2009のデータ）



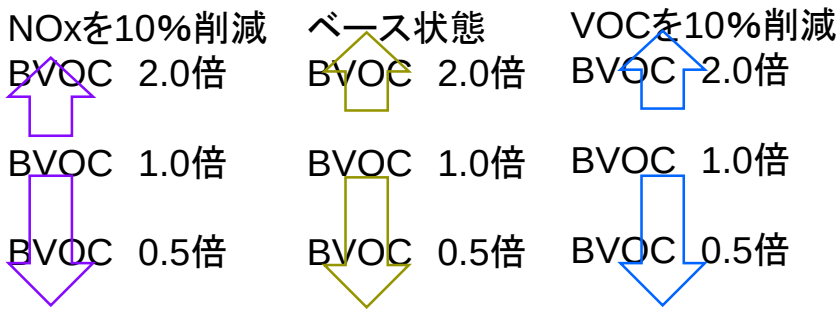
→イソプレン排出推計量（右）においては新潟県の辺りに高濃度の箇所が見られるが、衛星データ（左）においてはそれが認めらない等、一致していない。

（注）比較については今回実施

④ 植物起源VOCの評価（BVOCの設定による影響）

- 以下の理由により、BVOC設定の違いによるオゾン存在量低減効率への影響を確認した。
  ① BVOC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
  ② BVOC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）
- BVOC排出量の設定値※1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。

1. 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
2. 固定発生源の範囲	対象業種（VOC）：固定蒸発発生源の2業種 対象業種（NOx）：大規模燃焼点源の2業種
3. 対象地方	3地域（関東、近畿、東北）
4. 気象パターン、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
5. BVOC排出量の設定	基準の1.0倍から2.0倍、0.5倍に設定



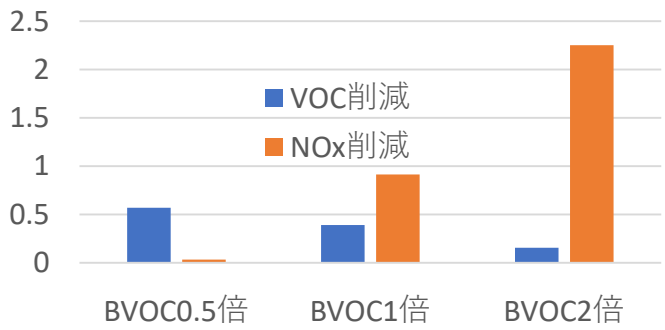
※1 ADMER-PROでのBVOC排出量の設定は、BVOC全国排出量330万トン（p.15参照）に相当。これに対応する基礎放出量を変化させ、季節による日射、気温の変化の影響は計算にて補正。

④ 植物起源VOCの評価（結果）

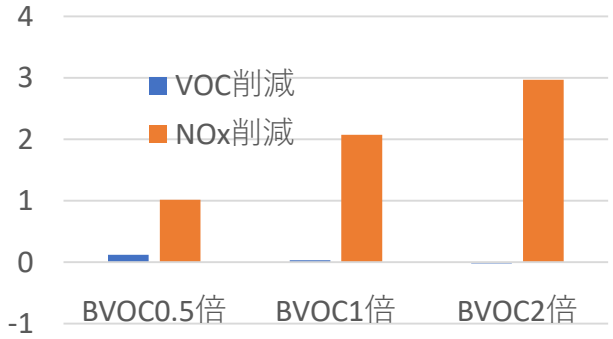
- BVOC排出量の設定によりオゾン存在量低減効率は大きく変わり、特に関東ではVOC削減とNOx削減によるオゾン存在量低減効率の大小についても変わる。
  →BVOCの排出量をどのように設定するかは今後も更なる検討が必要。

オゾン存在量低減効率

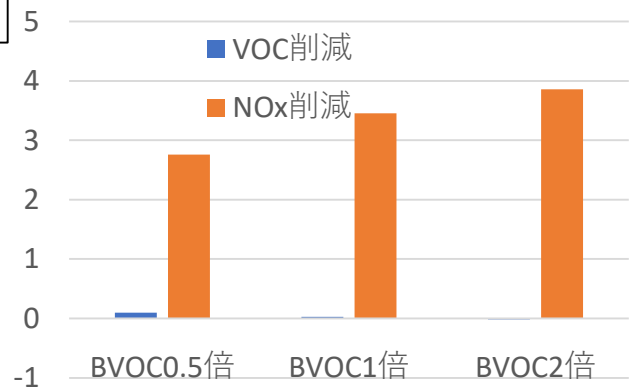
関東



近畿



東北



まとめ及び今後検討すべき事項

（まとめ）

① NOx排出削減による効果の定量的評価

- オゾン存在量低減効率（NOx）は、オゾン存在量低減効率（VOC）と逆の傾向を示した。
- オゾン存在量低減効率（NOx）は、東北＞近畿＞関東の順に大きい。
- 近年、オゾン存在量低減効率（NOx）がどの地域でも大きくなる傾向にある。

② 気象パターンによる変動

- 夏季にはNOx律速（NOxの削減がオゾン低減に効果的）、春季にはVOC律速（VOCの削減がオゾン低減に効果的）が強まる傾向となった。

③ 前駆物質の大幅削減の試算

- 大幅削減時においては、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。

④ 植物起源VOCの評価

- VOC排出全体のうち7割程度がBVOCと考えられているが、推計値には幅がある。
- 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る。

まとめ及び今後検討すべき事項

（今後検討すべき事項）

[1]　他の気象パターンでのオゾン存在量低減効率の計算（従来：春、夏の高濃度、平均濃度）

→年間を通じての平均値と変動の評価

[2]　BVOC設定に関する検討（継続）

→推計方法、不確実性の評価、BVOC設定の改善

[3]　「地方」よりも狭い地域でのオゾン存在量低減効率の検討

→典型的な市街化地域（都心部）、森林地域、市街-森林混在地域等のローカルな地理的条件での検討