

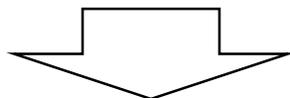
# VOC排出削減効果の定量的評価 に関する調査

令和2年2月19日  
定量的評価に関する調査検討会

# 調査の背景と目的

## (背景)

- 平成18年4月の大気汚染防止法改正により、法規制と事業者・業務団体等による自主的取組のベストミックスによりVOCの排出削減対策を実施。近年では平成12年度比の約半分までVOC排出量を削減。
- 今後も引き続きVOC排出抑制が求められる中、自主的取組参加企業等の負担軽減にも留意し、効率的に実施していく必要がある。このためにはVOC排出削減により、どの程度、光化学オキシダント濃度が低減するかを定量的に評価する必要がある。



## (目的)

- 過去及び将来のVOC排出削減の効果を定量的に評価及び予測するための手法を検討し、効果を定量的に算出する。

# 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
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

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

# VOC排出削減効果を定量的に評価する方法

- 各VOC排出抑制対策の削減効果を定量的に評価し、これらを比較するためには、同量のVOCを削減した場合に光化学オキシダントの濃度<sup>(注)</sup>がどれだけ低減するかを算出する必要がある。
- 今回、VOC排出削減効果の定量的な評価に用いたのは次式により算出する「オゾン存在量低減効率」とした。この値が大きいほど、単位削減量あたりのオゾン濃度の低減効果が大きい。
- 分子の「オゾン存在量低減量」は、VOCの排出量からオゾン濃度を計算する必要があるため、シミュレーションモデルを用いて算出した。

(注) 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。

オゾン存在量低減効率  
(ppb・km<sup>2</sup>／ton)

オゾン存在量低減量 (ppb・km<sup>2</sup>)  
VOC排出削減量 (ton)

=

=

(分子の意味)

VOC抑制対策によりオゾン濃度がどれだけ低減したか

(分母の意味)

VOC抑制対策によりVOC排出量をどれだけ削減したか

(全体の意味)

VOC排出量を削減した場合、オゾン濃度がどれだけ低減するか  
→値が大きいほど、単位削減量あたりのオゾン濃度の低減効果が高い

(例) 値が、Aのケースが「10 ppb・km<sup>2</sup>／ton」、Bのケースが「1 ppb・km<sup>2</sup>／ton」の場合

→A及びBのケースにてVOC排出量を同量削減しても、AはBより10倍、オゾン濃度の低減効果が大きい。

# シミュレーションに供したモデル

(シミュレーションが必要な理由)

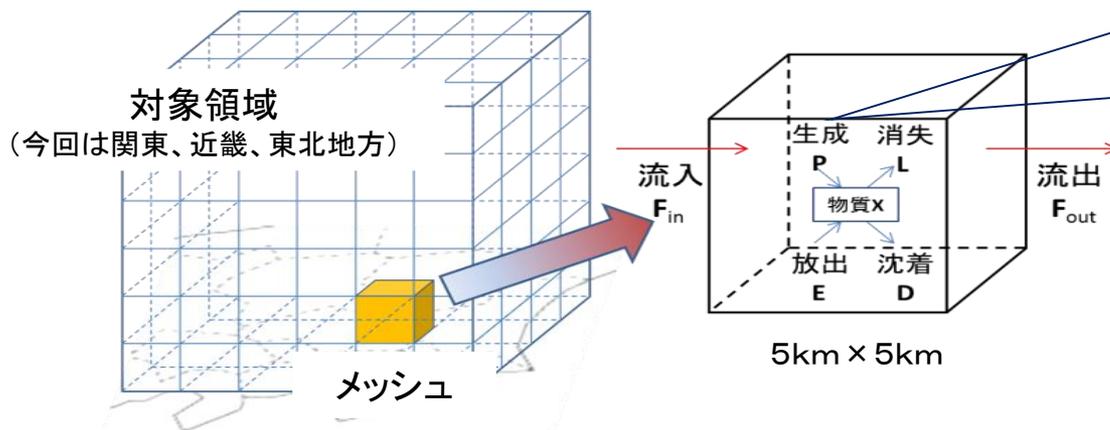
- VOCやNO<sub>x</sub>からオゾンが発生するメカニズム(光化学反応)は複雑であり、VOCの排出条件(排出物質、排出量)以外に、気象条件(気温、風速場等)、地形、排出源の立地等によっても大きく異なる。このため、オゾン濃度分布を計算するには、実際の現象をモデル化し、コンピューターを用いた大規模な計算(シミュレーション)を行う必要がある。



(シミュレーションに供したモデル)

- シミュレーションに供するモデルは「ADMER-PRO」とした。
- 対象領域(オゾン濃度を計算する領域)をメッシュ(計算上の区域)に分割し、VOCの排出、オゾンの生成(反応)、移動等を算出し、オゾンの濃度分布を計算する。

ADMER-PRO(井上ら, 2015, 大気環境学会誌)



- NO<sub>x</sub> + RH (VOCs) + hv(光) → オゾン, アルデヒド類, ...
- ✓ 反応モデルとしてはCB99を使用(似たもの同士の炭化水素(RH)をグループ化し、数十の化学種からなる数百の化学反応式で表現)

- 化学物質諸過程の計算に必要な気象場も同時に計算し、各メッシュの時々刻々の値を計算に反映
- 2005年度の排出量等のデータを内蔵し、これ一つで排出削減効果を推定可能
- 気象パターン類型化機能(吉門ら, 2006, 大気環境学会誌)が搭載されており、指定期間の典型気象パターンや各気象パターンの代表日を選出することが可能。この機能により計算時間の短縮も可能となる。

# 計算方法のイメージ

- オゾン存在量低減効率の算出手順は以下のとおり。

## 1. VOC排出量の設定

対策前、対策後の2つについて、各業種のVOC排出量や他の発生源の排出物質及び排出量を入力

## 2. オゾン濃度の計算

シミュレーションモデルを用いて、対策前、対策後のオゾン濃度(オゾンの濃度分布)をそれぞれ算出。

## 3. オゾン濃度低減量の算出

オゾン濃度低減量を①-②にてメッシュごとに算出。

## 4. オゾン存在量低減量の算出

オゾン存在量低減量を式Aで算出。

## 5. オゾン存在量低減効率の算出

オゾン存在量低減効率を式Bで算出。



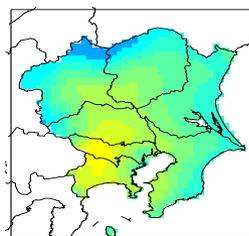
※VOC排出量以外は全て①と同じ



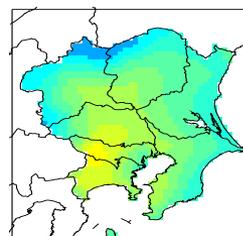
VOC排出削減量  
(①-②)

化学輸送モデルシミュレーション  
(ADMER-PRO)

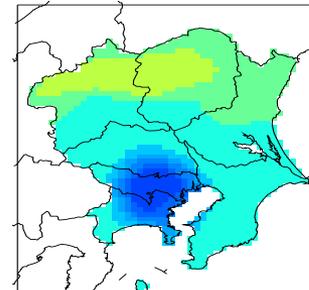
③オゾン濃度  
(対策前)



④オゾン濃度  
(対策後)



⑤オゾン濃度低減量  
(メッシュごと)



各メッシュで「オゾン濃度低減量×面積」を計算し、対象領域全体でこの総和を計算

## 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

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

# 計算ケース等一覧

- VOC対策の初期及び近年の削減効果の評価のため、関東、近畿及び東北地方と場所を変えてオゾン存在量低減効率の計算を行った。詳細は下表のとおり。
- 今回はVOCによる削減効果の評価するため、VOC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NO<sub>x</sub>については対策前後で値を変えていない。

1. VOC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 対策後:2010年度の排出量 ②近年(近年の削減効果の評価のための計算) →対策前:2015年度の排出量 対策後:2015年度の排出の10%削減値
2. VOC固定発生源 の範囲	主要な発生源のうち8業種 (注) 業種別排出量は環境省VOC排出インベントリの値を用いた。 <a href="https://www.env.go.jp/air/osen/voc/inventory.html">https://www.env.go.jp/air/osen/voc/inventory.html</a>
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

# 計算条件

- 主な計算条件については下表のとおり。

## 1. VOC排出量

固定発生源・移動発生源

①対策初期	削減前 (2005年度)	ADMER-PRO内蔵の排出量データ使用
	削減後 (2010年度)	対象業種のVOC排出量のみ2010年度の2005年度に対するVOCインベントリの比率を乗じて削減。
②近年	削減前 (2015年度)	2005年度ベース排出量の60パーセントとした (≒実測値の比)
	削減後	対象業種のVOC排出量のみ2015年度の90パーセントに削減。

植物起源

BEIS2(注1)による予測値を日本の植生に補正して使用(①②及び削減前後において全て同じ値を入力)  
(注1)BEIS2:Biogenic Emissions Inventory System ver.2の略。米国EPAの植物排出量推計モデル。

## 2. NOx排出量

固定発生源・移動発生源

①対策初期	ADMER-PRO内蔵の排出量データ使用
②近年	2005年度ベース排出量の60パーセントとした(≒実測値の比)

(注2)VOCの削減前と削減後はNOx排出量は同じとした

## 3. 初期条件、境界条件

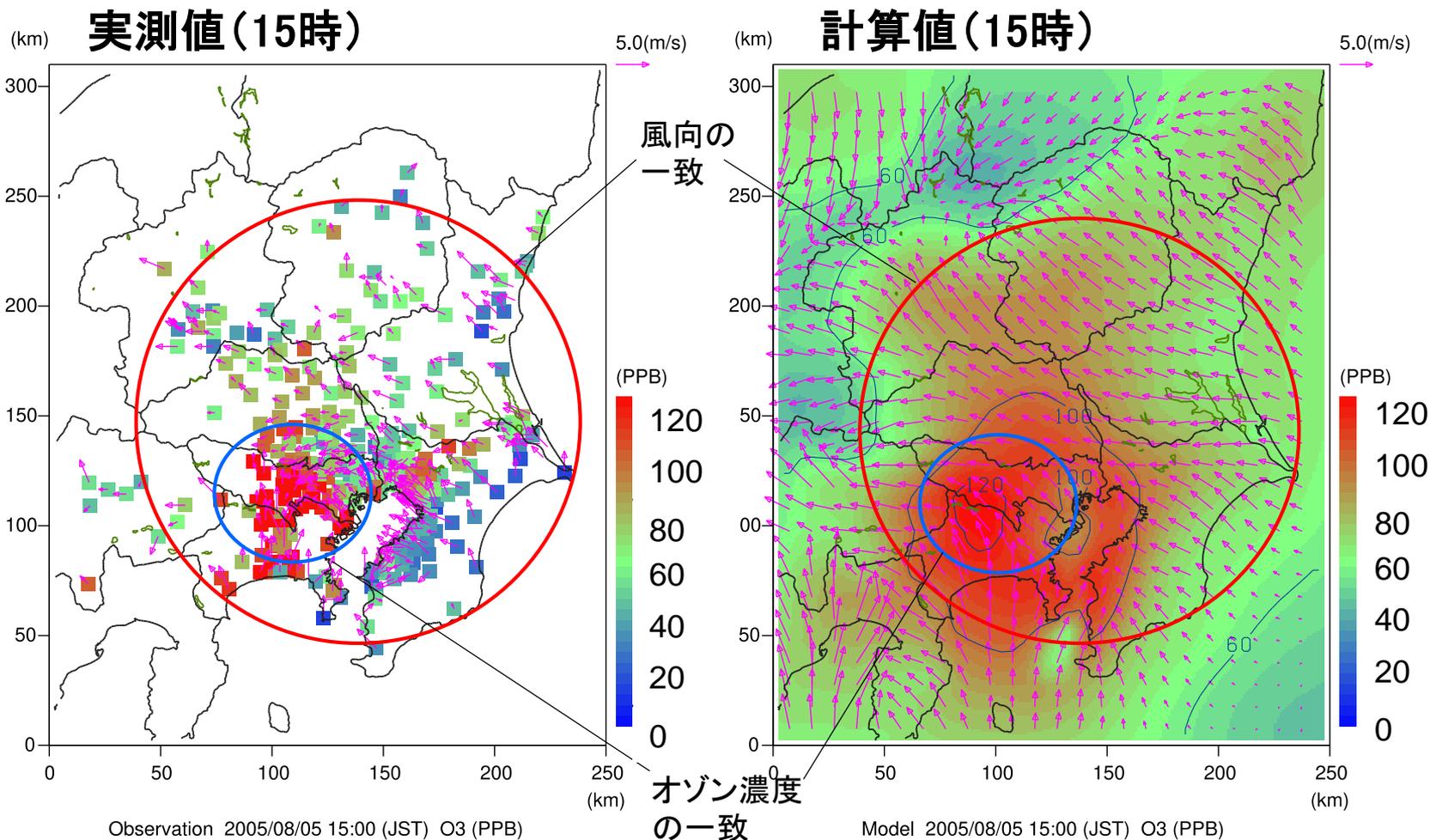
オゾン濃度:気象庁が実施している上空のオゾン濃度の高度分布データから配分  
その他物質濃度:ゼロ設定

(注3)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)計算を行うこと、また、計算対象日の51時間前から助走計算を行うことにより、初期・境界条件の影響を低減

# 再現性の確認

## オゾン濃度・風速場の実測値、計算値の比較(①対策初期(2005年度))

- シミュレーションモデルにおけるオゾン濃度及び風速場の再現性確認のため、実測値との比較を行った。
- 実測で見られる夏季の南東風(広域海風)やオゾン濃度分布(首都圏湾岸での高濃度)を概ね再現しており、本シミュレーションモデルを用いてオゾン存在量低減効率等の計算を行うこととした。



# 結果及び考察(1)

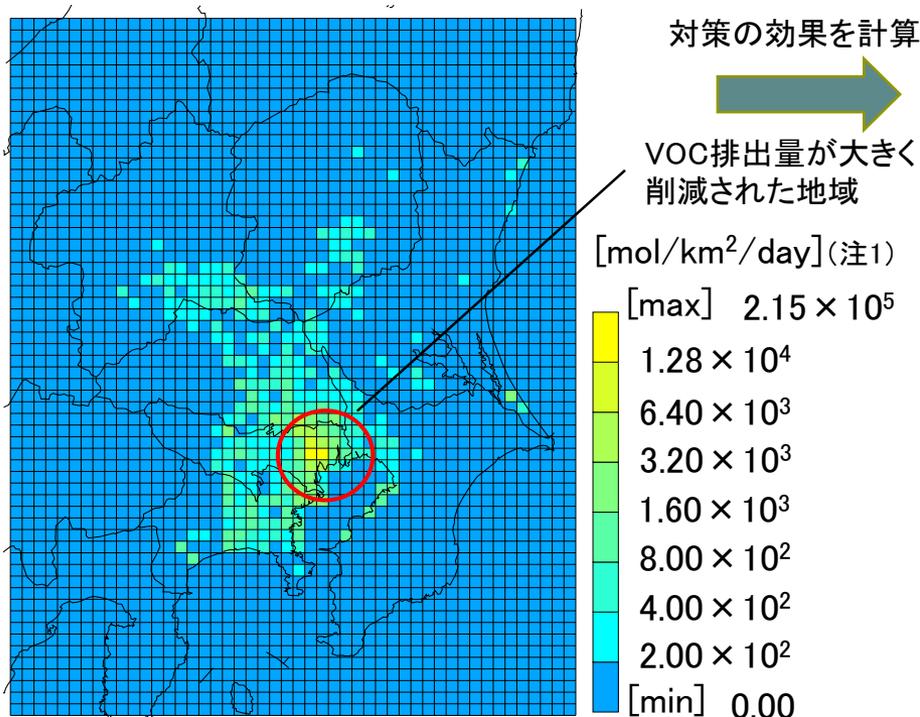
[関東]

## 対策の初期におけるVOC排出量削減のオゾン濃度等への影響

- ①対策初期(2005年度-2010年度)のVOC排出量及びオゾン濃度の変化は以下のとおり。

### VOC排出削減量(8業種計)

→VOC排出量の変化(2005年度から2010年度の削減量)を25km<sup>2</sup>毎に表示

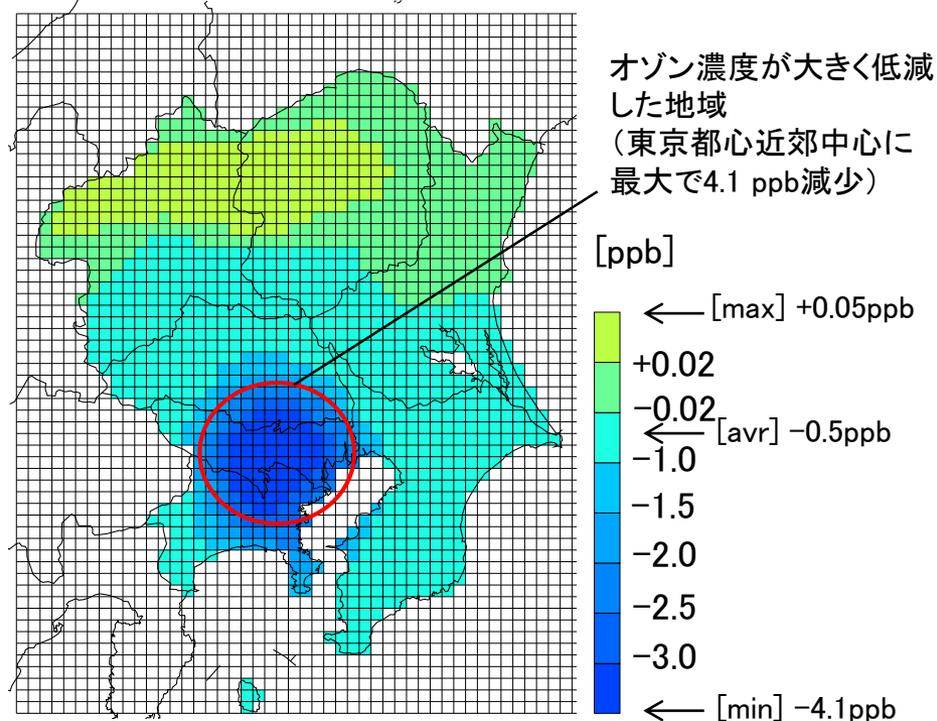


(注1)1日あたり、単位面積における分子数(VOC排出量をトンから分子数に換算)

関東全体のVOC排出削減量  
(2005年度から2010年度の変化): 71,648 ton

### オゾン濃度変化

→オゾン濃度の変化(2005年度から2010年度の低減量)を25km<sup>2</sup>毎に表示

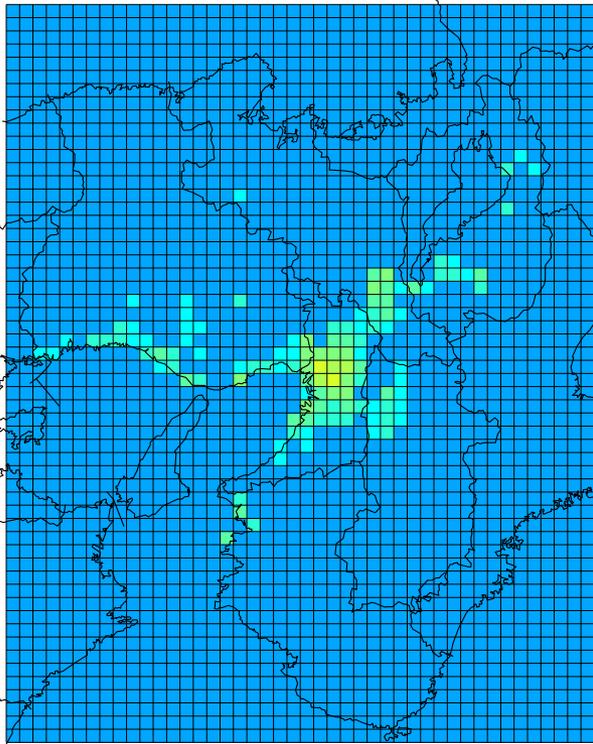


オゾン存在量低減量:  $1.7 \times 10^4$ ppb・km<sup>2</sup>  
平均値低減量(注2): 0.5ppb

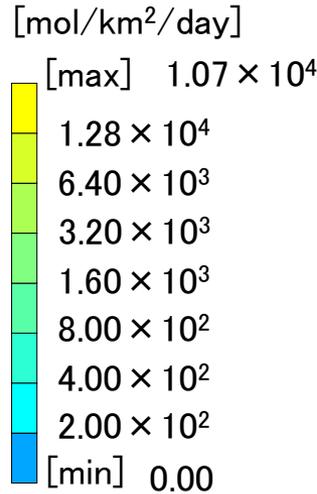
(注2)平均値低減量: オゾン存在量低減量 ÷ 対象領域の面積

# 対策の初期におけるVOC排出量削減のオゾン濃度等への影響

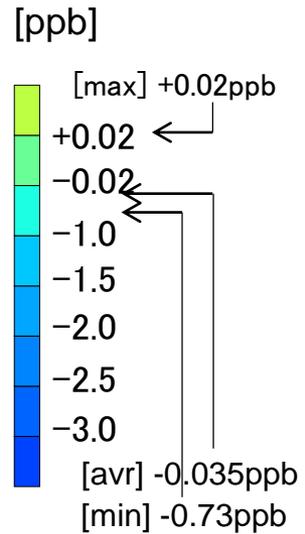
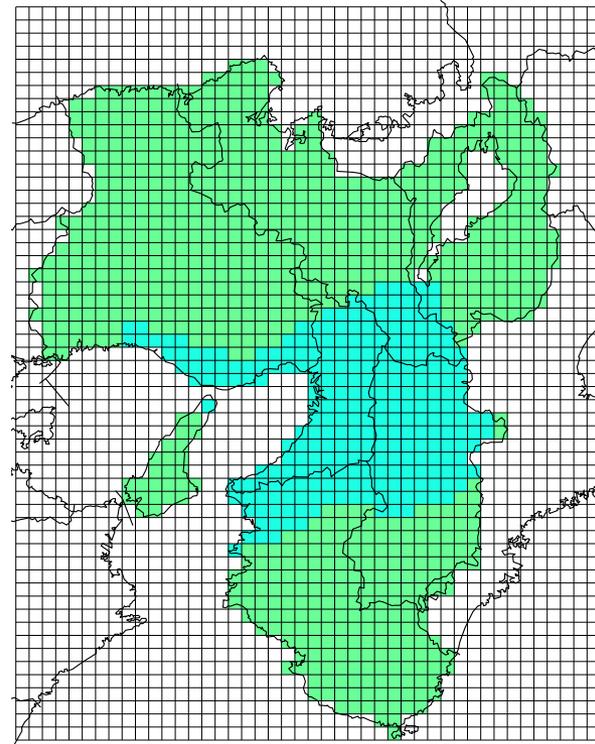
## VOC排出削減量(8業種計)



対策の効果を計算



## オゾン濃度変化

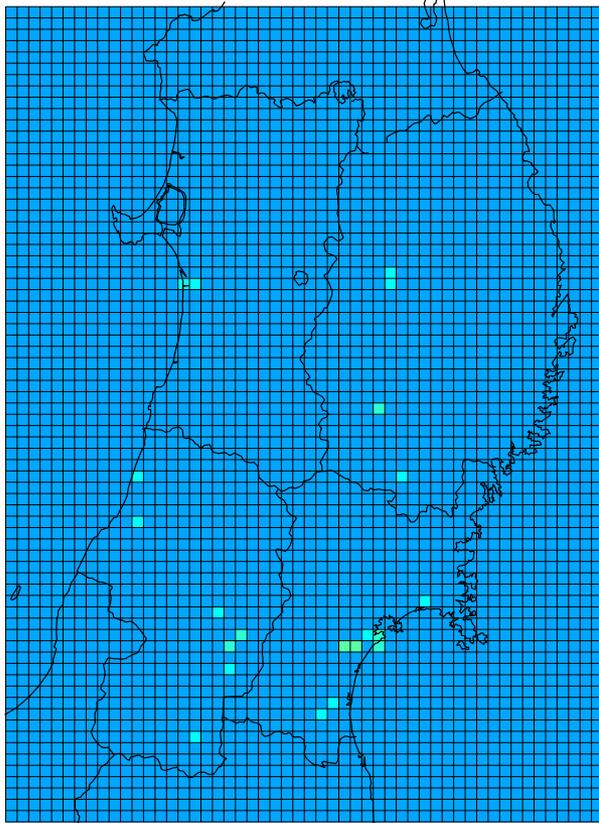


近畿全体のVOC排出削減量  
(2005年度から2010年度の変化): 35,661 ton

オゾン存在量低減量:  $1.0 \times 10^3$  ppb·km<sup>2</sup>  
平均値低減量: 0.035ppb

# 対策の初期におけるVOC排出量削減のオゾン濃度等への影響

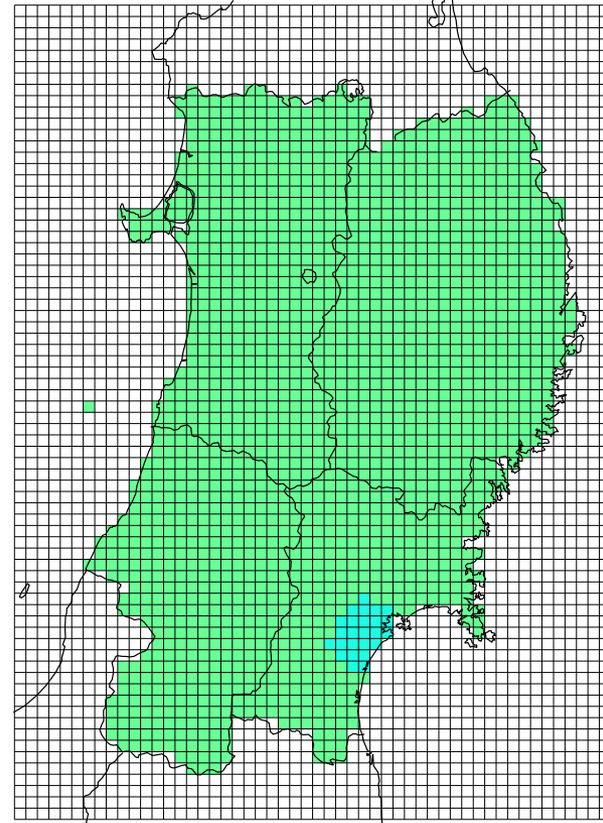
## VOC排出削減量(8業種計)



対策の効果を計算



## オゾン濃度変化



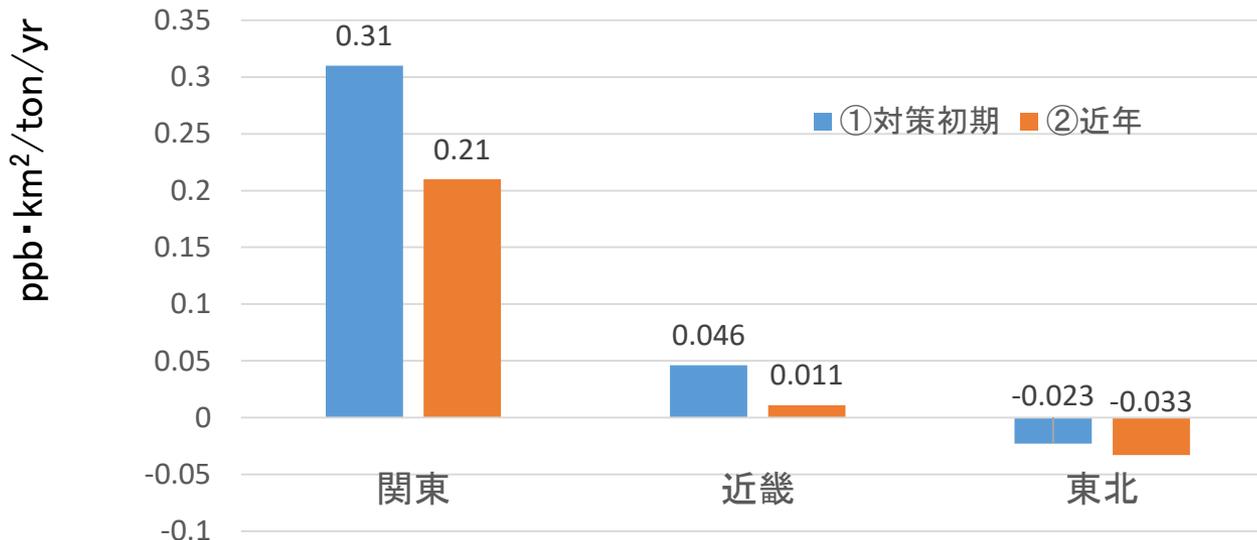
東北全体のVOC排出削減量  
(2005年度から2010年度の変化) : 6,573 ton

オゾン存在量低減量:  $-2.3 \times 10^2 \text{ppb} \cdot \text{km}^2$   
平均値低減量:  $-0.0058 \text{ppb}$

# 結果及び考察(2)

## オゾン存在量低減効率の地方間・VOC対策の期間による比較

- 地方により、オゾン存在量低減効率は大きく異なり、関東、近畿、東北の順となった。  
→同量のVOCを削減した場合においてもオゾン濃度の低減効果は地方により異なる。VOCの削減がオゾン濃度の低減に寄与する度合いは近畿よりも関東の方が大きい。東北はオゾン存在量低減効率が負の値となっており、地方全体で見るとVOCの削減によりオゾン濃度が増加する傾向にあることを示す。
- 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は低下傾向にある。  
→近年では、VOCの削減がオゾン濃度の低減に寄与しにくくなってきている。



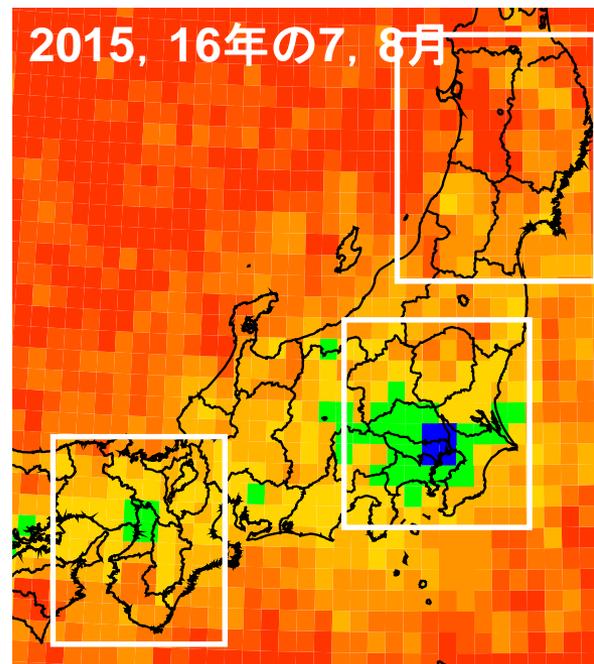
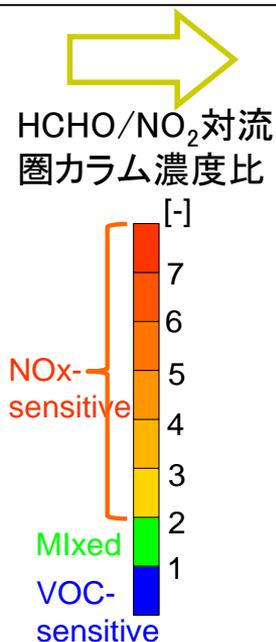
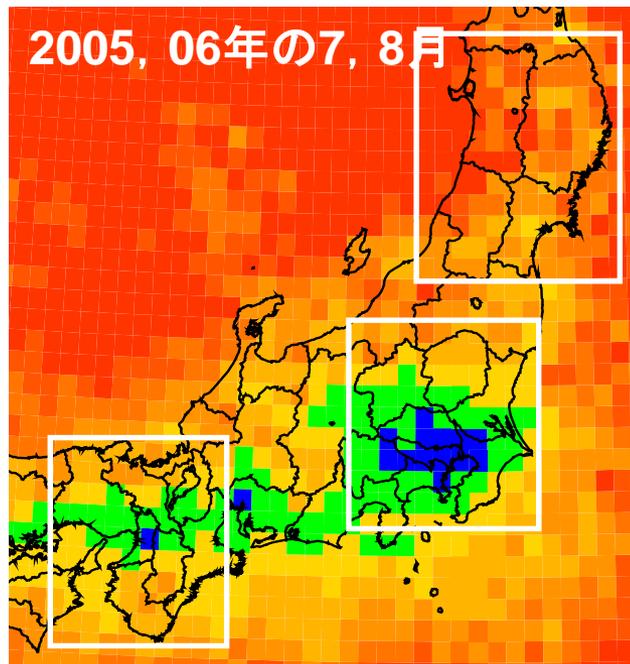
オゾン存在量低減効率

(注) 本検討におけるオゾン存在量低減効率は、VOCのみを削減するなどの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。

# 衛星データによるオゾンの感度レジーム診断結果との整合性

- 前ページのとおり、(イ)同量のVOCを削減した場合におけるオゾン濃度の低減効果は、関東、近畿、東北の順に小さくなり、(ロ)近年では関東と近畿でも低減効果が小さくなっている。
- 衛星データにおける感度レジーム<sup>(注)</sup>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。
  - VOC律速、混合律速(VOC律速とNO<sub>x</sub>律速の中間)の占める面積の割合が、関東、近畿、東北の順に小さくなっている。(上記(イ)を示す)
  - VOC律速、混合律速の面積の割合が、近年、関東及び近畿でも減少傾向にある。(上記(ロ)を示す)

(注)オゾンの感度レジームは次頁を参照のこと。



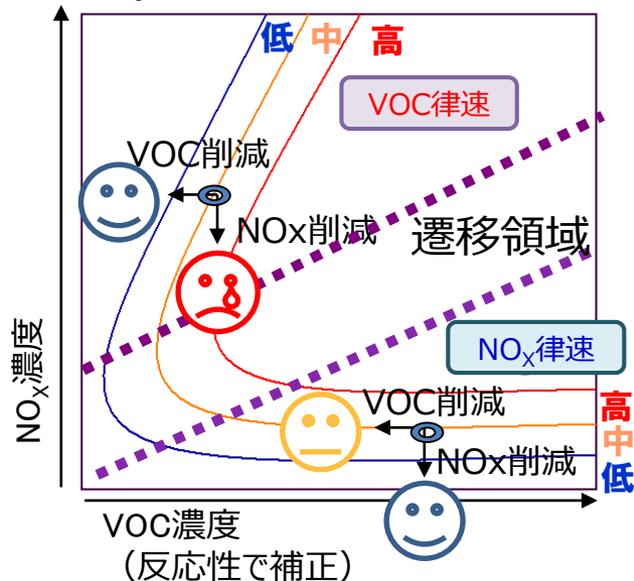
(注) 衛星データについては、オゾンの感度レジームの傾向の把握に用いることとし、政策的判断等に用いるには更なる検証を要する。

レジームの区分値はDuncan et al. (2010, AE)に基づく

## (参考) オゾンの感度レジームについて

- VOCやNO<sub>x</sub>排出量と、オゾン生成量（濃度）には、オゾンの「感度レジーム」と呼ばれる関係性があり、**VOC律速**（VOCに依存する状態）と、**NO<sub>x</sub>律速**（NO<sub>x</sub>に依存する状態）に大別される。
- 大気中のVOCとNO<sub>x</sub>の濃度（濃度比）により、感度レジームの状態が決まる。
- 感度レジームが異なると、VOCやNO<sub>x</sub>の排出削減効果に差が生じる。NO<sub>x</sub>律速ではVOCを削減してもオゾン濃度の低減には実質的な効果が得られない。

VOCとNO<sub>x</sub>の濃度の相関関係  
 (O<sub>3</sub>生成量（濃度）の等値線図)



出典：井上委員のプレゼンテーション資料より作成

VOC律速：

VOCを減らすとオゾン濃度が低下するが、NO<sub>x</sub>を減らすと逆にオゾン濃度が増加することもある。

NO<sub>x</sub>律速：

VOCを減らしてもオゾン濃度は変化がなく、NO<sub>x</sub>を減らすとオゾン濃度が低下する。

※ 上記の記述は一般化したものであり、必ずしも全てのケースに当てはまるものではない。

# まとめ及び今後検討すべき事項

## (まとめ)

- シミュレーションモデルを用いて、夏季のオゾン濃度及び「オゾン存在量低減効率」について、地方(関東、近畿、東北)及びVOC対策の期間(対策の初期及び近年)ごとに算出し、以下の結果を得た。
  - ① VOC排出抑制対策の初期(2005-2010年度)において、関東地方では都心近郊を中心にオゾンの削減効果が認められた。
  - ② VOCの単位削減量あたりのオゾン濃度の低減効果は地方によって異なり、関東、近畿、東北の順に小さくなった。対策の初期に比べ、近年では、VOCの削減がオゾン濃度の低減に寄与しにくくなっていることが認められた。
  - ③ 上記②の事項は、衛星データからも同様に認められた。

## (今後検討すべき事項)

- ① 今回は夏季の典型的な気象パターンでオゾン濃度を求めたが、光化学オキシダントは春季に発生する頻度も多いため、他の気象条件等を用いた際の検討
- ② 今回はVOCの削減効果を評価するため、VOCのみ対策前後の値を用いて検討を行ったが、もう一つの前駆物質であるNO<sub>x</sub>の値を変えた場合等における同様の検討