

アスファルトプラントにおけるブルースモークおよび悪臭の対策技術とその変遷

AUTHOR

蓬菜 秀人 HORAI Hideto

概要

ABSTRACT

悪臭は、有害な大気汚染物質などとは異なり直接的に人体に健康被害を及ぼすものではないが、不快感や倦怠感を引き起こすことにより、場合によっては食欲不振など、間接的に人の健康や情緒へも影響を及ぼす可能性がある。1971年に施行された悪臭防止法に基づき各産業分野において対策が講じられてきたが、施行から既に半世紀以上の年月が経過している。とりわけ、アスファルトプラント(以下、APと記述)においてもブルースモークをはじめとする臭気に対し、近隣住民から悪臭に関する苦情が寄せられる場合がある。加えて、循環型社会形成推進基本法の下で2002年に建設リサイクル法が施行され、道路舗装の打ち換え時に発生するアスファルト・コンクリート塊を有効資源として再利用することが義務付けられている。現在では、そのリサイクル率が99%に達し、リサイクル合材の出荷比率が合材全体の70%を超えている。このことは、同法による一定の目的を達成したと評価されるものの、大多数のAPで臭気の根源となるリサイクル合材の製造が常態化していることを意味する。しかしながら、これらの臭気対策については、経済的および技術的な課題が依然として山積しており、すべてのAPにおいて十分な対策が講じられるまでには至っていない。本稿では、「におい」の本質に着目するとともに、臭気に関する法規制の背景を俯瞰し、アスファルト・コンクリート塊が道路舗装資材としてリサイクル化された黎明期から課題となっている、AP発生のブルースモークをはじめとする臭気に対する対策技術の変遷を概観し、将来の展望について論じる。

キーワード:アスファルトプラント, リサイクル, ブルースモーク, 悪臭, 脱臭

1. はじめに

APにおける臭気対策および脱臭技術の変遷については、既刊のNIKKO TECHNICAL REPORT Vol. 3, No. 1, 2022「アスファルトプラントにおける二酸化炭素排出削減技術の変遷と展望」¹⁾並びにNIKKO TECHNICAL REPORT Vol.6, No.2, 2025「直接燃焼および触媒燃焼におけるアスファルト臭気成分の分解性能評価」²⁾で触れているので、そちらも参照されたい。

本稿では、最初に「におい」の本質に迫り、感覚量である「臭い」を客観的に評価する手法の開発において先達による評価手法確立の経緯を概観し、臭気に関する法規制の背景および経緯を俯瞰する。また、道路舗装を打ち換える際に発生するアスファルト・コンクリート塊(以下、「アスコンガラ」と記述)が、有効資源である道路舗装資材としてリサイクル化が始まった黎明期以降、課題となっているブルースモークをはじめとする悪臭に関する対策技術の変遷についても概観する。とりわけ、アスコンガラを破碎し粒度調整したリサイクル材(以下、「R材」と記述)を、リサイクルドライヤ(以下、「Rドライヤ」と記述)で乾燥加熱するプロセスにおいて生成されるブルースモークおよび悪臭について、これらの発生メカニズム、成分、防止法、さらには具体的な対策技術を、当社で得られた知見を中心に考察し、将来のAP

像を展望する。各章の構成は以下の通りである。

第2章「背景」では、臭い成分および人の嗅覚に関してその本質に迫るとともに、生物学的観点や社会的情勢を踏まえ、悪臭公害が問題化し法規制に至る背景について述べる。

第3章「悪臭防止法と臭気測定」では、悪臭防止法の歴史的経緯および概要と、機器分析から人間の嗅覚を用いた「臭気指数規制(三点比較式臭袋法)」への変遷、およびその測定技術の確立について解説する。

第4章「アスファルト由来のVOC(臭気成分)生成メカニズム」では、アスファルトの歴史的背景と構成成分の特徴に触れたうえで、予備実験の結果や既往の研究に基づき、特にRドライヤにおける加熱プロセスでブルースモークおよび臭気が発生・揮発し、凝縮に至るメカニズムについて考察する。

第5章「アスファルトプラントの悪臭対策技術」では、第4章で考察した発生メカニズムを踏まえ、黎明期の対策から現在の本格的な脱臭技術への変遷について述べる。そして、APに適用可能な技術として、燃焼法(直接燃焼・触媒燃焼・蓄熱燃焼)、洗浄法、吸着法、生物脱臭法、および消臭・脱臭剤の各方式について、その原理とAPへの適応性を論じる。

第6章「将来展望」では、これまでの考察に基づき、APにおいて有効な脱臭技術のあり方と、環境負荷低減に向けた今後の展望について示す。

2. 背景

「におい」は、人にとって有益で好ましいものを「匂い」と表記し、そうでないものを「臭い」と記述するという慣習に基づき、その本質が区別されることが多い。とりわけ、「におい」は、光や音と同様に人の感覚量であることから、その刺激の強度は、におい成分の濃度に対して線形的な比例関係にあるわけではなく、むしろ、**図-1**のウェーバーフェヒナー(Weber-Fechner Law)の法則³⁾が示すとおり、非線形な対数的な特性を有する。このことは、人の嗅覚が強い臭いには鈍感であるが、弱い臭いほど敏感になることを意味している。さらに、複数のにおい成分が複合的に相互作用することにより、感覚的な強度のみならず、「におい」そのものの質にまで変化が生じる。この特性を応用して、特にヨーロッパ、すなわちフランスにおいて発展してきたのが香水の調香技術である。

また、個人の嗜好やその時の感情状態により「におい」を感じる強度には大きな個人差が認められる。これらの理由から、においの種類、濃度、温度、湿度、時間、周囲の環境および感情の状態によっては、快い「匂い」が次第に「臭い」と認識され、果てには不快感を感じる「悪臭」となって「悪臭公害」を引き起こす場合がある。たとえば、通りすがりに漂う焼肉のにおいが食欲をそそる快い匂いとして捉えられる一方で、常時そのにおいに晒される隣人にとっては、まさに悪臭に他ならない⁴⁾。

「悪臭」は、有害な大気汚染物質などとは異なり直接的に人体に健康被害や自然環境の悪化をもたらすわけではないが、不快感や倦怠感を引き起こし、ひいては食欲不振などを通じて間接的に人の健康や情緒に影響を及ぼす可能性がある⁵⁾。このため、悪臭防止法に基づき、各自治体において必要なエリアで悪臭規制が実施されている(なお、悪臭防止法については第3章で詳細に触れている)。

大気中に漂う「におい」物質は40万種類⁶⁾を超えると言われ、**図-2**のように無機質系と有機質系に大別される。無機質系の臭い成分としては、石炭や石油などの化石燃料の燃焼過程により生成される窒素酸化物(NO_x)、硫黄酸化物(SO_x)、その他アンモニア(NH₃)、硫化水素(H₂S)などが挙げられる。一方、有機質系の臭い成分は無機質系に比べ圧倒的に多く存在し、脂肪族類や芳香族類などの炭化水素を基本構造とし、水酸基(-OH)やカルボキシル基(-COOH)などの官能基が結合した揮発性有機化合物(VOC: Volatile Organic Compound)が大多数を占めている。このことは、地球上に生息する多様な生物種の数とも深い因果関係があると考えられる。ただし、すべての生物は有機化合物そのものであるため、単純な有機・無機の二分法では捉えきれない複雑さが存在している。

陸上生物にとって嗅覚は、捕食、天敵からの逃避、防衛、さらには子孫繁栄のための求愛活動など、遺伝的に備わった能

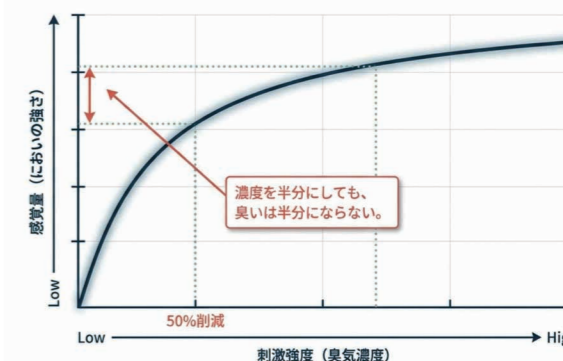


図-1 ウェーバーフェヒナーの法則の概念

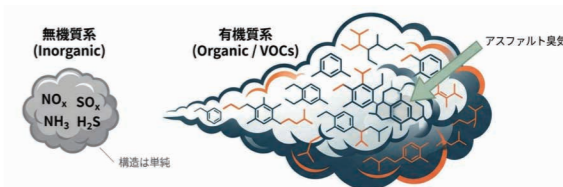


図-2 無機質系と有機質系臭気成分

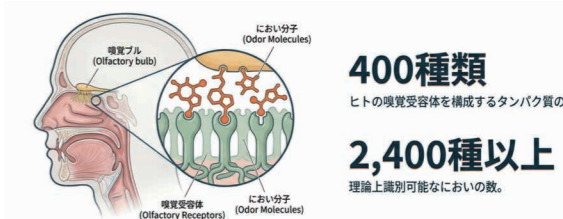


図-3 ヒトの鼻腔内にある嗅覚受容体

力として極めて重要な役割を担っている⁸⁾⁹⁾。生物が陸上で生息を始めた約5億年前から、嗅覚は多様な進化と退化を繰り返しながら現代に至っている。特に、陸上生物の中では、哺乳類が嗅覚を最も発達させ、その嗅覚受容体はVOCに非常に敏感である。同じ哺乳類であっても、アフリカゾウは最も多くの嗅覚受容体を有する一方で、進化の過程で陸上から海へ進出したイルカは嗅覚が退化している¹⁰⁾¹¹⁾。

図-3に示すようにヒトの鼻腔には約400種類の異なるタンパク質で構成された嗅覚受容体が存在し、これらの組み合わせにより理論上は2,400種以上のにおいを識別することが可能とされる。また、においは大気中における伝播機構上、その影響範囲が限定的である。なお、鼻腔の嗅覚受容体の構成は遺伝子により個体差が生じることが知られている¹²⁾¹³⁾。

陸上の大気を媒体とする嗅覚に対して、水中生物である魚類は水溶性物質に反応する嗅覚を有する。嗅覚に関するゲノム解析により、進化の過程や嗅覚の変遷が明らかになりつつあり、さらに近年の研究では、植物が被食時に特定の臭い成分を発散して捕食者である昆虫を追い払う事例も報告されている¹⁴⁾。

一方、近年、経済的豊かさを慢性的に享受している日本国民

においては、生活環境の質的意識の向上、地球規模の環境問題への関心、変化する食文化、多様化するにの嗜好、嗅覚への意識の向上、そしてアメニティの追求が顕著に表れている。このような背景から悪臭に対する規制が強化され、図-4のように近年では悪臭苦情の件数が漸近的に減少している。悪臭苦情は、図-5に示すように典型的な7公害(大気、水質、粉塵、騒音・振動、悪臭、土壌汚染、地盤沈下)の中でも騒音公害に次ぐ水準を維持しており、悪臭は感覚公害であるため、法規制をいかに強化しても完全に苦情をゼロにすることは不可能であるといわれている。

このような社会情勢を背景として、地方行政機関の指導の下、悪臭濃度規制が施行され、AP、特にR材を加熱再生するリサイクルプラント(以下、RPと記述)においても、排ガスの臭気濃度に関する規制が求められる地域が今後増加するものと予測される。

とりわけ、写真-1に示すAPから発生するブルースモークをはじめとする臭気が近隣住民から悪臭苦情として挙げられており、悪臭防止法に基づく対策が求められてから相当の年月が経過している。また、石油の蒸留精製の残渣であるアスファルト由来のこれらの悪臭は、有機質系の多様な臭気成分によって構成されていると考えられる。

2000年施行の循環型社会形成推進基本法の下で建設リサイクル法が2002年に施行され、道路舗装の打ち換え時に発生するアスコンガラのリサイクル率が99%を超えたことから、一定の成果が認められるものの、リサイクル化の加熱プロセスで発生するブルースモークおよび臭気対策については、経済的・技術的課題により、全てのAPに脱臭装置が普及するには至っていない。一方、悪臭防止法に基づく臭気規制は、地方自治体ごとに規制値が定められている。

3. 悪臭防止法と臭気測定

本章では、我が国における悪臭対策の歴史、法制度、測定技術、データ蓄積、専門人材育成の進展などについて、既往の主要論文から包括的な分析を行っている。1971年の悪臭防止法の制定から始まり、1995年の「臭気指数規制」導入、2000年の「臭気判定士制度」創設、そして「三点比較式臭袋法の開発」と「嗅覚閾値データの蓄積」に至るまで、日本独自の悪臭管理の基盤形成とその社会的意義を明らかにしている。これらの成果は、住民の感覚に即した実効性の高い政策を実現し、国際的にも高い評価を受けている。今後は、測定技術の高度化、データの精度管理、専門人材の育成強化を通じて、より効果的な悪臭管理が期待されることである。

以下では、「悪臭防止法の歴史的背景」、「三点比較式臭袋法の開発」、「嗅覚閾値データの蓄積」といった側面から、現代の臭気管理の基盤を形成する要素を体系的に整理し、今

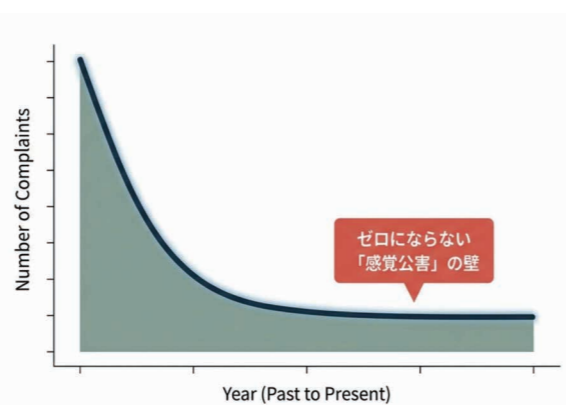


図-4 悪臭苦情の件数が漸近の傾向



図-5 悪臭苦情は騒音に次ぐ水準



写真-1 APの煙突から排出されるブルースモーク

後の課題と展望を明らかにしている。

3.1 悪臭防止法の歴史的背景

高度経済成長期に深刻化した公害問題に対して、国が対策を講じるための総合的な枠組として公害対策基本法(1993年に環境基本法へ移行)が1967年に制定される。欧米に追い付け追い越せの経済政策の下、急速に工業化が進み、国民が利便性や豊かさを享受し、社会に浸透していく。反面、その代償として典型7公害として知られる大気汚染、水質汚濁、土壌汚染、騒音、振動、地盤沈下、悪臭が社会問題となり、直接的に国民の生活環境を悪化させるとともに健康被害を拡大させていく。とりわけ、大気汚染と水質汚濁に関しては、四日市ぜんそくやイタイイタイ病などの公害病として歴史に深く刻まれ

ることになる。

悪臭は、直接的な健康被害をもたらさないが、嫌悪感や食欲不振など間接的な健康被害を招き、悪臭公害として社会問題にまで発展し、その対策法案の国会審議へと繋がっていくのである。

1971年(昭和46年)に制定された悪臭防止法は、規制地域内の工場や事業所から発生する悪臭に関する必要な規制を行うことにより、生活環境を保全し、国民の健康の保護を図ることを目的としている。そして同法は、我が国における悪臭対策の出発点と位置づけられる。制定当初は、特定悪臭物質の濃度を機器分析法で測定・規制するものであったが、複合臭や日常生活由来の臭気苦情が増加する中、従来の方法では十分な対応が困難であった¹⁵⁾。

このような悪臭防止法は、社会的要請や技術的進展に応じて改正が順次重ねられていく。とりわけ、1995年の「臭気指数規制」導入は、従来の機器分析法では対応困難だった複合臭や主観的苦情への対応を可能にし、全国の自治体での採用が進んでいく。臭気指数規制は、人の嗅覚を用いた官能試験法(三点比較式臭袋法)が公式測定法として採用されている¹⁶⁾。そして、全国の自治体で臭気指数規制の基盤となっていく。これにより、住民の感覚に即した実態把握が可能となり、複合臭や個人差への対応力が大幅に向上している¹⁷⁾。

さらに、2000年には「臭気判定士制度」が法的に位置づけられ、専門人材の育成と測定の信頼性向上が一層強化されている。臭気判定士制度は、官能試験法の実施における専門性を担保し、測定結果の一貫性と精度を確保するための資格制度である。厳格な試験と教育プログラムを通じて専門人材が育成され、住民の生活環境改善や事業者の臭気対策推進に大きく貢献している。この制度に基づく臭気判定士は、官能試験法と機器分析法を補完的に活用し、地域住民の生活環境改善に寄与することが求められる。

今後の課題としては、測定方法やパネル属性によるばらつき、試薬の純度や調製方法の違いなどが課題として指摘されており、複数機関によるデータの精度管理や官能試験法と機器分析法の補完的活用が求められている。

このように我が国における悪臭対策は、感覚公害としての悪臭問題が社会的課題となる中、法制度・技術開発・データ蓄積・専門人材育成の各側面で大きな進展を遂げていくのである¹⁸⁾。

一方、同悪臭防止法では、悪臭による被害の特性に鑑み指定地域制度が取られている。これは、悪臭による被害は、本質的には人に不快感や嫌悪感を与えるということにとどまるものであり、人に悪臭を感じさせることがない地域においては、悪臭の排出を規制する必要がないと考えられること、また、悪臭被害は一時的なものであり、食品等に蓄積され摂取した人体に影響を及ぼすといったことはないこと、現に悪臭規制が必

要な地域に限り規制すればよいと考えられるからである。

加えて、都道府県知事又は市長が規制地域を定め、その地域に対して、その自然的・社会的条件を考慮して、環境省令で定められた範囲で規制基準を定めることとされている。そして、規制対象は、規制地域内に設置されている工場その他の事業場とされており、業種や規模、経営主体の如何を問わず、工場その他の事業場における事業活動に伴って発生する悪臭全てが規制の対象とされる¹⁹⁾。

なお、同法では工場や事業場から発生する悪臭を固定発生源として規制の対象としており、自動車・船舶・航空機などの移動発生源や、建設現場・個人住宅・野外焼却といった一時的・個人発生源は規制対象とはならない。近年は、これら規制対象外の発生源に関する苦情が全体の約半数を占め、特に野外焼却や個人住宅に関する苦情が増加傾向にある²⁰⁾。

3.2 臭気指数規制と三点比較式臭袋法の導入

現行の悪臭防止法では、22種類の特定悪臭物質が指定されており、その排出濃度を対象として規制が行われる。機器分析により臭い成分を特定し濃度を定量することは、最近の分析技術をもってして十分な精度で定量可能である。しかしながら、悪臭対策としては、特定悪臭物質の濃度規制を行うだけでは不十分で、臭いの本質にまで迫る必要がある²¹⁾。

臭い物質の濃度と感覚量である臭いの強さとの間には線形関係がなく、ウェーバーフェヒナーの法則が示すとおり、非線形な指数関数的関係にある。具体的には、人の嗅覚で感じる臭いの強さを半減させるためには、臭気成分の濃度をおおよそ90%以上削減する必要があることを意味している。さらに、臭いの質や組み合わせの違いで臭いの感じ取り方が異なってくることを加味すると、人間の感覚量である臭いの強さを機器分析による臭気成分濃度と関連付けるのは極めて困難である²²⁾。

このような課題を克服するために、前節でも触れた「臭気指数規制」の導入へと至るのである。とりわけ、最初に東京都条例で施行された「三点比較式臭袋法」という人の嗅覚を用いた官能試験法が機器分析法を補完する公式測定法として採用する自治体が増加していく。

このことにより、従来の機器分析法では対応困難だった住民の感覚に即した実態把握を可能とするのみならず、複合臭や個人差のある主観的苦情への対応力が大幅に向上し、臭気指数規制の基盤を築いていくのである²³⁾。

3.3 嗅覚閾値データの蓄積と測定方法の概要

三点比較式臭袋法を用いた223物質にわたる嗅覚閾値がデータベースとして蓄積されている。嗅覚閾値は、機器分析法と官能試験法とを関連付ける基礎となるデータで、人の嗅覚で感受するか否かの境界濃度を示している。今では、このデータ

ベースが悪臭対策や労働衛生、健康影響評価など幅広い分野で活用されている。そして、これらのデータベースは、臭気指数規制の科学的根拠を支えるとともに、国際的にも高い評価を受けるようになってきている²⁴⁾。

臭気の官能試験において従来から用いられてきた注射器法は、容量不足や臭気の吸着ロス、測定客観性の欠如などの課題があった。これらの課題を克服するために、科学的かつ実用的な測定法として三点比較式臭袋法が開発されるに至っている²⁵⁾²⁶⁾。

図-6に示す三点比較臭袋法の分析手順は、まず臭気の発生源から空気を吸引し臭気サンプリングバッグに採取する。臭気サンプリングバッグは、付臭(物理的な吸着)が少ないPET(Poly Ethylene Terephthalate)製の袋などを用いる必要がある。そして、パネルと呼ばれる、嗅覚検査に合格した6名以上の被験者を選任する。嗅覚検査は、人口の5%存在するといわれる嗅覚異常者をパネルから除外するために実施する。パネルは特別な嗅覚を有している必要はなく、人として一般的な嗅覚であれば問題はない。

つぎに、採取した臭気を、臭いが感じられなくなるまで無臭の空気で段階的に薄めていく。三点比較式臭袋法に基づき、臭いの付いた袋1つと、無臭の袋2つを用意してパネルに提示し、3つの袋の中から臭気を含む袋をパネルが選択する。そして、パネル全員が臭いを感じなくなるまでこの希釈操作を繰り返し、その希釈倍率から「臭気濃度」を求める。最終的に臭気濃度を対数変換して「臭気指数」を算出する。このように、三点比較式臭袋法は、袋の材質選定やパネル人数の検討、閾値の確率的定義など、科学的根拠に基づいた基本設計が行われている。

以上のような一連の臭気分析業務を国家資格である臭気判定士が担っている。

4. アスファルト由来のVOC(臭気成分)

4.1 アスファルト

4.1.1 歴史

図-7に示すとおり、アスファルトの利用は古く、古代エジプト文明にまで遡ることができる。紀元前1000年頃、ツタンカーメン王などのミイラの防腐剤として天然アスファルトが使用された痕跡が確認されている。さらに、紀元前600年頃のメソポタミア文明期、古代都市バビロンにおいて王の行列道路に初めてアスファルト舗装が施されたとの記録も残っている。これらの天然アスファルトは、地表に露出した原油が火山活動による熱履歴を受けた後、大気中の酸素および太陽光(紫外線)の影響下で低分子成分が揮発し、重質分が重合や縮合反応を経て高分子化して蓄積したものと考えられている。

時代を下り1859年、アメリカのエドウィン・ドレークがペンシル

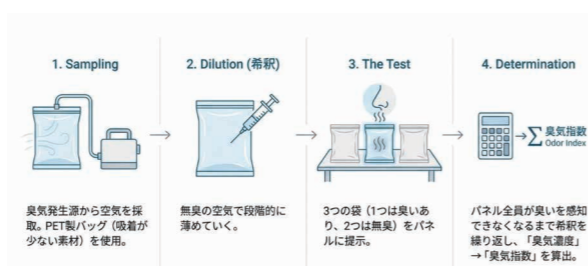


図-6 三点比較式臭袋法による分析手順

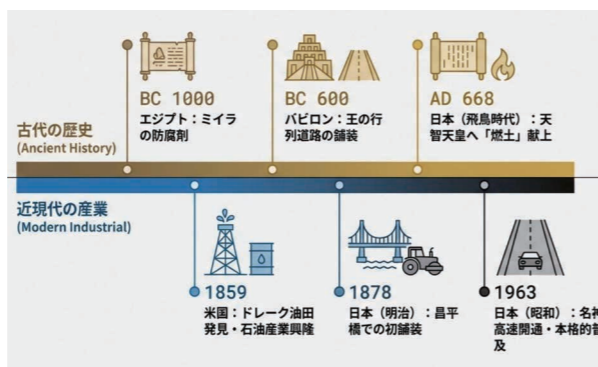


図-7 アスファルトの歴史

ベニア州で油田を発見し、機械化による石油産業を興した。続いてジョン・ロックフェラーがスタンダード・オイルを設立し、アメリカ全土の石油流通を支配したことは歴史的に有名である。その後、1877年にドイツのオットーがガソリンエンジンを、1893年にディーゼルがディーゼルエンジンを発明したことにより、自動車の普及に拍車がかかった。

燃料需要の増大に伴い産油量が増加し、副次的に生成されるアスファルトが安価な道路舗装バインダーとして定着した。経済成長と共にいわゆるモータリゼーションが進展し、アスファルト舗装道路の建設が加速したのである。

一方、日本においては、『日本書紀』に飛鳥時代の668年、天智天皇即位式に際して「燃土」と称される越の国(現在の新潟県)産のアスファルトが献上された記述がある。江戸時代には秋田県産の天然アスファルトを用いた油煙(墨の原料)製造が始まり、1878年(明治11年)には同県産のアスファルトを用いて東京の昌平橋で国内初のアスファルト舗装が施工された。昭和初期以降は原油の輸入・精製による石油アスファルトの生産が始まり、戦後の高度経済成長と1963年の名神高速道路開通を契機に、本格的な普及期を迎えた。

4.1.2 概要

アスファルト舗装のバインダーとしてのアスファルトは、適度な流動性・粘着性を有し、温度変化により流動性を調整可能であり、防水性が高く水よりも重いという特徴を持つ。常温では固形で、物理的・化学的に安定しており人畜無害である。

アスファルトは、天然アスファルト、石油アスファルト、改質アス

ファルトに大別される。天然アスファルトは自然界で産出されるものであり、石油アスファルトは原油精製過程の残渣油として生産される。改質アスファルトは、石油アスファルトにゴムや樹脂等を添加し性能を向上させたものである。

近年、エネルギー供給構造高度化法などの政策により、原油精製プロセスにおいて付加価値の高い軽質油の収率向上が図られている。その結果、残渣油であるアスファルトに対しても減圧下での分解処理(クラッキング)等が施される傾向にあり、生産量の減少や価格上昇、さらにはアスファルト性状の変化が指摘されている。

4.1.3 構成成分

石油アスファルトは、原油の蒸留精製残渣である。原油は沸点の違いによりナフサ、ガソリン、灯油、軽油、重油などに分留され、最後に残るのがアスファルトである。原油の主成分は炭化水素であり、パラフィン系、ナフテン系、芳香族系に分類される²⁷⁾。一般的に沸点は、パラフィン系 < ナフテン系 < 芳香族系の順で高くなる傾向がある。

アスファルトは高分子で多様な炭化水素の混合物であり、熱的に不安定な成分も多く含むため、組成は常に変動し得る。便宜上、図-8に示すように溶剤のノルマルペンタンに不溶な「アスファルテン」と、可溶な「マルテン」に大別される。

アスファルテンは分子量500~5,000の範囲に及び、バナジウムやニッケルなどを含むポルフィリン化合物を有し、ねじれた二次元構造を呈する。アスファルトの黒色は、この高分子多環芳香族が可視光を吸収することによる。

一方、マルテンは分子量200~1,500と比較的小さく、さらにプロパンに可溶な「油分」と不溶な「レジン」に分類される。これらは炭素数C5~C20程度の炭化水素が主成分で、アスファルトの流動性を司る。図-9のようにアスファルトは、アスファルテンがミセルとしてマルテン中に分散したコロイド構造を形成していると考えられている。

4.2 VOC(臭気成分)生成メカニズムの検討

4.2.1 アスファルトの蒸気圧(VOC発生量)

アスファルト由来のVOC(揮発性有機化合物)発生量は、その蒸気圧に大きく依存する。常温では固形であるが、加熱により流動点(65~70℃)を超えると、低沸点のパラフィン系、ナフテン系、芳香族系炭化水素などの蒸気圧が増大し、順次揮発していく。特にパラフィン系は温度上昇に伴う粘度低下により対流が活発化し、蒸発が促進される。

また、JIS規格では163℃で5時間加熱した際の薄膜加熱質量変化率が0.6%以下と定められているが、これは微量ながら揮発成分が存在することを示している。さらに、空気中の酸素による酸化作用が加わると、高分子成分が分解し、揮発性の高い(低分子の)VOCが生成される。

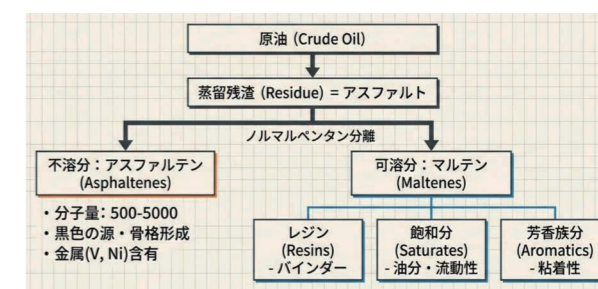


図-8 アスファルトの構成成分

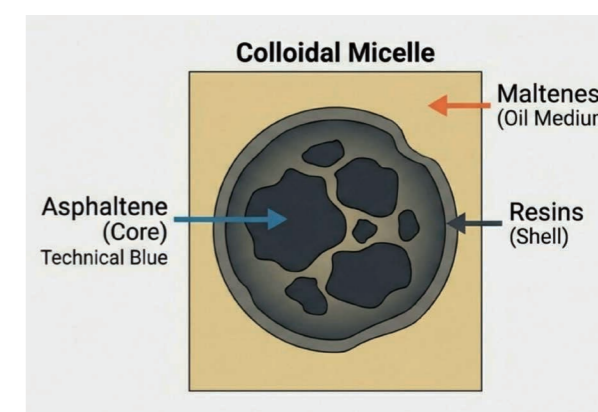


図-9 アスファルトのコロイド構造

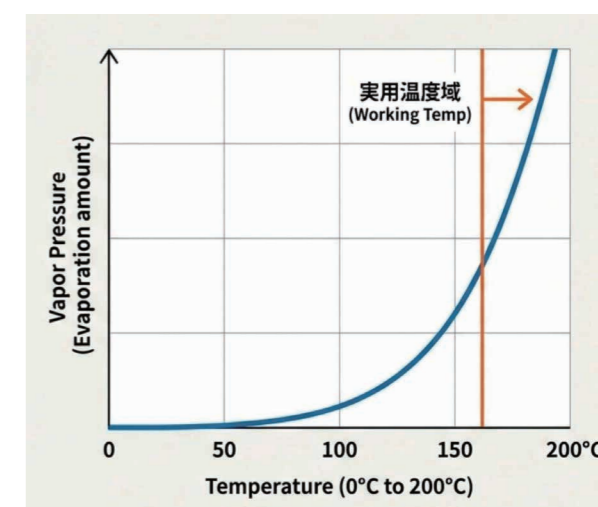


図-10 アスファルトの蒸気圧

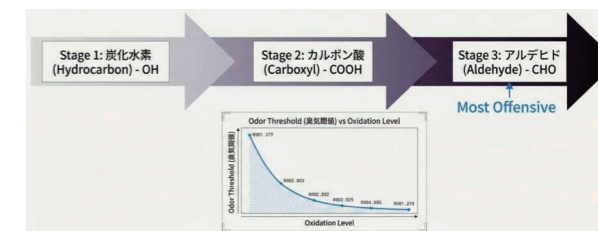
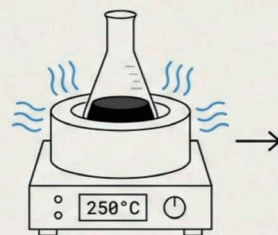


図-11 VOCの酸化による臭気成分の変化

通常出荷温度である160℃前後での揮発分量を把握するため、ストレートアスファルト(80-100)の蒸気圧を無酸素(還元雰囲気)下で測定した結果を図-10に示す。この結果は、原油精製の残渣油であるアスファルトにも多くの低沸点成分が

実験A：緩慢加熱 (Indirect Heat)



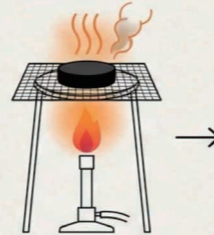
主な生成物：アルデヒド類 (Aldehydes)

酸化臭 (Oxidized Oil Smell)

硫黄化合物は不検出

図-12 実験A

実験B：直火加熱 (Direct Flame)



主な生成物：硫黄化合物 (Sulfur Compounds)

腐卵臭・刺激臭 (H₂S, Mercaptans)

高熱による分子破壊

図-13 実験B

残留していることを裏付けている。実際のプラントでは酸素が介在するため、酸化分解によりさらに蒸気圧が高まること推察される。そして、図-11に示すように酸化が進むことにより生成するVOCの多くは、芳香族系化合物や、カルボニル基(-CHO)、カルボキシル基(-COOH)、ケトン基(-C=O)などの官能基を有する物質であり、これらがアスファルト特有の悪臭原因物質として作用していると考えられる。

4.2.2 予備実験

加熱プロセスの違いによる臭気成分の変化を確認するため、以下の実験を行った。

4.2.2.1 実験A

図-12に示すように密閉容器内でアスファルトを250℃前後に加熱し、空気を吹き込んで発生させた臭気成分をガスクロマトグラフィ(GC)で分析した。これは、Rドライヤ後半部(160℃前後)やミキサ、サイロでの貯蔵中に相当する条件である。

4.2.2.2 実験B

図-13に示すようにR材を直火で加熱し、発生した臭気成分をGC分析した。これは、Rドライヤ前半部で高温熱風の輻射熱を受け、R材微粒分やドライヤ付着物が過熱された状態に相当する。

4.2.2.3 考察

実験Aでは硫黄化合物が検出されず、酸化反応によるアルデヒド類の増加が著しかった。一方、実験Bではアルデヒド類に加え、硫化水素、二酸化硫黄、メルカプタン類などの硫黄化合物が多く検出された。

この結果から、加熱条件により悪臭成分の構成は大きく異なり、特に高温部では硫黄系成分に起因する強い悪臭が発

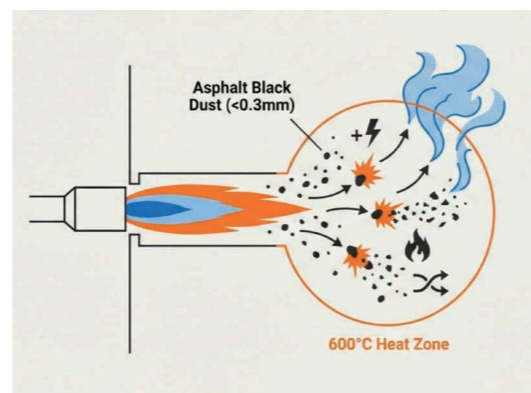


図-14 R材微粒子の飛散と不完全燃焼(ドライヤ入口部)

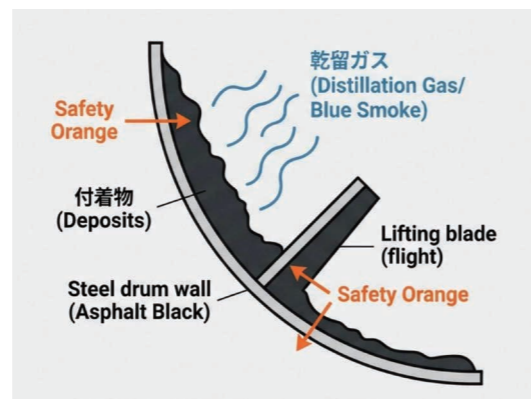


図-15 ドライヤ内部付着物の乾留

生することが確認された。また、揮発したVOCが外気により急冷されることで過飽和状態となり、凝縮してブルースモーク化することが示唆された。

4.2.3 RドライヤにおけるVOC(臭気成分)生成メカニズムの推察

以上の知見を基に、Rドライヤ内部でのVOC生成メカニズムを以下の3つのプロセスに分類して考察する。

4.2.3.1 R材微粒子の飛散と不完全燃焼(ドライヤ入口部)

R材に含まれる0.3mm以下の微粒子は比表面積が大きく、アスファルト分を多く含んでいる。図-14に示すようにこれらがドライヤ投入時に飛散し、600℃以上の高温熱風と直接接触することで瞬間的に加熱(燃焼)される。この際、熱分解や酸化分解が急激に進行し、メチルメルカプタンなどの硫黄化合物を含む強い臭気成分が発生する。

4.2.3.2 内部付着物の乾留(ドライヤ内部)

図-15に示すドライヤ内部、特にバーナ近傍の壁面やリフター(羽根)には、0.6mm以下の細粒分が付着しやすい。初期段階では水分を媒体として付着するが、温度上昇に伴い水分が蒸発すると、熔融したアスファルトがバインダーとなり強固に固着する。この付着物が熱風の輻射や伝熱を受けて加熱(乾留)されることで、高濃度のブルースモークと悪臭成分(硫黄化合物を含む)が揮発生成される。

4.2.3.3 加熱R材からの揮発(ドライヤ排出部)

図-16のようにドライヤ内をR材が移動し、所定の160℃付近まで昇温されたR材本体から発生する揮発成分である。ここでは温度が比較的低いため、発生するVOCは主に160℃以下の低沸点物や、酸化により生成したアルデヒド類などの炭化水素が主体となる。硫黄化合物の割合は少ないが、排ガス中の酸素により酸化が進行している。

4.2.3.4 凝縮および成長過程

Rドライヤから排出されるガス、ミスト、ダストが混在した排ガスは、ドライヤ出口付近で約200℃の温度を持つ。この段階でVOCの多くは気体として存在するが、16%前後の酸素濃度下で酸化分解が進み、図-17のように低分子のアルデヒドやケトン等へ変化していく。

その後、集塵機や煙突を経て大気へ放出される過程で温度が低下すると、飽和蒸気圧の低下に伴い、ダストやミストを核としてVOCの凝縮(液化)が進行する。煙突から排出され外気でさらに冷却されると凝縮が加速し、微細な粒子となって太陽光を散乱させ、視覚的に青く見える「ブルースモーク」となる。これは、図-18に示す粒子径が光の波長より小さい場合に生じるレイリー散乱(チンダルブルー現象)によるものである。なお、粒子径が大きくなるとミー散乱により白煙として視認されるようになる。

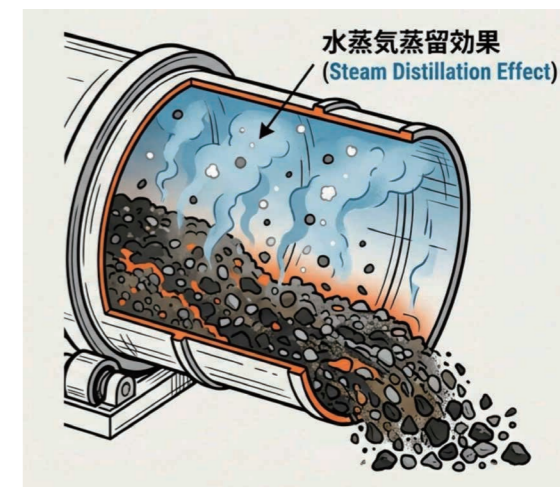


図-16 Rドライヤ排出部の加熱R材からの揮発

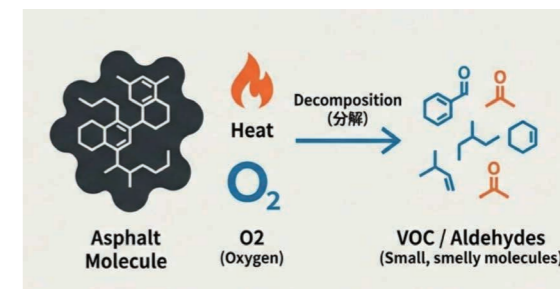


図-17 VOC(臭気成分)の酸化分解

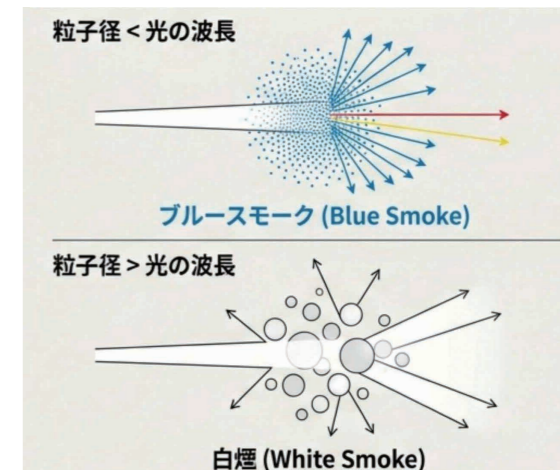
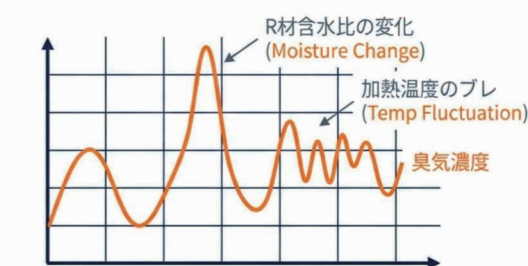


図-18 チンダルブルー現象

臭気の変動性 (Variability)



測定とサンプリングは、プラントが「定常状態」にある時のみ有効。

図-19 多様な要因による臭気の変動

5. アスファルトプラントの悪臭対策技術

5.1 概要

AP,とりわけR材を再利用するRDライヤから発生する揮発性有機化合物(VOC)に起因する臭気は、リサイクル合材の製造黎明期より継続的な課題となっている。本章では、筆者らがこれまで実施してきた悪臭対策の技術的変遷を整理し、各脱臭方式の原理とAPへの適応性について概観する²⁸⁾。

5.2 臭気の発生源

RPの運用において、悪臭対策を講じる上で留意すべき発生源は多岐にわたり、**図-19**のように臭気が常に変動している。基本的には発生源を断つことが理想であるが、R材の乾燥加熱というプロセスを経済合理的に行う以上、臭気の発生を完全に回避することは困難である。なお、マイクロ波加熱や誘導加熱などの電磁氣的加熱法を用いれば、原理的に燃焼排ガスが発生せず二次処理設備の縮小が可能となるが、設備コストやエネルギー効率の観点から現状では普及には至っていない。したがって、既存の燃焼加熱プロセスにおける発生源対策が主となる。

5.2.1 燃料と燃焼管理

使用燃料に含まれる硫黄分は、燃焼により硫酸化物(SOx)となり刺激臭の原因となる。そのため、A重油から低硫黄の灯油、あるいはガス(LNG等)への燃料転換が有効な対策となる。また、バーナのメンテナンス不足による不完全燃焼は、排ガス中の未燃炭化水素を増加させ、その後の酸化反応を経てアルデヒド類やケトン類といった強い臭気物質を生成させる要因となる。

5.2.2 骨材の性状

バージン骨材に関しては、骨材自体に硫黄分や有機質が含まれる場合、加熱工程で硫酸化物やタンパク質由来の焦げ臭が発生することがある。

R材に関しては、含有するアスファルト分が直接的な悪臭発生源となる。R材の含水比が低いとドライヤ前半部での微粒分飛散により急激な加熱(乾留)が起こり臭気の増加に繋がる。逆に含水比が高いとRDライヤ内部への付着を引き起こし、熱効率を低下させる要因となる。また、粒度が細かい場合も、飛散ダストの増加に伴い臭気問題が顕在化しやすい。

5.2.3 運転条件の影響

バーナ燃焼により生成する熱風の温度が高いほど、ドライヤの熱効率は向上する。しかしながら、高温熱風はR材に含まれるアスファルトの熱分解や酸化分解を促進させ、VOC(臭気成分)の発生量を増加させる。当社のRPでは、この臭気抑制

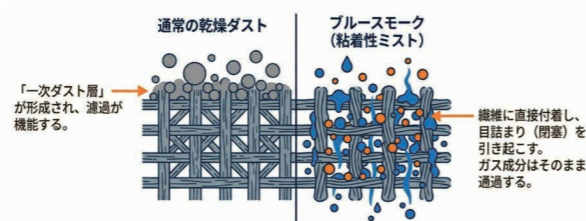


図-20 粘着性ミストによるバグフィルタの目詰まり

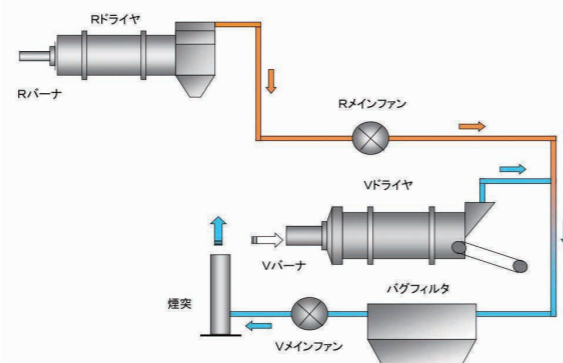


図-21 Vドライヤのダストを濾過助剤として利用するV+R併用バグフィルタ集塵システム



写真-2 リサイクルドライヤ専用のミストフィルタ(集塵機)

に対応するため、熱風温度を従来の1000℃から800℃、さらには600℃へと順次低温化してきた。この際、熱風温度の低下に伴う熱効率(燃費)の悪化を防ぐため、EGR(Exhaust Gas Recirculation:排ガス再循環)技術の導入やRDライヤの容量最適化を図ることで、省エネルギー性能を維持している。

5.3 黎明期アスファルトプラントにおける臭気対策

初期のAPにおける臭気対策は、煙突の高層化による拡散効果の利用や、集塵機(バグフィルター)による粒子状物質の除去が主であった。

5.3.1 バグフィルタによる濾過メカニズム

バグフィルタによる処理では、濾過助剤の活用が不可欠である。フェルト濾布を用いた三次元的な濾過において、濾布表面に形成される「一次ダスト層」が実際の濾過機能を担う。し

かし、RDライヤから発生するブルースモークのような粘着性ミストが直接濾布に付着すると、**図-20**のように目詰まりを誘発し圧損が上昇する。そのため、**図-21**のシステムが示すとおり、粘着性のないVDライヤからのバージンダストを濾過助剤として「一次ダスト層」を形成させ、さらにその上に粘着性ミストとバージンダストを混合させた「二次ダスト層」を形成させることで、バルスエアによる脱塵・更新を可能にしている。

また、**写真-2**に示すようなRDライヤからのブルースモークや粘着性ミストを補足するミストフィルタも社会実装された。ただし、使い捨て方式の濾材を採用していたことから、ミスト成分が濾材に蓄積され臭気対策としては限定的であった。

5.3.2 規制の強化と本格的脱臭の必要性

上記の手法は着地濃度の低減には一定の効果を示したが、悪臭防止法の施行および規制地域の拡大に伴い、人間の嗅覚に基づく「臭気指数規制(二号規制)」が導入された。これにより、単なる拡散や物理的濾過だけでは対応が困難となり、物理化学的・生物化学的な手法を用いた本格的な脱臭システムの導入が必要となったのである。

5.4 各種脱臭方式とアスファルトプラントへの適応性

産業分野で採用されている脱臭法には、燃焼法、薬液洗浄法、活性炭吸着法などがあり、多くの実績を有している。これらの方式をAPに適用する場合、脱臭効率はもとより、経済性、安全性、維持管理の容易さを総合的に評価し、かつ生産性に悪影響を与えないシステムを選定する必要がある。以下に、APの排ガス(特にRDライヤ排ガス)を処理する場合の各方式の特徴と適応性を論じる。

5.4.1 燃焼法

APから発生する悪臭(可燃性有機化合物)の対策として、燃焼法は極めて有効な手法である。本手法は、悪臭物質を高温状態で酸化分解し、無臭の二酸化炭素(CO₂)と水(H₂O)に変換する方式である。

5.4.1.1 直接燃焼法

悪臭成分を600~800℃(実用的には750~800℃)の高温酸素雰囲気下で一定時間滞留させ、完全燃焼させる方式である。**写真-3**に直接燃焼式脱臭装置の全景を、**図-22**にその内部構造を、**図-23**にそのシステムフローを示す。

特徴: 構造が単純であり、ブルースモークを含む高濃度の複合臭気処理に適している。脱臭効率は95%以上と非常に高い。

APへの適応性: 燃焼温度が高いため燃料消費量が多くなるが、**図**のように廃熱を熱交換器で回収することでランニングコストを低減できるため、APには最も適した方式である。



写真-3 直接燃焼式脱臭装置の燃焼室

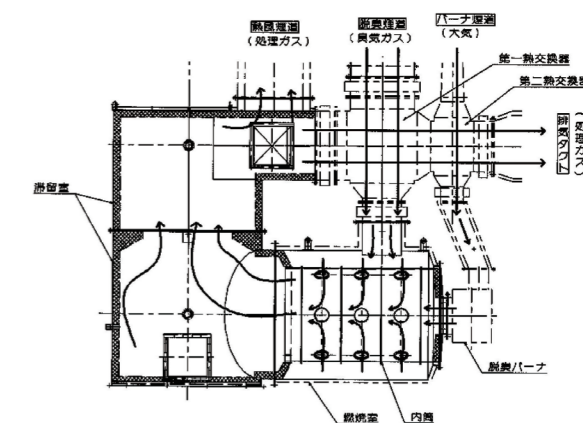


図-22 直接燃焼式脱臭装置の内部構造

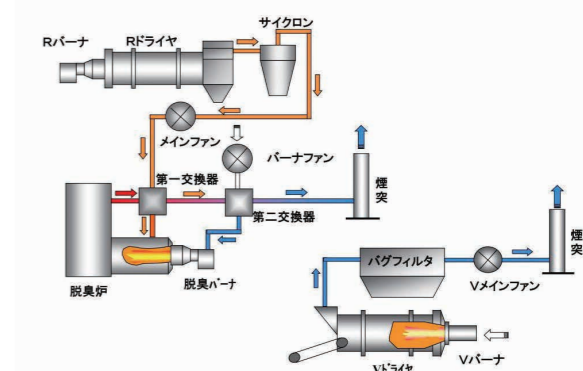


図-23 APに搭載した脱臭システムのフロー図

注意: 触媒毒と劣化要因 (Catalyst Poisons & Risks)

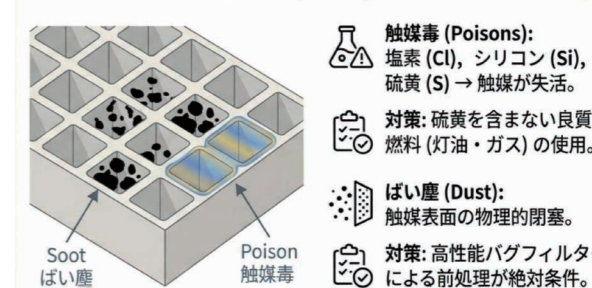


図-24 触媒燃焼脱臭法の短所

5.4.1.2 触媒燃焼法

白金などの触媒作用を活用し、直接燃焼法よりも低い温度(200~400℃、実用上は300~350℃程度)での酸化分解を可能にした方式である。

特徴: 低温反応が可能であるため、省エネルギー性に優れる。

APへの適応性: 図-24に示すようにAP排ガスには触媒毒となる硫黄分や、触媒表面を閉塞させる微細なダスト・ミストが含まれるため、触媒の劣化・失活リスクが高い。したがって、バグフィルタ等の厳格な前処理と、硫黄分を含まない良質な燃料の使用が必須条件となり、維持管理の難易度が高い。



写真-4 蓄熱燃焼(RTO)式脱臭装置の全景

5.4.1.3 蓄熱燃焼法(RTO)

セラミックス製蓄熱体を用い、排ガスの流れを周期的に反転させることで熱回収を行う方式である。

特徴: 90%以上の極めて高い熱交換効率を有し、ランニングコストが低い。

APへの適応性: 省エネ効果は高いが、蓄熱体へのダスト付着や閉塞を防ぐため、触媒燃焼法と同様に確実な前処理装置が必要となる²⁹⁾。写真-4に蓄熱燃焼(RTO)式脱臭装置の全景を、図-25に全体図を示す。

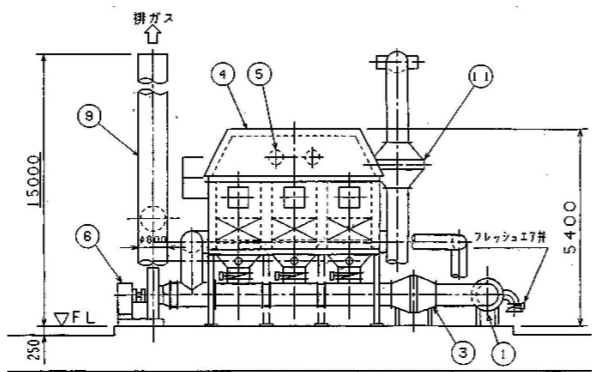


図-25 蓄熱燃焼(RTO)式脱臭装置の全体図

5.4.2 洗浄法(薬液洗浄)

臭気成分を水や薬液(酸、アルカリ、酸化剤)と気液接触させ、吸収・分解除去する方式である。図-26に洗浄法概念図を、写真-5に実際のAPで実施した薬液洗浄法によるフィールドテストの風景を示す。

特徴: 対象となる臭気成分(酸性・塩基性等)に応じて薬液を選定する。

APへの適応性: 効率的な吸収のためには排ガス温度を70℃以下に冷却する必要がある、大型の冷却設備(クーリングタワー等)が必要となる。また、APの臭気成分は多岐にわたるため単一の薬液では処理しきれず、脱臭効率は概ね70%程度に留まることが多い。このため、活性炭吸着等の二次処理との併用が必要となる場合が多い³⁰⁾。

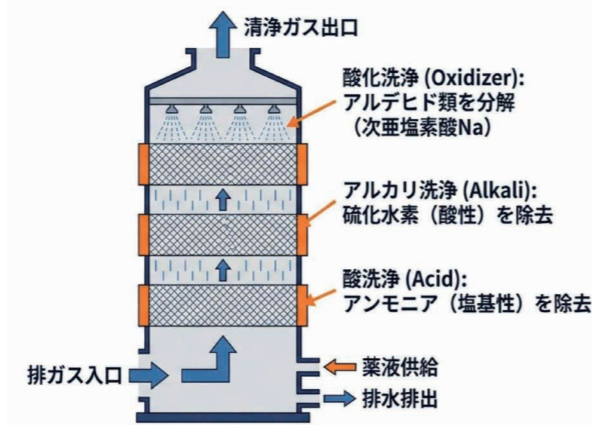


図-26 洗浄法(薬液洗浄)の概念図

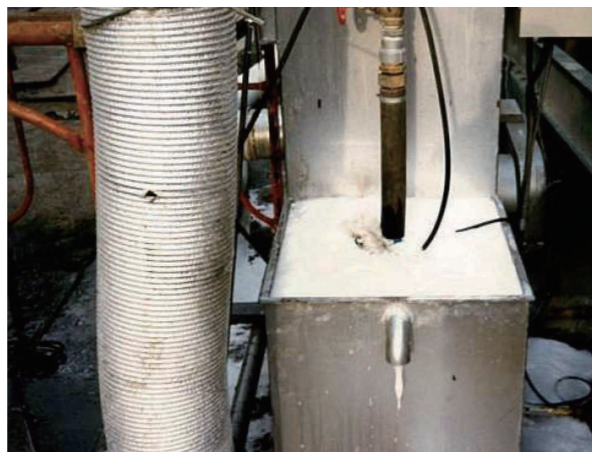


写真-5 薬液洗浄法によるフィールドテストの風景

5.4.3 吸着法

活性炭などの多孔質材を用い、臭気成分を物理的に吸着除去する方式である。

特徴: 低濃度の臭気に対する仕上げ脱臭として有効である。

APへの適応性: 吸着性能は温度依存性が高く、効率を維持するには排ガスを40℃以下まで冷却する必要がある。また、AP特有のブルースモーク(粘着性ミスト)やダストが活性炭表面に付着すると吸着能力が著しく低下するため、高性能な前処理が不可欠である。さらに、飽和した活性炭の交換や再生処理に伴うコストや手間も課題となる³¹⁾。

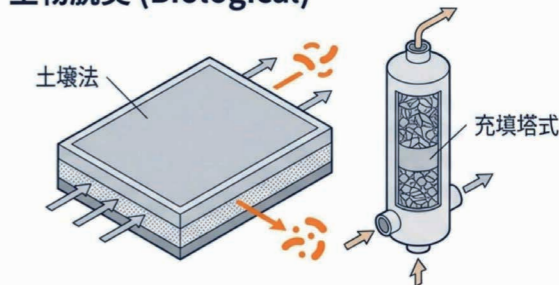
5.4.4 生物脱臭法

微生物の代謝能力を利用して臭気成分を分解する方式である。土壌脱臭法や充填塔式生物脱臭法がある。図-27に生物脱臭法の概念図を示す。

特徴: ランニングコストが低く、低濃度臭気の処理に適している。

APへの適応性: 処理速度が比較的遅いため、APのような大風量の排ガスを処理するには広大な設置面積(土壌脱臭の場合)や巨大な設備が必要となる。また、微生物の生育環境(水分・温度)の維持管理が必要であり、間欠運転が多いAPへの適用は限定的である³²⁾。

生物脱臭(Biological)



微生物が臭気を栄養源として分解。低濃度臭気に有効。

Pros/Cons (利点・欠点)

- 土壌法は広大な敷地が必要。
- 充填塔式はコンパクトだが担体管理が必要。

図-27 生物脱臭法の概念図

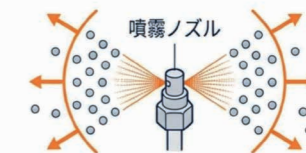
5.4.5 消臭・脱臭剤

植物精油や化学反応剤を排ガスに噴霧または混合し、マスキング、中和、化学反応により臭気を低減させる方式である。

特徴: 設備が比較的簡易であり、導入コストが安い。

APへの適応性: 根本的な脱臭(成分の分解除去)ではなく、臭いの質を変える、あるいは薄める効果が主となる。排気ダクト内への噴霧や、敷地境界での空間噴霧など、補助的な対策として用いられることが多い。薬剤の種類(植物精油系、化学反応系など)により効果が異なるため、現場の臭気質に合わせた選定が必要である³³⁾³⁴⁾。図-28に消臭・脱臭剤の概念図を、表-1に主な種類と特徴を示す。

消臭・脱臭剤(Cheical Agents)



- 化学反応 中和・分解
- 相殺 感覚的な打ち消し
- マスキング 香りによる被覆

Use Case (適用例)

敷地境界での噴霧(植物精油系)やスクラバーへの添加。

図-28 消臭・脱臭剤の概念図

表-1 消臭・脱臭剤の主な種類と特徴

薬剤の種類	主な特徴と用途
植物精油系	フィトンチッドなどの多種多様な成分を含有し、マスキング・化学反応・相殺作用を併せ持つのが特徴である。安全性が高く、大気中や室内への噴霧に適している。
化学反応系	中和、酸化還元、縮合反応等により、臭気成分そのものを化学的に変換する。主にスクラバー装置の循環液等に添加して使用される。
微生物・その他	微生物や酵素の作用を利用するタイプや、芳香によるマスキングを主体としたものなどがある。

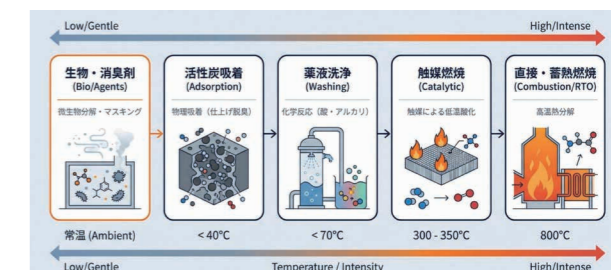


図-29 各種脱臭法の概要比較

方式(Method)	脱臭効率(Efficiency)	導入コスト(Initial Cost)	運転コスト(Running Cost)	維持管理(Maintenance)	設置スペース(Space)
直接燃焼法(Direct Combustion)	High (◎)	Low (○)	High (×)	Easy (◎)	Med (△)
蓄熱燃焼法(RTO)	High (◎)	High (×)	Low (◎)	Med (○)	Large (×)
触媒燃焼法(Catalytic)	Med/High (○)	High (×)	Med (○)	Hard (×) (×-Poison Risk)	Compact (◎)
薬液洗浄法(Washing)	Low (△, ~70%)	Med (△)	High (×) (×-Wastewater)	Hard (×)	Large (×)
活性炭吸着法(Adsorption)	High (◎-Finish)	Med (△)	High (×) (×-Replacement)	Med (△)	Large (×) (×-Cooling)

◎ Excellent, ○ Good, △ Average, × Poor/High Cost

図-30 各種脱臭法の機能比較

6. 将来展望

本稿では、APにおける悪臭・ブルースモークの発生メカニズムとその対策技術の変遷について論じてきた。循環型社会の形成においてR材の活用は不可欠であるが、それに伴う臭気問題は避けて通れない課題である。これまでの考察に加え、近年の「脱炭素社会」への要請を踏まえ、今後のAPにおける脱臭技術のあり方と展望について、以下の3つの観点から論じる。

6.1 APの特性に適した脱臭方式の確立

第5章および別途実施した分解性能評価実験で明らかになった通り、AP、特にRDライヤから排出されるガスは、水分、微細なダスト、粘着性のあるミスト(ブルースモーク)、および触媒毒となる硫黄分を含んでいる点が特徴である。省エネルギー性の観点からは触媒燃焼方式が有利であるが、AP特有のダストや被毒物質による性能低下のリスクを回避するためには、厳格な前処理と維持管理が不可欠となる。対して、直接燃焼法は、800℃以上の高温と滞留時間を確保することで、ブルースモークを含む高濃度の複合臭気を確実に酸化分解でき、ダストによる閉塞トラブルにも強い。現段階ではAPの運用に最も適したロバスト(堅牢)な方式であると結論付けられる。今後は、この直接燃焼法を主軸としつつ、次節で述べるエネルギー効率の改善策と組み合わせることが標準的な解となるであろう。

6.2 高度脱臭と脱炭素(省エネ)の両立

直接燃焼法は高い脱臭効果を持つ反面、化石燃料を消費して高温状態を維持するため、CO₂排出量が増加するという環境面でのジレンマ(トレードオフ)が存在する。カーボンニュートラルが叫ばれる昨今、単に臭いを燃やせばよいという時代ではなくなりつつある。したがって、将来のAPには、脱臭熱源をプロセス全体で有効活用する以下の技術的アプローチが不可欠となる。

6.2.1 熱のカスケード利用(RAVシステム等)

写真-6と図-31に示すように脱臭炉で発生した800℃～1200℃の高温熱風を、単に排熱回収するだけでなく、新材ドライヤ(VDライヤ)やRDライヤの熱源として再利用(カスケード利用)するシステムの導入である。これにより、システム全体の熱効率を向上させ、脱臭に伴う燃料消費の増加分を相殺、あるいはそれ以上の省エネ効果を得ることが可能となる。図-32は、熱交換器を増設することにより、熱分配比率を最適化したRAVシステムの進化型である。このことにより、R材の混入比率を70%まで高めた運用を可能にしている。



写真-6 RAVシステムの社内仮組風景

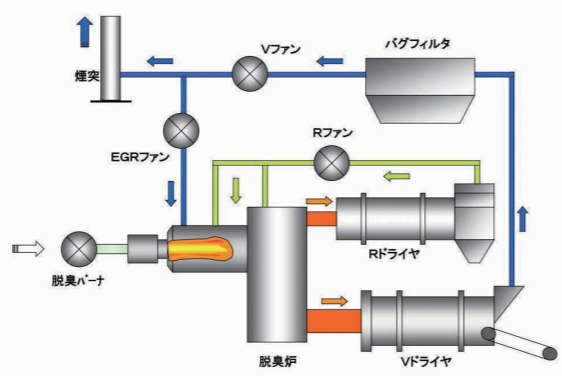


図-31 RAVシステムのフロー図

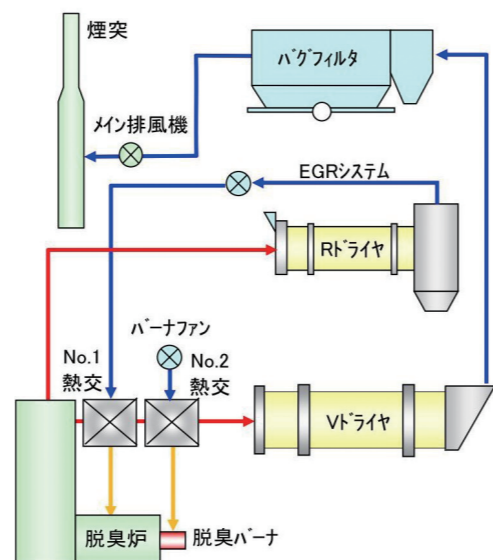


図-32 RAVシステムの進化型

6.2.2 潜熱回収技術とプロセスの分業化

APの省エネルギー化は「限界」に近づいていると言われるが、排ガスに含まれる水蒸気の凝縮潜熱の回収には未だ大きな余地が残されている。例えば、図-33に示すような骨材水分の大部分を占める「砂」の乾燥プロセスをAP本体から切り離し、排ガスの潜熱回収によって生成した温風を用いて事前に乾燥させる「砂乾燥システム」の導入が有効である。これにより、AP本体の熱負荷を劇的に低減させ、そこで浮いたエネルギー余力を高度な脱臭処理(直接燃焼)へ振り向けることで、トータルでの「脱臭と脱炭素の両立」が実現可能となる³⁵⁾。

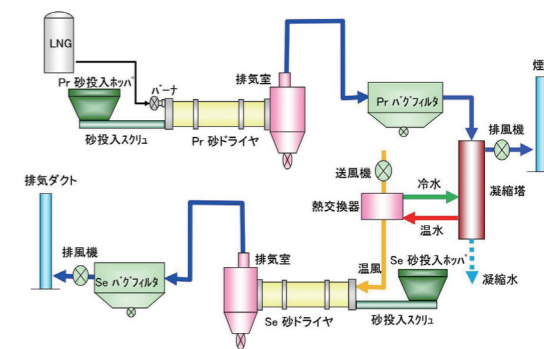


図-33 水蒸気潜熱回収技術の概念図

6.3 感覚公害への対応と地域共生

悪臭防止法の規制基準は、機器分析による物質濃度規制から、人間の嗅覚に基づく「臭気指数規制(三点比較式臭袋法)」へと移行しつつある。これは、「有害物質が含まれていなければよい」という基準から、「住民が不快に感じなければよい(住民の生活環境を守る)」という基準へのパラダイムシフトを意味する。たとえ排出濃度が規制値を下回っていても、臭いの「質」によって苦情が発生し得るのが感覚公害の難しさである。将来のAPは、単にハードウェアとしての脱臭装置を設置するだけでなく、気象条件や生産品目に応じた柔軟な運転管理を行い、地域住民の感覚に寄り添った「臭気マネジメント」を確立することが求められる。最終的には、高度な燃焼処理技術と、潜熱回収等の徹底した熱有効利用技術を融合させ、地域社会と共生可能な「無臭化・ゼロエミッションプラント」を目指すべきである。

な脱臭を約束する一方で、化石燃料の消費を伴い、CO₂排出量を増加させるというトレードオフの関係にある。しかし、第6章で展望したように、脱臭炉からの廃熱をドライヤの熱源として再利用する「熱のカスケード利用(RAVシステム等)」や、排ガスの潜熱を回収して骨材乾燥に充てる「潜熱回収技術」との融合により、このジレンマは解消可能である。すなわち、「高度な脱臭」と「脱炭素」は、プロセス全体の最適化によって両立し得るのである。

第三に、規制の尺度が「物質濃度」から「人間の感覚(臭気指数)」へと移行したことの重みである。いくら機器分析の数値が基準値を下回っていても、地域住民が「不快」と感じればそれは公害となる。これからのAPには、単に装置を導入して終わりではなく、気象条件や稼働状況に応じた細やかな運転管理を行い、住民の感覚に寄り添った「臭気マネジメント」を実践することが求められる。

かつて、黒煙や白煙を上げることが生産活動の証とされた時代は遠い過去となった。今後は、高度な燃焼技術と徹底した熱エネルギーの有効利用技術を駆使し、地域社会と調和し、環境負荷を極限まで低減させた「無臭化・ゼロエミッションプラント」の実現に向け、技術開発とその普及に邁進していかねばならない。

本稿が、その一助となれば幸いである。

7. おわりに

本稿では、アスファルトプラント(AP)における「におい」の問題を、人間の嗅覚という感覚的な側面、法規制の変遷、そして技術的な対策手法という多角的な視点から論じてきた。

循環型社会の構築において、アスファルト・コンクリート塊の再資源化は不可欠な営みである。しかし、リサイクル材を加熱するプロセスで発生するブルースモークや悪臭は、近隣住民の生活環境に直接的な影響を及ぼす「感覚公害」であり、その解決なくして事業の継続性は担保されない。

本稿の考察を通じて明らかになった点は以下の通りである。

第一に、AP、特にリサイクルドライヤから発生する臭気成分(VOC)は、多種多様な炭化水素の混合物であり、さらに微細なダストや粘着性ミストを伴う複合臭である。このため、単一の成分除去を目的とした手法ではなく、これらを包括的に酸化分解できる燃焼法、とりわけ「直接燃焼法」が、現時点において最も確実かつ堅牢(ロバスト)な解決策である。

第二に、脱臭技術の進化は、必然的にエネルギー問題と向き合わねばならないという点である。高温での酸化分解は確実

