

第5編 鉋害防止



井倉峽（岡山県）

第1章 大気汚染

第1節 大気汚染の概況

1 概要

大気汚染物質として、硫黄酸化物、窒素酸化物、浮遊粒子状物質、微小粒子状物質（PM2.5）、一酸化炭素、光化学オキシダント、ダイオキシン、PCB、フロン、二酸化炭素などが問題視されている。これらの物質が多量に発生する主原因は、人口増加、生活水準や生活意識の急変、産業、技術の発達などに伴うエネルギー、鉱工業製品等の大量消費と新材料や新製品の開発である。

大気の定常主成分は、窒素、酸素、二酸化炭素、アルゴンなどで、そのほか微量の水素、ネオンなどが含まれる（表5.1参照）。大気中に、火山の噴火などの自然現象や人間の生活活動によって生じた物質が持込まれ、今まで含まれなかった物質の生成や、特定物質の通常比率以上の増加が起こる。このような状態を「汚染」といい、その物質を汚染物質という。

大気中の汚染が拡大し、人間の健康や生活環境に影響を与える状態を「大気汚染による公害」という。ただし、火山噴煙等の自然現象に伴う排気物汚染は、法的には公害といわない。また、鉱業の生産活動等に伴って汚染物質が発生した場合を「鉱害」という。

表5.1 乾燥空気^{注)}の定常主要成分

成分名	記号	容積比 [%]	重量比 [%]
窒素	N ₂	78.10	75.51
酸素	O ₂	20.93	23.01
アルゴン	Ar	0.9325	1.286
二酸化炭素	CO ₂	0.03	0.04
ネオン	Ne	0.0018	0.0012
ヘリウム	He	0.0005	0.00007
クリプトン	Kr	0.0001	0.0003
クセノン	Xe	0.000009	0.00004

注) 乾燥空気：水蒸気を除いた空気

2 鉱山、製錬所における大気汚染の特色

有史以前の古い時代には、天然に金属の状態で産出した金、銀、銅などが使われていた。その後、装飾品、貨幣、工具などの需要が増し、天然金属が不足したために、不純物の多い鉱石から製錬によって金属を採取するようになった。銅、鉛、亜鉛などの鉱石は硫化物が主体であるので、化合している硫黄を除去しなければならない。このため近代の製錬技術では、銅は鉱石を硫化物のまま熔融濃縮した後、更に硫黄を燃焼させる方式、鉛・亜鉛は鉱石中の硫黄を燃焼させ、一度酸化物の形に変えて製錬する方式が中心になっている。

製錬設備が大規模になるに従って、まず農作物の被害が大きくなり、その解決を迫られた。わが国の非鉄金属製錬の歴史を振り返ると、煙害問題の解決が重要な課題であったことが分かる。

1893年、別子銅山の銅鉱の焙焼・製錬工程から発生した硫黄酸化物が、周辺の農作物に大きな被害

を与える事件が発生した。製錬設備が拡張され、処理鉱量が増加したことが直接の原因であった。この対策として、1895年、製錬設備を陸地より引き離し、洋上の無人島に移転した（四阪島製錬所）。当時の銅山年間収入100余万円に対し、この計画実行に80万円を要したといわれている。

日立鉱山では、鉱山の隆盛とともに、1912年には煙害地域が4町24村に及び、周辺の農業、林業に大きな被害を与えた。このため、1914年、当時世界一を誇った155 m高さの煙突を標高207.5 mの山頂に建設し、高煙突からの廃煙拡散による二酸化硫黄ガスの希釈を計った。一方、緑化工事では、やしゅぶし、大島桜、黒松、あかしやなどの植栽を積極的に進めた。

このほか、瀬戸内海の直島、契島両製錬所、佐賀関半島先端の佐賀関製錬所などは、いずれも排煙による大気汚染を考慮して遠隔地に建設された。

一般に、非鉄金属製錬の廃ガスは、次のような特色をもっている。

- ① 操業工程の変化によって、ガス量および濃度が変動しやすい。
- ② 経済的に硫酸を製造することが難しい低濃度の二酸化硫黄が発生することが多い。
- ③ 廃ガス中に多量のダスト類を含有している。
- ④ 焙焼工程より発生する微量の炭化水素によって、製造された硫酸が着色することがある。

一方、石灰石鉱山においては、大型重機による排ガス、原料を乾燥させるために使用されるドライヤー等が発生源として考えられるが、大気汚染が問題となった事例は少ない。

3 汚染物質別大気汚染の状況

(1) 硫黄酸化物

硫黄酸化物は代表的な大気汚染物質であり、主体は二酸化硫黄（SO₂亜硫酸ガス）と三酸化硫黄（SO₃無水硫酸）、硫酸ミストの3つをSO_xと呼ぶ。硫黄酸化物の発生は、以前は硫化鉱の焙焼により銅を製造する銅製錬業が始まりであったが、エネルギー使用量の増大や生産規模の拡大から硫黄を含む化石燃料の燃焼に伴うものが主流となっている。

硫黄酸化物のうち二酸化硫黄が環境に与える影響が最も大きいため、汚染度は二酸化硫黄測定値で判定する。大気中の二酸化硫黄濃度測定は、大気汚染物質広域監視システムで実施・公開されている。環境省の報告では、1966～67年度をピークに減少の傾向を示し、2015年度には0.002 ppmに激減した。

このような改善は、硫黄酸化物に対する排出規制や総量規制の強化に伴う低硫黄重油の積極的使用、重油低硫黄化および排煙脱硫技術の進歩などによるものである。なお、重油の低硫黄化は重油直接脱硫法の採用による。その主流技術は水素化脱硫法であり、触媒を用いて化合物から硫黄を切り離して水素と置換し、硫黄それ自身は、水素と化合させ硫化水素として除去する。

(2) 窒素酸化物

窒素酸化物は様々な形態があるが、物質の燃焼に伴い発生する一酸化窒素（NO）および二酸化窒素（NO₂）をNO_xと呼んでいる。大気中の窒素が酸化された場合と燃焼中の窒素が酸化された場合と

がある。一般には燃焼条件によってその発生量は大きく変化する。燃焼温度が高いほどまた燃焼時間が長いほど多く燃料消費量と生成熱エネルギー量にほぼ比例する。

主な発生源は自動車の排ガスであり、自動車排出ガス測定局の測定値が0.06 ppmを超えた地点は全国で約1%存在し、いずれも自動車排ガスの多い大都市に所在する。

(3) 浮遊粉じんと浮遊粒子状物質

大気中に浮遊する粉じんの総称が浮遊粉じんであり、また、浮遊粉じんのうちその粒子径が $10\ \mu\text{m}$ 以下の物質を総称して浮遊粒子状物質（SPM：Suspended Particulate Matter）という。また、大気中に浮遊しエアロゾルを構成する微粒子であるエアロゾル粒子は以下に分類される。

- ・ 粉じん 工学的には固体微粒子の総称で、物の破碎、選別、たい積、運搬などによって発生する。ダスト（Dust）ともいう。
- ・ ヒューム（Fume） 固体から発生した蒸気が大気中で再度固化して微粒子となったもの。金属の溶解に際して、液融面から発生する金属ヒュームは代表的な例である。
- ・ スモーク（煙，Smoke） 不完全燃焼から生じ、主として可燃物および灰分などの微粒子が燃焼ガス中に混在浮遊した状態のものをいい、通常「色」を有する。
- ・ ミスト（Mist） 常温常圧のもとで液体の微粒子。液滴ともいう。

なお、ばい煙（鉍煙）は物の燃焼、合成、分解などに伴い発生し、その中に含まれるすすなどのダストやヒュームなどの固体微粒子がばいじんである。微小粒子状物質PM2.5とは、大気中に浮遊している粒子径 $2.5\ \mu\text{m}$ 以下の粒子を指す。

(4) 光化学オキシダント

大気中で二酸化窒素と炭化水素が共存し、これに太陽光が作用して光化学反応を起こして生成される酸化性物質の総称である。（オゾン、パーオキシン・アセテル・ナイトレート（PAN）とその同族体を含み、光化学反応で生成される二酸化窒素は除く）。主成分はオゾンであり、オキシダント量の測定はオゾン濃度に基づく。ただし、通常大気中には0.05 ppm程度のオゾンが存在している。

液体燃料の精製、流通、および貯蔵時、有機溶剤類の揮発、物の不完全燃焼時などに炭化水素が発生するが、自動車等の排気ガス成分として大気中に放出される場合には、汚染が広範囲に及ぶこともあり、特に光化学オキシダントの広域発生に関連するものとして注目する必要がある。

4 フロンおよび酸性雨問題

(1) フロン

フロンの正式名称は、クロロフルオロカーボン（CFC）で、冷媒、噴射剤、発泡剤および洗浄剤として大量に使用されてきた。しかし、1974年米国のローランド教授らがフロン類によるオゾン層の破壊の可能性について指摘し、1987年には「オゾン層を破壊する物質に関するモントリオール議定書」が採択され、国際的に生産等が規制された。大気オゾン層破壊に関与する特定フロンは15種類を数える。大気中フロン11の濃度は、1988年には270 pptに達したが、1996年に先進国での生産と消費が全

廃されたこともあり、最近はほとんど止まっている。

(2) 酸性雨

当初、雨水に二酸化硫黄や二酸化炭素等が十分に溶けて平衡状態に達すると、pH5.6と成ることから、「pH5.6以下の雨を酸性雨」と定義した。現在では、雨などの湿性降下物のほか、大気中の浮遊粒子状物質を吸着して降下する乾性降下物を含めた降下物を、広義に酸性雨と呼んでいる。

酸性雨は、欧州諸国、北米等において森林の枯死、湖沼の魚の死滅など様々な形で生態系に影響を与えている。我が国では、欧州諸国、北米等に比べて生態系に対する影響は顕著化していないが、1993年～1995年の環境庁の調査結果報告では、pH4.8～4.9の欧州並の酸性物質を含む雨が全国的に観測されている。

5 アスベスト（石綿）問題

アスベスト（石綿）は、ILO（国際労働機関）では、『蛇紋石族造岩鉱物に属する繊維状けい酸塩鉱物であるクリソタイル及び角閃石族造岩鉱物に属する繊維状けい酸塩鉱物であるアモサイト、クロシドライト、トレモライト、アンソフィライト、アクチノライト、あるいはそれら一つ以上を含む混合物をいう』と定義している。

鉱物学的には、天然に産する鉱物群のうち、高い抗張力と柔軟性を持つ絹糸状光沢の特異な繊維状集合をなすものの俗称で、鉱物学上の分類にはアスベストという名称は使われていない。天然の鉱石では、蛇紋石系（クリソタイル：温石綿、白石綿）と角閃石系（クロシドライト：青石綿、アモサイト：茶石綿）に大別される。

工業的にはクリソタイル（ $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ）石綿が広く利用されており、世界の生産量の95%を占めている。アスベストは単独で使用することは少なく、石綿スレートのように他の原料と混合して使用することが多い。日本では、2006年以降、石綿および石綿をその重量の0.1%を超えて含有する製品の、製造、輸入、譲渡、提供又は使用が禁止されている。

6 オフロード法について

特殊自動車の使用による大気汚染の防止を図り、国民の健康を保護するとともに生活環境を保全するため、公道を走行しないオフロード特殊自動車に対する排出ガス規制を新たに行う、「特定特殊自動車排出ガスの規制等に関する法律」（オフロード法）が平成18年4月1日に施行された。また、平成22年3月18日及び平成26年1月20日に省令等が一部改正され、ディーゼル特定特殊自動車の排出ガス規制が強化された。特定特殊自動車とは、バックホーやブルドーザ等の軽油を燃料とする特定特殊自動車があげられる。ただし、現在の所、定格出力が19 kW以上560 kW未満のものを対象としており、一部の大型機械は規制の対象からは外れている。

本法律では、規制適用日以降に製作又は輸入された特定特殊自動車は、基準適合表示等が付されたものでなければ国内で使用できないことを謳っている。（一部規制対象外車もある。）

第2節 大気汚染の発生機構

大気汚染物質の発生原因は天然汚染、人為汚染、天然人為汚染に分類することができる。わが国では、大気汚染物質として、大気汚染防止法で表5.2の物質が定められている。

天然汚染 火山の爆発、噴火など火山活動によるガス・粉じんの発生、炭田・油田地域より噴出する天然ガス、風で吹き飛ばされる砂じん、植物の花粉、腐敗や発酵などにより発生するメタン、アンモニア、天然有機化合物など天然現象に起因する汚染。

人為汚染 各種の生産活動、物の輸送、交通機関、家庭生活などの人間活動に伴って発生する人為的原因によるもので、大気汚染による公害の主要なものである。

天然・人為的汚染 二酸化窒素や炭化水素などの人為汚染による発生物が、太陽光線などの自然の力によって反応し、二次汚染物である光化学オキシダントなどを生成する場合がこれに該当する。

第3節 大気汚染による影響

1 人体に与える影響

(1) 大気汚染と人体

一般に大気の汚染物質が高濃度の場合は、急性の呼吸器の炎症を引き起こし、死亡する場合すらある。低濃度の場合は、長期間継続して反復されると、感冒、気管支炎、肺炎などの呼吸器系の病にかかりやすくなり、特に呼吸器、心臓に障害のある人々が強く影響を受ける。また、肺の換気機能欠損、ヘモグロビンによる血液の酸素輸送などの生理機能障害を直接起こす物質、あるいは慢性の病気や潜伏性の病気を発生するものもある。

また、汚染物質や有害物質が1種類のときよりも複数種類が混合した状態、あるいは有害ダストに有害ガスが吸着した状態などの場合のほうが、一般に障害の程度が大きい。

汚染物質の人体に及ぼす影響を次に示す。

① 硫黄酸化物 (SO_x)

吸入された二酸化硫黄は、生体内の水分と反応し、亜硫酸水素イオンと亜硫酸イオンになる。このときに発生する水素イオン、また亜硫酸水素イオンはタンパク、脂質などと反応し、生体に影響を与えると考えられている。生体に吸収された二酸化硫黄のほとんどは、肝臓で解毒され、硫酸塩となって尿中に排泄される。二酸化硫黄の人体に対する影響は、3~5 ppmで臭気の感知、20 ppmで顕著な刺激感、100 ppm濃度のガスを毎日8時間吸入すると肺組織に障害を起こし、300 ppmで呼吸困難になり、500 ppmでは死亡することがある。

② 窒素酸化物 (NO_x)

主に、一酸化窒素 (NO)、二酸化窒素 (NO₂) が、人体に影響を与える。高濃度の二酸化窒素を吸入すると気管支炎、肺気腫などの呼吸器障害を起こす。一酸化窒素は、二酸化窒素に比べその作用は1/5程度であるが、一酸化炭素と同じく血液中のヘモグロビンと結びついてニトロソヘ

表5.2 大気汚染防止法における規制・制御の体系

規制対象物質		施設の種類	設置者の義務	規制措置
ばい煙	硫黄酸化物	ばい煙発生施設	<ul style="list-style-type: none"> ・設置届及び実施の制限 ・使用届（規制対象となった日から30日以内） ・構造等の変更届及び実施の制限 ・氏名等変更届（変更後30日以内） ・使用廃止届（廃止後30日以内） ・承継届（承継後30日以内） ・排出基準の遵守 ・総量規制基準（特定地域、硫黄酸化物、窒素酸化物のみ）の遵守 ・ばい煙量、ばい煙濃度、VOC濃度の測定及び記録 ・事故時の措置（ばい煙発生施設のみ） 	<p>【届出】 計画変更命令等</p> <p>【排出基準等】 改善命令等（排出基準及び総量規制基準違反には直罰）</p>
	ばいじん			
	有害物質 窒素酸化物 その他 (カドミウム等)			
揮発性有機化合物（VOC）		揮発性有機化合物 排出施設		
粉じん	一般粉じん	一般粉じん発生 施設	<ul style="list-style-type: none"> ・設置届及び実施の制限 ・使用届（規制対象となった日から30日以内） ・構造等の変更届及び実施の制限 ・氏名等変更届（変更後30日以内） ・使用廃止届（廃止後30日以内） ・承継届（承継後30日以内） ・構造等の基準の遵守 	<p>【届出】 計画変更命令等</p> <p>【構造等の基準】 基準適合命令等</p>
		特定粉じん排出作 業	<ul style="list-style-type: none"> ・排出作業実施届（作業実施の14日 前まで） ・作業基準の遵守 	<p>【届出】 計画変更命令等</p> <p>【作業基準】 基準適合命令等</p>
有害大気汚染物質（指定物質：ベンゼン、トリクロロエチレン、テトラクロロエチレン）		指定物質排出施設	<ul style="list-style-type: none"> ・指定物質排出抑制基準の遵守 ・排出、飛散状況の把握 ・排出、飛散抑制措置 	勧告
特定物質（アンモニア等28物質）		特定施設（ばい煙発生施設以外のもの）	・事故時の措置	事故時の措置命令

ヘモグロビンを形成し、血液の酸素輸送機能を害する。

③ 一酸化炭素 (CO)

一酸化炭素は、血液中のヘモグロビンと結合してカーボキシヘモグロビンを作る。ヘモグロビンは、肺内に吸入された酸素と結合して体内の組織の各所に輸送する働きを持っているが、一酸化炭素は酸素よりヘモグロビンとの結合力が200~300倍強いので、酸素との結合が損なわれる。

④ オゾン (O₃)

オゾンは、かつて人体に良い影響を与えるとされていたが、ある量的水準を超えれば有害になる。その影響は、二酸化窒素に極めて類似しており、オゾンは水に溶け難いため、肺の深部まで到達しやすく、炎症を起こす。

⑤ 浮遊粒子状物質

大気中に浮遊する各種微粒子の粒径範囲と、それらを吸入したときの呼吸器内残留率の大略を、図5.1に示す。

浮遊している金属粉じんの粒度範囲は大きく、およそ0.2~20 μmに及ぶ。20~10 μm程度の粒子を吸込むと、その90%以上は上部気道の口腔や気管支にある鼻毛や粘液面で捕捉される。0.2 μmの極微粒子では、体内残留率は25%以下である。残留率が最も多い粒子径は、1~2 μm前後であり、すべて下部気道（細小気管支）および肺胞（血液に酸素を供給する器管）に残留する。

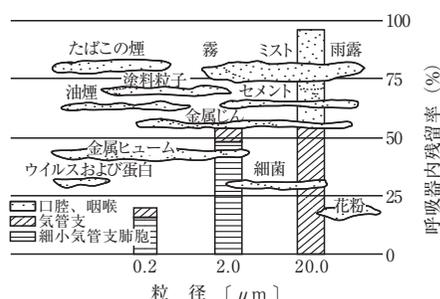


図5.1 大気汚染物質粒径と呼吸器内残留率

ミストのような液体粒子や可溶性物質は、血液によって体内の各器管に運ばれ固有の毒性を呈したり、解毒・中和後、体外に排出されたりする。また、不溶性、難溶性のダスト類は、残留部位が上部気道の場合には、せき、鼻汁などとともに体外へ排出されるが、肺胞にまで到達し残留した場合には、もはや体外への排出が不可能となる。

一方、不溶性、難溶性のダスト類は、残留部位が上部気道の場合には、咳、鼻汁などとともに体外へ排出されるが、肺胞で残留した場合には体外への排出が不可能となる。このダストのたい積によって組織は繊維化され、やがて固化・死滅して、血液への酸素供給機能が失われる。これがじん肺である。じん肺は不治の病であり、青年期に罹病すると病状の悪化が早く、余病を併発しやすいなど、多くの悪条件を備えた難病である。

また、年平均(24時間値)濃度が0.1 mg/m³の地域における慢性気管支炎症状の有症率は、それ以下の濃度の地域に比べて明らかに多い。

⑥ 微小粒子状物質 (PM2.5)

微小粒状物質とは、大気中に浮遊する粒子状物質であって、粒径が $2.5 \mu\text{m}$ の粒子を50 %の割合で分離できる分粒装置を用いて、より粒径の大きい粒子を除去した後に採取される粒子をいう。呼吸器系、循環器系及び肺がんの健康影響が認められる微小粒子状物質に係る環境基準は、年平均値が $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下であり、かつ、1日平均値が $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下である。

2013年度の微小粒子状物質の有効測定局数は、一般環境大気測定局492局、自動車排出ガス測定局181局であった。

微小粒子状物質については、長期基準と短期基準の両方を達成した場合に、環境基準を達成したと評価する。2013年度の環境基準達成率は、一般環境大気測定局で16.1 %、自動車排出ガス測定局で13.3 %であった。なお、長期基準の達成率は、一般環境大気測定局で44.3 %、自動車排出ガス測定局で32.0 %であった。短期基準の達成率は、一般環境大気測定局で16.3 %、自動車排出ガス測定局で13.3 %であった。

年平均は、一般環境大気測定局で $15.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、自動車排出ガス測定局で $16.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ であった。

⑦ アスベスト（石綿）粉じん

アスベストに起因する疾病には、石綿肺、肺がん、胸膜、腹膜又は心膜の悪性中皮腫および胸膜プラーク等がある。多くは呼吸器疾患であるが、最近では、胃がん、喉頭がん、結腸がん等の消化器系のがんと関連も強く疑われている。ばく露量が高濃度では石綿肺および肺がんが、低濃度の場合には胸膜プラークと悪性中皮腫等が起こる。また、肺ガンと悪性中皮腫は、それぞれ石綿肺、胸膜プラークの出現よりかなり遅れて発生するといわれている。

石綿肺は、アスベスト粉じんを吸入することにより起こる肺繊維症であり、じん肺の一種である。吸入されたアスベストは、肺に入り、細い気管支や肺胞を刺激し細気管支肺胞炎を起こす。肺胞が繊維化すると、細い気管支が引っ張られて拡張する。こうした繊維化が広範囲に及ぶと肺の弾力性がなくなるとともに、肺胞の壁が厚くなり、空気を吸っても酸素が血液の中に入り難くなり、呼吸困難な症状を示す。石綿肺は、じん肺と同様、その進行は潜行的で緩やかであり、臨床症状の発症まで10年以下のことは希である。じん肺と同様、現代医学では不治の病であり、早期診断が重要である。

2 植物に与える影響

(1) 大気汚染と植物

植物に顕著な被害を及ぼす有害物質には、古くから二酸化硫黄が知られており、次いでふっ素、オゾン、PAN（パーオキシアセチルナイトレート）、塩素が主に問題となる。

各種有害物質が植物に与える障害を化学的に分類すると、表5.3のようになる。

表5.3 植物に対する各種有害物質による障害

植物への障害	有機物質
① 酸化的障害	オゾン (O ₃), 塩素 (Cl ₂)
② 還元的障害	二酸化硫黄 (SO ₂), 硫化水素 (H ₂ S), 一酸化炭素 (CO)
③ 酸性障害	三酸化硫黄 (SO ₃), ふっ化水素 (HF)
④ アルカリ性障害	アンモニア (NH ₃)
⑤ 物理的障害	浮遊粉じん

(2) 環境と被害

被害の発生は、大気中に含まれる有害物質の「濃度 × 量」に影響されるが、同じ濃度や量であっても植物の置かれた環境、すなわち、ガスの種類、接触時間、接触時における光線の強弱、温度の高低、空中湿度、土壤水分、植物の種類、品種、植物の生育期などによって、被害状況は大きく異なる。

植物の気孔の開閉は、細胞内の水分の多少によって変わり、降雨、空気湿気、土壤水分の多いとき気孔は大きく開き、乾天続きのときは小さい。このため、小雨時や空中湿気の高いときに、急性煙害が多く発生する。一般に植物の葉は光が当たると気孔が開く性質がある。この現象は被害の発生が夜間より昼間に多い原因となっている。ただし、ばれいしょ、かんしょの葉などは夜間になっても気孔を閉じない。

このほか、他のガスの存在による相乗作用（二酸化硫黄 + オゾン）、農薬との相乗作用（ボルドー液 + 亜硫酸ガス）などもある。また、海岸線に沿った工業地帯では潮風害（塩害）を受けることが少なくないが、塩素などのガス害と混同されやすいので注意が必要である。

(3) 被害の特色

① 二酸化硫黄 (SO₂)

植物が二酸化硫黄に接触すると、葉の周辺部や葉脈間に組織の壊変が見られる。このような葉の部分的変色を一般に煙ばん（斑）と呼んでいる。煙ばんは白色～褐色系が一般的であるが、そら豆等は黒かっ色で、松類は針葉全体が緑色を失い次いで赤褐色に変わり脱落する。

② ふっ素 (F, HFなど)

ふっ化水素の被害は、二酸化硫黄の場合に類似し、若葉の尖瑞や周辺に黄白化現象を起こす。

③ オゾン (O₃)

葉の赤色化、葉の上表面の漂白化、白色のそばかす状のはん点、暗褐色の点状はん点などある。葉の上表面に発生する白色または暗褐色の点状はん点が、最も特徴的である。

(4) 指標植物

特定の環境条件に対して敏感な生物を指標生物というが、陸上では主として植物が利用される。植物を用いる方法では、広域にわたり、長期的かつ連続的に環境汚染を把握できる。指標植物には、汚染物質に対して感受性が高く耐性が低いものを選定する（表5.4参照）。

表5.4 大気汚染の指標植物(例)

大気汚染源	指 標 植 物
① フッ素化合物	グラジオラス, ソバ, ブドウなど
② オゾン	タバコ, ハツカダイコン, インゲンマメ, アルファルファ, ホウレンソウ, アサガオなど
③ 硫黄酸化物	アルファルファ, ソバ, ゴマ, アカマツなど
④ 二酸化硫黄を含む複合汚染	地衣類 (ウメノキゴケなど), センタイ類 (サヤゴケ)
⑤ PAN	ペチュニア, フダンソウ
⑥ エチレン	カトレア, ゴマ, キュウリ

3 その他の影響

(1) 動物への被害

大気汚染は、人間に対してと同様に犬や猫などのペットにも影響を与える。犬や猫の症状としてはせき、くしゃみ、結膜の充血、呼吸困難、鼻水、はきけ、下痢、食欲不振などがある。

(2) 器物への被害

大気汚染による器物の被害は、すす、煙灰などの固体微粒子の付着による洗濯物や器物の汚れ、絶縁不良現象の出現など物理的現象によるものと、金属、塗装面、ゴム、石油化学製品などが腐食・変質する化学的作用によるものがある。

ゴム割れの主原因は、オゾンである。また酸性雨による文化財、コンクリート構造物などの被害が取上げられている。

第4節 大気汚染防止技術 (1) — 鉱煙・ばい煙

1 燃焼およびばい煙防止

(1) 燃料

燃料とは、空気中で酸素との反応により燃焼し、その燃焼熱を利用できる物質をいう。このため、燃料として利用される物質は供給が容易で、貯蔵、運搬、取扱いが便利でなければならない。燃料は一般に天然物であるが、産出したものをそのまま用いる場合は少なく、多くは分別、精選、加工した後使用する。

燃料はその性状によって気体燃料、液体燃料、固体燃料に大別される。可燃部分の組成は炭素主体で、水素、酸素等が結合している。一般に固体燃料は、液体燃料に比し、酸素含有率が大きく水素が少ない。

主要な燃料の性状および用途を表5.5に示す。

① 気体燃料

気体燃料は、天然ガスを除けば、液体および固体燃料から製造される。以下の理由で、大気汚染防止に適した燃料であるが、燃料費がほかの燃料に比較して高いという欠点がある。

- a) 燃焼効率が高く、わずかな過剰空気でも完全燃焼でき、すすの発生が少ない。
- b) 燃料中に硫黄を含まないものが多く、燃焼排ガス中のSO₂生成量の少ないものが多い。
- c) 灰分がほとんどなく、ダストを発生することが非常に少ない。ただし、固体燃料から製造されるものには、燃焼ガス中にダストの混入量が多くなるものがある。

LPG（液化石油ガス：Liquefied Petroleum Gas）は、貯蔵、輸送は液体で、燃焼時は気体で取扱いも簡単であり、家庭用のほか自動車や工業用にも需要が増加している。ただし、比重が重いいため低所に滞留し思わぬところで引火することがある。また液体から気体になるとき蒸発熱377～419 kJ/kgが必要なので、使用時には配慮しなければならない。

天然ガスには、CH₄からなるドライガスと、CH₄、C₂H₆、C₃H₈など高級炭化水素を含むウェットガスがある。我が国はほとんど輸入に頼っており、-162℃に冷却したLNG（液化天然ガス：Liquefied Natural Gas）を冷凍タンカで受け入れ、保冷貯蔵後、再ガス化して消費地へ送る。

天然ガスの供給の増大に伴い、ナフサ、LPG、原油などの炭化水素や石炭などを原料としたSNG（代替天然ガスSubstitute Natural Gas / 合成天然ガスSynthetic Natural Gas）が開発されている。

② 液体燃料

液体燃料資源には原油、オイルシェール（Oil Shale：油母頁岩）、オイルサンド（Oil Sand：油砂）などがある。現在は原油系がほぼ大半を占めているが、採油技術向上や原油価格の上昇に伴い、オイルシェール、オイルサンド系も増加している。

液体燃料の主なものは石油系で、原油を蒸留、分解、改質、水素処理、溶剤処理などを組み合

液体燃料

液体燃料	主成分	沸点範囲 (℃)	高発熱量 [MJ/kg]	主用途
揮発油	C, H	30 ~ 200	46.1 ~ 48.1	ガソリンエンジン用
灯油	C, H	180 ~ 300	46.1 ~ 48.1	石油発動機用, 暖ちゅう房用
軽油	C, H	200 ~ 350	46.1 ~ 48.1	小形ディーゼル用, 焼玉機関用, 加熱用
重油	C, H (O, S, N)	230 ~	41.9 ~ 46.1	各種ディーゼル用, ボイラ用, 工業炉用

固体燃料

固体燃料	主成分	高発熱量 [MJ/kg]	主用途
石炭	C, H, O (N, S)	18.8 ~ 33.5	ボイラ用, 窯炉用, ガス及びコークス製造用, 家庭用
コークス	C (H, O, S)	25.1 ~ 31.4	製鉄用, 溶銑用, ガス製造用

わせて精製し、液化石油ガス、ガソリン、灯油、軽油、重油を得る。工業用燃料としては重油の使用量が最も多い。我が国は原油の大部分を中東地域から輸入しているが、一般にこれらの原油は硫黄の含有率が高く、硫黄分の分布は重質油のC重油が多い。

液体燃料は、工業用に、次のような有利な特徴を持つ。

- a) 発熱量が高い。
- b) 一般に発熱量当りの価格が安い。
- c) ほぼ均質である。
- d) 貯蔵、運搬が容易である。
- e) 燃焼が容易で、制御しやすい。
- f) 配合などによって硫黄分を調整できる。

欠点としては、灰分はほとんど含まないが、灰中の金属酸化物が様々な障害の原因になる、重油は硫黄分を多く含み、燃焼時に発生する二酸化硫黄の原因となるなどが挙げられる。

③ 固体燃料

固体燃料には、薪材、泥炭、亜炭、れき青炭、無煙炭などのような天然物と、コークス、半成コークスなどのように加工して得られるものがあり、炭素、水素、窒素、硫黄などから成る可燃性高分子化合物、灰と呼ばれる無機物質、および水分を含んでいる。

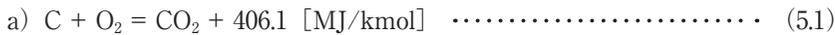
工業的には主にれき青炭が用いられる。燃料流体化に伴い、燃料消費量に占める固体燃料の割合は著しく低減したが、近年石炭が見直され、クリーンエネルギーとして利用拡大が見込まれている。固体燃料は、パイプ輸送に乾燥・粉砕などの前処理が必要な場合が多い。また、燃焼後灰を残すなどの課題がある。

コークスは、強粘結炭が主体の原料炭を1,000℃内外の高温乾留して得られる二次燃料である。その主成分は炭素で、揮発分はほとんどなく、灰分は原料炭中の灰分が全部残留する。着火し難いが、ほとんど揮発分を含まず、燃焼時に煙を発生しない。発熱量は25.1～31.4 MJ/kg程度である。

(2) 燃焼計算

① 燃焼反応式

燃焼反応を取り扱う場合には次の反応が主なものである。



これらはいずれも反応速度が大きく、発熱反応であるが、燃焼方法によっては吸熱反応を伴うことがある。



② 固体および液体燃料の燃焼に要する空気量および燃焼ガス量とガス組成

固体または液体燃料の燃焼に要する酸素量あるいは空気量は、その元素組成が明らかであれば正確に求められる。理論空気量 (A_0) の値は燃料の組成で定まるため、それぞれの燃料固有の値となる。各種燃料の A_0 の概略値を表5.7に示す。

③ 最大炭酸ガス量 (CO_2)_{\max}

燃焼装置の燃焼状態を判定するため、排ガス分析を行う。燃料を構成する主要元素は、C、H、N、O、Sであり、燃焼で生じるガス成分は CO_2 、 H_2O 、 SO_2 と過剰の O_2 および N_2 等である。

理論空気中で完全燃焼すると仮定すると、燃焼ガス中の CO_2 濃度は最大になる。この CO_2 ガス量を最大炭酸ガス量といい、 $(\text{CO}_2)_{\max}$ で表す。 $(\text{CO}_2)_{\max}$ は燃料中のCの量によって定まるので燃料に特有な値をとり、排ガス中の CO_2 の分析値と比較することによって燃焼状態の目安となる。各種燃料の $(\text{CO}_2)_{\max}$ の概略値を、表5.8に示す。

(3) ばい煙発生とその防止技術

従来、燃焼管理は、合理的な燃焼方法や熱経済が中心課題であったが、大気汚染が社会問題となるに従い、その起因物質であるすす、硫黄酸化物、窒素酸化物などが規制され、ばい煙除去・抑制技術が重点となった。

1) すすの生成

炭化水素の燃焼工程で、高温反応における燃料の分解、脱水素、凝集などの現象を経てすすが生成する。すすの生成過程は燃料の種類、燃焼過程によって異なり、一般的には燃料の炭素と水素の比 (C/H比) の大きいものほど生成しやすい。例えば、同じ気体燃料の燃焼でも、拡散燃焼では不活性ガスの添加によってすすの生成量の低下が見られるが、予混合燃焼では逆に増大する。

一方、火炎中で生成したすすの性質は、燃焼過程、燃料の性質および生成条件等ではほとんど変わらない。すすは、一般に約1~6%程度の水素を含み、

直径1~100 nmの球形粒子がじゅうずのように結合した形状や、更に複雑な構造やひも状の形状をしたものがある。

2) 窒素酸化物の生成抑制技術

① 燃焼による窒素酸化物の生成

- ・ Thermal (サーマル) NO_x 空気を用いて燃料を燃焼させるとき、空気中のN₂とO₂の反応によってNO、NO₂などを生成する。このNO、NO₂をThermal NO_xと呼ぶ。

NO生成の反応は気温が高いほど、酸素分圧が高いほど、高温域に滞在する時間が長いほど生成量が多くなる。実際の燃焼装置では、燃焼ガス中に含まれる窒素酸化物のうち、NOが95%以上で、NO₂は5%程度である。しかし、温度が下がるに従って平衡ガス組成はNO₂に偏る。

- ・ Fuel (フューエル) NO_x 燃料中に含まれる各種の窒素化合物の一部が燃焼に際して酸化されてNOとなる。このNOをFuel NO_xと呼んでおり、窒素化合物のNOへの変換率は12~50%位である。このように変換率が異なる理由は、燃料と空気との混合特性が大きく影響するためである。一般には、酸素分圧が高いほど変換率は高い。

一般には固体、液体、気体燃料の順にNO_xの生成量は少なくなる。NO_xの発生を抑制するためには、次の原則に従う。

- a) 有機窒素化合物含有率の低い燃料を使用すること。

表5.7 各種燃料の理論空気量の概略値 (A₀)

燃 料	A ₀ [m ³ _N /m ³ _N]	燃 料	A ₀ [m ³ _N /kg]
天 然 ガ ス	8.0 ~ 9.5	燃 料 油	10 ~ 13
オ イ ル ガ ス	4.5 ~ 11.0	れ き 青 炭	7.5 ~ 8.5
石 炭 ガ ス	4.5 ~ 5.5	無 煙 炭	9 ~ 10
高 炉 ガ ス	0.7	コ ー ク ス	8.5
		炭 素	8.9

表5.8 (CO₂)_{max}の概略値

燃 料	(CO ₂) _{max} [%]	燃 料	(CO ₂) _{max} [%]
天然ガス湿性	10.6	燃料油	15 ~ 16
天然ガス乾性	11.5	れき青炭	18.5
オイルガス	11.4 ~ 12.2	無煙炭	19 ~ 20
L P G	13.8 ~ 15.1	コークス	20.6
石炭ガス	11	炭素	21
高炉ガス	24		

- b) 燃焼域での酸素濃度を低くすること。
 c) 高温域での燃焼ガスの滞留時間を短くすること。
 d) 燃焼温度を低くする。特に局所的高温域をなくすこと。
 NO_x生成要因, 抑制原理, 抑制方法の関係を, 図5.2に示す。

② 窒素酸化物の抑制方法

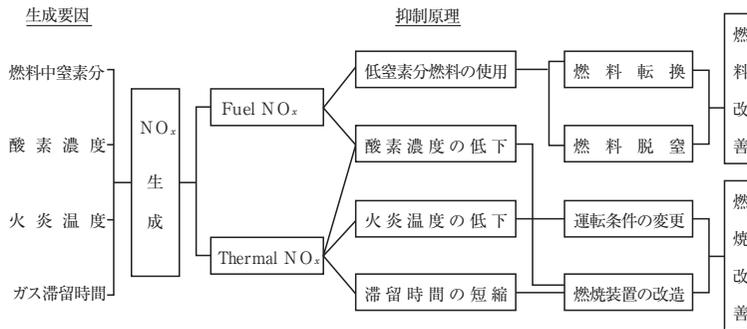


図5.2 NO_x抑制技術

燃焼技術によるNO_xの抑制方法としては, 運転条件の変更によるもの, 低NO_x化を目的として開発された新しい燃焼方法によるもの, 燃料の転換によるものなどがある。

a) 運転条件の変更による方法

低空気比燃焼, 燃焼室熱負荷の低減, 燃焼用空気の前熱温度の低減策などがある。これらの方法は, 既設の装置に比較的簡単に適用できるが, 改造燃焼法に比べてNO_xの抑制効果は少なく, 他の大気汚染物質の増加などの弊害もある。

b) 装置の改造による方法

- ・ 二段燃焼法 燃焼用空気を2回に分けて供給する。第一段階では理論空気量の約80~90%で燃焼させ, 第二段階では不足空気を補充し, 全体として完全燃焼させる。本法は火炎温度の低下と局所高温域の出現の防止を図り, NOの生成を抑制する。Fuel NO_x及びThermal NO_x抑制に効果がある。
- ・ 排ガス循環燃焼法 排ガスの一部を燃焼空気に混ぜて, 燃焼温度の低下と均一化を図るとともに, 相対的に酸素濃度を下げ, NO_x減少を図る。再循環排ガスの温度が低く, 循環量が多いほど抑制効果が大きい。排ガス循環率としては燃焼室の構造などにも関連するほか, 燃焼安定性の観点から約10~20%である。また, 火炎の安定性などから限界があるため, 排ガスの送入方法が重要な因子となる。Thermal NO_xには効果があるが, Fuel NO_xには効果がない。
- ・ 二段燃焼と排ガス循環燃焼との組合せ法 二段燃焼法による抑制効果に排ガス循環法の効果をプラスしてより大きな効果を期待する方法である。この組合せ法による抑制効果は各々を単独に実施した場合の低減効果の和に近い。

- ・低NO_xバーナ 本バーナは比較的簡単な改造で既設の装置に適用できるため、装置の大小に関係なく採用されている。二段燃焼や排ガス再循環の要素をバーナ自体に取り入れたものや、燃料と空気との混合を良好にして非常に薄い表面積の大きな火炎で急速に燃焼させる方法、火炎を分割することによって放熱量を増大させて火炎温度の低下を図る方法などがある。
- ・濃淡燃焼

非化学量論的燃焼（Off-stoichiometric燃焼）でバイアス燃焼とも呼ばれる。これは、二段燃焼の応用で、複数のバーナを持つ燃焼設備で何本かのバーナを燃料過剰の状態で使用し、その周囲に空気過剰のバーナ又は空気だけの送入口を配置し燃焼することにより、NO_x抑制を図る。問題としては、複数のバーナを持つ施設にしか使用できないことや負荷変動の大きい施設については燃焼管理が複雑化し、困難となるため適用が難しいことがあげられる。
- ・水蒸気又は水吹き込み

燃焼火炎中に水蒸気又は水を吹き込み、その潜熱を利用して火炎温度を低下させ、NO_xの発生を抑制する。吹き込みの方法は、燃料と同様にバーナスロート部より行う。NO_x低減効果は、ほぼ吹き込みに比例し、ボイラ効率は低下するため、省エネルギーの観点から問題がある。この方法はThermal NO_xに効果がある。
- ・炉内脱硝法

この方法は、炭化水素系燃料及び石炭にNO_xの還元性があることを利用し、主燃料の一部をバイパスさせて脱硝用燃料として用い、脱硝反応も全て炉内で完了させるものである。微粉炭ボイラのかんりの低NO_x化が可能な方式である。

2 鉞煙の大気拡散

(1) 大気汚染と拡散

大気中へ排出された汚染物質は、風によって流されながら次第に拡散し、生活圏である地上付近へも広がる。従って、汚染物質の大気中における拡散希釈状態を把握して、環境濃度を許容値以下に保つように排出を規制することが重要である。

煙突から排出された煙は吐出速度（運動量）と温度（浮力）の効果で大気中を上昇し、周囲の大気と混合してやがて上昇が停止し、中心軸が水平になる（図5.3参照）。この有効煙突高度 H_e [m]は、煙突高さ H [m]と上昇高度 ΔH [m]との和である。

上昇高度 ΔH は、一般に排ガスの運動量（吐出速度 × 排ガス量）が大きいほど、排出熱量が大きいほど高く、また安定度が高いと低い。また、排煙と周囲の大気との温度差が大きいほど高くなる。

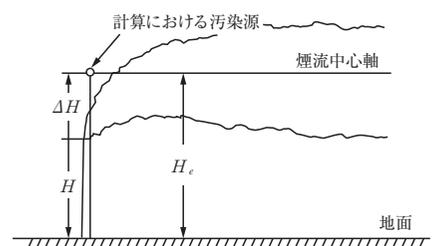


図5.3 煙流が上昇する様相

(2) K値規制と最大着地濃度

高煙突による鉱害防止は、古くからわが国では試みられてきた。サットンの拡散幅推定式から、煙流の最大着地濃度は有効煙突高度（実煙突高度と排ガス上昇高度の和）の2乗に反比例すること、鉛直拡散幅が増すと濃度が大きくなり水平拡散幅が増すと小さくなることが分かる。

SO₂のK値規制では、1本の煙突から排出できるSO₂の上限量が有効煙突高度の2乗に比例するとし、次式を提示している。

$$q = K \times 10^{-3} H_c^2 \dots\dots\dots (5.8)$$

ただし、 q は0℃・1気圧に換算したSO₂の許容排出量 [m³N/h]、 H_c は有効煙突高度 [m]、 K は地域ごとに決められた係数である。一般排出基準の K には東京特別区、名古屋、大阪などにおける3.0から汚染のない地区の17.5までの16ランクに分けた値を適用する。また、大気汚染の深刻な地域において、新設されるばい煙発生施設に適用される特別排出基準については、 K を1.17～2.34の3ランクに分けた値を使用する。

3 排煙処理技術

(1) 排煙脱硫技術

① 排煙脱硫技術の分類

硫化鉱の製錬、石炭・石油等燃料の燃焼時に、鉱石および燃料中の硫黄は、二酸化硫黄、三酸化硫黄等の硫黄酸化物として排出される。硫化鉱のばい焼時に発生するような、高濃度二酸化硫黄を含む排ガスは、硫酸製造の原料ガスに利用されるが、重油燃焼排ガスのように数百ppmから数千ppm程度の比較的低濃度の二酸化硫黄を含む排ガスは、大気汚染物質として法律で規制されているので、排煙から除去する必要がある。

現在実用化されている排煙脱硫法を、表5.8に示す。

② 湿式法

a) 石灰石スラリー吸収法

吸収剤として、炭酸カルシウム（石灰石）または水酸化カルシウム（消石灰）を用いる。いずれも水への溶解度が極めて低いため、5～15%のスラリーとして排ガスを洗浄する。

石灰石スラリー吸収法では吸収効率を高めるためにアルカリ領域で運転するが、石灰法の問題点であるスケルトラブルはアルカリ領域で多く、酸性域では少ない。このため、吸収スラリーの濃度、pHの調整、適当な液ガス比の選定等による過飽和溶液の生成減少、スケールの付着し難い形状・材質の吸収塔設置等が試みられている。スケールの生成防止と脱硫率向上のため、少量のNa化合物、水酸化マグネシウム、アジピン酸、ギ酸等を添加することがある。

二酸化硫黄吸収後のスラリーの主成分は亜硫酸カルシウムであり、酸化塔でO₂により酸化されて硫酸カルシウム（石こう）となる。使用済み吸収剤の処理法として、廃棄法と石こう回収法がある。

表5.8 排煙脱硫技術の分類

	脱硫プロセス	吸収剤又は吸着剤	副生物 (処理)
湿式	石灰スラリー吸収法	石灰石 (炭酸カルシウム), 消石灰 (水酸化カルシウム), ドロマイト	石こう (硫酸カルシウム) (回収) 亜硫酸カルシウム主体のスラッジ (廃棄)
	水酸化マグネシウムスラリー吸収法	水酸化マグネシウム	二酸化硫黄, 石こう (回収) 硫酸マグネシウム (廃棄)
	アルカリ溶液吸収法	水酸化ナトリウム, 亜硫酸ナトリウム, アンモニア水など	亜硫酸ナトリウム, 硫黄/硫酸, 硫酸 (硫酸アンモニウム) (回収)
	ダブルアルカリ法	炭酸ナトリウム, アンモニア, 硫酸アルミニウム	石こう (回収)
	酸化吸収法	触媒添加希硫酸	石こう (回収)
半乾式	スプレードライヤ法	水酸化カルシウム, 炭酸水素ナトリウム, 炭酸ナトリウム, 熱水養生剤 (石灰灰利用)	亜硫酸カルシウム, 石こう (廃棄又は埋め立て)
	炉内脱硫 + 水スプレー法	石灰石	亜硫酸カルシウム, 石こう (廃棄)
乾式	活性炭吸着法	活性炭 (活性コークス)	硫酸 (硫黄, 液体二酸化硫黄) (回収)

b) 水酸化マグネシウムスラリー吸収法

吸収剤として水酸化マグネシウムを用い、5～10%のスラリーとしてSO₂を吸収させる。

吸収工程では亜硫酸マグネシウムの一部は酸化されて硫酸マグネシウムとなる。硫酸マグネシウムの溶解度は35.5 g/100 gH₂O・20℃と大きく、ほとんど水溶液となるため、石灰-石こう法のようなスケールトラブルは発生しない。

吸収液の大部分は循環使用する。循環吸収液は、SO₂を吸収して生成した酸性亜硫酸マグネシウムを含むため、水酸化マグネシウムを加えてpHを調整し、亜硫酸マグネシウムを再生する。抜き出された吸収液の処理方法は空気酸化後海域に放流する放流廃棄法のほか、高濃度SO₂回収法および石こう回収法がある。

c) アルカリ溶液吸収法

吸収剤として水酸化ナトリウムまたは亜硫酸ナトリウム水溶液を用いる。これらの吸収剤は溶解度が大きく、二酸化硫黄との反応が速いため吸収塔が小型になるが、吸収剤の価格は高い。

水酸化ナトリウムまたは亜硫酸ナトリウムと二酸化硫黄の反応は次式のとおりである。この式から、液中のNaOHとSO₂のモル比が2:1になるまではSO₂の平衡分圧は0である。反応は水酸化ナトリウムと二酸化硫黄の間で進行し、SO₂の比がこれより大きくなると亜硫酸ナトリウムと二酸化硫黄との反応が始まる。



二酸化硫黄吸収後の吸収液の処理には、酸化してすべて硫酸ナトリウムとして廃棄する方法、

水酸化ナトリウムを加えて亜硫酸ナトリウム回収する方法、吸収液に石灰石を加えて石こうを回収する方法などがある。

また、アンモニア水溶液を使用する方法は以下のとおりである。アンモニア水溶液は亜硫酸ガスをよく吸収するが、pH7以上ではアンモニアの分圧が高く、排煙中への損失が大きくなるので、一般には亜硫酸アンモニウム水溶液を用い、亜硫酸ガスを吸収して酸性亜硫酸アンモニウムを生成する。吸収液温度が50℃付近では、pHが5以下になるとSO₂の平衡分圧が急激に上昇して吸収効率が低下するので、アンモニア水を補給してpH6前後で吸収を行う。

循環吸収液の一部は抜き出して再生工程に送り、副製品として硫酸アンモニウム、石こう、亜硫酸ガスを回収する。

d) ダブルアルカリ法

塩基性硫酸アルミニウムとして、工業用の液ばん (Al₂O₃ 8%)あるいは粉末の硫酸ばん土 (Al₂(SO₄)₃・16~18H₂O)を用い、水に溶解する。これに石灰石粉を添加して硫酸イオンの一部を石こうとして沈でんさせ、所定の塩基度に中和させる方法である。塩基性硫酸アルミニウム [(1-X) Al₂(SO₄)₃・XAl₂O₃]の水溶液は無色透明の溶液でよくSO₂を吸収する。吸収液のpHは3~3.5程度であるため、酸化反応は速く、石こうによるスケールトラブルもほとんど発生しない。

吸収液は、空気酸化して硫酸アルミニウム溶液とし、吸収塔に循環する。また吸収液の一部を抜きとり石灰石を加えて吸収液を再生すると同時に石こうを回収する。

O₂濃度が高くかつSO₂濃度の変動の大きなバッチ操業の発生源にも適用できるため、金属、非鉄金属製錬施設での実用例が多い。

e) 酸化吸収法

SO₂酸化触媒を用いる方法である。酸化触媒としてはMnが一般的であるが、55℃以上の温度域では、FeとMnの酸化活性はほとんど同じのため、価格の安いFeを使用する。酸化率はほぼ100%である。この方法における吸収反応は次のとおりである。



排ガスは、冷却器にて水冷・除じんして吸収塔に送り、2~3%の希硫酸で洗浄してSO₂が吸収除去する。吸収塔内でも、排ガス中のO₂および鉄触媒の作用で亜硫酸の一部が酸化され硫酸となるが、亜硫酸を含む吸収液は酸化塔に送り、空気を吹き込んで更に酸化し硫酸として吸収塔に還流する。吸収液の一部は石こう工程に送り、石こうを回収する。

③ 半乾式吸収法

現在わが国で実用化されている排煙脱硫法の大部分は脱硫率の高い湿式法である。湿式法は脱硫率が高い反面、プロセスが複雑で、運転操作に高い技術が要求され、また、コストも高い。一

方、海外では脱硫率を犠牲にしてもコストの安い簡易法に対する要望が強く、排煙脱硫技術開発研究の初期に提案された半乾式の実用化が進んでいる。国内では主として廃棄物焼却炉の排ガス（塩化水素）処理等で実用化されている。吸収剤には主に石灰石、消石灰を用いる。

a) 炉内脱硫－水スプレー法

本法は乾式吸収法の改良法で、米国等では早くから実用化されている。処理は2段で行う。一次反応は、石灰石、消石灰、ドロマイトなどの脱硫剤の粉末を燃焼室内に吹き込み、熱分解により生成する酸化カルシウムもしくは酸化マグネシウムと SO_2 との反応で、硫酸カルシウムまたは硫酸マグネシウムが生成する。次いで、空気余熱器後段の130～150℃の排ガス中に水を噴霧して二次脱硫を行う。脱硫率は、70～80%である。

b) スプレードライヤ法

吸収塔に120～160℃のボイラ排ガスを導き、塔頂部から消石灰スラリを噴霧する。排ガスでスラリ乾燥時に、 SO_2 を吸収し CaSO_3 （一部 CaSO_4 ）を生成する。脱硫反応生成物、未反応消石灰粉末、フライアッシュ等は後段の集じん装置で捕集する。吸収剤等の捕集粉体は吸収剤スラリタンクへ循環、廃棄あるいはセメント混和剤とする。Ca/S比1.5で、脱硫率は75～85%と高い。

④ 乾式脱硫法

湿式脱硫法は脱硫率が高いが、処理後の排ガス温度が低いため煙突から大気への拡散が悪いこと、排水処理を必要とするなどの問題がある。このため、数々の乾式法が試みられた。現在実用化されている方法は、排煙脱硫－脱硝法として用いられている活性炭法である。

(2) 排煙脱硝技術

窒素酸化物は、窒素の酸化物の総称であり、化学式 NO_x からノックスとも呼ばれる。ボイラ、加熱炉、焼結炉、溶解炉等の固定発生源や、自動車等の移動発生源の燃焼排ガス中に含まれる窒素酸化物は、NOおよび NO_2 である。 N_2O は還元燃焼等の特殊な燃焼の場合にのみ発生する。 NO_x の95%以上はNOであり、 NO_2 は3～5%程度である。

排ガス中の NO_x 濃度は燃料の種類、燃焼条件、燃焼装置の構造等により異なる。燃焼条件をコントロールして NO_x を低減することができ、種々の対策の組み合わせによりかなりの低減効果が得られている。ボイラ等固定発生源の排煙脱硝では、アンモニア接触還元法と無触媒還元法が実用化されており、アンモニア接触還元法が主流である。また、金属表面処理施設等の NO_2 濃度の比較的高い排ガス処理では、湿式酸化吸収法が用いられる。

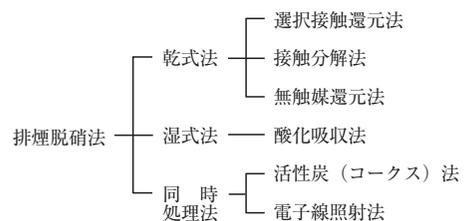


図5.4 排煙脱硝技術の分類

排煙脱硝技術の分類を、図5.4に示す。また、乾式法のうち選択接触還元法と無触媒還元法の概要は以下のとおり。

① アンモニア接触還元法

接触還元法では、触媒の存在下で窒素酸化物を還元剤と反応させて、 NO_x を N_2 に還元する。

触媒 触媒には、硫酸化されにくいバナジウム、鉄等の遷移金属酸化物を用いる。触媒の形状は、ダストを含む排ガス処理にも適用可能なダストスルータイプが一般的で、ハニカム状、格子状は、基本ユニットは150 × 150 mm、長さは500~1,000 mmである。目開きは排ガス中の含有ばいじん量や質などで決定されるが、一般的には3~10 mm、厚さは1~2 mmのものが多い。平板状は、基本ユニット500 × 500 × 500 mmで板の厚みは0.3 mm、板の間隔は8 mm程度である。

なお、還元触媒にはPt等の貴金属があるが、SO₂が共存する燃焼排ガス処理では、SO₂に被毒されて急速に活性を失う。また、アルミナ (Al₂O₃) はSO₂と反応して硫酸アルミニウムとなり、細孔が閉塞し、触媒活性が低下するため適していない。そのため、触媒担体としては、硫酸塩化されにくい二酸化チタン (チタニア：TiO₂) を用いる。

還元剤 重油や石炭の燃焼排ガス中には数100 ppmのNO_xの他に3~5 %のO₂、約10 %のH₂O、数100 ppmのSO_xが含まれている。還元剤にアンモニアを用いれば、NO_xとの反応が優先して進む。このような還元剤を用いる方法を選択接触還元法といい、アンモニアのほか、アンモニア水や尿素 (CO(NH₂)₂) も使用される。

接触還元法では、通常触媒の固定層が用いられるが、NH₃の分解が生じない範囲では、反応温度が高いほど反応速度が大きくなる。

NH₃とNO_xの反応は次のとおりである。



O₂の存在下で、NH₃1モルとNO1モルが反応し、1モルのN₂が生成する。NH₃/NOモル比を大きくすると脱硝率は向上するが、リークアンモニアが増加する。脱硝率80 %程度を目標とするときは、NH₃/NOモル比は0.9程度に抑える。

チタニア - バナジウム系ハニカム触媒の性能の一例を、図5.5に示す。

アンモニア接触還元法の触媒として、粒径25 mm以下の鉄鉱石を用いる方法が製鉄所で実用化されている。触媒の寿命は2~3か月と短いので、活性の低下した触媒は製鉄原料として高炉に入れて鉄となる。この方法は高炉を有する新製鉄所でしか採用できないが、触媒コストは安く、廃触媒処理の問題がない。普及率は余り高くない。

② 無触媒還元法

本法では触媒を用いず、高温の排ガス中にアンモニアや尿素を還元剤として加え、気相反応によりNO_xをN₂に還元する。触媒、反応器などの補器を必要としないので設備費が安く、高ダストのダーティ排ガス処理にも適用できるが、高温域での反応時間が0.4秒以上必要であり、低濃度のNO_xとNH₃の混合が難しい。

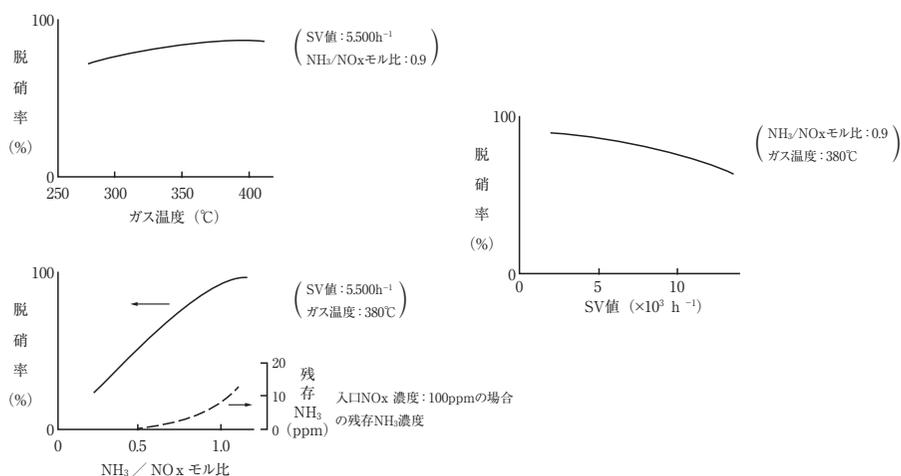


図5.5 ハニカム触媒の脱硝技術

(3) 排煙脱硫・脱硝同時処理技術

1つのプロセスで、排煙脱硫と脱硝を行う方法は、理想的な排煙処理技術といえる。

乾式法では、活性炭（活性コークス）法と電子線照射法の実用化研究が行われている。

湿式排煙脱硝法では NO_x の大部分を占めるNOが水にもアルカリ溶液にも溶解しないため、酸化剤を用いて NO_2 や N_2O_5 に酸化する必要がある。乾式法に比べ、排水処理を含むシステム面でもコスト面でも劣るため、ほとんど実用化に至っていない。

① 活性炭式脱硫・脱硝法

活性炭を用いる方法は、乾式脱硫法として開発されたが、活性炭の消耗が大きく、循環使用による活性低下から実用化されなかった。しかし、活性炭はアンモニア還元触媒として活性を持つことから、同時処理法として評価されることとなり、現在実用化研究が行われている。

② 電子線照射法

本技術は、排ガスにアンモニアを加え、電子ビームを照射して SO_x を硫酸アンモニウムに、 NO_x を硝酸アンモニウムにする同時脱硫・脱硝プロセスであり、米国、ドイツ等で長く実証実験が行われ、日本においても実証実験が実施されたが、現在はその技術開発を中断している。

4 除じん・集じん技術

(1) 除じん装置・集じん装置

ガス流または大気に含まれる固体粒子（ダスト）および液体粒子（ミスト）を分離する機械を集じん機または除じん機という。JIS B9909（集じん装置の仕様の表し方）では、集じん機本体とその前処理および付帯設備を含めて「集じん装置」と規定している。処理用気体を供給して清浄気体として排出するブロワ、ダクト、フード、スタック（排気煙突）などがそれに該当する。ここでは、特に集

じん機単体を「集じん装置」として記述する。

(2) 集じん装置の主な性能

1) 集じん率 (集じん効率)

集じん装置の能力や、集じんの効果を判定するには、集じん率 (集じん効率) η [%] を用いる。集じん率は、装置の入口および出口のダスト流量または装置の捕集ダスト流量を用い (図5.6参照)、次の3式のいずれかで求めることができる。

漏入空気やガス漏れは、主に捕集ダストの排出部気密不良に起因することが多い。正確には (5.18) 式を原則とするが、実際には (5.19) 式による場合が多い。ただし、②および③の方法は、現場では S_c の値を求めることが著しく困難なため、あまり利用されない。集じん率が高ければ、排出ガスはより清浄化されたことになるが、現実には 100 % になることはない。

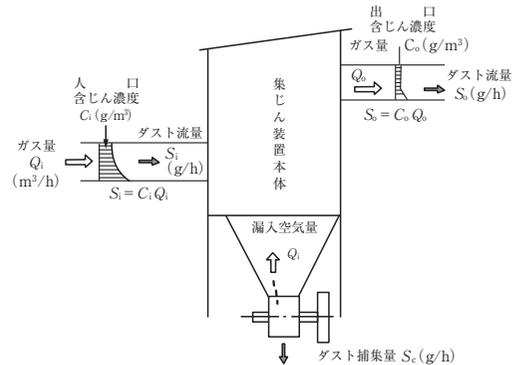


図5.6 集じん装置の集じん性能に関する量記号

① 出入口ダクト内のダスト流量またはダスト濃度から求める方法

$$\eta = (1 - S_o/S_i) \times 100 = (1 - C_o Q_o / C_i Q_i) \times 100 \quad \dots\dots (5.18)$$

なお、装置に漏入空気やガス漏れがない場合は、 $Q_i = Q_o$ となり、次式で求められる。

$$\eta = (1 - C_o/C_i) \times 100 \quad \dots\dots (5.19)$$

② 入口ダクト内のダスト流量と集じん装置の捕集ダスト量から求める方法

$$\eta = S_c/S_i \times 100 \quad \dots\dots (5.20)$$

③ 出口ダクト内のダスト流量と集じん装置の捕集ダスト量から求める方法

$$\eta = S_c/(S_c + S_o) \times 100 \quad \dots\dots (5.21)$$

ここに、 η : 集じん率 (%)

S : ダクト内のダスト流量 [g/h] = CQ

C : ダクト内のガス状態におけるダスト濃度 [g/m³]

Q : ダクト内のガス状態におけるガス流量 [m³/h]

S_c : 集じん装置の単位時間当たり捕集ダストの質量 [g/h]

添字 i は入口ダクトの諸量を、 o は出口ダクトの諸量を示す。

2) 通過率, 浄化係数

集じん率が極めて高い、例えば $\eta = 99.99\cdots\%$ のような場合は、装置が捕集したダスト量を対象とする代わりに、装置を通過した量の比率で表す。これを通過率 P といい、次式で求める。

$$P = \frac{S_o}{S_i} \times 100 \quad \dots\dots (5.22)$$

$$Q_i = Q_o \text{ の場合は, } P = \frac{C_o}{C_i} \times 100 \quad \dots\dots (5.23)$$

$$\text{または, } P = 100 - \eta \quad \dots\dots (5.24)$$

ここに, P : 通過率 [%] S_o, S_i : 装置出入り口のダスト流量 [g/h]

η : 集じん率 [%] C_o, C_i : 装置出入り口のダスト濃度 [g/m³]

また, C_o と C_i の比率 C_o/C_i で表される浄化係数 (f_b), あるいは浄化係数の常用対数をとった浄化指数などがある。 P の値は小さいほど, 浄化係数および浄化指数の値は大きいほど, 集じん率は良くなる。

3) 圧力損失

集じん装置内で降下する圧力を圧力損失という。圧力損失は, 集じん装置の種類によって大幅に異なり, 通常数百Pa~数kPaになる。この値が小さいほど少ない動力で運転できる。ガスが流入するファンまたはブロワの消費電力を, 装置の圧力損失と処理ガス流量を用い, 次式で求める。

$$P = 2.78 \times 10^4 Q \Delta p \quad \dots\dots (5.25)$$

ここに, P : 消費電力 [kW], Q : 処理ガス流量 [m³/h], Δp : 圧力損失 [kPa]

(3) 集じん装置の分類と原理および機能

① 分類

集じん装置は, 基本となる集じん作用(集じん力)ごとに6種類に分類できる。利用する集じん力には, 重力, 慣性力, 遠心力, 熱力, 拡散力, 電気力などがあり, 集じん装置では単独または複数の集じん力を利用している(表5.9参照)。

また, 捕集すべきダストを水その他の液体で「濡らす」集じん装置を湿式といい, 洗浄集じん装置の大部分がこれに該当する。これに対し, ダストを濡らさないものを乾式という。ただし, 集じん装置本体に流入するガスや気体の冷却・調湿だけに水または液体を噴霧するものは, 湿式

表5.9 集じん装置の分類

集じん力 装置名	重 力	慣性力	遠心力	熱 力	拡散力	電気力	音波力	乾湿式 の区分
重力集じん装置	◎							◇
慣性力集じん装置	○	◎	○					◇
遠心力集じん装置	○	○	◎	△				◇
洗浄集じん装置	○	◎		△	◎	△		◆
ろ過集じん装置	○	◎			◎	△		◇
電気集じん装置	○	○			○	◎		◇◆

(注) ◎及び○印は主な集じん作用, △印は凝集硬化に利用, ◇印は乾式。◆印は湿式。

といわない。

② 集じん装置の直列運転

集じん装置は、排ガスやダストの特性に応じて機種を選定するが、単独では万能ではないため、異なる機種の集じん装置を2台以上直列に運転することが多い(図5.7参照)。なお、直列運転でダストの一次流入側に置いた集じん装置をプレダスタ(Preduster)という。ダストが高濃度の場合は、一次側の集じん装置で粗大なダストを分離捕集し、二次側の集じん装置で微小なダストを捕集する方法を用いる。

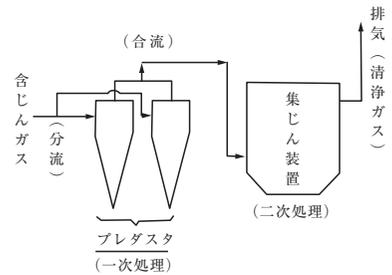


図5.7 プレダスタを用いた集じん回路

微小なダストが多い場合、プレダスタには、ダストを凝縮する効果を持つ静電凝縮器、ガス中のミストキャッチャーとなる重力沈降室や慣性力集じん装置などを用いる。

③ 原理と機能

a) 重力集じん装置

重力集じん装置では、重力による自然沈降によって水平に流れている含じんガス中のダストを分離捕集する。この装置は、集じん率が低いため、通常プレダスタとして用いられる。

分離速度が粒子径の二乗に比例するため、小さな粒子ほど分離が難しい。実用的な分離限界粒子径は50~60 μm までである。

b) 慣性力集じん装置

含じんガスに急激な方向転換を与え、また、各種の障害物に衝突させ、慣性力を利用してガス中の粒子を分離捕集する。マルチバツフル、ルーバー、ポケットおよび曲管などを用いて分離する「反転式」や、粒子の衝突を数多く重ねてガスから分離する「衝突式」がある。

慣性とは、与えられた運動を持続する性質で、質量の大きなものほど強い。例えば、含じんガス流に板を挿入すると、慣性力の大きい粒子はそのまま直進して板に衝突し落下する(図5.8参照)。実用的な分離限界粒径は20 μm 前後で、集じん率は重力沈降室よりも高く、通常プレダスタやミスト捕集用に用いる。

慣性力集じん装置の捕集性能を高めるために、次のような対応が考えられる。

- ・反転式では、邪魔板は間隔をせばめ、方向転換の回数を多くする。
- ・衝突式では、衝突直前のガスの速度はできるだけ早くし、装置出口のガス速度は小さくする。
- ・ダストホoppaは、分離したダストが再びガス流に混入しないような形状とし、十分な容積

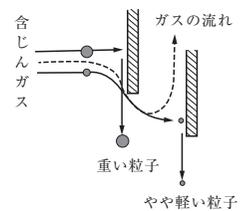


図5.8 邪魔板に対する含じんガス流の挙動

を確保したり、水などですばやく捕集する。

c) 遠心力集じん装置（サイクロン）

含じんガスを旋回運動させ、粒子に作用する遠心力により、ガスから分離する装置である。

サイクロンの入口ガス流速は7~20 m/sとされ、数値の小さい方は小形機、大きい方は大形機に適用される。実用的サイクロンでは、圧力損失は0.8~1.5 kPaで数 μm 前後の粒子を分離できる。プレダスタとしてはもちろん最適であり、単独でもかなりの集じん効果が期待できる。構造は簡単で可動部がないため、設備費もそれほど高くなく、保守管理も容易である。ただし、硬い粒子のダストでは、機体の摩耗が著しく、材質の選定に注意を要する。

旋回流の作り方は、接線流入式と軸流式に大別される。集じん性能は接線流入式が幾分よいが、圧力損失は一般に大きく、同一圧力損失ならば、処理ガス量は軸流式の1/3程度しかない。

ダストパンカに気流が吹き込み、捕集したダストを巻き上げて、集じん率の低下を招く現象を防ぐため、一部の気流（5~15%）を抽気したブローダウン（Blow Down）型がある（図5.9参照）。この形の装置は、仮想円筒に気流を巻き込む力を弱める作用をすることにもなるので、理論的にサイクロンとしては集じん率が最もよい。

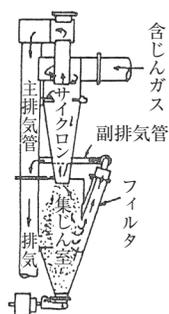


図5.9 ブローダウン型サイクロン

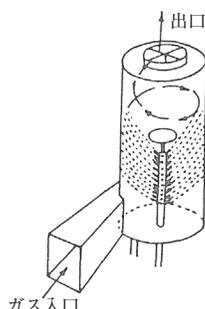


図5.10 サイクロンスクラバ

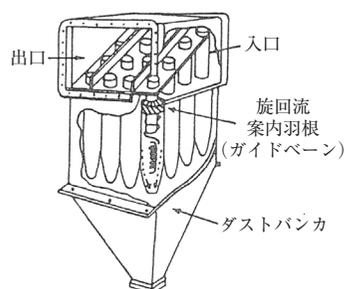


図5.11 マルチクロン

サイクロン内部に水を噴霧して、更に捕集効果を上げようとしたものが、サイクロンスクラバである（図5.10参照）。この装置は、通常洗浄集じん装置に分類される。

小型で細長いサイクロンは、微粒子の分離捕集能力が優れているが、単体では処理能力に劣る。大量の含じんガスを処理する場合は、小型サイクロンを多数並べ、ガス流を並列分割して処理する方式を採用する。慣例として、小型サイクロンを集合させたものについて、2本並列をダブルクロン、4本並列をテトラクロン、6本以上並列のものをマルチクロン（マルチ・サイクロンの短縮語）と呼ぶ（図5.11参照）。

d) 洗浄集じん装置

洗浄集じん装置は、普通「スクラバ（Scrubber）」と呼ばれるものの総称で、慣性・衝突・拡

散作用，凝集作用などを利用し，洗浄液（水）あるいは含じんガスの分散で生成された液滴，液膜，気泡などによって含じんガス中の粒子を分離捕集する。

ガスの冷却によって粒子表面に生じた凝縮水が，比較的疎水性粒子の水滴や水面に対する付着を促進させる。また粒子間の結合が起こり，見掛け粒径が増大して，捕集されやすい状態を作る。

含じんガスを気泡状に分散させる方法では，気泡が小さく，その運動が激しいほど粒子の捕集効果はあがる。

洗浄集じん装置には液滴，液膜，気泡等の生成と洗浄方法に種々の方式がある。機能を考慮して大別すると，含じんガスを液中へ通す溜水式，水流を加圧して水滴群を作りダストを捕集する加圧水式あるいは噴霧式（図5.12参照），充てん塔や流動層スクラバを用いる充てん槽式，ファンの回転を用いた回転式などがある。

e) ろ過集じん装置

含じんガス中の固体粒子をろ過材を通して分離捕集する。ろ過集じんでは，慣性付着，遮り付着，拡散付着，重力付着などの集じん作用が利用される。表面ろ過方式と内面ろ過方式に大別される（図5.13参照）。

表面ろ過方式では，比較的薄いろ布を袋状（円筒）またはV形断面を持つ平板状にして，主にろ布の表面でダストを分離捕集する。本方式はバグフィルタに採用されており，排ガス処理に広く用いられている。一方，内面ろ過方式は充てん層フィルタとも呼ばれ，比較的厚手のろ材を詰めた充てん層の内部でダストを分離捕集し，主として空気の浄化に利用する。

バグフィルタのろ布材では，新しいろ布に含じんガスを通したとき，ろ材表面に薄い粒子の層（一次付着層，初層）を作らせることが重要な因子となるため，一次付着層を作りやすいことが

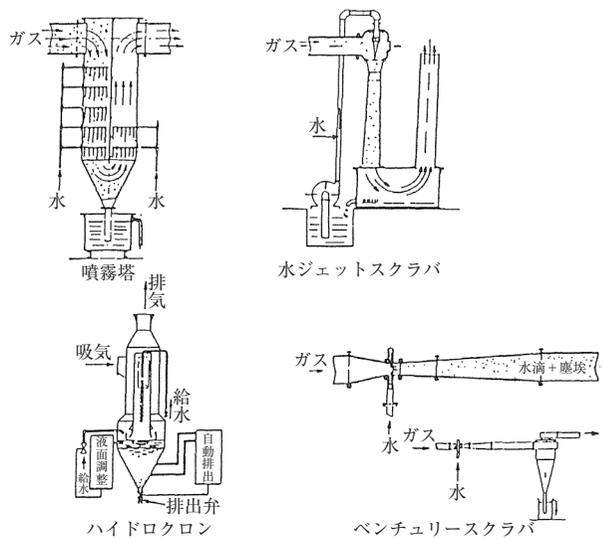


図5.12 加圧水式・噴霧式洗浄集じん装置の例

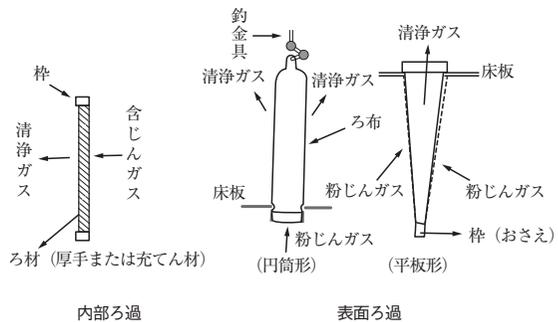


図5.13 内面ろ過と表面ろ過（平板形の点線部はろ布）

必要な条件である。

ろ布の材質は天然物、合成繊維、無機質など色々あるが、高温に弱いものが多く、高湿度やミストおよび粘着性のダストを含む排ガスには目詰まりを起こして適用できない。処理ガス温度が150℃以下で上記の性状が要求される場合は、一般にポリエステル系のろ布が多く利用されている。250℃までは主としてガラス繊維のろ布が多く利用されている。また、最近では耐酸、耐熱用に黒鉛繊維、静電気を帯びた高電気抵抗ダストの処理にステンレス繊維を織り込んだもの、あるいはグラファイト処理したろ布などが用いられている。

各種ろ布材の特性比較を、表5.10に示す。

バグフィルタは、一般的に円筒形のろ布（図5.12参照）を多数組み合わせ、更に幾つかの室で区分した多室型である。含じんガスはろ布の下部から入り、粒子をろ布の内側に分離附着させて清浄ガスとなり、外部へ排出される。この場合、粗い粒子は主として慣性衝突により、微粒子は拡散作用および遮り作用によりろ布に附着し、

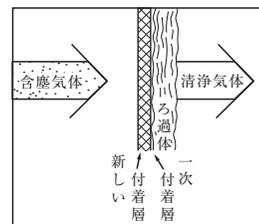


図5.14 一次附着層の生成

一次附着層を形成する（図5.14参照）。

この一次附着層は、曲折した多数の細孔を持ち、この細孔によって微細な粒子の捕集が行われる。従って、バグフィルタではろ布の目詰まりを防ぐため、処理ガス温度は酸露点以上で運転することが必要である。微粒子を有効かつ、定常的に捕捉するため必要な一次附着層の生成には、ろ布の性状見掛けろ過速度を適正に維持することである。見掛けろ過速度 V_f は、次式のように処理ガス量 Q をガスが通過するろ布分布（有効ろ過面積 A ）で除したものである。

$$V_f[\text{cm/s}] = \{Q[\text{m}^3/\text{s}]/A[\text{m}^2]\} \times 100 \quad \dots\dots\dots (5.26)$$

排ガスの性状や希望する集じん率によって異なるが、一般に V_f の値は10 cm/s以下で、微粒子捕捉には1 cm/s前後にする。

長時間ろ過を続けると、分離附着した粒子層が厚くなり、ガスの通過量が減退するので、附着したダストの払い落としが必要となる。払い落としには、ろ布を幾つかずつに区分して配置した室を順次1室ごとに処理ガスを遮断して行う間欠式（振動形、逆気流方、洗浄形等）と、一部のろ布の払い落としを順次行っていく連続式（パルスジェット型、リバースジェット型、ソニックジェット型あるいはパルスジェット型と振動型の併用等）がある。

g) 電気集じん装置

電気集じん装置は原理的に微細な粒子の捕集が容易で、ガスおよびダストの性状による影響が少ないため、古くからばい煙の処理をはじめ、有価物の回収、空気調和などに利用されている。

電気集じんでは、平行する極板（集じん極）の中央に高圧（数万ボルト）の直流放電極を置いて通電し、放電極周辺に正負両符号のイオンを発生させ、通過したダストのイオンを吸着して帯電させる。

ダスト粒子はクーロン力で放電極と逆の極性の集じん極に引き付けられて捕集される。

表5.10 各種ろ布材の特性比較

名称	織り方	目付 [g/m ²]	密度 [本/2.54 cm]		引張強度 [MPa]		通気度 [cm ³ ·s ⁻¹ ·cm ⁻²]	常温耐熱 温度 [°C]	耐酸	耐 アル カリ	コスト 比	
			縦	横	縦	横						
			表面加工		厚さ [nm]							
織布	木綿	5枚縹子織	325	75	57	7.8	5.6	5	60	×	△	1
	パイレン	5枚縹子織	260	75	47	18.6	10.8	7	80	○	△	1.4
	ナイロン	5枚縹子織	310	75	56	13.2	9.3	7	100	×	○	1.6
	耐熱ナイロン	5枚縹子織	310	78	58	14.2	10.3	10	200	△	○	4.0
	ポリエステル	5枚縹子織	335	78	58	21.6	16.7	8	140	△	△	1.2
	アクリル	5枚縹子織	300	74	50	10.8	7.4	10	120	○	×	2.3
	四ふっ化エチレン (テフロン)	5枚縹子織	350	88	79	4.9	4.6	20	250	○	○	22.0
	ガラス繊維	1/3あや織	480	48	20	18.1	12.7	20	250	○	○	3.3
	ガラス繊維	二重特殊織	790	48	40	28.2	11.8	15	250	○	○	5.4
	PPS*	5枚縹子織	300	100	50	17.7	9.3	6.2	190	○	○	6.5
不織布		表面加工		厚さ [nm]								
	ポリエステル	毛焼き又は平滑	600	1.9		7.8	19.6	18	140	△	△	1.5
	ポリエステル	膜加工	550	1.8		6.9	13.7	5	140	△	△	10.0
	パイレン	毛焼き	500	1.8		6.9	17.7	15	80	○	△	1.9
	アクリル	毛焼き	600	1.9		6.9	6.9	12	120	○	×	4.0
	耐熱ナイロン	毛焼き	500	1.7		7.8	14.7	20	200	△	○	5.4
	ガラス繊維	—	950	2.5		19.3	20.9	19	250	○	○	20.0
	四ふっ化エチレン (テフロン)	—	840	1.3		7.0	10.6	9	250	○	○	55.0
	PPS*	平滑	550	1.7		6.9	13.7	15	190	○	○	8.0
	テフアイヤ	—	710	1.3		5.9	4.9	15	250	○	○	21.0
ポリイミド	—	475	1.5		7.8	15.1	22	260	○	○	15.0	

PPS：ポリフェニレンサルファイド

工業用集じん装置の場合、普通は放電極は負（-）をとる。しかし、この極性でコロナ放電をすると、オゾンやNO₂などの有害ガスが発生しやすいので、「空気浄化」を主目的とした装置では正（+）極性が選ばれる（図5.15参照）。

電気集じん装置の集じん率 η については、集じん室の幾何学的形態と大きさ、ダストの凝集や

再飛散,あるいは処理ガス速度などを考慮すると,集じん率の算定は集じん極の形式によって,次のように示される。

$$\text{平板形の集じん率} \quad \eta = 1 - e^{-We \cdot LK/Vb} \quad \dots\dots (5.27)$$

$$\text{管形の集じん率} \quad \eta = 1 - e^{-We \cdot LK/VD} \quad \dots\dots (5.28)$$

ここに, W_e : 移動速度 [cm/s]

L : 集じん極のガス流方向の全有効長さ [cm]

V : 処理ガス速度 [cm/s]

b : 集じん極と放電極の距離 [cm]

D : 集じん極の直径 [cm]

K : 集じん室の幾何学的形態, その凝集, 再飛散などによる補正係数

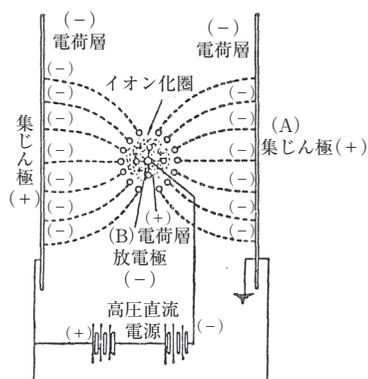


図5.15 平板型電気集じん機の
不平等電界

電気集じん装置は, 現在実用化されている単体集じん装置では, 最も集じん率の高い装置の一つであり, 圧力損失が少なく, $0.1 \mu\text{m}$ 以下の粒子やヒュームを捕集できる。しかし粗大粒子が多く粉じん濃度が高いと集じん率が低下するので, このような場合は, 先にプレダスタを用いる。

実際の集じん率は, 粒子および集じん極に付着した粒子層の見掛けの電気抵抗率に大きく左右される。このため, ダスト見掛け電気抵抗率を正常領域内 ($10^2 \sim 5 \times 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$) に保つ必要がある。また, 適正なガス流速値は, 乾式では $0.5 \sim 2 \text{ m/s}$, 湿式は $1 \sim 3 \text{ m/s}$ 以下である。

(4) 集じん装置を構成する機器

① フード (Hood)

フードは, 発生した含じんガスや有害ガスを直接集じん装置に導入できない場合に使用する, 含じんガス飛散を抑制し吸い集める「囲い」である。開口部の形状は円形および方形で, この部分からの吸い込みによって含じんガスを捕捉し, ダクトを経て集じん装置に送り込む。

有害物発生箇所になるべく近づけ, 開口部はガス飛散方向に対向させて設置する。高温ガスならば上向きに, 比重の大きい粒子に対しては下方に, それぞれ吸引を行う。発生源に近づけて設置ができない場合は, プッシュプル方式を採用する。プッシュプル方式では, プッシュ (吹出し) フードから吹出した空気, 発生している有害物質を包み込み, プル (吸込み) フードまで運んで吸引する。

② ダクト

フードで集めた含じんガスや有害ガスを, 集じん装置や排ガス処理装置まで運ぶ導管である。そのため, ガス流が持つ機械的エネルギーが, 管内壁の摩擦や, 流れの収縮, 広がりなどで損なわれないような構造とする。また, 管の曲がり部, 分岐点 (集合点) などをなるべく少なくし, 接合部における漏気や抵抗の増大に注意する。

ダクトが含じんガスを集じん装置まで運ぶ速度は, 対象物質によって異なる。特に, 粒子が管内に沈降し積まないために必要な速度 (搬送速度) の目安を, 表5.11に示す。

表5.11 搬 送 速 度

粒子の性状	搬送粒子（例）	搬送速度 [m/s]
きわめて軽いもの	ガス, 蒸気, 金属ヒューム, 木粉	10
中比重の乾燥体	ゴム, ベークライト粉, 穀物粉	15
一般工業粉じん	サンドブラスト粉, グライнда粉, 泥	20
重 い 粉 体	鉛, 鉄粉, 旋盤切屑	25
比 重 大	ぬれた粒子（特にぬれた重金属粉体）	25 <

③ スタック（Stack）、ファン（Fan）およびブロワ（Blower）

スタックは排気筒（煙突）で、排気口からの騒音伝播や、排ガスの拡散を考慮して設置する。

ファンとブロワは集じん装置に含じんガスを導入する送風機（排風機）で、吐出圧力が9.8 kPa未満をファン、9.8～約100 kPa以下をブロワと呼ぶ。

有害ガスや硬いダストによる羽根およびケースの腐食・摩耗を低減するため、集じん装置の出口側とスタックの間に設置し、吸引式（減圧式）にするのが一般的である。通常、圧力損失が少ない多翼ファン、ラジアルファン、ターボファンなどを用いる。

(5) 集じん装置選定の要領

集じん装置の選定に当たっては、次項目について考慮する。

- ① 粒子の物性：ダストの粒径分布，付着性，比重，見掛け電気抵抗など。
- ② ガスの物性：ガスの温度，粘度，腐食性，爆発性など。
- ③ 含じん濃度，処理ガス量
- ④ 設備費，運転費など：集じん装置設備費，運転費，運転性，維持管理の難易度，必要な集じん率など。

各種集じん装置の実用性能を，表5.12に示す。

表5.12 各種集じん装置の実用効能

名 称	処理可能粒 度 [μm]	基本流速 [m/s]	圧力損失 [Pa]	集じん率 [%]	設備費	運転費
重力沈降室	1000 ~ 50	1 ~ 3	98 ~ 147	40 ~ 60	小	小
ルーバ (慣性式)	100 ~ 10	15 >	294 ~ 686	50 ~ 70	小	小
サイクロン (遠心式)	100 ~ 3	10 ~ 25	490 ~ 1470	60 ~ 80	中	中
ベンチュリスクラバ (洗浄式)	100 ~ 0.1	60 ~ 90	2940 ~ 8830	80 ~ 95	中	大
バグフィルタ (ろ過式)	20 ~ 0.1	0.3 ~ 10	0 ~ 1960	90 ~ 99	中	中以上
電気集じん機 (湿式)	20 ~ 0.05	1 ~ 3	98 ~ 196	80 ~ 99 ~	大	中以上
(乾式)		0.5 ~ 2				

第5節 大気汚染防止技術 (2) — 粉じん

1 粉じんの定義

粉じんとは鉱山保安規則によると、大気汚染防止法に基づき「物の破碎、選別、その他機械的処理またはたい積に伴い発生し、または飛散する物質をいう。」と定義されている。同じ粒子状物質でも、ばいじんは「物の燃焼、加熱、あるいは化学的変化により発生する物質」と定義されており、発生状態により明確に区別している。従って、法でいう粉じんには、ヒューム（加熱により発生した蒸気が、大気中で冷却または酸化して再び固体粒子に変じたもの）、すす、煙灰等は含まれない。なお、工学上の分野では、粉じんは固体の粒子状物質の総称であり、ばいじんと区別はない。

2 粉じん発生施設および処理施設

(1) 粉じん発生施設

粉じんを発生・排出・飛散させる鉱山施設のうち、排出・飛散する粉じんが大気汚染の原因となる設備を指す。その種類、規模、構造、使用および管理の基準を、表5.13に示す。

(2) 粉じん処理施設

粉じん発生を防止する施設で、集じん機およびそれに附属するダクト、フード、散水施設等である。

(3) 粉じん発生施設に対する法的規制

粉じん発生施設には、ばい煙発生施設とは異なり、次の理由により粉じんの排出基準はない。

- ・特定の排出道から排出されることが少なく、そのため排出量や濃度測定が著しく困難、または不可能。
- ・粉じん粒子は比較的大きく一般に飛散範囲が狭いので、被害が発生施設付近に限られる。

- ・それゆえ、環境や人の健康に対する影響が比較的少ない。

3 粉じん発生施設における粉じん防止対策（発生源対策）

粉じん発生施設から大気中に排出または飛散した粉じんの捕集は難しい。このため、粉じんの発生源において極力粉じんの発生を抑制し、処理することに重点をおいた粉じん防止対策が必要である。そこで、粉じん発生施設では、表5.13に示す管理基準に適合した粉じん処理施設や粉じん防止対策を実施する。

1) 鉱物、土石等の集積場

鉱物、土石等の集積場では、風による集積物の飛散防止と、積込み、積卸しおよび運搬時の発じん

表5.13 粉じん発生施設と管理の基準

規則	施設名	規模	構造, 使用, 管理の基準
1	鉱物（コークスを含み、石綿を除く。以下同じ） 又は土石の集積場	面積 1,000 m ² 以上	イ 粉じんが飛散しにくい建屋内に設置。 ロ 散水設備による散水。 ハ 防じんカバーでおおう。 ニ 薬液の散布または表層の締固め。 ホ これらと同等以上の有効な措置。
2	坑外設置の破砕機および摩砕機（鉱物、岩石又はセメントの用に供するものに限り。湿式および密閉式を除く）	原動機定格 出力75 kW以上	イ 1のイと同じ。 ロ 1のロと同じ。 ハ 1のハと同じ。 ニ フードおよび集じん機の設置。 ホ これらと同等以上の有効な措置。
	坑外設置のふるい（鉱物、岩石又はセメントの用に供するものに限り。湿式および密閉式を除く）	原動機定格 出力15 kW以上	
3	坑外設置のベルトコンベア（密閉式を除く）	ベルト幅 0.75 m 以上	イ 1のイと同じ。 ロ 1のロと同じ。 ハ 1のハと同じ。 ニ コンベアの積込部、積降部にフードおよび集じん機を設置。それ以外の粉じん飛散部分は、上記のロまたはハと同じ。 ホ これらと同等以上の有効な措置。
	坑外設置のバケットコンベア（密閉式を除く）	バケット容積 0.03 m ³ 以上	

防止が重要である。

① 建屋内貯鋳場

貯鋳物が比較的少量の場合、飛散しやすい微細な粉体や雨水を避ける必要がある場合、あるいは有害な成分を含む場合には、建屋内に貯鋳することが多い。建屋内は、風による飛散が避けられ、積込み・積卸しを含め、粉じん飛散防止は比較的容易である。飛散しやすい粉体では、隙間風が入らない構造とし出入口の構造に注意する。防風壁、防風カーテン、エアカーテンを設置すると、なお有効である。最近、貯鋳用にドーム、サイロ、切妻屋根方式の屋内貯鋳方式が普及している（図5.16参照）。

	ドーム方式	サイロ方式	切妻屋根方式
概略寸法	容量：15万トン 直径：120mφ、H：50m、 h：20m	容量：10万トン 直径：50mφ、H：90m、 h：80m	容量：20万トン 幅：65m、H：36m、 h：20m、長さ：500m

図5.16 屋内貯鋳方式例の概略図

屋内貯鋳方式の長所は次のとおりである。

- 粉じん飛散、騒音および雨水、散水による排水など環境保全対策に極めて効果的である。
- 風雨、冬季の凍結防止、表面水分の増加防止に有効。
- 荷崩れの心配がなく、積付け高さが高くなるため土地利用効率が高い。
- 受入れ、払出しの自動化が容易である。

一方、次のような短所が考えられる。

- 建設費が高い。
- サイロ方式は、ホップの詰まりやアーチング現象に対する強制払出しが必要。
- 積込み時の発じん。

② 野外貯鋳場

貯鋳物が大量の場合や雨水を特に考慮しない場合は、野外に貯鋳することが多い。野外貯鋳で

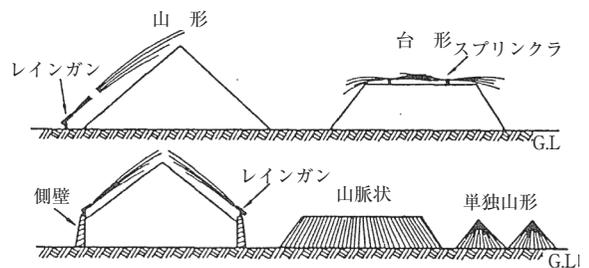


図5.17 貯鋳状態の種類

は、風による飛散防止と、積込みおよび積卸し時の発じん防止に重点を置き、年間の主な風向、風速など風の影響を重視して場所を選定する。貯鉱の形態は、断面が山形か台形状が一般的である（図5.17参照）。なるべく低く貯鉱する。ただし、低いほど広い面積が必要である。

山形状貯鉱場では、散水設備の能力を考慮すると、高さは最高20 m位が限度である。単位面積当たりの貯鉱量を増すためには、側壁（高さ2～5 m）を設ける。

台形状は、風の影響が少なく、表面を押し固めることができる利点があるが、小型のブルドーザなどが必要である。

表5.14 主な粉粒体の安息角（度）

粉粒体の種類	石灰石（粗粒）	石灰石（粉砕物）	砂利（球）	砂利（破碎）
安息角	25	47	30	40

貯鉱側表面の傾斜角は、安息角以下になるようにし、貯鉱場の崩れ落ちによる発じんを防ぐ。主な粉粒体の安息角を、表5.14に示す。

4 破碎機，摩砕機およびふるい

① 密閉建屋内設置

粉じんが飛散・流出しにくい密閉建屋内に機械や装置類を設置することが、粉じん防止対策の基本である。建屋内の粉じんが操業上や作業環境上問題となる場合は、発じん箇所へ散水、防じんカバーまたはフード設置による集じん対策をとる。建屋全体をフードとして集じんする建屋集じん方式もある。ただし、建屋容積が大きいと、発じん源に対する十分な制御風速を与えることが難しくなる。

② 散水設備

発じん箇所付近に孔あき散水管、シャワー散水器、あるいは噴霧器（スプレー）などを設置し、鉱石を破碎機等に給鉱する前に散水して湿らせる（与湿）方法と、破碎等によって生じた粉じん雲に散水して沈静させる方法とがある。与湿方式が一般的で効率がよい。

③ 防じんカバー

発じん箇所だけを覆う局部的密閉方式で、建屋密閉しにくい場所に適用する。適切な制御風速が得られるならば、集じんのフードとして用いる。

④ フードおよび集じん方式

最も効果の期待できる防じん対策で、散水と併用するとさらに有効ことが多い。

フードにより含じん空気を吸引する場合の原則は、

- a) フードをなるべく発生源に近づける。
- b) 発じん部を局所的に吸引する。

- c) フードの開口面積を小さくする。
 d) エアカーテンやシャッタを活用する。
 e) 十分な捕捉速度を維持する。
 f) 能力的に余裕のある送風機を選ぶ（通常30%程度の余裕）、などである。
 作業別によるフードおよび集じん機の選定例を、表5.15に、破碎機、摩砕機、ふるいに適用するフードの形式例を、それぞれ図5.18、図5.19および図5.20に示す。

表5.15 作業別によるフードおよび集じん機の選定

作業の種類	対象設備	フード形式	集じん機の種類
粉碎, 混合	粉碎機, ミキサ	囲い形, 側方形	① サイクロン + バグフィルタ
ふるい分け	各種ふるい分け機	同上	② バグフィルタ
袋詰, 梱包	袋詰機 包装機	側方形, 下方形 囲い形, 側方形	③ 洗浄集じん機 ④ サイクロン
輸送	バケットコンベア ベルトコンベア 運搬車	囲い形 同上 同上	この他, 電気集じん機もあるが, その使用例は極めて少ない。通常 バグフィルタが最も多く用いられ る。
鉱山, 採石	カッタドリル	囲い形, 側方形	

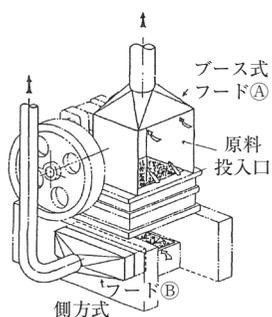


図5.18 破碎機（ジョークラッシャ）

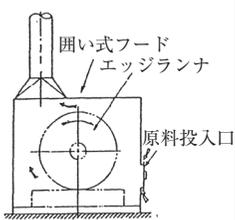


図5.19 摩砕機

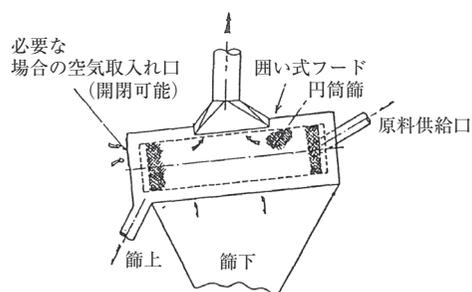


図5.20 ふるい（回転式）

5 石灰石（ドロマイトを含む）の消化施設

① 発じん源

生石灰または苦土生石灰（ $Mg \cdot CaCO_3$ ）を消和（水和）して消石灰（ $Ca(OH)_2$ ）または苦土消石灰（ $Mg \cdot Ca(OH)_4$ ）を製造する装置を消化施設という。

生石灰から消石灰への消和反応は、次式で示す発熱反応を生じる部分（消化機）と、末消和部分の反応を成長促進させ、あるいは余剰水を蒸気として放散させる部分（熟成槽）から成る。



反応によって発生した水蒸気に、微小消石灰あるいは未反応の微小物が付随して大気中に飛散し、浮遊の状態に至る。中でも消化機内における発じんが量的にも、また飛散速度の点でも著しく大きい。

② 防じん・集じん対策

消化施設で発生する粉じんは、微粒子が多く、粉じんおよび随伴空気が水分を多く含み、強いアルカリ性を示す。

集じん機には、微粒子捕集能力の優れた機種が必要である。ただし、消和反応を良好な状態で完了させるためには、発生熱と発生水蒸気を大気中に逃すことなく、十分に利用しなければならない。このため、集じん操作に必要な強制通風は消和反応を妨害するため、適用が難しい。

③ 機械消化装置

機械消化装置は自動消化装置ともいわれ、完全密閉槽形で、消和に必要な用水を集じん用シャワーにより供給する(図5.21参照)。シャワーから上向きに噴射された水が、装置右端上段に落ち、サービスタンクから供給された生石灰に添加されて消和が始まる。以下スクリーコンベアで攪拌・混合を3段にわたって繰返して製品(消石灰)として排出(右端・下段)する。

添加水供給と粉じん捕集用スプレーを兼ねた機械消化装置を、湿式集じん機という。また、このような形式の消化装置を湿式集じん機付き消化装置と呼ぶ。

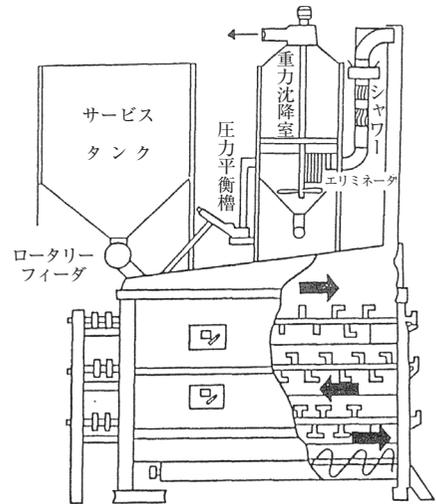


図5.21 石灰自動消化装置(秩父式の例)

6 露天採掘および積込み等における防じん対策

1) せん孔、発破、積込み作業

① せん孔機(クローラドリル等)は集じん機付きのものを用いる。

② 爆破された原石を下段に落とすオープンシュート工法は行わない。粉じん防止の立場からは、切羽造りの初期、搬出路完成までのごく短期間以外、この方法をとるべきではない。

③ 積込時バケット操作はなるべく低位置で行う。大き目の積込機を用いて爆砕物の移動回数や機械の操作回数を減らすよう心がける。

④ 発破に係る粉じんは、現実的には発生防止対策がない。このため、発破は、一般に一時的であるため、風向、風速、その他煙や粉じんの拡散に係る気象条件、発破時刻などの考慮、爆砕物崩落高さの縮減(ベンチ高さの低減化)、過装薬等による爆砕物の過粉碎防止などに取り組む。

2) 運搬・搬出路対策(トラック等使用時)

① 路面の固化および平滑化を計る。道路幅員や曲率半径は十分に余裕を持たせ、トラックの運転

性を向上させて荷くずれを防止する。

- ② 路面固化の方法として散塩がある。これは塩などの吸湿性物質が大気中の水分を吸収して潮解する現象を利用し、粉じんを湿らせ固着させるものである。降雨量、降水頻度が少なく、凍結しやすい地域の道路防じんとして効果が期待できる。
- ③ 非舗装道路は散水を主体とした対策を行う。道路際にあらかじめスプリンクラ等の散水器を設置しておき、遠隔操作で散水を調節する方法もある。
- ④ 車両の洗浄。最も簡単な洗車装置としては通路にピットを作り、これに水をためた方式（ため水式、貯水式）のものがある。ただし、洗浄水の交換を怠ると、かえって微細泥を外部に持出す結果になるので注意を要する。

3) 植栽および緑化帯

植栽による防じんは、ともすれば美観調整の効果の域を出ないことが多かった。しかし、

- ・最低限2列植えとする。
- ・喬木（きょうぼく：高木）と灌木の組合せを採用する。
- ・最低4～5 mの高さまでを覆う。

などの配慮をすれば、防じんスクリーンとしての効果が出る（図5.22参照）。ただし、芝生は粉じんの再飛散防止に効果はあるが、浮遊粉じんの漏えい・拡散防止効果はほとんど望めない。

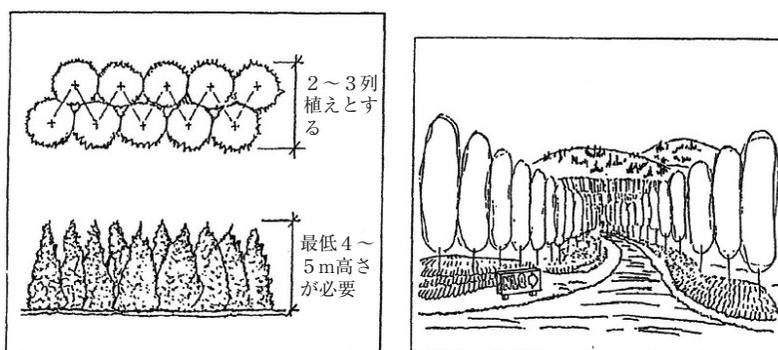


図5.22 防じんスクリーンとしての植栽例

7 漏煙・漏じん防止技術

鉍煙・ばい煙の発生施設には、それぞれ煙突、煙道、集煙フード、集じん装置などが設置され、漏れガス、粉じんの発生を極力少なくするよう設計・設備されている。

粉じんの発生しやすい箇所はできる限り密閉構造とし、工程、設備の特性上密閉が不可能な箇所はフードと集じん機を設けて粉じんの排出を防止する。また場内、工場床面にこぼれた粉鉍石、粉じんは、風で飛散しやすいのでスイーパーなどで清掃し常に取除く。

漏煙、漏じんの主な発生箇所とその防止対策の概要を、表5.16に示す。

表5.16 漏煙，漏じん発生箇所と防止対策

工 程	発生箇所	防 止 対 策
選 鉱	破碎機，摩鉱機，篩機， コンベア	散水，防じんカバー，集じん設備 機器の湿式化，密閉化
原 料 荷 揚	船内ハッチ，アンロー ダ，ショベルカー， ダンプトラック，ホッ パ，搬送コンベア	散水 コンベアカバー取付，集じん設備 ダンプトラックシートカバー取付，密閉式運搬車 ホッパ密閉にエアカーテンの使用 ダンプトラック車輪洗浄設備
貯 鉱 (原料，中間品)	貯鉱場，搬送コンベア， スタッカ，ショベル カー，リクレーマ	貯鉱舎の建設，散水 塩ビシートなどによるカバー セメントまたは有機物による表面コーティング コンベアカバー取付，パイプコンベア 集じん設備 スィーパーによる床面清掃
石灰消化施設	消化機 その他	散水 局所排気および集じん設備，排ガス処理施設 建屋の密閉 スィーパーなどによる床面清掃
廃 滓	集積場 その他	散水 塩ビシートなどによるカバー 覆土植栽

第6節 測定技術

1 大気中の粉じん濃度・量および粒径分布の測定方法

大気中の粉じんには，降下ばいじんと浮遊粉じんがある。前者は比較的大きい粒子が沈降してたい積したものであり，後者は微細な粒子が大気中に長時間浮遊しているものである。大気汚染防止法では，粒径10 μm 以下の粒子を「浮遊粒子状物質」と規定し，環境基準の濃度と測定法を定めている。

(1) 降下ばいじんの測定方法

降下ばいじんは，法の規制はなく，測定法も規格化されていないが，古くから大気汚染の指標として広く測定されている。

通常，1か月間測定器を野外に置き，自然に沈降する降下ばいじん粒子を，雨水とともに容器に受けて捕集する。測定器には，デポジットゲージまたは簡単なバケツ形のダストジャーがある（図5.23

参照)。捕集した試料は水溶性と非水溶性のばいじんを合わせ、 $t/km^2 \cdot 月$ の単位に換算して表示する。

(2) 浮遊粒子状物質（浮遊粉じん）の測定方法

大気汚染防止法では、浮遊粒子状物質の環境基準等（質量濃度）の測定に、ろ過捕集法、光散乱

法、圧電天びん法、および β 線吸収法を用いることを定めている。

1) ろ過捕集法

粒径 $10 \mu m$ 以上の粒子を分離する分粒装置（多段沈降板または小型サイクロン）を通して大気を吸引後、 $4 \mu m$ 50%をろ紙に捕集する。分粒装置付のローボリュームエアサンプラ（L.V）が広く用いられる（図5.24および図5.25参照）。通常、大気を $20 L/min$ の吸引流量で48時間以上吸引して、ろ紙に捕集した浮遊粒子状物質を天びんで秤量し、吸引した空気量から質量濃度を求める。ろ紙の秤量は、湿度50%の状態ですべて一定時間放置した後に行い、24時間の平均値を求める。

L.Vは、機能的に短時間測定が難しい。このため、環境基準など1時間値の連続測定が必要な場合には、以下の3測定法を用いる。

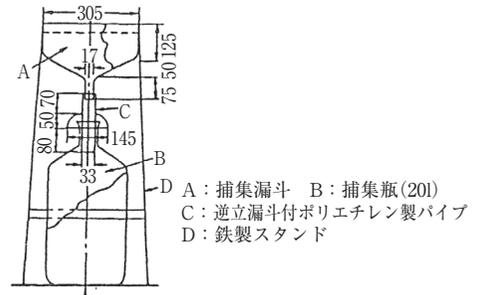


図5.23 国産デPOSITゲージ [mm]

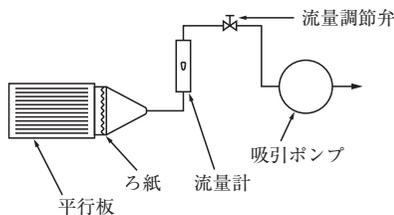


図5.24 ローボリュームエアサンプラの構造図（平行板付）

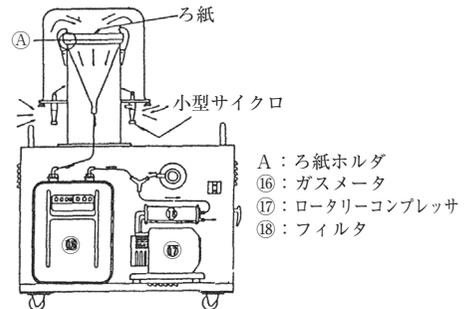


図5.25 ローボリュームエアサンプラの構造図（小型サイクロン付）

2) 光散乱法

吸引した大気に、光束を投射して得られる散乱光量を光電子増倍管により電氣量に変換し、相対濃度を測定する。分粒装置はない。質量濃度への換算は、L.Vの同時測定値から補正係数を算出して求める。測定器の構成を、図5.26に示す。

3) 圧電天びん法

圧電素子（水晶発振子）の表面に、粉じんを静電捕集により附着させると、発振周波数が減少する

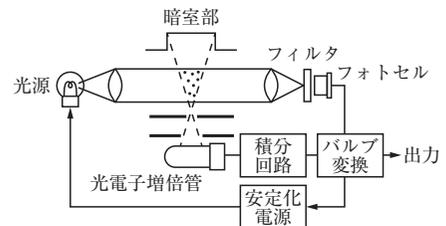


図5.26 光散乱式浮遊粉じん測定法の構成

が、この場合付着した粉じんの質量と周波数との間に直線的比例関係があり、周波数の変化を測定することにより、質量濃度を求めることができる原理を利用したもので、測定感度は極めて高く、180 Hz/ μg 前後である。1 L/minの吸引流量で、10 μm 以上の粒子を除く分粒装置のインパクト（慣性衝突の原理を利用した細じん計数計）を通して大気を吸引し、圧電素子上に粒子を捕集して周波数の変化を測定する。

4) β 線吸収法

ろ紙に捕集した粉じんの β 線吸収量を測定して、質量濃度を求める。通常20 L/minの吸引流量で大気を吸引し（4 μm 50%の粒子を除く分粒装置を通す）、テープ状のろ紙（幅3 cm × 長さ60 m）に捕集し、捕集前後の β 線吸収量を測定して、質量濃度を求める。 β 線源は100 μCi 以下の ^{14}C （半減期5,000年）または ^{147}Pm （半減期2年）を用い、 β 線の検出器にはGM管、シンチレーションカウンタ（電離放射線計数装置）などを用いる。現在、浮遊粒子状物質の質量濃度の測定に最も多く使用されている。

(3) 浮遊粉じんの粒径分布の測定方法

大気中の浮遊粉じんおよび排ガス中ダストの粒径分布の測定には、その濃度が中～大の場合は、慣性衝突を利用したカスケードインパクト法の測定器が多く使用され、一方、濃度が低い場合は、光散乱法を利用した粒径分布の自動測定器が広く使用されている。

1) カスケードインパクト法

空気または排ガスを、小さなノズルから捕集板（ガラス板など）に向かって高速で吹きつけ、慣性力でその中の粒子を捕集板上に衝突、分離捕集する測定法。ノズルの口径を次第に小さくした数段のインパクト（計数装置）から成り、吹き付け速度を次第に大きくして、下流ほど微細粒子を分離捕集する。各段で捕集した粒子の質量を天びんを用いて秤量し、質量基準で粒径分布を求める。JIS K

表5.17 アンダーセン式エアサンプラの各段の粒径測定範囲

ステージ数	粒径範囲 [μm]
0	～ 9.0
1	～ 5.8
2	～ 4.7
3	～ 3.3
4	～ 2.1
5	～ 1.1
6	～ 0.7
7	～ 0.4
バックアップ	0.4 ～

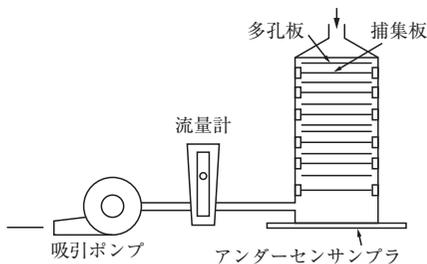


図5.27 アンダーセン式サンプラの構造

0302「排ガス中のダスト粒径分布の測定方法」(1989)では、本法が採用されており、測定範囲はおおむね0.005~30 μm である。

浮遊粉じん用のアンダーセン式エアサンプラを図5.27に、各段の粒径測定範囲を表5.17に示す。

2) 光散乱法

光散乱法の測定原理を利用し、粒子に対する散乱光のパルスの計測と波高分析により、粒子の個数と粒子の大きさを自動的に測定する。粒径の測定範囲は0.1~20 μm で、個数基準で表される。最近は、光源にレーザーを用いるものが増えている。

第2章 水質汚濁

第1節 水質汚濁の概況

1 概要

清浄な水域では、一般に汚濁物質の量は少なく、溶存酸素は豊富で、生息する生物の種類も多い。このような水域に汚濁物質が流入した場合、その量がある程度以下では、時間の経過とともに再びもとの清浄な状態にまで戻ることができる。これは、水系自体の自然の浄化能力（自浄作用）による。自浄作用には、物理的作用として希釈、拡散、沈殿、生物化学的作用として微生物による酸化などがある。

有機汚濁水流入の影響を受けた後、水質や生物相が、下流に行くに従い再び回復されていく様子を、図5.28に示す。図中のA、Bは主として物理的・化学的変化、Cはバクテリアおよび微小動植物の変化、Dは大型動物の影響を表す。

流入汚濁物質の量がある限度以上になると、この均衡が破れ、水質汚濁の現象を発生する。例えば、有害物質の多量の沈殿は河床の底質を悪化させて生物の棲み家を奪う。また、水中の溶存酸素の欠乏は魚類の生息環境を悪化させるだけでなく、有害ガスを発生し、これらが相互に関連して二次的に種々の悪影響を引き起こす。

重金属や化学物質には、比較的濃度が低くても、生物濃縮の過程を経て、人間の健康に重大な被害をもたらすものがある。

我が国の水質汚濁は、全国的にみれば汚濁の進行は近年鈍化し、一部の水域では改善の兆しが見えている。共用水域におけるカドミウム等の有害物質による汚濁状況は著しく改善され、また、アルキル水銀および有機リンは昭和52年度以降全く検出されていない。その他の有害物質についても、ごく一部の水域で検出されたものの、総体的には改善されてきている。

全窒素及び全りん環境基準の達成率は、2013（平成25）年度は湖沼50.4%（前年度51.3%）、海域88.6%（同83.9%）であり、湖沼では依然として低い水準で推移している。湖沼においては全窒素又は全りんのいずれかの環境基準を適用するものがある。全窒素、全りんのそれぞれについてみると、全窒素の環境基準達成率は12.8%（前年度12.8%）、全りんの環境基準達成率は52.1%（同54.6%）であった。閉鎖性海域の海域別の全窒素及び全りんの環境基準達成率は、東京湾83.3%（前年度83.3%）、伊

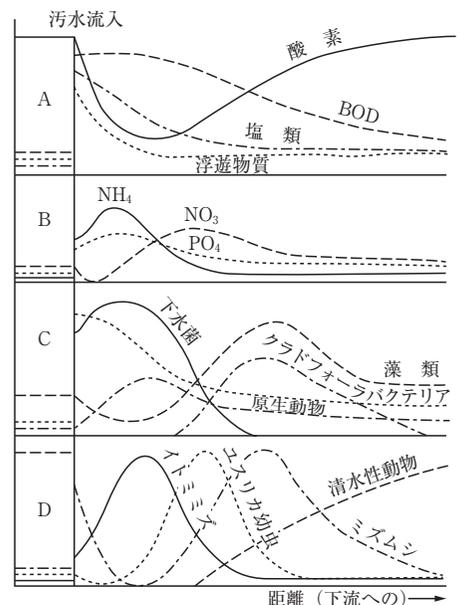


図5.28 流れに伴う水質等の変化の概念図

勢湾85.7%（同57.1%）、大阪湾100%（同100%）、大阪湾を除く瀬戸内海98.2%（同98.2%）であった。

各種化学製品による水質汚濁では、既に製造・使用が禁止されているPCB、有機スズ化合物などが高い濃度で魚介類から検出されており、非意図的生成有害物のダイオキシン類も微量ではあるが底質、魚介類から検出されている。また、発がんの可能性があるとされるトリクロロエチレン、テトラクロロエチレンによる地下水汚染が発覚し、有害物質として追加規制された。

2 鉱山、製錬所における水質汚染の特色

明治時代に入って産業の近代化が進められると、公害問題が社会的に大きく認識され始めた。水質汚濁に関する事例では、19世紀末から始まる足尾銅山の渡良瀬川流域における鉱害事件に端を発し工業都市では、重化学工業化に伴い工場排水による河川の汚濁が顕在化した。

第二次大戦後の復興期を経て、昭和30年代には、急速な技術革新と経済の高度成長による産業構造の高度化に伴い、水質汚濁が進行した。代表的な事例として、重金属による健康被害問題がある。昭和30年に、富山県神通川流域のイタイタイ病は上流鉱山より排出されたカドミウムに起因するとの説が発表された。また熊本県水俣市および新潟県阿賀野川流域で発生した水俣病は、化学工場の排水に起因する有機水銀中毒であることが明らかにされた。これらは、いずれも水を介して発生した公害病として認定されるに至っている。

鉱業は地下資源開発を主とするものであり、その特殊性から特別の配慮が必要であるとともに、過去の操業にかかる休廃止鉱山坑廃水による鉱害防止技術の確立も重要な課題である。

第2節 水質汚濁の発生機構

1 物理的作用

(1) 希釈、拡散

鉱山、工場から河川に流入した排水は、次第に拡散されながら帯状に流れ、やがて汚濁物質の量と河川水量との比率に応じた希釈濃度となる。ただし、完全混合に達する条件は、流量、流速、河床状態などで異なる。希釈・拡散は、水域の汚濁負荷の観点から、根本的解決にはならない。特に鉱業では、発生量が天然の湧水などに支配される場合が多く、対応が難しい。

(2) 沈殿

水中の懸濁物質は、河川の流速の減少に伴って沈降を生じ系外に除かれるので、水質に限って言えば浄化されることになる。ただし、再び系内に戻る可能性もあり、また、沈殿物が河床にたい積して底質を形成し、底質汚染の原因となる場合もある。

2 生物化学的作用

(1) 微生物による分解

生物化学的作用は、主として水中の微生物による有機物の酸化分解である。有機物は通常炭素、水素、酸素を主成分とし、微量の窒素、リン等を含んでいる。水中に有機物が流入すると、これを栄養

源として微生物が繁殖し、その結果有機物は酸化分解されて最終的に安定な無機物に変わる。

微生物による分解は好気性分解と嫌気性分解に分類される。有機物の汚濁物質は、まず水中の溶存酸素が十分存在する環境下で好気性酸化が行われるが、有機物の量が増えると、分解に必要な酸素が不足し嫌気性微生物が繁殖するに至る。このため、正常な自浄作用には、常に好気的な環境の維持が必要である。

① 好気性分解

十分な溶存酸素の存在する環境下では、好気性微生物の働きで酸化され、最終的には二酸化炭素 (CO_2)、水 (H_2O)、硝酸塩 (NO_3^-)、硫酸塩 (SO_4^{2-})、リン酸塩 (PO_4^{3-}) 等になる。

② 嫌気性分解

溶存酸素が欠乏する環境下では、嫌気性微生物の働きで分解され、この場合は、メタン (CH_4)、アンモニア (NH_3)、硫化水素 (H_2S)、メルカプタン等となり、悪臭を発生して腐敗現象を呈する。その限界溶存酸素濃度は約2 mg/Lである。

(2) 無機水銀の有機化

メタン菌の嫌気性培養において無機水銀からメチル水銀が生成される。自然界においても、有機化の機構が明らかにされてきており、北海道や奈良県など自然的要因によりバックグラウンドの高い地域が認められている。

(3) 有機汚染等の基準

有機汚染判断には、生物化学的酸素要求量BOD (Biochemical Oxygen Demand) や、化学的酸素要求量COD (Chemical Oxygen Demand) を用いる。

BODは、水中の好気性微生物の増殖や呼吸作用によって消費される溶存酸素量である。水の有機汚染が大きいほど酸素消費量が増大するため、これを測定して汚染の度合いを判定する。

CODは、一般には過マンガン酸カリウムによる100℃での酸素消費量をいい、これを測定して同じく有機汚染の大小を判定する。共存する還元性のイオンも検出されるためBOD値とは若干異なる。

有機汚染指標として、生物相の変化が注目されている。BOD, COD, pH, 重金属濃度などの測定値が一時的であるのに対し、本法は長期的な履歴を把握できる点から、意義あるものといえよう。

3 化学的作用

(1) 酸化

化学的酸化は、水中の溶存酸素に基づく酸化作用である。清浄な河川中の溶存酸素は通常飽和 (20℃で約9 mg/L) に近い。この酸素は、主に流下時における大気との接触などで空気中の酸素を溶解することにより、大気から供給する。

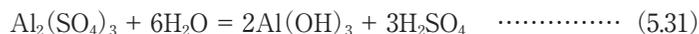
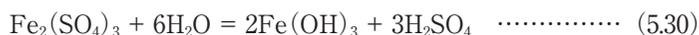
(2) 中和

一般に、酸性を示す物質と塩基性を示す物質とが反応する現象を中和という。酸性坑廃水などに人為的に石灰等を投入して中和することは広く行われている。

(3) 加水分解

金属の硫酸塩等が水中で希釈され、水と反応して不溶性の化合物を生成し、不溶性が沈殿する現象が加水分解である。

一般に、酸性坑廃水などが中性河川に流入して徐々に希釈されると、pH3付近から水酸化鉄(Ⅲ) [Fe(OH)₃] の沈殿が生じて黄褐～赤褐色に河床が汚染され赤水現象を呈し、さらにpHが上昇すると、水酸化アルミニウム [Al(OH)₃] の白色沈殿が生成する(次式参照)。



4 その他

たい積汚泥が有機物を含む場合には、分解に伴って下層水の酸素を消費するため、水中の溶存酸素が減少し、富栄養化の原因となる窒素、リン等の溶出も起こる。また、無機性の汚泥であっても、有害な重金属を含む場合は、金属イオンの溶出等が考えられる。

第3節 水質汚濁による影響

1 健康被害

(1) 被害の態様

水質汚濁による健康被害には、直接的なものと同接的なものがある。飲料水源となる河川水や井戸等に病原菌や有害物質が混入する場合は前者であり、水域に排出された有害金属や化学物質が次第に魚介類や農地の農作物中に摂取・吸収され、それを人間が長期間食用に供する場合は後者である。

最近の被害では、有機水銀、鉛、カドミウムによる慢性中毒など、除々に間接的で複雑な形として広範囲に現れ、重大な影響を及ぼす傾向がある。

(2) 生物濃縮

通常、水中の有害物質の濃度は微量で、水からの摂取のみでは慢性中毒は起こりにくい。近年、水俣病のように悲惨な被害を発生するに至る原因に、生物濃縮が関与することが明らかになった。

生物濃縮には、貝類の重金属、頭足類(たこ、いか)の肝のカドミウム、魚類のPCB等に見られる直接濃縮と、微生物→プランクトン→小魚→大魚のような経路で餌として摂取されて濃縮される食物連鎖がある。

2 農業被害

(1) 生育阻害

水質汚濁による農業被害は、灌がい水使用量が多い水稲に現れる場合が多い。生育阻害には、直接的被害と同接的被害がある。前者は、酸、アルカリなど高濃度の有害物質が農作物に直接付着、あるいは吸収されて生じるものであり、後者は、水中の有害物質が土壌中に蓄積して土質を悪化させる場

合（土壌の酸性化，重金属汚染，土壌物性など）のほか，土壌の嫌気化などにより土壌中微生物の活動に悪影響を及ぼし，二次的に作物の生育を阻害する場合である。

(2) 農業施設の被害

酸性水や土砂等による用水路その他農業施設の耐用年数の短縮，維持管理費の増加，微粒懸濁物による土壌の固結などがある。

3 水産被害

(1) 魚介類等の大量へい死

突発的な大量へい死には，シアンなどの急性毒物や温熱排水による直接的なものと，海域における赤潮，湖沼のアオコによる酸素欠乏の結果発生するものがある。

継続的な汚染の影響には，生物相の変化により餌となる生物の減少に伴う魚介の減少，枯渇や魚質の変化。産卵場，藻場，稚魚に必要な育成場の荒廃。水銀，PCBなどの魚介類への濃縮，あるいは油による魚体の着臭による販売不能や品質低下などがある。

(2) 生物に及ぼす影響

生物の有毒物に対する抵抗力は，魚種，大小によって差があり，マスなどは比較的弱く，コイ，フナなどは強い。また，海藻ではノリなども比較的弱い。

魚が短時間にへい死する場合は窒息死が多い。その原因は，①水中の酸素欠乏，②微細な懸濁物がエラをふさぐ，③毒物がエラを侵すなどである。なお，魚が毒物に接すると，自己防御として粘液の分泌が多くなり，そのため粘液によってエラが覆われることにより機能障害を起こし，さらに毒物によってエラ，体表面が侵される。

(3) 致死量，嫌忌反応

急性的な毒物の標準を示すために，一般にLC50（Median Lethal Concentration 50）が用いられ，24時間または48時間に供試生物の50%が死ぬ濃度で表す。生物学的安全濃度は，48時間LC50 × 0.1が妥当とされる。

また，魚類は水中で自由に行動できるため，好まない水質を避け，汚濁環境には進んで入ろうとしない。これを嫌忌反応と呼び，濃度により嫌忌量と不好量に分けられる。前者は魚が全く入らない濃度の限界をいい，後者は短時間にこれを避ける限界濃度をいう。

(4) 漁労への影響

漁船，漁具，養殖施設等の被害や，汚染漁場の復旧に影響がある。

第4節 水質汚濁防止技術

1 汚濁物質の種類

(1) 汚濁の様式

水質汚濁現象は，多分に相対的な概念で厳密な規定は難しいが，次のように分類する。

1) 量（濃度）による汚濁

天然水中には適量の有機物や溶存塩類が存在している。しかし、有機物の供給が増大して自浄作用の限界を超えると、溶存酸素は一方向的に消費され、やがて嫌気性微生物が発達して、水域は死んでしまう。また、溶存塩類濃度が増大すると、浸透圧が変化し生態系に大きな変化を生じる。

2) 有害物質による汚濁

人体に対する急性毒であるシアン、フェノールなど、蓄積性の慢性毒あるいは亜急性毒物である重金属類、あるいは発がん性物質などによる汚染がある。

3) 懸濁物質による汚濁

水中に存在する懸濁物質（不溶性固形物）は美観を損じる。有機性懸濁物質は溶存酸素を消費し、ヘドロを生成して底生生物に悪影響を及ぼし、悪臭を発する。無機性であっても底生生物への影響は無視できない。この種の問題は、特に選炭、窯業、採石などの排水で生じやすい。

4) 油分による汚濁

油分は概して水と混合せず、浮上しやすいので、含油廃水の場合は美観を損じ、悪臭を放ち、酸素の供給を阻害し、あるいは油分自体が生態系へ悪影響を与える。

5) その他

酸、アルカリ、色、温度変化などもある限界を越すと影響を生じる。

(2) 汚濁物質

1) 有害物質

水質汚濁防止法第2条第2項第1号では、人の健康に大きな影響を有するものを有害物質として規定している。この分類では、①カドミウム、②シアン、③有機リン、④鉛、⑤6価クロム、⑥ヒ素、⑦水銀、⑧アルキル水銀、⑨PCBのほかに、ジクロロメタン～セレンの15項目が付加され、また近年、アンモニア、アンモニウム化合物、硝酸性窒素および亜硝酸性窒素、ふっ素、ほう素、1,4-ジオキサンが追加されている（表5.20参照）。

2) 生活環境項目

生活環境の保全に特定濃度以上は好ましくないものとして、次の15項目が指定されている。

①pH、②BOD、③COD、④浮遊物質量、⑤ノルマルヘキサン抽出物質（鉱油類）、⑥ノルマルヘキサン抽出物質（動植物油類）、⑦フェノール類、⑧銅、⑨亜鉛、⑩溶解性鉄、⑪溶解性マンガン、⑫全クロム、⑬大腸菌群数、⑭窒素、⑮リン（表5.21参照）

このうち、銅、亜鉛、鉄、マンガンなどは有害物質としての一面も持つ。また、鉄、マンガンに限って溶解性に限定しているのは、全く非汚染の環境でのこれらの存在量は非常に多いため、人為的な汚染と直接関係すると考えられる「溶存成分」だけを対象にするためである。

3) その他

環境基準には、以上のほかに溶存酸素、アルカリ性過マンガン酸カリウムによる酸素消費量などがある。また、湖沼に対して窒素およびリンが定められている。また県条令による上乗せ基準では、ニッ

ケル，界面活性剤，ほう素なども対象になっている。

発がん性物質としてのベンゼン，ナフテルアミン，O-トリジンなど，あるいは有機塩素系の各種薬品，フタル酸エステル，有機凝集剤モノマーなどに対しても一部規制が実施され，今後ともその取扱いには厳しい制限が課されそうである。その他，有害性という面で論議されているものに，バナジウム，アンチモン，ニッケル，コバルト，セレン，ベリリウム，モリブデンなどがある。

(3) 基準値

国の定める排水基準値と環境基準値を，表5.18～表5.21に示す。

表5.18 有害物質の排水基準値

有害物質の種類	許容限度
カドミウム及びその化合物	1リットルにつきカドミウム0.03ミリグラム
シアン化合物	1リットルにつきシアン1ミリグラム
有機リン化合物（パラチオン、メチルパラチオン、メチルジメトン及びEPNに限る。）	1リットルにつき1ミリグラム
鉛及びその化合物	1リットルにつき鉛0.1ミリグラム
六価クロム化合物	1リットルにつき六価クロム0.5ミリグラム
砒素及びその化合物	1リットルにつき砒素0.1ミリグラム
水銀及びアルキル水銀その他の水銀化合物	1リットルにつき水銀0.005ミリグラム
アルキル水銀化合物	検出されないこと。
ポリ塩化ビフェニル	1リットルにつき0.003ミリグラム
トリクロロエチレン	1リットルにつき0.3ミリグラム
テトラクロロエチレン	1リットルにつき0.1ミリグラム
ジクロロメタン	1リットルにつき0.2ミリグラム
四塩化炭素	1リットルにつき0.02ミリグラム
1,2-ジクロロエタン	1リットルにつき0.04ミリグラム
1,1-ジクロロエチレン	1リットルにつき1ミリグラム
シス-1,2-ジクロロエチレン	1リットルにつき0.4ミリグラム
1,1,1-トリクロロエタン	1リットルにつき3ミリグラム
1,1,2-トリクロロエタン	1リットルにつき0.06ミリグラム
1,3-ジクロロプロペン	1リットルにつき0.02ミリグラム
チウラム	1リットルにつき0.06ミリグラム
シマジン	1リットルにつき0.03ミリグラム
チオベンカルブ	1リットルにつき0.2ミリグラム
ベンゼン	1リットルにつき0.1ミリグラム
セレン及びその化合物	1リットルにつきセレン0.1ミリグラム
ほう素及びその化合物	海域以外の公共用水域に排出されるもの1リットルにつきほう素10ミリグラム 海域に排出されるもの1リットルにつきほう素230ミリグラム
ふっ素及びその化合物	海域以外の公共用水域に排出されるもの1リットルにつきふっ素8ミリグラム 海域に排出されるもの1リットルにつきふっ素15ミリグラム
アンモニア、アンモニウム化合物、亜硝酸化合物及び硝酸化合物	1リットルにつきアンモニア性窒素に0.4を乗じたもの、亜硝酸性窒素及び硝酸性窒素の合計量100ミリグラム
1,4-ジオキサン	1リットルにつき0.5ミリグラム
備考	
	1 「検出されないこと。」とは、第2条の規定に基づき環境大臣が定める方法により排出水の汚染状態を検定した場合において、その結果が当該検定方法の定量限界を下回ることをいう。 2 砒素及びその化合物についての排水基準は、水質汚濁防止法施行令及び廃棄物の処理及び清掃に関する法律施行令の一部を改正する政令（昭和49年政令第363号）の施行の際現にゆう出している温泉（温泉法（昭和23年法律第125号）第2条第1項に規定するものをいう。以下同じ。）を利用する旅館業に属する事業場に係る排水については、当分の間、適用しない。

表5.19 生活環境項目の排水基準値

項目	許容限度
水素イオン濃度 (pH) (水素指数)	海域以外の公共用水域に排出されるもの5.8以上8.6以下, 海域に排出されるもの5.0以上9.0以下
生物化学的酸素要求量 (BOD) (単位 1リットルにつきミリグラム)	160 (日間平均 120)
化学的酸素要求量 (COD) (単位 1リットルにつきミリグラム)	160 (日間平均 120)
浮遊物質濃度(SS)(単位 1リットルにつきミリグラム)	200 (日間平均 150)
ノルマルヘキサン抽出物質含有量 (鉱油類含有量) (単位 1リットルにつきミリグラム)	5
ノルマルヘキサン抽出物質含有量 (動植物油脂類含有量) (単位 1リットルにつきミリグラム)	30
フェノール類含有量 (単位 1リットルにつきミリグラム)	5
銅含有量 (単位 1リットルにつきミリグラム)	3
亜鉛含有量 (単位 1リットルにつきミリグラム)	2
溶解性鉄含有量 (単位 1リットルにつきミリグラム)	10
溶解性マンガン含有量 (単位 1リットルにつきミリグラム)	10
クロム含有量 (単位 1リットルにつきミリグラム)	2
大腸菌群数 (単位 1立方センチメートルにつき個)	日間平均 3,000
窒素含有量 (単位 1リットルにつきミリグラム)	120 (日間平均 60)
リン含有量 (単位 1リットルにつきミリグラム)	16 (日間平均 8)
備 考	
1 「日間平均」による許容限度は、1日の排出水の平均的な汚染状態について定めたものである。	
2 この表に掲げる排出基準は、1日当たりの平均的な排出水の量が50立方メートル以上である工場又は事業場に係る排出水について適用する。	
3 水素イオン濃度及び溶解性鉄含有量についての排水基準は、硫黄鉱業（硫黄と共存する硫化鉄鉱を掘採する鉱業を含む。）に属する工場又は事業場に係る排出水については適用しない。	
4 水素イオン濃度、銅含有量、亜鉛含有量、溶解性鉄含有量、溶解性マンガン含有量及びクロム含有量についての排水基準は、水質汚濁防止法施行令及び廃棄物の処理及び清掃に関する法律施行令の一部を改正する政令の施行の際現にゆう出している温泉を利用する旅館業に属する事業場に係る排出水については、当分の間、適用しない。	
5 生物化学的酸素要求量についての排水基準は、海域及び湖沼以外の公共用水域に排出される排出水に限って適用し、化学的酸素要求量についての排水基準は、海域及び湖沼に排出される排出水に限って適用する。	
6 窒素含有量についての排水基準は、窒素が湖沼植物プランクトンの著しい増殖をもたらすおそれがある湖沼として環境大臣が定める湖沼、海洋植物プランクトンの著しい増殖をもたらすおそれがある海域（湖沼であって水の塩素イオン含有量が1リットルにつき9,000ミリグラムを超えるものを含む。以下同じ。）として環境大臣が定める海域及びこれらの流入する公共用水域に排出される排出水に限って適用する。「環境大臣が定める湖沼」= 窒素含有量又はリン含有量についての排水基準に係る湖沼、「環境大臣が定める海域」= 窒素含有量又はリン含有量についての排水基準に係る海域	
7 リン含有量についての排水基準は、リンが湖沼植物プランクトンの著しい増殖をもたらすおそれがある湖沼として環境大臣が定める湖沼、海洋植物プランクトンの著しい増殖をもたらすおそれがある海域として環境大臣が定める海域及びこれらに流入する公共用水域に排出される排出水に限って適用する。「環境大臣が定める湖沼」= 窒素含有量又はリン含有量についての排水基準に係る湖沼、「環境大臣が定める海域」= 窒素含有量又はリン含有量についての排水基準に係る海域	

表5.20 生活環境に係る環境基準値

類 型	河 川						湖沼・人工湖				海 域			
	AA	A	B	C	D	E	AA	A	B	C	A	B	C	
pH	6.5～8.5			6.0～8.5			6.5～8.5		6.0～8.5		7.8～8.3		7.0～8.3	
COD	—						1	3	5	8	2	3 ³⁾		8
DO	7.5		5		2		7.5		5	2	7.5	5	2	
BOD	1	2	3	5	8	10	—				—			
浮遊物質	25			50	100	¹⁾	1	5	15	¹⁾	—			
ヘキサ ン抽出物質	—						—				不検出		—	
大腸菌群数 ²⁾	50	1000	5000	—			50	1000	—		1000	—		

注 ¹⁾ ごみなどの浮遊が認められないこと ²⁾ MPN/100 mL ³⁾ COD_{OH}

表5.21 湖沼の窒素およびりんに係る環境基準値

項 目 類 型	利用目的の適応性	基 準 値	
		窒 素 (T - N)	り ん (T - P)
I	自然環境保全及びⅡ以下の欄に掲げるもの	[mg/L] 0.1以下	[mg/L] 0.005以下
Ⅱ	水道1, 2, 3級（特殊なものを除く） 水産1種 水浴及びⅢ以下の欄に掲げるもの	0.2以下	0.01以下
Ⅲ	水道3級（特殊なもの）及びⅣ以下の欄に掲げるもの	0.4以下	0.03以下
Ⅳ	水産2種及びⅤの欄に掲げるもの	0.6以下	0.05以下
Ⅴ	農業用水, 水産3種 工業用水及び環境保全	1以下	0.1以下

2 汚濁水の発生源

(1) 石灰石鉱山

石灰石鉱山（含ドロマイト鉱山）における排水は、主に坑内水と水洗排水である。

1) 坑内水

坑内採掘を行う一部の鉱山および露天採掘を行う鉱山では、鉱石運搬のための立坑および水平坑道

表5.22 水洗排水中固形物の分析例

分析項目	排水	
	石灰石水洗排水	ドロマイト水洗排水
Ig-Loss ^{注)}	34.94	43.98
SiO ₂	17.85	4.59
Fe ₂ O ₃	1.45	0.58
Al ₂ O ₃	2.96	1.11
CaO	38.59	34.95
MgO	3.29	14.48

注) Ig-Loss：強熱減量 Ignition Loss

が設けられる場合があり、掘さくに伴う坑内水の湧出を見ることがある。通常、湧水は重金属イオン等をほとんど含まず、またpHは中性ないし弱アルカリ性で、水質上の問題は比較的少ない。

2) 水洗排水

採掘された鉱石は、選鉱場に送り、破碎、水洗、ふるい分け等の処理により、整粒化と付着スライム除去とを行い、製鉄、生石灰製造原料等に供する。

水洗工程で発生する排水は、粗粒子の除去・回収のため更に分級機に供する。分級機オーバフロー中には数%から10%の懸濁物質が含まれるため、沈殿、ろ過等の処理を行う。

分級機オーバフローの懸濁物質成分分析例を、表5.22に示す。

(2) 金属鉱山および製錬所

金属鉱山および製錬所からの排水は、坑内水、選鉱廃水、製錬所廃水、ダム、鉱さい置場からの浸透水などに大別できる。

製錬所では各精鉱を原料とするほか、製錬での中間生成物やいったん市場に出て回収されたスクラップ類やめっきスラッジなどの金属含有廃棄物も処理する事例が増えている。取り扱う鉱石は鉱山、製錬所により異なり、排水中には、銅、鉛、亜鉛をはじめ、種々の金属イオンが含まれる。陰イオンは硫酸イオンが主であり、そのほか塩化物イオンやふっ化物イオンなどがある。

(3) 石炭鉱山

石炭鉱山の排水には坑内水と選炭廃水がある。一般に、水質面の問題は少ないが、通常選炭廃水が問題となる。

選炭工程では、数100 mmから数 μ m以下の粒度構成からなる原炭を処理して、廃石および石炭に付着する粘土等の不純物を除き、品位や粒度を整える。

選炭方法には乾式と湿式があるが、原炭湿分の関係から、亜炭を除いて、大部分は水を使用する湿式である。用水には坑内水、河川水、時には海水を利用し、微粉炭を除去・回収した選炭水は再利用

する（全使用量の80～95%は循環水）。選炭廃水では、SS（懸濁物質）とCODが重要であり、両成分はおおむね比例関係がある。また、同じSS濃度でも、純炭分の多い所ほどCOD値は高い。なお、COD濃度はBOD濃度の数百～数千倍であり、一般的な排水（数倍以下）とは異なる。

3 坑廃水処理技術

(1) 坑廃水の処理

1) 坑廃水処理の基本的考え方

坑廃水処理の対象となる水は、坑内水、選鉱廃水などであり、坑廃水処理では、これらの坑廃水を処理することにより、放流排水中の汚濁物質を、基準値以下にする。処理に当っては、「負荷量主義」（「絶対量主義」）の考え方にもとづき、濃度とともに流量も考慮する。

坑廃水処理水量を少なく抑えることは、設備効率上極めて有効である。このため、水質良好な廃水の分離排水、湧水箇所の水止め、酸化防止等の手段を講ずる。また、処理設備および放流口は、できるだけ集約することが、技術上・管理上望ましい。各種シクナオーバフロー等は原則として場外に出さず、繰り返し使用や水の用途別使い分け等により、処理水量の軽減を考慮する。

一般に排水処理に採用されている処理技術を、単位操作の面から分類すれば、次のようになる。この項では、主として乾燥を含めた固液分離について記述する。

- ① 固液分離（凝集、沈降、ろ過・脱水、浮上、遠心沈降・遠心分離、その他）
- ② 中和
- ③ 酸化
- ④ 還元
- ⑤ 沈殿（化学的）
- ⑥ イオン浮選その他の浮選
- ⑦ その他の物理化学的処理（吸着、イオン交換、逆浸透、電気透析）
- ⑧ 生物化学的処理（活性汚泥、散水ろ床、嫌気性消化、ラグーン）
- ⑨ 熱処理（乾燥、蒸発、凍結処理、焼却）

2) 固液分離

懸濁固形物（Suspended Solids, 略称SS）の負荷量を減少させる処理法として、凝集、沈降、ろ過・脱水、浮上法のほか遠心沈降・遠心ろ過等の遠心分離法等がある。

① 沈降

沈降は最も重要かつ普遍的な固液分離法であり、坑廃水中のSSを粒子自身の重みで沈降させ、液体と粒子を分離する操作である。液体中の固体粒子の沈降速度は、粒子の大きさと密度、液体の粘性と密度等に左右される。一般に排水処理対象の固一液懸濁系に適用できる粒子の沈降速度は、ストークスの式を用いる。ただし、水の流れを特徴づける係数であるレイノルズ数 R_e （Reynolds Number）が1.0以上になると、アレンの式やニュートンの式等を用いる。

粒子の沈降速度は、粒子と液体との密度差が大きいほど、粒子の径が大きいほど、また液体の粘性係数が小さいほど大きくなる（例えば、水温が上昇すると粘性係数が低下し、沈降速度が上昇する）。また、遠心力を利用する遠心沈降法も、沈降速度を上昇させる。

$$R_e \leq 1 \quad v = \frac{g(\rho_s - \rho)d^2}{18\mu} \quad (\text{ストークスの式}) \quad (5.32)$$

$$1 < R_e \leq 500 \quad v = \left\{ \frac{4(\rho_s - \rho)^2 g^2}{225 \mu \rho} \right\}^{1/3} d \quad (\text{アレンの式}) \quad (5.33)$$

$$500 < R_e \leq 10^5 \quad v = \left\{ \frac{3g(\rho_s - \rho)d}{\rho} \right\}^{1/2} \quad (\text{ニュートンの式}) \quad (5.34)$$

ここに、 v ：粒子の沈降速度 [cm/s] g ：重力の加速度 [cm/s²]

$\rho_s \cdot \rho$ ：粒子及び水の密度 [g/cm³] d ：粒子の直径 [cm]

μ ：水の粘度 [g・cm⁻¹・s⁻¹] R_e ：レイノルズ数 (= $dv\rho/\mu$)

② 凝 集

凝集は沈降・ろ過・脱水の促進手段であり、処理技術上重要な役割を持つ。

沈降しにくい微細粒子（粒径1 mmから500 nm程度のコロイド状粒子も含む）の大部分は水中で負に荷電している。粒子表面では、表面荷電に対して反対符号の荷電が相対し、固定の電気2

表5.23 凝集剤の種類（無機物）

分 類	物 質 例
無 機 塩	硫酸アルミニウム 硫酸鉄（Ⅲ） 硫酸鉄（Ⅱ） アルミン酸ナトリウム 塩化鉄（Ⅲ） 塩化亜鉛 四塩化チタン ポリ塩化アルミニウム
酸	硫 酸 塩 酸 二酸化炭素
アルカリ	炭酸ナトリウム 水酸化ナトリウム 石 灰
金属電解産物	電解水酸化アルミニウム 電解水酸化鉄
そ の 他	活性けい酸

表5.24 凝集剤の種類（界面活性剤）

分 類	物 質 例
陰イオン性	ラウリン酸ナトリウム ステアリン酸ナトリウム オレイン酸ナトリウム ドデシルベンゼンスルホン酸ナトリウム ロジン酸ナトリウム そ の 他
陽イオン性	ドデシルアミン・アセテート オクタデシルアミン・アセテート ロジンアミン・アセテート オクタデシル・トリメチル・アンモニウム・クロライド オクオクタデシル・ジメチル・ベンジル・アンモニウム・クロライド その他

表5.25 凝集剤の種類（高分子凝集剤）

分 類		物 質 例
重 合 度	イ オ ン 性	
低 重 合 〔分子量約 1000～数万〕	陰イオン性	アルギン酸ナトリウム, CMC-Na その他
	陽イオン性	水溶性アニリン樹脂塩酸塩, ポリエチレンイミン ポリビニル・ベンジル・トリメチル・アンモニウム・クロライド, その他
	非イオン性	デンプン, 水溶性尿素樹脂, その他
	両 性	ゼラチン, その他
高 重 合 〔分子量約10万 ～約1000万〕	陰イオン性	ポリアクリル酸ナトリウム, マレイン酸共重合物塩 ポリアクリルアミド部分加水分解物塩, その他
	陽イオン性	ポリビニルピリジン塩酸, ビニルピリジン共重合物塩, その他
	非イオン性	ポリアクリルアミド, ポリオキシエチレン

重層が形成される。その外側は拡散層となり、正負の荷電の分布は一様ではない。このように、帯電した微細粒子が動くときに、粒子に固定された電気2重層の表面、すなわち固定2重層と拡散層との界面（滑り面）に、ゼータ電位（Zeta Potential：界面動電位あるいは動的界面電位）を生じる。この電位は、微細粒子間に反発を来し、粒子相互の凝集を妨害する原因となる。

電解質濃度を増すとゼータ電位は低下するので、薬品を用いてこのゼータ電位を調節し、これらの微細粒子を結合させてフロック（大粒の凝塊）を生成させる操作が凝集である。フロック形成により、見掛けストークス粒径が大きくなり、沈降速度を増加するとともに、ある条件下では、コロイド状粒子を吸着・ろ過して、清澄な上澄水を得る。これに用いる薬品が凝集剤である。

各種凝集剤の種類を、表5.23～表5.25に示す。

無機凝集剤を使用する場合、最も留意すべき因子はpHであり、最適pH値は粒子の質や濃度、共存イオン、添加量によって変わる。

有機凝集剤には、高分子凝集剤と界面活性剤とがあるが、一般的には高分子凝集剤が多く使用されている。これは水溶性高分子物質であり、電荷を中和する作用のほか無機凝集剤にはない架橋作用により、粒子間の橋渡しで粒子を結びつける、凝集作用がある。一般的に、高分子凝集剤は重合度の高いものが優れた凝集作用を持つ。ただし、添加量が過剰になると粒子表面が親水性

となり，凝集効果が低下する。

凝集剤の選定・使用では，沈降試験を行い，界面沈降速度，上澄水の濃度，および固形物の沈降容積を測定して，目的に適した凝集剤の選定，最適使用量，使用法等を決定する。

③ ろ過・脱水

ろ過とは，固形物の懸濁液を，無数の小孔をもつ多孔質ろ材あるいは網目や，数10 μm から数mmの径をもつ固体充てん層を通すことにより，懸濁液中の固体粒子群をろ滓として捕捉するとともに，これらを通過する清澄液をろ液として分離する操作である。

ろ過は，その目的によって，清澄ろ過と脱水ろ過とに分けられる。

a) 清澄ろ過

清澄ろ過は重力式分離（沈降，浮上）で除去しきれなかった微量の懸濁物質を，さらに除去して清澄液を得ることを目的とする。上水の浄水場，一般排水処理の最終仕上げ等の急速ろ過，緩速ろ過等がある。本法は，坑廃水処理では，さほど利用されない。

浄化の主要因子はろ材のスクリーン作用，ろ材空隙での重力による沈降，吸着作用等で，ろ材には砂，アンスラサイト（無煙炭）やザクロ石等を使用する。

ろ材の表面にろ過助材をコーティングしてプレコートし清澄なる液を得るプレコートろ過も，清澄ろ過に入る。ろ過助材は，珪藻土，パーライト，セルロース，炭素等で作られている。

b) 脱水ろ過

脱水ろ過は，液体中から分離された精鉱や汚泥（スラッジ）の含水率を小さくすることを目的とする。圧力ろ過，真空ろ過，重力ろ過，絞り加圧ろ過，遠心力ろ過等がある。

- ・圧力ろ過 各種ポンプあるいは圧縮空気等を用いて，大気圧以上，通常は0.4～0.6 MPa程度の圧力で，ろ過する方式である。
- ・真空ろ過 真空ポンプを用いて，50～80 kPa程度に減圧することにより，ろ過する方式である。
- ・重力ろ過 回転式スクリーンを用い重力だけでろ過する方式と，加圧ローラ，キャタピラ等を用いて脱水する絞り加圧ろ過方式がある。いずれも，ろ材には非金属性ろ布（木綿，化学繊維，ガラス繊維等），金属性ろ布（ステンレスクロス，アイアンクロス等）などを使用する。

④ 浮上

浮選法（泡沫浮選法）は，鉱業関係で利用されている技術である。本法では，水中懸濁液（パルプ）の形で浮選機内に入った固体粒子が選択的に水中の気泡に付着し，その浮力によって液面に浮上し形成された泡沫（フロス）を回収する。

この方法が排水処理の固液分離に利用される場合には，浮上法と呼ばれる。

浮上分離法は，含油排水，金属表面処理排水，パルプ排水等で適用されており，その他合ゴム排水，電着塗料排水，染色排水，選炭排水，古紙再生時のカーボンブラック排水等でも近年利用されている。

次のような場合に浮上法の適用が考えられる。

- a) 排水中の固形物粒子が、水より比重の小さい物質や、水と同じくらいの比重で、気泡を抱きやすい性質を持つ。
- b) 水酸化物フロックの比重が水に近づき、フロックの沈降速度が小さい。
- c) 水と油の混合物のほか、エマルジョンや種々の懸濁物を含み、重力分離が不可能。

イオン浮選では、水溶液中のイオンに、これと反対符号の界面活性剤（これを捕収剤という）を添加し、水溶性錯化合物あるいは不溶性沈殿を作り、これを気泡につけて浮上させ、フォーム（Foam）あるいはスカム（Scum）として回収する。広義には、イオンを硫化物として沈殿させ浮上分離する沈殿浮選、イオンをベントナイト等の粒子表面に吸着させ浮上分離する吸着粒子浮選なども含まれる。

3) 乾燥

回収固形物の有効利用を考慮した場合、乾燥の工程を固液分離のプロセスとして考える必要がある。固液分離プロセスは、沈降（浮上）・ろ過・脱水・乾燥の順に進行するが、乾燥工程では、固形物の含水率を機械的に十分下げた後に行う。乾燥には天日乾燥と熱乾燥とがある。

- a) 天日乾燥: 汚泥を砂床上に載せて、水分の一部を砂床でろ過除去し、同時に太陽熱や風で自然乾燥させる。天日乾燥床は、建設費が安く、作業が簡単という利点があるが、反面、広い土地面積を必要とするため、湿潤な気候、狭い国土の日本では適用が困難である。
- b) 熱乾燥: 乾燥方式には通気乾燥、噴霧乾燥、回転乾燥、気流乾燥、流動層乾燥、伝熱加熱型乾燥、凍結乾燥などがあり、対象坑廃水汚泥の性状に応じた乾燥方式を採る必要がある。

4) 中和

酸性の坑廃水をアルカリで中和する場合と、アルカリ性の坑廃水を酸で中和する場合とがある。

アルカリで中和する場合、中和剤としては通常消石灰が用いられる。石灰石（通称炭カル）の利用も現在では一般化し、石灰石と消石灰の二段中和法が行われる事例もある。

金属イオンが混在している溶液では、アルカリ中和して、金属水酸化物を生成させ、沈殿分離させる。本法は、排水処理では最も一般的である。

溶解度積を K_s とすると、金属Mの溶存イオンが M^{2+} の場合は、

$$K_s = [M^{2+}] [OH^-]^2 \quad \dots\dots (5.35)$$

$$\log [M^{2+}] = \log K_s - 2\log [OH^-] \quad \dots\dots (5.36)$$

水のイオン積を K_w とすると

$$K_w = [H^+] [OH^-] = 10^{-14} \quad \dots\dots (5.37)$$

$$\text{また、pH} = -\log [H^+] \quad \dots\dots (5.38)$$

(5.36), (5.37) を (5.35) に代入して

$$\begin{aligned} \log [M^{2+}] &= \log K_s - 2\log K_w - 2\text{pH} \\ &= \text{const} - 2\text{pH} \quad \dots\dots (5.39) \end{aligned}$$

M^{3+} の場合は、同様にして

$$\log [M^{3+}] = \text{const} - 3\text{pH} \quad \dots\dots (5.40)$$

この結果を、表5.26および図5.29に示す。溶解度積の小さい順に各水酸化物が沈殿し、pHが高いほど金属濃度は低くなる。Al, Cr, Zn, Pbなどは、更に高pH域で再溶解現象が生じ、イオン化する。各金属に対する排水基準を満たすpH値を、表5.26から算定した結果を、表5.27に示す。単純な水溶液では、順次沈殿が生成して来るので、各金属の分別が可能である。

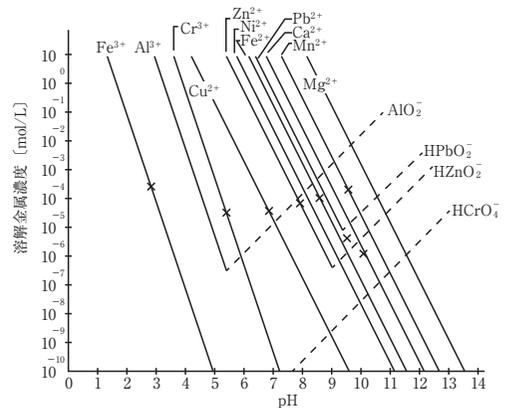


図5.29 各種金属水酸化物の溶解度とpHとの関係

表5.26 金属水酸化物の溶解度積，金属イオン濃度とpHとの関係

金属イオン	解 離 反 応	溶 解 度 積	金属イオン濃度とpHとの関係
Fe ³⁺	Fe(OH) ₃ = Fe ³⁺ + 3 OH ⁻	6.0 × 10 ⁻³⁸	log [Fe ³⁺] = 4.78 - 3 pH
Al ³⁺	Al(OH) ₃ = Al ³⁺ + 3 OH ⁻	5.0 × 10 ⁻³³	log [Al ³⁺] = 9.70 - 3 pH
Cr ³⁺	Cr(OH) ₃ = Cr ³⁺ + 3 OH ⁻	6.0 × 10 ⁻³¹	log [Cr ³⁺] = 11.78 - 3 pH
Sn ²⁺	Sn(OH) ₂ = Sn ²⁺ + 2 OH ⁻	3.0 × 10 ⁻²⁷	log [Sn ²⁺] = 1.48 - 2 pH
Cu ²⁺	Cu(OH) ₂ = Cu ²⁺ + 2 OH ⁻	1.6 × 10 ⁻¹⁹	log [Cu ²⁺] = 9.20 - 2 pH
Cr ²⁺	Cr(OH) ₂ = Cr ²⁺ + 2 OH ⁻	1.0 × 10 ⁻¹⁷	log [Cr ²⁺] = 11.00 - 2 pH
Zn ²⁺	Zn(OH) ₂ = Zn ²⁺ + 2 OH ⁻	4.5 × 10 ⁻¹⁷	log [Zn ²⁺] = 11.65 - 2 pH
Ni ²⁺	Ni(OH) ₂ = Ni ²⁺ + 2 OH ⁻	1.6 × 10 ⁻¹⁶	log [Ni ²⁺] = 12.20 - 2 pH
Fe ²⁺	Fe(OH) ₂ = Fe ²⁺ + 2 OH ⁻	1.8 × 10 ⁻¹⁵	log [Fe ²⁺] = 13.26 - 2 pH
Pb ²⁺	Pb(OH) ₂ = Pb ²⁺ + 2 OH ⁻	4.2 × 10 ⁻¹⁵	log [Pb ²⁺] = 13.62 - 2 pH
Cd ²⁺	Cd(OH) ₂ = Cd ²⁺ + 2 OH ⁻	2.0 × 10 ⁻¹⁴	log [Cd ²⁺] = 14.30 - 2 pH
Mn ²⁺	Mn(OH) ₂ = Mn ²⁺ + 2 OH ⁻	2.0 × 10 ⁻¹³	log [Mn ²⁺] = 15.30 - 2 pH
Mg ²⁺	Mg(OH) ₂ = Mg ²⁺ + 2 OH ⁻	8.9 × 10 ⁻¹²	log [Mg ²⁺] = 16.95 - 2 pH

ただし、液中には実際には数種の金属イオンが混入しており、これらが沈殿するときには共沈現象等が生じ、一般にその金属水酸化物が生成する理論値よりも低いpH値で同時に沈殿し、混合水酸化物となることが多い。

pH制御の基本方式を、図5.30に、また、中和剤の種類一覧表を、表5.28に示す。

5) 酸 化

坑废水处理では、中和・沈殿・固液分離等の処理を容易にするための予備手段として、酸化を行う

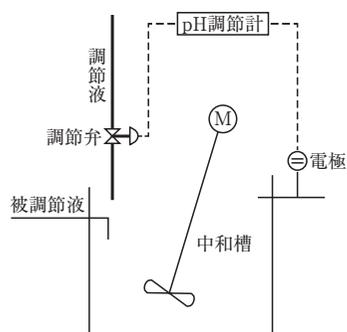


図5.30 pH制御の基本方式

表5.27 各金属が排水基準を満たすpH値

金属イオン	排水基準 [mg/L]	排水基準を満たすpH
Fe ³⁺	10	2.8
Cr ³⁺	2	5.4
Cu ²⁺	3	6.8
Zn ²⁺	5	7.9
Fe ²⁺	10	8.5
Pb ²⁺	1	9.5
Mn ²⁺	10	9.5
Cd ²⁺	0.1	10.2

表5.28 排水処理に用いられる酸およびアルカリ中和剤

酸及びアルカリ	化学式	溶解度 [g/100 g H ₂ O] 肩数字は温度	
水酸化ナトリウム (カセイソーダ)	NaOH	42 ⁰	} 溶解度, 反応速度共に大。 供給が容易で処理も便利であるが価格が高い。
炭酸ナトリウム (ソーダ灰)	Na ₂ CO ₃	7.1 ⁰ , 21.6 ²⁰	
酸化カルシウム (生石灰)	CaO		} 溶解度が小さいのでスラリーとして供給するので, 攪拌機付注入装置を要す。反応速度小で, 反応生成物が不溶性の場合が多い。反応生成物の脱水性はよい。価格が安い。
水酸化カルシウム (消石灰)	Ca(OH) ₂	0.185 ⁰	
アセチレンさい	Ca(OH) ₂		
炭酸カルシウム (石灰石)	CaCO ₃	0.014 ²⁵	} 主として強酸性の排水が対象。処理水を中性にするために更に消石灰などの添加が必要。
セメントダスト	CaO		
ドロマイト	CaCO ₃ MgCO ₃	0.032 ¹⁸	
硫酸	H ₂ SO ₄		} 溶解度, 反応速度大, 液体のため制御は容易であるが, 取扱い危険。
塩酸	HCl		

ことが多い。Fe (II) を酸化してFe (III) にする操作は, その代表的なものである。塩素酸化法, 空気酸化法 (曝気法), オゾン酸化法, バクテリア酸化法などが, 工業的に実施されている。

6) 還元

坑廃水処理法として重要な還元処理の例は、クロム（Ⅵ）をクロム（Ⅲ）にする操作である。還元剤には二酸化硫黄，亜硫酸ナトリウム，亜硫酸水素ナトリウム等が用いられる。くず鉄取銅法による沈殿銅の生成も一種の還元反応である。

7) 沈 殿

特定の溶存物質を化学的に沈殿させる操作で，中和操作と同時に行う場合と，単独で行う場合とがある。金属イオンを水酸化物として沈殿させる中和沈殿法は，最も一般的な処理技術である。また，沈殿を1段階で行わず，pHその他の条件を都度調整して，各種溶存物質を何段かで順次沈殿させる分別沈殿法（または優先沈殿法）がある。

硫化物沈殿法は，硫化水素 H_2S ，硫化ナトリウム Na_2S ，水酸化ナトリウム $NaHS$ などを加え，各金属を水溶液から硫化物として沈殿させる主要な処理技術の1つである。Cu，Pb，As除去への適用例がある。ただし，溶液中に Fe^{3+} ， CrO_4^{2-} などがあると，硫化剤はその分だけ消費され，コロイド状の遊離硫黄が懸濁する。また，遊離硫黄や金属硫化物は沈降しにくいこと，残存する S^{2-} を除去する工程を必要とすること等の課題がある。

8) その他の処理法

① 吸 着

吸着処理は，固体吸着剤を何らかの方法で処理対象水と接触させ，汚濁成分を吸着除去した後，吸着剤と処理水を分離する方法である。吸着剤としては，粉末あるいは粒状の活性炭，白土，ゼオライト，ポーキサイト，種々の粘土，骨炭，アルミナ，マグネシア，シリカゲル，活性シリカ等があるが，いずれも高価である。

排水処理に一般的に用いられているのは活性炭で，木材，泥炭等を原料として炭化賦活する。活性炭は多くの微細な空隙を持つ複雑な網目構造をしている。空隙孔径は0.1～100 nmの範囲で，細孔表面積は700～1,400 m^2/g の範囲にあり，この内表面への溶質の濃縮（吸着）を行う。吸着力が低下した活性炭は再生して使用し，再生損失分は補給する。一般に，活性炭処理はコストが高いため，他の方式と組合せて行う場合が多い。

② イオン交換

イオン交換体は，主にイオン交換樹脂が用いられる。イオン交換樹脂は，イオン交換基の種類により，陽イオン交換樹脂，陰イオン交換樹脂およびキレート樹脂がある。キレート樹脂は特殊のイオンのみを選択的に吸着する性質を持っている。吸着されたイオンは，高濃度の食塩水，塩酸，水酸化ナトリウムなどで溶離させて再生使用する。

本法では，廃水中の各種有用イオンの回収や，汚濁物質の選択的除去を行い，キレート樹脂による特定重金属の選択的捕集も一部実用化されている。排水中の不純物濃度が高い場合は，イオン交換樹脂の閉そくや，いたみが生ずる。イオン交換樹脂は高価であるため，いったん処理した処理水を更に高度処理する場合に使用されることが多い。

③ 逆浸透

溶媒は通すが溶質は通さない半透膜を介して，一方に希薄溶液（水），反対側に濃厚溶液を同一水面になるように置くと，希薄溶液は半透膜を通して濃厚溶液側に動き，濃厚溶液の水面が次第に高くなり，ある高さで安定する。この原理を浸透といい，この水位の差が浸透圧である。

このとき，濃厚溶液側に浸透圧以上の圧力をかけると，濃厚溶液中の水だけが半透膜を通過する。この原理が逆浸透であり，有機物や無機溶解物質を除去して，非常に良質の淡水が得られる。

半透膜には，酢酸セルロース，ナイロン，カーボン等を用いる。

逆浸透法の原理を，図5.31に示す。

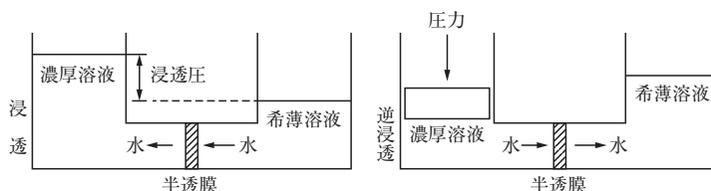


図5.31 逆浸透法の原理

④ 電気透析

電気透析では，イオン交換膜のイオン選択透過性を利用して，水中のイオン性成分（無機塩類など）を除去する。陽イオンのみを通す陽イオン交換膜と，陰イオンのみを通す陰イオン交換膜とを交互に多数配列し，その膜群の両端に一对の電極を配置し，その電位差により液中の電解質は1つとばした次の部屋で濃縮され，また脱塩される。

本法は，製塩のための海水濃縮等に実用化されているが，排水処理等への応用事例はまだわずかである。

電気透析法の原理を，図5.32に示す。

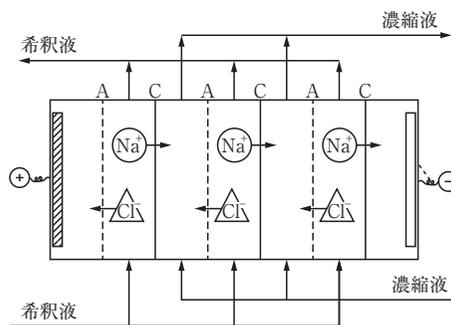


図5.32 電気透析法の原理

⑤ 生物化学的処理

バクテリアなどの微生物の働きで，主として有機物を含む排水を分解処理する。有機性の排水は，処理方法も好気性処理と嫌気性処理に分類される。有機物の含有量が低い場合は好気性処理が有効であり，高い場合（BOD 10,000 mg/L 以上）は嫌気性処理が有利である。

a) 好気性処理

好気性処理は，好気性微生物の働きで，脂肪，炭水化物，たん白質のような比較的複雑な分子構造を持つ有機物を，加水分解や酸化で分解し，最終的には二酸化炭素，硝酸塩，硫酸塩，

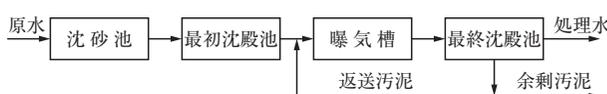


図5.33 標準的な活性汚泥法フロー

水のような汚染性を持たない簡単な化合物にする処理法である。代表的な方法の1つに活性汚泥法がある（図5.33参照）。

また散水ろ床法も、好気性処理法の1つである。本法は、碎石などを積み上げた床を設け、上部から原水を散布して、原水がろ材の表面に沿って流れる間に、表面に膜状に付着生成した微生物で汚濁物を吸着・分解する。

b) 嫌気性処理

嫌気性処理は、嫌気消化法あるいはメタン発酵法とも呼ばれる。空気および溶存酸素の少ない嫌気性条件下で、嫌気性微生物の働きにより、有機物を最終的にはメタン、窒素ガス、硫化水素、二酸化炭素などに分解する。

嫌気性処理は、沈殿処理で得られた有機性沈殿汚泥、活性汚泥法の余剰汚泥、し尿、発酵廃液などの処理に用いる。発生したメタンをエネルギーとして利用できる。

⑥ 曝気式酸化池法（曝気式ラグーン）

ラグーン（潟（かた）、潟湖（せきこ）Lagoon）は、その形式から、好気性池、エアレーション式ラグーン、嫌気性池の3種に大別できる。いずれも比較的広い面積を必要とする。

a) 好気性池

藻類の光合成作用による酸素および溶存酸素を利用して、有機物を好氣的に酸化分解する処理法である。

b) 嫌気性池

有機物を嫌気性発酵によって処理する池である。

c) エアレーション式

好気性池の改良形である。

4 処理施設の原理・機能

(1) 沈降分離装置

沈降分離装置には回分式と連続式とがある。

回分式では、汚泥を取り除く際、原排水の流入を一時停止する。原排水中の懸濁物を沈降分離する目的で、原排水を一時滞留させる機能を持つ池や水槽（沈殿槽、沈殿池等）がこれに該当する。

一方、連続式には、濃厚懸濁液を対象として、濃厚なスラリを得ることを目的とする連続濃縮装置（シクナ）と、比較的希薄懸濁液を対象として、清澄な上澄水を得ることを目的とする連続清澄装置（クラリファイア）があり、両者には装置上本質的な相違はないが、部分的に構造が異なる。

① 沈殿池（沈殿槽）

沈殿池を設計するに当たり考慮すべき事項は、滞留時間、池の容量および数、水の流速、池の深さ、池の幅と長さとの関係、流入口および流出口の設計、覆いまたは屋根、排泥設備、沈殿保有能力である。

回分式の場合、沈殿池仕様は概ね次のとおりである。

- ・滞留時間 一連の実験により決定。最短2時間から長い場合は1か月以上と幅があるが、一般には4時間程度である。
- ・流速 小さいほど沈殿効果がよいが、通常は0.2～0.4 m/min程度である。
- ・深さ、幅、長さ 深さは通常2～4.5 m程度。長さとの比は4：1で、最大長さは普通30 m程度である。池の容積に比べ、表面積が大きすぎると、風により水の流れが乱れる恐れがある。大体の標準は、1 m²当りの1日の処理水量40～50 m³として設計する。また、沈殿作用には細長い池が適している。
- ・排泥設備 排泥はスラッジ状で排出する場合、流入停止後一定時間静置し、上澄水を排出して機械力、あるいは人力で排出する場合など、さまざまな方式がある。なお、地形を利用してダムを築いたり、大きな素掘り沈殿池を造ることもある。

② 傾斜板沈降装置

沈降分離の場合、その分離速度 v と装置に必要な沈降面積 A と処理量 Q には、次の関係がある。

$$A = Q/v \quad \dots\dots (5.41)$$

従って、処理装置を能率化するには、沈降速度を大きくするか、あるいは装置の占有面積内で分離面積をできるだけ大きくすればよい。前者には凝集剤の使用、後者には傾斜板の使用がある。

ビーカー中に懸濁水を入れて静置する場合(図5.34参照)、Aの場合は懸濁粒子が、上面の a から底面の b まで沈降しなければ沈降は終了しない。これをBの場合のように、ビー

カーを4等分して棚を設けると、粒子は $a' \sim b'$ 間を沈降すればよく、Aの場合に比べて時間的に1/4でよいことになる。しかしこの方法は、スラッジの取出しが困難なため、実用的とはいえない。

そこでCのように、棚の仕切りを斜めにして、 $a'' \sim b''$ 間の垂直距離を $a' \sim b'$ 間の距離と同様にとすると、分離された粒子は坂上を流れて底部にたい積するため、排出が容易になり、静置時間もBの場合と同じになる。

傾斜板沈降装置はこの原理を利用している。実際に沈降装置に使用する場合は、例えば、板をくの字形に、2段、3段、4段と吊り下げる(図5.35参照)。懸濁物は板の表面に沿って下降し、同時に清澄水は板の裏面に沿って上昇できるように、上段と下段の板と板の間にスリットを設け、上昇する清澄水と沈降する濁質との混合を避ける。

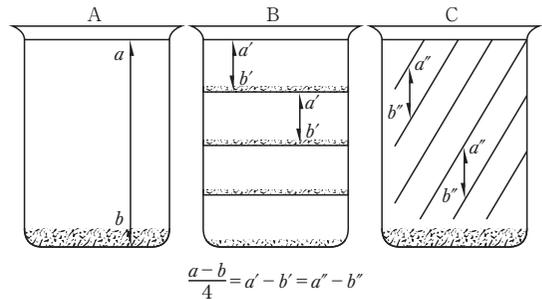


図5.34 傾斜板沈降装置の原理

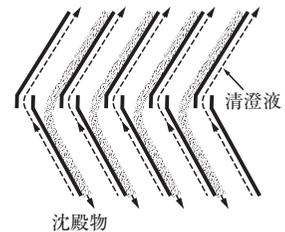


図5.35 傾斜板沈降装置の設置図

(2) ろ過, 脱水装置

① 清澄ろ過装置

排水処理で用いる清澄ろ過装置は、急速ろ過装置や高速ろ過装置が多く、沈殿装置その他の処理装置からキャリーオーバーしたわずかの固形分を除去する、仕上げ工程に用いる。

急速ろ過装置には、重力式、自動式、立体式がある。一般的な重力式急速ろ過装置は表面洗浄装置、ろ過層、砂利層、集水装置から構成され、ろ層の厚さは600~700 mm、ろ材は有効径0.45~0.70 mm、均等係数1.7以下の砂またはアンスラサイト（無煙炭）等を使用する。

急速ろ過装置の一例を、図5.36に示す。

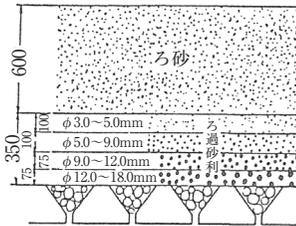


図5.36 急速ろ過装置

② 脱水ろ過装置

脱水ろ過法には、圧力ろ過、真空ろ過、重力ろ過、絞り加圧ろ過等があり、液体中から分離された汚泥の含水率を低くすることを目的とする。なお、脱水ろ過を行う前に、物理化学的操作による汚泥脱水性の改善を行うことが多く、前処理添加剤としては、灰、消石灰、けいそう土、微粉炭、無機凝集剤、高分子凝集剤等が用いられる。

・圧力ろ過装置 最も代表的なものはフィルタプレス（圧ろ機）である。ろ過圧力は通常0.4~0.6 MPaである。フィルタプレスは極微粒子のスラッジに適しており、ケーキ含水率が低いという利点がある。一方、回分式であること、ろ過速度が小さいこと等の欠点がある。使用するろ布は、パイレン、ナイロン、テトロン等の化学繊維が多い。

・真空ろ過装置 回分式と連続式があるが、一般には連続式が使用される。多孔式ドラムやディスクなどにろ布を取付けてこれを回転させ、内部を真空ポンプで真空度50~80 kPa程度に減圧する。ドラム等が汚泥に浸漬しているときには、汚泥は真空の負圧でろ布面に吸着され、回転が進んで汚泥が液面を離れると、吸着した汚泥の脱水が行われる。一定の排出位置に

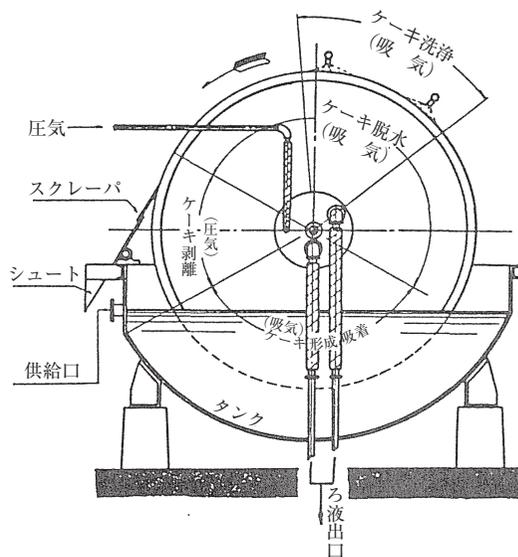


図5.37 連続式真空ろ過装置の原理

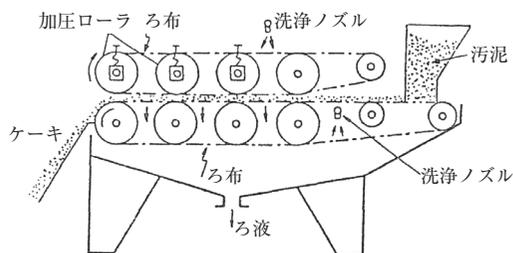


図5.38 ロールプレスろ過機

きた所で、バルブの自動動作により、圧縮機の正圧に切り替わり、ケーキが円筒表面から排出される。ろ布のケーキ洗浄も行うことができる。オリバ形真空ろ過機などが用いられる。真空ろ過の原理を、図5.37に示す。

- ・絞り加圧ろ過装置 汚泥を上下2段のエンドレス布で挟み、これを加圧ローラで絞り取る。ろ材としてスポンジを使用し、毛細管現象を利用してろ材に水分を吸収させ、その後圧搾用エンドレスベルトによって絞り取るタイプもある。

ロールプレスろ過機の一例を、図 5.38に示す。

③ その他の脱水装置

- ・遠心分離機 遠心脱水は、遠心力を利用して汚泥と水分を分離するもので、遠心ろ過を行わせるバスケット型と、遠心力の差で分かれた固形物と水を分離排出するスクリュデカンタ型がある。通常、汚泥の脱水には、スクリュデカンタ型が使用される。
- ・湿式造粒脱水機 汚泥に高分子凝集剤その他の脱水助剤をあらかじめ添加・攪拌し、フロックを作った原液を、回転円筒内でゆっくりと転がり運動を与えると、この運動により、フロックは次第に造粒されてケーキ状となり、水と分離しやすい状態になる。円筒部周速は、汚泥の性状によって適正速度に調整する。

(3) 乾燥装置

① 通気乾燥装置

通気乾燥法では、被乾燥物層の空隙に熱風を強制通過させるバンド形通気乾燥機が代表的である。これは、金網または多孔板で構成されるコンベア的一端を供給口として、1段または数段のコンベア上を運搬し、13~15 cm程度の厚みの被乾燥物層に、上方または下方から熱風を強制通気して乾燥する。通気乾燥装置の一例を、図5.39に示す。

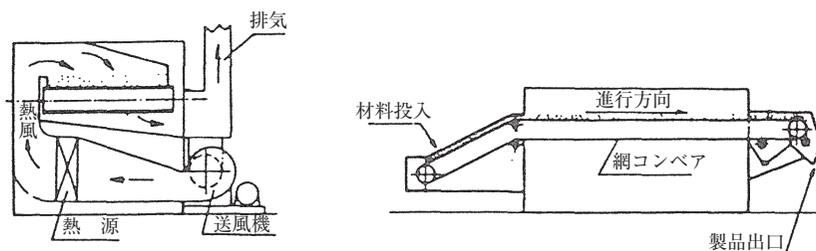


図5.39 通気乾燥装置（一段式）

② 回転乾燥装置

回転乾燥機の主体は、適当な傾斜と回転を与えられて運転されている円筒状の部分でありその中に被乾燥物がフィードされ、次いで通過中に乾燥される。このタイプは、大量処理に適し、構造が簡単で取扱いが容易であるうえ、被乾燥物の性状（含水率、粒度など）の変化に対する順応性が大きい。また熱源の選定範囲が広い等の特徴がある。

③ 気流乾燥装置

気流乾燥機は、被乾燥物を高速（通常15～40 m/s）で流れる熱気流中に供給・分散させて、熱気流と並流に搬送しながら迅速に乾燥させる方式である。熱容量係数が大きい、乾燥時間が短い、熱効率が大きい、処理量が多い、構造が簡単である等の利点があるが、解砕機でよくほぐれないような被乾燥物の場合は適用が困難である。

④ 流動層乾燥装置

流動層乾燥機は、円形または長方形の乾燥室内で、多孔板などの整流器の上にある被乾燥物の下方より熱風を送り、熱風中に被乾燥物を浮遊させ流動層を形成させながら、熱風と激しく混合させて乾燥する方式である。熱風と接触する材料表面積が大きい、滞留時間を任意にとれる、構造が比較的簡単等の利点があるが、凝集性のある被乾燥物には適しない。

5 処理施設の選定と維持管理

(1) 処理施設の選定

鉱山排水に含まれる汚濁物質の処理設備を選定する際に、考慮すべき点を次に示す。

- ・ 浮遊物質 浮遊物質濃度と沈降性を検討する。沈降性が悪いときは凝集剤を選択して凝集沈降試験を行う。
- ・ 中和試験 金属イオンを含む排水では、一定量の試験排水にアルカリ溶液を加えて、pH変化を追跡する（中和曲線の作成）。同時に上澄水中の金属イオン濃度を追跡する。これも広義の中和曲線の作成である。これらの情報は処理装置の選定の重要なファクタとなる。この際、生成する沈殿の性状（安定容積、ろ過性など）も見逃してはならない。
- ・ 高度処理 特殊な処理を必要とするときは、それに見合った基礎条件の検討が必要である。
- ・ 製造工程の検討 排水によっては既存の技術では経済的に処理不能なこともあり得る。このような場合は全プロセスとしての製造工程を再検討する必要がある。
- ・ 実装置の選定 このような検討を経た後、実装置を選定する場合には、設置場所、建設費、運転費、スラッジ量と処理、処分、維持管理の難易、担当メーカーの能力、実績、アフターサービスなどの事項を検討する。

ここで、石灰石鉱山を例に処理設備選定について具体的に述べる。

石灰石鉱山の選鉱排水処理技術は、大きく分けて次のように分類される。

- ① 懸濁物を含む排水を清澄な処理水と汚泥とに分離する清澄・濃縮技術。
- ② 生成した汚泥を処理水と脱水ケーキとに分離する脱水技術。
- ③ pH調節のための中和技術（必要に応じて適用）。

清澄・濃縮工程 凝集沈降および加圧浮上が適している。凝集沈降工程では、前段にシクナを置いて比較的粗粒の固形物を自然沈降させ、オーバーフローをクラリファイアで凝集沈降させる方式が、経済的および管理技術的に有利と考えられる。加圧浮上の場合も、なるべく微細な

固形物および比較的低濃度の方が良好な結果が得られるため、凝集沈降と同じく前段にシクナを設ける必要がある。

脱水工程 極微粒のみの固形物には、フィルタプレスの適用が最も確実である。脱水後のケーキのハンドリングを考慮すると、湿式造粒脱水機と圧さく脱水機との組合せが考えられる。

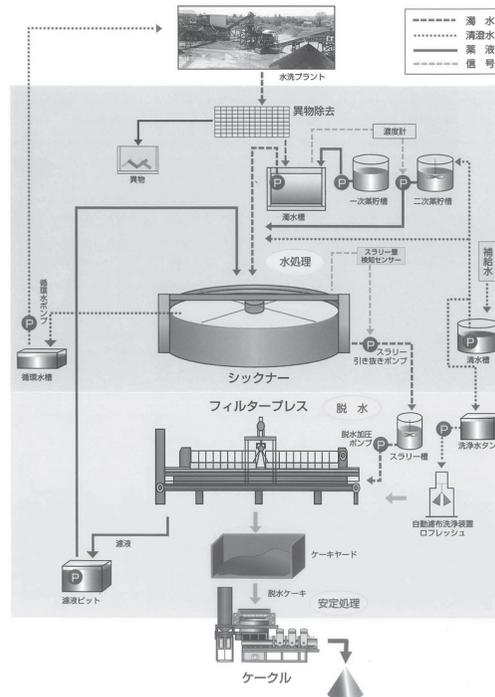


図5.40 石灰石の排水処理フローシート例（氣工社より）



図5.41 シクナーの外観（氣工社より）

廃滓処理 たい積処理が一般的である。坑内採掘跡空洞部（古洞）に、清澄・濃縮後の汚泥を放流する旧坑放流（あるいは圧入）方式があるが、旧坑は有限のため、処理方法では限定される。一般的な処理方式を考えた場合の代表的なフローシート、シクナーの外観を図5.40～図5.41に示す。

第5節 測定技術

1 流量測定

河川、水路、管路などにおける流量測定は、各種の利水計画、水力機械の効率判定などの目的で、広く行われている。

(1) 容器による測定

小流量（ $< 0.01 \text{ m}^3/\text{s}$ ）に適用する。容量既知の容器、例えば、バケツ、ドラム缶（200 L）およびこれを適当に切断したもので満水に10秒以上、できれば20秒以上を要する大きさのものを選ぶ。となどで導水して落差を設け、流水が全量容器に入るように水路を絞る。満水に要する時間を測定し、数回の測定値の平均を求め、流量を算出する。

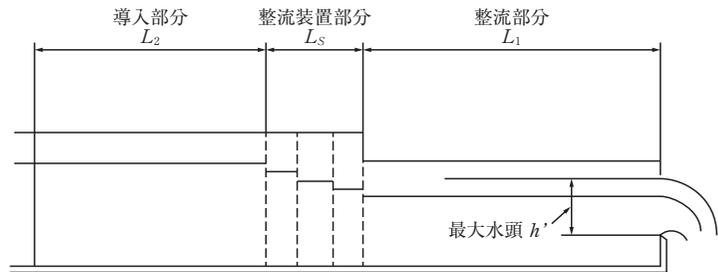


図5.42 せきの水路

(2) せきによる測定

流量に応じて、直角三角せき（ $0.01 \sim 0.05 \text{ m}^3/\text{s}$ ）、四角せき（ $0.05 \sim 0.15 \text{ m}^3/\text{s}$ ）、全幅せき（ $0.15 \text{ m}^3/\text{s}$ 以上）を用い、水頭 h を測って流量 Q 測定する。

せき水路は、導入部分（ L_2 ）、整流装置部分（ L_s ）および整流部分（ L_1 ）から成る（図5.42参照）。整流装置部分では4枚ほどの多孔板を垂直に取り付け、流れを整える。水路の最下流端に支え板で支持したせき板を設ける。せき板は、黄銅、ステンレス銅等さびや腐食に強い材質で作製する。

① 直角三角せき（図5.43参照）

$$Q = Kh^{\frac{5}{2}} \quad \dots\dots (5.42)$$

Q : 水量 [m^3/min] h : 「せき」の水頭 [m]

$$K: \text{流量係数} = 81.2 + \frac{0.24}{h} + \left(8.4 + \frac{12}{\sqrt{D}}\right) \left(\frac{h}{B} - 0.09\right)^2$$

B : 水路の幅 [m]

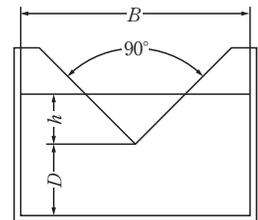


図5.43 直角三角せき

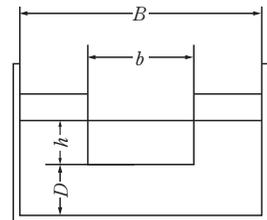


図5.44 四角せき

D ：水路の底面から切欠底面までの高さ [m]

この算式の適用範囲は次のとおりとする。

B ：0.5 ~ 1.2 m D ：0.1 ~ 0.75 m

h ：0.07 ~ 0.26 m h ： $B/3$ 以内

② 四角せき（図5.44参照）

$$Q = Kbh^{\frac{3}{2}} \quad \dots\dots (5.43)$$

Q ：水量 [m³/min] b ：切欠の幅 [m]

h ：「せき」の水頭 [m]

D ：水路の底面から切欠底面までの高さ [m]

$$K：流量係数 = 107.1 + \frac{0.177}{h} + 14.2 \times \frac{h}{D} - 25.7 \sqrt{\frac{(B-b)h}{Db}} + 2.04 \sqrt{\frac{B}{D}}$$

この算式の適用範囲は次のとおりとする。

B ：0.5 ~ 6.3 m b ：0.15 ~ 5 m

D ：0.15 ~ 3.5 m h ：0.03 ~ 0.45 \sqrt{b} m

bD/B^2 ：0.06以上

(3) 流速計による測定

河川，水路などの開水路の流量測定に適用される。流況のよい地点を選び，水流に直角な断面において適当に分割した小区間の水流の断面積（深さの測定から求める）とその区間の平均流速を乗じて区間流量を求め，その総和として流量を算出する。

流速計には，回転式，電気式，電磁式，超音波式などいろいろな形式のものがあり，水流の規模，流速などによって使い分けられる。なお，大河川ではこのような実測に基づいて水位—流量曲線が作られており，水位の測定から流量を容易に知ることができる。

(4) 流量計による測定

開水路や管路に流量計を設置し，流量を自動測定する。開水路用としては，せき式，プリューム式，流速計式などがあり，管路用としては電磁式，オリフィス式，ベンチュリ管式，フロート形面積式，超音波式，渦式，羽根車式などがある。

このうち，鉱山でよく使用されるベンチュリ計について説明する。ベンチュリ計は直径5 cm以上の送水管の流量測定器として最も好結果を得ている。本方式では，管路を流れる流量を測定するために管路を絞って，絞り前後の圧力差を計る（図5.45参照）。図のA，B2点における圧力水頭の差を h ，それぞれにおける断面積を A_1 ， A_2 とすると，

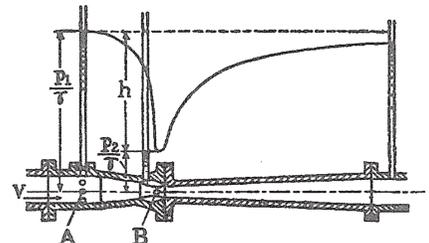


図5.45 ベンチュリ管式流量計

$$Q = C \frac{A_1 A_2}{\sqrt{A_1^2 - A_2^2}} \sqrt{2gh} \quad \dots\dots (5.44)$$

であり、 A_1 、 A_2 、 h を測定して流量 Q を求める。ここで、 C は定数で0.96~0.99である。

2 水質測定

(1) 吸光光度法

吸光光度法では、試料物質、その溶液、適当な試薬（発色試薬）等を加えて発色させた溶液の吸光度を測定して、試料中の目的成分の濃度を求める。通常は、光源からの連続光をモノクロメータあるいはフィルタで狭い波長範囲の光束とし、光電測光で吸光度を測定し、目的成分の濃度を求める。図5.46に示すように、強さ I_0 の単色光束が濃度 c 、長さ l の液層を通過するとき、光が吸収されて強さ I_t になったとする。このとき、ランバート・ベールの法則によって I_t と I_0 の間には次の関係が成立する。

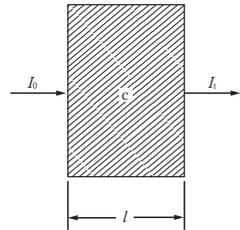


図5.46 液層による光の吸収

$$I_t = I_0 \cdot 10^{-\varepsilon cl} \quad \dots\dots (5.45)$$

ここで、 ε は光吸収物質、波長などで決まる定数で、吸光係数と呼ぶ。特に、 $c = 1 \text{ mol/L}$ 、 $l = 10 \text{ mm}$ のときの ε 値を、モル吸光係数という。 I_t と I_0 の関係とその名称を次に示す。

$$\frac{I_t}{I_0} = t \quad \dots\dots \text{透明度}, \quad t \times 100 = T \quad \dots\dots \text{透過パーセント}$$

$$\log \frac{1}{t} = E \quad \dots\dots \text{吸光度}$$

ランバート・ベールの法則を吸光度で表すと、

$$E = \varepsilon cl \quad \dots\dots (5.46)$$

となる。すなわち、液層の厚さが一定のとき、吸光度は濃度に比例する。既知濃度標準液の吸光度を測定し ε を求めておけば、試料溶液の吸光度を測定して定量できる。通常は、一連の異なった濃度の標準液の吸光度を測定して検量線を作成し、検量線から濃度を求めて定量する方式をとる。

(2) フレーム原子吸光法

原子吸光法は、試料中に含まれる分析対象元素をフレーム（炎）、電気加熱又は化学反応によって基底状態のエネルギーである原子とし、その原子蒸気層に原子の共鳴線を投下させ、その時の吸光度を測定することによって分析対象元素の濃度を求める方法である。フレーム原子吸光法ではアセチレン-空気、アセチレン-酸化二窒素などのフレーム中に試料を噴霧して原子化する。アセチレン-空気フレームはほとんど総ての金属の分析に有効である。アセチレン-酸化二窒素フレームは高温フレームで、クロム、アルミニウム、バナジウムなどの分析に適する。

(3) 電気加熱原子吸光法

フレイム原子吸光法のフレイムの代わりに黒鉛，耐熱金属を発熱体とする電気加熱炉を用いて，試料溶液を乾燥，灰化，原子化して原子吸光分析する方式である。金属元素の定量に用いられるが，フレイム原子吸光法に比べて感度が数十～数百倍と高いのが特徴であるが，共存物質による干渉が大きいのでその懸念の少ない試料に適用するとともに，必ずバックグラウンド補正装置を用いる。

(4) ICP発光分析法

ICP発光 (ICP-AES : ICP - Atomic Emission Spectrometry) 分析法は誘導結合プラズマ (Inductively Coupled Plasma, 略称 ICP) 中に試料を噴霧し，励起された原子による発光の強度を測定して，試料中の成分を定量する。

気体の温度を上げていくと，原子の外殻電子が離れてイオンを生じ，やがて電子，イオン，中性の原子および分子が共存した弱電離プラズマが生成される (温度6,000～10,000℃)。プラズマ光源部は，トーチと誘導コイルで構成される。トーチは石英ガラス製の三重管で，外側に冷却ガス，中間に補助ガス，中心にキャリアガスとしてアルゴンを流す (図5.47参照)。生成したプラズマ中に試料を噴霧し，励起された原子による発光の強度を測定する。

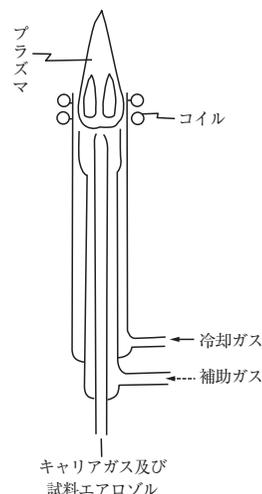


図5.47 プラズマ光源部トーチ

(5) ICP質量分析法

ICP質量 (ICP-MS: ICP-Mass Spectrometry) 分析法は前記ICP発光分析法の場合と同様に，試料を誘導結合プラズマ中に導入し，生成したイオンを質量分析計に導入して，元素の同定・定量を行う方法である。比較的高価であるが，ほとんどの元素に対して1 ng/Lより優れた検出限界を持つため，汚濁物質の微量分析には広く使われている。

(6) ガスクロマトグラフ (GC) 法

ガスクロマトグラフ (GC : Gas Chromatography) 法は分離カラム内を気体試料または気化した試料を適当な気体 (キャリアガス) で展開させ，各成分を分離，検出，定量する方法である。

分離カラムには，従来充填カラムが用いられたが，最近，分離特性が優れたキャピラリーカラム (毛管カラム) の利用が増えている。キャピラリーカラムは石英ガラスや硬質ガラス製の中空管 (内径0.1～0.5 mm，長さ5～100 m) で，内面にシロキサン系ポリマーが塗布されている。

ガスクロマトグラフ質量分析 (GC/MS) 計は，ガスクロマトグラフに質量分析装置を設置した分析器である。MS計で生じたイオンを質量分離部で分離して，定性，定量する。クロマトグラムとマススペクトルが同時に得られるため各ピーク成分の定量がきわめて容易であり，特に有機化学の分野で用いられている。

(7) イオン電極法

特定のイオンに感応するように作製されたイオン電極と，参照電極との組合せを試料中に浸すと，

イオンの活量に応じた膜電位が生じる。この膜電位を測定して、目的成分のイオン濃度を求める。シアン化物イオン、ふっ化物イオン、アンモニウムイオンなどに対して好成績が得られている。

金属元素の検定方法のまとめを、表5.29に示す。

表5.29 金属元素の検定方法

金属元素	AAS	EAAS	ICP - AES	ICP - MS	ABS	GC
Cd	◎	◎	◎	(還付1)		
Pb	◎	◎	◎	(還付1)		
Cr(VI)	◎	◎	◎	(排付3)	◎	
As	◎ ^{*1}		(還付2)		◎	
Hg	(還付3) ^{*2}					
アルキルHg	(排付4) ^{*3}					(還付4)
Cu	◎	◎	◎	(排付3)		
Zn	◎	(排付7)	◎	(排付3)		
Fe	◎	(排付7)	◎			
Mn	◎	◎	◎	(排付3)		
Cr	◎	◎	◎	(排付3)	◎	
Se	◎ ^{*1}		(還付2)		◎	

◎はJIS K 0102に規定されているもの

(還付)は環境基準告示付表, (排付)は排水基準告示付表

AAS: フレーム原子吸光法, EAAS: 電気加熱原子吸光法, ICP - AES: ICP発光分析法

ICP - MS: ICP質量分析法, ABS: 吸光光度法, GC: ガスクロマトグラフ法

^{*1} 水素化合物発生, ^{*2} 冷蒸気方式, ^{*3} 薄層クロマトグラフ分離

3 生活環境項目の測定

(1) 水素イオン濃度 (pH)

水中に存在する水素イオンmol濃度 (正確には水素イオンの活量) の逆数の常用対数をpHという。

$$\text{pH} = -\log_{10} a\text{H}^+ \quad \dots\dots (5.47)$$

ここで, $a\text{H}^+$ は水素イオン活量

一般に, pH計にはガラス電極と参照電極を組み合わせた「ガラス電極pH計」を用い, 溶液中に浸したときに生じる両電極間の電位差を高入力抵抗の電位差計で測定する。pH11以上の試料で, 特にアルカリ金属濃度が高い場合は, アルカリ誤差を生じることがあるので, リチウム電極を用いる。

なお, pHは液温により変化するので, 測定時の試料とpH標準液の温度はできるだけ一致させる。

pH標準液には, しゅう酸塩pH標準液 (pH1.68, 25℃), フタル酸塩pH標準液 (pH4.01, 25℃), 中性リン酸塩pH標準液 (pH6.86, 25℃) など5種類が規定されている。

(2) 生物化学的酸素要求量 (BOD)

BODは、水中の生物分解性の有機物が生物化学的に分解されて安定化するのに要する溶存酸素量であり、水のBOD値が高いことは、その水が有機物によって汚染されていることを意味する。通常は、20℃で5日間静置時の値、BOD₅を用いる。

(3) 化学的酸素要求量 (COD)

CODは、試料中の被酸化性物質（還元性物質）、主に有機物によって消費される酸化剤の量を酸素量 [mg/l] として表示する。この場合、使用する酸化剤の種類や濃度、反応温度、反応時間などの酸化条件が当然、結果に大きく影響する。酸化剤には、過マンガン酸カリウムやニクロム酸カリウムがあるが、我が国では安全性が高く反応時間が短い、過マンガン酸カリウムを用いている。

(4) 浮遊物質 (懸濁物質) (SS)

水中の濁りの程度を測定する方法である。まず、2 mm目のふるいを通過した試料を孔径1 μm、直径24～55 mmのガラス繊維ろ紙で吸引ろ過し、ろ紙上の浮遊物質などを水洗する。十分に吸引脱水したろ紙を取り外し、時計皿上に移して105～110℃で2時間乾燥し、質量を測る。

$$\text{浮遊物質質量 [mg/L]} = (b - a) \times \frac{1000}{\text{試料量 [mL]}} \quad \dots\dots (5.48)$$

ここで、b：乾燥後のろ紙と浮遊物質の質量 [mg]、a：ろ紙の質量 [mg]

第3章 騒音・振動

第1節 騒音・振動 概論

1 騒音とは

「好ましくない音」, 「ない方がよい音」を総称して「騒音」というが, この定義は物理的な要素ばかりではなく, 多分に主観的, 心理的解釈が含まれている。「好ましくない音」を大別すると次の通りである。

- ① 明らかに生理的な障害を起こす音
- ② 音色が不快な音
- ③ 第三者による妨害音
- ④ 安眠や休養を妨害する音
- ⑤ 出すべきでない音（「静かさ」を必要とするべき時に発する音, 機械や装置が定常状態で稼働しない時に発する音。）

身近にある音の騒音レベルの例を, 図5.48に示す。

2 鉱山関係の騒音

坑内・坑外の種々の作業や装置類から発生する騒音の特徴は, 次のとおりである。

① 露天採掘場の発破音

1日に行う発破回数は少なく, 継続音でないが, 騒音・振動ともに留意して行う必要がある。

② さく岩音

さく岩音は, ビットが岩石を打撃・切削する音, ロッドとシリンダ間の打撃・回転音, 圧気排出音が主体であり, 鉱山作業では最も大きな騒音源である。この音は周波数範囲が広く, 高周波域における音のエネルギーが強大なために, 坑内作業では作業者の難聴の原因を作り, 露天作業でもかなり遠方まで音が伝わる。

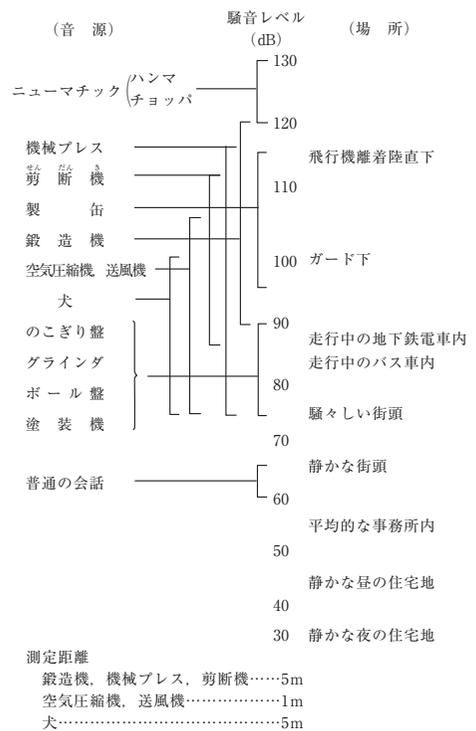
③ トラック走行音

騒音レベルは, 通常の走行状態ではそれ程大きな値にならない。むしろ, 場外搬出時の走行による騒音・振動の方が問題になることが多い。路面の状態が悪ければ, なおさらである。

⑤ 破砕工場などの騒音

破砕機や水洗設備, コンベア, ブロワなどは連続音である。一般に, 連続作業または夜間操業

図5.48 騒音の例



を行うので、問題を起こす可能性が高い。
坑内・坑外の種々の作業や装置類から発生する騒音レベルを、図5.49に示す。

図5.49 主要機械の騒音レベル (dB)

3 音の性質と単位

(1) 音波

音波とは、大気中の1点における微小な空気の圧力変化が、次々に隣の位置に伝わる振動現象である。最も単純な形として、一方向に進行する正弦波を想定すると、図5.50のようになる。すなわち、伝搬状態のある瞬間には、媒質空気の粒子はそれぞれの平衡位置から微小変位して、密度の密な所と疎な所が交互にできる。密な所は圧力が大気圧よりわずかに高く、疎の所は圧力が低い。

この状態は次の瞬間、粒子が逆方向に振動して、密であった所は疎になり、圧力の微小変動を繰り返す。この現象は次々に隣の方向に伝わる。伝搬するのは空気の振動現象すなわち振動のエネルギーで、空気自体が流れて行くのではない。空気は各微小部分がそれぞれの平衡位置を中心にして往復振動する。

音波の存在する空間を音場、往復振動の速度を粒子速度、圧力の変動分を音圧という。

空気の粒子振動方向と音波の伝搬方向が平行のため、空気中の音波は縦波である。音波の伝搬する速度(音速) c [m/s] は、空気の温度 t [°C] によって変化し、次式で表わされる。

$$c = 331.5 \sqrt{\frac{273 + t}{273}} \doteq 331.5 + 0.61t \quad [\text{m/s}] \quad \dots\dots (5.49)$$

音速は、常温では約340 m/sであり、50 °C位までは $c = 332 + 0.6t$ [m/s] で近似できる。

音場内のある1点における圧力変化の繰り返し、つまり1秒間の音圧変動のサイクル数を周波数 f (ヘルツ, Hz) という。また、ある瞬間の音場内の音圧変動の極大(小)値の位置から次の極大(小)値の位置までの距離を波長 λ [m] という。

音波が1秒間に伝搬する距離は、1つの波の長さに1秒間の波の発生数を掛けたものに等しいため、

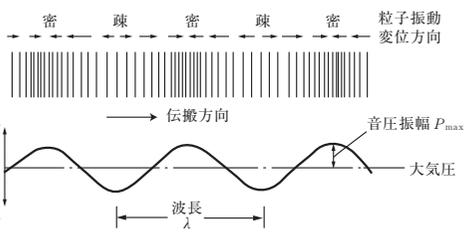
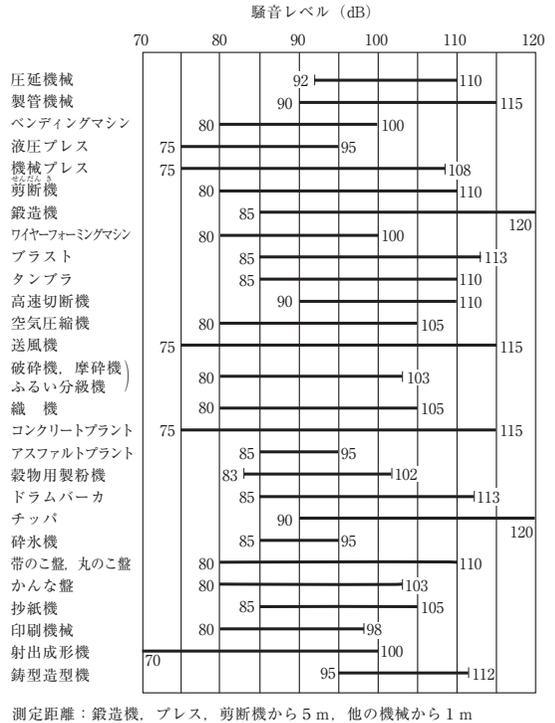


図5.50 音の伝播 (平面進行正弦波)

次の関係が成立する。cは温度が定まれば一定であるから、周波数によって波長が決まる。

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad [\text{m}] \quad \dots\dots (5.50)$$

(2) 音圧・音圧レベル

いま、音の伝搬方向に垂直な単位面積を考え、この面積を単位時間に通過するエネルギー（すなわち単位面積当りのパワー）をI、音圧をp、媒質の密度をρとすれば、次式が成り立つ。このエネルギーを音の強さといい、音圧の2乗に比例する。

$$I = p^2 / \rho c \quad [\text{W}/\text{m}^2] \quad \dots\dots (5.51)$$

人間は最大60 Pa程度までの音圧を音と感ずる。大気圧は約10⁵ Paであり、音圧の範囲は大気圧に比べて極めて小さい。

音圧レベルL_pは、可聴範囲の音圧の感覚量が音の強さの対数に比例し、2~3桁の数字で表示できるため、デシベル [dB] で表示する。すなわち、音圧レベルL_pは、音圧の大きさを、基準値との比の常用対数によって表現した量（レベル）であり、次式で表される。

$$\begin{aligned} L_p \text{ [dB]} &= 10 \times \log_{10} (I / I_0) = 10 \times \log_{10} (p^2 / p_0^2) \\ &= 20 \times \log_{10} (p / p_0) \quad \dots\dots (5.52) \end{aligned}$$

ここで、基準値p₀を2 × 10⁻⁵ Paとする。この値は、健康な人間の最小可聴音圧である。

音の強さがp²に比例するため音圧の比は10倍で20 dB、100倍で40 dBと10倍ごとに20 dBずつ増加する。また、音の強さは10倍で10 dB、100倍で20 dBの増加となる。

音圧と音圧レベルの関係を、図5.51に示す。

(3) パワーレベル

ある音源が周囲に放射している音の単位時間の全エネルギーをW [W] とし、基準W₀を

$$W_0 = 1 \text{ [pW]} \text{ (ピコワット)} = 10^{-12} \text{ W とするとき}$$

$$L_w = 10 \log_{10} (W / W_0) \quad [\text{dB}] \quad \dots\dots (5.53)$$

このL_wを音源のパワーレベルという。なお、W₀の値は、計算の便利さから定められた。

例えば、パワー1 [mW] の音源のパワーレベルは、W/W₀ = 10⁻³/10⁻¹² = 10⁹ のため、L_w = 90 dBとなる。また2 [mW] の場合は、10 log₁₀10⁹ + 10 log₁₀2 = 93 dBとなる。

(4) 音の大きさのレベル・聴感曲線

人は一般には周波数で20~20,000 Hz、音圧レベルで0~120 dBの範囲を知覚する。ただし人が感じる音の大きさは、音圧の大小のみならず、周波数によっても異なる。音圧レベルは周波数にはかわらず音圧振幅の大小を示す純物理量であり、同じ音圧レベルの音でも周波数が異なれば、音の大きさが異なる。この関係を単一正弦波（純音）で実験した結果を、図5.52に示す。この図を、聴感曲線（等

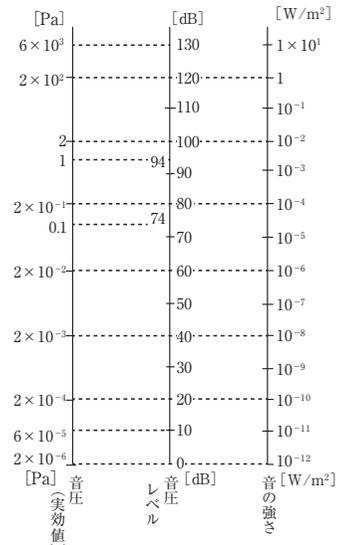


図5.51 音圧と音圧レベルの関係

感度曲線・等ラウドネス線）と呼ぶ。

図の曲線は音の大きさの等感曲線であり、等ラウドネス曲線の同一曲線状の純音は、周波数が違っていても等しい大きさに聞こえることを意味している。

図中の最小可聴値とは、聞こえる音の最小の音圧レベルであり、4 kHz付近の音に対してよく聞こえ、これよりも周波数が低ければ低いほど徐々に耳の感度が落ちていき、20 Hzの最小可聴値は78 dBになる。また、周波数が4 kHzより高くなれば高くなるほど、同様に耳の感度が落ちる。

(5) 騒音レベル

騒音レベルは耳の感覚特性を加味した音圧レベルである。耳の特性は複雑であるが、これにA特性を用いるよう国際的に統一している。測定には、A特性騒音計を用い、測定値を騒音レベル（A - Weighted Sound Pressure LevelまたはSound Level, 単位はデシベル [dB]）という。

これに対して一般の騒音の場合、C特性騒音計を用いる。C特性騒音計の測定値は、物理的な音のエネルギーを表す音圧レベル（Sound Pressure Level）とみなせる。

騒音レベルが時間的に変動する場合の騒音の測定・評価には、等価騒音レベル（Leq: Equivalent Continuous Sound Pressure Level）を用いる。これは、騒音レベルのエネルギー平均値といえる。

(6) dBの計算法

騒音測定では、音のレベル（音圧レベル、音の強さのレベル、パワーレベル、騒音レベル、周波数のバンドレベルなど）を、いずれもdBで表示処理する。

1) エネルギー和 [dB値] を求める場合

いま2つ以上の音のレベルを L_1, L_2, \dots, L_n [dB] とし、そのエネルギー（音圧の2乗値、音の強さ、パワーなど）を P_1, P_2, \dots, P_n (P_0 : 基準値) とすると

$$L_1 = 10 \log_{10} (P_1/P_0), L_2 = 10 \log_{10} (P_2/P_0), \dots, L_n = 10 \log_{10} (P_n/P_0) \text{ [dB]},$$

あるいは,

$$P_1/P_0 = 10^{L_1/10}, P_2/P_0 = 10^{L_2/10}, \dots, P_n/P_0 = 10^{L_n/10}$$

であるから、これら n 個のエネルギーの和のレベル L_s [dB] は、次式で表わされる。

$$\begin{aligned} L_s &= 10 \log_{10} \{(P_1 + P_2 + \dots + P_n) / P_0\} \\ &= 10 \log_{10} \{10^{L_1/10} + 10^{L_2/10} + \dots + 10^{L_n/10}\} \text{ [dB]} \end{aligned} \quad \dots (5.54)$$

レベル L_1 と L_2 ($L_1 \geq L_2$) とのエネルギーの和のレベル L_s は、(5.54) 式になる。

$$L_s = 10 \log_{10} \{(P_1 + P_2) / P_0\}$$

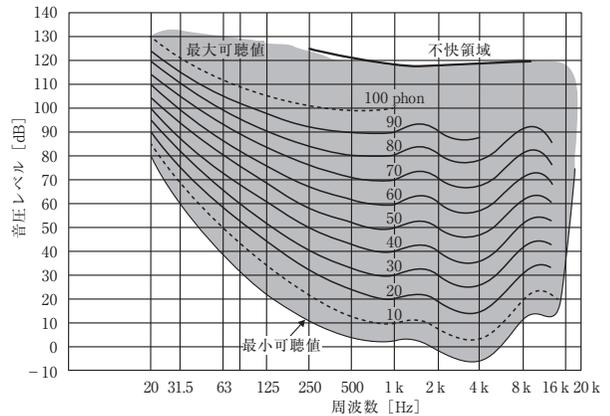


図5.52 可聴音の範囲（網掛け部分）と音の大きさの等感曲線（等ラウドネス曲線）

$$\begin{aligned}
 &= 10 \log_{10} \{10^{L_1/10} + 10^{L_2/10}\} = 10 \log_{10} [10^{L_1/10} \{1 + 10^{-\frac{L_1-L_2}{10}}\}] \\
 &= L_1 + 10 \log_{10} \left\{1 + \frac{10^{-\frac{L_1-L_2}{10}}}{1}\right\} \\
 &= L_1 + \Delta L \quad [\text{dB}] \quad \dots\dots (5.55)
 \end{aligned}$$

ΔL は $(L_1 - L_2)$ で定まるから、 ΔL と $(L_1 - L_2)$ の関係を図表にしておき、これから簡単に計算することができる (図5.53参照)。

例えば、80 dBと78 dBの音の場合は $L_1 - L_2 = 2$ dB、 $\Delta L = 2.1$ dB。これより、和のレベル $L_s = 80 + 2.1 = 82.1$ dBとなる。また L_1 と L_2 が同じレベルならば、和のレベルは $L_s = L_1 + 3$ dBになり、 L_1 と L_2 の差が10以上であれば0.4 dB程度以下しか増加しない。

3つ以上の場合については、初めの2つの L_s を求め、次にこの L_s と L_3 の和を同様にして求め、これを順次繰り返せばよい。

2) エネルギー平均値 [dB値] を求める場合

つぎに音源の周囲の多数点でレベルを測定した場合、あるいは変動する音を一定時間間隔で測定した場合など、これらの多数のレベルからエネルギー平均値のレベルを求めることがある (音圧レベル、パワーレベル、騒音レベルなどいずれにも共通)。この場合、エネルギー平均値のレベルを L_M [dB] とすると、(5.54) 式を準用して

$$\begin{aligned}
 L_M &= 10 \log_{10} \left\{ \left(\frac{1}{n} \right) (P_1 + P_2 + \dots + P_n) / P_0 \right\} \\
 &= L_s - 10 \log_{10} n \quad [\text{dB}] \quad \dots\dots (5.56)
 \end{aligned}$$

すなわち、エネルギー平均値のレベル L_M は、エネルギー和のレベル L_s から、平均するレベル個数 n の対数値の10倍を引いたものである。一方、各レベルの算術平均値 L_m は、次のようになる。

$$L_m = (L_1 + L_2 + \dots + L_n) / n \quad [\text{dB}] \quad \dots\dots (5.57)$$

例えば、80 dBと76 dBの2レベルのエネルギー平均値 L_M は、 $L_M = 81.5 - 3.0 = 78.5$ dBとなる。一方算術平均は78 dBで、両平均値の差は0.5 dBとなる。

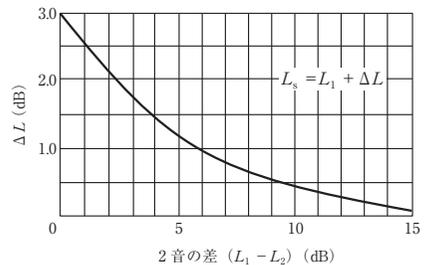


図5.53 音のエネルギー和レベル算出図表

4 騒音の評価

(1) 聴力に及ぼす影響

騒音被害で、最も一般的なものは聴力障害である。音圧レベル [dB] の大きな音を耳にすると、耳の感度が低下する。しかし、生体には「回復機能」があるため、たとえ音圧レベルの大きな音でも、それを聞いた時間 (曝露時間) が短ければ、聴力障害も一時的で済む。ただし、騒音レベルで85~90 dB程度の音でも、曝露時間が8時間を超えると回復力は次第に弱まり、回復が完全に終わらないうちに曝露を繰り返すと、永久的難聴になる。

各種要因にもとづく難聴の進行状態の例を、図5.54に示す。騒音に長時間曝露した結果の騒音性難聴では、検査音周波数で3000～4000 Hzに対する聴力損失が大きくなる特徴がある(図のa曲線)。また、この周波数はほぼC₅の音(4096 Hz)に近いので、このような傾向の難聴を「C₅ディップ」(C₅ - dip)という。これに対して、老人性難聴は高周波域ほど聴力の損失が大きい。抗生物質や利尿剤等の服用による薬品中毒でもC₅ - dipを示し、検査周波数8000 Hzに対する回復が弱い。

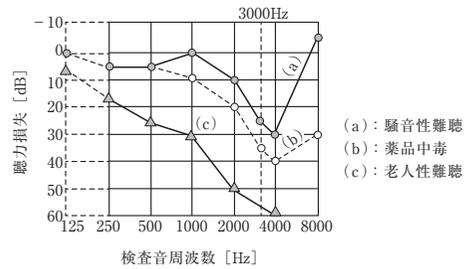


図5.54 オーディオグラムに現れる難聴の例

各種検査周波数に対する聴力レベルが - 10 dB～10 dBの範囲では、聴力が正常とみなせる。会話に不自由を自覚した人は、C₅ディップが進んでいることになる(普通の会話の周波数は300～3000 Hz範囲)。

音性難聴にはきめ手の治療がないため、騒音環境を作らないことが第一であるが、さもなければ、耳栓等の保護具着用などの予防が大切であり、同時に難聴の早期発見に特別の配慮を払う必要がある。

我が国を初め世界の大部分の国では、健康な男子青年が1日8時間労働を行う場合の許容騒音レベルをほぼ90 dBとしている。この値は、あくまでも労働環境における「健康な男子青年」に対するものであり、老人、青少年、女子、病人などに対しては、更に低く見積もる必要がある。

(2) 聴き取り能力への影響(聴取妨害)

音による情報が、他の音に妨害されて的確に把握できない現象が、聴取妨害である。この現象は、音のマスキング(陰べい作用)によって生じる。1 mの距離で向き合って、普通の声で会話が明瞭に聞き取れる周辺騒音の目安は65 dBとされている。騒音が71 dBを超すと、大きな声でも聞きとり難い。向きあう距離を2 mとすると、普通の声で59 dB程度となり、80 dBの騒音の中では聞き取れない。80 dBでは、距離を30～40 cmに近づけないと大きな声で話しても、明瞭には聞こえにくくなる。

電話に対しては、騒音の影響は普通の会話に対するよりもやや大きく、満足に聞き取れる騒音レベルは約55 dBであり、騒音レベルが65 dBを超えるとかなり聞きとりにくい。

(3) 生活妨害

音が「うるさい」とか「不快である」とかの度合は、多分に主観的であり、その音を聞いた人の心理的要因に支配されることが多く、一概にはいえない。某アンケート調査結果では、被害を訴えた人の割合が50%を超える騒音レベルは、情緒障害、睡眠妨害とも55 dB～59 dBであるとされる。

5 振動一般

(1) 振動と振動量

工場、作業場における機械の運転、工事や鉄道、自動車などによる好ましくない振動を、公害振動と仮に名づけることができよう。振動は、振動源に対し比較的近距离の範囲で、騒音と対になって生

じることが多い。ただし、加振源や地盤の性状の関係で、遠くまで伝搬して問題が起こることもある。

振動が振動源から屋内居住者まで伝わる経路は、大きく2種類ある（図5.55参照）。

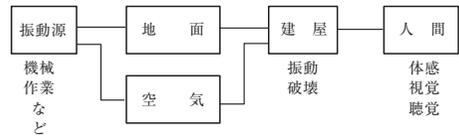


図5.55 振動苦情発生の様式

一つは地面振動で、家屋基礎に伝わり、家屋を振動させ、

微小振動では建具のガタや電灯が揺れる。壁のき裂や瓦のずれのような物理的被害が伴う場合には、大きな苦情となる。

もう一方は、発破やエンジン、コンプレッサなど、大量の空気移動を伴う作業や機械が引き起こす空気振動（超低周波音）で、空気中を伝搬して家屋壁面に到達し、家屋や建具が振動する。

振動源で生じた振動は、波動として媒体中を伝搬していく。振動が一定時間間隔 T で同じ現象が観測される場合、この振動を周期振動といい、 T [s] を周期、 $1/T = f$ を振動数 [Hz] という。

最も単純な振動は正弦振動（または単振動）であり、次式で表される。

$$A = A_0 \sin(\omega t + \phi_0) \quad \dots\dots (5.58)$$

正弦振動の波形を、図5.56に示す。振動量 A 、変位振幅 A_0 、角振動数 $\omega = 2\pi f$ 、初期位相角 ϕ_0 である。観測上振幅は $2A_0$ であるが、数式では A_0 を振幅（ピーク値）という。

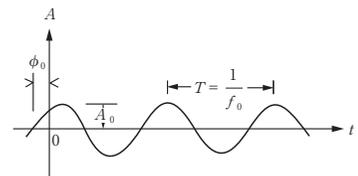


図5.56 正弦振動の波形

(2) 振動レベル

振動レベルは、音の騒音レベルに相当する量であり、振動加速度レベルに人の全身が振動を受ける場合の感覚を加味している。

振動加速度レベル（VAL：Vibration Acceleration Level） L_a は、音の音圧レベルに相当し、(5.59)式で表わされる。ここで、 a は振動加速度実効値、(Effective Value, Root Mean Square Value)、 a_0 は基準振動加速度実効値（ $a_0 = 10^{-5} \text{ m/s}^2$ ）である。

$$L_a = 20 \log_{10} a / a_0 \quad [\text{dB}] \quad \dots\dots (5.59)$$

例えば、振動加速度実効値が1ガル（gal） $[\text{cm/s}^2]$ の場合は、下記より、振動レベルは60 dBとなる。

$$20 \log_{10} \frac{10^{-2}}{10^{-5}} = 20 \log_{10} 10^3 = 60 \quad [\text{dB}]$$

(3) 振動の発生と伝搬

振動発生源は、大きく工場機械、建設土木作業、交通機関に分けられる。

振動の発生様相は連続と衝撃とがあるが、衝撃加振源が問題になる場合が多い。振動源から発生する波動は、振動方向が伝搬方向と一致する縦波（P波）、振動方向が伝搬方向と直角の横波（S波）、振動の進行方向を含む鉛直面内で楕円運動し、振幅が表面からの深さとともに著しく小さくなる表面波などがある。これらを分離計測することは難しく、合成波を観測している。

(4) 振動の影響

振動の影響は、人に対するものと構造物に対するものがある。

人に対する影響では、生理的側面と心理的側面がある。生理面では、動物実験から大体10 Gが限界と考えられる。加振が数百ガル [cm/s²] 以上で、血流、呼吸、消化器、内分泌系などの生体機能に影響が出ることが報告されており、振動環境の動力車やトラックの運転手などが当てはまる。

構造物に対する影響として、建具は、経験的に音圧レベルで70~80 dB程度から振動する。建屋振動が、空気伝搬か地面伝搬かを判定することは、極めて困難な場合がある。

6 超低周波音

一般に人が聞くことのできる音の周波数範囲は20 Hz~20 kHzとされているが、耳に聞こえない超低周波音あるいは低周波音による公害問題が1960年代から発生している。

低周波音や超低周波音は、窓をがたつかせたり、人間に圧迫感などの生理的、心理的影響を与えたりする気味の悪い公害といわれてきた。発生の音源としては、ディーゼル機関、往復式圧縮機、真空ポンプ、送風機、振動ふる

い機、ボイラなどの燃焼装置、発破などがある。超低周波音問題で一番顕著にあらわれるのが建具のがたつき問題である。建具に超低周波音および低周波音を照射して次第に音圧レベルを上昇させ、建具のがたつき始める音圧レベルを実験室で調べた調査結果が図5.57である。その結果、揺れやすい建具では、70 dBあたりからがたつきは始めている。建具が揺れ始める最低音圧レベルは建具の種類、大きさ、設置条件等で大きく異なる。

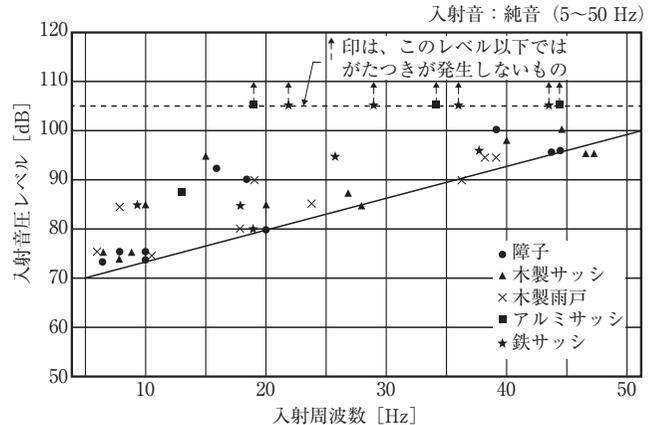


図5.57 建具のがたつき閾値

第2節 騒音防止技術

1 騒音防止対策と防止技術

騒音防止技術は、表5.30のように分類，整理できる。

表5.30 騒音防止技術

騒音防止技術の概要				原理	防音効果	
音源対策技術	音の発生原因を除くこと	直接的圧力変化の防止	渦，流れの乱れ，爆発等の防止		経験より推定	
		物体の振動防止	加振力の低減	打撃，衝突，摩擦，不平衡力の除去，釣合せ		〃
			振動絶縁	振動体と直接接触させない。振動伝達率が1より十分小さくなるように防振装置（おもり＋ばね）をつける		振動の反射 〃
			ダンピング処理	音の放射面に損失係数が5%より大きくなるようにダンピング材料をはる。		振動の吸収 経験より推定 10 dB程度
			共振防止	加振力の周波数と振動系の固有振動数を近づけない。		振動の増幅防止 経験より推定
伝搬防止技術	音源で発生した音の伝搬を防止すること	遮音	密閉型	必要透過損失を持つ材料で音源を囲う（カバー，フード，建屋）	音の反射	設計により決める
			部分型	減音量より10 dB大きい透過損失を持つ障壁を音減との間に置く（塀，建物）		設計により決める 25 dBが限度
			開口型	音の通路に必要な減音量をもつ消音器をつける。		音の反射，吸収，干渉 設計により決める
		吸音処理	音の当たるところに必要な吸音率をもつ吸音材料をはる。		音の吸収	〃
		共振防止	入射音の周波数と振動系の固有振動数を近づけない。		音の増幅防止	経験により推定
		音の伝搬に影響する現象の利用	距離減衰	音源を問題点から可能な限りはなす。		音の拡散
	音源の向きを変える		音の強く出ている方向を問題点に向けない。		音源の指向性	高周波音に有効 10 dB程度
	大気，風，気温，草，樹木の影響		近距離の場合無視できる。			

2 騒音低減の原理

騒音低減の基本的原理は、音の発生源となる物体等の振動を低減すること、および音を吸収することの2つである。実際の騒音防止対策では、この原理に基づき、遮音、吸音、ダンピング（振動減衰）、振動絶縁の4つを組み合わせた手段が取られる（図5.58参照）。

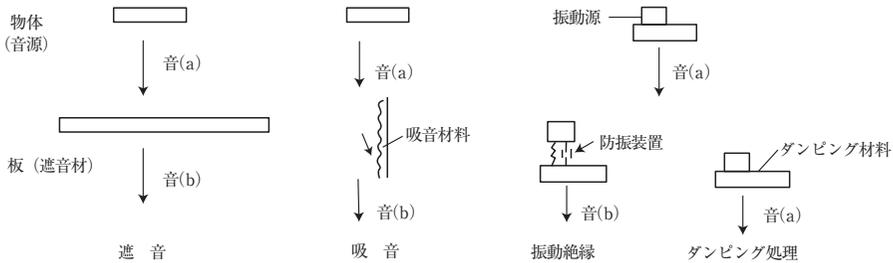


図5.58 騒音低減の基本原則

3 吸音

(1) 吸音と吸音率

音のエネルギーが吸収されること、すなわち音のエネルギーが熱エネルギーに変わって消滅することを吸音という。吸音の能力の大きい材料は特に吸音材料と呼ぶ。吸音材料や構造そのものの吸音の能力は、(5.60) 式で定義される吸音率で表される。吸音率は入射した音のエネルギーに対する、吸収された音のエネルギーの割合を表す。

$$a = \frac{I_i - I_r}{I_i} \quad \dots\dots (5.60)$$

ここで、 I_i ：材料に入射した音の強さ [W/m²]、 I_r ：材料で反射した音の強さ [W/m²] である。

(2) 吸音材料

吸音材料は吸音機構に基づき、幾つかの種類に分類できる。主な吸音材料を、表5.31に示す。

1) 多孔質吸音材料

ガラスなどの繊維を綿状やボード状に成形したグラスウールやロックウール、またポリウレタンなどの高分子物質を発泡させたもので、気泡が互いに連続した（連続気泡）材料を多孔質吸音材料という。最も広く用いられ

表5.31 吸音材の種類

種類	代表的材料
多孔質材料	グラスウール、ロックウール、スラグウール 発泡樹脂材料（連続気泡） 吹付繊維材料、焼成岩材料 木毛セメント板、木片セメント板 吸音用軟質繊維板 織物、植毛製品
孔あき板材料	孔あき石こうボード 孔あき合板 孔あきハードボード 孔あきアルミニウム板 孔あき鉄板
板状材料	合板 石こうボード ハードボード プラスチック板 金属板

る代表的吸音材料である。

多孔質材料の吸音率は、一般に周波数の増加とともに大きくなり、ある周波数でほぼ一定値になる。また、厚さの増加に伴い、中、低音域の吸音率が上昇する。また、材料の背後の空気層を増すと、低音部までの広い周波数範囲にわたり吸音率が大きくなる傾向がある（図5.59、図5.60参照）。

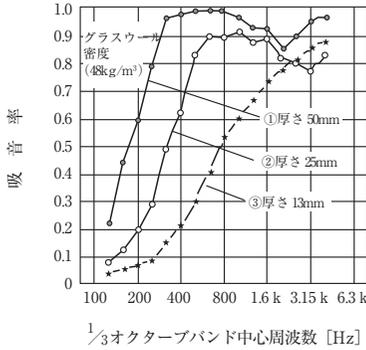


図5.59 多孔質材料の吸音特性 (厚さを変えた場合)

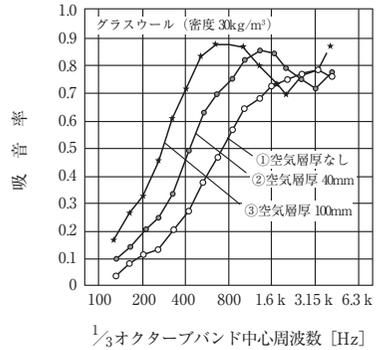


図5.60 多孔質材料の吸音特性 (空気層を変えた場合)

2) 孔あき板吸音構造

金属板や合板、石こうボード、ハードボードなどの各種ボード類に貫通孔をあけ、その背後に空気層を置いた構造である（図5.61参照）。

孔あき板構造に音が入射すると、穴の部分の空気は音の周波数に応じて振動を始め、背後空気層の空気がばねのように圧縮、膨張運動を繰り返し、穴の管壁との摩擦によりエネルギー損失が起きて、音が吸収される。

細管の空気の振動は、ある強さを持ったばね（背後空気層の空気）についての質量（穴の部分の空気）の振動と同じと考えられ、ある共鳴周波数を持っている。この共鳴周波数を利用した音の吸収を共鳴吸収という。

孔あき板構造の吸音特性は、共鳴周波数を中心とした山形になる。孔のすぐ後の位置に多孔質材料を入れると、共鳴周波数を中心として、更に広い周波数範囲に渡り高い吸音率が得られる。

3) 板状吸音構造

通気性のない合板、石こうボードなどを、図5.62に示すように剛壁との間に空気層を置いて取り付けた構造を板状吸音構造と呼ぶ。この構造では、音を受けると、板が振動して板自体の内部摩擦や取付け部付近の摩擦などでエネルギー損失が起こり、音が吸収される。

本構造は板の質量と背後空気層および板の剛性に関係するばねで振動系を

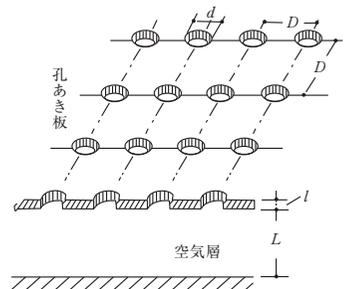


図5.61 孔あき板吸音構造

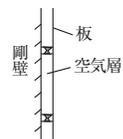


図5.62 板状吸音構造

形成し、共鳴周波数を持つ。この共鳴周波数に一致する周波数の音が入射すると、板は共鳴振動を起こし、その振幅は著しく大きくなり、その周波数付近のエネルギー損失が大きくなる。すなわち、孔あき板構造と同じように共鳴吸収によって音が吸収される。

4 遮音

(1) 遮音の特性

1) 遮音

遮音とは、音源の振動を間接的に低減すること、すなわち音が伝わるのをさえぎることである。遮音性能のよい材料を特に遮音材料と呼ぶ。

2) 透過損失

材料や構造そのものの遮音能力は、(5.61)式で定義される透過損失 TL で表わされる。

$$TL = 10 \log_{10} \frac{1}{\tau} = 10 \log_{10} \frac{I_i}{I_t} \quad \dots\dots (5.61)$$

ここで、 $\tau = \frac{I_t}{I_i}$: 透過率

I_t : 透過音の強さ [W/m²]

I_i : 入射音の強さ [W/m²]

である。すなわち透過損失は入射音と透過音の強さをdB単位で表したときの両者の差となる。

均質な平板およびその波板、合板、積層板などのように、それぞれの弾性的性質に著しい差がない材料では、入射音によって材料は一体となって振動し、透過音を生じる。

均質なパネルの周波数ごとの透過損失周波数特性の一般的な形は、図5.63に示すようになる。

3) 透過損失の算定 (質量則)

均質なパネルに音が垂直に入射した場合の透過損失 TL_0 [dB] は、(5.62)式で与えられる。

$$TL_0 = 20 \log_{10} f \cdot m - 42.5 \quad [\text{dB}] \quad \dots\dots (5.62)$$

ここで f : 入射音の周波数 [Hz]、 m : パネルの面密度 (単位面積当たりの質量) [kg/m²] である。周波数が2倍になるごとに、また面密度が2倍になるごとに、 TL_0 は6 dB増すことになる。

音がランダムに入射した場合の透過損失 TL [dB] は(5.63)式で与えられる。

$$TL = TL_0 - 10 \log_{10} (0.23 TL) \doteq 18 \log_{10} f \cdot m - 44 \quad [\text{dB}] \quad \dots\dots (5.63)$$

TL は周波数または面密度が2倍になるごとに約5 dB増加する (5 dB/oct (オクターブ))。

TL や TL_0 は材料の面密度によって決まるため、これらの式は質量則 (Mass Law) と呼ばれている。例えば、(5.62)式から、板厚1.6 mmの鋼板の、1,000 Hzに対する透過損失は約30 dBとなるが、板

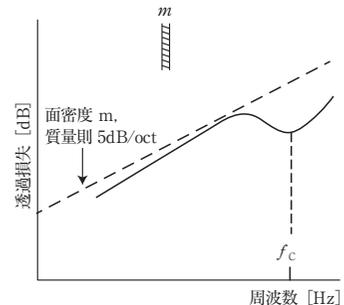


図5.63 均質パネルの透過損失特性

厚を2倍の3.2 mmにした場合、あるいは周波数を2倍の2,000 Hzにした場合には、透過損失は5 dB増して各々 35 dBになる。

主要材料の透過損失を、表5.32に示す。

4) コインシデンス効果

質量則に一致しない高音域での透過損失の谷形低下を、コインシデンス効果—コインシデンスによる低下 (Coincidence は、一致するという意味) と呼ぶ。この現象は、材料表面に斜めに入射する音により生じる材料面の音圧分布と材料の曲げ振動の固有振動数との一致(一種の共鳴)により起こる。コインシデンスの起こる周波数をコインシデンス周波数 f_c [Hz] と呼ぶ。平板の f_c は、(5.64) 式で示される。

$$f_c \doteq \frac{c^2}{1.8 t c_b} \quad [\text{Hz}] \quad \dots\dots (5.64)$$

ここで、 c : 空気中の音速 [m/s], t : 板厚 [m], c_b : 板の曲げ波の伝搬速度 [m/s]

同じ材料では、板厚が薄いほど f_c は大きくなり質量則の適用範囲が広がること分かる。

板厚が2倍になると f_c は半分になるので、表5.33に示すように、ある厚さにおける f_c の値を整理しておく、板厚を変えた時の f_c の値を直ちに知ることができる。

5) ダンピング (振動減衰)

① ダンピングの概念

振動源から伝わった振動を吸収して音を低減することをダンピング (Damping : 振動減衰) といい、ダンピング能力の大きい材料をダンピング材料と呼ぶ。

一般に、弾性体は異なった固有振動をもつ多くの振動系から成り、伝わってきた振動で質量が加振され音を放射する。例えば、鉄板を叩くと一時に多くの固有振動が励起され、複雑な音を発生するが、時間経過につれて、減衰の少ない固有振動だけが残る、カーンという単一周波数成分の純音が残る。また、鉄板より減衰の大きい鉛板では、この固有振動は速やかに消滅し響かない。

ある共振状態で振動し音を出している板に、ダンピング材料を貼って減衰を増すと、振動が減衰し音の発生が減る。ダンピング能力は、普通振動エネルギーの吸収の程度を表す損失係数 d で

表 5.32 材料の透過損失 (TL) 値の例 [dB]

種 類	板 厚 [mm]	周波数 [Hz]	TL [dB]
鋼 板	1.6	1000	30
コンクリート	120		55
スレート	6		30
板ガラス	3		28
石こうボード	12		30
ラワン合板	6		20

表5.33 コインシデンス周波数 (f_c) 例 [Hz]

種 類	板厚 [mm]	f_c [Hz]
合 板	12	2500
鋼 板	3.2	4500
ガラス板	5	3000
コンクリート	100	180

表される。損失係数は温度、周波数によって変化する。

② ダンピング材料とダンピング処理

ダンピング材料にはゴム系、ゴム・アスファルト系およびプラスチック系など種々ある。

比較的薄い金属板のダンピングにはアスファルト系の防音塗料、厚い鋼板にはプラスチック系のダンピング材料を用いる。また、薄い金属箔（アルミニウムなど）に特殊配合の合成ゴム系の粘着剤を塗りテープまたはシート状に切断したものや、比較的軟らかいゴム系のダンピング材料に金属箔を拘束層として付け、直ちに振動体に張りつけ使用できるものなどある。このほか、金属板や構造材料にダンピング処理をしたものや、ダンピングの大きい金属自体も実用化されている。

ゴム系およびプラスチック系のダンピング材料損失係数の一例を、図5.64に示す。図中の ξ は、

厚み比 ($= \frac{\text{ダンピング材の厚さ}}{\text{板の厚さ}}$) を表している。

ダンピングでは、ダンピング材料を振動する板の上に塗布・接着（図5.65 (a) 参照）、あるいは、ダンピング材料上に変形を拘束する剛性板を接着する（図5.65 (b) 参照）。(a) では、ダンピング材料の伸縮による減衰が作用し、(b) では、更にずれが生じ、両者の複合した減衰作用で振動エネルギーを吸収する。

ダンピングによる振動エネルギー減少と板の放射音の関係が不明確なため、騒音低減量の定量化は難しく、一般には、経験や実績などで推定する。

(2) 遮音材料

遮音材料は、遮音機構から、表5.34のように分類できる。

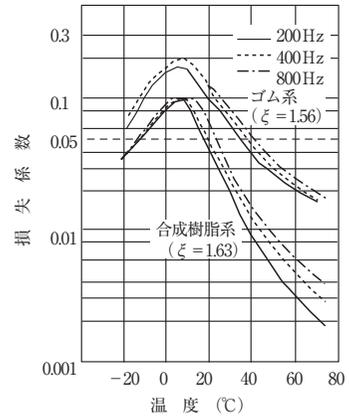


図5.64 ダンピング材料損失係数 (d) 例

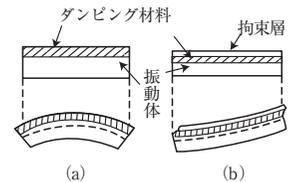


図5.65 ダンピング材料の使い方

表5.34 遮音材料の種類

種 類	代 表 的 材 料	
均質パネル	均質な板, それぞれの弾性的性質の著しい差のない合板, 積層板など	
中空パネル	2枚の均質パネルの間に空気層をもつ板	
ネ サ ル ド イ ッ チ バ	多孔材サンドイッチ	中空パネルの空気層に多孔材を充てんした板
	弾性材サンドイッチ	中空パネルの空気層に発泡材などを充てんした板
	剛性材サンドイッチ	中空パネルの空気層に剛性材を入れ表面材と接着した板
	ハニカムサンドイッチ	中空パネルの空気層にハニカムコアを入れ表面材と接着した板

5 消音器による防音

消音器は、減音のため、音の吸収、反射、干渉などを利用した装置である。機械等の一部に、例えば送風機の吸込口に設置すると、送風機によって発生し吸込口へ伝わる騒音は消音器によって吸収あるいは反射され、吸込口から放射される騒音は低減する。

消音器の消音効果は、通常透過損失（ TL ：Transmission Loss）によって表される。透過損失は消音器入口における入射音のエネルギー I_1 と出口での透過音のエネルギー I_3 をdB単位で表したとき

の両者の差であり、 $TL = 10 \log_{10} \frac{I_1}{I_3} = L_1 - L_3$ [dB] である。

消音器は消音機構から、次の幾つかの種類に分類できる。

(1) 吸音ダクト型消音器

ダクト内面に、グラスウールやロックウールなどの多孔質吸音材料を貼り付けた消音器である（図5.66 (a) 参照）。送風機の騒音防止など、気流を伴う場合の消音器として多く用いられる。また高音部の騒音低減に有効である（図5.66 (b) 参照）。

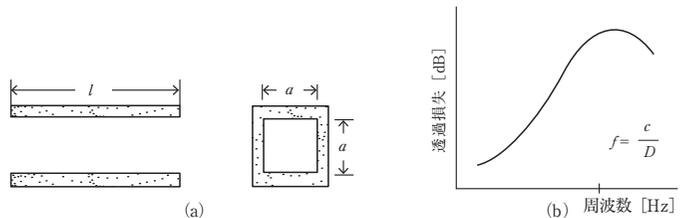


図5.66 吸音ダクト型消音器と透過損失 TL [dB]

この消音器の透過損失 TL は、通常次式によって求められる。

$$TL = 1.05 a^{1.4} \frac{P}{S} l \doteq (a - 0.1) \frac{P}{S} l \text{ [dB]} \quad \dots\dots (5.65)$$

ここで a : 吸音率, P : 周長 [m], S : 断面積 [m^2], l : 長さ [m]

この式はおよそ $f = \frac{c}{D}$ [Hz] (c : 音速, D : ダクト断面寸法, 直径又は短辺の長さ)

ダクトの曲がり部分の吸音材料を内張りした吸音ダクトでは、一般に曲率が大きいほど透過損失は大きくなる。

(2) 空洞型消音器

ダクトの断面を変化させた構造の消音器で、最も単純な構造を、図5.67 (a) に示す。消音器に入射した音は断面の変化部で反射されて低減する。この種の消音器は、主として低中音部の騒音低減に有効で、多孔質吸音材料を併用すると高音部の減音にも有効である。送風機、圧縮機およびエンジンなど各種の機械の吸、排気口からの騒音低減に広く用いられている。

この消音器の空洞部に多孔質吸音材料を内張りすると透過損失は (b) の点線に示すように高音部で改善される。また、空洞部に短管を挿入すると、透過損失が改善される (図5.68参照)。

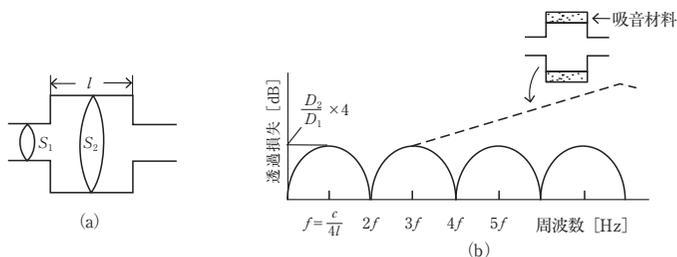


図5.67 空洞型消音器と透過損失TL [dB]

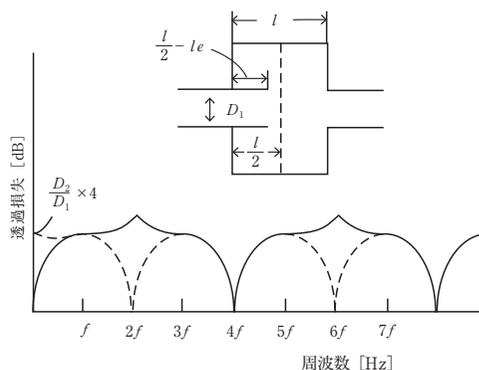


図5.68 短管1本挿入したときの透過損失TL [dB]

(3) 共鳴型消音器

ダクトの周囲に空洞を設けて小さな孔をあけた構造の消音器である。孔と背後の空洞が共鳴器を形成し、その共鳴周波数と一致する周波数の入射音は共鳴吸収によって吸音され低減する。

この消音器は、低・中音部の特定周波数成分のレベルが大きい騒音の低減に有効であり、往復式圧縮機やディーゼルエンジンの騒音低減に用いられる。

(4) 干渉型消音器

低音部の特定周波数成分のレベルが大きい騒音の低減に用いられる。入射音の通路を2つに分けて、一方 (l_1) を他方 (l_2) より音の波長の1/2だけ長くして、再び通路を1つにし (図5.69 (a) 参照)、この2つの音の干渉によって音は低減する。

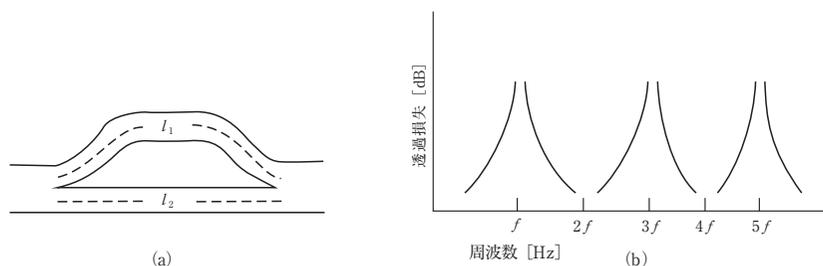


図5.69 干渉型消音器の透過損失TL [dB]

(5) 吹出口消音器

この消音器は、吹出口から高速で流体が吹出すときに発生する騒音低減に用いられる。この場合、吹出口近くでは高周波、遠く離れた所では低周波数の成分の騒音が発生する。

吹出口に多孔板や金網などを付け（プラストサプレッサという）、小さな孔から流体を吹き出させ、騒音源をできるだけ吹出口付近に留ませる（図5.70参照）。吹出流によって発生する騒音の低周波成分は減少し、高周波成分は若干大きくなるので、これを吸音ダクト形消音器で吸音する。消音器出口口径は流速を下げると入口より大きくする。

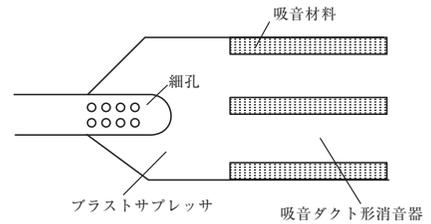


図5.70 吹出口消音器例

6 音の伝搬低減による防音

音の減衰を利用した音の伝搬低減対策を、表5.35に示す。

表5.35 音の伝搬低減対策

対策	低減効果等
①音源と受音点の距離を離す	音源からの距離に従い減衰（減音量は0～6 dB/倍距離の範囲）。音源の形状、寸法、音の放射状態等から効果を推定。
②音源の向きの変更	音源は指向性があり、方向によって放射される騒音のレベルが異なる。高周波数の音源や放射面積の大きい音源で減音。
③空気の吸収	高周波音や長距離伝搬で減音。それ以外は一般に効果減少。
④樹木、草等の植栽	通常の騒音防止対策においては、無視できるほど小さい。
⑤気温の影響を考慮	地上の気温が高い場合の減音量は低い場合に比べて一般に大きい。
⑥風向きの検討	風上方向の減音量は風下方向に比べて一般に比べて大きい。

第3節 振動防止技術

1 振動防止の考え方

本来、人間は振動を感じない生活環境にいるため、少しでも振動を感じると種々の心理的影響（不快、煩わしい、耐え難いなど）が生じる。

振動による苦情が発生した場合には、まず振動診察を行い、振動問題の確認、苦情対象の振動の振動源や振動発生原因等を明らかにすることが必要である。以上の確認作業を踏まえて、振動源対策、伝搬経路対策、受振部対策を実施する（図5.71参照）。

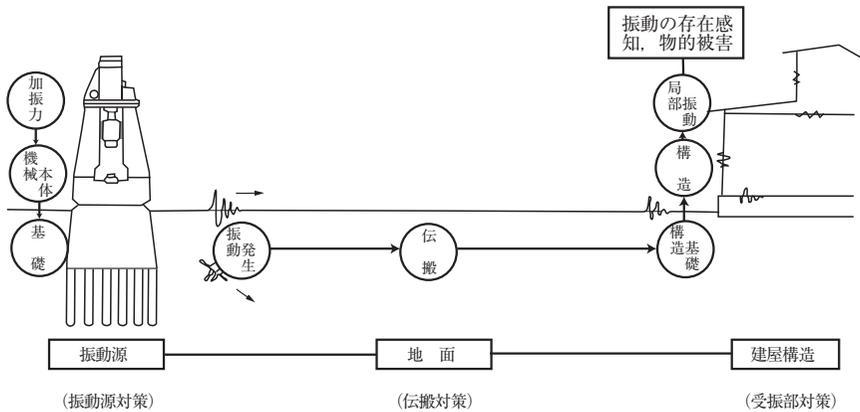


図5.71 鍛造機による振動公害の例

2 振動防止対策

振動の大きさを小さくするためには、振動源、伝搬経路、受振部のそれぞれにおいて対策を考えることができるが、その基本となる考え方を以下に示す。

(1) 振動防止対策の概要

1) 振動源対策

① 加振力対策

同じ性能で振動が少ない機械や作業法があれば、それに取り換える。次に機械で発生している加振力の低減策を考える。また、加振力の指向性も重要である。

複合する他の機械との影響がある場合には、対象の機械だけでなく、他の機械まで含めて振動源とみなす必要がある。

② 弾性支持対策

機械と機械基礎の間に防振装置（付加質量 + ばね）を入れ、防振設計により、振動の伝達を少なくする。

2) 伝播経路対策

一般に距離の増大とともに振動は減少する。このため、振動源の移設や敷地の拡大など工場および施設の立地と配置を考慮する。

3) 受信部対策

家屋基礎から伝わる振動は、家屋全体の揺れにより感知されたり、家屋の部材（窓ガラス、ふすまなど）のがたつき音や動きで感知される。このため、振動伝達の減少策とともに部材の共振やがたつきを防ぐ対策を講じる。

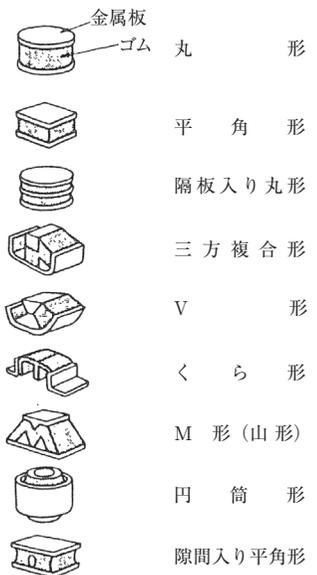


図5.72 防振ゴムの形状

(2) 弾性支持対策における防振材料の選定

1) 防振ゴム

非金属ばねでは防振ゴムが広く使用されており、金属板に天然ゴムや合成ゴムを接着した構造となっている。

主な特徴は、下記のとおりである。(図5.72参照)

- ① 形状の選択が比較的自由に、1個の防振ゴムで1方向だけでなく、他の方向の振動絶縁も行うことができる。
- ② ばね特性は内部摩擦による減衰要素を持ち、高周波振動の絶縁にも有効である。
- ③ 一般に小形、軽量で受圧面に取り付け金具を有しており、取り付けが容易である。
- ④ 金属ばねに比べて耐熱性、耐寒性、耐油性などが劣るので、使用環境に十分注意する必要がある。特に低温ではゴムが急に硬くなり、ばね作用が失われることがある。使用可能温度範囲は天然ゴムで $-10\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、特殊ゴムでは $-50\sim 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ である。

2) 金属ばね

金属ばねには、主に鋼製の重ね板ばね、コイルばねおよび皿ばねの3種類がある。

・重ね板ばね

数枚の板ばねを積み重ねたもの(図5.73参照)で、荷重の加わる方向と直交する2軸の方向は、かなり高い剛性をもっている。ばねがたわむ際の、各ばね板間の相対運動によって生じる板間摩擦力が減衰要素として働くが、高周波振動の絶縁性はよくない。

・コイルばね

材料を螺旋状に成形したもの(図5.74参照)で、金属ばねの中では最も広く利用され、代表的な線形ばねである。

コイルばねを用いた弾性支持では、サージングに注意する必要がある。サージングとは、コイルばね自身の弾性振動の固有振動数が、加振力の周波数と共振した状態をいい、振動の伝達がよくなる。サージングの起こる周波数は、一般に高い。

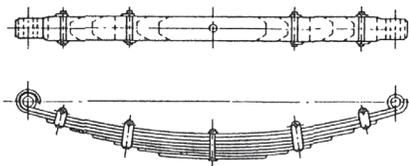


図5.73 重ね板ばねの例

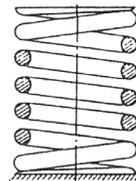


図5.74 コイルばねの例

・皿ばね

中央に孔のある円板を円錐状に形成して、鉛直方向に荷重を加えて使用するばね(図5.75参照)で、鉛直方向のみに作用する。直列に組み合わせてばねのたわみを増し、並列に組み合わ

せて荷重を増すなど、組合せ使用が普通である。直列の場合のばね定数は、それぞれのばね定数の和、並列では、ばね定数の逆数がそれぞれのばね定数逆数の和となる。

金属ばねの一般的特徴は、下記のとおりである。

- ① 各種のばね特性のものが広く選択できる。
- ② 一般的に構造は簡単で、取り付けも容易である。
- ③ 耐久性、耐高温・低温性、耐薬品性、耐候性の面で、防振ゴムや空気ばねより優れている。
- ④ 一般に、主負荷方向以外のばね定数を、任意にとることは困難である。
- ⑤ 金属自身の内部摩擦は、ゴムに比べて著しく小さいので、コイルばねではダンパ等で減衰を付与する必要がある。
- ⑥ 重ね板ばね、並列使用皿ばねなどでは、動的ばね定数についての配慮が必要である。

3) 空気ばね

タイヤコード等の補強層を内蔵したゴム膜で空気を封入し、弾性を利用したばねである。ゴム膜の形状によりペローズ形 (図5.76 (a) 参照) とダイヤフラム形 (図5.76 (b) 参照) の2種類がある。ペローズ形が多く使用されているが、最近はダイヤフラム形も一部使用されている。

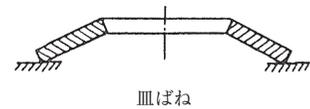
空気ばねの特徴は下記のとおりである。

- ① ばねの高さ、耐荷力およびばね定数をそれぞれ独立に、広範囲に選べる。
- ② 補助タンクを併用すると、極めて柔らかいばねが得られる。
- ③ 支持荷重の変化にかかわらず、高さ調整弁によって、高さが一定に保たれると同時に固有振動数も一定に保たれる。
- ④ 高周波振動の絶縁性がよい。
- ⑤ 空気ばね本体のほかに、補助タンク、高さ調整弁、配管回路および空気源としての圧縮機などが必要であり、構造は複雑である。
- ⑥ 横方向に柔らかすぎるので、鉛直方向にガイドが必要となることが多い。
- ⑦ ゴム膜を有するので、防振ゴムと同様、使用環境に注意する必要がある。

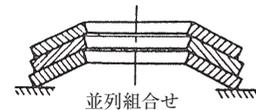
4) ダンパ

ダンパは次のような目的で、機械の弾性支持などに使用される減衰器である。

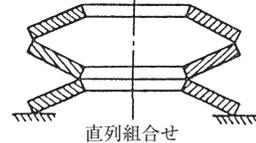
- ① プレスやハンマなどの衝撃的振動に対しては、過渡振動、自由振動の減衰を与える。



皿ばね

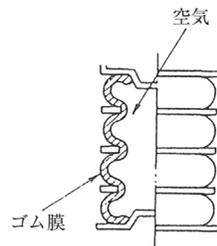


並列組合せ

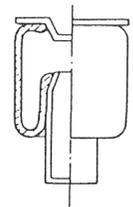


直列組合せ

図5.75 皿ばねと組合せ使用の例



(a) ペローズ型



(b) ダイヤフラム型

図5.76 空気ばねの例

- ② 圧縮機などの強制振動に対しては、起動時から定常回転になるまで、あるいは定常回転から停止するまでに、機械本体と支持ばねからなる振動系の固有振動数を通過するので、機械本体の共振振幅を許容値以下に抑える。

オイルダンパは、油の粘性または圧力降下を利用して運動体に抵抗を与え、運動体の運動エネルギーを熱エネルギーに変換し消滅させる。一般に筒形の直動式ダンパを使用する（図5.77参照）。ピストンPが上方に動くと、弁 V_1 が閉じ、油は細孔 H_2 を通過して下方に移動するとともに、弁 V_2 が開き、内シリンダと外シリンダの間の油が内シリンダの下室に流れ込む、逆にピストンが下方に動くと、 V_1 は開き V_2 は閉じるが、 V_2 には細孔 H_3 が開いているので、油は H_1 を通り下方から上方へ移動するとともに、 H_3 を通り内シリンダと外シリンダの間に逃げる。このピストンの上下運動の際に、油が細孔を流れるときの粘性摩擦によって減衰力が生じる。

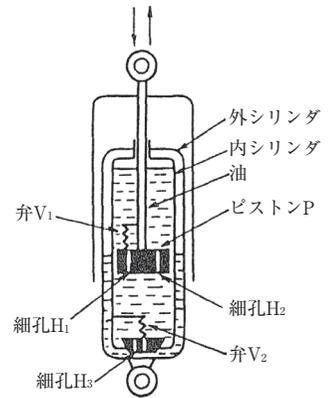


図5.77 オイルダンパの例

(3) 伝搬経路対策

1) 弾性波の距離減衰

振動源から離れるにつれて振動のエネルギーは減少する。従って、機械などを問題箇所から離して設置することによって、振動を低減することができる。

弾性波の振動源からの距離による減衰は、弾性波の種類や地盤の状態などによって異なり、単純ではない。実用的には、一様な地盤について、振動源からの弾性波の拡がりによるエネルギーの分散（幾何減衰）と地盤の土の摩擦による減衰（内部減衰）を考慮した、(5.66)式を用いて、弾性波の距離減衰を推定する。

$$L_r = L_0 - 8.7 \lambda (r - r_0) - 20 \log_{10} \left(\frac{r}{r_0} \right)^n \quad \dots\dots (5.66)$$

ここで、 L_r は、振動源から r [m] 離れた点の振動加速度レベルである。 L_0 は、振動源に近い、振動源から r_0 [m] 離れた点の振動加速度レベルである（単位はデシベル [dB]）。

r は振動源からの距離、 n は弾性波の種類によって決まる定数であり、表面波の場合 $n = 1/2$ 、半無限の自由表面を伝わる実体波の場合 $n = 2$ 、無限弾性体を伝わる実体波の場合 $n = 1$ である。

λ は地盤の内部減衰定数で、 h はその地盤の減衰定数 h 、弾性波の周波数 f 、弾性波の伝搬速度 V に依存し、次のように示される。

$$\lambda = 2\pi h f / V \quad \dots\dots (5.67)$$

λ の値は地盤の種類によって異なり、関東ローム、粘土、シルトなどでは0.01~0.2である。

(5.66)式の内部減衰 $8.7 \lambda (r - r_0)$ は、 λ が周波数に比例するため、高い周波数ほど減衰が大きい。また V が小さいほど、すなわち地盤が柔らかいほど減衰が大きい。

(5.66)式のエネルギー分散による減衰、 $20 \log_{10}(r/r_0)^n$ は、 $n = 1$ の場合は距離が2倍になるごとに6

dB, $n = 2$ の場合は12 dB, $n = 1/2$ の場合は3 dBずつ減衰し, 実体波は距離とともに急激に減衰する。

$r_0 = 1$ [m] の場合を基準として, $\lambda = 0$ および $\lambda = 0.05$ の場合における表面波および実体波の減衰状況を, 図5.78に示す。表面波に対する $\lambda = 0$ の伝搬について考えておくと安全側となる。周波数の低い場合の表面波の減衰は $\lambda = 0$, 高い場合の減衰は $\lambda = 0.05$ に近い減衰となる。

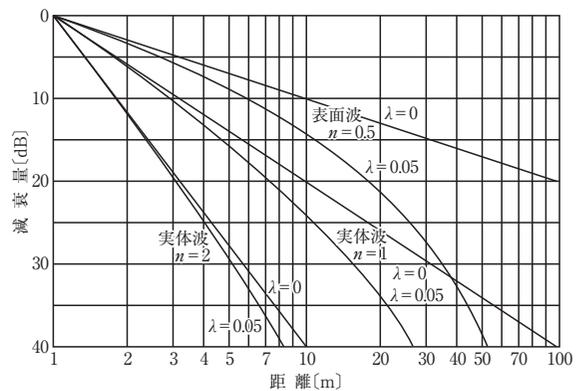


図5.78 弾性波の距離減衰

距離減衰 L_r は, (5.66) 式からおよその傾向がわかるが, 地盤の地層は必ずしも一様ではないため, その予測は非常に難しい。実際に機械を設置するときには, その付近の地盤に試験的に振動を与えて距離減衰を調べることにより, 伝搬状況を推定する。

2) 指向性

振動の指向性は, 振動源の種類, 加振力の方向, 地盤の状態などによって異なるため, 一般的ではなく本質的な解決策はないが, 例えば次の方法によって振動低減を図る。

- ① 地面上に設置された機械から, 一定距離離れた各方向において振動レベルを測定し, 問題とする点が, 振動レベルの小さな方向になるように機械を設置する。どのくらい小さくなるかは, 類似の機械などについての振動レベル測定結果から推定する。
- ② 機械から振動が発生している場合, 別に振動源を設置し振動を発生させ, この2つの振動を地面上で合致させることによって, ある地点や範囲の振動レベルの低減を図る。
- ③ 振動源の近くに, 弾性波の波長程度以上の大きな構造物 (建物など) があると, 弾性波が低減されるので, 大型構造物を設置することによって, 振動低減を図る。

第4節 測定技術

1 騒音測定器

(1) 騒音計

1) 騒音計の動作原理と基本操作

騒音は, マイクロホンによって音圧から電気信号に変換されて騒音計本体に加えられる。騒音計の本体は, 聴感特性を補正する周波数補正回路, 測定レンジを設定する減衰器, 増幅器, 信号を実効値で表すための指示部などで構成される。

騒音計のマイクロホンは, 無指向性のコンデンサマイクロホンである。マイクロホンにはバイアス方式とエレクトレット方式があり, 一般に後者の方式を使用している。コンデンサマイクロホンの主な性能は, マイクロホンの直径で決まる。小さいマイクロホンが音響的に有利であり, 測定周波数範

囲の上限が高く、かつ指向特性が良い（音の入射角の影響が小さい）。

2) 騒音計の周波数補正特性

騒音計は、音の大きさおよび音のうるささの聴覚特性に基づく周波数補正特性（A特性）を備えていて、騒音レベルの測定にはこのA特性を用いることが規定されている。音圧レベルの測定は、平坦特性FLATがあればその特性を用い、FLATがなければC特性を用いる。C特性は周波数範囲の両端付近で感度が低い特性になっているのでC特性の測定値を「C特性音圧レベル」と注記する場合もある。一般的には、騒音の大きな周波数成分は低い周波数帯域にあるので、A特性の測定値はC特性の測定値よりも小さい。

3) 騒音計の動特性

騒音計の指示機構には、動特性、実効値の精度、目盛の精度などの規定がある。動特性は、図5.79のような断続する正弦波信号に対する指示機構の応答性を規定するもので、速い動特性（FAST）と遅い動特性（SLOW）がある。FASTは耳の応答性を考慮して決められ、SLOWは指針の動断続信号に対する最大の指示を遅くして指示値を読み易くしたものである。これらの応答性を検波回路の時定数で表すと、FASTは0.125秒、SLOWは1秒である。

(2) 周波数分析器

騒音を低減させるときに、騒音のどの周波数を対象に防音対策をすればよいかを明らかにするのが周波数分析器使用の主な目的である。

建屋の遮音、防音塀による騒音低減などの設計は、一般的にはオクターブバンド分析器を用いる。オクターブバンド分析器のフィルタは、所定の通過帯域の周波数成分だけを取り出してその音圧レベルを測定する（表5.36参照）。

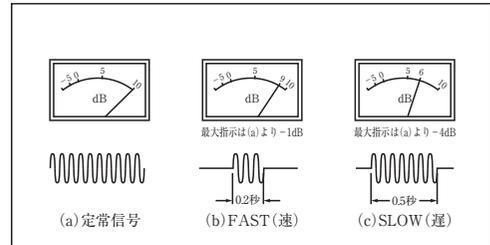


図5.79 騒音計の動特性値 — 断続信号に対する最大の指示値
(同振幅の定常信号に対する差を規定)

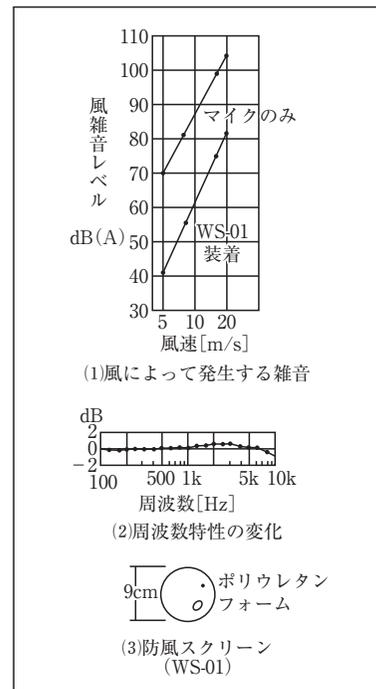


図5.80 マイクロホン防風スクリーン装着による風雑音低減効果

オクターブバンドA特性音圧レベル $L_1 \cdot L_2, \dots$
 L_n [dB] の騒音レベル L_A [dB] は、次式で求める。

$$L_A = 10 \log_{10} (10^{L_1/10} + 10^{L_2/10} + \dots + 10^{L_n/10}) \quad \dots\dots (5.57)$$

(3) 防風スクリーン

屋外での騒音測定や気流を伴う機械の騒音測定では、マイクロホンに風が当たると雑音が発生する。風の影響低減のため、マイクロホンに防風スクリーンを装着する。防風スクリーンの効果の例を図5.80に示す。材質によりマイクロホンの周波数特性が変化することがあるため、必ず専用のスクリーンを使用する。なお、風が強いとき（例えば風速5 m/s以上）は、騒音測定を中止することが望ましい。

表5.36 オクターブバンド分析器フィルタの通過帯域（下限および上限の遮断周波数 [Hz]）

中心周波数 [Hz]	通過帯域 [Hz]
31.5	22.4 ~ 45
63	45 ~ 90
125	90 ~ 180
250	180 ~ 355
500	355 ~ 710
1,000	710 ~ 1,400
2,000	1,400 ~ 2,800
4,000	2,800 ~ 5,600
8,000	5,600 ~ 11,200

2 騒音レベルの測定

普通の状態の騒音は所定の方法で測定できるが、特殊な条件が入る場合には、測定環境の状況、音の性質、測定器の性能限界、関連規格の規定等を十分考慮して、妥当性のある方法で実施する。

騒音レベル測定における基本的な注意事項を、図5.81に示す。

(1) 測定位置

1) 工場等の敷地境界線

工場および建設作業場所等の騒音レベル測定においては、住宅等に面する敷地境界線での測定が最も重要である。問題とする敷地境界線の長さに応じて、数メートル間隔、あるいは10～数十メートル間隔で測定点を設定する（少なくとも2点以上設定）。マイクロホンの高さは、1.2～1.5 mとする。

防音の目的で塀がある場合は、塀の外側で測定する。ただし、問題となる住宅等に対して塀の効果がないと思われる場合（例えば、音源位置からその住宅が見える場合）は、塀の内側で測定する。

2) 工場建屋内外

工場等の建屋内の代表的な騒音レベルを測定するときは、建屋内の床で数点測定して、それらの測定値を平均する。工場等の建屋の外側に、特に大きな音がでている場所、例えば、機械の吸・排気口、建屋の出入口、換気孔などがあれば、その近くの地上で騒音レベルを測定する。

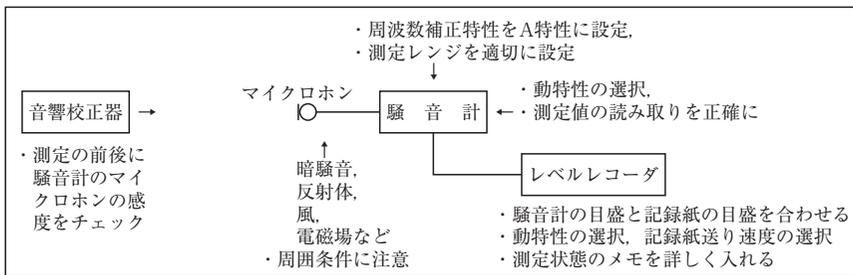


図5.81 騒音レベル測定における注意事項

工場等の建屋の遮音の程度を調べるときは、建屋の壁から内・外側それぞれ約1 m離れた位置で騒音レベルを測定して比較する。

3) 周辺の住宅等における測定点

騒音規制法では、周辺住宅等の騒音の測定規定はなく、通常は住宅等での測定は行わない。ただし、住民の希望等で騒音測定を行う場合は、建物からの反射音の影響を避けるため、それらの建物から3.5 m以上離れた位置で測定する。

4) 作業環境騒音測定の測定位置

屋内では床平面上に6 m以下の縦と横の等間隔線を引き、その交点の床上1.2～1.5 mにおいて、10分間以上の等価騒音レベルを測定して、規定による管理区分の判定をする。

(2) 周囲の条件

1) 暗騒音の影響

ある場所の特定の騒音を対象としたとき、対象の特定音がないときの騒音を暗騒音という。例えば、工場騒音の測定では、工場外の交通騒音、人の声、鳥、虫の鳴き声などは暗騒音となる。また、ある機械の音だけを測定する場合、その機械以外の機械から発生している騒音は暗騒音になる。

対象の音があるときと、無いときの騒音計の指示差が10 dB以上のときは、対象の音の測定される騒音レベルは、暗騒音の影響を受けない。

その差が4 dB以上10 dB未満のときは補正し（表5.37参照）、対象の音だけの騒音レベルを推定できる。例えば、騒音レベル70 dBの場所で、ある機械を運転したときに75 dBとなった場合、その差は5 dBであるから、表5.40から補正值-2 dBを求めて、75 dBから2 dBを引いた73 dBがその機械の騒音レベルである。

表5.37 暗騒音の補正

対象の音があるときの指示 (a dB) と ないときの指示 (b dB) の差 (a-b) [dB]	(a) から引き算をして対象の音の騒音 レベルを求めるための補正值 [dB]
4～5	-2
6～9	-1

この補正が成り立つのは、対象の音と暗騒音が定常音（騒音レベルが変動しない音）である場合である。影響する暗騒音が道路交通騒音のように変動する場合には、暗騒音の補正はできないので、交通騒音の騒音レベルが低くなる時に測定する。

(3) 気象条件等の影響

騒音が屋外を伝搬するとき、気象条件、地形、地表の状態などによって大きく影響を受けることがある。従って、音源から数百メートル以上離れた敷地境界線における騒音の正確な実態把握対象には、日時、季節等を変えて測定を繰り返し、天気などとともに、測定点近傍での風向、風速、温度、相対湿度などの気象条件、地形、地表面の状態などをできるだけ明確に把握しておくことが望ましい。

(4) 騒音レベルの測定値の求め方

騒音規制法の騒音レベルの測定方法では、「騒音の測定は、周波数補正回路はA特性を、動特性は速い動特性（FAST）を用いる。」と規定されている。

サンプリング時間間隔は短いほど、かつ測定時間は長いほど精度は高くなる。

騒音の大きさの決定は、次のとおりである。

- ① 騒音計の指示値が変動せず、または変動が少ない「定常騒音」の場合は、その指示値とする（図5.82参照）。
- ② 騒音計の指示値が周期的または間欠的に変動し、その指示値の最大値がおおむね一定の「間欠騒音」の場合は、その変動ごとの指示値最大値の平均値とする（図5.83参照）。
- ③ 騒音計の指示値が不規則、かつ大幅に変動する「変動騒音」の場合は、測定値の90パーセントレンジの上端数値とする。
- ④ 騒音計の指示値が周期的または間欠的に変動し、その指示値の最大値が一定でない「最大値が変動する間欠音」の場合は、その変動ごとの指示値の最大値90パーセントレンジの上端数値とする。

3 超低周波音、低周波音の測定

低周波音はJIS規格の騒音計で測定できるが、超低周波音は測定できないので、超低周波音用の音圧レベル計が必要となる。測定方法は基本的には騒音レベルの測定方法と同じである。

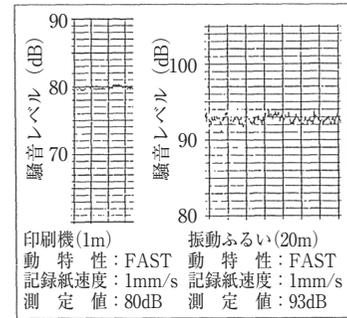


図5.82 定常騒音の騒音レベルの例

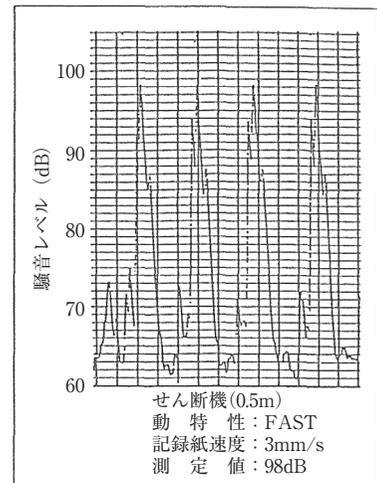


図5.83 間欠騒音の騒音レベルの例

(1) 測定機器

① マイクロホン

低周波音の測定には、主としてコンデンサマイクロホン、超低周波音の測定にはセラミックマイクロホンが用いられる。これらのマイクロホンは性能が比較的安定しており、各周波数領域で良好な性能が得られる。

② 低周波音圧レベル計

超低周波音測定用の音圧レベル計として、現在はISO規格やJIS規格に準拠した実時間分析器付き低周波音圧レベル計などが使用されている。なお、それは低周波音の測定でも可能である。超低周波音や低周波音の測定には、指示計の動特性はSLOW特性（時定数は1秒）がよく用いられている。

③ 周波数分析器

超低周波音および低周波音の分析には、一般的に1/3オクターブバンド分析器が用いられる。音源探査の場合は高速フーリエ変換（FFT）周波数分析器を用いることもある。

④ データレコーダ

超低周波音、低周波音の記録は、オーディオ範囲の録音装置は適さないので、データレコーダやデジタルオーディオテープレコーダ（DAT）を使用する。特に変動が大きい場合や衝撃的な場合は、ダイナミックレンジが十分な録音装置を選定する必要がある。

(2) 測定方法

マイクロホンの高さ、位置などは騒音レベル測定法の場合とほぼ同じであるが、注意事項として次の事が考えられる。

① 気象条件、地形などによる影響

超低周波音、低周波音が遠距離を伝播する場合は地表面や気象による影響を受けやすい。特に建物からの反射の影響は波長が長い分、大型の構造物や谷間のような地形で思わぬ場所から反射の影響を受けたり、定在波が生じたりする等、影響範囲も広くなるので影響がないかどうか十分に確認する必要がある。

② 風の影響

超低周波音や低周波音は風の影響を受けやすく、対象とする音圧レベルが小さいほど、また周波数が低いほど影響を受けやすい。騒音計用の防風スクリーンではあまり効果がないので、微風の場合は、マイクロホンに大型の防風スクリーン（直径30 cm程度）を用いると風の影響を除ける場合もあるが、風のある日は測定しない方が無難である。

4 振動測定

(1) 振動測定器

1) 振動レベル計

地面振動を振動規制法に基づいて測定する測定器を振動レベル計という。

振動レベル計の基本的な構成を、図5.84に示す。現在、振動レベル計に使用されている振動ピックアップは、圧電形の加速度ピックアップであり、通常は鉛直方向と互いに直角な2つの水平方向の3素子とそれぞれの前置増幅器を内蔵しており、地面または床に設置できる。

振動規制法では、工場等の敷地境界線が測定位置となる。振動の伝搬の様子を知るには、振動源から倍距離の関係で測定点を選定して、振動の距離による減衰特性を得る。

振動レベル計の振動ピックアップは硬い地面で行う。柔らかい地面では、共振周波数が測定周波数範囲に入る可能性があるため、地面の踏み固めや、コンクリートブロックの地中埋め込みを行う。

2) 周波数分析器

地面振動の場合は、振動の周波数が低いために、一般的に1/3オクターブバンド分析器を使用する。

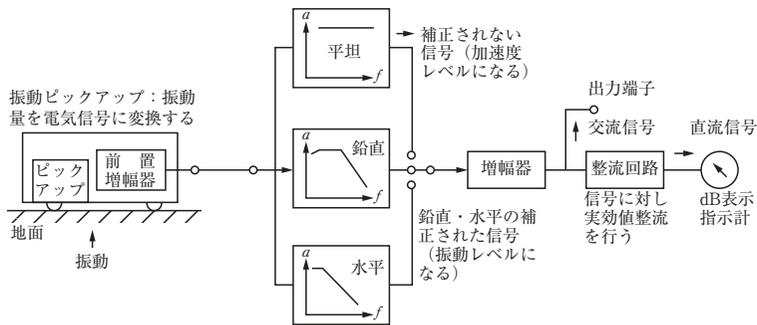


図5.84 振動レベル計の構成