

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	http://hdl.handle.net/2297/00061372

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



題名 (Title) 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
(邦訳又は英訳) Characterization of Nano-sized Oil Mist Particles Generated by Metal Machining
Processes and Collection

専攻 (Division) : 自然システム学専攻

学籍番号 (Student ID Number) : 1724062011

氏名 (Name) : 岩崎守顕

In metal processing plants such as automobile factories, a large amount of cutting oil is used for improving product quality, cooling tools, cleaning and collecting cutting powder around processing tools. This cutting oil physically scatters with a tool or material, evaporates due to frictional heat between a processing tool and a work (product), and is cooled and condensed in the air to generate an oil mist. The harmful effects of oil mist cover a wide variety of areas including the human body, equipment, and environment, and it is necessary to take measures in terms of a safe and comfortable work environment and the natural environment around the factory. The purpose of this paper is to evaluate the characteristics of oil mist generated in the metalworking process, evaluate the technology for collecting oil mist, and identify cutting oil by chemical analysis.

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。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。

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 以下のかんりの量の超微粒子 (Ultrafine Particle; UFP) が含まれると報告している。

2-3 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、スリッパ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。

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。

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 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 3-1 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。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。

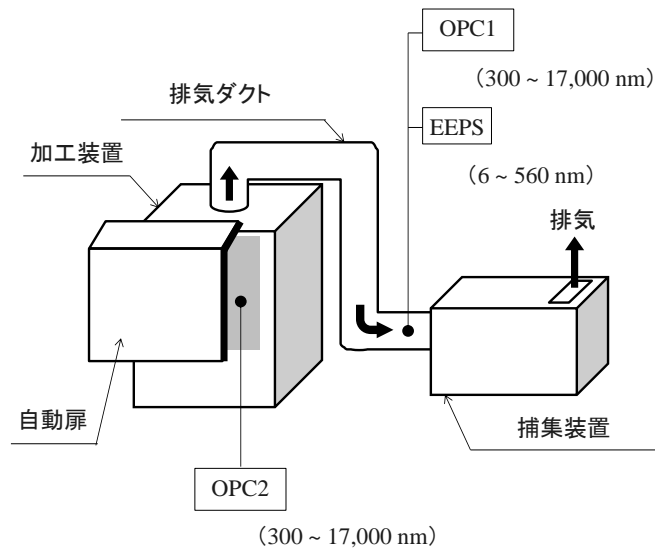


図 3-1 測定概要

3-3 旋盤加工における排気・扉前の個数濃度測定結果

図 3-2 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/cm³) 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。

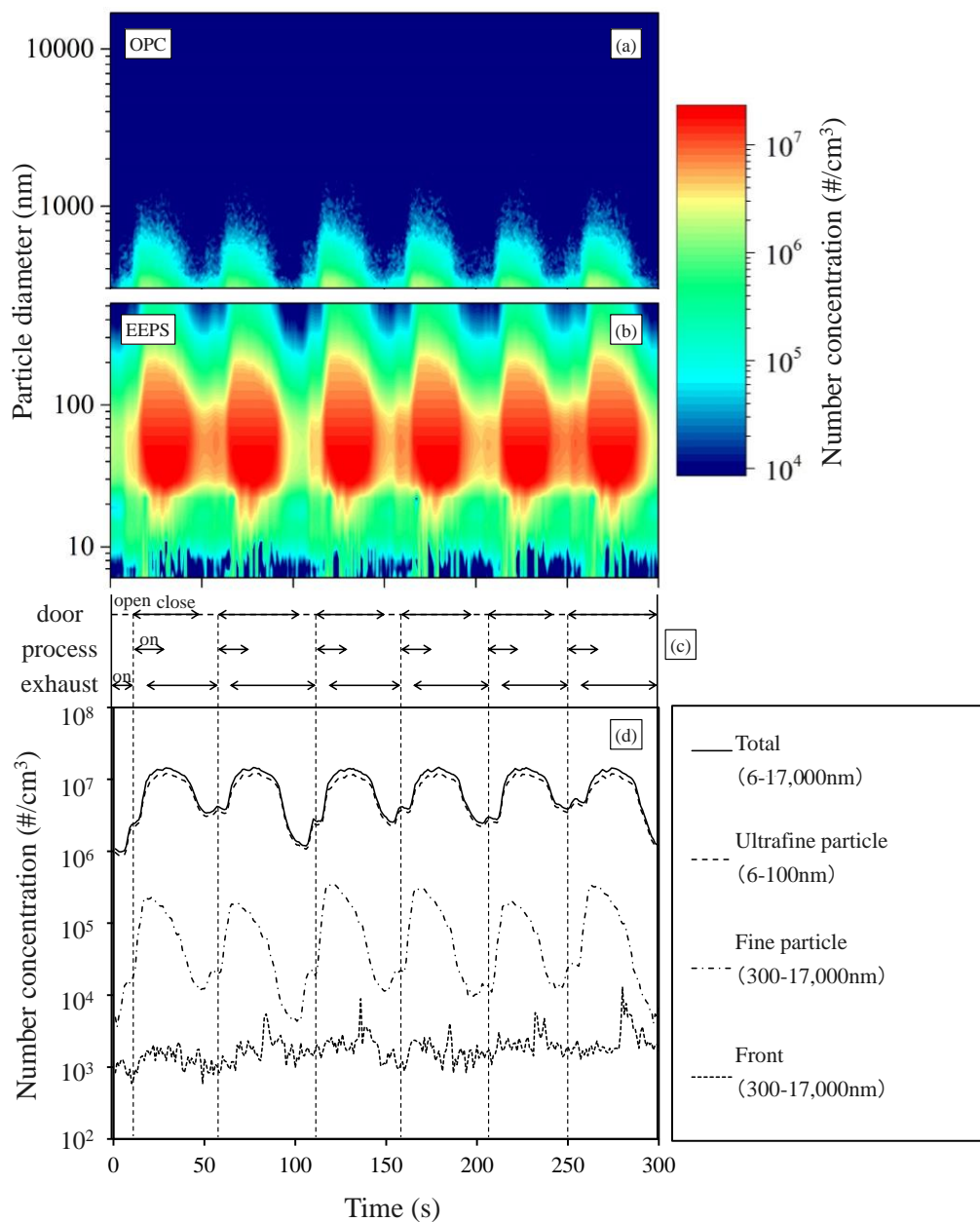


図 3-2 旋盤加工における排気・扉前の個数濃度測定結果

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/cm³) 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/cm³/s]

R : 置換量[個/cm³/s]

L : 前面扉からの漏洩量[個/cm³/s]

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/cm³]

Q : 排気量[cm³/s]

N_{front} : 加工装置前面の個数濃度[個/cm³]

V : 加工装置内体積[cm³]

A : 加工装置扉面積[cm²]

D : 粒子の拡散係数[cm²/s]

X : 装置中心から前面扉までの距離[cm]

OC : 扉開=1、扉閉=0

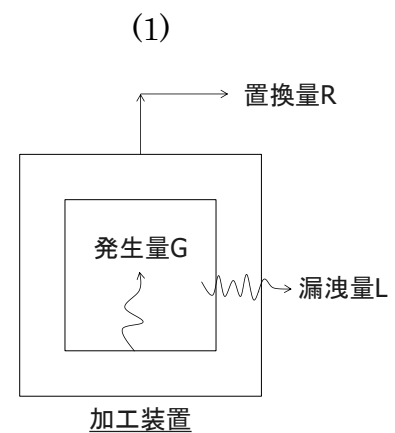


図 4-1 ボックスモデル概念図

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 1.0×10^6 個/cm³/s、微粒子の発生量は 2.0×10^4 個/cm³/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。

表 4-1 計算条件

	旋盤
V [m ³]	1.0
A [m ²]	0.40
Q [m ³ /s]	0.05
X [m]	0.20
D_{NP} [m ² /s]@D0.01 μ m	5.5×10^{-8}
D_{FP} [m ² /s]@D0.3 μ m	4.1×10^{-13}
N_{bg_NP} [# /cm ³]	2.0×10^5
N_{bg_FP} [# /cm ³]	1.0×10^3
G_{NP} [# /cm ³ /s]	1.0×10^6
G_{FP} [# /cm ³ /s]	2.0×10^4

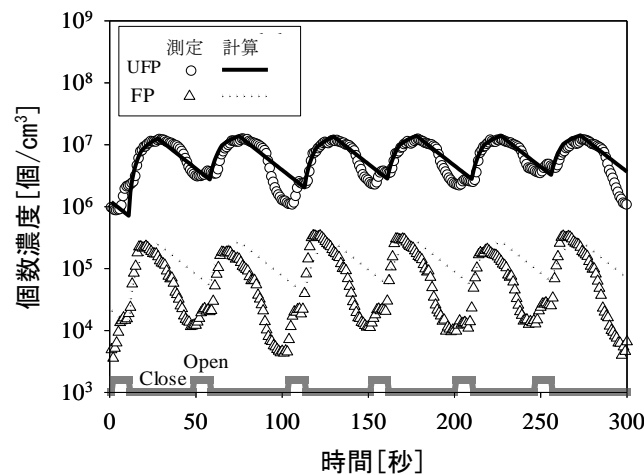


図 4-2 測定結果と計算結果の比較（旋盤加工）

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、遠心分離式は、慣性衝突式、電気式などの捕集原理の異なる7種類のミストコレクタとした（表5-1）。

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 ³ /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

5-3 試験結果

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た結果を図5-1に示す。各コレクタは粒径 $2\mu\text{m}$ 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。

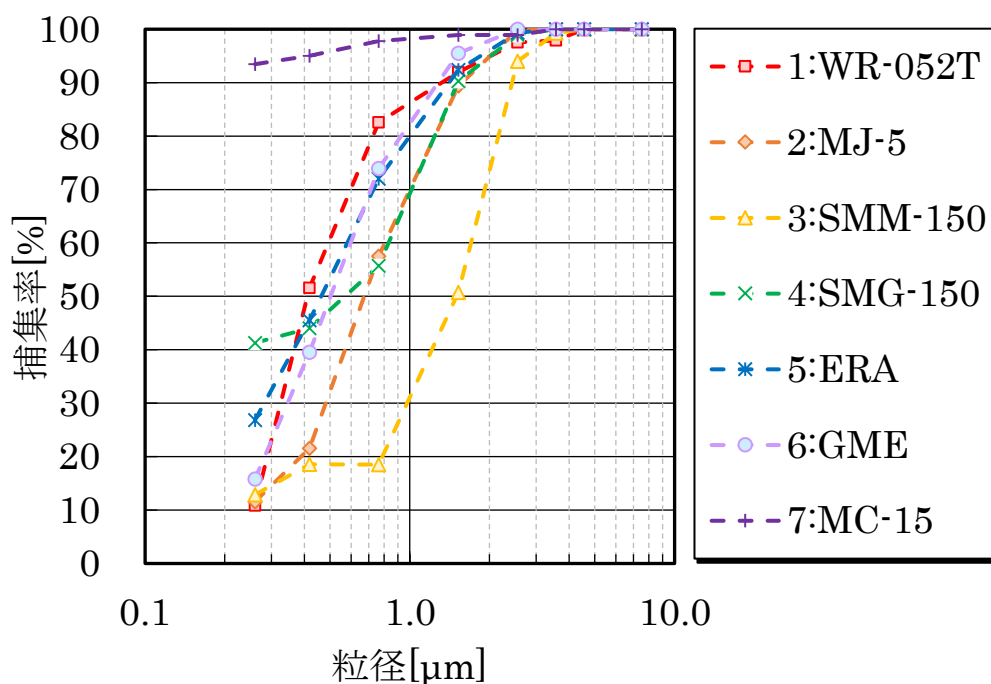


図 5-1 粒径別捕集効率

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。対象とした切削油は、水溶性油 2 種類（スギカット CE-18PF、CS-78TH）、不水溶性油 1 種類（ユシロンカット NX650T）とした。

6-3 化学分析結果

水溶性切削油及び不水溶性切削油の分析結果を図 6-1 に示す。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。

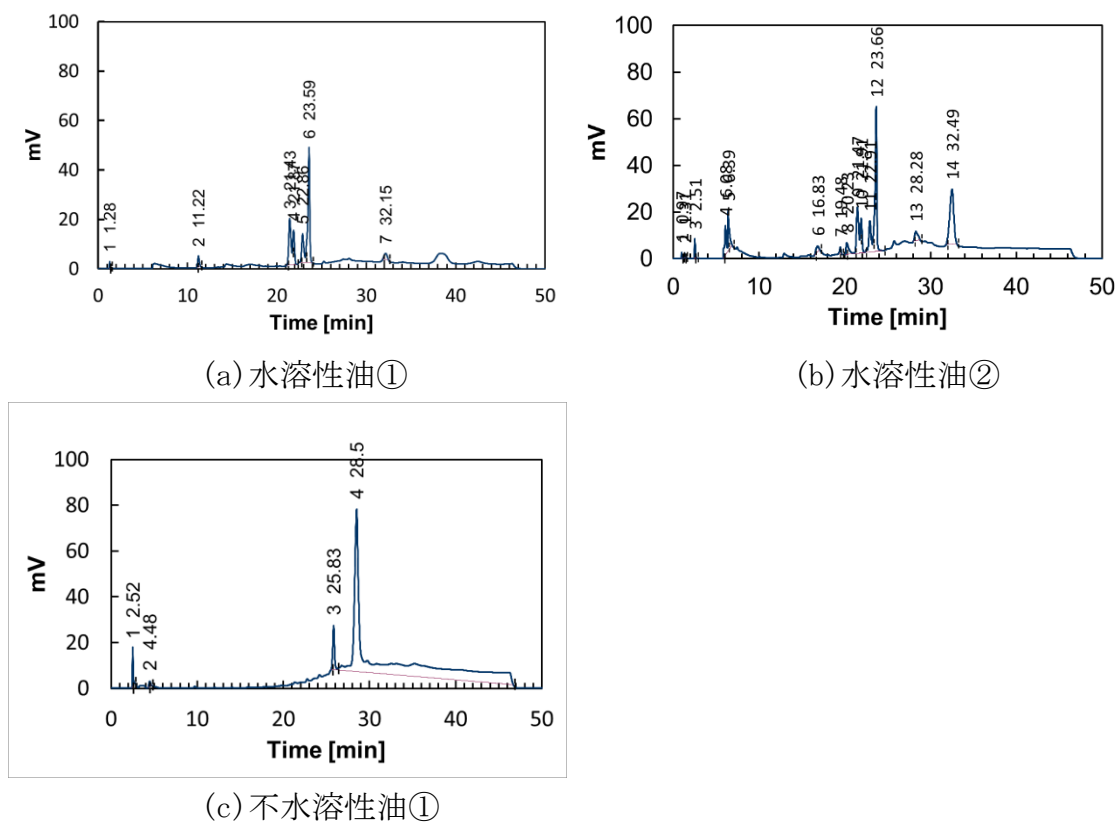


図 6-1 分析結果

学位論文審査報告書（甲）

1. 学位論文題目（外国語の場合は和訳を付けること。）

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

2. 論文提出者 (1) 所 属 自然システム学 専攻

(2) 氏 名 岩崎 守顕

3. 審査結果の要旨（600～650 字）

令和2年7月3日に予備審査会、令和2年7月31日に口頭発表と質疑応答を行い、その後開催した学位論文審査会において以下のように決定した。本論文は、金属加工などを行う労働環境で問題となっているオイルミストの実態把握と清浄化を目的として、その計測と除去について検討したものである。本論文で述べられている主要な研究成果は以下のとおりである。1) 実際の金属加工プロセスでは大量の金属加工用油が使用されており、その飛散だけでなく、蒸発・凝縮によって直径 100nm 以下のオイルミストが大量に生成していることを粒子径分布測定結果から示した。2) 3つのタイプの加工ユニット（旋盤加工、ギア歯切加工、ギア歯研加工）に着目した物質収支モデルを構築し、蒸発・凝縮によるオイルミストの発生速度を求めるとともに、前面扉からの拡散漏洩量を予測した。その結果より、局所排気風量とそのタイミングがオイルミストの漏洩量の抑制に効果があることを定量的に示した。3) 遠心分離、電気集塵機、慣性式などの7種類の既存のミストコレクタに対して、オイルミストの捕集性能を評価したところ、電気集塵機のみが 100nm 以下のナノ粒子まで適用可能であることを示した。これらの結果は、製造工程における労働環境の改善のために有用であり、また、ナノサイズのオイルミストの発生と気中での挙動に関する新たな知見を与えるものである。以上より、本論文の学術的、工学的価値は極めて高いと考えられ、博士（工学）の学位に相当すると判断する。

4. 審査結果 (1) 判 定（いずれかに○印） ○合 格 ・ 不合格

(2) 授与学位 博士（工学）