

大気汚染対策 普及啓発ガイド

はじめに

この普及啓発ガイドは、ミャンマー環境保全森林省と日本の環境省が協力してミャンマーの大気汚染対策に取り組む「コベネフィット型環境対策技術等の国際展開に係る二国間協力事業」の一環で作成されました。

近年の工業化により、ミャンマーでも徐々に廃棄物、水質汚濁といった環境問題が注目されるようになりました。家庭から排出されるゴミを減らす、工場の排水を浄化する、などの取り組みが必要になる中、ミャンマーは大気汚染にも意識を向ける必要があります。

大気汚染とは、自動車の排気ガスや、工場・発電所から排出する大気汚染物質などが原因となって空気が汚れることを言います。これらのガスの中には、硫黄酸化物や窒素酸化物などの汚染物質が含まれており、人に対しては目の痛み、頭痛、吐き気を与えるほか、気管支炎や呼吸器不全などの症状も引き起こします。また一部の物質は酸性雨の原因物質となり、自然環境にも悪影響を与えます。他にも、大気汚染物質の中には二酸化炭素など温室効果の高い物質も含まれており、これらの排出が続くと地球温暖化の進行を早めてしまいます。こうした事態を未然に防ぐためにも、早い時期から大気汚染について正しい知識をつけ、適切な対策を講じていくことが重要です。

この普及啓発ガイドは、大気汚染に対する基礎的な知識から、汚染物質の監視方法、大気汚染対策技術など、幅広く学ぶことができる構成になっています。

第一章では、大気汚染問題を知る上で欠かせない主要な大気汚染物質を紹介します。

第二章では、第一章で学んだ大気汚染物質がどのような場所から排出されるのかを理解してもらうため、汚染物質の発生源を紹介します。

第三章では、大気汚染物質の監視方法を解説します。監視活動は、各発生源における大気汚染物質の排出量を把握するのに重要です。

第四章では、大気汚染対策技術を紹介します。監視活動により低減すべき大気汚染物質が把握できた後は、この章を参考にして適切な大気汚染対策を検討しましょう。

第五章では、日本の大気汚染対策の歴史を紹介しています。また最後の第六章では、ミャンマーの大気汚染状況を概説しています。激甚な大気汚染問題を経験し克服してきた日本の歴史を踏まえて、ミャンマーの今を見つめ直してみましょう。

2016 年 2 月

目次

はじめに

第1章	大気汚染について.....	1
1.1	大気汚染とは.....	1
1.2	主な大気汚染物質.....	1
1.2.1	硫黄酸化物.....	1
1.2.2	窒素酸化物.....	2
1.2.3	粒子状物質.....	3
1.2.4	一酸化炭素.....	4
1.2.5	光化学オキシダント.....	4
1.2.6	二酸化炭素.....	5
1.2.7	その他.....	6
第2章	大気汚染の発生源.....	8
2.1	発生源の種類.....	8
2.2	移動発生源.....	9
2.2.1	ガソリン車.....	10
2.2.2	ディーゼル車.....	12
2.2.3	その他.....	13
2.3	固定発生源.....	14
2.3.1	工場ボイラー.....	14
2.3.2	焼成炉.....	16
2.3.3	発電所.....	16
2.3.4	その他.....	18
2.4	自然発生源.....	18
第3章	大気汚染の監視.....	19
3.1	大気汚染の監視方法.....	19
3.2	環境大気の測定.....	19
3.2.1	計測器での測定.....	19
3.2.2	インターネット情報の活用.....	23
3.3	自動車排ガスの計測.....	25
3.4	煙道排ガスの計測.....	26
第4章	大気汚染対策.....	28

4.1	移動発生源.....	28
4.1.1	ガソリン車.....	28
4.1.2	ディーゼル車.....	30
4.1.3	その他.....	32
4.2	固定発生源	32
4.2.1	工場ボイラー.....	32
4.2.2	セメント製造工場.....	36
4.2.3	発電所.....	38
第 5 章	日本の大気汚染対策の歴史.....	41
5.1	産業型公害の発生（1940 年代中頃～1970 年代前半）	41
5.2	都市・生活型公害の発生（1970 年代中頃～1980 年代）	41
5.3	近年の大気汚染（1990 年以降）	42
第 6 章	ミャンマーの大気汚染状況.....	43
6.1	移動発生源の状況.....	43
6.1.1	ミャンマーの現状.....	43
6.1.2	今後予想される大気汚染.....	45
6.1.3	汚染防止に必要なアクション	45
6.2	固定発生源の状況.....	45
6.2.1	ミャンマーの現状.....	45
6.2.2	今後予想される大気汚染.....	47
6.2.3	汚染防止に必要なアクション	47
6.3	大気汚染監視の状況.....	47

付録	大気汚染対策チェックリスト	
----	---------------	--

第1章 大気汚染について

1.1 大気汚染とは

大気汚染とは、私たちが普段の生活で使用している自動車の排気ガスや工場の煙により空気が汚れることを言います。その原因は、自動車の排気ガスや工場の排ガスに含まれる大気汚染物質です。大気汚染物質は、山火事や火山活動など自然的な要因で排出されることもありますが、大部分は人間の活動によるものです。これらの物質は、人に対しては目の痛み、頭痛、吐き気を与えるほか、気管支炎や呼吸器不全などの症状も引き起こします。また一部の物質は酸性雨の原因物質となり、自然環境にも悪影響を与えます。他にも、高い温室効果を持つ汚染物質もあるため、国際問題の大きな一つである地球温暖化とも、大気汚染は密接に繋がっています。

1.2 主な大気汚染物質

大気汚染物質とは一般的に、窒素酸化物や硫黄酸化物などをはじめとする、大気中に存在する有害な物質および物質群の総称です。

ここでは代表的な大気汚染物質を紹介します。

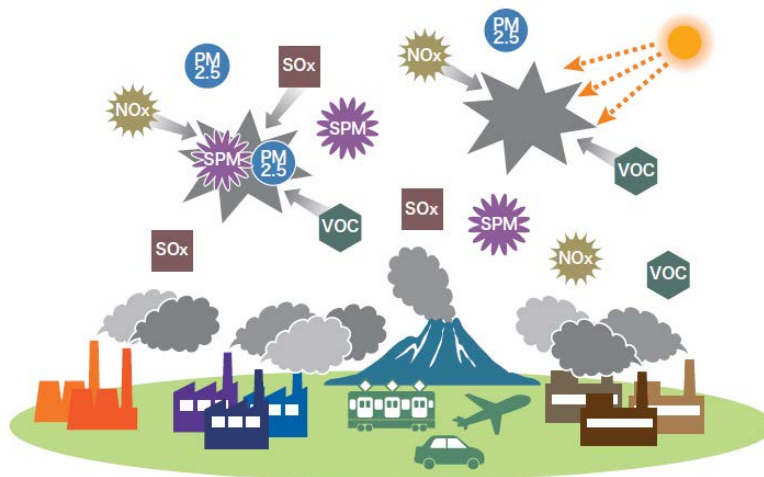


図 1-1 生活環境における様々な大気汚染物質

1.2.1 硫黄酸化物 (SO_x)

硫黄酸化物 (SO_x) は、硫黄成分を含んだ化石燃料 (石油・石炭など) の燃焼の際に発生します。硫黄を含んだ化石燃料を燃焼すると、硫黄分が酸化され、二酸化硫黄 (SO₂) が発生します (三酸化硫黄 (SO₃) も一部発生)。二酸化硫黄は、鼻を刺すような刺激臭が特徴です。

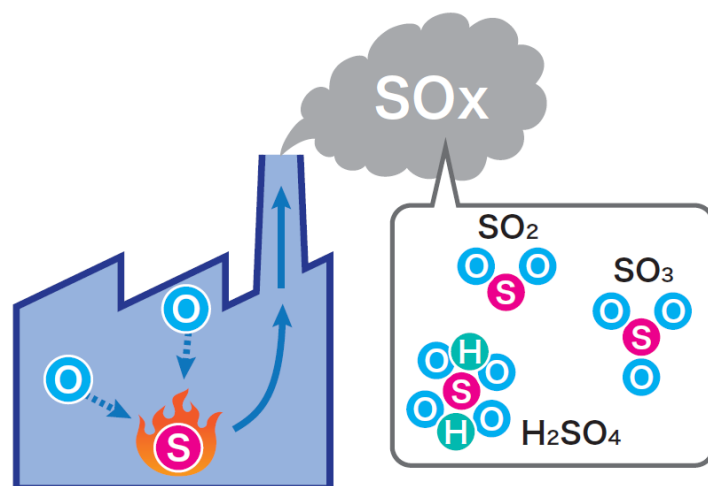
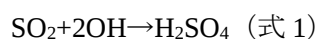


図 1-2 SO_x の生成プロセス

高濃度の SO₂は人に気管支炎やぜん息といった症状を引き起こします。自然環境への影響としては、大気中で硫酸に変化し、それが雲や雨水に溶け込み酸性雨として地上に降下します（式 1）。この酸性雨が森林を衰退させ、農作物・動植物にも悪影響を及ぼします。



1.2.2 窒素酸化物（NO_x）

窒素酸化物（NO_x）は、燃料を高温で燃やすことで、燃料中や空気中の窒素と酸素が結びついて発生する物質です。燃料中に含まれる窒素分が酸化して生成される NO_x を「Fuel NO_x」、空気中の窒素と酸素が高温状態で反応して生成される NO_x を「Thermal NO_x」と呼びます。発生時には、ほとんどが一酸化窒素（NO）として存在しますが、大気中に放出されると空気中で酸化されて赤褐色の二酸化窒素（NO₂）に変化します。NO₂も刺激臭のある気体です。

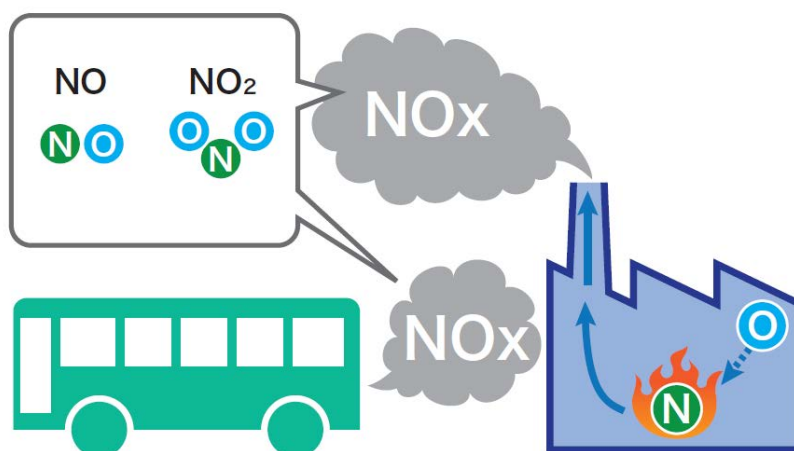
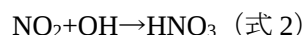


図 1-3 NO_x の生成プロセス

高濃度の NO₂は人の喉、気管、肺などの呼吸器に悪影響を及ぼします。また自然環境への影響としては、大気中で以下の反応により硝酸に変化し、それが雲や雨水に溶け込み酸性雨として地上に降下します（式2）。



この酸性雨が森林を衰退させ、農作物・動植物にも影響を及ぼします。他にも NO_x は、後述する光化学オキシダントの原因物質とも考えられています。

NO_x の排出量を低減する場合、低減すべき NO_x が Fuel NO_x なのか Thermal NO_x なのかを判断する必要があります。Fuel NO_x を減らすのであれば、燃料中の窒素の酸化を抑える必要があるため、窒素含有量の少ない燃料を使用する、燃料の際の酸素濃度を下げる、などの対策が有効です。一方、Thermal NO_x を減らすのであれば、空気中の窒素分の酸化を防ぐ必要があります。この場合は、燃料温度を下げる、燃焼の際の酸素濃度を下げる、高温燃焼時の燃焼ガスの滞留時間を短くする、などの対策が有効です。後述する NO_x 低減技術は、こうした特徴を上手く活かして NO_x の発生量を抑える技術です。

※揮発性有機化合物（VOCs）

塗料やインク、接着剤などに溶剤として含まれる揮発性有機化合物（VOC）は、揮発しやすく大気中で気体になる物質です。トルエン、キシレン、酢酸エチルなどがその代表です。VOC は、光化学スモッグを引き起こす光化学オキシダント（Ox）や浮遊粒子状物質（SPM）の生成原因となります。

1.2.3 粒子状物質（PM）

粒子状物質（PM）は固体および液体の粒です。工場の煙から排出する煤塵（ばいじん）や、鉱物の堆積場で発生する粉じんが代表例です。ディーゼル車の排出ガスに含まれる黒煙も粒子状物質に含まれます。他にも、火山から発生する火山灰、風によって巻き上げられる砂塵や海塩粒子（海や塩湖の塩分からなる微粒子）も粒子状物質の一種です。

大気中を浮遊する粒子状物質のうち、粒径が 10μm の粒子を 50%の割合で捕集できる装置を使って採取したものを PM10 と呼んでいます。同じように、粒径が 2.5μm の粒子を 50%の割合で捕集できる装置を使って採取したものを PM2.5 と呼んでいます。PM2.5 は、空気中の揮発性有機化合物（VOCs）※が光化学反応することによって生成するものもあります。

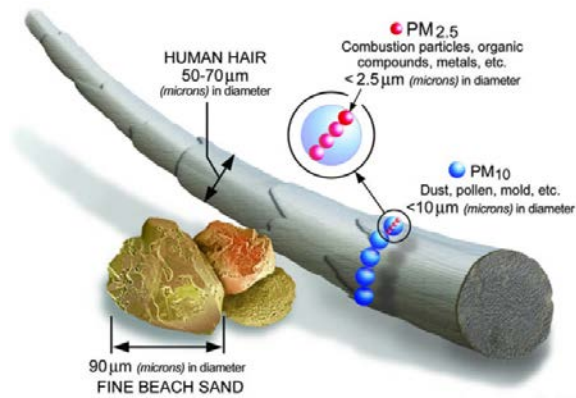


図 1-4 PM の大きさ（人髪や海岸細砂）との比較
出典：米国 EPA 資料
<http://www3.epa.gov/pm/basic.html>

高濃度の粒子状物質は、呼吸器疾患や循環器疾患と関連があると考えられています。とくに粒径が小さい PM2.5 は、吸い込まれると肺や気管などに沈着しやすく、ぜんそくや気管支炎などのリスクを上昇させると考えられています。また PM2.5 には発がん性のリスクがあると考えられています。世界保健機関（WHO）の専門組織である国際がん研究機関（IARC）が、発がん性物質として PM2.5 を挙げています¹。

1.2.4 一酸化炭素（CO）

酸素が不十分な環境で炭素が燃焼させると不完全燃焼を起こし、一酸化炭素（CO）が発生します。一酸化炭素は、燃料炊きボイラーなどから排出されますが、無色無臭のため、どの程度排出しているかを眼で確認することはできません。

一酸化炭素は一酸化炭素中毒の原因となり、めまい、頭痛、吐き気などを引き起こします。

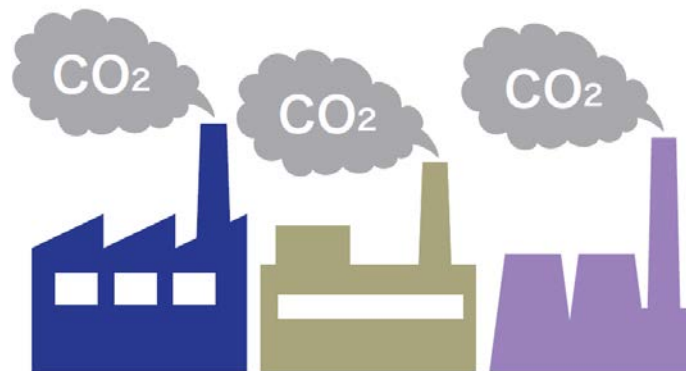


図 1-5 CO の発生イメージ

1.2.5 光化学オキシダント（Ox）

光化学オキシダント（Ox）は、自動車や工場などから排出された NOx や VOC が紫外線を受けて光化学反応を起こすことで生じる物質です。光化学オキシダントの主成分はオゾン

¹ PM2.5 は、段階ある発がん性リスクのうち最も危険度が高い「グループ 1」に分類されています。

(O₃) です。

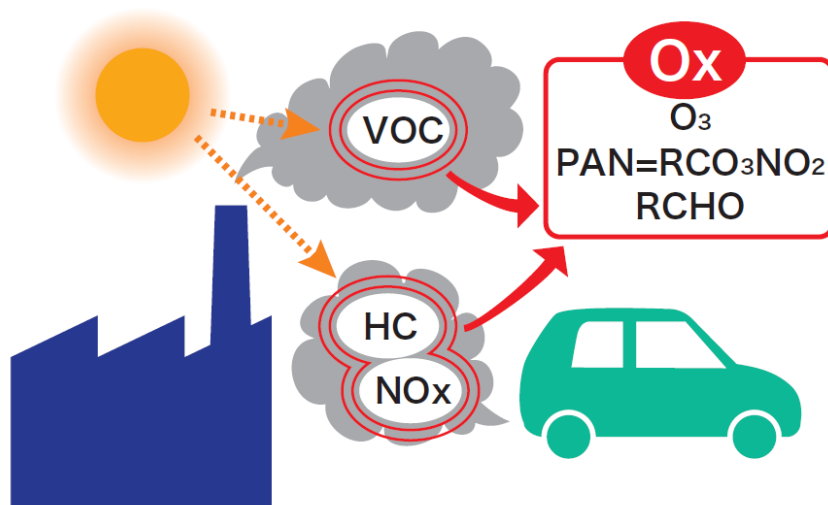
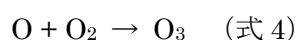


図 1-6 Ox の生成プロセス

このオゾンは、二酸化炭素（NO₂）の光分解で酸素原子が生成し（式 3）、その酸素原子と大気中の酸素が反応して生成されます。（式 4）



この他にも、大気中の炭化水素も光化学オキシダント生成に関係しています。具体的には、炭化水素が大気中で分解反応を起こしラジカル（HO₂）が生成されますが²、そのラジカルが NO を NO₂に酸化します（式 3）



この反応で生成される NO₂がまた（式 3）（式 4）の反応を起こすことにより、オゾンが生成し続けます。

高濃度の光化学オキシダント（Ox）が大気中に漂う現象を光化学スモッグといいます。高濃度の光化学オキシダント（光化学スモッグ）は、目の痛み、頭痛、吐き気などを引き起こします。

1.2.6 二酸化炭素（CO₂）

二酸化炭素（CO₂）は、主に化石燃料（石炭、石油など）を燃やすことで発生します。化石燃料を使用する場所全てが二酸化炭素の発生源です。

² 炭化水素が大気中で分解反応を起こし、ラジカルが連続的に生成されます。反応式は複雑のため本ガイドでは割愛します。

二酸化炭素に関しては、通常の大気濃度であれば人への健康被害はそれほどありません。ただし、自然環境には重大な影響を及ぼします。二酸化炭素は「温室効果ガス」と呼ばれる気体の 1 つです。温室効果ガスは、赤外線を吸収し、再び放出する性質があります。この性質のため、地表面から発生した赤外線を再び地表に押し戻してしまいます。これにより、赤外線が熱として大気に蓄積され、再び地球の表面に戻ってきます。この戻ってきた赤外線が、地球の表面付近の大気を暖めます。これを「温室効果」と呼びます（図 1-7）。

過去 100 年の間に、この温室効果ガスの濃度は急速に増加しています（図 1-8）。今後もこの傾向が続くと、地球温暖化をより一層進めてしまい、私たちの生活に様々な悪影響を及ぼします。



図 1-7 地球温暖化の仕組み

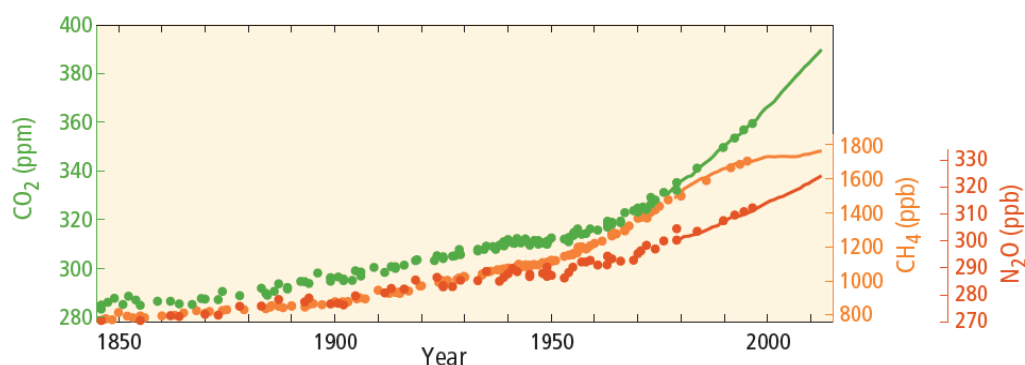


図 1-8 主要温室効果ガスの世界平均濃度

出典：IPCC Climate Change 2014 Synthesis Report Summary for Policymakers
https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/AR5_SYR_FINAL_SPM.pdf

1.2.7 その他

上記に挙げた以外にも、人や自然環境に害を及ぼす大気汚染物質は数多く存在します。移動発生源（「2.1.1 移動発生源」で後述）については、有鉛ガソリンの問題が一例です。

日本でも、過去、自動車燃料のオクタン価³を向上させる目的で鉛（Pb）が使用されていました。しかし、ガソリン燃料に含まれた鉛分は、排ガス処理装置の触媒に作用して処理機能を低下させてしまう性質があったため、有鉛ガソリンを入れた自動車から鉛分を含んだ高濃度の排ガスが放出されることがわかり、問題になりました。鉛は、人が少量でも吸ったりすると全身中毒を起こします。大量の鉛が人体に入ると急性中毒を起こし、腹痛や嘔吐が表れて死亡するケースもあり、大変危険な物質です。

工場や発電所、事業所といった固定発生源（「2.1.2 固定発生源」で後述）に関しては、たとえば日本では、次の表に挙げる大気汚染物質が規制対象になっています。

表 1-1 日本の大気汚染防止法で定められた規制物質

規制物質			主な発生形態
ばい煙	硫黄酸化物		ボイラー、廃棄物燃焼などにおける燃料や鉱石などの燃焼
	ばいじん		ボイラー、廃棄物燃焼などにおける燃料や鉱石などの燃焼、電気炉利用
	有害物質	カドミウム	銅、亜鉛、鉛の精錬施設における燃焼、化学処理
		塩素、塩化水素	化学製品反応施設や廃棄物焼却炉における燃焼、化学処理
		フッ素、フッ化水素、フッ化けい素	アルミニウム製錬用電解炉、ガラス製造溶解炉における燃焼、化学処理
		鉛、鉛化合物	銅、亜鉛、鉛の精錬施設における燃焼、化学処理
		窒素酸化物	ボイラー、廃棄物燃焼などにおける燃料や鉱石などの燃焼、電気炉利用
粉じん	一般粉じん		ふるいや堆積場などにおける鉱石、土砂などの粉砕・選別、機械的処理、堆積
	特定粉じん（石綿）		切断機などにおける石綿の粉砕、混合その他の機械的処理
			吹き付け石綿使用建築物の解体・改造・補修作業
			VOC
特定物質（アンモニア、一酸化炭素、メタノールほか）			特定施設において故障、破損などの事故時に発生
有害大気汚染物質	248 物質		（省略）
	指定物質	ベンゼン	ベンゼン乾燥施設など
		トリクロロエチレン	トリクロロエチレンによる洗浄施設など
		テトラクロロエチレン	テトラクロロエチレンによるドライクリーニング機など

³ ガソリンエンジン用燃料の燃焼効率度を表す尺度。オクタン価が高いほど、自動車のエンジンにおいて異常燃焼（ノッキングと呼ぶ）が起きにくく、より効率的な燃焼が可能。ガソリンに鉛を加えるとオクタン価をあげることができるが鉛分は環境に有害のため問題となっていた。

第2章 大気汚染の発生源

2.1 発生源の種類

大気汚染物質の発生源には、自動車や鉄道などの「移動発生源」、発電所や工場のように移動性がなく常に位置が定まっている「固定発生源」、そしてもともと大気中に微量に存在する「自然発生源」があります。

移動発生源とは、発生場所が移動する大気汚染物質の発生源のことです。乗用車、バス、二輪車などが該当します。ガソリンやディーゼルなどの燃料を燃やすことで汚染物質が生成され、排気口からガスとして排出されます。船舶、航空機、鉄道車両なども移動発生源に含まれます。



図 2-1 代表的な移動発生源

固定発生源には、工場や火力発電所、事業者などが該当します。石炭・石油のような化石燃料や、薪・穀類などのバイオマス燃料を燃やすと大気汚染物質が発生します。稲作で余った稲わらを屋外で焼却処分した場合も、その処分スペースが固定発生源になります。焼畑農業も固定発生源です。一般家庭も、調理の際の排気によって室内空気が汚染されることがあるため、固定排出源の一つに数えることができます。

また燃焼過程以外にも、セメントやレンガの製造工場では製造工程で粉塵を排出しますし、塗装・印刷工場では VOC が発生します。固定発生源と言っても、その種類は多種多様です。



図 2-2 代表的な固定発生源

自然発生源には、火山や黄砂などが代表例です。火山からは硫化水素ガスが発生します。砂塵・黄砂などの風による地面からの巻き上げ、森林火災、花粉の飛散も自然発生源による大気汚染です。植物も、VOC を排出するため自然発生源です。



図 2-3 代表的な自然発生源

このうち、人々の経済活動に起因する発生源は「移動発生源」と「固定発生源」です。街中を走る自動車の台数が増えれば増えるほど移動発生源は増加していきます。また、産業発展に伴い工場ボイラーの排ガスやセメント工場の建設が進む頃で固定発生源が拡大していきます。

次の 2.2 節からは、代表的な発生源とその大気汚染排出メカニズムを紹介していきます。

2.2 移動発生源

移動発生源には、自動車や鉄道、船舶、航空機などの交通機関全般が該当します。これらの交通機関は走行・航行する際、ガソリンや軽油等の燃料を燃やすことで動力を得ますが、この燃料燃焼に伴い NO_x・PM などの大気汚染物質を排出します。

その中でも、代表的で、私達の生活に身近な移動排出源が自動車です。ミャンマーにはガ

ソリンで走る乗用車も、軽油（ディーゼル油）で走る大型バス等もあります。これらの車両はどのようにして大気汚染物質を排出するのでしょうか。ここでは、ガソリン車、ディーゼル車それぞれから大気汚染物質が発生するメカニズムについて説明します。

2.2.1 ガソリン車

ガソリン車は、ガソリンを燃やして得られた駆動力を使って走る自動車です。駆動力を作る役目はガソリンエンジンが担っています。ガソリンエンジンは、燃料と空気の混合ガスをシリンダ内で圧縮して、点火プラグを使って圧縮ガスを爆発させることにより、駆動力を作りだします。送り込む空気の量も適切に調整されるため、送り込まれた空気（酸素）はほとんど余ることなく消費されます。

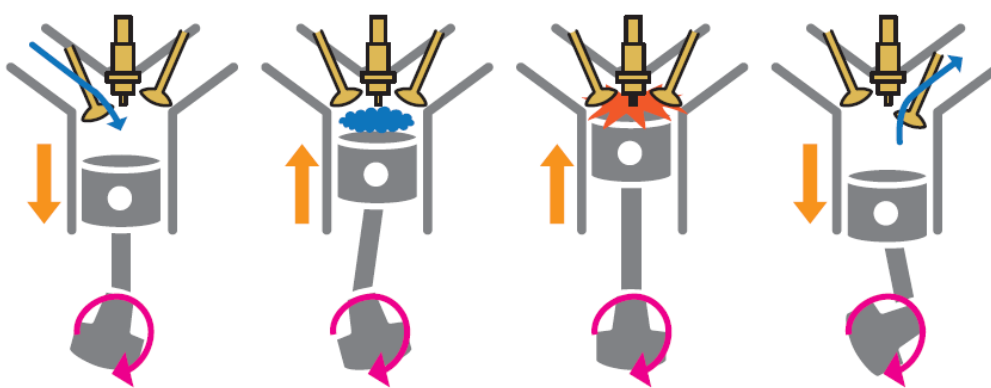


図 2-4 ガソリンエンジンの燃焼プロセス

こうして稼動するガソリン車からは、駆動力と引き換えに、有害な一酸化炭素（CO）、窒素酸化物（NO_x）、炭化水素（HC）が生成します。ガソリン車には、これら 3 種の有害物質を削減するために排ガス処理装置が装備されています。この排ガス処理装置は「三元触媒」と呼ばれています。「三元」とは、削減する 3 物質（CO, NO_x, HC）を指しています。三元触媒は、酸化反応と還元反応を同時に起こしてこれらの有害物質を除去し、安全な二酸化炭素（CO₂）、窒素ガス（N₂）、水（H₂O）に変換しています。

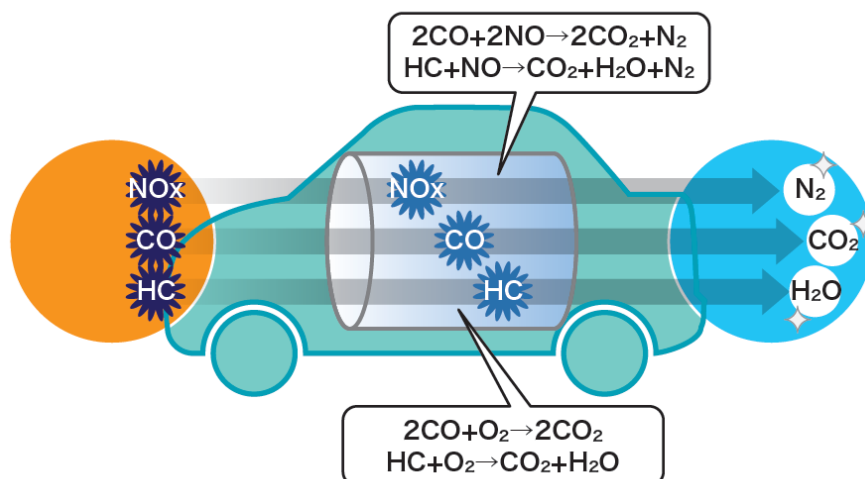


図 2-5 ガソリン車の排ガス浄化装置（三元触媒）

このように三元触媒は、有害な CO, HC, NO_x を同時に無害な物質に変換します。もし三元触媒が装備されていない、あるいは経年劣化を起こしている場合には、これらの有害物質が処理されず高濃度で大気中に放出されてしまいます。

また、使用するガソリンの品質が悪いと、この三元触媒の働きが低下してしまいます。ガソリンには硫黄分が含まれていますが、この硫黄分濃度が高い場合、三元触媒に使われる白金・パラジウムなどの金属と硫黄分が反応して、有害物質を酸化還元する能力を著しく低下させてしまいます。この能力が低下すると、有害物質の処理を上手く行えなくなってしまう、CO、HC、NO_x が未処理のまま大気中に排出されてしまいます。

さらに 1960 年頃には、エンジンの効率をあげるため、ガソリンを製油する際に鉛分が添加された「有鉛ガソリン」が世界中で使用されていました⁴。有鉛ガソリンを使うと、エンジンがより効率的に稼動するため、ガソリン車の燃費をあげることができます。ただし、鉛も三元触媒の処理能力を低下させる性質があります。鉛も触媒では処理できないため、ガソリンに含まれていた鉛分は全て排気ガスの中に溶け込み大気に拡散します。これを少量でもヒトが吸うと全身中毒を起こします。大量に吸ってしまうと急性中毒を起こし、腹痛や嘔吐が表れて死亡するケースもあります。

ガソリン車から排出される大気汚染物質をまとめると以下の通りです。これらの物質の具体的な低減策については第 4 章で説明します。

表 2-1 ガソリン車から排出される大気汚染物質

発生する物質	発生原因
NO _x	・ 三元触媒を装着していない
CO	・ 三元触媒の経年劣化
HC	・ 三元触媒以外

⁴ 1970 年代に米国、英国、スウェーデン等の国々が有鉛ガソリンを段階的に廃止。その後、1970～2000 年代にかけて各国が廃止を宣言し、2016 年現在はミャンマー含むほとんど国が有鉛ガソリン廃止を宣言している。

SOx	・高硫黄濃度ガソリンによる触媒被毒
Pb	・有鉛ガソリンによる触媒被毒

2.2.2 ディーゼル車

ディーゼル車は、軽油（ディーゼル油）を燃やして得られた駆動力を使って走る自動車です。駆動力を作る役目はディーゼルエンジンが担っています。ディーゼルエンジンは、最初に空気だけを注入します。シリンダ内で空気を圧縮したところに軽油を噴霧することで爆発を起こし、駆動力を作りだします。ガソリンと違い軽油は自ら発火するので、ガソリンエンジンのように点火プラグを使う必要がありません。ただし、ガソリンエンジンのように空気と燃料を前もって混ぜ合わせたりはしないため、ディーゼルエンジンでは空気と燃料が不均一に反応します。このため、シリンダ内部のところどころで酸素が余ったり、反対に足りなくなったりしてしまいます。

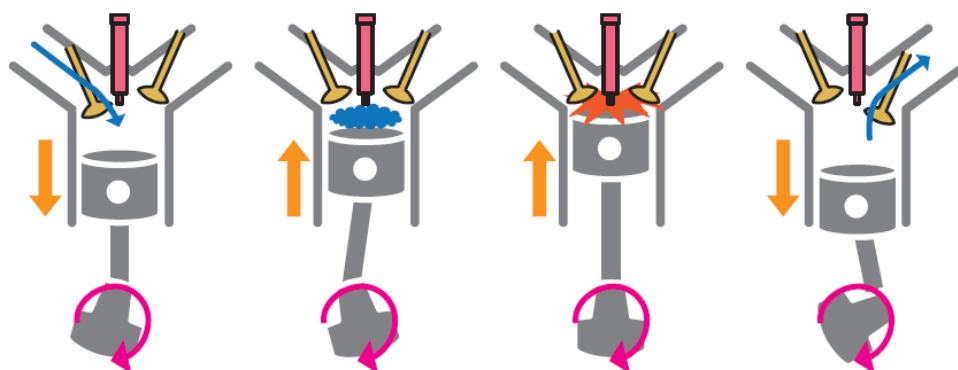


図 2-6 ディーゼルエンジンの燃焼プロセス

この不均一燃焼が、ディーゼル車の排ガスに影響を及ぼします。つまり、余った酸素は窒素と反応して NO_x を生成します。また、酸素が足りなかった箇所では燃料が不完全燃焼を起こし PM が生成します。こうした理由から、ディーゼル車ではガソリン車よりも NO_x と PM が多く発生します。もちろんガソリン車と同じように、 CO 、 HC も生成されます。

こうした有害物質を処理するには、どうすればよいのでしょうか。実はディーゼル車には、ガソリン車に採用されている三元触媒が使用できません。シリンダ内の不均一燃焼のせいでディーゼル車の排気ガス中には多くの酸素が残ってしまうため、 NO_x を還元する反応が酸素のせいで進まないのです。そのため、ディーゼル車には、 CO や HC を酸化して CO_2 、 H_2O にする「酸化触媒」のほか、 NO_x を還元する触媒や、 PM を捕集するフィルターなどが別々に取り付けられます。これらの触媒も、ガソリン車の三元触媒と同様、燃料品質が悪いと、触媒機能が低下してしまい、結果的に有害物質が大気中に排出してしまいます。

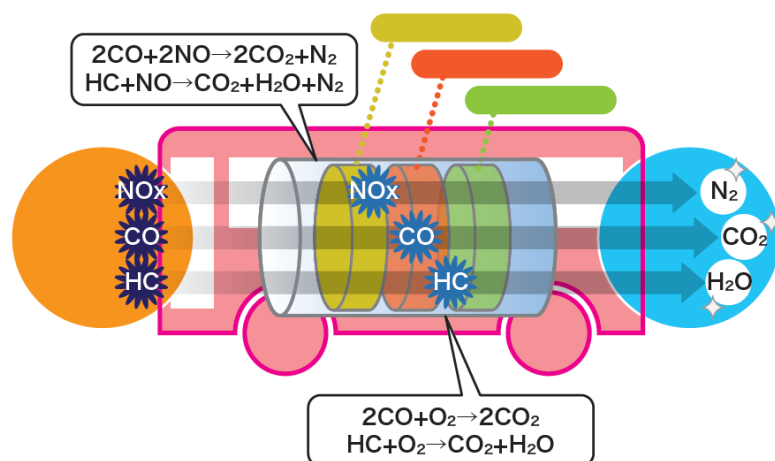


図 2-7 ディーゼル車の排ガス処理装置

ディーゼル車から排出される大気汚染物質をまとめると以下の通りです。これらの物質の具体的な低減策については第 4 章で説明します。

表 2-2 ディーゼル車から排出される大気汚染物質

発生する物質	発生原因
NO _x	・ NO_x 還元触媒を装着していない ・ NO_x 還元触媒の経年劣化
PM	・ PM 捕集フィルターの未装備 ・ PM 捕集フィルターの経年劣化
CO	・ 酸化触媒の未装備
HC	・ 酸化触媒の経年劣化
SO _x	・ 高硫黄軽油による触媒被毒

2.2.3 その他

1) 鉄道

鉄道も、燃料を使う車両であれば大気汚染の移動発生源になります。代表的なものに、ディーゼル汽車が挙げられます。

ディーゼル汽車は、燃料に軽油を使います。ディーゼル自動車と同じ原理で軽油を爆発させ、それにより得られたパワーを使って本体を駆動します。排出されるガスは、ディーゼル自動車と同じ CO、HC、すす、NO_x です。



2) 船舶

船舶は、19 世紀初頭には石炭炊きの船しかありませんでしたが、20 世紀初頭頃からは石油を燃料に使った船が主流になってきました。とくに中型以上の船舶には軽油・重油が使用されていますが、これら中型以上のサイズの船からは NO_x 、 SO_x 、PM（すす）が多く排出されます。とくに重油には多くの硫黄分が含まれていますので、大型重油船からの SO_x 排出が主な大気汚染問題になっていました。このような理由から、中型以上の船舶から出る排ガスをどのように規制するかが国際的に議論されるようになりました。船は国境を跨いで移動する乗り物ですので、大気汚染対策も一国だけで対処することができない点が多く、環境対策を進めるには国際的な協力・取組みが不可欠でした。そのような背景のもと、今では、海事分野における国際連合の専門機関である国際海事機関（International Maritime Organization: IMO）によって国際条約や規則が定められ、それを世界各国が順守する形で対策が講じられています。IMO は、船舶からの NO_x 排出量や、燃料の硫黄分濃度を段階的に規制強化しています。また、石炭、石油に代わる次世代の船として、環境に優しい天然ガスの導入促進も進めています。



3) 航空機

航空機も飛行時に大気汚染物質を出す移動排出源です。航空機エンジンを稼働した際に NO_x 、HC、CO、などが排出されます。航空分野における国際連合の専門機関である国際航空民間機関（International Civil Aviation Organization: ICAO）は、これらの有害物質について排出量の規制値を設定しています。航空機を所有する各航空会社は、この規制をクリアするために、より高効率のエンジンを導入するなど努力を続けています。



2.3 固定発生源

固定発生源とは、工場、発電所、事業所など、大気汚染物質を排出する施設のことです。温水や蒸気を得るためのボイラーを稼働する工場では、ボイラー用燃料を燃焼させるため、煤（すす）が発生します。セメント製造工場においては、焼成プロセスにおいて NO_x が発生します。これらの施設は、移動性がなく常に位置が定まっているため、移動発生源と区別されています。

2.3.1 ボイラー

ボイラーは、燃料を燃焼させて得た熱を水（液体）に加え、温水や蒸気を作る熱交換器をもつ機器です。蒸気や温水が必要な工場・事業所などで使用されています。

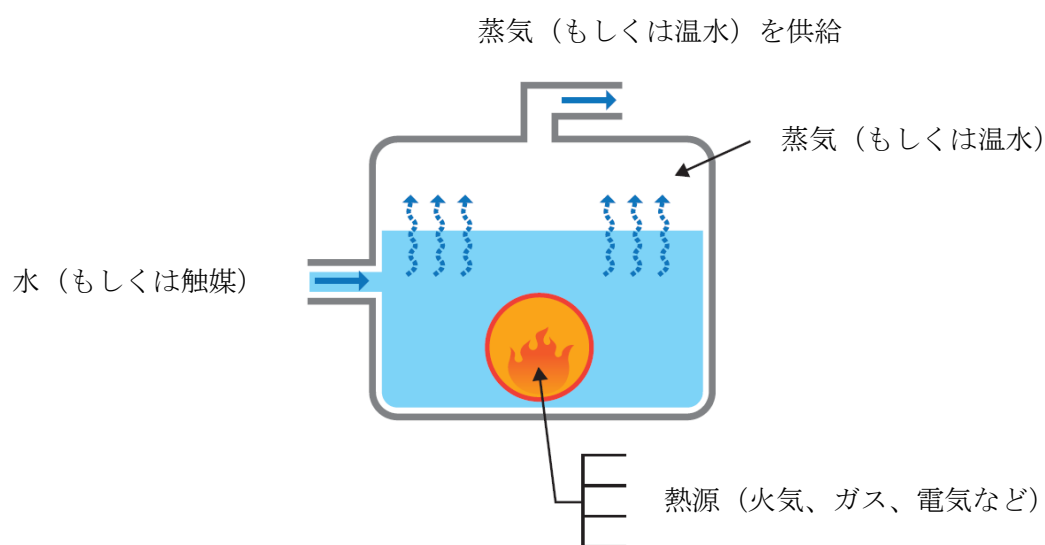


図 2-8 ボイラーの温水・蒸気生成プロセス

発生する大気汚染物質は、ボイラーに使われる燃料の種類によって違ってきますが、一般的に煤塵、 SO_2 、 NO_x 、 CO 、炭化水素類（HC）などが挙げられます。重油など硫黄分の多い燃料を使用すると、 SO_2 が多く排出します。 NO_x は、燃料に含まれる窒素分が酸化して生成される場合と、高温燃焼時に空気中の窒素と酸素が反応して生成される場合の 2 通りがあります。 CO や HC は不完全燃焼に伴い発生する物質で、ボイラーに投入する燃料の量に対して取り込む空気量が足りない場合などに生成されます。

ボイラーの種類は、燃料別に①固体燃料、②液体燃料、③気体燃料、④その他特殊燃料に分かれます。ボイラー燃料に求められる条件としては、利用可能量が多い、調達しやすい、取扱や貯蔵が容易-などが挙げられますが、大気汚染防止の観点では、燃焼の際に汚染物質の排出が少ない燃料を選ぶことが重要です。

表 2-3 ボイラー燃料別の種類

燃料種	燃料の例
固体燃料	石炭、褐炭、コークス、練炭、木材
液体燃料	軽油、重油、灯油
気体燃料	天然ガス、液化天然ガス、製油所ガス、高炉ガス、液化石油ガス
その他	木屑、一般廃棄物（ごみ）、廃タイヤ、バガス（砂糖きびの絞りかす）、植物性廃油等

工場ボイラーから排出される大気汚染物質をまとめると以下の通りです。これらの物質の具体的な低減策については第 4 章で説明します。

表 2-4 工場ボイラーから排出される大気汚染物質

発生する物質	発生原因
NO _x	・ 燃料中の窒素分の酸化
	・ 高温環境における空气中窒素と酸素の反応
SO ₂	・ 燃料中の硫黄分の酸化
PM（煤塵） CO HC	・ 燃料の不完全燃焼

2.3.2 焼成炉

焼成炉は、ものを高熱で焼いて焼成するための炉のことです。セメントなどを作成するロータリーキルン、陶磁器や煉瓦などを作成する窯などがあります。

焼成とは、固体の粉末を融点より低い温度で熱することで粉末を固める行程のことです。例えば、セメント製造で使用するロータリーキルンでは、消石灰・粘土・スラグなどのセメント素材をロータリーキルンに送り込み、回転させつつ 1450℃以上の高温で焼き固め、原料を徐々に化学変化させることで、セメントクリンカを製造します。



図 2-9 ロータリーキルン
出典：太平洋セメント（株）

http://www.taiheiyo-cement.co.jp/oofunato/html/sv_koutei01b.html

焼成炉では、ものを燃焼することにより煤塵が発生します。大規模な焼成炉では、発生する煤塵の量もかなり多いため、通常は炉に集塵装置を付設して煤塵を回収しています。また、ボイラーより炉内温度がかなり高温であるため、**Thermal NO_x** も生成します。セメント工場内だけでなく周辺環境にも悪影響を及ぼします。

2.3.3 火力発電所

発電所には、水力発電・火力発電・原子力発電・地熱発電・再生可能エネルギー発電など様々な種類がありますが、燃料を燃やして発電する火力発電所も大気汚染の固定発生源です。火力発電は、他の発電型式に比べて発電効率がよく、発電量の調整も容易という利点があり

ますが、燃料を燃やすため大気汚染物質が発生します。

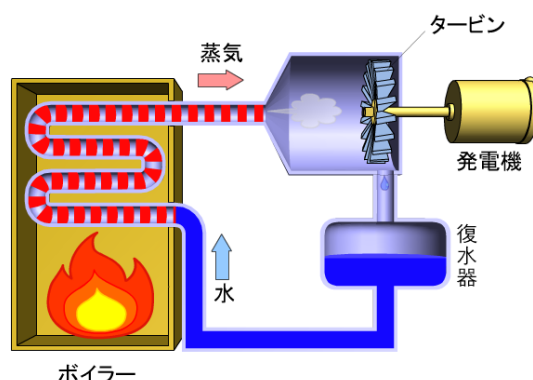


図 2-10 火力発電の基本構造

出典：電気事業連合会

<http://www.fepc.or.jp/enterprise/hatsuden/fire/index.html>

火力発電の最大の強みは扱いやすさで、電力需要量に応じて発電量を比較的簡単に調整することができます。電力需要のピーク時には出力を高め、逆に需要が少ないときには出力を下げるような稼動調整が可能です。逆に弱みとしては、SO_x や NO_x といった大気汚染物質を排出する点です。代表的な温室効果ガスである CO₂ 二酸化炭素を多く排出してしまうのも問題点です。

表 2-5 火力発電の長所と短所

長所	短所
・他の発電方法より発電効率が良い ・発電効率が更に良い火力発電が誕生している（例：コンバインドサイクル発電） ・発電量の調整が容易	・大量の化石燃料が必要 ・二酸化炭素を多量に排出する ・大気汚染物質を排出する

使用される燃料には石油・石炭・天然ガスがあります。燃料の採掘可能量、購入価格、調達の容易性などを考慮して最適な燃料が選択されます。火力発電所で使用される蒸気生成設備もボイラーであり、前述した「工場ボイラー」と基本的な原理は一緒です。燃料中の硫黄分や窒素分が多いと SO_x・NO_x の排出は多くなりますし、高温燃焼ですので、大気中の窒素が酸化されることでも NO_x が生成します。

火力発電所は大気汚染の排出源ではありますが、適切な対策技術を導入すれば、排出する汚染物質の大部分を抑えることができます。その対策技術については、「1.5 大気汚染対策」で紹介します。

表 2-6 火力発電所から排出される大気汚染物質

発生する物質	発生原因
SO _x	・高硫黄燃料の利用
NO _x	・燃料中の窒素分の酸化

	・高温環境での燃焼
煤塵	・燃料の不完全燃焼
CO ₂	・燃料の燃焼

2.3.4 その他

これまで挙げた工場ボイラー、焼成所、発電所以外にも、様々な固定発生源が存在します。

例えば「ごみ焼却炉」も固定発生源の代表例です。ごみ焼却炉からは、これまで説明した煤塵・NO_x・一酸化炭素などの物質のほか、ダイオキシンや水銀などのようにゴミに含まれていた物質が焼却炉ガスに溶け込み、大気中に拡散します。

セメント製造工場については、ロータリーキルンを紹介しましたが、原料を粉砕する粉砕機についても、粉塵が発生する固定発生源と考えることができます。粉砕機はレンガ製造工場などでも使用されています。

固定発生源は農業分野にもあります。稲作では、稲わらを焼却処分するのであれば、その焼却場所は固定発生源になります。焼畑農業は畑作予定地の樹木や草木が燃やされますので、大気汚染の発生源です。

車道・路橋などの建設現場では、建設資材の粉塵などが工事期間中堆積していますので、風などにより粉塵が頻繁に巻き上げられ、周辺の大気環境が悪化することもあります。

2.4 自然発生源

自然発生源とは、火山、海など、もともと自然界に存在して大気汚染物質を排出する発生源のことです。移動性発生源や固定発生源は、人の経済活動や生産活動の結果生じるものですが、自然発生源は人の活動に関係なく存在し、汚染物質を排出し続けます。

自然発生源には、自然発火による山火事や火山活動などが挙げられます。特に火山は、火山灰を撒き散らすだけでなく、マグマに含まれる硫黄成分から硫黄酸化物を発生させます。二酸化硫黄とともに火山ガスの代表的な成分である硫化水素（H₂S）は、より低濃度でも特徴的な腐卵臭があります。このため、二酸化硫黄の濃度が低い場合でも異臭を感じる場合があります。

その他、黄砂・砂塵などの風による地面からの巻き上げ、海塩粒子などの風による海面からの巻き上げなども自然起源の大気汚染物質です。近年は、植物からも大量のVOCが放出されていることがわかり、人為起源のVOCと比べても無視できない量であることがわかっています。

第3章 大気汚染の監視

3.1 大気汚染の監視方法

各発生源から排出される汚染物質を効果的に抑制するには、排出される大気汚染物質の種類とその排出量を正確に把握した上で、適切な抑制対策を選定することが重要です。ここでは、環境大気の測定方法、移動発生源の排ガス計測方法、固定発生源からの排ガス計測方法を概観します。

3.2 環境大気の測定

環境大気を常時監視することで、汚染状況を正確に把握できるだけでなく、大気汚染対策や排ガス規制の方針を決めるための基礎資料を蓄積することにも繋がります。また、広域的汚染のメカニズムの解明にも役立てることができます。環境大気の測定は、汚染物質の計測器を導入して直接測定するのが基本ですが、インターネット情報の活用なども有効です。広域汚染情報を入手して計測結果のダブルチェックに利用したり、国土全体の汚染状況の傾向把握に活用することができます。

3.2.1 計測器での測定

計測器を用いて環境大気を正しく測定・把握するためには、a)測定地点の選定、b)計測機の選定・運用-の両方を正しく実施することが重要です。

(1) 測定地点の選定

測定地点は、大気汚染による人の健康の保護と、生活環境の保全の見地から定める必要があります。居住エリアに計測器を設置して人々の居住区の大気環境を監視しつつ、同時に道路付近に設置して自動車排ガスによる汚染状況を監視できるよう、測定地点を設定します。

日本では、大気汚染物質の計測器を設置する施設を「測定局」と呼んでいます。大気汚染状況を常時監視するための「一般環境大気測定局」と、交差点や道路及び道路端付近において自動車排出ガスに起因する大気汚染を常時監視するための「自動車排出ガス測定局」の2種類を各地に設置しています。



図 3-1 日本の測定局

表 3-1 測定局の種類

測定局の種類	測定目的
一般環境大気測定局	☐ 大気汚染状況の継続的把握 ☐ 発生源からの排出による汚染への寄与及び高濃度地域の特定 ☐ 汚染防止対策の効果の把握
自動車排出ガス測定局	☐ 自動車排出ガスに起因する大気汚染状況の常時監視

「一般環境大気測定局」は、測定する地域を代表する測定値が得られるよう、特定の発生源の影響を直接強く受けない場所等を選定して配置します。測定地点の選定にあたっては、以下の点に留意する必要があります。

- i) 川岸のように下降気流が発生するところなど、特異な地形や特異な気象条件の場所を避ける
- ii) 周辺の建物や樹木による吹き溜まりや乱気流の発生する場所を避ける
- iii) 中高層建物が建ち並ぶ地域では気流の乱れが大きいため、影響の少ないところを選ぶ

「自動車排出ガス測定局」は、人が常時生活し活動している場所で、かつ自動車排出ガスの影響が最も強く現れる道路端（もしくはその付近）に配置します。留意すべき事項は以下の通りです。

- i) 汚染物質の距離減衰を考慮し、道路端から 10m 程度以内にすることが望ましい。設置場所の用地の確保が困難な場合においても道路端から 20m 程度以内にすることが望ましい。
- ii) 高架道路の場合には最大濃度の出現する場所は道路から水平方向に直線的に離れた地点になることも考えられるので、高濃度が出現し易い場所に設置することに留意する
- iii) その他、一般環境大気測定局と同様の検討を行い設置する

(2) 適切な計測機の選定・運用

測定地点を設定した後は、その地点の汚染状況を正しく把握するために、適切な計測器を

導入し、運用していくことが重要です。

○計測器のスペックチェック

計測器の選定にあたっては、その機器が十分な性能を有するかの確認（スペックチェック）が必要です。計測器の性能を示す代表的な項目を下表に示します。

表 3-2 計測器の性能を示す主要項目

項目	説明	記載例	スペックチェック時の 注意点
Parameter（測定成分）	対象とする測定物質	NO ₂ , SO ₂ , PM10	測定対象の物質に あるか
Measurement range/ span（測定範囲）	測定可能な濃度範囲	0 to 5,000 μ g/m ³ , 0 to 100ppm	事前に予想される濃 度が含まれているか
Measurement accuracy（測定精度）	測定値の正確度。機 器が許容される測 定誤差を表す	読取値の 10%の、 最大測定値の 1%誤 差	測定誤差が許容でき るか
Resolution（分解能）	計測器が判別でき る最小濃度差	1ppb, 1 μ g/m ³	測定値より十分小 さいか

計測器のスペック表には対象物質が記載されているため、測定予定の物質が含まれていることをまず確認します。「測定範囲」は、その計測器が測定可能な濃度範囲を示しています。測定器の購入時には、測定したい値を事前に見積もり、その値が機器の測定範囲に入っていることを確認します。次に「測定精度」から機器の読み取り値の正確さを検討します。測定物質の見積もり値に比べ測定誤差が大きい場合、その計測器は十分なスペックを有しているとは言えません。たとえば計測器の測定範囲が 0～5000 μ g/m³かつ測定誤差が最大目盛値の 1%であれば測定誤差は±50 μ g/m³ になりますが、測定したい NO₂濃度が 50 μ g/m³付近である場合、この計測器で使うのは望ましくありません⁵。測定誤差は、測定物質の濃度の真値（あるいは見積もり値）に対し十分小さいことが望ましいです。「分解能」も、スペックチェックにあたり欠かすことのできない項目です。分解能とは、計測器が読み取れる最小単位のことです。例えば、分解能が 100ppb の機器では、10ppb と 50ppb の違いを読み取ることができません。したがって分解能も、測定したい値に比べて十分小さい必要があります。なお参考として、日本工業規格（JIS 規格）で要求されている計測器のスペックを示します。機器スペックチェック時の参考にしてください。

表 3-3 JIS B 7953 における NO_x 濃度測定器（化学発光方式）の要求スペック

項目	仕様
Measurement accuracy（測定精度）	最大目盛値の±4.0%

⁵真値の 50 μ g/m³に対して読取値が 0～100 μ g/m³の間で常に変動してしまうため、正確な濃度測定ができない

Resolution（分解能）	最大目盛値 0.5%以下
-----------------	--------------

○メンテナンスの実施

計測機を長期間安定して稼働させるためには、計測機についての十分な知識を持った専門職員を配置して、適切にメンテナンスを実施する必要があります。メンテナンス手順、部品交換の頻度や必要経費は事前に確認しておきます。また専門職員自らが実施できない技術的困難な作業についてはメーカーのサポートを受ける必要がありますので、メーカーのサポート範囲は機器購入前に確認が必要です。他にも、職員の能力を維持するために、専門職員のための講習会や個々の計測機の取り扱いに関する技術研修を定期的に行ったり、メーカーによる測定・維持管理教育を受講したりといった活動も重要です。

○測定前および定期的な校正

校正とは、検量線の点検・調整作業のことです。計測機が正しく動作し、正確な測定値が得られることを確認するため、検量線のゼロ点・スパン点と呼ばれる点を点検・調整します。ゼロ点は検量線上の最小目盛値（濃度ゼロの点）を示す点、スパン点は検量線で最大目盛付近（通常は 90%程度）を示す点のことです。

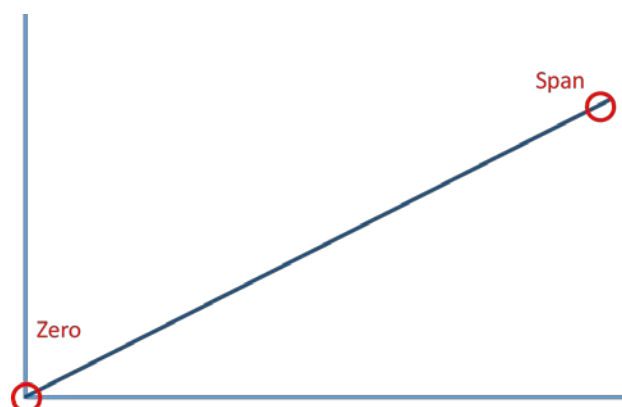


図 3-2 ゼロ点・スパン点の概説図

通常、計測機は、検量線が原理的に直線とみなされるので、ゼロ点とスパン点で校正し、できる限りその中間 3 点付近の濃度の標準ガス（または等価液）を用いて各点毎に直線性（指示誤差）を確認します。校正方法には、校正用の等価液（ゼロ等価液、スパン等価液、中間目盛用等価液）を使用する静的校正と、校正ガス（ゼロガス、スパンガス、中間目盛用ガス）を使う動的校正があります。具体的な校正手順・校正頻度については、メーカーの説明書を参照してください。

計測器を使い正確な濃度を測定するためには、測定開始前や測定期間中の定期的な校正作業が欠かせません。校正ガスや等価液などの調達可能性も含め、測定者自らで実施できるかを測定器購入前に必ず検討してください。測定者自らの実施が難しい場合は、メーカーや代理店、専門の研究機関などのサポートが必要となるため、大気監視活動の必要経費として見込んでおく必要があります。

3.2.2 インターネット情報の活用

国内の環境大気濃度を把握するには、実際に測定器を用いて測定する以外に、インターネットで公開されている観測・予測情報を参照することも有効です。計測器での測定結果と比較したり、計測器で測定できていないエリアがあれば参考情報としてこうした公開データを活用する等の使い方が考えられます。

(1) SPRINTARS

SPRINTARS は、大気中の浮遊粒子状物質（エアロゾル）による地球規模の気候変動および大気汚染の状況をコンピュータにより再現・予測するために開発された数値モデルです。日本の大学⁶が中心となり開発したソフトウェアで、アジア圏における対流圏に存在する自然起源・人為起源の主要エアロゾル（黒色炭素・有機物・硫酸塩・土壌粒子・海塩粒子）の濃度を予測し、ウェブ上で一般公開しています。SPRINTARS は以下の URL からアクセスすることができます。

SPRINTARS ウェブサイト（英語）

<http://sprintars.riam.kyushu-u.ac.jp/indexe.html>

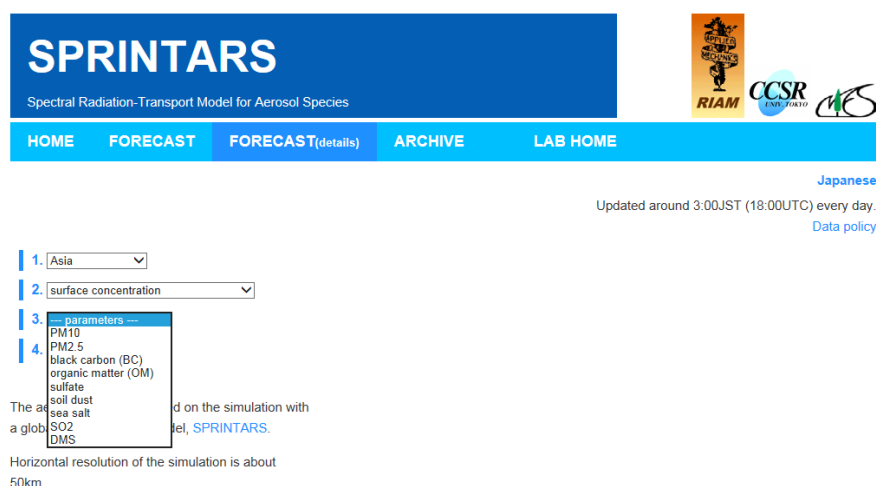


図 3-3 SPRINTARS のウェブサイト

<http://sprintars.riam.kyushu-u.ac.jp/indexe.html>

アジア圏の予測情報を見るには、ホーム画面上にあるタブから「FORECAST(details)」を選びます。複数のプルダウンが表示されますので、「Region」のプルダウンでは「Asia」を、「Categories」のプルダウンでは「surface concentration」を選択します。「Parameters」のプルダウンでは、予測情報を見たいパラメータを選択します。PM10、PM2.5、Black carbon、Organic matter、Sulfate、Soil dust、Sea salt、SO2、Dimethyl sulfide から選択できます。最後に「Play movie」

⁶九州大学 応用力学研究所気候変動科学分野

を押すと、選択した物質の地表濃度の予測情報を動画で見ることができます。

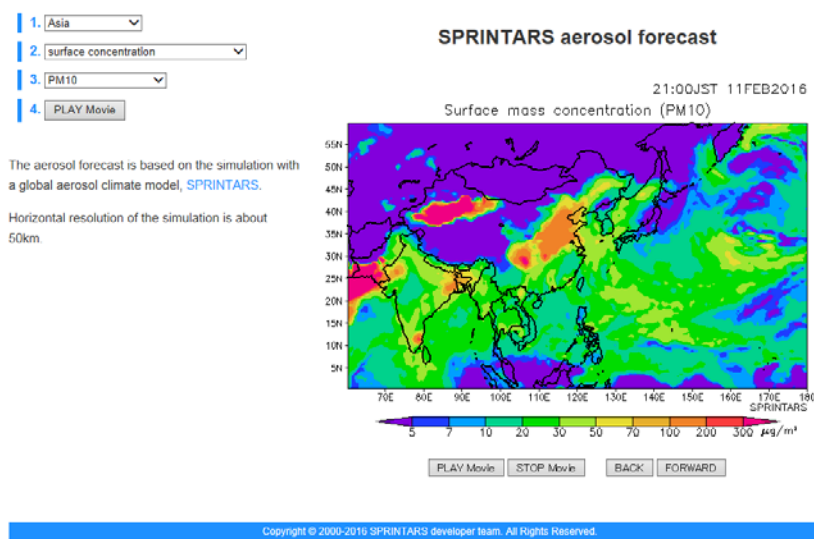


図 3-4 SPRINTARS の濃度予測

(図は 2016 年 2 月 11 日 21 時におけるアジア圏の PM10 地表濃度予測)

<http://sprintars.riam.kyushu-u.ac.jp/forecast2.html>

(2) NASA

NASA も、世界中の大気汚染状況や気象情報を衛生観測しており、ウェブサイトで一般公開しています。

NASA Earth Observatory ホームページ (英語)

<http://earthobservatory.nasa.gov/?eocn=topnav&eoci=logo>

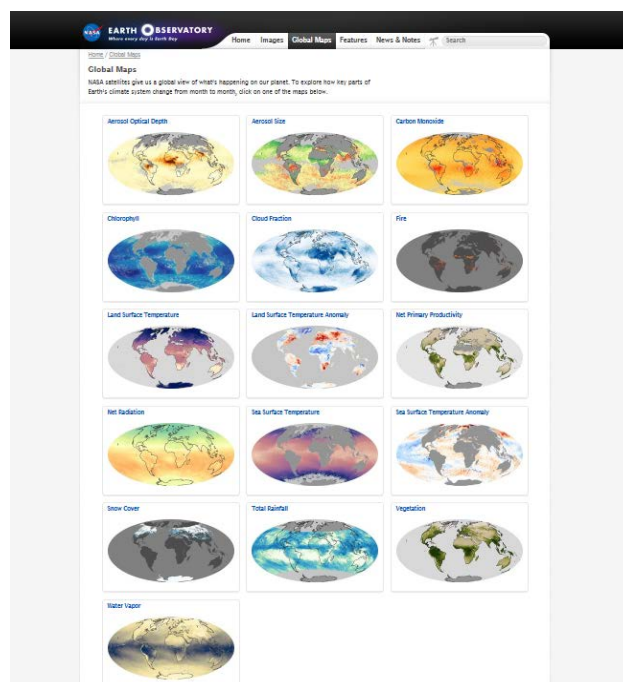


図 3-5 NASA Earth Observatory “Global Maps”のページで見ることのできるパラメータ
(各リンクをクリックすると動画再生画面に映る)

<http://earthobservatory.nasa.gov/GlobalMaps/?eocn=topnav&eoci=globalmaps>

このウェブサイトでは、粒子状物質（エアロゾル）の発生状況や一酸化炭素の排出情報を、衛生観測値として閲覧することができます。他にも、地表温度や海面温度、降雨量、積雪量などの気象情報も閲覧できます。各指標の衛生観測は、早いものは 2000 年初頭から、目新しいものでも 2005 年頃から 10 年以上のデータが蓄積されており、各観測地の経年変化が世界地図上に動画で示されています。大気汚染状況の変遷、地球温暖化に伴う異常気象の発現などをこのウェブサイトで確認することができます。

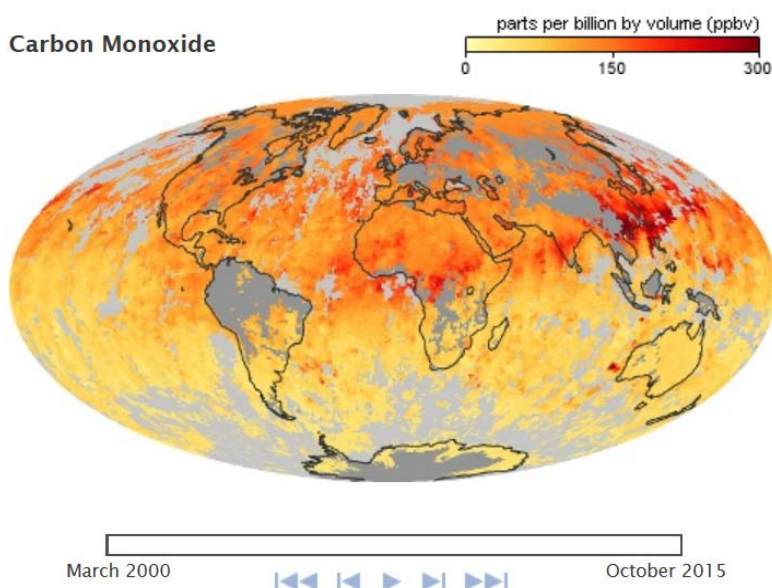


図 3-6 NASA Earth Observatory “Global Maps”で見る世界中の CO 濃度
(下部のシークバーを操作して 2000 年 3 月～2015 年 10 月の濃度状況が閲覧できる)

http://earthobservatory.nasa.gov/GlobalMaps/view.php?d1=MODAL2_M_AER_OD

3.3 自動車排ガスの計測

移動発生源対策として、自動車の排気ガスの成分、濃度を計測し把握することは極めて重要です。ここでは、自動車排ガスの計測方法として(1)車検場の排ガス検査結果の活用、(2)リモートセンシング法の活用、を紹介します。

(1) 車検場の排ガス検査結果の活用

ミャンマーでは、使用過程車の更新登録（車検）時に、排ガス検査を行います。ASEAN 排出ガス基準をベースに、ガソリン車では排ガス測定器により CO と HC が、ディーゼル車

ではオパシメータにより PM 濃度が検査されます。これらの計測結果を活用することにより、自動車排ガス状況を把握することが可能です。受検車両の年式、型式、走行距離、ナンバープレート区別（自家用、商用、観光用など）とあわせて排ガス検査結果を管理することで、通常時の走行でも異常な高濃度の排ガスを排出する車（ハイエミッター車）の傾向を把握することができます。

(2) リモートセンシング法の活用

リモートセンシング法とは、自動車が走行する道路の両側に紫外線・赤外線センサーを設置して、その箇所を通過する自動車の排ガス濃度を推計する方法です。自動車の排気管がセンサーを通過した直後の NO, HC, CO, CO₂, PM の吸光度を計測することにより、各物質の排出量を推計できます。計測時には、同時にナンバープレート情報も読み取ります。これにより、実走行時の排ガス排出状況を把握できると共に、ナンバープレート情報から得られる車両情報と照らし合わせることでハイエミッター車の傾向や割合等を実態調査することが可能です。

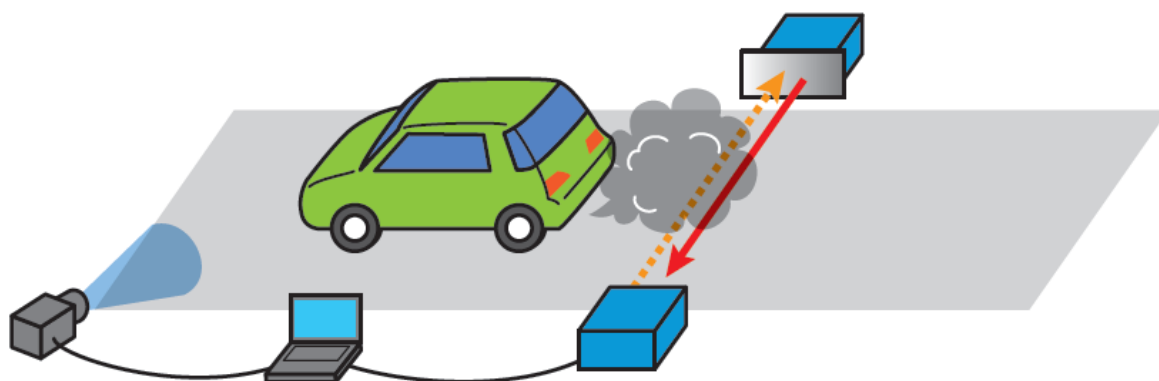


図 3-7 リモートセンシング法の概略

3.4 煙道排ガスの計測

大気汚染防止を適切に推し進めるためには、移動発生源だけでなく固定発生源からの汚染物質も効果的に抑制する必要があります。とくに煙道排ガスの排出量を把握するには、燃料使用量や出力等から理論値を計算するなどの方法もありますが、可能な限り直接計測することが望ましいです。とくに排ガス処理装置の導入効果を確認する場合には、計測器を使った直接モニタリングが不可欠です。

煙道排ガス中の大気汚染物質の測定方法には、自動計測器を用いた測定と、手分析による化学分析の二通りがあります。自動計測器は、ある固定発生源に対して長期的かつ連続的に測定したい場合に使用します。手分析は、短期的な測定や、自動計測器の測定結果を検証したい場合などに実施されます。

自動測定器は試料採取方法の違いにより、試料ガス吸引採取方式、試料ガス希釈方式、試料非吸引採取方式に別れます。各方式には長所・短所あるため、測定対象の施設の状況を踏まえて最適な測定方法を選定する必要があります。

表 3-4 煙道排ガスの測定方式

測定方式	方法
試料ガス吸引採取方式	試料ガスを採取・捕集して連続分析する測定方法。以下の 2 種類がある。 a) 捕集部に試料ガスを吸引捕集した後化学分析を行う b) 試料ガス中の水分を除去した後連続分析で測定する
試料ガス希釈方式	吸引した試料ガスを大量の計装空気又は希釈用ガスで希釈することによって、吸引ガスの露点を下げ、加熱保温せずにそのまま試料ガスを分析計に連続供給する方法
試料非吸引採取方式	試料ガスを採取しない連続分析方法。以下の 2 種類がある。煙道中の有害物質の量をリアルタイムで監視できるのが利点 a) ろ過材で保護した検知部を排ガス流に暴露させて排ガス濃度を検知測定する b) 赤外線又は紫外線を煙道内に貫通させて、その変化量から分析対象の成分濃度を測定する

第4章 大気汚染対策

大気汚染状況を監視し、高濃度の大气汚染物質を排出する発生源が特定された後は、汚染物質の排出を抑制するための対策を講じる必要があります。ここでは、移動発生源と固定発生源それぞれの代表的な汚染源を取り上げ、その大気汚染対策技術・事例について紹介をしていきます。

4.1 移動発生源対策

自動車から排出される窒素酸化物（NO_x）、浮遊粒子状物質（SPM）による大気汚染への対策技術には、エンジン改良、燃料品質改善、排ガス処理装置導入などがあります。制度面の対策としては、自動車排出ガス規制、低公害車等の普及促進が挙げられます。ここでは、ガソリン車、ディーゼル車について実施可能な対策を紹介します。

4.1.1 ガソリン車

ガソリン車から排出する排気ガスの成分によって、適切な大気汚染対策を選定します。

表 4-1 ガソリン車の大気汚染対策

発生する物質	発生原因	対策メニュー
NO _x CO HC	・三元触媒を未装着 ・三元触媒の経年劣化	・三元触媒の導入
		・エンジンの点火時期調整
	・それ以外	・車両の定期的な維持管理
		・排出ガス再循環装置の導入
SO _x	・高硫黄ガソリンによる触媒被毒	・低硫黄ガソリンの利用
Pb	・有鉛ガソリンによる触媒被毒	・無鉛ガソリンの利用

三元物質（NO_x、CO、HC）が高濃度で排出する場合は、排ガス処理装置が装備されていない、もしくは低型式車であれば排ガス処理装置が耐久（経年）劣化を起こしている可能性があります。この場合の対策としては、排ガス処理装置（三元触媒）の導入（交換）が有効です。ただし、使用する燃料に鉛分や硫黄分などの触媒毒が含まれていると、三元触媒を導入（交換）してもすぐに劣化してしまうことがあります。三元触媒を導入する際は、同時に、使用する燃料の品質にも気を配る必要があります。

三元物質だけでなく鉛分や硫黄分の排出が確認される場合は、燃料に含まれる触媒毒（鉛、硫黄など）が三元触媒と化学反応を起こし、触媒機能を低下させている可能性が考えられます。この場合は、三元触媒を交換しても、鉛・硫黄分によって触媒機能をすぐに破壊されて

しましますので、根本的な解決にはなりません。鉛や硫黄分の含まれない高品質な燃料で走らせることが、対策の第一歩です。なお日本では、ガソリン車の燃料においては、鉛は「検出されないこと」、硫黄は「0.001 質量%以下」と許容限度が定められています。

これらの対策を実施しても満足な排ガス処理性能が得られない場合には、三元触媒以外の部分に目を向ける必要があります。具体的には、「エンジンの点火時期調整」「排出ガス再循環装置の導入」「車両の定期的な維持管理」などの対策があります。いずれもガソリンエンジンの燃料性能を向上させる目的で実施されます。

表 4-2 ガソリン車の汚染対策例

技術対策	内容
排ガス処理装置（三元触媒）の導入・交換	排ガス処理触媒を装備していない、もしくは耐久劣化を起している車両に新しい三元触媒を導入し、三元物質（CO・HC・NOx）を適切に浄化処理する。
燃料品質の改善	有鉛ガソリンや高硫黄ガソリンから、無鉛かつ低硫黄のガソリンに代替することで、触媒毒により三元触媒の排ガス処理機能低下を防ぐ。
ガソリンエンジンの点火時期調整	ガソリンエンジンの混合気体に点火するタイミングを調整することで、燃焼室内の最高燃焼温度を低下させて、NOx 排出量を抑える。燃焼時間も長くなるので、不完全燃焼の割合が下がり、HC 排出量も減少する。
車両の定期的な維持管理	ガソリンフィルタ、空気フィルターを定期洗浄あるいは交換して、エンジンに供給する燃料の流量減少を防ぐことにより、エンジンの燃焼性能を維持する
排出ガス再循環装置の導入	排出ガス再循環装置により不活性な排出ガスを吸気系統に導入し、最高燃焼温度を低下することで NOx 生成を抑制する。

このような技術的対策を推進させるためにも、自動車排ガスの排出基準は国内の状況を踏まえた適切なレベルで設定する必要があります。ミャンマー周辺のアジア各国では、EU が定める EU 圏内統一排出ガス規制（European emission standards）に依り、規制値を制定しています。EU の規制値はその世代により「EURO + 数字」の標記で区分されており、初期の Euro 1 から最近の Euro 6 まで、段階的に規制強化されてきました。

表 4-3 EU 圏内統一排出ガス規制のガソリン車排ガス規制値（主要値のみ、乗用車用 ※1）

Emissions	Unit	Euro1	Euro2	Euro3	Euro4	Euro5	Euro6
CO	g/km	2.72	2.2	2.3	1.0	1.0	1.0
HC	g/km	-	-	0.2	0.1	0.1	0.1
NOx	g/km	-	-	0.15	0.08	0.06	0.06

※1 Euro1~4 では車両総重量 2,500kg 以下、Euro5,6 では 2,610kg 以下

アジア各国は、自国のモータリゼーションの進行度などを考慮しながら、自国に適したEuro 区分を参照しています(下表)。このように自国の現状に沿った規制値を定めることで、自動車排ガスの削減目標が明確になり、そしてその目標達成に必要な技術対策・制度を無理なく効率的に推進することができます。

表 4-4 アジア諸国における軽量自動車の排ガス排出基準

Country	95	96	97	98	99	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
EU	E1	Euro 2					Euro 3			Euro 4				Euro 5					Euro 6												
HK,PRC	Euro 1	Euro 2					Euro 3						Euro 4			Euro 5															
South Korea														Euro 4		Euro 5															
PRC ^a						Euro 1				Euro 2				Euro 3		Euro 4															
PRC ^a						Euro 1				Euro 2				Euro 3		Euro 4			Euro 5												
Taipei, China						US Tier 1										US Tier 2 Bin 7 ^f															
Singapore ^a	Euro 1																		Euro 2												
Singapore ^b	Euro 1									Euro 2				Euro 4																	
India ^c							Euro 1					Euro 2				Euro 3															
India ^d					E1		Euro 2					Euro 3				Euro 4															
Thailand	Euro 1						Euro 2			Euro 3									Euro 4												
Malaysia		Euro 1														Euro 2			Euro 4												
Philippines									Euro 1				Euro 2						Euro 4												
Vietnam														Euro 2							Euro 4								Euro 5		
Indonesia													Euro 2																		
Bangladesh ^a												Euro 2																			
Bangladesh ^b												Euro 2																			
Pakistan															Euro 2 ^a																
Sri Lanka										Euro 1																					
Nepal						Euro 1																									

Notes:

^aThe level of adoption vary by country but most are based on the Euro emission standards

a – gasoline; b – Diesel; c – Entire country; d – Delhi, Mumbai, Kolkata, Chennai, Hyderabad, Bangalore, Lucknow, Kanpur, Agra, Surat, Ahmedabad, Pune and Sholapur; Other cities in India are in Euro 2; e – Beijing [Euro 1 (Jan 1999); Euro 2 (Aug 2002); Euro 3 (2005); Euro 4 (1 Mar 2008); Euro 5 (2012)], Shanghai [Euro 1 (2000); Euro 2 (Mar 2003); Euro 3 (2007); Euro 4 (2010)] and Guangzhou [Euro 1 (Jan 2000); Euro 2 (Jul 2004); Euro 3 (Sep-Oct 2006); Euro 4 (2010)]; f – Equivalent to Euro 4 emissions standards; Vietnam will implement Euro 3 standards for motorcycles by 2017.

出典：Cal-Asia, Emission standards for new light-duty vehicles

4.1.2 ディーゼル車

ディーゼルから排出する排気ガスの成分によって、適切な大気汚染対策を選定します。

表 4-5 ディーゼル車の大気汚染対策

発生する物質	発生原因	対策メニュー
NO _x	• NO_x 還元触媒の未装備 • NO_x 還元触媒の経年劣化	• NO _x 還元触媒の導入
		• エンジンの燃料噴射時期の調整
		• コモンレール式高圧燃料噴射
		• 排出ガス再循環装置の導入
PM	• PM 捕集フィルターの未装備 • PM 捕集フィルターの経年劣化	• PM 捕集フィルターの導入
		• 車両の定期的な維持管理
CO	• 酸化触媒の未装備	• 酸化触媒の導入
HC	• 酸化触媒の経年劣化	
SO _x	• 高硫黄軽油による触媒被毒	• 低硫黄軽油の利用

NO_x, PM が高濃度で排出する場合は、排ガス処理装置がない、もしくは低型式車の場合は耐久劣化を起こしている可能性があります。ディーゼル車の場合においても、まずは排ガス

処理装置の導入（交換）が有効な対策です。CO, HC が高濃度で排出されているのであれば、酸化触媒を交換すると改善される可能性があります。NO_x 排出量が問題なのであれば NO_x 還元触媒を、PM の排出量が問題なのであれば PM 捕集フィルターが交換対象になります。使用する燃料の品質（硫黄分の濃度）に注意する必要があるのは、ディーゼル車の場合も同様です。

NO_x, PM に加え、硫黄分の高濃度排出が確認される場合も、まずは燃料品質を疑う必要があります。軽油の場合は鉛が添加されることはありませんが、元来硫黄分が高く含まれる燃料なので、硫黄分濃度には常に注意が必要です。なお日本では、ディーゼル車に使用する軽油燃料においては、硫黄は「0.001 質量%以下」と許容限度が定められています。

上記の対策を実施しても満足な排ガス処理性能が得られない場合には、排ガス処理装置以外の部分に目を向ける必要があります。具体的には、「ディーゼルエンジンの適燃料噴射時期の調整」「コモンレール式高圧燃料噴射」などの対策があります。ディーゼル車においても、「車両の定期的な維持管理」は PM 対策として一定の効果を発揮します。

表 4-6 ディーゼル車の汚染対策例

技術対策	内容
排ガス処理装置の導入・交換	排ガス処理触媒を装備していない、もしくは耐久劣化を起している車両について、酸化触媒、NO _x 還元触媒、PM 除去フィルター（Diesel Particulate Filter : DPF）を導入し、有害物質（CO・HC・NO _x ・PM）を適切に浄化処理する。
燃料品質の改善	より低硫黄の軽油を使用することで、触媒毒による酸化触媒の排ガス処理機能低下を防ぐ。また DPF の PM 除去機能維持にも繋がる。
エンジンの燃料噴射時期の調整	ディーゼルエンジン内での燃料噴射のタイミングを調整することで、燃焼室内の最高燃焼温度を低下させて、NO _x 排出量を抑える。燃焼時間も長くなるので、不完全燃焼の割合が下がり、HC 排出量も減少する。
コモンレール式高圧燃料噴射	ディーゼルエンジンでの燃料噴霧を高圧（200～250Mpa）で行うことで微粒化し、燃料消費を抑え、NO _x ・PM の発生を抑制する。
車両の定期的な維持管理	軽油燃料フィルター、空気フィルターを定期洗浄あるいは交換して、エンジンに供給する燃料の流量減少を防ぐことにより、エンジンの燃焼性能を維持する
排出ガス再循環装置の導入	排出ガス再循環装置により不活性な排出ガスを吸気系統に導入し、最高燃焼温度を低下することで NO _x 生成を抑制する。

ディーゼル車においても、自動車排ガスを適切に規制することが不可欠です。EU が定める EU 圏内統一排出ガス規制では、ディーゼル車には以下の規制値が設定されています。

表 4-7 EU 圏内統一排出ガス規制のディーゼル車排ガス規制値（主要値のみ、乗用車用^{※1}）

Emissions	Unit	Euro1	Euro2	Euro3	Euro4	Euro5	Euro6
CO	g/km	2.72	1.0	0.64	0.5	0.5	0.5
NOx	g/km	-	-	0.5	0.25	0.18	0.08
PM	g/km	0.14	0.08	0.05	0.025	0.005 ^{※2}	0.005 ^{※2}

※1 Euro1~4 では車両総重量 2,500kg 以下、Euro5,6 では 2,610kg 以下

4.1.3 その他

ガソリン車、ディーゼル車それぞれの大気汚染対策を説明してきましたが、低公害車に乗り換えるのも一つの大気汚染対策です。

代表的な低公害車に、天然ガス車が挙げられます。天然ガス車は、基本的な構造はガソリン車やディーゼル車と同じなのですが、燃料系統が違います。燃料には高圧に圧縮された天然ガスを使い、車内に搭載されたガス容器から燃料配管を通りエンジンに供給されます。天然ガスは地球温暖化の原因となる CO₂ の排出量が少なく、天然ガス車はガソリン車に比べ CO₂ 排出量を 2～3 割程度低減させた走行が可能です。また NO_x, CO, HC 等の排出量も少ない上に、SO₂ に至っては全く排出されません。黒煙もなく、粒子状物質 (PM) もほとんど排出されないことから、環境に優しい低公害車として位置づけられています。

もう一つ低公害車の代表として、ハイブリッド車があります。ハイブリッド車は、2 つ以上の動力源を持つ自動車のことを言いますが、一般的にはエンジンとモーター (電動機) を組み合わせたタイプの車両を指します。ハイブリッド車は燃料だけでなく電気も組み合わせて走るため、電気を使って走行する間は、大気汚染物質を一切排出しません。

4.2 固定発生源対策

固定発生源については、ボイラーなどのばい煙発生施設、セメント製造工場などの粉じん発生施設から発生する大気汚染物質を除去するため、集じん装置、排煙脱硫装置、重油脱硫装置、排煙脱硝装置などの技術が活用されています。以下、固定発生源の代表例として工場ボイラー、セメント製造工場、火力発電所を例に、大気汚染対策を見ていきます。

4.2.1 工場ボイラー

工場で稼動するボイラーから発生する大気汚染物質は、基本的に NO_x、SO₂、煤塵、CO、炭化水素類ですが、使用される燃料によります。例えば石炭焚きボイラー等は一般的にばいじん (すす) を多く発生しますが、ガス焚きボイラーではほとんど発生しません。これらによる大気汚染への対策技術としては、燃料転換、燃焼方法改善、空気比管理、集塵機設置などが挙げられます。

表 4-8 工場ボイラーの大気汚染対策

発生する物質	発生原因	対策メニュー
--------	------	--------

NO _x	燃料中の窒素分の酸化	・低窒素燃料への転換
	高温環境での燃焼	・燃焼方法改善 ・エマルジョン燃料の利用
SO ₂	燃料中の硫黄分の酸化	・低硫黄燃料への転換
PM（煤塵）	燃料の不完全燃焼	・空気比の管理 ・集じん機の設置
CO・HC	燃料の不完全燃焼	・空気比管理

(1) NO_x 低減策

ボイラーに使用される燃料に窒素分が多く含まれている場合、NO_x の発生量が増加します（Fuel NO_x）。また燃焼環境が高温であればあるほど、大気中の窒素分と酸素分が反応し NO_x を生成します（Thermal NO_x）。Fuel NO_x の生成を抑制するには低窒素燃料への転換が、Thermal NO_x の生成を抑えるには燃焼方法改善やエマルジョン燃料が、それぞれ有効です。なお NO_x 排出量が著しく高い場合には排煙脱硝設備を設置することもあります。一般的に工場で稼動する程度の小規模ボイラー（発熱量 20t/h 以下）では、燃料転換や燃料方法改善のみに留めることがほとんどです。

○低窒素燃料への転換

より窒素分の少ない燃料への転換は有効な NO_x 低減対策です。石炭炊きボイラーを使用する場合は、より窒素分の少ない石炭に転換すると Fuel NO_x の排出量を抑制できます。窒素含有量は、石炭が採掘された場所、つまり堆積環境によって変わります。石炭化度（褐炭・亜瀝青炭・瀝青炭・無煙炭）とはあまり関連がないことには注意が必要です。油炊きボイラーの場合は、例えば重油から灯油に燃料転換すると NO_x 排出量を低減できます。

一般に、硫黄分の少ない燃料は窒素分も少ない傾向があるため、低硫黄化対策として燃料転換した場合は Fuel NO_x の低減にも寄与するケースが多いです。

表 4-9 燃料中の窒素^{※1}含有量

燃料	種類	窒素含有量
固体燃料 ^{※2}	石炭	0.7～2.2
	コークス	0.6～1.4
液体燃料 ^{※2}	原油	0.03～0.34
	灯油	0.0005～0.01
	重油 ^{※3}	0.08～0.35
気体燃料 ^{※2}	液化天然ガス	極微量
	液化石油ガス	極微量
	石炭ガス（粗）	1～9
	石炭ガス（精）	0.02～0.5
	高炉ガス	極微量

※1 窒素化合物中の窒素分も含む

※2 固体燃料と液体燃料は質量パーセント、気体燃料は $\text{g/m}^3\text{N}$ (0°C 、 101.32kPa) で表示

※3 主に小型ボイラーに使用される「B 重油」(JIS 規格) の値

出典：新・公害防止の技術と法規 2016 大気編（産業環境管理教会）

○燃焼方法の改善

ボイラー内の酸素濃度や火炎温度が高く、またガス滞留時間が長いと、 NO_x 発生量が増加します。つまり燃料方法の改善とは、酸素濃度や火炎温度を下げる、またはガス滞留時間を短縮するといった燃料プロセスの改善作業のことを指します。

燃料の種類により、具体的な改善方法は変わります。ミャンマーで主に使用されている火格子燃焼方式⁷の場合、固形燃料の品質と燃焼環境（負荷率、空気比、空気配分、火層厚、空気温度など）によって Thermal NO_x の生成量が決まってきます。燃焼方法の改善はボイラーの設計や型式によって手法が異なるため、導入時にボイラーメーカーの指導を受けるか、もしくは燃料管理に関して十分な技術的知識を身につけた上で取り組む必要があります。

○エマルジョン燃料の利用

油炊きボイラーであれば、燃料油に水と界面活性剤を加えて攪拌した「エマルジョン燃料」を活用する方法もあります。エマルジョン燃料は、燃料油が水滴を含んだ構造をしており、燃焼の際に、この水滴の影響で燃焼室内の温度が比較的低下するため、燃焼温度を下げることができ、結果として NO_x を抑制することができます。高い NO_x 削減効果を持ちますが、一方で熱効率の低下は避けられないため注意が必要です。

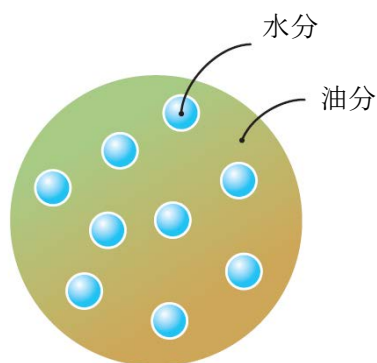


図 4-1 エマルジョン燃料の構造

(2) SO_x 低減策

ボイラーに使用される燃料に硫黄分が含まれている場合、 SO_x が排出します。 SO_x の排出を抑制するにはより硫黄分の少ない燃料への転換が有効です。石炭ボイラーの場合は、より硫黄分の少ない石炭に燃料転換します。油炊きボイラーの場合は、例えば重油から灯油に燃

⁷ 固形燃料を火格子（燃料を燃焼するための格子）の上に置き、火格子の下から空気を送り込んで燃料を燃やす方式のこと。ミャンマーでは、薪や籾殻を使った火格子燃料式のバイオマスボイラーが利用されている。

料転換すると NOx 排出量が削減できます。

表 4-10 燃料中の硫黄含有量

燃料	種類	硫黄含有量
固体燃料 ※1	石炭	0.3～2.6
	コークス	0.2～1.0
液体燃料 ※1	原油	0.1～3.0
	灯油	0.001～0.2
	重油 ※2	0.2～0.3
気体燃料 ※1	液化天然ガス	極微量
	液化石油ガス	極微量
	石炭ガス（粗）	1.5～7
	石炭ガス（精）	0.05～0.7
	高炉ガス	極微量

※1 固体燃料と液体燃料は質量パーセント、気体燃料は g/m³N（0℃、101.32kPa）で表示

※2 主に小型ボイラーに使用される「B 重油」（JIS 規格）の値

出典：新・公害防止の技術と法規 2016 大気編（産業環境管理教会）

(3) PM（煤塵）対策

○空気比の管理

ボイラーからの煤塵発生を抑えるには、燃焼室に十分量の空気を送り込んで完全燃焼を促す必要があります。ただし空気を過剰に送ると、ボイラー全体の熱効率が低下してしまいます。過剰空気はできるだけ少なくして完全燃焼させることが熱経済上重要です。空気比管理とは、この過剰空気量の適切な制御のことを指します。

空気比は、燃料の成分組成から算出される理論的に必要な空気量（理論空気量）に対して、実際にボイラーに供給される空気量（所要空気量）の比で表されます。

$$M = A / A_o$$

m : 空気比

A : 所要空気量

Ao : 理論空気量

空気比は、燃料の種類や燃焼方法によって異なります。例えば、ガス燃料は空気と混合しやすいため過剰空気は比較的少なくても問題ありません。反対に、塊上の石炭を燃焼する場合は過剰空気を大量に必要とします。参考として、日本の「エネルギーの使用の合理化に関する法律」に示されているボイラーの基準空気比を以下に掲載します。空気比が大きくなると排ガス量が比例して増大するため、ボイラー管理者は、この基準空気比を超えないように

運転することを義務付けられています。

表 4-11 ボイラーに関する基準空気比

区分	負荷率 (%)	基準空気比				
		固体燃料		液体燃料	気体燃料	高炉ガス その他の副生ガス
		固定床	流動床			
電気事業用	75~100	—	—	1.05~1.2	1.05~1.1	1.2
その他	50~100	1.3~1.45	1.2~1.45	1.1~1.3	1.1~1.3	1.2~1.3

出典：エネルギーに使用の合理化に関する法律「工場におけるエネルギーの使用の合理化に関する事業者の判断の基準」を一部改変

○集じん機の設定

煤塵の末端処理方法として集じん機があります。

集じんとは、粒子状物質を分離・除去する操作、すなわち粒子に気流と異なる運動（相対運動）をさせ、分離する操作です。集じん機は、発生する粒子状物質や排ガスの性状を踏まえて、最適な機器を選定する必要があります。参考に、一般的な集じん装置の実用範囲を以下に示します。

表 4-12 各集じん装置の実用範囲

分類名	取り扱われる粒度 (μm)	集じん率 (%)	設備費	運転費
重力集じん装置	1,000~50	40~60	小	小
慣性力集じん装置	100~10	50~70	小	小
遠心力集じん装置	100~3	85~95	中	中
洗浄集じん装置	100~0.1	80~95	中	大
隔壁形集じん装置	20~0.1	90~99.9	中 以上	中 以上
電気集じん装置	20~0.05	90~99.9	大	小~中

出典：新・公害防止の技術と法規 2016 大気編（産業環境管理教会）

(4) CO・HC 低減策

CO や HC は、ボイラーの燃焼室内の不完全燃焼が原因で生成されます。これらの物質についても、PM と同様、空気比を適切に管理することで排出量を低減することができます。

4.2.2 セメント製造工場

セメントの製造は、石灰石、粘土、けい石、鉄原料などの素材から粉碎状の原料を製造する「原料工程」、粉末原料をロータリーキルンで焼き固める「焼成工程」、焼成したものを最終製品のセメントにする「仕上げ工程」の3つのプロセスからなります。

セメント製造工場では、燃料排ガスを排出する主煙突や、クリンカ焼成後の冷却空気を排出するための煙突からは煤塵が発生します。またセメントキルンからは **NOx** も排出します。**NOx** は主煙突からしか発生しませんが、ガス状物質のため拡散しやすく、工場近辺だけでなく広範囲へ影響を及ぼす可能性があります。

以下で煤塵、**NOx** を削減するための対策について紹介します。

表 4-13 セメント工場の大気汚染対策

生ずる物質	発生原因	対策メニュー
PM（粉塵・煤塵）	・煙突からの煤塵排出	・電気集じん機の導入 ・集塵フィルターの導入
NOx	・煙突からの NOx 排出	・仮燃炉の設置 ・低 NOx バーナーの導入 ・燃焼排ガス量の低減 ・還元による NOx 削減

(1) 煤塵対策

煤塵は、工場の煙突から発生します。気候条件や地形条件にもよりますが、工場内の煙突類から発生する煤煙は、工場内だけでなく工場近隣の地区にも拡散し被害を及ぼす恐れがあります。

排気部分から煤塵が排出しないよう、通常は大規模な電気集じん機が設置されています。排ガス中のダストをこの集じん機で捕集し、ダスト回収後の排ガスが大気に放出されます。煙突の排ガスは大容量のものが多いため、基本的には電気集じん機を使用してダストが回収されます。ただし、セメント原料に廃棄物が多く使われていると、セメント原料ダストの電気抵抗が上がり電機集じん機の故障を招く場合があります。そのため、セメントキルンの排ガス集じん機についても、電気集じん機ではなくバグフィルターを採用する工場が増えています。

(2) **NOx** 低減対策

セメント製造工場では、高温で焼成するセメントキルンから **NOx** が発生します。この **NOx** を低減するには大きく分けて燃焼管理、脱硝の 2 通りに区分され、具体的には以下の対策がとられています。

表 4-14 セメント工場の **NOx** 低減対策

技術対策		内容
燃焼	仮燃炉の設置	キルンでの焼成の前に仮燃炉（プレヒータ）等を使い分散

管理	(二段燃焼)	燃焼させ、キルンでの燃焼分を低減させることで、NO _x 生成を極力抑える
	低 NO _x バーナーの導入	低空気比燃焼や高拡散によりクリンカ（セメントの中間品）の品質を維持しながら、NO _x 発生量を抑制する
	燃焼排ガス量の低減	クリンカクーラの熱回収効率増加等の省エネルギーにより、セメントを焼成する化石燃料を低減する。CO ₂ のみならず、NO _x 排出量も低減できる。
脱硝	還元による NO _x 削減	無触媒脱硝や触媒脱硝などにより NO _x を還元して NO _x 排出量を低減する。セメント産業では主に無触媒脱硝が利用されている。

4.2.3 火力発電所

火力発電所においても、排煙処理に対し様々な対策が講じられています。火力発電所から発生しうる大気汚染物質には SO_x, NO_x, 煤塵などがありますが、それぞれ以下の方法で低減・削減が図られています。

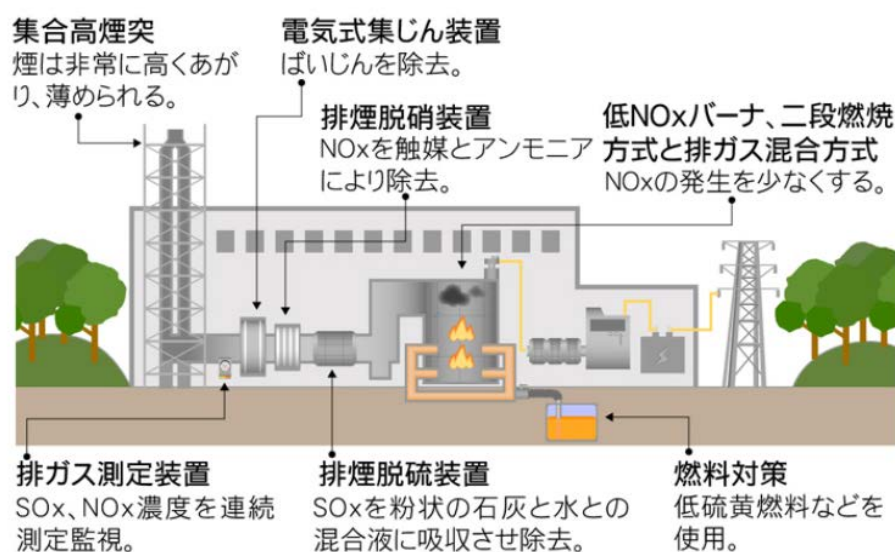


図 4-2 火力発電所での大気汚染対策

<http://rikanet2.jst.go.jp/contents/cp0130a/contents/22-w11/w11-02.html>

表 4-15 火力発電所の大気汚染対策

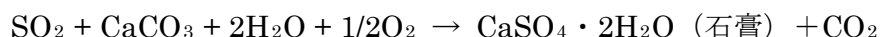
発生する物質	発生原因	対策メニュー
SO _x	・ 高硫黄燃料の利用	・ 低硫黄燃料の利用 ・ 排煙脱硫装置
NO _x	・ 燃料中の窒素分の酸化 ・ 高温環境での燃焼	・ 排煙脱硝装置 ・ 二段燃焼方式

		・低 NO _x バーナー
PM（煤塵）	・燃料の不完全燃焼	・電気集じん機
CO ₂	・燃料の燃焼	・石炭ガス化複合発電（IGCC） ・二酸化炭素回収・貯留（CCS）

(1) SO_x 低減対策

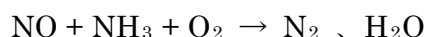
SO_x 低減対策として、燃料対策（低硫黄燃料の利用）と排煙脱硫装置があります。SO_x は、燃料中の硫黄分が酸化され、SO₂として大気中に放出されます。そのため、燃料中の硫黄分を低くすれば、酸化される硫黄分の量も減るため、SO_x の排出量を抑えることができます。

SO_x の後処理対策としては、排煙脱硫装置があります。排ガス中の硫黄酸化物除去が目的です。石灰石（CaCO₃）、消石灰（Ca(OH)₂）に SO₂を吸収させ、石膏（CaSO₄・2H₂O）として固定する「石灰石・消石灰吸収法」が代表的な手法です。



(2) NO_x 低減対策

NO_x 低減対策として、排煙脱硝装置を設置します。排ガス中の窒素酸化物除去が目的です。NH₃（アンモニア）等を還元剤にして、固定触媒の作用により窒素酸化物を分解する「接触還元法」を使います。



また、燃料方法を改善することで NO_x 生成を抑える方法もあります。低 NO_x バーナー、二段燃焼などが主に採用されています。

低 NO_x バーナーは、酸素濃度の低減、火炎温度の低下、高温域でのガス滞留時間短縮などの NO_x 低減方法のうちの 1 つ、あるいはそれらを組合せてバーナーに取り入れることによって、NO_x 低減を図る技術です。

二段燃焼は、燃焼用空気を二段に分けて供給する技術です。第 1 段階では理論空気量の 80～90%程度に供給する空気量を制限し、第 2 段階で不足する空気を補って供給します。これにより、火炎温度と酸素濃度が低下するため、NO_x 生成を抑制することができます。

(3) 煤塵削減対策

ばいじん対策には、電気集じん機を使用します。排ガス中のすすや固体粒子除去が目的です。直流高電圧によってガス中の粒子を帯電させ、電界中（電極間）を通過させることで、帯電した粒子を電極で捕捉します。

(4)CO₂削減対策

石炭火力は、発電量当たりの CO₂排出量が最も多い発電型式です。CO₂排出量を削減するには燃料消費量を減らす必要があり、つまり発電効率を上げなければいけません。

日本では、CO₂削減に目指した二つの技術開発が練られています。一つは、石炭をガス化しコンバインドサイクル発電と組み合わせることで高効率化を狙った石炭ガス化複合発電（IGCC）。日本では、世界に先駆けて本格的な大規模発電設備の建築が進められることになりました。もう一つは排ガス車の CO₂を吸収分離回収し、地中に埋める二酸化炭素回収・貯留（CCS）と呼ばれる技術である。CCS は、商用化はしていないが、今後の CO₂削減の鍵を握る技術と考えられています。

第5章 日本の大気汚染対策の歴史

日本では、1960～1970年頃、急激な産業発展と引き換えに、深刻な公害問題を経験しました。経済成長を優先させ、大気汚染対策が後回しされた結果、人々への健康被害が発生しましたが、その後住民運動などの後押しを受けて、国や自治体による法整備、対策技術の研究・開発・推進などが進められた結果、公害を克服した歴史があります。この章では、日本が経験した公害問題と、それを克服してきた歴史について紹介します。



5.1 産業型公害の発生（1940年代中頃～1970年代前半）

第二次世界大戦の終戦以降、日本では石炭を主要エネルギーとした工業発展が進みましたが、これに伴い石炭ボイラーの黒煙や火力発電所の煤塵、工場起源の硫黄酸化物が大気中に拡散して付近住民を苦しめました。全国の主な工業都市の住民に、大気汚染の影響によると考えられる呼吸器障害が発生しました。

重化学工業化が進むにつれエネルギー源の主役が石油に替わると、大気汚染の原因物質は硫黄酸化物が中心となり、その汚染範囲が広域化していきました。とくに主要な固定発生源である石油化学工業が臨海地域に集中したため、この付近には局所的に深刻な大気汚染をもたらしました。その他の工業地域でも、製鉄所・発電所・石油精製工業などが集中したことにより大気汚染はそれまで以上に一層悪化しました。

その後、1965年頃から高度成長期を迎えると、公害はより激化していきました。それまで工業地域付近だけに見られた健康被害が都市部でも報告されるようになりました。1970年には光化学スモッグ被害も発生、東京都内5000人以上が目の痛みだけでなく、呼吸困難も訴えました。

このような全国各地における公害問題の発生に対し、政府においても、1967年には公害対策基本法を制定するとともに、1970年に開かれた「公害国会」においては、規制対象となる地域・施設・物質の拡大、地域の実情に応じた上乘せ規制、直罰制度の導入など14の法律が制定又は改正され、今日の環境行政の基礎が築かれることとなりました。

5.2 都市・生活型公害の発生（1970年代中頃～1980年代）

経済が高度成長から安定成長へと移行すると、エネルギー構成は、石油が減少し石炭は横ばいに推移し、大気汚染物質の排出が少ない天然ガスと原子力がシェアを伸ばしました。大

気汚染対策も、硫黄酸化物対策（重油脱硫及び排煙脱硫）に一定の効果が表れていましたが、その一方で、自動車排気ガスによる大気汚染や生活排水等による水質汚濁など、日常生活や通常の事業活動に伴う都市生活型公害が問題となりました。大都市圏に人口が集中したこと、所得向上によって自動車が普及したこと等が原因でした。

1945 年中頃～1972 年の産業型公害時代に問題であった硫黄酸化物への対策としては、濃度規制に始まり、次いで個別排出源の排出量を抑える K 値規制⁸に移行し、随時強化されたことにより汚染状況は改善傾向にありました。しかし、工場密集地域は依然として深刻な状況が続いていました。これを受けて政府は、工場、事業場ごとに硫黄酸化物の排出総量を規制する総量規制を 1974 年に導入しました。また、窒素酸化物についても、同様に総量規制を 1981 年に導入しました。

5.3 近年の大気汚染（1990 年代以降）

1990 年以降は、それまで整備してきた法制度や汚染対策の効果が確実に発現していきました。過去に経験した産業型公害の発生が再び繰り返されることはありませんでしたが、日常生活や通常の事業活動に伴う都市生活型公害は依然として広がりを見せていました。この頃、低濃度でも継続的に摂取すると健康を損なう恐れのある「有害大気汚染物質」の危険性が問題となったため、1996 年に大気汚染防止法を改定し、各事業者は「有害大気汚染物質」の可能性がある全 248 物質に対し排出抑制の自主的取り組みを図ることになりました。ダイオキシン、VOC、PM2.5 など新しい大気汚染物質も報告されたため、その度に排出抑制を行うべく、大気汚染防止法が改定されています。

またこの時期は、大量生産・大量消費・大量廃棄型の社会経済システムが、わが国のみならず地球規模で拡大をみせたことにより、廃棄物・リサイクル問題や地球環境問題等の新たな環境問題を生じさせることとなりました。

⁸ 硫黄酸化物の規制方式。煙突の高さに応じ、ばい煙発生施設ごとに排出量が定められる。

第6章 ミャンマーの大気汚染状況

前章では、日本が過去に経験した深刻な大気汚染問題について紹介しました。

しかしミャンマーでは、いま現在、これほどの問題が生じているとは言えません。ただ、大気汚染源となる移動発生源や固定発生源は今後増加・深刻化する恐れがあります。たとえば、2011年の自動車輸入緩和以降、移動排出源となる自動車の台数は増加を続けています。主要産業（縫製業・食品加工産業）への外資参入も続いており、今後も工業地帯の新設が計画されています。また重工業においては、セメント産業が重点展開分野に指定されており、国内のセメント需要増に伴って今後工場も増加すると予想されています。これらの事情を踏まえると、ミャンマーにおいても将来的に大気汚染問題が深刻化する可能性は否定できません。

この章では、ミャンマーにおける移動発生源および固定発生源の状況を概観すると共に、将来考えられる大気汚染問題について考察し、またそれを防ぐために必要なアクション・対策についても言及しました。最後には、今後の大気汚染の監視活動についても提言をしました。

6.1 移動発生源の状況

6.1.1 ミャンマーの現状

(1) 車両台数の増加

2011年から段階的に自動車輸入緩和政策が実施されて以降、自動車の数は急増しています。2012年7月には、ミャンマーの銀行で外貨口座を開設している市民に対して2007年以降に生産された自動車の輸入が認められました。そのため、比較的新しい乗用車も散見されます。ただし、依然として低年式車（とくに2007年以前生産の車）は街中で多く見かけられます。

乗用車に関しては、ほとんどがガソリン車です。バス等の大型車に関しては、以前はほとんどディーゼル車でしたが、近年は天然ガス車への移行が進んでいます。

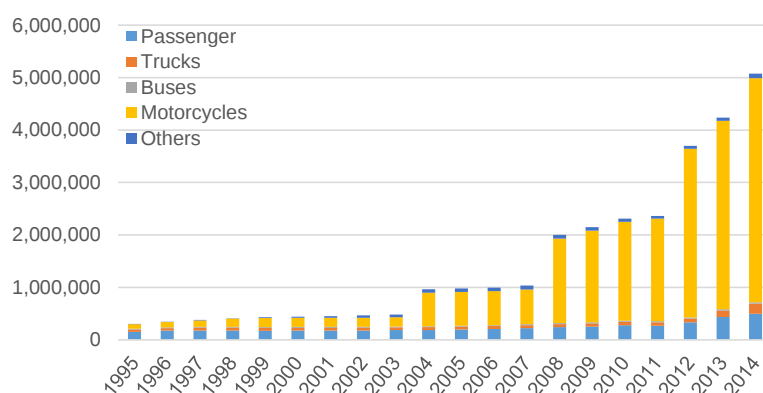


図 6-1 自動車保有台数の推移

出典：Central Statistical Organization Myanmar より作成

(2)燃料品質

ミャンマーでは、エネルギー省が燃料品質の向上を強く推進しています。2015年には有鉛ガソリンの使用禁止も世界に向け発信しました。ガソリンやディーゼル燃料の低硫黄化も進めています。エネルギー省は、市場に出回る燃料の品質確保にも努めており、国内各地のガソリンスタンドで使用される車両燃料を抜き打ちでチェックするなどの対策を講じています。

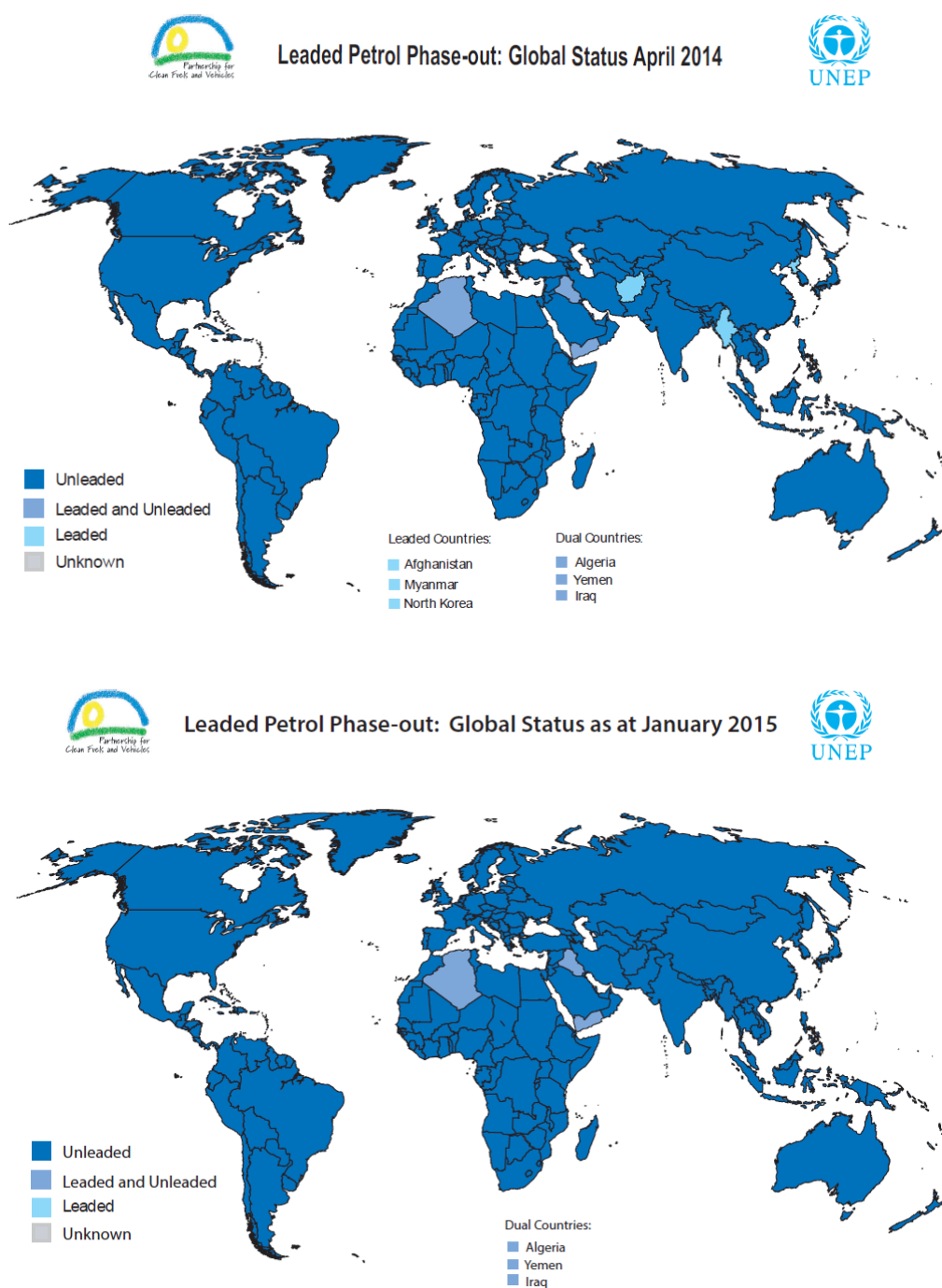


図 6-2 有鉛ガソリン廃止を宣言した国（上：2014年 下：2015年）
出典：UNEP ウェブサイト <http://www.unep.org/>

6.1.2 今後予想される大気汚染

ミャンマーで現在進むモータリゼーションは、近年の自動車輸入緩和政策により海外中古車両の輸入が劇的に推し進められた結果です。海外から輸入された比較的新しい車両もありますが、一方で低年式車も根強く残っています。比較的年式の新しい輸入車と、相当年式の古い車両が混在している特殊な状況において、ミャンマーの自動車排ガス対策は多種多様化するかもしれません。まずは、どのような年式・型式の車からどの程度有害物質が排出されているかといった実態把握が先決です。

燃料品質の問題も残っています。エネルギー省の取組により、燃料品質は確実に改善の方向に向かっています。しかし、加鉛ガソリンや高硫黄ガソリンが市場に流通していた時期に走行していた車両は、既に排ガス処理装置が触媒被毒している可能性があります。これらの車両は、CO、HC を高い濃度で排出するハイエミッター車になっている可能性があります。ハイエミッター車は、たとえ少台数であっても、大気汚染物質の一台あたりの排出量が極めて大きいため、大気環境に与える影響が少なくありません。今後、大気環境基準を定め、乗用車の排ガス対策を進めたとしても、仮にハイエミッター車が一部残ってしまうと、大気環境基準の達成が進まない可能性があります。

6.1.3 汚染防止に必要なアクション

大気汚染物質の計測器を道路付近に設置して、自動車排ガスの排出状況を監視することから始めることが望ましいです。また、車検の排ガス検査結果を整理・活用することにより車両単体からの排ガス排出状況を把握することができます。さらにリモートセンシング技術を活用すれば、実走行車両の排ガス排出状況も推定することができます。

また、ハイエミッター車も含めた使用過程車の排出実態の正確な把握が望まれます。具体的には、車検場における使用過程車の CO・HC 排出量検査結果を一度整理して、ハイエミッター車が全体の何割走っているか、何年以前生産の車両が当てはまるかなどを把握することが必要です。

6.2 固定発生源の状況

6.2.1 ミャンマーの現状

(1) 工業団地の開発

民間工業部門の発展を後押しするため、Yangon 管区やその他地域に工業団地が設けられました。最も古い工業団地は 1990 年に開発された Shwe Pyi Tar 工業団地（Yangon 管区）です。Yangon 管区ではそれ以降も開発が進み、現在は計 24 ヲ所の工業団地が設けられています。その他の地域においても、Mandalay, Sagaing を中心に、各地に工業団地が点在しています。

表 6-1 Yangon 管区の工業団地

地区	工業団地名
East area	Dagon, East Dagon, North Okkalapa, South Dagon 1, South Dagon 2, South Dagon 3, South Okkalapa, North Dagon, Thaketa, Shwepaukkan
North area	Shwelinban, Hlaing Thar Yar 1&2&3&4&6&7, Shwe Than Lwin, Anawrahta, Hlaing Thar Yar -5, Mingalardon Pyinmabin, Shwe Pyi Thar 1, Shwe Pyi Thar 2&3&4, Thadukan, Wataya, Yangon Industrial Zone
South area	Than Lyin / Kyauk Tan, Thilawa

(2) 軽工業におけるバイオマスボイラー利用

各工業団地には、縫製・食品業などを中心とした軽工業が多く集積しています。縫製工場では、衣類の仕上げにスチームアイロンが使用されており、必要な蒸気をボイラーで生成し、作業場に送られています。食品加工業では、食品の加熱・乾燥・殺菌消毒に蒸気を使用され、酒造業では醸造酒の蒸留行程に必要な蒸気をボイラーから得ています。

ミャンマー政府関係者や民間企業へのヒアリング結果によると、ミャンマー国内では以下の軽工業がボイラー用燃料として薪・粃殻などを使用しています。

表 6-2 燃料を利用する軽工業産業

1	Meat and meat product	16	Bleaching and dyeing of textiles
2	Canned meat	17	Dyeing and printing
3	Fish products	18	Print
4	Soya milk	19	Manufacture of other textiles
5	Rice noddle	20	manufacturing of other products of wood
6	Dry noddle	21	Bamboo
7	Thin wheat noddle	22	Soap
8	Wheat noddle	23	Soap, detergent and shampoo
9	Gelatime	24	Masquito repellent
10	Jelly/sweets	25	Paper
11	Sauces/vinegar	26	Paints
12	Oil	27	Leather
13	Cigarettes	28	Rubber
14	Distilling rectifying and blending of spirits	29	Fishing net
15	Soft drink/aerated water		

(3) セメント産業の発展

重工業産業の中で代表的なものとしては鉄鋼業、船舶、機械製造業などがありますが、ミャンマーにおいて、最も発展している重工業としてセメント産業が挙げられます。

ミャンマーのセメント消費は経済発展に伴い増加を続けています。セメント産業は、2010年に国内全土での製造能力が 300 万トン/年を越えて以降、堅調に増加しています。現在は、国営工業 9 棟、民間工業 8 棟の計 17 棟のセメント工業が稼動しており、最大生産量は年間 400 万トンに達しています。ただし、国内工場の供給力はその需要に追いついておらず、依然、国内需要の 5 割以上を輸入に頼っている状態です。

ミャンマー政府は、基礎建設資材であるセメント産業を重要産業に位置づけ、大規模な工場を国営で操業するなど常に支援を続けています。今後も、需要増に従い国営・民間問わず

ミャンマー各地でセメント産業が発達すると思われますが、大気汚染の観点から、セメント工場からの排出ガスをいかに抑制するかが重要となってきます。

6.2.2 今後予想される大気汚染

ミャンマーの現在の基幹産業である軽工業分野は今後も一層発展を続けると見込まれています。これに伴い、縫製業や食品業など蒸気を必要とする工場では、薪や穀殻を燃料としたバイオマスボイラーの導入がますます進むことでしょう。木質バイオマスボイラーは、燃焼室内の空気が不足していたり、燃料と空気が十分に混ざり合わない場合に不完全燃焼を起こし、一酸化炭素が生成したり煤（すす）が発生します。バイオマスボイラーを稼動する工場が集積した場合には、工業団地内の軽工業工場が排ガス汚染源となり、周辺の労働環境を悪化させる恐れがあります。

セメント産業においても、ミャンマー国内のセメント需要は伸び続けています。タイやベトナムの状況及び日本の例などから、2009年に40kg/人、2012年に64kg/人であったセメント消費量は、今後のインフラ整備と経済発展に伴い将来的に400kg/人までの増加が見込めると、専門家は判断しています。現在、地方部に工場が点在しており居住区の近くにセメント工場が立つ例はありません。しかし、将来的な工場増、臨海部など居住区付近での工場集積の可能性を踏まえると、セメント産業の大気汚染状況を監視し、予防的に対策に取り組むこともまた重要です。セメント工場からは、燃料排ガスを排出する主煙突から粉塵やNO_xが発生します。クリンカ焼成後の煙突からも煤塵が発生します。工場内にてセメント原料を貯蔵、破碎・粉砕、輸送する各所において粉塵の風による巻上げが懸念されます。

6.2.3 汚染防止に必要なアクション

バイオマスボイラーの煤、CO、HCは、空気比を管理することでその発生量を抑えることができます。燃焼室に投入する木質燃料の量と送り込む空気量を調整することで、燃料の不完全燃焼分を減り、これらの有害物質の発生を低減することができます。また空気比を調整することで燃料の投入量も減らすことができるため、より経済的な運転が可能です。

セメント工場で実施できる最も容易で原始的な大気汚染対策は、粉塵堆積地への定期散水です。工場煙突からの粉塵、煤塵排出には集塵フィルターが活用できます。キルンでのThermal NO_xの生成量が多い場合は、低NO_xバーナーの利用や仮焼炉の設置などが対策に挙げられます。

軽工業、重工業いずれにしても、煙道排ガスをはじめ大気汚染発生源と汚染物質の発生量を正しく監視、把握した上で、最適な汚染対策を選定して講じることが重要です。

6.3 大気汚染の監視状況

ミャンマーの大気汚染監視は、保健省が2009年に、Hlaing Tharyar工業団地、Ahloneタウンシップの地方事務所、Bahanタウンシップの居住区の3ヵ所で汚染物質の測定を始め

たのが最初です。環境保全森林省は、2015年には環境 NGO のサポートのもと、モバイル式の環境大気計測器を使用してマンダレーの大気汚染監視を行いました。2016年には、ヤンゴン、バゴー、パテインの3地域で大気汚染監視を行う計画があります。またヤンゴン都市開発委員会も、モバイル式の環境大気計測器を自ら購入して、市内70箇所での大気汚染濃度を測定しています（2016年2月現在）。

今後は、中央省庁、地方政府、NGO、民間企業らが協力・連携して、効率的かつ効果的に大気汚染監視体制を構築していくことが望まれます。

例えば、各機関が使用する測定器の測定結果を相互にダブルチェックすることで測定精度を高める方法が考えられます。各機関が所有する測定機器を持ち寄り、複数台で同一地点を同時に計測することで、計測機器の測定誤差を確認することができ、校正・メンテナンスの実施に結びつけることができます。

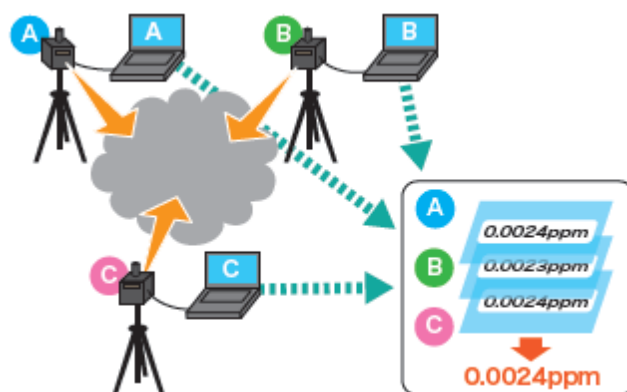


図 6-3 複数台計測による器差確認のイメージ図

もう一つの方法としては、より高精度の環境大気計測器を「基準機」として少数台導入し、各機関が所有するモバイル計測器の精度チェックに使用する方法も考えられます。基準機と同じ場所を同じ時間に測ることで、モバイル計測器の精度を確認することができます。

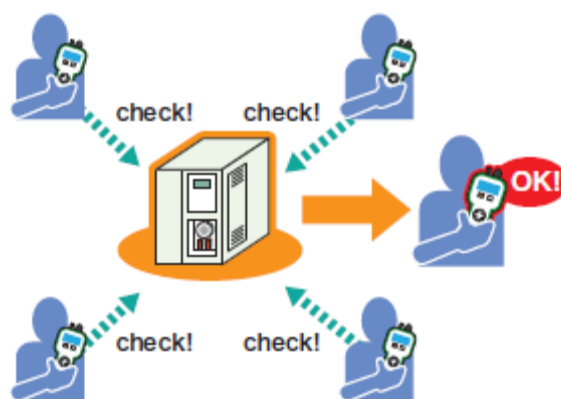


図 6-4 基準機を使用した器差確認のイメージ図

付録 大気汚染対策チェックリスト

発生源	発生する物質	発生原因	対策メニュー
ガソリン車	NOx CO HC	・三元触媒の未装着 ・三元触媒の経年劣化	三元触媒の導入
		・それ以外	エンジンの点火時期調整 車両の定期的な維持管理 排出ガス再循環装置の導入
	SOx	・高硫黄ガソリンによる触媒被毒	低硫黄ガソリンの利用
	Pb	・有鉛ガソリンによる触媒被毒	無鉛ガソリンの利用
ディーゼル車	NOx	・NOx 還元触媒の未装備 ・NOx 還元触媒の経年劣化	NOx 還元触媒の導入
			エンジンの燃料噴射時期の調整
			コモンレール式高圧燃料噴射
			排出ガス再循環装置の導入
	PM	・PM 捕集フィルターの未装備 ・PM 捕集フィルターの経年劣化	PM 捕集フィルターの導入
工場ボイラー	CO HC	・酸化触媒の未装備 ・酸化触媒の経年劣化	酸化触媒の導入
	SOx	・高硫黄軽油による触媒被毒	低硫黄軽油の利用
	NOx	・燃料中の窒素分の酸化	低窒素燃料への転換
		・高温環境での燃焼	燃焼方法改善 エマルジョン燃料
	SO ₂	・燃料中の硫黄分の酸化	低硫黄燃料への転換
	PM	・燃料の不完全燃焼	空気比の管理 集じん機の設置
セメント工場	CO HC	・燃料の不完全燃焼	空気比管理
	PM	・煙突からの煤塵飛散	電気集じん機の導入 集塵フィルターの導入
	NOx	・煙突からの NOx 排出	仮燃炉の設置 低 NOx バーナーの導入 燃焼排ガス量の低減 還元による NOx 削減
火力発電所	SOx	・高硫黄燃料の利用	低硫黄燃料の利用 排煙脱硫装置
	NOx	・燃料中の窒素分の酸化 ・高温環境での燃焼	排煙脱硝装置 二段燃焼方式 低 NOx バーナー
	PM	・燃料の不完全燃焼	電気集じん機
	CO ₂	・燃料の燃焼	石炭ガス化複合発電 (IGCC) 二酸化炭素回収・貯留 (CCS)