

環境保全のための計測技術

1. はじめに

最近の一般社会や産業界における環境保全への取り組み方の変化は、従来の環境防止対応のみならず環境配慮型産業分野や地球環境分野において、その意義の高まりを示している。特に、企業の環境意識は、公害問題から環境保全へと変化し、法規制対応から自主管理へと変化している。内容も細分化され、法律の整備（公害防止法、リサイクル法、循環型社会形成推進基本法、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（PRTR法：Pollutant Release and Transfer Register））に伴い、環境モニタリング、微量分析技術、環境影響評価（EIA：Environmental Impact Assessment）、環境アカウンタビリティー、製品のライフサイクルアセスメント、グリーン調達、廃棄物利用、環境自己評価プログラム、温暖化物質、環境負荷、ISO14000等と際限なく広がりを見せている。

このように複雑化、専門化している環境課題に

対して、環境計測、環境分析は基盤となる技術として重要な役割を担っている。環境計測、環境分析に係わる技術は、水質分析・土壌分析等の化学分析、ばい煙計測・大気計測、騒音振動計測、作業環境測定、PCB、アスベスト測定等幅広い分野に亘っており、環境の専門家集団としての環境管理に関連する技術メニューを紹介する。

2. 環境測定

2.1 水質分析

我が国の水質汚濁による公害は明治のはじめ、足尾銅山の鉱毒水に始まる。その後、様々な公害の発生により、1959年に「公共用水域に排出される水の保全に関する法律（水質保全法）」および「工場排水等の規制に関する法律（工場排水規制法）」が制定された。現在では水質汚濁防止法に発展し、環境への排水を規制している。排水の規制項目は幅広いが、おおまかには「健康項目」と「生活環境項目」の2つに大きく分類することができる。

表1 排水規制項目

区分		健康項目	生活環境項目	未規制項目
総合水質指標			pH, DO BOD, COD, SS ヘキサソ抽出物質	TOC, TODなど
元 素	金属	カドミウム 鉛 水銀 セレン	銅, 亜鉛, クロム, 鉄, マンガン	ニッケル, スズ, アンチモン, モリブデンなど
	両性物質と素			
	非金属	フッ素 ホウ素		塩素, 臭素, 硫黄など
化 合 物	無機化合物	シアン, クロム(VI), アンモニア, 硝酸, 亜硝酸	全窒素 全リン	硫化水素, 亜硫酸など
	有機化合物	有機塩素化合物, 農薬, ベンゼン, 有機水銀	フェノール類	塩素系有機化合物, 有機スズ化合物, アミン類, トルエン, キシレン, 中性洗剤, 一部の農薬など
その他			大腸菌類	色度, 温度など

「健康項目」とは、人の健康に被害を生じるおそれのある重金属（カドミウム、水銀等）や有機塩素系化合物（PCB トリクロロエチレン等）などの規制項目であり、「生活環境項目」とは、川や海などの水の「汚れ」について、物理的（pH、SS 等）あるいは生物の生育環境（BOD、DO 等）の面からみた規制項目である。

(1) 水の分析方法

水の分析には、一般に次のような要素を持つ分析方法が要求される。

ア. 適用範囲が広いこと

目的成分量を分析する場合、定量可能な濃度の幅はできる限り広い事が望ましい。

イ. 感度がよいこと

水の分析では、対象となる成分が相当に希薄な場合がある。また、要求される定量下限値が低いことが多いため、感度の良い分析法を必要とする。

ウ. 操作の簡便性と確実性

分析をする際に特別な熟練を必要とせず、極力簡単であること。また不測の誤差が生じるおそれが少ない確実な方法であること。

エ. 迅速性

多数の試料を扱うことが多いため、短時間で多くの試料数を処理できる方法であること。

と。また、酸化・分解などにより経時的に濃度に変化する成分があるため、迅速に対応する必要がある。

オ. 実用性

使用する分析機器の価格や必要試薬の費用等が安価であることも実用の上で考慮が必要である。

水の分析には上述のような条件が要求されるが、実際の分析項目に用いられている普通の定量法を方法別に分類すると表2のようになる。

(2) 分析方法の概要

ア. 高周波プラズマ発光分析法(ICP - AES 法)

近年、金属元素分析の主流となった方法である。比較的高感度、操作も簡便、また共存物の妨害を受けにくいいため、従来、比色法や容量法で実施されていた項目の多くが ICP-AES 法に置き換わり、定量に用いられている。

イ. 比色法

比色法は対象物の色を測定する手法であり、従来幅広い分析に用いられていたが、現在は ICP 法に置き換わった項目が多い。しかし ICP - AES 法はその性質上、元素単体の分析にしか用いることができないため、化合物であるアンモニア、硝酸化合物、シアンなどは比色法で定量されている。

表2 水質分析に用いられる分析方法

定 量 法	項 目
高周波プラズマ発光分析法	鉄、鉛、カドミウム、クロムなど金属元素全般
比 色 法	アンモニア、硝酸化合物、シアンなど
容 量 法	溶存酸素、化学的酸素要求量など
重 量 法	蒸発残留物、懸濁物など
フレイム光度法	ナトリウム、カリウムなど
原子吸光法	水銀、砒素、セレンなど
電気的方法	電気電導度、pHなど
液体クロマトグラフ法	アルデヒド類、農薬など
ガスクロマトグラフ法	有機溶剤、有機化合物など
そ の 他	温度、外観、透視度など

ウ. 容量法・重量法

容量法は操作が簡便で精度も高いが、微量成分の分析は困難である。重量法は高精度であるが、比較的少量に含まれる成分にしか適用できず、また分析に長時間を要するため、多量の試料数を扱う場合には適さないのが欠点である。

エ. フレーム発光度法・原子吸光法

炎の中に対象物質を注入し、その時の発光を測定する手法がフレーム発光度法、光の吸収を測定する手法が原子吸光法である。元素によって ICP - AES 法よりも高感度であるため利用されている。

オ. 電気的方法

濃度差によって起電力が発生する性質を利用する手法であり、水素イオン濃度 (pH) の測定が代表的である。電気的方法は感度が高くないことが多いが連続測定に有利であり、装置モニタとして利用価値が高い。

カ. 液体クロマトグラフ法、ガスクロマトグラフ法

機器分析法としても分類される。分析の対象となる項目は装置の構成や部品により変更でき、感度の調整も可能と応用範囲が非常に

広いが、高額な機器を使用しなければならな
いため、コスト的に不利となることがある。

2.2 排ガス分析

大気汚染物質の分析は昭和 40 年代の公害防止の時代から盛んに行われている。その後、脱硫装置・脱硝装置や集塵装置の技術開発と普及、燃料転換等により硫黄酸化物やばい塵による大気汚染はほぼ解消され、環境保全の時代に移っている。21 世紀に入り微量分析が発達し、ダイオキシンなどの環境ホルモンが注目され、最近では地球規模の環境問題を議論する時代となっている。

ここでは、排ガス分析の概要と特徴について簡単に紹介する。

(1) 排ガス分析項目

大気汚染防止法規制物質として指定された項目を表 3 に示す。

上記項目のうち硫黄酸化物、ばいじん、有害物質は「ばい煙」と呼ばれている。これらは固定発生源から排出される大気汚染物質で、昭和 37 年のばい煙規制法の時代から規制されているものである。揮発性有機化合物は VOC と呼ばれているもので、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あり、浮遊粒子状物質および光化学オキシダントの原因物質とさ

表3 大気汚染防止法規制物質

規制物質名	排ガス分析項目	分析方法	発生状況	対象施設
硫黄酸化物	SO ₂ , SO ₃	JIS K 0103	石炭, 油, 廃棄物等の物の燃焼	燃焼装置, 脱硫装置
ばいじん	ダスト	JIS Z 8808	物の燃焼	燃焼装置, 集塵装置
有害物質	窒素酸化物, カドニウム, 鉛, ふっ化水素, 塩素, 塩化水素	JIS K 0104, 0083, 0106, 0107, 0105	物の燃焼 合成, 分解など	燃焼装置 廃棄物処理装置など
揮発性有機化合物	全炭化水素	環境省告示第 61 号	塗装, 印刷, 乾燥焼付け	揮発性有機化合物発生施設
自動車排出ガス	一酸化炭素, 炭化水素, 窒素酸化物, 粒子状物質	JIS D 1030 JIS D 1101	自動車の運行	特定の自動車

れている。平成 18 年から大気汚染防止法上の新しい規制物質となった。

自動車排出ガスは、ばい煙規制法を見直し、大気汚染防止法を制定した昭和 43 年から規制されている。上記規制項目のほかに、排出ガスを算定するためにガス流速や基本ガス組成の O_2 、 CO_2 濃度の計測が必要になる。

(2) 分析方法

分析方法は大きく区別すると以下の 2 方法に分かれる。

ア. 吸収液 - 化学分析法

試料ガス中の分析対象ガスを溶液に吸収させ、その試料溶液を化学分析により定量する方法で、吸収液は対象ガスにより、純水、過酸化水素水、ホウ酸溶液、硫酸、水酸化ナトリウム溶液等を使用する。排ガス中の他成分による吸収効果低下が起こる場合や、液温度の上昇による吸収効率の低下、あるいは試料溶液の飛散越流による捕集率の低下に注意する必要がある。

分析対象ごとに各種の化学分析方法があり、適用条件や誤差要因等に注意して分析する。大気中や排ガス中のガス濃度定量の基礎となっている。

図 1 に排ガス採取方法の一例を示す。

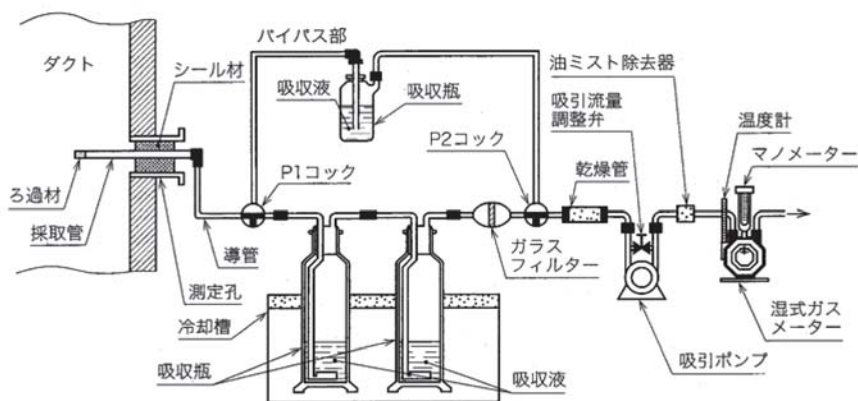


図1 吸収液による排ガス採取方法の一例

イ. 自動分析 - 連続分析法

ガスの光を吸収する性質、磁気や電氣的性質を利用した連続自動分析装置を使用する分析方法である。化学発光、赤外線吸収、紫外線吸収、定電位電解法等の原理による自動分析装置を標準濃度ガスにて校正し、正確な濃度を計測する。妨害成分に注意し、装置の整備やガス漏れチェック、ガス採取配管の正しい運用を行えば、精度の高い計測ができる。

図 2 に排ガス計測機器を示す。

(3) 排ガス分析の留意点

ア. 温度によるガス性状の変化

測定対象ガスの温度とガス採取配管材質との関連によりガスの形態が変化することがある。ガス採取場所の温度が $300^{\circ}C$ 以上の場合には可燃性ガスが採取管内で酸化したり、ダイオキシンや NO_x が発生し易い環境となるので、ガス反応の少ない配管材料を使用したり、配管を冷却して、ガスを採取する。 SO_3 と NH_3 が共存する場合は、 $200^{\circ}C$ 未満で硫酸が生成し、 SO_3 と NH_3 濃度に影響を与える。採取場所のガス温度と共存ガスの種類を確認し、採取時のガス形態に注意を払うことが大切である。

イ. 配管表面における吸脱着



図2 排ガス計測機器

SO₂ や高分子炭化水素、あるいは ppm 未満の低濃度ガスでは、配管表面への吸着によるガスの置換遅れが発生したり、場合によっては桁違いの計測結果を得ることがある。配管材料には細心の注意を払い、吸着の少ない材料を使用する。また炭化水素等の採取では、配管を加熱し吸着を少なくし、置換速度を速める。

ウ. ガス中の水分やドレンへの溶解

ガス中の水分は、配管途中でドレンとなった場合には、ドレン水中にガス成分が溶解し負の計測誤差を生じさせる。特に NH₃、SO₂、NO₂、H₂S ガスは水に溶解し易いので、配管を加熱し水や配管内面のくもりや結露を発生させないようにする。

以上のように、排ガス分析は温度形態、吸着置換、凝結溶解の3つの点に留意し、誤差要因をよく検討したうえで、採取や分析を実施することが要求される。

3. 微量分析

3.1 PCB 分析およびダイオキシン類分析

化学物質の中には、環境中で分解されにくく、一旦環境中に排出されると人間の身体に有害な影響を及ぼす恐れがあるものがある。このような性質を持つ化学物質は、残留性有機汚染物質 (POPs)

と呼ばれ、ダイオキシン類 (PCDDs、PCDFs および DL-PCBs) やポリ塩化ビフェニル (PCBs) などがこれに当たる。国内においても環境汚染を懸念する社会的関心が非常に高まり、これらの化学物質に対して厳しい管理規制を盛り込んだ「ダイオキシン類対策特別措置法」(平成 11 年 法律第 105 号)、「ポリ塩化ビフェニル廃棄物の適正な処理の推進に関する特別措置法」(平成 13 年 法律第 65 号) が相次いで整備された。

(1) ダイオキシン類

ダイオキシン類 (DXNs) とは、ポリ塩化ジベンゾパラジオキシン (PCDDs)、ポリ塩化ジベンゾフラン (PCDFs) およびダイオキシン様 - ポリ塩化ビフェニル (DL-PCBs) の総称で、特に毒性の強い化学物質であることから他の有害物質に比べより低いレベルの計量単位 (ng 又は pg) で排出基準および環境基準が制定されている。

ダイオキシン類の分析に供する試料は、大気や公共水域のような比較的きれいなものから、燃焼ガスや燃え殻のように多量の有機物を含むものまであり多種多様である。また、分析工程 (図 3) も試料の抽出から始まり、夾雑物の除

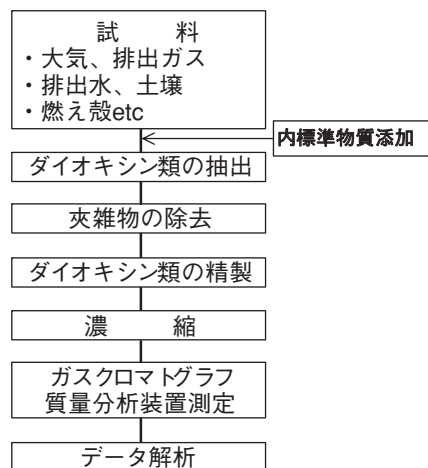


図3 ダイオキシン類分析フロー

去そして分離精製操作と前処理だけでも長い期間を要する。抽出された有機成分の中から、長い前処理を経て極微量のダイオキシン類だけをロス無く精製するには、経験と高い技術力が要求される。

2002年に導入された独立行政法人・製品評価技術基盤機構による特定計量証明事業者認定制度（MLAP：図4）は、複雑なダイオキシン類分析における分析技術力と分析精度の管理システムが一定の基準をクリアしている事業所かどうかを審査・認定する制度で、当社でも、2003年に認定を受けて以来、横浜市をはじめとする地方自治体が実施する実態調査をサポートしてきた。

焼却炉メーカーであったIHIの分析機関としてダイオキシン類分析を始めたこともあり、当初は発生源の排出実態調査に最も注力してきた。しかし、学校や事業場に設置されていた焼却炉のほとんどが廃止・撤去され、発生源総数が激減したことを受け、近年では大気や土壌といった環境保全を目的とした業務へと展開している。

(2) ポリ塩化ビフェニル

ポリ塩化ビフェニル（PCBs）は、優れた電気的特性や耐熱安定性などから産業用から家庭用品にまで広く使用されてきた。カネミ油症事件以来、その毒性が社会問題となり30年以上前に製造が禁止された。しかし、PCBsを含む絶縁油の不適切な管理により、環境汚染が深刻化し、「ポリ塩化ビフェニル廃棄物の適正な処理の推進に関する特別措置法」が制定された。これにより廃棄物はもちろん使用中の重電機器も使用されている絶縁油に含まれるPCBs濃度を調査することになった。

現状、未処理の絶縁油に適用される公的PCBの検定方法が無いことから、分析機関に



図4 特定計量証明事業者認定度（MLAP）認定証

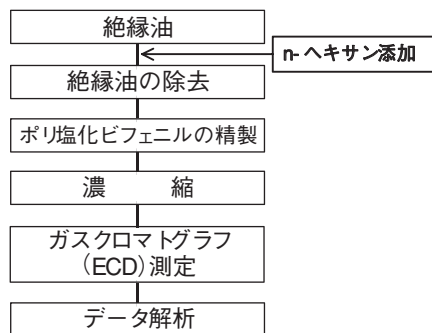


図5 絶縁油中のPCBs分析フロー

よって様々な方法が適用されている。当社では、JEAC1201法（JEAC：社団法人・日本電気協会）をはじめ、底質調査法（環境省マニュアル）および厚生省告示192号とすべての分析方法に対応可能であり、固相抽出法を用いた分析方法（図5）では短時間・低コストを実現し、開始より延べ10,000台を超える重電機器の調査を実施してきた（分析結果例：図6）。さらに昨年度からは生物抗体反応を用いたバイオセンサー法の導入により、類似した変圧器の大量調査に対応できる体制を整えている。

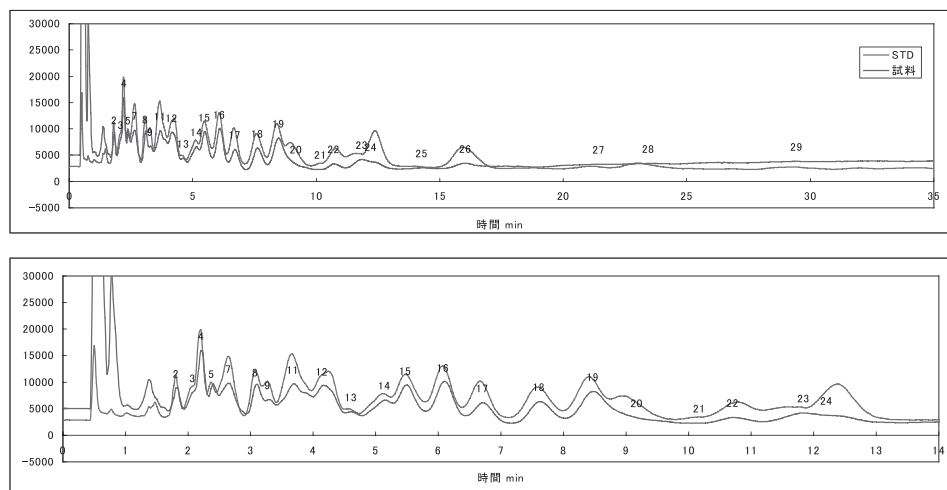


図6 PCB分析の測定例

3.2 アスベスト分析

(1) アスベスト分析の動向

石綿（アスベスト）に関する規制は、労働安全衛生法、特定化学物質等障害予防規則等に基づいて行われてきたが、平成17年に石綿障害予防規則として石綿（アスベスト）単独の規則が公布された。平成18年8月には労働安全衛生法施行令の一部を改正する政令により、規制値も従来のアスベスト含有濃度1%以下から0.1%以下と強化された。さらに対象となるアスベストの種類も、アモサイト、クリソタイルおよびクロシドライトの3種類から、アンソフィライト、アクチノライトおよびトレモライトが加えられて6種類となった。

ここでは、新たに規制対象項目となったアンソフィライト、アクチノライトおよびトレモライトの分析方法を紹介する。

(2) アンソフィライト、アクチノライトおよびトレモライトの分析方法

JIS A 1481の解説を参考にし、JIS A 1481の「分析手順」に従い分析試料調製、X線回折分析法、位相差顕微鏡を使用した分散染色分析法により

定性分析を実施し、アスベスト有りと判定された試料については、基底標準吸収補正法によるX線回折分析法により石綿含有率を算出する。

なお、アクチノライトについては、国内で標準物質が供給されていないことから当社ではNIST (National Institute of Standard and Technology) 標準物質を使用している。

アンソフィライト (JAWE411) とトレモライト (JAWE511) およびアクチノライト (NIST1867a) の位相差顕微鏡を使用した分散色およびX線回折分析のピーク位置を表4に、分散色写真およびX線回折出力チャート例を図7に示す。

図7から位相差顕微鏡を使用した分散染色分析法では3種類とも同様な分散色のため識別することが困難であり、X線回折分析の出力チャート例からも回折線がほとんど同じため識別することが困難である。

当社ではこれらのアスベストが検出された場合は、①位相差顕微鏡に偏光用回転アナライザーを装着した分散染色の偏光観察および②走査型電子顕微鏡－エネルギー分散型X線分析 (SEM-EDS) により、アスベストと思われる織

表4 アンソフィライト、トレモライトの分散色、X線回折ピーク位置

名称	化学組成式	屈折率 $n_D^{25^\circ\text{C}}$	分散色	X線回折ピーク位置:度	
アンソフィライト ちよくせんせき (直閃石) anthophyllite	$\text{Mg}_7\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	1.605	橙	主ピーク	29.3
		1.620	桃 紫	副ピーク	27.5
		1.640	青	第三ピーク	10.7
アクチノライト とおせんせき (透閃石) tremolite	$\text{Ca}_2\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	1.605	橙	主ピーク	32.9
		1.620	桃 紫	副ピーク	35.3
		1.640	青	第三ピーク	26.2
トレモライト とおせんせき (透閃石) tremolite	$\text{Ca}_2\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	1.605	橙	主ピーク	10.5
		1.620	桃 紫	副ピーク	28.6
		1.640	青	第三ピーク	33.0

注) アクチノライトは JIS A 1481 に記載が無いため当社オリジナルデータ

(浸液右側の数字は屈折率 $n_D^{25^\circ\text{C}}$)

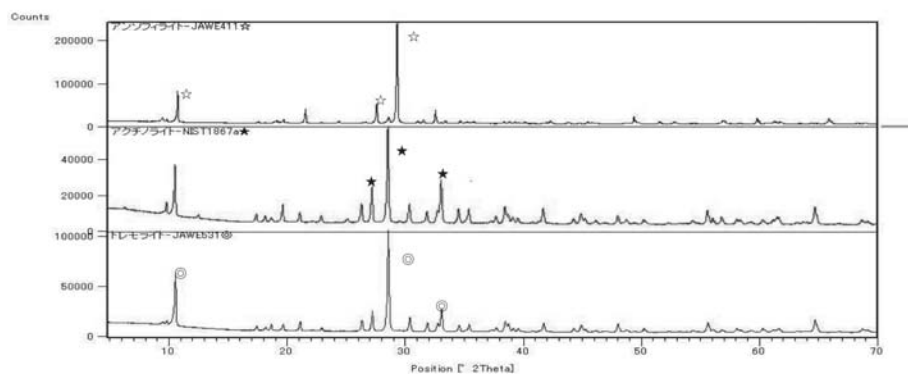
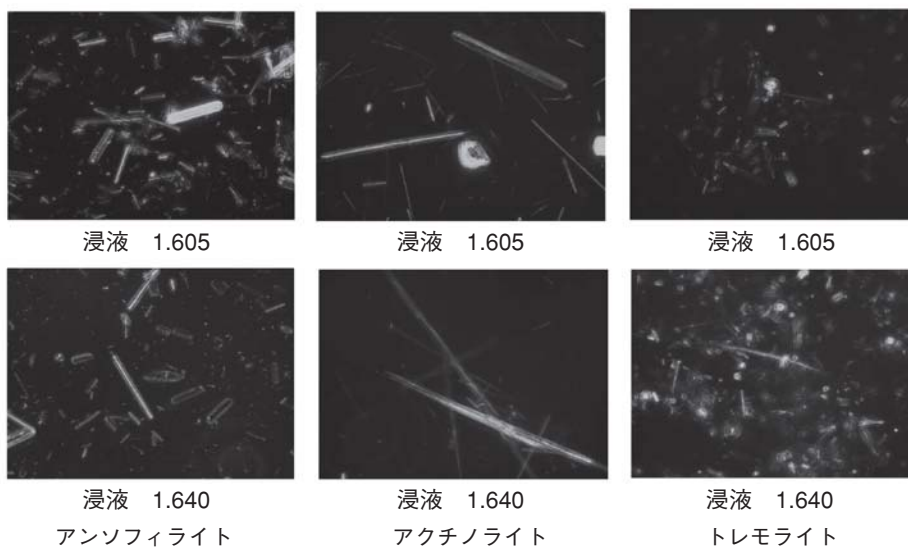


図7 アンソフィライト、アクチノライト、トレモライトの分散染色写真およびX線回折分析の出力チャート例

維状物質の形状や大きさを観察するとともに任意の繊維状物質に電子線を照射し、その元素成分を測定する方法を併用している。

3.3 農薬の分析

農薬は300種類以上もあり、除草剤、殺虫剤、殺菌剤、成長促進剤などに大きく分けることができ、目的に応じて広く利用されている。輸入野菜に基準値を超える残留農薬が検出された事件、登録を抹消された農薬が無断で使用された事件などが報道機関によって大きく取り上げられた。その影響で農作物の安全性に対する関心が急速に高まっており、農協や大手スーパーなどが相次いで商品の残留農薬検査を実施するようになった。ここ数年、残留農薬分析の要求が急増しており、公的機関だけでなく民間の分析機関にも分析が委託されるようになってきている。

これら農薬のうち、特にシマジン、チウラム、チオベンカルブはゴルフ場の芝草、水田の稲に散布されるので、河川、湖、水路の水に含まれる可能性があり、「環境基本法」(平成5年施行)によって基準値が定められている。分析方法はJIS K 0128-2000「用水・排水中の農薬試験方法」に記載されており、50種類の農薬に対して個別の分析方法が定められている。

分析の大まかな流れは

- ①検水から対象農薬成分を有機溶媒に抽出
- ②対象農薬成分を抽出した有機溶媒を濃縮
- ③ガスクロマトグラフ法、高速液体クロマトグラフ法による定量分析

となり、必要に応じて②と③の間に精製の作業を行う。

検水から農薬を抽出する方法には溶媒抽出法と固相抽出法がある。溶媒抽出法は有機溶媒(ジクロロメタン等)と検水を分液ロートに入れて振とうさせ、農薬を有機溶媒に抽出する方法である。ジクロロメタンは毒性が高いため、抽出溶媒に酢

酸エチル・ヘキサン混合溶媒を用いる方法もある。抽出の最適条件は対象農薬成分により異なるが、同時抽出が可能な農薬成分の組み合わせもある。一方、固相抽出法は固相カラム(市販品)に検水を通して農薬を吸着させ、次に遊離液を固相カラムを通して農薬を回収する方法である。この方法は有機溶媒の使用量が少ない、多数の検体の処理が容易であるといった利点がある。かつては通水の過程における固相カラムの目詰まりが問題であったが、最近では目詰まりを起こしにくい固相カラムが市販されている。溶媒抽出法、固相抽出法により農薬を抽出した溶媒はロータリーエバポレータ、および窒素吹き付けにより濃縮し、必要に応じてクロマトグラフ分離による夾雑物の分離操作を行う。最後に一定量になるよう再び濃縮し、定量分析を行う。

当社では排水中のシマジン、チウラム、チオベンカルブの3成分に対する定量分析を実施している。シマジン、チオベンカルブはガスクロマトグラフ質量分析計を用いて定量分析を行う。図8にシマジン、チオベンカルブのトータルイオンクロマトグラムおよびイオンクロマトグラムの例(シマジン m/z 201、チオベンカルブ m/z 100)を示す。チウラムは高速液体クロマトグラフを用いて定量分析を行う。図9にチウラムを分析したクロマトグラムの例を示す。

図8、図9に示すように対象農薬成分のピーク分離は良好であるが、検水によって夾雑成分が異なる。夾雑成分による妨害が著しい場合には、クロマトグラフ分離による夾雑物の分離作業を行った試料を調製して、定量分析を実施する。

4. 作業環境

4.1 臭気

悪臭防止法(昭和46年施行)は、規制地域内の工場や事業場の事業活動に伴って発生する悪臭

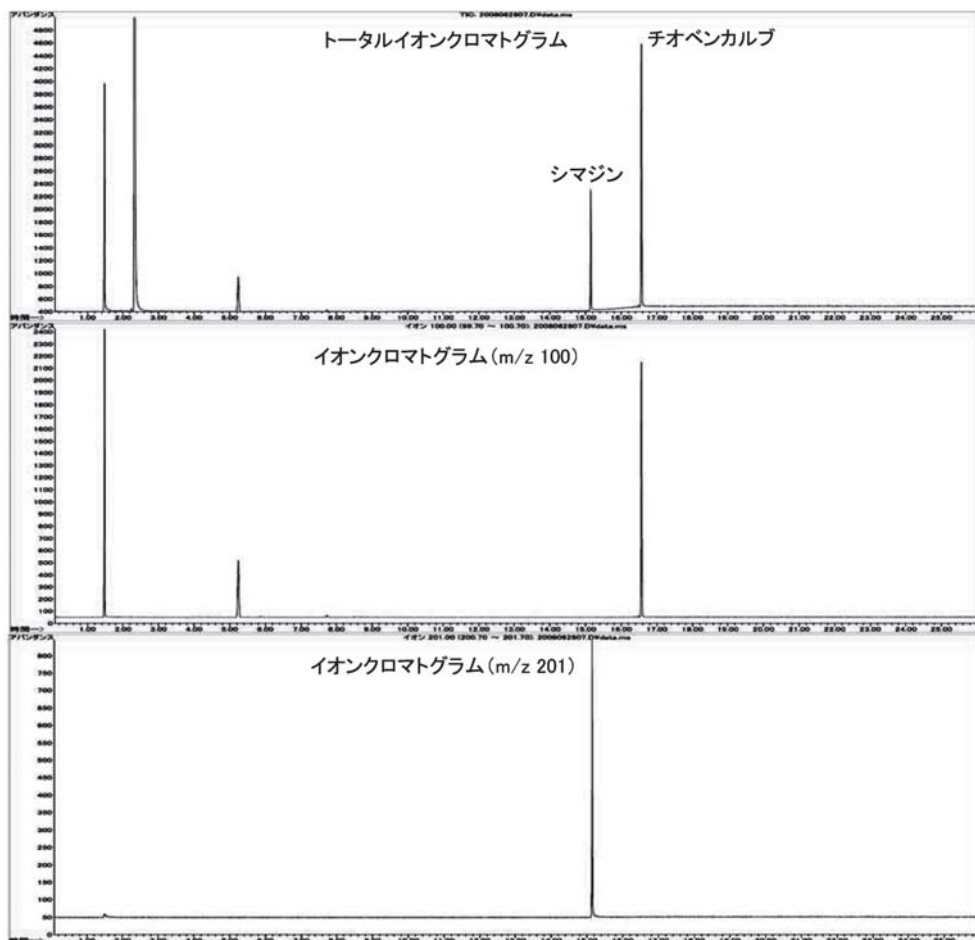


図8 シマジン、チオベンカルブのトータルイオンクロマトグラム
およびイオンクロマトグラムの例

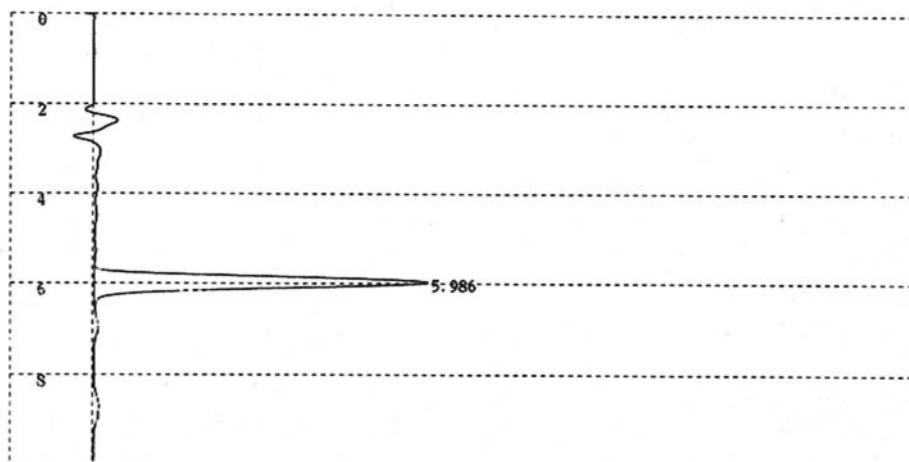


図9 チウラムの分析チャート (高速液体クロマトグラフ、検出器：UV)

を規制することにより悪臭防止対策を推進し、生活環境の保全と国民の健康の保護に資することを目的としている。都道府県知事は住民の生活環境を保全するため、悪臭を防止する必要があると認める地域を指定する。

悪臭防止法では、濃度規制と臭気指数規制があり、都道府県知事が規制地域における自然的、社会的条件を考慮して特定悪臭物質または臭気指数について敷地境界線、気体排出口、排水水における規制基準を定める。特定悪臭物質として表5の22物質が指定されている。表5に示した分析方法は、吸光光度法、ガスクロマトグラフ法 (FPD)、ガスクロマトグラフ法 (FID) であるが、ガスクロマトグラフ質量分析計 (GC - MS) を使う場合もある。

これらの化学分析、機器分析は、濃度計量証明

の対象であり、都道府県知事から計量証明事業所 (濃度) 登録を受けた事業所で行われる。登録を受けた事業所では、環境計量士 (濃度) の管理下で分析試験が行われる。

人間の感覚に似せた臭気指数という表示方法が臭気濃度に代わって用いられる。臭気濃度と臭気指数の関係は、式1の通りである。

臭気指数 = $10 \times \log(\text{臭気濃度})$ ……………式1
より直感的に数値の意味を理解できるようにしたのが臭気強度である。

以下に示す6段階臭気強度表示法が広く使われている。

臭気強度と判定尺度

- 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 (識別閾値濃度)
- 3 楽に感知できるにおい
- 4 強いにおい
- 5 強烈なにおい

一般に人の臭覚による臭気試験は、官能試験や三点比較臭い袋法と呼ばれ、臭気判定士の管理下で行われる。

作業環境上の臭気は、原材料などから発生する一次的なものや製造工程などから発生する二次的なものなどがある。原材料から発生するものには、塗装作業などに使用する有機溶剤などがあり、有機溶剤を製造または取り扱う屋内作業場においては有機溶剤の濃度が労働安全衛生法に定める作業環境測定の対象になっている。主な物質としては、アセトン、ノルマルヘキサン、トルエン等47物質が指定されている。作業環境測定は、作業環境測定士 (有機溶剤) が行う。

製造工程の場合、過熱処理などに伴うこげ臭などがあり、通常これらは、排ガス処理装置を通して大気中に排出されるため、悪臭防止法の規制対

表5 悪臭22物質とその分析方法

NO.	分析項目	分析法
1	アンモニア	吸光光度法
2	メチルメルカプタン	ガスクロマトグラフ法 (FPD)
3	硫化水素	
4	硫化メチル	
5	二硫化メチル	
6	トリメチルアミン	
7	アセトアルデヒド	ガスクロマトグラフ法 (FID)
8	プロピオンアルデヒド	
9	ノルマルブチルアルデヒド	
10	イソブチルアルデヒド	
11	ノルマルバレールアルデヒド	
12	イソバレールアルデヒド	
13	イソブタノール	ガスクロマトグラフ法 (FID)
14	酢酸エチル	ガスクロマトグラフ法 (FID)
15	メチルイソブチルケトン	ガスクロマトグラフ法 (FID)
16	トルエン	ガスクロマトグラフ法 (FID)
17	スチレン	
18	キシレン	
19	プロピオン酸	ガスクロマトグラフ法 (FID)
20	ノルマル酪酸	
21	ノルマル吉草酸	
22	イソ吉草酸	

象になる。

4.2 騒音・振動

騒音・振動は、環境基本法で定義されている典型七公害の項目であり苦情件数も多い。騒音の定義は、基準値よりも大きい音であることと同時に不快の音であることが必要条件になる。個人の心理状態や感覚、生い立ちなどによって騒音と感ずる場合とそうではない場合があり、騒音問題を難しくしている。振動についても感覚的要素があるため同様に対策を難しくしている。

騒音の種類には、環境騒音、工場騒音、道路交

通騒音、建設工事騒音、鉄道騒音、航空機騒音、作業環境騒音、深夜カラオケ騒音、低周波騒音などがあり、環境基準などの基準値がある場合が多い。一例として環境基本法の規定に基づく騒音に係る環境基準を表6に示す。

振動の種類には、工場・事業場振動、道路交通振動、建設工事振動などがある。振動には規制基準はあるが環境基準は無いので注意が必要である。

一例として振動規制法の規定に基づく特定工場等の規制基準を表7に示す。

環境基準や規制基準の適合状況を判定するための

表6 騒音に係わる環境基準

1 環境基準は、地域の類型及び時間の区分ごとに次表の基準値の欄に掲げるとおりとし、各類型を当てはめる地域は、都道府県知事が指定する。

地域の類型	基準値	
	昼間	夜間
A A	50デシベル以下	40デシベル以下
A及びB	55デシベル以下	45デシベル以下
C	60デシベル以下	50デシベル以下

- (注) 1 時間の区分は、昼間を午前6時から午後10時までの間とし、夜間を午後10時から翌日の午前6時までの間とする。
 2 A Aを当てはめる地域は、療養施設、社会福祉施設等が集合して設置される地域など特に静穏を要する地域とする。
 3 Aを当てはめる地域は、専ら住居の用に供される地域とする。
 4 Bを当てはめる地域は、主として住居の用に供される地域とする。
 5 Cを当てはめる地域は、相当数の住居と併せて商業、工業等の用に供される地域とする。

環境省 HP より抜粋

表7 特定工場等の振動規制基準

区域の区分\時間の区分	昼間	夜間
第一種区域	六十デシベル以上六十五デシベル以下	五十五デシベル以上六十デシベル以下
第二種区域	六十五デシベル以上七十デシベル以下	六十デシベル以上六十五デシベル以下

備考

第一種区域 良好な住居の環境を保全するため、特に静穏の保持を必要とする区域及び住居の用に供されているため、静穏の保持を必要とする区域

第二種区域 住居の用に併せて商業、工業等の用に供されている区域であって、その区域内の住民の生活環境を保全するため、振動の発生を防止する必要がある区域及び主として工業等の用に供されている区域であって、その区域内の住民の生活環境を悪化させないため、著しい振動の発生を防止する必要がある区域

昼間とは、午前五時、六時、七時又は八時から午後七時、八時、九時又は十時までとし、夜間とは、午後七時、八時、九時又は十時から翌日の午前五時、六時、七時又は八時までとする。

環境省 HP より抜粋

騒音・振動計測は、前記の法律に基づき計測する。一例として特定工場における規制基準の適合状況を判定する騒音・振動の計測条件を以下に示す。

(1) 測定条件

ア. 騒音レベル

騒音レベルの測定は、「環境騒音の表示・測定方法 (JIS Z 8731)」に定める方法により行う。使用測定機器及び測定条件を表 8、図 10、図 11 に示す。

イ. 振動レベル

振動レベルの測定は、「振動レベル測定方法 (JIS Z 8735)」に定める測定方法により行う。使用測定機器及び測定条件を表 9、図 10、図 11 に示す。

(2) データの整理方法

ア. 各測定地点に IC レコーダを設置し、測定中の音を記録する。工場から発生する音以外で測定値に大きく影響を与えるものは異常音として除外する。振動については、波形のほか騒音データも併せて判断し異常振動を除外する。

イ. データスクリーニングした後、騒音は 10 分間の等価騒音レベル (L_{Aeq}) と同時に最大値 (L_{Amax})、時間率騒音レベル (L_5 , L_{10} ,

L_{50} , L_{90} , L_{95}) の値を計測する。振動は、時間率振動レベル (L_{10} , L_{50} , L_{90}) の値を計測する。測定値は騒音計・振動計のメモリに自動保存し、その測定値をパソコンに転送して表計算ソフト (エクセル) などで加工・管理する。

ウ. 測定結果は、通常、騒音は音圧レベル、振動は振動加速度レベルの計量証明書として取りまとめる。

4.3 粉じん

空气中に粒子が分散している状態を総称してエアロゾルと呼び、その発生源や粒子の性状から粉じん、ヒューム、ミスト、煙、霧など種々の呼び名がある。粉じんは固体が粉砕、研磨、爆破などで空气中に分散したものであるが、ヒューム、ミストなどを含めて粉じんとする場合もある。

大気汚染防止法第 2 条第 4 項では、粉じんは、「物の破碎、選別その他の機械的処理又はたい積に伴い発生し、又は飛散する物質」と定義されている。「特定粉じん」と「一般粉じん」に区分され、特定粉じんとしては、石綿 (アスベスト) が指定されている。また、労働安全衛生法は作業環境における健康被害を防止する目的で粉じんを規制している。

表8 騒音レベルの測定機器及び測定条件

測定機器	測定条件	
積分型普通騒音計 (JIS C 1502) (RION NL-06)	周波数補正回路	A 特性
	動特性	F A S T
	マイクロホン高さ	1.2m
	サンプリング間隔	0.2 秒 (3,000 データ/10 分間)

表9 振動レベルの測定機器及び測定条件

測定機器	測定条件	
振動計 (JIS C 1510) RION VM-52A	感覚補正回路	V L (振動レベル)
	測定方向	Z (鉛直方向)
	サンプリング間隔	1 秒 (600 データ/10 分間)

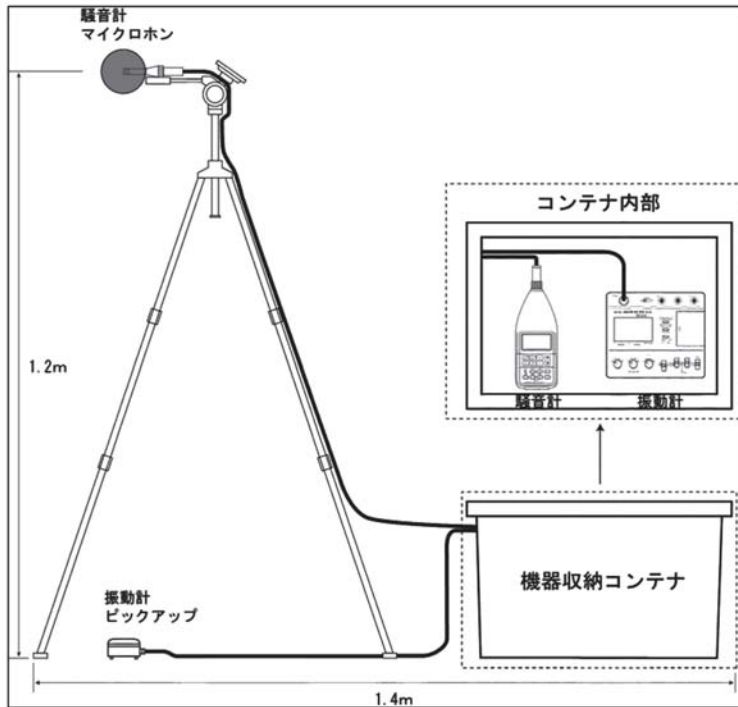


図10 測定機器図

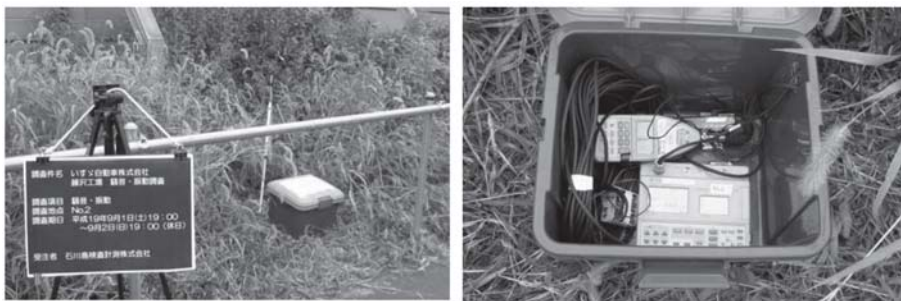


図11 測定機器図

ここでは、労働安全衛生法、粉じん障害防止規則で規定する粉じん作業の作業環境測定について紹介する。

労働安全衛生法第65条第2項の規定に基づく作業環境測基準は、昭和51.4.22 労働省告示第46号により定められており、測定の方法は、この作業環境測基準により行う。作業環境測定における粉じん計測の手順は、デザイン、サンプリング、分析および評価の4段階からなる。以下に各段階を解説する。

(1) デザイン

デザインは、当該作業場で行われている作業の内容、労働者の行動範囲、原材料として用いられている物質、有害物質発生源の数、作業場の広さなどから、測定エリアの決定、測定ポイントの決定を行う。

作業環境の測定ポイントには、A測定、B測定のポイントがあり、A測定は、通常測定エリアを6mメッシュ等間隔に区切り、交点付近を測定点とするが最低点数は5点である。B測定

は、作業内容から最も濃度が高くなる場所および時間とする。

(2) サンプルング

サンプルングは、デザインで決定した測定ポイントで作業工程から適切な時間帯で行う。

粉じん計測の場合、相対粉じん計、ローボリュームエアサンプラー、ハイボリュームエアサンプラーを用いるが、後記の2種類のサンプラーは、空気中の粉じんをろ過捕集する装置である。付着物した粉じんの重量を化学天秤などで秤量することにより粉じんの重量濃度を求める。

相対粉じん計は、重量法で求めた校正値を用いることで使用できるが、軽量であり、使用方法も簡便であることから、A測定などの多点計測する場合に適している。

サンプルング実施時には当該単位作業場所で行なわれていた作業、設備の稼働状況、温度、湿度、気流等、及び測定値に影響を及ぼしたと考えられる事項を記録する。

(3) 分析

粉じん分析は、重量測定および遊離ケイ酸分析がある。遊離ケイ酸の分析方法には、エックス線回折法かりん酸法を用いる。

(4) 評価

労働安全衛生法第65条の2第2項の規定に基づく作業環境評価基準は、昭和63.9.1労働省告示第79号により定められており、評価の方法は、この「作業環境評価基準」により行う。

評価方法は、A測定結果から、幾何平均値M、

幾何標準偏差 σ 、第1評価値EA1、第2評価値EA2を求め、B測定の結果からCBを求め、式1に示す管理濃度Eと比較評価する。評価基準を表10に示す。

$$E \text{ (mg/m}^3\text{)} = 3.0 / (0.59 Q + 1) \quad \dots\dots\dots\text{式 1}$$

Q：遊離ケイ酸含有率（%）

第3区分の場合、直ちに改善すべき状態であり、第1区分は良好で維持すべき状態と評価され、第2区分はその中間である。

4.4 揮発性有機化合物測定

作業環境上の揮発性有機化合物測定としては、VOCをトータルとして捕らえる自動測定器を用いた連続測定その他、個々の成分を分離計測する方法がある。

分析は作業環境測定基準（労働省告示第46号）に基づき実施する。そしてサンプルングした試料ガス中の分析対象成分は主にガスクロマトグラフ法により定性・定量分析を行う。ここではガスクロマトグラフ質量分析計（以下GC/MSと呼ぶ）を用いたVOCの成分分析について紹介する。

GC/MSは注入した試料をガスクロマトグラフで成分ごとに単離し、逐次質量分析計で検出する分析装置である。分析方法はSIM（Selected Ion Monitoring）法とスキャン法がある。SIM法は高い感度と選択性を有しており、定量分析で利用されている。一方、スキャン法は主に定性分析や構造解析において利用されている。使用している装置は図12に示す「Agilent製ガスクロマトグラフ質量分析計 HP-6890/5973」である。

SIM法の分析事例を図13に示す。この図は

表10 粉じん評価基準

		A 測定		
		$E_{A1} < E$	$E_{A2} \leq E \leq E_{A1}$	$E < E_{A2}$
B 測 定	$C_B < E$	第1区分	第2区分	第3区分
	$E \leq C_B \leq E \times 1.5$	第2区分	第3区分	第3区分
	$E \times 1.5 < C_B$	第3区分	第3区分	第3区分

VOC 混合標準試薬のトータルイオンクロマトグラムで、多成分を一斉に定量分析した例である。



図12 GC/MS

次にスキャン法の分析事例を図14に示す。トータルイオンクロマトグラム上に現れたピーク（矢印のピーク）のマススペクトルに対し、相同性が高い成分をデータベースで検索する。

この例では、検索の結果、トルエンであることが分かった。

ガスクロマトグラフ法は保持時間を成分固有のパラメータとして分析を行う。GC/MS法は保持時間とマススペクトルを成分固有の二次元パラメータとして分析を行うため、ガスクロマトグラフ法よりも分析の精度と確度が高い。したがって、ガスクロマトグラフ法（FID）では難しい多成分

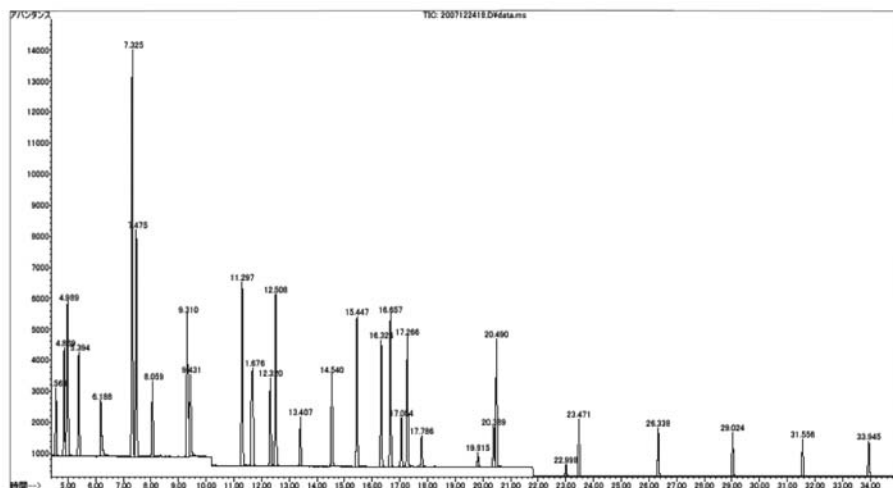


図13 SIM法の分析例

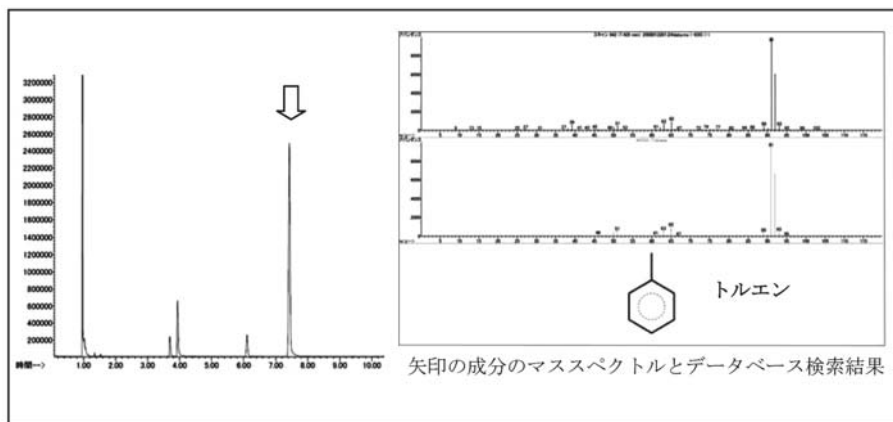


図14 スキャン法の分析事例

の一斉分析や定性分析が可能になる。

5. 環境シミュレーション

5.1 冷熱サイクル試験

自動車等の材料や部品は JIS、MIL、JASO、EIAJ の規格試験が行われる場合がある。中でも環境試験は部品の耐久性の評価を行う上で不可欠となっている。本稿では急冷急熱の温度環境によって試験対象物に熱衝撃および熱サイクルを与える冷熱サイクル試験装置について紹介する。

(1) 冷熱衝撃装置

図 15 および図 16 に冷熱衝撃装置を示す。本装置は前述したように JIS、MIL 等の規格試験の中の環境試験に堪える高能力仕様（+150℃から -65℃に 5 分以内に復帰。逆パターンも同じ。標準仕様では 10 分以上要。）で、テストエリア（410×460×370mm）内に -70℃～200℃の温度環境をサイクリックに設定することができる。図 17 に示すように、テストエリア内を急冷急熱および常温雰囲気へ切り替えるため、予熱槽、予冷槽に予め所定温度の空気を溜めておき、ダンパの切り替えによりテストエリア内に各温度の空気を一気に流入させる。この切り替え操作により低温から高温、高温から低温へとサイクリックに短時間に変化させ、テストエリア内に格納された試験対象物に熱衝撃を与える。表 11 に主な仕様を示す。



図15 冷熱衝撃装置



図16 テストエリア内部

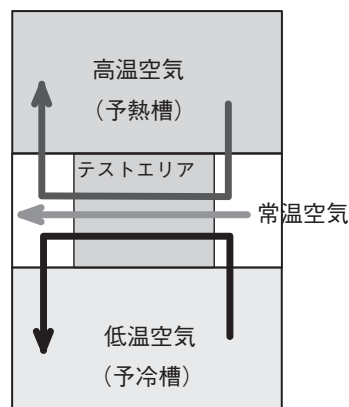


図17 空気の流れ模式図

表11 冷熱衝撃装置の主な仕様

方式	ダンパ切り替え2ゾーンおよび3ゾーン方式
高温さらし温度範囲	0～200℃
低温さらし温度範囲	-70～0℃
温度復帰時間	5分（条件による）
テストセル寸法	410W×460H×370D
外寸法	1320W×1900H×1670D
重量	1250kg
最大負荷電流	112A

(2) 小型極低温シミュレーションチャンバー

図18に小型極低温シミュレーションチャンバーと周辺装置を示す。本装置は宇宙関連機器部品の冷熱耐久性試験を目的としてT社によって開発されたもので、液体窒素流量をコントロールしてチャンバー内に導入し、同時にヒーターを制御することで -160°C ～ 80°C の間の任意温度に保持することができる。また冷熱衝撃装置のように、極低温から高温、高温から極低温とサイクリックに繰り返し試験も実施可能である。

表12に小型極低温シミュレーションチャンバーの主な仕様を示す。液体窒素の消費量は、設定温度、保持時間、温度降下速度およびサイクル数や高温側設定温度によって異なるが、電磁弁コントロールにより最小に制御される。

5.2 風環境風洞実験

風環境影響評価のうち、地形モデルを風洞内に設

置し、道路上や家屋上において風向および風速を測定することにより、風環境を評価することを風環境風洞実験という。実験では建設予定建物の有無をパラメータとし、評価対象地域の気象データをもとに実験データを解析して建物建設による風環境への影響を調べる。

(1) ビル風とは

周囲の建物より目立って高い建物や大きい建物が建設されると、その回りでは局所的に強い風や乱れた風が吹くようになる。これがビル風と呼ばれる風である。

ビル風は建物の形状・配置や周辺の状況などにより非常に複雑な流れになるが、周囲に与える影響の大きいものとして剥離流、吹き降ろし等がある。

(2) ビル風の評価

風洞試験結果によりビル風の影響を評価する方法としては、風速の発生確率による評価方法

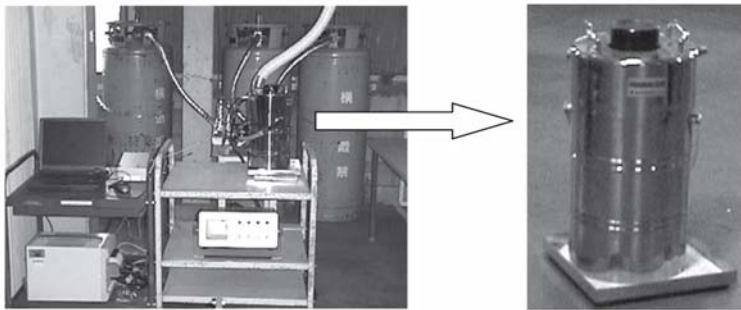


図18 極低温シミュレーションチャンバー

表12 小型極低温シミュレーションチャンバーの主な仕様

温度範囲	-160°C ～ $+80^{\circ}\text{C}$
有効内寸法	185φ×205H mm
チャンバー内容積	6リットル
外形寸法	200W×415H mm
冷媒	液体窒素 (LN ₂)
温度精度	± 3.0°C
温度上昇速度	7°C/min
温度降下速度	10°C/min
液体窒素消費量	15リットル/hr以下 (-100°C 保持にて)

(確立的評価方法)が主流となっている。この方法は、風が場所により吹き方の異なる性質を考慮して風速の発生頻度を予測してビル風の影響の有無を判断する手法である。

風速の発生頻度は確立分布の一つであるワイブル分布でよく近似されることが知られている。ワイブル分布を用いると、任意の場所で、ある風向 a 、ある風速 v 以上の風が発生する頻度(風速 v の超過確立)は次の式で表される。

$$P(V \geq v, a) = A(a) \times \exp\left[-\left(\frac{v}{R(a) \cdot C(a)}\right)^{K(a)}\right]$$

$P(V > v, a)$: 風向 a での風速 v の超過確率

$A(a)$: 風向 a の発生頻度(風配)

$C(a), K(a)$: ワイブル係数

$R(a)$: 風速比

各風向について、上式を計算し、それらを合計すると全風向の超過確率が得られる。

$$P(V \geq v) = \sum A(a) \times \exp\left[-\left(\frac{v}{R(a) \cdot C(a)}\right)^{K(a)}\right]$$

これらの式を計算するためには、ワイブル係数を求める必要がある。

現地または最寄気象台の観測データから風速、風向の累積頻度分布を作成し、風配(風向の統計的性質)およびワイブル分布を計算することで超過確率を求めることができる。

(3) 風洞実験手法

ビル風を予測する場合に最も信頼がおけるのは、風洞実験による方法である。風環境風洞実験では、乱流境界層を風洞内に作成して自然風の状態を模擬し、この風の中に対象建物を含む周辺地域の縮尺模型を置いて風速や風向を測定する。その測定結果は実際の現象を再現あるいは予測していることが要求されるので実験に使用する模型は計画建物周辺にある建物を忠実に

再現する必要がある。

普通地域模型を使用した風洞実験では、現況の地域模型でまず調査し、現在どのような風環境になっているかを調べることから始める。次に計画建物が建設された場合の地域模型を使用し風環境の変化(風向、風速)について現況の場合と比較し、影響の有無を検討する。この評価結果によりビル風害があると判断された場合には対策を講じ再度風洞実験を行い、再評価する。これを満足できる対策が得られるまで、繰返し行う。風洞実験設備は「研究開発支援のための技術、5 大型試験設備紹介」に示す。

5.3 脱硝触媒寿命予測試験

燃焼により燃料中の有機物に結合している窒素と空気中の窒素とが酸化され、NO とか NO₂ に代表される窒素酸化物 NO_x を生成し、大気中に放出されて太陽光の作用により NO₂ となり、光化学スモッグ等の原因物質となる。

NO_x の固定排出源である火力発電所等では大気汚染防止のため、ボイラの排ガス中にアンモニアを加えて触媒を通すことにより NO_x を窒素(N₂)と水蒸気(H₂O)に分解する装置(脱硝装置)を広く採用している。脱硝装置の触媒は、排ガス中で生成される硫酸アンモニウム触媒への付着堆積や排ガスに含まれる鉄・Na等のアルカリ成分の触媒への付着により経年的な劣化が避けられず、脱硝装置としての所定性能を維持するには適切な時期に触媒の交換が必要となる。

当社では、脱硝装置に使用されている触媒の交換時期を定めるために触媒寿命予測試験を実施している。

(1) 触媒寿命予測

ア. 試験装置

ガス通過断面を 3cm 角、長さを 30cm に切断した直方体で、容積 270cc の試験触媒をガラス製反応管の中に入れ、垂直高さ 145cm

の管状電気炉（図19）の中に固定し、一定流量の試験ガスを通しつつ加熱し、試験条件に保持して供給ガスのNO_xと出口ガスのNO_x濃度を計測し、脱硝率を算出している

イ. 試験条件

(ア) SV 値、AV 値と LV 値

単位時間当たりの標準状態ガス流量と試験体容積より次式で求まる値を SV 値という。

$$SV = \frac{\text{標準状態ガス流量}}{\text{試験体容積}} \frac{\text{m}^3\text{N/hr}}{\text{m}^3}$$

単位時間当たりの標準状態ガス流量と試験体のガスとの接触面積より次式で求まる値を AV 値という。

$$AV = \frac{\text{標準状態ガス流量}}{\text{試験体接触面積}} \frac{\text{m}^3\text{N/hr}}{\text{m}^2}$$

触媒の容積当たりのガスとの接触面積は、触媒固有の値であるために SV 値を定めると AV 値も決まってしまう、実機条件と同等の 5000hr⁻¹ 程度の値で試験を行う。

一方、単位時間当たりのガス流量と試験体のガス流路面積より次式で求まる値、すなわちガス速度を LV 値という。

$$LV = \frac{\text{ガス流量}}{\text{試験体ガス流路面積}} \frac{\text{m}^3/\text{sec}}{\text{m}^2}$$



図19 脱硝触媒性能評価試験設備

LV 値が小さいと、ガス中の NO_x や NH₃ の触媒表面までの拡散時間が大きくなり脱硝率を低下させる。このため、ガス拡散速度の影響しない 1m/sec 以上の LV 値として試験する。

(イ) モル比

性能の高い触媒ほど NH₃ の利用率が高くなり、利用率 100% となるモル比が 1 に近づき、性能判定ができなくなるため、脱硝率とモル比が一致しないモル比の 0.8 ~ 1.2 で性能試験を実施する。

(ウ) 温度

上限温度は、触媒単体の TiO₂ 焼結温度で定まり、下限温度は SO_x 濃度と予想転化率から酸性流安析出温度を求め、350℃程度とする。

(エ) ガス組成

反応式からわかるように、脱硝反応は H₂O 生成反応であるために H₂O 濃度が高くなると反応を抑制し脱硝率を低くする。酸素が低い場合にも脱硝率を低下させ、SO_x は転化反応により、脱硝反応と競合する。

これらの理由により供給ガスの H₂O、O₂、SO₂、および NO 濃度を実機にあわせたガス組成とし、NH₃ 濃度は NO 濃度とモル比より定めている。

ウ. 寿命推算

脱硝性能の低下を脱硝率の低下として把握すると変化の小さい数値になるためと、運転時間と性能変化の関係を直線としてグラフに表現し、外挿予測を容易にするため反応速度定数で比較する。厳密な意味での反応速度定数を求めることは困難であるため、試験条件をそろえ、反応速度定数に比例する反応速度係数として比較している。すなわち触媒容積当たりの反応面積 (AV 値) や反応温度あるいはガス速度 (LV 値) が同じと仮定すると

次式が成立する。

$$k = -SV \cdot \ln \left(1 - \frac{\eta}{100m} \right)$$

あるいは反応時間の逆数、SV 値も一定条件で試験されていると次式で表現できる。

$$r = \log \{ 1 / (1 - f) \}$$

f : 脱硝割合

k : 反応速度係数

r : SV 一定の場合の反応速度係数

SV : 反応時間の逆数 (SV 値)

η : 脱硝率 (%)

m : モル比 (NH₃/NO)

但し m>1 のときは m=1 とする

初期の新しい触媒は、完全に性能が安定するまで焼成していないため、運転時間の増加と共に一時的に性能が高くなることが多い。このため、性能が安定し反応速度係数と運転時間を対数グラフでプロットしたとき直線関係になると判断される。運転時間の反応速度係数を基準値とし、基準値との倍数で表すと次式となる。

$$\frac{kt}{ko} = \frac{\ln(100m - \eta t) - \ln(100m)}{\ln(100m - \eta o) - \ln(100m)}$$

ko : 基準時間の反応速度係数

kt : 時間経過後の反応速度係数

ηo : 基準時間の脱硝率

ηt : 時間経過後の脱硝率

$$AV = \frac{\text{標準状態ガス流量}}{\text{試験体接触面積}} \cdot \frac{\text{m}^3\text{N/hr}}{\text{m}^2}$$

例えば、SV 値などの試験条件を同じにし、脱硝装置 A と B より抜き取った触媒の性能試験を実施した結果を運転時間と脱硝率の関係としてグラフにすると図 20 のように曲線となるが、反応係数と運転時間の両対数グラフにすると図 21 の

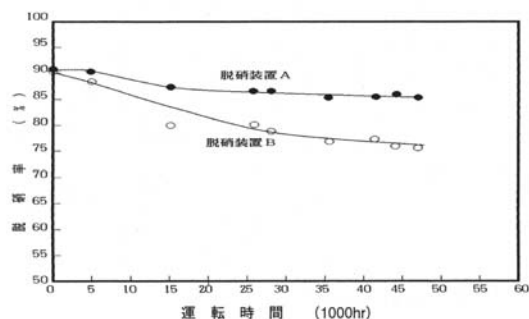


図20 触媒の性能試験脱硝率の経時変化

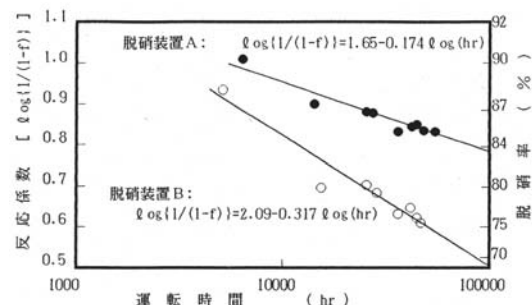


図21 触媒性能試験における運転時間

ように直線関係として表わすことができ、脱硝性能の変化を予測することが容易となる。

6. まとめ

分析・計測技術は、環境保全、食の安全、製品の品質管理とあらゆる分野でますます重要性が高まっている。環境保全は21世紀において避けて通ることのできない命題にもかかわらず、人間の生産活動に伴って発生する環境阻害因子は今後も増加する懸念があり、これら因子となる有害な化学物質および新たな有害物質を正確かつ迅速に測定することが強く求められる。

本章では、当社の環境保全に関わる環境計測、分析技術のうち、①環境測定、②微量分析、③作業環境、④環境シミュレーションについて概要を紹介した。長年にわたり蓄積した環境関連技術とノウハウを基盤として、時代の変化とニーズに対応できる設備、新技術を備えて、環境保全を

積極的かつ確実に推進していく上でのお手伝いを
させていただき所存である。

文責

計測事業部 化学環境部 部長
博士(学術) 茂田 潤一
計測事業部 計測技術部 部長
菅原 敏博

参考文献

- 1) (社) 産業環境管理協会：公害防止の技術と法規、1995年、丸善出版
- 2) 日本分析化学会：水の分析、1973年、化学同人
- 3) 用水排水便覧編集委員会：用水排水便覧、1973年、丸善出版
- 4) (社) 産業環境管理協会：新・公害防止の技術と法規 2008 大気編
- 5) 石綿障害予防規則（平成17年厚生労働省令第21号）
- 6) 労働安全衛生法施行令の一部を改正する政令（平成18年政令第257号）
- 7) 石綿障害予防規則等の一部を改正する省令（平成18年8月2日厚生労働省令第147号）
- 8) JIS A 1481：2008 建材製品中のアスベスト含有率測定方法
- 9) 日本規格協会：JIS ハンドブック 2008 53 環境測定Ⅱ 水質
- 10) 則定 和志：農薬の分析、IIC REVIEW 32号、2004年4月
- 11) 悪臭防止法（昭和四十六年六月一日法律第九十一号）
- 12) 悪臭防止法施行令（昭和四十七年五月三十日政令第二百七号）
- 13) 悪臭防止法施行規則（昭和四十七年五月三十日総理府令第三十九号）
- 14) 計量法（平成四年五月二十日法律第五十一号）
- 15) 作業環境測定法（昭和五十年五月一日法律第二十八号）
- 16) 環境基本法（平成五年十一月十九日法律第九十一号）
- 17) 騒音規制法（昭和四十三年六月十日法律第九十八号）
- 18) 振動規制法（昭和五十一年六月十日法律第六十四号）
- 19) JIS Z 8731：1999 環境騒音の表示・測定方法
- 20) JIS Z 8735:1981 振動レベル測定方法
- 21) 大気汚染防止法（昭和四十三年六月十日法律第九十七号）
- 22) 労働安全衛生法（昭和四十七年六月八日法律第五十七号）
- 23) 粉じん障害防止規則（昭和五十四年四月二十五日労働省令第十八号）
- 24) 作業環境測定法（昭和五十年五月一日法律第二十八号）
- 25) (社) 日本作業環境測定協会：作業環境測定ガイドブック [0]-[5]
- 26) JIS C0025-1988：「環境試験方法（電気・電子）温度変化試験方法」
- 27) 根岸 稔：風洞試験手法（1）風環境評価，IIC REVIEW 1989. 4月
- 28) 風工学研究所編：ビル風の基礎知識，鹿島出版会，1984. 7月
- 29) 豊田研二他：乾式脱硝触媒における反応・吸脱着速度の解析，触媒 Vol136，1994. 10月
- 30) 井上敏男他：脱硝装置の動特性の解析，石川島播磨技報 35，1995