

# Characterization of Nano-sized Oil Mist Particles Generated by Metal Machining Processes and Collection

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2021-03-17 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/2297/00061373">http://hdl.handle.net/2297/00061373</a>

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.



博 士 論 文

金属加工プロセスで発生する  
ナノサイズオイルミストの特性評価と捕集

金沢大学大学院自然科学研究科

自然システム学専攻

学 籍 番 号 1724062011

氏 名 岩崎守顕

主任指導教員名 瀬戸章文

提 出 年 月 2020年6月25日

## 目次

第1章 緒論	1
1-1 はじめに	1
1-2 本論文の目的と構成	2
第2章 既往の研究	3
2-1 はじめに	3
2-2 オイルミストの定義	3
2-3 オイルミストの弊害と規制	4
2-3-1 人体への弊害	4
2-3-2 設備への弊害	8
2-3-3 規制	9
2-4 エアロゾル計測手法	10
2-4-1 個数濃度測定	11
2-4-2 質量濃度測定	13
2-4-3 粒径測定	15
2-4-4 有機成分測定	16
2-5 オイルミストの捕集技術	18
第3章 金属加工プロセスにおけるオイルミストの発生とその性状測定	22
3-1 はじめに	22
3-2 発生メカニズム	22
3-3 金属加工工場の加工装置から発生するオイルミストの測定	23
3-3-1 測定概要	23
3-3-2 測定対象加工装置	25
3-3-3 旋盤加工における排気・扉前の個数濃度測定結果	29
3-3-4 ギヤ歯切加工における排気・扉前の個数濃度測定結果	32
3-3-5 ギヤ歯研削加工における排気・扉前の個数濃度測定結果	35
3-4 まとめ	38
第4章 加工装置から発生するオイルミストのボックスモデルによる解析	39
4-1 はじめに	39
4-2 ボックスモデル概要	39
4-3 加工装置内個数濃度の計算値と実測値の比較による発生量の推定	41
4-4 加工装置前面扉からの漏洩量の推定	44

第5章	ミストコレクタの捕集性能確認	46
5-1	はじめに	46
5-2	試験条件	46
5-3	試験結果	48
5-3-1	水溶性油試験結果	48
5-3-2	不水溶性油試験結果	51
5-3-3	粒径別捕集効率	54
5-4	ナノ粒子に対する電気式ミストコレクタの捕集効率	56
第6章	切削油の化学分析	57
6-1	はじめに	57
6-2	化学分析概要	57
6-3	化学分析結果	58
第7章	総論	61
	引用文献	62
	謝辞	64

## 第1章 緒論

### 1-1 はじめに

自動車工場などの金属加工工場では、製品品質の向上、工具類の冷却、加工工具周辺の切削粉の洗浄、回収のため多量の切削油を使用している（図 1-1）。この切削油が工具や材料で物理的に飛散したり、加工工具とワーク（製品）との摩擦熱により蒸発し、空気中で冷却され凝縮したりすることによりオイルミストが発生する。オイルミストの粒径は10～10,000nmの範囲で広く分布するが、熱を伴い発生した油煙は核生成により100nm以下のナノ粒子を多く含むことが知られている。

オイルミストの弊害は人体、設備、環境など多岐に及び、安全で快適な職場環境、工場周辺の自然環境の面から対策が必要とされている。なかでも人体に及ぼす影響として、皮膚の炎症や咽頭癌、喘息、気管支過敏症などの発生が報告されている。日本国内では日本産業衛生学会が許容濃度として $3\text{mg}/\text{m}^3$ を勧告しているが、自動車メーカーなどでは各社が独自に自社規制値を設定し（ $0.3\sim 0.5\text{mg}/\text{m}^3$ ）、管理していることが現状である。



図 1-1 金属加工プロセスにおける切削油の使用例

## 1-2 本論文の目的と構成

本論文の目的は、金属加工プロセスで発生するオイルミストの特性評価、オイルミストの捕集技術の評価、化学分析による切削油の判別である。

本論文の構成は以下の通りである。

第1章 本論文の目的と概要について説明した。

第2章 既往の研究をまとめた。

第3章 金属加工装置から発生するオイルミストについてまとめた。

第4章 金属加工装置から発生するオイルミストについて数値モデルにより理論的に解析した。

第5章 オイルミストの捕集技術について実験的に評価した。

第6章 切削油の化学分析についてまとめた。

第7章 第3章から第6章までの結果を踏まえ、総論としてまとめた。

## 第2章 既往の研究

### 2-1 はじめに

金属加工工場で発生するオイルミストについて、オイルミストの定義、弊害と規制、捕集技術について既往の研究をまとめ、本論文の研究意義につなげる。

### 2-2 オイルミストの定義

オイルミストは金属加工工場で発生し、金属加工工場では切削工具やワークピースの潤滑と冷却のために大量の切削油を消費している。Jonathan ら (2000) は、オイルミストは高速で動く機械部品による油滴および気化した油の凝縮によって生成されるマイクロスケールの粒子として定義した。また、Zhang ら (2017) は、オイルミストは金属などのソリッドコア粒子と、オイルに囲まれたその他の要素で構成されるコロイドとして定義した。Greg ら (2001)、Kondo ら (2011)、Wang ら (2011) は、オイルミストの直径は一般に 10~10,000nm の範囲であり、蒸発凝縮プロセスによって生成されるオイルミストには、直径が 100nm 以下のかなりの量の超微粒子 (Ultrafine Particle; UFP) が含まれると報告している。

ここで、切削工具やワークピースの潤滑と冷却のために使用されている切削油には、水溶性切削油と不水溶性切削油があり、それらの特徴について以下にまとめる。

### ①. 水溶性切削油

水溶性切削油は水で10～20倍に希釈して使用する。そのため腐敗や臭気の予防など適切な油剤の管理が必要である。また、引火の危険性も低く、安全性が高い。

### ②. 不水溶性切削油

不水溶性切削油の主成分は鉱油、および脂肪酸であり、潤滑性に優れているため高い加工精度を要求される加工に用いられる。しかしながら油性切削油の多くは消防法において危険物に該当するため、法律に基づいた使用および火災の対策が必要である。水溶性切削油と比較すると、劣化は緩慢であり、管理しやすい油剤である。

## 2-3 オイルミストの弊害と規制

### 2-3-1 人体への弊害

オイルミストを吸い込むと気分が悪くなり、場合によっては呼吸器癌や内臓の病気の要因となる恐れがある。また、目への刺激や肌のかぶれなどを起こすことも十分考えられる。粒径の大きなオイルミストは床に沈降し、スリップしやすくなる危険もある。部品加工に使用している切削油は主成分として鉱物油、潤滑剤、界面活性剤、防錆剤の他、多くの添加物が含まれているため、腐食して劣化が進行すると悪臭を放つ。オイルミストの人体への弊害を図2-1にまとめる。

Mackerer (1985)、Robertson ら (1988)、Kubasiewicz ら (1991)、Kazerouni ら (2000)、Greg ら (2001) は機械加工プロセス中のオイルミストの放出は、作業環境の空気中の粒子濃度を増加させ、皮膚の炎症、喉頭癌、喘息、気管支過敏症



などの職業上の健康問題に関連すると報告している。前述したようにオイルミストには超微粒子（UFP）が大量に含まれており、UFPは気道や肺の奥深くに沈着することがある。Oberdörster（2001）、Donaldsonら（2002）は、UFPは健康への悪影響に関連すると報告した。表 2-1 にオイルミストの健康被害についてまとめ、表 2-2 にミスト濃度別視界状況を示す。

さらに、Hinds（1999）はオイルミスト粒子の濃度が高いと霧が発生し、特に直径が約 100nm のエアロゾル粒子によって光が散乱されるため、加工工場の作業スペースでの視認性が低下すると報告した。これらのオイルミストの人体への弊害は、職場環境に与える深刻な問題であり、定着率の低下が懸念されている。

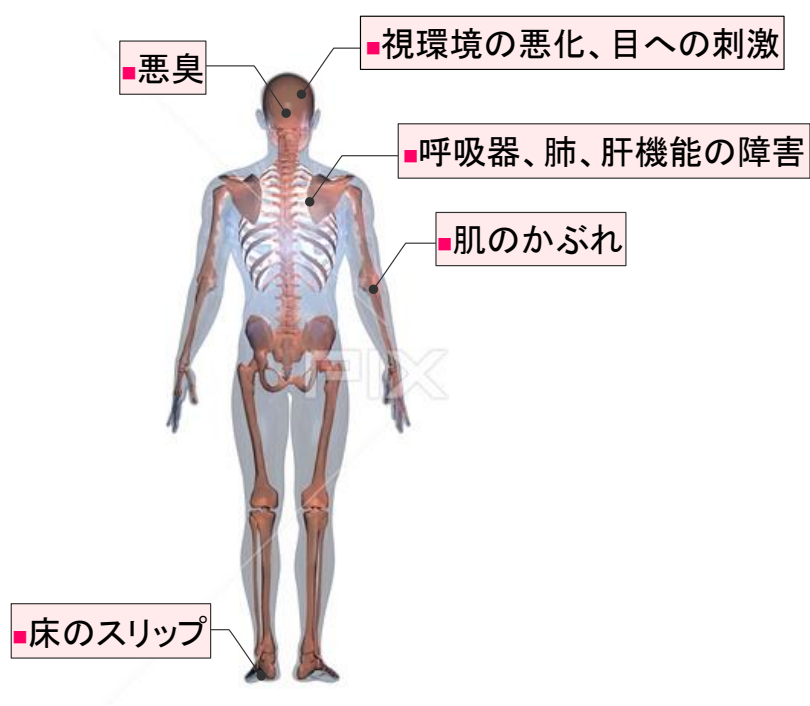


図 2-1 オイルミストの人体への影響

表 2-1 オイルミストの健康被害

タイトル	著者	発行年	内容
Health effects of oil mists: A brief review.	Carl R. Mackerer	1985	直接の皮膚刺激によって引き起こされる皮膚炎は、切削液への曝露による最も一般的な健康への影響である。最近の研究では、切削油剤への長期曝露は、肺がん、膀胱がん、消化管がん、または非悪性呼吸器疾患による死亡の発生率の増加をもたらさないことを示している。ただし、特定の切削液に長期間さらされると、特定の種類の皮膚がん、特に陰嚢がんが発生したと考えられている。
Occupational asthma due to oil mists	Robertson, A.S. Weir, D.C. Burge, P.S.	1988	職場でオイルミストに曝された 25 人の患者を仕事に関連した喘息の可能性について調査した。一連のピーク呼気流記録は、13 人が明確な仕事に関連する喘息、7 人が曖昧な仕事に関連する喘息、および 3 人が仕事に無関係の喘息、2 人が喘息ではないことを示した。
Case-referent study on skin cancer and its relation to occupational exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons	Kubasiewicz, M. Starzynski, Z. Szymczak, W.	1991	皮膚がん罹患している 376 人の男性のグループと、年齢に応じてマッチングされた 752 人の男性の 2 つの対照グループを対象とした。多環芳香族炭化水素を含むさまざまな製品への職業曝露の分析は、鉱油に曝された人の皮膚がんのリスクの増加を示すデータを得た（オッズ比=1.46; 95%信頼区間; 1.06-2.05）。鉱油以外の多環式芳香族炭化水素源への曝露の場合、皮膚がんリスクの有意な増加は認められなかった。
Mortality Among Workers Exposed to	Neely Kazerouni, Terry L. Thomas, Sandra A. Petralia,	2000	肝臓と胆道、および精巣癌の SMR（標準化死亡比）は有意に上昇していた。重油ミストに曝された労働者のサブ

Cutting Oil Mist: Update of Previous Reports	Richard B. Hayes		セットの中で、SMR は肺と精巣の癌、およびホジキン病で有意に上昇した。肺がんによる死亡のリスクは、15 年以上オイルミストに大量にさらされた労働者の中で最大であった。胃がんによる死亡率は、オイルミストに大量にさらされた労働者が 5 年以上雇用されていた場合に架台であった。喘息および肺気腫による死亡の有意な増加があった。
Metalworking fluid exposures in small machine shops: An overview.	Greg, M.P. Sieber, W.K. O'Brien, D.M. Hughes, R.T. Glaser, R.A. Catalano, J.D.	2001	サンプリングは 79 の小さな機械工場で行われ、金属加工液 (MWF) への空中曝露を評価した。収集された 942 人の個人用サンプルの 62% が、総粒子状物質に対して推奨される曝露限度 (REL) 0.50 mg/m <sup>3</sup> 未満であった。しかし、調査した 79 施設のうち 61 施設で、少なくとも 1 つのサンプルが REL を超えていた。

表 2-2 オイルミスト濃度別視界状況

ミスト濃度[mg/m <sup>3</sup> ]	視界状況
0.15	目標数値
0.20	顕著な現象は確認できない
0.50	うっすらと淀む
1.0	曇っていることが分かる
2.0	視界が悪い

空衛便覧 第 14 版 3 空気調和設備編より

## 2-3-2 設備への弊害

オイルミストは人体への影響に加え、図 2-2 に示すように工場設備に対しても悪影響を及ぼす。まず工場内の床面や設備または製品、精密機器などへの付着である。特に水溶性油を発生源とするオイルミストは、工場内の湿度を助長させ、制御盤内を汚染し電子機器などを故障させるケースが多くなっている。

天井梁に付着したミストが油滴となって床面や製品上へ落下することもあるが、空調機などのフィルタ、熱交換器などに付着して風量の低下や熱交換効率の低下によるエネルギーロスも考えなければならない。照明器具への付着で照度の低下や工場全体の換気による空調エネルギーの放出、熱交換器やクーラント液のオイルコントローラ、ラジエーターの汚れによる機能低下は無駄なエネルギー消費となっている。また、ダクト汚染は火事の際に延焼経路となってしまうことから早急な対策が必要となる。さらには工場内空気の入替により周辺への臭気放出、雨水溝への油分の混入などの害もある。

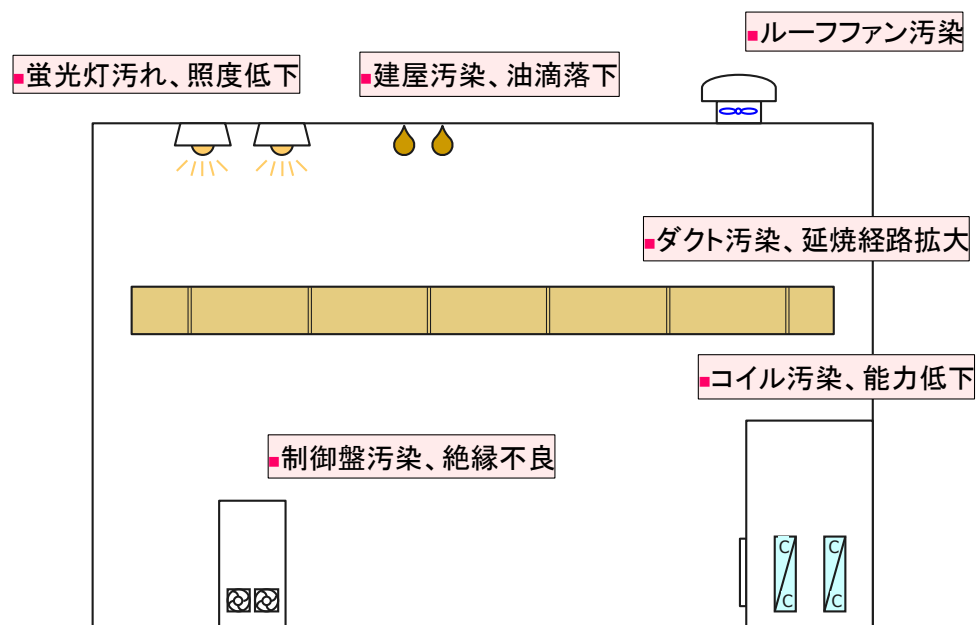


図 2-2 オイルミストの設備への影響

### 2-3-3 規制

日本産業衛生学会（2019）は、オイルミストの質量濃度を  $3\text{mg}/\text{m}^3$  以下に維持することを推奨し、日本では各社が独自に管理質量濃度を設けている。ただし、このような質量ベースの規制では、蒸発凝縮プロセスで生成されるナノスケールのオイルミストの影響は考慮されていない。工場での機械加工によって発生するナノスケールの空気中のオイルミストの個数濃度を理解することに大きな関心が寄せられているが、工場での実際の機械加工プロセス中の測定はまだ限られている。

## 2-4 エアロゾル計測手法

エアロゾルの計測・測定では、物理・化学的性状と速度などの動的挙動を測ることが極めて重要であるが、両者の間には密接な関係があり、エアロゾルの性状を構成する基本要素である濃度・粒径・化学組成の計測法を表 2-2 まとめる（日本エアロゾル学会、2004）。

エアロゾル濃度測定といった場合、一般的に個数または質量濃度測定をさすことが多い。質量濃度の標準法は、フィルタを用いて試料空気を一定流量で濾過捕集し、試料捕集前後の質量差を天秤などで秤量後、吸引空気量で除することで求めるものである。個数濃度は、顕微鏡を用いてフィルタ上に捕集された粒子の個数を計数することで測定されるが、煩雑で時間を要することから一般的ではない。個数、質量濃度は、表 2-2 に示すようにエアロゾル粒子の濃度と 1 対 1 に対応した物理量を測定する機器測定が、簡便で連続測定が可能、光散乱法ではフィルタ上に捕集せずその場での測定が可能、フィルタ捕集と比較して時間分解能が高い、などの利点を有するため、良く用いられる。

エアロゾル粒子の粒径は、表 2-2 に示すように顕微鏡を用いて直接測定される幾何学径と、粒子の物理量や沈降速度などの動力的特性値の粒径依存性を利用して求められる物理的（動力的）換算径に分けることができる。前者の方法で粒度分布を求める場合には多数の粒子数を測定することが必要なため煩雑であり、電子顕微鏡を用いた場合、真空下で揮発性粒子が消失するおそれが生じる。後者の例としては、空気力学径があげられ、対象粒子と同一の重力沈降速度を有する単一密度の球形粒子径が相当する。

エアロゾルを構成する化学成分は極めて微量なため、その組成（元素、化学状態、結晶構造）を同定、定量化するには、フィルタやインパクトで長時間サンプ

リングしたバルク試料について、各種の無機および有機分析手法が適用されることが多い。

表 2-2 エアロゾルの計測手法

測定量		測定法	測定粒径範囲 (μm)	測定下限濃度	測定原理
濃度	個数	光散乱カウンタ (OPC)	0.05~100	0.001 個/cm <sup>3</sup>	光散乱パルス
		凝縮核測定器 (CNC)	0.003~3	1 個/cm <sup>3</sup>	過飽和凝縮+光散乱
	重量	フィルタ捕集	0~	捕集条件による	ろ過+秤量
		光散乱法	0.1~2	(空気散乱)	散乱光量
圧電天秤		0.01~10	1μg/m <sup>3</sup>	結晶振動周波数の変化	
		β線吸収法	0~10	2~5μg/m <sup>3</sup>	β線吸収
粒径	幾何学径	顕微鏡観察	0.001~	-	-
	物理的 等価径	拡散バッテリー	0.001~0.2	検出器による	拡散沈着
		電気移動度法 (DMA)	0.001~1	検出器による	荷電+移動度分離
		光散乱カウンタ (OPC)	0.05~100	0.001 個/cm <sup>3</sup>	光散乱パルス
		カスケードインパクト	0.03~30	分析法による	慣性衝突

#### 2-4-1 個数濃度測定

エアロゾル粒子の個数濃度とは、一定体積中に含まれる任意の粒径範囲の粒子個数を言うが、一般に 1m<sup>3</sup> 中または 1cm<sup>3</sup> 中の粒子個数の総数で表される。

ここでは、個数濃度測定法として一般に用いられる光散乱法、凝縮核計数法についてまとめる。

##### ①. 光散乱法

測定原理を図 2-3 に示す。計測機の流路を通過する粒子がレーザー光にあたりと散乱光を発生する。その粒子から出た散乱光の強度を測定し、電気信号 (パルス) として読み取ることで粒径を判断する。電気信号の強さは粒子体積・粒径に依存

し、大きい粒径をもつ粒子ほど強い散乱光が発せられる。また、粒子の個数は電気信号の数で判定される。

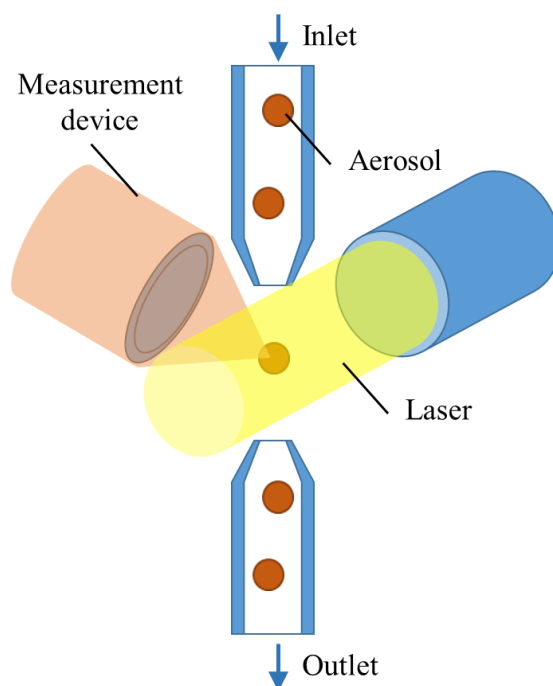


図 2-3 光散乱式粒子計数機測定原理



## ②. 凝縮核計数法

個数濃度測定方法のひとつとして、粒径  $0.01\mu\text{m}$  程度以上の粒子を対象とした凝縮核計数器（CNC：Condensation Nucleus Counter）による方法がある。本装置は、粒子を含むサンプル空気をアルコールや水等の蒸気によって飽和状態として、断熱膨張や急冷却、または低温と高温の飽和空気の混合によって過飽和霧囲気を生成し、サンプル空気が過飽和から飽和状態に移行する際に微粒子を凝縮核として凝縮成長を生じさせ、微粒子を粗大粒子化した後に、前述の光散乱法等によって計数する方法である。この方法によれば、容易に  $10\text{nm}$  程度の微粒子を検出することが可能であり、さらに装置の設計条件を検討することによって  $3\text{nm} \sim 5\text{nm}$  の超微粒子を検出することが可能となっている。基本的には最小可測径以上の粒子の総個数濃度を求めるもので、本装置単体で粒径の情報を得ることは困難である。粒径分布を求める場合には、粒子の静電気力や拡散現象を用いた分級装置を併用する必要がある。

## 2-4-2 質量濃度測定

大気中の粒子濃度と健康影響の関係については未だに解明されていない部分が多く、健康に影響をもたらす最も重要な要因が、質量濃度なのか粒子数なのか粒子表面積なのか等今後解明していかなければならない要素が多い。一方環境中の粒子濃度評価の指標としては現在質量濃度が各国で採用されている。以下に代表的な質量濃度測定法をまとめる。

### ①. 質量濃度の標準測定法（手分析）

質量濃度の標準測定法としては、いずれの国もフィルタを用いて試料空気を

一定流量で濾過捕集し、試料捕集前後の質量差を吸引空気量で除した値を、大気中粒子状物質質量濃度としている。

大気中粒子の全量を捕集する場合には、フィルタ捕集面をオープンフェースにしているが、SPM(粒径 10 $\mu\text{m}$  以上の粒子を 100%カットした浮遊粒子状物質)、PM10、PM2.5(粒子の空気動力学的 50%カットオフ径がそれぞれ 10 $\mu\text{m}$ 、2.5 $\mu\text{m}$  の粒子)等の測定をする場合は、捕集用フィルタの前段にインパクト方式(慣性衝突方式)やサイクロン方式等の分級装置を装着する。

捕集用フィルタ性能としては、大気中の酸性、塩基性ガス等の吸着が少なく、粒径 0.3 $\mu\text{m}$  粒子に対し 99.9%以上の捕集効率をもつものが一般的に用いられている。

また試料空気吸引量については、測定の目的により毎分 15~30L 程度の一定量で吸引するローボリュームエアサンプラー、毎分 500~1500L 程度の一定量で吸引するハイボリュームエアサンプラー等が一般的に用いられているが、個人曝露量測定のため毎分数百 ml 程度で吸引する携帯型のパーソナルサンプラーなども用いられている。これらのサンプラーの多くは、目的とする粒径の粒子を捕集するために、前段に分級装置を装着している場合が多く、定められた流量で試料空気を吸引することにより、一定の粒径以上の粒子がカットできる。

## ②. 粒径別測定(手分析)

アンダーセンエアサンプラーが最も多く使用されている。多孔式のジェットノズルを備え、多段式プレート上にエアロゾルを粒径別にインパクト方式で捕集する装置で、エアロゾル粒径別に秤量し、粒径分布を求める装置である。

### 2-4-3 粒径測定

代表的な粒径測定法についてまとめる。

#### ①. 電気移動度法

測定原理を図 2-4 に示す。粒子はチャージャー部へと輸送され、全粒子が正に荷電される。荷電された粒子はそれぞれの有す電気移動度に従って各エレクトロメーターで捕集され、検出される。粒径が小さいほど電気移動度は大きくなり、エレクトロメーター上部に捕集される。逆に、粒径が大きい粒子は下部で捕集される。

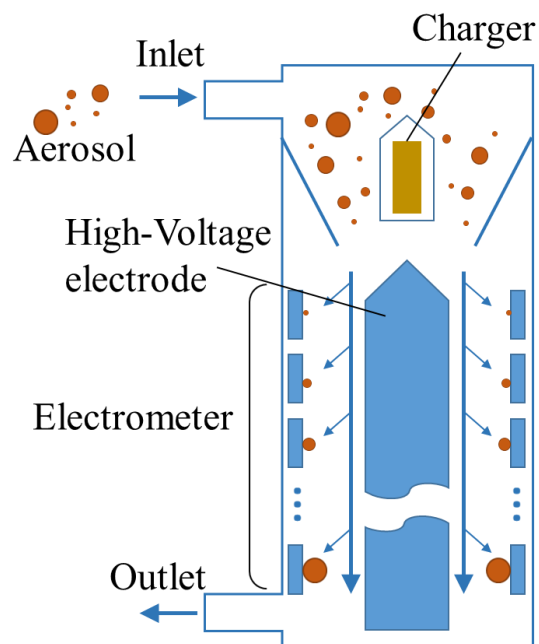


図 2-4 電気移動度式粒子計数機測定原理

## ②. 慣性衝突法

慣性衝突法によりエアロゾル粒子を粒径別に分級するステージを多段に組み込んで、分級ステージ単位で捕集された粒子の個数または質量を求めることにより、空気力学基準の粒径分布を測定することに用いられるものがカスケードインパクトである。

ELPI (Electrical Low Pressure Impactor) はロープレッシャータイプのカスケードインパクトとエレクトロメーターとを組み合わせたもので、エアロゾル粒子の質量基準の粒径別濃度を、リアルタイムに計測できる装置である。測定原理は、エアロゾル粒子にコロナ放電によって電荷を与えて、カスケードインパクトに導き、各ステージ上に慣性衝突により捕集する。そこに捕集された帯電粒子は、導電性のステージ上で直ちに放電するので、その電荷量がエレクトロメーターによって計測される。粒径別荷電量は、あらかじめ質量に対応するように較正されているので、流量とサンプリング時間とから粒径別濃度が求められる。

### 2-4-4 有機成分測定

エアロゾル中の有機化合物の解析には、ガスクロマトグラフ法 (gas chromatography ; GC) および GC/質量分析法 (mass spectrometry ; MS) が用いられる。ここでは、GC および GC/MS 法による有機溶媒で抽出可能な脂質成分と水溶性有機成分の分析法についてまとめる。

#### ①. 脂質成分の分析

炭化水素や脂肪酸など脂質は大気エアロゾル中に広く存在する。脂質成分を分離するには、塩化メチレンなどの有機溶媒抽出法を用いる。抽出物は濃縮後、

水酸化カリウムによる加水分解（ケン化）を行い、アルカリおよび酸性条件下でそれぞれ中性成分と酸性成分に分ける。

## ②. GC、GC/MS による測定

各画分は、GC カラムに導入し低分子のものから順にカラム内を移動させ分離する。試料の導入にはスプリット/スプリットレス試料注入口が広く使われるが、高沸点化合物にはオンカラム注入口が適する。分離カラムには熔融石英キャピラリーを用い、カラムオーブンは 50℃から 300℃まで昇温する。化合物の検出には水素炎イオン化検出器（FID）を使う。

## 2-5 オイルミストの捕集技術

オイルミストの捕集技術としては、主にフィルタ式、静電式、慣性式の3つが存在する。これらの捕集原理を利用したミストコレクタと呼ばれる捕集装置が市販されており、カタログ値として捕集効率が記載されている。ただし、ナノメートルサイズのオイルミストの捕集効率については記載されていない。ミストコレクタは通常、発生源（加工装置等）の排気に設置され、発生したオイルミストを捕集し、工場内もしくは屋外に排気する。以下に3つの捕集原理とその特徴についてまとめ、表2-3に市販されている代表的なミストコレクタを捕集原理別にまとめる。

さらに、機械装置からのオイルミストの漏れは、加工作業場でのオイルミストの潜在的な発生源である。製造コストを削減しながら生産歩留まりを改善するという厳しい要件があるため、通常、機械加工プロセスの完了後すぐに装置のドアを開いて製品の交換を行う。したがって、装置のドアから大量のオイルミストが排出される可能性がある。これら装置から漏洩したオイルミストを周囲に拡散させぬよう、加工装置を物理的に衝立等で囲い込んだり、加工装置上部に局所排気フードを設置したりするなどの対策が取られている。

### ①. フィルタ式

フィルタ式は最も一般的に普及している装置である。比較的安価ではあるが、定期的なフィルタの交換が必要で、詰まると極端に集塵効果が落ちるため、継続的な維持管理が欠かせない。

捕集原理は、装置内に複数のフィルタを多段に設置し、大径のオイルミストから順次小径のオイルミストを捕集する。最終的な捕集効率は最終段にある高性

能フィルタに依存する。前段フィルタの捕集効率が高ければ最終フィルタへの負荷を減らすことができ、メンテナンスサイクルの延長およびメンテナンスコストを低減することができる。

## ②. 静電式

静電式は捕集効率が非常に高く、粒径の小さいオイルミストまで捕集可能である。そのため、直接使用すると目詰まりの周期が早く、セルを痛めるため、維持管理費が高くなる。プレフィルタ式と組み合わせ、最後の仕上げの位置づけとして使用することが望ましい。また、フィルタ式に比べ通風抵抗が少なく省エネであり、廃棄物が少ないためリサイクル性に優れている。電氣的にミストを帯電させるため、引火点が70°C以下のミストには使用できないという欠点がある。

捕集原理は、装置内部の放電部でオイルミストを帯電させ、集塵部で静電気の斥力により捕集する。図 2-1 に捕集原理を示す。

静電式ミストコレクタにおける捕集性能は、放電部での放電量、集塵極間の電界強度、極板間の滞留時間に関係する。また、捕集対象となるオイルミストの電気抵抗度が高すぎると粒子は帯電しにくくなり、低すぎると帯電してもすぐに放電してしまい、集塵部で十分な斥力を与えることができず捕集できない。粒子径が小さくなると粒子あたりの表面積が小さくなり帯電しにくくなり、大き過ぎると粒子質量に対する表面積の割合が小さくなるので集塵極への移動速度が遅くなり捕集できない。

静電式ミストコレクタの捕集性能比較をする場合、放電量（放電部での電流値）と集塵極間の電界強さおよび通過風速を比較すると良い。

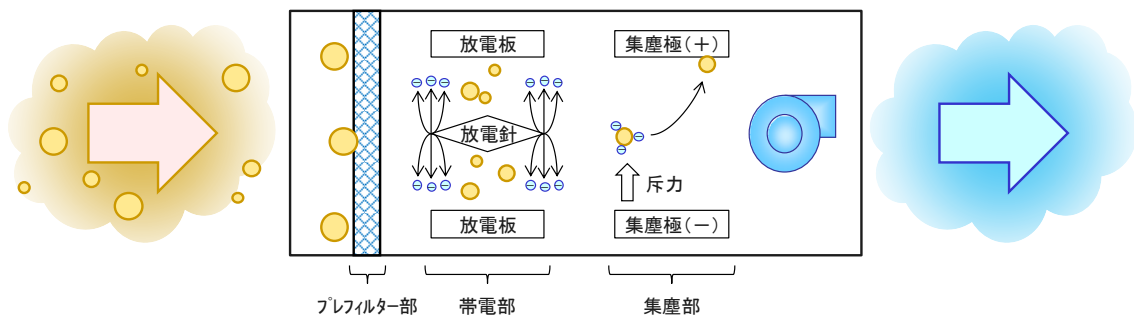


図 2-1 静電式ミストコレクタの捕集原理

### ③. 慣性式

慣性式はフィルタレスミストコレクタであり、廃棄物が少なく、環境に優しい手法である。例として、バッフル板への衝突、回転物への衝突、遠心力による捕集が挙げられる。図 2-2 に捕集原理を示す。慣性力は、速度が速いほど大きく働くため、大きな動力を必要とする。一般的には大粒径のオイルミストの捕集に用いられ、小粒径のオイルミストの捕集は不得手である。

また、大抵の場合は捕集のユニットが金属製であるため、フィルタ（不織布）に比べ固形物（切粉や大気塵）の保持量が少ないので、再飛散に注意が必要である。

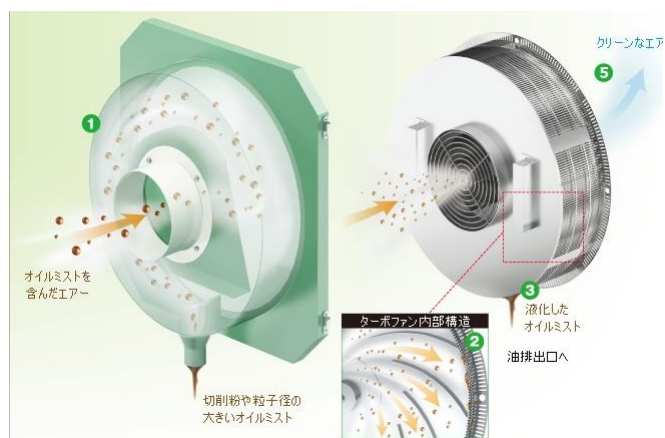



図 2-2 慣性式ミストコレクタの捕集原理（オーム電機(株)HP より）



表 2-3 市販ミストコレクタ

捕集原理	メーカー	外観	捕集効率 (カタログ値)	処理風量 (50Hz)
フィルタ式	ホーコス		95% (0.3~0.5 $\mu$ m 以上)	15m <sup>3</sup> /min
	アマノ		99.7%以上 (2 $\mu$ m 以上)	10.5m <sup>3</sup> /min
静電式	ミドリ安全		99.5%	15m <sup>3</sup> /min
	アマノ		99%	15m <sup>3</sup> /min
慣性式	ミドリ安全		99.9%	13m <sup>3</sup> /min
	アマノ		99.9% (2 $\mu$ m 粒子)	13m <sup>3</sup> /min

## 第3章 オイルミストの発生

### 3-1 はじめに

前述したようなオイルミストの弊害を防ぐためには、実際の製造工程で発生するオイルミストの特性（個数濃度、粒径分布、タイミング等）を把握する必要がある。発生しているオイルミストの特性を把握することが出来れば、有効な対策方法の提案が可能となる。本章では、実際の金属加工工場の加工装置から発生するオイルミストの特性についてまとめた。

### 3-2 発生メカニズム

オイルミストの発生メカニズムは、以下の2種類に分類される。

①Droplet emission：切削油が物理的に飛散し、オイルミストが発生する過程

②Vapor condensation：切削油が被加工物と刃との摩擦熱により蒸発し、空气中で冷却され凝縮し、オイルミストが発生する過程

図 3-1 に代表的な加工である旋盤加工を例とし、オイルミスト発生メカニズムの概要図を示す。ここで旋盤加工とは、被切削物を回転させ、刃物を送り切削を行う加工である。2種類の発生メカニズムのうち、Droplet emission で発生するオイルミストは比較的粒径が大きく（マイクロオーダー）、Vapor condensation で発生するオイルミストは比較的粒径が小さい（ナノオーダー）ことが特徴である。

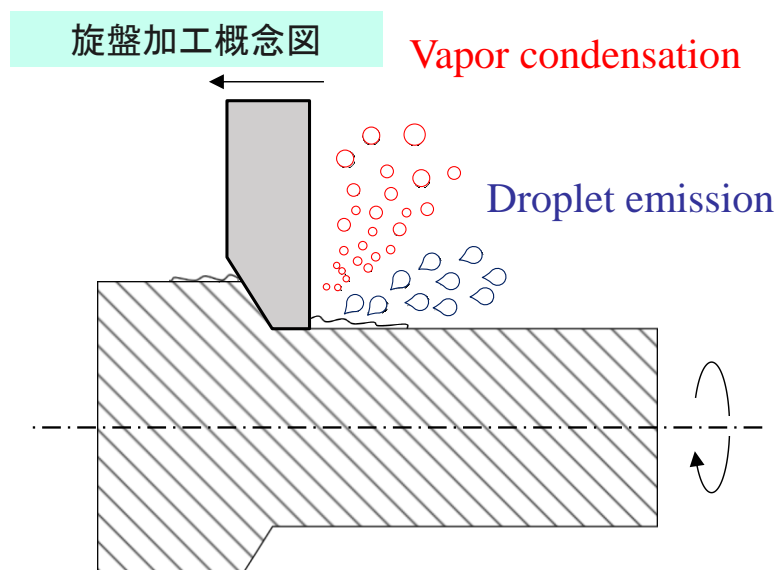


図 3-1 オイルミスト発生メカニズム

### 3-3 金属加工工場の加工装置から発生するオイルミストの測定

#### 3-3-1 測定概要

実際の金属加工工場の加工装置から発生するオイルミストの個数濃度を測定した。図 3-2 に測定概要を示す。加工装置には装置内で発生したオイルミストを排気するための排気ダクトと製造物を作業員が出し入れするための自動扉が存在する。個数濃度測定箇所は排気ダクト内 1 点、自動扉前 1 点とした。測定機は測定粒径範囲の異なる電気移動度式粒子計数機（Engine Exhaust Particle Sizer ; EEPS）と光散乱式粒子計数機（Optical Particle Counter ; OPC）を用いた（表 3-1）。EEPS を 1 台、OPC を 2 台使用し、排気ダクト内の個数濃度を EEPS と OPC で測定し、前面扉前の個数濃度を OPC で同時に 5 分間測定した。

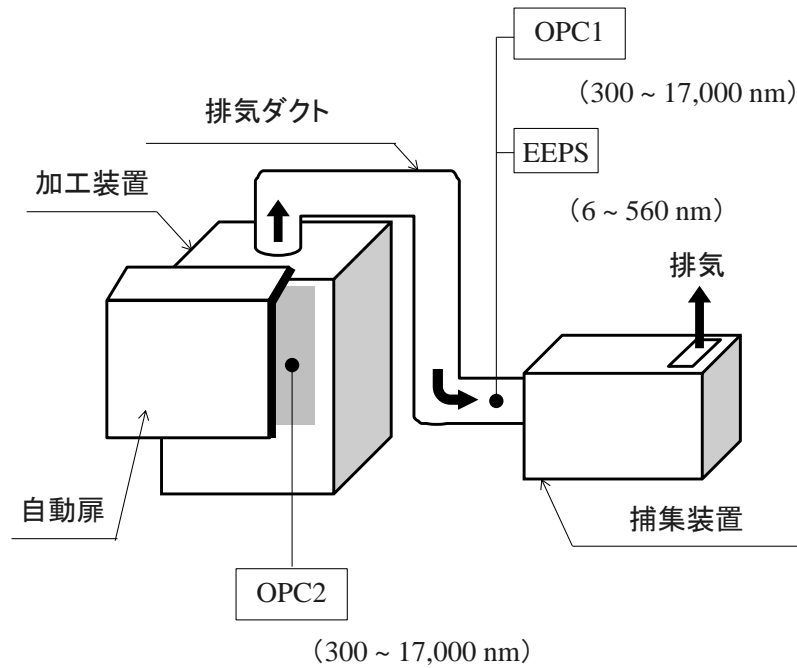




図 3-2 測定概要

表 3-1 測定機器

名称	電気移動度式粒子計数機 (EEPS)	光散乱式粒子計数機 (OPC)
外観		
製造	TSI	PALAS
測定原理	電気移動度式	光散乱式
測定粒径範囲	5.6~560nm	200~40,000nm
サンプリング流量	10L/min	5L/min

### 3-3-2 測定対象加工装置

測定対象加工装置は、実際の金属加工工場で使用されている旋盤加工、ギヤ歯切加工、ギヤ歯研削加工の代表的な 3 種類の加工装置とした。以下に各加工についてまとめ、表 3-2 に概要を示す。

#### ①. 旋盤加工

旋盤加工は円筒状の被切削物を回転させ、主軸に固定されたバイトと呼ばれる刃物を当てて切削する加工である。概要図を図 3-3 に示す。バイトは刃物台に締め付け用ボルトを用いて固定され、被切削物はチャック (chuck) と呼ばれる旋盤器具の回転部に取り付けられる。加工は基本的にバイトが一直線に移動することで、被切削物が削られていく。この時、被切削物とバイトの接触部にてそれぞれの力が干渉するため、摩擦が生じる。そのため摩擦を低減するように、被切削物の材質や切削面積、加工速度等に注意を払う必要がある。旋盤における加工では主に、回転数や切削深さ、バイトの送り速度などを設定する。これらの様々な条件を考慮して適切な条件を検討し、品質や生産効率の向上、バイトの耐久性を考える必要がある。しかしながら加工に伴い生じる摩擦熱の影響は避けられないため、被切削物、バイトの温度がともに上昇し、加工精度やバイトの耐久性の低下を引き起こす。そこで、加工部の冷却、潤滑などの目的で多量の切削油を用いながら加工が行われることが多い。今回対象とした工場では水溶性切削油が用いられていた。装置容積  $1.0\text{m}^3$ 、排気風量  $3.0\text{m}^3/\text{min}$  であった。

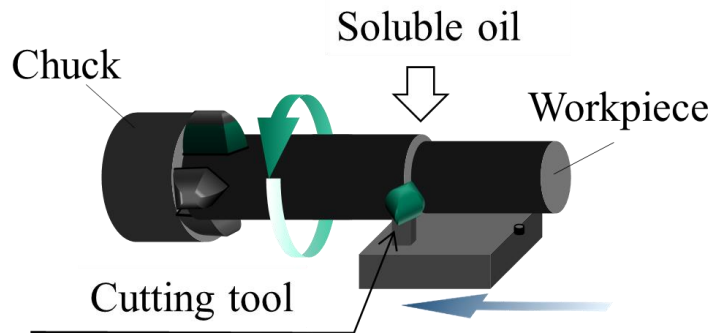


図 3-3 旋盤加工概要

## ②. ギヤ歯切加工

ギヤ歯切加工は主に歯車を作る一連の加工の 1 つである。ホブと呼ばれる刃物と円盤型の被切削物をそれぞれ回転させ、その 2 つの回転物を複雑に接触させることで被切削物を削り、歯車の歯を切る (図 3-4)。ホブには様々な種類があり目的とする歯車の種類によって使用するホブの形状を変える。歯車の種類には、一般的な垂直の歯やらせん状の歯、傘型の歯などがある (図 3-5)。旋盤加工と同様に、ギヤ歯切加工においても加工部に摩擦熱が生じることが予想されるが、対象の工場では切削油を用いないドライ加工が採用されている。ドライ加工は切削油を用いないため環境負荷が小さく、生産性も高くなるため近年注目されている加工方法である。ドライ加工を実現するためには切削工具の耐摩擦性、耐久性を向上させる必要があるため、工具表面には硬質の膜がコーティングされている。装置容積  $1.2\text{m}^3$ 、排気風量  $17.4\text{m}^3/\text{min}$  であった。

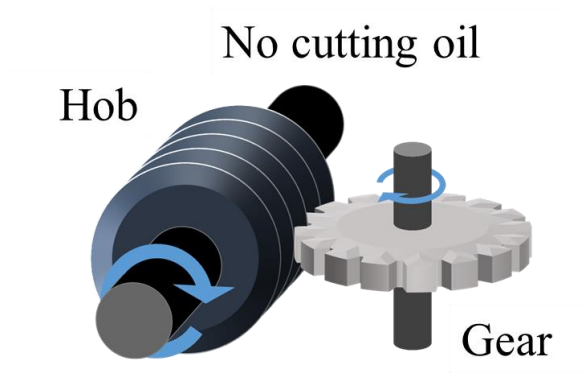


図 3-4 ギヤ歯切加工概要

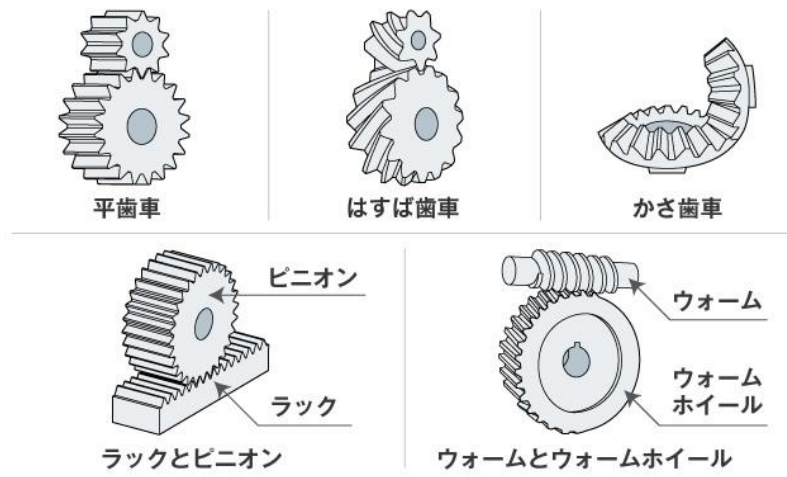


図 3-5 ホブの種類

### ③. ギヤ歯研削加工

ギヤ歯研削加工は歯の精度を決定する、歯車加工の最重要工程とされている。加工方法はらせん状の砥石と歯車をそれぞれ回転させ、歯切加工のように複雑に接触させることで表面を磨く（図 3-6）。この工程により、歯車の粗面粗さや寸法精度が向上し、高速作動下においても静寂な運転が可能となる。他の加工と同様に、ギヤ歯研削加工においても摩擦熱により加工部温度が高くなるため、対策が必要である。今回対象とした工場では不水溶性切削油が用いられている。装置容積 3.4m<sup>3</sup>、排気風量 18.4m<sup>3</sup>/min であった。

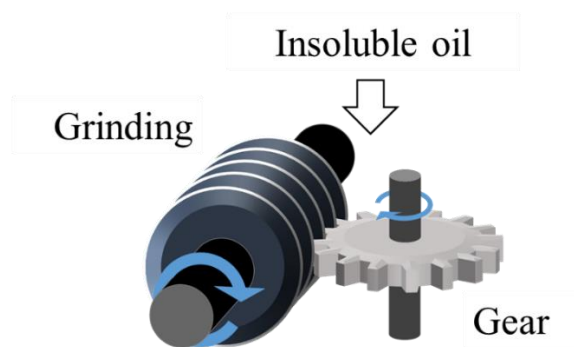
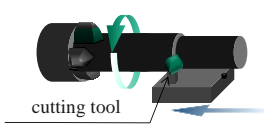
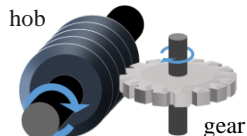
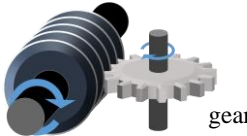


図 3-6 ギヤ歯研削加工概要

表 3-2 測定対象加工装置

	旋盤加工	ギヤ歯切加工	ギヤ歯研削加工
加工イメージ			
概要	被切削物を回転させ、刃物を送り切削	被切削物と刃物をそれぞれ回転させ切削	螺旋状の砥石を高速で回転させ、ギヤ歯を研削
使用切削油	水溶性油	なし（ドライ加工）	不水溶性油
装置容積[m <sup>3</sup> ]	1.0	1.2	3.4
排気風量[m <sup>3</sup> /min]	3.0	17.4	18.4



### 3-3-3 旋盤加工における排気・扉前の個数濃度測定結果

図 3-3 に旋盤加工から発生するオイルミスト個数濃度経時変化を OPC の測定値、EEPS の測定値、加工プロセスの経時変化、特定の粒径の個数濃度変化と併せて示す。図 (a) および (b) は、OPC による 300~17,000nm と EEPS による 5.6~560nm の 2 つの測定機によって測定された粒子直径 (y 軸) および時間 (x 軸) に対する個数濃度のコンター図である。図 (a) に見られるように、機械加工プロセスが開始され装置内換気が稼働した時、300~1,000nm の粒径範囲の個数濃度の増加が確認された。個数濃度の周期的な増加は EEPS によってより明確に観察された (図 (b))。これらの結果から、旋盤加工により高濃度 ( $>10^7$  個/cm<sup>3</sup>) のナノメートルサイズのオイルミストが発生していることが確認された。サイズ範囲を考慮すると、これらのオイルミストは気化した切削油の核生成によって発生している可能性がある。

図 (d) は、特定の粒径範囲のオイルミスト個数濃度の変化を示している。実線は 5.6~17,000nm までの全粒径範囲の総個数濃度を表し、濃度の周期的変動は換気のタイミングと同期している。ナノ粒子 (<100nm) の個数濃度は、全粒径範囲の個数濃度とほぼ同一であり、これはナノ粒子が個数濃度において支配的であることを示している。微粒子 (>300nm) の個数濃度もまた機械加工プロセスサイクルと同期しているが、それらの濃度は全個数濃度およびナノ粒子個数濃度より 2 桁小さい。また、紫色の線で示している装置前面の個数濃度の変化より、装置前面では扉開放時に個数濃度が上昇し、オイルミストが作業従事者側に流出していることが確認された。図 3-4 に測定点ごとのオイルミスト個数濃度測定結果を示す。

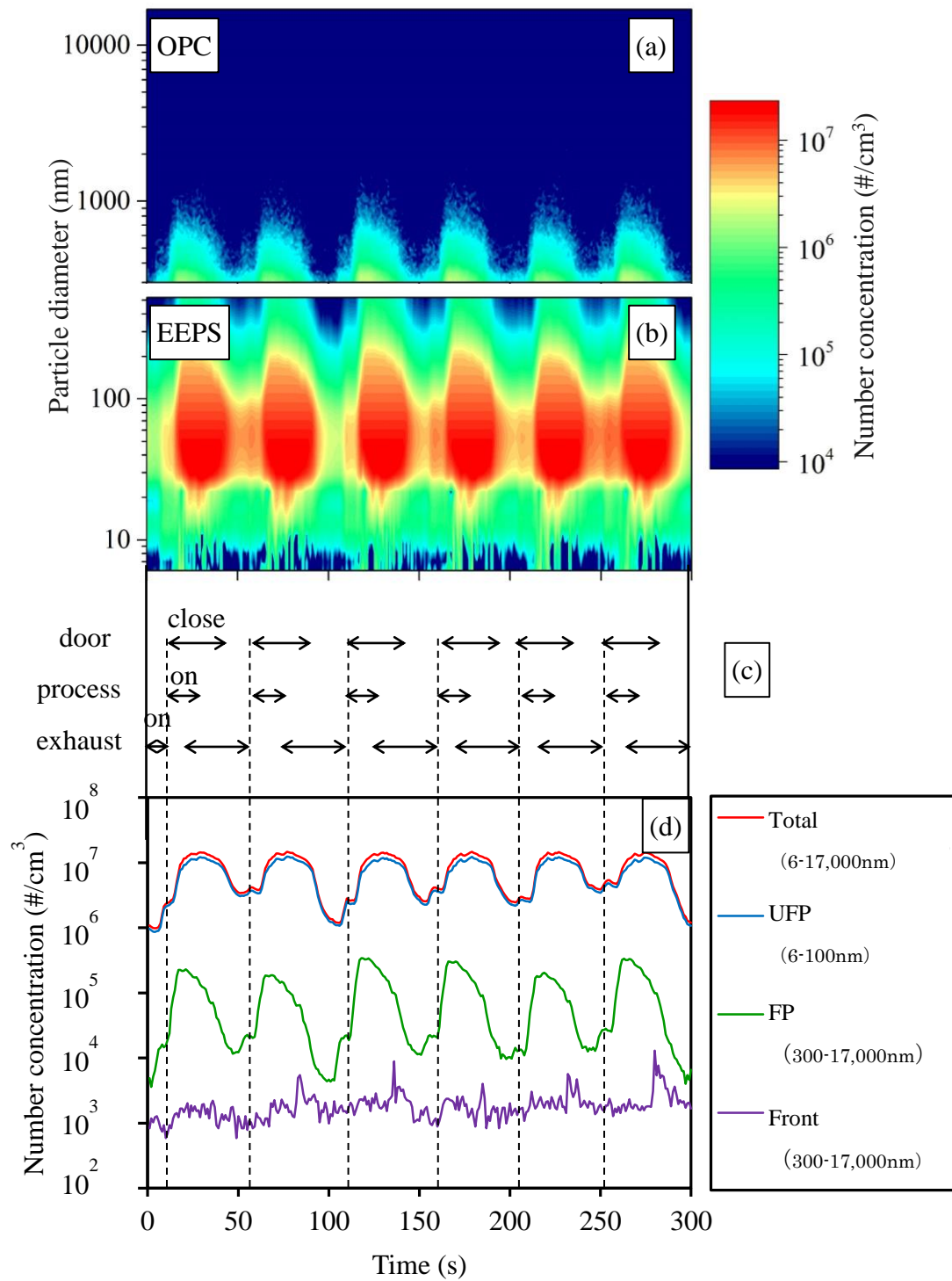


図 3-3 旋盤加工における排気・扉前の個数濃度測定結果

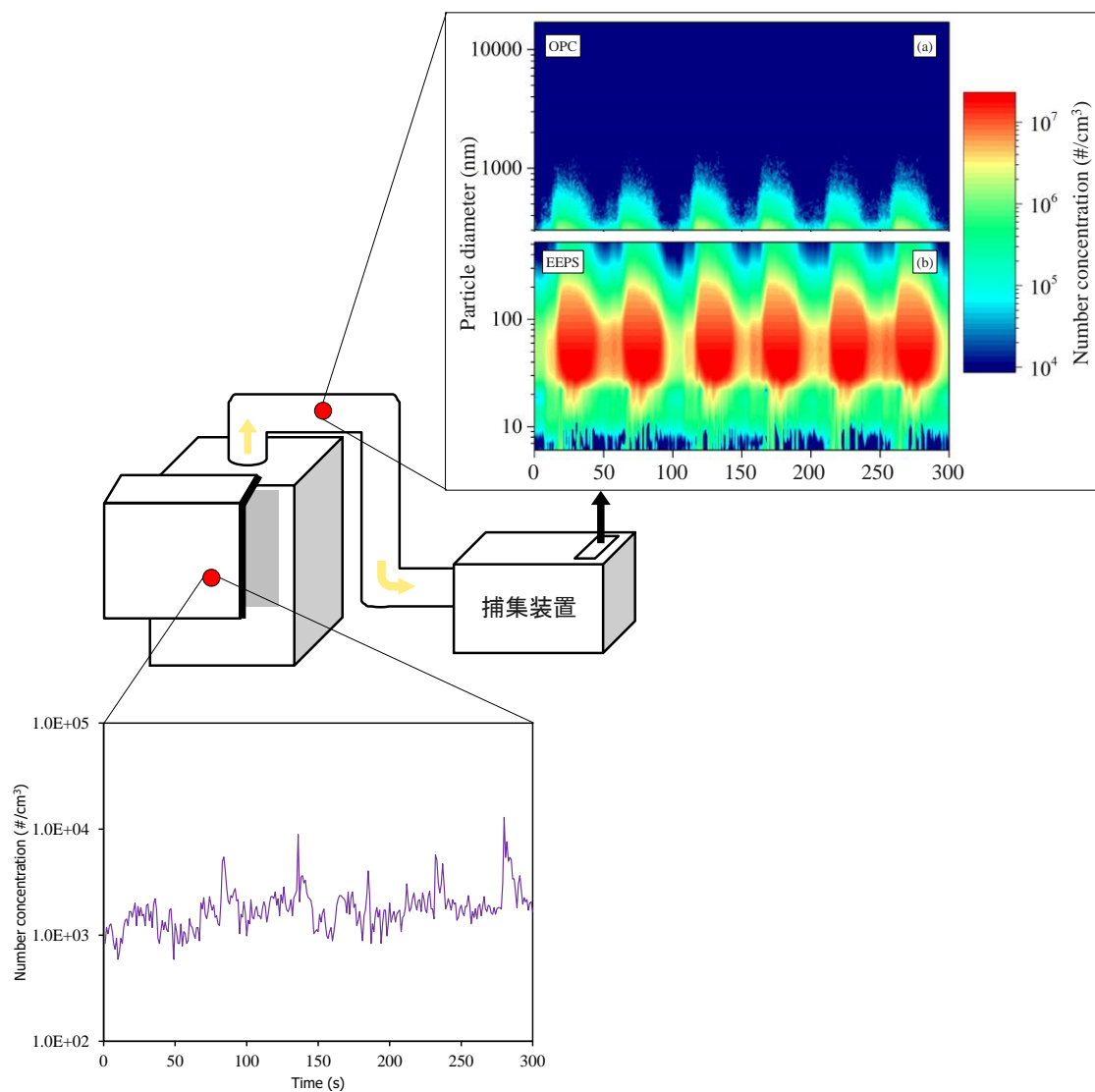


図 3-4 測定点ごとのオイルミスト個数濃度測定結果（旋盤加工）

### 3-3-4 ギヤ歯切加工における排気・扉前の個数濃度測定結果

図 3-5 にギヤ歯切加工の測定結果を示す。本加工は切削油を使用しないドライ加工であるが、オイルミストが発生していた。このことは、加工点の表面温度は金属の蒸発温度よりも低いことから、前工程で付着した残渣油の影響であると考えられる。実際に金属表面には、表面の溶解や熱による損傷は見られなかった。さらに、オイルミスト粒子の平均移動度直径は、加工開始直後は約 30~40 nm であり、時間経過とともに増大していた (図 (b))。この粒径の変化は、加工点にオイルが供給されていないため、切削中に被切削物の表面温度が増加したことが原因であると考えられる。加工開始 10~20 秒後、前工程の旋盤加工で残ったオイルが蒸発し、空気中でそれらの超微粒子 (UFP) が凝縮結合することでオイルミストのサイズが大きくなった。この傾向は、特定の粒径範囲の個数濃度でも観察された (図 (d))。UFP の個数濃度は、トータルの個数濃度とほぼ同じであった。UFP の個数濃度は、プロセスの開始後 10 秒以内に急速に増加し、その後、処理中の時間とともにほぼ一定またはわずかに減少しました。ただし、微粒子 (FP) の個数濃度はプロセス中に徐々に増加した。UFP と FP の間で最大数の濃度に到達するまでのタイムラグが存在した。このことから、プロセス中の粒子径の増大が示唆されている。

加工装置前面での個数濃度は、装置のドアが開いたときに約 8,000 個/cm<sup>3</sup> に増加した。この濃度は旋盤加工の濃度よりも高い値であった。図 3-6 に測定点ごとのオイルミスト個数濃度測定結果を示す。

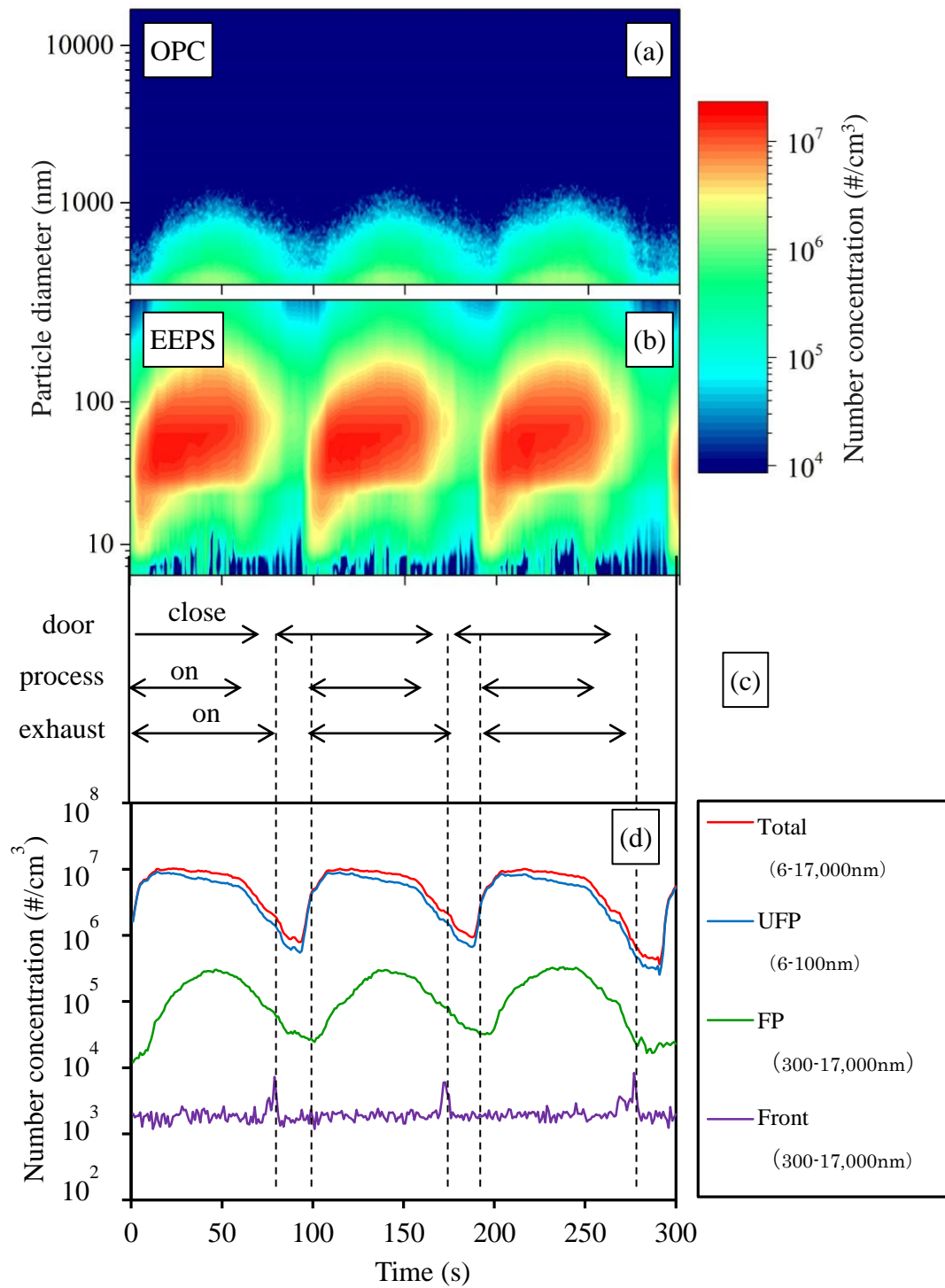


図 3-5 ギヤ歯切加工における排気・扉前の個数濃度測定結果

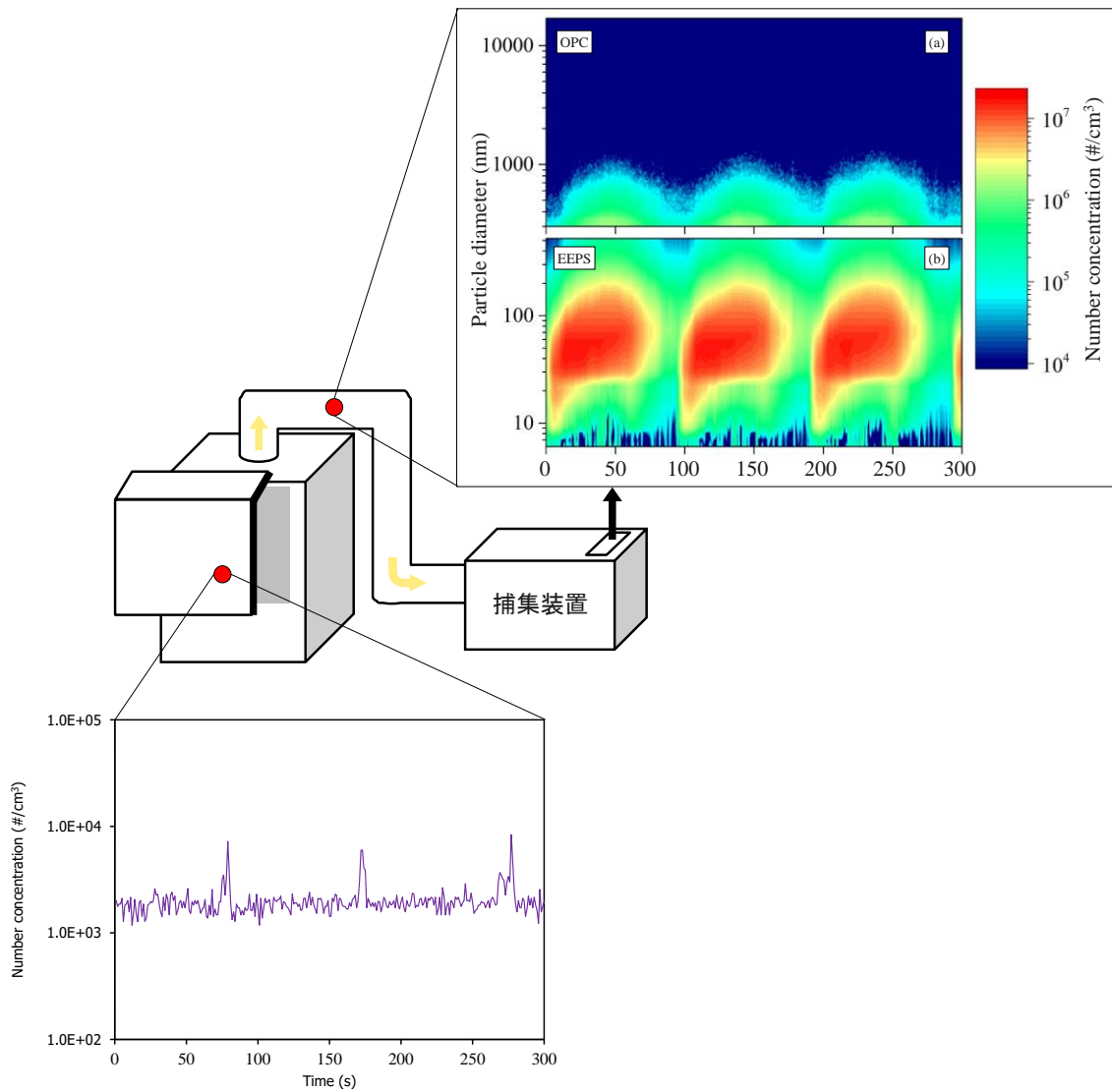


図 3-6 測定点ごとのオイルミスト個数濃度測定結果（歯切加工）

### 3-3-5 ギヤ歯研削加工における排気・扉前の個数濃度測定結果

図 3-7 にギヤ歯研削加工の測定結果を示す。本加工では常に加工装置から排気を行っているため、オイルミスト発生のタイミングは加工タイミングと同期している。図 (a) より旋盤加工と比較し、300~1,000nm の範囲の比較的大きな粒子が計数されていることが分かる。これは歯研削加工では水溶性油より粘度の高い不水溶性油を使用しているため、**Droplet emission** により粒径の大きな粒子が発生したと考えられる。また、他の加工と同様に、総粒子数に占めるナノ粒子の割合は大きく、ナノ粒子が支配的であることが分かる (図 (d))。装置前面では扉開放時に個数濃度が上昇しており、オイルミストが作業従事者側に流出していることが確認された。図 3-8 に測定点ごとのオイルミスト個数濃度測定結果を示す。

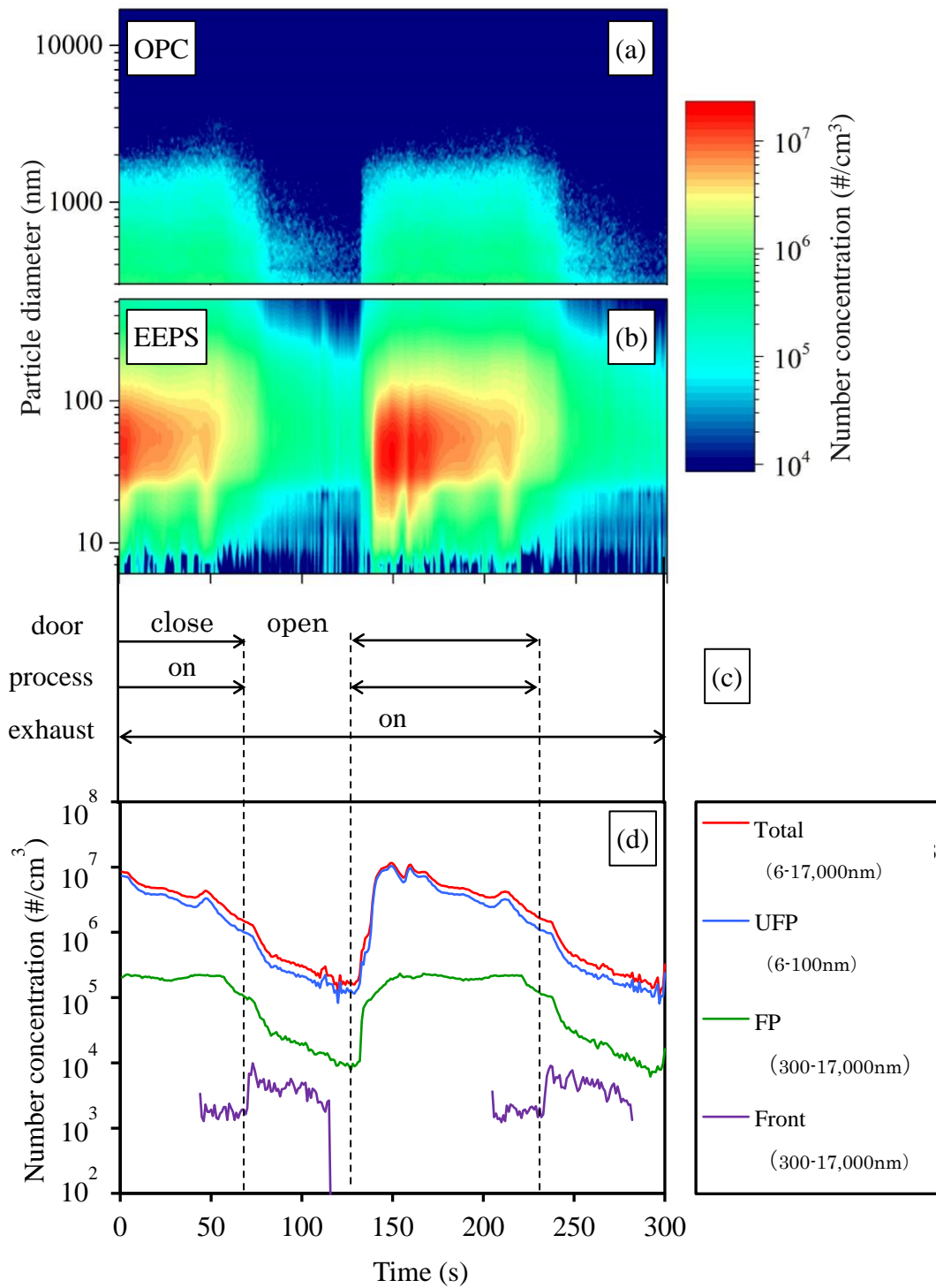


図 3-7 ギヤ歯研削加工における排気・扉前の個数濃度測定結果



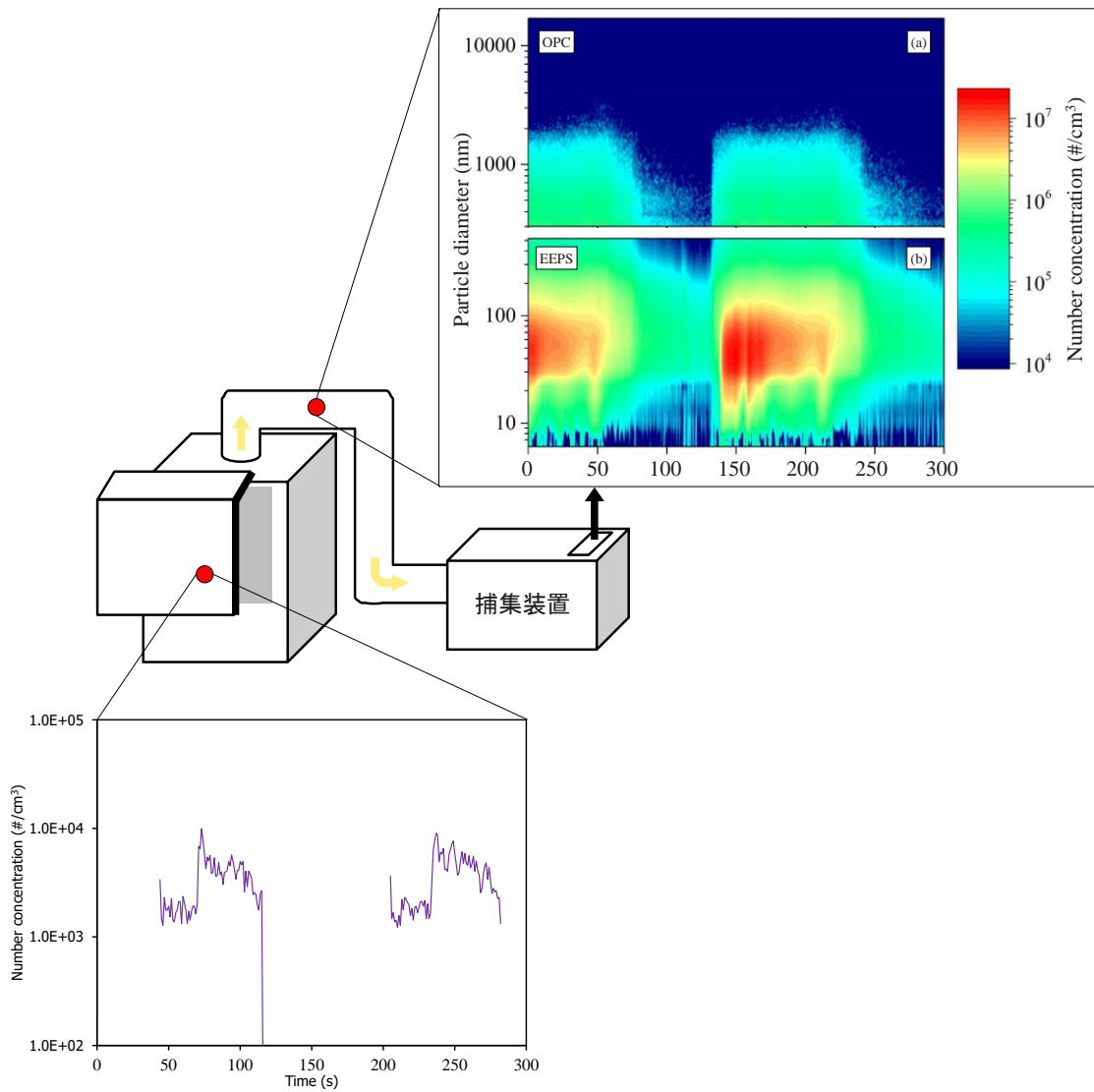


図 3-8 測定点ごとのオイルミスト個数濃度測定結果（歯研加工）

### 3-4 まとめ

表 3-3 に測定結果の比較をまとめる。どの加工においても総粒子(6~17,000nm)の大部分をナノ粒子(6~100nm)が占めていた。ナノ粒子の最大個数濃度は  $10^7$  個/cm<sup>3</sup>、微粒子の最大個数濃度はナノ粒子より 2 桁小さい  $10^5$  個/cm<sup>3</sup> であった。

表 3-3 測定結果比較

	旋盤加工	ギヤ歯切加工	ギヤ歯研加工
切削油	水溶性油	なし	不水溶性油
装置容積[m <sup>3</sup> ]	1.0	1.2	3.4
排気風量[m <sup>3</sup> /min]	3.0	17.4	18.4
換気回数[回/min]	3.0	14.5	5.4
最大個数濃度[個/cm <sup>3</sup> ] (6~17,000nm)	$1.5 \times 10^7$	$1.0 \times 10^7$	$1.2 \times 10^7$
最大個数濃度[個/cm <sup>3</sup> ] (6~100nm)	$1.2 \times 10^7$	$0.9 \times 10^7$	$1.0 \times 10^7$
最大個数濃度[個/cm <sup>3</sup> ] (300~17,000nm)	$3.4 \times 10^5$	$3.3 \times 10^5$	$2.3 \times 10^5$

## 第4章 加工装置から発生するオイルミストのボックスモデルによる解析

### 4-1 はじめに

前章で述べたように、すべての加工装置の前面で高濃度 ( $>10^3$  個/cm<sup>3</sup>) のオイルミストが観察された。オイルミストの漏れが作業空間の空気の質に及ぼす影響を調査するために、UFP と FP の個数濃度の変動を簡略化されたボックスモデルを用いて計算した。

### 4-2 ボックスモデル概要

図 4-1 にモデル概念図を示す。加工装置 ( $N_{in}$ ) 内のオイルミストの個数濃度の時間 ( $t$ ) に対する変化は、(1)式により計算される。

$$\frac{\partial N_{in}}{\partial t} = G - R - L \quad (1)$$

ここで、

$G$  : 発生量[個/cm<sup>3</sup>/s]

$R$  : 置換量[個/cm<sup>3</sup>/s]

$L$  : 前面扉からの漏洩量[個/cm<sup>3</sup>/s]

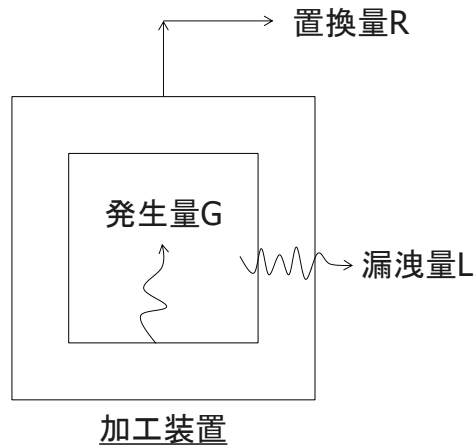


図 4-1 ボックスモデル概念図

発生量  $G$  は計算結果と測定結果の個数濃度のフィッティングにより推定し、置換量  $R$  と前面扉からの漏洩量  $L$  は以下の式で計算した。

$$R = \frac{\{N_{in} - N_{bg}\}}{V} Q \quad (2)$$

$$L = \frac{AD\{N_{in} - N_{front}\}}{VX} OC \quad (3)$$

ここで、

$N_{bg}$  : バックグラウンド濃度[個/cm<sup>3</sup>]

$Q$  : 排気量[cm<sup>3</sup>/s]

$N_{front}$  : 加工装置前面の個数濃度[個/cm<sup>3</sup>]

$V$  : 加工装置内体積[cm<sup>3</sup>]

$A$  : 加工装置扉面積[cm<sup>2</sup>]

$D$  : 粒子の拡散係数[cm<sup>2</sup>/s]

$X$  : 装置中心から前面扉までの距離[cm]

$OC$  : 扉開=1、扉閉=0

#### 4-3 加工装置内個数濃度の計算値と実測値の比較による発生量の推定

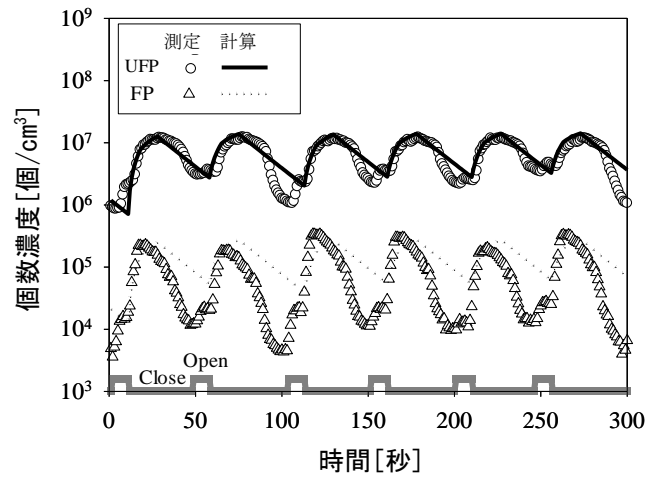
計算条件を表 4-1 に示す。3 種類の加工装置内（排気ダクト内）の測定結果と計算結果の比較を超微粒子（UFP）と微粒子（FP）に分けて図 4-2 に示す。旋盤加工では超微粒子、微粒子ともに濃度増減の傾向が再現され、超微粒子の発生量は  $1.0 \times 10^6$  個/cm<sup>3</sup>/s、微粒子の発生量は  $2.0 \times 10^4$  個/cm<sup>3</sup>/s と推定された。濃度の低減は排気の影響であるが、微粒子の個数濃度は計算結果が測定結果を下回った。これは、本モデルでは加工装置内での慣性衝突等による粒子の捕集を考慮していない影響であると考えられる。

歯切加工では超微粒子の発生量は  $2.0 \times 10^6$  個/cm<sup>3</sup>/s、微粒子の発生量は  $6.0 \times 10^4$  個/cm<sup>3</sup>/s と推定された。微粒子の個数濃度の立ち上がり速度が計算結果の方が速くなった。このことは、計算では加工装置内全体で一様にオイルミストが発生しているとしているが、実際には加工装置内で発生の変りが起きている影響であると考えられる。

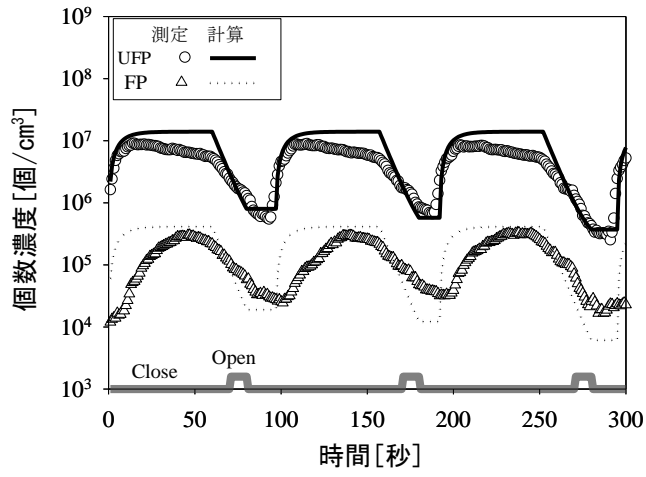
歯研加工では超微粒子の発生量は  $1.0 \times 10^6$  個/cm<sup>3</sup>/s、微粒子の発生量は  $2.0 \times 10^4$  個/cm<sup>3</sup>/s と推定された。微粒子の濃度低減部分については計算結果と測定結果で概ね一致したが、超微粒子の濃度低減部分については差が見られた。これは、超微粒子の凝縮成長による粗大化が原因として考えられる。

表 4-1 計算条件

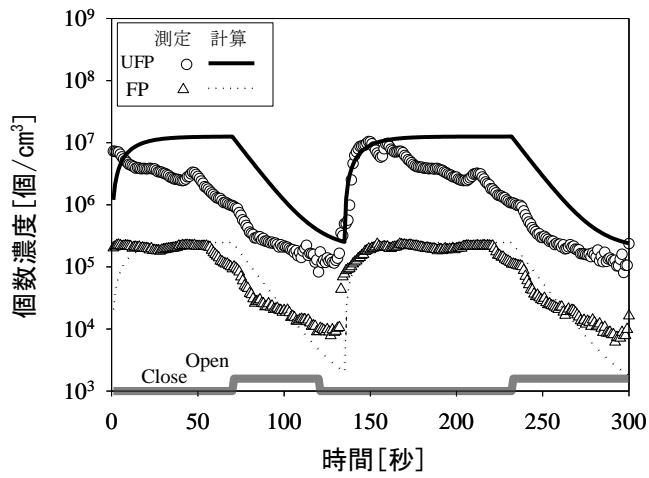
	旋盤	齒切	齒研
$V[\text{m}^3]$	1.0	2.0	3.8
$A[\text{m}^2]$	0.40	1.86	1.23
$Q[\text{m}^3/\text{s}]$	0.05	0.29	0.31
$X[\text{m}]$	0.20	0.20	0.20
$D_{\text{NP}}[\text{m}^2/\text{s}]\text{@D}0.01\mu\text{m}$	$5.5 \times 10^{-8}$	$5.5 \times 10^{-8}$	$5.5 \times 10^{-8}$
$D_{\text{FP}}[\text{m}^2/\text{s}]\text{@D}0.3\mu\text{m}$	$4.1 \times 10^{-13}$	$4.1 \times 10^{-13}$	$4.1 \times 10^{-13}$
$N_{\text{bg\_NP}}[\#/\text{cm}^3]$	$2.0 \times 10^5$	$2.0 \times 10^5$	$2.0 \times 10^5$
$N_{\text{bg\_FP}}[\#/\text{cm}^3]$	$1.0 \times 10^3$	$1.0 \times 10^3$	$1.0 \times 10^3$
$G_{\text{NP}}[\#/\text{cm}^3/\text{s}]$	$1.0 \times 10^6$	$2.0 \times 10^6$	$1.0 \times 10^6$
$G_{\text{FP}}[\#/\text{cm}^3/\text{s}]$	$2.0 \times 10^4$	$6.0 \times 10^4$	$2.0 \times 10^4$



(a) 旋盤加工



(b) 歯切加工



(c) 歯研加工

図 4-2 測定結果と計算結果の比較

#### 4-4 加工装置前面扉からの漏洩量の推定

超微粒子 (UFP) と微粒子 (FP) の加工装置前面扉からの漏洩を調べるため、(3)式により漏洩量を計算した。初期の加工装置前個数濃度は  $0 \text{ 個/cm}^3$  とした。図 4-3 に 3 種類の加工装置の加工開始 1 時間後における扉からの漏洩量を超微粒子と微粒子に分けて示す。前面濃度は超微粒子でも最大  $300 \text{ 個/cm}^3$  程度であり、拡散漏洩については適切に現状の排気システムで排気できていることが分かる。しかしながら、実際の測定結果では微粒子で  $6,000 \text{ 個/cm}^3$  程度の漏洩が確認されている (図 4-4)。加工装置前面の濃度が高くなる原因としては、拡散漏洩以外では加工物を作業員が取り出す際に同伴して流出した粒子や加工装置に設置されている捕集装置 (ミストコレクタ等) の排気の影響が考えられる (図 4-5)。今後の作業環境の改善の為には、加工装置からの排気だけではなく、作業員との同伴粒子を防ぐためのエアカーテンや高捕集効率の捕集装置に関する技術が必要である。

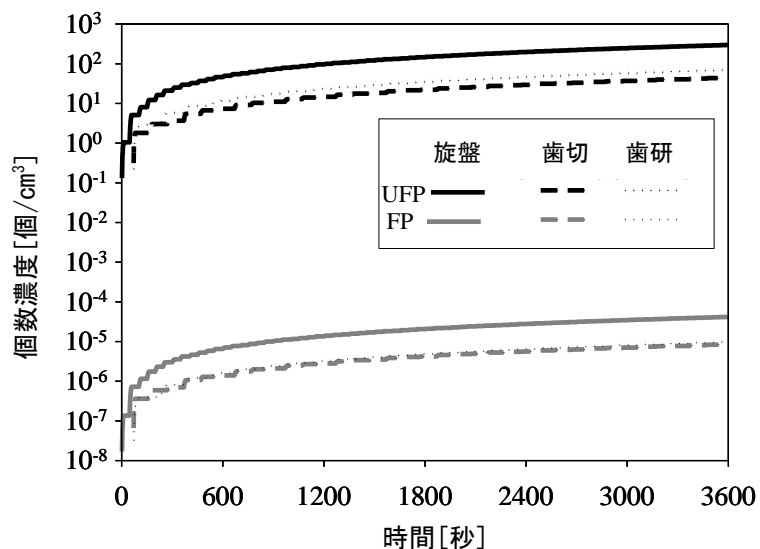


図 4-3 前面扉からの漏洩量の推定



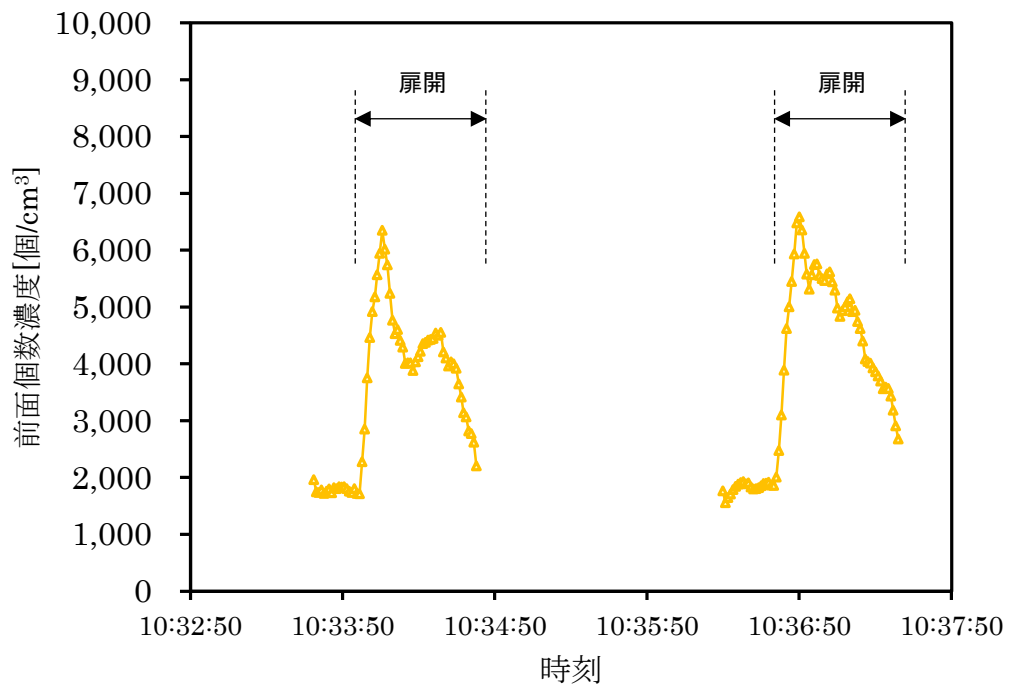


図 4-4 前面扉からの漏洩量（歯研磨加工実測値）

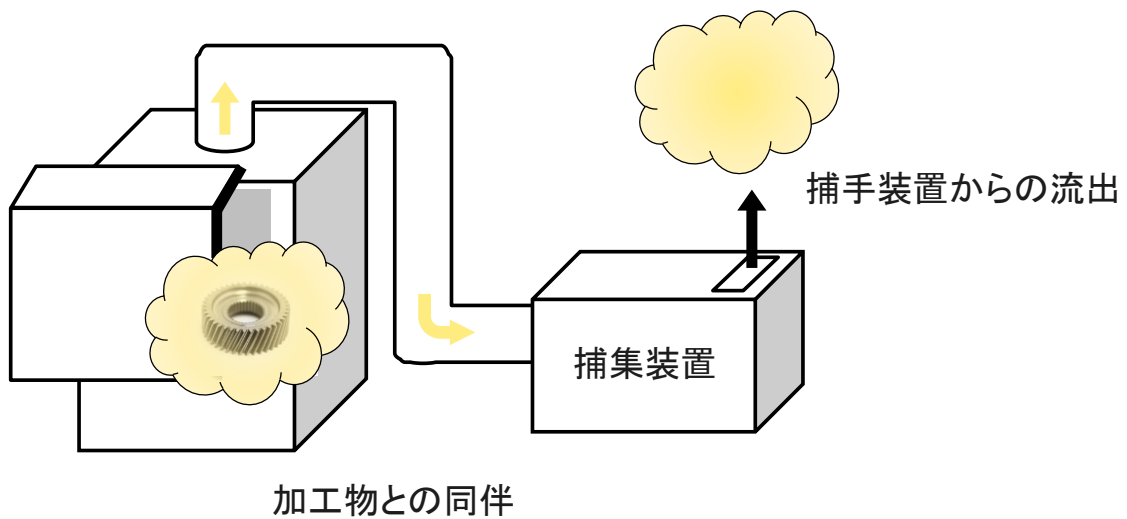


図 4-5 オイルミスト流出のイメージ

## 第5章 ミストコレクタの捕集性能確認

### 5-1 はじめに

発生したオイルミストに対しては、ミストコレクタにより捕集することが対策として挙げられる。ミストコレクタには種々の捕集原理があり、加工装置からの発生状況に合わせた適切なミストコレクタを選定することが重要である。ここでは、捕集原理の異なるミストコレクタについて、実験的に粒径別捕集効率を確認した結果をまとめる。

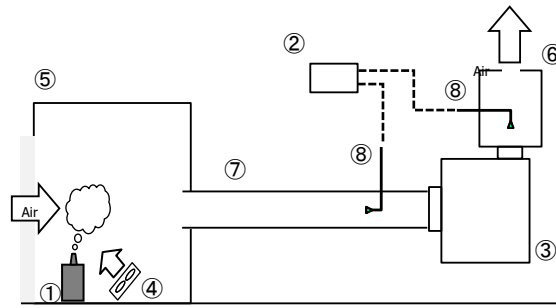
### 5-2 試験条件

対象としたミストコレクタは、表 5-1 にまとめる。遠心分離式は、コレクタ内で遠心力によりオイルミストを空気中から分離し捕集する。慣性衝突式は、オイルミストを衝突板やコレクタ内壁に慣性力によって衝突させることにより捕集する。静電式は、オイルミストをアイオナイザで荷電し、集じん部で高電圧をかけることで集じんプレートに捕集する。

図 5-1 に試験装置概要、表 5-2 に試験機器を示す。切削油は水溶性油と不水溶性油を使用し、入口、出口の質量濃度を交互に 1 分間 3 回ずつ測定し、その平均値を用いて捕集効率を算出した。

表 5-1 試験対象ミストコレクタ

番号	製造	名称	外観	捕集原理	風量 [m <sup>3</sup> /min]
1	ミドリ安全	クリーンワンダー WR-052T		回転ディスク 遠心分離式	5
2	アマノ	MJ-5		サイクロン 捕集ディスク	3.7
3	赤松電機 製作所	オニカゼ SMM-150		遠心分離 慣性衝突	19
4	赤松電機 製作所	オニカゼ SMG-150		遠心分離 慣性衝突	20
5	ハイデック	エコリンガー ERA-20BCFS-2		微細粒子凝集式	20
6	アピステ	GME-R1500		回転ディスク 遠心分離式	13
7	ミドリ安全	エムクリーン MC-15		電気集塵式	15



- ①オイルミストアトマイザ ②光散乱式粒子計数機 ③ミストコレクタ  
 ④拡散ファン ⑤ミストチャンバ ⑥排気チャンバ ⑦ダクト  
 ⑧サンプリングチューブ

図 5-1 試験装置概要

表 5-2 試験機器

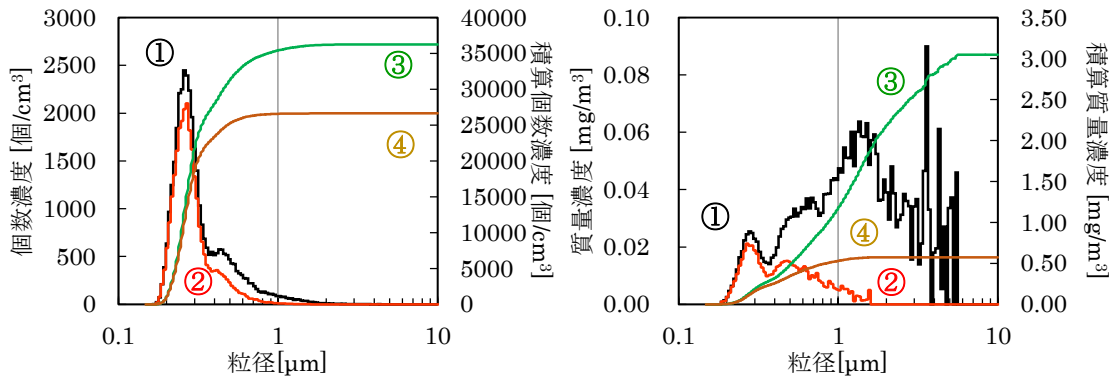
	名称	仕様
オイルミストアトマイザ	6-Jet アトマイザ	$>10^6$ 個/cm <sup>3</sup>
光散乱式粒子計数機	Welas 2000	0.2~40 $\mu$ m

### 5-3 試験結果

#### 5-3-1 水溶性油試験結果

水溶性油でオイルミストを発生させた条件での各コレクタの入口・出口の個数濃度、質量濃度を図 5-2~図 5-8 に示す。左軸に粒径ごとの個数または質量濃度を、右軸に積算個数または積算質量濃度を示す。粒径ごとの個数濃度では、0.3 $\mu$ m 程度の比較的小粒径の粒子が最も多く発生している。コレクタ入口質量濃度は 3.0mg/m<sup>3</sup> 程度であり、出口質量濃度の低減が測定結果から確認される。各コレクタの水溶性油由来のオイルミストに対する捕集効率については 5-3-3 に後述する。

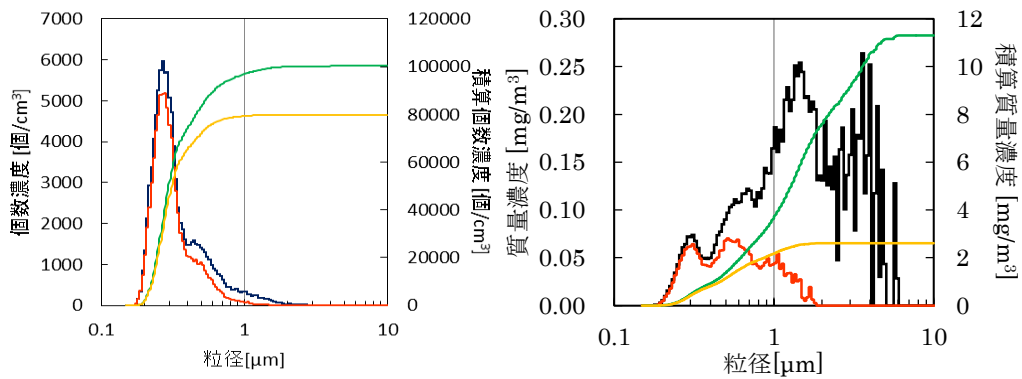
①入口個数/質量濃度 ②出口個数/質量濃度 ③入口積算個数/質量濃度 ④出口積算個数/質量濃度



(a) 個数濃度

(b) 質量濃度

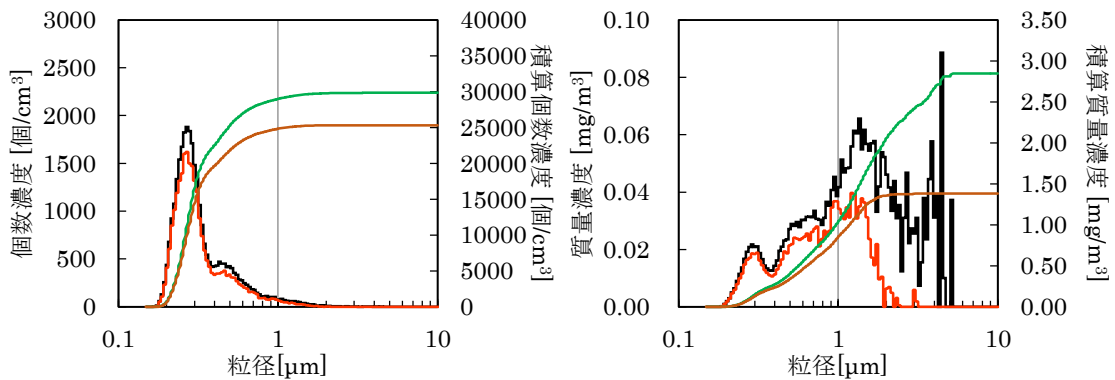
図 5-2 回転ディスク式ミストコレクタ試験結果 (水溶性油)



(a) 個数濃度

(b) 質量濃度

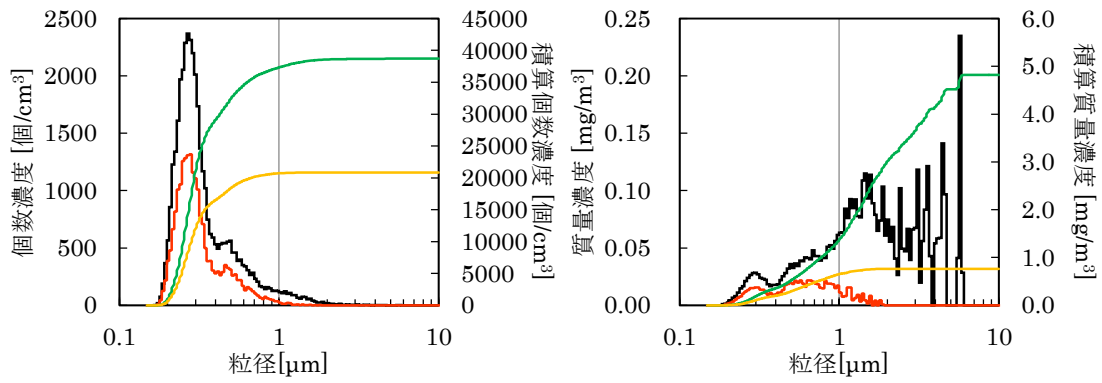
図 5-3 MJ-5 試験結果 (水溶性油)



(a) 個数濃度

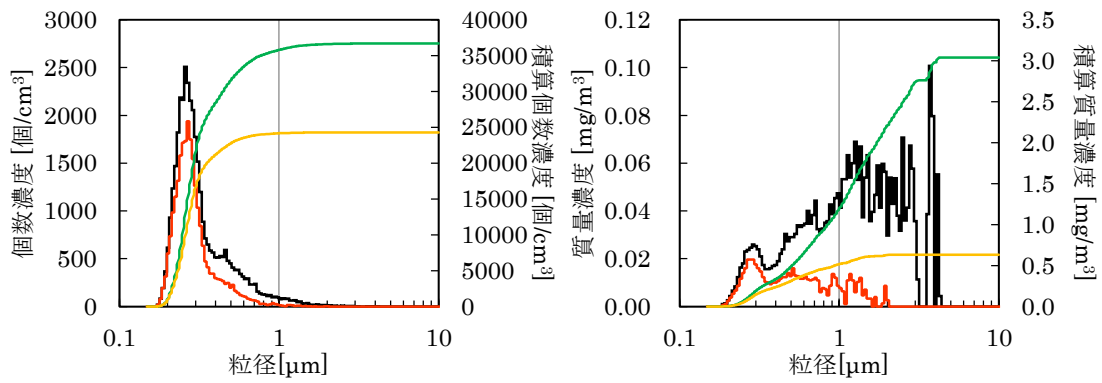
(b) 質量濃度

図 5-4 SMM150 試験結果 (水溶性油)



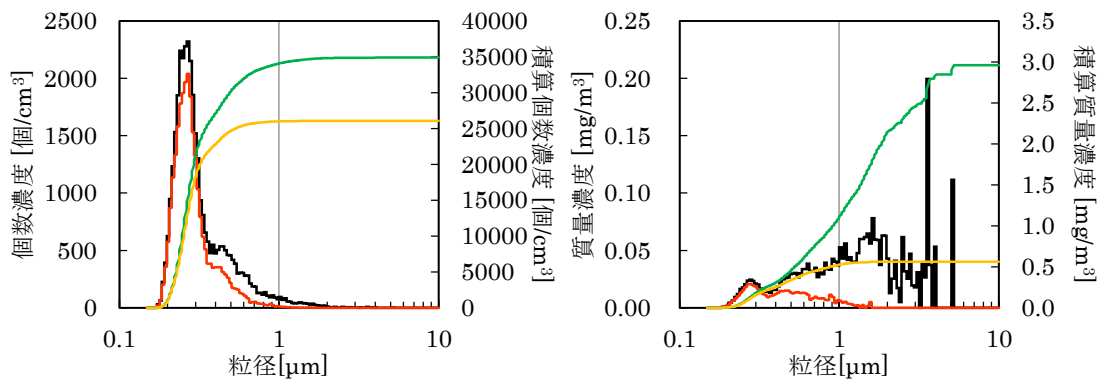
(a) 個数濃度 (b) 質量濃度

図 5-5 SMG150 試験結果 (水溶性油)



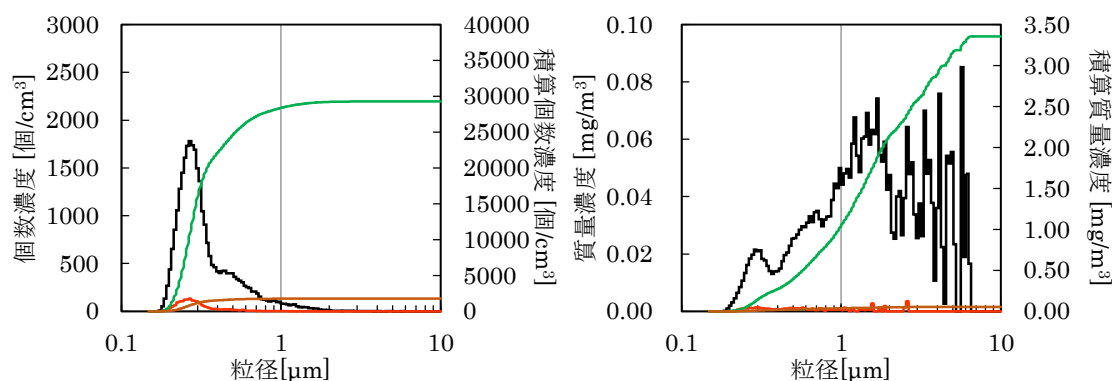
(a) 個数濃度 (b) 質量濃度

図 5-6 エコリングー試験結果 (水溶性油)



(a) 個数濃度 (b) 質量濃度

図 5-7 GME 試験結果 (水溶性油)



(a) 個数濃度 (b) 質量濃度

図 5-8 静電式ミストコレクタ試験結果（水溶性油）

### 5-3-2 不水溶性油試験結果

不水溶性油でオイルミストを発生させた条件での各コレクタの入口・出口の個数濃度、質量濃度を図 5-9～図 5-15 に示す。コレクタ入口の積算個数濃度は、水溶性油由来のオイルミストと比較し、20%以下と少ないが、積算個数濃度に占める  $1\mu\text{m}$  以上の大粒径の粒子の割合が多い。また、コレクタ入口の積算質量濃度は、 $9.7\sim 16.1\text{mg}/\text{m}^3$  であり、水溶性油に比べ高濃度である。これは、不水溶性油の方が水溶性油に比べ粘度が大きいため、油が小さく分裂されず、質量濃度の大きい大粒径の粒子が多く発生するからである。コレクタ出口では、質量濃度の低減からコレクタによりオイルミストが捕集されていることが確認される。各コレクタの不水溶性油由来のオイルミストに対する捕集効率については 5-3-3 に後述する。

①入口個数/質量濃度 ②出口個数/質量濃度 ③入口積算個数/質量濃度 ④出口積算個数/質量濃度

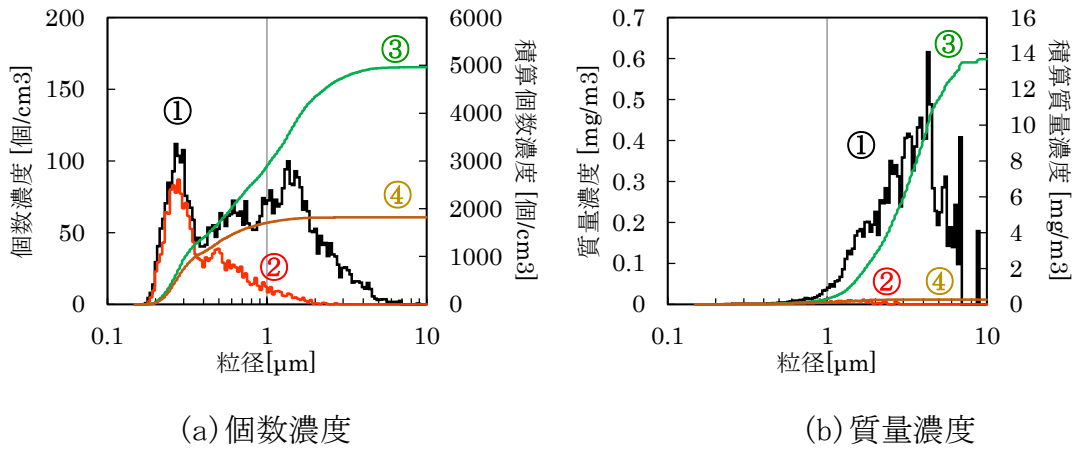


図 5-9 回転ディスク式ミストコレクタ試験結果 (不水溶性油)

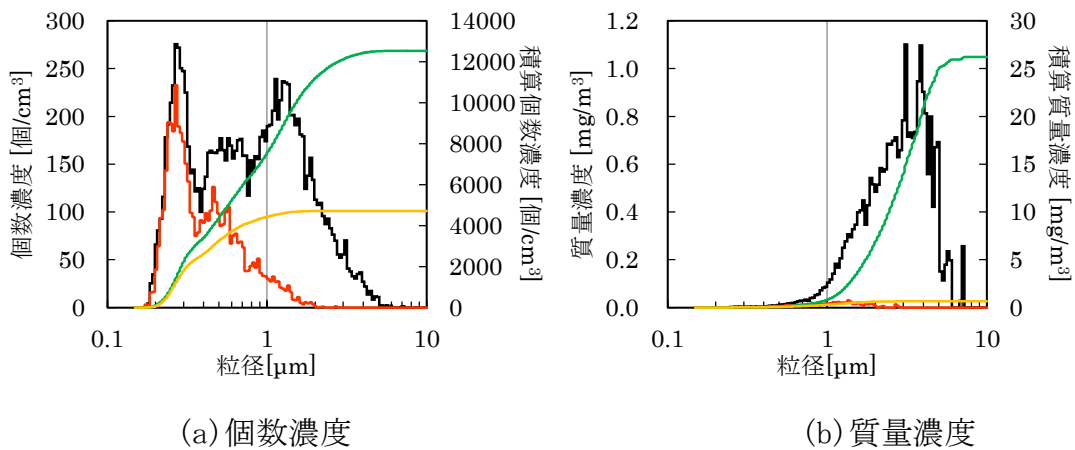


図 5-10 MJ-5 試験結果 (不水溶性油)

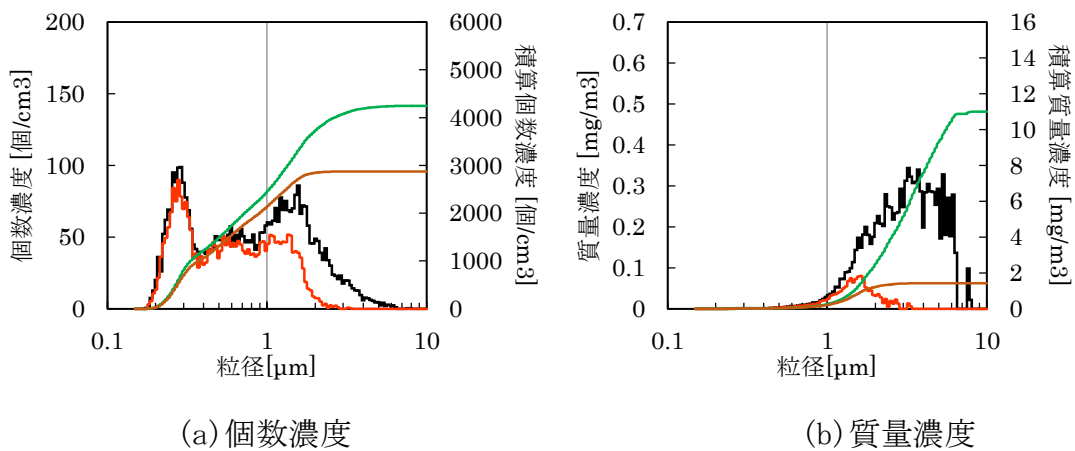


図 5-11 SMM150 試験結果 (不水溶性油)



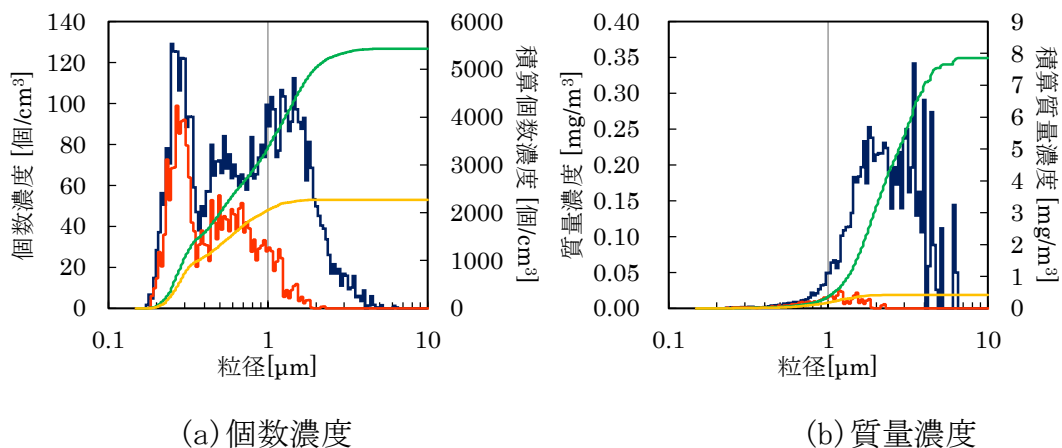


図 5-12 SMG150 試験結果 (不水溶性油)

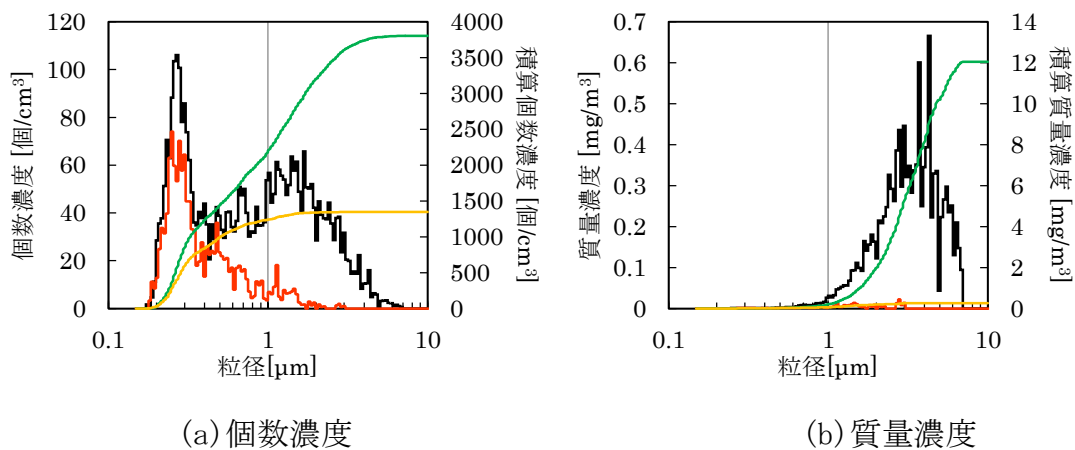


図 5-13 エコリンガー試験結果 (不水溶性油)

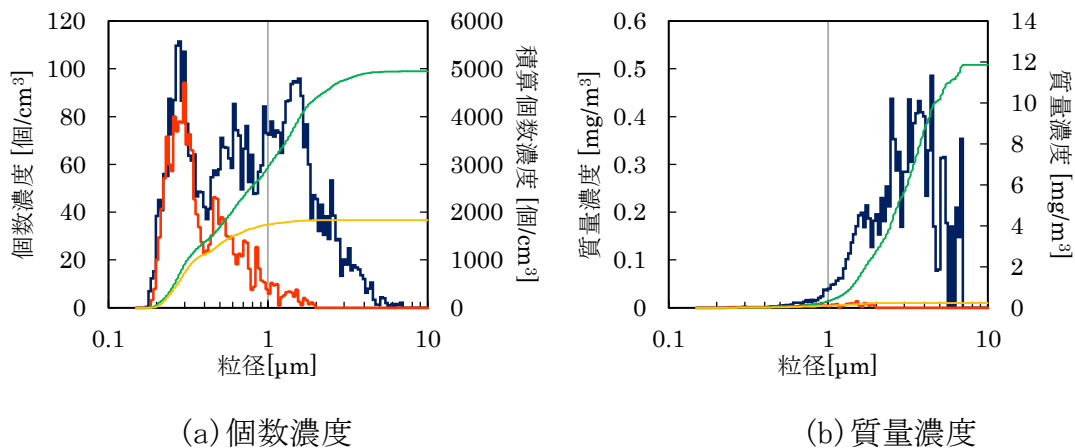
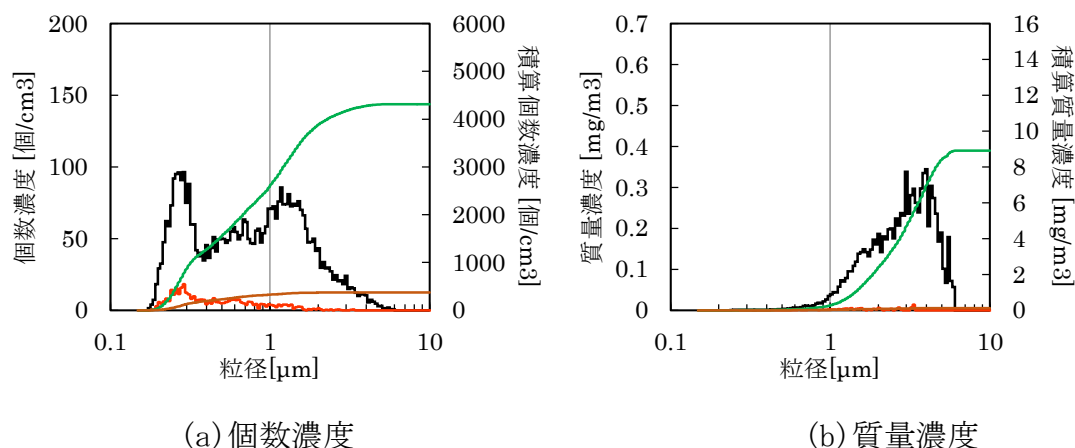


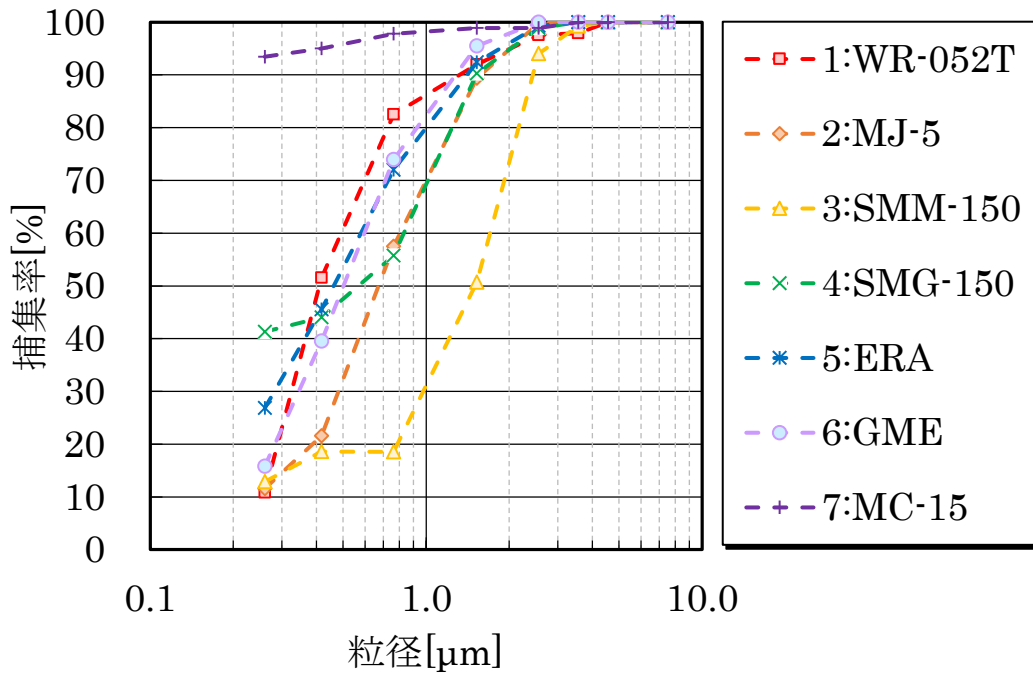
図 5-14 GME 試験結果 (不水溶性油)



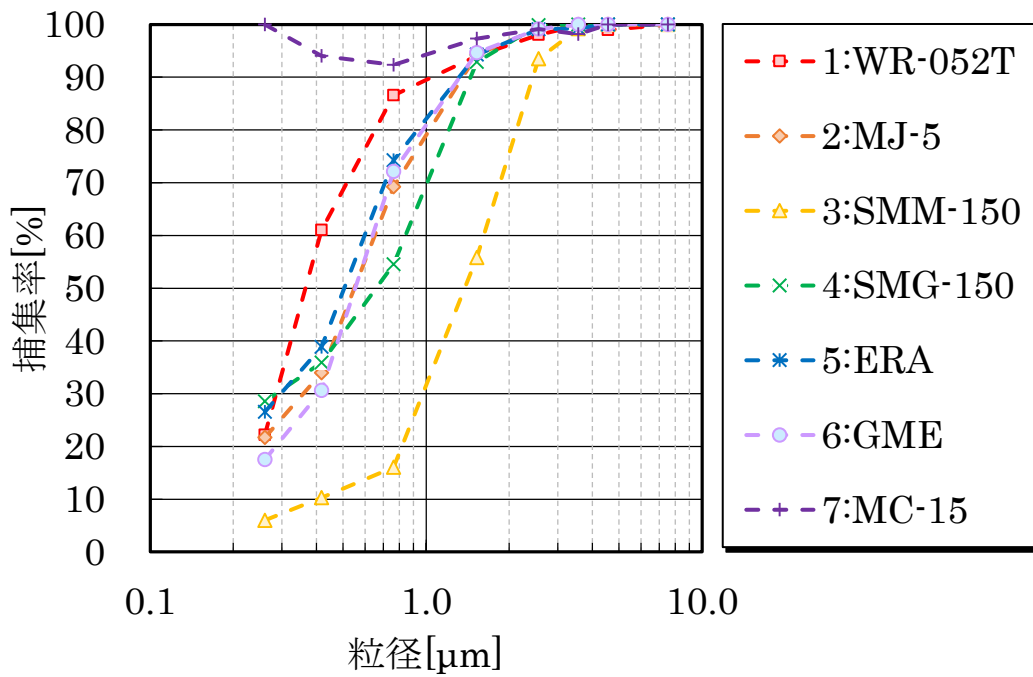
(a) 個数濃度 (b) 質量濃度  
 図 5-15 静電式ミストコレクタ試験結果（不水溶性油）

### 5-3-3 粒径別捕集効率

ミストコレクタ入口・出口の粒径ごとの質量濃度差から捕集効率を算出し、水溶性油、不水溶性油別に図 5-16 に示す。各コレクタの捕集効率は、水溶性油、不水溶性油で大きく変わらない。粒径  $2\mu\text{m}$  以上の粒子に対しては、捕集効率 90% 以上である。慣性衝突式（SMM-150、SMG-150）、回転ディスク式（WR-052T、GME-R1500）の捕集効率は、粒径  $1\mu\text{m}$  以下のサブミクロン粒子に対して大きく低下するが、電気式（MC-15）は小粒径範囲まで 90% 以上の捕集効率である。第 3 章で述べたように、加工装置から発生するオイルミストの大部分はナノ粒子であることから、慣性衝突式、回転ディスク式では捕集が難しい。しかしながら、工場内には多くの慣性衝突式、回転ディスク式のミストコレクタが設置されており、このことが工場内で霧がかかったように見える原因であると考えられる。



(a) 水溶性油に対して



(b) 不水溶性油に対して

図 5-16 粒径別捕集効率

#### 5-4 ナノ粒子に対する電気式ミストコレクタの捕集効率

前述したように0.3~10 $\mu\text{m}$ のオイルミストに対するミストコレクタの捕集効率は、静電式が最も高かった。ここでは、人体への沈着の多いナノ粒子範囲の捕集効率を確認した。

電気移動度式計数機と光散乱式計数機を用いて捕集効率を測定した結果を図5-16に示す。30nmまで捕集効率90%以上であることを確認した。

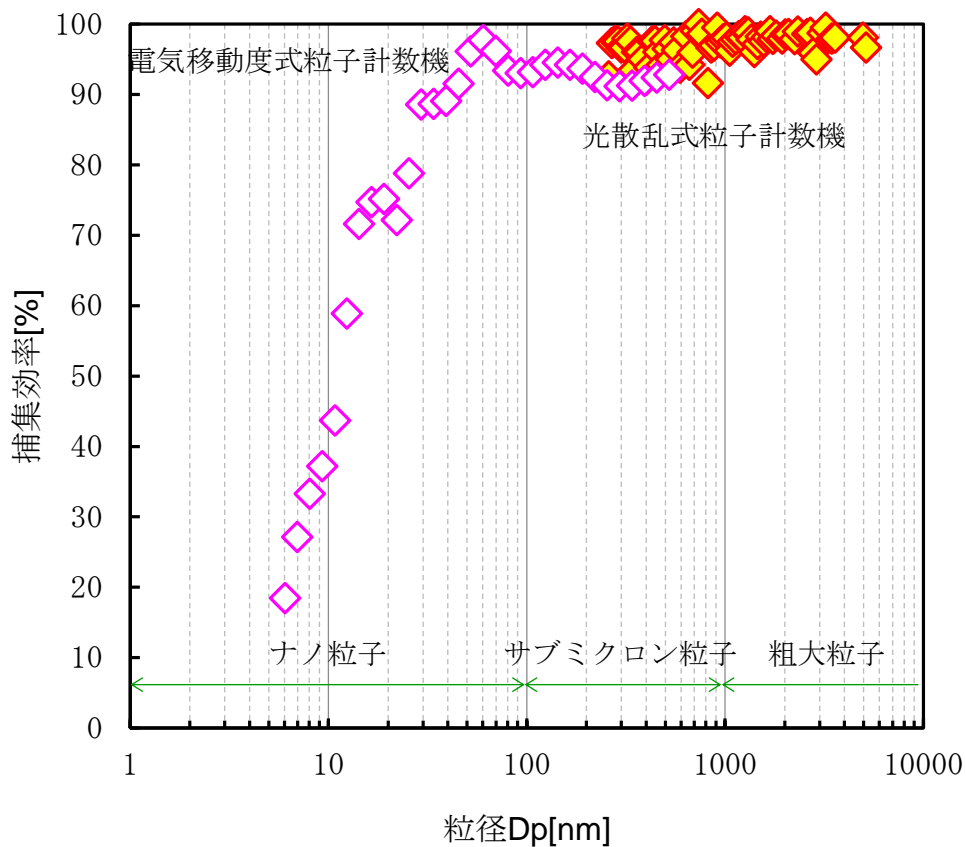


図 5-17 ナノ粒子範囲までの粒径別捕集効率

## 第6章 切削油の化学分析

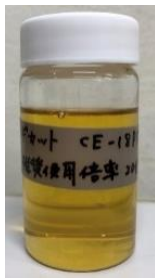
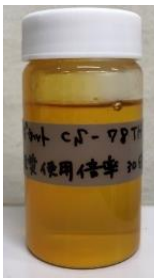

### 6-1 はじめに

工場内では水溶性油と不水溶性油を使用している加工装置が混在している。空気中のオイルミストをサンプリングし、化学成分分析を行うことで切削油を判別し、発生源（対策必要エリア）を特定することを目的とする。

### 6-2 化学分析概要

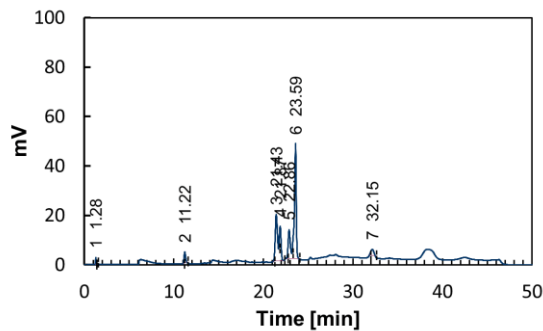
GC-FID を用い切削油の直接注入により分析を行った。対象とした切削油 3 種類を表 6-1 に示す。

表 6-1 分析対象油

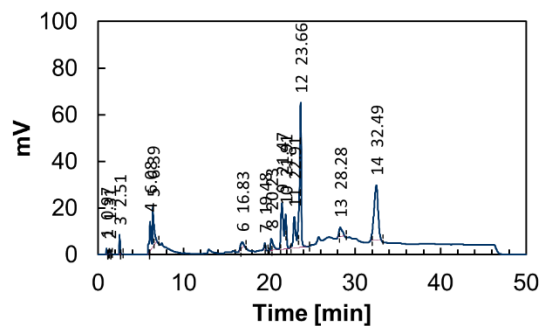
	水溶性①	水溶性②	不水溶性①
外観			
色	淡褐色	淡褐色	褐色
臭い	低臭	低臭	特異臭
密度 (@15°C) [g/cm <sup>3</sup> ]	0.91	0.95	0.89

### 6-3 化学分析結果

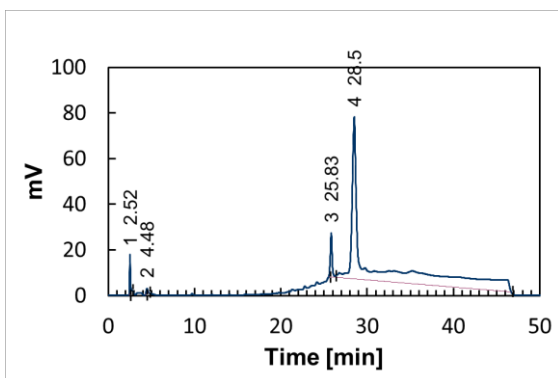
水溶性切削油(スギカット CE-18PF、CS-78TH)及び不水溶性切削油 (ユシロンカット NX650T) の分析結果を示す。CE-18PF では、保持時間約 24 分のピークが最大であり、保持時間 21-22 分頃にも、いくつかピークが出現していた。CS-78TH では、保持時間 23 分頃に最大ピーク、保持時間 21-22 分頃にも、いくつかピークが出現していた。CE-18PF 及び CS-78TH は、水溶性切削油であり、ピークには大きな違いが認められなかった。NX650T については、保持時間 28.5 分に最大ピーク、その少し前の約 25.8 分に小さなピークが出現していた。不水溶性切削油 NX650T は、水溶性切削油 CE-18PF 及び CS-78TH と比較して、明瞭に出現ピークが異なっていた。



(a) 水溶性油①



(b) 水溶性油②



(c) 不水溶性油①

図 6-1 分析結果

次に先ほどの分析結果をもとに油量とピーク高さの検量線を作成した。直接注入の場合では、油量とピーク高さの相関がとれていることが確認できた。また、金属加工工場内におけるオイルミストの捕集効率を明らかにするために、切削油のフィルタ上への添加実験を行った。フィルタ (PALLFLEX 2500QAT-UP) に切削油を添加し、ヘキサン 10mL を加え、超音波にて抽出した。この操作を 2 回繰り返し、最終的に抽出液を 1mL とした。図 6-2 に切削油を GC に直接分析した結果とフィルタ添加実験による結果を示す。ろ紙に添加したオイルについての実験は、現在途中であるが、1 点の分析結果だけをみると、CE-18PF の回収率は 25%、NH650T の回収率は 84%であった。CE-18PF の回収率が低いため、さらに添加実験を行う予定である。また、データ数が少ないので、データを増やしつつ、回収率の改善を行う。

以上より、切削油を判別し、発生源 (対策必要エリア) を特定する (図 6-3)。

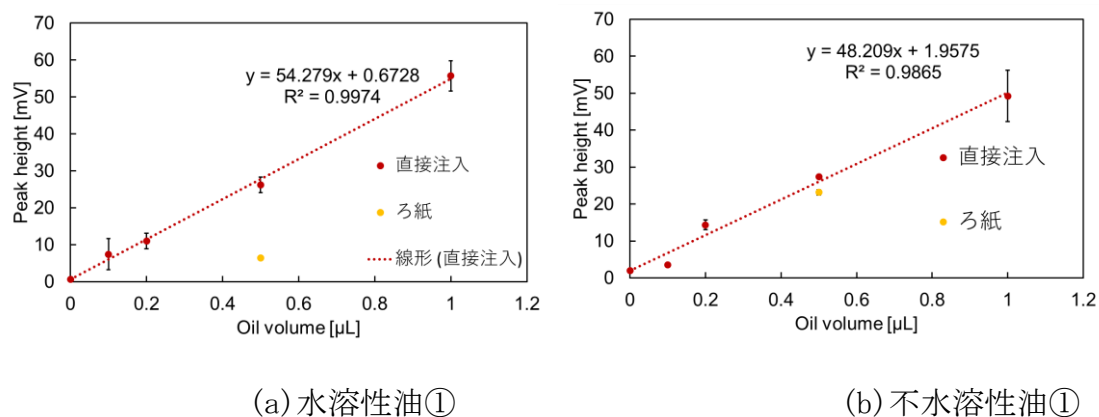


図 6-2 検量線

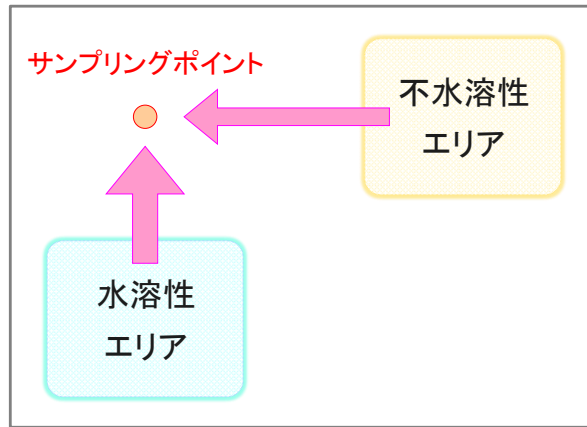


図 6-3 オイルミストの化学分析による切削油、発生源の特定



## 第6章 総論

金属加工工場の加工装置では  $10^7$  個/cm<sup>3</sup> のオイルミストが発生しており、大部分をナノ粒子が占めている。

加工装置の数値モデル化により、扉からの漏洩量は 1 時間で最大 300 個/cm<sup>3</sup> と少なく、ワーク取り出し時に同伴してオイルミストが流出していると考えられる。

ミストコレクタの捕集性能試験より、慣性式では 2 $\mu$ m 以下の粒子に対して捕集効率が低下するが、電気式では 30nm まで 90% 以上である。

切削油のガスクロマトグラフ分析により、出現ピークの違いから水溶性油と不水溶性油の判別が可能である。

・引用文献

- Donaldson, K., Brown, D., Clouter, A., Duffin, R., MacNee, W., Renwick, L., Tran, L. and Stone V. (2002). The pulmonary toxicology of ultrafine particles. *J. Aerosol Med.* 15: 213–220.
- Greg, M.P., Sieber, W.K., O'Brien, D.M., Hughes, R.T., Glaser, R.A. and Catalano, J.D. (2001). Metalworking fluid exposures in small machine shops: An overview. *Am. Ind. Hyg. Assoc.* 62: 356–370.
- Hinds, W.C. (1999). *Aerosol Technology*. A Wiley-Interscience publication, New York, pp. 349–378.
- Jonathan, T. and David, L. (2000). Mist generation during metal machining. *J. Tribol.* 122: 544–549.
- Kazerouni, N., Terry, L.T., Sandra, A.P. and Richard, B.H. (2000). Mortality among workers exposed to cutting oil mist: Update of previous reports. *Am. J. Ind. Med.* 38: 410–416.
- Kondo, Y., Kawaguchi, A., Yoshino, H. and Ogita, S. (2011). Particle size distribution and aerosol dynamics of oil mist in commercial kitchens. *J. Environ. Eng.* 76: 547–554.
- Kubasiewicz, M., Starzynski, Z. and Szymczak, W. (1991). Case-referent study on skin cancer and its relation to occupational exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons. II. Study results. *Polish J. Occup. Med. Environ. Health* 4: 141–147.
- Mackerer, C.R. (1985). Health effects of oil mists: A brief review. *Toxicol. Ind. Health* 5: 429–440.
- Oberdörster, G., (2001). Pulmonary effects of inhaled ultrafine particles. *Int. Arc. Occup. Environ. Health* 74: 1–8.
- Robertson, A.S., Weir, D.C. and Burge, P.S., (1988). Occupational asthma due to oil mists.

Thorax. 43: 200–205.

Wang, Y.F., Tsai, P.J., Chen, C.W., Chen, D.R. and Dai, Y.T. (2011). Size distributions and exposure concentrations of nanoparticles associated with the emissions of oil mists from fastener manufacturing processes. *J. Hazard. Mater.* 198: 182–187.

Zhang, J., Pan, W., Long, Z., Wang, C. and Feng, Z. (2017). Study of the oil mist filtration performance: Pressure drop characteristics and filter efficiency model. *Aerosol Air Qual. Res.* 17: 1063–1072.

日本エアロゾル学会 (2004). エアロゾル用語集. :74–85

日本産業衛生学会 (2019). 許容濃度の勧告 (2019 年度) . 産業衛生学雑誌 61(5). :170–202

〈謝辞〉

本論文を作成するにあたり、瀬戸章文教授、猪股弥生准教授、東秀憲准教授には大変世話になりました。また、私に金沢大学博士課程で学ぶ機会を与えて下さった三機工業株式会社にも感謝申し上げます。