

海外における光化学オキシダント対策等に関する動向

2021年2月8日

MRI 株式会社三菱総合研究所

サステナビリティ本部

調査の背景・目的

<背景>

- 揮発性有機化合物（VOC）については、法規制と産業界による自主的取組により排出抑制を実施。近年では平成 12 年度比の約半分までVOC排出量を削減。
- 一方、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。
- 以上の状況を踏まえ、今後の施策の参考とするため、海外の情報を収集し、日本の対策と比較する。



<目的>

- 米国、欧州及び中国におけるOx濃度の低減対策について、日本の対策と比較を行う。
- 具体的には、Oxの環境基準、VOC及び窒素酸化物（NOx）の排出基準の設定状況、それ以外のOx対策として政府が推進する取組について整理し、個々を比較するとともに、全体としての対策の強弱を比較し、考察を行う。

各国の対策の比較

Oxの環境基準及び達成状況

- 各国のOxの環境基準及び達成状況は以下のとおり。数値については、 $\text{ppm} \Leftrightarrow \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、1時間値 $\Rightarrow$ 8時間値の換算を実施（詳細は次頁参照）
- 換算後の環境基準値の数値のみでの比較を行うと、日本> 米国> 欧州> 中国の順となるが、測定値の取り扱いが各国で異なることに留意が必要。
- 各国とも大部分は環境基準未達となっている。

表1. Oxの環境基準及び達成状況

	Ox環境基準 ※下線が基準値、下線なしは比較のため単位換算した値	達成状況	備考
米国	<u>0.070ppm</u> / <u>150.0$\mu\text{g}/\text{m}^3$</u> ➤ O ₃ 濃度：年間4番目に高い日中8時間濃度の3年間の加重平均値	部分未達成 ➤ 2015年オゾン基準を達成した郡（County）の数に基づく基準達成率は85%	—
欧州	<u>0.056ppm</u> / <u>120$\mu\text{g}/\text{m}^3$</u> ➤ O ₃ 濃度：1日最大8時間平均値で120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 未満であり、平均3年間で環境基準値を超える日が25日/年以下	部分未達成 ➤ 17の加盟国および6つの報告国は、O ₃ 目標値を超える濃度を25回以上記録	連続した年次データを確保できない場合は1年間のデータも可
中国	<u>0.047ppm</u> / <u>100$\mu\text{g}/\text{m}^3$</u> ➤ O ₃ 濃度：一日最大8時間平均値	未達成 ➤ 実測値は167 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	8時間毎に6以上のデータが必要
日本	<u>0.06ppm</u> / <u>128.6$\mu\text{g}/\text{m}^3$</u> ➤ Ox/O ₃ 濃度：1時間値の最大値。昼間（5時から20時までの時間帯）を測定 <u>0.071ppm</u> ➤ 1時間値の最大値を8時間値に換算（次頁2）参照	大部分は未達成 ➤ 環境基準達成率は一般局0.1%、自排局0%	規制上Oxが測定対象物質となっており過去にはOxを測定していたが、現在は、測定手法上O ₃ を測定。

出所）各国規制官庁のウェブサイト等に基づき作成

(参考) Oxの環境基準値の換算の考え方

1) ppmと $\mu\text{g}/\text{m}^3$ の換算の考え方

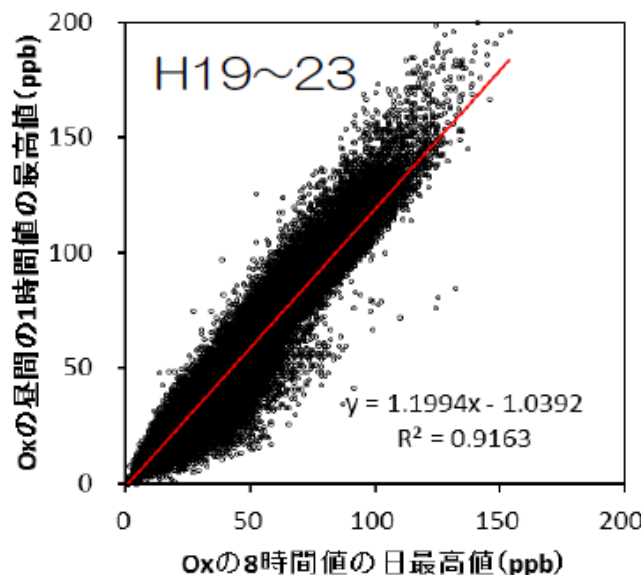
- $\text{ppm} = \text{mg}/\text{m}^3 \times 22.4 / \text{分子量} \times (273 (\text{K}) + t^\circ\text{C}) / 273 \times 1013 \text{hPa} / \text{気圧 (hPa)}$

2) 1時間値の8時間値への換算の考え方

- 環境省「光化学オキシダント調査検討会報告書（平成26年3月）」において、日本の1時間平均値と8時間平均値の関係について検討。
- 日本におけるOxの1時間値の最高値とOxの8時間値の日最高値との関係を示す一次回帰式が得られている。

$$\text{Oxの1時間値の最高値 (ppb)} = 1.1994 \times \text{Oxの8時間値の日最高値 (ppb)} - 1.0392$$

- この式一次回帰式に基づき、日本の環境基準値0.06ppm（1時間値）を8時間値に換算すると0.071ppmとなる。なお、日本では、2000年以降、吸光光度法（KI法）からUV法へ測定器更新が進み、海外と同様、測定対象物質が O_3 に限定されていると考えてよい。



（注）測定地域は埼玉県
 出所）環境省「平成25年度第2回 光化学オキシダント調査検討会」
 資料1-4データの多角的解析（1時間値と8時間値の関係）
https://www.env.go.jp/air/osen/pc_oxidant/conf/chosa/h25_02.html 2020年11月閲覧

図1. 日本におけるOxの1時間値の最高値とOxの8時間値の日最高値との関係

VOC及びNOxの排出基準値（放出限界値）

- 各国のVOC及びNOxの排出基準値（放出限界値）は以下のとおり。排出源によって基準値が異なるため、主要な排出源として、VOCはオフセット印刷、NOxは天然ガスタービンを例に比較する。
- VOC排出基準値は、日本＞欧州＞米国＞中国。NOx排出基準値は、日本＞米国＞欧州＝中国。

表2. VOC及びNOxの排出基準値（放出限界値）の比較

	VOC（オフセット印刷の場合）		NOx（天然ガスガスタービンの場合）	
	排出基準値 ※下線が基準値、下線なしは比較のため単位換算した値	備考	排出基準値 ※下線が基準値、下線なしは比較のため単位換算した値	備考
米国	20ppmC <u>20ppm</u>	連邦政府規制はなくデラウェア州独自の値。 全体で16.8kg/dのVOCを排出する施設のヒートセット・リトグラフ・オフセット印刷での排ガス排出限界値。	<u>42ppm</u>	NSPSの規制。15MW超250MW以下・既設の値。
欧州	187ppmC <u>100mgC/Nm³</u>	溶剤消費閾値 15-25t/y	24.35ppm <u>50mg/Nm³</u>	産業排出指令の附属書 I。CCGTを含む。 一定以上高効率の場合、放出限界値は高くなる（計算式あり）。
	37ppmC <u>20mgC/Nm³</u>	溶剤消費閾値 > 25t/y		
中国	0.086ppmC <u>0.5mg/m³</u>	ベンゼン	24.35ppm <u>50mg/Nm³</u>	「火力発電所大気汚染物排出基準」（GB13223-2011）
	16.3ppmC <u>10mg/m³</u>	ベンゼンとトルエンの合計		
日本	<u>400ppmC</u>	大気汚染防止法施行規則。印刷の用に供する乾燥施設（オフセット輪転印刷に係るものに限る。）。「乾燥施設」はVOCを蒸発させるためのもの。送風機の送風能力が7,000m ³ /時以上のもの。	<u>70ppm</u>	大気汚染防止法施行規則

注1) 中国VOC排出基準値には、非メタン全炭化水素：30mg/m³があるが、物質組成が不明のため考慮していない。

注2) mg/m³⇒ppmCの換算は、mg/m³をppmへ換（ppm = mg/m³ × 22.4/分子量 × (273 (K) + t℃) / 273 × 1013hPa/気圧 (hPa)）し、ppmをppmCへ換算（ppmC = ppm × 物質の中の炭素の数）した。

出所) 各種資料から三菱総合研究所作成

VOC及びNO_xの排出状況

- 各国のVOC及びNO_xの排出状況は以下のとおり。各国において比較可能な値としてVOCは排出量を、NO_xは大気質濃度を示す。

表3. VOC及びNO_xの排出状況

	VOC		NO _x	
	排出量	備考	大気質濃度	備考
米国	1,264万t/y ➢ 2017年実績 ^{注1)}	➢ 2015年比では8%低減。	16 μ g/m ³ ^{注4)} ➢ 2019年実績、年平均値	➢ NAAQSで定めるNO ₂ の環境基準、年平均値が0.053ppm (109 μ g/m ³) 以下。 ➢ 2015年比13%低減。
欧州	570万t/y ➢ 2017年実績、NMVOC ^{注2、3)}	➢ 国別排出上限指令付属書排出上限値 893.8万t/y (2014-2019年)。 ➢ 2015年比では0.8%増加。	16.3 μ g/m ³ ➢ 2017年実績、年平均値	➢ 濃度は年間平均値でNO ₂ の値。EU新大気質指令制限値40 μ g/m ³ (年平均値)。 ➢ 2015年比13%低減。
英国	70.3万t/y ➢ 2018年実績、NMVOC ^{注3)}	➢ 国別排出上限指令付属書排出上限値 120.0万t/y (2010-2019年) ➢ 2015年比では0.6%増加。	19.6 μ g/m ³ ➢ 2019年実績、都市バックグラウンドNO ₂ 年平均値	➢ 濃度は年間平均値でNO ₂ 。EU新大気質指令制限値に倣い40 μ g/m ³ (年平均値)。 ➢ 2015年比14%低減。
ドイツ	80.5万t/y ➢ 2018年実績、NMVOC ^{注3)}	➢ 国別排出上限指令付属書排出上限値 99.5万t/y (2010-2019年) ➢ 2015年比では2%低減。	18 μ g/m ³ ➢ 2019年実績、都市バックグラウンドNO ₂ 年平均値	➢ 濃度は年間平均値でNO ₂ 。EU新大気質指令制限値に倣い40 μ g/m ³ (年平均値)。 ➢ 都市バックグラウンドで2015年比12.9%低減。
中国	—	➢ 目標は2020年で2015年比15%低減 (青空保護戦勝利 (青空保衛戦) 3年行動計画、2018-2020年)。	29 μ g/m ³ ➢ 2019年実績、338都市平均、NO ₂ 年平均値	➢ 環境空気質量基準 (GB3095-2012) のNO ₂ 制限値40 μ g/m ³ ➢ 338都市平均で2015年比3%低減。
日本	固定発生源：64.2万t/y ➢ 2018年度実績、NMVOC 移動発生源：8.2万t/y ➢ 2018年度実績、THC	➢ 平成22年度までに平成12年度比で3割程度の削減。(中央環境審議会意見具申 (平成16年2月))	18 μ g/m ³ ^{注5)} ➢ 2018年実績、一般局、NO ₂ 年平均値	➢ 大気汚染に係る環境基準、NO ₂ の1時間値の1日平均値が0.06ppm (123 μ g/m ³) 以下。 ➢ 一般局で2015年比10%低減。

注1) 米国排出量は、山火事を含まない値。山火事を含むと1,722万t/y (2017年)。注2) EUはGg/y表記であるため、1Gg/y=0.1万t/yと換算。注3) 欧州、英国、ドイツの排出量は、肥料または農業の農業土壌からの排出量を除く。注4) 7.80ppb→16 μ g/m³に換算。注5) ppm表記であるため、NO_x標準状態 (0℃、1気圧) 0.009 ppm→18 μ g/m³に換算。

出所) 各種資料から三菱総合研究所作成

(参考) VOC及びNOxの排出に関する目標値と達成状況

- 各国のVOC及びNOxの排出に関する目標値（排出量目標、大気質目標）とその達成状況は以下のとおり。
- VOCの排出量目標については設定されている各国とも達成。NOxの大気質目標は全ての国で達成、排出量目標についても概ね達成。

表4. VOC及びNOxの排出に関する目標値と達成状況

	VOC		NOx			
	排出量目標	達成状況	大気質目標	達成状況	排出量目標	達成状況
米国	—	— ➢ 2015年比で8%低減	109 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ^{注4)} ➢ 年平均値NO ₂ の値	達成 ➢ 目標比85%低減	—	—
欧州	893.8万t/y ^{注1,2)}	達成 ➢ 目標比36%低減	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ➢ 年平均値NO ₂ の値	達成 ➢ 目標比59%低減	909.0万t/y ^{注1)}	達成 ➢ 目標比23%低減
英国	120.0万t/y ^{注2)}	達成 ➢ 目標比41%低減	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ➢ 年平均値NO ₂ の値	達成 ➢ 目標比51%低減	116.7万t/y	達成 ➢ 目標比29%低減
ドイツ	99.5万t/y ^{注2)}	達成 ➢ 目標比19%低減	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ➢ 年平均値NO ₂ の値	達成 ➢ 目標比55%低減	105.1万t/y	未達成 ➢ 目標比1%超過
中国	2015年比15%減	不明	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ➢ 年平均値NO ₂ の値	達成 ➢ 目標比28%低減	1,573万t/y	達成 ➢ 目標比22%低減
日本	98.4万t/y ^{注3)}	達成 ➢ 目標比35%低減	123 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ^{注5)} ➢ 1時間値の1日平均値NO ₂ の値	達成 ➢ 目標比85%低減	—	—

注1) EUはGg/y表記であるため、1Gg/y=0.1万t/yと換算。注2) 欧州、英国、ドイツの排出量は、肥料または農業の農業土壌からの排出量を除く。注3) 日本の排出目標は、排出インベントリデータ（上段）の値に対し設定され、移動発生源のTHCデータは考慮されていない。平成12年度インベントリデータ1,405,058t/y $\times$ 0.7=98.4万t/yとした。注4) 7.80ppb $\rightarrow$ 16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、0.053 ppm $\rightarrow$ 109 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ に換算。注5) ppm表記であるため、NOx標準状態（0℃、1気圧）0.06 ppm $\rightarrow$ 123 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ に換算。

出所）各種資料から三菱総合研究所作成

Oxの環境基準、VOC及びNOxの排出基準の比較

- 各国のOx環境基準及びVOC・NOx排出基準を単位換算して比較すると以下のとおり。
- Ox環境基準値は米国と日本は同程度、欧州、中国はより厳しい基準値を設定。VOC及びNOx排出基準値とも日本は米国、欧州、中国に比べ大きい。

表5. Oxの環境基準、VOC、NOxの排出基準値の比較（再掲）

	Oxの環境基準 ※下線が基準値、下線なしは比較のため単位換算した値		VOCの排出基準値 ※オフセット印刷の場合 ※下線が基準値、下線なしは比較のため単位換算した値		NOxの排出基準値 ※天然ガスタービンの場合 ※下線が基準値、下線なしは比較のため単位換算した値
	8時間値	1時間値			
米国	<u>0.070ppm</u> / <u>150.0μg/m³</u> ➢ O ₃ 濃度：年間4番目に高い日中8時間濃度の3年間の加重平均値	—	20ppmC <u>20ppm</u>		<u>42ppm</u>
欧州	0.056ppm/ <u>120μg/m³</u> ➢ O ₃ 濃度：1日最大8時間平均値で120 μ g/m ³ 未満であり、平均3年間で環境基準値を超える日が25日/年以下	—	溶剤消費閾値 15-25t/y	187ppmC <u>100mgC/Nm³</u>	24.35ppm <u>50mg/Nm³</u>
			溶剤消費閾値 > 25t/y	37ppmC <u>20mgC/Nm³</u>	
中国	0.047ppm/ <u>100μg/m³</u> ➢ O ₃ 濃度：一日最大8時間平均値	—	ベンゼン	0.086ppmC <u>0.5mg/m³</u>	24.35ppm <u>50mg/Nm³</u>
			ベンゼンと トルエン	16.3ppmC <u>10mg/m³</u>	
日本	0.071ppm ➢ 1時間値の最大値を8時間値に換算	<u>0.06ppm</u> / <u>128.6μg/m³</u> ➢ Ox/O ₃ 濃度：1時間値の最大値。昼間	400ppmC		<u>70ppm</u>

注1) 米国のVOC排出基準値はデラウェア州の値、中国のVOC排出基準値は北京市の値。

注2) 中国VOC排出基準値には、非メタン全炭化水素：30mg/m³があるが、物質組成が不明のため考慮していない。

出所) 各種資料から三菱総合研究所作成

VOC対策に関する自主的取組

- 中国を除き、米国、欧州では、規制による削減の補完的方法として、独自の自主的取組が見られる。

表6. 各国のVOCに関する自主的取組の内容

	プログラム名称	関連主体	概要
米国	「固定発生源の自主的措置 (Stationary Source Voluntary Measures)」	州、CAAによって規制されていない小規模・地域排出源	- 州は州実施計画 (SIP) において、企業 (固定排出源) による自主的な排出削減についての実施方法を規定することとされている。 - 大気浄法 (CAA) で規制されていない小規模排出源が対象。 - 自主的措置は強制力はない。
	「自主的移動発生源排出削減制度 (Voluntary Mobile Source Emission Reduction Programs (VMEPs))」	州、企業	- EPAが固定発生源同様、大気浄法 (CAA) に基づくVMEPsを設けている。 - 従業員輸送管理制度 (通勤や移動のためのバンや乗用車の相乗り、バスの借り上げ等)、勤務時間変更 (テレワーク、勤務時間のシフト等)、地域ライドシェア・インセンティブ等 (通勤者に一人乗り車に代わる利用を奨励) 等。
欧州	エコラベル (EU Ecolabel) 制度	EU、製品の製造者、輸入者およびサービス・プロバイダー	- 一定の要件を満たした製品・サービスを認証。(個別の製品にはそれぞれ含有上限値 (g/L)) - 製品の製造者、輸入者およびサービス・プロバイダー等が認証申請。
	オランダ「炭化水素2000 (Koolwaterstoffen 2000 (KWS2000))」	地方政府、自治体、業界団体	- EUの国別排出上限指令 (各国の排出上限値を規定) の達成方法は、各国に一任。 - オランダには、日本と同様の取り組み (KWS2000) があった。 - KWS2000は、「VOC排出抑制戦略」の下での電力と農業を除く固定排出源からのVOC排出削減を目的とした官民合同プロジェクト (1989-2000)。当時の住宅・国土計画・環境省 (VROM)、経済省 (EZ)、地方政府、自治体および業界団体などによって準備され、事業者等との密接な協議によって策定された。
中国	見当たらない。	—	(参考) 「主要産業における揮発性有機物の包括的な管理プログラムの発行に関する通知 (2019年6月26日)」において、汚染物質が大量に排出される企業に専門的な技術サポートを提供し、実行可能な汚染管理計画を策定させる。重点地域のVOC排出量の多い企業に対し、「OnePlant、One Policy」計画を2020年6月末までに策定させ実行させるとしている。
日本	自主的取組	経済産業省、業界団体	- 事業の実態を踏まえた事業者の創意工夫と自発性が最大限発揮される自主的取組により効果的な排出抑制を図る。 - 業界団体が策定する自主行動計画 (目標) への企業の自主的な参加等、実情に応じ適切な対策を講じる。

出所) 各種資料から三菱総合研究所作成

対策全体の比較（環境基準、排出規制及び自主的取組）

- O_x対策について、各国を比較すると環境基準値は、中国、欧州、米国、日本の順に厳しい。ただし、米国と日本の環境基準値はほぼ同程度である。環境基準値の運用状況は、米国が州ごとに達成・未達成を判断、EUが加盟国毎に達成・未達成を判断、中国及び日本は、全国レベルで達成・未達成を判断している。
- VOC排出基準値については、米国では排出基準値の設定の有無は州により異なり、基準値設定州の排出基準値は欧州より厳しい。欧州では、排出基準値は日本より厳しく日本と同様、排出量目標を設定している。中国では、排出基準値は4地域比較で最も厳しく、排出量目標を設定している。日本では、排出基準値は4地域比較で最も緩いが、排出量目標を設定している。
- VOC対策について、米国、欧州（オランダ）、日本については、規制と自主的取組のセットで対応している。ただし、オランダの取組については過去事例である。EUでは、VOC対策として、製品の製造者、輸入者およびサービス・プロバイダーの申請に任せるエコラベル（EU Ecolabel）制度がある。中国では、規制強化、監視強化により対応しており、自主的取組は見られなかった。
- NO_x排出規制値については、日本より米国の方が厳しく、欧州及び中国は米国よりも更に厳しい。米国では、欧州より緩い大気質目標があり、特定州で排出量目標がある。欧州では、大気質目標があり、排出量目標もある。中国については、欧州と同じ値の大気質目標があり、排出量目標もある。日本では、4地域比較で最も緩い値の大気質目標となっており、特定県で移動発生源の総量規制（排出量目標）がある。

対策全体の比較（環境基準、排出規制及び自主的取組）

表7. 対策全体の比較（まとめ）

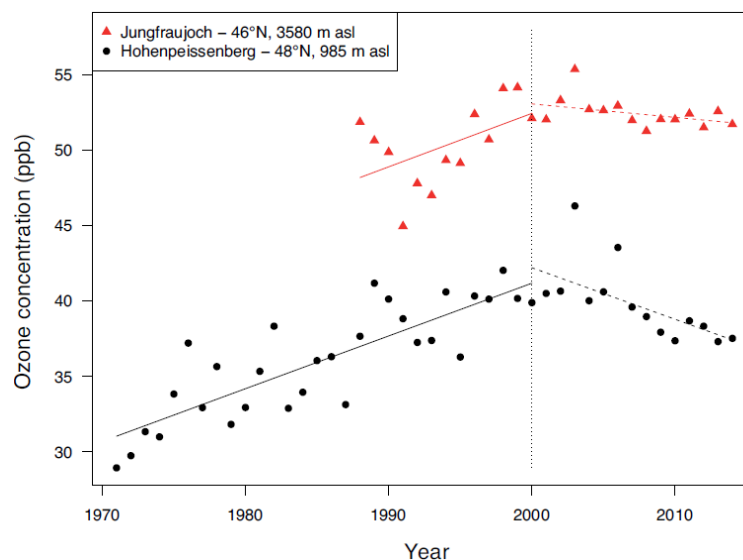
	Ox環境基準	排出基準値		自主的取組（VOC）
		VOC ※オフセット印刷の場合	NOx ※天然ガスタービン の場合	
米国	<u>0.070ppm/150.0μg/m³</u> ➤ 州ごとに達成・未達成を判断	20ppmC <u>20ppm</u> ※デラウェア州の値		➤ SIP（州実施計画）において、企業（固定発生源）による自主的な排出削減についての実施方法を規定。排出規制の対象外である小規模排出源に対応。 ➤ EPAが固定発生源同様、大気浄化法（CAA）に基づく「自主的移動発生源排出削減制度（VMEPs）」を設けている。
欧州	<u>0.056ppm/120μg/m³</u> ➤ 加盟国毎に達成・未達成を判断	溶剤消費閾値 15-25t/y	187ppmC <u>100mgC/Nm³</u>	➤ EUの国別排出上限指令（各国の排出上限値を規定）の達成方法は各国に一任。 ➤ EUでは、一定の要件を満たした製品・サービスを認証するエコラベル（EU Ecolabel）制度がある。 ➤ オランダでは、欧州版自主的取組（KWS2000）があった。
		溶剤消費閾値 > 25t/y	37ppmC <u>20mgC/Nm³</u>	
中国	<u>0.047ppm/100μg/m³</u> ➤ 全国レベルで達成・未達成を判断	ベンゼン	0.086ppmC <u>0.5mg/m³</u>	➤ 見当たらない。
		ベンゼンとトルエン	16.3ppmC <u>10mg/m³</u>	
日本	<u>0.071ppm</u> ➤ 1時間値の最大値を8時間値に換算 ➤ 全国レベルで達成・未達成を判断	<u>400ppmC</u>		➤ 業界団体が策定する自主行動計画への企業の自主的な参加等、実情に応じ適切な対策を講じる。

注）下線が基準値、下線なしは比較のため単位換算した値
出所）各種資料から三菱総合研究所作成

(参考) O_xの大気濃度の比較

対流圏でのO₃の大気濃度の傾向

- バックグラウンドO₃（対流圏における人為起源によらないオゾン濃度）は、2000年以降、ヨーロッパの表面オゾンの平均濃度とピーク濃度の両方が横ばいになり、一部の場所で減少。
- バックグラウンド濃度レベルの変化を特定するには、地域の排出量に直接影響されない場所での体系的な長期測定が必要。
- ホーエンパイセンベルク（ドイツ、48°N 985 asl）、ユングフラウヨッホ（スイス、46°N 3580m asl）の観測基地は、全球大気監視計画で、対流圏オゾン評価報告書にデータを提供。
- オゾン濃度レベルは、標高とともに増加するため、ホーエンパイセンベルクよりもユングフラウヨッホの方が高い



出所) WMO REACTIVE GASES BULLETIN, No. 2 October 2018

図2. JungfraujochとHohenpeissenbergでのバックグラウンドO₃濃度の長期的な傾向

(参考) O_xの大気濃度の比較

地表でのO₃（バックグラウンドに加えて人為起源のO₃）の大気濃度の傾向

- 北半球冬：高オゾン (> 40 nmol mol⁻¹ (ppb)) 観測エリアは、主に高地に限定（米国西部、西ヨーロッパ（アルプス、アペニン、ピレネー））、日本中部、中国中部、ヒマラヤ、グリーンランド、アルジェリア南部、イザーニャ（カナリア諸島）。標高の低い地域での高オゾン観測エリアは、カナダ西部、カリフォルニア南部、ユタ州北東部、イスラエル、地中海島嶼部、韓国、日本、香港、台湾の近くの島/沿岸地域。
- 北半球夏：高オゾン (> 50 nmol mol⁻¹ (ppb)) 観測エリアは、主に米国西部、南ヨーロッパ、中国、韓国、日本。
- 南半球のオゾン濃度は、観測点がまばらであるため評価が困難。

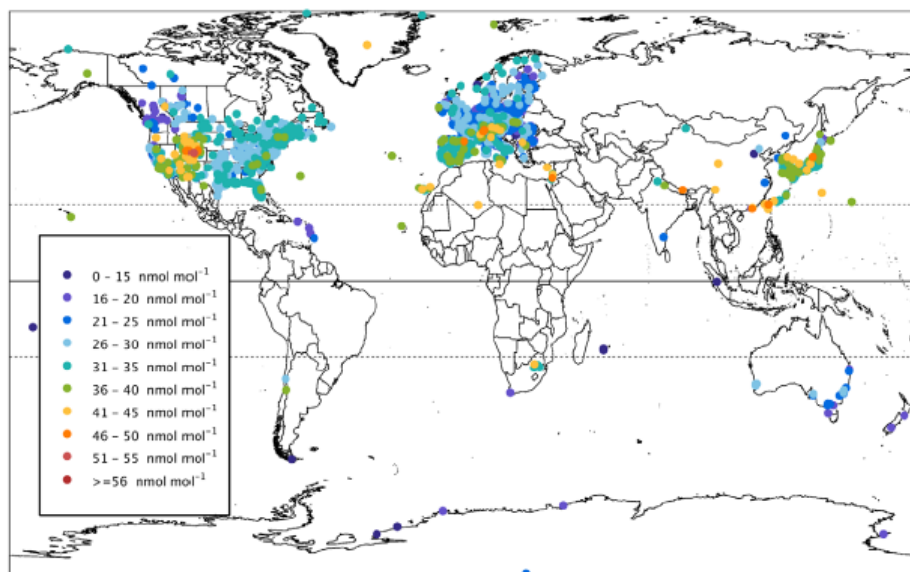


図3. 冬期のO₃分布（2010-2014）

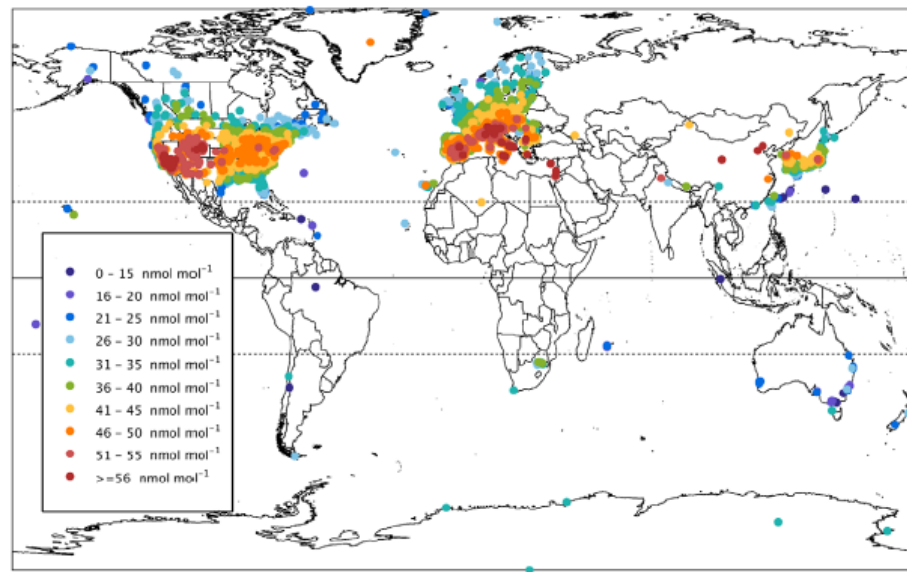


図4. 夏期のO₃分布（2010-2014）

注) 注) 12月、1月、2月の2,702の非都市表面サイト（左）と6月、7月、8月の3,136の非都市サイト（右）での世界の日中平均オゾン (nmol mol⁻¹) 2010-2014年。

出所) 対流圏オゾン評価レポート：気候と全球大気化学モデルの評価に関連する対流圏オゾンの現在の分布と傾向 研究記事 | 2018年5月10日

<https://online.ucpress.edu/elementa/article/doi/10.1525/elementa.291/112811/Tropospheric-Ozone-Assessment-Report-Present-day> 2020年11月閲覧。

(参考) O_xの大気濃度の比較

- 欧州の値は加盟国全体の推定年間平均値（国によりばらつき）。日本のO₃の大気濃度は、米国及びドイツと同程度。
- 日本もO_x測定法が吸光光度法（KI法）からUV法へ測定器更新されており、O₃を観測していると考えてよい。

表8. 各国のO_x濃度

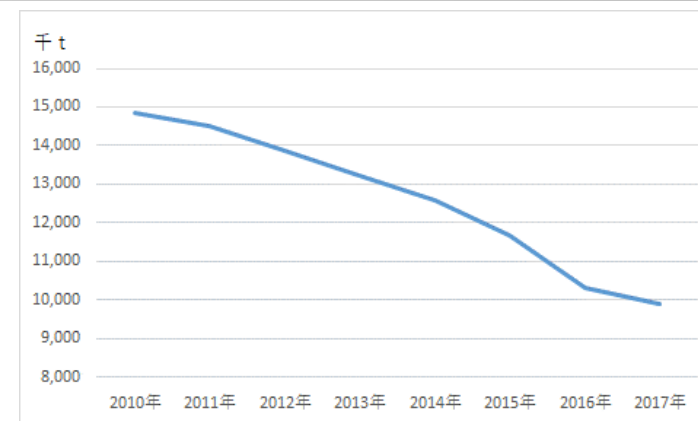
国・地域		Ox濃度の測定値		備考
		測定値 ※下線が実測値、下線なしは比較のため単位換算した値	測定条件	
米国		0.066ppm/141.4μg/m³	➤ 測定対象：O₃ ➤ 全国測定地点の平均値を3か年移動平均した値（2019年値）	➤ 環境基準は、0.070ppm（150.0μg/m³）以下。年間4番目に高い日中8時間濃度の3年間の加重平均。 ➤ 2015年オゾン基準を達成した郡（County）の数に基づく基準達成率は85%。
欧州		0.016ppm/34μg/m³	➤ 測定対象：O₃ ➤ EU全体のO₃濃度の推定年間平均値（2017年値）	➤ 環境基準は、120μg/m³以下。1日最大8時間平均値。平均3年間で 25日/年を超えないこと。 ➤ 最大値は41μg/m³であった（2017年）。17の加盟国および6つの報告国は、O₃目標値を超える濃度を25回以上記録。
	英国	0.029ppm/61.1μg/m³	➤ 測定対象：O₃ ➤ 1日の最大8時間平均値。（2019年値）	➤ 環境基準はEUと同じ。 ➤ 都市部のO₃濃度は直近10年間、安定。農村部のO₃濃度は都市部より大きく明確な傾向を示さない。72.1μg/m³（2019）。 ➤ 2018年の農村部と都市部の両方で100μg/m³を超える時間数は、過去10年間で最も高く、2019年が2番目に高い。
	ドイツ	0.046ppm-0.061ppm/98.05-130.11μg/m³	➤ 測定対象：O₃ ➤ 都市部の1日の最大8時間平均値の93.15 ppercentile値。（2019年値）	➤ 環境基準はEUと同じ。 ➤ 260全ての観測ステーションにおいて環境基準を超過した。（2019年）
中国		0.078ppm/167μg/m³	➤ 測定対象：O₃ ➤ 重点区域都市の年間平均濃度（2019年値）	➤ 環境基準は、二級濃度制限の1日最大8時間平均値100μg/m³以下。 ➤ PM2.5、PM10は減少傾向にあるがオゾン（O₃）は増加傾向。
日本		一般局：0.057ppm（8時間値換算値） 自排局：0.052ppm（8時間値換算値）	➤ 測定対象：Ox ➤ 昼間の日最高1時間値の年平均値（2018年値）	➤ 一般局：0.048ppm/102.9μg/m³（1時間値） ➤ 自排局：0.044ppm/94.3μg/m³（1時間値） ➤ 環境基準は、1時間値が0.06ppm（128.6μg/m³）以下。 ➤ 環境基準達成率は一般局0.1%、自排局0%と極めて低い水準。

出所）各種資料から三菱総合研究所作成

各国の状況

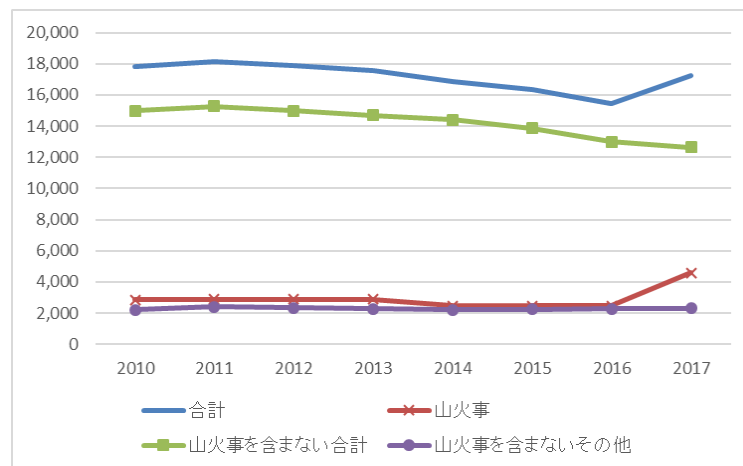
米国：Oxの環境基準達成状況

- NOx排出の状況：NOxの排出量は「運輸」および「固定燃料燃焼」からの排出が持続的に減少しており、2010年と比較すると2019年ではそれぞれ38.0%減、37.1%減とほぼ4割の減少
- VOC排出の状況：2010年以来緩やかな減少を示して推移していたが、2017年は山火事による排出増加により全体としても増加に転じた。
- Oxの環境基準達成状況：O₃濃度（全国測定地点の平均値を3か年移動平均した値）は減少傾向。2015年以降は環境基準値であるNAAQS（0.07ppm）近傍を推移。2018年4月現在、EPAによると、2015年オゾン基準を達成した郡（County）の数に基づく基準達成率は85%。



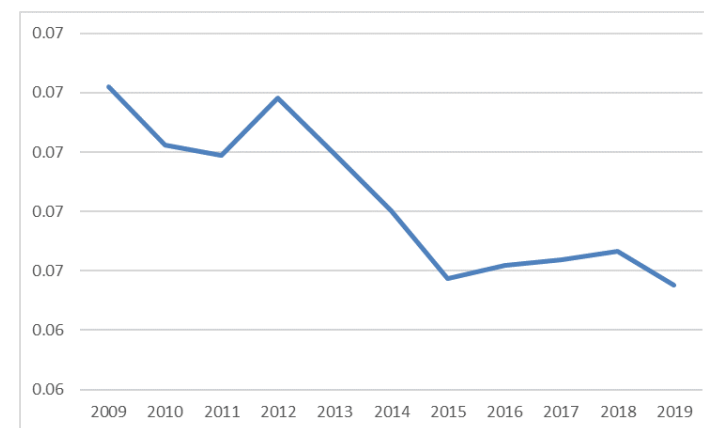
出所) EPA, Air Emissions Inventories, 'National Annual Emissions Trend', より作成。
https://www.epa.gov/sites/production/files/2018-04/national_tier1_caps.xlsx
 2020年11月閲覧 より作成。

図6. 米国のNOxの排出量推移（単位：千 t）



出所) EPA, Air Emissions Inventories, 'National Annual Emissions Trend',
https://www.epa.gov/sites/production/files/2018-04/national_tier1_caps.xlsx 2020年11月閲覧 より作成。

図5. 米国のVOCの排出量推移（単位：千 t）



注) 濃度は全国測定地点の平均値を3か年移動平均した値。

出所) 出所) 米国EPAホームページ

(<https://gispub.epa.gov/air/trendsreport/2018/#highlights> : 2020年10月閲覧) より作成。

図7. 米国のO₃濃度の推移（単位：ppm）

米国：大気環境に係る規制の状況

■ NOx規制

- 新規発生源基準（NSPS）では、固定発生源の規制があり、例えば天然ガスタービンの規制は下表となる。

表9. 固定式燃焼タービンにおける窒素酸化物（NOx）の排出基準（天然ガス）

タービンのタイプ				基準値 [ppm]
使用燃料	設備容量	新設／既設	用途	
天然ガス	15MW以下	新設	発電	42
			機械駆動	100
		既設	—	150
	15MW超250MW以下	新設	—	25
		既設	—	42
	250MW超	—	—	15

■ VOC規制

- 放出限界値については、連邦規則によらない規制「管理技術ガイドライン（CTG）」により、オフセット・リトグラフ印刷に関するCTGは、全体で6.8 kg/日のVOCを排出する施設を対象としている。デラウェアはこのCTGに基づき州独自の規制を定めている。ヒートセット・リトグラフ・オフセット印刷の乾燥での排出制御装置出口での濃度には20ppm（メタン換算）を採用している。

米国：大気環境に係る規制の状況

➤ 自主的取組

大気浄化法（CAA）の下での各州による州実施計画（SIP）において、企業（固定・移動排出源）による自主的な排出削減についての実施方法を規定することとされている。「固定発生源の自主的措置（Stationary Source Voluntary Measures）」と「自主的移動発生源排出削減制度（VMEPs：Voluntary Mobile Source Emission Reduction Programs）」がある。

- ・「固定発生源の自主的措置」：対象はCAAによって規制されていない小規模排出源であり、費用対効果を見込んだ排出対策が実施される。具体的には、VOCを多く放出する製品を夏季に販売しないこと（小売業）、VOCを多く放出する塗料の使用量を減らすか、高濃度オゾンの発生が予想される日には塗装を行わないことを誘引する消費者向け制度（Ozon Action Days）、工業界と消費者の両方により、VOCを多く放出する化学薬品を使用して行われる設備メンテナンスの回数を減らすこと等が行われている。大気質の改善に貢献すること、州や大気質の改善に貢献した他の排出事業者から認知されることが、企業にとってインセンティブとなっている。
- ・「自主的移動発生源排出削減制度」：排出削減のための技術開発が限界に近づくにつれ、そのための費用が増加すること、又、開発された技術が実際に走行している車両全てに適用されるまでには時間がかかり、補完的・代替的な方法が必要とされるため、当該制度が設けられている。当該制度は、CAAに規定される「経済インセンティブ制度（Economic Incentive Program（EIP）」によって、州が実施し企業が協力する。具体的には、従業員輸送管理制度（通勤や移動のためのバンや乗用車の相乗り、バスの借り上げ等）、勤務時間変更（テレワーク、勤務時間のシフト等）、地域ライドシェア・インセンティブ等（通勤者に一人乗り車に代わる利用を奨励）、駐車場マネジメント（相乗り車のための優遇的な駐車場や優遇的な駐車場料金、通勤用利用を抑制する料金構造等）、イベント期間中の輸送需要マネジメント（駐車場の管理、効率的な経路選定、広報等）が行われている。

➤ 植物由来VOC（BVOC）対策の有無

BVOCインベントリ（BEIS、BELD3、BELD4.1）が開発整備され、O₃のモデルシミュレーションが行われている。VOC対策については、EPAが「道路周辺大気の改善のための道路脇植生壁構築についての推奨事項」を公表し、BVOC排出種の植生を避けるようにとしている。カリフォルニア州サクラメント市も個別の種の属性を示した同様の趣旨のガイドラインを作成している。

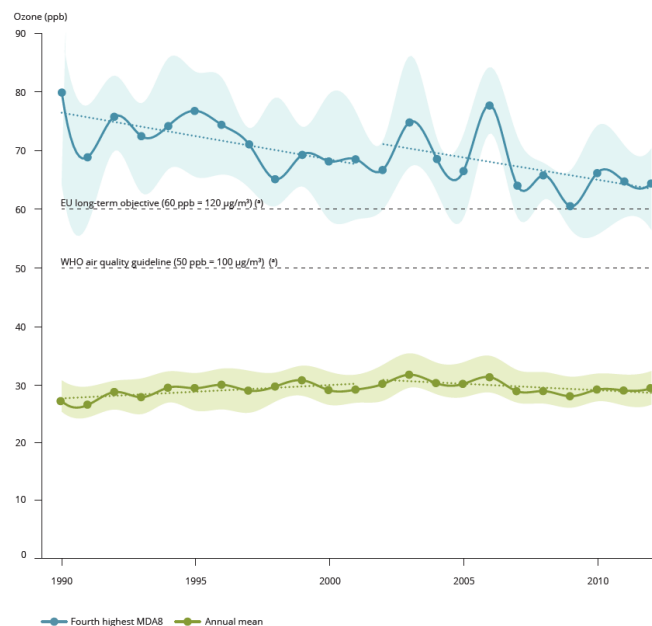
米国：大気環境に係る規制の状況

■ Ox規制

- 米国では、大気浄化法（CAA：Clean Air Act）の1970年の改正時に、「米国大気質基準（NAAQS：National Ambient Air Quality Standards）」を環境基準として規定。
- 現時点のO₃環境基準値（NAAQS2015年改正値）は0.070ppmで、年間4番目に高い日中8時間濃度の3年間の加重平均が基準値を超えないことである。

欧州：Oxの環境基準達成状況

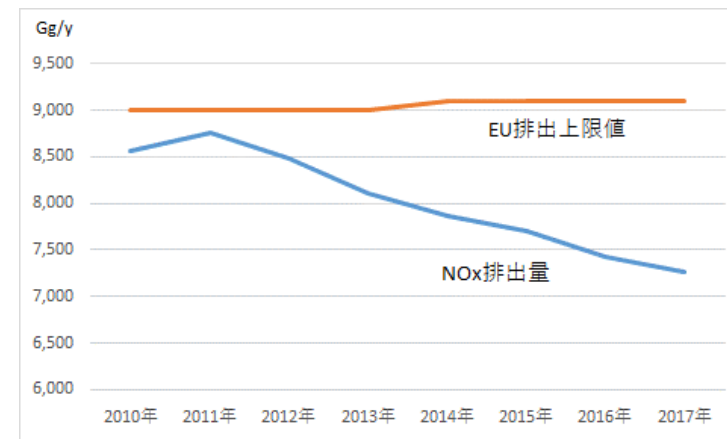
- NOx排出の状況：国別排出上限指令排出上限値：9,090Gg/y（2019年末まで適用）に対し、7,268Gg/y（2017年）排出。
- VOC排出の状況：国別排出上限指令排出上限値：8,938Gg/y（2019年末まで適用）に対し、NMVOC（肥料または農業の農業土壌からの排出量含む）を6,808Gg/y（2017年）排出、減少量は鈍化している。
- Oxの環境基準達成状況：O₃濃度は、地域によって異なる。年間平均濃度は環境基準値120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下で安定している。8時間移動平均の4番目に高い1日最大値は環境基準値を超えているが減少傾向。



注) MDA8 (Mean values of the daily maximum 8h average)：8時間移動平均の4番目に高い1日最大値

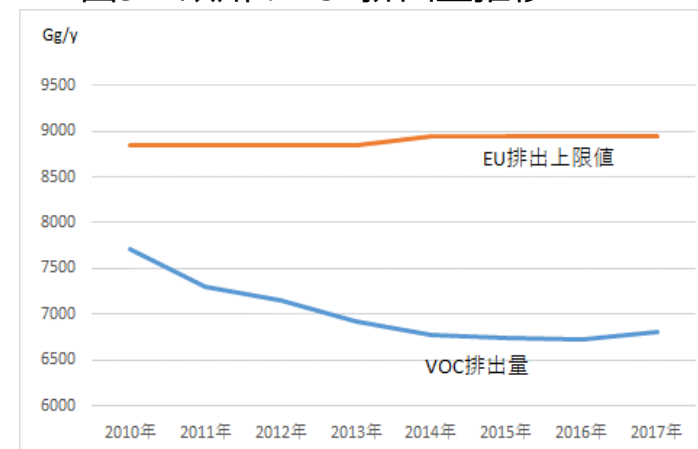
出所) Air quality in Europe — 2018 report EMEP (European Monitoring and Evaluation Programme), 2016.

図8. 欧州のO₃の排出量推移



出所) https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/eu-progress-in-meeting-its-1#tab-chart_4 <https://www.eea.europa.eu/themes/air/air-pollution-sources-1/national-emission-ceilings/nec-directive-reporting-status-2019> 2020年9月閲覧より作成。

図9. 欧州のNOx排出量推移



出所) https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/eu-progress-in-meeting-its-1#tab-chart_4 <https://www.eea.europa.eu/themes/air/air-pollution-sources-1/national-emission-ceilings/nec-directive-reporting-status-2019> 2020年9月閲覧より作成

図10. 欧州のNMVOCの排出量推移

欧州：大気環境に係る規制の状況

■ NOx規制

EU指令（2010/75/EU）により、固定発生源の規制があり、例えば天然ガスタービンの放出限界値は下表となる。

表10. ガス燃焼による燃焼施設のNOx排出上限値

対象燃焼施設	NOx（単位：mg/Nm ³ ）
燃焼施設（ガスタービンとガスエンジンは除く）	100
ガスタービン（CCGTを含む）	50 ^{注1）}
ガスエンジン	75

注1）単一サイクルガスタービンで、ISO基準で決められた35%を超える効率がある場合、NOx排出上限値は $50 \times \eta / 35$ となる。（ η はISO基準の負荷条件で%表示したガスタービン効率である。）

■ VOC規制

- 放出限界値については、産業排出指令の付属書VIIにより、熱処理オフセット輪転印刷（溶剤消費閾値15トン/年以上）の場合は以下となる。

表11. 溶剤の閾値・排出限界値（熱処理オフセット輪転印刷）

作業（溶剤消費閾値（トン/年））	溶剤消費閾値（トン/年）	排ガス排出限界値（mgC/Nm ³ ）	揮散排出値（溶剤投入量に対する%）	特記事項
熱処理オフセット輪転印刷（＞15）	15-25	100	30	(1) 最終製品中の残留溶剤は揮散排出の一部とみなさない。
	> 25	20	30	

欧州：大気環境に係る規制の状況

➤ 自主的取組

「エコラベル（EU Ecolabel）制度」と過去の取り組みとして「オランダ炭化水素2000（Koolwaterstoffen 2000（KWS2000））」がある。

エコラベル：一定の要件を満たした製品・サービスをEUが認証するエコラベル（EU Ecolabel）制度は、その対象製品にVOCおよび準揮発性有機化合物（Semi-VOC; SVOC）を含有する塗料およびニスも含んでいる。個別の用途毎に製品にはそれぞれ含有率上限値（g/L）が定められており、これらの要件を満たす製品の製造者、輸入者およびサービス・プロバイダー等が認証のための申請を行うことができる。

KWS2000：EU指令を各国がどのように達成するかは、各国に任せられているが、オランダには、KWS2000（電力と農業を除く固定排出源からのVOC排出削減を目的とした官民合同プロジェクト（1989-2000））の取り組みがあった。「VOC排出抑制戦略」の下で当時の住宅・国土計画・環境省（VROM）、経済省（EZ）、地方政府、自治体および業界団体などによって準備され、事業者等との密接な協議によって策定された。プロジェクトはVOCの排出量を2000年までに1981年比で50%削減することを目的とした。塗装業、ガソリン流通業等13業種がVOC排出源として特定され、3分の2近い業種が目標値に近いVOCの排出削減を果たし、全体として目標の1981年比50%減が実現された。

➤ 植物由来VOC対策の有無

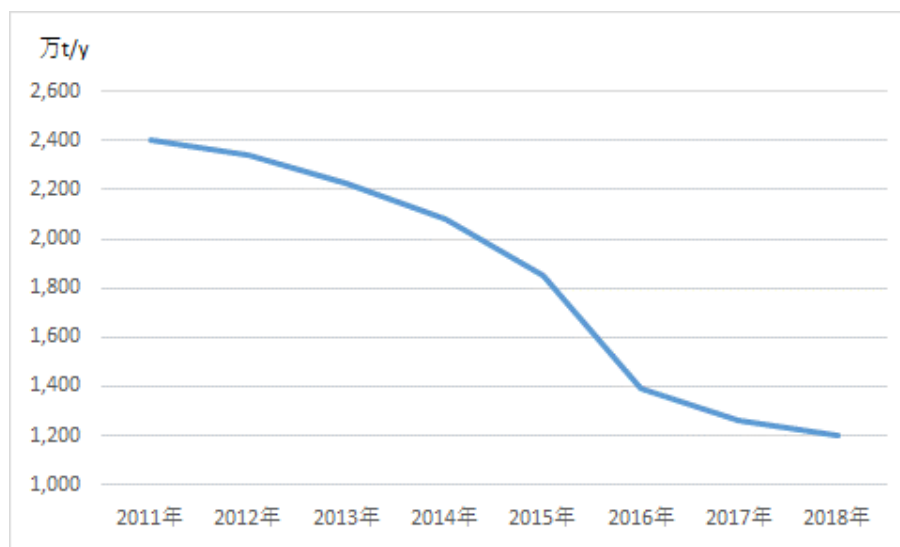
BVOCのインベントリとして、EMEP/EEA大気汚染物質排出インベントリガイドブックが整備されており、については、MSC-W（Meteorological-West）でO₃の最新のモデル推計結果がある。VOC対策については、英国 環境・食料・農村地域省で、大気質専門家グループによる都市の大気汚染に対する植生の影響レポート（2018）を公開しており、この中で、BVOCを最も多く放出する種の植栽を避ける必要があるとしている。ウィーン科学技術基金により、異なる都市樹種によるO₃の吸収と干ばつと塩分ストレスのVOC生成への影響について、都市樹種のBVOCの研究や、熱波時のベルリンにおける植生によるVOC排出の大気質への影響の研究があり都市植林の検討にも言及している。

■ Ox規制

- 欧州では、新大気質指令(Ambient Air Quality and Cleaner Air for Europe (CAFE) Directive (2008/50/EC))で、O₃の環境基準値（目標値）が定められている。
- 現時点のO₃環境基準値は、120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ で、日8時間平均値の最大値が平均3年間で環境基準値を超える日が25日/年以下であること。

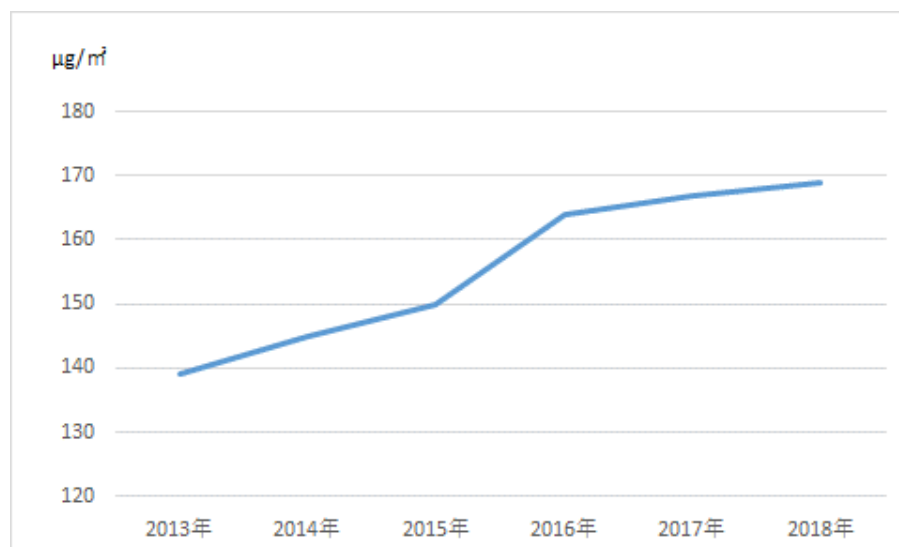
中国：Oxの環境基準達成状況

- NOx排出の状況：国家プロジェクト「青空保護戦勝利（青空保衛戦）3年行動計画（2018－2020）」で掲げるNOx削減目標（2015年比15%削減）は、2018年に達成（一部の省/直轄市では未達成）。
- VOC排出の状況：国家プロジェクト「青空保護戦勝利（青空保衛戦）3年行動計画（2018－2020）」でVOC削減目標が掲げられているが期待目標となっており、計測データも存在せず、定量的な評価はなされていない。
- Oxの環境基準達成状況：大気汚染行動計画（2013年）以降、74都市での大気質レベルは改善しているとされているが、O₃については増加傾向（PM2.5、PM10については減少傾向）



出所）中国環境状況公報（2013～2019）より三菱総合研究所作成

図11. 中国のNOxの排出量推移



出所）2019年中国統計年鑑より三菱総合研究所作成

図12. 中国のO3の大気汚染の経年推移（重点区域都市平均）

中国：大気環境に係る規制の状況

■ NOx規制

火力発電所のNOx煙排出濃度制限値は、国家標準である「火力発電所大気汚染物排出基準」（GB13223-2011、2012年に施行）で決められている。ガスを燃料とするボイラーまたはタービンについて示す。

表12. 火力発電所のNOx排出濃度制限値（ガスを燃料とするボイラーまたはタービン）

燃料とカロリー転換施設類型	適用条件	制限値（単位：mg / m ³ ）	特別制限値 ^{注）} （単位：mg / m ³ ）	汚染物質モニタリング場所
ガスを燃料とするボイラーまたはタービン	天然ガスボイラー	100	100	煙突又は煙道
	その他ガスボイラー	200		
	天然ガスタービン	50	50	
	その他ガスタービン	120		

注1) NOx排出濃度制限値とあるが、計測はNO₂で計測。

注2) 特別制限値は重点地区に適用される。特別制限値を執行する具体的な地域範囲・実施時間は国務院環境保護行政主管部が規定する。

出所) 「火力発電所大気汚染物排出基準」（GB13223-2011）により三菱総合研究所作成

■ VOC規制

- 放出限界値については、国家標準（GB）での規制値は無い。北京市「印刷業揮発性有機物排出基準」（DB11/1201—2015）の値を以下に示す。

表13. 北京印刷生産活動におけるVOC排出濃度制限値

汚染物項目	第1段階（単位：mg/m ³ ）	第2段階（単位：mg/m ³ ）
ベンゼン	0.5	0.5
トルエンとキシレン	15	10
非メタン全炭化水素	50	30

注) 第1段階：2015年7月1日～2016年12月31日の時期、第2段階：2017/1/1以降。

出所) 北京市「印刷業揮発性有機物排出基準」（DB 11/ 1201—2015）より三菱総合研究所作成

中国：大気環境に係る規制の状況

- 自主的取組は、規制対応が主となっており見当たらない。自主的取組ではなく中央政府により管理強化が見られる。「主要産業における揮発性有機物の包括的な管理プログラムの発行に関する通知（2019年6月26日）」では、汚染物質が大量に排出される企業に専門的な技術サポートを提供し、実行可能な汚染管理計画を策定させるとしている。重点地域のVOC排出量の多い企業に対して、「OnePlant、One Policy（一工場一策：汚染物質が大量に排出される工場に専門的な技術サポートを提供し、実行可能な汚染管理計画を策定させる）」を2020年6月末までに実施するとしている。当局の監督と執行においては、VOC排出規制の執行を強化し違法排出を厳しく取り締まるとしている。さらに、VOCの不適切な排出がある企業へ環境保護施設（VOC管理・処理施設）を提供・運用・管理する事業者に対して、共同責任としての懲戒や処分を強化するとしている。
- 植物由来VOC対策の有無
植物由来VOC対策事例は見いだせない。研究事例として衛星観測によりBVOC排出量の分析研究があり、中国のオゾン汚染を管理する政策を立てる際にBVOCを考慮することの重要性を示唆している。
- Ox規制
 - O₃の環境基準値は、環境空気質量基準（GB3095-2012）で決められている。
 - 現時点のO₃環境基準値（NAAQS2015年改正値）を以下に示す。

表14. O₃の大気汚染物濃度制限値

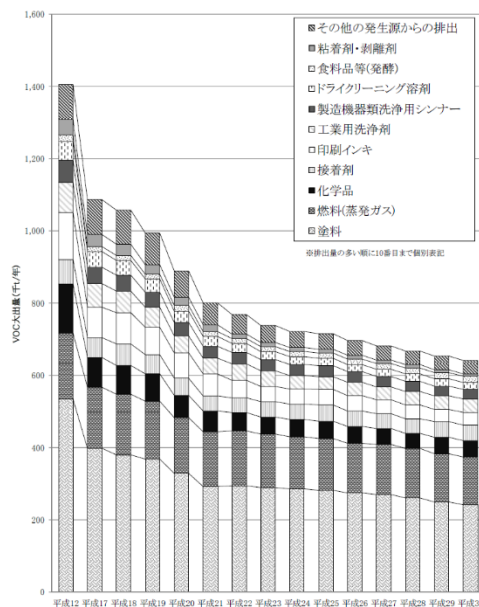
汚染物項目	1級（単位：μg/m ³ ）	2級（単位：μg/m ³ ）
一日最大8時間平均	100	100
1時間平均	160	200

注）一類エリアには一級濃度制限値を適用、二類エリアには二級濃度制限値を適用する。一類エリアは自然保護区、景勝地区及びその他特殊な保護が必要とされる地区である。二類エリアは居住区、商業・交通・住民の混合地区、文化地区、工業及び農村地区である。

出所）環境空気質量基準（GB3095-2012）より三菱総合研究所作成。

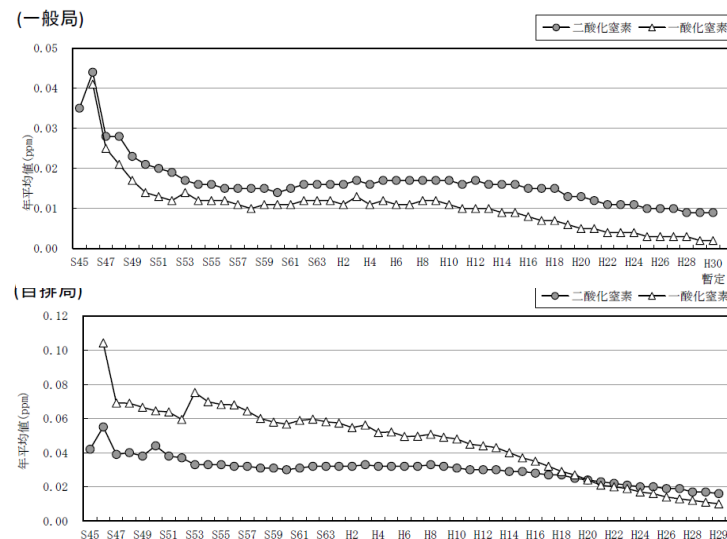
日本：Oxの環境基準達成状況

- NOx排出の状況：大気汚染物質排出量総合調査を定期的に行っているが排出総量に対する明確な削減目標値は無い。大気質の環境基準値は、1時間値の1日平均値が0.04ppmから0.06ppmまでのゾーン内又はそれ以下となっており、平成29年度の二酸化窒素（NO₂）の環境基準達成率は、一般局で100%、自排局で99.7%。
- VOC排出の状況：平成22年度までに平成12年度比で3割程度の削減を目指す（中央環境審議会意見具申（平成16年2月））という目標が設定され、平成30年度のVOC排出量の平成12年度比削減率は54%で「3割程度の削減」という目標は達成。
- Oxの環境基準達成状況：光化学オキシダントの環境基準は「1時間値が0.06ppm以下」で環境基準達成率は、一般局で0.1%、自排局で0%（平成29年度 一般局：0%、自排局：0%）であり、達成状況は依然として極めて低い水準。



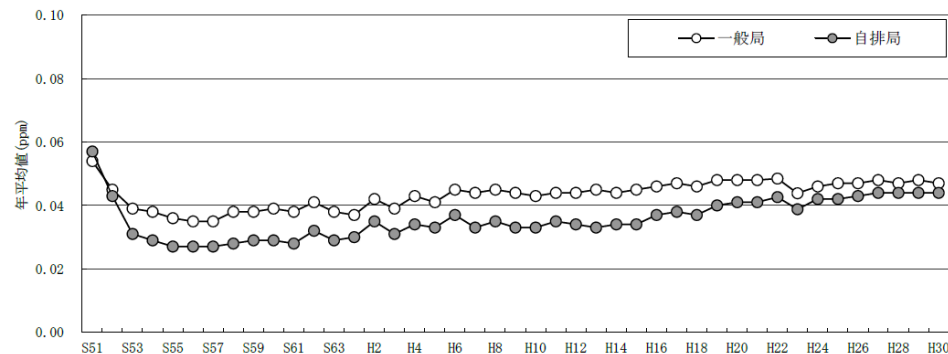
出所) 揮発性有機化合物（VOC）排出インベントリについて 令和2年3月 揮発性有機化合物（VOC）排出インベントリ検討会 <https://www.env.go.jp/air/osen/voc/inventory.html>
2020年10月関

図13. 日本のVOCの排出量推移



出所) 環境省 報道発表資料「平成30年度 大気汚染状況について」令和2年3月27日 (<http://www.env.go.jp/press/107878.html> 2020年9月閲覧)

図14. 日本のNO₂及びNOの大気濃度年平均値の推移



出所) 環境省 報道発表資料「平成30年度 大気汚染状況について」令和2年3月27日 (<http://www.env.go.jp/press/107878.html> 2020年9月閲覧)

図15. 日本の光化学オキシダント（昼間の日最高1時間値）の年平均値の推移

日本：大気環境に係る規制の状況

■ NOx規制

大気汚染防止法施行規則があり、例えばガスタービンの排出基準値は70ppmである。

■ VOC規制

- 大気汚染防止法施行規則により規制対象となる揮発性有機化合物排出施設及び排出基準が定められている。排出基準値については、印刷の用に供する乾燥施設（オフセット輪転印刷に係るものに限る。送風機の送風能力が7,000m³/時以上のもの）の場合は400ppmCとなる。
- 自主的取組については、「大気汚染防止法の一部を改正する法律の施行について（平成17年6月17日）」によると、一律の規制ではなく、事業の実態を踏まえた事業者の創意工夫と自発性が最大限発揮される自主的取組により効果的な排出抑制を図るとしている。具体的には、業界団体が策定する自主行動計画への企業の自主的な参加等、実情に応じ適切な対策を講じるとしている。業界団体等が策定する自主行動計画にて目標を設定している。VOCの排出規制が平成18年4月1日より開始され、VOCに係る排出規制と事業者の自主的取組とをともに推進し、平成22年度までに、工場等の固定発生源からのVOC排出総量を平成12年度比で3割程度抑制することを目標としこの目標は達成した。日本の自主的取組においては中小企業を対象に税制優遇などの支援も併せて実施されている。
- 植物由来VOC対策の有無

BVOC対策については実施された対策は見出されない。大学、環境省、国立環境研究所、産業技術総合研究所、自治体（東京都、埼玉県、川崎市）、石油産業活性化センター等で、放出メカニズム、大気濃度変動、放出量、反応生成物などに関する研究が行われてきた。環境省「光化学オキシダント調査検討会 報告書（平成29年3月）光化学オキシダント調査検討会」で取りまとめられ今後のO₃対策を検討するうえでは日本国内のBVOC排出量の実態把握、BVOC排出インベントリの精緻化が望まれるとしている。

■ Ox規制

- O₃の環境基準値は、環境基準値告示「大気汚染に係る環境基準」で1時間値が0.06ppm以下と決められている。