

VOC 削減による
大気汚染改善効果に関する
レビュー

公益社団法人 大気環境学会
H28 年度光化学オキシダント等に関する
文献等調査業務研究会

(1) はじめに

1) 背景・目的

環境基準達成率の低い光化学オキシダント (O_x) 及び $PM_{2.5}$ (以下、「光化学オキシダント等」という。) については、原因物質である揮発性有機化合物 (VOC) 等の排出抑制が進められてきており、高濃度域の光化学 O_x 濃度が低下するなどの改善が示唆されている (光化学オキシダント調査検討会; 平成 24 年 3 月)。また、中央環境審議会の答申 (平成 14 年 4 月) や同審議会微小粒子状物質等専門委員会の中間取りまとめ (平成 27 年 3 月) においては、VOC (燃料蒸発ガス) 対策の必要性が指摘されているところである。

本業務は、VOC の排出抑制対策による光化学オキシダント等の低減効果に関する現在の科学的知見を収集・整理することにより、VOC 対策を検討するための基礎資料を作成することを目的とする。

2) レビュー対象とした既存資料

本業務は、VOC 排出量の変化による光化学 O_x 及び $PM_{2.5}$ の感度、特に国内都市域における VOC 削減による光化学オキシダント等の効果に関係する最近 10 年間程度の公開資料を中心にレビューとした。対象とした資料を参考資料 2 に示す。

これらの資料をもとに、本調査の主要目的である「VOC の排出抑制対策による光化学オキシダントと $PM_{2.5}$ の低減効果」についてとりまとめた。

(2) VOC 削減による光化学 O_x 低減効果

1) 基礎的知見 (資料①-1 の S-9~10 参照)

光化学 O_x は大気中の NO_x や VOC が太陽光 (特に紫外線) を受けて、光化学反応によって生成される。光化学 O_x の主成分であるオゾン (O_3) の生成機構の模式図を図 1 に示す。

VOC (図中では RH) ①が存在すると、OH ラジカル ($OH\cdot$) による連鎖反応が開始される。この連鎖反応の中で過酸化ラジカル ($ROO\cdot$ 、 $HOO\cdot$) により NO が酸化され、 O_3 の生成が加速する②。このように大気中に NO_x 及び VOC が共存すると、 O_3 生成の連鎖反応サイクルが進行し O_3 濃度が増加する。

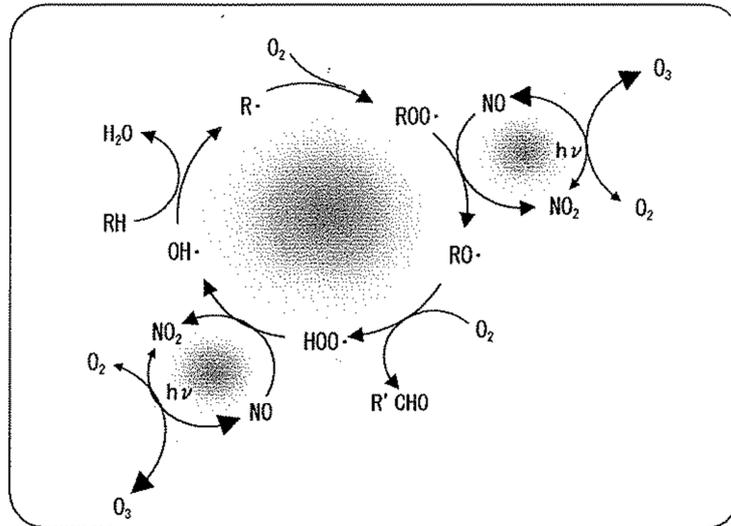


図1 OH ラジカルによるオゾン生成の連鎖反応サイクルの模式図 (板野、2006)

(資料①-1の図 5.1.1-1)

日中に生成される大気中オゾンの濃度は、前駆物質の排出量に対して非線形的に変化することが知られている。例えば VOC に比べ NO_x 濃度が高い時には、以下の $\text{OH}\cdot$ と NO_2 の反応が優勢となる。



この反応は $\text{OH}\cdot$ と RH (VOC) の反応により開始される上記の連鎖反応サイクルを妨害するため、 O_3 の生成効率が低下する。逆に NO_x 濃度が低すぎると NO_x (VOC) が関与するサイクルが滞り、やはり O_3 の生成効率は低下する。

以上のように O_3 の生成挙動は NO_x と VOC 濃度のバランスにも影響を受ける複雑なものであり、一般的に以下の 2 種の特徴的な状態 (NO_x 律速、VOC 律速) があることが知られている (図 2)。

- ① NO_x 律速 : NO_x 排出量の削減でオゾン濃度減少、VOC 排出量の削減でほとんど減少しない状態
- ② VOC 律速 : VOC 排出量の削減でオゾン濃度減少、 NO_x 排出量の削減ではほとんど減少しない、または逆に増加する状態

また、①、②間の遷移的な状態として、③に示す状態が別途定義されることもある。

- ③ 混合律速 : NO_x 、VOC いずれの排出削減でもオゾン濃度が減少する状態

VOC 律速の領域 (B 点) では、VOC 削減を行うことはオゾン濃度低減に有効であるが、NO_x 削減は逆効果となる。逆に NO_x 律速の領域 (A 点) では、VOC 削減を行うことはオゾン濃度低減には有効ではなく、NO_x 削減が有効となる。したがって、適切な排出削減対策を決定するためには、地域における律速状態を把握することが重要であるとしている (資料⑤-1)。

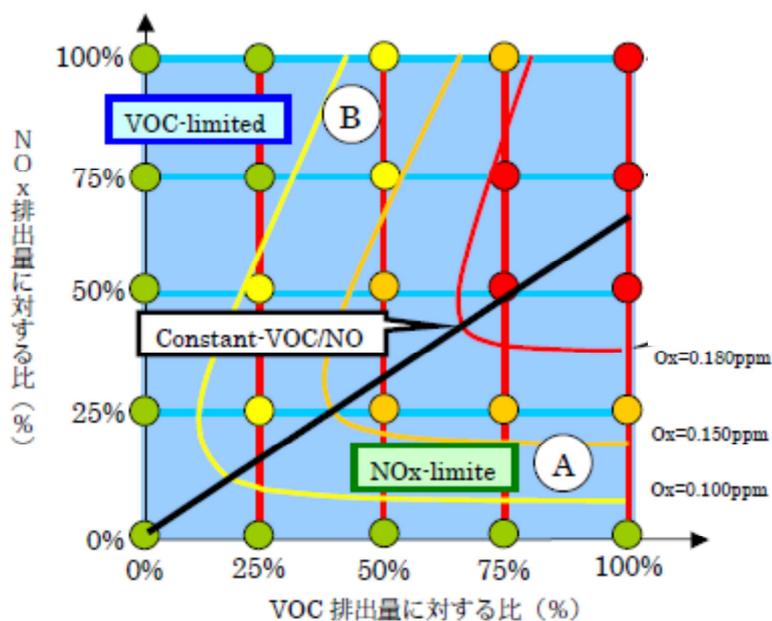


図2 オゾン濃度の NO_x 濃度、VOC 濃度に対する依存性 (資料①-1 の図 5.1.1-2)

【まとめ】

- ・ VOC を削減した場合、VOC 律速 (混合律速を含む) 条件下では O_x 濃度は確実に低減し、NO_x 律速条件下でも O_x 低減効果は VOC 律速条件下に比べて期待できないが O_x が増加することはない。
- ・ 適切な排出削減対策を決定するためには律速条件を把握することが重要である。律速条件は NMHC/NO_x 比に強く依存する。

(参考文献)

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、Vol.50、p.115-122

2) データ解析に基づく知見

首都圏における前駆物質と O_x 濃度の関係をデータ解析することにより得られた知見を整理すると以下のとおりである。

①資料①-1 の S-6～7

- ・光化学オキシダント濃度 (98th パーセンタイル値) は平成 17～18 年度 (2005～2006 年度) 付近を境に濃度の推移に変化が見られ、これまでの上昇または横ばい傾向が低下傾向に転じている地域が多く存在する。この傾向は前駆物質の濃度でも見られ、特に東京都や大阪府における NMHC 濃度はこの年付近を境に低下傾向に転じているのが明瞭であり、その他の地域も概ね低下傾向を示している。また、 NO_x についても近年低下傾向を示している。
- ・VOC 排出抑制制度は平成 18 年度 (2006 年度) より施行されており、光化学オキシダント濃度や NMHC 濃度のトレンドの変化が見られた年と概ね一致する。また、6～9 時における NO_x 濃度や NMHC 濃度と光化学オキシダント濃度の日最高値は中程度の相関が見られており、前駆物質の濃度と高濃度光化学オキシダントの出現には一定程度の関係が見られる。
- ・このことから、近年見られる高濃度域の光化学オキシダントの出現頻度が低下している状況は、従来より進められてきた大気汚染防止法等による NO_x 排出規制の対策に加え、VOC 排出抑制制度など前駆物質の削減対策が進められたことにより発現したものであることが示唆される。

②資料①-1 の S-11, 12

- ・夏季日中の東京都心 (目黒区駒場、地表) では主に VOC 律速にあることが、ボックスモデルシミュレーションに基づいた解析と先端的なラジカル実測に基づいた解析から共通して示唆された (Kanaya et al., 2008)。
- ・国内都市域において光化学 O_x の週末効果を解析した結果、高パーセンタイル値に注目した場合、東京など前駆物質の大発生源付近では光化学 O_x 濃度は日曜日に上昇しているが、都市部から離れるに従い光化学 O_x 濃度が日曜日に低下する傾向を示す。この要因として、日曜日には NO_x の方が VOC より高い割合で低減するため、前駆物質の大発生源周辺では VOC 律速にあるものが、遠方に行くに従い NO_x 律速へと移行することにより生じているものと推測した (神成・大原、2009)。

③資料②-2 の S-19, 20

1) 光化学オキシダント濃度の上昇原因の解析

- ・関東地方において、限定した気象条件で朝方の NO_x 、NMHC 及び NMHC/ NO_x と O_x 濃度の関係を整理した結果、「高濃度発生源エリア」における NO_x 濃度が 0.04ppm 以上、NMHC 濃度が 0.3ppmC 以上、もしくは NMHC/ NO_x 濃度比が 6 以上では、「1 都 6 県の解析エリア」における光化学 O_x が注意報発令レベル (0.12ppm 以上) の高濃度となる割合が約 8 割以上と高くなる。
- ・原因物質濃度の低下と高濃度オキシダントの出現との関係を解析した結果、原因物質

の濃度が低下すると現況よりも高濃度 O_x の年間出現日数は減少することが試算された。例えば、 NO_x 低減率を 20%に固定した場合には、NMHC 濃度を半減させると基準年（2000～2002 年）には高濃度 O_x 年間出現日数が 62 日であったものが 5 日まで減少する。

- ・ NMHC 濃度の低下率よりも NO_x 濃度の低下率の方が大きい場合、すなわち NMHC/ NO_x 濃度比が現況よりも大きくなる場合は、濃度比が大きいほど高濃度 O_x の出現の減少効果が小さくなる。

④資料②-3

- ・ 関東地方の 2004～2011 年のデータを用い、一定の気象条件のもとで朝の NMHC、 NO_x 濃度と ΔO_x との関係を解析した結果、 NO_x 濃度が低減すると O_x が増加し、NMHC 濃度が低減すると O_x も低減する VOC 律速であることを示す。
- ・ O_x 高濃度日削減のための前駆物質濃度低減率を推計すると、NMHC 濃度を 2009～2011 年比で 20%低減すれば NO_x が 20%低減したとしても O_x 高濃度日は半減し、NMHC 濃度を 50%程度低減すると O_x 高濃度日はほぼゼロになる。

⑤資料②-4

- ・ 関東地域における VOC 排出削減量と O_x 生成の減少量を検討するため、気温と日射量で指標化した O_x と VOC 排出量の関係を解析した結果、VOC 排出削減が O_x 低減に十分に寄与していたことが示唆された。

⑥資料②-6

- ・ 関東地域等におけるデータ解析及び移流・反応モデル解析結果をもとに、 O_3 の週末効果に着目し、 NO_x 律速か VOC 律速に関係して以下のような指摘をしている。
- ・ 特定の O_3max パーセンタイル区間で、 O_3max の週末変化が、発生源に近い地域での週末上昇から、遠方の地域の週末低下に変化する現象は、VOC 律速から NO_x 律速へのレジーム変化によることが推定される。また、一般に発生源からの距離とともに $Tmax(O_3max$ が生じる時刻)が遅延していく現象が観測され、日最高濃度に達する内陸地点でレジーム変化が起きていることが推定できる。
- ・ 移流・反応モデルにより理論的な α — $Tmax$ 関係 (α (ppbC/ppb) はオゾン等値線図におけるレジーム境界) が推定でき、その関係は光化学反応性が増す方向で経年変化している。その原因として気象条件、VOC 組成、ラジカルシンクのメカニズム等の経年的変化の可能性を指摘している。

【まとめ】

- ・ 近年の高濃度域における光化学オキシダントの出現頻度の低下は、VOC 排出抑制など前駆物質の削減対策が進められたことによるものと示唆される。
- ・ 首都圏の発生源地域では VOC 律速であり、VOC 削減が光化学オキシダントの低減に有効であることがほぼ共通した見解である。
- ・ 但し、郊外では NO_x 律速に変化すると考えられ、 NO_x 削減とのバランスを考慮する

必要がある。

(参考文献)

Kanaya, Y ; Fukuda M.; Akimoto H.; Takegawa N.; Komazaki Y.; Yokouchi Y.; Koike M.; Kondo Y.(2008) Urban photochemistry in central Tokyo: 2. Rates and regimes of oxidant (O₃ + NO₂) production, J. Geophys. Res., 113, D06301, doi:10.1029/2007JD008671.

神成陽容、大原利眞(2009) オゾン週末効果反転現象のメカニズム、大気環境学会誌、Vol. 44、p.82-90

3) モデル解析に基づく知見

関東地方等における前駆物質と O_x 濃度の関係を化学輸送モデル解析することにより得られた知見を整理すると以下のとおりである。

①資料③-1

- ・関東地域の暖候期におけるシミュレーション結果（基準年 2009 年）によると、O₃ 新指標相当値（日最高 8 時間値の暖候期 98 パーセンタイル値）が基準ケースに比べて、域内の人為起源 VOC 排出量を半減したケースでは 6 %、固定蒸発発生源の VOC 排出量を半減したケースでは 4 %、それぞれ減少する。また、域内の人為起源 VOC 排出量を半減したケースでは、O₃ 新指標相当値が全域で低減する。一方、NO_x 排出量を半減したケースでは基準ケースに比べて、O₃ 新指標相当値が東京湾地域では増大、その他の地域では低減する。
- ・2009 年の基準ケースと、固定蒸発発生源の VOC 排出量のみ 2001 年（固定蒸発 VOC 発生源対策前のレベル）に変化させたケースを比較すると、O₃ 新指標相当値が全域で低下し、特に、東京都東部～埼玉県南東部において低減傾向が大きく 10～15%程度低下した。このことから、固定蒸発発生源における VOC 排出量削減対策により、関東地域では O₃ 新指標相当値が低下したことが確認された。

②資料③-2

- ・関東地方において、2000 年と 2005 年の各年の VOC 排出量と NO_x 排出量を組み合わせた 4 ケースの O₃ 濃度変化から VOC 律速か NO_x 律速かを判断したところ、東京湾周辺地域では VOC 律速、内陸部では NO_x 律速もしくは混合律速であることが確認された。

③資料③-3

- ・関東地方において、注意報発令レベルのオゾンが出現した夏季の 3 日間を対象としたシミュレーション結果によると、都市部及びその周辺のわずかな地域では VOC 律速、その他の地域の大部分が NO_x 律速と推定された。ただし、植物起源 VOC (BVOC) 排出量データとして排出総量が小さなインベントリを使用した場合には VOC 律速地

域が顕著に拡大することから、植物起源 VOC 排出量による影響が大きいと考えられる。

④資料③-5

- ・ 関東圏の人為 NO_x および VOC 排出量を一律に 0～50%に削減した場合のシミュレーション結果によると、対象とした 7 地点すべてにおいて、VOC 削減は O₃ 最高濃度減少につながるが、NO_x 削減だけを実施すると、特に都心においては O₃ 最高濃度の増加につながる可能性が示唆された。

【まとめ】

- ・ 東京湾周辺の都市域（発生源地域）では VOC 律速であるが、発生源から離れるにしたがって NO_x 律速になる傾向がある。また、BVOC の不確実性に伴う影響については引き続き検討する必要がある。
- ・ 関東地域のシミュレーション結果（基準年 2009 年）によると、VOC 削減対策が有効であり、例えば、O₃ 新指標相当値は、人為起源 VOC 排出量を半減したケースでは 6%、固定蒸発発生源の VOC 排出量を半減したケースでは 4%、それぞれ減少する。また、域内の人為起源 VOC 排出量を半減したケースでは、O₃ 新指標相当値が全域で低減する。更に、2001 年～2009 年の固定蒸発 VOC 発生源対策によって O₃ 新指標相当値は全域で低下した。特に、東京都東部～埼玉県南東部においては 10～15%程度低下したと評価されたことから、固定蒸発発生源における VOC 削減対策により、関東地域では O₃ 新指標相当値が低下したことが確認された。
- ・ 一方、内陸地域（風下地域）では NO_x 律速と考えられることから、化学輸送モデルによる削減対策の事前評価、NO_x 削減と組合わせた発生源対策の検討が必要である。

(3) VOC 削減による PM_{2.5} 低減効果

大気中の光化学反応により、大気中の VOC が酸化して難揮発性物質が生じる。この難揮発性物質が凝結したり既存の粒子に取り込まれたりして二次粒子（二次有機粒子 SOA; Secondary Organic Aerosol）になる（エアロゾル学会編「エアロゾル用語集」p62）。また、発生源から直接排出される一次有機粒子（POA; Primary Organic Aerosol）のうち揮発性の高いものは、大気中で凝結／気化して半揮発性有機化合物（SVOC; Semi-volatile Organic Compounds）となり、エージングや反応を経た後、再び粒子化して SOA になることが知られている。

このように二次有機粒子の生成過程は極めて複雑であり、現在、生成過程の解明とモデル化に向けて、世界的に研究が進められているところである。

二次有機粒子は PM_{2.5} の主要成分の一つであり、群馬県前橋市で測定された結果によると、通年で PM_{2.1} の 11～23%（Kumagai et al., 2009）、夏季の PM_{2.5} のうち SOC(Secondary Organic Carbon)として約 13%（SOA/SOC=1.4 とすると SOA としては 18%程度）（高橋ら, 2009）を占めることが報告されている。二次有機粒子の前駆物質は VOC であり、VOC 排出量を削減すれば二次有機粒子は低減する。

①資料④-1

- ・化学輸送モデルを用い、自動車 NO_x・PM 法規制地域である大阪・兵庫圏、愛知・三重圏、首都圏と東京 23 区における 2005 年度の PM_{2.5} 濃度に対する各種発生源と越境輸送の感度を評価した。
- ・蒸発 VOC については、SOA に対する感度が 20%程度であったが、PM_{2.5} の濃度計算値に占める SOA の割合が小さいため、PM_{2.5} に対する感度は、夏に数%に達する程度であった。ただし、シミュレーションで計算される SOA は大幅な過小評価であるため、実大気での感度はさらに大きい可能性がある。

②資料④-2

- ・現在の化学輸送モデルでは、SOA の生成・反応過程が十分に記述できておらず、SOA を過小評価する傾向にある。例えば、従来の CMAQ シミュレーションでは POA は不揮発性とされ、SOA は 2 反応生成物モデルで記述されていたが、CMAQ-VBS では POA を揮発性があるものとして、揮発性の桁が異なるものの集まりとして扱う。
- ・南カリフォルニアにおいて、従来型モデル (CMAQ-AE6) と CMAQ-VBS によるシミュレーションを行い、観測結果と比較評価した結果によると、CMAQ-VBS による SOA は、エアロゾル質量分析計 (AMS) の OOA (酸化された OA ; SOA の代替物質) 測定値の平均より 1/5.2 過小評価であったが、CMAQ-AE6 の 1/24 よりかなり改善された。
- ・全体として、CMAQ-VBS では、IVOCs (Intermediate Volatility Organic Compounds) からの SOA 生成と、SOA のエイジングによって SOA の再現性が改善される (未だに 1/1.6~1/2 過小ではあるが)。今後、パラメーター化の仮定 (例えば SOA のエイジング) をより良く理解すること、既存の排出インベントリーを POA に揮発性があるとする枠組みに適合させるより確からしい手法が必要とされる。

【まとめ】

- ・VOC 排出量の削減によって、PM_{2.5} の主要成分である SOA (二次有機粒子) は低減する。
- ・関東地方における化学輸送モデルを用いたシミュレーション結果によると、蒸発 VOC 排出量の SOA に対する感度は 20%程度であるが、PM_{2.5} の濃度計算値に占める SOA の割合が小さいため、PM_{2.5} に対する感度は夏に数%に達する程度である。
- ・しかし、SOA の生成過程は極めて複雑であり、現在の化学輸送モデルの再現性は不十分である。従って、その低減効果の定量評価には大きな不確実性がある。
- ・現在、SOA 生成過程の解明とモデルの改善に向けた研究が世界的に進められており、例えば、CMAQ-VBS のような改良モデルが開発・活用されつつある。

(参考文献)

Kumagai, K.; Iijima, A.; Tago, H.; Tomioka, A.; Kozawa, K.; Sakamoto, K. (2009) Seasonal characteristics of water-soluble organic carbon in atmospheric particles in the inland Kanto plain, Japan, Atmos. Environ., 43, 3345-3351.

高橋克行, 伏見暁洋, 森野悠, 飯島明宏, 米持真一, 速水洋, 長谷川就一, 田邊清, 小林伸治 (2009) 北関東における微小粒子状物質のレセプターモデルと放射性炭素同位体を組み合わせた発生源寄与率推計, 大気環境学会誌, 46, 156-163.

(4) まとめ

1) VOC 削減による光化学 O_x 低減効果

①基礎的知見

- ・ VOC を削減した場合、VOC 律速（混合律速を含む）条件下では O_x 濃度は確実に低減し、NO_x 律速条件下でも O_x 低減効果は VOC 律速条件下に比べて期待できないが O_x が増加することはない。
- ・適切な排出削減対策を決定するためには律速条件を把握することが重要である。律速条件は NMHC/NO_x 比に強く依存する。

②データ解析に基づく知見

- ・近年の高濃度域における光化学オキシダントの出現頻度の低下は、VOC 排出抑制など前駆物質の削減対策が進められたことによるものと示唆される。
- ・首都圏の発生源地域では VOC 律速であり、VOC 削減が光化学オキシダントの低減に有効であることがほぼ共通した見解である。
- ・但し、郊外では NO_x 律速に変化すると考えられ、NO_x 削減とのバランスを考慮する必要がある。

③モデル解析に基づく知見

- ・東京湾周辺の都市域（発生源地域）では VOC 律速であるが、発生源から離れるにしたがって NO_x 律速になる傾向がある。また、BVOC の不確実性に伴う影響については引き続き検討する必要がある。
- ・関東地域のシミュレーション結果（基準年 2009 年）によると、VOC 削減対策が有効であり、例えば、O₃ 新指標相当値（日最高 8 時間値の暖候期 98 パーセンタイル値）は、人為起源 VOC 排出量を半減したケースでは 6 %、固定蒸発発生源の VOC 排出量を半減したケースでは 4 %、それぞれ減少する。また、域内の人為起源 VOC 排出量を半減したケースでは、O₃ 新指標相当値が全域で低減する。更に、2001 年～2009 年の固定蒸発 VOC 発生源対策によって O₃ 新指標相当値は全域で低下した。特に、東京都東部～埼玉県南東部においては 10～15%程度低下したと評価されたことから、固定蒸発発生源における VOC 削減対策により、関東地域では O₃ 新指標相当値が低下したことが確認された。
- ・一方、内陸地域（風下地域）では NO_x 律速と考えられることから、化学輸送モデルによる削減対策の事前評価、NO_x 削減と組合わせた発生源対策の検討が必要である。

2) VOC 削減による PM_{2.5} 低減効果

- ・VOC 排出量の削減によって PM_{2.5} の主要成分である SOA（二次有機粒子）は低減

する。

- ・関東地方における化学輸送モデルを用いたシミュレーション結果によると、蒸発 VOC 排出量の SOA に対する感度は 20%程度であるが、PM2.5 の濃度計算値に占める SOA の割合が小さいため、PM2.5 に対する感度は夏に数%に達する程度である。
- ・SOA に対する現在の化学輸送モデルの再現性は不十分であり、その低減効果の定量評価には大きな不確実性があるため、SOA 生成過程の理解とモデルの改良が必要である。

全体を通して、今回の文献レビューにより以下の点が指摘できる。

- ・これまでの VOC 排出量の削減により高濃度域における光化学オキシダント濃度の改善が見られる。
- ・首都圏の都市域では VOC 律速であり、VOC の排出削減が光化学オキシダント濃度の低減に有効である。一方、郊外では NO_x 律速に変化すると考えられるが VOC 排出削減により光化学オキシダント濃度が増加する可能性は低い。
- ・VOC の個別成分の増減により光化学オキシダント濃度に影響を与えることを具体的に示す文献は見当たらなかった。
- ・VOC 排出量の削減によって PM2.5 の主要成分である SOA（二次有機粒子）は低減する。ただし、その低減効果の定量評価のためには、SOA 生成過程の理解とモデルの改良が必要である。

【参考資料1】名簿

公益社団法人大気環境学会

H28 年度光化学オキシダント等に関する文献等調査業務研究会

(五十音順)

- 上野 広行 公益財団法人東京都環境公社 東京都環境科学研究所
 ◎大原 利眞 国立研究開発法人 国立環境研究所
 岡崎 友紀代 愛媛大学
 篠原 直秀 国立研究開発法人 産業技術総合研究所
 長谷川 就一 埼玉県環境科学国際センター
 星 純也 公益財団法人東京都環境公社 東京都環境科学研究所
 ○森川 多津子 一般財団法人 日本自動車研究所
 若松 伸司 愛媛大学

◎座長、○幹事

[協力者]

(五十音順)

- 黒川 純一 一般財団法人 日本環境衛生センターアジア大気汚染研究センター
 小林 伸治 国立研究開発法人 国立環境研究所
 高橋 克行 一般財団法人 日本環境衛生センター
 田邊 潔 国立研究開発法人 国立環境研究所
 茶谷 聡 国立研究開発法人 国立環境研究所
 中塚 誠次 エヌ・ティ・ティ・データ CCS
 速水 洋 一般財団法人 電力中央研究所環境科学研究所
 横田 久司 公益社団法人 大気環境学会

【参考資料2】資料リスト**①総論**

①-1 抜粋

「光化学オキシダント調査検討会 報告書」光化学オキシダント調査検討会、p. 103～105、p. 116～122、(2012)

②データ解析

②-1 抜粋「光化学オキシダント対策検討会報告」光化学オキシダント対策検討会、p. 48～49、(2005)

②-2 レビュー

「光化学オキシダント対策検討会報告について、」東京都環境局環境改善部、大気環境学会誌、40(6)、A65-A77 (2005)

②-3 レビュー

「関東地方の夏季高濃度 O_x の長期的濃度変動要因の検討と前駆物質濃度削減効果の予測評価」上野広行、齊藤伸治、國領和夫:大気環境学会誌、50(6)、p. 257-265 (2015).

②-4 レビュー

「関東地域における揮発性有機化合物 (VOC) 排出量の変化と光化学オキシダント生成の関係について」星 純也、石井 康一郎:大気環境学会誌、48(5)、p. 215-222 (2013)

②-5 レビュー

「首都圏における夏季高濃度オゾン出現に関わる前駆物質 (NMHC と NO_x) の挙動解析」吉門洋、大気環境学会誌、50(1)、p. 44 (2015)

②-6 原著

「オゾン生成レジームに関する法則ーオゾン低減戦略のための理論としてー」神成 陽容、大原 利真、大気環境学会誌、大気環境学会誌、48(2)、p. 110、(2013)

②-7 その他、大気環境学会誌に掲載された関連する論文の概要

③モデル解析

③-1 抜粋

「光化学オキシダント調査業務報告書」一般財団法人日本気象協会、p. 54～57、(2016)

③-2 レビュー

「関東地方における NO_x および VOC 排出削減のオゾン濃度に与える影響」桐山悠祐、速水洋、板橋秀一、嶋寺光、三浦和彦、中塚誠次、森川多津子、大気環境学会誌、50(1)、p. 8、(2015)

③-3 レビュー

「関東地方における下記地表オゾン濃度の NO_x 、VOC 排出量に対する感度の地理分布 第 I 報 大小 2 種類の植物起源 VOC 排出量推定値を入力した場合の数値シミュレーションによる推定」井上和也、安田龍介、吉門洋、東野晴行、大気環境学会誌、45(5)、p. 183-194、(2010)

③-4 レビュー

「関東地方における下記地表オゾン濃度の NO_x 、VOC 排出量に対する感度の地理分布

第II報 光化学指標の実測に基づく推定」井上和也、吉門洋、東野晴行、大気環境学会誌、45(5)、p.195-204、(2010)

③-5 抜粋

「PM_{2.5}成分観測結果と大気シミュレーションによる発生源寄与解析」、森川 多津子、木村真、自動車技術会 2016 年春季大会フォーラムテキスト「リアルワールドでの空気質改善に対する自動車影響を考える」p.39 (2016)

④VOC 削減による PM_{2.5} 低減効果

④-1 レビュー

「3 次元大気シミュレーションによる 2005 年度日本三大都市圏 PM_{2.5} 濃度に対する国内発生源・越境輸送の感度解析」茶谷聡、森川多津子、中塚誠次、松永壮、大気環境学会誌、46(2)、p.101-110、(2011)

④-2 レビュー

” Understanding sources of organic aerosol during CalNex-2010 using the CMAQ-VBS” Matthew C. Woody, Kirk R. Baker, Patrick L. Hayes, Jose L. Jimenez, Bonyoung Koo, Havalala O. T. Pye, Atmos. Chem. Phys., 16, 4081-4100, (2016)

④-3 レビュー

「首都圏における人為燃焼発生源の排出量抑制と二次粒子無機イオン成分濃度の関係」速水洋、大気環境学会誌、42(4)、p.234-252 (2007)

⑤リスク評価

⑤-1 概要

「詳細リスク評価書シリーズ 24 オゾン -光化学オキシダント-」新エネルギー・産業技術総合開発機構・産総研 化学物質リスク管理研究センター編、中西準子・篠崎裕哉・井上和也 著、丸善株式会社 (2009)

⑤-2 原著

「ガソリンスタンド従業員VOC類への曝露」篠原直秀、依田隆志、岡崎友紀代、若松伸司、第56回大気環境学会年会講演要旨集、2E1045、p.413、(2015)