

VOC 排出対策ガイド
—基礎から実践・評価法まで—

1 基礎編

1 基礎編

はじめに

基礎編では、VOC 排出施設全般に適用できる排出対策を対象として、基礎情報、対策方法、評価方法についてまとめました。

「第1章 VOC の排出と環境等への影響」では、大気中でのVOCの挙動やその健康への影響、排出実態や法的な規制のあらましなどについて、概略を紹介します。「第2章 VOC の処理技術」では、気体中のVOCを処理する技術について、実用化されているものを中心にして、種類と特徴、利用の際に必要な知識について述べます。「第3章 VOC および関連項目の測定方法」では、VOC 及び関連する項目の測定方法について述べます。「第4章 排出されたVOC の影響と評価法」では、事業所等で使用されるVOCが大気

環境へ放出された場合、どのような環境に影響を及ぼすのか、特に重要と考えられる4項目について解説します。「第5章 対策技術導入による環境影響軽減効果の評価」では、事業所からの排出ガスによる環境影響について、VOCとCO₂を中心に環境影響軽減の考え方を整理します。そして「第6章 VOC 削減への取組」では、VOC 削減に向けた東京都の取組について説明するとともに、国や社団法人産業環境管理協会等の活動についても紹介します。

本編によって、VOC 排出対策における留意事項が分かり、より環境影響の少ない対策を選択するための一助となれば幸いです。

VOCとは、様々な排出源から発生する揮発性を有する多数の有機化合物の総称です。ガソリン、シンナーなどに含まれるトルエンがその代表的な成分です。本章では、大気中でのVOCの挙動やその健康への影響、排出実態や法的な規制のあらましなどについて、概略を紹介します。

1.1 VOCの定義

VOCとは、揮発性有機化合物 (Volatile Organic Compounds) の略称であり、揮発性を有し、大気中で気体状となる有機化合物の総称です。大気汚染防止法では、「揮発性有機化合物」とは、大気中に排出され、又は飛散した時に気体である有機化合物（浮遊粒子状物質及びオキシダントの生成の原因とならない物質として政令で定める物質を除く。）をいう。」と定義されています（法第2条）。VOCの具体的な成分としては、塗料、印刷インキ、

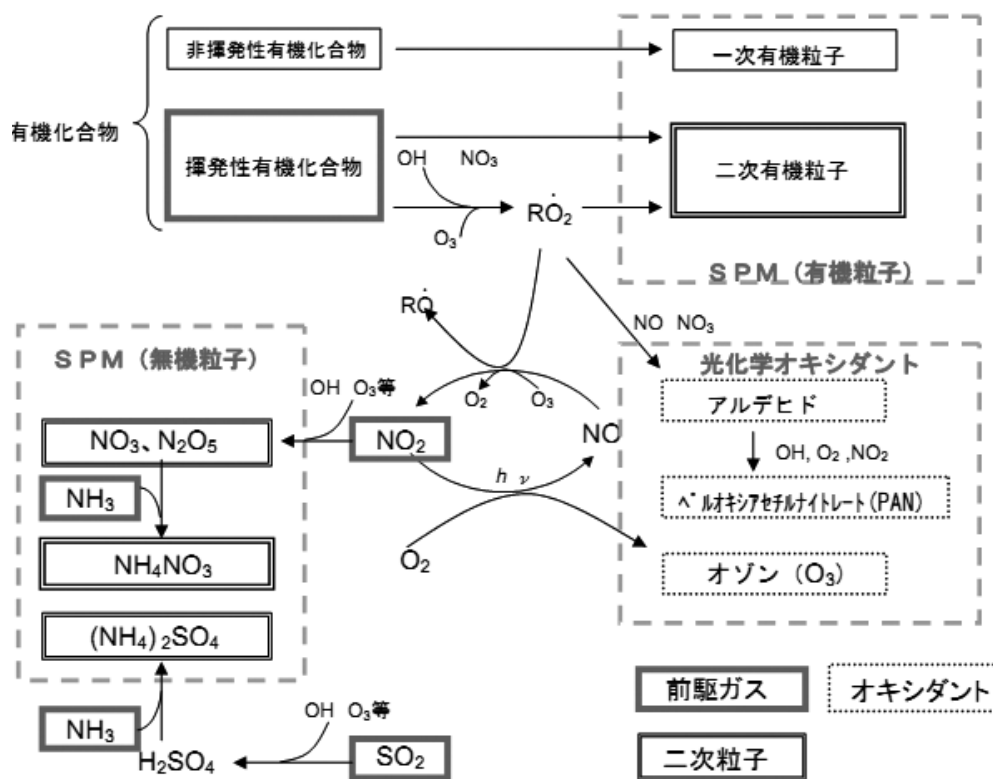
接着剤、洗浄剤、ガソリン、シンナーなどに含まれるトルエン、キシレン、酢酸エチルなどが代表的な物質です。

政令が定めるVOCから除かれる物質としては、従来の大気汚染対策の中でオキシダント生成能が低い物質として扱われてきたメタンに加え、それと同等以下のオキシダント生成能を有する物質であって、かつ、わが国のVOC年間排出量に占める割合が一定量以上あるもの（0.01%を超えるもの）として7種類のフロン類が指定されています（大気汚染防止法施行令第2条の2）。

1.2 大気環境への影響

VOC は、光化学オキシダント及び浮遊粒子状物質（以下「SPM」という。）等の二次生成粒子の原因物質とされており、これらの生成機序については次のように考えられています（図 1.1.2.1）¹⁾。光化学オキシダントは、大気中の VOC を含む有機化合物と窒素酸化物の混合系が、太陽光（特に紫外線）照射による反応を通じて生成します。また、SPM の二次生成粒

子は、大気中の VOC が化学反応を起こし、更に反応生成物が凝縮すること等により生成します。また、窒素酸化物や硫黄酸化物からも二次生成粒子が生成しますが、この反応にはオゾンが関与しています。なお、二次生成粒子が生成するためには、VOC から生成した反応物の蒸気圧が低い必要があるため、通常、炭素数の多い VOC が関与しますが、光化学オキシダントの生成には、ほとんど全ての VOC が関与します。



出典：炭化水素類に係る科学的基礎情報調査(三菱化学安全科学研究所)

図 1.1.2.1 大気中の VOC 等の反応メカニズム

(転載：環境省 揮発性有機化合物 (VOC) 排出抑制検討会、「揮発性有機化合物 (VOC) の排出抑制について (検討結果)」(H15.12.9)、

環境省ホームページ、<http://www.env.go.jp/air/osen/voc/kekka.pdf>、2013/02/12 確認)

現在の大气汚染状況²⁾をみると、光化学オキシダントの原因物質の一つである非メタン炭化水素 (NMHC: Non-Methane Hydrocarbons) の午前6時～9時の3時間平均値*の推移は図1.1.2.2のように年々減少しています。SPMも、近年改善傾向がみられています(図1.1.2.3)が、オキシダントは漸増しています(図1.1.2.4)。

* 中央公害対策審議会答申³⁾では、光化学オキシダント生成防止のための必要条件としての環境大気中のNMHC濃度レベルの指針として、光化学オキシダントの日最高1時間値0.06ppmに対応する午前6時から9時までのNMHCの3時間平均値は、0.20ppmCから0.31ppmCの範囲にあるとしています。

原因物質である大気中のVOCと窒素酸化物が低減しているにもかかわらず、オキシダントが増加していることについては、多くの研究⁴⁾が行われている段階です。

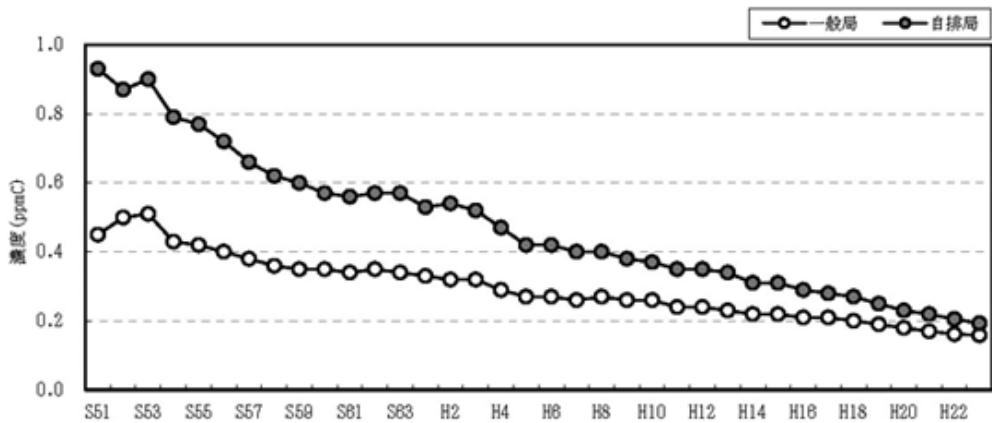


図1.1.2.2 非メタン炭化水素濃度(午前6時～9時の3時間平均値)の推移

(転載：環境省、「大気汚染状況」、http://www.env.go.jp/air/osen/jokyo_h23/figs3.html#fig3-7、2014/01/16 確認)

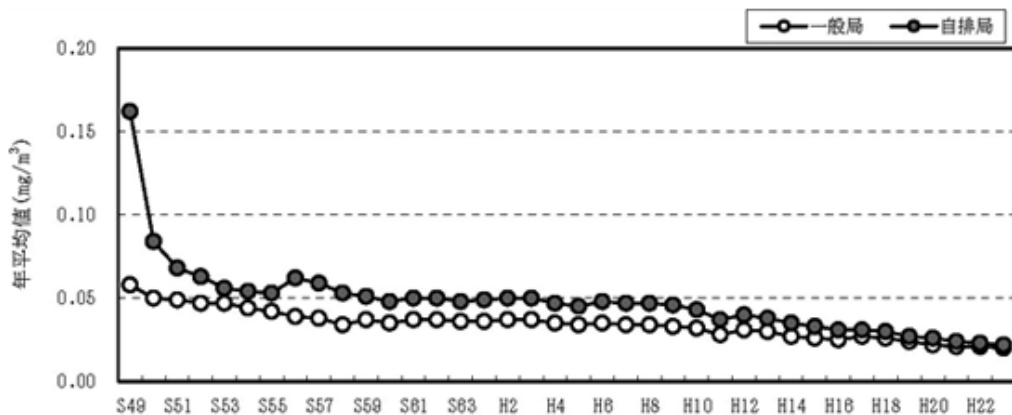


図1.1.2.3 SPM濃度の年平均値の推移

(転載：環境省、「大気汚染状況」、http://www.env.go.jp/air/osen/jokyo_h23/figs2.html#fig2-4、2014/01/16 確認)

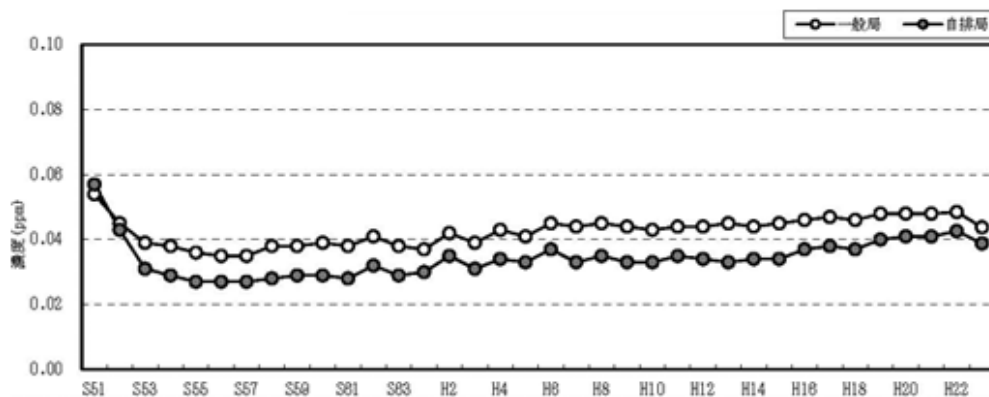


図 1.1.2.4 光化学オキシダントの昼間の日最高1時間値の年平均値の推移

(転載：環境省、「大気汚染状況」、http://www.env.go.jp/air/osen/jokyo_h23/figs3.html#fig3-2、2014/01/16 確認)

引用文献

1. 環境省 揮発性有機化合物 (VOC) 排出抑制検討会、「揮発性有機化合物 (VOC) の排出抑制について (検討結果)」(H15.12.9)、環境省ホームページ、<http://www.env.go.jp/air/osen/voc/kekka.pdf>、2014/01/16 確認
2. 環境省、「大気汚染状況」、環境省ホームページ、<http://www.env.go.jp/air/osen/index.html>
3. 中央公害対策審議会、「光化学オキシダントの生成防止のための大気中炭化水素濃度の指針について (答申)」、昭和 51 年 8 月 13 日
4. 例えば、国立環境研究所研究報告第 195 号、「日本における光化学オキシダント等の挙動解明に関する研究、国立環境研究所と地方環境研究所との C 型共同研究、平成 16～18 年度、最終報告 (2007)」、<http://www.nies.go.jp/kanko/kenkyu/pdf/r-195-2007.pdf>、2014/01/16 確認

1.3 健康影響等

1.3.1 VOCに関連する環境基準等

VOCについては、屋外の一般環境だけでなく、作業環境、室内環境でも影響を受けることから、様々な基準が設定されています。

(ア) 環境基準 (環境基本法)

環境基本法では、第16条第1項で、

大気の汚染、水質の汚濁、土壌の汚染及び騒音に係る環境基準を定めることとしており、大気汚染については、二酸化いおう、一酸化炭素、浮遊粒子状物質、光化学オキシダント、二酸化窒素、ベンゼン、トリクロロエチレン、テトラクロロエチレン、ジクロロメタン、ダイオキシン類、微小粒子状物質の11物質について、環境基準が設定されています。表1.1.3.1にVOCの4物質の環境基準を示します。

表 1.1.3.1 有害大気汚染物質 (ベンゼン等) に係る環境基準
(環境基本法第16条第1項)

物 質	環境上の条件
ベンゼン	1年平均値が 0.003 mg/m ³ 以下であること。(H9.2.4 告示)
トリクロロエチレン	1年平均値が 0.2 mg/m ³ 以下であること。(H9.2.4 告示)
テトラクロロエチレン	1年平均値が 0.2 mg/m ³ 以下であること。(H9.2.4 告示)
ジクロロメタン	1年平均値が 0.15 mg/m ³ 以下であること。(H13.4.20 告示)

(イ) 室内濃度指針値 (厚生労働省)

VOCによる健康被害は、室内ではシックハウス症候群や化学物質過敏症として問題となりました。厚生労働省により1996年からホルムアルデヒドに関する全国調査が行われ、シックハウス(室内空気汚染)問題に関する検討会により、1997年から2002年にかけて室内汚染物質13種について室内濃度指針値¹⁾が定められました(表1.1.3.2)。室内濃度指針値の意味は、「現時点で入手可能な毒性に係る科学的知見から、ヒトがその濃度の空気を一生涯にわたって摂取しても、健康への有害な影響は受けないであろうと判断さ

れる値を算出したもの。」とされています。

また、総揮発性有機化合物(TVOC)については、室内空気質のTVOC暫定目標値が400 µg/m³とされています。この数値は、「国内家屋の室内VOC実態調査の結果から、合理的に達成可能な限り低い範囲で決定した値であり、室内空気質の状態の目安として利用されることが期待される。TVOC暫定目標値は、毒性学的知見から決定したものではなく、含まれる物質の全てに健康影響が懸念されるわけではない。また、個別のVOC指針値とは独立に扱われなければならない。」¹⁾とされています。

表 1.1.3.2 室内濃度指針値

(転載：厚生労働省、「室内濃度指針値一覧表」、2010/08/30 更新、<http://www.nihs.go.jp/mhlw/chemical/situnai/hyou.html>、2014/01/16 確認)

揮発性有機化合物	室内濃度指針値 *	毒性指標	設定日
ホルムアルデヒド	100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.08ppm)	ヒト吸入暴露における鼻咽頭粘膜への刺激	1997.6.13
アセトアルデヒド	48 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.03ppm)	ラットの経気道暴露における鼻腔嗅覚上皮への影響	2002.1.22
トルエン	260 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.07ppm)	ヒト吸入暴露における神経行動機能及び生殖発生への影響	2000.6.26
キシレン	870 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.20ppm)	妊娠ラット吸入暴露における出生児の中樞神経系発達への影響	2000.6.26
エチルベンゼン	3800 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.88ppm)	マウス及びラット吸入暴露における肝臓及び腎臓への影響	2000.12.15
スチレン	220 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.05ppm)	ラット吸入暴露における脳や肝臓への影響	2000.12.15
パラジクロロベンゼン	240 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.04ppm)	ビーグル犬経口暴露における肝臓及び腎臓等への影響	2000.6.26
テトラデカン	330 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.04ppm)	C8-C16 混合物のラット経口暴露における肝臓への影響	2001.7.5
クロルピリホス	1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.07ppb) 小児の場合 0.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.007ppb)	母ラット経口暴露における新生児の神経発達への影響及び新生児脳への形態学的影響	2000.12.15
フェノブカルブ	33 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (3.8ppb)	ラットの経口暴露におけるコリンエステラーゼ活性などへの影響	2002.1.22
ダイアジノン	0.29 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.02ppb)	ラット吸入暴露における血漿及び赤血球コリンエステラーゼ活性への影響	2001.7.5
フタル酸ジ-n-ブチル	220 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.02ppm)	母ラット経口暴露における新生児の生殖器の構造異常等の影響	2000.12.15
フタル酸ジ-2-エチルヘキシル	120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (7.6ppb)	ラット経口暴露における精巣への病理組織学的影響	2001.7.5

* 両単位の換算は、25℃の場合による。

(ウ) 作業環境評価基準**(労働安全衛生法)**

労働安全衛生法に基づき定められた同法施行令別表第6の2において、クロロホルム、四塩化炭素、トルエン、キシレンなど54物質の有機溶剤に対して、労働安全衛生法上の対策を規定しています。また、同法第65条の2第2項の規定に基づく「作業環境評価基準」(昭和63労働省告示79)の別表には、粉じん以下81

物質の管理濃度が定められており、作業環境測定の結果を評価する基準とすることが規定されています(表1.1.3.3)。

労働安全衛生法に基づいて定められた有機溶剤中毒予防規則では、労働安全衛生法施行令の有機溶剤54物質を、第一種有機溶剤(7物質)、第二種有機溶剤(40物質)、第三種有機溶剤(7物質)に分類し、分類毎に許容消費量や換気量が定められています。

表1.1.3.3 作業環境評価基準別表(昭和63労働省告示第79号 抜粋)

物質の種類		管理濃度
28	ベンゼン	1ppm
29の2	ホルムアルデヒド	0.1ppm
35	アセトン	500ppm
36	イソブチルアルコール	50ppm
37	イソプロピルアルコール	200ppm
38	イソペンチルアルコール(別名イソアミルアルコール)	100ppm
39	エチルエーテル	400ppm
45	キシレン	50ppm
63	ジクロロメタン(別名二塩化メチレン)	50ppm
65	スチレン	20ppm
67	テトラクロルエチレン(別名パークロルエチレン)	50ppm
70	トリクロルエチレン	10ppm
71	トルエン	20ppm
73	ノルマルヘキサン	40ppm
76	メタノール	200ppm
77	メチルイソブチルケトン	20ppm
78	メチルエチルケトン	200ppm
81	メチル-ノルマル-ブチルケトン	5ppm

(備考 この表の管理濃度の値は、温度25度、1気圧の空気中における濃度を示す。)

1.3.2 オキシダントおよびSPM等の健康影響

VOCは、SPM及びオキシダントの生成の原因となる物質として対策が進められています。これらの物質の健康影響について以下に述べます。

(ア) SPM等の健康影響

SPMは、大気中に浮遊する粒子状物質のうち、粒径が10 μm以下のものをいいます。微小なため大気中に長期間滞留し、肺や気管などに沈着して、呼吸器に影響を及ぼすとされています。SPMの中でもディーゼル機関からの排気微粒子については、従来から発がん性が疑われていることに加え、最近、動物実験においてぜん息様の病態が認められるなどアレルギー疾患との関連が指摘されており、健康影響などへの早急な対策が求められています。

一方、浮遊粒子状物質の中でも粒径2.5 μm以下の微小粒子状物質(以下、「PM2.5」という)については、短期曝露及び長期曝露と循環器系・呼吸器系死亡、肺がん死亡及びその他の健康影響との関連に関する疫学研究から、これらの健康影響の原因の一つとなりうると結論されている²⁾など、一定の健康影響を及ぼしていることを示す国内外の疫学その他の分野の科学的知見が蓄積されてきました。国外で

はこれらの知見により、微小粒子状物質について独立の項目として環境目標値を設定している状況があります³⁾。わが国では、中央環境審議会による検討結果を受け、平成21年9月9日に、微小粒子状物質に係る大気環境基準が告示されました⁴⁾。

(イ) オキシダントの健康影響

大気環境のオキシダントによる健康被害としては、目の症状(チカチカする、涙が出る等)、呼吸器の症状(喉が痛い、せきが出る、息苦しい等)、更に重くなると吐き気や頭痛等の急性症状が出るということが知られています。こうした症状を予防するために、大気汚染防止法第23条では、日本の大気環境基準(表1.1.3.5参照)の2倍にあたる1時間値0.12ppm以上の高濃度状況が継続するとき及び0.40ppm以上の著しい高濃度の状態が継続すると認められるときは、下記のような緊急時の措置をとることとしています。

※ 大気汚染防止法第23条(緊急時の措置)(抜粋)

都道府県知事は、(中略)政令で定める場合に該当する事態が発生したときは、その事態を一般に周知させるとともに、ばい煙を排出する者、揮発性有機化合物を排出し、若しくは飛散させる者又は自動車の使用者若しくは運転者であつて、当該大気の汚染をさらに著しくするおそれがあると認められるものに対し、ばい煙の排出量若しくは

揮発性有機化合物の排出量若しくは飛散の量の減少又は自動車の運行の自主的制限について協力を求めなければならない。

2 都道府県知事は、(中略) 政令で定める場合に該当する事態が発生したときは、当該事態がばい煙又は揮発性有機化合物に起因する場合にあっては、環境省令で定めるところにより、ばい煙排出者又は揮発性有機化合物排出者に対し、ばい煙量若しくはばい煙濃度又は揮発性有機化合物濃度の減少、ばい煙発生施設又は揮発性有機化合物排出施設の使用の制限その他必要な措置をとるべきことを命じ、当該事態が自動車排出ガスに起

因する場合にあつては、都道府県公安委員会に対し、道路交通法の規定による措置をとるべきことを要請するものとする。

ただし、各都道府県では要綱等に基づき、警報の発令基準を独自に定めている場合があります。東京都の光化学スモッグ注意報等の発令基準⁵⁾を示します(表1.1.3.4)。

表 1.1.3.4 東京都の光化学スモッグ注意報等の発令基準

(転載：東京都環境局、「光化学スモッグ注意報等の発令基準」、2008/03/12 更新、<http://www.ox.kankyo.metro.tokyo.jp/kijun.html>、2014/01/16 確認)

発令区分	発令地域	発令基準	備考
光化学スモッグ予報	区東部、区北部、区西部、区南部、多摩北部、多摩中部、多摩西部、多摩南部の8地域	オキシダント濃度が高濃度になり光化学スモッグ注意報等が発令されると予想されるとき。	
光化学スモッグ学校情報		オキシダント濃度が100ppb以上の状態になり、その状態が継続すると認められるとき。	学校情報は、児童・生徒の光化学スモッグによる被害を未然に防止するため、学校等に対して提供する情報
光化学スモッグ注意報		オキシダント濃度が120ppb以上の状態になり、その状態が継続すると認められるとき。	大気汚染防止法
光化学スモッグ警報		オキシダント濃度が240ppb以上の状態になり、その状態が継続すると認められるとき。	都独自

(注) ppb：10億分率

一方、最近の疫学研究において、環境基準以下の濃度であってもPM2.5などと同様、オキシダントは日々の濃度がその日あるいは前日の死亡率と関連しているこ

とが明らかにされています。すなわち、オキシダント濃度の増加に対応したその日、あるいは翌日の死亡率の増加が多くの疫学研究から確認されています⁶⁾。

(ウ) オキシダントおよびSPM等の環境基準

環境基本法第16条第1項の規定によ

り、SPM、光化学オキシダント及び微小粒子状物質の環境基準は以下のように設定されています(表1.1.3.5)。

表 1.1.3.5 大気汚染に係る環境基準(環境基本法第16条第1項)

物質	環境上の条件(設定年月日等)
浮遊粒子状物質(SPM)	1時間値の1日平均値が0.10 mg/m ³ 以下であり、かつ、1時間値が0.20 mg/m ³ 以下であること。(48.5.8 告示)
光化学オキシダント(Ox)	1時間値が0.06ppm以下であること。(48.5.8 告示)
微小粒子状物質(PM2.5)	1年平均値が15 μg/m ³ 以下であり、かつ、1日平均値が35 μg/m ³ 以下であること。(H21.9.9 告示)

備考

- ・環境基準は、工業専用地域、車道その他一般公衆が通常生活していない地域または場所については、適用しない。
- ・浮遊粒子状物質とは大気中に浮遊する粒子状物質であってその粒径が10 μm以下のものをいう。
- ・光化学オキシダントとは、オゾン、パーオキシアセチルナイトレートその他の光化学反応により生成される酸化性物質(中性ヨウ化カリウム溶液からヨウ素を遊離するものに限り、二酸化窒素を除く)をいう。
- ・微小粒子状物質とは、大気中に浮遊する粒子状物質であって、粒径が2.5 μmの粒子を50%の割合で分離できる分粒装置を用いて、より粒径の大きい粒子を除去した後採取される粒子をいう。

引用文献

1. 厚生労働省、「室内濃度指針値一覧表」、2010/08/30更新、<http://www.nihs.go.jp/mhlw/chemical/situnai/hyou.html>、2014/01/16 確認
2. 中央環境審議会大気環境部会 微小粒子状物質リスク評価手法専門委員会、「微小粒子状物質の定量的リスク評価手法について」(平成20年11月)、http://www.env.go.jp/press/file_view.php?serial=12546&hou_id=10473、2014/01/16 確認
3. 中央環境審議会 第24回大気環境部会、「資料2-1 欧米における粒子状物質に関する動向について」(平成20年4月11日)、http://www.env.go.jp/council/07air/y070-24/mat02_1.pdf、2014/01/16 確認
4. 環境省 報道発表資料、「「微小粒子状物質に係る環境基準について」(告示)について(お知らせ)」(平成21年9月9日)、<http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=11546>、2014/01/16 確認
5. 東京都環境局、「光化学スモッグ注意報等の発令基準」、2008/03/12更新、<http://www.ox.kankyo.metro.tokyo.jp/kijun.html>、2014/01/16 確認
6. 田村憲治、松本幸雄、佐々木寛介、椿貴博、「地球温暖化と大気汚染：光化学オキシダント濃度への影響と超過死亡リスク」、地球環境、Vol.14, No.2, 2009, p.271~277

コラム：

VOC, VOCs, NMHC, TVOC・・・

揮発性有機化合物 (Volatile Organic Compounds) は、いくつかの定義があります。大気汚染防止法では、「大気中に排出され、または飛散した時に気体である有機化合物」と定義されています。ただし、SPM 及びオキシダントの生成の原因とならない物質は除かれます。したがって、SPM やオキシダントの原因となる有機化合物を「VOC」と定義しているといえます。

USA の文献¹⁾では、特定の VOC を想定しているときは「VOC」、一般的に言うときは「VOCs」としています。日本の「有害大気汚染物質測定方法マニュアル」では「VOCs」を使っていますが、法律関係は「VOC」が一般的です。

大気汚染常時監視測定局では、オキシダント生成能が低いメタンを分離し、その他の炭化水素を測定した NMHC (非メタン炭化水素) を測定しています。NMHC は、環境大気中での VOC の総量の表し方のひとつと考えられます。

一方、室内環境での「VOC」は、WHO (世界保健機関) により 50-100℃～240-260℃の沸点の有機化合物と定義されています。また、VOC の総量を表す場合、TVOC (総揮発性有機化合物) を用います。

以上のように VOC は測定の目的に応じて様々な定義や表現があります。

VOC は、ヒトへの健康影響が懸念されるほか、大気において光化学オキシダントや浮遊粒子状物質の前駆物質として考えられるため、2006 年に施行された大気汚染防止法によりその排出抑制が強く求められました。

1. William P. L. Carter. "Development of ozone reactivity scales for volatile organic compounds", Journal of the Air and Waste Management Association, Vol. 44, 1994, pp. 881-899

1.4 排出量・排出源

平成 23 年度の全国の VOC 排出量 (t/年) は約 78 万トンであり、平成 12 年度 (約 141 万トン) の約 45% 減となっています¹⁾。品目別には、塗料の割合が高く、平成 23 年度は約 37% です (図 1.1.4.1)。物質別には、トルエン等の炭化水素系物質の割合が多く、平成 23 年度は約 40% です (図

1.1.4.2)。東京都では、平成 23 年度排出量 (t/年) は約 4.4 万トンであり、平成 12 年度 (約 7.0 万トン) の約 37% 減となっています。

ベスト・ミックス方式の目標とした、平成 22 年度までに VOC 排出総量を平成 12 年度比で 3 割程度削減することについては達成している状況です。

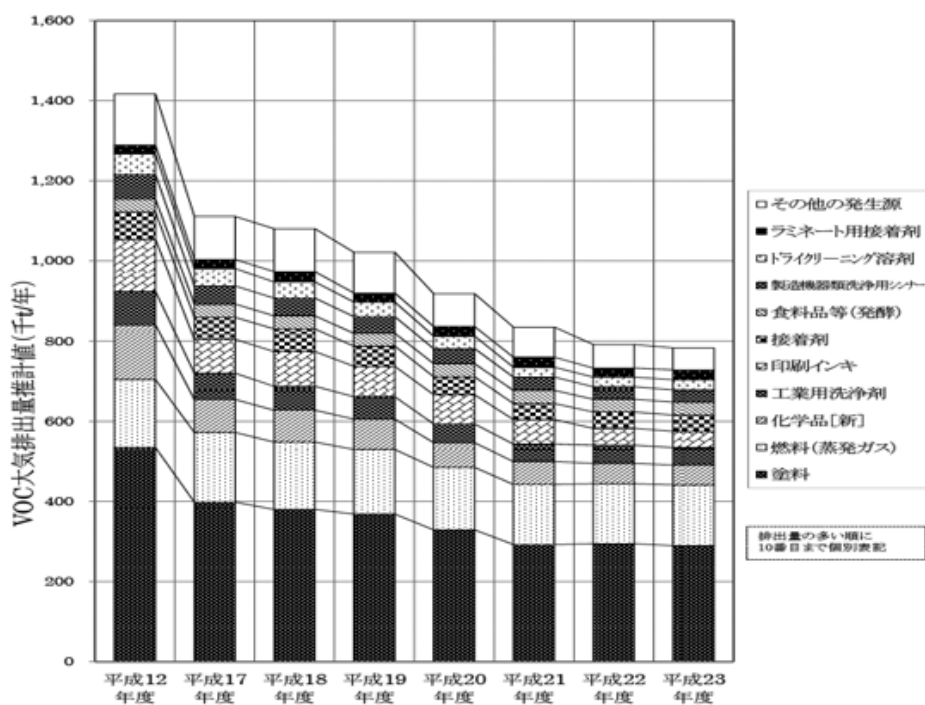


図 1.1.4.1 発生源品目別の VOC 排出量推計結果

(転載: 環境省 揮発性有機化合物 (VOC) 排出インベントリ検討会 (平成 25 年 3 月)、「揮発性有機化合物 (VOC) 排出インベントリについて」、http://www.env.go.jp/air/osen/voc/inventory/rep_h2503/01main.pdf, 2014/01/16 確認)

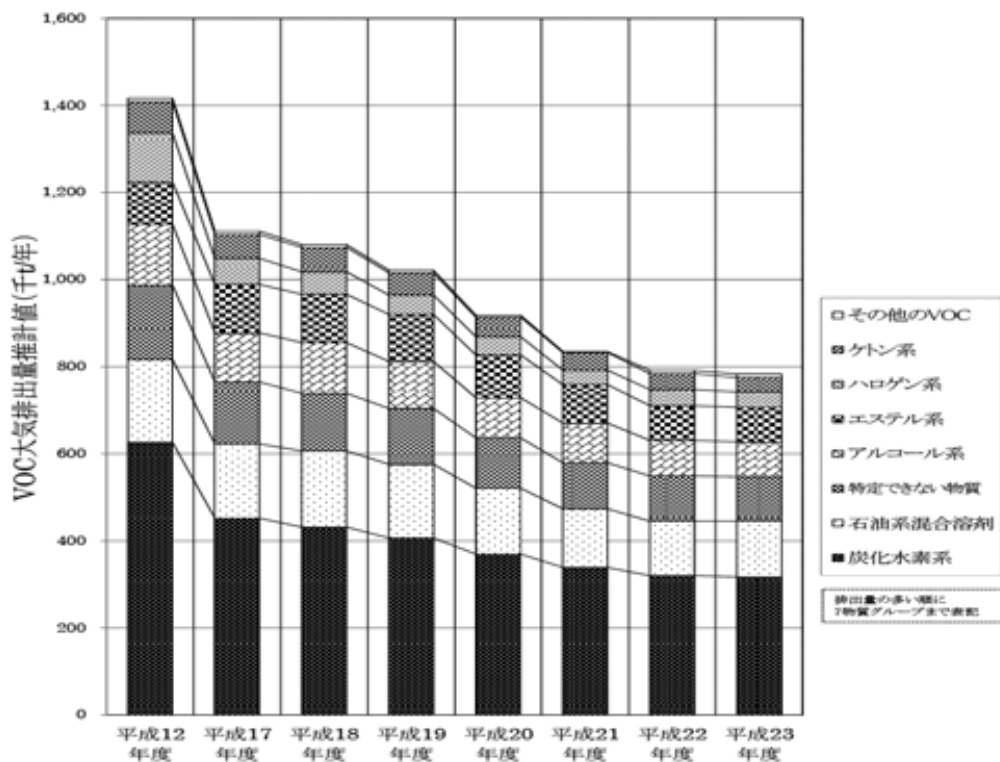


図 1.1.4.2 物質別 VOC 排出量推計結果

(転載：環境省 揮発性有機化合物 (VOC) 排出インベントリ検討会 (平成 25 年 3 月)、「揮発性有機化合物 (VOC) 排出インベントリについて」、http://www.env.go.jp/air/osen/voc/inventory/rep_h2503/01main.pdf、2014/01/16 確認)

引用文献

1. 環境省 揮発性有機化合物 (VOC) 排出インベントリ検討会 (平成 25 年 3 月)、「揮発性有機化合物 (VOC) 排出インベントリについて」、http://www.env.go.jp/air/osen/voc/inventory/rep_h2503/01main.pdf、2014/01/16 確認

1.5 規制等

1.5.1 大気汚染防止法による規制

(ア) VOC 対策

SPM や光化学オキシダントに係る大気汚染の状況が深刻であり、これに緊急に対処することが必要であることから、平成 16 年 5 月に大気汚染防止法が改正されました。この改正により、SPM 及びオキシダントの生成の原因となる物質である VOC の排出等を抑制するため、VOC 排出施設の届出を義務付けるとともに、当該施設に係る排出基準について定めること及びその他の措置を講ずることとしました。

改正では、大規模の施設に対する法による VOC の排出規制と中小事業者の自主的な取組との適切な組合せ（ベスト・ミックス）による効果的な VOC の排出抑制という考え方を、初めて法律に位置づけました。ベスト・ミックス方式の推進により、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ました¹⁾。更に、平成 17 年 5 月と 6 月にそれぞれ大気汚染防止法施行令、同施行規則を改正し、また、VOC 濃度の測定法を環境省告示で決めました。また、法による VOC の排出規制が必要なものを VOC 排出施設（表 1.1.5.1）として定め、VOC の排出規制が平成 18 年 4 月 1 日より開始されました。

平成 22 年度の VOC 排出量は、大気汚染防止法で定められた目標である平成 12 年度比 3 割程度削減を上回る 4 割以上の削減が達成されたため、今後の VOC 対策の動向が注目されています。環境省中央環境審議会大気環境部会は、揮発性有機化合物排出抑制専門委員会を開催して平成 24 年 10 月 11 日に「今後の揮発性有機化合物（VOC）の排出抑制対策の在り方について（報告）（案）」²⁾をとりまとめ、11 月 19 日から 12 月 18 日までパブリックコメントを実施しました。報告書（案）は平成 24 年 12 月 26 日に開催された大気環境部会（第 36 回）で報告書となっています。これによりますと、「法規制と自主的な取組を組み合わせた現行の VOC 排出抑制制度は、このまま継続することが適当と考えられる。」とあります。この理由として、VOC 排出抑制による光化学オキシダント及び SPM の抑制効果が示唆されたとの見解もあり、現状では VOC の排出抑制について規制を強化する必要性は見当たらないものの、VOC 排出抑制制度を廃止した場合、再び大気環境の悪化を招くおそれがあるためとしています。なお、この報告書では「今後は、VOC のみならず、光化学オキシダントや PM2.5 を含めて総合的な検討を行う専門委員会を新たに立ち上げ、今後必要な対策の検討等について幅広い議論を行うことが適当である。」とまとめられています。

表 1.1.5.1 規制対象となる VOC 排出施設及び排出基準
(大気汚染防止法施行規則第 15 条の 2 別表第 5 の 2)

VOC 排出施設	規模要件	排出基準	
揮発性有機化合物を溶剤として使用する化学製品の製造の用に供する乾燥施設	送風機の送風能力が 3,000 m ³ /h 以上のもの	600ppmC	
塗装施設（吹付塗装に限る。）	排風機の排風能力が 100,000 m ³ /h 以上のもの	自動車の製造の 用に供するもの	既設 700ppmC 新設 400ppmC
		その他のもの	700ppmC
塗装の用に供する乾燥施設 (吹付塗装及び電着塗装に係るものを除く。)	送風機の送風能力が 10,000 m ³ /h 以上のもの	木材・木製品（家 具を含む。）の製造 の用に供するもの	1,000ppmC
		その他のもの	600ppmC
印刷回路用銅張積層板、粘着テープ・粘着シート、 はく離紙又は包装材料（合成樹脂を積層するも のに限る。）	送風機の送風能力が 5,000 m ³ /h 以上のもの	1,400ppmC	
接着の用に供する乾燥施設（前項に掲げるもの 及び木材・木製品（家具を含む。）	送風機の送風能力が 15,000 m ³ /h 以上のもの	1,400ppmC	
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 7,000 m ³ /h 以上のもの	400ppmC	
印刷の用に供する乾燥施設（グラビア印刷に係 るものに限る。）	送風機の送風能力が 27,000 m ³ /h 以上のもの	700ppmC	
工業製品の洗浄施設（乾燥施設を含む。）	洗浄剤が空気に接する 面の面積が 5 m ² 以上のもの	400ppmC	
ガソリン、原油、ナフサその他の温度 37.8℃に おいて蒸気圧が 20 kPa を超える揮発性有機化合 物の貯蔵タンク（密閉式及び浮屋根式（内部浮 屋根式を含む）のものを除く。）	1,000 kL 以上のもの（ただし、 既設の貯蔵タンクは、容量が 2,000 kL 以上のものについて 排出基準を適用する。）	60,000ppmC	

注 1) 「送風機の送風能力」が規模の指標となっている施設で、送風機がない場合は、排風機の排風能力を規模の指標とする。

注 2) 「乾燥施設」は VOC を蒸発させるためのもの、「洗浄施設」は VOC を洗浄剤として用いるものに限る。

注 3) 「ppmC」とは、排出濃度を示す単位で、炭素換算の容量比百万分率である。

(イ) 有害大気汚染物質対策

大気汚染防止法により有害大気汚染物質 (HAPS) は、「継続的に摂取される場合には人の健康を損なうおそれがある物質で大気の汚染の原因となるもの(ばい煙及び特定粉じんを除く。)」とされています。1996年に中央環境審議会大気環境部会「今後の有害大気汚染物質対策のあり方について(第二次答申)」³⁾により、HAPSに該当する234物質のリストとリスクレベルが高く、優先的に対策に取り組むべき物質(優先取組物質)を22種類リストアップしました。該当する物質については見直しが行われ、2010年10月18日には、同第九次答申⁴⁾により、HAPSに該当するものは248物質に、優先取組物質は、23物質に改定されています(表1.1.5.2)。VOCに該当する物質も多く含まれており、トルエンは第九次答申で新たに指定されました。

優先取組物質のうち、早急に排出抑制を行わなければならない物質(指定物質)として、平成9年2月6日、指定物質抑制基準が告示され(大気汚染防止法附則第9項の規定に基づく指定物質抑制基準、環境庁告示5号(新設基準)、同6号(既設基準))、ベンゼン、トリクロロエチレン、テトラクロロエチレンの3物質が指定され、それぞれ指定物質抑制基準が定められています(表1.1.5.3)。

表 1.1.5.2 優先取組物質

物質名		VOC
1	アクリロニトリル	○
2	アセトアルデヒド	○
3	塩化ビニルモノマー	○
4	塩化メチル	○
5	クロム及び三価クロム化合物	
6	六価クロム化合物	
7	クロロホルム	○
8	酸化エチレン	○
9	1,2-ジクロロエタン	○
10	ジクロロメタン	○
11	水銀及びその化合物	
12	ダイオキシン類	
13	テトラクロロエチレン	○
14	トリクロロエチレン	○
15	トルエン	○
16	ニッケル化合物	
17	ヒ素及びその化合物	
18	1,3-ブタジエン	○
19	ベリリウム及びその化合物	○
20	ベンゼン	○
21	ベンゾ(a)ピレン	
22	ホルムアルデヒド	○
23	マンガン及びその化合物	

表 1.1.5.3 指定物質排出施設及び指定物質抑制基準（大気汚染防止法附則第 9 項）

指定物質排出施設		指定物質排出施設		
一	ベンゼン（濃度が体積百分率 60% 以上のものに限る。以下同じ。）を蒸発させるための乾燥施設であって、送風機の送風能力が1時間当たり 1,000 m ³ 以上のもの	溶媒として使用したベンゼンを蒸発させるためのものに限定。		
		既設	200 mg/m ³ N	排ガス量 1,000 m ³ /h 以上 3,000 m ³ /h 未満
			100 mg/m ³ N	排ガス量 3,000 m ³ /h 以上
		新設	100 mg/m ³ N	排ガス量 1,000 m ³ /h 以上 3,000 m ³ /h 未満
50 mg/m ³ N	排ガス量 3,000 m ³ /h 以上			
二	原料の処理能力が1日当たり 20 トン以上のコークス炉	装炭時の装炭口からの排出ガスで装炭車集じん機の排出口から排出されるものに対して適用。		
		既設	100 mg/m ³ N	特殊構造炉の適用除外あり
		新設	100 mg/m ³ N	
三	ベンゼンの回収の用に供する蒸留施設（常圧蒸留施設を除く。）	溶媒として使用したベンゼンの回収の用に供するものに限定。		
		既設	200 mg/m ³ N	排ガス量 1,000 m ³ /h 以上
		新設	100 mg/m ³ N	排ガス量 1,000 m ³ /h 以上
四	ベンゼンの製造の用に供する脱アルキル反応施設（密閉式のものを除く。）	フレアスタックで処理するものを除外		
		既設	100 mg/m ³ N	
		新設	50 mg/m ³ N	
五	ベンゼンの貯蔵タンクであって、容量が 500 kL 以上のもの	浮屋根式のもの除外。また、基準はベンゼンの注入時の排出ガスに対して適用。		
		既設	1,500 mg/m ³ N	容量 1,000 kL 以上
		新設	600 mg/m ³ N	
六	ベンゼンを原料として使用する反応施設であって、ベンゼンの処理能力が1時間当たり1トン以上のもの（密閉式のものを除く。）	フレアスタックで処理するものを除外。		
		既設	200 mg/m ³ N	排ガス量 1,000 m ³ /h 以上 3,000 m ³ /h 未満
			100 mg/m ³ N	排ガス量 3,000 m ³ /h 以上
		新設	100 mg/m ³ N	排ガス量 1,000 m ³ /h 以上 3,000 m ³ /h 未満
50 mg/m ³ N	排ガス量 3,000 m ³ /h 以上			
七	トリクロロエチレン又はテトラクロロエチレン（以下「トリクロロエチレン等」という。）を蒸発させるための乾燥施設であって、送風機の送風能力が1時間当たり 1,000 m ³ 以上のもの	溶媒として使用したトリクロロエチレン等を蒸発させるためのものに限定。		
		既設	500 mg/m ³ N	
		新設	300 mg/m ³ N	
八	トリクロロエチレン等の混合施設であって混合槽の容量が 5 kL 以上のもの（密閉式のものを除く。）	溶媒としてトリクロロエチレン等を使用するものに限定。		
		既設	500 mg/m ³ N	
		新設	300 mg/m ³ N	
九	トリクロロエチレン等の精製又は回収の用に供する蒸留施設（密閉式のものを除く。）	トリクロロエチレン等の精製の用に供するもの及び原料として使用したトリクロロエチレン等の回収の用に供するものに限定。		
		既設	300 mg/m ³ N	
		新設	150 mg/m ³ N	
十	トリクロロエチレン等による洗浄施設（次号に掲げるものを除く。）であって、トリクロロエチレン等が空気に接する面の面積が 3 m ² 以上のもの			
		既設	500 mg/m ³ N	
		新設	300 mg/m ³ N	
十一	テトラクロロエチレンによるドライクリーニング機であって、処理能力が1回当たり 30 kg 以上のもの	密閉式のもの除外。		
		既設	500 mg/m ³ N	
		新設	300 mg/m ³ N	

1.5.2 悪臭防止法による悪臭物質規制

悪臭防止法は1971年に制定され、22種の特定悪臭物質に対して臭気強度による規制が定められました(表1.1.5.4)。悪臭物質には、VOCに該当する物質が多く

含まれています。しかし、個別の物質の規制では複合臭の問題に対処できないことを勘案して、1995年に臭気指数による規制が導入されました。これは嗅覚に基づいた悪臭原因物質の評価方法であり、悪臭物質の総量での規制といえます。

表 1.1.5.4 特定悪臭物質(悪臭防止法施行規則別表第一を改作)

No.	名称	ppm*
1	アンモニア	2
2	メチルメルカプタン	0.004
3	硫化水素	0.06
4	硫化メチル	0.05
5	二硫化メチル	0.03
6	トリメチルアミン	0.03
7	アセトアルデヒド	0.1
8	プロピオンアルデヒド	0.1
9	ノルマルブチルアルデヒド	0.03
10	イソブチルアルデヒド	0.07
11	ノルマルバレルアルデヒド	0.02
12	イソバレルアルデヒド	0.006
13	イソブタノール	4
14	酢酸エチル	7
15	メチルイソブチルケトン	3
16	トルエン	30
17	スチレン	0.8
18	キシレン(o,m,p混合物)	2
19	プロピオン酸	0.07
20	ノルマル酪酸	0.002
21	ノルマル吉草酸	0.002
22	イソ吉草酸	0.004

*臭気強度として3(規制基準の中央値)を与える物質濃度(ppm)

1.5.3 化学物質排出把握管理促進法による指定化学物質規制

「特定化学物質の環境への排出量の把握等及び管理の改善の促進に関する法律（化学物質排出把握管理促進法、化管法）」では、人の健康を損なうおそれ（発がん性、変異原性、感作性など）又は動植物の生息もしくは生育に支障を及ぼすおそれ（生態毒性）があるもので、環境中に存在すると考えられる量の違いによって、第一種指定化学物質（462種類）と第二種指定化学物質（100種類）の2つに区分し、指定しています。

化管法は、PRTR制度とSDS制度（旧

MSDS制度）を核としていますが、PRTR制度で届出の対象となるのは、第一種指定化学物質です。このうち、人に対する発がん性があると評価されている物質を特定第一種指定化学物質と呼び、15種類を指定しています（表1.1.5.5）。第一種指定化学物質及び第二種指定化学物質を他の事業者へ出荷する場合には、有害性に関する情報や取扱い方法などを記載したSDS（安全データシート）を提供することを事業者には義務づけています。特定第一種指定化学物質には、VOCに該当するエチレンオキシド（酸化エチレン）、1,3-ブタジエン、2-ブロモプロパン、ベンゼン、ホルムアルデヒドが含まれています。

表 1.1.5.5 第一種指定化学物質及び特定第一種指定化学物質

（特定化学物質の環境への排出量の把握等及び管理の改善の促進に関する法律第2条、同施行令第4条、同別表第一及び別表第2）

第一種指定化学物質 (法第2条第2項)	次のいずれかの有害性の条件に当てはまり、かつ、環境中に広く継続的に存在するもの	462種類
	○人の健康を損なうおそれ又は動植物の生息もしくは生育に支障を及ぼすおそれがあるもの	
	○その物質自体は人の健康を損なうおそれ又は動植物の生息もしくは生育に支障を及ぼすおそれがなくても、環境中に排出された後で化学変化を起こし、容易に上記の有害な化学物質を生成するもの	
	○オゾン層を破壊するおそれがあるもの	
特定第一種指定化学物質 (施行令第4条)	人に対する発がん性があると評価されているもの 石綿、エチレンオキシド、カドミウム及びその化合物、六価クロム化合物、塩化ビニル、ダイオキシン類、鉛化合物、ニッケル化合物、砒素及びその無機化合物、1,3-ブタジエン、2-ブロモプロパン、ベリリウム及びその化合物、ベンジリジジエン=トリクロリド、ベンゼン、ホルムアルデヒド	15種類

1.5.4 東京都環境確保条例による有害ガス規制

東京都環境確保条例第2条11号により、有害ガスとは「人の健康に障害を及ぼす物質のうち気体状又は微粒子状物質（ばい煙を除く。）」とされ、別表第3により42種類の物質が定められていま

す。有害ガスには、VOCに該当する物質が多く含まれており、同条例第68条及び別表第7第3号により、排出口濃度における規制基準値が定められています（表1.1.5.6）。

表 1.1.5.6 有害ガス その1（東京都環境確保条例第68条別表第7第3号）

番号	有害ガスの種類	規制基準値(mg/m ³ N)	VOC
1	弗（ふつ）素及びその化合物	9	(一部)
2	シアン化水素	6	
3	ホルムアルデヒド	70	○
4	塩化水素	40	
5	アクロレイン	10	○
6	塩素	30	
7	臭素及びその化合物	70	(一部)
7-2	臭化メチル	200	○
8	窒素酸化物	200	
9	フェノール	200	○
10	硫酸（三酸化硫黄を含む。）	1	
11	クロム化合物	0.25	
12	塩化スルホン酸	1	
13	ピリジン	40	○
14	スチレン	200	○
15	エチレン	300	○
16	二硫化炭素	100	○
17	クロルピクリン	40	○
18	ジクロロメタン	200	○
19	1,2-ジクロロエタン	200	○
20	クロロホルム	200	○
21	塩化ビニルモノマー	100	○
22	酸化エチレン	90	○
23	砒（ひ）素及びその化合物	0.05	
24	マンガン及びその化合物	0.05	
25	ニッケル及びその化合物	0.05	
26	カドミウム及びその化合物	1	
27	鉛及びその化合物	10	

表 1.1.5.6 有害ガス その2 (東京都環境確保条例第 68 条別表第 7 第 3 号)

番号	有害ガスの種類	規制基準値 (mg/m ³ N)	VOC
28	メタノール	—	○
29	イソアミルアルコール	—	○
30	イソプロピルアルコール	—	○
31	アセトン	—	○
32	メチルエチルケトン	—	○
33	メチルイソブチルケトン	200	○
34	ベンゼン	100	○
35	トルエン	200	○
36	キシレン	—	○
37	トリクロロエチレン	300	○
38	テトラクロロエチレン	300	○
39	酢酸メチル	—	○
40	酢酸エチル	—	○
41	酢酸ブチル	—	○
42	ヘキサン	200	○

引用文献

1. 環境省、「揮発性有機化合物 (VOC) の排出抑制制度の概要」、環境省ホームページ、<http://www.env.go.jp/air/osen/voc/seido/001.pdf>、2014/01/16 確認
2. 揮発性有機化合物排出抑制専門委員会、「今後の揮発性有機化合物 (VOC) の排出抑制対策の在り方について (報告)」、環境省ホームページ、<http://www.env.go.jp/council/07air/y070-36b.html>、2014/01/16 確認
3. 環境省 報道発表資料、「中央環境審議会大気環境部会「今後の有害大気汚染物質対策のあり方について (第二次答申)」について」(平成 8 年 10 月 17 日)
4. 環境省 報道発表資料、「中央環境審議会大気環境部会「今後の有害大気汚染物質対策のあり方について (第九次答申)」について (お知らせ)」(平成 22 年 10 月 18 日)、<http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=13040>、2014/01/16 確認

本章では、気体中の VOC を処理する技術について、実用化されているものを中心に、種類と特徴、利用の際に必要な知識について述べます。

2.1 処理技術の種類

2.1.1 処理技術の分類

表 1.2.1.1 に処理技術の種類と概要を示します。VOC の処理技術は、大別して、a. 燃焼法、b. 吸着法、及び c. その他の方法、があります。

- a. 燃焼法は、VOC 中の炭素を酸化して CO_2 にまで分解して処理する方法で、工場の排ガス処理などに多く利用されています。燃焼法を更に分類すると直接燃焼法、蓄熱燃焼法、触媒燃焼法があります。同じ酸化処理をするので、光触媒をこの中に入れる分類法もありますが、本章では光触媒はその他の方法に分類しました。
- b. 吸着法は、VOC を物理的に吸着して捕集する方法です。吸着材には、活性炭、ゼオライト、シリカなどが使用されています。通常は VOC の吸着と脱着を繰り返して、吸着材を再生しながら使用します。

- c. その他の方法として、光触媒、放電プラズマ、オゾン酸化、生物処理、薬液処理などがあります。光触媒は脱臭、抗菌などに多く使用されています。放電プラズマ、オゾン酸化、生物処理、薬液処理については、それぞれ特定の用途に向けた開発が進められています。

2.1.2 ガスの種類と処理技術

社団法人産業環境管理協会が作成した「有害大気汚染物質対策の経済性評価報告書」*
注では、ニッケル化合物を除く自主管理物質の 11 物質を性質の違いから 4 群に分けています (表 1.2.1.2)。

*注：経済産業省の依頼で社団法人産業環境管理協会が実施した、VOC 処理技術の調査結果をまとめたものが「有害大気汚染物質対策の経済性評価報告書」(2003 年 2 月) です。この報告書は、34 団体約 330 社へのアンケート調査がもとになっています。調査に協力した団体は化学、材料、製薬などの製造業が中心です。

表 1.2.1.1 VOC 処理技術の種類と概要

分類	原理	主な用途	特長	課題	
燃焼法	直接燃焼	VOC を直接燃焼させて酸化	塗装、印刷、化学プラントなど	実績大（装置安価・保守容易）、VOC の種類不問（燃焼温度 750～850℃程度）	低濃度の場合は補助燃料費大、補助燃料による多量のCO2排出、燃焼に伴う2次汚染防止対策必要
	蓄熱燃焼	蓄熱体（セラミックス）に熱を蓄えて燃焼	塗装、印刷、化学プラントなど	熱効率良好（90～95%）、自然濃度が低い（VOC の種類により 500ppm 程度から自然）	装置が高価で重い、断続運転は不適、ヤニ・タール、シリコンなど処理必要、（蓄熱材が目詰り）
	触媒燃焼	熱触媒を使用して低温で酸化	印刷、化学プラントなど	低温燃焼可能（350～450℃程度）、低NOx発生、保守容易	シリコン、リン、硫黄などで触媒が被毒し失活
吸着法	活性炭（破砕状、繊維状、粒状、ハニカム成型品など）	吸着と脱着。脱着は、昇温、減圧、水蒸気の吹き付けなどで行う	化学プラント、洗浄、ビル・クリーンルームの空調など	VOC を回収して再利用が可能、捕集（吸着）時エネルギー不要、処理に伴う中間生成物発生なし	再生コスト、吸着材の劣化、脱着時に VOC が一部残留、可燃性で特にケトン類で発火が報告されている
	無機系吸着材（ゼオライト、シリカなど）	吸着と脱着。脱着は、昇温、減圧など	化学プラント、ガソリンペーパーバックなど	VOC を回収して再利用が可能、不燃性、処理に伴う中間生成物	活性炭に比較して、同等の表面積でコスト高
	高分子吸着材	吸着と脱着。脱着は、昇温、減圧など	現在、国内では実施例不明（流動床方式による吸着）	形状が均一、摩耗粉が出ない、湿度に影響され難い	VOC の種類により吸着性能が大きく異なる 処理速度遅い、分解する
光触媒	紫外線 + 光触媒（酸化チタン、酸化タングステンなど）	室内空気浄化、水処理、畜産物死骸保管倉庫等の脱臭	低ランニングコスト、保守容易、常温処理、（可視光利用が研究されている）	VOC の量が少ない場合だけ使用可能（にの処理など）	
放電プラズマ法	プラズマによる酸化。触媒との組合せが工夫されている	小売店の脱臭、家庭用空気清浄機	分解率が高い、省エネルギー、常温処理	空気中の放電はNOx発生のおそれがある、排気中の二次生成物に注意が必要	
オゾン酸化法	オゾンによる酸化	水処理で実用化、気体用は開発進行中	省エネルギー、保守が容易、常温処理	処理物質が限定される、排気中のオゾンを処理する必要がある	
生物処理法	微生物・細菌などによる分解	畜産の悪臭、（国外では工場排気処理にも利用）	省エネルギー、保守が容易、常温処理、排気の再処理不要	処理速度が遅い、設備が大きく水の補給が必要	
薬液処理法	水、酸・アルカリ、合成油などによる吸収及び分解	特定化学物質の回収、悪臭防止、効率的な液体への吸収方法など開発中	装置は小型・低コスト可能	特定化学物質の場合は効率的、薬液管理と廃液処理がコスト要因	

この報告書では、I群はベンゼン、1,3-ブタジエン、アクリロニトリルで、発熱量が高く自燃しやすい物質です。II群はホルムアルデヒド、アセトアルデヒドで、乾燥炉などから発生し悪臭が強い水溶性の物質です。III群はトリクロロエチレン、テトラクロロエチレン（パークロロエチレン）、ジクロロメタン（塩化メチレン）、クロロホルムで、洗浄に使用されていて、水や土壌汚染で問題になる塩素を含んだ物質です。IV群は塩ビモノマー（VCM）、1,2-ジクロロエタンで、塩ビ製造工程で発生する物

質です。

物質群ごとの処理技術を図 1.2.1.1 に示しますが、I群では焼却加熱（燃焼）、II群では水・酸・アルカリ吸収、III群では活性炭等吸着処理が多く使用されています。

処理技術は日々進歩をしており、また報告書が作成された 2003 年当時は顕在化していなかった、CO₂ 削減を求める強い社会的要請もあるので、ガスの種類と処理技術の関係は、大きく変化していくと思われます。

表 1.2.1.2 ガスの性質による4物質群分類

(転載:経済産業省, (社)産業環境管理協会、「有害大気汚染物質対策の経済性評価報告書」、2003年2月、p.13、表2.5)

群・事例数	物質名	分類理由
I群 246 事例	① ベンゼン ② 1,3-ブタジエン ③ アクリロニトリル	発熱量が高く、焼却して熱回収に向く (注:高濃度の場合) 一般有機化合物
II群 82 事例	④ ホルムアルデヒド ⑤ アセトアルデヒド	水溶性の高いアルデヒド類
III群 318 事例	⑥ トリクロロエチレン ⑦ テトラクロロエチレン (パークロロエチレン) ⑧ ジクロロメタン (塩化メチレン) ⑨ クロロホルム	IV群を除く塩素化合物
IV群 94 事例	⑩ 塩ビモノマー (VCM) ⑪ 1,2-ジクロロエタン (EDC)	塩ビの製造工程に係る物質

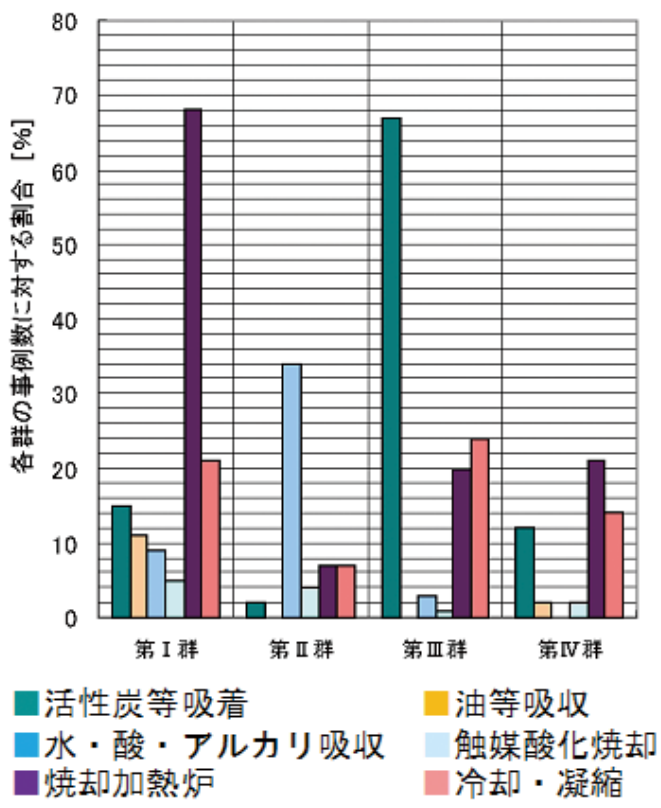


図 1.2.1.1 物質群別の処理設備の適用割合

(転載:経済産業省, (社)産業環境管理協会,「有害大気汚染物質対策の経済性評価報告書」、2003年2月、p.26、図 2-7b)

コラム： 室内でも大気汚染?!

大気環境で光化学オキシダントとは、VOCと窒素酸化物の混合系に太陽光線が作用することにより生成した含酸素物質やオゾンを指します。ここで生成したオゾンは、さらに他のVOCと反応して新たな二次酸化生成物を生成し、一部の物質は、蒸気圧が低いため凝集して粒子を生成します。さて、このオゾンと有機化合物の反応ですが、室内においても同様のメカニズムで起こっている可能性があります。

最近、酸化分解によって有機化合物を分解するタイプの空気清浄機をよく見かけますが、その多くが直接または間接的にオゾンによる酸化分解を利用しています。有機化合物が二酸化炭素と水にまで完全分解されてしまえば問題は無いのですが、大抵は完全分解に至らず、大気環境と同じように二次酸化生成物つまり光化学オキシダントや微小粒子を生じると考えられています。実験室レベルでは、木材から発生する α -ピネンなどのテルペン類がオゾンと反応すると高分子量の有機化合物や微小粒子を生成することが確認されています。これらの物質の健康影響は明らかではありませんが、大気環境において光化学オキシダントが目や呼吸器に影響を与えることが分かっているので、少し心配になります。

濃度の違いは大きいですが、事業所におけるVOC処理技術を考える時と同じように、室内における空気清浄についても、出口ガスの成分も含めた総合的な評価を行うことが必要だと言えるでしょう。

2.2 燃焼法による処理

2.2.1 直接燃焼法

直接燃焼法では、排気ガスを750～850℃程度まで昇温させてVOCを燃やし、その炭素をCO₂に完全分解します。この方法は、大規模な塗装工場の排気処理に多く使用されてきました。温度が高いため、塗料に含まれるシリコンやヤニ等による影響が少なく、高効率で安定したVOCの分解が可能です。直接燃焼処理装置は、他方式に比較して構造がシンプルで、風量の割には設置費用が小さく、機器のメンテナンスも手数がかかりません。

ただし、VOCが自燃する濃度は、VOCの種類によりますが、一般には1,000ppm以上です。したがって、塗装や印刷の工程から排出される通常のVOCを処理するには、灯油、都市ガス、及びLNGなどの補助燃料が必要です。様々な熱回収方法が工夫されていますが、それでも補助燃料コストは高額になります。同時に、補助燃料を燃焼させることにより大量のCO₂が発生します。そのため、近年は作業ロボットを使用して排気量を減らすこと、あるいはVOC濃縮装置をつけることなど、補助燃料を減らす取り組みが強められています。

2.2.2 蓄熱燃焼法

VOC燃焼時に発生した熱を蓄熱材に蓄えて、熱効率を最大95%程度まで高めることが可能な燃焼法です。処理する排気を燃焼室の入力側に設けた高温の蓄熱材の中を通し、昇温させて燃焼室に導き、更に燃焼室でバーナー等で温度を上げてVOCを燃焼させます。その結果発生する高温の排ガスを燃焼室の出力側に設置した別の蓄熱材を通して排出します。処理される気体は入力側で蓄熱材から熱をもらい、処理された後で出力側の蓄熱材に熱を与えることとなります。入力側と出力側の蓄熱材は適宜切換えて、熱を効率的に利用します。蓄熱材の切換えにはロータリー方式やダンパー切換え弁方式が使用されています。蓄熱材を切り替えるときに熱効率が低下しないように、工夫がされています。蓄熱材はセラミックスなどを素材とし、熱交換用の通気孔を多数設けた構造になっています。蓄熱燃焼方式の処理装置は、重量がかさみ価格も高いことから普及が遅れていましたが、熱効率が良く、直接燃焼法より高い温度で燃焼させることで補助燃料を減らすことができるので、今後は使用が増加すると思われます。ただし、連続運転をしないと蓄熱の効果が出ないため、仕事が一不連続で排気も断続的になりやすい中小企業などの場合は使い方に工夫がいるでしょう。

2.2.3 触媒燃焼法

直接燃焼法では、排ガスの温度を750～850℃程度まで上げる必要がありますが、触媒燃焼法では350～450℃でVOCを酸化することができます。したがって、補助燃料コストを低減することができます。また、低温燃焼のために、窒素酸化物の発生も少なくなります。

現在、触媒には主に白金(Pt)が使用されていますが、鉄、セリウム、コバルトなどの酸化物触媒の開発が行われています。東京都地域結集型研究開発プログラムでは、コバルト・セリウム酸化物系熱触媒の開発が行われ、特に酢酸エチルに関しては、白金系より100℃低い温度でCO₂まで分解することができます。

触媒燃焼法に使用する熱触媒に求められる性能としては次のものが挙げられます。

- a. 酸化温度が低いこと
- b. 大きな空間速度(SV)がとれること
- c. 圧力損失が低いこと
- d. シリコンなどの被毒に強く、寿命が長いこと
- e. ヤニ、コーキングなどで目詰まりしないこと

実際は、a.の酸化温度は350～450℃程度、b.のSV値は白金触媒をハニカムのコーディエライト等に担持したもので30,000 h⁻¹程度(ただし、処理装置としては10,000 h⁻¹程度)、c.の圧力損失以下の項目は装置の設置面積や運転方法によります。

2.3 吸着法による処理

VOC を物理的に吸着して捕集する処理方法です。吸着材として**活性炭**、**ゼオライト**、**シリカ**などが使用されています。

吸着材の孔はその大きさから、直径 2 nm 以下をマイクロ孔（ミクロ孔）、2 ～ 50 nm をメソ孔、それ以上をマクロ孔と呼んでいます。吸着材の**比表面積**を大きくし、VOC を素早く吸着するのはマイクロ孔です。一方、水蒸気を多量に蓄え湿度を一定に保つ用途などにはメソ孔やマクロ孔が有効です。ガスを吸着材内部まで速やかに運ぶためにはマクロ孔が有効と言われています。一般に、**活性炭**はマイクロ孔からマクロ孔まで様々な径の孔を持っています。一方、**ゼオライト**はサイズの揃ったマイクロ孔を持っています。

工場などで多量に VOC が出る場合、高価で単一の VOC の場合は脱着後に回収されています。しかし、安価で多種の VOC が混合されている場合は、分離精製などに費用がかかるので、VOC は脱着後に廃棄されます。

2.3.1 活性炭

活性炭は、吸着材として最も多く使用されています。活性炭は、他の吸着材に比較して安価で、高い**比表面積**を有する利点があります。各種 VOC に対する活性

炭の保持量を表 1.2.3.1 に示します。

活性炭の原料は、ヤシガラ、石炭（瀝青炭、無煙炭）、オイルピッチ、木材チップ、おが屑、コーヒー滓、レーヨン、アクリロニトリル、フェノール樹脂などがあります。形状は、粒状、破碎状、粉末状、繊維状、成型（ハニカム状）などがあります。活性炭の表面は基本的に疎水性です。しかし、酸処理などにより表面に酸化物をつくり、親水性を持たせることも可能です。

活性炭は原料、形状、製造方法などにより、それぞれ特徴があり用途も異なります。気相の VOC を吸着する場合は、一般的に以下のようなものが使用されています。

原料：ヤシガラ活性炭、石炭原料活性炭が多く使用されています。

形状：粒状及び破碎状の活性炭が多く使用されています。装置に組み込むときは、圧力損失が大きくなり過ぎないためと、活性炭が擦れて生じる粉が飛ばないようにするために、一般的には**線速度** 0.5 m/s 以下で使用されます。

繊維状活性炭は、吸脱着を頻繁に繰り返す濃縮機などの用途に使用されています。繊維径は数～20 μm 程度で、原料はフェノール、PAN、ピッチ、レーヨン系などがあります。

ハニカム状は、クリーンルームの空調など濃度が低い用途に使用されて

います。
粉末状は圧力損失が大きく、飛散し
やすいので気体用にはあまり使用さ
れません。

性能：気体浄化用の活性炭の比表面積は
800～1,500 m²/g程度が一般的です。
(粉末活性炭では比表面積が大きい
ものもあります。)

表 1.2.3.1 VOC および悪臭物質の活性炭による吸着保持量

(転載：中津山憲、「塗装工程における臭気発生の現状と臭気対策」、塗装技術、45 (9)、2006、pp.72-78)

番号	物質名	分子式	活性炭保持量 (重量%)	分子量	沸点 (°C)
1	ホルムアルデヒド	CH ₂ O	僅少	30.0	-19.2
2	メタノール (メチルアルコール)	CH ₄ O	2.2	32.0	64.7
3	イソプロピルアルコール	C ₃ H ₈ O	15.8	60.1	82.4
4	アセトン	C ₃ H ₆ O	7.2	58.1	56.3
5	メチルエチルケトン	C ₄ H ₆ O	10	72.1	79.6
6	メチルイソブチルケトン	C ₆ H ₁₂ O	20	100.2	115.8
7	ベンゼン	C ₆ H ₆	23	78.1	80.1
8	トルエン	C ₇ H ₈	25	92.1	110.8
9	キシレン	C ₈ H ₁₀	26	106.2	139
10	トリクロロエチレン	C ₂ HCl ₃	13	131.4	87.2
11	テトラクロロエチレン	C ₂ Cl ₄	60	165.9	121.2
12	ピリジン	C ₅ H ₅ N	25	79.1	115.4
13	酢酸メチル	C ₃ H ₆ O ₂	16	74.1	56.3
14	酢酸エチル	C ₄ H ₈ O ₂	19	88.1	76.8
15	酢酸ブチル	C ₆ H ₁₂ O ₂	28	116.2	126.3
16	ヘキサン	C ₆ H ₁₄	10.6	86.2	68.8
17	スチレン	C ₈ H ₈	22	104.2	145.8
18	ジクロロメタン	CH ₂ Cl ₂	3.2	84.9	39.8
19	1,2-ジクロロエタン	C ₂ H ₄ Cl ₂	8.5	99.0	83.7
20	塩化ビニルモノマ	C ₂ H ₃ Cl	40	62.5	-13.9

2.3.2 無機系吸着材

無機系吸着材としては、ゼオライトとシリカが使用されています。活性炭と比較すると、高価ですが、不燃性で脱着時に高温にすることが可能です。また、一般的には、脱着後に残留するVOCの量が活性炭の場合より少なくなります。

ゼオライト

ゼオライトは結晶性のアルミノケイ酸塩で、触媒、吸着材として化学分野、環境分野で広く利用されています。VOC処理関係では、**比表面積**が活性炭と同等のものをつくることが出来て、繰返しの使用に耐えるので、VOCの濃縮装置に使用されています。また、ゼオライトは細孔径が均一で、その特徴を活かして特定のガスだけを選択して吸着させることが可能です（活性炭でも製法によっては酸素と窒素を分離吸着可能なものなどが製造できます）。

シリカ

吸着材としては、ケイ酸をゲル化したシリカゲルの形で使用されています。本来は親水性で水蒸気の吸着能力に優れており、乾燥材として広く使用されています。現在、大気浄化材料としては、消臭材として使用されています。また、VOC処理に関しては、ガソリン蒸気の吸着回収用

などに使用されています。

メソ細孔径を揃えたメソポーラスシリカが合成可能なことが知られていますが、本プロジェクトでは、細孔径を更に小さく制御して、マイクロ孔を持つマイクロポーラスシリカの開発に成功しました。まだ、製造コストが高額ですが、大きなSV値でも優れた吸着性能を示しているため、将来は有望な吸着材です。

アパタイト

アパタイト (apatite) はリン酸塩鉱物の一種で、動物の骨や貝殻の成分でもあります。自然のアパタイトの**比表面積**を100 m^2/g 以上に加工することは困難で、現在は、気中のVOC浄化用にはあまり使用されていません。しかし、脱臭用などに、今後は利用される可能性があります。

2.3.3 その他の吸着材

高分子のVOC吸着材は、スチレン(PS)-ジビニルベンゼン(DVB)共重合物で製造されるGC分離剤やイオン交換樹脂の発展として開発されました。多くの樹脂系吸着材は疎水性であり、気相のVOC吸着のほか汚染地下水などに含まれるジクロロエタン、トリハロメタンなどの吸着に使用されています。

高分子吸着材を使用した気中のVOC処理装置としては、スウェーデンのChematur Engineering AB社のPOLYADプロセス技術が有名で、我が国でも主として塗装工場におけるVOC、溶剤ガス処理装置として技術導入され製造販売されました(1999年)。吸着塔は高分子吸着材

(Bonopore 1120)を充填した流動床方式*^注であり、吸着材は脱着塔で加熱再生され、吸着塔に循環されます。現在は、国内では製造されていません。

*注：流動床(fluid bed)とは、吸着と脱着のために吸着材そのものを流すように動かす方式で、吸着材には擦れても破損しないなどの性質が必要です。それに対して、固定床(fixed bed)では、吸着材は床 bed)に固定されて使用されます。

高分子吸着材として、活性炭の代わりに使用することを目的に開発されたのが、The Dow Chemical CompanyのDOWEX™ OPTIPORE™ シリーズです。これは現在も入手可能であり、そのうちの3種類の特性を表1.2.3.2に示します。

表 1.2.3.2 DOWEX™ OPTIPORE™ ポリマー吸着材の特性例

(転載：The Dow Chemical Company, "Dow Water & Process Solutions", <http://www.dowwaterandprocess.com/>, 2014/01/10 確認)

名称	BET比表面積 (m ² /g)	密度 (g/cc)	メッシュ又は粒径	クラッシュ強さ (g/粒)	細孔容積 (cc/g)	平均孔サイズ (Å)	用途
V493	>1100	0.34	20/50	>500	1.16	46	気体、流動床
V503	>1100	0.34	1000 μm	>1000	0.94	34	気体、固定床
L493	>1100	0.67	20/50	>500	1.16	46	液体

2.4 その他の処理方法

2.4.1 光触媒法

光触媒により VOC を酸化分解する方法が実用化されています。光源は主に紫外線が使用されていますが、最近は可視光を利用する研究が活発に行われています。

光触媒は分解速度が遅いので、塗装工場や印刷工場などから排出される多量の VOC を直接酸化分解することは困難です[※]。しかし、悪臭は僅かの原因物質から発生していることが多く、悪臭除去装置として実用化されています。実際に、排水処理場の悪臭や腐敗臭の発生する保管庫などで効果を発揮しています。

光触媒の材料としては、酸化チタンが多く使用されています。活性を高める添加物や有効波長を長くする窒化処理など様々な工夫がされています。図 1.2.4.1 は、光触媒によるトルエン分解の模式図です。

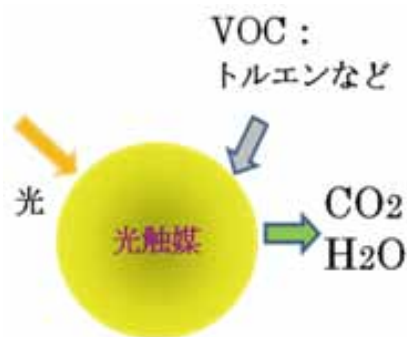


図 1.2.4.1 光触媒によるトルエンの酸化

*注：光触媒の分解速度

太陽エネルギーを利用する場合（理論計算）：
波長 600 nm までの太陽光を量子収率 100% で用いると仮定すると、1 電子反応で処理できる場合と 36 電子反応の場合、トルエンの分解速度は受光面積 1 m² 当たり毎時で以下のとおりです。

1 電子反応 → 0.45 kg/h/m²

36 電子反応 → 0.01 kg/h/m²

一方、処理が必要なトルエン量は、私たちの工場調査によると、中小規模の塗装工場でも 20 kg/日、或は 2.5 kg/h は必要です。したがって、工場からの排出される大量のガスを光触媒で処理することは困難です。

2.4.2 放電プラズマ法

プラズマとは、気体を構成する分子が電離して、陽イオンと電子に別れて運動する状態を言います。放電は主に**コロナ放電** (Corona discharge) が使用されています。VOCの分解は、VOCとプラズマの接触により進行します。また、プラズマ周辺に触媒を配置することで分解速度を10倍以上に高めることが可能です。

放電プラズマ法は、現在、放電を強力にして分解速度を高める研究が行われています。一方では、放電を弱くして、空気中での放電に伴う窒素酸化物の発生を抑えて、微量の悪臭物質を除去する用途に限定して使用する方法が使われています。

放電プラズマ法は、消費エネルギーが少なく分解能力も高い魅力的な処理方法ですので、大気中の放電で発生する窒素酸化物を上手に処理することが出来れば更に用途は拡大するでしょう。

2.4.3 オゾン酸化法

オゾンの酸化力を利用してVOCを分解する方法です。VOCを含む排ガスを直接オゾンと接触させる方法、及び排ガスを活性炭等に吸着させてからオゾンで処理する方法が研究されています。光触媒法や放電プラズマ法と同じで、処理対象の気体の温度を上げることなしに処理が可能

です。オゾン発生には酸素中の放電が使用され、VOC処理後の残留オゾンをもそのまま大気中に放出しない処理が必要です。

2.4.4 生物処理法

生物処理は、畜舎や堆肥のにおいを除去するために使用されています。しかし、生物処理については装置の仕組みも性能データの取得方法もほとんど公開されていません。分解菌の種類も担持体もノウハウで固められています。その中で、群馬県の地域結集型研究開発プログラムで開発された成果は、一般に公開されています。開発された装置は、水の補給が必要ですが、保守の手間は大きくないとのことです。(参照:群馬県「群馬県地域結集型研究開発プログラム 環境に調和した地域産業創出プロジェクト」、<http://www.g-inf.or.jp/create/index.html>)

生物処理では、微生物を殺すような殺菌作用のあるVOCは処理できず、また装置は広い設置面積が必要なので、工場の排気処理には利用が難しいところがあります。しかし、自然に近いクリーンな処理技術として再評価して、強力に開発を進めるべきだとの意見もあります。

2.4.5 薬液処理法

VOCを吸収する薬液をシャワーにして吹き付ける、あるいは薬液中でバブリングして排ガスを処理する方法です。吸収したVOCを回収し、薬液を再生してリサイクルします。したがって、排ガスの種類、風量、濃度などにより装置を個別に設計する必要があり、汎用品として市場に出ている製品はほとんどありません。しかし、VOCの種類によっては効率的な処理が期待できます。悪臭物質についてはアルデヒド類など水溶性のものが多いため、脱臭剤を混ぜた水を利用する方法が使われています。また、吹き付け塗装ブースには、通常、油膜や水槽を使ってミストを取り除く機構が付随しています。可溶性のVOCはミストと同時に除去することが可能です。

2.5 処理装置導入のコスト

処理装置の導入を検討する場合、まず必要なのがコストの見積もりです。ここでは処理装置導入に係る費用の概要について述べ、具体的な装置例については、2 塗装編の第 5 章「塗装工場用 VOC 処理装置」を参照してください。

2.5.1 イニシャルコストとランニングコスト

まず始めに断らなければいけないのは、処理装置導入とランニングコストの見積もり及び比較は非常に難しいということです。

イニシャルコスト

装置は単体で運転されることなく、熱回収システムや配管などの付帯工事が必要になります。それらをどこまで含めるかでコストは大きく異なります。また、そうした設備状況はランニングコストに影響します。

ランニングコスト

燃焼法の装置では VOC 濃度が高ければ補助燃料費がゼロになります。触媒を使用した場合には、シリコンなどの被毒物質が排ガス中に含まれる量によって触媒の寿命が異なります。また、吸着法では VOC 濃度が低ければ、吸着材が破過

するまでの時間が長くなり、吸着・脱着に必要な再生処理コストが小さくなります。したがって、処理対象とする VOC の種類、VOC 濃度、一日の運転時間、処理効率などを一定にしないと数値だけの比較は無意味です。

以上の議論を踏まえた上で、「VOC 排出削減支援ツール」*注上で公開されているイニシャルコストとランニングコストを表 1.2.5.1 に示します。それをグラフ化したものが図 1.2.5.1 です。図 1.2.5.1 の中で株式会社モリカワの冷却凝集法は吸着法に含めました。また、同じ企業の同じ製品シリーズに複数の装置がある場合は、処理風量が最小ものと最大のものだけを取り上げました。更に、処理風量とコストが「△～○」と記載してあるものは最大の「○」の数値を採用しました。図 1.2.5.1 より、処理風量とコストの間に正の相関関係のあることが分かります。

*注：「VOC 排出削減支援ツール」は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託により開発され、VOC 削減技術に関する情報を集めてインターネット上に公開したものです(<http://www.voc-info.jp/>、ただし、2014/01/16 現在休止中です)。開発担当は(株)三菱化学テクノロジー、(株)三菱総合研究所、みずほ情報総研(株)、(独)産業技術総合研究所の4社で、開発研究の統括は東京大学生産技術研究所が行ったものです。

表 1.2.5.1 処理装置のイニシャルコストとランニングコスト

((独) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)、「VOC 排出削減支援ツール」、<http://www.voc-info.jp/> (2011/02/10 確認) より抜粋、2014/01/16 現在休止中)

番号	企業名	製品名	最大処理風量 (m ³ /min)	イニシャルコスト (百万円)	ランニングコスト (千円/月)	装置面積 (m ²)	処理方式
1	アマノ (株)	VRT-290 (ゼオライトフィルター付)	290	15	253	6.34	触媒燃焼
2	有アマリ精工	AK-0130PP	13	7.8	34	2	触媒燃焼
3	有アマリ精工	AK-0015PP	1.5	2.45	3	0.59	触媒燃焼
4	(株) 環境プラント技研	リンクル	1000	16	300	10	粒状活性炭
5	東洋紡績 (株)	Kフィルター溶剤吸着処理装置 2RG-2	30	15	18.68	3.25	繊維状活性炭
6	東洋紡績 (株)	Kマットロール脱臭装置 KR-50	50	9.8	27.4	1.53	触媒燃焼
7	パナソニック環境エンジニアリング	触媒酸化設備	2000	200	500	200	触媒燃焼
8	パナソニック環境エンジニアリング	触媒酸化設備	1	5	10	1	触媒燃焼
9	大和化学工業 (株)	溶剤回収装置 Take-10L	10	7	24	3.6	粒状活性炭
10	大和化学工業 (株)	溶剤回収装置 Take-100	60	30	210	12	粒状活性炭
11	(株) モリカワ	REARTH S150 (圧縮深冷凝縮方式)	10	7.4	20	0.957	冷却凝集
12	(株) モリカワ	REARTH S500 (圧縮深冷凝縮方式)	100	12.3	50	1.52	冷却凝集
13	(株) モリカワ	REARTH SV (活性炭吸着方式)	100	120	200	100	粒状活性炭
14	(株) モリカワ	REARTH RV (活性炭吸着・交換方式)	100	3	300	6	吸着材交換方式
15	(株) 西部技研	スカイセーブS	60	14.5	50	3.5	触媒燃焼

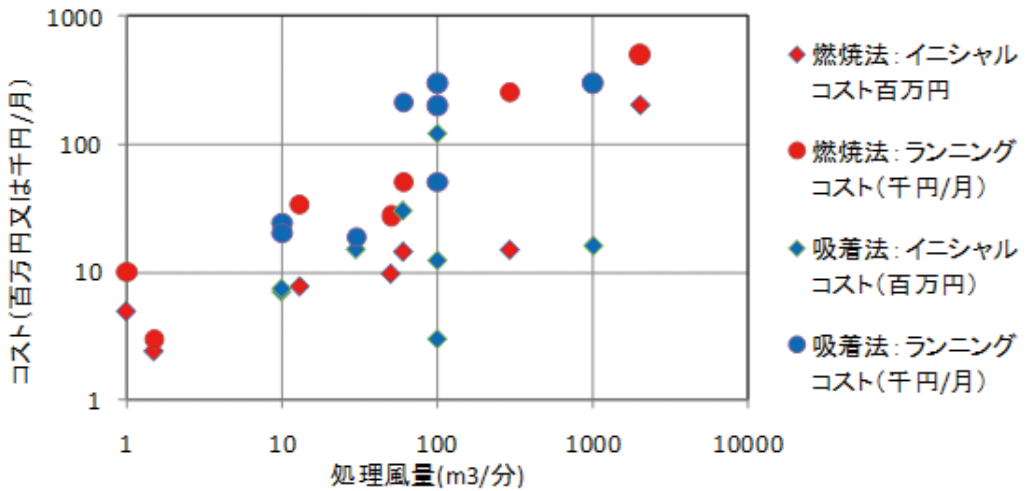


図 1.2.5.1 市販処理装置のイニシャルコスト (単位 100 万円) とランニングコスト (単位 1 千円/月) の企業発表値

((独) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)、「VOC 排出削減支援ツール」、<http://www.voc-info.jp/> (2011/02/10 確認) より数値引用、2014/01/16 現在休止中)

2.5.2 VOC 濃度による処理費用の違い

VOC の処理コストは方式や濃度によっても大きく異なります。大風量、低濃度の VOC を発生する場所が、塗装ブース、グラビア印刷、繊維強化プラスチック (Fiber Reinforced Plastics, FRP) の製造・加工現場などにあります。FRP の製造・加工で発生する VOC は主にスチレンで (Styrene: $C_6H_5C_2H_3$ 、分子量 104、沸点 $145^{\circ}C$)、塗装の多く使用される溶剤であるトルエン (Toluene: $C_6H_5CH_3$ 、分子量 92、沸点 $111^{\circ}C$) と似た性質を持っています。United States Environmental Protection Agency のレポートが大風量低濃度スチレンの処理コストを報告してい

ます¹⁾。

その報告から作成した年間 20 トン処理した場合のスチレン濃度 1 kg 当たりの回収コストを図 1.2.5.2 に示します。縦軸の処理コストは 1 ドル 90 円で円に換算したものです。濃度が低くなると kg 当たりの処理費用が急激に上昇することが分かります。中小塗装工場の塗装ブースの排気中の VOC は、本プログラムで実施した工場調査ではトルエン換算で平均 38ppm (全炭素量で 266ppmC) でしたので、この図の曲線には乗らないほど低濃度で濃度ゼロの近傍です。更に、中小企業の塗装ブース 1 台の年間 VOC 処理量は、このグラフの 1/10 である 2 トン/年程度なので単位重量当たりの処理コストはより高く

なります。処理コストを下げるためには、塗装、FRP 製造、グラビア印刷などの工場では、VOC 処理装置の前段に濃縮装置

を付けることを検討すべきでしょう。VOC 濃縮装置は高額ですが、処理風量を1/5～1/20に減少させることができます。

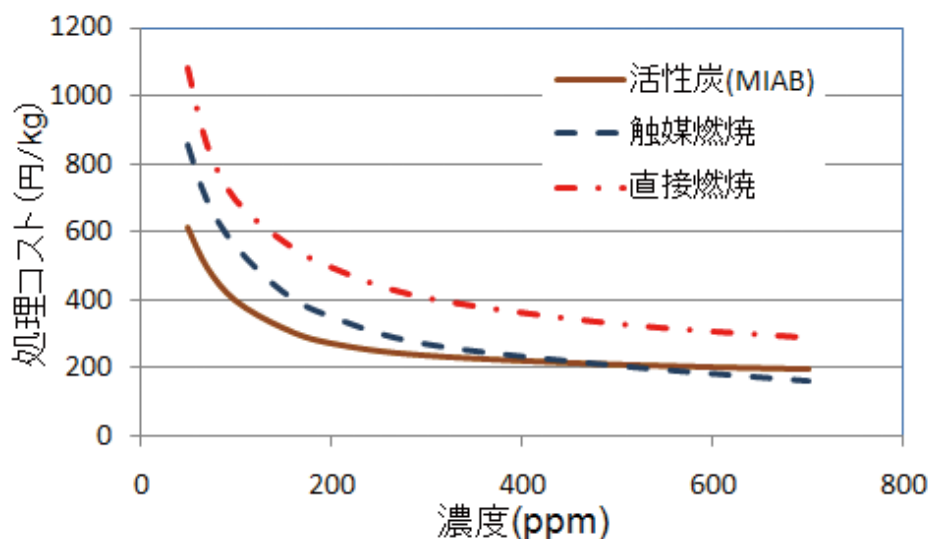


図 1.2.5.2 スチレンの濃度と回収コスト (年間 20 トン排出を仮定)

(引用：United States Environmental Protection Agency, “Assessment of Styrene Emission Controls for FRP/C and Boat Building Industries”, National Risk Management Research Laboratory, EPA-600/R-96-106, September (1996))

引用文献

1. United States Environmental Protection Agency, “Assessment of Styrene Emission Controls for FRP/C and Boat Building Industries”, National Risk Management Research Laboratory, EPA-600/R-96-106, September (1996)

第3章 VOC および関連項目の測定方法

本章では、VOC 排出対策を評価するのに必要な VOC および関連する項目の測定方法について述べます。測定すべき項目は環境によって異なります (図 1.3.1.1)。そのため、排出口、作業環境、大気環境、室内環境それぞれについて、測定項目とその測定方法をまとめました (表 1.3.1.1)。

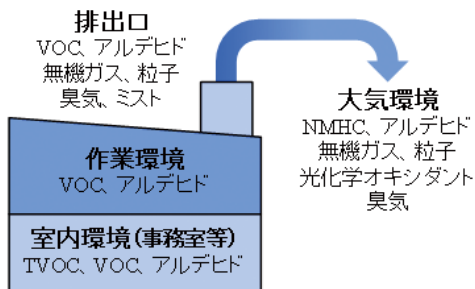


図 1.3.1.1 環境ごとの測定項目

表 1.3.1.1 環境ごとの測定項目とその測定方法

測定環境	測定物質	規制値等	代表的な測定法
排出口	VOC*	排出基準	FID、NDIR (公定法)
	VOC、アルデヒド類成分**		GC/MS、HPLC
	無機ガス		GC-FID、TCD、イオンクロマトグラフ法
	粒子		重量法 (JIS Z 8808 によるばいじん測定)
	臭気	気体排出口 (2号規制)	三点比較式臭袋法
	排気風量		ピトー管、熱式風速計
作業環境	VOC*	-	FID、NDIR
	VOC、アルデヒド類成分**	作業環境評価基準	GC/MS、HPLC
大気環境	NMHC	環境基準等	FID
	VOC、アルデヒド類成分**		溶液導電率法、吸光光度法、NDIR
	無機ガス		GC-FID、TCD、イオンクロマトグラフ法
	粒子		重量法、β線吸収法、光散乱法
	光化学オキシダント		紫外線吸収法、吸光光度法
	臭気	敷地境界線上 (1号規制)	三点比較式臭袋法
室内環境	VOC、アルデヒド類成分**	室内濃度指針値	GC/MS、HPLC
	TVOC***	室内濃度暫定目標値	GC/MS

*VOCの総量を表します。

**VOCとアルデヒド類の各成分を表します。

*** 室内環境におけるVOCの総量は、TVOCとしました。

3.1 排出口における測定

大気汚染防止法では、排出口におけるVOCの測定が義務付けられています。しかし、VOCは様々な成分を含むため、環境への影響を考える際は、その成分を明らかにすることが重要となります。特に、VOC処理装置による燃焼・分解を行った場合は、アルデヒド類が生成したり、無機ガスが発生したりする可能性があります。また、排出口から発生するVOCは悪臭の原因となることがあります。本項では、排出口におけるVOCの測定法に加え、関連して排出される物質（VOC、アルデヒド類成分、無機ガス、粒子、臭気）の測定方法について説明します。また、排出口における排気風量の測定方法についても記載しました。

3.1.1 VOC

大気汚染防止法による法規制の対象となっているVOC排出者は、年2回以上のVOC排出濃度の測定が義務付けられています。その測定法として、環境省告示による測定方法（公定法）が定められています。また、公定法以外の簡易測定法もあります。ここでは、公定法と簡易測定法について述べます。

（ア）公定法

（1）排出ガスのサンプリング¹⁾

排出ガスのサンプリングには、試料採取管、捕集バッグ、吸引用気密容器、流量調整バルブ、吸引ポンプ、流量計等を用います（図1.3.1.2）。サンプリングは、吸引ポンプによって気密容器の圧力を低くすることにより、排出ガスを捕集バッグに採取します。ダクトの試料採取位置は、JIS K 0095（排ガス試料採取方法²⁾）に規定されている方法によります。

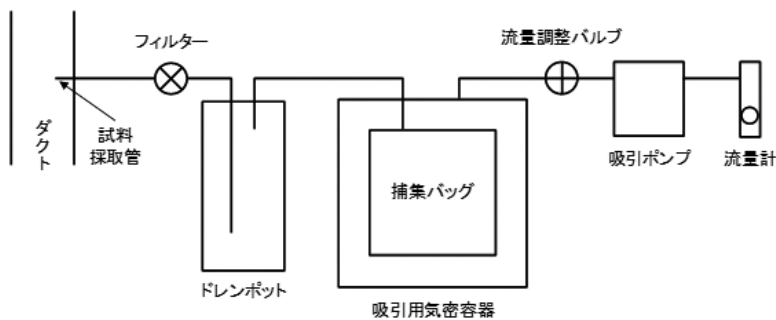


図 1.3.1.2 排気ダクトからの排出ガスのサンプリング

（転載：環境省、「VOC濃度の測定法」、環境省ホームページ、<http://www.env.go.jp/air/osen/voc/sokuteiho.html>、2014/01/16 確認）

(2) VOC 濃度の測定方法

排ガス中の VOC 濃度レベルに合わせて、直接もしくは希釈して、排ガスを分析計に導入します。VOC 濃度の測定には、触媒酸化 - 非分散形赤外線分析計 (NDIR) か水素炎イオン化形分析計 (FID) のどちらかの分析計を用います。

触媒酸化 - 非分散形赤外線分析計

(NDIR ; Non Dispersive Infrared)

NDIR は、VOC を触媒で酸化したときに発生する CO₂ の濃度を測定することで、VOC 濃度 (炭素換算濃度、ppmC) を求める装置です (図 1.3.1.3)。CO₂ の濃度は赤外線吸収強度により測定します。実際の試料ガス中にはもともと CO₂ が存在

するため、触媒の前後での CO₂ 濃度を測定し、その差を求めて VOC 濃度とします。なお公定法では、NDIR は燃焼過程を経たガスを含む排出ガス中 VOC の測定には用いないこととされています。なお、NDIR は、平成 24 年に ISO 規格 (ISO 13199:2012 Stationary source emissions -- Determination of total volatile organic compounds (TVOCs) in waste gases from non-combustion processes -- Non-dispersive infrared analyser equipped with catalytic converter) において、排ガス中の VOC 濃度の測定法として採用されました。(地独)東京都立産業技術研究センターは、本規格化に際し測定データを提供しております。

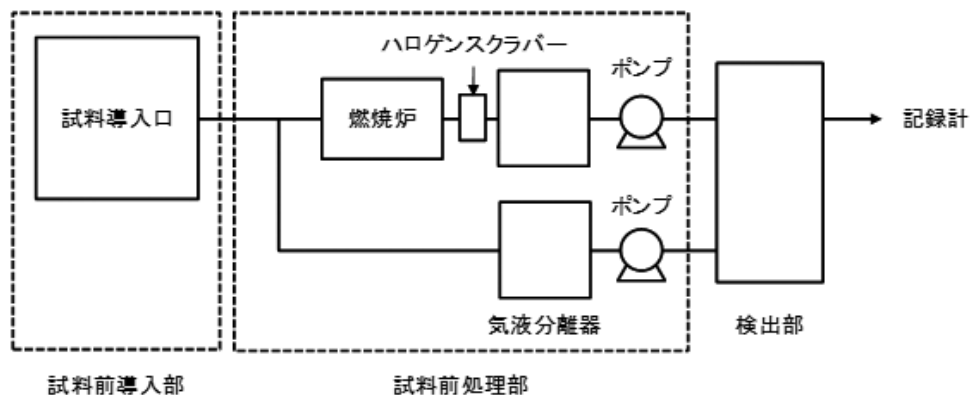


図 1.3.1.3 NDIR の構成例

(転載：環境省、「VOC 濃度の測定法」、環境省ホームページ、<http://www.env.go.jp/air/osen/voc/sokuteiho.html>、2014/01/16 確認)

水素炎イオン化形分析計

(FID ; Flame Ionization Detector)

FID は、VOC を水素炎中で燃焼するこ

とによって発生するイオンを電極で検出する装置です (図 1.3.1.4)。NDIR と同様、炭素換算濃度 (ppmC) で表わされます。

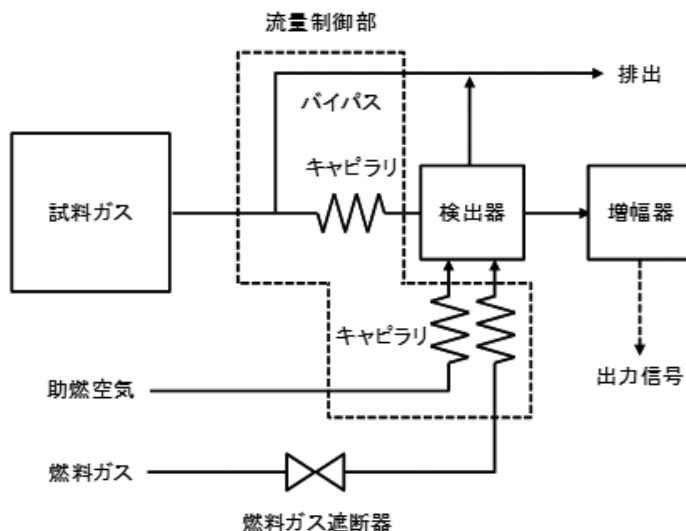


図 1.3.14 FIDの構成例

(転載：環境省、「中央環境審議会大気環境部会 揮発性有機化合物測定方法専門委員会(第2回) 議事次第・資料 資料2 揮発性有機化合物の分析方法」、環境省ホームページ、<http://www.env.go.jp/council/07air/y075-02.html>、2014/01/16 確認)

(3) 除外物質の測定方法¹⁾

VOC 排出施設において大気汚染防止法で規定された VOC から除く物質(除外物質：メタンおよびフロン類)を使用もしくは発生している場合は、その濃度を測定し、上記の方法で測定した VOC 濃度から差し引きます。メタンは、捕集バッグを用いて採取後、FID を用いるガスクロマトグラフ法(GC-FID)により測定します。フロン類は、捕集バッグを用いて採取後、GC-FID、電子捕獲検出器を用いるガスクロマトグラフ法(GC-ECD)または、質量分析器を用いるガスクロマトグラフ法(GC-MS)により測定します。

(イ) 簡易測定法

排出抑制対策のために VOC 排出状況

を把握したり、処理装置の処理性能を評価したりするための VOC 測定方法として、試料採取にバッグを用いずに連続測定する方法や、**公定法**で規定されていない簡易な測定機を用いた測定方法があります。環境省では、簡易測定法に該当する測定機として、**光イオン化検出法(PID)**、**FID**、**赤外線分光式吸収法**、**高分子薄膜の膨潤に基づく干渉増幅反射法(IER法)**、**触媒酸化とCO₂センサを組合せたもの**、**半導体ガスセンサ**、**ガスクロマトグラフ法(半導体センサ)**について紹介しています³⁾。

(ウ) 分析計の性能比較

分析計はそれぞれ性能が異なるため、測定目的に応じた選択が必要です。特に分析計の感度は、VOCの種類によっ

て異なる場合があります。環境省では、NDIR、FID、PID について、主要 VOC 成分に対する相対感度特性を測定しています⁴⁾。その結果、NDIR はどの VOC に対しても同様の感度を示すのに対し、FID はアルデヒドやアルコールに対して感度が

低くなります(図 1.3.1.6)。一方、PID は VOC の種類によって感度が大きく異なり、芳香族炭化水素には良い感度を示すのに対し、脂肪族炭化水素やアルデヒド類の感度が低いという特徴があります。

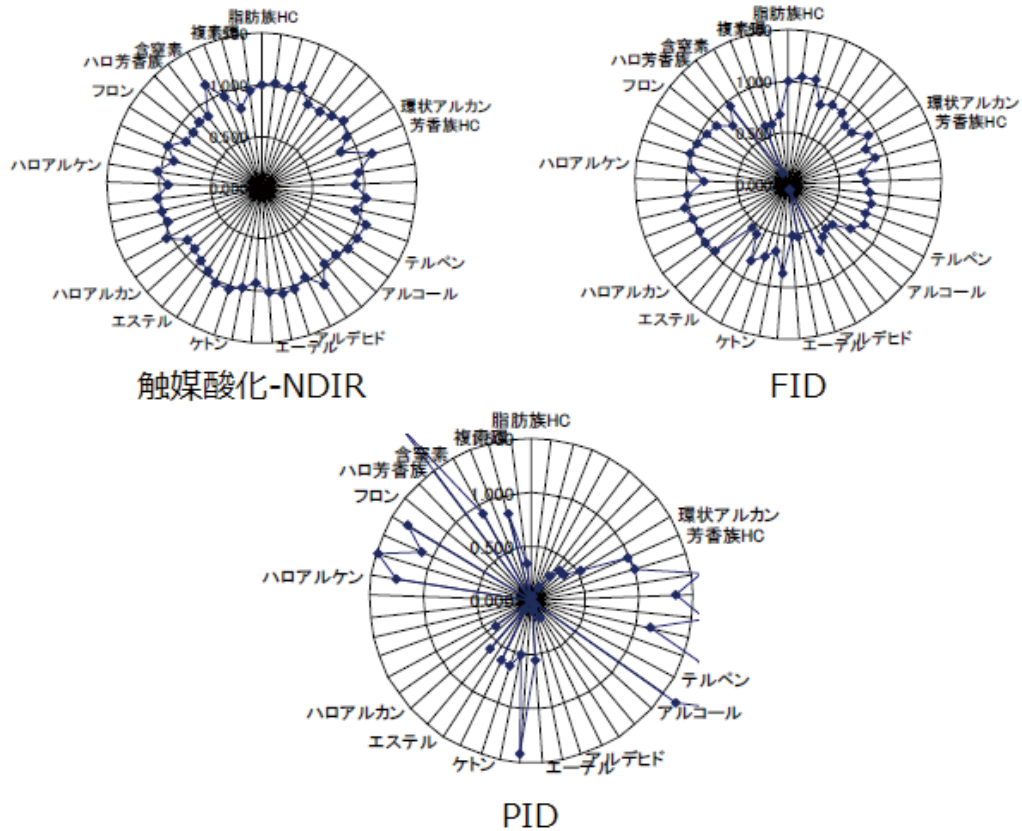


図 1.3.1.6 分析計の VOC の種類による感度の違い

転載：環境省、「中央環境審議会大気環境部会揮発性有機化合物測定方法専門委員会（第 2 回）議事次第・資料 揮発性有機化合物測定機に関する調査結果」2004/09/24、環境省ホームページ、<http://www.env.go.jp/council/07air/y075-02.html>、2014/01/16 確認

また、環境省の環境技術実証事業では、平成 21 年度から新たな技術分野として「VOC 簡易測定技術」を取り上げ、VOC 簡易測定の有用性の技術情報などを実証・

公表しています⁵⁾。現在、触媒酸化 - 検知管方式、IER 法、酸化物半導体式ガスセンサ、FID の実証試験の結果が紹介されています。

3.1.2 VOC、アルデヒド類成分

排出口におけるVOCは、多種類のVOCによって構成され、その成分は事業所によって異なります。したがって、排出されるVOCの有害性や大気汚染などの環境負荷を評価するためには、VOC成分を明らかにすることが必要です。

VOC成分のうち、排出基準が定められている指定物質（テトラクロロエチレン、トリクロロエチレン及びベンゼン）（1.5.1（イ））については、その測定法が環境省の「[有害大気汚染物質測定方法マニュアル](#)」の「第2編 排出ガス中の指定物質の測定方法マニュアル」⁶⁾に記載されています。一方、排出ガス中のその他のVOC成分の測定方法は定められていませんが、環境省の「[有害大気汚染物質測定方法マニュアル](#)」に記載されている環境大気の測定方法を参考にすることができます。例えば、有害大気汚染物質に含まれるVOCに関しては、「[有害大気汚染物質測定方法マニュアル 第2部 有機化合物の容器採取・固体吸着による測定方法及び第4部 有機化合物の反応捕集による測定方法](#)」⁶⁾に記載されています。また、固定発生源からの排出量の多い21物質（アセトン等極性7物質及びトルエン等14物質）のVOCの採取、測定方法等については、「[環境大気中の揮発性有機化合物（VOC）濃度モニタリングに係る測定方法マニユア](#)

ル」に記載されています⁷⁾。表1.3.1.2にこれらの測定法の抜粋を示しました。この表から、測定法はベンゼン等VOCを測定するための「容器採取法または固体吸着による測定法」とアルデヒド類を測定するための「DNPHを用いた反応捕集による測定法」に大きく分けられることが分かります。

表 1.3.1.2 測定対象物質とその測定方法 (抜粋)

(転載：環境省、「有害大気汚染物質測定方法マニュアル、環境省ホームページ、<http://www.env.go.jp/air/osen/manual2/index.html>、2014/01/16 確認) 及び 環境省、「環境大気中の揮発性有機化合物 (VOC) 濃度モニタリングに係る測定方法マニュアル」、環境省ホームページ、http://www.env.go.jp/air/osen/manual_voc/index.html、2014/01/16 確認)

	試料採取 - 前処理方法					分析方法			
	容器採取法	固体吸着 - 加熱脱着法	固体吸着 - 溶媒抽出法	固相 (DNPH) 捕集 - 溶媒抽出法	液相 (DNPH) 吸収 - 溶媒抽出法	ガスクロマトグラフ質量分析法	ガスクロマトグラフ (熱イオン化検出器法)	高速液体クロマトグラフ法	高速液体クロマトグラフ質量分析法
アクリロニトリル	○					○			
塩化ビニルモノマー	○	○				○			
クロロホルム	○	○	○			○			
1,2-ジクロロエタン	○	○	○			○			
ジクロロメタン	○	○	○			○			
テトラクロロエチレン	○	○	○			○			
トリクロロエチレン	○	○	○			○			
1,3-ブタジエン	○					○			
ベンゼン	○		○			○			
その他の VOCs	○					○			
アセトン等極性 7 物質 *		○				○			
トルエン等極性 14 物質 **	○					○			
アルデヒド類 (ホルムアルデヒド、アセトアルデヒド)				○		○	○	○	○
					○			○	

* アセトン、イソプロピルアルコール、メチルエチルケトン、酢酸エチル、*n*-ブタノール、メチルイソブチルケトン、酢酸ブチル

** トルエン、*m*-キシレン、*p*-キシレン、*o*-キシレン、1,3,5-トリメチルベンゼン、デカン、ジクロロメタン、*n*-ブタン、イソブタン、トリクロロエチレン、*n*-ヘキサン、*n*-ペンタン、*cis*-2-ブテン、ウンデカン

3.1.3 無機ガス

事業所の排出口からは、大気汚染物質として従来から懸念されている無機ガスが排出されることがあります。VOC 排出施設においても、VOC 処理過程において無機ガスが生成することもあり、必要に応じて無機ガス成分を測定することが望ましいといえます。本項では、無機ガスとして、一酸化炭素(CO)、硫黄酸化物(SO_x)、窒素酸化物(NO_x)、塩化水素(HCl)に

ついて、それぞれ発生源⁸⁾と測定法をまとめました。排ガス中の無機ガスの測定方法は、JISにより定められていて⁹⁻¹⁴⁾、このうち、イオンクロマトグラフ法を用いると、NO_x、SO_x及びHClを同時に測定することができます(表 1.3.1.3)。

(ア) CO

COによる大気汚染の大部分は自動車排出ガスによるものと考えられています。燃料等の不完全燃焼によって発生します。分

析法は JIS K 0098「排ガス中の一酸化炭素分析方法」⁹⁾ に示されています。

(イ) SO_x

SO_x は、石油や石炭等の硫黄分を含む燃料等の燃焼によって生成します。その大部分は、SO₂ です。主要な発生源は、重油を使用するボイラー、加熱炉を持つ工場・事業場です。また、ごみ焼却設備において、紙類、たんぱく質系厨芥類、加硫ゴム等を焼却するときにも発生します。分析方法は、化学分析方法 (JIS K 0103「排ガス中の硫黄酸化物分析方法」¹⁰⁾ と連続測定法 (JIS B 7981「排ガス中の二酸化硫黄自動計測システム及び自動計測器」¹¹⁾ に分けられます。

(ウ) NO_x

一般に二酸化窒素 (NO₂) と一酸化窒素 (NO) を合わせて NO_x と呼びます。燃料などの燃焼により NO が生成し、大気中でオゾンなどとの反応によって酸化されて NO₂ になります。燃焼過程においては、燃焼用空気中の N₂ と O₂ が高温状態で反応して生成するサーマル NO_x と、燃料中の N 分が燃焼中に酸化されて生成するフューエル NO_x の 2 種類が生成します。主な排出源は、自動車及び工場の燃焼設備で、ビル、家庭の厨房・暖房施設からも排出されます。廃棄物焼却によってはフューエル NO_x が生成するといわれてい

ます。

VOC 処理装置のうち、直接燃焼装置は、NO_x の発生が課題とされています。一方、蓄熱式燃焼装置、触媒燃焼装置は NO_x の発生が少ないといわれています。分析方法は、化学分析方法 (JIS K 0104「排ガス中の窒素酸化物分析方法」¹²⁾ と連続測定法 (JIS B 7982「排ガス中の窒素酸化物自動計測システム及び自動計測器」¹³⁾ に分けられます。

(エ) HCl

HCl は、工業的には、含塩素化合物の製造及びアルコール類などの中間体の製造を目的として炭化水素を塩素化する際に副生することがあります。一例として、かつて塩化ビニルは、エチレンと塩素から 1,2-ジクロロエタンを作ってこれを熱分解して製造していましたが、この工程の排ガス中に未回収の HCl が残留することがありました。また、代替フロン (HCFC) のフッ素化の過程でも HCl が生成する例があります。一方、ごみ焼却設備においては、塩化ビニル樹脂等の塩素系プラスチックを焼却するときに発生するほか、食塩等の無機塩素化合物を焼却する際、高温域において HCl ガスが発生します。分析法として、JIS K 0107「排出ガス中の塩化水素分析法」¹⁴⁾ があります。

表 1.3.1.3 無機ガスの種類と測定法

無機ガスの種類	発生源 (対象とする排ガス)	測定法	対応する JIS
CO	燃料の燃焼 金属精錬 化学反応工程	ガスクロマトグラフ法 検知管法 赤外線吸収法 (連続測定可) 定電位電解法 (連続測定可)	JIS K 0098
SOx	燃料などの燃焼 鉱石のばい燃 金属の精錬 硫黄製造工程 その他の化学反応 脱硫工程	イオンクロマトグラフ法 沈殿滴定法 (アルセナゾIII法)	JIS K 0103 (化学分析法)
		溶液導電率方式 赤外線吸収方式 紫外線吸収方式 紫外線蛍光方式 干渉分光方式	JIS B 7981 (連続測定法)
NOx	燃料などの燃焼 金属表面処理工程 無機及び有機化学反応工程 脱硝工程	亜鉛還元ナフチルエチレンジアミン 吸光光度法 (Zn-NEDA 法) ナフチルエチレンジアミン吸光光度法 (NEDA 法) イオンクロマトグラフ法 フェノールジスルホン酸吸光光度法 (PDS 法) ガルツマン吸光光度法	JIS K 0104 (化学分析法)
		化学発光方式 赤外線吸収方式 紫外線吸収方式 差分光吸収方式	JIS B 7982 (連続測定法)
HCl	燃焼 化学反応	イオンクロマトグラフ法 硝酸銀滴定法 イオン電極法 イオン電極連続分析法	JIS K 0107

3.1.4 粒子

VOC は排出口から排出される場合には気体ですので、粒子の測定は直接的には関係がありません。しかし、VOC と同時に顔料などの固形物が排出される場合や、処理装置で粒子が生成される可能性もありますので、ここでは排出口において使用できる粒子の測定方法について記載

します。なお、塗装現場で問題とされるような、いわゆる「塗装ミスト」については、[2 塗装編 5.4](#) を参照してください。

大気汚染防止法では、ばい煙発生施設における粒子 (ばいじん) の排出基準を定めています。測定方法は、JIS Z 8808 「排ガス中のダスト濃度の測定方法」¹⁵⁾ に規定されており、これは粒子をフィルタに採取しその質量を秤量する方法 (重量法)

です。その他に、公定法ではありませんが、事業所においてバグフィルタなどの集塵装置の管理のためには、ダストモニターと呼ばれる光学式や摩擦電荷方式などの連続測定できるものが使用されています。

研究的には粒子を粒径別に測定する場合もあります。この場合には、インパクターやサイクロンなどの分粒装置を用いてフィルタに採取し、質量を秤量する方法があります。また、平成21年にPM2.5（粒径が2.5 μmより小さい粒子）が環境基準に設定されたことから、発生源におけるPM2.5の測定方法として、バーチャルインパクターやカスケードインパクターがISOにおいて検討されています^{16,17)}。

PM2.5より粒径の小さいナノ粒子レベルの測定には、ELPIやSMPSといった装置が必要となりますが、多くは環境測定に使用されているので、詳細は3.3 大気環境における測定 の3.3.4項に記載します。

3.1.5 臭気

臭気は主観的なものですが、悪臭苦情に対応するためには客観的に分かるように数値化する必要があります。悪臭防止法¹⁸⁾では、「特定悪臭物質濃度」と「臭気指数」のどちらかで臭気を評価します。特定悪臭物質濃度は、機器分析法により測定した臭気物質の濃度です。一方、臭

気指数は、嗅覚測定法（人がにおいを嗅いで測定する方法）によって算出します。都道府県知事（または政令市長）は、評価方法をどちらか指定し、規制基準を敷地境界線上（1号規制）、気体排出口（2号規制）、排出水（3号規制）で定めることになっています。気体排出口（2号規制）は、臭気が敷地境界外の着地点において1号基準以下になるために、排出口において満たさなければならない臭気の排出基準です。なお、測定した特定悪臭物質濃度及び臭気指数の評価方法に関しては、第4章の4.4.3項を参照してください。

(ア) 特定悪臭物質濃度

特定悪臭物質濃度の測定方法は、環境庁告示第9号¹⁹⁾により、悪臭物質ごとに定められています。排出口では、特定悪臭物質22種のうち13物質が規制対象となっていて、メチルメルカプタン、硫化メチル、二硫化メチル、アセトアルデヒド、スチレン、プロピオン酸、ノルマル酪酸、ノルマル吉草酸、イソ吉草酸は、規制対象外です（表1.3.1.4）。なお、敷地境界線での測定方法の概要は、表1.3.3.1を参照してください。

表 1.3.1.4 特定悪臭物質（13 物質）の測定方法（排出口）の概要

（転載：環境省、「環境庁告示 9 号 特定悪臭物質の測定の方法」、環境省ホームページ、<http://www.env.go.jp/hourei/syousai.php?id=10000022>、2014/01/16 確認）

特定悪臭物質	試料採取方法	分析方法
アンモニア	JIS K 0099「排ガス中のアンモニア分析方法」による	
硫化水素	バッグサンプリング	GC-FPD
トリメチルアミン	吸収瓶による捕集（5 分間）	GC-FID
プロピオンアルデヒド n-ブチルアルデヒド イソブチルアルデヒド n-バレルアルデヒド イソバレルアルデヒド	バッグサンプリング	GC-FTD (アルカリ熱イオン化検出器) GC-MS
イソブタノール 酢酸エチル メチルイソブチルケトン トルエン キシレン	バッグサンプリング	GC-FID

(イ) 臭気指数

特定悪臭物質以外の物質による臭気や複数の悪臭物質による複合臭は、特定悪臭物質濃度の測定では評価できません。この場合は臭気指数による評価が有効です。臭気指数は、実際に人がにおいを嗅いで求めるため、複合臭にも対応でき、実際の悪臭の被害感と一致する結果を得やすいという特徴があります。臭気指数は三点比較式臭袋法により求めます。本項では、排出口における三点比較式臭袋法に基づく臭気指数の求め方の概要を示します。詳細は平成 7 年環境庁告示 63 号²⁰⁾や嗅覚測定法マニュアル²¹⁾に記載

されています。なお、悪臭防止法に基づいた臭気指数の測定は、臭気判定士により行われます。臭気判定士が測定を行う臭気測定認定事業所のリスト²²⁾は、[におい・かおり環境協会の HP](#) で公開されています。

(1) サンプリング

排出口試料のサンプリングには、直接採取法（ポンプを通して試料採取袋に直接試料を採取する方法）か、間接採取法（ポンプを用いて吸引ケース内を減圧することにより試料採取袋に間接的に試料を採取する方法）を用います。

(2) 判定試験

臭気がなく、パネル（嗅覚を用いて臭気の有無を判定する者）が落ち着ける部屋に6名以上のパネルを集めます。オペレーター（パネルを用いて臭気指数等の測定を行う者）は、希釈した試料を入れたにおい袋1つと無臭空気を入れた袋（ブランク）2つをパネルの人数分調製してパネルに配布し、パネルに嗅いでもらい、試料を入れたにおい袋を選ばせます。正しく選定できたパネルには、更に希釈した（おおむね3倍）試料を含むセットから選定してもらい、不正解が不明になるまで、判定試験を行います。

(3) 臭気指数の算出

次の式によりに各パネルの試料の希釈倍数に係る閾値を求めます。パネルAの場合、

$$X_a = (\log M_1 + \log M_0) / 2$$

この式において、 X_a はパネルAの試料の閾値、 M_1 は当該パネルAが「正解」である希釈倍数の閾値、 M_0 はパネルAが「不正解が不明」である希釈倍数の閾値です。

次に、各パネルについて算出した閾値のうち最大の値と最少の値をそれぞれ一つずつ除き、その他の中間の値を平均し

たものが、パネル全体の閾値(X)となります。臭気指数(Y)と臭気濃度(C)は、以下の式で求めます。

$$Y = 10X$$

$$C = 10^{Y/10}$$

また、排出口高さが15 m以上の場合は、臭気排出強度(OER: odor emission rate)を算出します。臭気排出強度は、臭気濃度に気体排出口における排気風量(m^3/min)を乗じて求めます。複数の排出口がある場合は、全ての気体排出口の臭気排出強度を合計したもの(TOER: total odor emission rate)を算出します。

なお、環境試料の臭気指数の測定方法は、[3.3.6\(イ\)](#)を参照してください。

3.1.6 排気風量

排気風量は、排気口から排出される大気汚染物質の総量を知るために必要です。また、排気が十分にされていないと作業環境の汚染物質濃度が高くなる原因となりますので、排気風量の定期的な測定が必要です。

排気風量を測定するためには、ダクト内の排ガスの風速を**ピトー管**または**熱式風速計**を用いて測定します。同時にダクトの断面積を計測します。断面積と風速か

ら排気風量は次式により算出します。

なお、排出ガス量の測定方法は、JIS Z

排ガス量 (m³/h) = ダクト断面積 (m²)

8808「排ガス中のダスト濃度の測定方法」

×風速 (m/s) × 60²

¹⁵⁾ に規定されています。

引用文献

1. 環境省、「VOC濃度の測定法」、環境省ホームページ、<http://www.env.go.jp/air/osen/voc/sokuteiho.html>、2014/01/16 確認
2. JIS K 0095「排ガス試料採取方法」
3. 環境省、「関連資料、VOC用測定機（公定法、簡易測定法）」、環境省ホームページ、<http://www.env.go.jp/air/osen/voc/materials.html>、2014/01/16 確認
4. 環境省、「中央環境審議会大気環境部会揮発性有機化合物測定方法専門委員会（第2回）議事次第・資料 揮発性有機化合物測定機に関する調査結果」、環境省ホームページ、<http://www.env.go.jp/council/07air/y075-02.html>、2014/01/16 確認
5. 環境省、「環境技術実証事業」、環境省ホームページ、<http://www.env.go.jp/policy/etv/field/f07/p3.html>、2014/01/16 確認
6. 環境省、「有害大気汚染物質測定方法マニュアル」、環境省ホームページ、<http://www.env.go.jp/air/osen/manual2/index.html>、2014/01/16 確認
7. 環境省、「環境大気中の揮発性有機化合物(VOC)濃度モニタリングに係る測定方法マニュアル」、環境省ホームページ、http://www.env.go.jp/air/osen/manual_voc/index.html、2014/01/16 確認
8. 産業環境管理協会 公害防止の技術と法規編集委員会、「新・公害防止の技術と法規2009」、丸善株式会社、2009
9. JIS K 0098「排ガス中の一酸化炭素分析方法」
10. JIS K 0103「排ガス中の硫黄酸化物分析方法」
11. JIS B 7981「排ガス中の二酸化硫黄自動計測システム及び自動計測器」
12. JIS K 0104「排ガス中の窒素酸化物分析方法」
13. JIS B 7982「排ガス中の窒素酸化物自動計測システム及び自動計測器」
14. JIS K 0107「排ガス中の塩化水素分析方法」
15. JIS Z 8808「排ガス中のダスト濃度の測定方法」
16. ISO 23210:2009 Stationary source emissions -- Determination of PM10/PM2,5 mass concentration in flue gas -- Measurement at low concentrations by use of impactors
17. ISO/DIS 13271 Stationary source emissions -- Determination of PM10/PM2,5 mass concentration in flue gas -- Measurement at higher concentrations by use of virtual impactors
18. 悪臭法令研究会、「ハンドブック 悪臭防止法 四訂版」、株式会社ぎょうせい、2008
19. 環境省、「環境庁告示9号 特定悪臭物質の測定の方法」、環境省ホームページ、<http://www.env.go.jp/hourei/syousai.php?id=10000022>、2014/01/16 確認
20. 環境省、「平成7年環境庁告示63号 臭気指数及び臭気排出強度の算出の方法」、環境省ホームページ、<http://www.env.go.jp/hourei/syousai.php?id=10000019>、2014/01/16 確認
21. 環境省管理局大気生活環境室、「嗅覚測定法マニュアル 第5版」、(社)におい・かおり環境協会、2005
22. (社)におい・かおり環境協会、「臭気測定認定事業所」、(社)におい・かおり環境協会ホームページ、<http://www.orea.or.jp/data/ninteilist.html>、2014/01/16 確認

3.2 作業環境における測定

3.2.1 VOC

作業環境の改善のためには、VOCの発生源を探索することが重要です。そのため、測定の法として、3.1.1(イ)で紹介した簡易測定法が適しています。環境省はホームページでVOCの簡易測定法に関して、作業環境用の分析計についても紹介しています¹⁾。また、ホルムアルデヒドに関しては、東京都地域結集型研究開発プログラムにおいて、酵素を用いた高感度リアルタイムセンサを開発しています。ホルムアルデヒドは管理濃度が低い(0.1ppm)ので、本プログラムのセンサは作業環境の管理、改善に役立つと考えられます。

3.2.2 VOC、アルデヒド類成分

作業環境においては、作業場で使用されている溶剤等の気中濃度を測定し、作業員への健康影響がないように適切な管理を行う必要があります。労働安全衛生法では、作業環境の状況を把握するため、特定の作業場について作業環境測定を実施することとその結果を記録することが義務付けられています。VOCなどの特定化学物質及び有機溶剤を製造し、または取り扱う屋内作業場等は、6ヶ月以内ごとに1回、**作業環境測定士**が気中の濃度を

測定し、3年間記録を保存(特定の物質については30年間)することが義務付けられています。また、測定結果が作業環境評価基準の管理濃度(第1章 1.3.1(ウ))に比べて高い場合は、適切な改善措置を講じることが定められています。

作業環境測定ガイドブック 5 有機溶剤関係²⁾に記載されている有機溶剤の測定方法を表 1.3.2.1 に示しました。また、特定化学物質等のうちベンゼンの測定方法として、直接捕集 - ガスクロマトグラフ分析法、固体捕集法 - ガスクロマトグラフ分析法、液体捕集法 - 吸光度分析法、検知管法、ホルムアルデヒドの測定法として、固体捕集法 - 高速液体クロマトグラフ分析法、検知管法が挙げられています³⁾。

表 1.3.2.1 有機溶剤の測定方法

(参考：日本作業環境測定協会、「作業環境測定ガイドブック 5 有機溶剤関係 第3版第4刷」、新日本印刷株式会社、2011、より作成)

物質の種類		直接捕集法 - ガスクロマト グラフ分析法	固体捕集法 (シリカゲル管) ガスクロマト グラフ分析法	固体捕集法 (活性炭管) ガスクロマト グラフ分析法	検知管法	吸光光度 分析法
35	アセトン	○	○		○	○
36	イソブチルアルコール	○	○	○		
37	イソプロピルアルコール	○	○	○	○	○
38	イソペンチルアルコール (別名イソアミルアルコール)	○	○	○	○	
39	エチルエーテル	○	○	○	○	
45	キシレン	○	○	○	○	○
65	スチレン	○	○	○	○	○
67	テトラクロロエチレン (別名パークロロエチレン)	○	○	○	○	
70	トリクロロエチレン	○	○	○	○	○
71	トルエン	○	○	○	○	○
73	ノルマルヘキサン	○	○	○		
76	メタノール	○	○			○
77	メチルイソブチルケトン	○	○	○		○
78	メチルエチルケトン	○	○	○		○
81	メチル-ノルマル-ブチルケトン	○	○	○		

引用文献

1. 環境省、「関連資料、VOC用測定機(公定法、簡易測定法)」、環境省ホームページ、<http://www.env.go.jp/air/osen/voc/materials.html>、2014/01/17 確認
2. 日本作業環境測定協会、「作業環境測定ガイドブック 5 有機溶剤関係 第3版第4刷」、新日本印刷株式会社、2011
3. 日本作業環境測定協会、「作業環境測定ガイドブック 3 特定化学物質関係 第3版第3刷」、新日本印刷株式会社、2011

3.3 大気環境における測定

大気環境には、排出口や作業環境から排出されたVOC等が存在しますので、これらの測定方法は、基本的にはこれまで記載した方法と同じです。ただし、大気で希釈されて濃度が低くなるため、低濃度でも測定できる測定法が必要となります。また、大気化学反応により光化学オキシダントやSPMが生成するため、これらの測定も必要です。

大気環境においては、大気汚染防止法に基づいて、大気汚染常時監視測定局にて環境大気汚染状況を常時監視(24時間測定)しています。測定局は、一般環境大気測定局(一般局)と幹線道路を対象とした自動車排出ガス測定局(自排局)の2種類があり、平成22年度末で一般局は全国に1503局、自排局は429局あります。測定項目は、非メタン炭化水素(NMHC)、SPM、PM_{2.5}、SO_x、NO_x、CO、光化学オキシダントなどです。この項では、測定局における測定方法やその他の測定法について説明します。

3.3.1 NMHC

排出口から排出されたVOCは、大気環境中でNMHCとして検出されます。測定局において、NMHCの測定には、メタン・非メタン炭化水素測定方式(直接法)

が標準測定法として採用されています。測定方法は、NMHCとメタンをGCによって分離し、それぞれをFIDで検出する方法です。

NMHCの測定方法の詳細は、環境大気常時監視マニュアル第6版¹⁾及びJIS B 7956「大気中の炭化水素自動計測器」²⁾に記載があります。

3.3.2 VOC、アルデヒド類成分

VOC、アルデヒド成分の測定方法は、「有害大気汚染物質測定方法マニュアル 第2部 有機化合物の容器採取・固体吸着による測定方法」³⁾及び「環境大気中の揮発性有機化合物(VOC)濃度モニタリングに係る測定方法マニュアル」⁴⁾を参考にすることができます(3.1.2を参照)。

3.3.3 無機ガス

測定局で測定されている無機ガスは、SO₂、NO_x、COの3種類です。

(ア) SO₂

石油、石炭等を燃焼したときに含有される硫黄が酸化されて発生します。測定法としては、溶液導電率法(湿式測定法)と紫外線蛍光法(乾式測定法)があります。溶液導電率法は、試料大気を過酸化水素水に通してSO₂を吸収させ、生成し

た硫酸による電気導電率の変化を測定して、SO₂濃度を測定する方法です。一方、紫外線蛍光法は、試料大気に波長の短い紫外線を照射した時のSO₂の蛍光の強度を測定して、SO₂濃度を測定する方法です。

SO₂の測定方法の詳細は、環境大気常時監視マニュアル第6版¹⁾及びJIS B 7952「大気中の大気中の二酸化硫黄自動計測器」⁵⁾に記載があります。

(イ) NO_x

大気中のNO_xの多くは、自動車排ガス、燃焼炉排ガス中に含まれます。測定法としては、吸光光度法(湿式測定法)のほか、化学発光法(乾式測定法)があります。吸光光度法は、ザルツマン試薬にNO₂を吸収させたときの発色の545 nmにおける吸光度を測定し、NO₂濃度を測定する方法です。NOは、ザルツマン試薬とは反応しないので、硫酸酸性過マンガン酸カリウムの酸化液を通してNO₂に酸化した後と同様に測定します。一方、化学発光法は、試料大気中のNOとオゾンの反応により生じる化学発光強度を測定することで、NO濃度を測定する方法です。NO₂は、コンバータと呼ばれる変換器によりNOに変換して化学発光強度を測定するとNO_x濃度が測定できるため、NO濃度を差し引いて求めます。

NO_xの測定方法の詳細は、環境大気常時監視マニュアル第6版¹⁾及びJIS B

7953「大気中の窒素酸化物自動計測器」⁶⁾に記載があります。

(ウ) CO

NDIRを用いる方法が定められています。COの測定方法の詳細は、環境大気常時監視マニュアル第6版¹⁾及びJIS B 7951「大気中の一酸化炭素自動計測器」⁷⁾に記載があります。

3.3.4 粒子

VOCは排出される時点では気体ですが、大気中で粒子化されるとされており、大気中のSPMやPM2.5の削減のためにはVOCの削減も重要といわれています。ここでは、大気中の粒子を測定する方法を粒径別に記載します。

(ア) SPM

大気環境基準にあるSPMは直径が10 μm以下の粒子のことで、測定方法としては、フィルタに採取して質量を秤量する重量法(標準測定法)、または重量法と等価な値が得られる自動測定機による方法(光散乱法、圧電天びん法、若しくはβ線吸収法)とされています。このうち、大気汚染常時監視にはほとんどβ線吸収法が使われています。これは、サイクロンで分粒した粒子をテープろ紙に捕集し、ここにβ線を当てるとその吸収量が粒子

の質量に比例することを利用した測定方法です。

SPMの測定方法の詳細は、環境大気常時監視マニュアル第6版¹⁾及びJIS B 7954「大気中の浮遊粒子状物質自動計測器」⁸⁾に記載があります。

(イ) PM2.5

PM2.5は直径が2.5 μmより小さい粒子のことで、SPMよりも健康影響に密接に関与するものとして平成21年に環境基準が設定されました。大気中のPM2.5の測定方法は、フィルタに採取した粒子の質量を秤量する重量法、またはこれと等価な値が得られる自動測定機による方法とされています。自動測定機としては、環境省が標準測定法との等価性試験を行い、結果を公表しています^{9,10)}。2011年1月31日現在、等価性があると認められた機種はβ線吸収法若しくはβ線吸収法と光散乱法のハイブリッド型の装置となっています。PM2.5の測定方法の詳細は環境大気常時監視マニュアル第6版¹⁾及びJIS Z 8851「大気中のPM2.5測定用サンプラ」¹¹⁾に記載されています。

(ウ) ナノ粒子

ナノ粒子とは、一般に粒径が1～100 nm程度の粒子とされています。ナノ粒子は表面積が大きく活性が高いため産業利用も期待されていますが、粒径が非常

に小さいことから、吸入すると肺胞の奥深くまで到達し血液にまで浸透するため健康影響も懸念されています。しかし、ナノ粒子の健康影響はまだ未解明な点も多く、測定方法についても公定法はまだありません。

大気中のナノ粒子は、質量は非常に小さいものの、個数が多いため、個数濃度を測定することが一般的です。そのためには、大気中のさまざまな粒径の粒子を粒径別に分級する必要があります。分級の手法としては、荷電した粒子の電気移動度を利用する方法と、粒子の慣性力を利用する低圧インパクターを用いた方法が広く用いられています。

電気移動度を用いた分級器としては微分型電気移動度分級装置(Differential Mobility Analyzer、DMA)が多く用いられています。一般的なDMAは、荷電させた粒子を、クーロン力によって引き寄せ、下流に設けたスリットに到達した粒子のみを取り出すことにより、特定のサイズの粒子を得ることができます。また、印加電圧を変えることにより、任意のサイズの粒子を得ることができます¹²⁾。

DMAで分級した粒子個数を計測するためには、ファラデーカップエレクトロメータ(FCE)や凝縮核計数器(Condensation Nucleus Counter、CNC、凝縮粒子カウンター(CPC)とも呼ばれる)が用いられます。FCEは粒子の運んできた電荷を電流として

計測するものです。CNCは光学的に検出できないナノ粒子を、ブタノール蒸気を凝縮させて大きくし、光散乱検出器で計測する装置です。

DMAとCNCを組み合わせたものが、走査型移動度粒径測定器(Scanning Mobility Particle Sizer、SMPS)としてよく用いられています。この装置では粒径分布を得るのに通常数分間かかります。これに対し、検出器を多段のエレクトロメータにし、感度は劣るものの粒径分布をほぼリアルタイムで測定できる装置も開発されています。一方、東京都地域結集型研究開発プログラムでは、DMAとFCEとを一体化した装置を開発・商品化しました。本装置は、環境中に浮遊している1 μm 以下の微小粒子の粒径別数濃度と表面積を計測できます(図1.3.3.1)。

粒子の慣性力を利用して分級する方法としては、多段式(カスケード)インパクターがあります。通常のインパクターではノズル流速を大きくしてもナノ粒子まで分級することは難しいのですが、これを低圧下で操作することによりナノ粒子まで分級することができます。また、電子式低圧インパクター(Electrical Low Pressure Impactor、ELPI)では、コロナ放電により荷電した粒子を低圧カスケードインパクターで分級し、各段で粒子が運んだ電荷をエレクトロメータで測定することにより、粒子個数を測定できます(図1.3.3.2)。ELPIではリアルタイムで個数濃度分布を測定するとともに、インパクター

に捕集された粒子の化学分析を行うことができますが、分級精度はSMPSに比べると劣ります。



図 1.3.3.1 本事業で開発した DMA (左) と大流量型 DMA (右)
(写真提供：柴田科学株式会社)

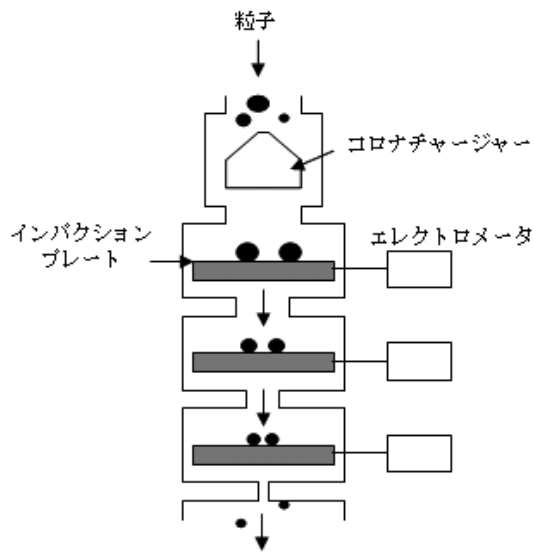


図 1.3.3.2 ELPI の原理

3.3.5 光化学オキシダント

光化学オキシダントの測定方法は、吸光光度法、電量法（湿式測定法）、紫外線吸収法、化学発光法（乾式測定法）があります。詳細は環境大気常時監視マニュアル第6版¹⁾及びJIS B 7957「大気中のオゾン及びオキシダントの自動計測器」¹³⁾に記載されています。

3.3.6 臭気

環境大気の臭気は、排出口と同様、「特定悪臭物質濃度」と「臭気指数」のどちらかで評価します（3.1.5 参照）。規制基準は、敷地境界線上（1号規制）が適用されます。

(ア) 特定悪臭物質濃度の測定方法

敷地境界線では、特定悪臭物質 22 種全てが規制対象となっています。表 1.3.3.1 に特定悪臭物質(22 物質)の測定方法(敷地境界線)¹⁴⁾を示しました。

表 1.3.3.1 特定悪臭物質(22 物質)の測定方法(敷地境界線)の概要

特定悪臭物質	試料採取方法	分析方法
アンモニア	吸収瓶による捕集(5分間)	分光光度計
メチルメルカプタン 硫化水素 硫化メチル 二硫化メチル	バッグサンプリング (6～30秒)	GC-FPD
トリメチルアミン	吸収瓶による捕集(5分間)	GC-FID
アセトアルデヒド プロピオンアルデヒド <i>n</i> -ブチルアルデヒド イソブチルアルデヒド <i>n</i> -バレルアルデヒド イソバレルアルデヒド	バッグサンプリング (6～30秒)	GC-FTD(アルカリ熱イオン化検出器) GC-MS
イソブタノール 酢酸エチル メチルイソブチルケトン トルエン スチレン キシレン	バッグサンプリング (6～30秒)	GC-FID
プロピオン酸 ノルマル酪酸 ノルマル吉草酸 イソ吉草酸	試料捕集管(5分間採取)	GC-FID

(イ) 臭気指数

環境試料の臭気指数は、基本的には排出口と同様の方法で求めることができますが、排出口と比較して濃度が小さいため、異なるサンプリング方法や判定方法が定められています。詳細は平成7年環境庁告示63号¹⁵⁾や嗅覚測定法マニュアル¹⁶⁾に記載されています。以下に概要を示します。

(1) サンプリング

環境試料は、悪臭の時間的な変動が大きいため、短時間(6～30秒)で試料を採取する必要があります。そのため、サンプリングは、直接採取法、間接採取法のほか、真空瓶法(あらかじめ内部を減圧しておいた真空瓶を用いる方法)や吸引瓶法(あらかじめ内部を減圧し、内部に試料採取袋を装着した吸引瓶を用いる方法)を用います。

(2) 判定試験

環境試料は濃度が低いため、排出口試料の判定試験では精度のよい測定値が得られません。環境試料の場合は、6人のパネルに希釈した試料を入れたにおい袋と無臭空気を入れた袋(ブランク)2つから試料を入れたにおい袋を選ばせる作業を3回行います。そして、18回の選定結果に正解1.00、不正解0.00、選定不能0.33と点数を与え、平均正解率を求めま

す。この値が0.58未満の場合は判定試験を終了します。0.58以上の場合は希釈倍数を10倍して再度上記の操作を行います。

(3) 臭気指数の算出

臭気指数は以下の式から計算します。

$$Y = 10 \log(M \times 10((r_1 - 0.58) / (r_1 - r_0)))$$

この式において、Yは臭気指数、Mは当初希釈倍数、 r_1 は当初希釈倍数に係る平均正解率、 r_0 は当初希釈倍数を10倍したときの平均正解率を表します。

1. 環境省、「環境大気常時監視マニュアル第6版」、環境省ホームページ、http://www.env.go.jp/air/osen/manual_6th/index.html、2014/01/17 確認
2. JIS B 7956 (大気中の炭化水素自動計測器)
3. 環境省、「有害大気汚染物質測定方法マニュアル」、環境省ホームページ、<http://www.env.go.jp/air/osen/manual2/index.html>、2014/01/17 確認
4. 環境省、「環境大気中の揮発性有機化合物(VOC)濃度モニタリングに係る測定方法マニュアル」、環境省ホームページ、http://www.env.go.jp/air/osen/manual_voc/index.html、2014/01/17 確認
5. JIS B 7952「大気中の大気中の二酸化硫黄自動計測器」
6. JIS B 7953「大気中の窒素酸化物自動計測器」
7. JIS B 7951「大気中の一酸化炭素自動計測器」
8. JIS B 7954「大気中の浮遊粒子状物質自動計測器」
9. 環境省 水・大気環境局大気環境課、「微小粒子状物質の標準測定方法と等価性を有する自動測定機について」、平成22年(2010)10月15日
10. 環境省 水・大気環境局大気環境課、「微小粒子状物質の標準測定方法と自動測定機の等価性評価結果に関する考え方」、平成23年(2011)1月31日
11. JIS Z 8851「大気中のPM2.5測定用サンブラ」
12. Shin Chen Wang and Richard C. Flagan, "Scanning Electrical Mobility Spectrometer", *Aerosol Science and Technology*, 13, 1990, pp.230-240
13. JIS B 7957「大気中のオゾン及びオキシダントの自動計測器」
14. 環境省、「環境庁告示9号 特定悪臭物質の測定の方法」、環境省ホームページ、<http://www.env.go.jp/hourei/syousai.php?id=10000022>、2014/01/17 確認
15. 環境省、「平成7年環境庁告示63号 臭気指数及び臭気排出強度の算出の方法」、環境省ホームページ、<http://www.env.go.jp/hourei/syousai.php?id=10000019>、2014/01/17 確認
16. 環境省管理局大気生活環境室、「嗅覚測定法マニュアル 第5版」、(社)におい・かおり環境協会、2005

3.4 室内環境における測定

室内環境中の VOC は、シックハウス症候群や化学物質過敏症の原因として懸念されています(1.3.1(イ)参照)。事業所内においても、事務室などは室内環境に該当します。

室内環境においては厚生労働省により 13 物質について室内濃度指針値が定められており(表 1.1.3.2)、また総揮発性有機化合物(TVOC)濃度の暫定目標値が定められています。本項ではこれらの測定方法について述べます。

3.4.1 VOC、アルデヒド類成分

VOC、アルデヒド類成分のうち、指針値物質の測定法に関しては、厚生労働省により「室内空气中化学物質の測定マニュアル」¹⁾が示されています。このマニュアルに記載されている測定法は、精密測定法(標準的測定法)であり、1. 室内化学物質濃度の最大値を求める場合、2. 厳密な測定を行う場合、3. 指針値との比較を行う場合、の測定法です。新築住宅の測定と居住住宅の測定について示されており、新築住宅では住居を評価するための最高濃度となるように、30 分の換気後、5 時間以上密閉して 30 分間空気を採取することとされています。一方、居住住宅においては居住状態での濃度レベルを知る

ため、日常生活を営みながら 24 時間空気を採取することとされています。

分析方法は、ホルムアルデヒド及びアセトアルデヒドについては、DNPH 誘導体化固相吸着/溶媒抽出-高速液体クロマトグラフ法、VOC については、固相吸着/溶媒抽出法、固相吸着/加熱脱着法及び容器採取法とガスクロマトグラフ/質量分析法の組み合わせによって行います。

なお、上記の測定法は主に指針値物質を測定するための方法ですが、その他の VOC についても標準品を用いることで定量が可能です。また、後述する TVOC 濃度も算出することができます。

新築住宅での室内空気の測定風景を図 1.3.4.1 に示しました。この測定では、加熱脱着用サンプラーに VOC を捕集して、DNPH サンプラーにアルデヒド類を捕集しています。また、PID モニターによって TVOC 濃度をモニタリングしています(3.4.2 参照)。測定位置は、部屋の中央、高さ 1.2 m 付近となっています。また、同時に温湿度計により、温度と湿度も計測しています。



図 1.3.4.1 室内空気採取風景

3.4.2 TVOC

TVOCの測定により、指針値のないVOC、定性が困難なVOCの量を見積もることができます。室内には指針値物質以外にも多種のVOCが存在するため、シックハウス症候群を予防するためには、TVOC濃度を把握して十分に低減することが重要です。TVOCは暫定目標値 $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$ とされています(1.3.1(イ)参照)。

TVOCの測定方法には精密測定法と簡易測定法があります。一般に室内環境におけるTVOCは精密測定法の固相吸着-ガスクロマトグラフ法を用いて求めた値を指します。測定方法によってTVOCの値

は異なるため、測定結果にはサンプリング方法、分析方法等の測定条件を併記する必要があります。

(ア) 精密測定法

VOCと同様の方法(固相吸着-ガスクロマトグラフ法)で分析します。濃度はGCクロマトグラムに検出されたピークを定量して合計した値から求めますが、合計する範囲は、便宜上、ヘキサンからヘキサンデカンの範囲に検出されるピークを対象とします。厚生労働省²⁾では、これらのピークの成分について標準品を用いて可能な限り定性(全検出ピークの1/2から2/3)及び定量し、定性できなかったピー

クについては面積を合計してトルエン相当量に換算して定量し、両者を合計してTVOC濃度とします。一方、建築学会では、JIS A 1965「室内及び放散試験チャンバー内空气中揮発性有機化合物のTenaxTA(R)吸着剤を用いたポンプサンプリング、加熱脱離及びMS/FIDを用いたガスクロマトグラフィーによる定量」³⁾に準拠し、ヘキサンからヘキサンデカンの範囲に検出される全てのピークの面積を合計しトルエン換算する方法を提唱しています⁴⁾。

(イ) 簡易測定法

簡易測定法は、装置が比較的小型で持ち運びやすく、かつ操作が簡便で、現場で測定値が得られるものです。半導体式センサ法やPIDなどがあります。これらの測定法はVOCの種類によって感度が異なることやVOC以外の物質の影響を受けることがあり、精密測定法で求めたTVOC濃度と必ずしも一致しません。スクリーニング、濃度の監視などの用途に有用であるといえます。

引用文献

1. 厚生労働省、「シックハウス（室内空気汚染）問題に関する検討会 中間報告書 - 第6回～第7回のまとめ について、室内空气中化学物質の測定マニュアル」、厚生労働省ホームページ、<http://www.mhlw.go.jp/houdou/0107/h0724-1c.html>、2014/01/17 確認
2. 厚生労働省、「シックハウス（室内空気汚染）問題に関する検討会中間報告書 - 第4回～第5回のまとめについて 総揮発性有機化合物（Total Volatile Organic Compounds: TVOC）の空気質指針策定の考え方について」、厚生労働省ホームページ、http://www1.mhlw.go.jp/houdou/1212/h1222-1_13.html#bessi3、2014/01/17 確認
3. JIS A 1965「室内及び放散試験チャンバー内空气中揮発性有機化合物のTenaxTA(R)吸着剤を用いたポンプサンプリング、加熱脱離及びMS/FIDを用いたガスクロマトグラフィーによる定量」
4. 日本建築学会、「総揮発性有機化合物による室内空気汚染防止に関する濃度等規準・同解説」、丸善、2010、pp.32-35

コラム：

シックハウス問題は解決したのか？

VOCによるシックハウス症候群を防ぐため、行政により様々な対策が行われてきました。厚生労働省により1997年から2002年にかけて室内汚染物質13種について指針値が定められました(本文表1.1.3.2)。また、国土交通省により2000年に住宅の品質確保の促進等に関する法律が施行され、住宅性能表示制度においてホルムアルデヒド対策、換気対策、化学物質濃度測定についての基準が設けられました。更に、2003年には建築基準法が改正され、ホルムアルデヒドを含む建材の使用制限や建材へのクロルピリホスの使用禁止が定められ、機械換気設備の設置が義務付けられました。その結果、国土交通省の実態調査によると、指針値物質の室内濃度は年々減少しています。シックハウス問題は解決したのでしょうか？

同調査によると、新築1年以内の住宅に居住した人のうち化学物質が原因とみられる体調の変化を感じた人の割合は減少していません¹⁾。これは、いまだにシックハウス症候群の症状を感じる人が減っていないことを表しているのかもしれない。最近の新築建物のVOC濃度を測定すると、TVOCの濃度は高いものの、そのうち指針値VOCの割合は僅か6%程度であったという報告があります²⁾。この原因として、室内環境で使用される化学物質が指針値物質以外の代替物質へとシフトしていることが考えられます。今後シックハウス問題を起こさないようにするには、使用するVOCの量を減らす、より安全なVOCを使用する、などの努力が必要といえます。

1. 財団法人住宅リフォーム・紛争処理支援センター、「平成17年度 室内空気に関する実態調査報告書 概要版」、p.27、http://www.chord.or.jp/tokei/pdf/h17_juutaku.pdf、2014/01/17 確認
2. 野口美由貴、水越厚史、柳沢幸雄、「新築保育施設における空気質改善方法 / TVOC濃度変化を指標とした室内空気質評価」、日本建築学会技術報告集、No.36、pp.577-582、2011

事業所等で使用されるVOCが大気環境へ放出された場合、どのような環境に影響を及ぼすのか、特に重要と考えられる4項目について解説します。

4.1 オゾンの生成

大気中には光で起こる化学反応で生成し、一定の平衡濃度が維持される物質があります。そのような物質は、表 1.4.1.1 に示すような酸性物質と酸化性物質（オキシダント）とに大別されます。また、地表の発生源と大気中の光化学反応の両方に由来する大気成分もあります。窒素酸化物（ $\text{NO}_x = \text{NO}, \text{NO}_2$ ）、二酸化硫黄（ SO_2 ）、一酸化炭素（CO）及びホルムアルデヒド

をはじめとする多くのカルボニル化合物がこれに該当します。

これらの物質は、大気中にVOCと NO_x が共存する時に太陽光の紫外線照射を受けることによって生成されます。特にオキシダントには様々な健康影響が認められており、大気中濃度の環境基準が定められています（基礎編 1.3.2(ウ)）。また後述するように、オキシダントは気候変動や生態系衰退にも関わる物質として重要視されています。

表 1.4.1.1 大気中の光化学反応で生成される主な物質

酸性物質	硝酸（ HNO_3 ）、硫酸（ H_2SO_4 ）
酸化性物質 （オキシダント）	オゾン（ O_3 ）、PAN（ペルオキシアセチルナイトレート）、 過酸化水素（ H_2O_2 ）、MHP（メチルヒドロペルオキシド）

オキシダントの汚染を防ぐには、光化学反応の原因物質の総量を抑制することが重要です。これまで、オキシダントの汚染の一方の原因物質である NO_x については発生源対策が推進されてきました。しかし、VOCとの共存条件においては、 NO_x は触媒として機能するので、本質的

には他方の原因物質であるVOCの対策が必要です。

大気に排出されるVOCは様々ですが、それぞれのVOCの大気中濃度、光化学反応のしやすさは異なります。このため、個々の物質の濃度と、その物質がオキシダントを生成する効率（生成能）を考慮し

て、オキシダント生成のリスクを評価する必要があります。ここでは、オキシダントの中で最も大気中濃度が高く、光化学反応で重要な役割を果たすオゾン (O₃) について取り上げます。

4.1.1 オゾンについて

ここでは、オゾンの性質、気候及び環境、生体影響について、及び光化学過程でのオゾン生成のメカニズムを説明します。

(ア) オゾンの光吸収特性と気候影響

オゾンは紫外部 (波長 200 ~ 340 nm) と可視~近赤外部 (650 ~ 1100 nm) で光を吸収します。成層圏のオゾン層が太陽光に含まれる有害な紫外線を吸収して地表に到達するのを防ぐという、地表の生物にとって欠くことのできない重要な役割を果たすのは、紫外部の吸収特性によるものです。対流圏オゾン濃度の増加は、近年注目を集めているオゾン層の破壊による有害紫外線照射量の増大を緩和する作用があると言えます。

一方、可視~近赤外部の吸収特性により、オゾンは温室効果気体としての性質を示します。対流圏オゾン濃度が2倍になると地球の平均気温が0.9度上昇すると試算されています。これは、単位濃度当たりの温室効果としてはCO₂の2000

倍以上に相当します。対流圏オゾン濃度の変化は、地球規模の気候変動に影響を及ぼす重要な因子であると言えます。

(イ) オゾンの生物への影響

(1) オゾン曝露でどんな症状が現れるか

オゾンは酸化力の強い物質で、僅かですが水に溶けます。このことを利用して、室内空気や水溶液の殺菌に用いられます。また、オゾンの高い反応性は、脱臭・脱色にも用いられています。一方、空気中にオゾンが高濃度で存在するとヒトを含む動物の肺などに障害を起こします。

曝露濃度や条件によって症状は異なりますが、鼻や喉に刺激を感じる、ぜん息発作や慢性の気管支炎、肺機能低下などの呼吸器系への影響が表れるほか、眼などに刺激を与えることもあります。

植物では葉の気孔から吸収され、細胞組織を破壊し、結果として葉の白化などの可視障害や成長阻害などの影響を及ぼすことが知られています。近年では、北米などでの森林衰退に、酸性物質と並んでオゾンの関与が指摘されています。

こうした障害は脂質過酸化と関連していると考えられています。オゾンそのものはラジカルではありませんが、生体膜脂質を含む種々の有機分子と反応してラジカル種を生成し、脂質過酸化を促進します(連鎖的脂質過酸化反応)。

また、オゾンは大気中の光化学反応によってヒドロキシルラジカル($\cdot\text{OH}$)を生成します(次項 4.1.1 (ウ) 参照)。 $\cdot\text{OH}$ はこれまでに知られている最も反応性の高い反応種の一つで、生細胞中にあるほとんど全ての種類の分子(糖、アミノ酸、リン脂質、ヌクレオチドや有機酸など)と速やかに反応し、生体膜や遺伝子損傷の原因となります(コラム:酸素は猛毒である)。

(2) 連鎖的脂質過酸化反応 (図 1.4.1.1)

高級不飽和脂肪酸のメチレン基($-\text{CH}_2-$)から水素原子($\cdot\text{H}$)を引き抜くのに十分な反応性をもった反応種の攻撃によって

反応が開始されます。脂肪酸に二重結合があると、それに隣接した炭素原子上のC-H結合は弱まり、 $\cdot\text{H}$ の引き抜きが起りやすくなります。 $\cdot\text{H}$ を引き抜かれた炭素原子の上には不対電子が残ります($-\cdot\text{CH}-$)。分子内転位の結果として共役ジエンができることにより、炭素ラジカルが安定化されます。この共役ジエンは酸素分子と容易に反応し、ペルオキシラジカル($\text{ROO}\cdot$)を生じます。 $\text{ROO}\cdot$ は反応性に富み、他の脂質分子から $\cdot\text{H}$ を引き抜くことができます。このようにして、反応過程がいったん開始されると、連鎖的に反応が進行していくために、これら一連の反応を連鎖的脂質過酸化反応と呼びます。

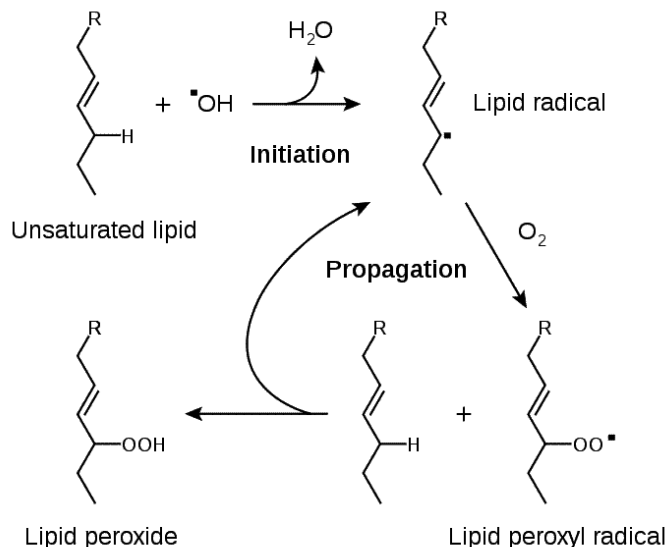


図 1.4.1.1 脂質過酸化反応のメカニズム

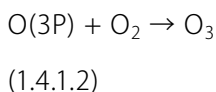
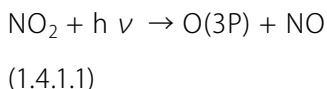
(転載: Tim Vickers, 「Wikipedia—脂質過酸化反応」、2007/07/31 更新、<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%84%82%E8%B3%AA%E9%81%8E%E9%85%B8%E5%8C%96%E5%8F%8D%E5%BF%9C>、2014/01/17 確認)

脂質過酸化によって起こる生体影響は主に次の3つです。これらは究極的には、細胞の機能低下や細胞死を引き起こします。

1. 膜流動性の低下：例えば、赤血球膜の脂質過酸化によって膜の流動性が低下すると、赤血球が変形することにより毛細血管を通り抜ける能力を失わせる原因となります。
2. 通常では膜を通過しないカルシウムイオンのような物質の膜からの「漏出」の増大
3. 膜結合性酵素の不活性化

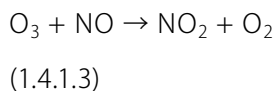
(ウ) 光化学反応によるオゾンの生成

第1章で解説したように、対流圏大気中のオゾン生成には、窒素酸化物(NO_x)が主要な役割を果たしています。大気中の NO_x の反応性は極めて高く、大気中で起こるほとんどの反応に直接、間接に関わっています。大気中の NO_2 は光によって(1.4.1.1)、(1.4.1.2)式のように、 NO の生成を介してオゾンを生成します。

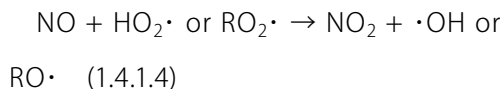


($\text{O}(3\text{P})$ は基底状態の酸素原子を表す。)

式(1.4.1.1)で副生した NO は式(1.4.1.3)のようにオゾンと反応するため、清浄な大気中ではオゾン濃度は定常状態に達し、極端な高濃度になることはありません。



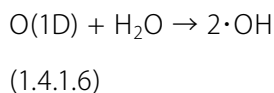
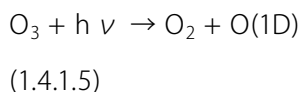
ところが、大気中に炭化水素類が存在すると、 $\text{HO}_2\cdot$ や $\text{RO}_2\cdot$ といった過酸化ラジカルが生成されます。式(1.4.1.1)で副生した NO は、これらと反応して NO_2 に戻されます(式(1.4.1.4))。



(R はアルキル基等炭化水素に由来するグループ)

この NO_2 が再び式(1.4.1.1)、(1.4.1.2)の反応を経てオゾン生成に関与します。つまり NO_2 とVOCの混合系での光化学反応では、 NO_2 が触媒として働いてオゾンが高濃度になります。

光化学反応によるオゾンの消滅は(1.4.1.5)、(1.4.1.6)式のように起こります。



(O(1D)は励起状態の酸素原子。基底状態の酸素原子 O(3P)は水と反応しない。)

この反応で生成されたヒドロキシルラジカル($\cdot\text{OH}$)は高い反応性を持ち、オゾンと反応しないアルカン類や芳香族炭化水素類とも反応します。更に、 NO_x や炭化水素を含むラジカル連鎖反応によって式(1.4.1.4)のように $\cdot\text{OH}$ や $\text{RO}\cdot$ が再生され再び反応にあずかるとともに、カルボニル化合物の生成にも寄与します。こうした反応はVOCの光化学反応による2次粒子生成にも深く関与しています。

4.1.2 最大オゾン生成推計濃度

VOCによるオゾン生成リスクの評価法の一つに、最大オゾン生成推計濃度があります。以下に、その算出方法、注意点、実際の大气環境試料への適用例を示します。

(ア) 算出方法

個々のVOC化合物の光化学反応性はそれぞれ異なります。また、オゾン生成への寄与も物質によって様々です。したがって、大気中(あるいは排出ガス中)のVOCがオゾンを生成するリスクを評価するためには、個々の化合物の大気中濃度(もしくは排出インベントリ)に加え、その化合物のオゾン生成のしやすさ、すな

わち生成ポテンシャルの尺度をもあわせて考慮する必要があります。

オゾンの生成ポテンシャルを示す係数は過去に複数例提唱されています。表1.4.1.2にその例として、単位VOC量が生成しうるオゾン量を示す最大オゾン生成(Maximum Incremental Reactivity: MIR)を示してあります。MIRを用いて、最大オゾン生成推計濃度は次式によって算出されます。

$$\text{最大オゾン生成推計濃度} = \sum ([C]_i \times \text{MIR}_i)$$

ただし、

MIR_i : VOC化合物*i*のMIR

$[C]_i$: VOC化合物*i*の大気中濃度(測定値)

VOCの濃度の代わりに、排出インベントリを用いれば、事業所排気による潜在的なオゾン生成の最大推計量を算出することもできます。

(イ) MIRから算出した最大オゾン生成推計濃度についての注意点

- MIRは個々のVOCのオゾン生成能の絶対値としてよりも、異なるVOC間の相対的な大小関係の把握に有用である。
- 表1.4.1.2は、例えば炭素数4以上のアルデヒドについてはMIRが明らかとなっていないなど、完全なリストではない。表1.4.1.2に挙げられているVOCについて求めた最大オゾン生成推計濃度は、実際の大气

中の全 VOC の示すオゾン生成能と一致しない可能性がある。

行うためには、未同定の炭化水素類がオゾン生成に及ぼす影響を含めて考慮する必要がある。

c. より正確なオゾン生成能の評価を

表 1.4.1.2 Maximum Incremental Reactivity (MIR)^a

物質名	g-O ₃ /g-C	mol-O ₃ /mol-C ^b	物質名	g-O ₃ /g-C	mol-O ₃ /mol-C ^b
アセチレン	0.5	0.14	2-メチルヘキサン	1.08	0.32
エテン	7.4	2.16	2,3-ジメチルペンタン	1.31	0.39
エタン	0.25	0.08	3-メチルヘキサン	1.4	0.42
プロペン	9.4	2.75	2,2,4-トリメチルペンタン	0.93	0.28
プロパン	0.48	0.15	n-ヘプタン	0.81	0.24
イソブタン	1.21	0.37	メチルシクロヘキサン	1.8	0.53
1-ブテン	8.9	2.6	2,3,4-トリメチルペンタン	1.6	0.48
n-ブタン	1.02	0.31	トルエン	2.7	0.74
t-2-ブテン	10	2.92	2-メチルヘプタン	0.96	0.29
c-2-ブテン	10	2.92	3-メチルヘプタン	0.99	0.29
3-メチル-1-ブテン	6.2	1.81	n-オクタン	0.6	0.18
イソペンタン	1.38	0.41	エチルベンゼン	2.7	0.75
1-ペンテン	6.2	1.81	m-およびp-キシレン	7.4^d	2.05
n-ペンタン	1.04	0.31	スチレン	2.2	0.6
イソブレン	9.1	2.58	n-ノナン	0.54	0.16
t-2-ペンテン	8.8	2.57	イソプロピルベンゼン	2.2	0.6
c-2-ペンテン	8.8	2.57	n-プロピルベンゼン	2.1	0.58
2-メチル-2-ブテン	6.4	1.87	1,3,5-トリメチルベンゼン	10.1	2.81
2,2-ジメチルブタン	0.82	0.25	1,2,4-トリメチルベンゼン	8.8	2.45
シクロペンテン	7.7	2.19	1,2,3-トリメチルベンゼン	8.9	2.6
4-メチル-1-ペンテン	3.0 ^c	0.87	o-キシレン	6.5	1.8
シクロペンタン	2.4	0.7	o-エチルトルエン	5.3 ^c	1.48
2,3-ジメチルブタン	1.07	0.32	m-エチルトルエン	5.3 ^c	1.48
2-メチルペンタン	1.5	0.45	p-エチルトルエン	5.3 ^c	1.48
3-メチルペンタン	1.5	0.45	m-ジエチルベンゼン	4.8 ^c	1.33
2-メチル-1-ペンテン	3.0 ^c	0.87	p-ジエチルベンゼン	4.8 ^c	1.33
n-ヘキサン	0.98	0.29	n-デカン	0.46	0.17
t-2-ヘキセン	6.7	1.96	n-ウンデカン	0.42	0.12
c-2-ヘキセン	6.7	1.96	ホルムアルデヒド	7.2	4.5
メチルシクロペンタン	2.8	0.82	アセトアルデヒド	5.5	2.52
2,4-ジメチルペンタン	1.5	0.45	アセトン	0.56	0.23
ベンゼン	0.42	0.11	一酸化炭素	0.054	0.032
シクロヘキサン	1.28	0.37	メタン	0.015	0.005

太字はホルムアルデヒド以上の MIR (g-O₃/g-C) をもつ物質

a: Carter W.P.L., Development of ozone reactivity scales for volatile organic compounds. *J. Air & Waste Manag. Assoc.* **44**, 881-899 (1994). この文献では g-O₃/g-C のみ記載。

b: 次式により換算 mol-O₃/mol-C = g-O₃/g-C × 1/MW_{O₃} × MW_{VOC} / #C_{VOC}

MW_{O₃}: オゾンの分子量 (48 g/mol)

MW_{VOC}: VOC の分子量

#C_{VOC}: VOC の炭素数

c: Carter W.P.L., Development of ozone reactivity scales for volatile organic compounds.

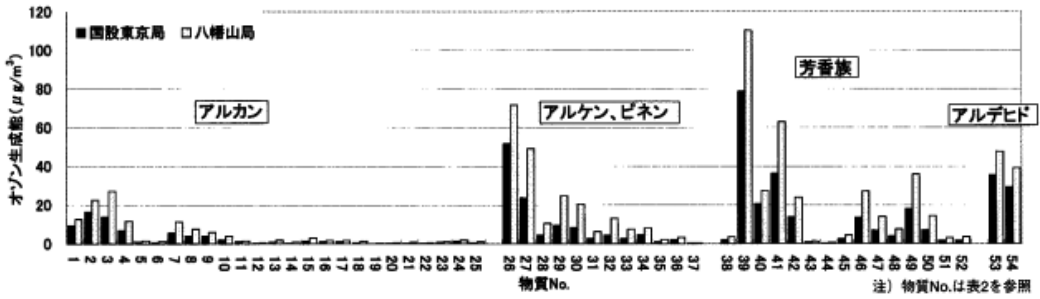
Report prepared for the U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC, EPA-600/3-91-050 (1991).

d: メタ-キシレンとパラ-キシレンの平均値

(ウ) 最大オゾン生成推計濃度の解析例

東京都の大気中のVOC測定結果をもとに最大オゾン生成推計濃度を評価した事例を示します¹⁾。図1.4.1.2では、棒グラフの高さが高いほどその物質のオゾン生成能が高いことを示しています。この図から、都市大気中ではアルケン類や芳香族炭化水素類のオゾン生成能が高く、光

化学オキシダントの増加に重要な役割を果たしていることが分かります。また、星らのこの研究では、大気中のVOC連続測定濃度やPRTR排出量データをベンゼンで基準化して解析することにより、トルエンやエチルベンゼンなどの芳香族の排出源として固定発生源の寄与が大きいという推定結果を示しています。



[参考: 物質 No.]

種類	No.	物質名	種類	No.	物質名	種類	No.	物質名	
アルカン	1	イソブタン	アルケン、 ピネン	19	2,3,4-トリメチルペンタン	芳香族	37	β-ピネン	
	2	ブタン		20	2-メチルヘプタン		38	ベンゼン	
	3	イソペンタン		21	3-メチルヘプタン		39	トルエン	
	4	n-ペンタン		22	n-オクタン		40	エチルベンゼン	
	5	シクロペンタン		23	n-ノナン		41	m+p-キシレン	
	6	2,2-ジメチルブタン		24	n-デカン		42	o-キシレン	
	7	2-メチルオエタン+2,3-ジメチルブタン		25	n-ウンデカン		43	スチレン	
	8	3-メチルペンタン		26	プロピレン		44	イソプロピルベンゼン	
	9	n-ヘキサン		27	1-ブテン		45	n-プロピルベンゼン	
	10	メチルシクロペンタン		28	1,3-ブタジエン		46	m+p エチルトルエン	
	11	シクロヘキサン		29	トランス-2-ブテン		47	1,3,5-トリメチルベンゼン	
	12	2,4-ジメチルペンタン		30	シス-2-ブテン		48	o-エチルトルエン	
	13	2-メチルヘキサン		31	1-ペンテン		49	1,2,4-トリメチルベンゼン	
	14	2,3-ジメチルペンタン		32	トランス-2-ペンテン		50	1,2,3-トリメチルベンゼン	
	15	3-メチルヘキサン		33	シス-2-ペンテン		51	m-ジエチルベンゼン	
	16	n-ヘプタン		34	2-メチル-1,3-ブタジエン		52	p-ジエチルベンゼン	
	17	メチルシクロヘキサン		35	2-メチル-1-ペンテン		アルデヒド	53	ホルムアルデヒド
	18	2,2,4-トリメチルペンタン		36	α-ピネン			54	アセトアルデヒド

図 1.4.1.2 国設東京局、八幡山局のオゾン生成能 (平成 15・16 年度平均値)

横軸の数字は化合物を表し、1～25 はアルカン類、26～37 はアルケン、ピネン類、38～52 は芳香族、53～54 はアルデヒド類。(転載: 星 純也ら、大気中 VOC モニタリングデータを用いた排出源およびオゾン生成能の評価、東京都環境科学研究所年報 2005, 93-101 (2005), (http://www.tokyokankyo.jp/kankyoken_contents/report-news/2005/taiki-1.pdf、2014/01/17 確認))

表 1.4.1.3 には、都内 5 地点における VOC 主要成分の大気中濃度とオゾン生成への寄与割合の推定値を示しました²⁾。オゾン生成への寄与割合は、どの地点でも大気中濃度の高いトルエンによる寄与が最大となっています。また、寄与割合 2 位以下の組成は大気中濃度の成分と大き

く異なっています。これは、個々の VOC 成分の MIR が異なるためです。つまり、排出量の多い VOC 成分を中心とした排出削減対策だけでは光化学オキシダント対策として、必ずしも十分でない可能性があります。

表 1.4.1.3 都内 5 地点における VOC 主要成分の大気中濃度とオゾンの生成への寄与割合 (2007 年度)
(転載：星 純也ら、大気中 VOC の成分組成の経年変化とオゾン生成への寄与について、東京都環境科学研究所年報 2008, 10-17(2008), (http://www.tokyokankyo.jp/kankyoken_contents/report-news/2008/ronbun102.pdf, 2014/01/17 確認))

順位	大気中濃度の寄与割合									
	国設東京 (一般環境)		荒川南千住 (一般環境)		八幡山 (道路沿道)		日比谷 (道路沿道)		松原橋 (道路沿道)	
	成分名	寄与割合 (%)	成分名	寄与割合 (%)	成分名	寄与割合 (%)	成分名	寄与割合 (%)	成分名	寄与割合 (%)
1	トルエン	10.1	トルエン	14.7	ブタン	8.7	トルエン	8.7	トルエン	10.3
2	酢酸エチル	7.1	酢酸エチル	12.2	トルエン	8.3	イソプロピルアルコール	8.7	ブタン	6.5
3	アセトン	6.7	イソプロピルアルコール	9.7	イソプロピルアルコール	7.8	ブタン	7.9	イソヘキサン	5.4
4	ブタン	6.5	ブタン	5.3	イソヘキサン	5.3	アセトン	6.8	イソプロピルアルコール	5.0
5	イソプロピルアルコール	6.1	プロパン	4.0	酢酸エチル	4.6	酢酸エチル	6.6	酢酸エチル	4.8
6	プロパン	5.6	メチルエチルケトン	3.5	n-ヘキサン	4.6	イソブタン	4.3	アセトン	4.3
7	メチルエチルケトン	5.3	アセトン	3.3	イソブタン	4.4	プロパン	4.2	n-ヘキサン	4.3
8	n-ヘキサン	3.4	イソブタン	2.8	プロパン	4.2	n-ヘキサン	3.7	イソブタン	3.5
9	イソブタン	3.3	n-ヘキサン	2.6	アセトン	3.4	メチルエチルケトン	3.5	プロパン	3.4
10	イソヘキサン	3.0	イソヘキサン	2.5	n-ヘキサン	3.2	イソヘキサン	3.4	m+p-キシレン	2.8
	その他	42.9	その他	39.3	その他	45.5	その他	42.2	その他	49.8

順位	オゾン生成量の寄与割合									
	国設東京 (一般環境)		荒川南千住 (一般環境)		八幡山 (道路沿道)		日比谷 (道路沿道)		松原橋 (道路沿道)	
	成分名	寄与割合 (%)	成分名	寄与割合 (%)	成分名	寄与割合 (%)	成分名	寄与割合 (%)	成分名	寄与割合 (%)
1	トルエン	17.0	トルエン	26.8	トルエン	13.4	トルエン	15.0	トルエン	14.7
2	ホルムアルデヒド	7.3	ホルムアルデヒド	6.4	1-ブテン	5.9	ホルムアルデヒド	7.3	m+p-キシレン	7.4
3	プロピレン	6.7	アセトアルデヒド	5.1	ホルムアルデヒド	5.7	プロピレン	6.0	ホルムアルデヒド	5.9
4	m+p-キシレン	6.3	プロピレン	4.9	プロピレン	5.5	アセトアルデヒド	5.9	プロピレン	5.7
5	アセトアルデヒド	6.0	m+p-キシレン	4.5	m+p-キシレン	5.0	m+p-キシレン	5.6	1-ブテン	5.3
6	1-ブテン	4.3	酢酸エチル	3.6	ブタン	4.7	ブタン	4.6	1,2,4-トリメチルベンゼン	4.2
7	エチレン	4.2	1-ブテン	3.4	シス-2-ブテン	4.2	1-ブテン	4.6	アセトアルデヒド	4.1
8	ブタン	3.6	ブタン	3.2	エチレン	3.9	エチレン	4.1	エチレン	3.8
9	メチルエチルケトン	3.3	イソプロピルアルコール	3.2	アセトアルデヒド	3.9	メチルイソブチルケトン	2.8	イソヘキサン	3.3
10	1,2,4-トリメチルベンゼン	2.5	エチレン	2.6	トランス-2-ブテン	3.7	イソプロピルアルコール	2.7	m+p-エチルトルエン	3.2
	その他	38.7	その他	36.4	その他	44.1	その他	41.4	その他	42.3

引用文献

1. 星 純也ら、「大気中 VOC モニタリングデータを用いた排出源およびオゾン生成能の評価」、東京都環境科学研究所年報 2005, pp.93-101 (2005)。
2. 星 純也ら、「大気中 VOC の成分組成の経年変化とオゾン生成への寄与について」、東京都環境科学研究所年報 2008, pp.10-17 (2008)。

参考文献

1. 秋本肇、「対流圏オゾン—大気中における光化学生成」、季刊化学総説、10 大気の化学、1990、pp.146-164

コラム： 酸素は猛毒である

(1) 酸素の毒性について

地球進化の歴史を振り返ると、約30億年前に酸素分子を放出する光合成生物が現れました。その後、現在と同じような酸化的環境に変わるのに約10億年がかかっていますが、この間、大気中の酸素含有量が上昇するにつれて、それまでに存在していた無酸素条件に適応した生物は酸素毒性にさらされることになりました。

酸素は極めて高い反応性をもつ物質で、細胞内で無秩序な酸化が起こることは生物にとって時には致命的な障害を与えます。当時の原始生物は酸素毒性に対する防御機構を進化させるか、酸素が侵入できない環境に避難するかの選択を強いられたのです。現在の嫌気性生物はこのような酸素が侵入できない環境に避難した生物であると考えられています。

有酸素環境に適応した好気性生物に対しても、酸素は有害作用を示します。

◇植物：全ての植物組織は空気中より高濃度の酸素で障害をうけ、葉緑体の発生阻害、種子生存率の低下、根の成長抑制、生体膜障害、葉の退縮や落葉が起こります。

◇ヒト：高濃度（または高分圧）酸素の連続吸入によって中枢神経系の機能不全、肺や網膜の損傷が起こります。特に新生児への高濃度酸素曝露は後水晶体繊維増殖症（失明）を起こすことが判っています。

(2) 酸素毒性の原因は何か

生体内で起こる正常な酸素代謝の副産物としてスーパーオキシドアニオン(O_2^-)や過酸化水素(H_2O_2)が生成されます。また、 H_2O_2 の均等開裂によってヒドロキシルラジカル($\cdot OH$)が生成されます。 $\cdot OH$ はこれまでに知られている最も反応性の高い反応種の一つで、生細胞中にあるほとんど全ての種類の分子（糖、アミノ酸、リン脂質、ヌクレオチドや有機酸など）と非常に速い速度で反応します。

◇ $\cdot OH$ は生体膜成分の一種であるホスファチジルコリン（レシチン）から水素($H\cdot$)を引き抜いて、炭素中心ラジカルを生成します。これは生体膜損傷の原因となる連鎖的脂質過酸化反応を起こします。

◇ $\cdot OH$ はDNAの一部を構成するデオキシリボースのような糖とも反応します。こうした反応の生成物の中には微生物に対する変異原性が認められているものもあります。

◇ $\cdot OH$ は芳香環構造に付加反応をしますが、これはDNAやRNA中のプリン塩基やピリミジン塩基などのもつ二重結合に対しても同様です。

例えば、ピリミジン塩基であるチミンの二重結合への・OH付加で生成したチミンラジカルは一連の反応を起こします。

以上のように、・OHはDNAの塩基や糖を損傷し、DNA鎖切断を誘起して、細胞死や突然変異の原因となります。

4.2 大気エアロゾルの生成

前節で述べたように、VOC に代表されるガス状有機成分は大気中の光化学反応を経てカルボン酸やその誘導体などに酸化されます。これらの酸化生成物は、蒸気圧が低いため凝集して粒子化したり、他の大気エアロゾル表面に吸着したりして有機エアロゾル(2次生成有機エアロゾル)を形成します。2次生成有機エアロゾルは、その大きさや性状、構成成分など様々な点において、ヒトの健康や地球規模での気候変動に与える影響が大きく、重要な大気成分です。

4.2.1 大気エアロゾルとは

大気中に浮遊する微小な液滴や固体か

らなる粒子を総称して大気エアロゾルといいます。大気エアロゾルは、様々な成因や起源をもつ有機物、無機物からなる多成分の粒子で、その粒径は数 nm ~ 100 μm 程度と広範囲にわたります。

(ア) 有機エアロゾルとは

有機物粒子(有機エアロゾル)は大気エアロゾルの主要な構成成分です。東京など都市域のエアロゾル全体の35~60%は有機物であると報告されています。この有機エアロゾルは、排出源から直接粒子として排出された一次有機エアロゾルと、大気中での光化学反応によってガス状炭化水素が粒子化してできた二次有機エアロゾルとに大別されます(表 1.4.2.1)。

表 1.4.2.1 有機エアロゾルの分類と由来

	一次有機エアロゾル	二次有機エアロゾル
自然発生源由来	土壌中の有機物*、植物の葉の表面のワックス成分、花粉、孢子、バクテリア、海塩粒子**中に含まれる有機物	α -ピネンなどのテルペン類から生成される。
人為起源由来	アルカン類、アルケン類、BTEX(石油精製や化学工業過程からの漏出、自動車排ガス中の未燃焼燃料成分、潤滑油の変質成分)、フタル酸エステル、多環芳香族炭化水素(燃焼由来のスス粒子表面に吸着)、殺虫剤など	自動車排ガスなどに含まれる環状アルケン類やアルカジエン類、アルキル置換芳香族炭化水素類と、窒素酸化物(NO , NO_2)の混合系の光化学反応によって、炭化水素類が蒸気圧の低いカルボニル化合物へと酸化されて粒子化する。

* 土壌有機物: 地表面の土壌粒子が風で舞い上げられることに起因して生成します。これは以下のように、大粒子の移動と破砕によって生じた微小モード粒子が大気中に浮遊することによります。土壌粒子のうち、極めて小さい微粒子はロンドン・ファンデルワールス力によって地表面に付着しており、また大きすぎる粒子は重量があるために、風によって動かされません。風で動かされやすい40~50 μm 程度の粒子が他の土壌粒子表面に衝突、表面を破砕して1~数 μm の粒子を生成します。

** 海塩粒子: 海面での気泡の破裂によって、ジェット液滴とフィルム粒子が形成され、それぞれ2~40 μm の粗大モード、0.1~2.0 μm の微小モードの乾燥粒径をもつ海塩粒子が生成されます。生成される海塩粒子の90%以上は粗大モードであると見積もられています。

(イ) 大気エアロゾルの大きさ

一般に都市大気エアロゾルの粒径分布は、1～2 μm 付近に谷間をもつ 2 山の対数正規分布に近似できます。微小粒子側にできる山は微小モード、大粒子側にできる山は粗大モードと呼ばれます(表

1.4.2.2)。エアロゾルの粒径分布を数濃度で示すと、大部分の粒子が 0.002～0.06 μm の粒径領域に存在します。この領域の粒子群はエイトケン粒子またはエイトケン核(Aitken nuclei)と呼ばれています(補足説明)。

表 1.4.2.2 モードと生成要因

モード	粒子の生成要因
微小モード	燃焼によって生じた気体分子や光化学反応によって生じた気体分子が凝縮して生成される。すす(煤)粒子や光化学反応で生じた硫酸塩粒子や有機エアロゾルなど
粗大モード	大きな物体が力学的(機械的)な作用を受け、さらに摩耗や破砕といった過程を経て形成される。土壌性粒子、海塩粒子、セメント粒子など

(ウ) 大気エアロゾルの健康影響

呼吸によって、大気エアロゾルが呼吸器内へ吸入されると、粒径が細かい粒子ほど肺胞など気道の奥まで侵入します。また侵入した粒子の一部は呼気に含まれて体外へ排出されますが、残りは呼吸器内の粘膜に付着するなどして残留します(沈着)。

一般的にエアロゾル粒子の粒径が 10 μm 以下になると鼻腔内への侵入が起こり、1.1 μm 以下になると肺胞まで到達するとされています。

2次有機エアロゾルの大部分は微小モードに存在します。2次有機エアロゾルには、粒子化のもととなった有機物分子だけでなく、気相中のさまざまな汚染化学物質が吸着して存在します。例えば、発がん

物質であるベンゾ[a]ピレンやジニトロピレンは、微小モード粒子に特に高濃度で存在することが知られています。

こうしたことから、微小モード粒子を構成する有機エアロゾルに高濃度で曝露されると、塵肺症やミストによる肺毒症を引き起こし、低濃度であっても肺がんや喘息などの呼吸器疾患につながる可能性があります。

日本では 1972 年に粒径 10 μm 以下の浮遊粒子状物質(SPM)について、また 2009 年に粒径 2.5 μm 以下の微小粒子状物質(PM2.5)について環境基準が設定されています(表 1.1.3.5)。

(エ) 大気エアロゾルの気候影響

大気エアロゾルの気候影響には直接効

果と間接効果があります。

直接効果

硫酸ミストや有機エアロゾルは透明で、太陽光を散乱・反射しやすい。これらのエアロゾルが増加することで地表に到達する太陽光の量が減り、大気を冷却する効果のこと。

間接効果

水溶性のエアロゾルは雲粒生成の核（雲凝結核：CCN）として働く。水溶性エアロゾルが増加すると、雲粒の粒径が小さいものがより多くなり、雨粒として降下するのに十分なサイズにまで成長するのに時間がかかるように、つまり雲の寿命が長くなる。その結果、日射反射率が増加し大気が冷却される効果のこと。

近年、CO₂などの温室効果気体の増加による地球の温暖化が問題となっています。これまでの観測結果では、過去100年間に地球の平均気温は約0.6度上昇しました。一方、この100年間の温室効果ガスの増加量を基に、同じ期間の地球平均気温の上昇値を試算すると約1.0度となります。これは、近年世界各地での大気汚染の進行に伴い、硫酸ミストや有機エアロゾルによる直接及び間接効果が気候変動に及ぼす影響が増大しているためと考えられています。

CCNとして働く水溶性有機エアロゾルの増加は、雲の寿命を長くするとともに、降雨が始まるまでに大気に蓄えられる水分の量を増大させます。大気汚染が進んだ都市大気では降雨強度、降雨パターンが人為的に改変されることとなります。人為起源のエアロゾルの増加は、近年のゲリラ豪雨とも関連する問題と言えるでしょう。

4.2.2 VOCの有機エアロゾル生成能

VOCの有機エアロゾル生成能(Y)は、反応によって減少したVOCの単位濃度(ΔVOC, μg/m³) 当たりに生成される有機エアロゾル濃度(ΔM, μg/m³) の比として定義されます。

$$Y = \Delta M / \Delta \text{VOC} \quad (1.4.2.1)$$

Yの値は、チャンバー実験や化合物の構造 - 反応相関によって求めます。初期の粒子生成のモデルでは、VOC反応生成物の濃度が飽和蒸気圧を超えると、その過剰部分が凝結して粒子化するというメカニズムが想定されていました¹⁾。

図1.4.2.1に、アルカン、アルケン、芳香族炭化水素及びその他の化合物群のY(実験値、推定値)を示しました。以下に化合物群ごとのYの傾向をまとめたように、同じ化合物群の中では、実験値も含めて、概ね構造 - 反応相関どおりのYの相対的な関係

性が確認されています。

アルカン、アルケン類

炭素数が多いほど Y が高い。また鎖状よりも環状構造の化合物の方が Y が高い。

芳香族炭化水素類

ベンゼンよりもアルキル置換された化合物の方が、アルキル置換基が直鎖状のものよりも分岐している方が、Y が高い。オルト位やメタ位で置換された化合物の方がパラ置換された化合物よりも Y が高い。

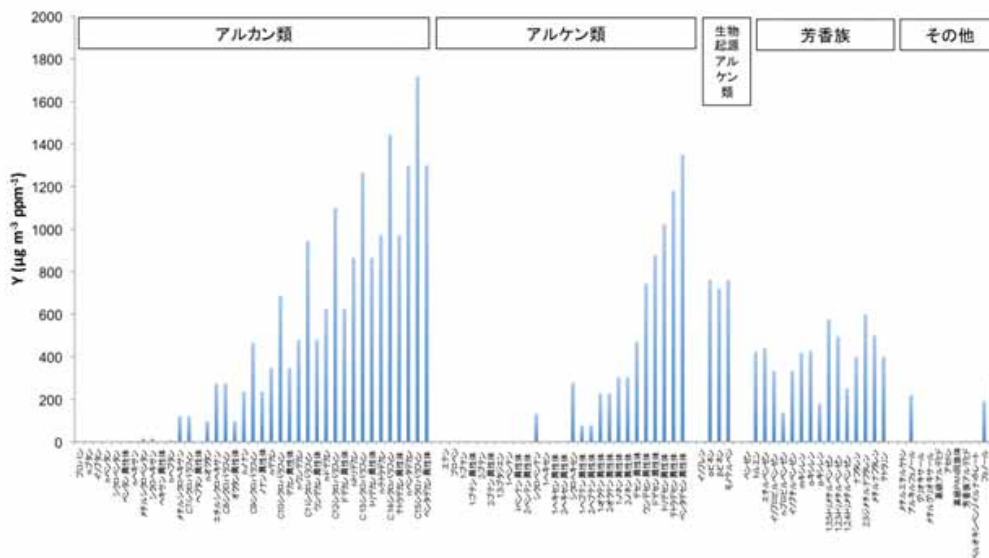


図 1.4.2.1 VOC の有機エアロゾル生成能

(Pandis S.N. et al., "Secondary organic aerosol formation and transport". Atmos. Environ., 26A, 2269-2282 (1992) のデータより作成)

当初のモデルでは、同一化合物の Y の実験値間のバラツキをうまく説明できませんでした。この課題を解決するために導入されたのが以下に説明するモデルです。

このモデルでは、VOC の反応生成物の濃度が飽和蒸気圧に達していなくても大気中に存在する粒子に凝集して成長することで有機エアロゾルが 2 次生成されるというメカニズムを想定しています。この

場合、Y は VOC の反応生成物 (voc_i) のガス - 粒子間分配平衡で表現することができます。

$$Y = M \cdot \sum [(a_i \cdot K_{p,i}) / (1 + M \cdot K_{p,i})] \quad (1.4.2.2)$$

a_i : 化学量論係数

$K_{p,i}$: voc_i のガス - 粒子間分配係数；化学反応による VOC 濃度の変化に対する生

成 物質濃度の比 ($C/\Delta \text{VOC}$) を表す

M : voc_i が吸着する有機エアロゾルの質量濃度

式 (1.4.2.2) は、粒子生成能 (Y) は voc_i 固有の性質 ($K_{p,i}$ = 揮発性) だけでなく、環境条件である粒子濃度 (M) にも依存することを意味しています。 M は環境中の有機エアロゾル濃度で、一般的な都市環境では $1 \sim 20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 程度の範囲であると想定されます。化合物固有のパラメーター、 a_i 、 $K_{p,i}$ はチャンバー実験によって求められる値です。

Odum らの研究では^{2,3)}、芳香族炭化水素や α -ピネンについて $\text{VOC} \rightarrow \text{voc}_1 + \text{voc}_2$ のような 2 成分を生成する系を想定し、 a_i 、 $K_{p,i}$ を求めています (表 1.4.2.3)。これらのパラメーターを用いて、東京都の 대기における Y を算出した結果を図 1.4.2.2 に示しました。

表 1.4.2.3 に記載されていないその他の化合物についても、チャンバー実験による a_i 、 $K_{p,i}$ の算出を進め、より正確な粒子生成能の評価につなげていく必要があります。これは今後の課題です。

表 1.4.2.3 VOC からの有機エアロゾル生成に係るパラメーター

(参考: ① Odum J.R. et al., "Gas/Particle Partitioning and Secondary Organic Aerosol Yields", Environ. Sci. Technol., 30, 2580-2585 (1996).

② Odum J.R. et al., "Aromatics, Reformulated Gasoline, and Atmospheric Organic Aerosol Formation", Environ. Sci. Technol., 31, 1890-1897 (1997).)

	a_1	$K_{p,1}$	a_2	$K_{p,2}$
高収率芳香族 メチル、エチル置換数 ≤ 1 (トルエン、エチルベンゼン、エチルトルエン)	0.038	0.042	0.167	0.0014
低収率芳香族 メチル置換数 ≥ 2 (キシレン、トリメチルベンゼン、ジメチルエチルベンゼン、テトラメチルベンゼンなど)	0.071	0.053	0.138	0.0019
α -ピネン	0.038	0.326	0.171	0.004

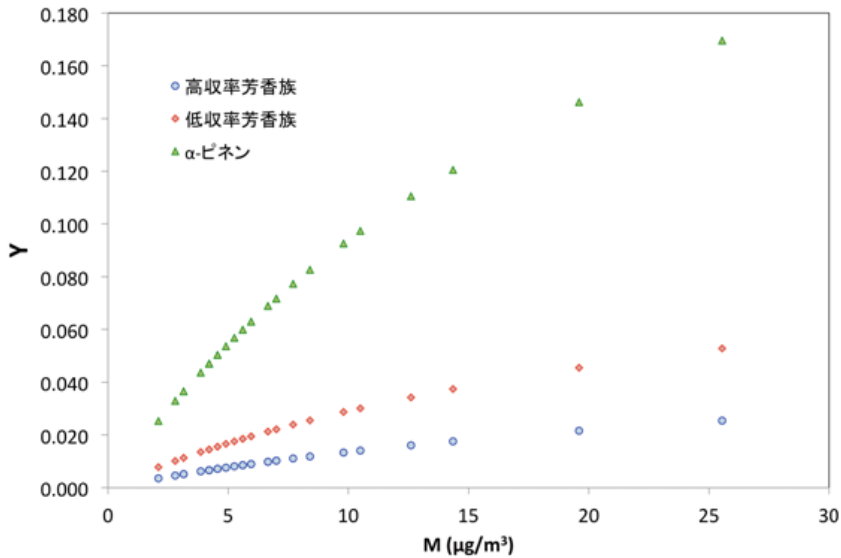


図 1.4.2.2 東京都大気における有機エアロゾル生成能 (Y)

※ 補足説明：粒径分布関数

個数表示、表面積表示、体積表示、重量表示の粒径分布関数 $n(a)$, $s(a)$, $v(a)$, $m(a)$

$$dN = n(a)da$$

a: 大気エアロゾルの粒径 (直径)

dN: 単位体積中に含まれる粒径 a から a+da の間の粒子の個数

$$dS = s(a)da$$

dS: 単位体積中に含まれる粒径 a から a+da の間の粒子の表面積

$$dV = v(a)da$$

dV: 単位体積中に含まれる粒径 a から a+da の間の粒子の体積

$$dM = m(a)da$$

dM: 単位体積中に含まれる粒径 a から a+da の間の粒子の重量

大気エアロゾルは、粒径が5桁にもわたって変化するので、粒径分布は対数で表されるのが一般的である。

$$dN/d \ln a = a \cdot n(a)da$$

$$dS/d \ln a = a \cdot s(a)da = \pi a^2 \cdot dN/d \ln a$$

$$dV/d \ln a = a \cdot v(a)da = (\pi/6)a^3 \cdot dN/d \ln a$$

大気エアロゾルの粒径分布は対数正規分布でほぼ近似的に表せる。個数表示、体積表示の粒径分布関数は次のように表される。

$$dN/d \ln a = [N/(\sqrt{2\pi} \ln \sigma_g)] \exp[-(\ln a - \ln \tilde{a}_{gN})^2 / (2 \ln^2 \sigma_g)]$$

$$dV/d \ln a = [V/(\sqrt{2\pi} \ln \sigma_g)] \exp[-(\ln a - \ln \tilde{a}_{gV})^2 / (2 \ln^2 \sigma_g)]$$

N: 単位体積中に含まれる全粒子数

V: 単位体積中に含まれるエアロゾルの総体積

σ_g : 幾何標準偏差

\tilde{a}_{gN} : 個数幾何平均径

\tilde{a}_{gV} : 体積幾何平均径

$$\tilde{a}_{gV} = \tilde{a}_{gN} \cdot \exp(3 \ln^2 \sigma_g)$$

Whitby, Scerdrup によれば、

微小モード: $\tilde{a}_{gN} = 0.069 \mu\text{m}$, $\sigma_g = 2.03$,

$\tilde{a}_{gV} = 0.31 \mu\text{m}$

粗大モード: $\tilde{a}_{gN} = 0.98 \mu\text{m}$, $\sigma_g = 2.15$,

$\tilde{a}_{gV} = 5.7 \mu\text{m}$

エイトケン粒子: $\tilde{a}_{gN} = 0.013 \mu\text{m}$, $\sigma_g = 1.7$

引用文献

1. Pandis S.N. et al., Secondary organic aerosol formation and transport. *Atmos. Environ.*, 26A, 2269-2282 (1992).
 2. Odum J.R. et al., Gas/Particle Partitioning and Secondary Organic Aerosol Yields, *Environ. Sci. Technol.*, 30, 2580-2585 (1996).
 3. Odum J.R. et al., Aromatics, Reformulated Gasoline, and Atmospheric Organic Aerosol Formation, *Environ. Sci. Technol.*, 31, 1890-1897 (1997).
-

参考文献

1. 太田幸雄、「大気エアロゾル」、季刊化学総説、10 大気の化学、1990、pp.123-145、学会出版センター
-

4.3 VOCの発がん性

4.3.1 発がん物質について

(ア) 発がんとは、発がん性とは

正常な細胞は、からだの機能を保つためにその成長や寿命がコントロールされています。発がんとは、このコントロールが効かなくなり増殖し続ける腫瘍細胞となる過程のことです。発がんの過程は、イニシエーション、プロモーション、プログレッションと呼ばれる多段階が存在しています。それぞれの段階は以下のように説明されています。

イニシエーション

化学物質が遺伝子(DNA)に結合して、DNAの塩基配列に異常が生じます。放射線によっても同様の異常が発生します。これらの遺伝子の損傷が修復されずに突然変異として固定される、発がんの最初のステップをいいます。突然変異が固定された細胞は前腫瘍細胞に変化します。ただし、この作用だけでがんになるとは限りません。

プロモーション

もととなった言葉は「促進」「助長」といった意味をもちます。遺伝子の損傷を持った前腫瘍細胞が異常に増殖し始めます。プロモーション作用をもつ物質だけでは発がんには至りません。イニシエー

ションの後でそのような物質が作用した時に発がんが起こります。

プログレッション

良性細胞が、制御の効かない悪性細胞へと変化していきます。

発がん性とは、ある物質を生体内に取り入れることによって、その影響で体内に悪性腫瘍を発生させる、または発生を促進する毒性のことです。

(イ) 発がんリスクの分類

国際癌研究機関(IARC:WHOに設置されている専門機関)が、化学物質、混合物、特定の職業における活動や、喫煙などの行為を含む環境を、ヒトに対する発がんリスクの確度によって5グループに分類し公表しています¹⁾。表1.4.3.1はIARCによる発がんリスクの分類と、各グループに対してどのような証拠の確度が設定されているかを示しました。証拠の確度は表1.4.3.2に示したような一定の評価基準に従って決められます²⁾。

表 1.4.3.1 IARC による発がんリスク分類

(参考：IARC、“Agents Classified by the IARC Monographs, Volumes 1-106”、IARC ホームページ、2013/10/30 更新、<http://monographs.iarc.fr/ENG/Classification/index.php>、2014/01/21 確認)

グループ	発がん性の評価	登録数	証拠の確度
1	ヒトに対して発がん性がある (Carcinogenic to humans)	113	ヒト：A のとき それ以外でも、動物実験において A、かつヒトにおいても発がんメカニズムが作用していると認められる。
2A	ヒトに対しておそらく発がん性がある (Probably carcinogenic to humans)	66	ヒト：B、実験動物：A ヒトに対して C、実験動物に対して A で、その発がんメカニズムがヒトにおいても作用するという強い証拠がある。 例外、ヒト：B だけでも、次に該当する／発がんメカニズムに基づいて物質を分類したとき、その物質が属する物質群の1つ以上がすでにグループ1か2Aに分類されているとき。
2B	ヒトに対して発がんの可能性がある (Possibly carcinogenic to humans)	285	ヒト：B、実験動物：<A (十分とは言えない) ヒト：C、実験動物：A ヒト：C、実験動物：<A、メカニズムなどのデータによって証拠が支持される。 発がんメカニズムなどのデータのみから、強く発がん性であることが示されるとき。
3	ヒトに対する発がん性については分類できない (Not classifiable as to carcinogenicity to humans)	505	ヒト：C、実験動物：B or C 例外的に、ヒトに対して C、実験動物で A であっても実験動物における発がんメカニズムがヒトにおいて作用しないという強い証拠がある場合。 他のいずれのグループにも分類できない場合。 グループ3への分類は、通常、さらなる調査の必要性を示すもので、発がん性がないこと、安全であることの判断ではない。曝露が広範囲におこる場合や、がんのデータに複数の解釈が可能な場合などは、特に調査の必要性が高い。
4	ヒトに対しておそらく発がん性はない (Probably not carcinogenic to humans)	1	ヒトおよび実験動物：D ヒトに対して C でも、実験動物に対して D かつその証拠が発がんメカニズムその他のデータによって支持される。

表 1.4.3.2 発がんリスク分類の根拠となる試験データの評価基準

(参考：IARC, "Preamble to the IARC Monographs (amended January 2006)", IARC ホームページ 2006/01/23 改正、<http://monographs.iarc.fr/ENG/Preamble/index.php>、2014/01/21 確認)

証拠の確度	発がん試験データの評価	発がん性の証拠としての評価基準	
		ヒトに対して	実験動物で
A	十分な証拠 (Sufficient evidence of carcinogenicity)	物質物質への曝露と発がんとの間に、統計的に十分な信頼性を伴って、正の相関があるなど、因果関係があると認められるとき。	(a) 2種以上の動物において、もしくは (b) 1種の動物について、調査時期、研究機関、調査手法のいずれかを異にして行われた2つ以上の独立した調査研究において、物質と悪性腫瘍の発生率あるいは適切な組み合わせの良性および悪性腫瘍の発生率の上昇との間に因果関係が存在するとき。適切な実験方法によって、単一の種について雌雄両性について腫瘍発生率の上昇が認められた場合も十分な証拠と見なされる。単一種、単一性であっても、悪性腫瘍が発生率、標的部位、腫瘍のタイプ、発生の年齢などにおいて特異的な程度で起こる場合、多数の標的部位で腫瘍がみられるばあいには十分な証拠と見なされる。
B	限定的な証拠 (Limited evidence of carcinogenicity)	統計的に十分な信頼性を伴わないが、物質への曝露と発がんとの間に正の相関が認められとき。	(a) 発がん性のデータが単一の試験からしか得られていない、(b) 試験のデザイン、実施段階、結果の解釈のいずれかに疑問があり、それが解決されていない、(c) その物質によって、良性腫瘍のみ、もしくは悪性腫瘍の可能性のある病変しか引き起こされない、(d) その物質による発がん性の証拠が、狭い範囲の組織、臓器でのプロモーション作用を示す調査に限定されている、などに該当し、明確な評価を下すには限定的と見なされる場合。
C	不十分な証拠 (Inadequate evidence of carcinogenicity)	(発がん性を報告した) 調査研究の質、統一性、統計的信頼性が、曝露と発がんの間の因果関係を結論づけるには不十分なとき。 ヒトに関する発がん性のデータが存在しないとき。	実験データの質的または量的な制限から、発がん性があるとも判断できない場合。また実験動物に関する発がん性のデータが存在しないとき。
D	発がん性がないことを示す証拠 (Evidence suggesting lack of carcinogenicity)	既知のヒトへの曝露レベル範囲の全域で、その物質への曝露といかなる種類のがんとの間にも相関がないとする報告が複数存在するとき。	2種以上の動物について、用いられた試験の範囲内で発がん性ではないという結果が示されたとき。試験で用いられた種、標的部位、曝露年齢、曝露レベルの範囲において、発がん性がないことを示す証拠とされる。

(ウ) VOCの発がんリスク分類

PRTR 制度では、ヒトに対する発がん性があると評価されているものとして15種類の物質が、特定第一種指定化学物質として指定され届出対象とされています(第1章第5節3)。この中には、エチレンオキシド、1,3-ブタジエン、2-ブロモプロパン、ベンゼン、ホルムアルデヒドといったVOCに該当する物質が含まれています。これ以外にも、VOCに該当する物質について発がんリスク分類がなされているものが多数あります(表1.4.3.3)。

この分類について注意すべきことは、分類(グループ)の違いは、それぞれの要因の発がん性の強さの差ではなく、発がん性の証拠がどれだけそろっているかの差を表しているということです。特に、グループ3への分類は、通常、更なる調査の必要性を示すもので、発がん性がないこと、安全であることの判断ではないということに留意する必要があります。曝露が広範囲に起こる場合や、がんのデータに複数の解釈が可能な場合などは、特に調査の必要性が高いとされています。

表1.4.3.3には含まれませんが、燃焼過程での非意図的生成物であるダイオキシン類や多環芳香族炭化水素類についても発がんリスクの分類がなされています。ダイオキシン類では最も毒性が強いとされる2,3,7,8-TCDD(2,3,7,8-テトラクロロジベンゾ-1,4-ジオキシン)はグループ1、

その他はグループ3に分類されています。多環芳香族炭化水素ではベンゾ[a]ピレンがグループ1に分類されている他、ベンゾ[b]フルオランテンなど一般的に観測される化合物の多くがグループ2Bに分類されています。事業所排気に燃焼ガスが含まれる場合には、これらの物質についても注意が必要です。

表 1.4.3.3 各種対策で指定物質とされた VOC の発がんリスク分類

グループ	物質名	優先取組物質 (大気汚染防止法)	有害ガス (東京都環境確保条例)	室内濃度 指針値 (厚生労働省)	有機溶剤 中毒予防 規則
1	1,3-ブタジエン	○			
	ベンゼン	○	○		
	ホルムアルデヒド	○	○	○	
	塩化ビニルモノマー	○	○		
	酸化エチレン	○	○		
	トリクロロエチレン	○	○		○
2A	テトラクロロエチレン	○	○		○
2B	アクロニトリル	○			
	アセトアルデヒド	○		○	
	エチルベンゼン			○	
	クロロホルム	○	○		○
	1,4- ジオキサン				○
	p- ジクロロベンゼン			○	
	1,2- ジクロロエタン	○	○		○
	ジクロロメタン	○	○		○
	スチレン		○	○	○
	フタル酸ジ-2-エチルヘキシル			○	
	1,1,2,2- テトラクロロエタン				○
	四塩化炭素				○
	メチルイソブチルケトン		○		○
3	アクロレイン		○		
	イソプロピルアルコール		○		○
	エチレン		○		
	塩化メチル	○			
	キシレン		○	○	○
	シクロヘキサノン				○
	o- ジクロロベンゼン				○
	N,N-ジメチルホルムアミド				○
	臭化メチル		○		
	1,1,1-トリクロロエタン				○
	トルエン	○	○	○	○
	ピリジン		○		
	フェノール		○		

4.3.2 発がんリスク値を用いた リスク評価

カリフォルニア州大気資源局(CARB)は、大気中の種々の有害成分の健康影響の程度を評価する値として、各成分の発がんリスク、急性及び慢性非発がんリスク値(ユニットリスク)を公表しています³⁾。

非発がんリスクについては、①発症に必要な最低濃度(閾値)で表される、②影響部位及び症状が成分に固有であるなどの理由から、異なる成分間相互でのリスクの量的比較をすることが困難です。

一方、発がんリスクの評価では、イニシエーションに関わる物質(=イニシエーター)では閾値無し、プロモーションに関わる物質(=発がんプロモーター)では閾値あり、それぞれ異なるモデルが用いられます。

イニシエーターの影響は閾値を持たないため、発がんリスク値を異なる物質間で量的に比較することが可能です。発がんリスク値(inhalation unit risk, [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]⁻¹)は「70年間曝露において十万人中一人が発がんする濃度($\mu\text{g}/\text{m}^3$)の逆数」で表されます。これは「1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ の発がん物質の吸入により個人の全生涯(70年間)にわたって継続的に曝露された場合の発がん確率」を意味します。

表 1.4.3.4 は、各種対策で指定物質とされた VOC のうち、吸引による発がんリス

ク値が求められている物質と、それらのユニットリスク値をまとめました。ユニットリスク値が大きいほどその物質の発がんリスクが高いことを示します。

排出リスク評価値は、排出される発がん物質の排出係数(E_i)とユニットリスク値(U_i)の積の総和として求められます。

$$\text{排出リスク評価値} = \sum (E_i \times U_i)$$

表 1.4.3.4 VOC の吸引による発がんリスク値 (単位 : $[\mu\text{g}/\text{m}^3]^{-1}$)

(転載 : California Environmental Protection Agency, “Consolidated Table of OEHHA/ARB Approved Risk Assessment Health Values”¹⁾、California Environmental Protection Agency Air Resources Board ホームページ、2012/05/03 更新、<http://www.arb.ca.gov/toxics/healthval/contable.pdf>、2014/01/21 確認)

グループ	物質名	ユニットリスク値
1	1,3-ブタジエン	1.7E-04
	ベンゼン	2.9E-05
	酸化エチレン	8.8E-05
	ホルムアルデヒド	6.0E-06
	塩化ビニルモノマー	7.8E-05
	トリクロロエチレン	2.0E-06
2A	テトラクロロエチレン	5.9E-06
2B	アクロニトリル	2.9E-04
	アセトアルデヒド	2.7E-06
	エチルベンゼン	2.5E-06
	クロロホルム	5.3E-06
	1,4-ジオキサン	7.7E-06
	p-ジクロロベンゼン	1.1E-05
	1,2-ジクロロエタン	2.1E-05
	1,1,2-トリクロロエタン	1.6E-05
	フタル酸ジ-2-エチルヘキシル	2.4E-06
	ジクロロメタン	1.0E-06
	1,1,2,2-テトラクロロエタン	5.8E-05
	四塩化炭素	4.2E-05

* 例えば、「1.7E-04」は、「0.000170」を表します。

* ユニットリスク値の最終更新日 : 2013 年 8 月 1 日

引用文献

1. IARC, “Agents Classified by the IARC Monographs, Volumes 1-101”, IARC ホームページ、2011/04/13 更新、<http://monographs.iarc.fr/ENG/Classification/index.php>、2014/01/21 確認
2. IARC, “Preamble to the IARC Monographs (amended January 2006)”, IARC ホームページ、2003/01/23 更新、<http://monographs.iarc.fr/ENG/Preamble/index.php>、2014/01/21 確認
3. California Environmental Protection Agency, “Consolidated Table of OEHHA/ARB Approved Risk Assessment Health Values”, California Environmental Protection Agency Air Resources Board ホームページ、2012/05/03 更新、<http://www.arb.ca.gov/toxics/healthval/contable.pdf>、2014/01/21 確認

4.4 臭気の問題

4.4.1 悪臭公害の特徴

悪臭は、騒音や振動とともに感覚公害と呼ばれる公害の一種で環境基本法第2条で定める「公害」（いわゆる**典型公害**）の一つに挙げられています。悪臭による公害は、その不快なにおいにより生活環境を損ない、主に感覚的・心理的な被害を与えるものです。こうした感覚公害の特性から、住民の苦情や陳情という形で顕在化し、汚染物質等の蓄積はないものの、広範囲に「影響」を及ぼすことがあります。

悪臭の大部分は、低濃度・多成分の臭気物質からなっています。これらが複合して住民の嗅覚に作用し、苦情に結びつきます。しかし、嗅覚という感覚には個人差があり、その感度は年齢、性別、健康状態、喫煙の習慣などに影響されます。このため、特定の人には悪臭として感じられるが、他の人は感じないといった状況が起こります。

また、悪臭の原因となる臭気物質は広範囲に風で運ばれて拡散するため、発生源の特定を難しくしている場合も少なくありません。更に、公害苦情の特徴である地域の間人間関係や例えば土地の境界争いといった悪臭の程度とは無関係の別の要因も加わり、悪臭苦情問題を複雑にしている例もあります。上記のように種々の

要因が関係することで、人の感覚に基づく悪臭問題の解決はしばしば困難となり、その対応に長期間を要することが多いのです。

4.4.2 悪臭に係る苦情

(ア) 近年の推移

平成23年度の総苦情件数14,569件のうち、悪臭防止法の規制対象となる規制地域内の工場・事業場に対するものは5,903件(40.5%)、規制地域外の工場・事業場に対する苦情が1,715件(11.8%)でした。発生源の業種別に見ると、化学工場、飼料・肥料、食料品製造工場が7.8%、印刷塗装業などを含むその他の製造工場が8.0%と、製造工場全体で全苦情件数のおよそ16%を占めています(図1.4.4.1)。

悪臭に関する苦情件数は、悪臭防止法が制定された昭和47年をピークに減少傾向にありましたが、平成5年以降は増加に転じ、平成15年の24,587件をピークに8年連続で減少となっています。しかし、苦情件数が1万件前後であった平成3年～5年と比較すると未だ依然として高い水準です(図1.4.4.2)。これは野外焼却や小型焼却炉の関係の他に、国民がダイオキシン汚染に対して過敏になっており、従来ならば苦情の電話を掛けなかった程度のもので苦情対象になったことが原因とされています。

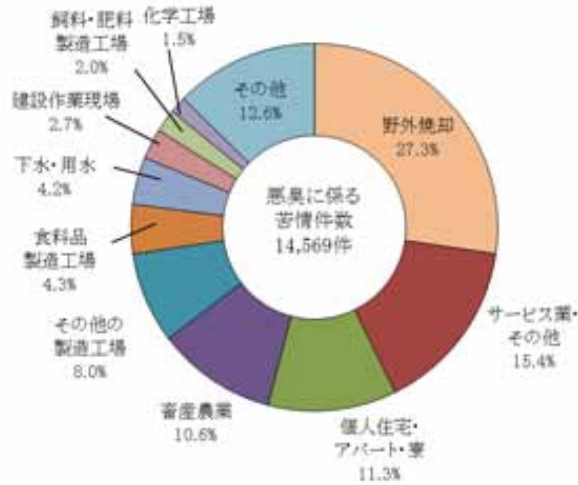


図 1.4.4.1 悪臭に係る苦情の内訳 (平成 23 年度)

(転載:環境省、「平成 23 年度悪臭防止法施行状況調査について」、環境省ホームページ、2012/12/27 更新、http://www.env.go.jp/air/akushu/kujou_h23/index.html、2014/01/23 確認)

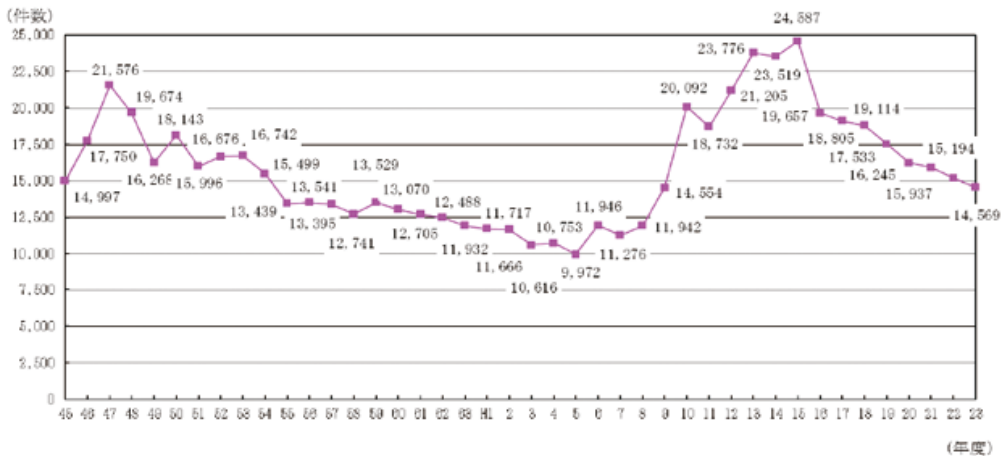


図 1.4.4.2 悪臭苦情件数の推移

(転載:環境省、「平成 23 年度悪臭防止法施行状況調査について」、環境省ホームページ、2012/12/27 更新、http://www.env.go.jp/air/akushu/kujou_h23/index.html、2014/01/22 確認)

(イ) 悪臭苦情に対する基本的な考え方

環境省が平成14年4月に作成した「臭気対策行政ガイドブック」(<http://www.env.go.jp/air/akushu/guidebook/index.html>)では悪臭苦情に対する基本的な考え方として、次のように述べられています。「事業活動に伴って排出される臭気によって、工場・事業場と周辺住民との間にトラブルが生じる場合があります、そのうちのいくつかが悪臭苦情として市区町村などに持ち込まれる。苦情の発生は、原因となる工場・事業場が規制の対象であるか、また、規制基準に適合しているかを問わない。したがって、苦情があった場合、規制対象の事業者に法に定める規制基準を遵守させることはもちろんであるが、場合によっては、苦情対応として規制対象でない事業者に防止対策を講じさせたり、規制基準遵守以上の改善をするよう事業者を説得することなどが重要となる。」(「悪臭苦情処理の流れ」から)

以上のことから、製造工場を含む各種事業所での悪臭防止施策の推進が重要視されています。悪臭によるハザードを回避するための、有効な防止策としてVOC処理装置や脱臭、防臭装置の導入が推奨されます。

4.4.3 悪臭防止法における臭気の評価方法

各都道府県知事が定めた規制地域内の工場等で、事業活動に伴って悪臭物質を発生させるものは、悪臭防止法の適用を受けます。悪臭防止法での規制には2通りあります。

(ア) 悪臭物質の濃度による規制

特定悪臭物質として指定されている22物質(基礎編1.5.2 表1.1.5.4)については、機器分析で濃度を測定し(基礎編3.1.5 (ア) 及び基礎編3.3.6 (ア) 参照)、対応する臭気強度を求めます。特定悪臭物質の濃度と臭気強度の対応は表1.4.4.1に示す通りです。事業場敷地境界線における規制基準値は、6段階臭気強度表示法(表1.4.4.2)の臭気強度2.5から3.5に対応する特定悪臭物質の濃度として定められています。ただし、においの感じ方・不快感には、個人差や地域差などがあることから、地域の実態に応じて基準値を各都道府県知事が設定することとされています。

表 1.4.4.1 規制基準が設定される特定悪臭物質名と臭気強度に対応する濃度
(転載：(社)におい・かおり環境協会編、ハンドブック悪臭防止法、ぎょうせい (2010))

特定悪臭物質名	規制基準の設定			臭気強度に対応する濃度 (ppm)		
	第1号	第2号	第3号	臭気強度2.5	臭気強度3.0	臭気強度3.5
アンモニア	○	○		1	2	5
メチルメルカプタン	○		○	0.002	0.004	0.01
硫化水素	○	○	○	0.02	0.06	0.2
硫化メチル	○		○	0.01	0.05	0.2
二硫化メチル	○		○	0.009	0.03	0.1
トリメチルアミン	○	○		0.005	0.02	0.07
アセトアルデヒド	○			0.05	0.1	0.5
プロピオンアルデヒド	○	○		0.05	0.1	0.5
ノルマルブチルアルデヒド	○	○		0.009	0.03	0.08
イソブチルアルデヒド	○	○		0.02	0.07	0.2
ノルマルバレールアルデヒド	○	○		0.009	0.02	0.05
イソバレールアルデヒド	○	○		0.003	0.006	0.01
イソブタノール	○	○		0.9	4	20
酢酸エチル	○	○		3	7	20
メチルイソブチルケトン	○	○		1	3	6
トルエン	○	○		10	30	60
スチレン	○			0.4	0.8	2
キシレン	○	○		1	2	5
プロピオン酸	○			0.03	0.07	0.2
ノルマル酪酸	○			0.001	0.002	0.006
ノルマル吉草酸	○			0.0009	0.002	0.004
イソ吉草酸	○			0.001	0.004	0.01

○規制基準が定められているもの

表 1.4.4.2 6段階臭気強度表示法による臭気強度と規制基準の関係

(転載：環境省、「臭気対策行政ガイドブック」、環境省ホームページ 2002/04 更新、<http://www.env.go.jp/air/akushu/guidebook/01.pdf>、2014/01/22 確認)

臭気強度	内容	
0	無臭	
1	やっと感知できるにおい (検知閾値濃度)	
2	何のにおいかわかる弱いにおい (認知閾値濃度)	
(2.5)	(2と3の中間)	敷地境界線の 規制基準設定 の範囲
3	らくに感知できるにおい	
(3.5)	(3と4の中間)	
4	強いにおい	
5	強烈なにおい	

(イ) 臭気指数による規制

ある発生源から多種類の悪臭物質が排出されると、それらが複合して強い複合臭となる場合があります。このような場合、個々の特定悪臭物質についての規制基準は下回っていても苦情・陳情に結びつくことがあります。

また、臭気濃度は、基本的には臭気物質の濃度と正比例の関係にあります。これに対し、人間の感覚(知覚強度)は対数関数的な増減をします(ヴェーバー-フェヒナーの法則)。このため、より人の感覚に近い評価方法として臭気指数による規制が導入されました。

臭気指数は以下のように定義されています。

「平成7年環境庁告示第63号「臭気指数及び臭気排出強度の算定の方法」(嗅覚測定法)により、あらかじめ嗅覚が正常であることの検査(嗅覚検査)に合格した被検者が、試料を無臭空気で希釈したものを嗅いでいき、臭気を感じなくなったときの希釈倍数(臭気濃度)を求め、その常用対数値に10を乗じた数値をいう。

臭気指数 = $10 \times \log(\text{臭気濃度})$ 」(引用: 環境省、「臭気指数規制ガイドライン」、平成13年3月、http://www.env.go.jp/air/akushu/guide_ind/index.html)

臭気指数の測定方法については、[基礎編 3.1.5 \(イ\)](#) 及び [基礎編 3.3.6 \(イ\)](#) を参照してください。

4.4.4 臭気対策に関するリンク

(ア) 臭気対策行政ガイドブック

[環境省]

<http://www.env.go.jp/air/akushu/guidebook/index.html>

(イ) 悪臭防止法施行状況調査

(悪臭苦情の統計データ) [環境省]

<http://www.env.go.jp/air/akushu/index.html>

(ウ) においシミュレータ

(臭気指数規制第2号基準算定ソフト) [環境省]

環境省では悪臭防止法施行規則第6条の2に定められた排出口における臭気排出強度及び臭気指数に係る規制基準の設定方法等に基づき、規制基準を容易に算出するソフトウェア(においシミュレータ)を作成、公開しています。このソフトでは、算出された結果と実際の排出ガスの臭気排出強度及び臭気指数を比較することにより、規制基準への適合状況を判断することができます。においシミュレータは以下のサイトからダウンロードして使用することができます。

<http://www.env.go.jp/air/akushu/simulator/index.html>

東京都の規制基準値については、以下のサイトをご利用ください。

規制・指導基準(東京都環境局)

http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/air/offensive_odors/restriction_guide.html

(工) 臭気測定認定事業所 [公益社団法人
におい・かおり環境協会]

<http://www.orea.or.jp/data/ninteiList.html>

公益社団法人におい・かおり環境協会は、臭気に係わる嗅覚測定法が適切に行われることを目的として、平成5年4月から事業所単位の資格である「臭気測定認定事業所」の審査登録制度を設け、技術基準や設備基準等を満たす機関の認定事業を行っています。

事業所からの排出ガスによる環境影響を考えた場合、主に VOC と CO₂ が挙げられます。本章では、これらの物質を中心に、事業所における環境影響軽減の考え方を整理します。

5.1 事業所単位で考える環境影響軽減法

事業所における環境影響を定量的に評価するためには、製品製造に関わる原料の購入、使用から、廃棄に至るまでの環境・安全・健康負荷を配慮したライフサイクルアセスメント (LCA) という手法を用います。LCA の目標は、製品の品質を保ちつつ、エネルギーの消費量や二酸化炭素の排出量、VOC の排出量を軽減することにあります。本章では、様々な VOC 軽減技術の導入による排出 VOC の環境影響軽減効果を評価するために、製品を製造する際の消費エネルギー、VOC 使用量、これらの排出に伴う環境負荷量を下記に示した ISO-LCA 手法¹⁾のうち①～④を参考にして評価します。

ISO-LCA の実施手順

- ① 調査範囲と目的の設定 (シナリオの作成)
- ② インベントリ分析 (環境負荷の定量化と集計・分析)
- ③ インパクト評価 (環境影響の定量化と評価)

④ 結果の解釈 (分析・評価の考察)

⑤ 報告書の作成

⑥ クリティカルレビュー (ISO-LCA としての適合性チェック)

ステップ 1: 目的と調査範囲

製品製造のための材料購入から製品完成までの環境負荷軽減効果を評価します。

ステップ 2: 環境負荷分析

環境負荷の程度を事業所単位で分析する場合、最初に行わなければならないのは、現在の製品製造における入口と出口の状況を数値として明らかにすることです。そのためにインプットデータとアウトプットデータの項目を明らかにし、精査します。インプットデータには、使用されるエネルギー、水資源、化学物質の使用量等を、アウトプットデータには大気や水域への排出物、廃棄物などを挙げるができます (図 1.5.1.1 参照)。

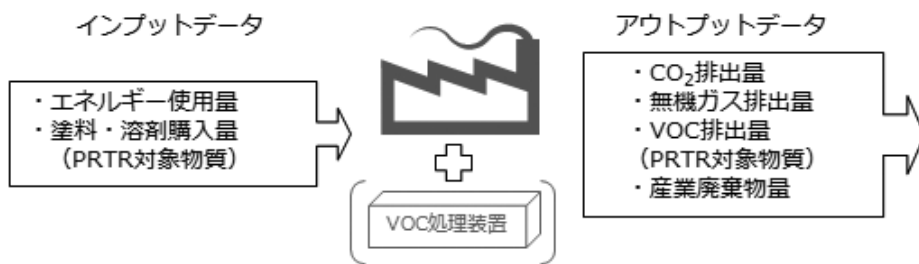


図 1.5.1.1 製品製造における環境負荷の評価項目

・インプットデータ

ここで使用されるエネルギーとは、製品製造、VOC 処理装置及びその稼働に関わるエネルギーを指します。それぞれのエネルギーは、環境省より公表されている二酸化炭素排出係数²⁾を用いて CO₂ 排出量に換算し、アウトプットデータにある CO₂ 排出量と統合化して評価されます。

塗料・溶剤の購入量のうち PRTR 対象物質は、化学物質排出把握管理促進法により購入及び排出量に関する報告義務があります。また、塗料には、溶剤型塗料の他、水性塗料、粉体塗料など、印刷インキにも油性、植物油性、水性などがあり、それぞれ VOC 排出量が大きく異なります。一般には、顔料などの固形分以外は全て気中に排出されるものとされます。

・アウトプットデータ

CO₂ 排出量には、全工程におけるエネルギー消費により発生するものが挙げられます。平成 21 年度東京電力の二酸化

炭素排出係数は 0.000384 t -CO₂/kWh²⁾と報告されています。その他 VOC 処理装置による VOC 及び補助燃料の分解・燃焼に伴って発生する CO₂ が含まれます。エネルギー源、燃料の種類によってコスト及び CO₂ 排出量が異なるので、装置に適したものを選ぶ必要があります(基礎編 2.5 及び塗装編 5.3 参照)

無機ガス排出量には、製品製造及び VOC 処理工程において生成する CO₂ 以外の無機ガスが含まれます。

VOC 排出量は、排気ダクト及び作業環境の VOC 濃度を測定することにより得られますが、大まかには、スプレー塗装の場合、塗料のおよそ半分の重量の VOC が排気されると考えられます(塗装編 4.3.2 参照)。工程別には、塗装段階において約 70%、乾燥段階において約 30% の VOC が排出されます(塗装編 1.2.2(工) 参照)。また、ここでは報告義務のある PRTR 対象物質の排出量を把握する必要があります。

産業廃棄物量には、爆発性・毒性・感

染性を有する特別管理産業廃棄物、塗料が固形化した廃棄物、塗料を含んだ水溶液などの廃棄物などが含まれます。また、溶剤の購入量から廃棄物として排出された量を差し引いた量が環境へ排出された量として考えることができます。

ステップ3: 環境影響評価

ここでは、アウトプットデータをもとに環境に与える影響を評価します。評価項目には、地球温暖化、酸性化、光化学オキシダント生成、粒子生成、人間毒性、また地域住民に対する社会的責任として悪臭物質に対する評価も必要になります(基礎編 4.4 参照)。

地球温暖化

地球温暖化を進行させる温室効果ガスの排出量。代表的な温室効果ガスであるCO₂との相対値で示したGWP(Global Warming Potential、地球温暖化係数)の100年値を用いて評価を行う。

酸性化

排出に伴い雨が酸性化するなどの問題を生じさせるNO_xやSO_xの排出量。H⁺イオンの相当数をSO₂との相対値で示したAcidification Potential(AP)を用いて評価を行う。

光化学オキシダント

窒素酸化物や炭化水素類などの一次汚染物質が、太陽光線中の紫外線を受けて光化学反応を起こして発生する物質。光化学ス

モッグの原因物質である。健康や植物等に有害である。排出量を変化させたときのオゾン濃度の変化をC₂H₄との相対値で示したPhotochemical Ozone Creation Potential(POCP)や単位VOC量が生成しうるオゾン量を示す最大オゾン生成(Maximum Incremental Reactivity: MIR)(基礎編 4.1.2 参照)を用いて評価を行う。

粒子生成

気中のVOCが化学反応によってより蒸気圧が低い物質を生成し、凝集して粒子化、または他の大気エアロゾル表面に吸着する可能性のある物質質量。これまで大気で扱われてきたSPMの他、さらに微小な粒子についても評価が必要。(基礎編 1.3.2 及び基礎編 4.2 参照)

人間毒性

人体に有害な物質の排出によって、健康影響を受ける。多くの指標が存在するが、最もデータの多く集まったTLV-TWAの逆数を用いて評価を行う。

悪臭物質生成

乾燥過程などVOCの酸化分解などによって悪臭物質が生成する。機器分析によって物質が同定されるものもあるが、未同定のものも多数ある。3点比較式臭袋法などにより臭気指数を測定し、指標とする。(基礎編 4.4 参照)

これらの環境負荷項目を統合化して環境影響を評価するために、Eco-indicator 99、LIME(Life-cycle Impact assessment Method based on Endpoint modeling)などの手法が開発

されていますが、多くの事業所では、地球温暖化対策としてCO₂排出量、環境負荷物質としてVOC、PRTR、NO_x、SO_x、産業廃棄物の排出量を個々に示して環境影響の指標としています。

排出される化学物質については、その排出量が重要となるため、大風量排気により低濃度のVOCが多量に排出される場合も高濃度のVOCが排出される場合と同様の環境負荷があると考え、総量としてのVOC排出量を評価する必要があります。また、個々の化学物質について光化学オキシダント生成能や粒子生成能、人間毒性や悪臭などの特性を把握する必要があります。特に後述するVOC処理装置を用いた場合、ターゲット物質と処理後に発生する物質の特性を比較して、環境に対する改善効果を評価する必要があります。

ステップ4: 結果の解釈

ここでは、アウトプットデータで示した環境負荷から評価した環境影響に対して、それぞれの製品製造工程における環境負荷を調査し、工程に沿った環境影響低減対策の提案を行います。具体的な対策は次の項で述べますが、各事業所に適した対策を選定するためには、図1.5.1.2に示したように、環境影響だけでなく、製品の品質など多方面からの検討が必要です。ここでなされた検討結果をインプットデータにフィードバックし、事業所経営全体の成果として表現する必要があります。東京都では、「[基礎編第6章 VOC削減への取組](#)」で述べられているVOC対策アドバイザーなど公的な機関に依頼し改善対策のアドバイスを受けることができます。また、塗装における対策については、「[塗装編第4章 工程改善によるVOC削減の手法](#)」でも詳しく述べられています。

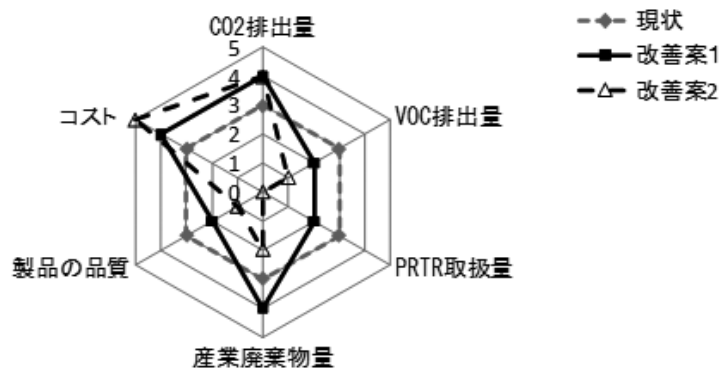


図 1.5.1.2 環境影響低減手法選定のための検討項目

環境影響低減対策の効果を評価するためには、ステップ3で述べたLIMEなどを用いた環境影響評価を行う必要がありますが、多くの企業では、地球温暖化物質としてCO₂排出量、トルエンなどのVOC排出量、PRTR対象物質取扱量などの経年変化を示して低減効果の評価を行っています。図1.5.1.3に自動車製造における

環境影響低減対策の効果としてCO₂排出量の推移を示します。

CO₂排出量を売上高で割った売上高原単位あるいは、CO₂排出量を企業物価指数により補正した実質売上高で割った実質売上高原単位をCO₂排出削減の管理指標とすることにより、事業所経営に即した評価を行うことができます。



図 1.5.1.3 自動車製造におけるCO₂排出量の推移

(転載：スズキ株式会社、「スズキ環境・社会レポート2013」、2013、p.37、http://www.suzuki.co.jp/about/csr/report/2013/pdf/2013_envj_03_02.pdf、2014/01/22 確認)

一方、製品の価値(売上や製品の機能)をその提供に伴う環境負荷で割った**環境効率**という指標を用いて、製品の価値を示す概念があります。しかし業種により

価値の定義や環境負荷の計算式が異なるため、その統一的指標の開発が急がれています。

引用文献

1. 稲葉敦監修、「LCAの実務」、(社)産業環境管理協会、2005、p.239
2. 環境省、「平成24年度の電気事業者ごとの実排出係数・調整後排出係数等の公表について(お知らせ)」、環境省ホームページ、2013/12/19 報道発表、<http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=17512>、2014/01/22 確認

5.2 作業工程単位で考える

環境影響軽減法

製品製造の工程中には、VOC 排出量の多い工程、環境負荷が大きい工程があります。例えば塗装業において最も多くの VOC を排出する工程は、塗装工程です（[塗装編 1.2](#) 参照）。一方悪臭物質が発生される工程は、乾燥工程です（[塗装編 2.3](#) 参照）。ここでは、これらの工程において適用できる環境影響軽減方法を考えます。

・作業改善

塗料の保管方法や調合方法を工夫するなどの工程改善により、コストをかけずに VOC 排出量を約 5% 削減することができます。この他にも、塗装製品の設置場所、スプレー作業の最適化などにより、VOC 排出量削減を期待できる作業改善があります。詳しくは塗装編で述べられています（[塗装編第 4 章](#)参照）。

塗装工程では、ブース内の VOC が高濃度にならないように大きな風量で換気がなされます。しかし、必要以上に風量を増加させることは、消費エネルギーを増大させるだけでなく、後に述べます VOC 処理装置の負荷にもなります。したがって、ブース内の VOC 濃度を正しく把握し、適正な風量で運転することにより消費エネルギーを削減し、処理装置の VOC 処理効率を上げることができます。

・材料の選定

塗装工程や印刷工程は、製品製造工程のうちで最も VOC 排出量の多い工程です。塗料やインキの選択により、これらの工程における VOC の排出量を削減することができます。近年これまで主流だった溶剤型の塗料・インキに替わり、水性の製品や溶剤を使用しない塗料・インキが開発されています（[塗料編 4.3.5](#) 参照）。例えば、塗料には大きく分けて溶剤型塗料、ハイソリッド塗料、水性塗料、粉体塗料があります。このうち最も多く使用されているのは溶剤型塗料ですが、多くの機能性を持たせることができる反面 VOC 排出量の多い塗料です。ハイソリッド塗料では、顔料の割合が多くなっており、VOC 排出量を溶剤型より約 30% 減らすことができます。また、水性塗料では約 60%、粉体塗料では 100%、VOC 排出量を減らすことができます（[図 1.5.2.1](#) 参照）。ただし、溶剤の変更により材料費が高くなったり、これまでの装置の変更が必要になったり、求められる製品の機能性が実現できない、機能性を持たせるために添加物が必要となる、などの課題が生じることもあるため、適応の可能性を考えることが必要です。

また、乾燥工程は、悪臭の原因となる物質の排出が多くなる工程です。臭気の問題は、近隣住民とのよい関係を築きた

めには必ず解決すべき課題です。塗料やインキによっては、悪臭の強い物質を排出する場合がありますので、これらを選択する際には臭気についても考慮しましょう。

・使用機器の変更

近年塗装工程で使用するスプレーガン

など、製品製造工程で使用する機器の改善が進められています。これらの機器は、数万円から数十万円のコストで、改善された機器への変更ができます（[塗装編 4.3.3](#)参照）。これらの情報を得るために各種工業会に加盟し、講習等を受けることが有効です。

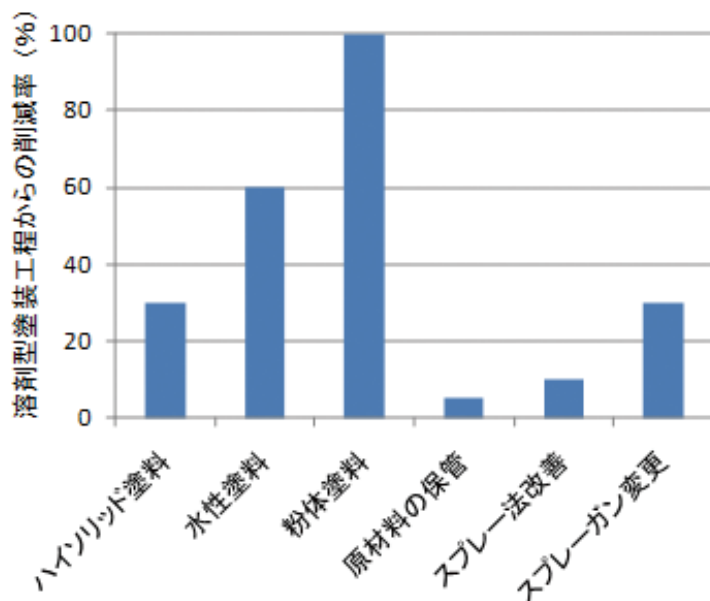


図 1.5.2.1 溶剤型塗料を用いた塗装工程における対策別 VOC 排出量削減率の比較

5.3 VOC 処理装置単位で考える環境影響軽減法

事業所における環境影響低減方法の中でも VOC 処理装置の導入は、より直接的に確実に環境影響軽減につながる方法であるといえます。VOC 処理装置には、大きく分けて、**燃焼法、吸着法、その他の**

方法があります。何れの方法でも、環境影響低減方法として VOC 処理装置を導入する場合、VOC 処理装置から排出されるガスの環境影響評価を行っておく必要があります。事業所における環境影響評価と同様にアウトプットデータから環境影響評価を行い、インプットデータにフィードバックすることにより装置全体の環境影響軽減効果を評価します(図 1.5.3.1 参照)。

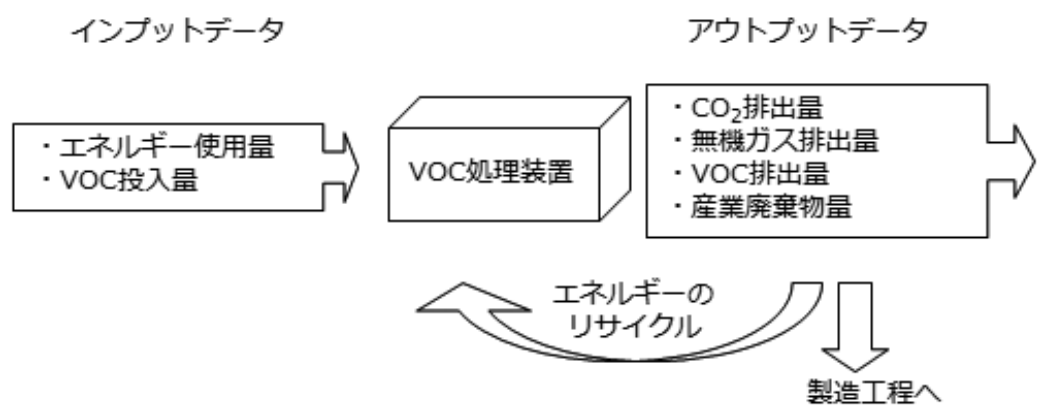


図 1.5.3.1 VOC 処理装置における環境負荷の評価項目

・インプットデータ

エネルギー使用量は、装置稼働に伴うエネルギー量を指します。乾燥炉などの製造工程中に、発生する熱を利用できる場合は、このエネルギー使用量から差し引くことができます。また、処理しなければならない VOC の投入量に応じて、装置の運転条件を制御することによりエネルギー使用量を減らすことができます。

VOC 投入量は、処理装置に導入される VOC の量を指します。VOC 濃度×風量に

より算出されますが、装置の VOC 処理能力・特性とともに作業環境の保全にも留意した装置の設計・配置が必要になります。また、溶剤の回収機能を有した装置では、再利用する溶剤量を事業所におけるインプットデータに加えることになります。

・アウトプットデータ

CO₂ 排出量には、処理装置稼働のためのエネルギー消費により発生するものの

ほか、VOCの分解・燃焼に伴って発生するCO₂が含まれます。使用されたエネルギーは、環境省より公表されている二酸化炭素排出係数¹⁾によりCO₂排出量に換算することができます。また、燃焼法によるVOC処理では、補助燃料が別途必要になる場合があります、ランニングコストの上でも大きな割合を占めます(基礎編 2.5 及び塗装編 5.3 参照)。

無機ガス排出量及びVOC排出量は、どちらも処理されなかったVOCと装置によって処理される際に副生成物として発生する無機ガス及びVOCを指します。処理装置の設計においては、導入されたVOCより排出される物質の環境影響が十分に低いことが求められます。特に多くの処理装置で導入されているVOCの酸化処理で発生しやすい含酸素化合物は、悪臭の原

因物質となることがあるので、処理後に悪臭が増加することもあり、注意が必要です。表 1.5.3.1 に装置設計において留意すべき項目について示しました。各項目のランクに従って図 1.5.3.2 のようなグラフを作成し、総合的観点からみたVOC処理装置の評価を行うことが有効です。

また、VOC処理装置の導入には、装置購入によるイニシャルコストの他、装置稼働のためのランニングコスト、装置メンテナンスに係るコストと装置の耐用年数も考慮する必要があります。

エネルギーや燃料の使用量を削減することは、CO₂とコストの両者を削減することにつながるため、複数の技術及び設備との組み合わせと、事業所の特性に合わせた選択が必要です(基礎編 2.5 参照)。

表 1.5.3.1 各評価項目におけるランク

ランク	CO ₂ (kg/日)	オキシダント (ppm)	粒子 (mg/m ³)	毒性* (ppm)	悪臭 (臭気強度)	コスト** (万円)	処理風量 (m ³ /min)	寿命 (年)
1	<10	<0.01	<0.01	<0.05	0,1	<100	>1000	>20
2	10-30	0.01-0.02	0.01-0.03	0.05-0.1	2	100-300	500-1000	10-20
3	30-50	0.02-0.03	0.03-0.05	0.1-0.3	3	300-500	100-500	5-10
4	50-100	0.03-0.05	0.05-0.1	0.3-0.5	4	500-1000	10-100	3-5
5	>100	>0.05	>0.1	>0.5	5	>1000	<10	<3

* : TLV/100 を規準とする。表はトルエンについて計算した例

** : イニシャルコストのみ、装置稼働、補助燃料、メンテナンスなどは別途計算が必要

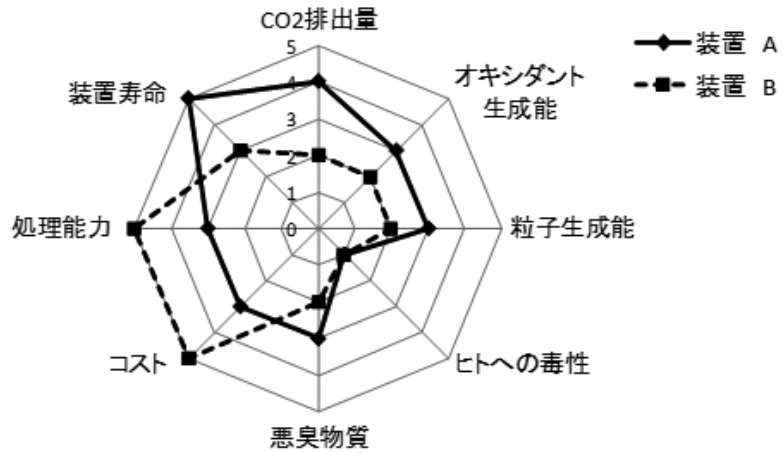


図 1.5.3.2 VOC 処理装置の評価項目

引用文献

1. 環境省、「平成23年度の電気事業者ごとの実排出係数・調整後排出係数等の公表について(お知らせ)」、環境省ホームページ、2013/12/19 報道発表、<http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=17512>、2014/01/22 確認

5.4 VOC 対策技術導入による環境影響の軽減効果

これからの製品製造業界では、真に環境影響の軽減に留意した生産活動が求められていることから、LCA 手法を用いてエネルギー使用量、原材料使用量、環境負荷物質の排出量を把握し、削減することが必須であるといえます。現在行ってい

る製品製造工程における材料購入量、使用量及びエネルギー使用量を工程別に数値化することにより環境負荷を削減できるポイントが見えてきます。そのポイントに従って VOC 対策技術を導入することにより環境負荷低減とコスト削減を実現することができます。表 1.5.4.1 に塗装工場を例に VOC 対策技術導入の流れを示します。

表 1.5.4.1 VOC 対策技術の導入（塗装工場）

	Step 1	Step 2	Step 3
調合・洗浄工程	<ul style="list-style-type: none"> ・容器にふたをする ・調合作業の適正化 		<ul style="list-style-type: none"> ・溶剤回収装置
塗装工程	<ul style="list-style-type: none"> ・スプレー技術の向上 	<ul style="list-style-type: none"> ・塗料の変更 ・スプレーガンの変更 	<ul style="list-style-type: none"> ・VOC処理装置
乾燥工程		<ul style="list-style-type: none"> ・風量の制御 	<ul style="list-style-type: none"> ・VOC処理装置

Step1 は、新たなコスト投入を必要とせず、VOC 排出量を削減できる対策技術です。更に、原材料の節約につながりコスト削減も同時に実現できる可能性がありますので、最初に選択すべき対策技術です。Step2 は、原材料や装置・機器の変更により VOC 排出量を削減する対策技術です。単に VOC 排出量が削減されるだけでなく、製品の品質や新しい機器の導入、排出される環境負荷の変化などを伴いますので、専門的な知識が必要です。十分な原材料の機能の調査と需要を考慮して

選択する必要があります。Step3 では、排出される VOC が新たな環境負荷をもたらさずに確実に削減できる装置の導入が求められます。個々の事業所により排出される VOC の種類や濃度が異なるため専門家の知識が必要です。また、悪臭物質などが問題となる工程では、処理装置による除去が最も有効である場合もあります。

5.5 環境経営支援ツールとしてのマテリアルフローコスト会計(MFCA)

近年の厳しい経済情勢のなか、コストのかかるVOC排出対策を行うことは非常に困難です。そこで、VOC排出量を減らしつつ、コスト削減にもつながるような、環境と経営を両立できる環境経営手法が望まれます。このような手法の一つとして、マテリアルフローコスト会計(Material Flow Cost Accounting, 以下、MFCA)が提唱されています。MFCAは、製造工程における資源やエネルギーのロス(不良品や廃棄物の発生とそれに関連する加工費、廃棄物処理費等)に注目し、ロスを物量とコストで「見える化」する手法です。

MFCAによりロスを「見える化」することで、今まで気付かなかったロスに気づき、新たな省資源・省エネ対策により、VOC排出削減、低コスト化につながると考えられます。

関東経済産業局ではMFCAを普及するため自治体、支援機関等と連携し、地域企業に対して毎年研修会を開催しています。

<http://www.kanto.meti.go.jp/seisaku/kankyo/recycle/20140307mfca.html>

また、東京都立産業技術研究センターでは、MFCAに関する技術相談やエンジニアリングアドバイザーによる実地技術支援を行っています。

<http://www.iri-tokyo.jp/joho/kohoshi/houkoku/h25/documents/n2519.pdf>

本章では、VOC削減に向けた東京都の取組について説明するとともに、国や社団法人産業環境管理協会等の活動についても紹介します。

6.1 東京都の取組

東京都では、光化学オキシダント高濃度日の低減、SPMの環境基準を全測定局で達成、有害化学物質の環境リスク低減を図ることで、「平成28年度までに光化学スモッグ注意報発令日数を0日とする」ことを目標にしています。

都内では中小事業者からのVOC排出が6割以上を占めている状況をふまえ、事業者の自主的取組によるVOC排出量削減への技術支援及び低VOC製品の普及啓発に力を入れています。

東京都のVOC対策の概要 [東京都環境局]

http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/air/air_pollution/voc/measures_outline/index.html

6.1.1 自主的取り組みへの技術支援

(ア) VOC対策ガイドの発行

経済的に導入可能な抑制策を選択できる技術ガイドとして、工場からのVOC排出を削減するための具体的な抑制手法をまとめた「工場内編」と、屋外塗装においてVOC発生の少ない塗料を選択するための情報を整理した「屋外塗装編」が発行されています(図1.6.1.1)。

工場内編は、塗装、印刷、金属等表面処理(めっき前処理の脱脂洗浄等)、ドライクリーニングの4分野を対象としていますが、それ以外の分野においても同様の作業があれば、排出抑制のためにガイドとして役立つように作成されています。

東京都 VOC 対策ガイド [工場内編] [東京都環境局]

<http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/air/attachement/guide1801.pdf>



工場内における VOC 排出抑制策の選択 [東京都環境局]

http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/air/air_pollution/voc/guide/voc_guide.html



図 1.6.1.1 東京都環境局の「VOC 対策ガイド」 工場内編 (左側) と屋外塗装編 (右側)

VOC 対策ガイド (工場内編) の内容

VOC 排出抑制策を工程改善、原材料転換、処理装置の導入に分けて解説、概ねの VOC 削減効果やコスト等を紹介しています。

- ・目次、ガイドの使い方、凡例

http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/air/attachement/guide1801_0.pdf

- ・工場内塗装

http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/air/attachement/guide1801_1.pdf

- ・印刷

http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/air/attachement/guide1801_2.pdf

- ・金属等表面処理

http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/air/attachement/guide1801_3.pdf

- ・ドライクリーニング

http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/air/attachement/guide1801_4.pdf

- ・付録 (関係法令、問い合わせ)

http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/air/attachement/guide1801_5.pdf

(イ) 東京都の VOC 対策アドバイザー派遣制度

揮発性有機化合物 (VOC) 対策 [東京都環境局]

http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/air/air_pollution/voc/index.html

中小企業の VOC 排出量削減に向けた自主的な取組を支援するため、自治体では VOC 対策アドバイザーを派遣する制度をもっているところがあります。東京都の制度の概要を図 1.6.1.2 に示します。

この制度は、対策意欲のある企業からの依頼に基づき、審査を経た上でアドバイザーを無料で派遣、簡易測定結果に基づき効果的な対策について技術的観点から助言を行なう仕組みです。

東京都の場合、対象は中小企業（製造業では、資本金 3 億円以下又は従業員数が 300 人以下）で、VOC を取り扱う都内の工場（印刷工場、塗装工場、めっき工場等）です。助言内容は、現場で VOC の簡易測定を行い、工程の改善、原材料の転換、回収・処理装置の設置、融資制度の紹介などです。

現在、日本産業洗浄協議会等に所属する脱脂洗浄・塗装・印刷技術の専門家 6 名がアドバイザーとなっています。



図 1.6.1.2 東京都の VOC 対策アドバイザー派遣制度の概要

（転載：東京都環境局、「派遣制度のリーフレット」より、http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/air/attachement/adviser_leaflet.pdf、2013/03/19 確認）

1) 派遣制度のあらまし

- ・事業所を訪問し、対策を助言します(無料)。
- ・ハンディー VOC 計による簡易測定を実施し、測定結果をその場でお知らせできます。
- ・VOC 使用実態に応じた効果的な対策について、主に技術的観点から助言を行います。

2) 派遣対象

中小企業（資本金 3 億円以下又は従業員数が 300 人以下）で、VOC を取り扱う都内の工場（印刷工場、塗装工場、めっき工場等）が対象です。

3) 助言内容

現場で VOC の簡易測定を行い、工程の改善、原材料の転換、回収・処理装置の設置、融資制度の紹介などの助言を行います。

4) 助言内容の紹介

VOC 対策アドバイザー助言内容の紹介
[東京都環境局]

http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/air/air_pollution/voc/adviser/adviser_example.html

5) 派遣の様子

VOC 対策アドバイザー派遣の様子 [東京都環境局]

http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/air/air_pollution/voc/adviser/adviser_news.html

6) 派遣手続

対策意欲のある企業からの依頼に基づき、審査を経た上でアドバイザーを派遣します。

7) アドバイザー 登録者名簿

VOC 対策アドバイザー登録者名簿 [東京都環境局]

http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/air/air_pollution/voc/adviser/adviser_list.html

資料

・派遣制度のリーフレット [PDF690KB]

東京都 VOC 対策アドバイザー

http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/air/attachement/adviser_leaflet.pdf

・派遣講習会の様子

VOC 対策アドバイザー派遣講習会の様子

http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/air/air_pollution/voc/adviser/adviser_seminar.html

・派遣のお申し込み方法

VOC 対策アドバイザー派遣お申し込み手順

http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/air/air_pollution/voc/adviser/adviser_request.html

東京都環境局 環境改善部 化学物質対策課へお気軽に御相談ください。電話：03-5388-3503（直通）

東京都VOC対策アドバイザー派遣先事業者の声

- アドバイザーの指導により、溶剤（IPA）の使用量を前年比で50%削減しました（平成19年度4.9トン⇒平成20年度2.4トン）。使用後のウエスを蓋付き容器に収納する等により、現場環境臭も低減できました。（印刷業）
- 現状のVOC濃度を認識することができ、薬品やインキの蓋を必ず閉める等、現場の意識向上につながりました。また、廃インキ回収業者の見直しにつながり、大幅なコストダウンができました。（印刷業）
- 現状のVOC濃度を認識することができ、VOC排出量があまり多くないことが分かりました。専門家にみてもらうことで安心できました。（塗装業）
- これまで、各種溶剤が環境に与える影響が分かりませんでした。アドバイザーから一つひとつ丁寧にアドバイスをいただき、溶剤に対する管理がいかに大切かを教えていただきました。（印刷業）

■使用していた脱臭剤では、逆に臭気指数の数値を上げてしまうことが判明しました。脱臭剤の変更か、別の処理を検討するきっかけとなりました。過剰換気であることが分かりましたが、様々な換気条件で溶剤濃度を測定していただき、ほぼ適正換気には正できました。（めっき業）

(ウ) 環境確保条例上の化学物質適正管理

都は、「都民の健康と安全を確保する環境に関する条例」、いわゆる「東京都環境確保条例」に基づく化学物質適正管理制度と、国が全国一律に実施している「特定化学物質の環境への排出量の把握等及び管理の改善の促進に関する法律」に基づくPRTR制度の2つの制度により、化学物質の排出量等の把握と適正管理を進めています（図1.6.1.3、表1.6.1.1）。

東京都 東京都環境確保条例 有害ガス排出基準（VOC成分）

規制対象物質	基準値 (mg/m ³)	規制対象物質	基準値 (mg/m ³)
3 ホルムアルデヒド	70	28 メタノール	—
5 アクロレイン	10	イソプロピルアルコール	—
7-2 (臭化メチル)	200	イソブチルアルコール	—
9 フェノール	200	アセトン	—
13 ビリジジン	40	メチルエチルケトン	—
14 スチレン	200	メチルイソブチルケトン	200
15 エチレン	300	ベンゼン	100
16 二酸化窒素	100	トルエン	200
17 クロルピクリン	40	キシレン	—
18 ジクロロメタン	200	トリクロロエチレン	300
19 1,2-ジクロロエタン	200	テトラクロロエチレン	300
20 クロロホルム	200	酢酸メチル	—
21 塩化ビニルモノマー	100	酢酸エチル	—
22 酸化エチレン	90	酢酸ブチル	—
		ヘキサン	200

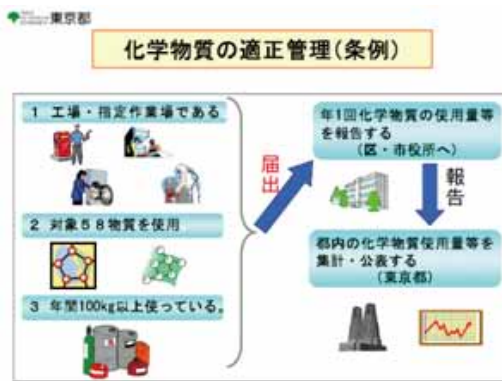


図 1.6.1.3 東京都の化学物質適正管理

表 1.6.1.1 東京都の化学物質適正管理制度と PRTR 制度の比較

(平成 22 年度排出量集計結果、<http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/chemical/chemical/control/attachement/H22tekisei-top.pdf>)

	東京都の化学物質適正管理制度	PRTR 制度
対象物質の着眼点	性状及び使用状況等から特に適正な管理が必要とされる物質として指定したもので、条例による濃度規制の対象物質にもなっているもの 58 種類	人や生態系への有害性（オゾン層破壊性を含む）があり、環境中に広く存在する物質として指定されたもの 462 種類（前回 354 種類）
報告対象	・年間取扱量 100 kg 以上の工場及び指定作業 ・場従業員数の規模要件はない	・年間取扱量 1 トン以上の製造業等 24 業種 ・従業員数 21 人以上（前回 23 業種）
把握及び報告内容	5 項目 ・使用量 ・製造量 ・製品としての出荷量 ・環境への排出量 ・事業所外（廃棄物・下水道）への移動量	2 項目 ・環境への排出量 ・事業所外（廃棄物・下水道）への移動量
報告件数	2,622 件	1,233 件
環境への排出量 (平成 21 年度)	合計 3,545 トン (前年度比 193 トン増加)	合計 2,248 トン (前年度比 212 トン増加)

6.1.2 低 VOC 塗装の普及啓発

東京都 VOC 対策ガイド[屋外塗装編]（東京都環境局）

(ア) VOC 対策ガイド(屋外塗装編)の普及

<http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/air/attachement/guide1802.pdf>

業界等との連携による低 VOC 塗装の普及啓発を目的に作成されました。

(イ) 平成 24 年度の VOC 対策セミナーの開催

- ① 現状適用可能な低塗装仕様（塗装で VOC 工程の組み合わせ）を整理。
- ② 構造物別（建築物、仕上材、橋梁等）、素地面別（コンクリート、鉄鋼等）に分けて記載。
- ③ VOC 削減率、コスト、耐久性のランク等を提示。

平成 24 年度 VOC 対策セミナー - いまならできる! 低 VOC 資材への転換 - 対象業種毎に 3 回、開催されます。

東京都環境局、「平成 24 年度 VOC 対策セミナー開催のご案内」

<http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/air/event/voc/H24VOCseminar.html>

回	開催日	開催時間	会場	主な対象業種
1	7月11日(水)	セミナー：14時～15時55分 個別相談会：16時5分～16時50分	都民ホール	印刷
2	7月18日(水)			金属加工・めっき
3	7月26日(木)	塗装		

(ウ) VOC 対策の自主的取組として活用できる仕組み

VOC 対策の自主的取り組みとして活用できるものに VOC 排出削減支援ツールの提供やエコアクション 21 などが挙げられます。

1. VOC 排出削減支援ツール (VOC ナビ) [2011 年 4 月より休止中です]

<http://www.voc-info.jp>

2. エコアクション 21

エコアクション 21 地域事務局東京

電話 :03-5471-0095

<http://www14.plala.or.jp/jaec/>

エコアクション 21 地域事務局東京中央
電話 :03-3392-5231

<http://www.eco-action21-tokyo.com>

エコアクション 21 地域事務局東京都中小企業団体中央会

電話 :03-3542-0386

http://www.tokyochuokai.or.jp/ea/ea_main.html

(エ) 低 VOC 製品の普及啓発

屋外塗装では VOC 発生の少ない塗料 (水系塗料など) を使用したり、印刷物作成は VOC 排出抑制に考慮した方法で行うなど、工事発注や商品購入時には、VOC の発生抑制に配慮した製品を選択するよう啓発しています。VOC 対策に配慮した印刷を示すマークを図 1.6.1.4 に示します。

	グリーンプリンティングマーク (社) 日本印刷産業連合会		エコマーク (財) 日本環境協会
	バタフライマーク (一社) 日本 WPA		クリオネマーク 環境保護印刷 推進協議会
	印刷インキ工業 連合会		

図 1.6.1.4 VOC 対策に配慮した印刷を示すマークの一例

6.2 国・その他の取組

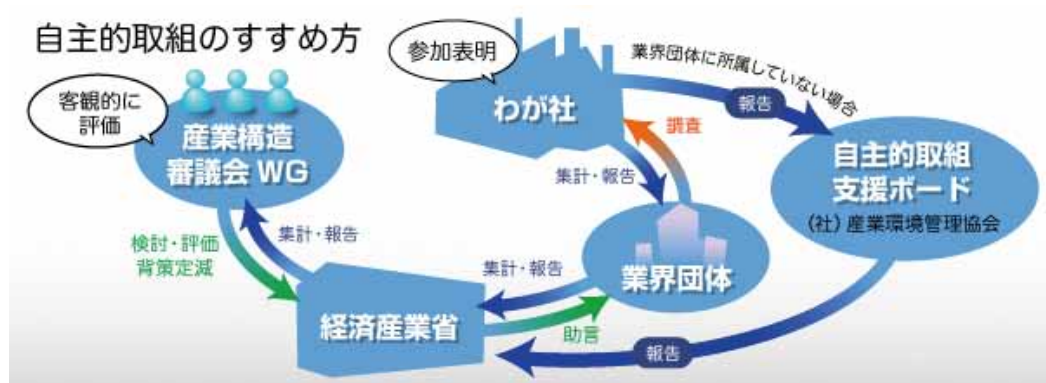
6.2.1 国の取組

(ア) 経済産業省

経済産業省では、事業者の VOC 排出削減に関する自主的取組を推進するため、「産業構造審議会」において「環境リスク対策合同ワーキンググループ」を設置し、事業者による VOC 削減のための自主的行動計画を取りまとめ、NEDO における

VOC 排出抑制のための技術開発や有害化学物質削減支援ツールの開発などを行ない、VOC 自主的取組の支援制度を推進してきました(図 1.6.2.1、図 1.6.2.2、表 1.6.2.1)。

自主行動計画による全国の VOC 排出量の削減率は、平成 12 年度比で、平成 20 年度は 46% 減、平成 21 年度は 51% 減となっています(図 1.6.2.3)。



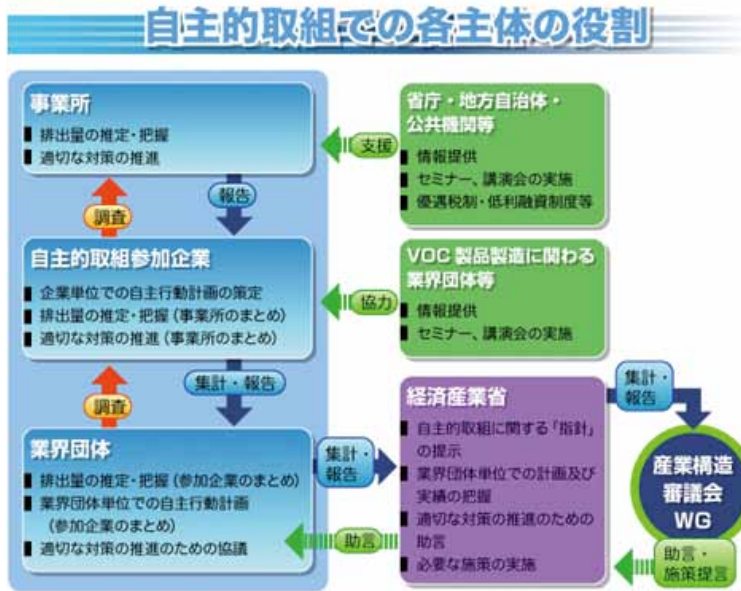


図 1.6.2.2 自主的取組での各主体の役割

（転載：経済産業省、「自主的取組での各主体の役割」、<http://www.meti.go.jp/policy/voc/flow/steps.html>、2014/01/22 確認）

表 1.6.2.1 自主的取組への参加状況

（引用：経済産業省、「VOC排出抑制に係る自主行動計画の概要（平成23年度実績）について」、平成25年4月）

年度	参加団体数	参加企業数
平成17年度	30	9,341
平成18年度	36	10,217
平成19年度	37	9,900
平成20年度	38	9,792
平成21年度	42	9,980
平成22年度	42	9,365
平成23年度	41	8,257

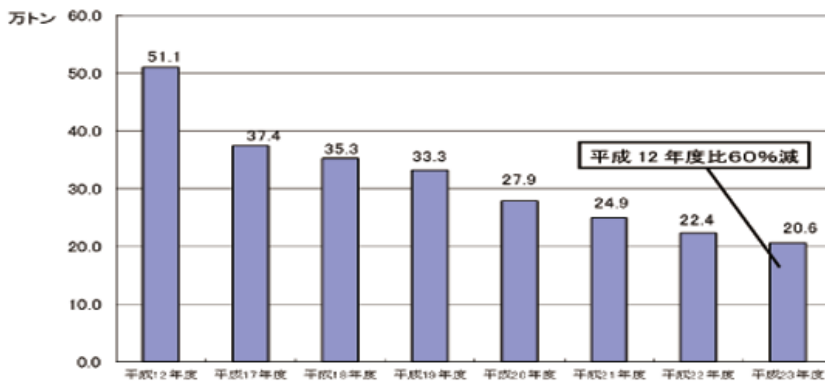


図 1.6.2.3 自主行動計画による全国のVOC排出量の推移

（引用：経済産業省、「VOC排出抑制に係る平成23年度自主的取組実績の概要について」、http://www.meti.go.jp/committee/summary/0001990/pdf/011_02_00.pdf、2014/01/22 確認）

(イ) 環境省

環境省は VOC の排出抑制対策の進捗状況を把握するに当たって、平成 18 年度から「揮発性有機化合物 (VOC) 排出インベントリ検討会」を設置し、VOC 排出インベントリ (発生源別の VOC の排出量) を調査しています。

環境省インベントリ調査では、平成 23 年度全国の VOC の排出量は約 78 万トン

であり、平成 12 年度比の削減量は 63 万トン、削減率は 44%と求められています。自主行動計画による平成 23 年度排出量 20.6 万トン、削減量 30.5 万トン、削減率 59.7%をこれらと比較すると、自主行動計画の占める割合 (捕捉率) は排出量 26.3%、削減量 48.1%となっています (表 1.6.2.2)。

表 1.6.2.2 環境省インベントリ調査と自主行動計画調査との比較

		環境省インベントリ調査 (①) 万トン	自主行動計画 (②) 万トン	自主行動計画の占める割合 (捕捉率) (②/①)
平成 12 年度	排出量	141.7	51.1	36.0 %
平成 17 年度	排出量	111.1	37.4	33.7 %
平成 18 年度	排出量	108.0	35.3	32.7 %
平成 19 年度	排出量	102.2	33.3	32.5 %
平成 20 年度	排出量	91.8	27.9	30.4 %
平成 21 年度	排出量	83.5	24.9	29.8 %
平成 22 年度	排出量	79.1	22.4	28.3 %
平成 23 年度	排出量	78.3	20.6	26.3 %
	削減量	63.4 (削減率 44.7%)	30.5 (削減率 59.7%)	48.1 %

(引用：①環境省、「揮発性有機化合物 (VOC) 排出インベントリについて」、平成 25 年 3 月、
②経済産業省、「VOC 排出抑制に係る平成 23 年度の自主的取組実績の概要について」、平成 25 年 3 月)

6.2.2 業界の取組

平成 23 年度、自主的取組に関して 41 の団体から 38 件の自主行動計画が提出され、自主的取組に参加している企業数は 8,257 社と報告されています (表 1.6.2.3)。これらの取組については、社団法人産業環境管理協会、日本産業洗浄協議会が支援団体として位置づけられています。

表 1.6.2.3 VOC 自主的取組参加団体と URL

[() 内の数字は自主的取組参加企業数です。URL は 2014/03/08 確認。]

一般社団法人 日本ガス協会 (9) http://www.gas.or.jp/default.html	日本印刷産業連合会 (5,937) http://www.jpfi.or.jp/
一般社団法人 日本染色協会 (41) http://www.nissenkyo.or.jp/	一般社団法人 日本化学工業協会 (68) http://www.nikkakyo.org/
日本製紙連合会 (一) http://www.jpca.gr.jp/	ドラム缶工業会 (11) http://www.jsda.gr.jp/
一般社団法人 日本鉄鋼連盟 (88) http://www.jisf.or.jp/	一般社団法人 軽金属製品協会 (4) http://www.apajapan.org/APA2/framepage2.htm
電機・電子 4 団体 (129) ① 一般社団法人 電子情報技術産業協会 http://www.jeita.or.jp/	日本プラスチック工業連盟 (35) http://www.jpif.gr.jp/
② 一般社団法人 情報通信ネットワーク産業協会 http://www.ciaj.or.jp/jp/	社団法人 日本オフィス家具協会 (23) http://www.joifa.or.jp/
③ 一般社団法人 ビジネス機械・情報システム産業協会 http://www.jbmia.or.jp/	社団法人 日本表面処理機材工業会 (26) http://www.kizaikou.or.jp/index.html
④ 一般社団法人 日本電機工業会 http://www.jema-net.or.jp/	一般社団法人 日本自動車車体工業会 (170) http://www.jabia.or.jp/
社団法人 日本塗料工業会 (76) http://www.toryo.or.jp/	日本接着剤工業会 (85) http://www.jaia.gr.jp/
一般社団法人 日本自動車部品工業会 (112) http://www.japia.or.jp/	社団法人 プレハブ建築協会 (10) http://www.purekyo.or.jp/
一般社団法人 日本自動車工業会 (14) http://www.jama.or.jp/	印刷インキ工業連合会 (37) http://www.ink-jpima.org/ink_torikumi.html
線材製品協会 (16) http://www.wire.jp/	日本工業塗装協同組合連合会 (94) http://www.n-kotoren.jp/
一般社団法人 日本伸銅協会 (6) http://www.copper-brass.gr.jp/	日本ゴム工業会 (36) http://www.jrma.gr.jp/
全国鍍金工業組合連合会 (207) http://www.net.inst.or.jp/~zentoren/	日本自動車車体整備協同組合連合会 (540) http://www.jabra.or.jp/
一般社団法人 日本電線工業会 (121) http://www.jcma2.jp/index.html	日本粘着テープ工業会 (17) http://www.jatma.jp/
一般社団法人 日本溶融亜鉛鍍金協会 (80) http://aen-mekki.or.jp/	全国楽器協会 (4) http://www.zengakkyo.com/
一般社団法人 日本アルミニウム協会 (13) http://www.aluminum.or.jp/	一般社団法人 日本釣用品工業会 (19) http://www.jaftma.or.jp/
一般社団法人 日本建材・住宅設備産業協会 (37) http://www.kensankyo.org/	日本金属ハウスウェア工業組合 (51) http://www.houseware.jp/
天然ガス鉱業会 (5) http://www.tengas.gr.jp/	日本金属洋食器工業組合 (8) http://www.youshokki.com/
石油連盟 (18) http://www.paj.gr.jp/	一般社団法人 日本ガス石油機器工業会 (87) http://www.jgka.or.jp/

【VOC 自主的取組支援団体】

社団法人産業環境管理協会 (30)、日本産業洗浄協議会

(引用：経済産業省、「VOC 排出抑制に係る平成 23 年度の自主的取組実績の概要について」、平成 25 年 4 月 12 日)