

外乱気流に応じた排风量制御機能を搭載した作業環境改善用  
換気装置の開発

Development of a ventilation system for improving the  
working environment equipped with an exhaust air volume  
control function according to disturbance airflow

2024年2月

田 博源  
Boyuan TIAN

外乱気流に応じた排風量制御機能を搭載した作業環境改善用換気装置  
の開発

Development of a ventilation system for improving the  
working environment equipped with an exhaust air volume  
control function according to disturbance airflow

2024年2月

早稲田大学大学院 創造理工学研究科  
地球・環境資源理工学専攻 大気水圏環境化学研究

田 博源  
Boyuan TIAN

# 目次

<b>第 1 章 序論</b> .....	1
1.1 工場換気と局所排気装置 .....	1
1.1.1 工場換気の目的と方法 .....	1
1.1.2 工場換気の空気環境 .....	2
1.1.3 工場換気の温熱環境 .....	2
1.2 局所排気装置の概要 .....	5
1.3 フードの特性と分類 .....	8
1.3.1 フードの特性 .....	8
1.3.2 吸込み気流の特性 .....	11
1.4 制御風速 .....	17
1.5 排風量の計算とその問題点 .....	22
1.6 外付け式フードに関する研究 .....	24
1.6.1 建築設備や厨房設備で使用する外付け式フードに関する研究 .....	24
1.6.2 有機溶剤を取扱う現場における外付け式フードの使用 .....	26
1.6.3 外付け式フード捕集効率の評価方法 .....	32
1.7 CFD 解析 .....	35
1.8 フード捕集効率に影響を与える要因に関する研究 .....	36
1.9 作業環境測定 .....	38
1.9.1 作業環境測定の定義 .....	38
1.9.2 作業環境測定における測定結果の評価 .....	39
1.10 本研究の意義と目的 .....	40
1.11 本論文の概要 .....	41
<b>第 2 章 側方吸引型外付け式フードにおける外乱気流を考慮した漏洩を抑制する必要排風量</b> .....	57
2.1 研究背景と目的 .....	57
2.2 実験装置と方法 .....	58
2.3 数値流体力学的解析に基づいた数値実験 .....	61
2.4 漏洩濃度の測定結果 .....	63
2.5 外乱気流の発生位置及び風速と漏洩を抑える排風量の関係 .....	75

2.6	漏洩を抑える排風量と Dalla Valle 式との比較についての考察	81
2.7	数値実験の結果及び考察	82
<b>第3章</b>	<b>側方吸引型外付け式フードにおける外乱気流に対する排風量を制御する発散防止抑制装置の開発及び性能評価</b>	<b>96</b>
3.1	研究背景と目的	96
3.2	実験装置と方法	97
3.2.1	漏洩を抑える排風量の測定実験	97
3.2.2	風量制御発散防止抑制装置の開発実験	98
3.3	実験結果と考察	104
3.3.1	風速センサーの性能テスト実験の結果	104
3.3.2	排風量制御システムの動作条件の決定	105
3.3.3	排風量制御システムの性能テストについての考察	108
<b>第4章</b>	<b>有機溶剤作業に対するばく露防止対策用換気作業台の開口面周りの風速分布測定及び捕集性能の評価</b>	<b>112</b>
4.1	研究背景と目的	112
4.2	実験装置と方法	113
4.2.1	実験装置	113
4.2.2	実験方法	117
4.3	実験結果	120
4.3.1	各開口率のパンチングの風速測定結果	120
4.3.2	異なるパンチングの開口率による風速の比較	127
4.3.3	考察	129
4.4	風速分布の測定(無指向性)	129
4.4.1	実験目的	129
4.4.2	実験方法	129
4.4.3	実験結果	130
4.4.4	先行研究、指向性、無指向性での風速分布比較	136
4.4.5	考察	145
4.5	換気作業台の捕集率の測定	146
4.5.1	実験目的	146
4.5.2	実験方法	147
4.5.3	実験結果	150

4.5.4 考察 .....	157
<b>第 5 章 有機溶剤作業に対する排風量制御システムを搭載した換気作業台の性能評価</b> .....	<b>161</b>
5.1 研究背景と目的 .....	161
5.2 実験装置と方法 .....	162
5.2.1 ネイルサロンでの作業を想定した場合の外乱気流の測定 .....	162
5.2.2 外乱気流に対する換気作業台の捕集性能の評価 .....	164
5.3 実験結果と考察 .....	167
5.3.1 ネイルサロンでの作業を想定した場合の外乱気流の測定結果と考察 .....	167
5.3.2 外乱気流に対する換気作業台の捕集性能の評価の結果と考察 .....	176
5.3.3 排風量制御システムを搭載した場合の捕集率の結果と考察 .....	180
<b>第 6 章 結言</b> .....	<b>188</b>
<b>発表論文</b> .....	<b>192</b>
<b>学会発表</b> .....	<b>193</b>
<b>謝辞</b> .....	<b>195</b>

## 第1章 序論

### 1.1 工場換気と局所排気装置

#### 1.1.1 工場換気の目的と方法

工場等の生産活動に伴い、熱や種々の有害物質が発生する。これらの有害物質に作業者がばく露されることにより健康に影響を及ぼす恐れがある。有害物質は呼吸器を通して体内に侵入することが最も多いと言われている。そのため空気環境を清浄に保つ必要がある。作業者の健康障害を防止する目的で、作業環境中の有害物質を換気により効率的に除去することが工場換気である<sup>1)</sup>。

また、換気にはエネルギーが必要となる。省エネルギーあるいはコスト削減のためには、動かす空気量ができる限り少なくなるような換気法を計画することが重要である。

工場の作業者の快適性を保つ上で生産効率を高めるために工場の温熱環境を改善することも重要である。また、生産プロセスで発生する有害物質の蒸気、ヒュームなどに伴い大量の熱が発生することもある。そこで、室内で発生する熱を取り除くために空気の膨張による浮力を利用した温度差換気という換気手法もある。

以上のように、室内空間において作業者の健康に影響する有害物質及び高温で発熱を伴う作業環境に対して、換気によって良好な作業環境を維持することも工場換気の目的である。

工場換気は全体換気と局所換気に分けられる。全体換気は希釈換気とも呼ばれる。室内の作業空間の入口から、清浄な空気を導入し、作業空間内で発生する有害物質と混合希釈をしながら、排気口から排出するという換気方式である。このような換気方式は作業空間内の有害物質の平均濃度を下げる希釈効果はあるが、有害物質と混合希釈するための大量な換気となるなどの欠点があるといわれている。そして、ばく露濃度の低減効果がほとんどないことも指摘されている<sup>2)</sup>。

一方、局所換気の換気対象空間は室内の一部である。換気に必要な動力は動かす空気量に比例するので、換気対象空間が小さければ動かす空気量も少なくなり局所換気の方が効率は高いと言える。局所換気には局所排気、局所給気、プッシュプル換気の手法がある。局所排気は有害物質の発散源の近くに吸込み口を設け、吸込み気流を形成し、発散源から発生する有害物質を吸込み口でできるだけ高い濃度で吸込み排出しようとするものである。局所給気は作業場所で必要な量の清浄空気を供給するものである。局所給気では、発散する汚染物質を取り除くことはできないが、局所的に清浄な空気の領域を維持することができる。作業者の呼吸域が有害物質にばく露される

場合、局所給気の吹き出し口を設置して、呼吸域を保護することができる。プッシュプル換気は、発散する有害物質が含まれる空気をプッシュプル気流に乗せ、吸込み開口の近くまで搬送し、排出するものである。

### 1.1.2 工場換気の空気環境

工場内の生産活動に伴って発生する有害物質に対する作業者のばく露の評価指標として、日本産業衛生学会が勧告する許容濃度がある。許容濃度は、作業者が有害物質に長時間ばく露されることにより、その有害物質の空気中の濃度がこの値以下であれば、作業者に悪影響が見られないと考えられる濃度として定められている<sup>3)4)</sup>。但し、大気汚染と一般居室は対象としていない。

一方、アメリカの産業衛生専門家会議(ACGIH)の TLV(Threshold Limit Values)は世界で最も使われている基準濃度である。TLV は基本的に一日の労働時間の時間加重平均濃度であるが、物質によっては短時間でも高濃度ばく露が許されないものがあるため、このことを考慮し、ACGIH では TLV を表 1.1 のように示している。

表 1.1 ACGIH による TLV<sup>3)</sup>

時間加重平均濃度(TLV-TWA)	1日8時間、1週40時間の正規の労働時間中の時間加重平均濃度
短時間ばく露限度(TLV-STEL)	15分以内の短時間ばく露があっても、特別な障害が生じない濃度
天井値(TLV-C)	たとえ瞬間的にでも超えてはならない濃度

### 1.1.3 工場換気の温熱環境

温熱環境に対する工場換気は、製品の品質管理や作業者の快適性あるいは熱ストレスの解消を目的としている。ここでは作業者に対する温熱環境について述べる。

人体は温度を一定に維持するために、体内における熱発生と体外への熱放出を同じ量にしなければならない<sup>4)</sup>。一般的に、人間と周囲環境との熱交換は対流、放射及び蒸発などの形で行われるが、これらの熱の間に熱収支式が成り立つ。この熱収支に影響する因子としては作業強度、着衣状態、環境中の温湿度、放射熱及び作業空間の気流状態がある。これらの因子を統一した熱環境指標として湿球黒球温度指標(WBGT=Wet-Bulb Globe Temperature Index)が最も推奨されている。その算出式は次の

ように表される。

室内または屋外で日光照射のない場合

$$\text{WBGT} = 0.7\text{NWB} + 0.3\text{GT} \quad (1-1)$$

屋外で日光照射がある場合

$$\text{WBGT} = 0.7\text{NWB} + 0.3\text{GT} + 0.1\text{DB} \quad (1-2)$$

ここで NWB(natural wet-bulb temperature)は自然気流にばく露された状態で測定される湿球温度(°C)、GT(globe thermometer temperature)は直径 15cm の黒球温度計示度(°C)、DB(dry-bulb temperature) は熱放射源からの直接の影響を避け、自然気流は損なわれないように球部を囲ったもので測定された乾球温度(°C)である。

日本産業衛生学会では、WBGT 指標を用いて高温の許容基準を表 1.2 のように定めている。この許容基準は、高温の熱環境において、作業に習熟した健康な成年男子作業者が、夏の作業服を着て適当な水分・塩分を補充しながら作業を行い、連続 1 時間作業或いは断続 2 時間作業を基本として、健康で安全に、かつ能率の低下がない作業場における条件である。

表 1.2 高温の許容基準<sup>3)</sup>

作業強度	代謝エネルギー [kcal/h]	WBGT [°C]
RMR～1(極軽作業)	～130	32.5
RMR～2(軽作業)	～190	30.5
RMR～3(中程度作業)	～250	29.0
RMR～4(中程度作業)	～310	27.5
RMR～5(重作業)	～370	26.5

表 1.2 で作業強度を表す作業の時に消費された代謝エネルギーの程度は RMR で表わされている。それに関する計算を次の式で示す。

$$\text{RMR} = (\text{E} - \text{B})/\text{B} \quad (1-3)$$

ここで、E は作業時のエネルギー消費量、R は安静時のエネルギー消費量、B は基礎代謝量である。通常の作業現場では、RMR が平均 1.0 前後の継続作業が多いため、作業強度は RMR が 2.0 までの作業と考えてよい<sup>3)</sup>。

#### 1.1.4 工場換気的手段

全体換気は作業場の全空間の汚染物質の濃度を希釈する方法であり、作業場の汚染された空気を清浄な空気で置換する置換換気と清浄な空気を導入する希釈換気の2つの方法がある。

置換換気は、床から給気し、室内に温度成層が形成できるため、汚染物質はその上昇気流に乗せられ、天井の排気口から排出する換気手段である。また、置換換気では室内に一方向の流れを形成し、理想的な場合には室内の空気をピストンで押し出すように入れ替える換気法である。ピストン換気は設備費が高いため、有害物質が発散する作業現場に適用することはコスト的に難しいと思われる。しかし、理想的なピストン流れでなくてもこれに近い一方向流れを室内に形成することはそれほど難しいことではない。

これに対し希釈換気は、作業場の空気と導入された空気及び拡散する有害物質を混合する手法である。全体換気が利用されるのは、熱量や水分が蒸発する場合や、ガスやヒュームが発生する場合、スモークや粉じんが発生する場合、局所排気で取り除けない分を排出する場合、作業場で高湿空気が発生する場合などがある。また、換気に所要動力を必要としない場合、例えば室内の温度差に基づく浮力や風の力等の自然力を利用する場合には全体換気が用いられる<sup>5)</sup>。

これに対し、局所換気の対象は作業空間における室内の一部である。そのため、全体換気より換気に必要な所要動力が少ない、つまり、エネルギーの消費が全体換気より少ない利点がある。局所換気が最も使われるのは次のような場合とされている<sup>1)</sup>。有害性が強いガスや粉じん、ヒュームが発生する場合、局所的に高温熱源や高温蒸気などの発生源がある場合、外気へ排出する前に除じん・集じんや清浄装置を必要とする場合などである。なお局所換気の中に局所排気、局所給気及びプッシュプル換気を含んでいる。

局所排気は図 1.1に示したように吸引口であるフードに吸込み気流を形成することにより、拡散する前に有害物質を取り除く排気の手法である。

局所排気では、フードに吸い込まれる空気と同じ量の給気が必要となる。そのため、密閉度が高い作業空間の場合、清浄な空気の供給を考えなければならない。また、作業者が吸引フードの前で作業する場合、作業者の周囲に乱れ気流が生じ、渦が形成される。この渦によって、作業者の呼吸域が汚染される可能性も考えられる。

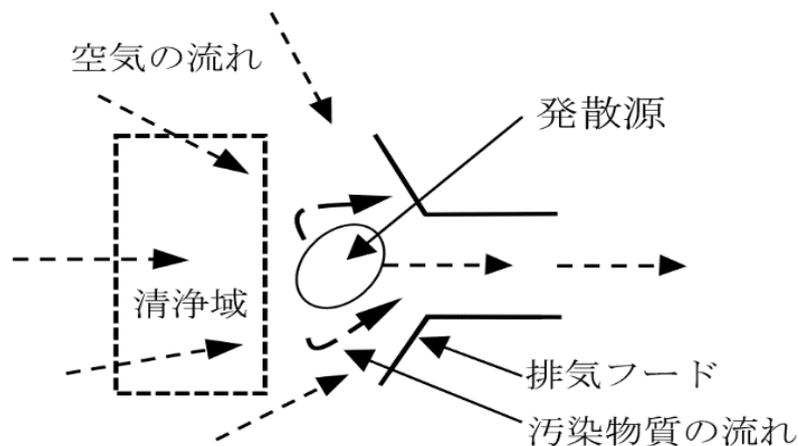


図 1.1 局所排気

局所給気は、局所排気が局所的な発生源から発生した汚染物質を吸い込み、排出することによるのに対して、作業場に清浄な空気を局所的に供給することによって発生する汚染物質を制御する手段を言う。このような局所給気に用いられる気流は、流れが一定方向で遠い距離まで届く性質を持っている円形又は噴流がよく知られている。一般的に排気フードと同時に使用されることが多い。

プッシュプル換気はフードと汚染物質の発散源との距離が遠い場合、吹き出し気流を加えることによって、有害物質をフードの開口面まで搬送するような手法である。

## 1.2 局所排気装置の概要

有害物質が発生する作業環境では、発生する汚染物質を作業者の呼吸域にまで拡散させることなく吸引・排出する局所排気装置が、作業環境改善を目的とした工場換気における最も有効な手段であり、広く利用されている。局所排気装置とは、図 1.2 に示すようにフード、吸込みダクト、排気処理装置、ファン、排気ダクトおよび排気口の各部から構成されている。

吸込み開口であるフードに局所的な吸い込み気流を形成し、発散する有害物質が周囲に拡散する前にできるだけ高い濃度の状態で吸い込み、同時に吸い込まれる周囲の空気によって有害物質がダクト内を運ばれていく。この原動力になっているのが、一般には建物の外に設置される排風機であり、排風機に吸い込まれる前に排気処理装置を置き、空気の流れの中から有害物質を除去する。また、その排風量は発生する汚染物質あるいは作業場の汚染された空気を十分に捕捉するために必要な風量を満足しなければならない。また、汚染物質の発散源に対するフードの設計上の留意点を十分に理解することも必要である。具体的には汚染物質の発生量と空気中での挙動、周りの空気の動き、発散源の形状・寸法、作業性などを考え、最適な形状・寸法のフードを設置しなければならない。

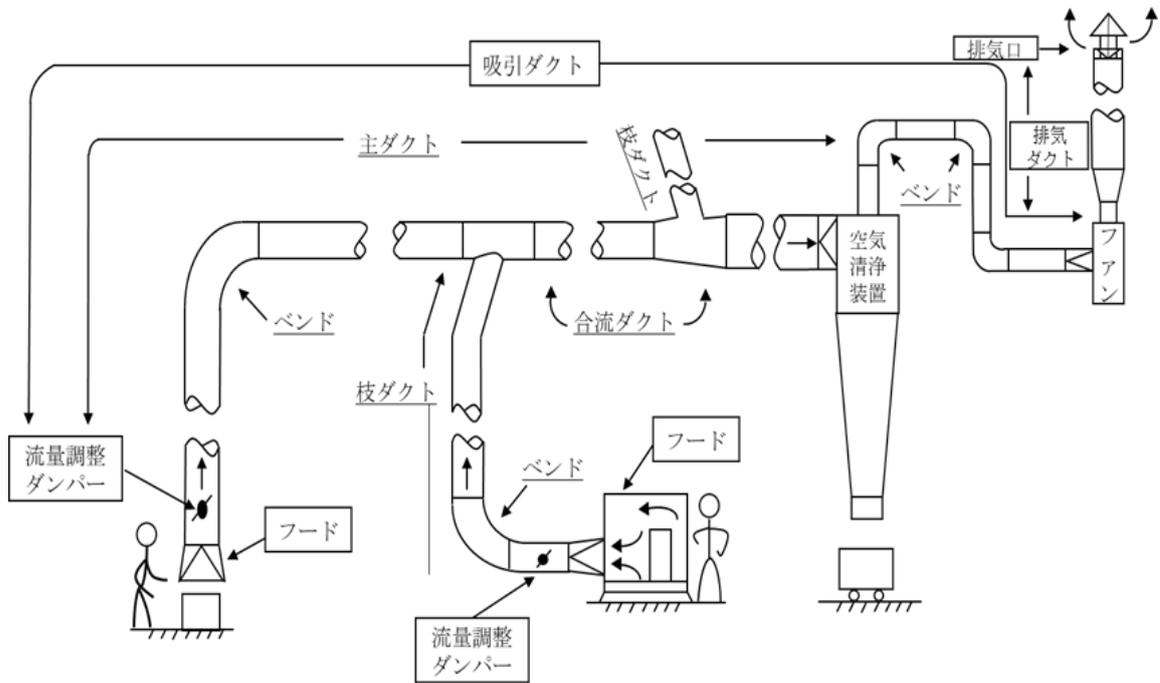


図 1.2 局所排気装置の構成

ダクトは、フードに吸い込まれた空気を排気口まで搬送するための導管である。フードから空気清浄機を通りファンまでを吸引ダクト、ファンから排気口までを排気ダクトと呼ぶ。ダクト内を流れる空気の速度を搬送速度と呼ぶ。気流の力で汚染物質の粒子を搬送するために、搬送速度を十分に大きくする必要がある。また、搬送速度は大きすぎるとダクト内の摩擦や渦などにより圧力損失を増やし、ファンの所要動力を大きくして運転コストを過大にする。反対に搬送速度を小さくすれば汚染物質の粒子

がダクトの内壁に留まり圧力損失を増やし、局所排気装置の効果を失うことになる。このように搬送速度は排気装置の性能を左右するものであり、ダクトの断面寸法を決めるための重要な要素である。実際のダクト設計の際には、実際のダクト設計の際には、表 1.3 のような搬送速度を用いる。

表 1.3 一般的な搬送速度の範囲<sup>4)</sup>

汚染物質	例	搬送速度 (m/s)
ガス、蒸気、 ミスト	各種のガス、蒸気、ミスト	5～10
ヒューム、 きわめて軽い乾燥 粉じん	酸化亜鉛、酸化アルミニウム、 酸化鉄等のヒューム、木、ゴム、プラスチック、 綿等の微細な粉じん	10
軽い粉じん	綿じん、おがくず、殻粉、ゴム、プラスチック 等の粉じん、羽布研磨粉じん、 メタリコン粉じん	15
一般工業 粉じん	毛、木屑、かな屑、サンドブラスト、 グラインダ粉じん、耐火れんが粉じん	20
重い乾燥 粉じん	金属粉、鋳物砂	25
重くて 湿った粉じん	湿った鉛粉、湿った鋳物砂	25 以上

ダクトの断面積と排风量と流速の関係は、式(1-4)で表される。

$$A_d = \frac{Q}{60} \cdot V_t \quad (1-4)$$

ここで  $A_d$  は開口面面積( $m^2$ )、 $Q$  は排风量( $m^3/min$ )、 $V_t$  はダクト内の搬送速度( $m/s$ )である。

最近では省エネルギーの観点から運転コスト削減の目的で、有機溶剤の場合、搬送

速度を 5 m/s 以下に設計することがよく行われる。また、粉じん等の粒子状物質に対しても、最近ではフードに近いダクトのできるだけ上流の位置に前置き除じん装置を設けて粒径の大きい粒子を取り除き、粒径が小さい沈降堆積しにくい粒子だけを 10m/s 以下の搬送速度で搬送する設計が行われている。

空気清浄装置は空気中の有害物質を大気中に放出する前に取り除く装置である。排気に含まれる有害物質などを分離、回収又は無害化して、大気中に放出された汚染空気が外気に乗って再び作業場に戻らないことを目的としている。また、大きく分けて粉じんやヒュームのような粒子状物質などに対する除じん装置と、ガスや有機溶剤蒸気などの気体物質に対する排ガス処理装置がある。

ファンはフードに吸い込まれた空気が排気口から排出されるまでの間に生じる圧力損失に相当するエネルギーを加える機械であり、排風機とも呼ばれる。ファンの選定は型式によって使用に適した静圧の範囲が決まっているので、まず、求めたファン前後の静圧差に見合った型式を選び、次にメーカーのカタログなどにある選定図を使って必要な排風量を出せる大きさのファンを選ぶ。

排気口は局所排気装置の出口に相当する。排気口は雨水が入らないような構造にし、屋外に設けなければならない。その形状は特に決まっていないため、圧力損失ができる限り小さいことや排気騒音がでないこと及び排気が大気中によく拡散できる形が良い。また、有機系には排気口の構造要件として、排気口濃度が作業環境評価基準で定められた管理濃度の 1/2 未満でない場合には、排気口の位置を屋根より 1.5(m)以上高くするように規定している。

### 1.3 フードの特性と分類

#### 1.3.1 フードの特性

局所排気装置は汚染物質の発生源対策として用いるものであることから、まず汚染物質とその発生源の性状を十分に把握することが重要である。したがって、汚染物質の発生源の形状、寸法、汚染物質の発生量と空気中での挙動、周囲の空気の動き、作業性などを考慮して最適な形状または寸法のフードを設置することが必要である。

局所排気装置ではフードで吸い込んだ空気量のすべてを排気ダクトから屋外に排出することになる。したがって、この空気量と同じ量の空気を室内に供給しなければならない。この空気のことを補給空気と呼んでいるが、密閉度の低い建屋であればすきまから外気が進入することになるが、密閉度が高くなるにつれて必ず補給空気のことを考慮しなければならない。窓や他の開口から自然に流入する空気を補給空気と考え

るのであれば、その入口を常に確保することを忘れてはならないし、室内が空調されているような場合には強制的に補給することになる。

局所排気フードに流入する気流の中に作業者が位置する場合、流れの速度が大きいと図 1.3 に示すように流れは作業者の体の周りから剥離し、渦が形成される。このような流れの中に発散する有害物質が巻き込まれて、作業者の呼吸域が汚染されてしまう恐れが出てくる。これを防ぐには、フードの吸込み速度が過大にならないようにすることが必要で、吸込み速度を大きくすることがより安全につながると思いがちであるが、かえって悪い結果となることに注意しなければならない。

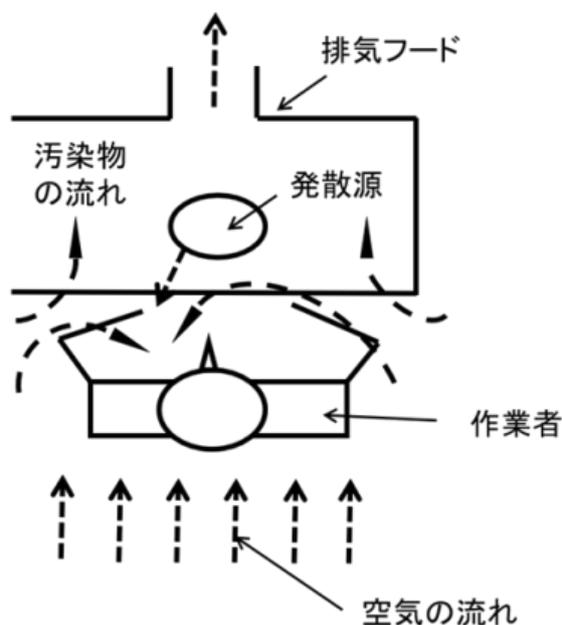


図 1.3 ドラフトチャンバー

図 1.3 に示した局所排気フードは一般にドラフトチャンバーと呼ばれているもので、作業者の背後からの流れが作業者の周りから剥離し渦が形成されることがある。このような状態になると、チャンバー内で発生した有害物質がフード開口部から漏れ出し、作業者の呼吸域に巻き込まれることになる。そこで図 1.4 の場合には、作業者の頭上から清浄な空気を吹き出し呼吸域を保護しようとするものである。特に、労働衛生法規で大きめの制御風速が定められたような場合には注意しなければならない。フードは基本的に開口に吸い込まれる流れを利用して発生する汚染物を吸引するものであるから、開口に吸い込まれる流れの特性を十分に理解しておかなければならない。また、フードの必要排風量は汚染物を吸引するための必要最小量とするべきであって、排風量が過大となることを避けなければならない。

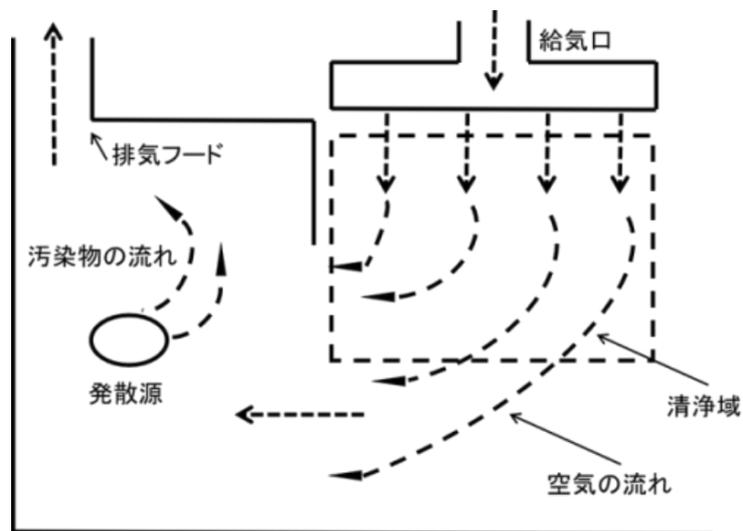


図 1.4 作業者の頭上から吹き出す空気の流れ

フードは発生する汚染物を周囲に拡散させることなく排出することが目的であるので、汚染物発生源付近で作業する作業者の呼吸域を常に清浄な状態に保つことは最も重要なことである。例えば、図 1.5 は囲い式フードのブース型である。このフードは作業性がよい囲い式フードとして従来からよく用いられているが、フード内部はすべて汚染された領域と考えなければならない。したがって、図 1.5 に示すようにフード内部に作業者が立ち入ることはその呼吸域を汚染された領域に持ち込む結果となる。吹出し側に送風機を用いない水平流による密閉式プッシュプル型換気装置においても、局所排気装置であるブース型フードの内部にはほかならないと考えられるので、同様な問題点が指摘されている<sup>6)</sup>。

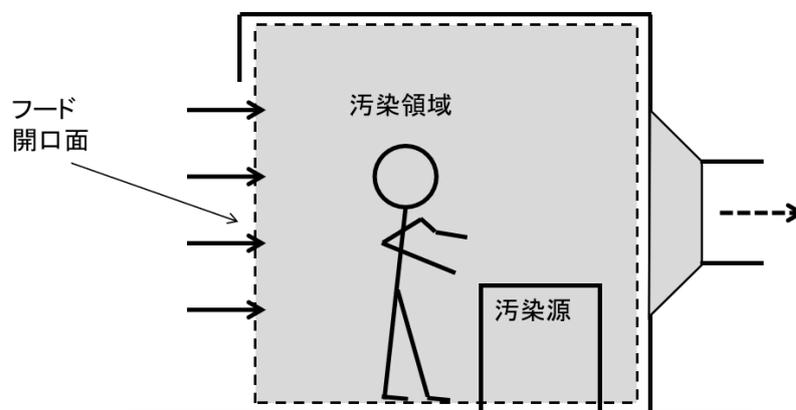


図 1.5 作業者の呼吸域(囲い式フードの場合)

また、図 1.6 は上方吸引型の外付け式フードでキャノピフードとも呼ばれるものである。このフードは周囲が開いていることから、作業性がよいと考えられ多くの作業に用いられているが、作業の姿勢によって図 1.6 に示すように呼吸域を発生する汚染物で汚染された領域に持ち込むことになる。

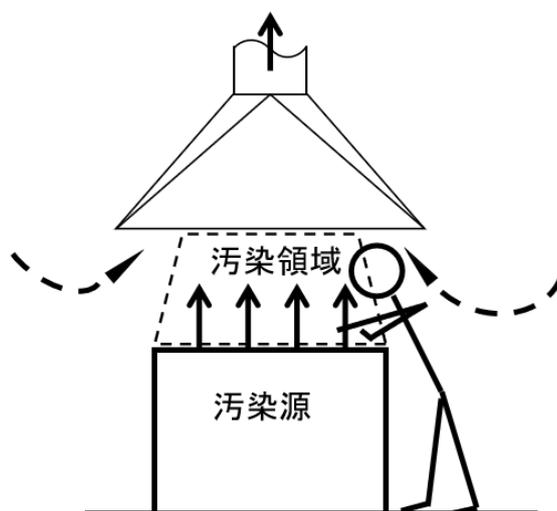


図 1.6 作業者の呼吸域(キャノピフードの場合)

### 1.3.2 吸込み気流の特性

開口に吸い込まれる流れとして、図 1.7 に示すような点開口が自由空間に設置されている場合について考えると、吸込みの流れはほとんどその方向性を持たないことから、開口から  $X(m)$  離れた位置において開口に向かう流れの速度  $V(m/s)$  は、半径  $X(m)$  の球面上で等しくなると考えられる。したがって、点開口における吸込み流量  $Q(m^3/s)$  と開口に向かう流れの速度との間には、球面の面積が  $4\pi X^2(m^2)$  で表されることから、式(1-5)のような関係が存在することになる。

$$Q = (4\pi X^2) \cdot V = 12.57VX^2 \quad (1-5)$$

また、開口が長さ  $L(m)$  のスロット状開口の場合には、図 1.7 を二次元流れとして考えることができ、半径  $X(m)$  の円筒面で速度が等しくなると考えられることから、点開口の場合と同様にして式(1-6)が得られる。

$$Q = (2\pi XL) \cdot V = 6.28VXL \quad (1-6)$$

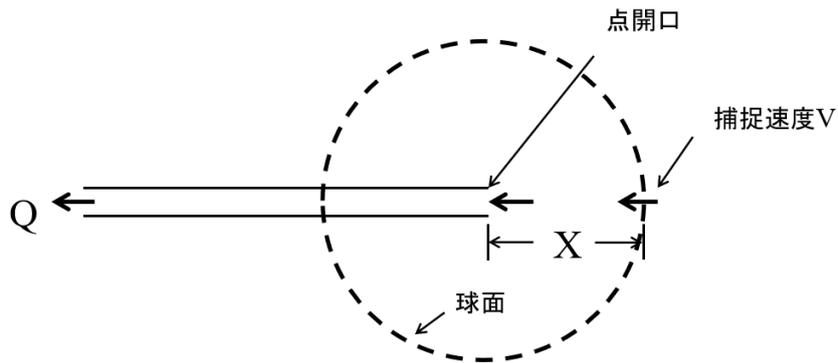


図 1.7 点開口周りの流れ

これらの関係は、いずれも無限に小さい開口に吸い込まれる流れの開口から  $X$  の位置における速度と流量の関係を示している。

以上の式から明らかなように、開口から  $X(\text{m})$  離れた位置における吸込み速度  $V(\text{m/s})$  は三次元流れの場合には  $X^2$  に反比例、二次元流れの場合には  $X$  に反比例することがわかる。いずれの場合でも開口から離れるに従って、速度が極端に小さくなることが開口に吸い込まれる流れの大きな特徴である。

いま、開口から  $X$  の位置にある汚染物を開口に吸引するために、速度  $V$  が必要である場合、この速度のことを制御風速(捕捉速度)と呼び、制御風速が決まれば式(1-5)あるいは式(1-6)から必要排风量  $Q$  を求めることができる。しかし、実際のフード開口は有限の面積を持つことから、これらの式をそのまま適用することは困難である。

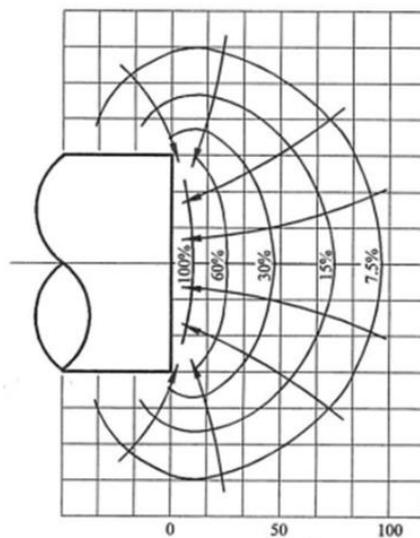


図 1.8 円形開口周りの吸込み流れ

Dalla Valle は有限の大きさを持つ吸込み開口周りの流れの等速度面を実験的に求めている。図 1.8 はその一例で、自由空間に置かれた円形開口周りの等速度面を表している。さらに、Dalla Valle は縦横比の異なる長方形開口面についても多くの実験を行い、その結果、開口から X (m) 離れた中心軸上の速度 (m/s) と吸込み流量 Q(m<sup>3</sup>/s) の関係を式(1-7)で表した。

$$Q = (10X^2 + A) \cdot V \quad (1-7)$$

### 1.3.3 フードの分類<sup>4)</sup>

局所排気装置に使われているフードは形状、発生源との位置関係及び吸込みの方向などにより様々な形式に分けられる。表 1.4 にフードの分類を示す。

表 1.4 局所排気フードの型式の分類<sup>4)</sup>

型式		適応作業例
囲い式	カバー型	粉砕、ふるい分け、貯槽、仕込、 工作機械
	グローブボックス型	放射性同位元素取扱、毒性ガス取扱、 遺伝子組換え、サンドブラスト、 ジョットブラスト
ブース式	ドラフトチャンバー型	化学分析、化学実験、 放射性同位元素取扱、研磨、計量、袋詰
	建築ブース型	吹付塗装、計量、容器詰め
外付け式	スロット型	めっき、ディップ塗装、脱脂、酸洗浄、 接着
	ルーバ型	あらゆる作業
	グリッド型	はけ塗装、粉砕、シェークアウト
	円形型、長方形型	あらゆる作業
レシーバ式	キャノピー型	溶解炉、溶融炉、鍛造、鋳造、熱処理
	グラインダカバー型	研磨、バフ研磨、卓上グラインダ
	円形型、長方形型	研磨、バフ研磨

### 1.3.3.1 囲い式フード<sup>3)</sup>

汚染物の発生源がすべてフード内部に囲われた形状のもので、図 1.9 に示すように開口面にフード内部へ向かう流れを形成し、この流れで内部で発生した汚染物がフード外へ漏れること、あるいは拡散することを制御するものである。したがって、フード開口面の面積を小さくするほどフードの排風量は少なくてすむことになる。しかし、フード開口面を小さくすることは汚染物の漏れを制御するためには大きな効果をもたらすが、その反面、フード内部の発生源に対する作業性は悪くなる。このため図のように作業を行う一面を開放したブースと呼ばれる形状のものがよく用いられている。

汚染物の発生源がフード内部に囲われているため、周囲の気流の影響を受けにくく、排風量も少なくてすむことから、囲い式フードはフードの中で最も性能の良いフードといわれている。しかし、先にも述べたように開口面で汚染物を制御するため、フード内部はすべて汚染された領域として考えなければならず、特にブースの場合には内部に作業者の呼吸域を持ち込まないように注意しなければならない。

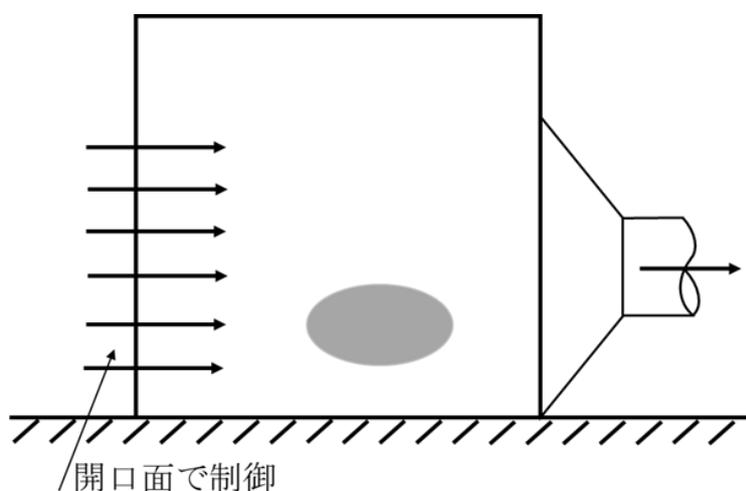


図 1.9 囲い式フード

有機溶剤中毒予防規則や特定化学物質障害予防規則などでは、囲い式フードの制御風速は開口面で測定された最低風速と定められている。囲い式フードの排風量は開口面風速と開口面積との積として求められるが、このような制御風速の定義では、フード計画時に開口面での風速分布、平均開口面風速と最低風速の関係などが明らかになっていることが要求される。

しかし、各種形状のフードの排風量を求める際に、経験によるか、あるいは模型実

験や数値計算で開口面風速分布を予測した後、算出しなければならない。さらに、化学実験用のドラフトチャンバーあるいはヒュームフードでは、開口面積が前面の扉の開閉により自由に調節されるような構造に作られているが、特に有害度の高い物質を内部で取り扱う場合、開口部を小さくすることが多い。作業者は開口の外側に位置しているが、開口から流入する流れの速度が増加するにつれて作業者背後からの流れが作業者まわりではなく離し、作業者の前面に負圧部が形成されることがある。このような場合にはフード開口部にも負圧部が影響を及ぼすことになり、内部の空気が漏出するおそれが生じるので注意しなければならない。また、不適切な幾何学的設計、設置、開口部での人の通行及びオペレータの手の動きなどが慎重に考慮されていない場合、漏れが発生してしまう可能性がある<sup>8-14)</sup>。

そして、過去 10 年間に、エアカーテンヒュームフード(air-curtain fume hood)、サッシなし傾斜エアカーテンヒュームフード(sash-less inclined air-curtain fume hood)、傾斜エアカーテンヒュームフード(inclined air-curtain fume hood)など、革新的な設計コンセプトを備えたいくつかの化学実験用のドラフトチャンバーが提案されてきた<sup>15-18)</sup>。これらの新たな技術は、換気フードの設計に適用された。EN-14175(ドラフトチャンバー型式試験)法および ANSI 米国規格協会 (American National Standards Institute) /ASHRAE(アメリカ暖房冷凍空調学会)-110(ヒュームフード性能試験)法によって測定したこれらの技術で開発したフードは、低吸引流量での静的試験または動的試験でほぼゼロの漏れレベルを示した<sup>19-21)</sup>。

### 1.3.3.2 ブース式フード<sup>3)</sup>

ブース式フードは作業のために開口面となる 1 面または 2 面を除く有害物質の発生源の周囲を囲むフードである。作業者は開口面に立って背後からくる清浄な空気を呼吸しながら、中に向かって作業するのがブース式フードの特徴である。また、ブース式フードの開口面は囲い式フードより大きく、有害物質の拡散・漏洩を防止するために、必要排风量は囲い式フードと比べて大きい。作業性が良くなり、開口面の周囲の壁が有害物質の吸引に必要な気流を減らすフランジの役割を果たす。有機則をはじめとする規制ではブース式も囲い式の一つとして分類されている。図 1.10 に側方吸引型ブース式フードを示す。

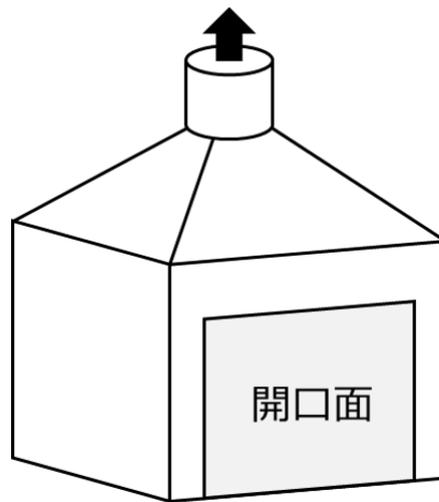


図 1.10 ブース式フード

### 1.3.3.3 レシーバ式フード<sup>3)</sup>

作業場で有害物質の発散に伴って熱浮力による上昇気流、また回転による慣性気流等一定方向の気流を生じることにより、有害物質が一定の方向に拡散する場合、その気流を受け止める位置にレシーバ式フードを設置する。外付け式フードとフードの開口面の形状は似ているが、有害物質を吸い込む機能や必要排風量を計算する方法が外付け式フードと異なる。レシーバ式フードによる吸引の様子を図 1.11 に示す。

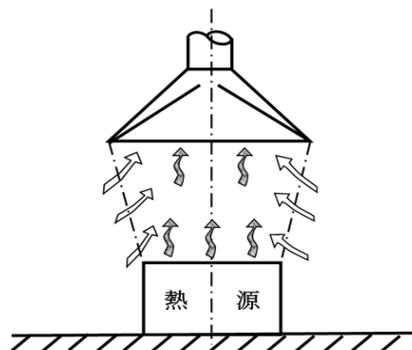


図 1.11 レシーバ式フード

### 1.3.3.4 外付け式フード<sup>3)</sup>

外付け式フードは図 1.12 に示したように、有害物質の発生源はフード開口面の外側に位置するもので、開口面から離れた距離で有害物質を捕捉する必要がある。フードに吸い込まれる気流は開口面からの距離が離れるほど、有害物質を捕捉する風速は極めて小さくなる。図 1.13 に示すようにフードの開口面の周りにフランジを設けること

により、開口面後方からの吸い込み気流が抑えられる。その結果、等速面がフードの前方に伸びるので、このような効果はフランジ効果と呼ばれ、必要な排風量を低減することができる<sup>1)</sup>。フランジの適切な設計と配置によって、作業者の健康と安全を守るための効果的な気流制御が実現される。

そして、外付け式フードは囲い式フードと異なり、外乱気流による妨害を受けやすい欠点がある。また、外付け式フードの形状から分類すると円形型、長方形型、スロット型フードがある。フードの吸引方向により上方吸引型フード、側方吸引型フード、下方吸引型フードに分けられる。

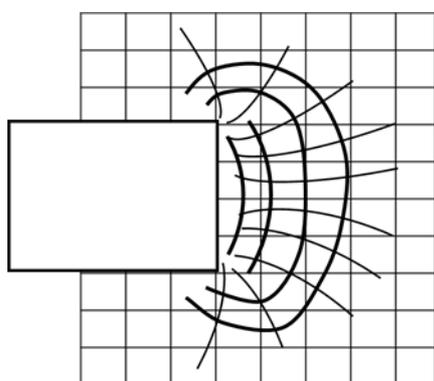


図 1.12 円形開口周りの吸込み流れ

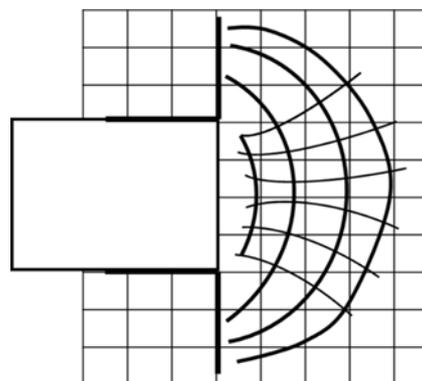


図 1.13 フランジ効果

#### 1.4 制御風速

制御風速とは、作業場で発生源から発散した有害物質を、発生源と作業者の呼吸域との間の点でフードに捕捉するために必要な気流の最小速度のことをいう。

囲い式フードやブース式フードの場合、開口面上で吸込み気流の速度が最小となる点を捕捉点と定義している。一方、外付け式フードの場合、フードの開口面から離れるに従って吸込み気流の速度は急激に低減することが知られている<sup>5)</sup>。ACGIHでは、外付け式円形型フードの場合、開口面から捕捉点までの距離はフードの開口面の直径以内としている。また、長方形型フードの場合、その距離はフード開口面の短辺の1.5倍以下としなければならない<sup>4)</sup>。日本で最も使われている制御風速の値を表1.5に示す。この表は1920年代アメリカの労働衛生工学者 A.D.Brandt が提案した制御風速の値である<sup>6)</sup>

表 1.5 一般的に適用される制御風速<sup>6)</sup>

汚染物質の発生状況	例	制御風速 (m/s)
静かな大気中に、実際上ほとんど速度がない状態で飛散する場合	液面から発生するガス、蒸気、ヒューム等	0.25～0.5
比較的静かな大気中に、低速度で飛散する場合	ブース式フードにおける吹付塗装作業、断続的容器づめ作業、低速コンベヤー、溶接作業、メッキ作業、酸洗作業	0.5～1.0
速い気流のある作業場所に、活発に飛散する場合	奥行の小さなブース式フードの吹付塗装作業、たるづめ作業、コンベヤーの落とし口、破碎機	1.0～2.5
非常に速い気流のある作業場所または高初速度で飛散する場合	研磨作業、ブラスト作業、タンブリング作業	2.5～10.0

また、粉じん則で定められたフードの型式ごとの制御風速を表 1.6 に、特定粉じん発生源ごとに定められた制御風速を表 1.7 に示す。

表 1.6 粉じん則で定められた制御風速<sup>6)</sup>

フードの型式		制御風速(m/s)
囲い式フード		0.7
外付け式フード	側方吸引型	1.0
	下方吸引型	1.0
	上方吸引型	1.2

表 1.7 特定粉じん発生源ごとの制御風速(その 1)<sup>6)</sup>

特定粉じん発生源		制御風速(m/s)			
		囲い式 フード	外付け式フード		
			側方 吸引型	下方 吸引型	上方 吸引型
1	屋内において、手持式又は可搬式を除く動力工具により、岩石又は鉱物を裁断する箇所	0.7	1.0	1.0	—
2	屋内において、手持式又は可搬式を除く動力工具により、岩石又は鉱物を彫り、又は仕上げする箇所	0.7	1.0	1.0	1.2
3	屋内において、研磨材の吹き付けにより研磨し、又は岩石、若しくは鉱物を彫る箇所	1.0	—	—	—
4	屋内において、研磨材を用いて手持式または可搬式を除く動力工具により、岩石、鉱物若しくは金属を研磨し、又は金属を裁断する箇所	0.7	1.0	1.0	1.2
5	屋内において、手持式を除く動力工具により、鉱物等、炭素原料又はアルミニウムはくを破碎し、又は粉碎する箇所	0.7	1.0	—	1.2

表 1.8 特定粉じん発生源ごとの制御風速(その 2)<sup>6)</sup>

特定粉じん発生源		制御風速(m/s)			
		囲い式 フード	外付け式フード		
			側方 吸引型	下方 吸引型	上方 吸引型
6	屋内において、手持式を除く動力工具により、鉱物等、炭素原料又はアルミニウムはくをふるい分ける箇所	0.7	—	—	—
7	セメント、フライアッシュ又は粉状の鉱石、炭素原料、炭素製品、アルミニウム又は酸化チタンを袋詰めする箇所	0.7	1.0	1.0	1.2
8	粉状の鉱石又は炭素原料を原料又は材料として使用する物を製造し、又は加工する工程において、屋内の、粉状の鉱石又は炭素原料又はこれらを含む物を混合し、混入し、又は散布する箇所	0.7	1.0	1.0	1.2
9	ガラス、ほうろう、陶磁器、耐火物、けいそう土製品、研磨材、又は炭素製品を製造する工程において、屋内の、原料を混合する箇所	0.7	1.0	1.0	1.2
10	耐火れんが又はタイルを製造する工程において、屋内の、湿潤でない原料を動力により成形する箇所	0.7	1.0	1.0	1.2
11	陶磁器、耐火物、炭素製品を製造する工程において、動力工具により製品を仕上げする箇所で、圧縮空気を用いてちりを払う箇所	0.7	1.0	1.0	—

表 1.9 特定粉じん発生源ごとの制御風速(その 3)<sup>6)</sup>

特定粉じん発生源		制御風速(m/s)			
		囲い式 フード	外付け式フード		
			側方 吸引型	下方 吸引型	上方 吸引型
12	陶磁器、耐火物、けいそう土製品、研磨材、又は炭素製品を製造する工程において、屋内の手持式を除く動力工具により製品または半製品を仕上げする箇所で、圧縮空気を用いてちりを払う箇所以外の箇所	0.7	1.0	1.0	1.2
13	砂型を用いて鋳物を製造する工程において、屋内の、型ばらし装置を用いて砂型をこわし、又は砂落としする箇所	0.7	1.3	1.3	—
14	砂型を用いて鋳物を製造する工程において、屋内の、手持式工具を除く動力により砂を再生する箇所	0.7	—	—	—
15	砂型を用いて鋳物を製造する工程において、屋内の、手持式工具を除く動力により砂を混練する箇所	0.7	1.0	1.0	1.2
16	屋内において、手持式を除く溶射機を用いて金属を溶射する箇所	0.7	1.0	1.0	1.2

有機溶剤中毒予防規則および特定化学物質等障害予防規則では表 1.10 および表 1.11 に示すような制御風速 (捕捉速度)が定められているが、これらの値は周囲の気流速度が 0.3m/s である場合を想定した値で、どのような場合においてもこの値が最適な制御風速であるとは限らない。実際の設計にあたっては、先に示した表などを参考に

すればよい。

表 1.10 有機溶剤中毒予防規則で定められた制御風速<sup>6)</sup>

フードの型式		制御風速(m/s)
囲い式フード		0.4
外付け式フード	側方吸引型	0.5
	下方吸引型	0.5
	上方吸引型	1.0

表 1.11 特定化学物質等障害予防規則で定められた制御風速<sup>6)</sup>

物の状態	制御風速(m/s)
ガス状物質	0.5
粒子状物質	1.0

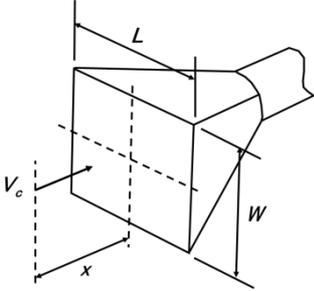
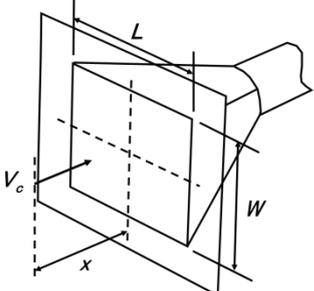
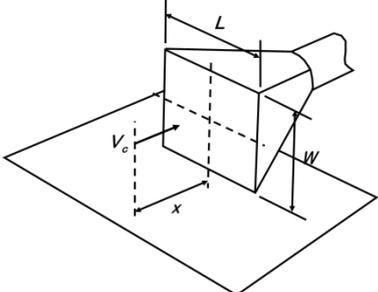
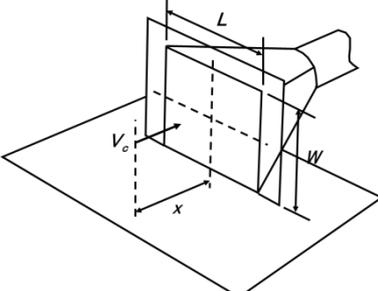
しかし、熱源から上昇するプルームのように上昇速度を無視することができない発生源も存在する。このような場合には発生する汚染物の流量を無視することができず、後に述べるように捕捉速度に基づいて排風量を算出することができなくなる。

### 1.5 排風量の計算とその問題点

局所排気装置では、フードの形状及び有害物質の発生源に対する設置場所を決め、制御風速とそれに対するフードの開口面からの距離が決まれば、制御風速を得るために必要なフードの排風量が計算できる<sup>6)</sup>。表 1.12 に側方吸引型外付け式フードの排気風量を求める式を示した。

また、それらの式から明らかなように、フランジを設置することにより排風量は 75% になる。したがって、フード開口には必ずフランジを設置するようにフードを計画しなければならない。また、いずれの場合にも開口からの距離  $x$  によって排風量は急激に増大するので、フードはできる限り発生源に近づけて設置しなければならない。

表 1.12 側方吸引型外付け式フードの排気風量を求める式<sup>6)</sup>

フードの型式	例図	排気風量 $Q(\text{m}^3/\text{min})$	
① 外付け式 (自由空間設置)		$Q = 60 \times V_c \times (10x^2 + LW)$	(1-8)
② 外付け式 (自由空間設置、フランジ付き)		$Q = 60 \times 0.75 \times V_c \times (10x^2 + LW)$	(1-9)
③ 外付け式 (作業台上設置)		$Q = 60 \times V_c \times (5x^2 + LW)$	(1-10)
④ 外付け式 (作業台上設置、フランジ付き)		$Q = 60 \times 0.75 \times V_c \times (5x^2 + LW)$	(1-11)

以上に示した制御風速あるいは捕捉速度に基づいてフードの排風量を求める場合、いずれもその計算式は極めて簡単な形で与えられている。しかし、次に示す二点については十分留意しておかなければならない。

(1) いずれも排風量は制御風速あるいは捕捉速度に比例する形であるため、適切な制御風速(捕捉速度)の選定を行わなければならない。

(2) いずれの式も、ある点(囲い式フードではフード開口面、外付け式フードでは開口からx離れた点)である大きさの速度(制御風速または捕捉速度)を得るために必要な排风量として考えているため、発生する汚染物の量はいっさい考慮されていない。したがって、汚染物の発生量が無視できないような発生源に対してこれらの式を適用することはできない。

また、鑄造や熱処理等の現場で使われるレシーバ式フードの排风量においては基本的に流量比法で計算するが、乱れ気流の影響を避けるために必要な安全係数の根拠が明らかでないという問題が残っている<sup>7)</sup>。

1980年代後半より、アメリカの研究者を中心に、有限要素法によるコンピューターで気流の分布をシミュレートする方法でフードの吸引気流の分布を予測し、吸引気流による有害物質の移動状態を解明する研究が行われた。

## 1.6 外付け式フードに関する研究

1983年に国立労働安全衛生研究所(NIOSH)は10種類の労働関連疾患および傷害のリストを作成した<sup>22)</sup>。この10種類の症状のうち少なくとも7つの症状の予防は、主要な予防策としての換気に直接依存する<sup>23)</sup>。局所排気装置の中の外付け式フードは発生源から有害物質の捕集また除去に最も使用されている手法となる。

また、外付け式フードは、設置の容易さは他のフードと比べ作業性が良く、そして実装コストが安いから、様々な作業現場でよく使用されている<sup>24)</sup>。

一方、外付け式フードでは囲い式フードと異なり、フード周辺の外乱気流の影響を直接受けることになる。作業場内に生じる外乱気流の原因としては窓や扉から流入する外気、作業に伴って生じる気流および室内の空気調和設備からの気流などが考えられるが、この中で最も影響が大きいのは室外から流入する外乱気流である。また、一般的に工場内では屋外風速の20%程度の気流が生じるといわれている。そのため、作業場内で直接室外からの外乱気流の影響を受けるような場所にはフードの設置を避ける必要がある。また、汚染物発生源付近に顕著な気流が見られるような場合には、その影響が少なくなるようにバップル板などを用いることを考えなければならない。しかし、一般的には0.15~0.5m/s程度の気流が作業場の周囲にあると考えてフードを計画すべきである。

### 1.6.1 建築設備や厨房設備で使用する外付け式フードに関する研究

最近の研究の多くは、公共および住宅の厨房における室内空気質の問題に焦点を当

てている<sup>25-28)</sup>。特に、調理や調理用バーナーは燃焼生成物、汚染物質、過剰な水分を排出する可能性があり、住宅の室内空気質に悪影響を与える可能性がある。特に、揚げ物、グリル、ストーブの使用は、屋内のサブマイクロメートル粒子濃度レベルとPM2.5を通常の5~90倍以上に増加させる可能性がある<sup>29)</sup>。これまでの研究では、調理及び調理用バーナーによって生成されるサブマイクロメートルの粒子や化合物が呼吸器系の問題を引き起こす可能性が報告されている<sup>30-31)</sup>。

住宅の換気システムは、暖房と冷房のエネルギー消費において重要な役割を果たし、住居の温熱条件と水熱条件、および空気の質を決定する。他の機能の中でも、家庭用燃焼器具に必要な酸素レベルを確保するために換気システムが必要である<sup>32)</sup>。そして、厨房換気では、建築設備設計業務において重要な一環となり、<sup>33)</sup> その換気システムの設計では、レンジフードまたはその他の関連設備(ダクトの選定など)の設置に深く関わっている。

厨房換気の主な目的は、住居の中の局所的な領域から湿気や汚染物質を除去することである。レンジフードや天井に設置する換気扇は、厨房や住居の他の場所に設置されている換気扇よりもはるかに効果がある。また、レンジフードは、住宅での調理によって引き起こされる有害物質の量を減らすための重要な環境設備である。従来の厨房排気装置には、キャノピー式フード、外付け式フード等の種類がある。フードの吸引方向によって、上方吸引型、側方吸引型、傾斜吸引型フードなどが挙げられる。そして、従来のレンジフードの主な構造は、吸引口、ファンなどによって構成される。ストーブなどの加熱機器によって発生する浮力は送風機やファンなどの駆動力に合わせて、粒子、臭気、ガス、熱などの汚染物質を屋外に排出する。

以前の研究では、主に捕集効率を用いてレンジフードや厨房換気システムの性能を評価していた<sup>34-36)</sup>。いくつかの研究では、レンジフードの下にあるストーブ周囲の空気の流れを調査するために、流れの可視化技術が使用されたと報告した<sup>37)</sup>。そして、キッチンの天井を変更することでキッチンの換気が改善されたと報告した<sup>38-39)</sup>。

また、Abanto と Reggio らは、換気扇の特性曲線が数値結果に基づいて構築されたことを報告した<sup>40)</sup>。Liu らは、レンジフードのエアカーテンが厨房換気フードからの油煙の流出を制御することを報告した<sup>41)</sup>。Huang らは、静的条件(環境中の外乱気流がない場合)と動的条件(作業者が作業する際)の下で、レーザーによる流れの可視化を使用して壁掛けレンジフードの性能を研究した<sup>42)</sup>。その後、Huang らは、エアカーテンレンジフードを開発した。従来のレンジフードと比べ、レンジフードの前に傾斜エアカーテンを付け加え、オイルパンから発生する汚染物質(オイルミスト)を遮断

することができ、フード性能を向上させることができた<sup>43-44)</sup>。

## 1.6.2 有機溶剤を取扱う現場における外付け式フードの使用

### 1.6.2.1 有機溶剤の性質

有機溶剤とは、色々な物質を溶かす性質を持つ有機物の総称であり、塗装、洗浄、印刷等様々な現場で幅広く使用されている<sup>45)</sup>。これらの有機溶剤は一般的に高い揮発性を持っており、特に脂肪を溶かす性質があるため、人間の呼吸器や皮膚から容易に吸収されやすいという特徴がある。さらには、中枢神経まで到達し、急性中毒や慢性中毒を引き起こす危険性もある。

有機溶剤の体内への侵入経路は主に①吸入、②接触、③嚥下の3つがあり、①吸入が特に注意、対策すべき経路である<sup>46)</sup>。そのため有機溶剤のうち特に有害とされるものについては有機溶剤中毒予防規則や特定化学物質障害予防規則等で取り扱いが規制されている<sup>47)</sup>。

### 1.6.2.2 有機溶剤による健康被害の例

日本では、戦後復興期に石炭と水力発電を中心に産業発展した。この時期、日本は比較的豊富な石炭の地下資源を有しており、石炭の乾留によってベンゼン、トルエン、キシレンなどの有機溶剤が大量に生産され、幅広い産業で使用されるようになった。しかし、1990年代に入ると、ビニールサンダル製造業者などでベンゼンによる再生不良性貧血や白血病などの造血器障害が多発し、これが大きな社会問題となった<sup>48)</sup>。これらの健康被害は、長時間のベンゼンばく露によって引き起こされた。ベンゼンは有害な揮発性有機溶剤であり、慢性的なばく露で造血器系に悪影響がある。ビニールサンダル製造業者などでは、作業者がベンゼンと接触する環境下で作業を行っていたため、健康被害が発生した。これらの被害事故を受けて、厚生労働省令により、労働安全衛生法による有機溶剤中毒予防規則を導入した。そして、労働環境の改善や適切な個人防護具の使用、定期的な健康診断などが推奨され、ベンゼンによる健康被害のリスクを最小化するための対策が取られた。

アメリカでは、トルエン、キシレン、スチレンなどの有機溶剤へのばく露が聴覚障害の発症と関連している症例報告がある<sup>49)</sup>。動物実験においては、これらの溶剤が耳の内部の構造や聴覚神経に影響を与えることが観察されている。また、一部の物質中毒者の症例報告では、有機溶剤への長期的なばく露によって聴力の低下や聴覚障害が発生したとされている。トルエン、キシレン、スチレンなどの溶剤は揮発性が高く、

皮膚から吸収されることで体内に取り込まれる。これらの化学物質は神経系に影響を及ぼすため、中枢神経系への作用が聴覚系にも影響を及ぼす可能性がある。

#### 1.6.2.3 有機溶剤中毒予防規則とその法令の一部改正について

有機溶剤中毒予防規則は類似の健康被害を防止することを目的としており、①総則、②設備、③換気装置の性能等、④管理、⑤測定、⑥健康診断、⑦保護具、⑧有機溶剤の貯蔵及び空容器の処理、⑨有機溶剤作業主任者技能講習の全九章から構成されている<sup>47)</sup>。

この規則によって、有機溶剤はその危険性に応じて3種類に分類されている。有害度の高いものから第一種有機溶剤、第二種有機溶剤、第三種有機溶剤に分け、様々な業務と組み合わせて各種の適用除外や特例が定められている。また、有機溶剤中毒予防規則で掲げる物を当該混合物の重量の5%を超えて含有するものは有機溶剤等に該当し、規制の対象となっている。

厚生労働省によると、取り扱われる化学物質の種類・工程が多様化複雑化する中、合理的な化学物質管理を促進し、化学物質による労働災害を減少させるためには、作業に合わせた多様な発散防止抑制措置を導入できる仕組みの構築が必要である。そのため、2012年4月に有機溶剤中毒予防規則の一部が改正され、作業現場で作業環境測定を行い、第1管理区分に区分されたときは、所轄労働基準監督署長の許可を受けて、発散防止抑制措置を講ずることによって、有機溶剤の蒸気の出発源を密閉する設備、局所排気装置およびプッシュプル型換気装置を設けなくてもよくなった。これにより、有機溶剤の濃度を十分に低減できる発散防止抑制装置が法的に認められるようになった。発散防止抑制装置とは、法令で定められた性能要件と構造要件を満たさなくても十分に有害物質の濃度を低減できる装置である。

#### 1.6.2.4 有機溶剤を取り扱うネイルサロンについて

ネイルサロンでは、ネイルケアやネイルアートのために様々な製品が使用される。その中には、ネイル液や除光液といった有機溶剤を含む製品もある。ネイル液には酢酸エチル、酢酸ブチル、アセトン、トルエンなどの有機溶剤が含まれる<sup>50-51)</sup>。これらの有機溶剤は揮発性が高く、作業員や客が有機溶剤にばく露される可能性がある。

#### 1.6.2.5 ネイルサロンにおける有機溶剤による健康被害の例

韓国では、大邱広域市のネイルサロンの作業員 159 人に健康状態に関するアンケート

ート調査を行った<sup>52)</sup>。ネイルサロンの作業者と比較するため、一般のオフィスワーカー105人に同様のアンケートを行った。調査の結果、呼吸器や神経系の症状としては、鼻の刺激が最も多く報告され、その他にも頭痛や喉の炎症を訴える作業者もいた。目と皮膚については、回答者の92%が目の刺激を訴えた。さらに、肩や首の痛みといった筋骨格系の症状など、様々な健康被害が報告された。また、職業上のばく露限界値(OEL)を超える割合はアセトンが64%で最も高く、トルエン50%、酢酸ブチル46%、メタクリル酸メチル12%となった。しかし、このアンケート調査を行った159人のうち、156人(98.1%)は局所排気装置が設置されていないネイルサロンで働いていた。

アメリカでは、1970年代からメタクリル酸メチルを使用したネイルサロンが流行したが、爪が溶けたり傷ついたりするという苦情が多く寄せられたため米国食品医薬局(FDA)はネイル製品にメタクリル酸メチルモノマーの使用を禁止した<sup>53)</sup>。しかし、ネイルサロンで使用されるネイル液には酢酸エチル、酢酸ブチル、アセトンおよびケトンなど作業者に健康被害を及ぼす可能性のある有機溶剤が最大98%含まれていると推定されており、作業者は1~2時間の作業の間、有機溶剤蒸気や粉じんさらされている状況にあった。そこで、国立労働安全衛生研究所(NIOSH)がネイルサロンでの健康被害調査を行った。その結果、ネイルサロンで発生するイソプロピルアルコール、酢酸メチル、酢酸ブチルなどの吸入や過剰なトルエン蒸気、有機溶剤にさらされることで中枢神経系の機能低下、統計的に有意な疲労、記憶障害、注意力障害、および麻薬中毒症状の増加が報告された。また、ネイルサロンの作業者に加え利用者においてもかゆみや皮膚炎、発疹の症状があるという報告もあった<sup>53)</sup>。

#### 1.6.2.6 ネイルサロンに関する研究調査

ネイルサロンは、アメリカで人気のあるサービスである。しかし、ネイル製品やサービスの性質により、ネイルサロンの室内空気には低濃度の有害物質が存在することがある。作業者への調査では、頭痛や呼吸器刺激などの労働関連の症状が増加していることが多く報告されている<sup>52-54)</sup>。

- ① Pavilonis 氏らはニューヨーク市内の10箇所のネイルサロンで現場調査を行い、揮発性有機化合物(TVOC)および二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)の濃度を測定し、時間的および空間的な傾向を評価した<sup>55)</sup>。その結果、アメリカ国立規格協会(ANSI)/アメリカ暖冷房空調技術協会(ASHRAE)が設定したCO<sub>2</sub>濃度目標の850 ppmを超えた場合、TVOCの濃度は目標を満たした場合と比べて約10倍増えることが確認された。

- ② Han 氏らはニューヨーク市内のネイルサロン 20 箇所において、シリコンリストバンドとパッシブサンプラーを用いて、室内空気のフタル酸エステル類と揮発性有機化合物(VOCs)を測定した。さらに、ネイルサロンの特徴も調査した<sup>56)</sup>。調査によって測定されたフタル酸エステルの中で、ジ(2-エチルヘキシル)フタル酸エステルとジエチルフタレートの濃度が高いことがわかった。また、トルエン、D-リモネン、メチルメタクリレート、エチルメタクリレートの濃度も他の VOC よりも高かった。そして、マニキュア/ペディキュアテーブル、1 日の来客数、作業量はフタル酸エステルと VOC の濃度と正の相関があった。
- ③ Ma 氏らはアメリカ東海岸でアセトン、メチルメタクリレート(MMA)、トルエンの 3 つの VOC を 3M 3500 有機ガスモニターを用いて測定した<sup>57)</sup>。その結果、アセトン、MMA、トルエンの平均濃度は、それぞれ 18.51ppm、39.45ppm、0.09ppm であった。ニューヨーク市のネイルサロンで測定されたアセトンと MMA の平均濃度は、フィラデルフィアとニュージャージー州南部で測定された濃度よりも有意に低かった。
- ④ Pavilonis 氏らはカリフォルニアでネイルサロンの働くベトナム人女性にコミュニティベースを調査し、ネイルサロンにおける有機溶剤の個人ばく露濃度を測定した<sup>54)</sup>。この調査では、20 箇所のネイルサロンの作業員 80 人を対象に、VOC モニターを用いて、トルエン、酢酸エチル、酢酸イソプロピルの平均ばく露濃度を測定した。測定の結果、それぞれの平均ばく露濃度の測定値はそれぞれ、トルエンが 0.15 ppm(範囲=0.02~1.0)、酢酸エチルが 0.53 ppm(範囲=0.02~5.50)、酢酸イソプロピルが 0.04 ppm(範囲=0.02~0.15)となった。これらの測定値は、管理濃度よりも低い結果となったが、頭痛、炎症、呼吸障害等の健康被害が報告されている。
- ⑤ Ma 氏らはアメリカ東海岸で 25 のネイルサロンから個人ばく露測定と健康アンケートで 112 人の労働者のデータを収集した<sup>57)</sup>。参加者がネイルサロン業界で働き始めた後に出現または悪化した自己申告の健康問題は、頭痛(8%)、ふらつき(9.8%)、鼻、目、喉、皮膚への刺激(21.2%)であった。参加者の約 70%が妊娠したことがあると回答し、そのうち 11.7%が少なくとも 1 回の流産を経験した。また、アセトン、MMA、トルエンの平均濃度が測定され、ニューヨーク市、フィラデルフィア、

南ジャージーのネイルサロン間に差が観察された。

- ⑥ Ceballos 氏らはボストンで 71 種類の VOC を対象にして、個人と室内の空気をサンプリングした<sup>56)</sup>。また、43 種類の VOC について、勤務前後の作業員血液サンプルも収集し、換気率は連続的な二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)を測定した。測定の結果、主要な VOC の濃度には、エチルメタクリレート、メチルメタクリレート、トルエン、エチルアセテートが含まれていた。作業員が勤務後の血液中のトルエンとエチルアセテートの濃度は、勤務前の濃度よりも非常に高くなったことがわかった。
- ⑦ Zhong 氏らはミシガン州での 3 つの地域で、秋と冬の季節に 17 のネイルサロンで、個人と室内の空気サンプルを収集して熱脱着、ガスクロマトグラフ、質量分析法を用いて分析し、ネイル製品の VOC 組成を測定した<sup>58)</sup>。ほとんどのネイルサロンでエチル酢酸エステル、プロピル酢酸エステル、ブチル酢酸エステル、MMA、ヘプタン、トルエンが検出された。多くの VOC において個人ばく露濃度が環境濃度の測定値よりも高くなった。それは換気不十分が原因となる MMA が広く存在することが考えられる。
- ⑧ Aaron 氏らはコロラド州の 6 箇所において、ホルムアルデヒド、ベンゼン、トルエン、エチルベンゼン、キシレンの室内濃度を測定した。また、個人ばく露測定と健康アンケートも実施した<sup>59)</sup>。その結果、調査対象となった労働者の 70%が、雇用に関連した健康問題を少なくとも 1 つ経験しており、多くの人が複数の関連症状を報告した。ホルムアルデヒドの室内濃度は、6 箇所全体で 5.32~20.6 µg/m<sup>3</sup> の範囲であった。トルエンの室内濃度は 26.7~816 µg/m<sup>3</sup> で、ベンゼン(3.13~51.8 µg/m<sup>3</sup>)、キシレン(5.16~34.6 µg/m<sup>3</sup>)、エチルベンゼン(1.65-9.52 µg/m<sup>3</sup>)となった。1 つの箇所で測定されたホルムアルデヒドの濃度は、NIOSH が規定したばく露限界濃度を超えた。ホルムアルデヒドのばく露による発がんリスク推定値は、扁平上皮がん、上咽頭がん、ホジキンリンパ腫、白血病についてアメリカ環境保護庁 (USEPA) のデミニマスリスクレベル(de minimis risk level)である 1×10<sup>-6</sup> を超え、白血病リスクは 1 箇所で 1×10<sup>-4</sup> を上回った。作業におけるがんの発症リスクが増加していることが示された。

### 1.6.2.7 ネイルサロンで使用されている外付け式フードに関する研究

現在、主に以下4種類のネイルサロン用の換気システムが市場に存在している<sup>60)</sup>。

(1)掃除機付き換気作業台(vacuum cleaners built into the table)、(2)外付け式フード付き作業台(exhausts hoods and ventilation hoods mounted above tabletop)、(3)組み合わせ型換気システム(combined dust removal systems)<sup>61-68)</sup>。

掃除機付き換気作業台(vacuum cleaners built into the table)は低性能のファンによる捕集効率の低下の問題がある。ネイリング作業から発生した蒸気はうまく吸い込まれず、ネイリストや顧客の手に付着し、テーブルの上に広がって空気を汚染してしまう。そして、もう一つの欠点は、爪の研磨で生じるダストをダストバックから飛散され、特に微細粒子の漏れの可能性が高くなる<sup>61-65)</sup>。

一方、掃除機付き換気作業台(vacuum cleaners built into the table)と比べて、外付け式フード付き作業台(exhausts hoods and ventilation hoods mounted above tabletop)は高性能空気ファンが付いていることから、粉じん及び蒸気の捕集効果が高まっている<sup>63-64)</sup>。しかし、外付け式フード付き作業台でも欠点がある。例えばロータリーグラインダー(Rotary Grinder)で爪を磨く時、水平方向のダストの噴流が発生し、上方吸引型外付け式フードや掃除機で効果的にダストを捕集することが特に困難になる。

また、組み合わせ型換気システム(combined dust removal systems)は作業台に組み込まれた排気装置とその上にある吸引フードで構成されている。このシステムは、図 1.14 に示すように、吸引気流による捕集範囲が広いという利点がある。大きな粒子及びネイリングで発生する有機溶剤を含む蒸気は作業台に組み込まれた吸引フードによって捕捉され、作業台に取り付けられた排気装置によってより細かい粒子及び滴下した除光液などが除去できる。そのため、各吸引フードの排気流量を考慮しないと換気効率が不十分になる。他の装置と比較して、組み合わせ型排気システムは、粉じんの放出を発生源で完全に捕集でき、除去効率が向上するという利点もある。

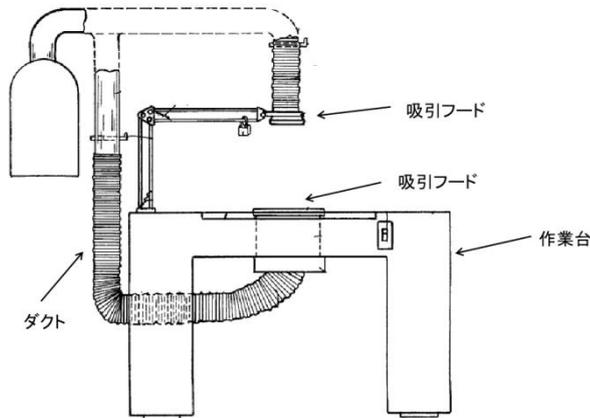


図 1.14 組み合わせ型換気システム

一方、これらの装置の欠点は、組み合わせ型換気システムでは照明ランプの表面に微細な粉じん粒子が付着しやすく、ネイリストの視認性が低下すると言われる。そして、作業台の上に設置するフードの吸引口はネイリストの作業にも影響する問題がある。また、複数種類を含むネイルサロンまたは美容室では、作業空間が狭いので、この排気システムへの設置が難しくなるという問題も挙げられる。さらに、ダクト入口の渦ゾーンで発生する騒音、またはファンモーター稼働で生じる騒音は、これらすべてのシステムに共通する欠点である。

### 1.6.3 外付け式フード捕集効率の評価方法

多くの作業現場では、環境中の有害物質の除去に使用する外付け式フードの捕集効率は、フードの吸引気流の風速によって評価するのが一般的である。日本でも局所排気装置の捕集能力を規定する値として制御風速が法令で定められており、局排の設計および稼働時の性能評価の指標とされている。ただし、この制御風速は経験的数値に基づき設定されたもので、有害物質の捕集量及びフードの捕集率を測定してばく露抑制効果を直接確認するものではない、いわば結果予測的な指標である<sup>69,70)</sup>。従って、捕集能力に影響を及ぼす要因が多種多様に存在する現場の局排に対し、(フード形式および対象物質による大まかな区分はあるが)一律に定めた制御風速が常に過不足の無い最適な性能要件に成り得るという保証はない。

1930年に、Dalla Valle は初めて外付け式フードを研究対象に、実験を通して、フード前方の等速度線の相対位置を示すデータを提示した<sup>71)</sup>。その後 Dalla Valle らは、等速度曲線の分布は「フード開口面の幾何学的形状とサイズ」によって決められると主

張し、それに応じて開口面からの距離、開口面積、中心線風速の関係を表す式を提唱した<sup>72)</sup>。これらの式は、それぞれ円形と長方形のフード開口部を備えたフランジなしフードとフランジ付きフードに適用される。それ以降、中心線風速を用い、フードの捕集効率を評価する手段として広く使用されていた。そして、産業用換気の普及及び流量測定技術の進歩に伴い、中心線風速を使用してフードの捕集効率を評価することに関する多数の研究が発表されてきた。また、1951年において、Dalla Valleらが提案した式はACGIHによるフードの設計標準となった<sup>7)</sup>。また、アスペクト比の増加にしたがってフード開口面上の同じ位置の中心線風速も急激に低下することが分かった。しかし、SilvermanやFletcherらが提唱した計算式は複雑になり実用性に欠けていたという原因でDalla Valleの式にとって代わることはなかった<sup>73-74)</sup>。

新しい技術が出現し、より高度なデータ収集技術が可能になるにつれて、流れ場の測定がより正確になった<sup>75)</sup>。しかし、測定技術の進歩にもかかわらず、中心線速度の研究は、従来の研究方法で用いた理想的な実験条件を超える進歩はいない。Thomasらは初めて作業台上に設置した吸引フード前方の風速分布を測定し、フード開口面近くの平面状物体の存在はフードの捕集力に影響を及ぼすことを示した<sup>76-77)</sup>。HemeonとGarrisonはフランジ付きフードの有効捕集範囲への影響を調査した<sup>78-79)</sup>。また、Garrisonは、テーブルが存在する表面近くでは粘性効果を見逃すことができないことを示唆した<sup>80)</sup>。つまり、作業台、テーブル、および吸引フードの近くにあるその他の表面は、フード捕集領域の形状を変える可能性がある。しかし、これらの要因による中心線速度への影響に関する研究はまだ進んでいない<sup>81-83)</sup>。

さらに、自由空間にフードがある場合、フランジを付けるとフランジがない場合に比べ25%の風量削減効果があると式(1-8)と式(1-9)は示している。また、図1.1.3に示した通り、フランジを付けることによってフード後方からの流れが遮断され、遮断された風量と同じ風量がフード前方から吸い込まれる。その結果、風速分布がフード前方に延びると考えられている。フランジの幅はフード開口面積 $LW$ に対して $\sqrt{LW}$ 以上が推奨されている<sup>70)</sup>。例えばフード開口面サイズが $W500\text{mm}\times H500\text{mm}$ の場合、推奨フランジ幅は $500\text{mm}$ となり、フランジを含めたフード全体の大きさは幅 $1.5\text{m}\times$ 高さ $1.5\text{m}$ となりかなりの大きさとなってしまふ。一方で、フランジ幅は $150\text{mm}$ 程度で十分との主張やフードの幅および外乱気流の大きさで決まるとの研究もある<sup>6,84)</sup>。しかし、フランジを付けることによって、従来考えられてきたようなフード後方からの流れを完全に遮断できるわけではない。そのため25%の風量削減効果は過剰に評価されている可能性がある。特に、ある決まった排風量の場合において、フランジを付けた

場合の風速は、フランジがない場合の風速に比べ開口面からの距離に依存せず常に1.33倍に上昇すると示している<sup>5)</sup>。しかしながら実際にフードを設計し風速を測定してみると、1.33倍という数値が過剰に評価されている場合がみられた。

そこで、久保田氏により、側方吸引型外付け式フードのフランジ効果について詳しく調べ、フード設計に際して正しく必要排風量を求められる新たな計算式を開発した<sup>5)</sup>。その式は式(1-12)と式(1-13)で表す。この新たな式を用いることで、フランジを付けた場合の局所排気装置の設計が正しく実施できるようになり、排気風量不足による性能低下を防ぎ、作業環境の悪化や作業者への有害物のばく露防止に大いに役立つものである。

$$V_c = \frac{Q}{60 \times 1.12 \times (6.48x^2 + LW)} \quad (1-12)$$

$$V_c = \frac{Q}{60 \times 1.12 \times (3.24x^2 + LW)} \quad (1-13)$$

ここで  $Q(\text{m}^3/\text{min})$ は排気風量、 $V_c(\text{m/s})$ はフード開口面の中心線風速、 $L$ はフード開口面の横幅(m)、 $W$ はフード開口面の縦幅(m)、 $x$ は開口面からの距離である。

一方、側方吸引型外付け式スロット型フードにおいては、沼野による式や ACGIH による式から求めた結果と実測値が異なっている。さらに、両式とも一次式であるため、計算上、開口面の風速 $V$ は距離 $x=0$ で無限大になってしまう問題点が示されている。

そこで、田らは実験室での実験及び CFD 解析によって、従来の長方形型フードの式のように二次関数の形を保ち、自由空間でフランジなしの場合の長方形型フードとスロット型フードともに適用できる計算式を開発した。その式を式(1-14)に示す。

$$Q = 60 \times A \times V_c \times [(36.85\alpha x^2 + (0.31\alpha^2 + 1.61\alpha)x + 0.87)] \quad (1-14)$$

ここで、ここで  $Q(\text{m}^3/\text{min})$ は排気風量、 $V_c(\text{m/s})$ はフード開口面の中心線風速、 $A$ は開口面面積( $\text{m}^2$ )、 $\alpha$ はフード開口面のアスペクト比(横幅  $L$ /縦幅  $W$ )、 $x$ は開口面からの距離。

そして、フードが吸引したトレーサーガス等の濃度をダクト内もしくは漏洩部位に

において測定し捕集率を求める手法(トレーサー法)は、フードの捕集能力を直接かつ定量的に確認するため、個々の局排に最適な吸引風速ないし排風量を把握することができ、より合理的な局排の性能要件指標を与えると過去の研究より示された<sup>85-104)</sup>。

トレーサーガスは、1950年代に初めて建物の換気システムに使用され、建物と地下鉱山の両方の換気分析に広く使用されてきた<sup>105-106)</sup>。多くの研究が、地下の金属/非金属鉱山および炭鉱の換気システムを評価する手段としてトレーサーガス技術を利用してきた。六フッ化硫黄(SF<sub>6</sub>)は、低濃度で検出でき、無毒、無臭、無色、化学的および熱的に安定であるため、標準的な鉱山換気トレーサーとして広く受け入れられている<sup>107)</sup>。

地下鉱山におけるトレーサーガスの用途には、乱流拡散の測定、メタン制御、戻り吸入空気の鉱山換気再循環研究、停止ゾーンを通過する通過時間、補助ファンの有効性と体積流量の推定、空気漏れ調査、粉じんの評価が含まれる<sup>108-112)</sup>。ただし、これらの研究のほとんどはCFDを使用して事前にトレーサーテストを設計しておらず、多くの場合においては、通常の経験と試行錯誤に基づいていた。

## 1.7 CFD解析

CFD解析とは数値流体力学(computational fluid dynamics)に基づいたコンピューターシミュレーションである。CFD解析は近年、工場などの室内における空気の流れあるいは密閉空間の気流環境による解析、地下鉱山の換気気流の解析、石炭の自然加熱、地下火災の制御、爆発の調査、粉じん制御及び地下空間の安全関連の問題をシミュレートするために一般的に使用される強力なツールとなっている<sup>113-123)</sup>。また、トレーサーガスの実験測定とCFD解析の組み合わせは、屋内環境やその他の産業用途における気流と汚染物質の輸送を研究するために使用されている<sup>124-125)</sup>。そして、建物の自然換気は、数値流体力学(CFD)による数値シミュレーションを含む幅広い手法を使用して実行できる<sup>124-143)</sup>。

解析の手順はまず、シミュレーションで数値計算の前処理における解析の対象のモデルを作り、次に計算する領域にメッシュを当てはめ、物理量の変化が大きい領域でメッシュを細かくする。そして解析の条件を定義し、計算実行及び可視化をする。

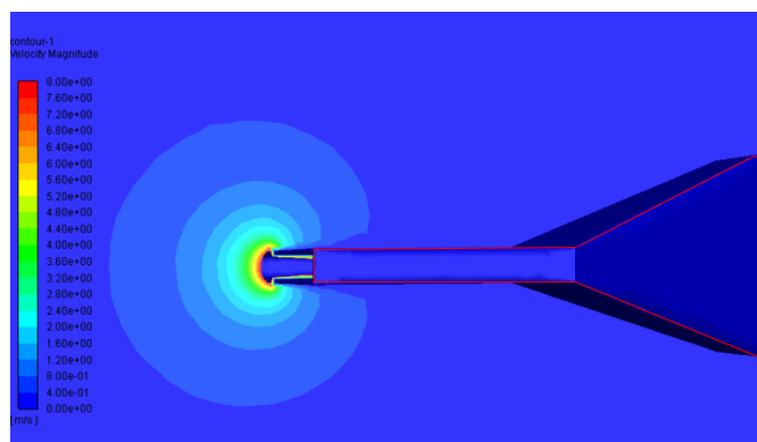


図 1.15 CFD 解析による気流解析

CFD 解析による数値解法には数多くの手法があるが、一般に広く用いられる手法は、有限差分法(Finite Difference Method、FDM)である、近年では、有限要素法(Finite Element Method、FEM)を使用した例が増えている。FEM は、構造物の強度解析法として広く用いられる手法であり、解析の値は理論値とよく一致している。また、複雑な形状をした計算対象の取り扱いに制約が少ないことなどの特徴があるため、流体解析にも応用できる。しかし、FDM に比べて解析の手順が理解しにくく、プログラムの構造が複雑であり、大きなコンピューターのメモリが必要であるなどのデメリットがあるといわれている。

そして、最近では、CFD 解析の技術が発達してきて、FDM に比べてコンピューターのメモリ及び計算コストが低減でき、プログラムの構造や解析の手順も以前の流れの数値シミュレーションより容易になってきた。また、複雑な流体対象による計算格子の細分化即ち計算精度も高くなってきている。その解析の一例を図 1.15 に示す。

## 1.8 フード捕集効率に影響を与える要因に関する研究

様々な作業現場において、フードの捕集効率に影響する要因はいくつかある。例えば、一様な流れの中に円柱状物体が存在した場合、その影響で生じる渦が円柱の下流域に局所的な逆流を生むことがある<sup>144)</sup>。同様に、作業環境において作業者が背後から気流を受けた場合、下流側になる作業者の正面で逆流が生じ、これが有害物質を呼吸

域へ運び、ばく露を増大させる可能性がある。Wellingらは、稼働する局所排気装置の捕捉フード前方で設置するマネキンの背後に渦が生じることを発見した<sup>145)</sup>。この渦によって生じる逆流は、作業環境中の汚染物質を作業者の呼吸域に巻き返す可能性がある<sup>146,147)</sup>。ACGIH(米国産業衛生専門家会議、American Conference of Governmental Industrial Hygienists)では、作業者のばく露量を左右する問題について複数の研究を行った<sup>148-152)</sup>。単純なトンネル状チャンバーないしプッシュプル型換気装置を利用し、逆流現象が(プッシュプル換気における層流のように)比較的大きな気流場の中でより顕著に観察されることが分かった。また、Ojimaは局所排気装置の外付け式フードおよび囲い式フードを用いて、作業者がフード開口面と向き合う姿勢で位置した際に体躯周辺で惹起される逆流現象をスモークテストおよびトレーサーガスによる実験で再現し、ばく露および漏洩への影響を調べた<sup>153)</sup>。その結果、外付け式フード使用の場合、作業者が立位姿勢でフードと対面した際に逆流が発現し、吸引風速0.4m/s以下で若干のばく露が確認された。また吸引風速に関わらず、逆流による10ppm未満の漏洩が確認された。囲い式フードでは、抑制に0.8m/s以上の吸引風速を必要とする場合があった。囲い式フードでは漏洩の危険は少ないが、作業者が座位の時には危険が高いことが判明した。両フードの場合とも、吸引風速の増加は逆流によるばく露を抑制する効果があった<sup>154,155)</sup>。また、GuffeyとTsengによるトレーサーガスを用いてフードの捕集能力に関する研究では、フードの前に立っているマネキンの呼吸域の濃度は、マネキンが存在しない場合よりも高いことが判明した<sup>154,155)</sup>。

以上のように、局所排気装置を設置する多種多様な作業現場において、フードの捕集効率に影響する要因はいくつかある。その中では特に、吸引フードの周辺に外乱気流が存在する場合におけるフードの捕集効率を調べる研究が近年着目されている。外乱気流の発生要因は、窓や戸口の開放による外気の流入、エアコンや全体換気による給気、高熱発生源による対流、または作業人や物体の移動に伴う気流などがあげられる。

これらの外乱気流がフードの周辺に存在すると、フード前方の吸引気流が形成する等速度線領域、即ち捕集領域(Capture Zone)の汚染物質に対する有効的な捕集範囲を変動させる可能性がある<sup>156-165)</sup>。このフード開口面前方の有効捕集領域が変わると、汚染物質がフード周囲への拡散及び作業者へのばく露が発生しやすくなる。また、Huangらは、開口面面積が同じフードにおいては、開口面のアスペクト比(横幅:W/高さ:H)が1を境界として、フードの捕集性能が明らかに異なることを示した。捕集領域が外乱気流の影響を受けた場合、中心線速度の減衰曲線が大きく変化することを確認

した<sup>166)</sup>。普段の作業場で制御風速を満たす局所排気装置を計画する場合、これらの外乱気流を加味しているのが一般的である。小嶋らは、外付け式長方形型フードに対して、0.2m/s以下の外乱気流であれば、フードの捕集能力に影響がなく、有害物質の漏洩を完全に防ぐためには、開口面の吸引風速が1.0m/s以上必要であると指摘している。

しかし今まで研究された中心線風速または必要排風量を予測する関係式は、有害物質の捕集量ないし捕集率を測定してばく露抑制効果を直接確認するものではない、捕集能力に影響を及ぼす要因が多種多様に存在する現場の局排に対し、一律に定めた制御風速でフードの必要排風量を求めるのが最適な性能要件に成り得るという保証はない。

さらに、制御風速は作業状況や作業による有害物質の発散速度、外乱気流の大きさを考慮して決められている。特に粉じんの場合は特定粉じん発生源のように研磨などによって速い速度を持って発生する場合もある。近年は生産現場において取り扱う化学物質の種類・工程が多様化・複雑化する中、リスクに基づく合理的な作業管理をすることにより、作業現場によっては制御風速以下でも作業環境が良好に維持できる場合が多くあると考えられる。そのため、制御風速のみを局所排気装置の性能要件として設計すると、必要以上に過剰な風量で排気する結果を招いてしまう。これらのことを考慮して、2012年(平成24年)に有機溶剤中毒予防規則等の一部改正があり、一定の条件のもとで局所排気装置等以外の作業の実態に応じた多様な発散防止抑制措置の導入が可能になり、制御風速を満たさない場合でも許可されることになった。

## 1.9 作業環境測定

### 1.9.1 作業環境測定の定義

労働安全衛生法第2条では、「作業環境測定」とは「作業環境の実態を把握するため空気環境その他の作業環境について行うデザイン、サンプリングおよび分析(解析を含む)をいう」と定義されている<sup>167)</sup>。

作業環境中に存在する有害因子を取り除き、ある限度まで低減させ、またはこれらの対策だけでは有害な因子への労働者のばく露を十分な程度まで低減させることができない場合には、保護具や保護衣等のばく露防止の手段を使用すること等によって、その有害な因子による労働者の健康障害を防止することが必要である。その有害な因子の主なものとしては有機溶剤、鉛およびその化合物、特定化学物質等の有害な化学物質、じん肺の原因となる粉じん等の有害な物質のほか、電離放射線、電磁波、有害光線、騒音、振動、高温・低温、高湿度等の物理的因子等もある。また、その化学物

質等に過敏な反応を起こすことのある労働者については特に重視することが必要である。

### 1.9.2 作業環境測定における測定結果の評価

測定結果の評価は A 測定、B 測定を実施することにより、第 1 管理区分、第 2 管理区分、第 3 管理区分に分けられる。

A 測定は作業環境中の有害物質の発生を伴う作業の一定の空間ごと、時間帯ごとの無作為標本として設定された測定点にて行う測定である。

B 測定とは単位作業場所で、①発生源とともに移動しながら行う作業がある場合、②有害物質の発散を伴うような原材料の投入、点検作業が間欠的に行われる場合、③有害物質の発散を伴うような設備等の近くで固定して行う作業がある場合、など A 測定のみでは補えないような高濃度のばく露が考えられるような場合に、A 測定の他に追加して行う測定である。A、B 測定の結果による作業環境の評価を表 1.13 に示す。

表 1.13 作業環境測定結果の評価<sup>167)</sup>

測定結果の評価		A 測定		
A 測定と B 測定 を実施した場合	A 測定のみを 実施した場合	第 1 評価値 < 管理濃度	第 2 評価値 ≤ 管理濃度 ≤ 第 1 評価値	第 2 評価値 > 管理濃度
		第 1 管理区分	第 2 管理区分	第 3 管理区分
B 測定	B 測定値 < 管理濃度	第 1 管理区分	第 2 管理区分	第 3 管理区分
	管理濃度 ≤ B 測定値 ≤ 管理濃度 × 1.5	第 2 管理区分	第 2 管理区分	第 3 管理区分
	B 測定値 > 管理濃度 × 1.5	第 3 管理区分	第 3 管理区分	第 3 管理区分

第 1 評価値とは単位作業場所について考えられるすべての測定点の中で、管理濃度を越える濃度が存在する可能性が 5%になるような水準値として数量化された値である。第 1 評価値が管理濃度を超えなければ第 1 管理区分となる。

第 2 評価値とは作業環境中の有害物質の平均濃度を推定した値である。第 2 評価値

が管理濃度を超える単位作業場所は第3管理区分となる。

管理濃度とは行政的規制のための濃度として導入されたもので、作業環境管理を進める過程で有害物質に関する作業環境の状態を評価するために、測定結果から単位作業場所の管理区分を決定するための指標である。個々の労働者のばく露濃度との対比を前提として設定されている許容濃度(日本産業衛生学会)は時間の概念が含まれているが、管理濃度には含まれていない。

#### 1.10 本研究の意義と目的

有害物質が発生する生産現場に対して、法令によって、局所排気装置などの設置が義務付けられている。また、局所排気装置の外付け式フードの吸引能力は、その周辺に存在する外乱気流に影響を受けやすく、フードの吸引能力は低下することが知られている。近年はリスクに基づく合理的な作業管理をすることにより、作業現場によってはフード設計時の性能要件である制御風速以下でも作業環境が良好に維持できる場合が多くあると考えられる。これらのことを考慮して、2012年の安衛法の一部法改正により、一定の条件のもとで局所排気装置等以外の発散防止抑制措置の導入が可能になり、制御風速を満たさない場合でも、使用が許可されることになった。過去には、制御風速以下でも作業環境を良好に維持できる最適な風量を求めた研究がある。しかし、多様で変動する外乱気流に応じて最適な風量に制御する研究はまだ少ない。そして従来の研究手法による漏れ濃度やばく露濃度を監視し、排風量を制御する方法が考えられるが、ガスセンサーの耐久性、混合ガスの影響、作業への影響、コスト面などの問題で実施することが難しいと考えられる。そこで、本研究では、独自の方法として、風速センサーで外乱風速を監視し、外乱気流の風速に応じて、最適な排風量に制御する方法を考案した。そのため、外付け式フードを対象として実験室での実験によって、外乱気流の発生位置及び風速と漏洩を防ぐフードの排風量との関係を調べ、その上で、外乱気流を常時モニターし、その風速に応じて漏洩を抑える排風量に制御する発散防止抑制装置の開発を目的としている。

また、近年ネイルサロンサロンにおける有機溶剤を含む製品の使用による作業員および顧客への低濃度ばく露の問題が起きている。特にアメリカと韓国では、ネイルサロンで働く作業員の長時間による低濃度ばく露問題が課題になっている。ネイルサロン用の換気作業台の使用は米国国立労働安全衛生研究所で推奨されている。一方日本では、ネイルサロンに対しては法令による局所排気装置等の設置義務はない。そして、令和5年の安衛法改正によって、化学物質の自律的な管理の実施状況の調査審議を行

うことを義務付けられるようになった。多様な化学物質が取り扱うネイルサロンでは、限られている作業空間で、労働者が作業環境中での有害物質へのばく露濃度を最小限度にするため、法令で定められた性能要件を満たすような局所排気装置より、現場の実状に応じて柔軟的な換気手段として発散防止抑制装置の導入が進められている。そこで、本研究では、低濃度のばく露でも健康に悪影響を及ぼす可能性があるネイルサロンなどの現場を想定して、実際の作業者の作業範囲を考慮して、作業に影響が少ない換気作業台を開発した。その上で、排风量制御システムを換気作業台に取り込み、作業者の手による外乱気流が生じた作業における有害物質に対する捕集効果と排风量削減効果の両方を達成することを目的とする。

### 1.11 本論文の概要

本論文は本章序論を含む全 6 章から構成されている。以下に各章の概略を述べる。

#### 第 1 章 序論

本論文の背景と労働衛生分野における本研究の意義について述べた。

#### 第 2 章 側方吸引型外付け式フードにおける外乱気流を考慮した漏洩を抑制する必要排风量

本章では、作業台上で作業する場合の 3 種類の外付け式フード（開口面サイズ:W500mm×H50mm、W500 mm×H100mm、W500mm×H300mm）を研究対象として、フードの開口面に対し異なる方向から外乱気流を発生させた場合の漏洩を抑制できる必要排风量を求めた。その結果、いずれのフード形状に対しても、フード開口面に対する横風方向の外乱気流を与えた条件が、他の外乱気流の方向より漏洩の抑制に必要な排风量が大きいことがわかった。その結果から、有害物質が発生する現場で局所排気装置を設ける場合、異なる外乱気流の条件及びフードの開口面サイズを考慮し、各現場に適した必要排风量を求めて局所排気装置を設計すれば、従来よりも低風量化することが可能となる。

#### 第 3 章 側方吸引型外付け式フードにおける外乱気流に対する排风量を制御する発散防止抑制装置の開発及び性能評価

2 章の結果から、外付け式フードの開口面に対し異なる方向から外乱気流を発生させた場合の漏洩を抑制できる必要排风量を求めることができたので、この外乱気流の風速及び発生方向と漏洩を抑える排风量の関係を用いて、フード周辺の外乱気流を数か所に設置した風速センサーで検知し、その風速の大きさに応じて排风量を制御するという独自の手法による発散防止抑制装置を作製した。そして、フードに対して横方

向の気流が一番影響を受けることが前章で分かったので、どの方向からの気流も横風として排風量を制御するシステムとした。また、変動する外乱気流風速の条件で、発散防止抑制装置の煙発生実験（トレーサー粒子法）で漏洩に対する捕集性能を確認した。その結果、いずれの外乱気流の条件に対しても、制御風速を満たす一定の排風量よりも、外乱気流がない時は少ない排風量で済み外乱気流がある場合、それに応じて漏洩を抑える最適な排風量に制御することができた。

#### 第4章 有機溶剤作業に対するばく露防止対策用換気作業の開口面周りの風速分布測定及び捕集性能の評価

前章までの結果から、外乱気流が発生する際に、風速センサーで外乱風速を監視し、外乱気流の風速に応じて、最適な排風量に制御するという独自の方法を考案し、法令で定められた性能要件を満たさなくても、有害物質を十分排除できる発散防止抑制装置を作製した。本章では、有機溶剤蒸気に対する低濃度のばく露によって健康に悪影響を及ぼす可能性があるネイルサロンなどの現場を想定して、実際の作業者の作業範囲を考慮して、作業に影響が少ない、かつ法令で定められている制御風速を満たさなくても有機溶剤を十分除去できる外付け式下方吸引長方形型フードを備えた換気作業台を作製した。その上で、フードの開口面上に開口率の異なる3つのパンチング(22.7%、32.6%、40.3%)をそれぞれ設置した場合において、設定した捕捉点での風速や開口面上の風速分布にどう影響を与えるかを調べるため、風速測定を行った。また、実際に有機溶剤を扱う現場を想定して、アセトンガスを発生させ、換気作業台の排風量を変化させた場合の捕集率の測定を行った。ダクトの設置位置と向きを変えることによって、開口面上の風速分布の均一性を改善した結果、下方吸引でアセトンガスの吸引に最も効果的な開口率 40.3%のパンチングを設置した換気作業台を用いて、法令で定められている制御風速を満たすように求めた必要排風量より少ない排風量でも有機溶剤蒸気に対する捕集率を90%以上に達成することができた。

#### 第5章 有機溶剤作業に対する本開発システムを搭載した換気作業台の性能評価

本章では、4章の結果をもとに開口率 40.3%のパンチングを設置した換気作業台を用いて、実際のネイルサロンの現場から想定される外乱気流を発生させ、発生源付近の風速の変化を測定した。そして、実際のネイルサロンの現場における作業者の手の動きによって発生する外乱気流に対して、3章で開発した排風量制御システムを搭載した発散防止抑制装置である換気作業台の性能評価を行った。その結果、外乱気流が存在しない場合は有機溶剤蒸気の発生に対して有機則で定められた制御風速で求めた必要排風量より少ない排風量で捕集率を90%以上に維持し、外乱気流が存在する場合

でも、排风量制御システムが機能し、有機溶剤蒸気に対する捕集率をほとんど 90%以上にすることができた。

## 第 6 章 結言

これまでの研究結果から導き出した結論と、今後の展望について記載した。

## 参考文献

- 1) 空気調和・衛生工学会, 新版工場換気, 丸善出版, pp.4-8 (2009).
- 2) 日本産業衛生学会, 許容濃度等の勧告(2018年度), 産業衛生学会雑誌, pp.117-124 (2018).
- 3) 空気調和・衛生工学会, 工場換気の理論と実践, 丸善出版, pp.57-58 (2002).
- 4) 中央労働災害防止協会, 局所排気・プッシュプル型換気装置及び空気清浄装置の標準設計と保守管理, 中央労働災害防止協会, pp.60-61 (2015).
- 5) 久保田裕仁, 作業環境改善およびばく露濃度低減のための局所排気装置等に関する労働衛生工学的研究, 博士論文, pp.16-31 (2015).
- 6) 沼野雄志, 新やさしい局排設計教室, 中央労働災害防止協会, pp.121-131(2012).
- 7) Dalla Valle, J.M., Exhaust Hoods 2nd edition, The Industrial Press, pp.56 (1952).
- 8) Caplan, K.J., and G.W. Knutson, A performance test for laboratory fume hoods. Am. Ind. Hyg. Assoc. J., **43**, 722-727 (1982).
- 9) Saunders, G.T., A no-cost method of improving fume hood performance, Am. Lab., **10**, 102-103 (1984).
- 10) Özdemir, I.B., J.H. Whitelaw, and A.F. Bichen: Flow structures and their relevance to passive scalar transport in fume cupboards, Proc. Inst. Mech. Eng, **23**, 103-115 (1993).
- 11) Maupins, K., D.T. Hitchings, Reducing employee exposure potential using the ANSI/ASHRAE 110 method of testing performance of laboratory fume hoods as a diagnostic tool, Am. Ind. Hyg. Assoc. J., **59**, 133-138 (1998).
- 12) First, M.W., Laboratory chemical hoods, a historical perspective, Am. Ind. Hyg. Assoc. J., **64**, 251-259 (2003).
- 13) Tseng, L. C., R.F. Huang, C.C. Chen, C.P. Chang, Aerodynamics and performance verifications of test methods for laboratory fume cupboards, Ann. Occup. Hyg., **51**, 173-187 (2007).
- 14) Tseng, L.C, R.F. Huang, C.C. Chen, Effects of doorsill jet-injection on fume cupboard containment, Ann. Occup. Hyg., **52**, 635-644 (2008).
- 15) Huang, R.F., J.K. Chen, K.C. Tang, Development and characterization of an inclined air-curtain (IAC) fume hood, Ann. Occup. Hyg., **59**, 655-667 (2015).

- 16) Huang, R.F., Y.D. Wu, H.D. Chen, et al., Development and evaluation of an air-curtain fume cabinet with considerations of its aerodynamics, *Ann. Occup. Hyg.*, **51**, 189-206 (2007).
- 17) Huang, R.F., D.C. Hong, C.H. Hung, Effects of walk by and sash movement on contaminant leakage of air curtain-isolated fume hood, *Ind. Health*, **45**, 804-816(2007).
- 18) Huang, R.F., J.-K. Chen, and W.-L. Hung, Flow and containment characteristics of a sash-less, variable height inclined air-curtain fume hood, *Ann. Occup. Hyg.*, **57**, 934-952 (2013).
- 19) Huang, R.F., S.Y. Lin, S.-Y. Jan, et al., Aerodynamic characteristics and design guidelines of push-pull ventilation systems, *Ann. Occup. Hyg.*, **49**, 1–15 (2005).
- 20) European Committee for Standardization, Fume Cupboards Parts 3, Type Test Methods (EN: 14175–3:2003), Brussels, European Committee for Standardization, (2003).
- 21) American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers Inc. (ASHRAE)M, Method of Testing Performance of Laboratory Fume Hoods, (ANSI/ASHRAE Standard 110–1995), Atlanta, GA., ASHRAE (1995).
- 22) CDC, Leading work-related diseases and injuries, *MMWR, Morbidity and Mortality Weekly*, **32**, 24 (1983).
- 23) J.D. Millar, Breathing easier in the '90s and beyond. *Ventilation '91, 3rd International Symposium on Ventilation for Contaminant Control*, **3**, (1993).
- 24) Ellenbecker, M. J., Gempel, R.F. and Burgess, W.A, Capture efficiency of local exhaust ventilation systems, *American Industrial Hygiene Association Journal*, **44**, 752 (1983).
- 25) Chowdhury Z, Le LT, Masud AA, Chang KC, Alauddin M, Hossain M, Zakaria ABM, Hopke PK, Quantification of indoor air pollution from using cookstoves and estimation of its health effects on adult women in northwest Bangladesh. *Aerosol Air Qual Res*, **12**, 463-475 (2012).
- 26) Saha S, Guha A, Roy S, Experimental and computational investigation of indoor air quality inside several community kitchens in a large campus, *Build Environ*, **52**, 177-90 (2012).
- 27) Li A, Zhao Y, Jiang D, Hou X, Measurement of temperature, relative humidity, concentration distribution and flow field in four typical Chinese commercial kitchens, *Build Environ*, **56**, 139-150 (2012).

- 28) He C, Morawska L, Hitchins J, Gilbert D, Contribution from indoor sources to particle number and mass concentrations in residential houses. *Atmos Environ*, **38**, 3405-3415 (2004).
- 29) Gao J, Cao C, Zhang X, Luo Z, Volume-based size distribution of accumulation and coarse particles (PM<sub>0.1-10</sub>) from cooking fume during oil heating. *Build Environ*, **59**, 575-580 (2013).
- 30) Svendsen K, Sjaastad AK, Sivertsen I Respiratory symptoms in kitchen workers, *Am J Ind Med*, **43**, 436–239 (2003).
- 31) Sisti J, Boffetta P, What proportion of lung cancer in never-smokers can be attributed to known risk factors, *Int J Cancer*, **131**, 265-275(2014).
- 32) Pinto M, Viegas J, The influence of ventilation systems on domestic gas appliances: An experimental study, *Build Environ*, **69**, 1-13 (2013).
- 33) Lee H, Lee YJ, Park SY, Kim YW, Lee Y, The improvement of ventilation behaviours in kitchens of residential buildings, *Indoor Built Environ*, **21**, 48-61(2014).
- 34) Li Y, Delsante A, Symons J, Residential kitchen range hoods-buoyancy-capture principle and capture efficiency revisited. *Indoor Air*, **7**, 151-157(1997).
- 35) Zhao YJ, Li AG, Tao PF, Gao R, The impact of various hood shapes, and side panel and exhaust duct arrangements, on the performance of typical Chinese style cooking hoods. *Build Simul-China*, **6**, 139-49 (2013).
- 36) Delp WW, Singer, BC, Performance assessment of U.S. residential cooking exhaust hoods. *Environ Sci Technol*, **46**, 6167-6173(2012).
- 37) Hargather MJ, Settles GS, Background-oriented schlieren visualization of heating and ventilation flows, *HVAC-BOS.HVAC&R Res*, **17**, 771-80 (2011).
- 38) Kosonen R, Mustakallio P, The influence of a capture jet on the efficiency of a ventilated ceiling in a commercial kitchen, *Int J Vent*, **1**, 189-99 (2003).
- 39) Kosonen R, The effect of supply air systems on the efficiency of a ventilated ceiling, *Build Environ*, **42**, 1613-23 (2007).
- 40) Abanto J, Reggio M, Numerical investigation of the flow in a kitchen hood system, *Build Environ*, **41**, 288-296 (2006).

- 41) Liu X, Wang X, Xi G, Orthogonal design on range hood with air curtain and its effects on kitchen environment, *J Occup Environ Hyg*, **11**, 186–199 (2014).
- 42) Huang RF, Dai GZ, Chen JK, Effects of mannequin and walk-by motion on flow and spillage characteristics of wall-mounted and jet-isolated range hoods, *Ann Occup Hyg*, **54**, 625–39 (2010).
- 43) Huang RF, Nian YC, Chen JK, Static condition differences in conventional and inclined air-curtain range hood flow and spillage characteristics. *Environ Eng Sci*, **27**, 513-22 (2010).
- 44) Huang RF, Nian YC, Chen JK, Peng KL, Improving flow and spillage characteristics of range hoods by using an inclined air-curtain technique, *Ann Occup Hyg*, **55**, 164–79 (2011).
- 45) 高田勲, 房村信雄, 作業環境測定概論, 公益財団法人日本作業環境測定協会, pp.63-64 (1976).
- 46) 浅原照三, 戸倉仁一郎, 大河原信, 熊野谿従, 妹尾学, 溶剤ハンドブック, 講談社, pp.127-128 (1976).
- 47) 木村嘉勝, 図解よく分かる有機溶剤中毒予防規則、労働調査会、2011.
- 48) 竹内康浩, 第 12 回有機溶剤中毒の今後の課題 (有機溶剤による健康障害), 産業衛生学雑誌, **40**, 129-130 (1998).
- 49) Morata T C, Dunn D E, Kretschmer L W, et al., Effects of occupational exposure to organic solvents and noise on hearing, *Scandinavian journal of work, environment & health*, 245-254 (1993).
- 50) Broadwater K, Chiu S. Evaluation of ergonomics, chemical exposures, and ventilation at four nail salons, (2019).
- 51) Harrichandra A, Roelofs C, Pavilonis B, Occupational exposure and ventilation assessment in New York City nail salons, *Annals of work exposures and health*, **64**, 468-478 (2020).
- 52) Sung-Ae Park, Sugyeong Gwak, Sangjun Choi, Assessment of Occupational Symptoms and Chemical Exposures for Nail Salon Technicians in Daegu City, Korea, *Journal of Preventive Medicine & Public Health*, **47**, 169-179 (2014).

- 53) DAVID HIIPKKA, BEHZAD SAMIMI, Exposure of Acrylic Fingernail Sculptors to Organic Vapors and Methacrylate Dusts, *American Industrial Hygiene Association Journal*, **48**, 230-237(2010.)
- 54) Thu Quach PhD, Robert Gunier MPH, Alisha Tran Julie Von Behren MPH, Phuong-An Doan-Billings Kim-Dung, Nguyen Linda Okahara, Characterizing Workplace Exposures in Vietnamese Women Working in California Nail Salons, *American journal of public health*, **101**, 271-276 (2011).
- 55) Pavilonis B, Roelofs C, Blair C, Assessing indoor air quality in New York City nail salons, *Journal of occupational and environmental hygiene*, **15**, 422-429 ( 2018).
- 56) Han, I.; Seo, J.Y.; Barr, D.B.; Panuwet, P.; Yakimavets, V.; D'Souza, P.E.; An-Han, H.; Afshar, M.; Chao, Y.-Y, Evaluating Indoor Air Phthalates and Volatile Organic Compounds in Nail Salons in the Greater New York City Area, A Pilot Study, *Int. J. Environ., Res. Public Health*, **19**, 12411 (2022).
- 57) Ma, G.X., Wei, Z., Husni, R. et al., Characterizing Occupational Health Risks and Chemical Exposures Among Asian Nail Salon Workers on the East Coast of the United States. *J Community Health*, **44**, 1168–1179 (2019).
- 58) Zhong, L., Batterman, S. & Milando, C.W. VOC sources and exposures in nail salons, a pilot study in Michigan, USA. *Int Arch Occup Environ Health*, **92**, 141-153(2019).
- 59) Aaron L., Megan H., Feng X., Janice T., Arsineh H., Lupita D., Occupational exposure to volatile organic compounds and health risks in Colorado nail salons, *Environmental Pollution*, **249**,518-526 (2019).
- 60) O. Averkova, O. Zaycev, I. Kryukov, V. Uvarov, O. Kryukova, Methods and means of localization of dust divisions in cosmetological cabinets, *Bull. Belgorod State Technol. Univ. Named after. V. G. Shukhov.*, **3**, 80–89 (2018).
- 61) M. Henning, Combined armrest and dust suction device, EP1707071A1, <https://patents.google.com/patent/EP1707071A1>, 2005.C.G. Novobilski, Nail vapor and dust collection and treatment device, (1991).
- 62) C.G. Novobilski, Nail vapor and dust collection and treatment device, US5139546A, <https://patents.google.com/patent/US5139546A>, (1991).

- 63) T. Phan, Salon air purification system, US20080216647A1, <https://patents.google.com/patent/US20080216647A1>, (2008).
- 64) P.J. Hoon, Nail caring table having vacuum purifier, US6698360B2, <https://patents.google.com/patent/US6698360B2/>, (2004).
- 65) H.T. Nguyen, Vacuum system for nail salon workstation, US8430940B2, <https://patents.google.com/patent/US8430940B2>, 2010.Q. Nguyen, Nail salon workstation, (2010).
- 66) Q. Nguyen, Nail salon workstation, US20120045981A1, <https://patents.google.com/patent/US20120045981A1>, (2010).
- 67) H.M. Korotkyi, Desktop exhaust ventilation system, UA56365U, <https://patents.google.com/patent/UA56365U>, 2010.B. Mai, Nail salon air purification system, (1999).
- 68) B.Mai, Nail salon air purification system, US6444002B1, <https://patents.google.com/patent/US6444002B1>, (1999).
- 69) Brandt AD, Local exhaust ventilation-hood design, Industrial health engineering. New York, John Wiley & Sons Inc, pp.68-97 (1947).
- 70) American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH), Industrial Ventilation, A Manual of Recommended Practice for Design, 29th Edition, ACGIH, Cincinnati, (2016).
- 71) Dallavalle, J. M., Studies in the Design of Local Exhaust Hoods. PhD diss., Harvard Engineering School, Cambridge, MA, (1930).
- 72) Dallavalle, J. M., and T. Hatch, Studies in the design of local exhaust hoods. Trans. ASME, **54**, 31 (1932).
- 73) Silverman L, Velocity characteristics of narrow exhaust slots, J. Ind. Hyg. Toxicol., **24**, 39 (1942).
- 74) Fletcher B, Centerline velocity characteristics of rectangular unflanged hoods and slots under suction, Ann. Occup. Hyg., **20**, 141-146 (1977).
- 75) Ellenbecker, M. J., Gempel, R. F. and Burgess, W. A., Capture efficiency of local exhaust ventilation systems, American Industrial Hygiene Association Journal, **44**, 752 (1983).
- 76) Thomas, F.A., Design characteristics of canopy exhaust hoods. Heating and Ventilating, **1**, 84 (1950).
- 77) Esmen, N., Weyel, D. A. and McGuigan. F, American Industrial Hygiene Association Journal, **47**, 448 (1986).

- 78) W. Hemeon, Plant and process ventilation (2nd ed.), New York, Industrial Press., (1963).
- 79) R.P. Garrison, Evaluation of models for local exhaust velocity characteristics-part two, Velocity gradients for an inlet near a boundary source, American Industrial Hygiene Association Journal, **50**, 204 (1989).
- 80) R. P. Garrison, Graphical approximation model for velocity characteristics of local exhaust inlets, American Industrial Hygiene Association Journal, **49**, 49 (1988).
- 81) W. M. Elnahass, Effects of heating, breathing, hair style, posture, and air velocity on breathing zone concentrations for an anthropometrically correct manikin in a wind tunnel, Unpublished PhD, West Virginia University, (2005).
- 82) Li, J., Yavuz, I., Celik, I. and Guffey, S. Predicting worker exposure - the effect of ventilation velocity, free-stream turbulence and thermal condition. Journal of Occupational and Environmental Hygiene, **4**, 864 (2007). .
- 83) A. R. El-Sotouhy, Effects of breathing, posture, and air velocity on breathing zone gas concentrations for human subjects in a wind tunnel, Unpublished PhD, West Virginia University (2008).
- 84) Huang Rong Fung, Liu Gene Shin, Chen Yu-Kang, Yeh Wen-Yu, Chen Chun-Wann, Chen Chih-Chieh, Effects of flange size on dividing streamlines of exterior hoods in cross draft, Journal of occupational and environmental hygiene, **5**, 283-288 (2004).
- 85) Burgess WA, Murrow J, Evaluation of hoods for low volume-high velocity exhaust systems, Am Ind Hyg. Assoc J, 546-549 (1976).
- 86) Ellenbecker MJ, Gempel RF, Burgess WA. Capture efficiency of local exhaust ventilation systems, Am Ind Hyg Assoc J, **44**, 752-755 (1983).
- 87) Hampl V. Evaluation of industrial local exhaust hood efficiency by a tracer gas technique, Am Ind Hyg Assoc J, **45**, 485-490(1984).
- 88) Simmonds PG, Shoemaker GR, Lovelock JE, Improvements in the determination of sulfur hexafluoride for use as a meteorological tracer. Anal Chem, **44**, 860-863(1972).
- 89) Hampl V, Shulman S, Use of tracer gas techniques for industrial exhaust hood efficiency evaluation-application of sulfur hexafluoride for hood controlling particulate emissions. Am Ind Hyg. Assoc J, **46**, 379-386 (1985).
- 90) Hampl V, Niemela R, Shulman S, Bartley D, Use of tracer gas technique for industrial exhaust hood efficiency evaluation-Where to sample Am Ind Hyg. Assoc J, **47**, 281-287(1986).

- 91) Niemela R, Lefevre A, Muller JP, Aubertin G. Comparison of three tracer gases for determining ventilation effectiveness and capture efficiency. *Ann Occup Hyg.*, **35**, 405-417 (1991).
- 92) Peck RC, Validation of a method to determine a protection factor for laboratory hoods, *Am Ind Hyg. Assoc J*, **43**, 596-601 (1982).
- 93) Ivany RE, First MW, DiBerardinis LJ, A new method for quantitative, in-use testing of laboratory fume hoods, *Am Ind Hyg Assoc J*, **50**, 275-280 (1989).
- 94) DiBerardinis LJ, First MW, Ivany RE, Filed results of an in-place, quantitative performance test for laboratory fume hoods, *Appl Occup Environ Hyg*, **6**, 227-231 (1991).
- 95) Smith TC, Flynn MR, Dement JM, A design and performance analysis of laboratory fume hoods, *Appl Occup Environ Hyg.*, **9**, 117-124 (1994).
- 96) Mosovsky JA, Sulfur hexafluoride tracer gas evaluations on hood exhaust reductions, *Am Ind Hyg. Assoc J*, **56**, 44-49 (1995).
- 97) Altemose BA, Flynn MR, Sprankle J. Application of a tracer gas challenge with a human subject to investigate factors affecting the performance of laboratory fume hoods, *Am Ind Hyg. Assoc J*, **59**, 321-327 (1998).
- 98) Greenly PL, Billings CE, DiBerardinis LJ, Edwards RW, Barkley WE. Containment testing of laboratory hoods in the as-used condition. *Appl Occup Environ Hyg.* 2000;15, 209-216.
- 99) Woods JN, McKarns JS, Evaluation of capture efficiencies of large push-pull ventilation systems with both visual and tracer techniques, *Am Ind Hyg. Assoc J*, **56**, 1208-1214 (1995).
- 100) Watson SI, Cain JR, Cowie H, Cherrie JW, Development of a push-pull ventilation system to control solder fume, *Ann Occup Hyg.*, **45**, 669-676 (2001).
- 101) Marzal F, Gonzalez E, Minana A, Baeza A, Influence of push element geometry on the capture efficiency of push-pull ventilation systems in surface treatment tanks, *Ann Occup Hyg.*, **46**, 383-393 (2002).
- 102) Marzal F, Gonzalez E, Minana A, Baeza A, Determination, and interpretation of total and transversal liner efficiencies in push-pull ventilation systems for open surface tanks. *Ann Occup Hyg.*, **46**, 629-635 (2002).
- 103) Marzal F, Gonzalez E, Minana A, Baeza A. Methodologies for determining capture efficiencies in surface treatment tanks, *Am Ind Hyg. Assoc J*, **64**, 604-608 (2003).

- 104) 小嶋 純, トレーサー物質による局所排気フードの評価法, セイフティダイジェスト, **52**, pp.10-19(2006).
- 105) Dick, J.B., Measurement of ventilation using tracer gas, Heat. Pip. Air Condit, **22**, 131-137 (1950).
- 106) Kennedy, D.J., Stokes, A.W., Klinowski, W.G., Resolving complex mine ventilation problems with multiple tracer gases, In: 3rd Mine Ventilation Symposium, University Park, Pennsylvania, pp.213-218 (1987).
- 107) Thimons, E.D., Kissell, F.N., Tracer Gas as an Aid in Mine Ventilation Analysis, Bureau of Mines., (1974).
- 108) Arpa, G., Widiatmojo, A., Widodo, N.P., Sasaki, K., Tracer gas measurement and simulation of turbulent diffusion in mine ventilation airways, J. Coal Sci. Eng. (China), **14**, 523-529 (2008).
- 109) Mucho, T.P., Diamond, W.P., Garcia, F., Byars, J.D., Cario, S.L., Implications of recent NIOSH tracer gas studies on bleeder and gob gas ventilation design, In: SME Annual Meeting, Salt Lake City, UT., (2000).
- 110) Thimons, E.D., Bielicki, R.J., Kissell, F.N., Using Sulfur Hexafluoride as a Gaseous Tracer to Study Ventilation Systems in Mines, U.S. Bureau of Mines, Pittsburgh, PA., (1974).
- 111) Singh, A.K., Ahmad, I., Sahay, N., Varma, N.K., Singh, V.K., Air leakage through underground ventilation stoppings and in situ assessment of air leakage characteristics of remote filled cement concrete plug by tracer gas technique, J. South African Inst. Min. Metall., 101-106 (2004).
- 112) Timko, R.J., Thimons, E.D., Sulfur Hexafluoride as a Mine Ventilation Research Tool - recent Field Applications, U.S. Bureau of Mines, (1982).
- 113) Hargreaves, D.M., Lowndes, I.S., The computational modeling of the ventilation flows within a rapid development drivage, Tunn. Undergr. Space Technol, **22**, 150-160 (2007).
- 114) Heerden, J.V., Sullivan, P., The application of CFD for evaluation of dust suppression and auxiliary ventilating systems used with continuous miners. In:6th US Mine Ventilation Symposium, SME, Salt Lake City, Utah, USA, 293-297 (1993).
- 115) Huang, J., Bruining, J., Wolf, K.-H.A.A., Modeling of gas flow and temperature fields in underground coal fires, Fire Saf. J. **36**, 477-489 (2001).

- 116) Ren, T., Balusu, R., CFD modelling of goaf gas migration to improve the control of spontaneous combustion in longwalls. In: Coal Operators' Conference, University of Wollongong & the Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 259-264 (2005).
- 117) Yuan, L., Smith, A.C., Effects of ventilation and gob characteristics on spontaneous heating in longwall gob areas, In: 12th US/North American Mine Ventilation Symposium, SME, Reno, NV, USA, **12**, 141-147 (2008).
- 118) Yuan, L., Smith, A.C., CFD modelling of sampling location for early detection of spontaneous combustion in long-wall gab areas, *Int. J. Min. Mineral Eng.*, **4**, **1**, (2012).
- 119) Zhang, S., Wu, Z., Zhang, R., Kang, J., Dynamic numerical simulation of coal mine fire for escape capsule installation, *Saf. Sci.*, **50**, 600–606 (2012).
- 120) Huang, Z., Liu, Z., Chen, S., Zhang, Y., Zhang, Y., Numerical simulation and study on the transmission law of flame and pressure wave of pipeline gas explosion, *Saf. Sci.*, **50**, 806-810 (2012).
- 121) Balusu, R., Humpries, P., Harrington, P., Wendt, M., Xue, S., Optimum interstation strategies, In: Queensland Mining Industry Health and Safety Conference, Queensland, Australia, 133-144 (2002).
- 122) Heerden, J.V., Sullivan, P., The application of CFD for evaluation of dust suppression and auxiliary ventilating systems used with continuous miners, In: 6th US Mine Ventilation Symposium. SME, Salt Lake City, Utah, USA, 293-297 (1993).
- 123) Karacan, C.Ö., Ren, T., Balusu, R., Advances in grid-based numerical modeling techniques for improving gas management in coal mines, In: 12th US/North American Mine Ventilation Symposium. SME, Reno, Nevada, USA, 313-320 (2006).
- 124) Cheong, K.W.D., Djunaedy, E., Plh, T.K., Measurements and computations of contaminant's distribution in an office environment, *Build. Environ.*, **38**, 135-145 (2003).
- 125) Yang, X., Performance of three air distribution systems in VOC removal from an area source, *Build. Environ.*, **39**, 1289-1299 (2004).
- 126) Chen Q, Ventilation performance prediction for buildings, a method overview and recent applications, *Build Environ.*, **44**, 4 (2009.)
- 127) Linden PF, The fluid mechanics of natural ventilation, *Annu Rev Fluid Mech*, pp. 31 (1999).
- 128) Hunt GR, Linden PF, The fluid mechanics of natural ventilation e displacement ventilation by buoyancy-driven flows assisted by wind. *Build Environ*, **34**, 6 (1999).

- 129) Heiselberg P, Li Y, Andersen A, Bjerre M, Chen Z. Experimental and CFD evidence of multiple solutions in a naturally ventilated building, *Indoor Air*, **14**, (2004).
- 130) Li YG, Delsante A. Natural ventilation induced by combined wind and thermal forces, *Build Environ*, **36**, (2001).
- 131) Costola D, Blocken B, Hensen JLM, Overview of pressure coefficient data in building energy simulation and airflow network programs, *Build Environ*, **44**, 10 (2009).
- 132) Costola D, Blocken B, Ohba M, Hensen JLM, Uncertainty in airflow rate calculations due to the use of surface-averaged pressure coefficients, *Energy Build* **42**, 6 (2010).
- 133) Tsutsumi J, Katayama T, Ishii A, He P, Hayashi T, Investigation, and numerical simulation of the wind effects on thermal comfort in a house, *J Wind Eng Ind Aerod.*, **60**, (1996).
- 134) Gao NP, Niu JL, Perino M, Heiselberg P, The airborne transmission of infection between flats in high-rise residential buildings, tracer gas simulation. *Build Environ.*, **28**, (2003).
- 135) Tablada A, de Troyer F, Blocken B, Carmeliet J, Verschure H, On natural ventilation and thermal comfort in compact urban environments e the Old Havana case. *Build Environ*, **44**, 9(2009).
- 136) Van Hooff T, Blocken B, Coupled urban wind flow and indoor natural ventilation modelling on a high-resolution grid, a case study for the Amsterdam ArenA stadium, *Environ Modell Softw*, **25**, (2010).
- 137) Jiang Y, Alexander D, Jenkins H, Arthur R, Chen Q, Natural ventilation in buildings, measurement in a wind tunnel and numerical simulation with large-eddy simulation, *J Wind Eng Ind Aerod*, **91**, (2003).
- 138) Karava P, Stathopoulos T, Athienitis AK, Wind-induced natural ventilation analysis. *Sol Energy*, **81**, (2007).
- 139) Karava P, Stathopoulos T, Atheneites AK, Airflow assessment in cross-ventilated buildings with operable facade elements. *Build Environ*, **46**, (2011).
- 140) Bu Z, Kato S, Takahashi T, Wind tunnel experiments on wind-induced natural ventilation rate in residential basements with areaway space, *Build Environ.*, **45**, (2011).
- 141) Norton T, Grant J, Fallon R, Sun DW, Assessing the ventilation effectiveness of naturally ventilated livestock buildings under wind dominated conditions using computational fluid dynamics, *Biosystems Eng*, **103**, (2009).

- 142) Norton T, Grant J, Fallon R, Sun DW, Optimising the ventilation configuration of naturally ventilated livestock buildings for improved indoor environmental homogeneity, *Build Environ*, **45**, 9(2011).
- 143) Van Hooff T, Blocken B, On the effect of wind direction and urban surroundings on natural ventilation of a large semi-enclosed stadium. *Comput Fluids*, **39**, 7(2009).
- 144) 宮寄 武, 渦運動の観察, 日本流体力学会, 流体力学ハンドブック, 東京, 丸善(株), pp. 186-201 (1998).
- 145) Welling, I., Kulmala, I., Andersson, I. M., Rosen, G., Raisanen, J., Mielo, T., Saamanen, A., Niemela, R, Extent of the reverse flow wake region produced by a body in a uniform flow field, *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, **16**, 900 (2001).
- 146) Tielemans, E., Schneider, T., Goede, H., Tischer, M., Warren, N., Kromhous, H., VanTongeren, M., VanHemmen, J., Cherrie, J.W, Conceptual Model for assessment of inhalation exposure, Defining modifying factors, *Annals of Occupational Hygiene*, **52**, 577 (2008).
- 147) J Li, I Yavuz, I Celik, S Guffey, Predicting Worker Exposure The Effect of Ventilation Velocity, Free-Stream Turbulence and Thermal Condition, *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, **7**, 864-874 (2007).
- 148) Flynn MR, Ljungqvist B, A review of wake effects on worker exposure, *Ann Occup Hyg.*, **39**, 211-221 (1995).
- 149) Welling I, Andersson IM, Rosen G, et al, Contaminant dispersion in the vicinity of a worker in a uniform velocity field, *Ann Occup Hyg.*, **44**, 219-225 (2000).
- 150) Welling I, Kulmala I, Andersson IM, et al., Extent of the reverse flow wake region produced by a body in a uniform flow field, *Appl Occup Environ Hyg.*, **16**, 900-904 (2001).
- 151) 小嶋 純, 換気気流中の作業員周辺に生じる逆流現象, *セイフティダイジェスト*, **48**, 2-13 (2002).
- 152) Ojima J, Worker exposure due to reverse flow in push- pull ventilation and development of a reverse flow pre-venting system, *J Occup Health*, **44**, 391-397 (2002).
- 153) 小嶋 純, 局所排気フードによって作業員の体躯周辺に惹起される逆流現象の実験室的検証, *産衛誌*, **45**, 125-132 (2003).
- 154) Guffey, S. E. and Barnea, N., Effects of face velocity, flanges, and mannikin position on the effectiveness of a benchtop enclosing hood in the absence of cross-drafts, *American Industrial Hygiene Association Journal*, **55**, 132 (1994).

- 155) Tseng, L., Huang, R. F., Chen, C. and Chang, C. P., Correlation between airflow patterns and performance of a laboratory fume hood, *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, **3**, 694 (2006).
- 156) Altemose, B. A., Flynn, M. R. and Sprankle, J., Application of a tracer gas challenge with a human subject to investigate factors affecting the performance of laboratory fume hoods. *American Industrial Hygiene Association Journal*, **59**, 321(1998).
- 157) Tseng, L., Huang, R. F., Chen, C. and Chang, C. P., Effects of sash movement and walk-bys on aerodynamics and contaminant leakage of laboratory fume cupboards, *Industrial Health*, **45**, 199 (2007).
- 158) Ellenbecker, M.J., R.J. Gempel, and W.A. Burgess, Capture efficiency of local exhaust ventilation systems, *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, **44**, 752-755 (1983).
- 159) Flynn, M.R., and M.J. Ellenbecker, The potential flow solution for airflow into a flanged circular hood, *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, **46**, 318-322 (1985).
- 160) Flynn, M.R., and M.J. Ellenbecker, Capture efficiency of flanged circular local exhaust hoods, *Ann. Occup. Hyg.*, **30**, 497-513 (1986).
- 161) Flynn, M.R., and M.J. Ellenbecker, Empirical validation of theoretical velocity fields into flanged circular hoods, *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, **48**, 380-389 (1987).
- 162) Flynn, M.R., and C. Miller, Comparison of models for flow through flanged and plan circular hoods, *Ann. Occup. Hyg.*, **32**, 373-384 (1988).
- 163) Conroy, L.M., M.J. Ellenbecker, and M.R. Flynn, Prediction and measurement of velocity into flanged slot hoods, *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, **49**, 226-234 (1988).
- 164) Alenius, S., and A. Jansson, Air Flow and Particle Transport into Local Exhaust Hood—A Verified Computer Mode, Solna, Sweden, National Institute of Occupational Health, pp.34 (1989).
- 165) Heinsohn, R.J., *Industrial Ventilation, Engineering Principles*, New York, John Wiley & Sons, pp.360-428 (1991).
- 166) Huang, R. F., Sir, S. Y., Chen, Y., Yeh, W., Chen, C. and Chen, C, Capture envelopes of rectangular hoods in cross drafts, *American Industrial Hygiene Association Journal*, **62**, 563 (2001).
- 167) 環境技術研究所, 作業環境測定の実施から評価まで, pp.121-123 (2016).

## 第 2 章 側方吸引型外付け式フードにおける外乱気流を考慮した漏洩を抑制する必要排風量

### 2.1 研究背景と目的

様々な化学物質を取り扱う工場などの作業現場では、作業に伴って粉じん、ミスト、蒸気が高濃度で発散し、周辺の空気中に拡散することにより、作業者が有害物質にばく露される可能性が高い<sup>1-4)</sup>。このような作業場において作業者の健康と安全を守るため、局所排気装置、プッシュプル型換気装置及び全体換気装置などの工学的対策が行われてきた。局所排気装置とは、作業工程で発生した作業者の健康に影響を及ぼす有害物質を、周囲に拡散する前になるべく発散したときの高濃度の状態で吸い込み、また吸い込んだ空気中の有害物質をできるだけ除去してから排出する装置であり、作業環境中の有害物質対策に広く用いられる手段のひとつである。

局所排気装置のフードは、吸引方式や設置方法によって幾つかの種類に分類されるが、その中で外付け式フードは囲い式フードと比べ作業性を損なわず、設置が容易であることから現場で広く用いられている。しかし、外付け式フードの吸い込み気流の特性によって、開口面から離れると風速が二次関数的に減少し、吸い込み効果が急激に低下する<sup>5-7)</sup>。フードの型式や有害物質の状態(ガス状・粒子状)などの違いによって、法規則に定められた制御風速を満たす必要がある<sup>8)</sup>。制御風速とは、有害物質を吸引するために必要な風速を示しており、外付け式フードにおいては、フードの開口面から最も離れた作業位置(捕捉点)の風速が制御風速を満たしている必要がある。また、設計時には、捕捉点で汚染物質をフードへ搬送する制御風速を得られるための排風量の計算が必要である。

外付け式フードの設計において、必要排風量を求める際には Dalla Valle の式がよく用いられる<sup>9)</sup>。この計算式を用いていくつかの種類の外付け式フードに対し、一定な風量で吸引するとき求めた開口面からの距離と風速との関係は実際の測定結果とよく一致する。しかし、制御風速は作業状況や作業による有害物質の発散速度、外乱気流の大きさを考慮しているため、制御風速を満たす外付け式フードを設計する際、外乱気流が小さい場合には、従来の Dalla Valle 式で求めた必要排風量が過剰になる場合が多く、電力消費の増加や屋外に排気される室内空調への負荷が大きくなることから、エネルギーコストの増加に直結する。

外乱気流の発生要因は、窓や戸口の開放による外気の流入、エアコンや全体換気による給気、高熱発生源による対流、または作業人や物体の移動に伴う気流などがあげられる。作業場で制御風速を満たす局所排気装置を計画する場合、これらの外乱気流

を加味しているのが一般的である。また、小嶋らは、外付け式長方形型フードに対して、0.2m/s以下の外乱気流であれば、フードの捕集能力に影響がなく、有害物質の漏洩を完全に防ぐためには、開口面の吸引風速が1.0m/s以上必要であると指摘している<sup>10)</sup>。

また、令和3年4月に溶接ヒュームが特定化学物質障害予防規則の対象になった。溶接作業はシールドガス等の問題があるため、局排等の設置は義務付けられていないが、全体換気またはそれと同等以上の対策が必要となっており、可能であれば局排を設置することが望ましい。粉じん則で規定されている制御風速1.0m/sを、物性(粒径など)の違いや現場の状況などに応じて柔軟に運用することにより、局排を使用しても溶接現場で問題となっているシールドガスへの妨害による溶接不良の問題が低減できると考えられる。

そこで本研究では、作業台上に設置した外付け式長方形型フードとスロット型フードを対象として、現場で溶接ヒュームが発生している状態を想定し、実験室での煙発生装置により発生する軽い粒子に対し、外乱気流の発生位置及び風速とフード周辺への漏洩濃度の関係を求めることにより、作業環境を良好に維持できる最適な風量を求めることを目的としている。

## 2.2 実験装置と方法

外付け式フード(開口面サイズ W500mm×H50mm、W500mm×H100mm、およびW500mm×H300mm)に長さ300mmのレデューサを介してダクトと排気ファン(昭和電機株式会社製 KSB-3700 または SBT-600)を接続した。排気ダクトの途中に複合ピトー管(ウェットマスター株式会社製 エアロアイ)を設置し、ピトー管からの圧力を微差圧計(長野計器社製 GC62 デジタル微差圧計)で速度圧を計測することにより排風量を求めた。

実験装置の概略図を図2.1に示す。本実験では外乱気流をフード開口面に対して3方向(斜め前方45°、横風方向、斜め後方45°)から発生させ、それぞれの外乱気流が発生する状況において、発生させた煙をフードで捕捉できる排風量を測定した。各サイズの外付け式フードをそれぞれ作業台(高さ750mm×横幅1200mm×縦幅750mm)上に設置し、図2.2に示した煙発生装置(日本カノマックス株式会社製 Model 8304)を用いて、内径35mmのノズルに接続し、フード開口面から500mm離れた位置で、溶接ヒュームの上昇速度を参考に0.5m/sの速度で煙を発生させた。

また、定盤の上で小物機械部品を載せて作業する溶接作業(加工)などを行う現場に

対応させ、部品の高さをおおよそ 100mm から 150mm と想定し、発煙ノズルの高さは 100mm に設定した<sup>1)</sup>。この高さは本実験で使用した 3 種類の外付け式フードの中で、スロット型フードと長方形型フードの境としている縦横比 0.2 の開口面サイズが W500mm×H100mm のフードの縦幅と一致している。

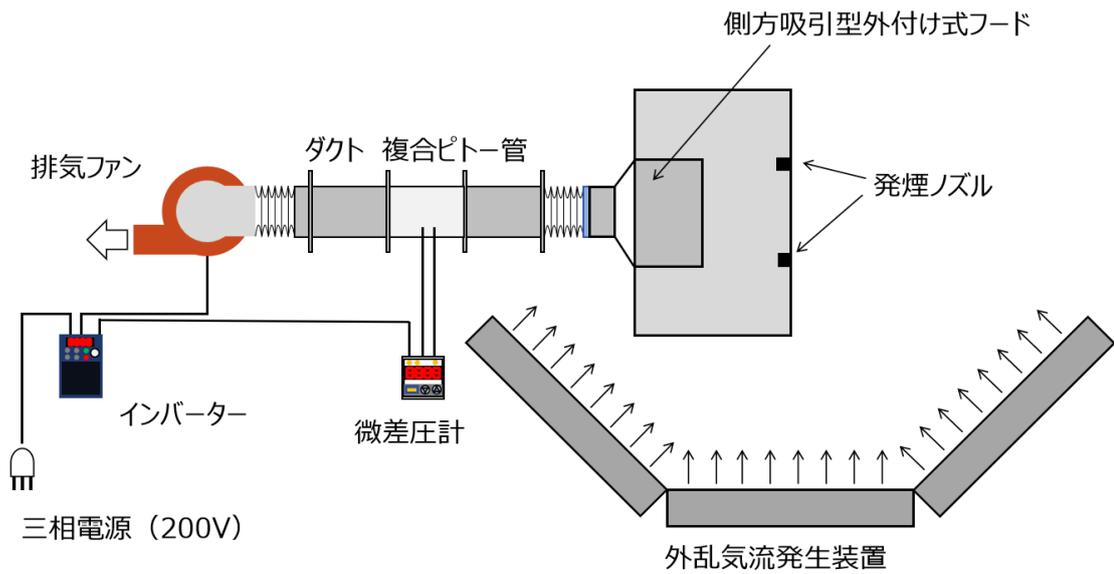


図 2.1 実験装置概略図



図 2.2 煙発生装置の外観



漏洩を測定する際にプッシュフードと煙発生装置を同時に稼働させ、30秒後にフードの開口面周辺と作業台周囲の漏洩濃度を測定し、測定後各測定点の粉じん計のカウント数から漏洩の状況を判断し、漏れが発生しない排風量を求めた。また、本研究の漏れ発生の評価は、予備実験として排風量が0の場合の漏洩濃度を測定し、その時の最大値であった13264カウントの約1/100を基準に、すなわち、カウント数が100以上である場合を漏れ発生と判断する。測定条件を表2.1に示した。

表 2.1 測定条件

フード開口面 サイズ	外乱気流 発生速度 (m/s)	外乱気流発生方向 (フード開口面に対する)	煙発生速度 (m/s)	漏洩濃度 測定時間 (min)
500mm×50mm 500mm×100mm 500mm×300mm	0.2、0.3、 0.4、0.5	斜め前方 45° 横方向 斜め後方 45°	0.5	3

### 2.3 数値流体力学的解析に基づいた数値実験

本研究では実験室内での測定とともに数値流体力学的解析(CFD 解析)に基づいた数値実験も実施した。流体の現象は大きく分けて3つの保存則で記述される。すなわち

- 1)質量保存則(連続の式)
- 2)運動量保存則(運動方程式)
- 3)エネルギー保存則(エネルギー保存式)

連続の式および運動方程式はそれぞれ式(2-1)、式(0-2)の通りになる。ここで $\rho$ は密度、 $\mathbf{u}$ は速度、 $p$ は圧力、 $\mathbf{K}$ は外力である。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (2-1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \text{grad}) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \text{grad} p + \nu \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \mathbf{u} + \mathbf{K} \quad (0-2)$$

今回の数値実験で温度依存性は無視したので熱力学第1法則から得られるエネルギー方程式は考慮しない。式(2-1)と式(0-2)を連立させて解けば解が得られるのだが、2階の非線形偏微分方程式は一般的には解けない。そこで式(2-1)と式(0-2)を離散化して

近似的な数値解を得る方法が CFD 解析である。偏微分方程式を離散化することとは、解析領域を格子状に細分化することであり、離散化された偏微分方程式を指定した境界条件、初期値のもとで、各格子に対して数値的な近似解を求める。近年は汎用の CFD 解析コードの発展が著しく、コンピューターの性能向上もあって大型計算機(いわゆるスパコン)やワークステーションではなく、パーソナルコンピュータでも十分に解析できるようになってきた。

表 2.2 数値実験解析条件

解析領域	5m×5m×3m
メッシュ分割数	elements:197392(非構造メッシュ)
乱流モデル	standard k-ε
対象流体	空気：密度 1.2kg/m <sup>3</sup>
フード の開口面サイズ	W500mm×H50mm
	W500mm×H100mm
	W500mm×H300mm
外乱気流発生方向 (フード開口面に対する)	斜め前方 45°、横方向 90°、斜め後方 45°
ダクトサイズ	内寸： 250mm×250mm、厚み：5mm
フード及びダクトの材質	アルミニウム
排風量	ダクトからの流出速度で規定 0、1.72、3.44、5.17、6.89、8.61、10.33、12.05、 13.77m/s

本研究では、アメリカの ANSYS(アンシス)社製の 3 次元汎用熱流体解析ソフト「Fluent」を用い数値実験を行った。数値実験解析条件を表 2.2 に示した。解析領域は 5m×5m×3m、メッシュ分割数は約 197,392(非構造メッシュ)、ダクト(220mm×220mm)とフード(開口面サイズ：W500mm×H50mm、W500mm×H100mm、W500mm×H300mm)の材

質はアルミとした。排風量は 0、5、10、15、20、25、30、35、40m<sup>3</sup>/min であるが、実際の計算では解析領域からの流出条件(境界条件)としてダクト内風速を規定した。つまり流出条件としてのダクト内風速は 0、1.72、3.44、5.17、6.89、8.61、10.33、12.05、13.77m/s である。

#### 2.4 漏洩濃度の測定結果

表 2.3 に各開口面サイズのフード (W500mm×H50mm、W500mm×H100mm、W500mm×H300mm)における外乱気流がない場合(無風状態)の排風量と漏洩濃度の結果を示した。

ここで、 $C_0$ は発煙させる前にデジタル粉じんで測定した空気中の粒子カウント数(BG濃度)測定値を表し、 $C$ は測定時間3分となった時の粒子カウント数を表す。測定後、各測定点の粒子カウント数 $C$ と $C_0$ の差の最大値( $C_{max}$ )で漏洩を評価する。

表 2.3 より、外乱気流がない場合(無風状態)において、それぞれのフード開口面サイズにおける漏洩を完全に防ぐ排風量が 7、8、8m<sup>3</sup>/min となった。また、漏れが発生した場合において、フード開口面サイズにかかわらず、フード開口面に近い位置である測定点①、②と⑧のカウント数は他の測定点より大きくなった。つまり、外乱気流が存在しない場合では、フード開口面の近い位置で漏洩が発生しやすいことが確認できた。

表 2.3 3種類の開口面サイズにおける外乱気流がない場合の排風量と漏洩濃度結果

フード 開口面 サイズ (mm)	排風量 (m <sup>3</sup> /min)	粒子カウント数								
		測定点	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
500×50	6	C <sub>0</sub>	9	6	12	8	11	12	7	9
		C	173	218	25	42	34	37	16	157
		C-C <sub>0</sub>	184	212	13	34	23	25	9	148
	C <sub>max</sub>	212								
	7	C	67	75	16	21	18	17	10	34
		C-C <sub>0</sub>	58	69	4	13	7	5	3	25
C <sub>max</sub>		69								
500×100	7	C	87	423	39	58	48	41	27	173
		C-C <sub>0</sub>	78	417	27	50	37	29	20	164
		C <sub>max</sub>	417							
	8	C	54	88	24	18	24	36	15	64
		C-C <sub>0</sub>	45	82	12	10	13	24	8	55
		C <sub>max</sub>	82							
500×300	7	C	128	786	31	53	48	63	27	204
		C-C <sub>0</sub>	119	782	19	47	37	51	20	195
		C <sub>max</sub>	782							
	8	C	37	77	23	47	43	32	16	56
		C-C <sub>0</sub>	28	71	12	39	32	20	9	47
		C <sub>max</sub>	71							

表 2.4 W500mm×H50mm のフード、斜め前方 45°外乱気流の場合の漏洩濃度結果

外乱気流 発生速度 (m/s)	排风量 (m <sup>3</sup> /min)	粒子カウント数								
		測定点	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
		C <sub>0</sub>	12	2	8	13	6	16	7	8
0.2	17	C	36	226	724	56	47	25	9	14
		C-C <sub>0</sub>	24	224	716	43	41	9	2	6
		C <sub>max</sub>	716							
	18	C	14	36	61	17	8	22	14	10
		C-C <sub>0</sub>	2	34	53	4	41	6	7	2
		C <sub>max</sub>	53							
0.3	22	C	25	376	1127	76	62	34	12	9
		C-C <sub>0</sub>	13	374	1114	63	56	18	5	1
		C <sub>max</sub>	1114							
	23	C	22	45	88	15	15	20	8	10
		C-C <sub>0</sub>	10	43	80	2	9	4	1	2
		C <sub>max</sub>	80							
0.4	26	C	23	1673	2884	78	18	39	18	8
		C-C <sub>0</sub>	11	1671	2876	65	12	13	11	0
		C <sub>max</sub>	2876							
	27	C	32	74	68	58	33	25	8	12
		C-C <sub>0</sub>	20	72	60	45	27	9	1	4
		C <sub>max</sub>	72							
0.5	30	C	42	748	1562	87	76	21	10	10
		C-C <sub>0</sub>	30	746	1554	74	70	5	3	2
		C <sub>max</sub>	1554							
	31	C	34	85	88	65	20	18	12	18
		C-C <sub>0</sub>	22	83	80	52	14	2	5	10
		C <sub>max</sub>	83							

表 2.5 W500mm×H50mm のフード、横方向外乱気流の場合の漏洩濃度結果

外乱気流 発生速度 (m/s)	排风量 (m <sup>3</sup> /min)	粒子カウント数								
		測定点	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
		C <sub>0</sub>	12	2	8	13	6	16	7	8
0.2	22	C	28	48	828	343	67	24	18	12
		C-C <sub>0</sub>	16	46	820	330	61	8	11	4
		C <sub>max</sub>	820							
	23	C	35	26	73	77	60	21	17	22
		C-C <sub>0</sub>	23	24	65	64	54	5	10	14
		C <sub>max</sub>	65							
0.3	29	C	26	31	2373	1258	72	34	9	9
		C-C <sub>0</sub>	14	29	2365	1245	66	18	2	1
		C <sub>max</sub>	2365							
	30	C	37	33	92	89	57	29	12	9
		C-C <sub>0</sub>	25	31	84	76	51	13	5	1
		C <sub>max</sub>	84							
0.4	35	C	142	46	1175	432	176	53	16	12
		C-C <sub>0</sub>	130	44	1167	419	171	37	9	4
		C <sub>max</sub>	1167							
	36	C	32	22	37	49	18	26	17	9
		C-C <sub>0</sub>	20	20	29	36	12	10	10	1
		C <sub>max</sub>	36							

表 2.6 W500mm×H50mm のフード、斜め後方 45°外乱気流の場合の漏洩濃度結果

外乱気流 発生速度 (m/s)	排风量 (m <sup>3</sup> /min)	粒子カウント数								
		測定点	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
		C <sub>0</sub>	12	2	8	13	6	16	7	8
0.2	18	C	20	14	64	442	189	136	17	22
		C-C <sub>0</sub>	8	12	56	429	183	120	10	14
		C <sub>max</sub>	429							
	19	C	19	13	26	89	75	77	9	12
		C-C <sub>0</sub>	7	11	18	76	69	61	2	4
		C <sub>max</sub>	76							
0.3	22	C	21	16	53	1453	218	327	12	10
		C-C <sub>0</sub>	9	14	47	1440	212	311	5	2
		C <sub>max</sub>	1440							
	23	C	34	10	33	73	79	64	23	10
		C-C <sub>0</sub>	21	8	25	60	73	48	16	2
		C <sub>max</sub>	73							
0.4	27	C	18	22	61	872	228	173	28	18
		C-C <sub>0</sub>	6	20	53	859	222	157	21	10
		C <sub>max</sub>	859							
	28	C	18	34	50	81	72	74	21	11
		C-C <sub>0</sub>	6	32	42	68	66	58	14	3
		C <sub>max</sub>	68							
0.5	32	C	27	26	34	549	352	276	15	27
		C-C <sub>0</sub>	15	24	26	536	346	260	8	19
		C <sub>max</sub>	536							
	33	C	14	12	43	76	45	70	10	9
		C-C <sub>0</sub>	2	10	35	63	39	54	3	1
		C <sub>max</sub>	63							

開口面サイズが W500mm×H50mm のフードに対して、斜め前方 45°で外乱気流を発生させた場合の排風量と漏洩濃度の結果を表 2.4 に示した。表 2.4 に示したように外乱気流風速 0.2、0.3、0.4、0.5m/s に対して漏洩を完全に防ぐ排風量はそれぞれ 18、23、27、31m<sup>3</sup>/min となった。また、それ以下の排風量の場合(17、22、26、30m<sup>3</sup>/min)、外乱気流の下流側である測定点②と③のカウント数は他の測定点より大きくなった。つまり、この条件では、外乱気流の下流側で漏洩が発生しやすかった。一方、開口面サイズが W500mm×H50mm のフードに対して、表 2.5 に示したように横方向の外乱気流を発生させた時、外乱気流風速 0.2、0.3、0.4m/s における漏洩を完全に防ぐ排風量はそれぞれ 23、30、36m<sup>3</sup>/min となった。また、それ以下の排風量の場合(22、29、35m<sup>3</sup>/min)、測定点③と④のカウント数は他の測定点より大きくなった。すなわち、フード開口面に対する斜め前方 45°で外乱気流を発生させた場合と同様に、外乱気流の下流側で漏洩が発生しやすかった。そして、斜め後方 45°の外乱気流を発生させた場合の排風量と漏洩濃度の結果を表 2.6 に示した。表 2.6 より、外乱気流風速 0.2、0.3、0.4、0.5m/s における漏洩を完全に防ぐ排風量はそれぞれ 19、23、28、33m<sup>3</sup>/min となった。また、それ以下の排風量(18、22、27、32m<sup>3</sup>/min) の場合、測定点④と⑤のカウント数は他の測定点より大きくなった。つまり、この条件では、他の外乱気流を発生した場合の結果と同様に、外乱気流の下流側で漏洩が発生しやすかった。

また、開口面サイズが W500mm×H100mm のフードに対して、斜め前方 45°で外乱気流を発生させた場合の排風量と漏洩濃度の結果を表 2.7 に示した。表 2.7 に示したように外乱気流風速 0.2、0.3、0.4、0.5m/s における漏洩を完全に防ぐ排風量はそれぞれ 17、21、25、29m<sup>3</sup>/min となった。また、それ以下の排風量の場合(16、20、24、28m<sup>3</sup>/min)、外乱気流の下流側である測定点②と③のカウント値が他の測定点より大きくなった。つまり、この条件では、外乱気流の下流側で漏洩が発生しやすかった。一方、表 2.8 に示したように横方向の外乱気流を発生させた時、外乱気流風速(0.2、0.3、0.4、0.5m/s) における漏洩を完全に防ぐ排風量はそれぞれ 19、27、34、41m<sup>3</sup>/min となった。また、それ以下の排風量(18、26、33、40m<sup>3</sup>/min) の場合、測定点③と④のカウント数が他の測定点より大きくなった。すなわち、フード開口面に対する斜め前方 45°で外乱気流を発生させた場合と同様に、外乱気流の下流側で漏洩が発生しやすかった。

そして、斜め後方 45°の外乱気流を発生させた場合の排風量と漏洩濃度の結果を表 2.9 に示した。表 2.9 より、外乱気流風速 0.2、0.3、0.4、0.5m/s における漏洩を完全に防ぐ排風量はそれぞれ 18、23、28、33m<sup>3</sup>/min となった。また、それ以下の排風量(17、22、27、32m<sup>3</sup>/min) の場合、測定点④と⑤のカウント数は他の測定点より大きくなっ

た。つまり、この条件では、他の外乱気流を発生させた場合の結果と同様に、外乱気流の下流側で漏洩が発生しやすかった。

表 2.7 W500mm×H100mm のフード、斜め前方 45°外乱気流の場合の漏洩濃度結果

外乱気流 発生速度 (m/s)	排風量 (m <sup>3</sup> /min)	粒子カウント数								
		測定点	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
		C <sub>0</sub>	13	9	8	8	12	6	7	6
0.2	16	C	46	575	717	96	64	32	16	18
		C-C <sub>0</sub>	33	566	709	88	52	26	9	12
		C <sub>max</sub>	709							
	17	C	27	67	83	34	22	18	12	16
		C-C <sub>0</sub>	14	58	75	26	10	12	5	10
		C <sub>max</sub>	75							
0.3	20	C	67	450	2624	223	75	46	20	15
		C-C <sub>0</sub>	54	441	2616	215	63	40	13	9
		C <sub>max</sub>	2616							
	21	C	31	58	52	25	36	26	18	15
		C-C <sub>0</sub>	18	49	44	17	24	20	11	9
		C <sub>max</sub>	49							
0.4	24	C	72	1574	412	281	85	24	27	32
		C-C <sub>0</sub>	59	1565	404	273	73	18	20	26
		C <sub>max</sub>	1565							
	25	C	27	36	52	57	38	23	17	14
		C-C <sub>0</sub>	14	27	44	49	26	17	10	8
		C <sub>max</sub>	49							
0.5	28	C	252	737	1532	338	217	89	23	18
		C-C <sub>0</sub>	239	728	1524	330	205	83	16	12
		C <sub>max</sub>	1524							
	29	C	22	43	65	46	33	23	15	11
		C-C <sub>0</sub>	9	34	57	38	21	17	8	5
		C <sub>max</sub>	57							

表 2.8 W500mm×H100mm のフード、横方向外乱気流の場合の漏洩濃度結果

外乱気流 発生速度 (m/s)	排風量 (m <sup>3</sup> /min)	粒子カウント数								
		測定点	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
		C <sub>0</sub>	13	9	8	8	12	6	7	6
0.2	18	C	52	72	512	429	43	22	15	18
		C-C <sub>0</sub>	39	83	504	421	31	16	8	12
		C <sub>max</sub>	504							
	19	C	18	54	62	27	22	17	15	21
		C-C <sub>0</sub>	5	45	54	19	10	11	8	15
		C <sub>max</sub>	54							
0.3	26	C	74	121	552	326	32	17	24	19
		C-C <sub>0</sub>	61	112	544	318	20	11	17	13
		C <sub>max</sub>	544							
	27	C	24	51	85	75	32	18	15	12
		C-C <sub>0</sub>	11	42	77	63	20	12	8	6
		C <sub>max</sub>	77							
0.4	33	C	65	212	347	462	62	28	21	17
		C-C <sub>0</sub>	52	203	339	454	50	22	14	11
		C <sub>max</sub>	454							
	34	C	18	42	50	27	18	17	26	14
		C-C <sub>0</sub>	5	33	42	19	6	11	19	8
		C <sub>max</sub>	42							
0.5	40	C	76	123	1272	473	48	27	17	22
		C-C <sub>0</sub>	63	114	1264	465	36	21	10	16
		C <sub>max</sub>	1264							
	41	C	23	43	56	79	24	28	14	24
		C-C <sub>0</sub>	10	34	48	71	12	22	7	18
		C <sub>max</sub>	71							

表 2.9 W500mm×H100mm のフード、斜め後方 45°外乱気流の場合の漏洩濃度結果

外乱気流 発生速度 (m/s)	排风量 (m <sup>3</sup> /min)	粒子カウント数								
		測定点	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
		C <sub>0</sub>	13	9	8	8	12	6	7	6
0.2	17	C	21	18	65	626	1427	221	15	17
		C-C <sub>0</sub>	7	9	57	618	1415	215	8	9
		C <sub>max</sub>	1415							
	18	C	18	26	52	78	43	18	13	16
		C-C <sub>0</sub>	5	17	44	70	31	12	6	10
		C <sub>max</sub>	70							
0.3	22	C	24	21	87	367	326	118	15	15
		C-C <sub>0</sub>	11	12	79	359	314	112	8	9
		C <sub>max</sub>	359							
	23	C	25	14	75	67	45	18	15	15
		C-C <sub>0</sub>	12	5	67	59	33	12	8	9
		C <sub>max</sub>	59							
0.4	27	C	17	18	72	427	664	127	27	19
		C-C <sub>0</sub>	4	9	64	419	652	121	20	13
		C <sub>max</sub>	652							
	28	C	24	17	53	86	81	45	18	16
		C-C <sub>0</sub>	11	8	45	78	69	39	11	10
		C <sub>max</sub>	78							
0.5	32	C	22	26	127	2875	764	107	25	17
		C-C <sub>0</sub>	9	17	119	2867	752	101	18	11
		C <sub>max</sub>	2867							
	33	C	19	27	43	77	64	48	18	23
		C-C <sub>0</sub>	6	18	35	69	52	42	11	17
		C <sub>max</sub>	69							

表 2.10 W500mm×H300mm のフード、斜め前方 45°外乱気流の場合の漏洩濃度結果

外乱気流 発生速度 (m/s)	排风量 (m <sup>3</sup> /min)	粒子カウント数								
		測定点	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
		C <sub>0</sub>	8	12	7	7	10	6	8	5
0.2	14	C	23	246	357	118	74	32	21	16
		C-C <sub>0</sub>	15	234	350	111	64	26	13	11
		C <sub>max</sub>	350							
	15	C	19	75	68	25	22	19	12	15
		C-C <sub>0</sub>	11	63	61	18	12	13	4	10
		C <sub>max</sub>	63							
0.3	19	C	47	1265	637	78	84	28	17	12
		C-C <sub>0</sub>	39	1253	630	71	74	22	9	7
		C <sub>max</sub>	1253							
	20	C	14	67	86	35	61	21	10	18
		C-C <sub>0</sub>	6	55	79	28	51	15	2	13
		C <sub>max</sub>	79							
0.4	24	C	88	548	1327	214	54	37	16	17
		C-C <sub>0</sub>	80	426	1320	207	44	31	8	12
		C <sub>max</sub>	1320							
	25	C	22	53	75	38	31	29	14	11
		C-C <sub>0</sub>	14	41	68	31	21	23	6	6
		C <sub>max</sub>	68							
0.5	28	C	187	376	861	146	79	37	22	12
		C-C <sub>0</sub>	179	364	854	139	69	31	14	7
		C <sub>max</sub>	854							
	29	C	17	39	58	22	43	27	24	17
		C-C <sub>0</sub>	9	27	51	15	33	21	16	12
		C <sub>max</sub>	51							

表 2.11 W500mm×H300mm のフード、横方向外乱気流の場合の漏洩濃度結果

外乱気流 発生速度 (m/s)	排风量 (m <sup>3</sup> /min)	測定点における粒子カウント数								
		測定点	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
		C <sub>0</sub>	8	12	7	7	10	6	8	5
0.2	18	C	32	128	245	189	56	18	12	15
		C-C <sub>0</sub>	24	116	238	182	46	12	4	10
		C <sub>max</sub>	238							
	19	C	23	77	82	36	21	16	13	14
		C-C <sub>0</sub>	15	65	75	29	11	10	5	9
		C <sub>max</sub>	75							
0.3	27	C	43	84	887	216	42	28	14	17
		C-C <sub>0</sub>	35	72	870	209	32	22	6	12
		C <sub>max</sub>	870							
	28	C	17	25	53	56	31	18	12	23
		C-C <sub>0</sub>	9	13	48	49	21	12	4	18
		C <sub>max</sub>	49							
0.4	34	C	32	204	1532	429	83	26	13	18
		C-C <sub>0</sub>	24	192	1525	422	73	20	5	13
		C <sub>max</sub>	1525							
	35	C	12	33	42	46	27	17	22	12
		C-C <sub>0</sub>	4	21	35	39	17	11	14	7
		C <sub>max</sub>	39							
0.5	41	C	43	67	1339	536	97	36	18	15
		C-C <sub>0</sub>	35	55	1332	529	87	30	10	10
		C <sub>max</sub>	1332							
	42	C	25	32	73	86	24	18	17	12
		C-C <sub>0</sub>	17	20	66	79	14	12	9	7
		C <sub>max</sub>	79							

表 2.12 W500mm×H300mm のフード、斜め後方 45°外乱気流の場合の漏洩濃度結果

外乱気流 発生速度 (m/s)	排风量 (m <sup>3</sup> /min)	粒子カウント数								
		測定点	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
		C <sub>0</sub>	8	12	7	7	10	6	8	5
0.2	16	C	21	18	52	237	351	56	21	13
		C-C <sub>0</sub>	13	6	45	230	341	50	13	8
		C <sub>max</sub>	341							
	17	C	16	15	32	76	59	23	14	12
		C-C <sub>0</sub>	8	3	25	69	49	17	6	7
		C <sub>max</sub>	69							
0.3	22	C	17	25	18	1318	627	41	16	13
		C-C <sub>0</sub>	9	13	11	1311	617	35	8	8
		C <sub>max</sub>	1311							
	23	C	13	15	42	73	54	37	14	12
		C-C <sub>0</sub>	5	3	35	66	44	31	6	7
		C <sub>max</sub>	66							
0.4	27	C	23	16	132	2252	1237	124	17	14
		C-C <sub>0</sub>	15	4	125	2245	1227	118	9	9
		C <sub>max</sub>	2245							
	28	C	17	23	54	89	78	41	21	12
		C-C <sub>0</sub>	9	11	47	81	77	35	13	7
		C <sub>max</sub>	81							
0.5	32	C	32	18	129	742	337	176	22	17
		C-C <sub>0</sub>	24	6	122	735	327	170	14	12
		C <sub>max</sub>	735							
	33	C	13	18	52	72	55	31	18	13
		C-C <sub>0</sub>	5	6	45	65	45	25	10	8
		C <sub>max</sub>	65							

開口面サイズが W500mm×H300mm のフードに対して、斜め前方 45°で外乱気流を発生させた場合の排風量と漏洩濃度の結果を表 2.10 に示した。、外乱気流風速 0.2、0.3、0.4、0.5m/s における漏洩を完全に防ぐ排風量はそれぞれ 15、20、25、29m<sup>3</sup>/min となった。また、それ以下の排風量の場合(14、19、24、28m<sup>3</sup>/min)、外乱気流の下流側である測定点②と③のカウント値は他の測定点より大きくなった。つまり、この条件では、外乱気流の下流側で漏洩が発生しやすかった。

一方、表 2.11 に示したように横方向の外乱気流を発生した時、外乱気流風速(0.2、0.3、0.4、0.5m/s) における漏洩を完全に防ぐ排風量はそれぞれ 19、28、35、42m<sup>3</sup>/min となった。また、それ以下の排風量(18、27、34、41m<sup>3</sup>/min) の場合、測定点③と④のカウント数は他の測定点より大きくなった。すなわち、フード開口面に対する斜め前方 45°で外乱気流を発生させた場合と同様に、外乱気流の下流側で漏洩が発生しやすかった。

そして、斜め後方 45°の外乱気流を発生した場合の排風量と漏洩濃度の結果を表 2.12 に示した。表 2.12 より、外乱気流風速 0.2、0.3、0.4、0.5m/s における漏洩を完全に防ぐ排風量はそれぞれ 17、23、28、33m<sup>3</sup>/min となった。また、それ以下の排風量(16、22、27、32m<sup>3</sup>/min) の場合、測定点④と⑤のカウント数は他の測定点より大きくなった。つまり、この条件では、他の外乱気流を発生した場合の結果と同様に、外乱気流の下流側で漏洩が発生しやすかった。

## 2.5 外乱気流の発生位置及び風速と漏洩を抑える排風量の関係

表 2.13 に本実験で用いた 3 種類の側方吸引型外付け式フードにおける外乱気流の発生位置及び風速に対する漏洩を抑える排風量の結果を示す。ただし、フード開口面サイズが W500mm×H50mm における横方向外乱気流 0.5m/s の場合、実験装置の最大排風量である 45m<sup>3</sup>/min では、漏洩を抑えられなかった。フードの開口面サイズが W500mm×H100mm と W500mm×H300mm の場合、いずれの外乱気流発生位置に対しても、これらのフードによる漏洩を抑える排風量はほぼ同じ結果となった。

一方、開口面サイズが W500mm×H50mm のフードによる漏洩を抑える排風量は、外乱気流の方向及び風速によらず他のフードサイズより大きいことがわかった。これについては、煙の発生源がフードの縦幅に対して高い位置になることから、フードの吸引気流は発生した煙を捕捉しにくいことが考えられる。したがって、作業台上で設置する外付け式フードを設計する際には、フードの縦幅は発生源よりできる限り高いほうが、フードの捕捉性能の向上に効果的であると考えられる。

また、表 2.13 により、いずれのフードサイズに対しても横風外乱気流を加えた条件が、漏洩を抑制するための必要排風量が大きいことがわかった。

表 2.13 外乱気流の発生位置及び風速に対する漏洩を抑える排風量の結果

外乱気流の発生位置	外乱気流の発生速度 (m/s)	フードの開口面サイズ		
		W500×H50	W500×H100	W500×H300
		漏洩を抑える排風量(m <sup>3</sup> /min)		
斜め前方 45°	0	8	7	7
	0.2	18	17	15
	0.3	23	21	20
	0.4	27	25	25
	0.5	31	29	29
横方向	0	8	7	7
	0.2	23	19	19
	0.3	30	27	28
	0.4	36	34	35
	0.5	N/A	41	42
斜め後方 45°	0	8	7	7
	0.2	19	18	17
	0.3	23	23	23
	0.4	28	28	28
	0.5	33	33	33

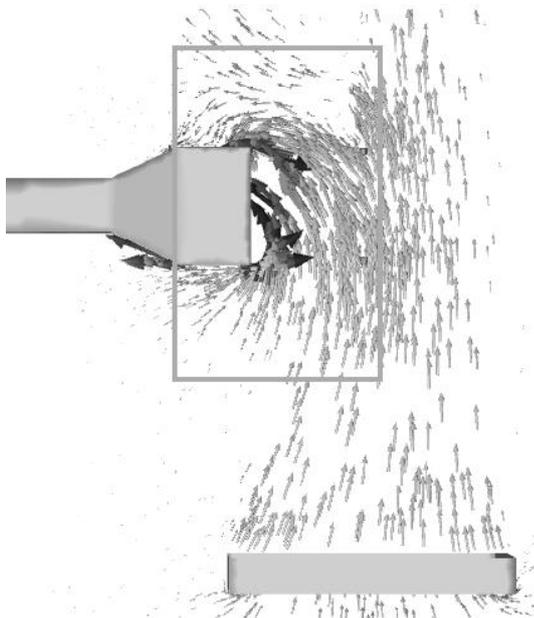


図 2.4 CFD 解析による横風外乱気流ありの場合の風速分布



図 2.5 実験による横風外乱気流が発生した場合の煙の様子

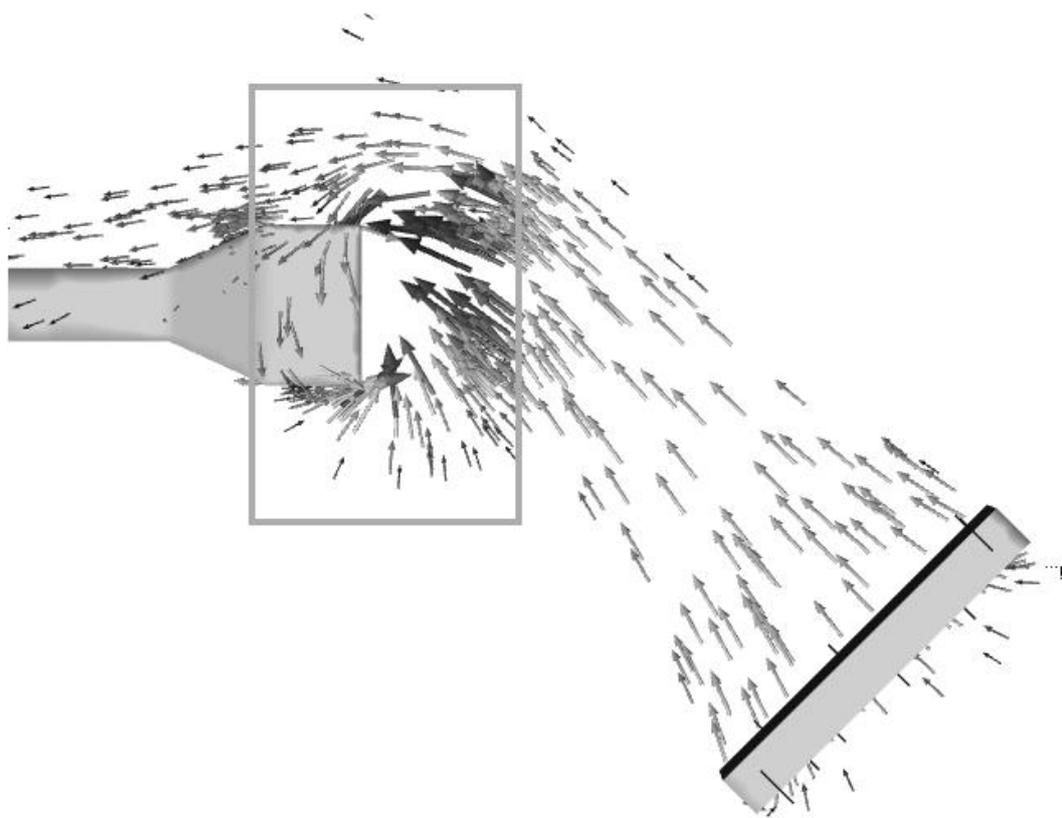


図 2.6 CFD 解析による斜め前方 45°外乱気流ありの場合の風速分布

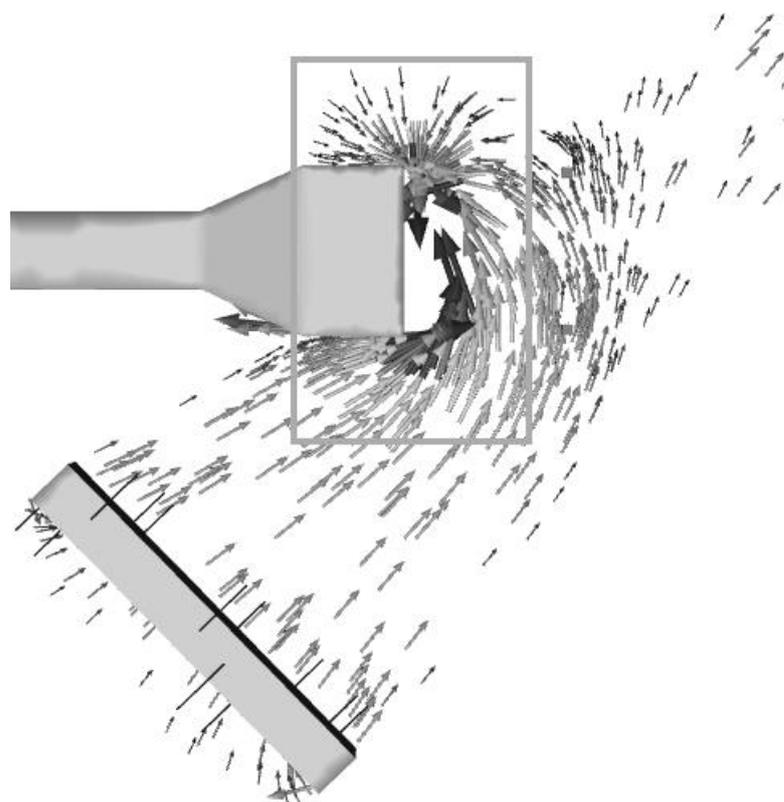


図 2.7 CFD 解析による斜め後方 45°外乱気流ありの場合の風速分布

このことは、図 2.4 の CFD 解析の結果で示した通り、フード開口面に対して 90°方向の外乱気流を加えた場合、一部の外乱気流は煙の発生源に直接当たることから、他の角度の外乱気流より、横方向の外乱気流はフードの捕捉気流に影響が大きく、煙は外乱気流方向の下流側に流れやすいことが原因と考えられる。図 2.5 に実験室において風速 0.3m/s の横風外乱気流を発生させた場合の煙の様子を示す。横風により流線は曲げられるが、この風速では煙はフードに有効に吸引されていることがわかる。

一方、斜め前方 45°の外乱気流の場合は、図 2.6 の CFD 解析の結果に示し通り、外乱気流は吸込みフードの方向に向かって流れるため、煙はフードに向かって吸い込まれやすくなる。また、斜め後方 45°の外乱気流の場合は、図 2.7 の CFD 解析の結果に示した通り、外乱気流が発生源に当たる前に、その一部がフードに吸い込まれることによって、フードの捕捉性能への影響が小さくなったと考えられる。図 2.9、2.10、2.11 は、それぞれのフード開口面サイズが W500mm×H50mm、W500mm×H100mm、W500mm×H300mm における外乱気流に対する漏洩を抑えるための排風量の結果を示した。この結果から、いずれのフードサイズの場合でも、外乱気流の発生位置にかかわらず、外乱気流の風速と漏洩を抑える排風量は、ほぼ直線的な関係となった。

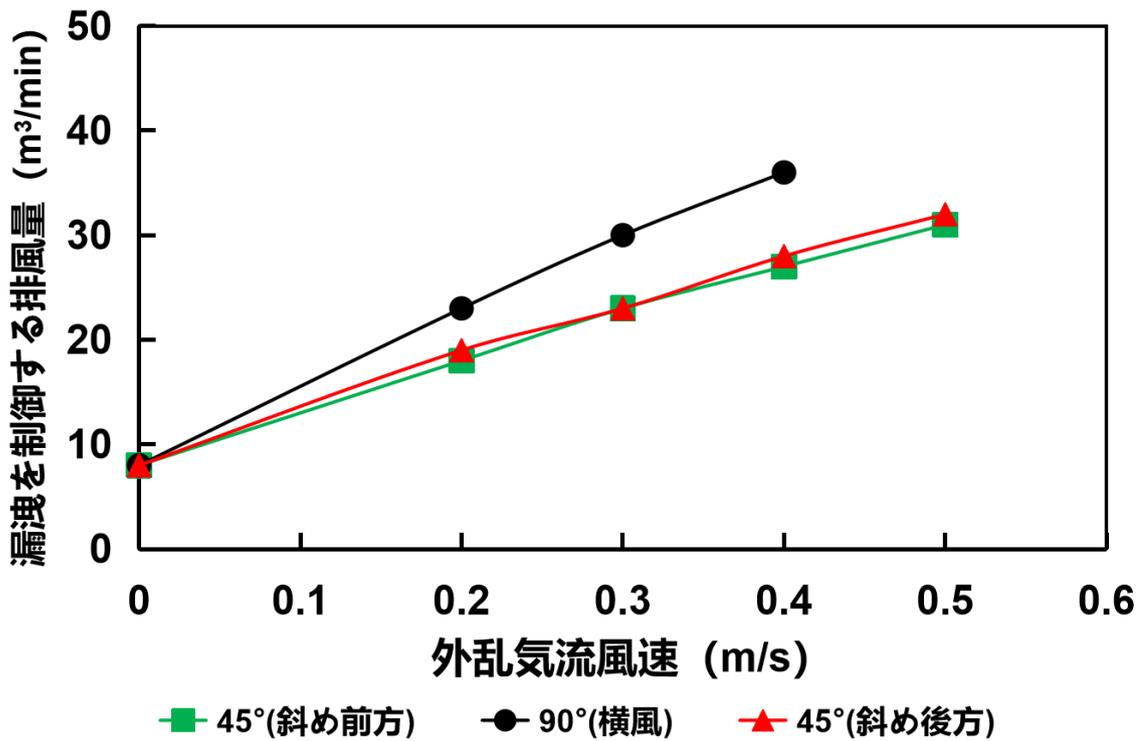


図 2.8 スロット型フードにおける外乱気流風速と漏洩を抑える排風量の関係(フード開口面サイズ：W500 mm×H50 mm)

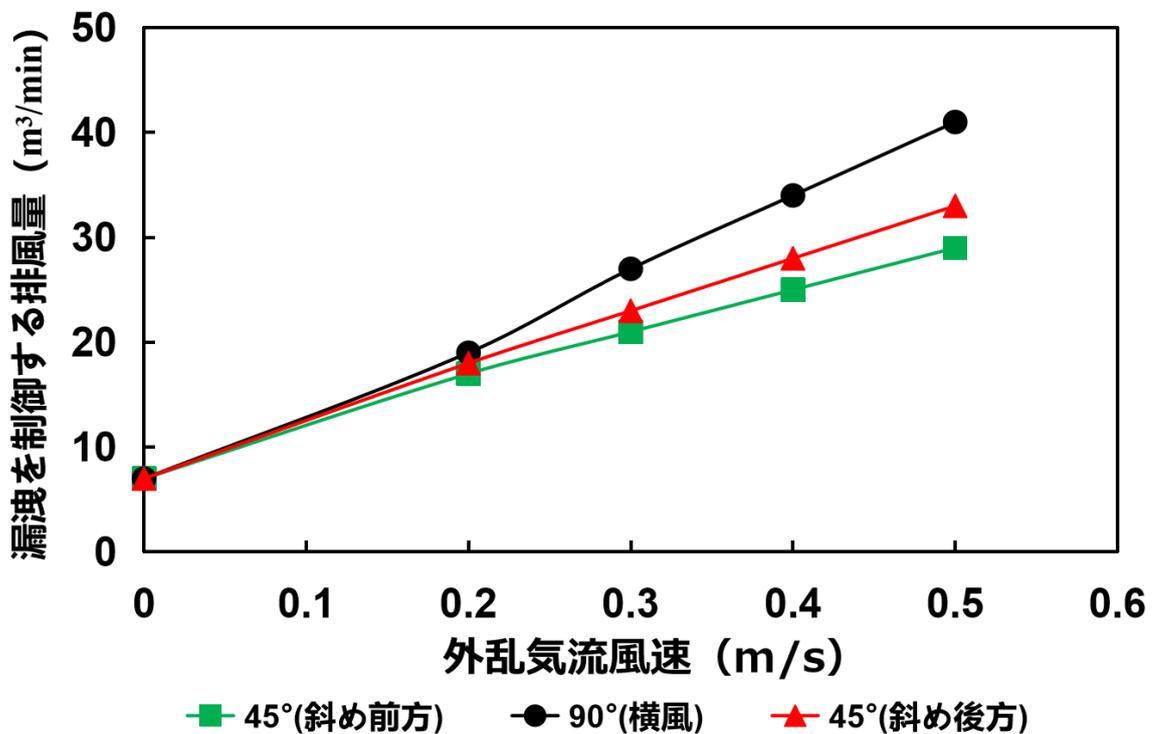


図 2.9 スロット型フードにおける外乱気流風速と漏洩を抑える排風量の関係(フード開口面サイズ：W500 mm×H100 mm)

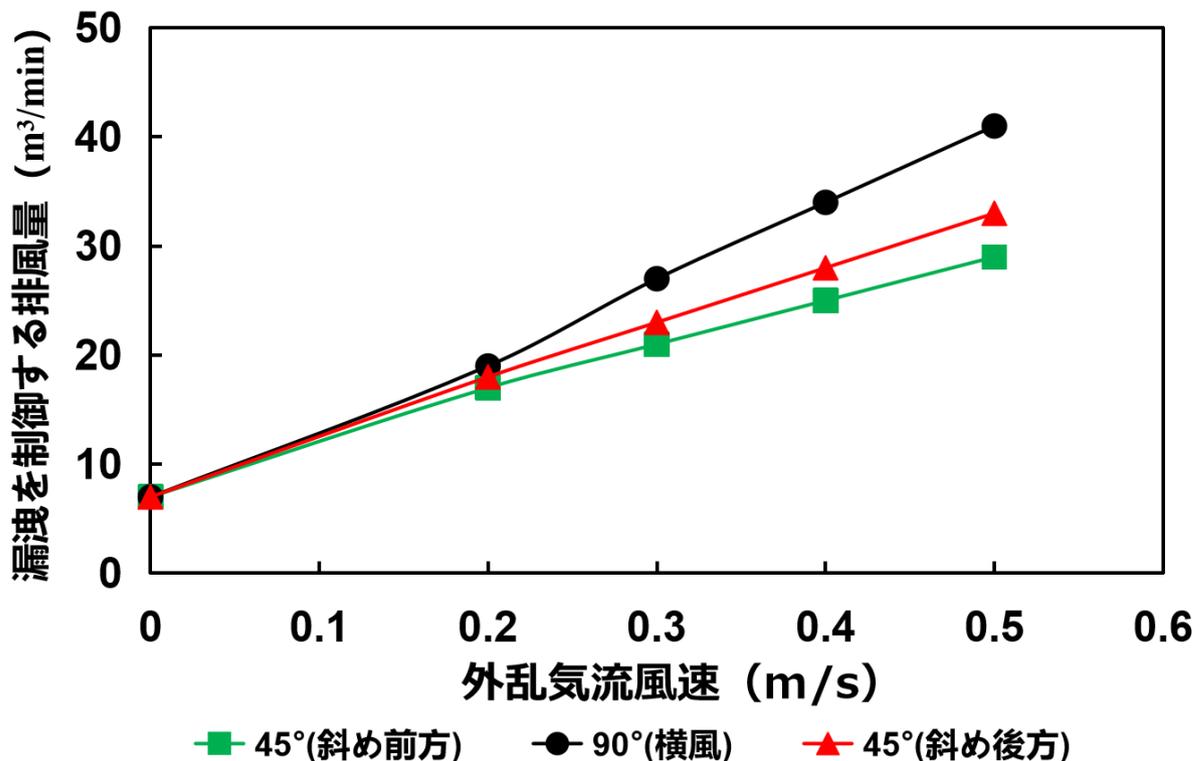


図 2.10 スロット型フードにおける外乱気流風速と漏洩を抑える排風量の関係(フード開口面サイズ：W500 mm×H300 mm)

## 2.6 漏洩を抑える排風量と Dalla Valle 式との比較についての考察

粉じん則に定められた制御風速に対し、従来の Dalla Valle の式を用いて必要排風量を求め、実験で得られた必要排風量と比較した。今回の実験はフランジのないフードを作業台上に設置して行ったことから、Dalla Valle の式として式(2-3)を用いた。ただし、開口面サイズ  $A=300\text{mm}\times 500\text{mm}$ 、開口面からの距離  $X=0.5\text{m}$ 、制御風速  $V_c=1.0\text{m/s}$  として計算した。

$$Q = 60 \times V_c \times (5X^2 + A) \quad (2-3)$$

その結果、式(2-3)の Dalla Valle の式から求めた必要排風量は  $84\text{m}^3/\text{min}$  となる。一方、本実験で設定したフードの開口面に対するそれぞれの横風、斜め後方  $45^\circ$ 及び斜め前方  $45^\circ$ のそれぞれに、 $0.3\text{m/s}$  の外乱気流を加えた条件で、漏洩を抑える必要排風量はそれぞれ  $28\text{m}^3/\text{min}$ 、 $23\text{m}^3/\text{min}$ 、 $20\text{m}^3/\text{min}$  であり、Dalla Valle の式で求めた排風量の  $33\%$ 、 $27\%$ 、 $24\%$  となった。

また、開口面サイズ  $A=50\text{mm}\times 500\text{mm}$ 、開口面からの距離  $X=0.5\text{m}$ 、制御風速  $V_c=1.0\text{m/s}$

として計算した場合は、Dalla Valle の式の作業台上に設置した場合のスロット型フードに対応する式(2-4)を用いた。

$$Q = 60 \times 2.8 \times L \times X \times V_c \quad (2-4)$$

その結果、式(2-4)の Dalla Valle の式から求めた必要排風量は  $42\text{m}^3/\text{min}$  となる。一方、本実験で設定したフードの開口面に対するそれぞれの横風、斜め後方  $45^\circ$ 及び斜め前方  $45^\circ$ のそれぞれに、 $0.3\text{m/s}$  の外乱気流を加えた条件で、漏洩を抑える必要排風量はそれぞれ  $30\text{m}^3/\text{min}$ 、 $23\text{m}^3/\text{min}$ 、 $23\text{m}^3/\text{min}$  であり、Dalla Valle の式で求めた排風量の  $71\%$ 、 $55\%$ 、 $55\%$ となった。

一方、本実験で使用した煙に対し、特化則で規定されているガス状物質の制御風速である  $0.5\text{m/s}$  を用いたとしても、開口面サイズ  $A=300\text{mm} \times 500\text{mm}$ 、開口面からの距離  $X=0.5\text{m}$ 、Dalla Valle の式として式(2-3)で計算した場合、必要排風量は  $42\text{m}^3/\text{min}$  となる。本実験で設定したフードの開口面に対するそれぞれの横風、斜め後方  $45^\circ$ 及び斜め前方  $45^\circ$ のそれぞれに、 $0.3\text{m/s}$  の外乱気流を加えた条件で、漏洩を抑える必要排風量はそれぞれ  $28\text{m}^3/\text{min}$ 、 $23\text{m}^3/\text{min}$ 、 $20\text{m}^3/\text{min}$  であり、Dalla Valle の式で求めた排風量の  $67\%$ 、 $55\%$ 、 $48\%$ となった。

また、開口面サイズ  $A=50\text{mm} \times 500\text{mm}$  の作業台上に設置した外付け式スロット型フードにおいて、開口面からの距離  $X=0.5\text{m}$ 、制御風速  $V_c=0.5\text{m/s}$ (特化則のガス状物質)の条件で Dalla Valle の式として式(2-3)で計算すると、必要排風量は  $21\text{m}^3/\text{min}$  となる。本実験で設定したフードの開口面に対するそれぞれの横風、斜め後方  $45^\circ$ 及び斜め前方  $45^\circ$ のそれぞれに、 $0.3\text{m/s}$  の外乱気流を加えた条件で、漏洩を抑える必要排風量はそれぞれ  $30\text{m}^3/\text{min}$ 、 $23\text{m}^3/\text{min}$ 、 $23\text{m}^3/\text{min}$  であり、Dalla Valle の式で求めた排風量の  $143\%$ 、 $110\%$ 、 $110\%$ となった。

このように、外乱気流の発生速度や発生位置の違いによって、漏洩がなく排気可能な必要排風量が異なるため、局所排気装置の性能要件を制御風速のみで規定すると、局所排気装置を設計する際に有害物質を除去するための必要排風量の過不足という問題になると考えられる。

## 2.7 数値実験の結果及び考察

数値実験の解析領域図を図 2.11 に示した。また、排風量と漏洩濃度の関係を求めた。漏洩濃度は図 2.11 に示した作業台の側方から  $150\text{mm}$ (フードの中心線から離れる

750mm)、作業台から上下方向±500mm、フード開口面から中心線方向±1000mm 程度の領域とし、その領域内で得られた濃度の最大値を漏洩濃度とした。ノズルから発生した煙の上昇速度は実験条件と同じ 0.5m/s とした。そして、発生源の初期濃度を 1ppm と設定し、各外乱気流条件における漏洩濃度測定領域で検出した濃度が初期濃度の 1/100 以上になる場合は漏洩が発生したと判断する。

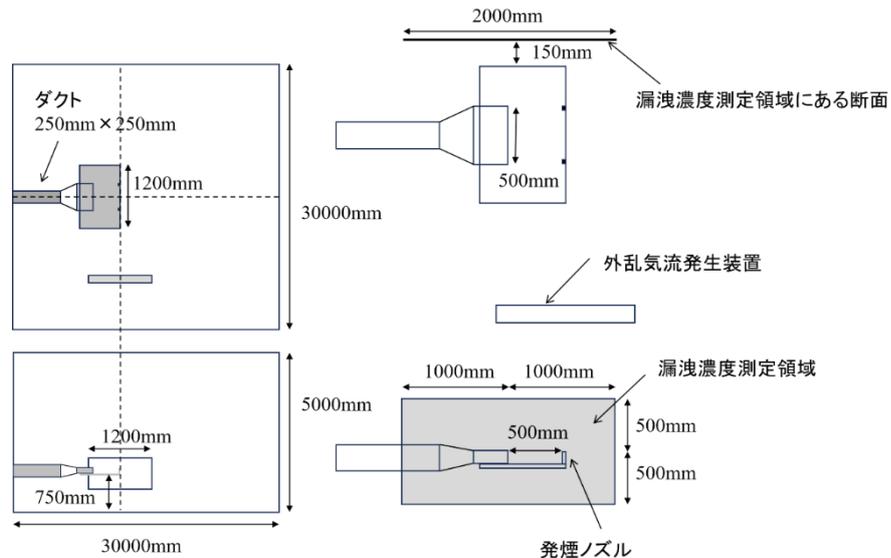


図 2.11 数値実験解析領域図

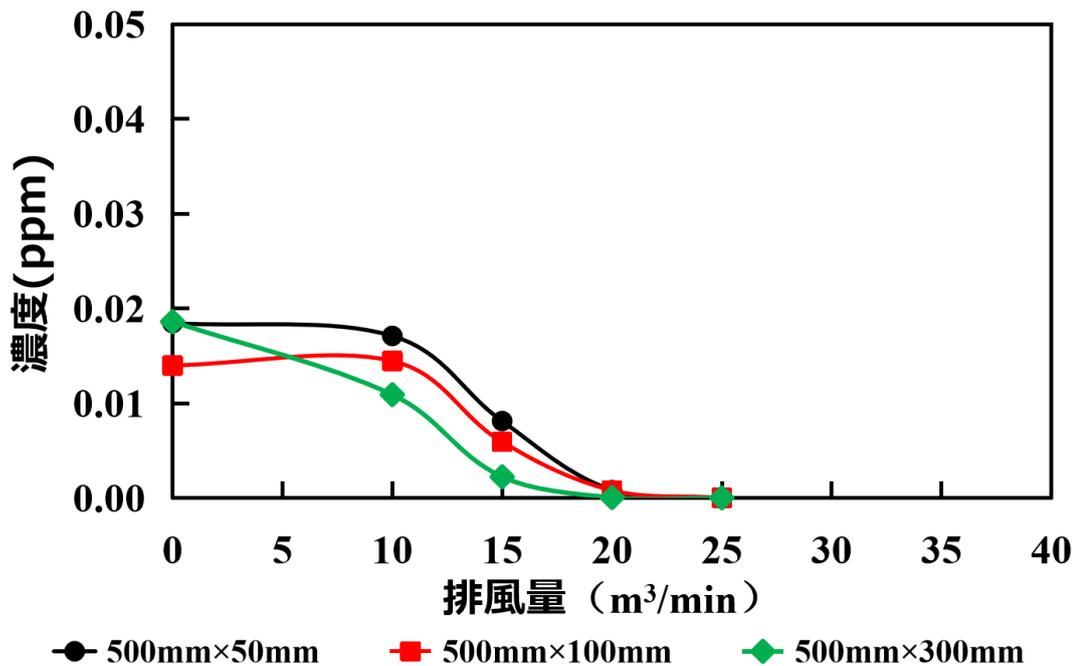
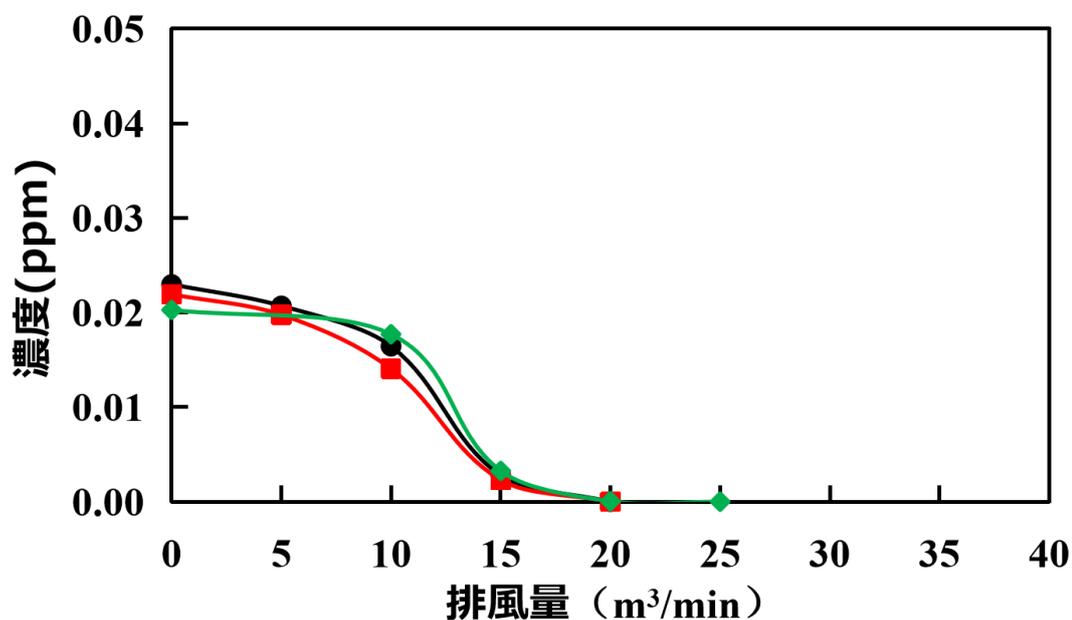
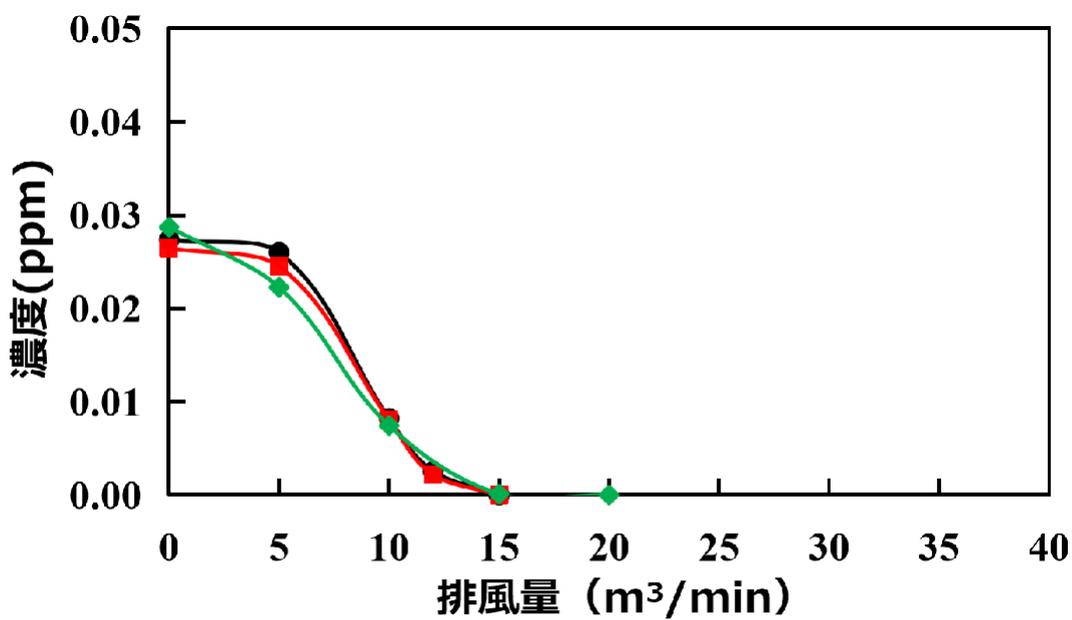


図 2.12 CFD 解析におけるフード開口面に対して斜め前方 45°で 0.5m/s の外乱気流を発生させた場合のフードサイズごとの排風量と漏洩濃度の関係



● 500mm×50mm    ■ 500mm×100mm    ◆ 500mm×300mm

図 2.13 CFD 解析におけるフード開口面に対して斜め前方 45°で 0.4m/s の外乱気流を発生させた場合のフードサイズごとの排風量と漏洩濃度の関係



● 500mm×50mm    ■ 500mm×100mm    ◆ 500mm×300mm

図 2.14 CFD 解析におけるフード開口面に対して斜め前方 45°で 0.3m/s の外乱気流を発生させた場合のフードサイズごとの排風量と漏洩濃度の関係

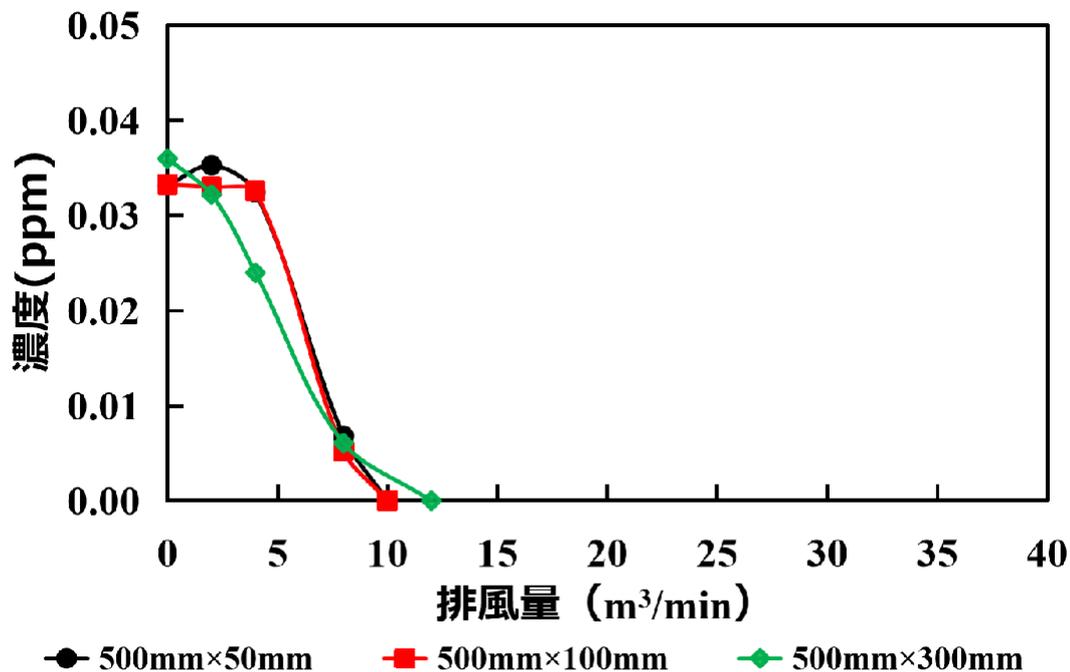


図 2.15 CFD 解析におけるフード開口面に対して斜め前方 45°で 0.2m/s の外乱気流を発生させた場合のフードサイズごとの排風量と漏洩濃度の関係

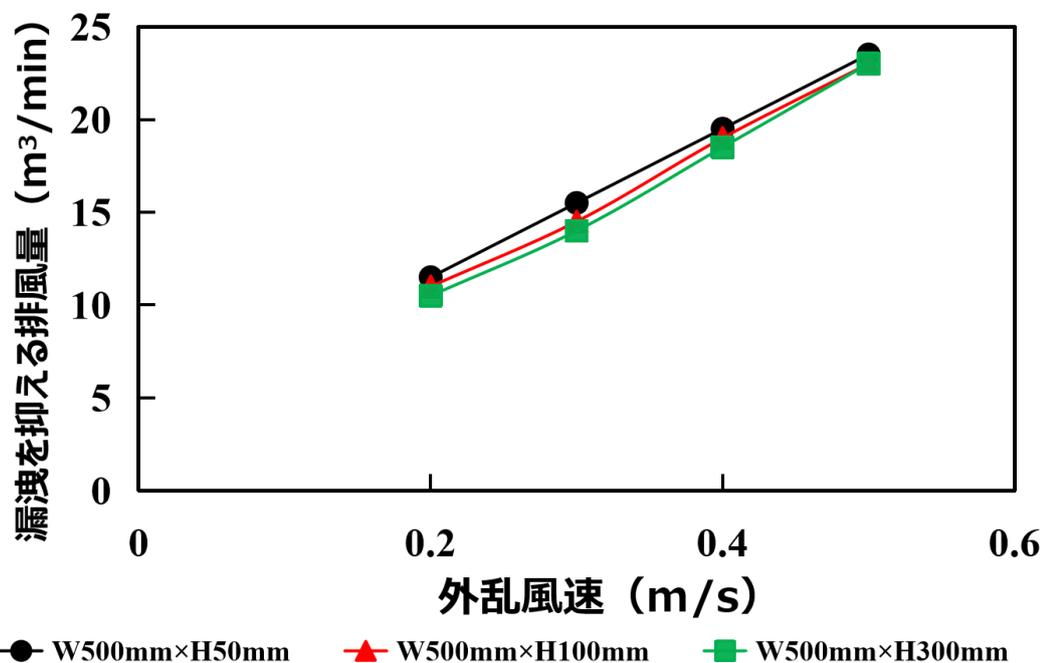


図 2.16 CFD 解析におけるフード開口面に対して斜め前方 45°で外乱気流を発生させた場合のフードサイズごとの外乱気流風速と漏洩を抑える排風量の関係

図 2.12 から図 2.15 にフード開口面に対して斜め前方 45°でそれぞれ 0.2m/s、0.3m/s、0.4m/s、0.5m/s の外乱気流を発生した場合によるフードサイズごとの排風量と漏洩濃度の関係を示す。図より、いずれの外乱気流風速を加えた場合でも、排風量を大きくするにつれて漏洩濃度は急激に減少した。また、漏洩濃度測定領域の濃度が発生濃度の 1/100 以下となった場合の排風量を漏洩抑制できる排風量とし、その漏洩を抑える排風量と外乱気流風速の関係(開口面サイズごと)を図 2.16 に示す。その関係から、開口面サイズの違いによる差はほとんどなく、近似的に 1 つの直線になった。図 2.17 から図 2.20 にフード開口面に対して横方向でそれぞれ 0.2m/s、0.3m/s、0.4m/s、0.5m/s の外乱気流を発生させた場合のフードサイズごとの排風量と漏洩濃度の関係を示す。図より、斜め前方 45°で外乱気流を発生させた場合と同じく、排風量を大きくするにつれて漏洩濃度は急激に減少した。また、フード開口面サイズごとの漏洩を抑える排風量と外乱気流風速ごとの関係を図 2.21 に示した。その結果から、開口面サイズの違いによる差はほとんどなく、近似的に 1 つの直線で表わすことができた。そして、実験の結果と同様に、開口面サイズが 500mm×50mm のフードによる漏洩を抑える排風量は、外乱気流の方向及び風速によらず他のフードサイズより大きくなった。

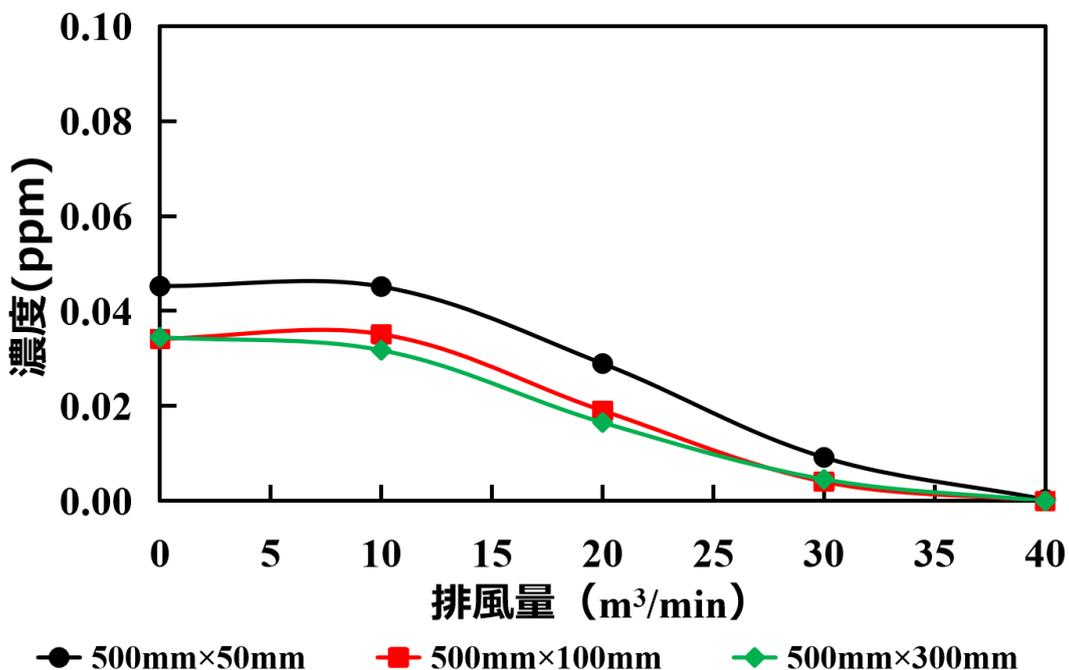


図 2.17 CFD 解析におけるフード開口面に対して横方向で 0.5m/s の外乱気流を発生させた場合のサイズごとの排風量と漏洩濃度の関係

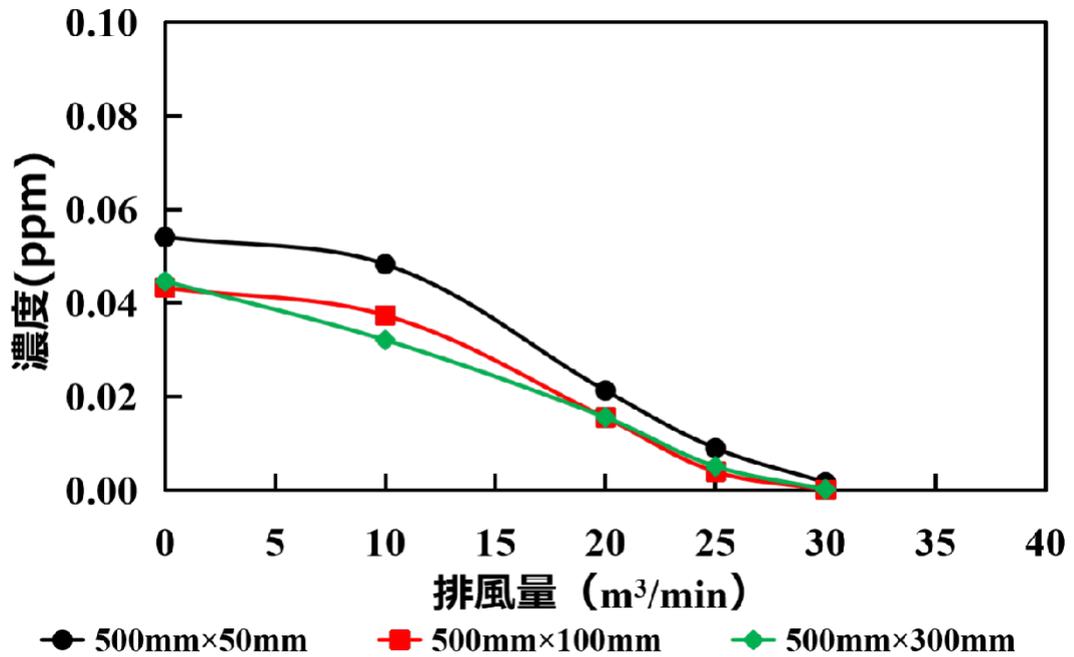


図 2.18 CFD 解析におけるフード開口面に対して横方向で 0.4m/s の外乱気流を発生させ場合のフードサイズごとの排風量と漏洩濃度の関係

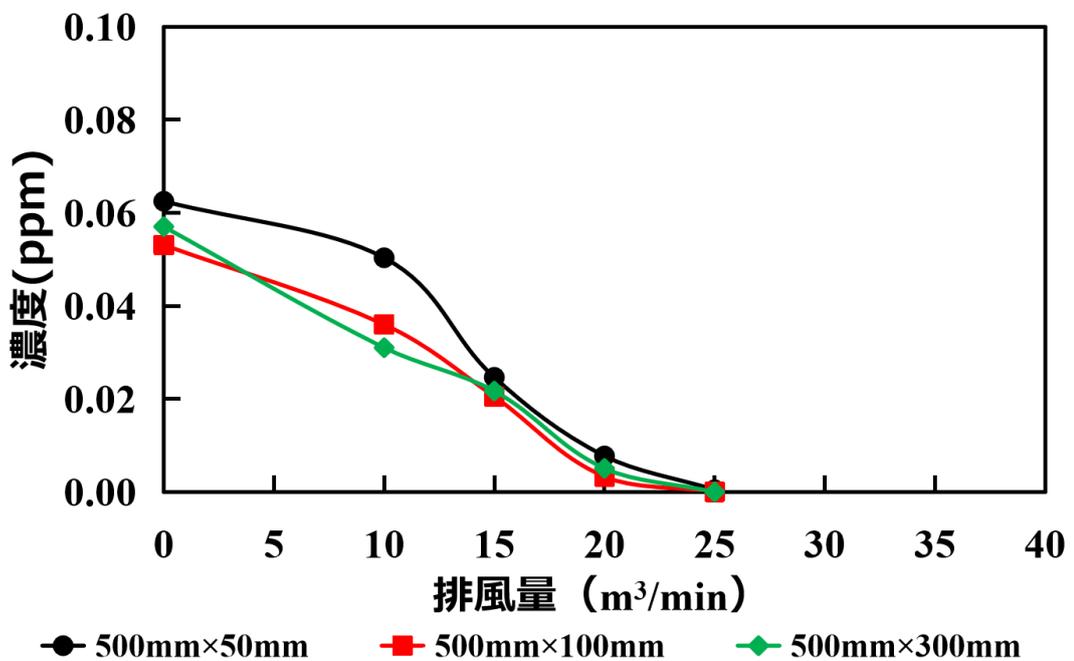


図 2.19 CFD 解析におけるフード開口面に対して横方向で 0.3m/s の外乱気流を発生させ場合のフードサイズごとの排風量と漏洩濃度の関係

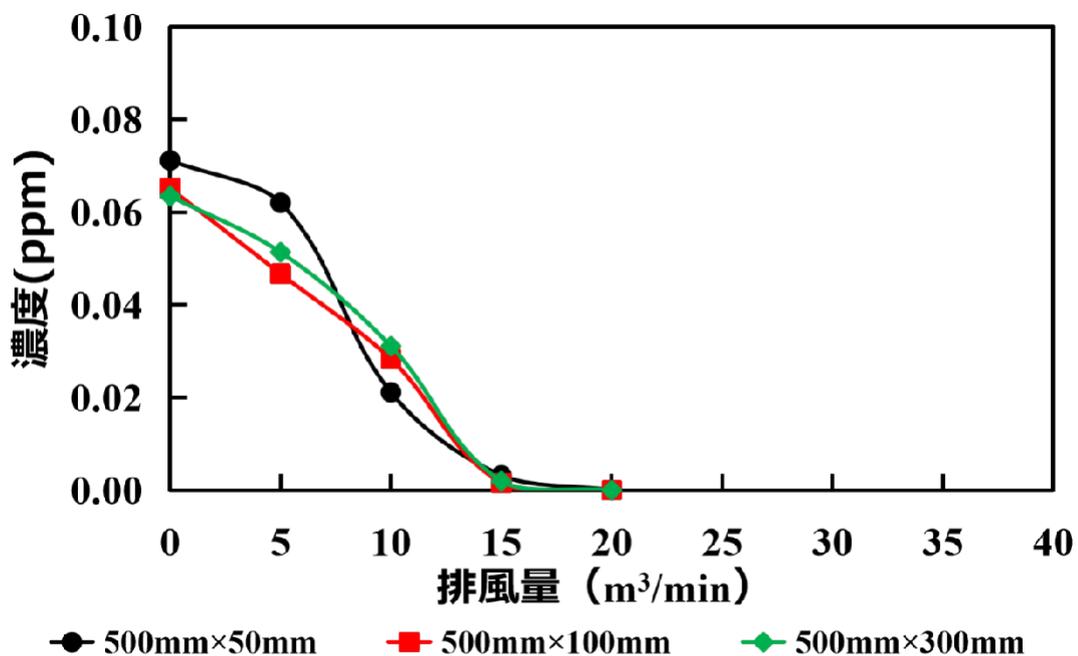


図 2.20 CFD 解析におけるフード開口面に対して横方向で 0.2m/s の外乱気流を発生させた場合のフードサイズごとの排風量と漏洩濃度の関係

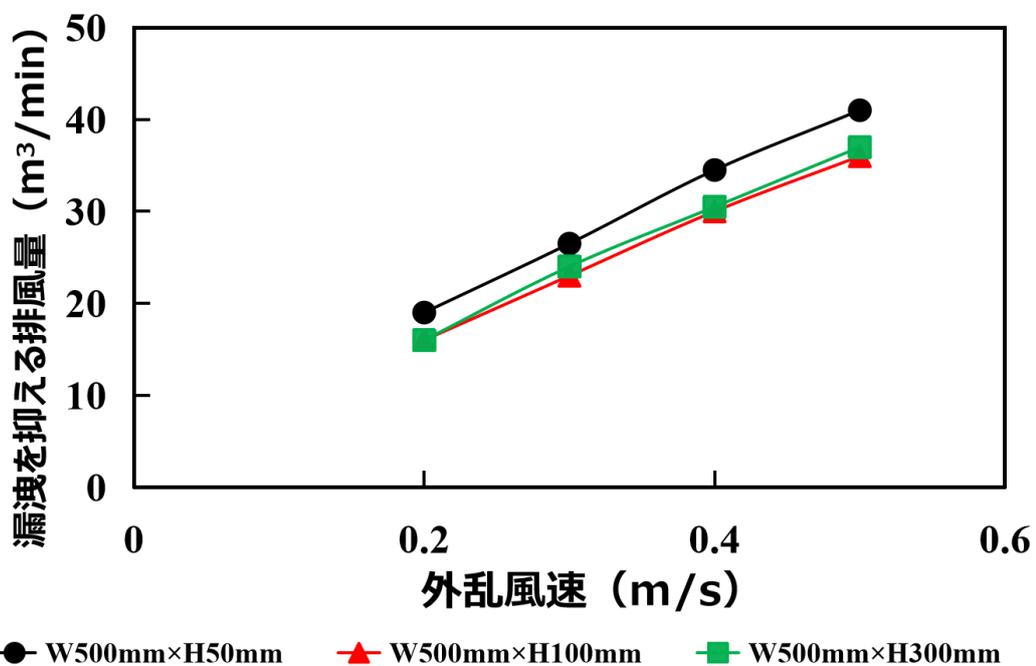


図 2.21 CFD 解析におけるフード開口面に対して横方向で外乱気流を発生させた場合のフードサイズごとの外乱気流風速と漏洩を抑える排風量の関係

図 2.22 から図 2.25 開口面に対して斜め後方 45°でそれぞれ 0.2m/s、0.3m/s、0.4m/s、0.5 m/s の外乱気流を発生させた場合のフードサイズごとの排風量と漏洩濃度の関係を示す。図より、いずれの外乱気流風速を加えた場合、排風量大きくするにつれて漏洩濃度は急激に減少した。また、フード開口面サイズごとの漏洩を抑える排風量と外乱気流風速ごとの関係を図 2.26 に示した。その結果から、開口面サイズの違いによる差はほとんどなく、近似的に 1 つの直線で表わすことができた。そして、実験の結果と同様に、斜め後方 45°で外乱気流を加えた場合、フード開口面サイズによらず漏洩を抑える排風量はほぼ一致した。

また、代表例として、0.4m/s の横方向の外乱気流を加えた場合、排風量 10m<sup>3</sup>/min と 25m<sup>3</sup>/min における煙の濃度分布および速度分布の違いについて考察した。図 2.28 に CFD 解析よりそれぞれ 10m<sup>3</sup>/min と 25m<sup>3</sup>/min の場合における濃度分布図を示した。排風量 10m<sup>3</sup>/min では漏れ領域での濃度が高くなっているが、排風量 25m<sup>3</sup>/min では漏洩せず十分に排気されていることが分かる。また、横方向外乱気流を加えた場合、外乱気流の下流側に漏洩が発生しやすいことが分かった。

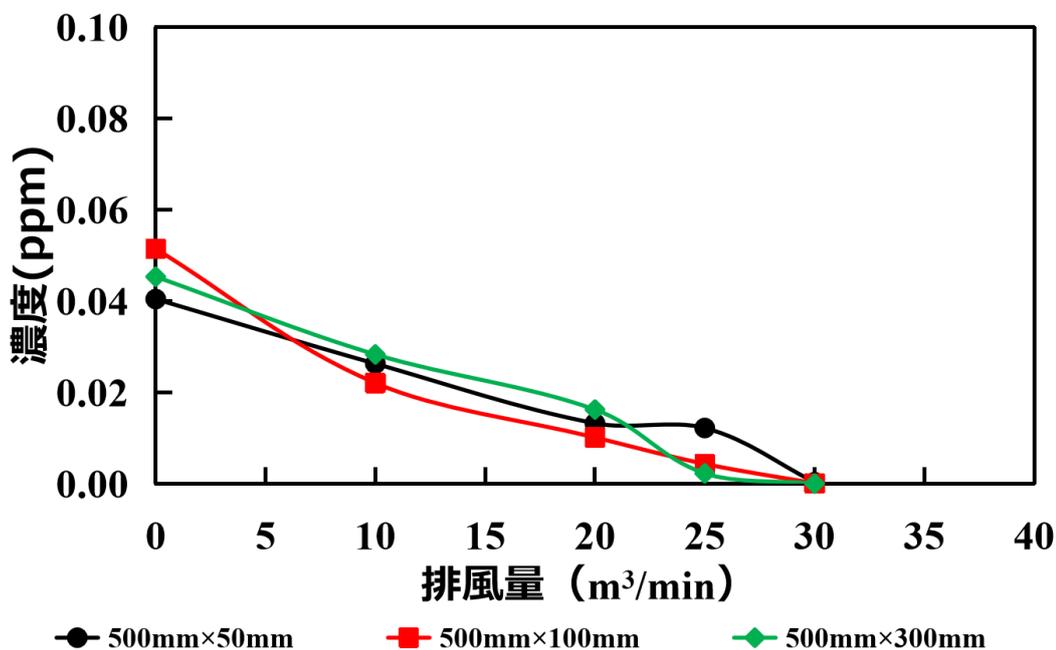


図 2.22 CFD 解析におけるフード開口面に対して斜め後方 45°で 0.5m/s の外乱気流を発生させた場合のフードサイズごとの排風量と漏洩濃度の関係

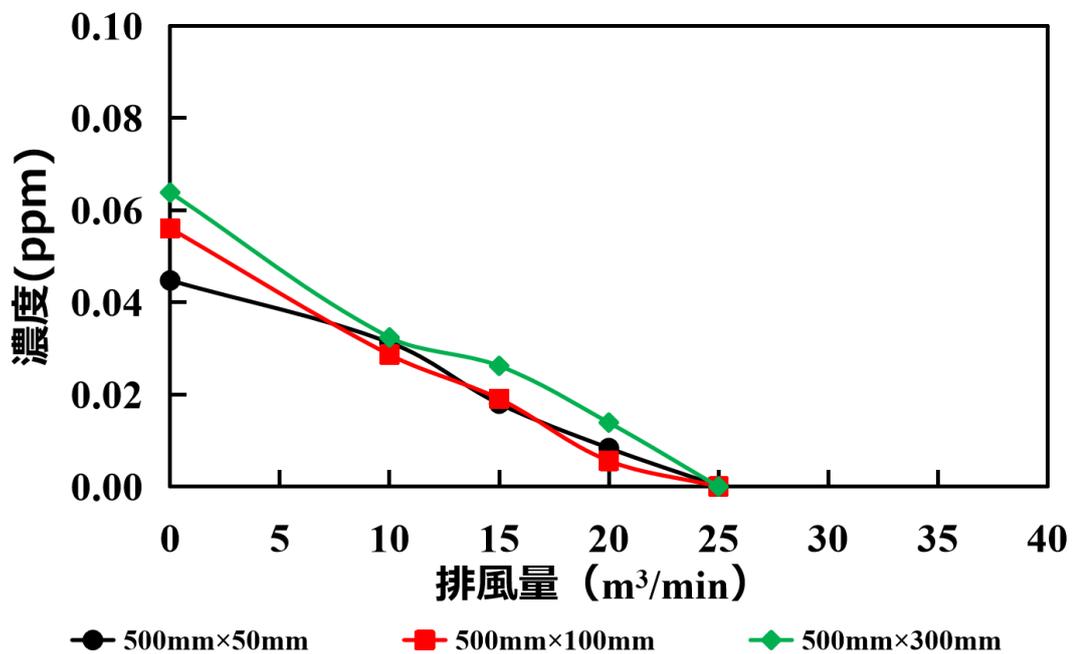


図 2.23 CFD 解析におけるフード開口面に対して斜め後方 45°で 0.4m/s の外乱気流を発生させ場合のフードサイズごとの排風量と漏洩濃度の関係

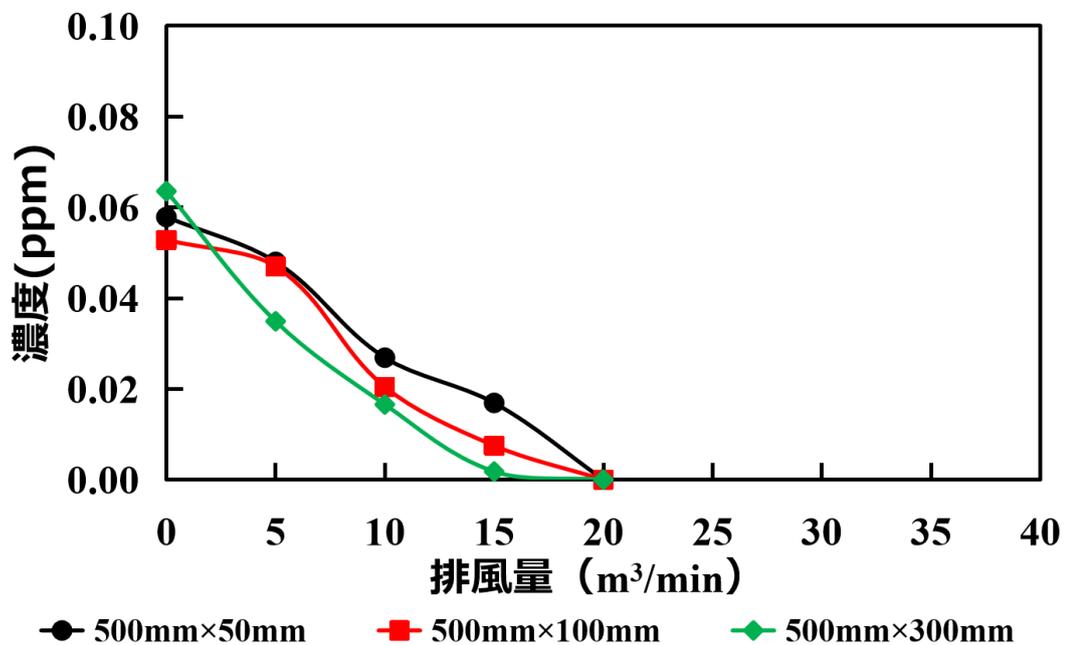


図 2.24 CFD 解析におけるフード開口面に対して斜め後方 45°で 0.3m/s の外乱気流を発生させ場合のフードサイズごとの排風量と漏洩濃度の関係

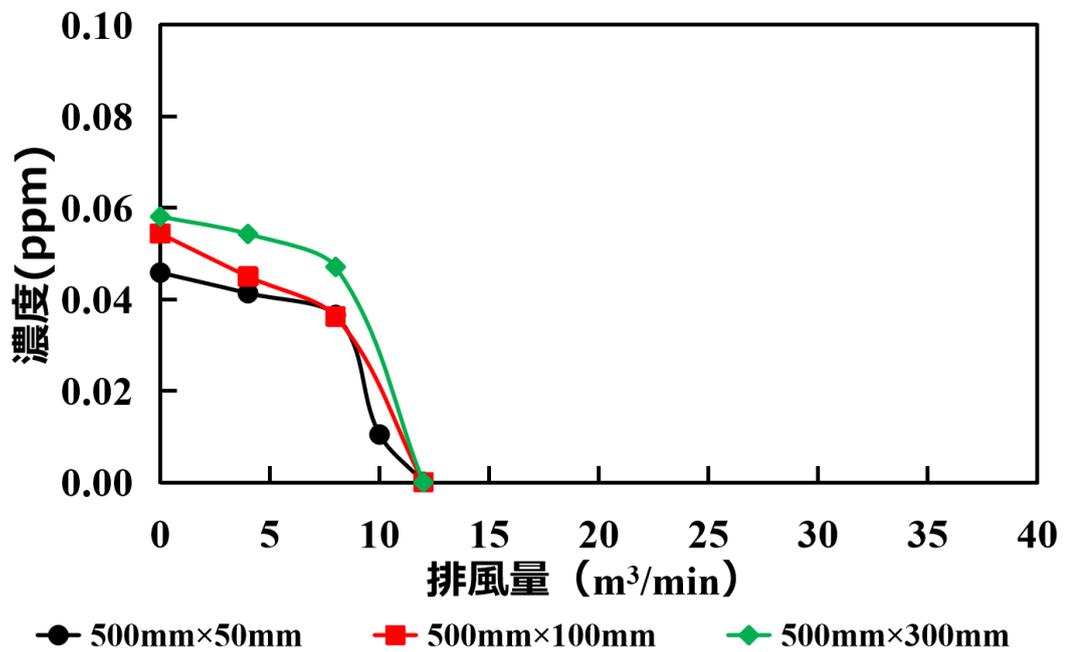


図 2.25 CFD 解析におけるフード開口面に対して斜め後方 45° で 0.2m/s の外乱気流を発生させ場合のフードサイズごとの排風量と漏洩濃度の関係

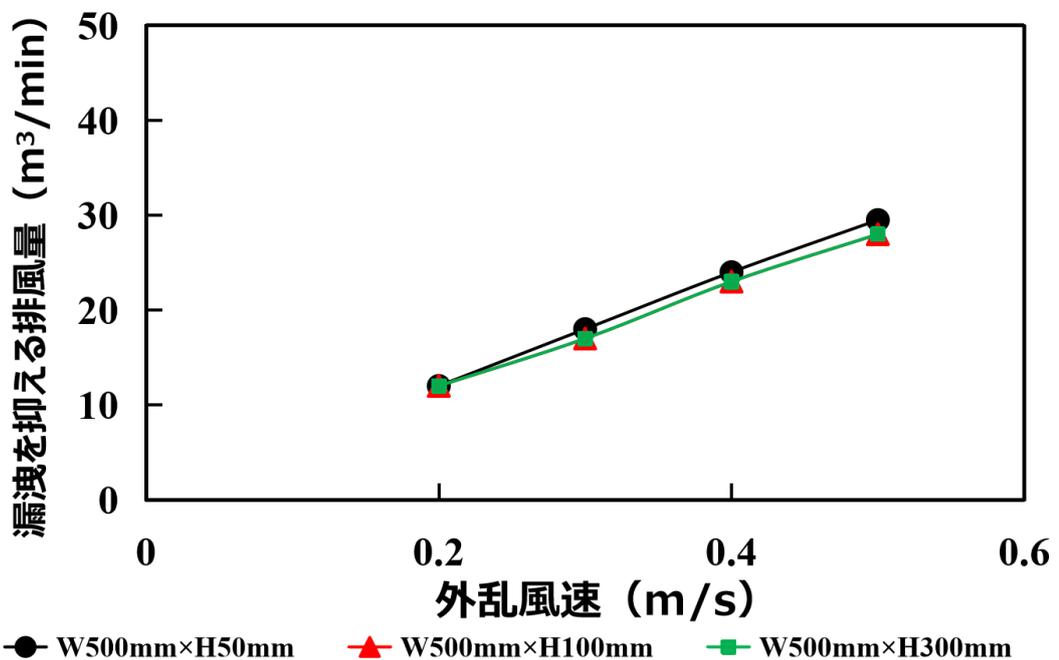


図 2.26 CFD 解析におけるフード開口面に対して斜め後方 45° で外乱気流を発生させ場合のフードサイズごとの外乱気流風速と漏洩を抑える排風量の関係

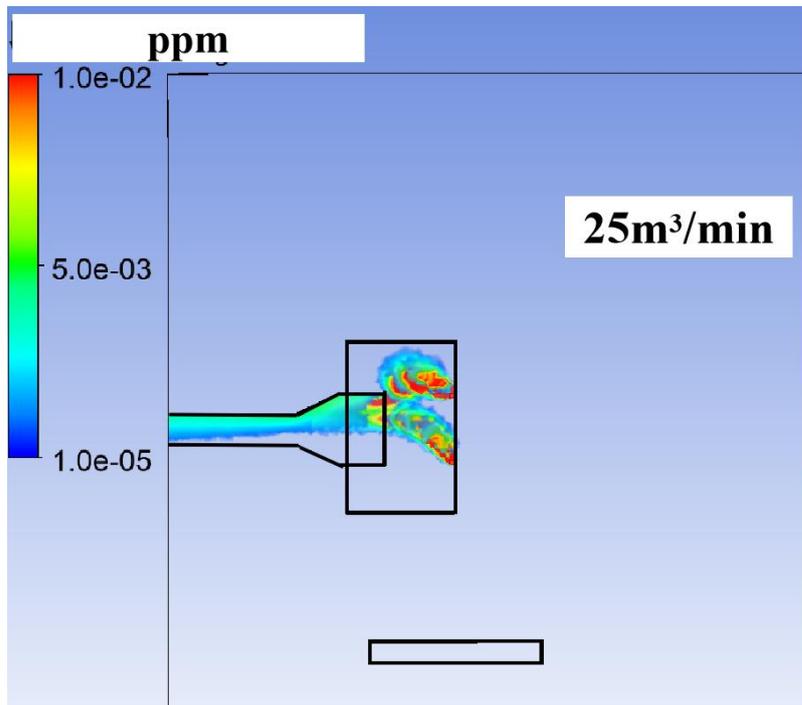
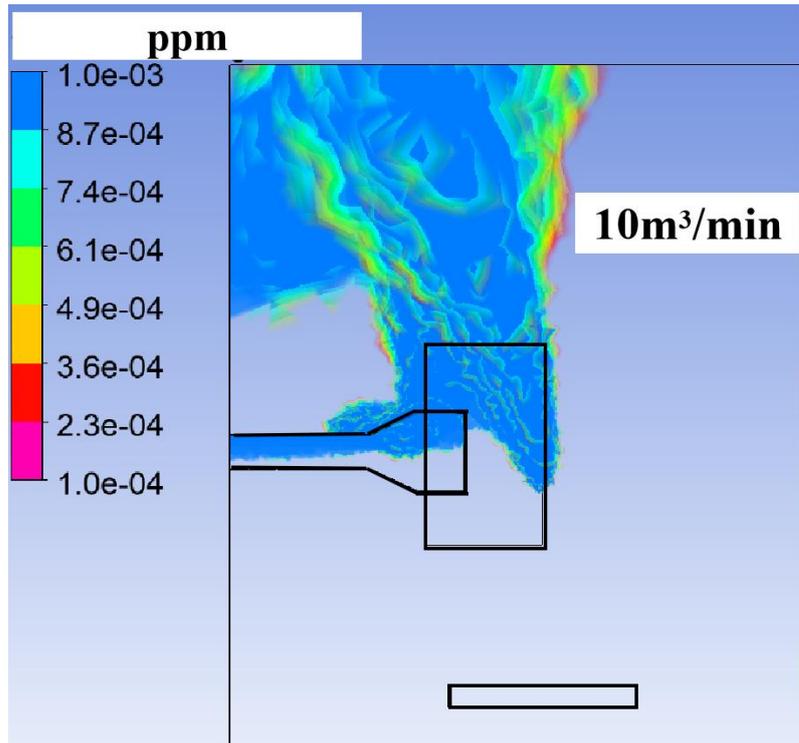


図 2.27 CFD 解析におけるフード開口面に対して横方向で外乱気流を発生させた場合の濃度分布の違い

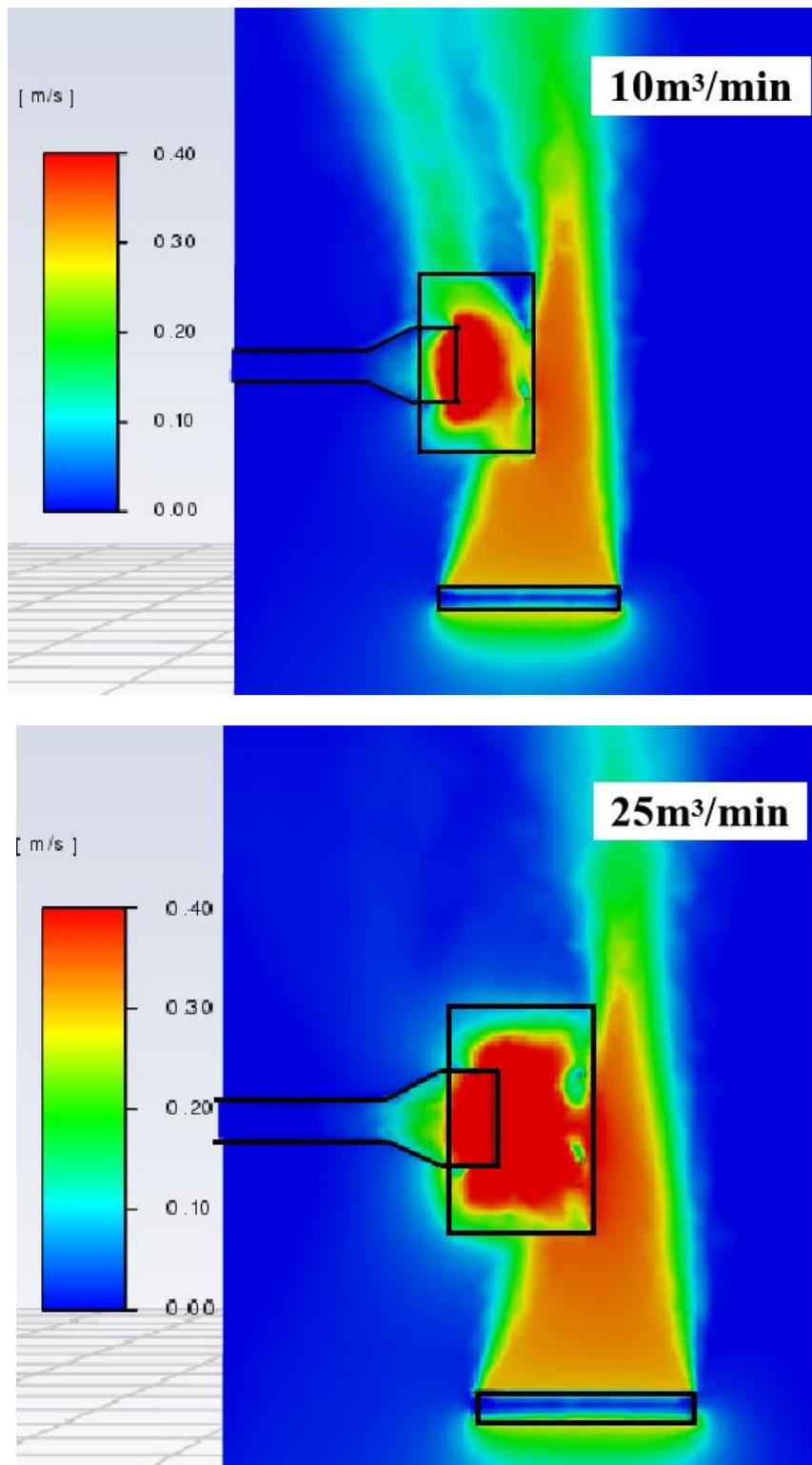


図 2.28 CFD 解析におけるフード開口面に対して横方向で外乱気流を発生させた場合の速度分布の違い

一方、図 2.28 に  $10\text{m}^3/\text{min}$  と  $25\text{m}^3/\text{min}$  の場合における CFD 解析で求めた速度分布を示した。排風量  $10\text{m}^3/\text{min}$  では外乱気流が漏洩発生領域(実験測定点③にある領域)まで影響を及ぼしている様子が分かる。一方、排風量  $25\text{m}^3/\text{min}$  では外乱気流の影響はほとんど見られず、フード開口前方の吸い込み気流によって漏洩が十分に抑制されていることが分かる。

## 2.8 まとめ

局所排気装置を設計する際に、フードの型式や有害物質の状態などの違いによって、法規則に定められた制御風速を満たす必要がある。この制御風速は一般的な外乱気流を加味しているため、外付け式フードを設計する際に、実際の外乱気流が小さい状態では、必要な排風量が過剰になる場合があり、エネルギー損失の観点から問題がある。そこで、本研究では作業台上に設置した側方吸引型外付け式フードを対象として、フードの開口面に対して 3 方向の外乱気流の発生条件を検討し、3 種類の開口面サイズのフード(スロット型と長方形型を含め)に対して、外乱気流風速と漏洩を制御できる必要排風量について調べた。その結果、いずれのフードサイズに対しても、横風方向の外乱気流の条件が、他の風向の外乱気流より漏洩を制御する必要排風量が大きかった。また、フードの開口面サイズによる外乱気流に対する漏洩を制御できる排風量の結果から、発生源の高さに対するフードの縦幅も、フードの捕捉性能に影響することがわかった。

そして、今回の実験で用いた煙は粒径が小さく軽いため、特化則・有機則等で規定される制御風速  $0.5\text{m/s}$  を用いた場合、作業台上に設置した外付け式長方形型フードの条件においては、実験で測定した必要排風量は Dalla Valle の式で求めた排風量の 67%、55%、48%となった。したがって、粒径などの違いや現場の状況などに応じて適切な排風量にすることで、例えば溶接のシールドガスへの妨害による溶接不良等の問題解決に貢献できると考えられる。また、異なる外乱気流の条件及びフードの開口面サイズを考慮し、各現場に適した必要排風量を求めて局所排気装置を設計すれば、従来よりも低風量化することが可能となる。

CFD 解析でも実験結果と近い結果を得ることができた。以上より、外乱気流が存在する作業現場における局所排気装置を設計する際に、外乱気流の発生速度や発生位置の違いによって、漏洩がなく排気可能な必要排風量が異なるため、局所排気装置の性能要件を制御風速のみで規定すると、局所排気装置を設計する際に有害物質を除去するための必要排風量が過不足の問題になると考えられる。

## 参考文献

- 1) Flynn MR, Local exhaust ventilation for the control of welding in the construction industry - A literature review, *Ann. Occup. Hyg.*, **56**, 764-776 (2012).
- 2) Gonzale E, Marzal F, Minana A, Doval M, Influence of exhaust geometry on the capture efficiency of lateral exhaust and push-pull ventilation system in surface treatment tanks, *Environmental Progress.*, **27**, 405-411 (2008).
- 3) Ojima J, Efficiency of a tool-mounted local exhaust ventilation system for controlling dust exposure during metal grinding operations, *Industrial Health.*, **45**, 817-819 (2007).
- 4) Vekteris V, Tetsman I, Mokshin V, Investigation of the efficiency of the lateral exhaust hood enhanced by aeroacoustic air flow, *Process Saf, Environmental Protection.*, **109**, 224-232 (2017).
- 5) Ellenbecker, M. J., Gempel, R. F. & Burgess, W. A, Capture efficiency of local exhaust ventilation systems, *The American Industrial Hygiene Association Journal*, **44**, 752-755 (1983).
- 6) B. FLETCHER, Centerline Velocity Characteristics of Local Exhaust Ventilation Hoods, *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, **43**, 626-627 (1982).
- 7) Socha, G. E, Local exhaust ventilation principles, *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, **40**, 1-10 (1979).
- 8) 中央労働災害防止協会, 局所排気・プッシュプル型換気装置及び空気清浄装置の標準設計と保守管理, 中央労働災害防止協会, pp.47 (2012).
- 9) Dalla Valle, J.M., Exhaust Hoods 2nd edition, The Industrial Press, pp.56 (1952).
- 10) 小嶋純, 歩行による乱れ気流が排気フードの捕集能力に及ぼす影響の検証, *産業衛生学雑誌*, **53**, 162-164 (2011).
- 11) 沼野雄志, 新やさしい局排設計教室, 中央労働災害防止協会, pp.90-92 (2005).

## 第 3 章 側方吸引型外付け式フードにおける外乱気流に対する排風量を制御する発散防止抑制装置の開発及び性能評価

### 3.1 研究背景と目的

有害物質を取り扱う作業場では作業に伴い、作業環境中に熱及び有害物質が発生する。有害化学物質による健康影響を避けるには、その物質の使用をやめるか、より有害性の少ない物質に代替するのがもっとも好ましい方策とされるが、それらが実現できない場合には有害物質へのばく露をできるだけ低減させることが重要になる。また、作業場では作業者と化学物質の接触及び体内への摂取は主に呼吸を通して起きるので、作業環境中の有害化学物質の濃度を低く抑えることが重要となる<sup>1-3)</sup>。

これらの作業現場に対して、作業者の健康に悪影響を及ぼす有害物質の作業環境濃度や作業者に対するばく露濃度を低減するために、法令によって、局所排気装置やプッシュプル型換気装置などの設置が義務付けられている。局所排気装置とは、作業工程で発生した作業者の健康に影響を及ぼす有害物質を、周囲に拡散する前になるべく発散したときの高濃度の状態で吸い込み、また吸い込んだ空気中の有害物質をできるだけ除去してから排出する装置であり、作業環境中の有害物質対策に広く用いられる手段のひとつである。

フードは吸引方式や設置方法によって幾つかの種類に分類されるが、外付け式フードは設置の容易さや囲い式フードと比較し作業性の良いところが利点とされる。しかし、開口面から離れることによって吸引風速は二次関数的に減少するので、開口面に近接する位置でないと吸い込み効果が得られないことが欠点である<sup>4-6)</sup>。また、外付け式フードの吸引能力は、その周辺に存在する外乱気流による影響を受けやすい<sup>7-10)</sup>。特に外付け式フードの吸引能力は、その周辺に存在する外乱気流、例えば、窓や戸口の開放、高熱発生源による対流、作業者の歩行や物体運搬による移動から生じる気流に影響を受けやすく、フードの吸引能力は低下することが知られている。このようにフードの吸引能力が低下するとフードへ捕捉されるべき有害物質を作業環境中に拡散させるため、作業環境の悪化や作業者へのばく露による健康障害を引き起こす原因となる。

フードの性能は排風量と制御風速によって決定される。制御風速は、作業状況や作業による有害物質の発散速度、外乱気流の大きさを考慮して経験的に決められたものである。また、固定グラインダのような回転体を有する機械を用いて研磨を行う際に発生する粉じんは強い気流と共に飛散するので、その場合の制御風速は大きな値が設定されている。近年は生産現場において取り扱う化学物質の種類・工程が多様化・複雑化する中、リスクに基づく合理的な作業管理をすることにより、作業現場によって

は制御風速以下でも作業環境が良好に維持できる場合が多くあると考えられる。そのため、制御風速のみを局所排気装置の性能要件として設計すると、必要以上に過剰な風量で排気する結果を招いてしまう。これらのことを考慮して、2012年(平成24年)に有機溶剤中毒予防規則等の一部改正があり、一定の条件のもとで局所排気装置等以外の作業の実態に応じた多様な発散防止抑制措置の導入が可能になり、制御風速を満たさない場合でも、使用が許可されることになった。

過去には、局所排気装置の外付け式フードを対象として、トレーサーガスやトレーサー粒子を用い外乱気流が存在する場合のフード周辺への漏洩濃度を測定することによって、制御風速以下でも作業環境を良好に維持できる最適な風量を求めた研究がある<sup>11-12)</sup>。しかし、多様で変動する外乱気流に応じて最適な風量に制御する研究はまだ少ない。

そして従来の研究手法による漏れ濃度やばく露濃度を監視し、排風量を制御する方法が考えられるが、ガスセンサーの耐久性、混合ガスの影響、作業への影響、コスト面などの問題で実施することが難しいと考えられる。

そこで、本研究では、独自の方法として、風速センサーで外乱風速を監視し、外乱気流の風速に応じて、最適な排風量に制御する方法を検討した。そのため、外付け式フードを対象として実験室での実験によって、外乱気流の発生位置及び風速と漏洩を防ぐフードの排風量との関係を調べ、その上で、外乱気流を常時モニターし、その風速に応じて漏洩を抑える排風量に制御する発散防止抑制装置の開発を目的としている。

## 3.2 実験装置と方法

### 3.2.1 漏洩を抑える排風量の測定実験

本研究では、3種の側方吸引型外付け式フード(開口面サイズ：W500mm×H50mm、W500mm×H100mm および W500mm×H300mm)における外乱気流に対する漏洩を抑える排風量は第2章の実験条件で測定した結果を用いた。実験装置の概略図を図3.1に示す。測定条件を表3.1に示す。

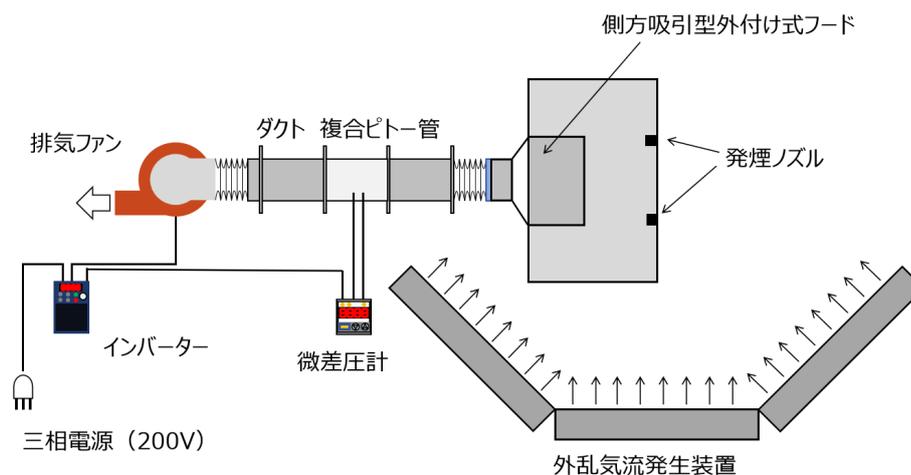


図 3.3 実験装置概略図

表 3.1 3 方向の外乱気流を発生させた場合の漏洩濃度の測定条件

フード開口面 サイズ	外乱気流 発生速度 (m/s)	外乱気流発生方向 (フード開口面に対する)	煙発生速度 (m/s)	漏洩濃度 測定時間
500mm×50mm	0.2,0.3,0.4,0.5	斜め前方 45°	0.5	3min
500mm×100mm		横方向		
500mm×300mm		斜め後方 45°		

### 3.2.2 風量制御発散防止抑制装置の開発実験

外乱気流の風速や漏洩濃度に応じた排風量を制御する発散防止抑制装置の概略図を図 3.2 に示す。作業台の端に 2 章の外乱気流発生位置の条件と同じく、斜め前方 45°、横風と斜め後方 45°の向きで風速センサー(オムロン社製 D6F-WMEMS)を設置した。この風速センサーは空気に対して小型、高精度であり、立体流路構造により耐ダスト性能を持つ。図 3.3 と図 3.4 にそれぞれ小型風速センサーの外観と寸法概要を示す。表 3.2 に小型風速センサーのメーカーによる流速(m/s)に対する出力電圧(V)のデータを示す。

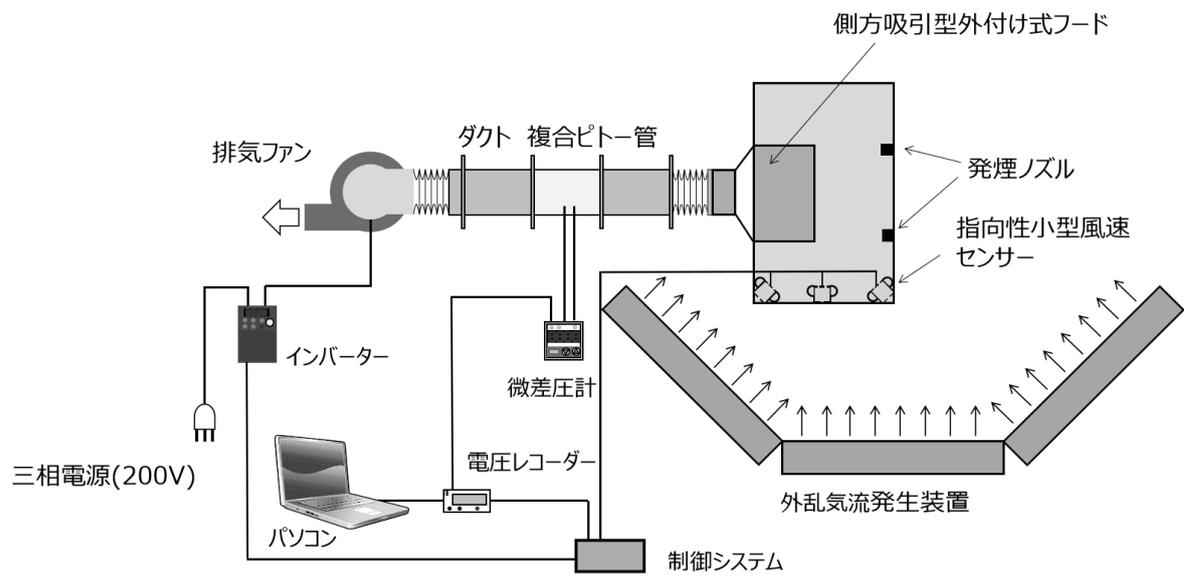


図 3.2 外乱気流に応じて排風量を制御する発散防止抑制装置の概略図



図 3.3 小型風速センサーの外観

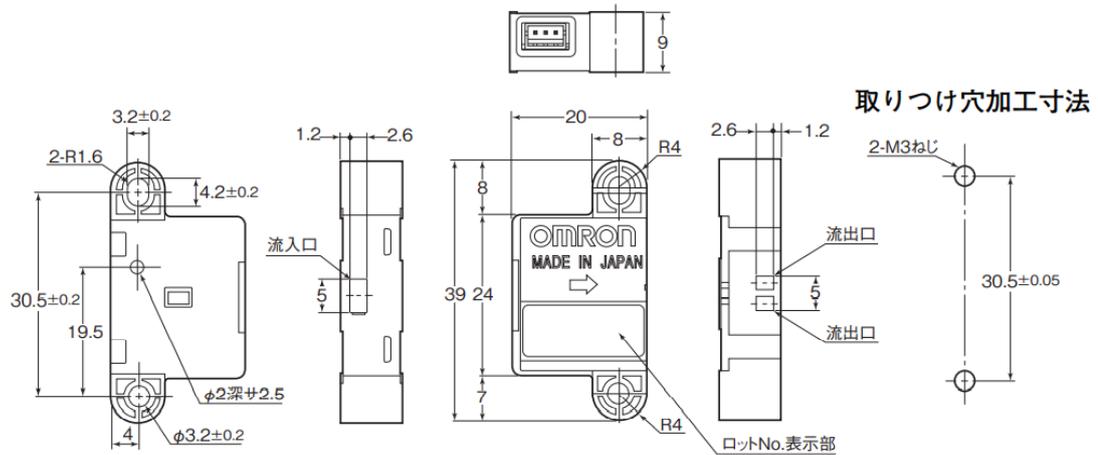


図 3.4 小型風速センサーの寸法概要

表 3.2 小型風速センサーのメーカーによる流速における出力電圧のデータ

流速 (m/s)	0	0.25	0.50	0.75	1.0
出力電圧 (V)	1.00±0.2	1.35±0.2	2.01±0.2	3.27±0.2	5.00±0.2

今回は 3 つの風速センサーを図 3.2 で示した 3 方向に設置し、3 つのセンサーからの出力電圧のうち、最大値（最大風速）を用いる。最大風速がどの向きからの外乱気流か分からないが、2 章で求めたように横方向の外乱気流が一番影響が大きいので、センサーからの最大風速を常に横方向の外乱気流として扱えば、安全側に見ることになる。そこで設置した複数のセンサー出力電圧の中からの最大値を検出する機能を、PIC マイコンを用いて作製した。同時に、微差圧計を用いて、ダクト内の速度圧を常時モニターし、外乱が発生するときの風量変化も監視できる。制御システムの回路基板の外観を図 3.5 に示す。

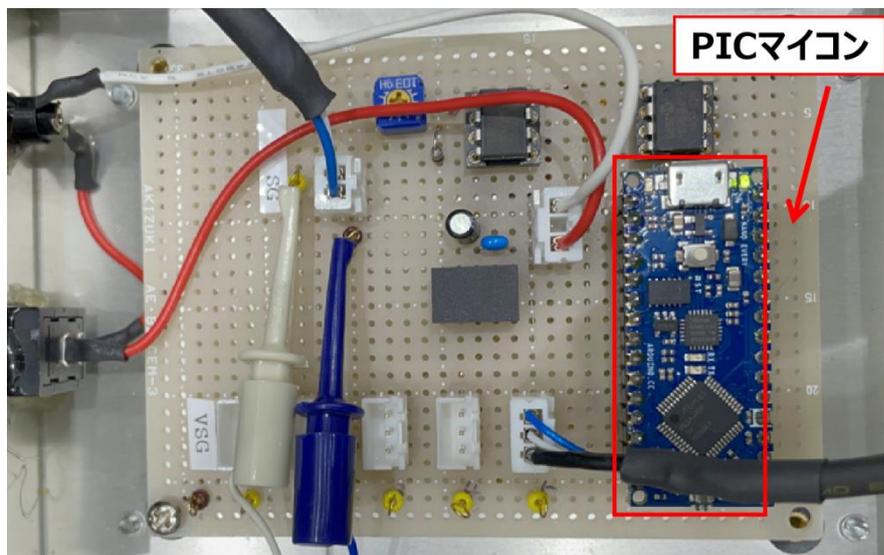


図 3.5 制御システムの回路基板の外観

本研究で使用した電圧に応じたファンの回転数に調整するインバーターの外観を図 3.6 に示す。また、インバーターの仕様を表 3.3 に示す。

表 3.3 インバーターの仕様

出力定格	
定格容量(kVA)	6.5
電圧(V)	200～240
定格電流(A)	17
入力電源	
相数	3 相
電圧(V)	200～240
所要電源容量(kVA)	4.9



図 3.6 インバーターの外観

また、微差圧計(長野計器株式会社製 GC62)を用いて、複合ピトー管からの圧力を速度圧として計測し排風量を求めた。微差圧計の外観を図 3.7、仕様を表 3.4 に示す。



図 3.7 微差圧計の外観

表 3.4 微差圧計の仕様

型式	GC62
測定流体	乾燥空気 窒素ガス
圧力レンジ(Pa)	0～500
表示方法	4桁LEDデジタル表示
質量(g)	95
電源	12～24 V DC±10%



図 3.8 電流レコーダーの外観

また、ダクト内の速度圧を計測する微差圧計の出力電流を監視する電流レコーダー(ティアンドデイ社製 TR55i)を図 3.8 に示す。

そして、制御システムの出力電圧を監視する電圧レコーダー(ティアンドデイ社製 Voltage Recorder VR-71)の外観を図 3.9 に示す。

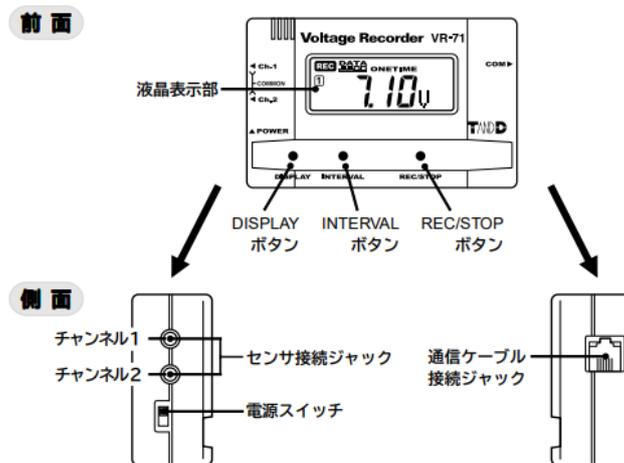


図 3.9 電圧レコーダーの外観

また、排风量制御システムの動作を確認する際に、はじめに外乱気流風速を変動させ、その風速を風速センサーで検知し、その風速に応じて実験で得られた必要排风量に制御できることを確認した。その上で、発散防止抑制装置の漏洩抑制性能を確認するため、煙を発生させて、発散防止抑制装置を稼働した時の作業台周囲の漏洩濃度を測定した。煙発生装置の外観を図 3.10 に示す。



図 3.10 煙発生装置の外観

### 3.3 実験結果と考察

#### 3.3.1 風速センサーの性能テスト実験の結果

本研究では外乱気流を検知し、それに応じて制御システムでインバーターを稼働させるので、最初の段階は、小型風速センサー(オムロン社製 D6F-WMEMS)で外乱気流を検知した場合の電圧出力値を調べる必要がある。そのため、本実験は6つの外乱気流風速をそれぞれ5つの小型風速センサーに当たる時の出力電圧値を調べ、その出力電圧値の平均値を用いて、外乱気流との関係を最小二乗法で求めた。その関係式を式(3-1)に示す。ここで、 $U$  はセンサーの出力電圧(V)、 $V_t$  は外乱気流風速(m/s)である。さらに、その関係をメーカーデータで求めた関係と比較した。

$$U = 3.55V_t^2 + 1.01 \quad (3-1)$$

外乱風速によるセンサーの出力電圧値の結果表 3.5 に示す。また、それぞれ実験とメーカーにおける外乱風速とセンサーの出力電圧値の関係を図 3.11 に示す。図 3.11 の結果より、実験における風速センサーの出力電圧平均値を用いて、最小二乗法で求めた外乱気流風速とセンサー出力電圧の関係はメーカーデータとほぼ一致することを確認した。そして、表 3.5 より、5つの風速センサーの出力電圧における性能のばらつきがほとんどなく、すなわち、本排風量制御システムにどのセンサーを用いても問題ないと考えられる。

表 3.5 外乱気流風速における風速センサーの出力電圧の結果

外乱気流風速 (m/s)	風速センサーの出力電圧(V)					電圧平均 (V)
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	
0.00	1.03	1.04	1.00	1.02	1.03	1.02
0.18	1.10	1.11	1.07	1.10	1.10	1.10
0.26	1.27	1.25	1.24	1.27	1.28	1.26
0.31	1.40	1.36	1.35	1.40	1.40	1.38
0.41	1.64	1.57	1.58	1.64	1.66	1.62
0.50	1.94	1.84	1.90	1.94	1.93	1.91
0.59	2.31	2.20	2.34	2.26	2.33	2.29

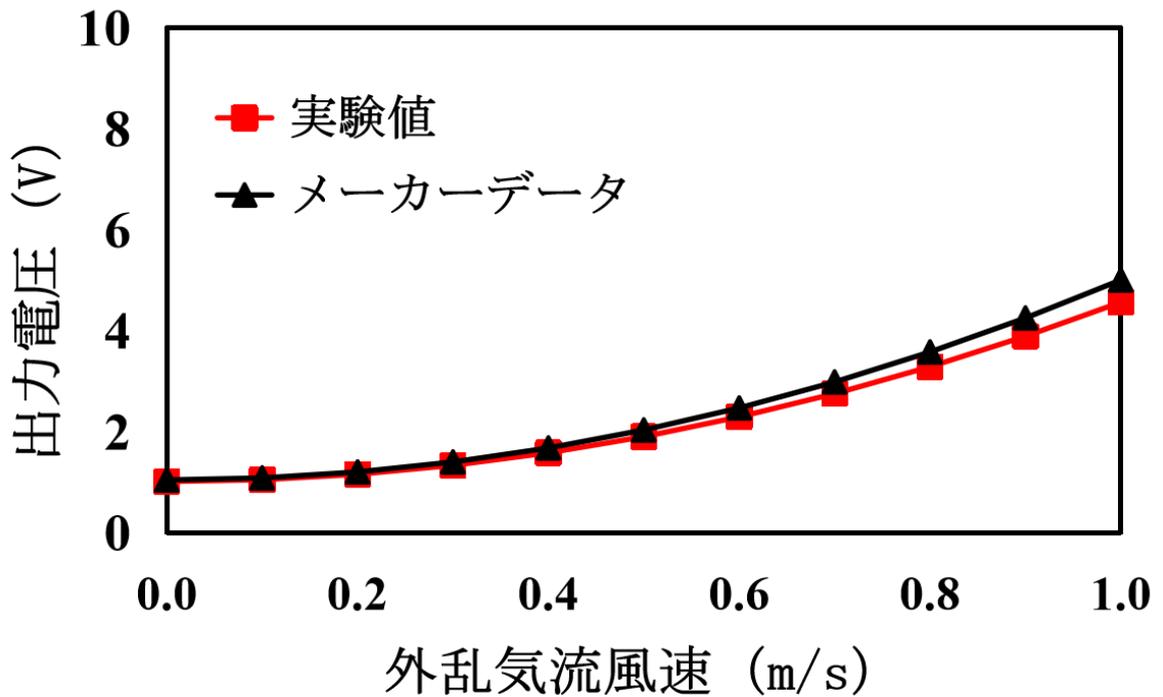


図 3.11 実験とメーカーにおける外乱風速とセンサーの出力電圧値の比較

### 3.3.2 排风量制御システムの動作条件の決定

3.3.1 で求めた外乱気流風速と風速センサーの出力電圧の関係、すなわち式(3-1)を用いて、表 3.5 に示すそれぞれの外乱気流風速条件(0,0.2,0.3,0.4,0.5m/s)による出力電圧を求めた。

また、開口面サイズ W500mm×H300mm のフードを代表例として、横方向の外乱気流を加え装置を稼働させた場合に、外乱気流風速に対して漏洩を抑える排风量になるようなインバーターの周波数を調べた。同時に、それらのインバーター周波数で装置を稼働した際に、ダクト内の速度圧を計測する微差圧計の出力電流を電流レコーダー(ティアンドデイ社製 TR51i)に記録した。本実験で使用した微差圧計の測定レンジは0-500Pa、出力電流値は4-20mAなので、出力電流値と速度圧の関係は式(3-2)のようになる。そこで式(3-2)を用い、出力電流値から速度圧を求め、さらに式(3-3)から外乱気流を加えた場合の排风量を求めることができる。このようにして求めた排风量と、2章の実験で求めた漏洩を抑える排风量の測定結果と比較した。その結果を表3.6に示す。ここで、 $P_v$ はダクト内の速度圧(Pa)、 $I$ は出力電流値(mA)を示す。

$$P_v = \frac{500}{16} I - 125 \quad (3-2)$$

$$Q = 60 \times \alpha \times \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot P_v} \quad (3-3)$$

ここで、 $Q$ は排风量( $m^3/min$ )、 $\alpha$ は複合ピトー管係数(0.83)、 $\rho$ は環境温度が25℃の時の空気密度( $1.185kg/m^3$ )、 $P_v$ はダクト内の速度圧である。

表 3.6 外乱気流を加えた場合の風速センサーの出力電圧値とインバーターの周波数の関係

外乱気流風速(m/s)	0	0.2	0.3	0.4	0.5
風速センサーの出力電圧値(V)	2.00	2.20	2.60	3.20	3.80
インバーターの周波数(Hz)	5.30	15.10	22.30	28.00	34.10
微差圧計の出力電流値(mA)	4.16	5.15	6.50	7.89	9.69
ダクト内の速度圧(Pa)	5.00	35.90	78.10	121.60	177.80
排风量の計算値( $m^3/min$ )	7.10	19.00	28.10	35.00	42.40
排风量の実測値( $m^3/min$ )	7.00	19.00	28.00	35.00	42.00

表 3.6 の結果より、外乱気流を加えた場合、漏洩を抑える排風量になるように調整したインバーターの周波数で装置稼働する時、排風量の計算値は 2 章で調べた外乱気流風速における漏洩を抑える排風量の実測値とほぼ一致することが確認できた。

以上、表 3.3 のそれぞれの外乱気流を加えた場合の風速センサーの出力電圧値(V)と漏洩を抑えるインバーター周波数(Hz)を用いて、制御システムを作製した。

この制御システムは PIC マイコンを用いて作製した。図 3.5 に示すように、この制御システムは複数の風速センサーを搭載でき、その中から最大出力電圧値を検出できる機能を持たせる。そのため、多種多様な外乱気流が存在する現場でも、複数の風速センサーを搭載するシステムは多数の外乱気流の発生が検出できる。そのため、本研究では、2.5 で調べた表 3.7 の結果に基づいて、漏洩に最も影響する外乱気流と漏洩を抑える排風量の関係を利用し、インバーターで最適な排風量となるようにファンを制御する。

表 3.7 外乱気流の発生位置及び風速に対する漏洩を抑える排風量の結果

外乱気流の 発生位置	外乱気流の 発生速度 (m/s)	フードの開口面サイズ		
		W500×H50	W500×H100	W500×H300
		漏洩を抑える排風量(m <sup>3</sup> /min)		
斜め前方 45°	0	8	7	7
	0.2	18	17	15
	0.3	23	21	20
	0.4	27	25	25
	0.5	31	29	29
横方向	0	8	7	7
	0.2	23	19	19
	0.3	30	27	28
	0.4	36	34	35
	0.5	N/A	41	42
斜め後方 45°	0	8	7	7
	0.2	19	18	17
	0.3	23	23	23
	0.4	28	28	28
	0.5	33	33	33

表 3.7 より、横方向から発生した外乱気流がフードの捕集能力に最も影響する。したがって、横風方向で発生するそれぞれの外乱気流風速(0.2、0.3、0.4、0.5)の場合における漏洩を抑える排風量と外乱気流風速(風速センサーが検出した電圧値)の関係を排風量制御システムに取り込み、インバーターで適切な風量が得られるようにファンを制御する。

### 3.3.3 排風量制御システムの性能テストについての考察

以上の結果を踏まえて、開口面サイズ W500mm×H300mm のフードを用いて、横方向の外乱気流を加えた場合において、発散防止抑制装置の漏洩制御性能をテストした。

この発散防止抑制装置を用いて、外乱気流風速が一定の時間間隔で段階的に上昇そして下降させた場合と、外乱気流風速の変動幅が大きい場合の 2 条件において、漏洩を抑えるために必要な排風量と、フード周辺の漏洩濃度の確認を行った。

図 3.12 に外乱気流風速が一定の時間間隔で段階的に上昇そして下降させた場合(ケース 1)の外乱風速と排風量の経時変化及び漏洩濃度の結果を示した。その結果、外乱気流風速の変化に応じて排風量が追従することが確認できた。また、漏洩濃度の結果でもすべての測定点で濃度は 100 カウント以下となった。

図 3.13 に外乱気流風速の変動幅が大きい場合(ケース 2)の外乱風速と排風量の経時変化及び漏洩濃度の結果を示した。外乱気流風速の時間変動が激しい場合と同様に、外乱気流風速の変化に応じて排風量が追従することが確認できた。また、漏洩濃度の結果でもすべての測定点で濃度は 100 カウント以下となった。

以上より、外乱気流を常時計測することによって、漏れのない最適な排風量に制御する機能をもつ発散防止抑制装置を開発できた。この発散防止抑制装置を使用することによって、制御風速を満たすような一定の排風量よりも、外乱気流がない時は少ない排風量で済み、外乱気流がある場合には、それに応じて必要な排風量に自動制御することができる。

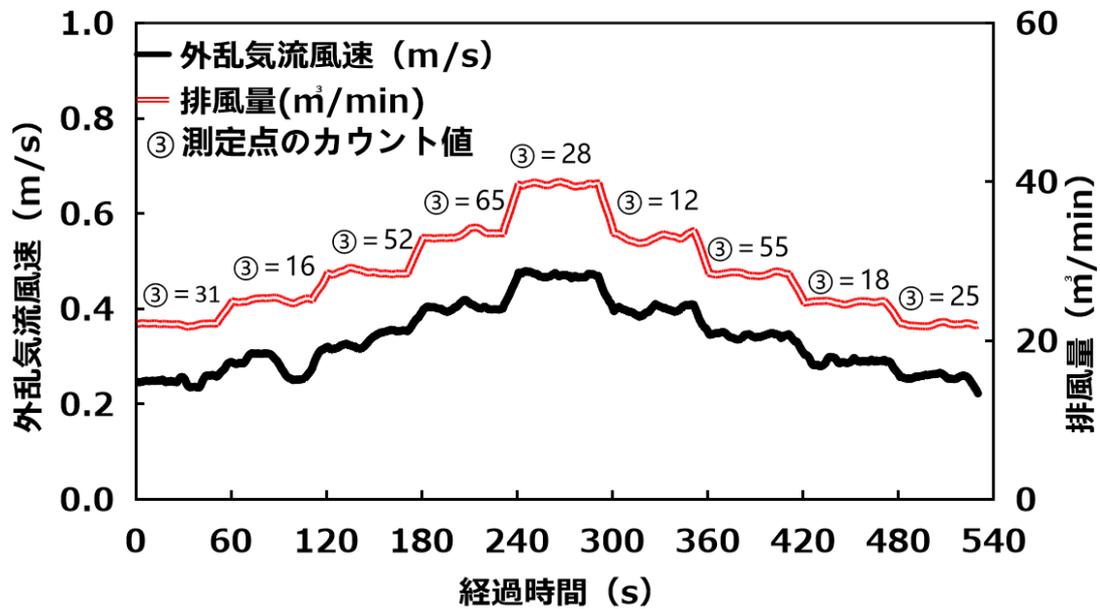


図 3.12 外乱気流風速ケース 1(外乱気流風速が一定の時間間隔で段階的に上昇または下降させた場合)における外乱気流風速と排風量の経時変化及び漏洩濃度の結果

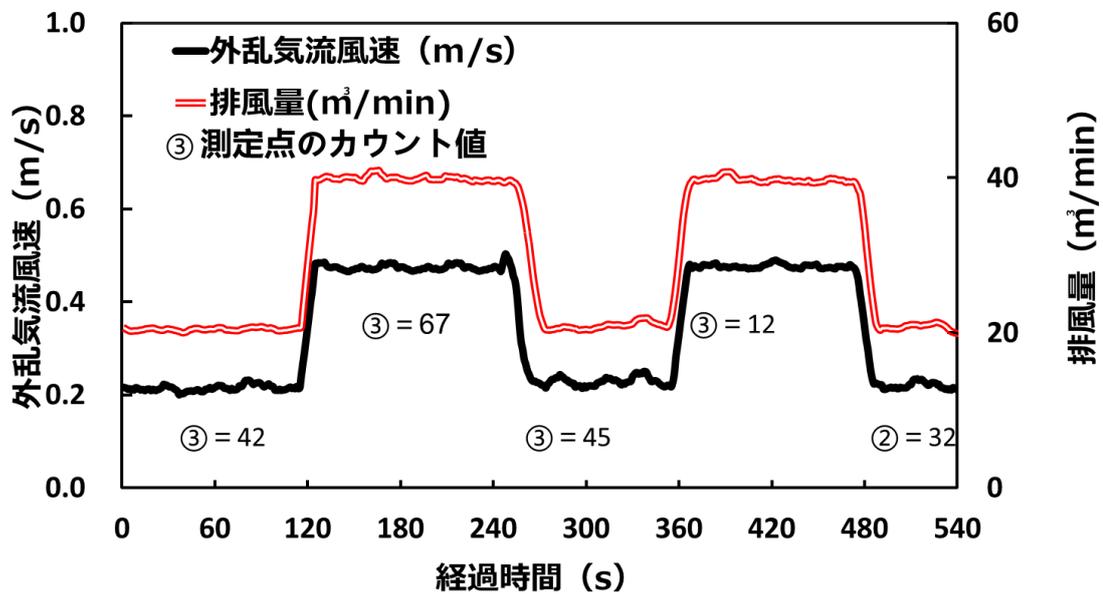


図 3.13 外乱気流のケース 2(外乱気流の変動が大きい場合)における外乱気流風速と排風量の経時変化及び漏洩濃度の結果

### 3.5 まとめ

第2章では作業台上に設置した側方吸引型外付け式フードを対象に、開口面に対して3方向から外乱気流を発生させ、外乱気流の風速と漏洩を抑制できる必要排風量について調べた。従来の漏れ濃度やばく露濃度を監視し、排風量を制御する手法の場合、ガスセンサーの耐久性や混合ガスの影響、作業への影響、コスト面などの短所が考えられる。そこで本研究は、より簡便な方法で風速センサーを用いて外乱風速を監視し、外乱気流の風速及び方向に対応する排風量を制御する発散防止抑制装置を試作した。また、外乱気流風速の2つの条件下で、当発散防止抑制装置の捕集性能を確認した。その結果、どちらの外乱気流の条件に対しても、制御風速を満たす一定の排風量よりも、外乱気流がない時は少ない排風量で済み、外乱気流がある場合は、それに応じて漏洩を抑える最適な排風量に制御することができた。このように異なる外乱気流の条件及びフードの開口面サイズを考慮し、各現場に適した必要排風量を求めて作業環境改善用換気装置を設計すれば、従来よりも低風量で済み、その結果、より柔軟的にこの発散防止抑制装置を現場に導入することによって、エネルギー消費量の削減にもつながって行くことが期待される。また、今後実際の作業現場において、作業者が存在する場合及び異なる発生源の条件を含め、外乱気流に応じて漏洩及びばく露を抑制できるように排風量を制御する発散防止抑制装置を導入し、性能を評価する予定である。

## 参考文献

- 1) Flynn. MR, Local exhaust ventilation for the control of welding in the construction industry - A literature review, *Ann. Occup. Hyg.*, **56**, 764-776 (2012).
- 2) Welling. I, Kulmala. I, Andersson. IM, Extent of the reverse flow wake region produced by a body in a uniform flow field, *Appl Occup Environ Hyg.*, **16**, 900-904 (2001).
- 3) Welling. I, Andersson. IM, Rosen. G, Contaminant dispersion in the vicinity of a worker in a uniform velocity field, *Ann Occup. Hyg.*, **44**, 219-225 (2000).
- 4) Ellenbecker, M. J, Gempel, R. F. & Burgess, W. A, Capture efficiency of local exhaust ventilation systems, *The American Industrial Hygiene Association Journal*, **44**, 752-755 (1983).
- 5) B. FLETCHER, Centerline Velocity Characteristics of Local Exhaust Ventilation Hoods, *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, **43**, 626-627 (1982).
- 6) Socha, G. E, Local exhaust ventilation principles, *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, **40**, 1-10 (1979).
- 7) 沼野雄志, 新やさしい局排設計教室, 中央労働災害防止協会, pp.90-92(2005).
- 8) Huang. RF, Sir. SY, Capture envelopes of rectangular hoods in cross drafts, *AIHA J.*, **62**, 563-571 (2001).
- 9) Huang. RF, Dai. GZ, Chen. JK, Effects of mannequin and walk-by motion on flow and spillage characteristics of wall-mounted and jet-isolated range hoods, *Ann Occup Hyg.*, **54**, 625-539 (2010).
- 10) Huang. RF, Chen. HD, Hung. CH, Effects of walk-by and sash movement on aerodynamics and contaminant leakage of air curtain-isolated fume hood, *Ind Health.*, **45**, 804-16 (2007).
- 11) 小嶋純, 歩行による乱れ気流が排気フードの捕集能力に及ぼす影響の検証, *産業衛生学雑誌*, **53**, 162-164 (2011).
- 12) 小嶋純, トレーサーガスを用いた局所排気フードの捕集能力評価, *産業衛生学雑誌*, **49**, 209-215 (2007).

## 第 4 章 有機溶剤作業に対するばく露防止対策用換気作業台の開口面周りの風速分布測定及び捕集性能の評価

### 4.1 研究背景と目的

ネイルサロンや刷毛塗り、接着作業、歯科医療のような有機溶剤を扱う作業現場では、低濃度のばく露でも健康に悪影響を及ぼす可能性があると考えられる。特に、多くの化学物質から作られている人工爪製品を取り扱うネイルサロンにおいて、その主成分であるメタクリル酸エチル (EMA)、または除光液の主成分であるアセトンは接触皮膚炎、喘息、目や鼻のアレルギーを引き起こす原因となる。また、それらの成分は目、鼻、その他の粘膜を刺したり、赤くなったり、腫れたりすることで顧客も危険にさらされている。そして、ネイルサロンにおける化学物質が過敏症やアレルギーを引き起こすのかを判断するのは難しいことが多いため、過敏症になる前にばく露をコントロールすることが最善である。そのため、多くのネイルサロンでは、環境中、特に呼吸域の空気環境中の人に健康影響を及ぼす有害物質を除去するため、換気装置の設置は必要となる。

米国国立労働安全衛生研究所(NIOSH)では、換気作業台(Ventilated Table)がネイルリストを EMA の吸入から最大限に保護することを示した。換気作業台(Ventilated Table)は、図 4.1 に示すように換気作業台の開口面の吸込み気流が直接に作業員及びお客様の呼吸域近くの有機溶剤蒸気を吸込めるため、ネイルサロンで EMA などの有害物質を除去するための重要な工学的制御手段となった<sup>1)</sup>。

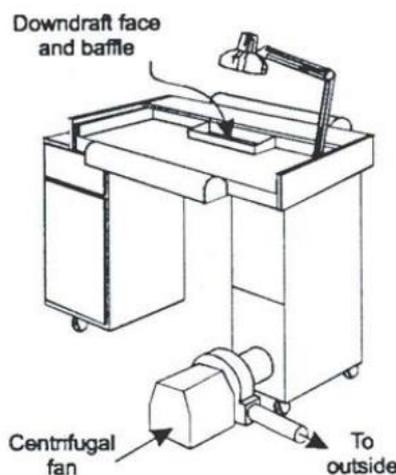


図 4.1 ネイルサロン用換気作業台

また、このネイルサロン用換気作業台を用いて、ネイルサロンの環境中に存在するメタクリル酸エチルに対する捕集効果を調べた結果、ネイルサロンで換気作業台を $6.7\text{m}^3/\text{min}$ の排風量で6時間使用した場合、作業者の呼吸域でメタクリル酸エチル濃度の幾何平均は $0.6\text{ppm}$ となり、換気のない従来の作業台を使用した場合の幾何平均濃度である $8.7\text{ppm}$ より10倍以上の捕集効果が得られたと報告している。

ただし、ネイルサロンなどの現場では多様な作業に伴い、作業者の口や鼻の位置(呼吸域)が移動することが考えられる。その際に、排気装置の吸引で生じる開口面上の風速分布の偏りが大きいと、風速の低い領域から有害物質の漏洩が発生する可能性がある。その領域に、作業者の口や鼻が移動した際に、作業者が高濃度の有害物質にばく露する危険性がある。

そこで、本研究では、低濃度のばく露でも健康に悪影響を及ぼす可能性があるネイルサロンなどの現場を想定して、実際の作業者の作業範囲を考慮して、作業に影響が少ないように外付け式下方吸引長方形型フード(開口面サイズ:  $W400\text{mm}\times H300\text{mm}$ )を備えた換気作業台を作製した。その上で、フード開口面上の風速分布の偏りを低減させるために、フードの開口面上に開口率の異なる3つのパンチングをそれぞれ設置した場合において、設定した捕捉点での風速や開口面上の風速分布にどう影響を与えるかを調べるため、風速測定を行った。そして、実際に有機溶剤を扱う現場を想定して、有機溶剤であるアセトンガスを発生させ、換気作業台の排風量を変化させた場合の捕集率の測定を行った。

## 4.2 実験装置と方法

### 4.2.1 実験装置

本研究で作製した換気作業台は図 4.2 に示す外付け式下方吸引型フードを備えた換気作業台、ダクト、複合ピトー管、微差圧計(長野計器株式会社製 GC62)、インバーター(富士電機株式会社製 FRENIC-Mini)、排風機(昭和電機株式会社製 EC-100T-R313)によって構成されている。下方吸引型外付け式フード付き換気作業台はネイルサロンの現場調査におけるネイリング作業の作業範囲に基づき、 $W400\text{mm}\times H300\text{mm}$ のフード開口面(作業面)を設けた。また、フードの開口面に合わせて、市販品で一般的な $L80\text{cm}\times W60\text{cm}\times H75\text{cm}$ サイズの作業台を使用した。なお、ダクト内の速度圧を求めるため、排風量に応じて内径 $100\text{mm}$ の複合ピトー管(ウェットマスター株式会社製 エアロアイ AE100D)、または内径 $52\text{mm}$ のスリット式流量検出ピトー管(岡野製作所株式会社製 SGP52A)を設置した。

また、フード開口面下のチャンバーボックスには内径 100 mm のダクトと排風機を接続した。開口面に設置したパンチングは、アルミニウム製で開口率の異なる 3 種類のパンチングを用いた。使用した 3 種類のパンチングの仕様を表 4.1 に示す。フード付き換気作業台の概略図を図 4.3 に示す。

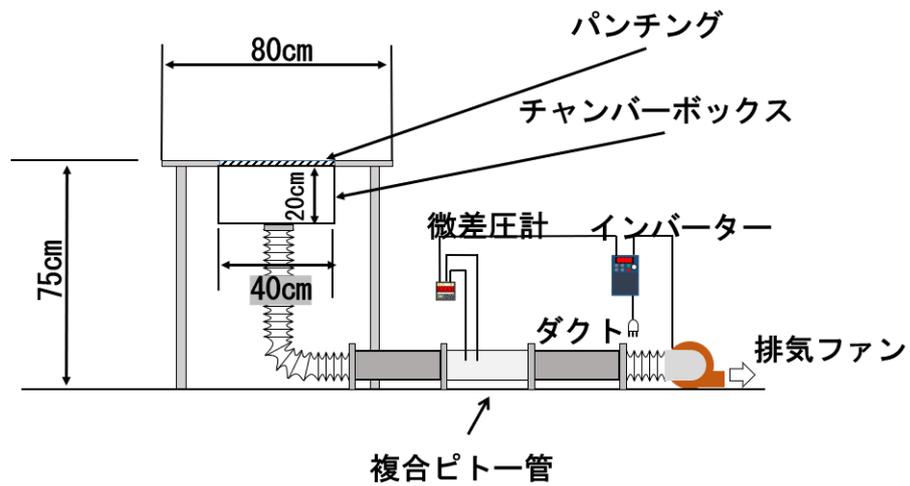


図 4.2 換気作業台の概略図

表 4.1 3 種類のパンチングの仕様

	①	②	③
配列	60°千鳥型 		
穴径 D(mm)	2.0	3.0	0.5
ピッチ P(mm)	3.0	5.0	1.0
開口率 (%) = $\frac{90.6 \times \text{穴径 } D^2}{\text{ピッチ } P^2}$	40.3	32.6	22.7

パンチングの開口率(%)は穴径  $D(\text{mm})$ とピッチ  $P(\text{mm})$ を用いて式(4-1)で求められる。

$$\text{開口率} = \frac{90.6 \times D^2}{P^2} \quad (4-1)$$

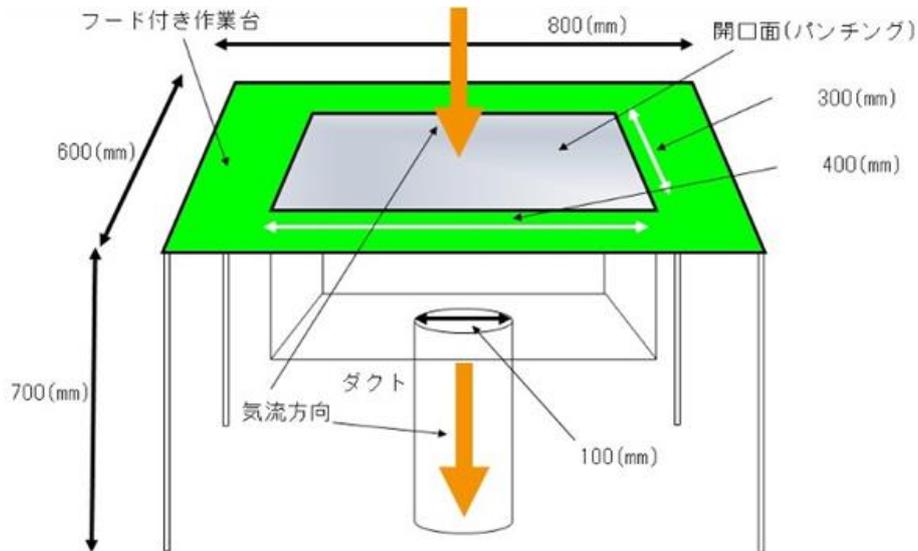


図 4.3 フード付き換気作業台の概略図

また、本研究では風速測定にクリモマスター風速計(日本カノマックス社製 MODEL6541-21)を用いた。クリモマスター風速計は風速、風温を測定でき、一定時間ごとの最大、最小、平均値のデータを取得することができる熱線風速計である。熱線風速計は流れの冷却作用で熱線の温度が変化し、温度により熱線の電気抵抗が変化するという二つの現象を利用して風速を得ている<sup>2)</sup>。クリモマスター風速計の外観を図 4.4 に示す。



図 4.4 クリモマスター風速計の外観

プローブには指向性と無指向性の2種類があり、本研究ではその両方を使用した。指向性プローブと無指向性プローブの概略図を図4.5に示す。指向性プローブでは風向マークがついた方向からの気流で校正されている。一方、無指向性プローブでは、気流のある水平面に対して、水平面上のあらゆる方向からの気流の風速を測ることができる。

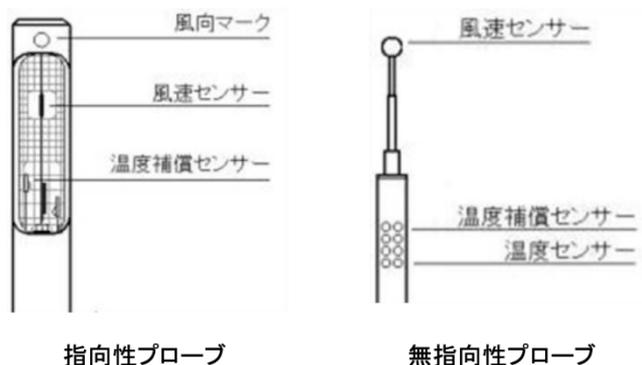


図4.5 指向性プローブと無指向性プローブの概略図

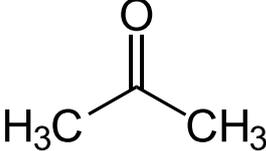
そして、本研究では有機溶剤蒸気の濃度測定に図4.6に示すVOCモニター(理研計器社製GX-6000)を使用した。VOCモニターは可燃性ガス、酸素、硫化水素、一酸化炭素、その他毒性ガス、揮発性有機溶剤ガス(VOC)など、最大6種類のガスを同時検出することが可能である。



図4.6 VOCモニターの外観

本研究では、実際に有機溶剤を扱う作業現場を想定して、フード上部の開口面上でアセトンを蒸発させて濃度測定を行った。アセトンの物理的および化学的性質を表4.2に示す<sup>3)</sup>。

表 4.2 アセトンの物理的および化学的性質

化学名	アセトン(acetone)
構造式	
化学式	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O
分子量	58.08
融点 °C	-94.7
沸点 °C	56.1
密度(20 °C) g/cm <sup>3</sup>	0.791
相対蒸気密度(空気=1)	2.0
管理濃度 ppm	500
蒸発量 mg/min/cm <sup>2</sup>	5.0

アセトンは無色、低粘性率、高揮発性、やや刺激的なエーテル臭のある液体である。双極子モーメントや誘電率が高く、蒸発速度に関しても、有機溶剤である酢酸ブチルの11.6倍と非常に大きい。また、蒸気圧が高く、引火しやすい性質を持つ。水、アルコール、多価アルコール、エステル、エーテル、ケトン、炭化水素、ハロゲン化水素などの極性、非極性溶剤とよく混和する性質がある<sup>4)</sup>。アセトンの蒸気を吸入することによって生じる症状として、頭痛、めまい、嘔吐などが報告されている。目、鼻、喉などの粘膜に接触を繰り返すことにより、炎症を引き起こす。アセトンの主な工業的生成法として、2-プロパノールの酸化、脱水素、Wacker法によるプロピレンの直接酸化、クメン法によるフェノールとの併産法などがある。

#### 4.2.2 実験方法

本研究では、フード上部の開口面の中心を原点(X、Y、Z=0(mm))に設定した。また、開口面における短辺方向をX軸、長辺方向をY軸、XY平面に垂直な高さ方向をZ軸とし、YZ平面の風速分布を測定した。使用した3種類のパンチングの開口率と実際

に風速測定を行なった際の測定条件を表 4.3、測定点を図 4.7、4.8、風速測定の様子を  
 図 4.9 に示す。

表 4.3 風速測定の測定条件

パンチング 開口率(%)	フード開口面 サイズ (mm)	サンプリング 条件	測定点(mm)
40.3	400 × 300	サンプリング 間隔 1 s × 測定時間 60 s × 測定回数 3 回	X 軸 0、200
32.6			Y 軸 -250、-200、-150、- 100、 -50、0、50、100、150、 200、250
22.7			Z 軸 25、40、60、80、100、 150、200、250、300

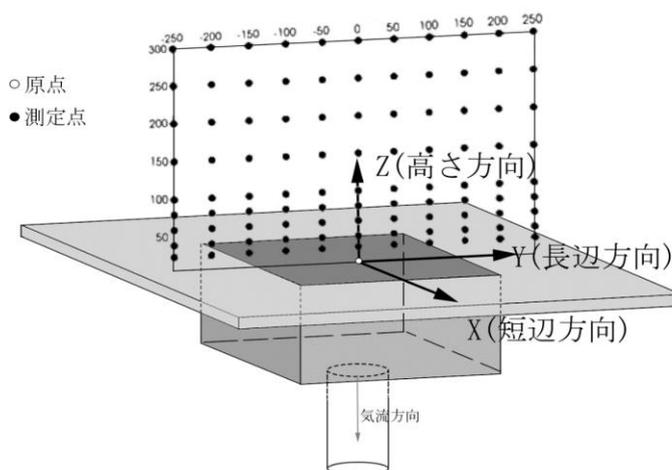


図 4.7 X=0(mm)の YZ 平面の測定点

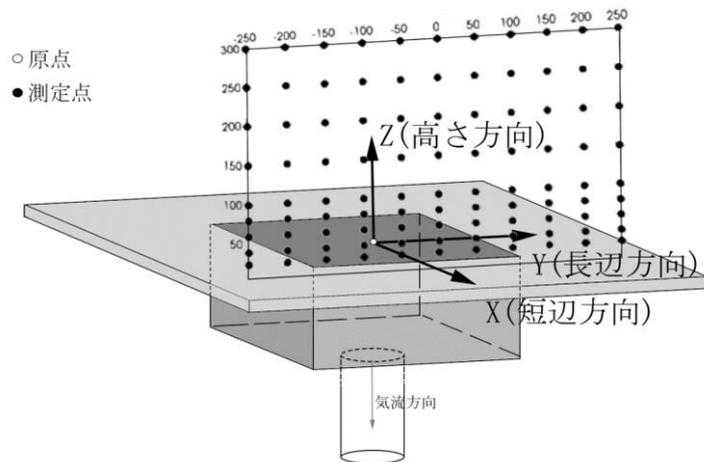


図 4.8 X=200(mm)の YZ 平面の測定点

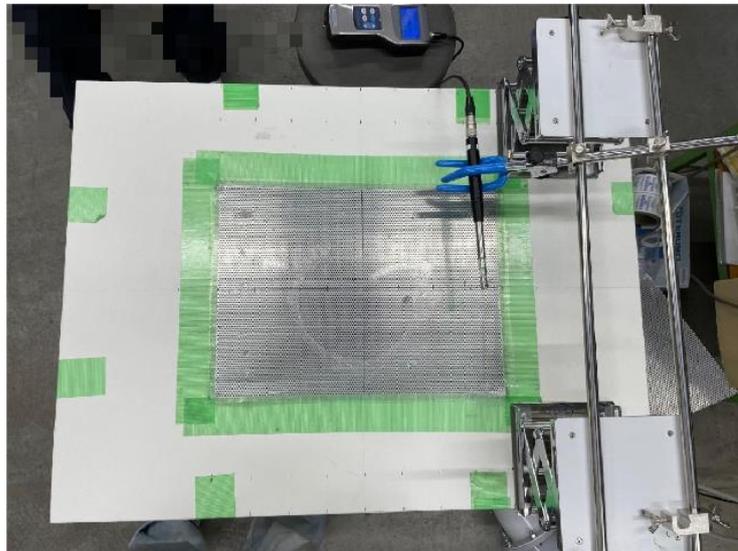


図 4.9 風速測定の様子

風速分布の測定は、アセトンの発生源の位置(原点)を含む面である  $X=0(\text{mm})$  の YZ 平面と、呼吸域に設定した測定点を含む面である  $X=200(\text{mm})$  の YZ 平面で行なった。また、今回使用した外付け式フードの捕捉点は、有害物が発生する可能性のある点で、開口面から最も遠い点である<sup>5)</sup>。そのため、作業台の直上で作業を行うことを想定して、ネイルサロンの現場調査結果を参考にし、捕捉点として  $X=0(\text{mm})$ 、 $Y=0(\text{mm})$ 、 $Z=25(\text{mm})$  に設定した。

本研究の排風量は、2021 年の伊藤と青木の研究に基づき、有害物質であるアセトンの蒸発を十分に吸引できる排風量としている  $3\text{m}^3/\text{min}$  と設定した。そして、この換気作業台による風速測定を行った。以下に風速測定の実験手順を示す。

## 実験手順

- ① 微差圧計によって、複合ピトー管からの圧力を速度圧として計測し、排風量を求めた。
- ② 微差圧計からの出力電流をインバーターに入力して、設定した排風量になるようにファンを制御した。
- ③ 測定点に風速計のプロープを固定し、風速を測定した。1回のサンプリングごとに、1秒の間隔で1分間、全部で3回の測定を行った。

## 4.3 実験結果

### 4.3.1 各開口率のパンチングの風速測定結果

#### (1)開口率 40.3%のパンチングの風速測定結果

開口率 40.3%のパンチングを用いて、 $X=0(\text{mm})$ (発生源を含む面)のYZ平面の各測定点の風速を表 4.4、風速分布を図 4.10 に示す。また、 $X=200(\text{mm})$ (呼吸域を含む面)のYZ平面の各測定点の風速を表 4.5、風速分布を図 4.11 に示す。

表 4.4 開口率 40.3%のパンチング、 $X=0(\text{mm})$ のYZ平面風速(m/s)

		Z(mm)								
		25	40	60	80	100	150	200	250	300
Y(mm)	250	0.03	0.04	0.07	0.04	0.05	0.02	0.02	0.01	0.01
	200	0.18	0.17	0.17	0.15	0.14	0.09	0.04	0.02	0.01
	150	0.33	0.27	0.24	0.21	0.18	0.13	0.06	0.01	0.01
	100	0.39	0.30	0.28	0.23	0.21	0.16	0.07	0.02	0.01
	50	0.41	0.33	0.29	0.25	0.22	0.17	0.10	0.03	0.01
	0	0.41	0.34	0.30	0.27	0.23	0.16	0.11	0.03	0.01
	-50	0.39	0.34	0.30	0.27	0.23	0.17	0.10	0.02	0.01
	-100	0.37	0.31	0.28	0.25	0.22	0.14	0.09	0.02	0.01
	-150	0.30	0.26	0.23	0.22	0.18	0.11	0.07	0.03	0.01
	-200	0.19	0.16	0.17	0.17	0.14	0.10	0.04	0.01	0.01
-250	0.07	0.05	0.08	0.07	0.06	0.04	0.01	0.01	0.01	

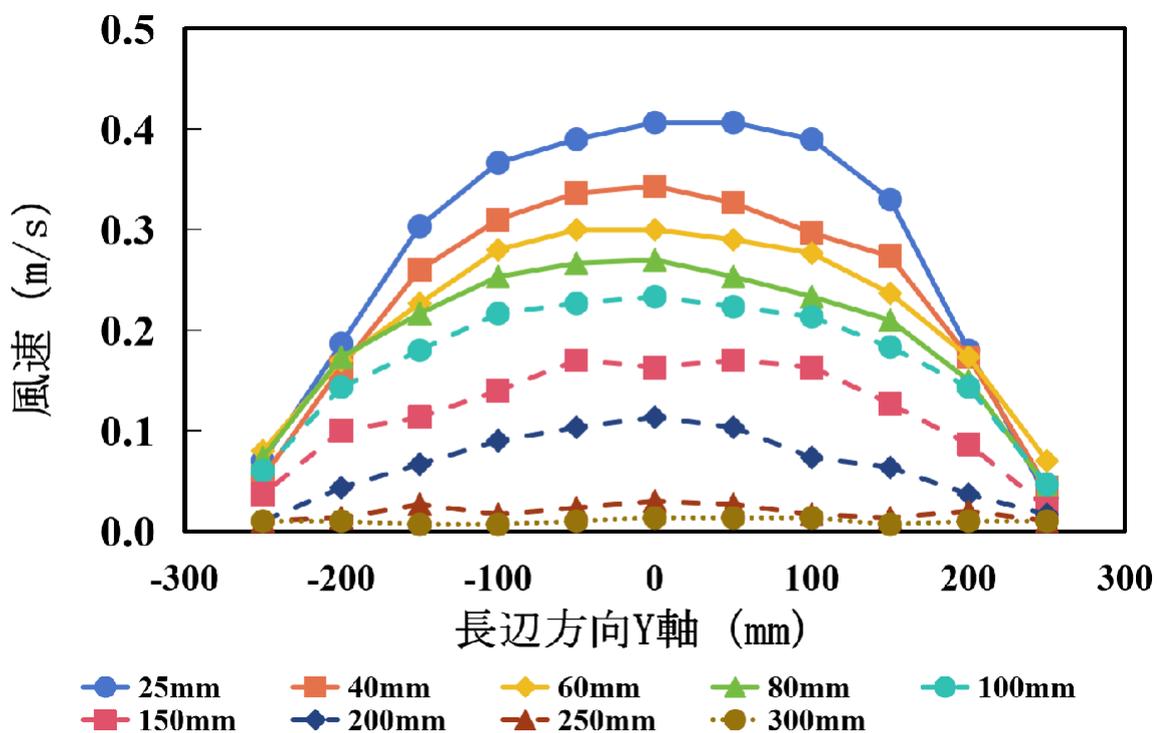


図 4.10 開口率 40.3%のパンチング、X=0(mm)の YZ 平面風速分布

表 4.5 開口率 40.3%のパンチング、X=200(mm)の YZ 平面風速(m/s)

		Z(mm)						
		25	40	60	80	100	200	300
Y(mm)	250	0.06	0.06	0.03	0.03	0.02	0.01	0.01
	200	0.07	0.08	0.04	0.07	0.03	0.01	0.02
	150	0.08	0.08	0.06	0.05	0.04	0.01	0.01
	100	0.08	0.10	0.09	0.07	0.05	0.00	0.02
	50	0.08	0.09	0.09	0.07	0.06	0.02	0.00
	0	0.08	0.10	0.10	0.08	0.06	0.02	0.00
	-50	0.07	0.10	0.09	0.09	0.07	0.01	0.00
	-100	0.07	0.09	0.09	0.07	0.08	0.01	0.00
	-150	0.05	0.07	0.06	0.05	0.07	0.01	0.01
	-200	0.04	0.05	0.03	0.05	0.05	0.01	0.03
	-250	0.03	0.02	0.02	0.04	0.03	0.02	0.03

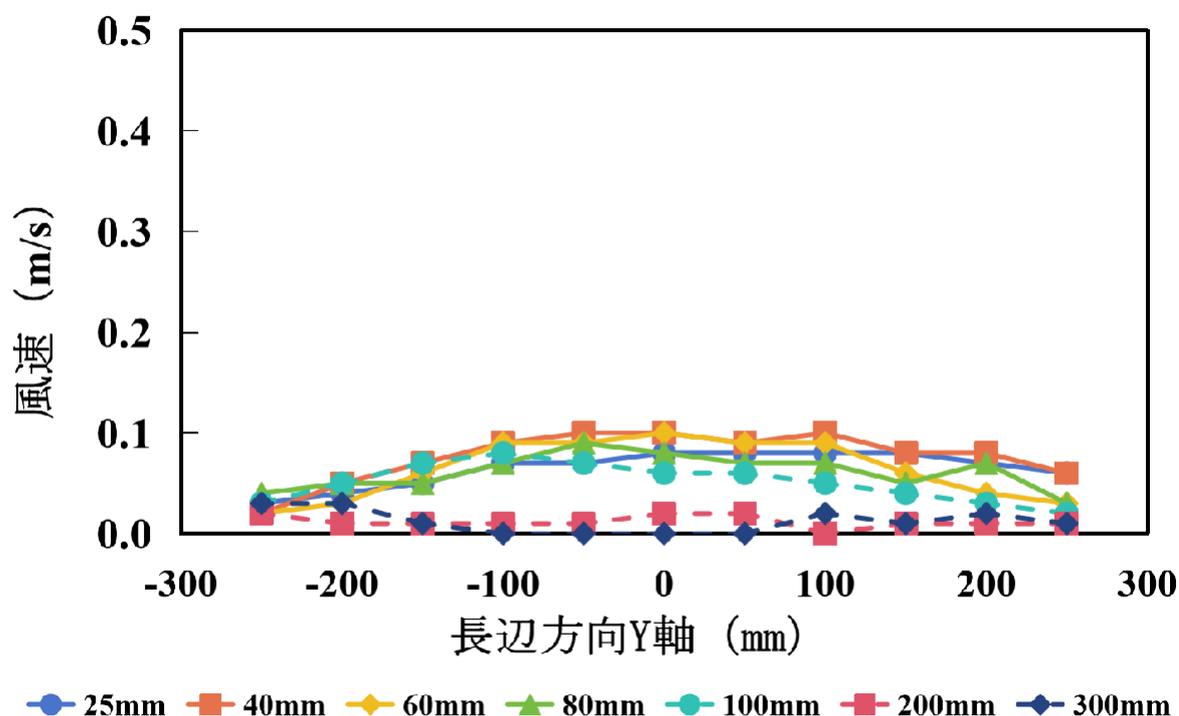


図 4.11 開口率 40.3%のパンチング、X=200(mm)の YZ 平面の風速分布

表 4.4、表 4.5 より、設定した捕捉点において、有機溶剤中毒予防規則によって定められた下方吸引型外付け式フードの制御風速 0.5 m/s を下回っていた。図 4.10、図 4.11 から、X=0(mm)と X=200(mm)の 2 つの面において、開口面から遠ざかるほど風速が減少する傾向となった。

全体の風速について、図 4.10、4.11 から、X=200(mm)の風速が X=0(mm)に比べて全体的に低くなっていた。風速分布の偏りについては、X=0(mm)および X=200(mm)の両面で大きな偏りは見られなかった。

## (2)開口率 32.6%のパンチングの風速測定結果

開口率 32.6%のパンチングを用いて、X=0(mm)(発生源を含む面)の YZ 平面の各測定点の風速を表 4.6、風速分布のグラフを図 4.12 に示す。また、X=200(mm)(呼吸域を含む面)の YZ 平面の各測定点の風速を表 4.7、風速分布を図 4.13 に示す。

表 4.6 開口率 32.6%のパンチング、X=0(mm)の YZ 平面風速(m/s)

		Z(mm)								
		25	40	60	80	100	150	200	250	300
Y(mm)	250	0.04	0.07	0.09	0.07	0.08	0.05	0.02	0.02	0.01
	200	0.19	0.19	0.18	0.17	0.15	0.08	0.06	0.03	0.01
	150	0.33	0.28	0.24	0.21	0.17	0.14	0.08	0.02	0.01
	100	0.37	0.32	0.28	0.22	0.21	0.17	0.12	0.04	0.01
	50	0.39	0.34	0.27	0.25	0.22	0.17	0.13	0.07	0.03
	0	0.40	0.34	0.27	0.25	0.23	0.17	0.13	0.06	0.03
	-50	0.38	0.33	0.28	0.25	0.21	0.17	0.13	0.06	0.03
	-100	0.36	0.30	0.27	0.22	0.19	0.16	0.10	0.04	0.02
	-150	0.28	0.25	0.25	0.19	0.17	0.14	0.06	0.02	0.01
	-200	0.17	0.17	0.16	0.14	0.15	0.08	0.02	0.02	0.01
	-250	0.04	0.04	0.08	0.07	0.04	0.04	0.01	0.00	0.00

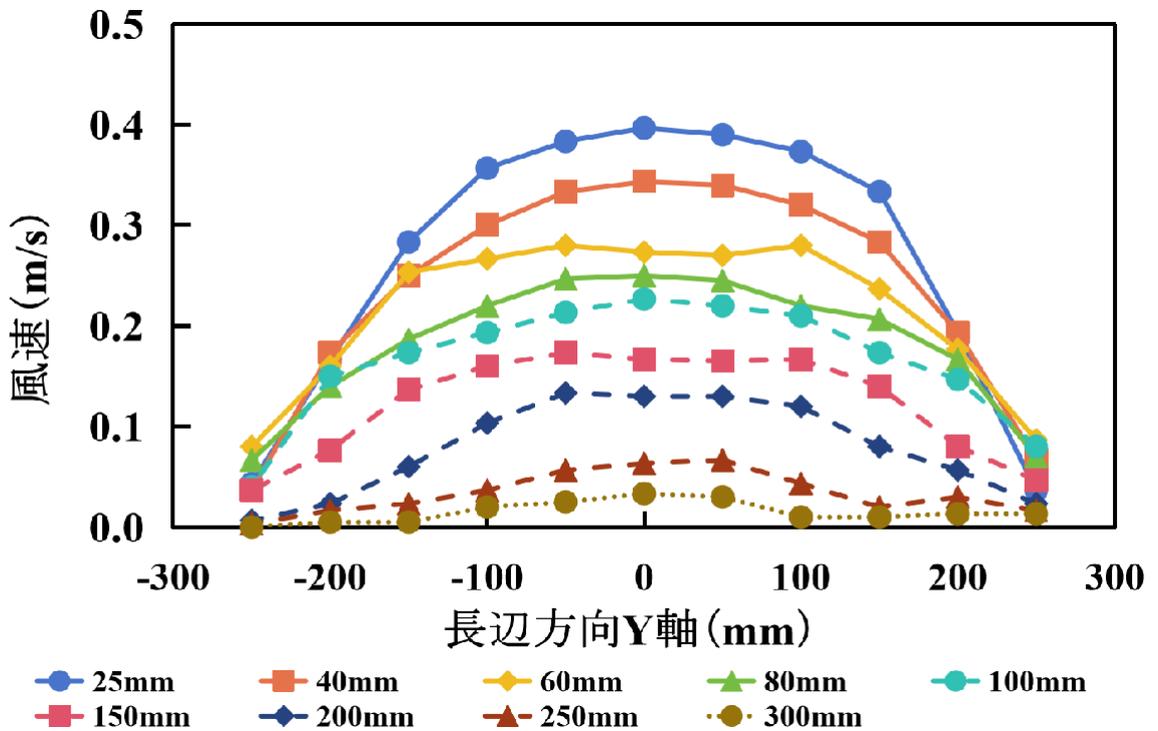


図 4.12 開口率 32.6%のパンチング、X=0(mm)の YZ 平面風速分布

表 4.7 開口率 32.6%のパンチング、X=200(mm)の YZ 平面風速(m/s)

		Z(mm)						
		25	40	60	80	100	200	300
Y(mm)	250	0.01	0.01	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
	200	0.03	0.03	0.04	0.03	0.04	0.04	0.03
	150	0.05	0.04	0.06	0.04	0.04	0.04	0.03
	100	0.04	0.05	0.07	0.08	0.06	0.04	0.02
	0	0.03	0.05	0.12	0.12	0.08	0.05	0.04
	-100	0.04	0.03	0.09	0.09	0.08	0.03	0.03
	-150	0.01	0.03	0.07	0.06	0.05	0.04	0.03
	-200	0.00	0.01	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04
	-250	0.01	0.00	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02

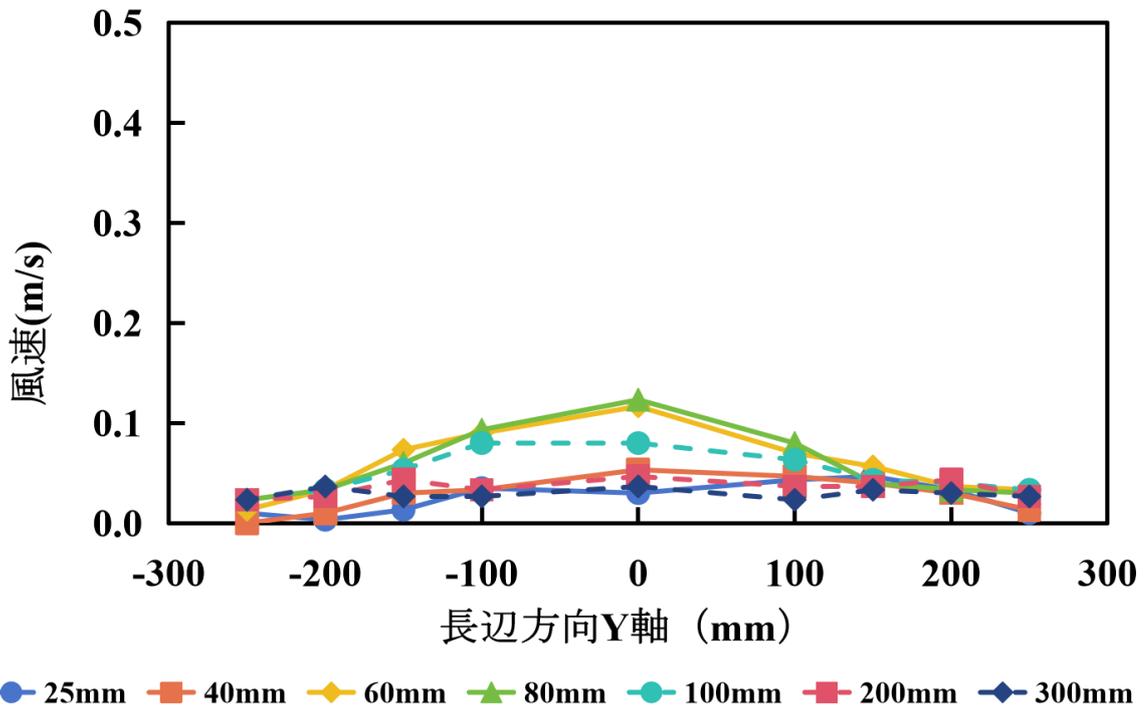


図 4.13 開口率 32.6%のパンチング、X=200(mm)の YZ 平面の風速分布

表 4.6、表 4.7 から、設定した捕捉点において、有機溶剤中毒予防規則で定められた下方吸引型外付け式フードの制御風速 0.5 m/s を下回っていた。また、図 4.12、図 4.13 から、X=0(mm)(発生源を含む面)と X=200(mm)(呼吸域を含む面)の 2 つの面において、

開口率が 40.3%の場合と同様に、開口面から遠ざかるほど風速が減少する傾向となった。

全体の風速について、図 4.12、図 4.13 から、 $X=200(\text{mm})$ (呼吸域を含む面)の風速が $X=0(\text{mm})$ (発生源を含む面)よりも全体的に低くなっていた。風速分布の偏りについては、 $X=0(\text{mm})$ および $X=200(\text{mm})$ の両面で大きな偏りは見られなかった。

### (3)開口率 22.7%のパンチングの風速測定結果

開口率 22.7%のパンチングを用いて、 $X=0(\text{mm})$ (発生源を含む面)の YZ 平面の各測定点の風速を表 4.8、風速分布のグラフを図 4.14 に示す。また、 $X=200(\text{mm})$ (呼吸域を含む面)の YZ 平面の各測定点の風速を表 4.9、風速分布を図 4.15 に示す。

表 4.8 開口率 22.7%のパンチング、 $X=0(\text{mm})$ の YZ 平面風速(m/s)

		Z(mm)								
		25	40	60	80	100	150	200	250	300
Y(mm)	250	0.04	0.05	0.07	0.09	0.07	0.06	0.02	0.01	0.02
	200	0.19	0.18	0.16	0.14	0.14	0.12	0.06	0.02	0.01
	150	0.33	0.27	0.21	0.20	0.19	0.15	0.07	0.04	0.01
	100	0.38	0.31	0.25	0.21	0.21	0.16	0.10	0.03	0.02
	50	0.38	0.33	0.28	0.23	0.22	0.17	0.12	0.04	0.01
	0	0.40	0.34	0.28	0.24	0.23	0.18	0.13	0.05	0.02
	-50	0.38	0.33	0.27	0.23	0.22	0.17	0.10	0.04	0.01
	-100	0.37	0.32	0.25	0.21	0.21	0.15	0.09	0.04	0.01
	-150	0.31	0.25	0.21	0.18	0.17	0.13	0.06	0.03	0.01
	-200	0.17	0.17	0.16	0.14	0.11	0.11	0.06	0.03	0.01
-250	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.04	0.03	0.02	0.01	

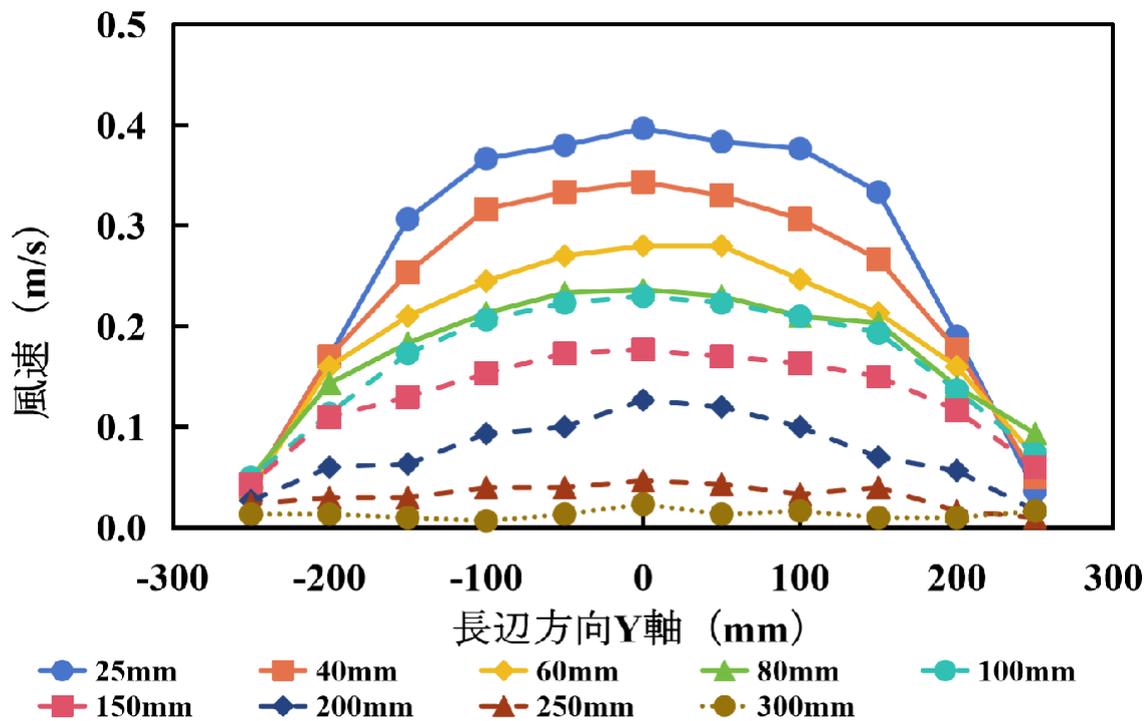


図 4.14 開口率 22.7%のパンチング、X=0(mm)の YZ 平面風速分布

表 4.9 開口率 22.7%のパンチング、X=200(mm)の YZ 平面風速(m/s)

		Z(mm)						
		25	40	60	80	100	200	300
Y(mm)	250	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.00
	200	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01
	150	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.00
	100	0.02	0.03	0.02	0.03	0.03	0.01	0.00
	0	0.04	0.04	0.03	0.04	0.06	0.03	0.01
	-100	0.04	0.02	0.04	0.05	0.04	0.02	0.01
	-150	0.01	0.01	0.02	0.03	0.03	0.02	0.00
	-200	0.01	0.00	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01
	-250	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00

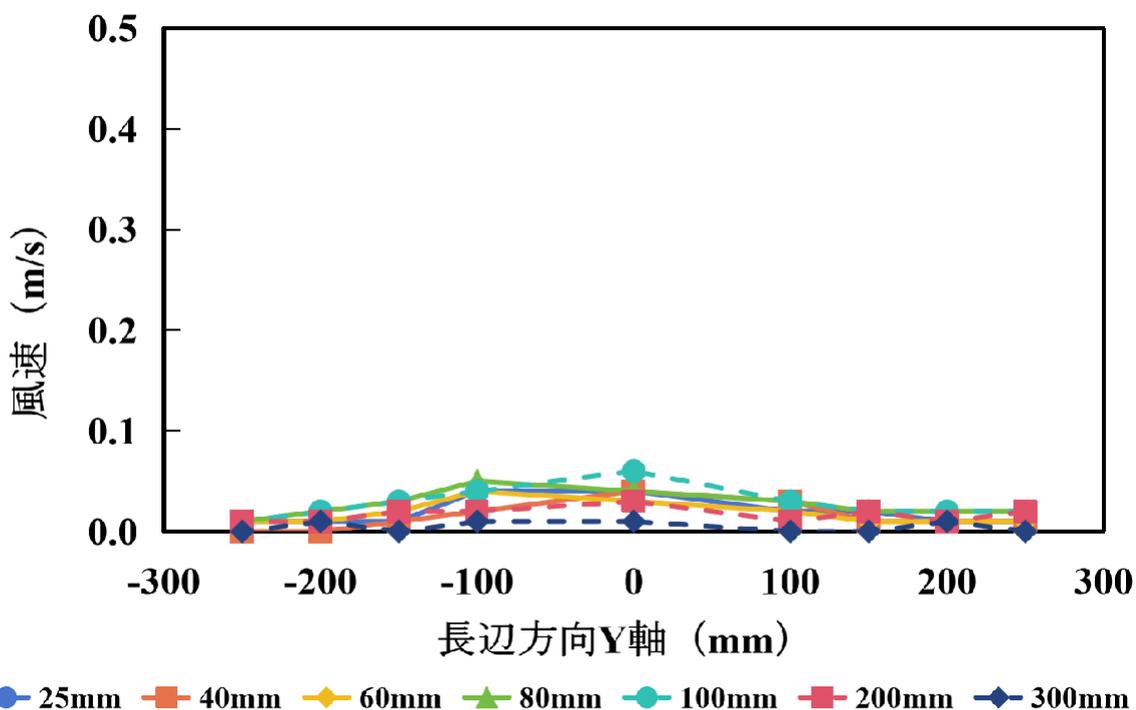


図 4.15 開口率 22.7%のパンチング、X=200(mm)の YZ 平面の風速分布

表 4.8、表 4.9 から、設定した捕捉点において、有機溶剤中毒予防規則で定められた下方吸引型フードの制御風速 0.5 m/s を下回っていた。また、図 4.14、図 4.15 から、X=0(mm)(発生源を含む面)と X=200(mm)(呼吸域を含む面)の 2 つの面において、開口率が 40.3%および 32.6%の場合と同様に、開口面から遠ざかるほど風速が減少する傾向となった。全体の風速について、図 4.14、図 4.15 から、X=200(mm)(呼吸域を含む面)の風速が X=0(mm)(発生源を含む面)よりも全体的に低くなっていた。風速分布の偏りについては、X=0(mm)および X=200(mm)の両面で大きな偏りは見られなかった。

#### 4.3.2 異なるパンチングの開口率による風速の比較

本研究で用いた開口率 40.3、32.6、22.7%の 3 つのパンチングを使用することにより、フードの開口面からの風速分布がどのように変化するかを比較する。これにより、開口率と風速の関係を明らかにし、開口面上の風速分布の均一性や偏りを評価することもできる。そのため、最も発生源に近い点である X=0、Z=25(mm)と X=0、Z=40(mm)の風速分布を比較する。パンチングの開口率 40.3、32.6、22.7%の X=0、Z=25(mm)の風速分布を図 4.16、パンチング開口率 40.3、32.6、22.7%の X=0、Z=40(mm)の風速分布を図 4.17 に示す。

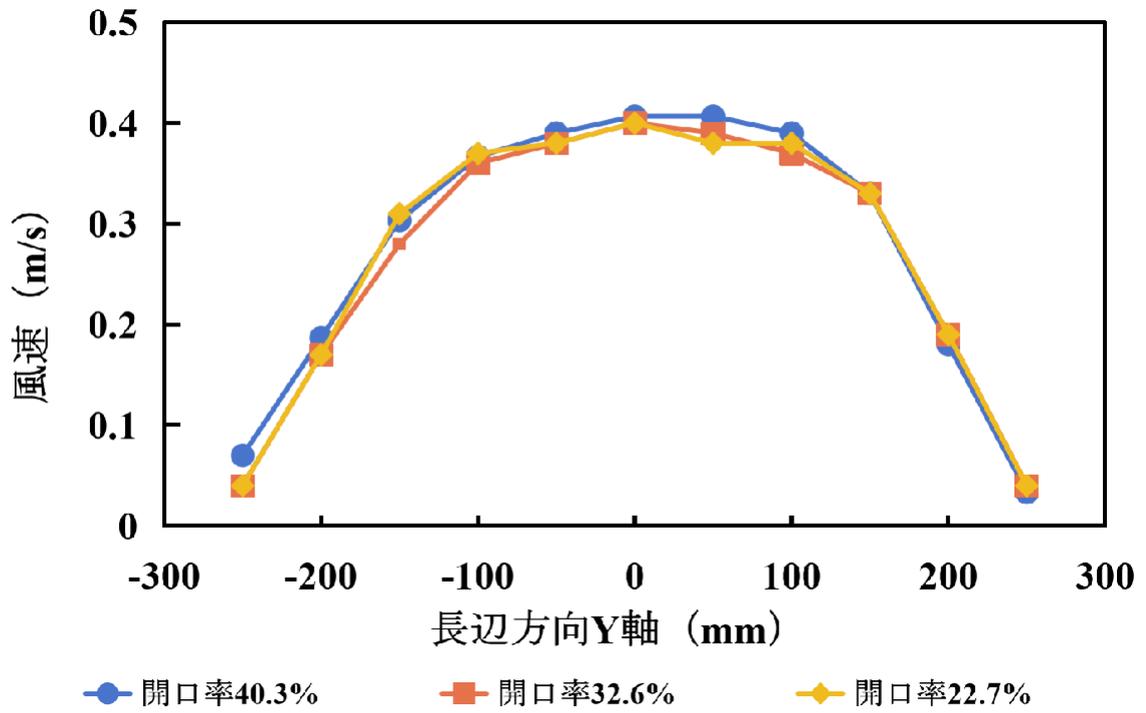


図 4.16 パンチング開口率 40.3、32.6、22.7%の X=0、Z=25(mm)の風速分布

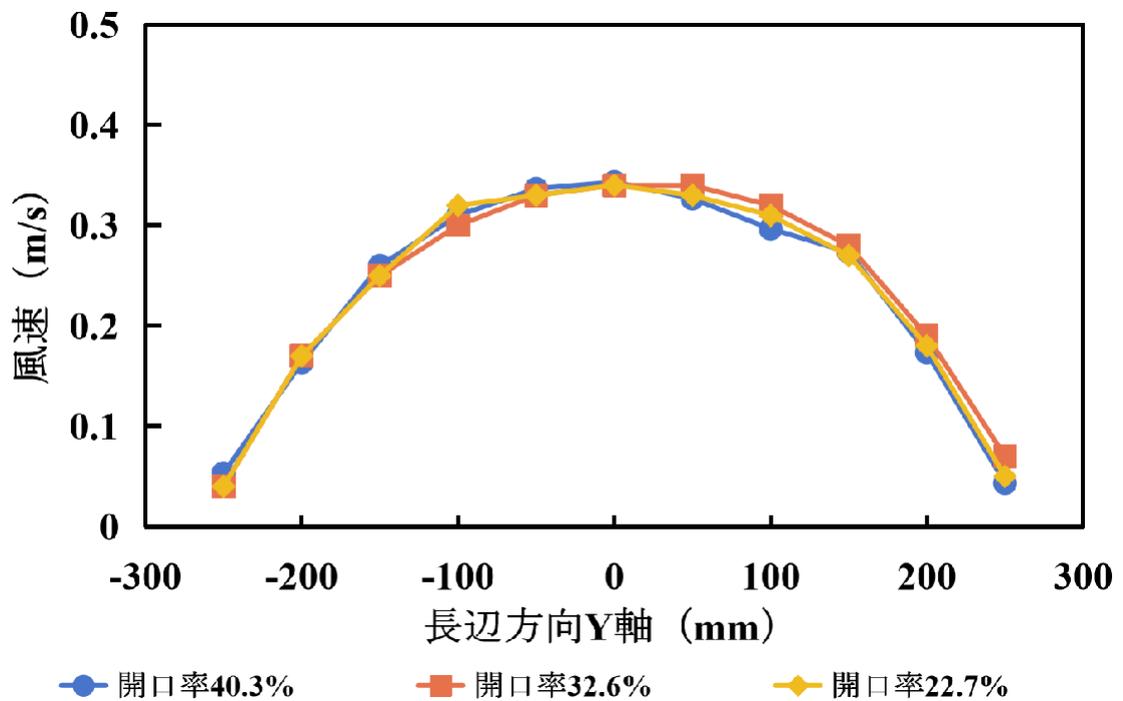


図 4.17 パンチング開口率 40.3、32.6、22.7%の X=0、Z=40(mm)の風速分布

図 4.16、4.17 から、異なる開口率のパンチングを使用した風速測定データにおいて、左右の偏り見られなかった。また、 $X=0$ 、 $Z=40(\text{mm})$ の場合、開口率が 40.3%、32.6%と 22.7%に風速の大きさはほとんど違いが見られなかった。

#### 4.3.3 考察

先行研究では、開口率が大きい場合に開口面風速の偏りが大きいという問題があった。しかし、本研究では図 4.16、4.17 より、全てのパンチングで、風速の偏りはほとんど確認できなかった。先行研究ではダクトを Z 軸に対して垂直な向きに配置していたが、本研究ではダクトを Z 軸と平行に配置している。今回の実験結果より、換気作業台の吸い込み開口面の風速分布は、パンチングよりもダクトの設置向きに強く影響を受けることが分かった。パンチングは整流効果を期待して設置したが、開口面上流側の風速分布にはあまり効果がないと考えられる。つまりパンチングは気流がそのパンチングを通過することで効果を発揮すると考えられる。

また、チャンバー効果によって気流の偏りがなくなること期待してチャンバーボックスを設けたが、先行研究のようにダクトを Z 軸に対して垂直な向きに配置すると、気流が大きく曲がるので、風速分布の偏りも大きくなり、チャンバーボックスだけでは不十分であったと考えられる。そのため、本研究のようにダクトの向きを Z 軸と平行な向きに設置したことで風速分布が大きく改善したと考えられる。

### 4.4 風速分布の測定(無指向性)

#### 4.4.1 実験目的

4.3 の風速測定では、指向性の風速計を用いたため、開口面に対して垂直方向(Z 軸方向)の風速のみが測定できていた。しかし、実際の状況では開口面に対して垂直方向以外の気流も存在するため、垂直方向の測定だけでは風速分布の考察が不十分であると考えた。そのため、無指向性の風速計を使用して、風速の測定を行なった。

#### 4.4.2 実験方法

4.3 の風速測定と同じように、開口面の中心を原点( $X$ 、 $Y$ 、 $Z=0(\text{mm})$ )に設定した。また、開口面における短辺方向を X 軸、長辺方向を Y 軸、XY 平面に垂直な高さ方向を Z 軸とし、YZ 平面の風速分布を測定した。また、測定条件についても表 4.3 と同じである。無指向性風速計を用いた風速測定の様子を図 4.18 に示す。

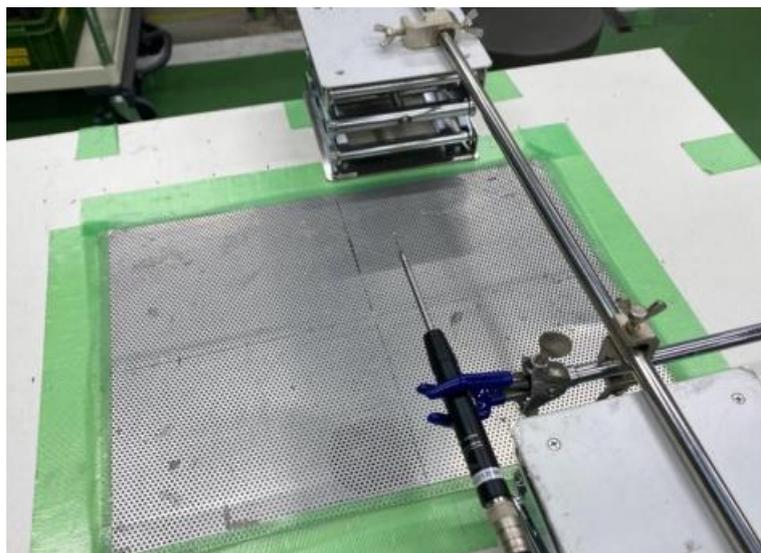


図 4.18 無指向性風速計を用いた風速測定の様子

風速分布の測定を行なったのは、4.3 と同様に、アセトンの発生源の位置(原点)を含む面である  $X=0(\text{mm})$  と、呼吸域に設定する測定点を含む面である  $X=200(\text{mm})$  の二つの  $YZ$  平面である。また、4.3 と同様の理由で、 $X=0(\text{mm})$ 、 $Y=0(\text{mm})$ 、 $Z=25(\text{mm})$  の点を捕捉点として設定した。本研究の排風量は、4.3 と同様に、有害物質として蒸発させたアセトンを十分吸引できる排風量としている  $3\text{m}^3/\text{min}$  とし、風速測定を行った。以下に風速測定の実験手順を示す。

- ① 微差圧計によって、複合ピトー管からの圧力を速度圧として計測し、排風量を求めた。
- ② 微秒差圧計からの出力電流をインバーターに入力して、設定した排風量になるようにファンを制御した。
- ③ 測定点に無指向性風速プローブを固定し、風速を測定した。

#### 4.4.3 実験結果

##### (1) 開口率 40.3% のパンチング、無指向性風速計の風速測定結果

開口率 40.3% のパンチング、無指向性風速計を用いて、 $X=0(\text{mm})$  (発生源を含む面) の  $YZ$  平面の各測定点の風速を表 4.10、風速分布を図 4.19 に示す。また、開口率 40.3% のパンチング、無指向性風速計を用いて、 $X=200(\text{mm})$  (呼吸域を含む面) の  $YZ$  平面の風速測定を行なった際の各測定点の風速を表 4.11、風速分布を図 4.20 に示す。

表 4.10 無指向性風速計を用いた開口率 40.3%のパンチング、X=0(mm)の YZ 平面風速(m/s)

		Z(mm)								
		25	40	60	80	100	150	200	250	300
Y(mm)	250	0.15	0.17	0.14	0.11	0.10	0.05	0.03	0.02	0.02
	200	0.29	0.27	0.22	0.18	0.14	0.10	0.05	0.03	0.03
	150	0.36	0.33	0.28	0.24	0.19	0.11	0.08	0.04	0.02
	100	0.38	0.35	0.30	0.26	0.21	0.14	0.09	0.04	0.03
	50	0.39	0.35	0.31	0.27	0.23	0.15	0.10	0.06	0.04
	0	0.39	0.35	0.31	0.27	0.23	0.16	0.12	0.07	0.04
	-50	0.39	0.35	0.31	0.27	0.23	0.16	0.12	0.06	0.04
	-100	0.39	0.35	0.30	0.26	0.24	0.16	0.12	0.07	0.04
	-150	0.38	0.33	0.29	0.24	0.22	0.15	0.12	0.08	0.05
	-200	0.30	0.26	0.23	0.19	0.20	0.14	0.11	0.08	0.07
	-250	0.17	0.16	0.15	0.13	0.17	0.13	0.08	0.07	0.06

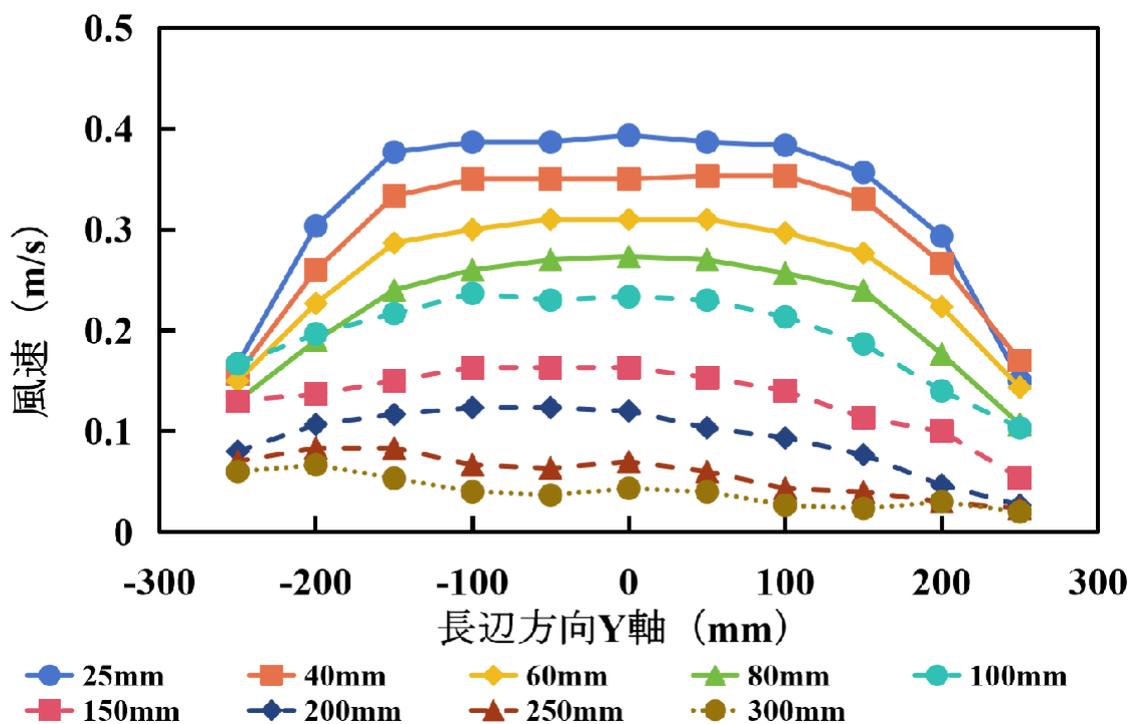


図 4.19 開口率 40.3%のパンチング、無指向性風速計、X=0(mm)の YZ 平面風速分布

表 4.11 無指向性風速計を用いた開口率 40.3%のパンチング、X=200(mm)の YZ 平面風速(m/s)

		Z(mm)						
		25	40	60	80	100	200	300
Y(mm)	250	0.03	0.07	0.07	0.07	0.05	0.03	0.01
	200	0.07	0.08	0.09	0.07	0.06	0.06	0.03
	150	0.08	0.09	0.11	0.09	0.04	0.02	0.03
	100	0.11	0.10	0.11	0.10	0.07	0.05	0.03
	0	0.17	0.15	0.12	0.13	0.07	0.04	0.03
	-100	0.13	0.12	0.13	0.12	0.08	0.05	0.04
	-150	0.11	0.11	0.12	0.11	0.08	0.06	0.03
	-200	0.08	0.09	0.08	0.09	0.07	0.06	0.04
	-250	0.05	0.08	0.07	0.07	0.10	0.07	0.07

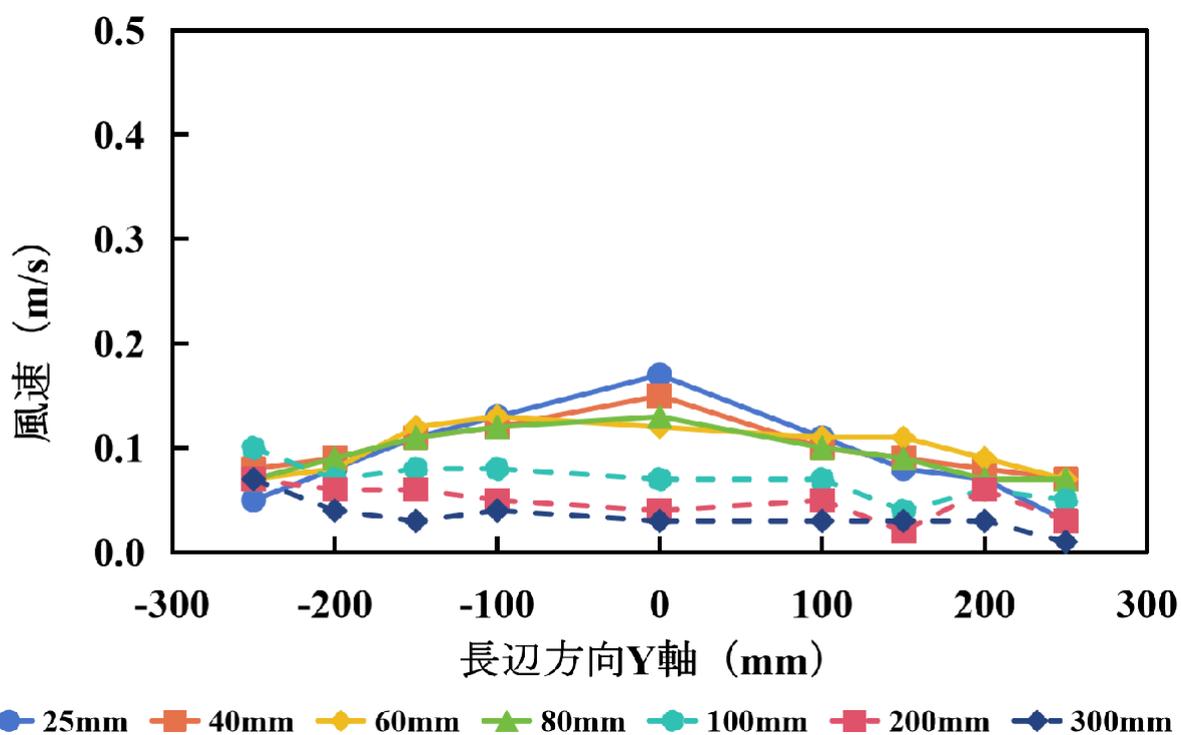


図 4.20 開口率 40.3%のパンチング、無指向性風速計、X=200(mm)の YZ 平面風速分布

表 4.10、表 4.11 から、設定した捕捉点において、下方吸引型外付け式フードの制御風速 0.5 m/s を下回っていた。また、図 4.19、図 4.20 からは、 $X=0(\text{mm})$ (発生源を含む面)および  $X=200(\text{mm})$ (呼吸域を含む面)の二つの面において、開口面から遠ざかるにつれて風速が減少する傾向となった。全体の風速について、図 4.19 と図 4.20 から  $X=0(\text{mm})$ と  $X=200(\text{mm})$ の二つの面を比較すると、 $X=200(\text{mm})$ の面の風速が全体的に低くなっていた。図 4.19 と図 4.20 から、 $X=0(\text{mm})$ の場合では、指向性風速計と無指向性風速計の測定結果を比較すると、無指向性風速計の方が全体的に高い風速を示した。特に、 $Y=-150、-100、100、150(\text{mm})$ の開口面の端付近では、無指向性風速計と指向性風速計の差が大きくなった。 $X=200(\text{mm})$ (呼吸域を含む面)について指向性風速計の結果と無指向性風速計の結果を比較すると、無指向性風速計で測定した風速は、指向性で測定した風速よりも全体的に少し高くなっていた。風速分布の偏りに関しては、 $X=0(\text{mm})$ (発生源を含む面)、 $X=200(\text{mm})$ (呼吸域を含む面)のどちらの面においても、大きな偏りは見られなかった。

(2)開口率 32.6%のパンチング、無指向性風速計の風速測定結果

表 4.12 無指向性風速計を用いた開口率 32.6%のパンチング、 $X=0(\text{mm})$ の YZ 平面風速(m/s)

		Z(mm)								
		25	40	60	80	100	150	200	250	300
Y(mm)	250	0.16	0.15	0.14	0.12	0.10	0.06	0.03	0.03	0.01
	200	0.31	0.27	0.22	0.19	0.15	0.09	0.05	0.03	0.02
	150	0.37	0.33	0.27	0.22	0.19	0.13	0.08	0.03	0.01
	100	0.38	0.35	0.30	0.26	0.23	0.15	0.08	0.04	0.02
	50	0.39	0.35	0.31	0.28	0.25	0.16	0.10	0.04	0.02
	0	0.39	0.36	0.31	0.28	0.24	0.17	0.12	0.06	0.03
	-50	0.39	0.36	0.31	0.28	0.24	0.17	0.10	0.05	0.02
	-100	0.39	0.35	0.31	0.27	0.24	0.17	0.10	0.04	0.03
	-150	0.37	0.34	0.27	0.24	0.21	0.15	0.09	0.04	0.03
	-200	0.33	0.29	0.24	0.20	0.16	0.11	0.08	0.05	0.03
-250	0.18	0.18	0.16	0.14	0.12	0.08	0.06	0.05	0.03	

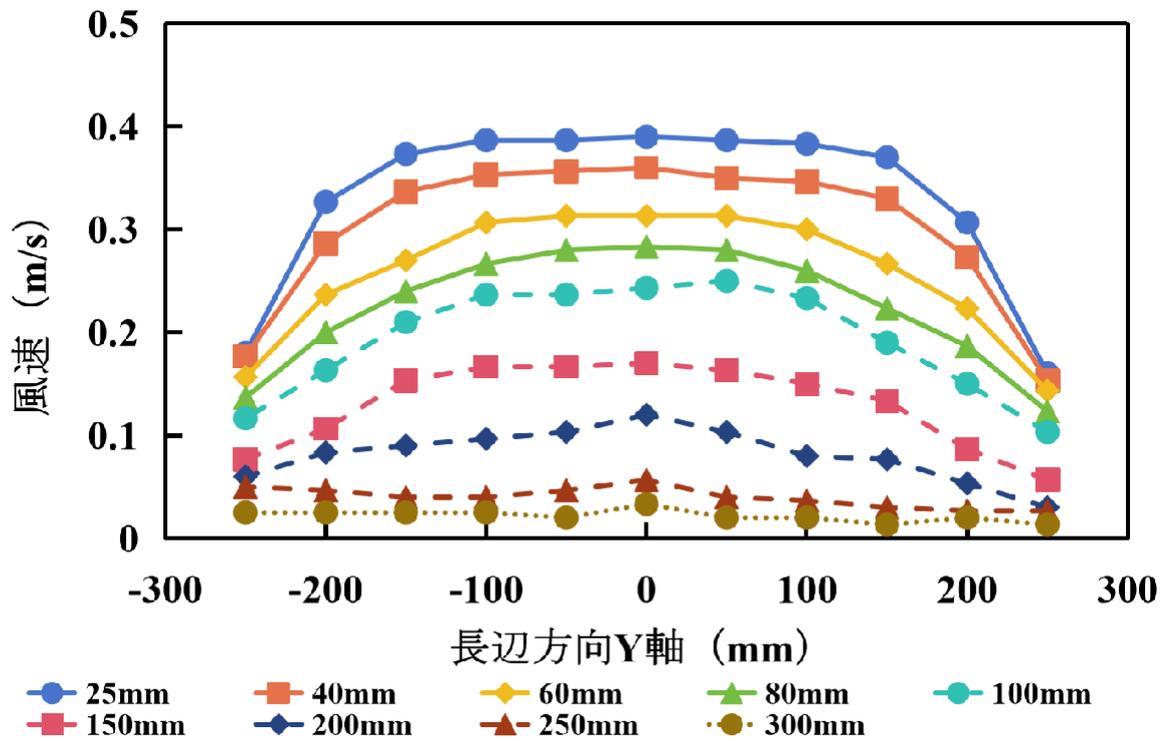


図 4.21 開口率 32.6%のパンチング、無指向性風速計、X=0(mm)の YZ 平面風速分布

表 4.13 無指向性風速計を用いた開口率 32.6%のパンチング、X=200(mm)の YZ 平面風速(m/s)

		Z(mm)							
		25	40	60	80	100	200	300	
Y(mm)	250	0.05	0.02	0.05	0.03	0.02	0.03	0.02	
	200	0.06	0.06	0.05	0.06	0.02	0.04	0.01	
	150	0.11	0.07	0.08	0.07	0.06	0.04	0.01	
	100	0.14	0.10	0.11	0.09	0.08	0.04	0.01	
	0	0.15	0.10	0.11	0.08	0.11	0.04	0.00	
	-100	0.12	0.10	0.11	0.11	0.12	0.04	0.01	
	-150	0.11	0.10	0.10	0.09	0.09	0.02	0.01	
	-200	0.09	0.11	0.11	0.10	0.09	0.03	0.02	
	-250	0.05	0.09	0.10	0.10	0.06	0.01	0.02	

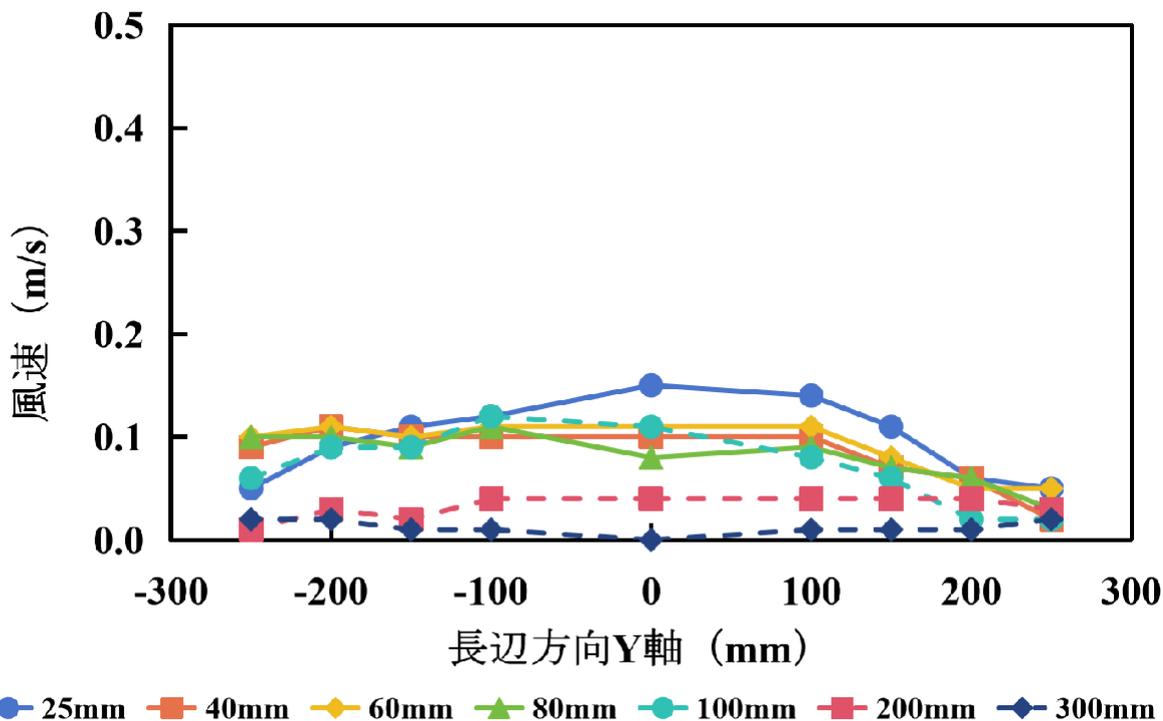


図 4.22 開口率 32.6%のパンチング、無指向性風速計、X=200(mm)の YZ 平面風速分布

開口率 32.6%のパンチング、無指向性風速計を用いて、X=0(mm)(発生源を含む面)の YZ 平面の風速測定を行なった際の各測定点の風速を表 4.12、風速分布のグラフを図 4.21 に示す。また、開口率 32.6%のパンチング、無指向性風速計を用いて、X=200(mm)(呼吸域を含む面)の YZ 平面の風速測定を行なった際の各測定点の風速を表 4.13、風速分布を図 4.22 に示す。

表 4.12、表 4.13 から、設定した捕捉点において、下方吸引型フードの制御風速 0.5 m/s を下回っていた。図 4.21、図 4.22 からは、X=0(mm)(発生源を含む面)および X=200(mm)(呼吸域を含む面)の 2 つの面において、開口面から遠ざかるにつれて風速が減少する傾向があると言える。

全体の風速について、図 4.21 と図 4.22 から X=0(mm)と X=200(mm)の二つの面を比較すると、X=200(mm)の面の風速が全体的に低くなった。

また、図 4.12 と図 4.21 より、から、X=0(mm)の場合では、指向性風速計と無指向性風速計の測定結果を比較すると、無指向性風速計の方が全体的に高い風速を示した。特に、Y=-150、-100、100、150(mm)の開口面の端付近では、無指向性風速計で測定し

た風速と指向性風速計で測定した風速の差がかなり大きくなった。

図 4.13 と図 4.22 から、 $X=200(\text{mm})$ の場合では、無指向性風速計で測定した風速が指向性風速計よりもわずかに高くなった。

風速分布の偏りに関しては、 $X=0(\text{mm})$ (発生源を含む面)および  $X=200(\text{mm})$ (呼吸域を含む面)のどちらの面においても大きな偏りは見られなかった。

#### 4.4.4 先行研究、指向性、無指向性での風速分布比較

先行研究では指向性の風速計を使用して風速測定を行っていた。本研究では指向性と無指向性の2種類の風速計を用いて風速測定を行なったので、各測定点における風速分布を比較する。各測定点における、先行研究、指向性風速計、無指向性風速計での風速分布を比較したもの以下に示す。パンチング開口率 40.3%、 $X=0(\text{mm})$ の時を図 4.23～図 4.29、パンチング開口率 40.3%、 $X=200(\text{mm})$ の時を図 4.30、図 4.31、パンチング開口率 32.6%、 $X=0(\text{mm})$ の時を図 4.32～図 4.38、パンチング開口率 32.6%、 $X=200(\text{mm})$ の時を図 4.33、図 4.34 に示す。

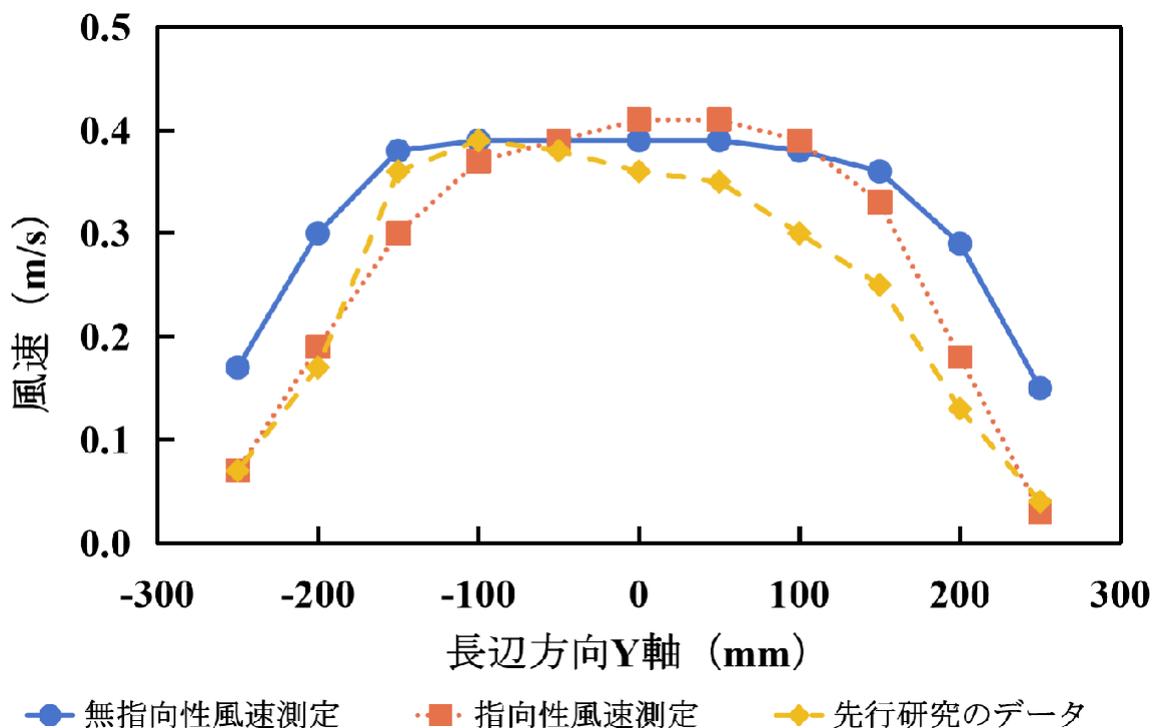
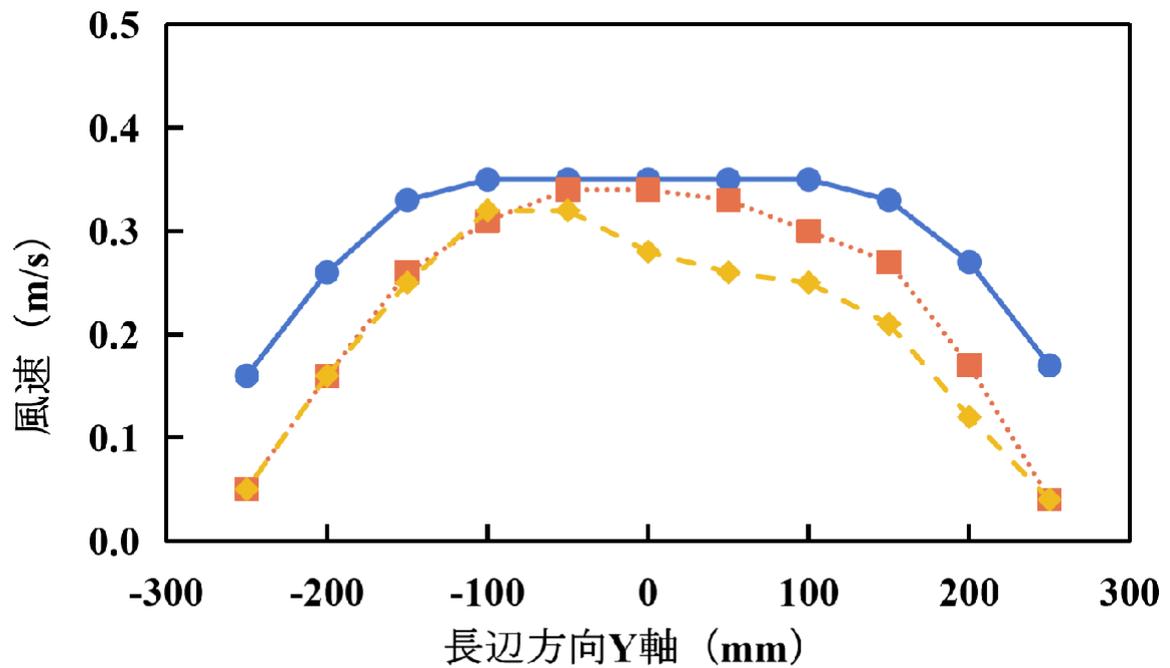
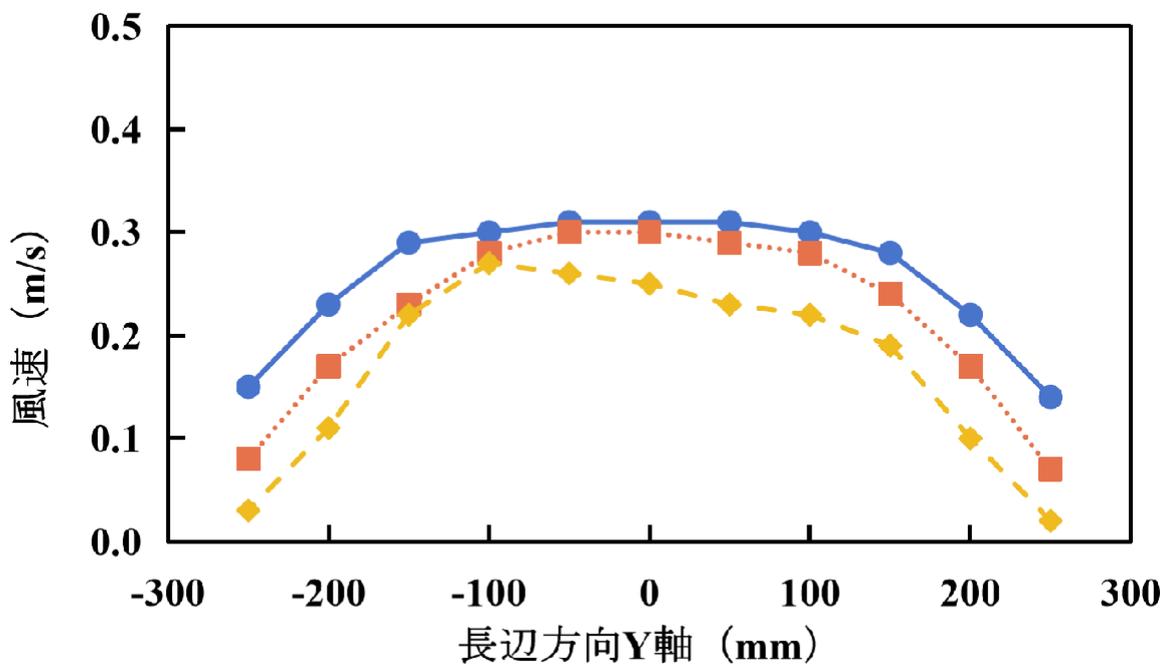


図 4.23 開口率 40.3%のパンチング、 $X=0(\text{mm})$ 、 $Z=25(\text{mm})$ での風速分布の比較



● 無指向性風速測定    ■ 指向性風速測定    ◆ 先行研究のデータ

図 4.24 開口率 40.3%のパンチング、X=0(mm)、Z=40(mm)での風速分布の比較



● 無指向性風速測定    ■ 指向性風速測定    ◆ 先行研究のデータ

図 4.25 開口率 40.3%のパンチング、X=0(mm)、Z=60(mm)での風速分布の比較

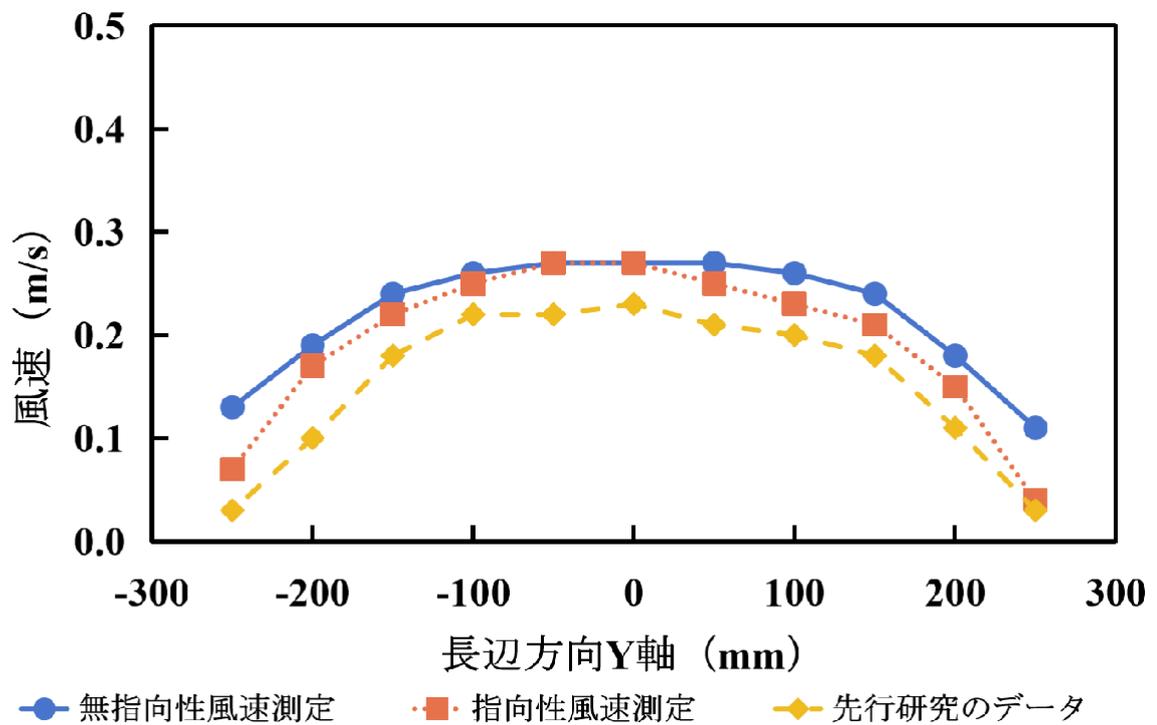


図 4.26 開口率 40.3%のパンチング、X=0(mm)、Z=80(mm)での風速分布の比較

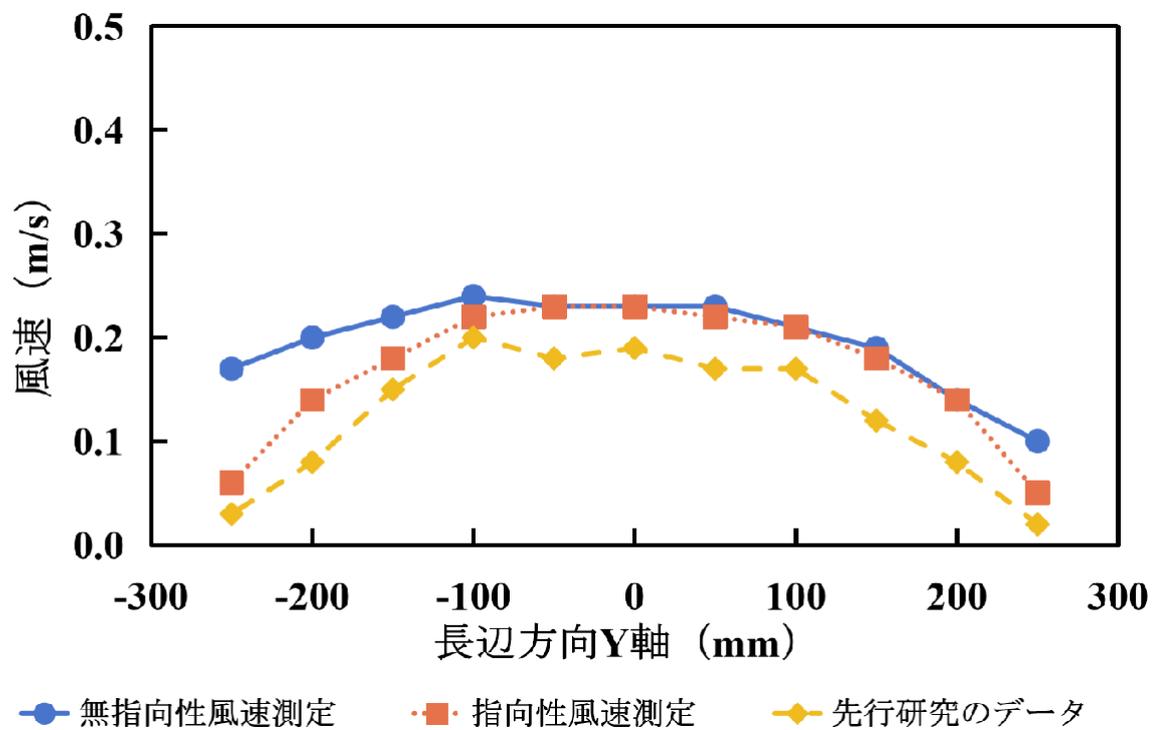


図 4.27 開口率 40.3%のパンチング、X=0(mm)、Z=100(mm)での風速分布の比較

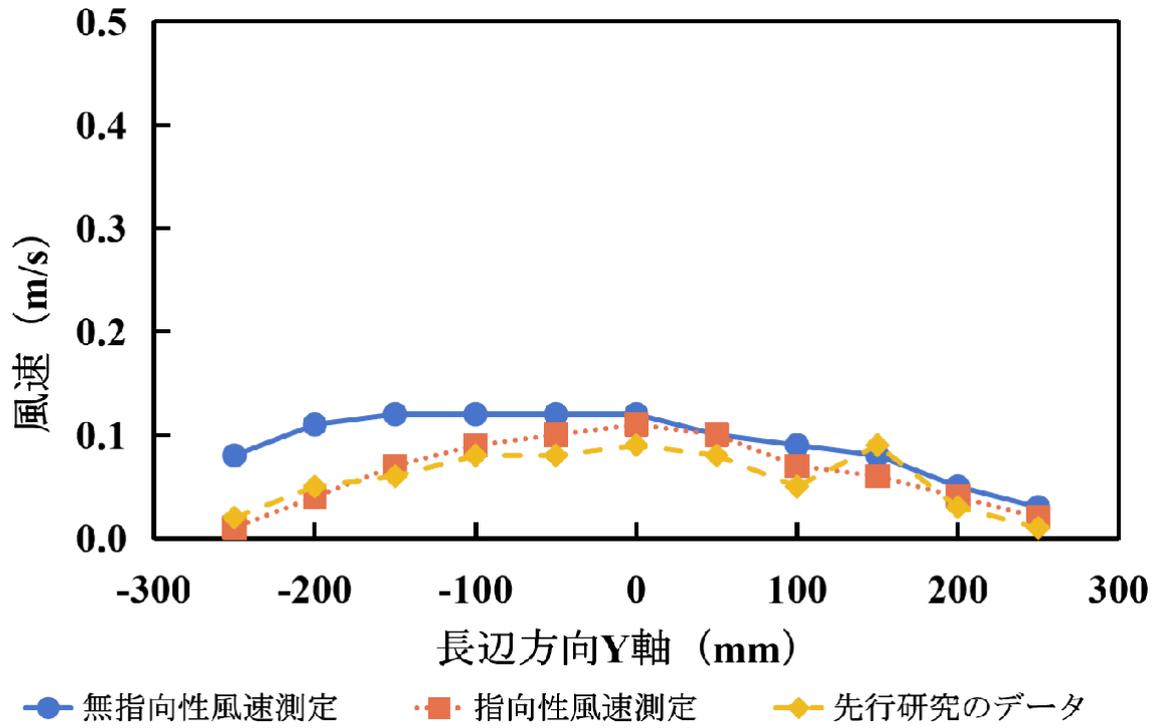


図 4.28 開口率 40.3%のパンチング、X=0(mm)、Z=200(mm)での風速分布の比較

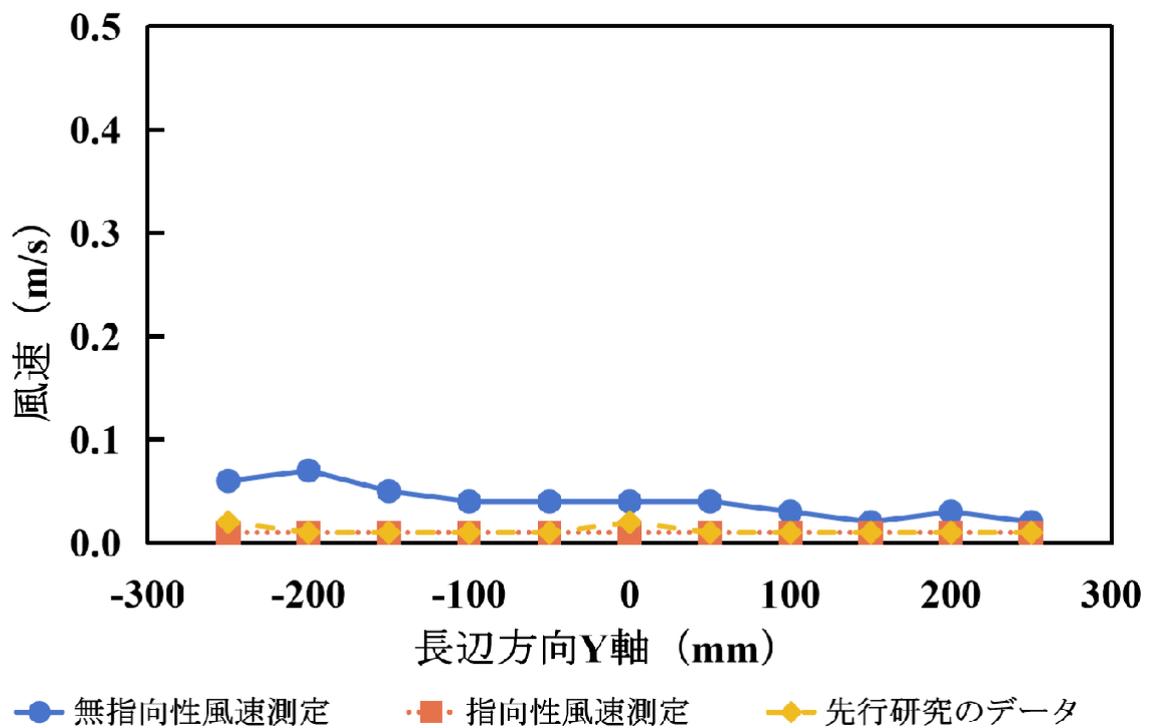


図 4.29 開口率 40.3%のパンチング、X=0(mm)、Z=300(mm)での風速分布の比較

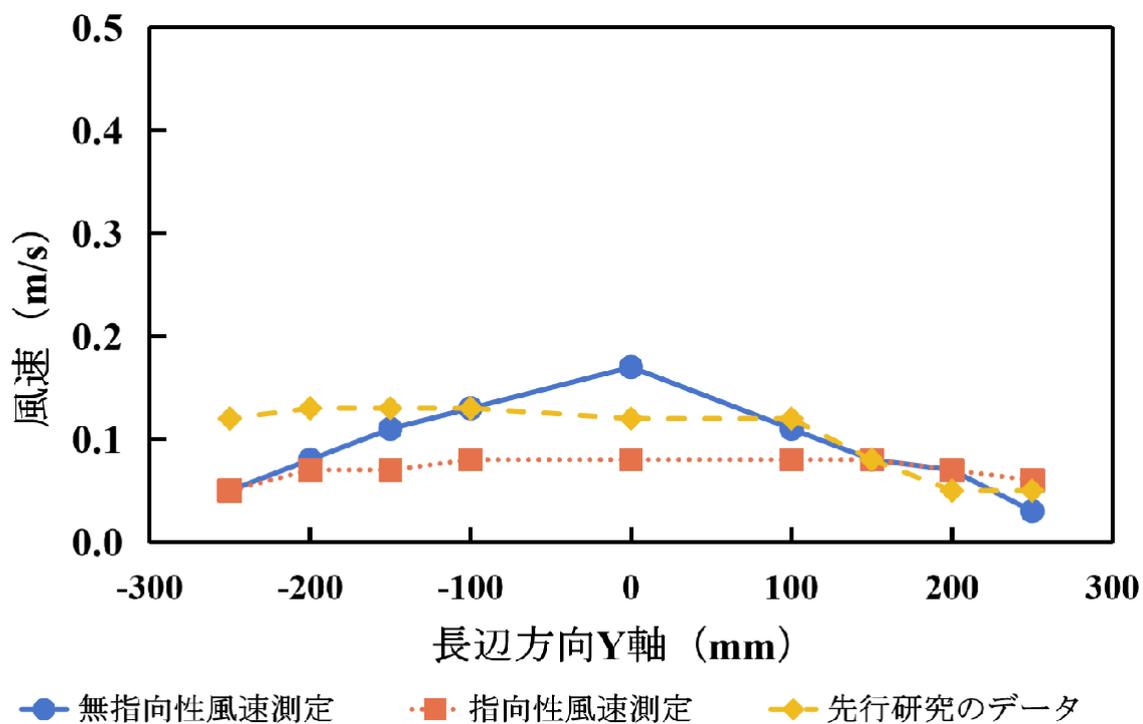
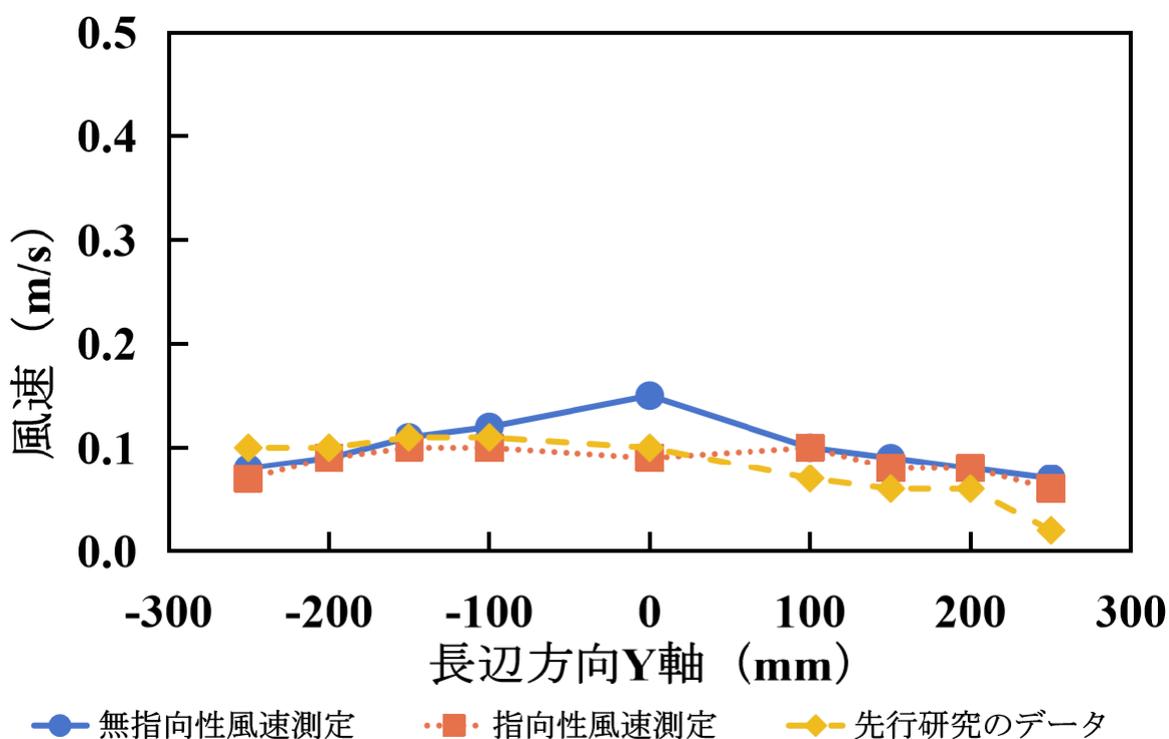
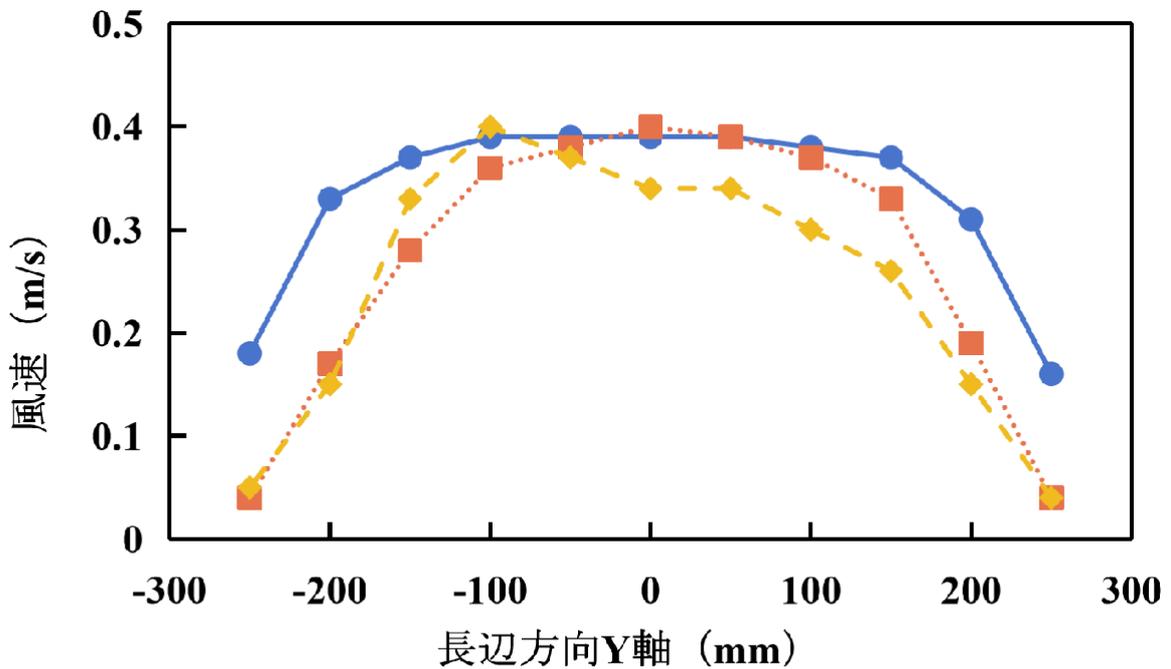


図 4.30 開口率 40.3%のパンチング、X=200(mm)、Z=25(mm)での風速分布の比較図

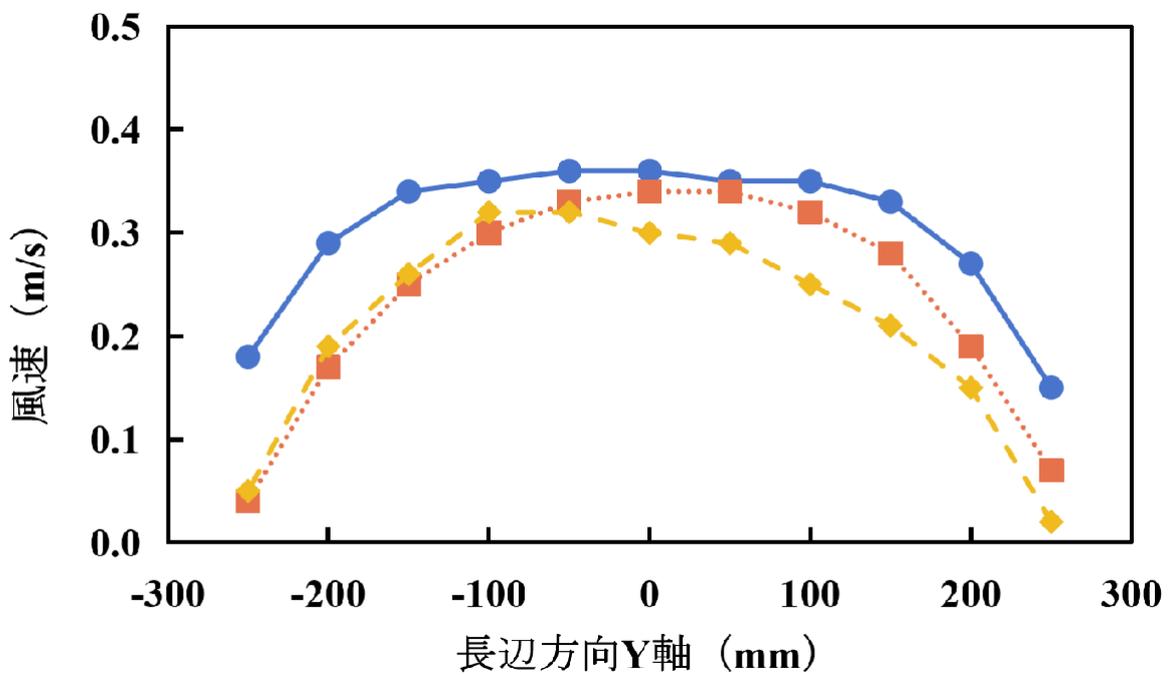


4.31 開口率 40.3%のパンチング、X=200(mm)、Z=40(mm)での風速分布の比較



● 無指向性風速測定    ■ 指向性風速測定    ◆ 先行研究のデータ

図 4.32 開口率 32.6%のパンチング、X=0(mm)、Z=25(mm)での風速分布の比較



● 無指向性風速測定    ■ 指向性風速測定    ◆ 先行研究のデータ

図 4.33 開口率 32.6%のパンチング、X=0(mm)、Z=40(mm)での風速分布の比較

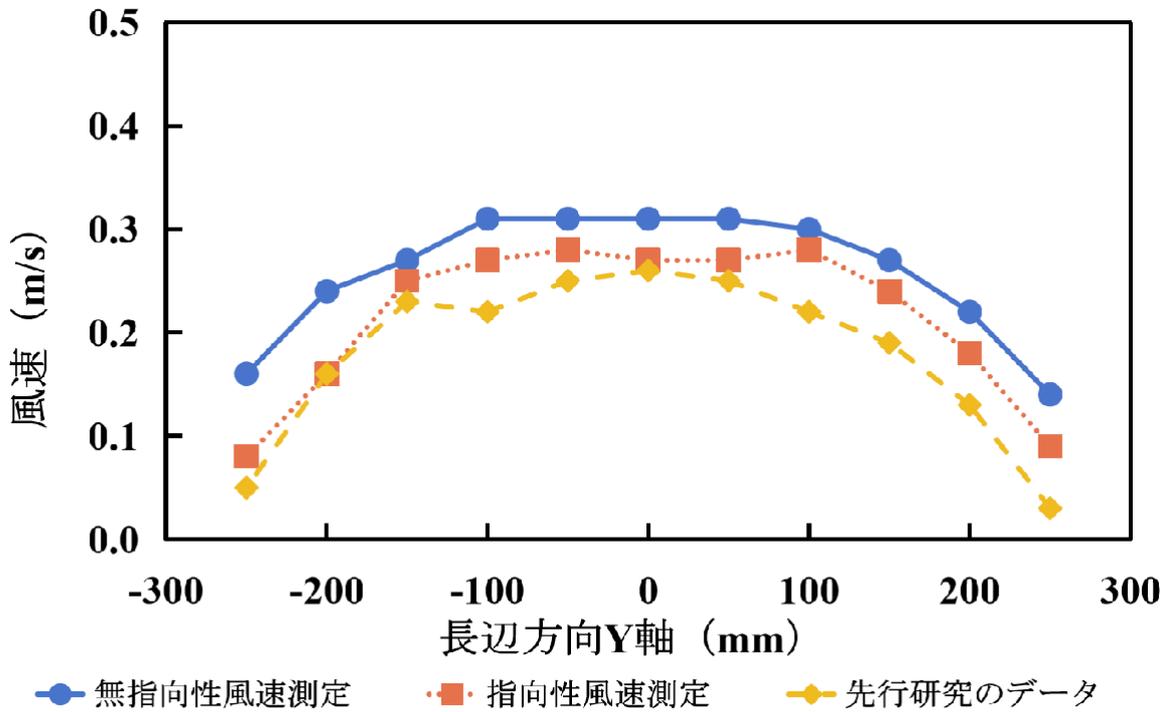


図 4.34 開口率 32.6%のパンチング、X=0(mm)、Z=60(mm)での風速分布の比較

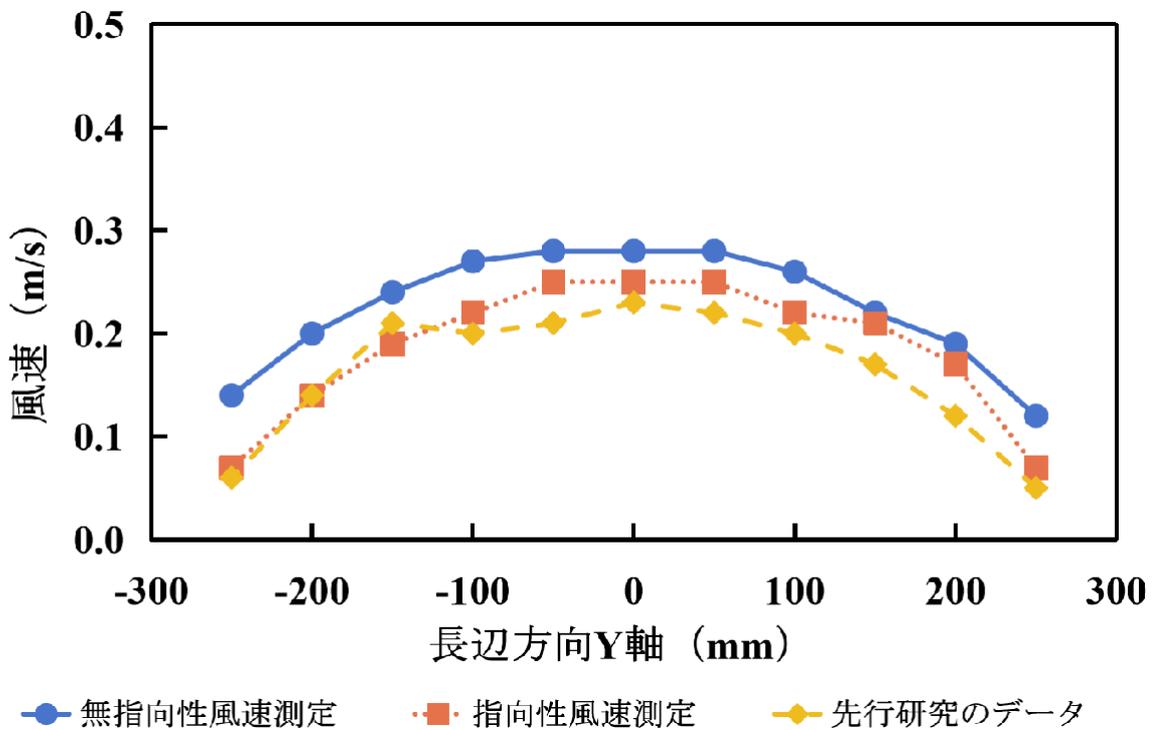
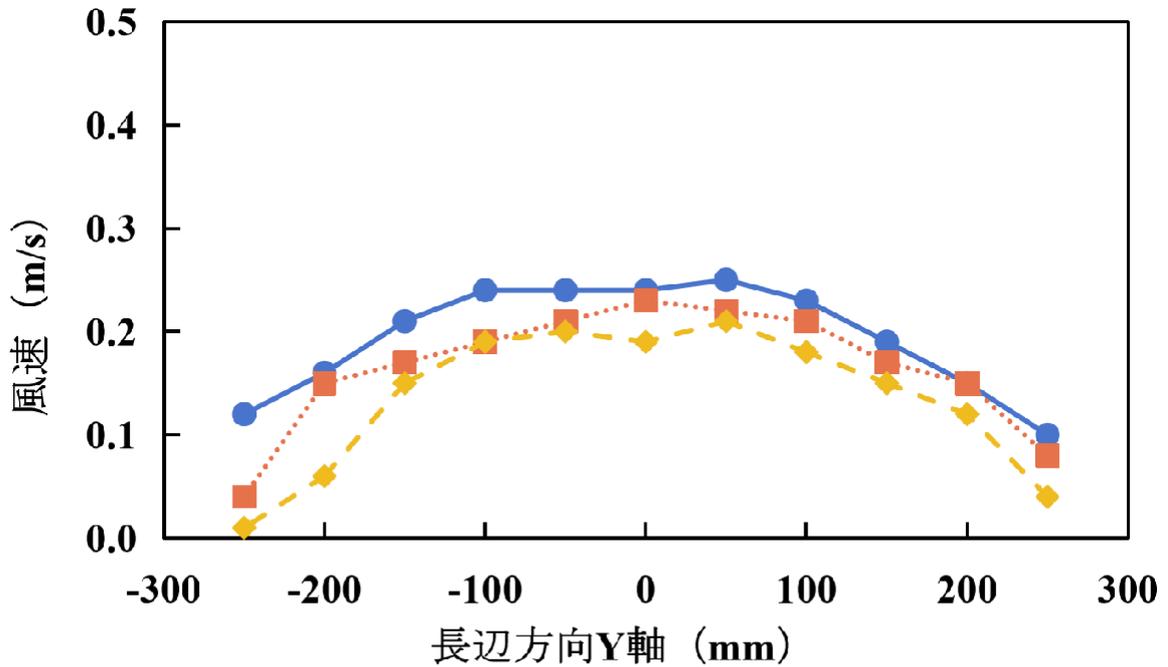
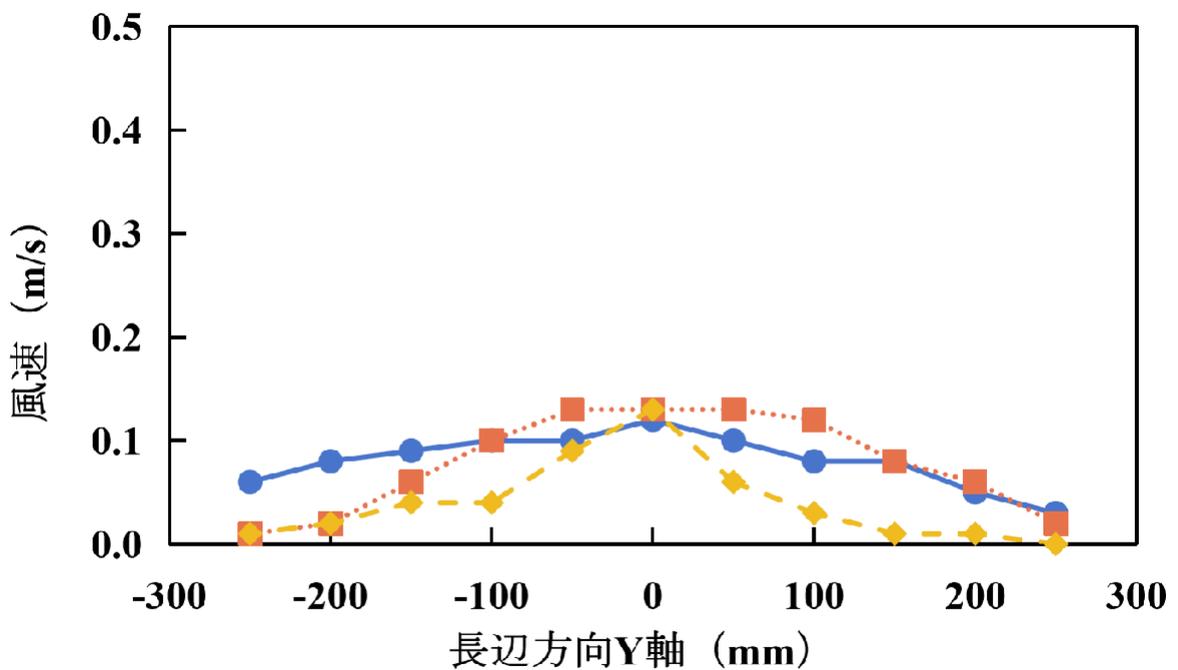


図 4.35 開口率 32.6%のパンチング、X=0(mm)、Z=80(mm)での風速分布の比較



● 無指向性風速測定    ■ 指向性風速測定    ◆ 先行研究のデータ

図 4.36 開口率 32.6%のパンチング、X=0(mm)、Z=100(mm)での風速分布の比較



● 無指向性風速測定    ■ 指向性風速測定    ◆ 先行研究のデータ

図 4.37 開口率 32.6%のパンチング、X=0(mm)、Z=200(mm)での風速分布の比較

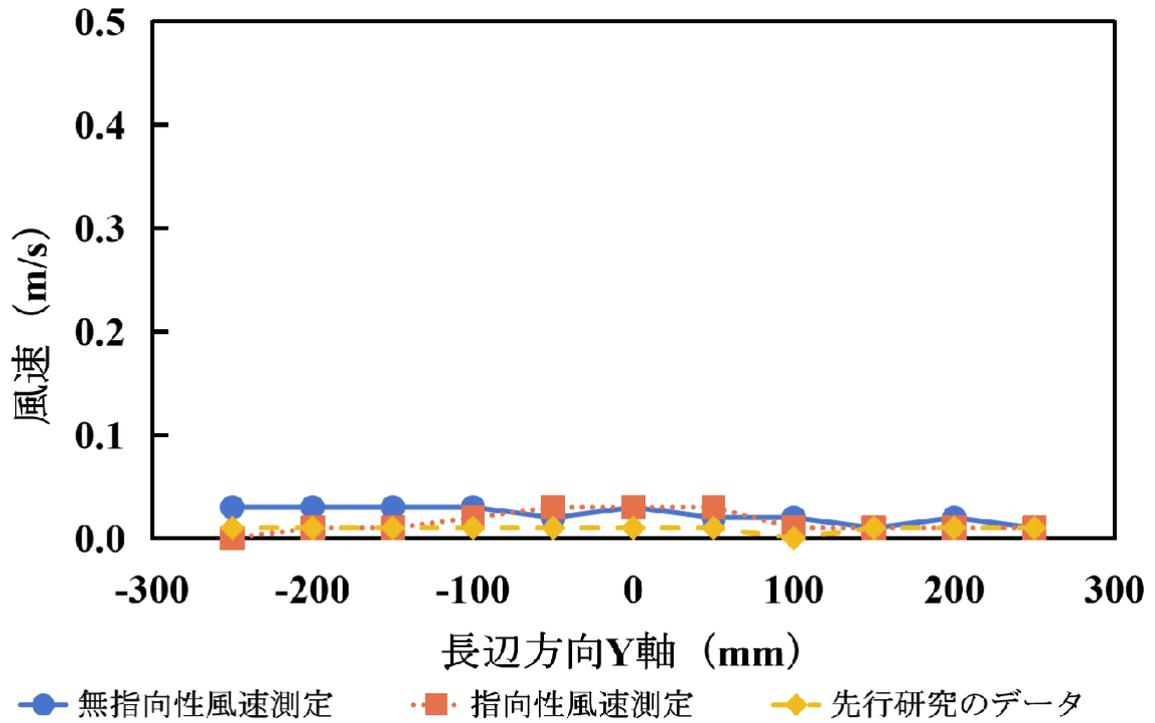


図 4.38 開口率 32.6%のパンチング、X=0(mm)、Z=300(mm)での風速分布の比較

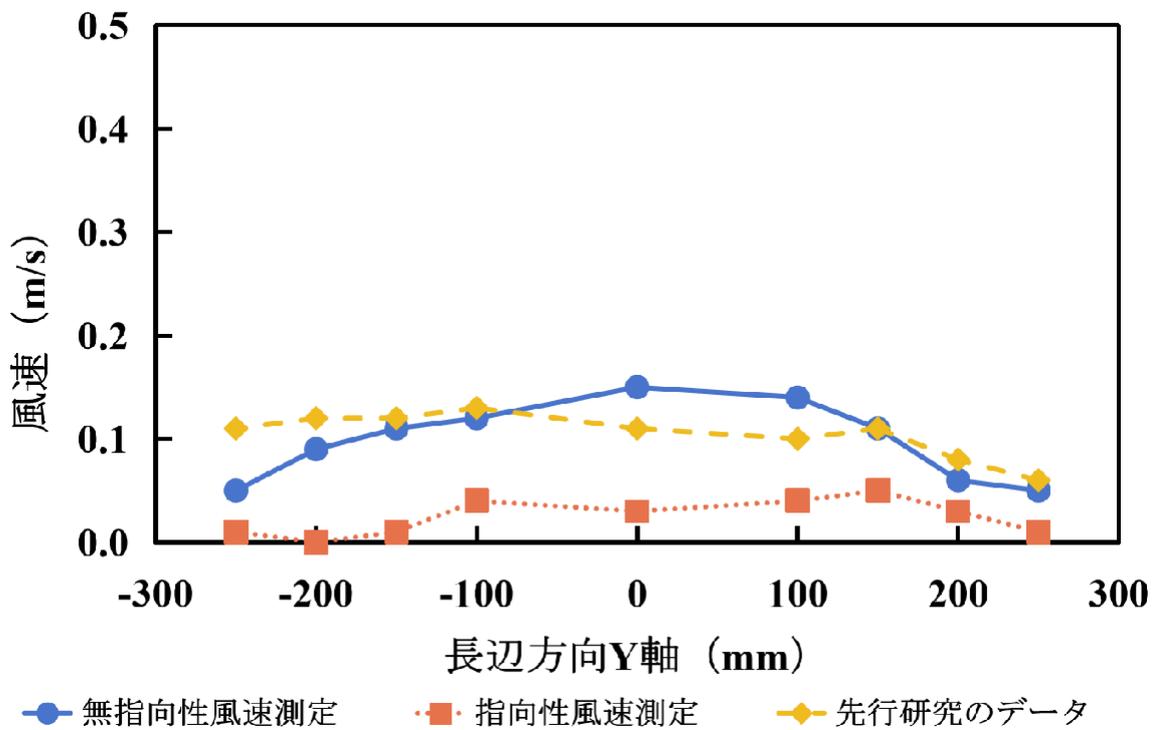


図 4.39 開口率 32.6%のパンチング、X=200(mm)、Z=25(mm)での風速分布の比較

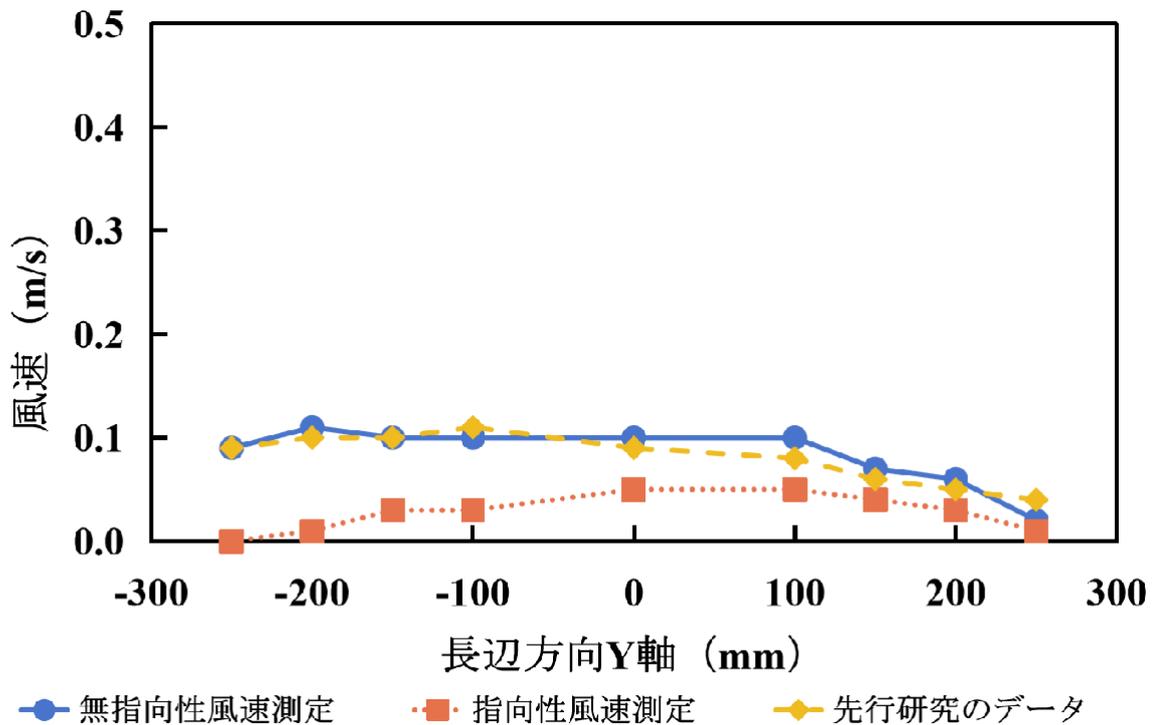


図 4.40 開口率 32.6%のパンチング、X=200(mm)、Z=40(mm)での風速分布の比較

図 4.23～図 4.29、図 4.32～図 4.38 より、X=0(mm)(発生源を含む面)において、先行研究では風速分布が Y 軸マイナス方向に偏っていたのに対し、本研究の測定結果では左右の偏りが見られなかった。また、指向性風速計と無指向性風速計による測定結果を比較すると、開口面の端付近である Y=-250、-200、-150、150、200、250(mm)においては、無指向性風速計による測定結果の方が指向性風速計による測定結果よりも風速が大きくなった。

図 4.30、図 4.31、図 4.39、図 4.40 より、X=200(mm)(呼吸域を含む面)において、Y 軸マイナス方向では先行研究のデータの方が本研究の測定結果よりも風速が大きくなった。また、指向性風速計と無指向性風速計による測定結果を比較すると、X=0(mm)(発生源を含む面)の結果ほど顕著ではないが、無指向性風速計による測定結果の方が指向性風速計による測定結果よりも全体的に風速が大きくなった。

#### 4.4.5 考察

X=0(mm)(発生源を含む面)および X=200(mm)(呼吸域を含む面)において、先行研究と指向性・無指向性風速計による測定結果の風速分布の違いを比較すると、無指向性

風速計による風速測定結果の方が指向性風速計による風速測定結果よりも全体的に風速が大きくなっていることがわかった。特に開口面の端付近では、無指向性風速計の測定結果が指向性風速計よりも大きな風速を示していた。つまり、開口面中心付近では、主として垂直方向の吸引気流が発生しているが、開口面の端付近では垂直方向以外の吸引気流が発生していると考えられる。吸い込みフードの場合、フード後方からも吸い込むので、特にフランジを付けた場合、開口面の端付近では、開口面に対して水平な方向に気流が強くと発生していると考えられる。

また、先行研究のデータと本実験の指向性風速計による測定結果を比較すると、先行研究の風速分布が Y 軸マイナス方向に偏っていたのに対し、指向性風速計による測定結果では風速分布に左右の偏りは見られなかった。先行研究ではダクトを Y 軸と平行に配置し、チャンバーボックスの側面に設置していた。これが先行研究の風速分布が Y 軸マイナス方向に偏っていた原因と考えられる。その結果、開口面とダクトの近くでは風速が大きくなる傾向があった。一方、本研究で作製した換気作業台では、開口面上の中心付近にダクトを設置し、ダクトの向きを Z 軸と平行に配置したことにより、風速の偏りが少なくなった。今回の実験結果より、開口面の中心線(Z 軸)における風速が開口面上の各高さにおける最大風速となることが分かった。つまり、開口面上の中心付近、ダクトの向きを Z 軸と平行に配置することで、ダクトからの吸引風速が中心に集中し、開口面の中心線(Z 軸)において風速が最大になった。この配置により、開口面の風速が均一になるため、風速の偏りが小さくなると考えられる。

無指向性風速計を用いた各開口率パンチングの YZ 平面風速から、開口率 40.3%のパンチングが風速の偏りが少ない。したがって、本研究で用いたパンチングの中では、開口率 40.3%のパンチングが最も効果的なパンチングと考えられる。また、無指向性風速計が換気作業台において風速を正確に測定するのに有効であり、ダクトの設置位置と向きは風速分布の均一性に影響を与えらる。

## 4.5 換気作業台の捕集率の測定

### 4.5.1 実験目的

実際の有機溶剤を扱う現場を想定し、換気作業台の排風量と発生源位置の高さを変化させた場合のアセトンの捕集率を測定する。捕集率を測定することにより、本研究で作製した換気作業台がどれくらいの排風量で効果を発揮できるかを知ることができる。本研究では 4.4 の結果から、開口率 40.3%のパンチングを使用することとした。

#### 4.5.2 実験方法

実際の現場を想定して発生源の設置位置の高さを 3、5、7、9(cm)に設定し、それぞれの高さにおける排風量を変化させた場合のアセトンの捕集率を測定した。

風速測定と同じようにフード上部の開口面の中心を原点(X、Y、Z=0(mm))に設定する。そして、高さ方向(Z軸)にアセトンの発生位置を設定した。また、設定した高さにおける制御風速を満たすための必要排風量をフランジ付き長方形型外付け式フードに対する式(4-2)から算出した。ここで、Q は必要排風量(m<sup>3</sup>/min)、V<sub>C</sub> は制御風速(m/s)、X は開口面からの距離(m)、A はフード開口面面積(m<sup>2</sup>)である。

$$Q = 60 \times 0.75 \times V_C \times (10X^2 + A) \quad (4-2)$$

式(4-2)より、高さが 3 cm、5 cm、7 cm、9cm の場合、必要排風量はそれぞれ 2.9、3.3、3.8、4.5(m<sup>3</sup>/min)である。それぞれの必要排風量よりも小さい排風量と大きい排風量について捕集率の測定を行なった。

実際のネイルサロンの現場調査より、ネイリング作業で使う溶剤の入った容器のサイズを参考に、直径 3cm のシャーレから溶剤が蒸発すると仮定した。しかしながら、発生源としてのアセトンガスを全方向に均一に発散させるため、実際の実験では直径 3cm のバブリングフィルターを用いることとした。そこでシャーレからの 1 分間あたりの蒸発量と同じになるようにポンプの流量を求める必要がある。アセトンの発生量は 5.0 mg/min/cm<sup>2</sup> であり、表面積に比例する。そのため直径 3cm のシャーレを用いてアセトンを蒸発させる時の発生量は以下の式(4-3)のように算出できる<sup>6)</sup>。

$$5.0(\text{mg}/\text{min}/\text{cm}^2) \times (1.5(\text{cm}))^2 \times 3.14 \div 1000 = 0.035325(\text{g}/\text{min}) \quad (4-3)$$

したがって、式(4-3)より、1 分間あたり 0.0353g アセトンが蒸発していることになる。また、気体のモル体積は 24.45(L/mol)(25°C)、アセトンのモル質量は 58.08(g/mol)、アセトンの管理濃度が 500 ppm であるので、本研究は管理濃度の 10 倍の 5000 ppm のアセトンガスを発生源として発生させた。以上の数値を用いて、1 分間あたりの蒸発量と同じになるようなポンプの流量を算出したものが以下の式(4-4)である。

$$24.45(\text{L/mol}) \times \frac{0.0353(\text{g/min})}{58.08(\text{g/mol}) \times \frac{5000}{1000000}} = 2.97205 \dots (\text{L/min}) \quad (4-4)$$

そして、直径 3cm のシャーレからの 1 分間あたりの蒸発量と同じになるようなポンプの流量は 2.97 L/min となる。また、10L のテトラバックに 5000ppm のアセトンガスを作成するため、液体のアセトン注入量は式(4-5)で求めた。

$$\frac{10(\text{L})}{24.45(\text{L/mol})} \times 5000(\text{ppm}) = \frac{58.08(\text{g/mol})}{784(\text{g/mol})} \times 10^{-7} = 1.51\text{mL} \quad (4-5)$$

はじめに、発生源をチャンバーボックスの中央に設置し、発生したアセトンガスがすべて吸引されるようにし、捕集率が 100 %になるダクト内濃度を求めた。次に、他の設定した発生位置での各排風量におけるダクト内濃度を測定し、捕集率を求めた。ただし、アセトンガスが十分均一になるようにダクト内の測定点はチャンバーボックスとダクトの接続部から下流側 2m 離れた位置とした。捕集率測定実験の測定条件を表 4.14、アセトンの発生位置を示した図を図 4.41、実際の発生源の様子を図 4.42 に示す。

表 4.14 捕集率測定実験の測定条件

フードの開口面 サイズ(mm)	アセトンガス 濃度(ppm)	発生源の 設置位置 (cm)	排風量 (m <sup>3</sup> /min)
400 × 300	5000	3	1.0、2.0、2.9*、3.0、4.0
		5	1.0、2.0、3.0、3.3*、4.0、5.0
		7	1.0、2.0、3.0、3.8*、4.0、5.0
		9	3.0、4.0、4.5*、5.0、6.0

\*式(4-1)より求めた各高さにおける必要排風量

- 原点
- アセトンガス発生点
- ⊗ チャンバーボックスの中央

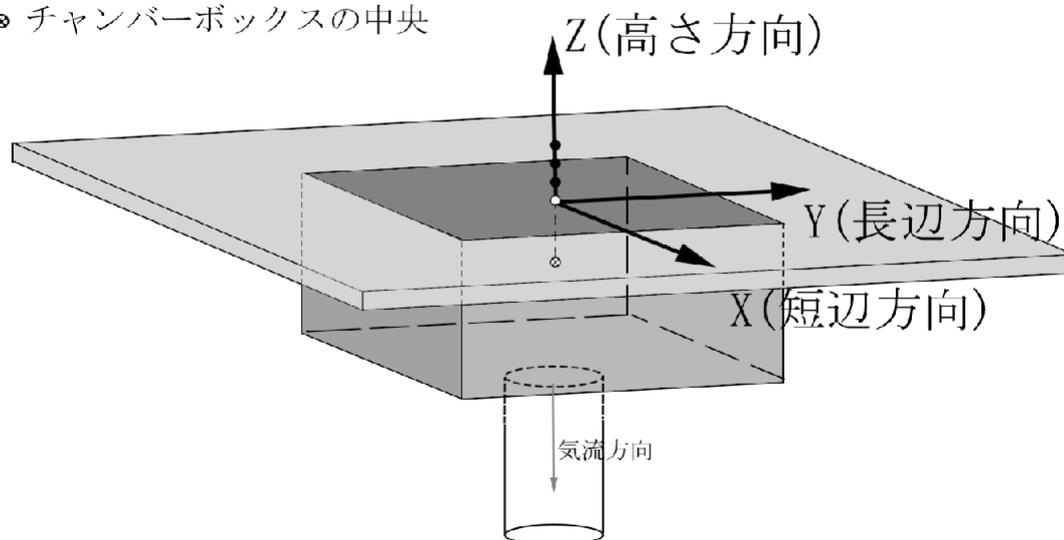


図 4.41 アセトンの発生位置

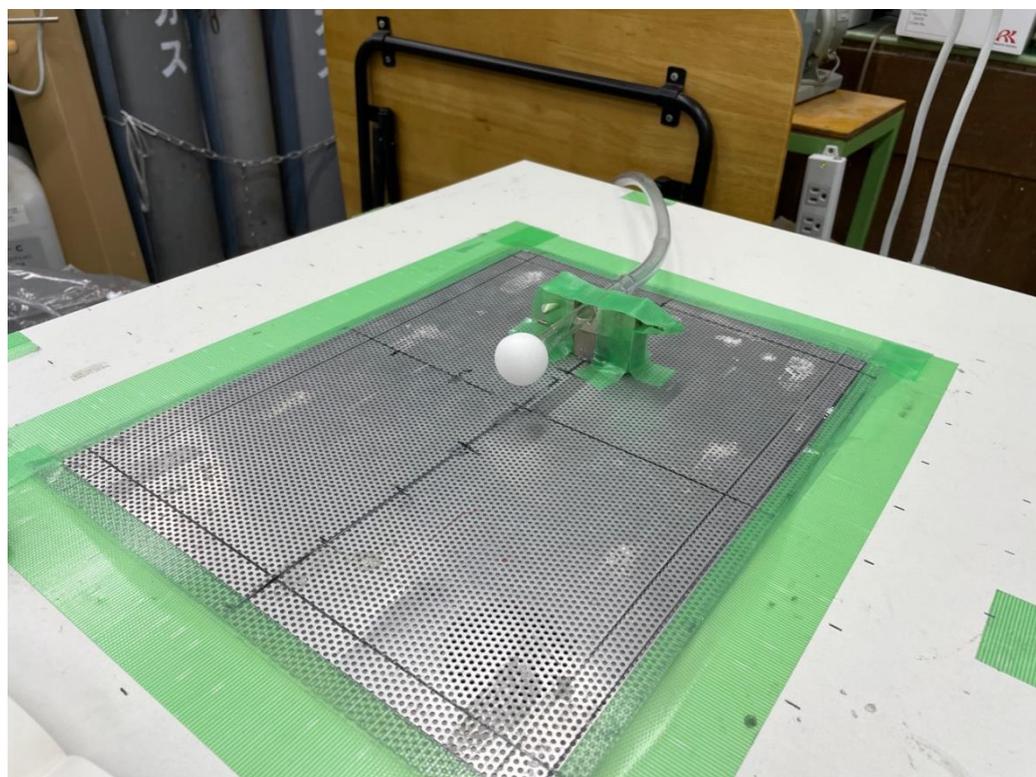


図 4.42 実際の発生源の様子

以下に捕集率測定の実験手順を示す。

実験手順

- ① 10 L テトラバッグに 1.51 mL の液体のアセトン注入して 5000 ppm のアセトンガスを作製した。
- ② 作製したテトラバッグをポンプに接続して、ポンプの流量を 2.97 L/min に設定した。
- ③ 捕集率が 100 % の場合のダクト内濃度を求めるために発生源をチャンバーボックスの中央に設置した。
- ④ ガス発生 1 分後、2 L/min に設定したポンプで、ダクト内測定点からテトラバッグに 3 L のガスを捕集した。
- ⑤ VOC モニター(理研計器 GX-6000)を使ってテトラバッグ内のアセトン濃度を測定した。
- ⑥ 発生源の位置を変えて、同様にダクト内の濃度を測定し、捕集率を求めた。

4.5.3 実験結果

(1)発生源をチャンバーボックス中央に設置した場合(捕集率が 100%)のダクト内濃度の測定結果

表 4.15 チャンバーボックスの中央(捕集率が 100%)、実際の測定値、平均濃度

発生源の 設置位置	排风量 (m <sup>3</sup> /min)	測定値(ppb)			平均濃度 (ppb)
		1 回目	2 回目	3 回目	
チャンバ ーボック スの中央	1.0	5880	5910	5980	5920
	2.0	3720	3550	3510	3600
	2.9	2420	2570	2700	2600
	3.0	2450	2660	2620	2580
	3.3	2100	2500	2430	2340
	3.8	2020	2040	2080	2050
	4.0	1810	1780	1800	1800
	4.5	1540	1570	1630	1580
	5.0	1350	1480	1470	1430
	6.0	1200	1240	1280	1240

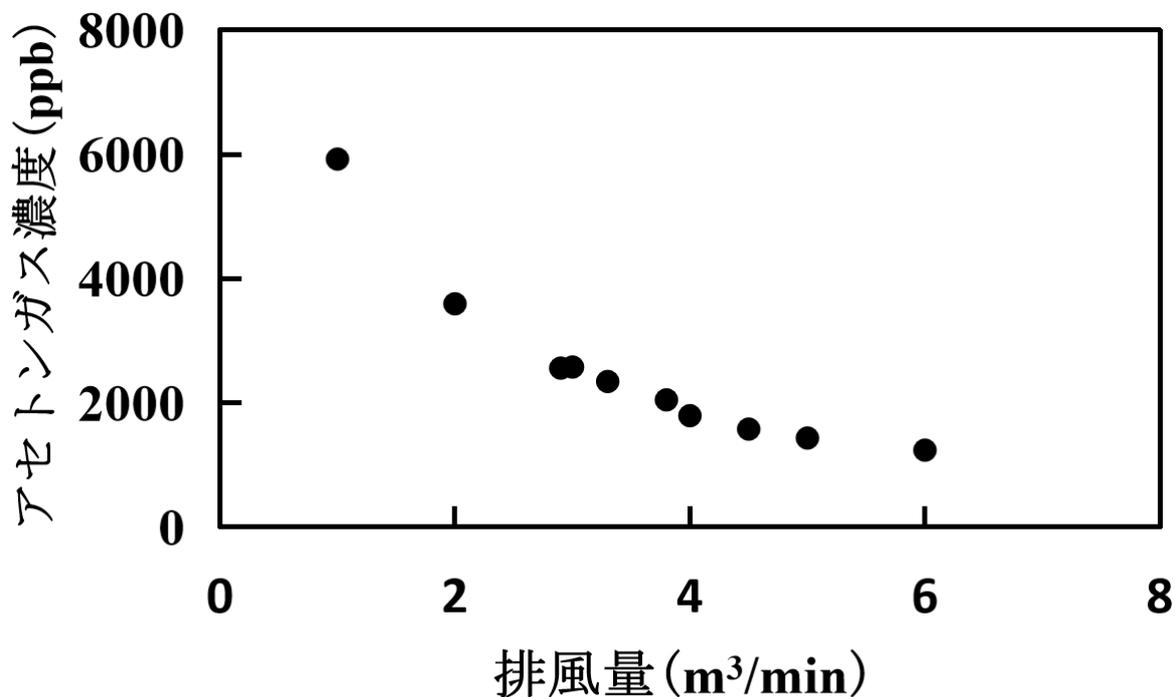


図 4.43 チャンバーボックスの中央のアセトンガス濃度捕集率と排風量の関係

チャンバーボックスの中央に発生源を設置し、排風量を変化させてダクト内の濃度を測定した。排風量は、1.0、2.0、2.9、3.0、3.3、3.8、4.0、4.5、5.0、6.0 (m<sup>3</sup>/min)に設定した。また、測定ごとに BG(バックグラウンド)濃度を測定し、VOC モニターの指示値から差し引いたものを測定値として用いる。測定値、平均濃度を表 4.15 に示す。また、チャンバーボックスの中央のアセトンガス濃度捕集率と排風量の関係を図 4.43 に示す。

表 4.15 より、発生源をチャンバーボックスの中央に設置した場合、排風量が大きくなるに従って、ダクト内濃度が低くなっていることがわかる。また、図 4.43 より、アセトンガス濃度捕集率と排風量の関係は反比例関係に近いことが分かった。

#### (2)高さごとのダクト内濃度測定結果

発生源の設置位置の高さを 3、5、7、9 cm と変えて、チャンバーボックスの中央(捕集率 100%)の時と同様にダクト内濃度を測定した。発生源の設置位置とその時設定した排風量は表 4.16 に示した通りである。また、捕集率 100%の測定時と同様に BG(バックグラウンド)濃度を測定し、VOC モニターの指示値から差し引いたものを測定値

として用いる。測定値、平均濃度と捕集率を表 4.16～表 4.19、各高さにおいて排風量を変化させた時の測定値、平均濃度と捕集率を図 4.44～図 4.47 に示す。

表 4.16 高さ 3 cm、各排風量の測定値、平均濃度と捕集率

発生源の 設置位置	排風量 (m <sup>3</sup> /min)	測定値(ppb)			平均濃度 (ppb)	捕集率 (%)
		1 回目	2 回目	3 回目		
高さ 3 cm	1.0	5360	5300	5280	5310	89.7
	2.0	3220	3350	3370	3310	92.2
	2.9	2320	2370	2530	2410	94.0
	3.0	2410	2450	2410	2420	94.1
	4.0	1810	1820	1860	1830	102.0

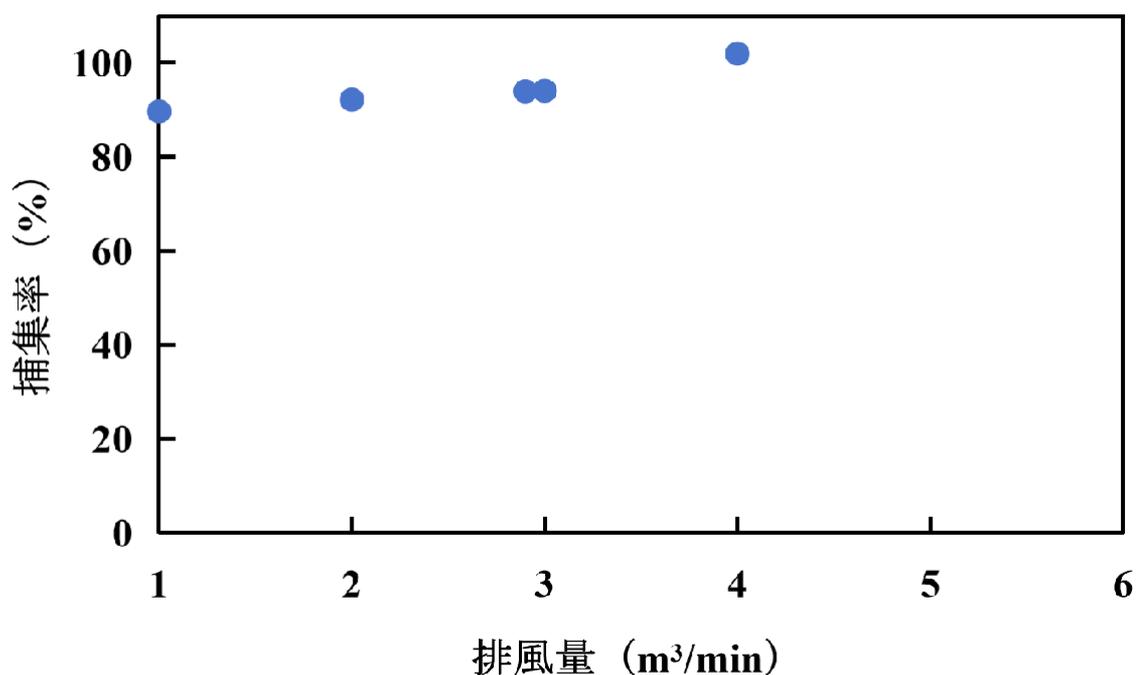


図 4.44 高さ 3 cm において排風量を変化させた時の捕集率

表 4.16、図 4.44 より、発生源の設置位置が高さ 3 cm、排風量 2.9 m<sup>3</sup>/min とした場合、捕集率は 94.0% となった。排風量 2.0 と 1.0 m<sup>3</sup>/min の場合、捕集率は 92.2%、89.7% となり、排風量の減少により捕集率が低下した。排風量が必要排風量 2.9 m<sup>3</sup>/min より大きい 3 m<sup>3</sup>/min、4 m<sup>3</sup>/min の場合、捕集率がそれぞれ 94.1% と 102.0% となった。

表 4.17 高さ 5 cm、各排風量の測定値、平均濃度と捕集率

発生源の 設置位置	排風量 (m <sup>3</sup> /min)	測定値(ppb)			平均濃度 (ppb)	捕集率 (%)
		1 回目	2 回目	3 回目		
高さ 5 cm	1.0	5100	5020	5080	5070	85.6
	2.0	3390	3430	3480	3430	95.4
	3.0	2460	2490	2570	2510	97.3
	3.3	2310	2270	2270	2280	97.3
	4.0	1660	1740	1690	1700	99.3
	5.0	1520	1530	1530	1530	106.5

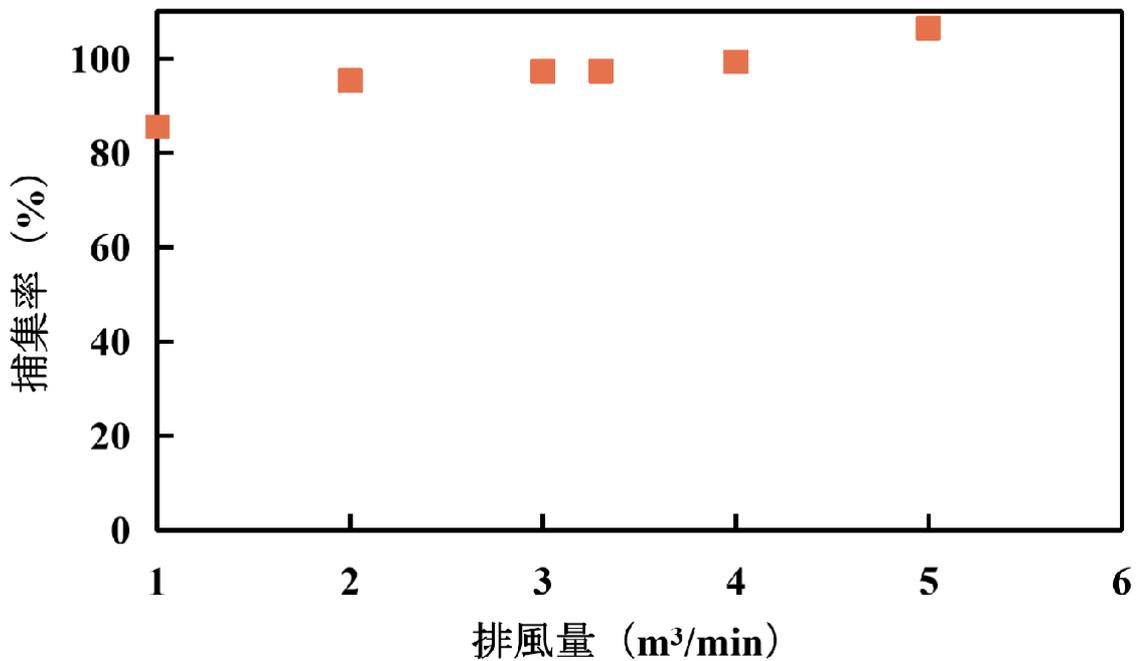


図 4.45 高さ 5 cm において排風量を変化させた時の捕集率

表 4.17、図 4.45 より、発生源の設置位置が高さ 5 cm、排風量 3.3 m<sup>3</sup>/min で測定した場合、捕集率は 97.3% となった。排風量が必要排風量 3.3 m<sup>3</sup>/min より少ない 1.0 m<sup>3</sup>/min の場合、捕集率が 85.6% となり、捕集率に大きな影響を与えた。排風量が必要排風量 3.3 m<sup>3</sup>/min より大きい 4.0 m<sup>3</sup>/min、5.0 m<sup>3</sup>/min の場合、捕集率がそれぞれ 99.3%、106.5% となり、捕集率は 100% に近くなった。

表 4.18 高さ 7 cm、各排風量の測定値、平均濃度と捕集率

発生源の 設置位置	排風量 (m <sup>3</sup> /min)	測定値(ppb)			平均濃度 (ppb)	捕集率 (%)
		1 回目	2 回目	3 回目		
高さ 7 cm	1.0	4900	4930	4940	4920	83.1
	2.0	3410	3490	3230	3380	93.9
	3.0	2530	2460	2410	2470	95.7
	3.8	1980	1940	1920	1940	94.9
	4.0	1680	1770	1610	1690	98.7
	5.0	1500	1400	1550	1490	103.6

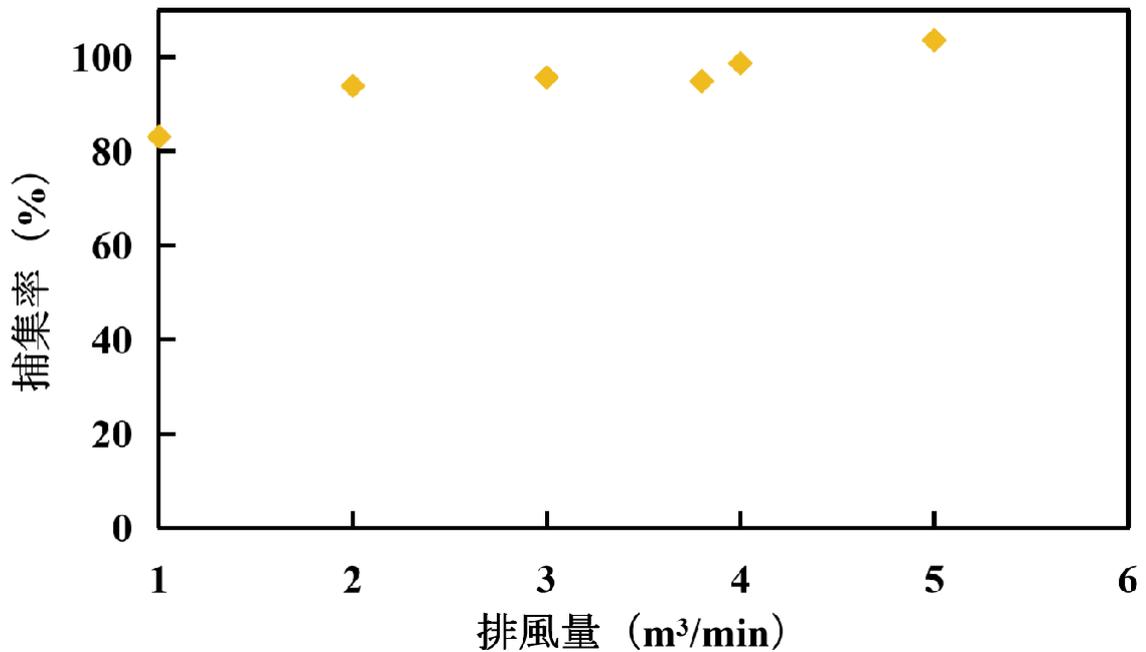


図 4.46 高さ 7 cm において排風量を変化させた時の捕集率

表 4.18、図 4.46 より、発生源の設置位置が高さ 7 cm、排風量 3.8 m<sup>3</sup>/min で測定した場合、捕集率は 94.9%となった。排風量が必要排風量 3.8 m<sup>3</sup>/min より少ない 1 m<sup>3</sup>/min の場合、捕集率が 83.1%となり、必要排風 3.8m<sup>3</sup>/min より大きい 4.0m<sup>3</sup>/min、5.0m<sup>3</sup>/min の場合、捕集率がそれぞれ 98.7%、103.6%となった。アセトンの設置位置を高さ 7cm とした場合、排風量が大きくなると、捕集率に明確な上昇傾向が見られた。発生位置 3 cm、5 cm の場合、捕集率はほぼ 95 %以上であった。

表 4.19 高さ 9 cm、各排風量の測定値、平均濃度と捕集率

発生源の 設置位置	排風量 (m <sup>3</sup> /min)	測定値(ppb)			平均濃度 (ppb)	捕集率 (%)
		1 回目	2 回目	3 回目		
高さ 9 cm	3.0	2230	2330	2400	2320	89.9
	4.0	1710	1730	1750	1730	101.2
	4.5	1530	1570	1620	1570	99.7
	5.0	1410	1460	1440	1430	100.0
	6.0	1260	1330	1200	1270	102.1

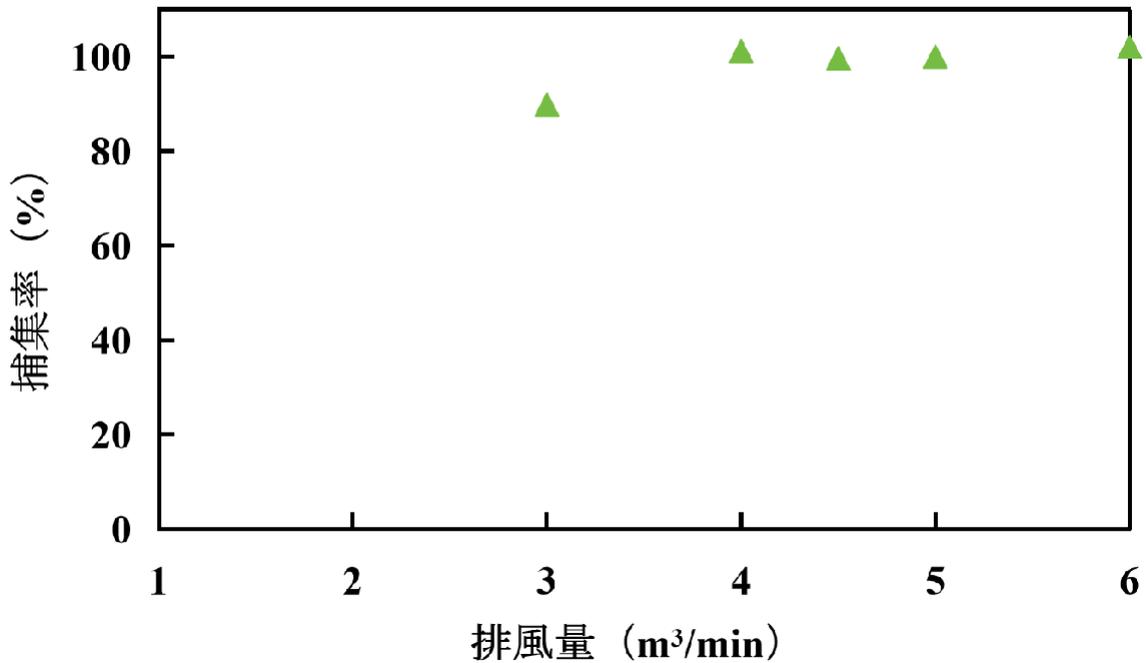


図 4.47 高さ 9 cm において排風量を変化させた時の捕集率

表 4.19、図 4.47 より、発生源の設置位置が高さ 9 cm、排風量 4.5 m<sup>3</sup>/min で測定した場合、捕集率は 99.7%となった。必要排風量 4.5 m<sup>3</sup>/min より大きい 5.0m<sup>3</sup>/min、6.0m<sup>3</sup>/min の場合、捕集率がそれぞれ 100.0%、102.1%となった。表 4.16～表 4.19 より、発生源の設置位置を高くしても、排風量が大きいくほど、ダクト内濃度が低くなる傾向は変わらなかった。

(3)各発生源高さ、排风量における捕集率測定の結果

4.16～表 4.19 までの結果をまとめ、発生源の各高さ、排风量における捕集率を求めたものを表 4.20 に示す。また、発生源の各高さにおいて、排风量を変化させた時の捕集率をまとめたものを図 4.48 に示す。

表 4.20 各発生源高さ、排风量における捕集率(%)

排风量 (m <sup>3</sup> /min)	測定場所			
	高さ 3 cm	高さ 5 cm	高さ 7 cm	高さ 9 cm
1.0	89.7	85.6	83.1	
2.0	92.2	95.4	93.9	
2.9	94.0			
3.0	94.1	97.2	95.7	89.9
3.3		97.3		
3.8			94.9	
4.0	102.0	99.3	98.7	101.2
4.5				99.7
5.0		106.5	103.6	100.0
6.0				102.1

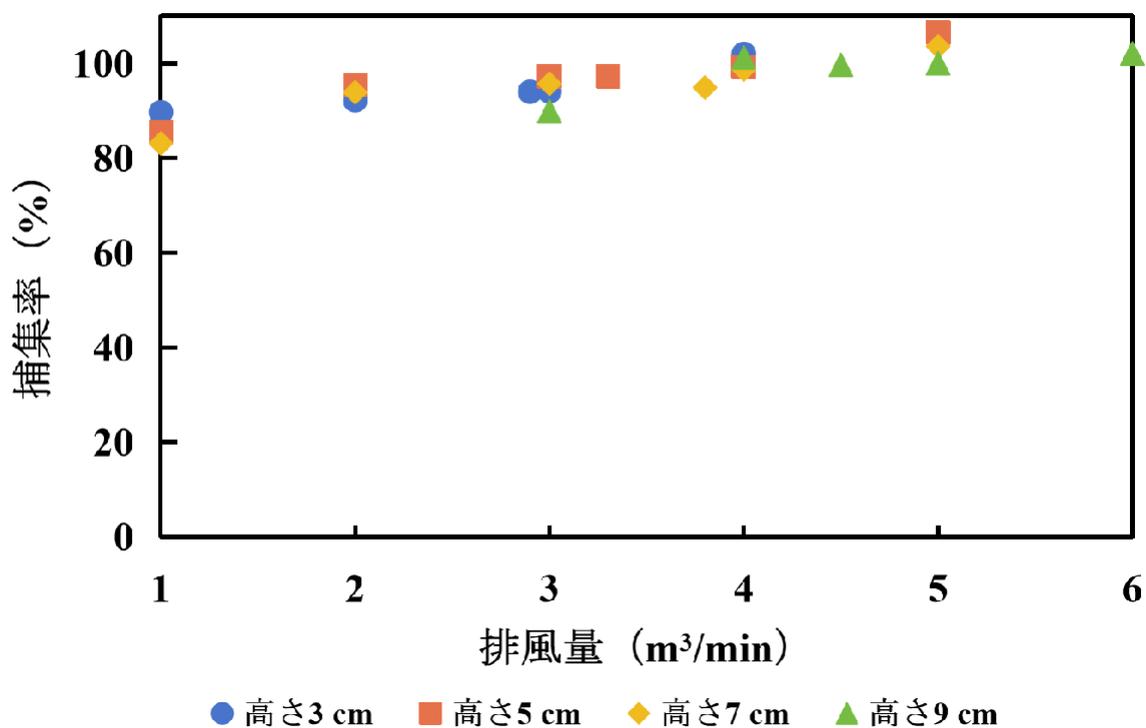


図 4.48 各高さにおいて排風量を変化させた時の捕集率

表 4.20 から、発生源の設置位置の高さ 3、5 cm の場合、排風量を大きくすると捕集率も大きくなる傾向があることがわかる。一方、発生源の設置位置の高さが 7 cm、9 cm の場合、排風量の変化による捕集率の変化は少なく、捕集率は 90%前後を維持し、あまり変化しない結果となった。また、図 4.48 より、どの高さにおいても排風量が増加すると捕集率も増加する傾向になった。そして、必要排風量より少ない場合でも、捕集率が 90%以上になることもあった。

#### 4.5.4 考察

発生源の設置位置が低い場合(各発生源の設置位置高さ 3cm、5cm)では、排風量を増やすと捕集率も高くなる傾向があった。しかし、発生源の設置位置が高い時(各発生源の設置位置高さ 7、9 cm)には、排風量を大きくしても捕集率が高くない場合があった。これは、発生源の設置位置が高いほど吸引風速が低くなり、周囲の環境の影響(外乱気流など)を受けやすくなるからと考えられる。また、いくつかの排風量において、発生源の設置位置が 3cm の場合、約 90%程度の捕集率を維持した。一方、同じ排風量に設定した場合、発生源の設置位置が低いほど捕集率が高くなる傾向となった。

これは、同じ排風量でも開口面に近いほど風速が大きくなり、その気流によって有機溶剤が捕集されることが原因として考えられる。

さらに、式(4-2)より求めた各高さにおける必要排風量と、必要排風量よりも大きな排風量に設定した場合、捕集率は100%近くになった。これは、必要排風量を満たさなくてもアセトン十分に捕集できることを示している。この結果から、制御風速を満たすために計算された必要排気風量が、本研究で用いた換気作業台では過剰であると考えられる。

また、排風量が必要排風量よりも少ない $1.0\text{m}^3/\text{min}$ の場合、捕集率は90%以下となり、他の排風量と比べて捕集率が大幅に減少した。一方で、 $2.0\text{m}^3/\text{min}$ の場合、捕集率は90%を維持していた。過去の研究ではアセトンガスの捕集率を90%以上に保つためには $3.0\text{m}^3/\text{min}$ の排風量が必要であった。このことから、本研究で作製した換気作業台は、チャンバーボックスとダクトの設置位置の変更によってフード開口面上の風速分布が均一化され、アセトンガスの捕集性能が向上したと考えられる。

#### 4.6 まとめ

ネイルサロンや塗装、洗浄、印刷などの有機溶剤を取り扱う現場では、低濃度のばく露でも健康に悪影響を及ぼす可能性があると考えられる。そのため、多くのネイルサロンでは、環境中、特に呼吸域の空気環境中による人の健康影響を及ぼす有害物質を除去するため、換気装置の設置は必要となる。その中で米国国立労働安全衛生研究所(NIOSH)が推奨する換気作業台(Ventilated Table)は作業員及び顧客の呼吸域の近くにある有機溶剤蒸気を効果的に除去することを示し、ネイルサロンなどの有機溶剤を扱う現場における有害物質を除去するための重要な工学的制御手段となる。一方、ネイルサロンなどの現場における多様な作業に伴い、作業員の口や鼻の位置が移動することが考えられる。その際に、排気装置の吸引で生じる開口面上の風速分布の偏りが大きいと、風速の低い領域から有害物質の漏洩が発生する可能性があり、特に作業員の口や鼻が移動した際に、作業員が高濃度の有害物質にばく露する危険性がある。

そこで、本研究では、低濃度のばく露でも健康に悪影響を及ぼす可能性があるネイルサロンなどの現場を想定して、実際の作業員の作業範囲を考慮して、作業に影響が少ないように外付け式下方吸引長方形型フードを備えた換気作業台を作製した。その上で、フード開口面上の風速分布の偏りを低減させることを考慮し、フードの開口面上に開口率の異なる3つのパンチング(22.7%、32.6%、40.3%)をそれぞれ設置した場合において、設定した捕捉点での風速や開口面上の風速分布にどう影響を与えるかを調

べるため、風速測定を行った。さらに、実際に有機溶剤を扱う現場を想定して、有機溶剤であるアセトンガスを発生させ、換気作業台の排風量を変化させた場合の捕集率の測定を行った。その結果、先行研究と本研究における指向性風速計による測定結果を比較したところ、先行研究ではダクトの配置が風速分布に偏りをもたらし、特に Y 軸マイナス方向に風速が増加していることが明らかになった。一方、本研究でのダクト配置では、Z 軸と平行な向きに設置することで風速分布の偏りが軽減された。実験結果からは、開口面の中心線(Z 軸)における風速が最大となることが確認された。この配置により、風速が均一に開口面に取り込まれるため、風速の偏りが小さくなると考えられる。そして、無指向性風速計を用いた各開口率パンチングの YZ 平面風速から、開口率 40.3%のパンチングが風速の偏りが少ない。さらに、穴径が大きいため、パンチングの圧力損失が小さくなる。そのためファンへの負荷も小さくなる。したがって、本研究で用いたパンチングの中では、開口率 40.3%のパンチングが最も効果的なパンチングと考えられる。また、無指向性風速計が換気作業台において風速を正確に測定するのに有効であり、ダクトの設置位置と向きは風速分布の均一性に影響を与えると考えられる。

また、有機溶剤であるアセトンガスを発生させ、換気作業台の排風量を変化させた場合の捕集率の結果より、下方吸引でアセトンガスの吸引に最も効果的な開口率 40.3%のパンチングを設置した換気作業台を用いて、法令で定められている制御風速を満たすように求めた必要排風量より少ない排風量でもアセトンガスに対する捕集率を 90%以上にすることができた。

## 参考文献

- 1) AB Spencer, CF Estill, JB McCammon, RL Mickelsen, OE Johnston, Control of Ethyl Methacrylate Exposures During the Application of Artificial Fingernails, *American Industrial Hygiene Association Journal*, **58**, 214-218 (2010).
- 2) 西岡通男, 佐藤浩, 低雑音定温度型熱線風速計の試作, *東京大学宇宙航空研究所報告*, **6**, 571-589 (1970).
- 3) 浅原照三, 戸倉仁一郎, 大河原信, 熊野谿徒, 妹尾学, *溶剤ハンドブック*, 講談社, pp.127-128 (1976).
- 4) 日本作業環境測定協会, *新訂作業環境測定ガイドブック 3*, 日本作業環境測定協会, pp.4-5 (1990).
- 5) 沼野雄志, *新やさしい局排設計教室*, 中央労働災害防止協会, pp.119-120 (2005).
- 6) 山田憲一, *数理モデルを用いた作業環境における揮発性有機化合物のばく露評価に関する研究*, 早稲田大学博士論文, pp.47 (2010).

## 第 5 章 有機溶剤作業に対する排風量制御システムを搭載した換気作業台の性能評価

### 5.1 研究背景と目的

近年、ネイルサロンの有機溶剤を含むネイル製品の使用による室内空気質問題及び作業員または顧客に対する健康問題における社会の注目が高まっている<sup>1-12)</sup>。また、ネイルサロンから発生する強い化学物質の臭気により、その場の空気環境やネイリスト及び顧客の健康への影響についての懸念が高まっている。ネイルサロンの臭気、蒸気、粉じんがネイリストや顧客の健康に有害なのかを判断するために、そのばく露評価の需要も近年増加していた。

ネイルサロンで最も一般的に使用される溶媒はアセトンである。また、OSHA(アメリカ合衆国労働安全衛生庁)危険情報伝達基準により、危険な化学物質を 1% 以上含む製品ごとに、化学物質メーカーがサロンオーナーに製品の製品安全データシート(SDS)を提供する必要がある。SDS には、製品の成分、健康と安全のリスク、ばく露経路、使用および保管の注意事項、または緊急時に必要な措置に関する情報が記載されている。ネイルサロンでの労働者のばく露を最小限に抑えるために、換気システム、適切な呼吸器、皮膚及び目の保護具を含む個人用保護具(PPE)が OSHA によって推奨されている<sup>13)</sup>。

ネイルサロンにおける化学物質や粉じんへのばく露の主な経路は、吸入と皮膚への接触であると考えられる。ネイルの施術は通常ネイルテーブルで行われ、ネイリストが作業を完了するまでに、顧客の手をテーブルの上に置き、ネイルの処理中、ネイリストの呼吸域が化学物質や粉じんに近いことが懸念の理由である。そして、ネイリストは、粉じんや蒸気の形でアクリル酸塩や溶剤など、さまざまな危険な化学物質にばく露される可能性がある。

Linh らはトロントの 18 軒のネイルサロンで、従業員が 10 種類のフタル酸エステルと 19 種類の有機リン酸エステル(OPEs)における個人ばく露状況を評価した<sup>14)</sup>。活性空気サンプラー(Active air sampler)でばく露濃度測定結果では、フタル酸ジエチルとフタル酸ジイソブチルの濃度が最も高かった。また、活性空気サンプラーで検知したリン酸トリス(2-クロロイソプロピル)、TCIPP、リン酸トリス(3-クロロエチル)は一般的に難燃剤として使用されているが、ネイリング製品の使用には報告されていないことがわかった。そして、1つの作業中、受動シリカゲルブローチ上で合計 16 種類(55%)のフタル酸エステルと OPE が検出され、リストバンドでは 19 種類(66%)のフタル酸エステルと OPE が検出された。サンプラーの特性、作業内容及び化学排出

源は受動サンプラーを用いた揮発性有機化合物のばく露測定に影響を与える3つの原因が考えられる。

通常、局所排気装置などの換気装置はネイルサロンでの吸入ばく露を最小限に抑えることができるが、ばく露を軽減する上で、これらの換気装置の有機溶剤蒸気に対する捕集効率に関する調査研究はほとんどない。

さらに、ネイルサロンなどの現場における多様な作業に伴い、特に、除光液でマニキュアやエナメルを落とす作業とネイリング作業を行う際に、揮発性の高い性質をもつアセトンなどを含む蒸気は手の作業から生じる気流に乗り、作業員または顧客の呼吸域に拡散するリスクが高い。その際に、ネイルサロンで使用される局所排気装置は、一般的に吸引風速の有効範囲が狭いので、フードの開口面作業面上における作業員の手による動作で生じる外乱気流が引き起こす有害物質の拡散に適切に対応できないという問題点がある。

そこで、本研究では、4章におけるネイルサロンの現場を想定して作製した換気作業台を用いて、実際のネイルサロンを対象として現場調査を行い、実際の作業動作を実験室で模擬して外乱気流を発生させた。その作業における手の動作によって発生源付近の風速にどう影響を与えるかを調べた。そして、外乱気流を発生させた状態で捕集率の測定を行い、外乱気流がない場合の結果と比較した。それによって、本研究で作製した換気作業台が、外乱気流を発生させた場合に対して、どれくらいの排风量で効果を発揮できるかを調べ、適切な排风量を求めた。さらに、3章で開発した排风量制御システムを換気作業台に取り込み、作業員の手による外乱気流が生じた場合のアセトン蒸気に対する捕集率の変化を調べ、捕集性能の評価を行った。

## 5.2 実験装置と方法

### 5.2.1 ネイルサロンでの作業を想定した場合の外乱気流の測定

4章で作製した作業台を用いて、作業台のフード開口面上における外乱気流の測定を行った。図5.1に示すようにフード上部の開口面の中心を原点( $X$ 、 $Y$ 、 $Z=0(\text{mm})$ )に設定した。そして、アセトンの発生位置を高さ方向( $Z$ 軸)に設定した。また、バブリングフィルターを発生源としてフードの上に設置した。外乱気流の発生はネイルサロンの現場調査に基づいて作業員の手による縦方向の動作(外乱パターン縦動作)と横方向の動作(外乱パターン横動作)とした。実際に想定した手の動きを示した図を図5.2に示す。

本研究では、無指向性風速計を使用して風速の時間変化を測定した。無指向性風速

計の設置位置を発生源からさらに 2cm 上方の位置に設定した。また、手の動きによって発生源や無指向性風速計に干渉してしまう可能性があるため、発生源の設置位置を捕集率測定の時とは違い、発生源の設置位置が 9cm の場合の測定は行わなかった。手の動きで生じる外乱気流風速の測定条件を表 5.1 に示す。

- 原点
- アセトンガス発生源
- ⊗ チャンバーボックスの中央

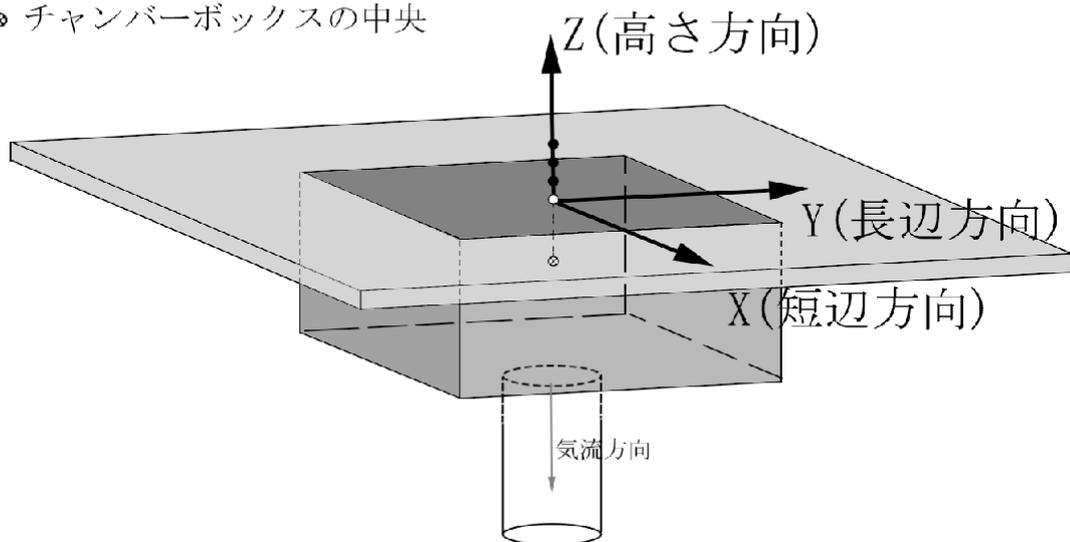


図 5.1 フード開口面上の測定概要



図 5.2 作業者の手の作動方向

表 5.1 外乱風速の測定条件

サンプリング条件	測定パターン	発生源設置位置 (cm)	手を動かす動作パターン	排風量 (m <sup>3</sup> /min)	測定点 (X,Y,Z)(mm)	
サンプリング間隔 1 s × 測定時間 60 s × 測定回数 3 回	装置稼働 外乱気流 なし	3	外乱パターン 縦動作	2.9	(0,0,50), (0,100,50), (50,0,50)	
			外乱パターン 横動作			
	装置稼働 なし 外乱気流 あり	5	外乱パターン 縦動作	3.3	(0,0,70), (0,100,70), (50,0,70)	
			外乱パターン 横動作			
	装置稼働 外乱気流 あり	7	/		3.8	(0,0,90), (0,100,90), (50,0,90)
			外乱パターン 横動作			

また、発生源の位置が 7 cm の場合は外乱パターン横動作のみで測定を行った。これは、発生源が 7 cm の位置にある場合、外乱パターン縦動作は風速計に干渉してしまうためである。

以下に作業に伴って発生する外乱風速測定実験の実験手順を示す。

- ① 微差圧計からの出力電流をインバーターに入力して、設定した各排風量になるようにファンを制御した。
- ② 手のマネキンを設置し、測定点に風速計を固定した。
- ③ 想定した外乱気流のパターンを再現するために、作業者の手を 1 秒に 2～3 回の速さで横方向または縦方向に動かし、外乱気流を発生させた。
- ④ 測定は以下の 3 つのパターンで行った。
  - ・装置を稼働させずに外乱気流のみを発生させた場合。
  - ・手を動かさずに装置のみを稼働させた場合。
  - ・装置を稼働させた状態で手を動かして外乱気流を発生させた場合。

#### 5.2.2 外乱気流に対する換気作業台の捕集性能の評価

本実験では、フード上部の開口面の中心を原点(X、Y、Z=0(mm))に設定した。そして、原点から高さ方向(Z軸)にアセトンの発生位置を設定した。また、5.2.1で行った発生源の設置位置と同じく、3 cm、5 cm、7cm に設定し、4章で行った捕集率測定と同じく、アセトンガスを発生源として使用し、直径3 cmのシャーレ内のアセトン蒸発量と同じになるようにポンプの流量を2.97 L/minに設定した。アセトンガスが十分に拡散するようにダクト内の測定点はチャンバーボックスとダクトの接続部から下流側2m離れた位置とした。

また、想定した外乱パターン動作で手を動かし、外乱気流を発生させた。発生源の設置位置を3 cm、5 cm、7cmと変えたとき、4章の捕集率測定の時と同様にダクト内濃度を測定した。排风量は、1、2、3(m<sup>3</sup>/min)に設定した。また、測定ごとにBG(バックグラウンド)濃度を測定し、VOCモニターの指示値から差し引いたものを測定値として用いた。捕集率測定実験の測定条件を表5.2に示し、外乱気流がある場合の捕集率測定実験の様子を図5.3に示す。

表 5.2 捕集率測定実験の測定条件

フードの 開口面サイズ (mm)	アセトン ガス濃度 (ppm)	発生源の 設置位置 (cm)	排风量 (m <sup>3</sup> /min)
400 × 300	5000	3	1、2、3

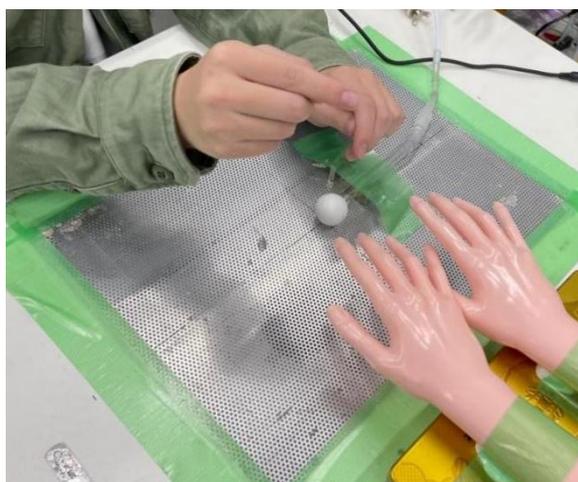


図 5.3 手の動作で生じる外乱気流を加えた場合の捕集率測定実験の様子  
以下に捕集率測定の実験手順を示す。

- ① 10 L テトラバッグに 1.51 mL の液体のアセトンを入力して 5000 ppm のアセトンガスを作製した。
- ② 作製したテトラバッグをポンプに接続して、ポンプの流量を 2.97 L/min に設定した。
- ③ 発生源を固定し、想定した外乱パターン動作を再現するように、手を 1 秒間に 2～3 回の速度で動かし外乱気流を発生させた。
- ④ ガス発生 1 分後、2 L/min に設定したポンプで、ダクト内測定点からテトラバッグに 3 L のガスを捕集した。
- ⑤ VOC モニター(理研計器 GX-6000)を使ってテトラバッグ内のアセトン濃度を測定した。
- ⑥ 発生源の位置を変えて、同様にダクト内の濃度を測定し、捕集率を求めた。

### 5.2.3 排风量制御システムを搭載した換気作業台における捕集効率の実験

本実験では、3章で作製した排风量制御システムを換気作業台に搭載させ、換気作業台の上方で手による動作から生じる外乱気流を加えた場合、アセトンガスに対する捕集率を測定し、作業台の捕集性能を評価した。実験装置の概略を図 5.4 に、作業中の小型風速センサーを手につけた位置の概略を図 5.5 に示す。

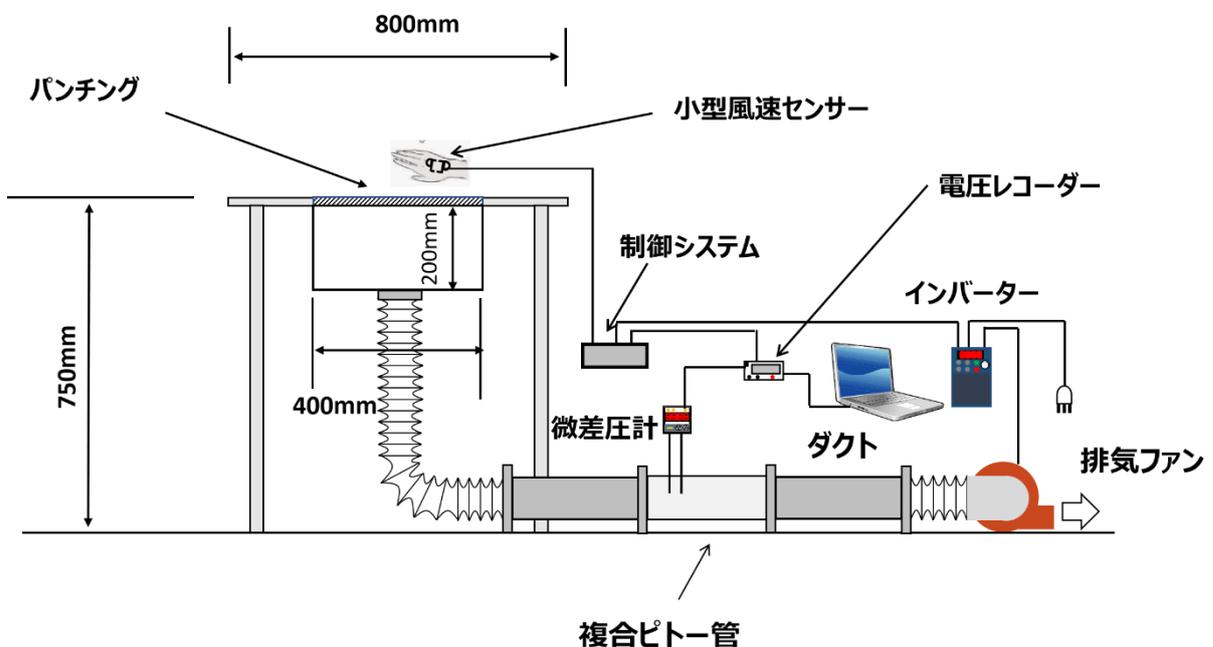


図 5.4 排风量制御システムを搭載した換気作業台の概略図

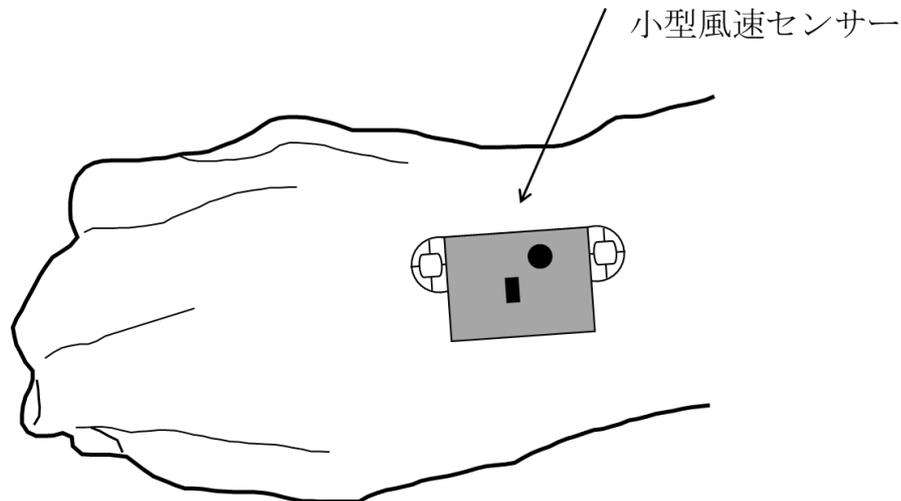


図 5.5 小型風速センサーを手に付けた場合の概略図

また、捕集率測定の実験手順は以下のように示す。

- ①10 L テトラバッグに 1.51 mL の液体のアセトンを入力して 5000 ppm のアセトンガスを作製した。
- ②作製したテトラバッグをポンプに接続して、ポンプの流量を 2.97 L/min に設定した。
- ③発生源を固定し、ガス発生 30 秒後、2 L/min に設定したポンプで、ダクト内測定点からテトラバッグに 3 L のガスを捕集した。
- ④想定した外乱パターン動作を再現するように、作業台のフード開口面上方で手を 1 秒間に 2~3 回の速度で動かし外乱気流を発生させた。ガス発生 30 秒後、2 L/min に設定したポンプで、ダクト内測定点からテトラバッグに 3 L のガスを捕集した。
- ⑤VOC モニター(理研計器 GX-6000)を使ってそれぞれ外乱気流を加えた場合と外乱気流がない場合のテトラバッグ内のアセトン濃度を測定し比較した。

### 5.3 実験結果と考察

#### 5.3.1 ネイルサロンでの作業を想定した場合の外乱気流の測定結果と考察

##### (1)発生源の設置位置が高さ 3 cm の時の外乱風速測定結果

発生源の設置位置の高さを 3 cm に設定し、装置を稼働させず外乱気流のみを発生させた場合、手を動かさずに制御風速を満たすための必要排风量である 2.9 m<sup>3</sup>/min で

装置のみを稼働させた場合、必要排风量で装置を稼働させた状態で手を動かして外乱気流を発生させた場合の3つのパターンで風速を測定した。各測定点での結果を図5.6～図5.8に示す。

図5.6から図5.8より、同じ測定点での結果を比較すると外乱パターン横動作の場合、外乱パターン縦動作よりも装置のみ場合の風速に対して、大きくなった。しかし、同じ外乱パターンで比較すると、(50, 0, 50)の点は、他の2点と比較して装置のみを稼働させた場合よりも風速の変動が小さくなった。

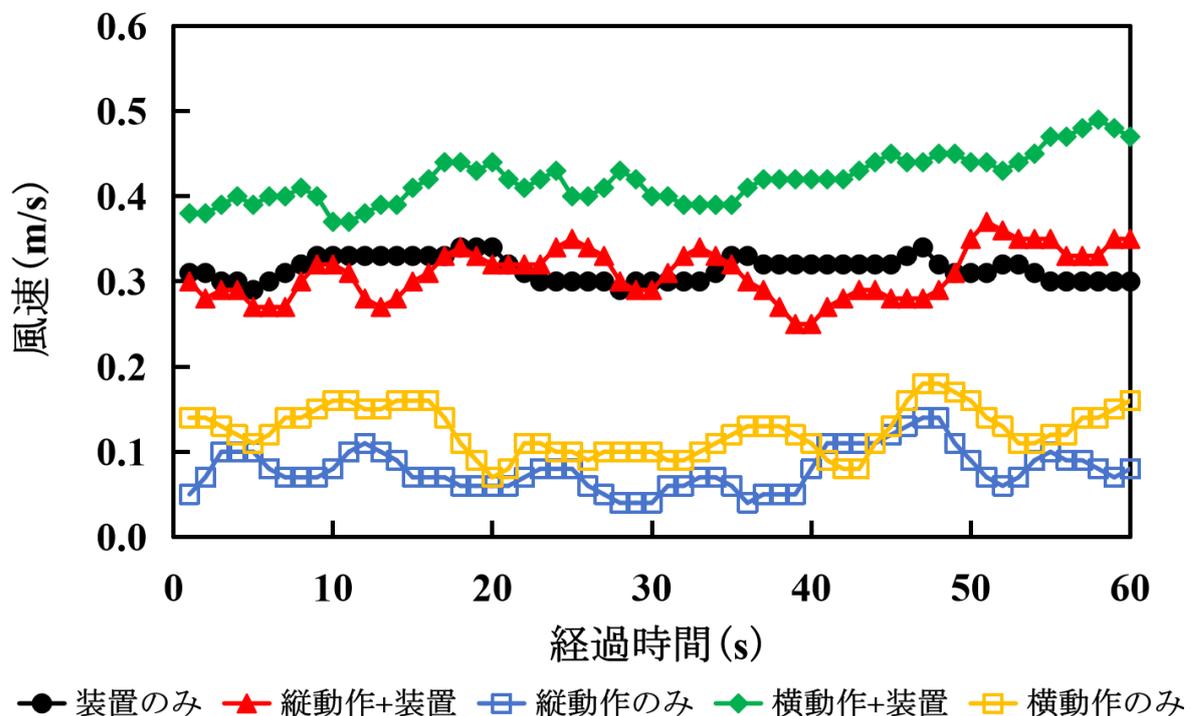
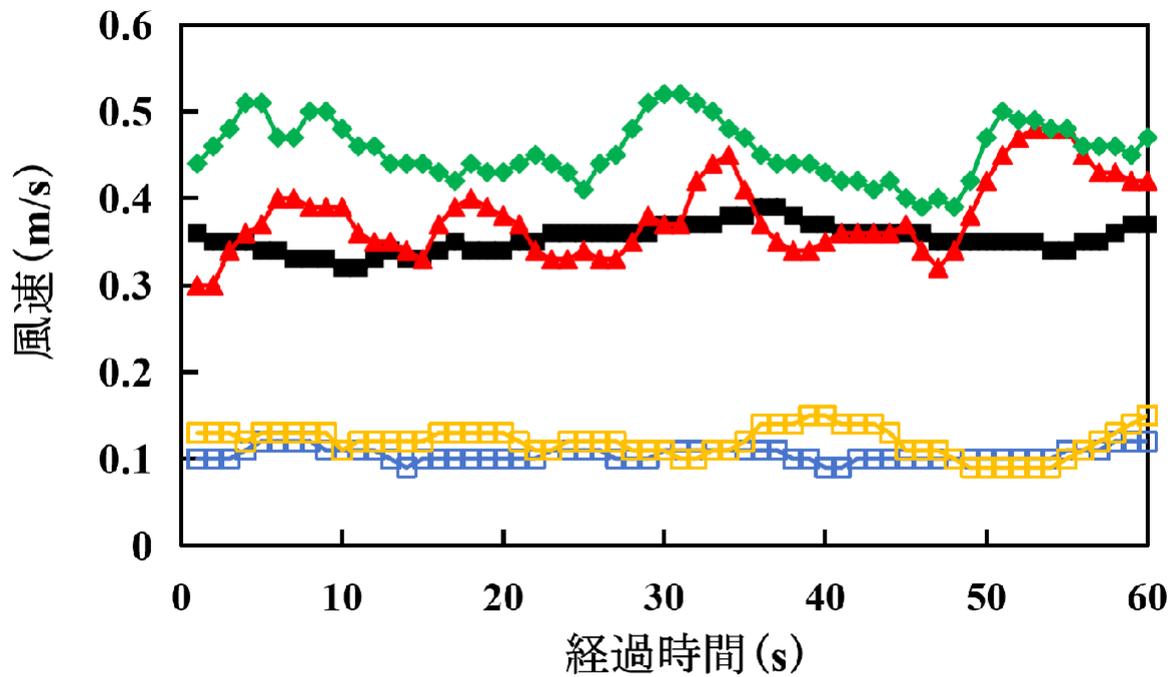
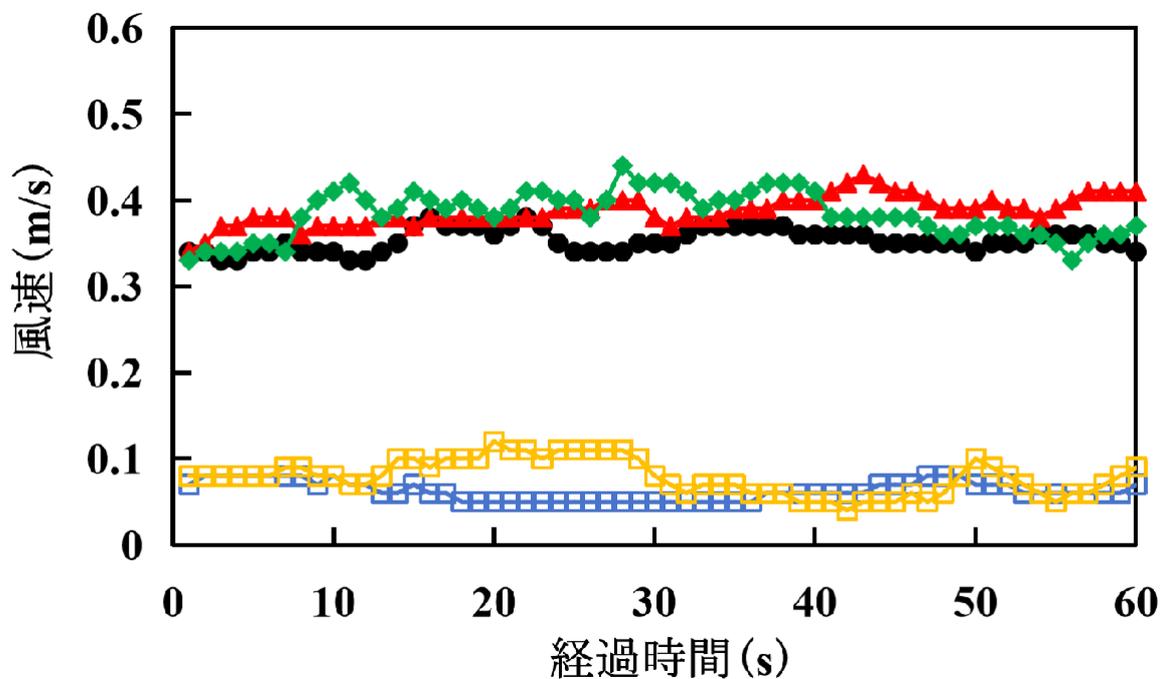


図 5.6 発生源の設置位置高さ 3cm、各外乱パターン動作、(0,0,50)での風速比較



■ 装置のみ ▲ 縦動作+装置 □ 縦動作のみ ◆ 横動作+装置 □ 横動作のみ

図 5.7 発生源の設置位置高さ 3cm、各外乱パターン動作、(0,100,50)での風速比較



● 装置のみ ▲ 縦動作+装置 □ 縦動作のみ ◆ 横動作+装置 □ 横動作のみ

図 5.8 発生源の設置位置高さ 3cm、各外乱パターン動作、(50,0,50)での風速比較

(2)発生源の設置位置が高さ 5 cm の時の外乱風速測定結果

発生源の設置位置の高さを 5 cm に設定して、装置を稼働させず外乱気流のみを発生させた場合、手を動かさずに制御風速を満たすための必要排風量である 3.3 m<sup>3</sup>/min で装置のみを稼働させた場合、必要排風量で装置を稼働させた状態で手を動かして外乱気流を発生させた場合の 3 つのパターンで風速を測定した。各測定点での結果を図 5.9～図 5.11 に示す。

図 5.9 から図 5.11 より、同じ測定点での結果を比較すると外乱パターン横動作の場合、外乱パターン縦動作よりも風速の差が大きくなった。また、(50, 0, 70)の点で測定した結果は、他の 2 点で測定した結果より風速の変動が大きくなった。

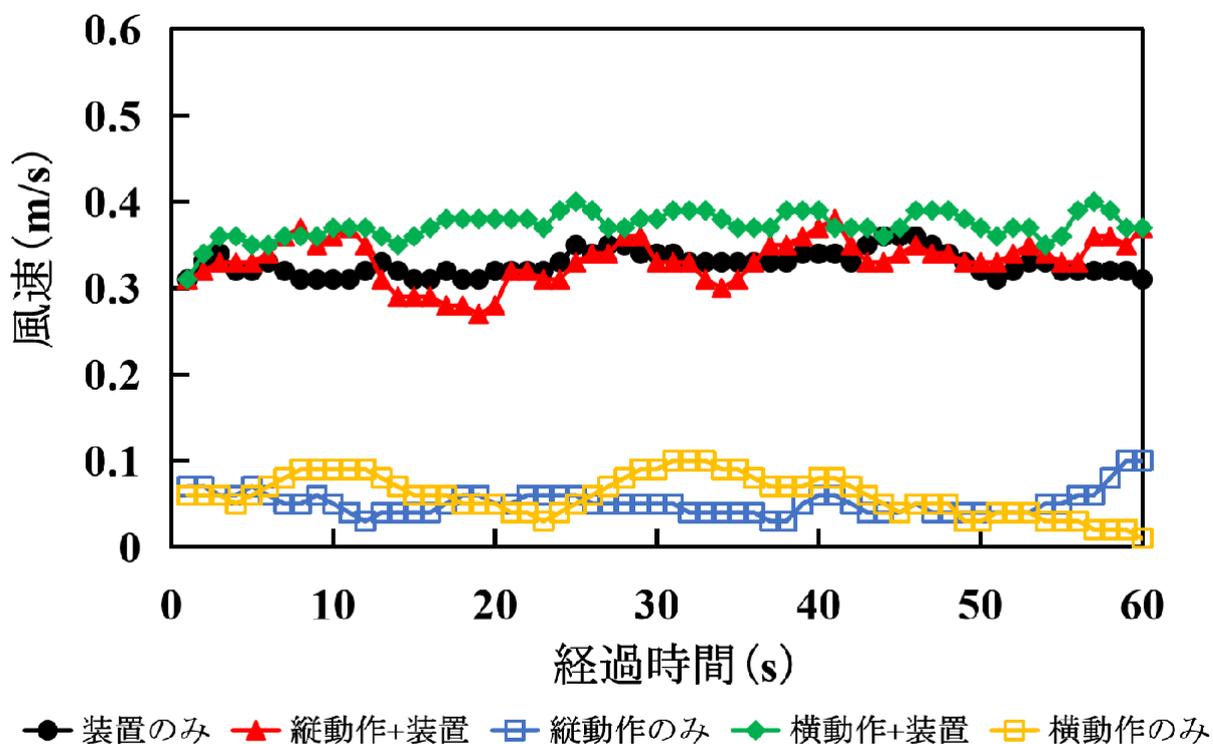
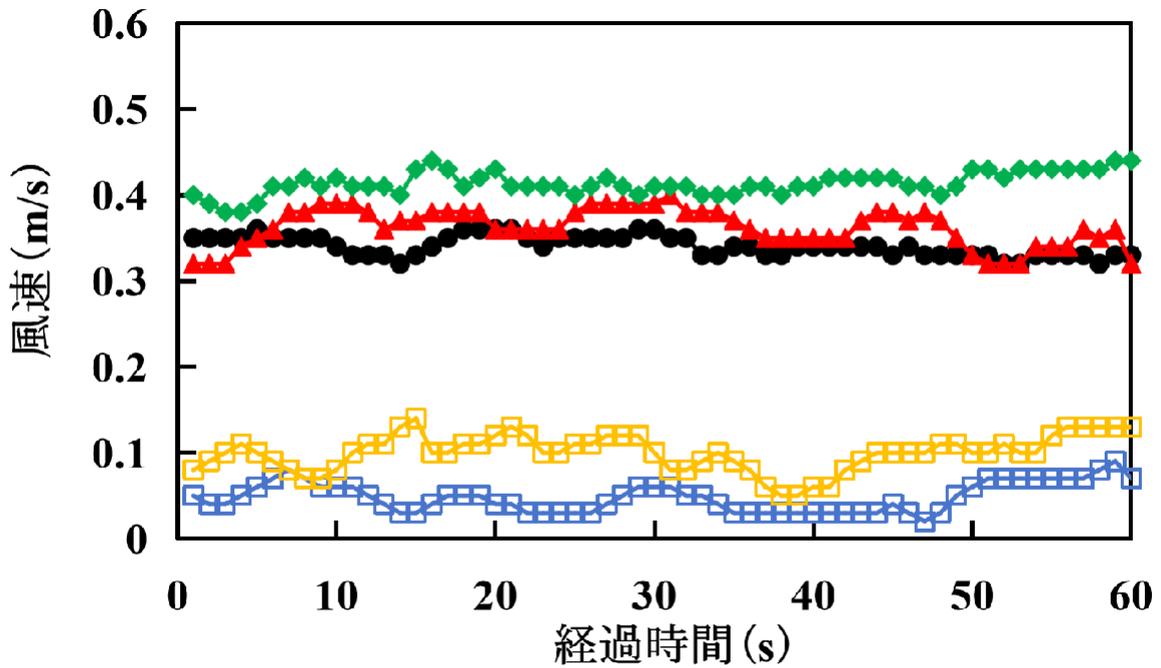
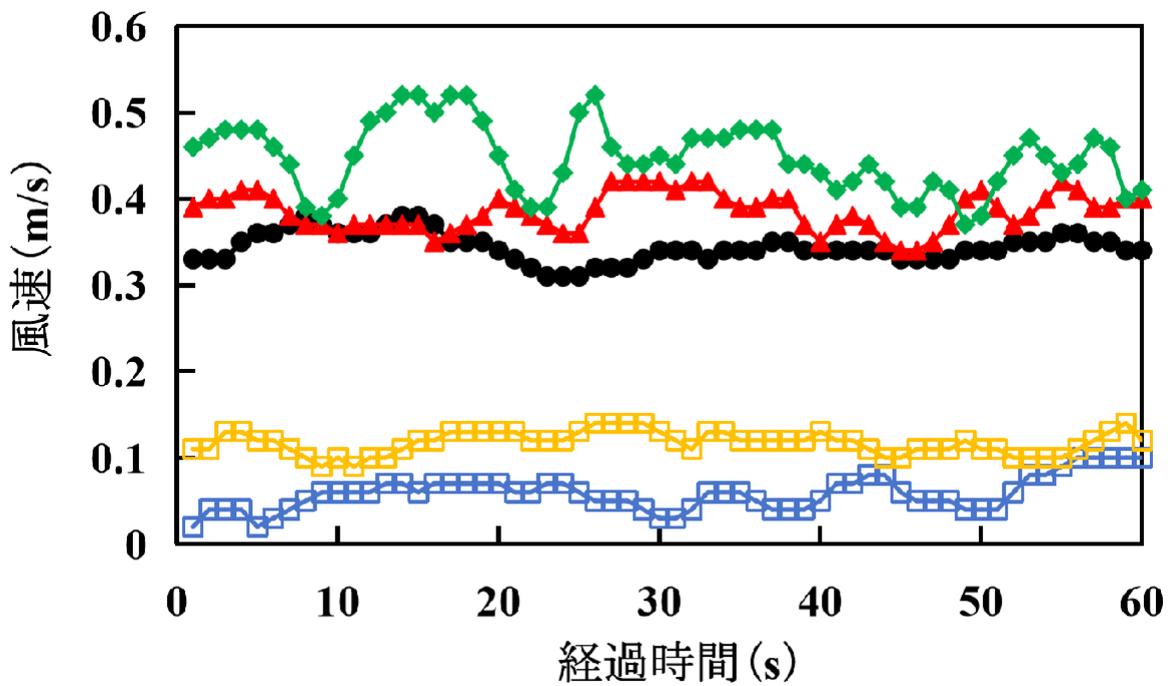


図 5.9 発生源の設置位置高さ 5cm、各外乱パターン動作、(0,0,70)での風速比較



● 装置のみ ▲ 縦動作+装置 □ 縦動作のみ ◆ 横動作+装置 ◻ 横動作のみ

図 5.10 発生源の設置位置高さ 5cm、各外乱パターン動作、(0,100,70)での風速比較



● 装置のみ ▲ 縦動作+装置 □ 縦動作のみ ◆ 横動作+装置 ◻ 横動作のみ

図 5.11 発生源の設置位置高さ 5cm、各外乱パターン動作、(50,0,70)での風速比較

(3)発生源の設置位置が高さ 7 cm の時の外乱風速測定結果

発生源の設置位置の高さを 7 cm に設定して、装置を稼働させず外乱気流のみを発生させた場合、手を動かさずに制御風速を満たすための必要排风量である 3.8 m<sup>3</sup>/min で装置のみを稼働させた場合、必要排风量で装置を稼働させた状態で手を動かして外乱気流を発生させた場合の 3 つのパターンで風速を測定した。先ほど述べたように、発生源の位置が 7 cm の場合は、外乱パターン横動作でのみ測定を行った。外乱パターン横動作で外乱気流を発生させ、3 つのパターンの風速を測定し、比較したものを図 5.12～図 5.14 に示す。図 5.12 から図 5.14 より、同じ外乱パターンで比較すると、(0, 100, 90)の点で測定した結果は、他の 2 点で測定した結果より風速の変動が小さくなった。

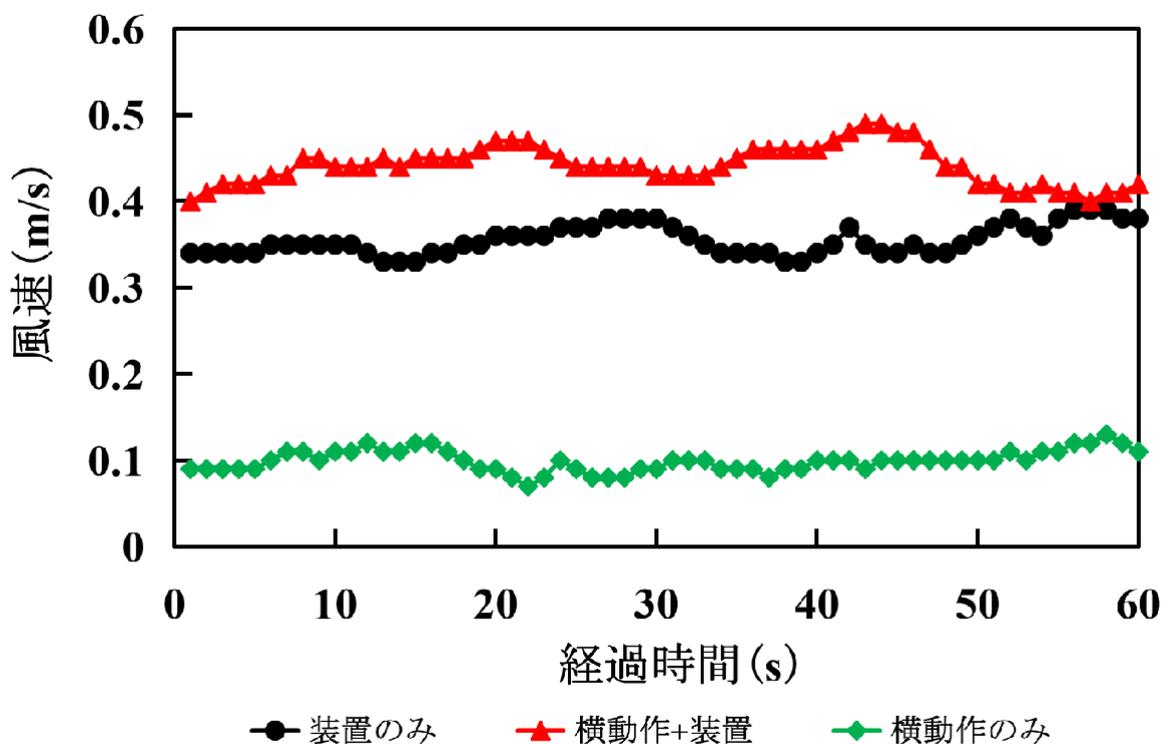


図 5.12 発生源の設置位置高さ 7cm、外乱パターン横動作、(0,0,90)での風速比較

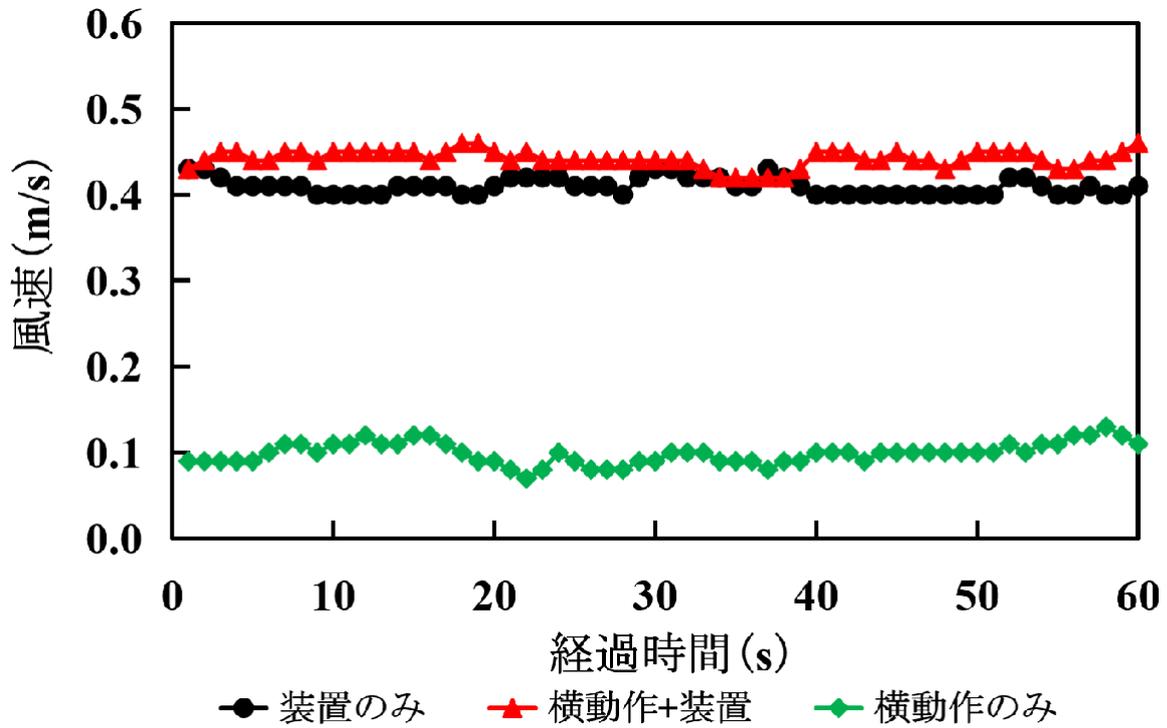


図 5.13 発生源の設置位置高さ 7cm、外乱パターン横動作、(0,100,90)での風速比較

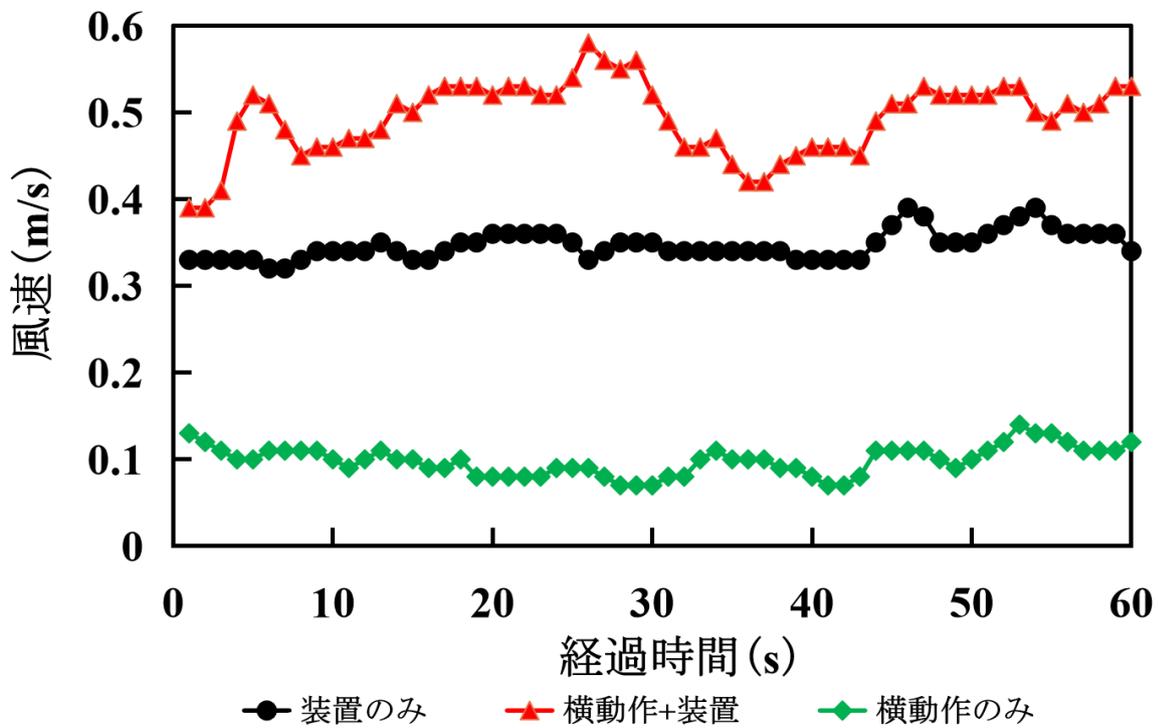


図 5.14 発生源の設置位置高さ 7cm、外乱パターン横動作、(50,0,90)での風速比較

#### (4) 考察

実験結果より、外乱パターン横動作と外乱パターン縦動作の場合、同じ測定点で比較すると、外乱パターン横動作の方が風速の変動が大きいことが明らかになった。これは、作業者の手の横動作で発生した外乱気流が、大きな風速の変動を引き起こす可能性があることがわかった。そして、外乱パターン横動作の場合、左右の手の動きによって発生した外乱気流は外乱パターン縦動作で発生した外乱気流と比べ、より左右方向及び前後方向の広い範囲での外乱気流が発生しやすいと考えられる。

さらに、開口面中心付近から上下方向(Z 軸)に離れる各発生源設置位置の中心点における風速を比較した。その結果を図 5.15 に示す。

図 5.15 より、開口面に最も近い 3cm と開口面から最も遠い、つまり手に最も近い 7cm の風速が速く、中間の 5cm が一番遅い風速になった。これは開口面に近いほど吸引風速の影響を強く受け、風速が速くなり、逆に手に近いほど手の動きで発生する外乱気流に強く影響を受けるからと考えられる。また、風速の変動に関しては高さの違いによる明確な違いは見られなかった。

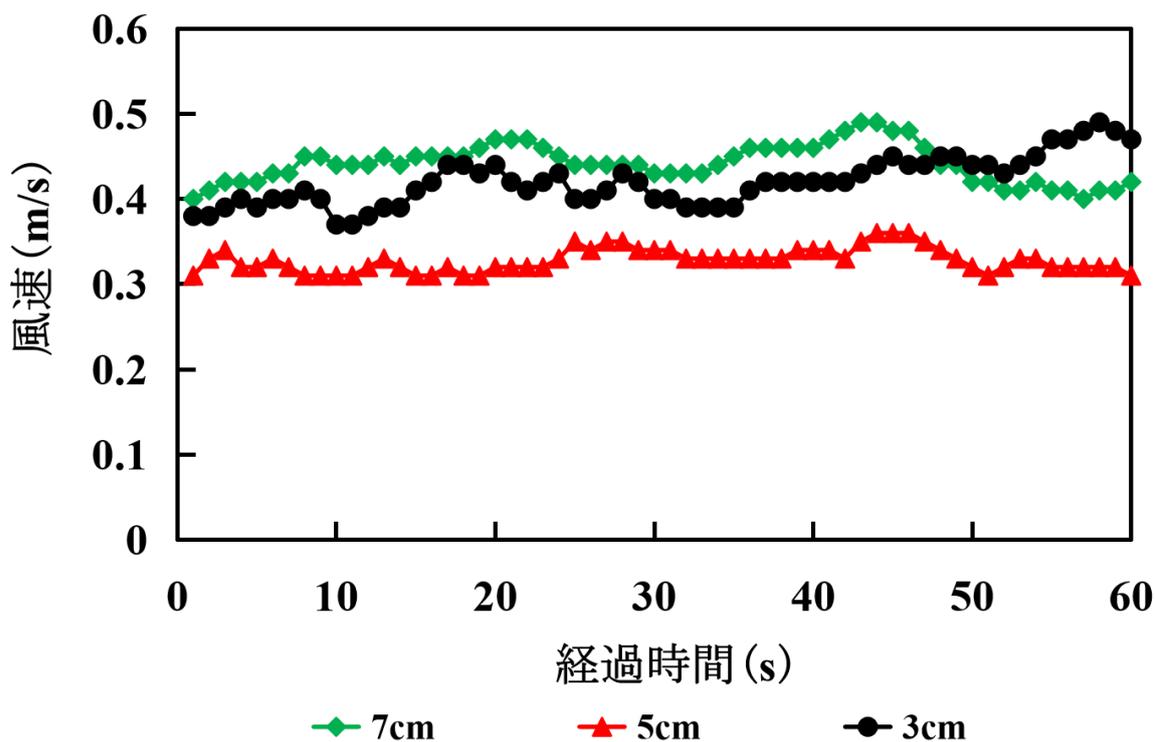


図 5.15 各発生源の設置位置、外乱パターン横動作、中心点の風速比較

また、開口面中心付近から左右方向(Y 軸)に離れる(0,0,90)と(0,100,90)の位置での風速を比較した。その結果を図 5.16 に示す。

図 5.16 より、発生源の設置位置高さ 7 cm、外乱パターン横動作の場合、(0,0,90)の風速と(0,100,90)の風速にはほぼ差がなかった。同じ外乱パターンで測定した場合、開口面中心付近から左右方向に離れる測定点では外乱気流による風速の変化が大きくなることがわかった。これは、4 章の風速分布測定の結果、風速分布が均一なので、Y=0mm と Y=100mm の風速はそれほど違わなかったことと、左右の手の動きで発生する外乱気流の風速が、X=0 の Y 軸上の Y=0mm と Y=100mm ではあまり差がないからと考えられる。

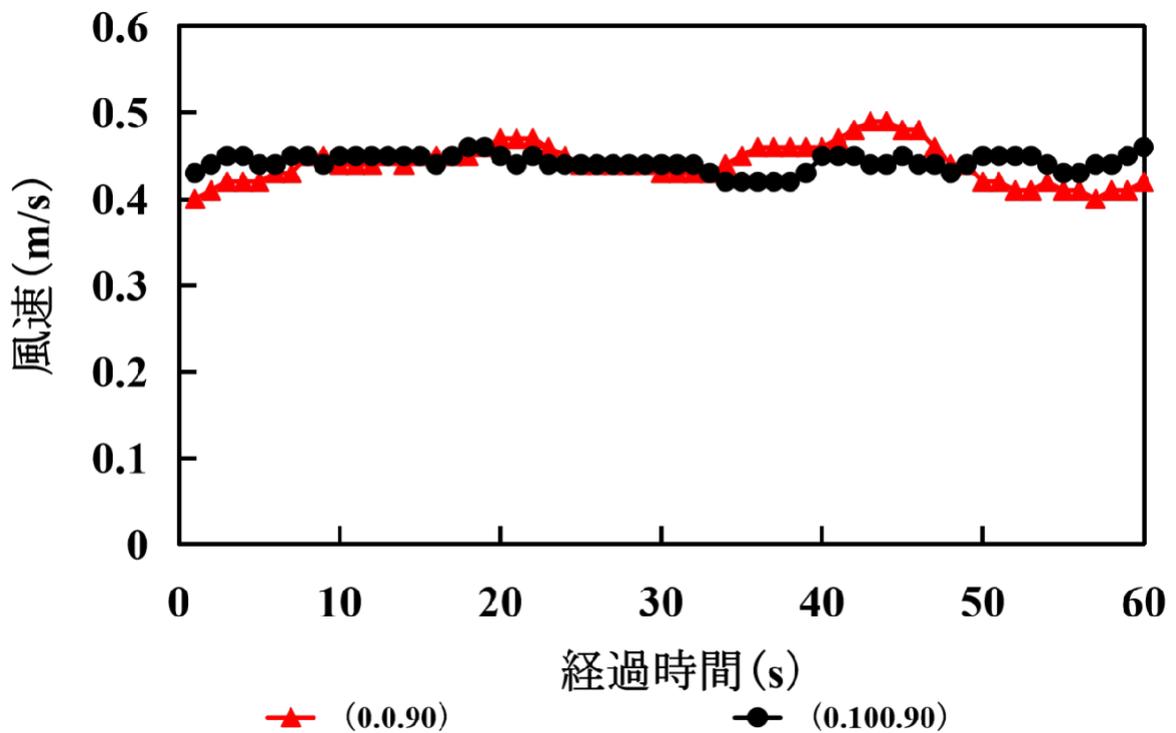


図 5.16 発生源の設置位置高さ 7cm、外乱パターン横動作、(0,0,90)と(0,100,90)の風速比較

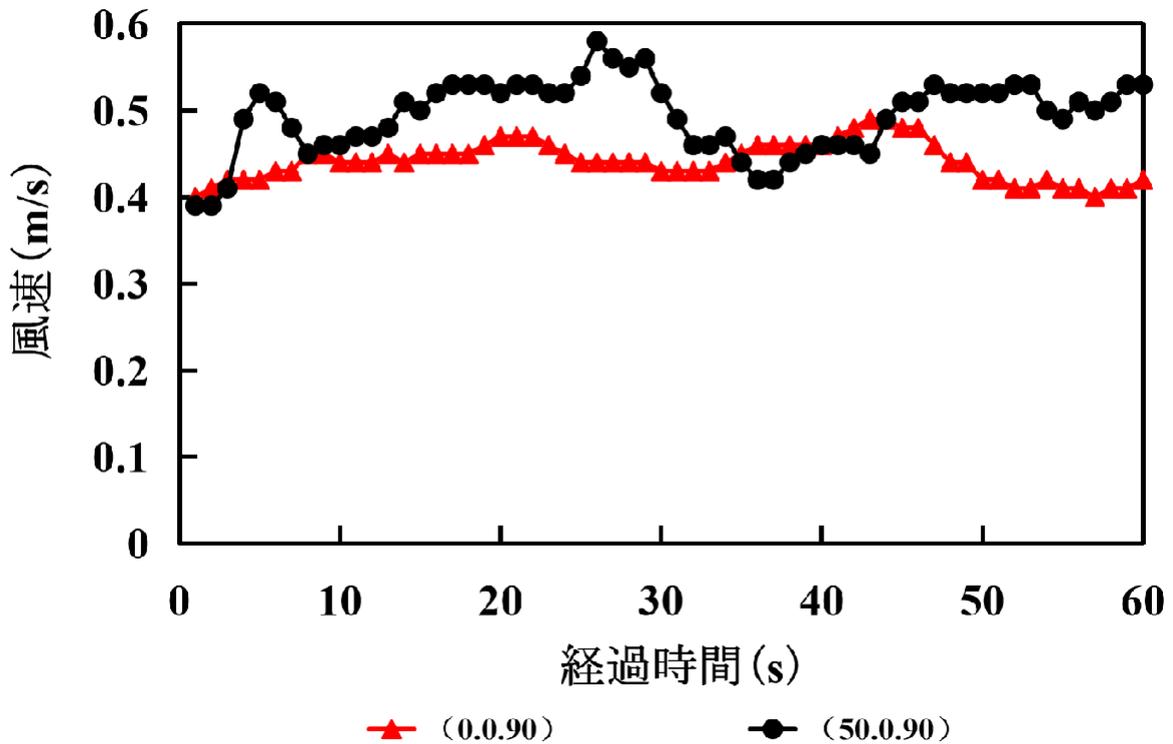


図 5.17 発生源の設置位置高さ 7cm、外乱パターン横動作、(0,0,90)と(50,0,90)の風速比較

また、開口面中心付近から前後方向(X軸)に離れる(0,0,90)と(50,0,90)の位置での風速を比較した。その結果を図 5.17 に示す。

図 5.17 より、発生源の設置位置高さ 7cm、外乱パターン横動作の場合、(0,0,90)が(50,0,90)より風速の変動が小さくなった。同じ外乱パターンで測定した場合、開口面中心付近から前後方向(X軸)に離れる測定点の方が外乱気流による風速の変化が大きいことがわかった。これは、外乱パターン横動作の場合、左右の手の動きによって前後方向に気流が発生しやすいからと考えられる。

本研究では、外乱パターン横動作による発生源付近の風速へ与える影響が大きいということがわかったので、以降の外乱気流がある場合での捕集率測定実験では、外乱パターン横動作を用いて実験を行うこととした。

### 5.3.2 外乱気流に対する換気作業台の捕集性能の評価の結果と考察

#### (1)外乱気流がある場合の発生源位置の高さを変えたときの捕集率測定結果

外乱気流がある場合、各発生源の設置位置の高さの測定値と捕集率を表 5.3～表 5.5

に示す。

表 5.3 外乱気流がある場合、高さ 3 cm、各排風量の平均濃度と捕集率

発生源の 設置位置	排風量 (m <sup>3</sup> /min)	測定値(ppb)			平均濃度 (ppb)	捕集率 (%)
		1 回目	2 回目	3 回目		
高さ 3cm	1	4910	4930	4830	4890	82.6
	2	3160	3420	3250	3270	91.1
	3	2510	2480	2410	2450	94.9

表 5.3 より、外乱気流がある場合、発生源位置が 3cm、排風量が 3m<sup>3</sup>/min の場合、捕集率は 94.9%となった。また、排風量 2m<sup>3</sup>/min の場合、捕集率は 91.1%となり、排風量 1m<sup>3</sup>/min の場合、捕集率は 82.6%となり、排風量が減少するとともに捕集率が低下した。

表 5.4 外乱気流がある場合、高さ 5 cm、各排風量の平均濃度と捕集率

発生源の 設置位置	排風量 (m <sup>3</sup> /min)	測定値(ppb)			平均濃度 (ppb)	捕集率 (%)
		1 回目	2 回目	3 回目		
高さ 5cm	1	4540	4280	4600	4480	75.5
	2	3410	3300	2940	3220	89.6
	3	2340	2310	2250	2300	89.2

表 5.4 より、外乱気流がある場合、発生源位置が 5 cm、排風量 3 m<sup>3</sup>/min 以下とした場合、捕集率がそれぞれ 89.2%、89.6%、75.5%となり、排風量が制御風速を満たすための必要排風量である 3.3m<sup>3</sup>/min より少ない場合、外乱気流が捕集率に影響を与えた。

表 5.5 外乱気流がある場合、高さ 7 cm、各排風量の平均濃度と捕集率

発生源の 設置位置	排風量 (m <sup>3</sup> /min)	測定値(ppb)			平均濃度 (ppb)	捕集率 (%)
		1 回目	2 回目	3 回目		
高さ 7cm	1	4320	4310	4250	4290	72.5
	2	3140	3160	2910	3070	85.4
	3	2190	2220	2200	2200	85.5

表 5.5 より、外乱気流がある場合、発生源位置が 7 cm、排風量 3 m<sup>3</sup>/min 以下とした場合、捕集率は 90 %以下であり、捕集率が明らかに低下した。

(2)外乱気流のありなしによる実験結果の比較

表 5.3～表 5.5 までの結果をまとめ、外乱気流がある場合の捕集率測定の結果と 4.3 の外乱気流がない場合の捕集率測定の結果を比較する。外乱気流のありなしによる各発生源位置における排風量ごとの捕集率の比較を表 5.6、図 5.18～図 5.20 に示す。

表 5.6 外乱気流のありなしによる各高さ、各排風量ごとの捕集率(%)

発生源の 設置位置	高さ 3cm		高さ 5cm		高さ 7cm	
	外乱気流 なし 捕集率	外乱気流 あり 捕集率	外乱気流 なし 捕集率	外乱気流 あり 捕集率	外乱気流 なし 捕集率	外乱気流 あり 捕集率
1	89.7	82.6	85.6	75.5	83.1	72.5
2	92.2	91.1	95.4	89.6	93.9	85.4
3	94.1	94.9	97.3	89.2	95.7	85.5

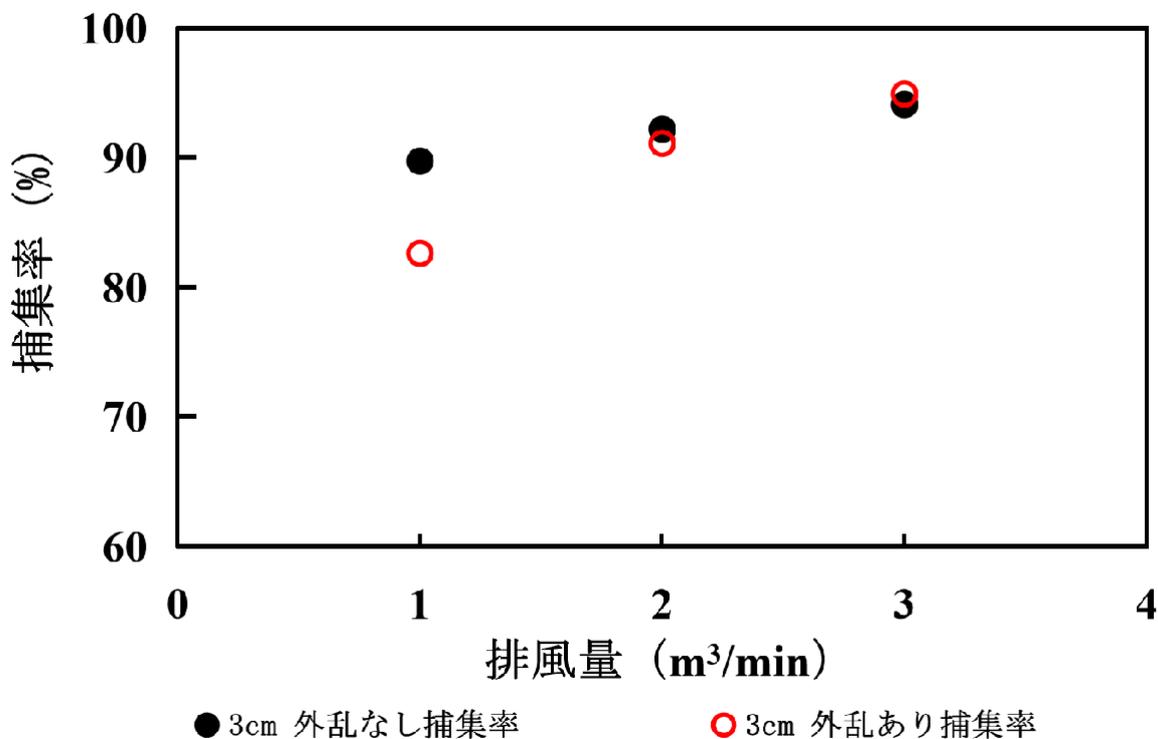


図 5.18 外乱気流のありなしによる高さ 3cm における排風量ごとの捕集率

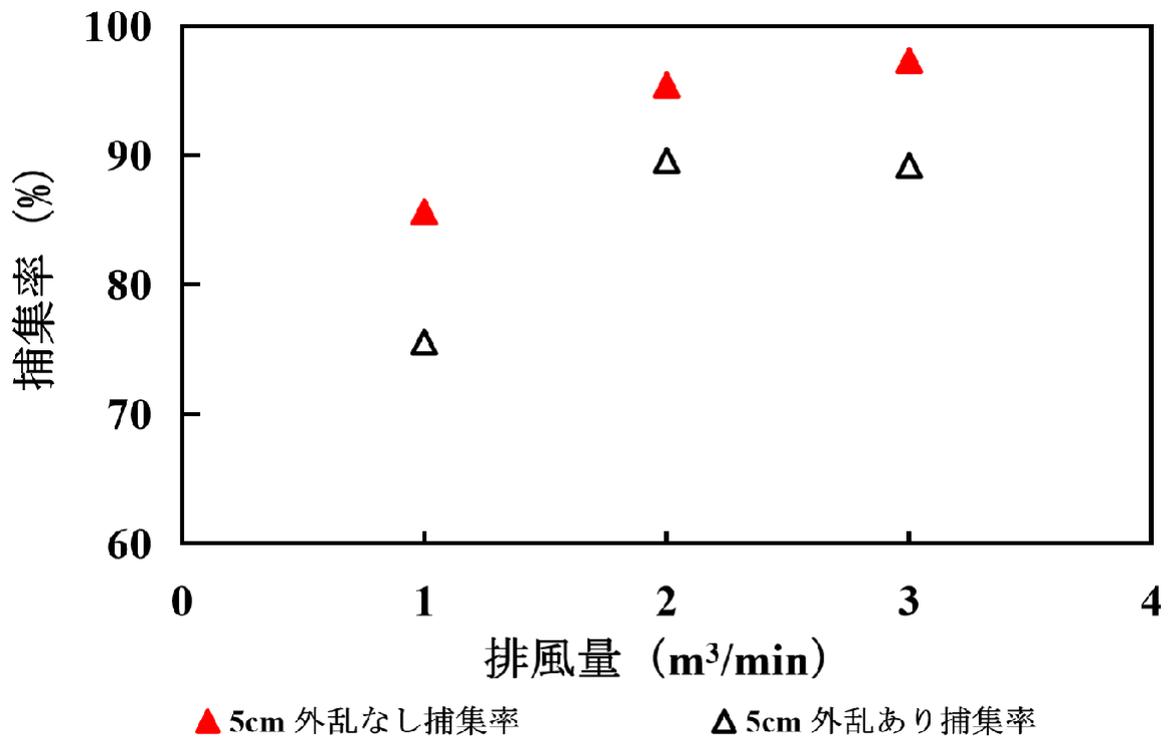


図 5.19 外乱気流のありなしによる高さ 5cm における排風量ごとの捕集率

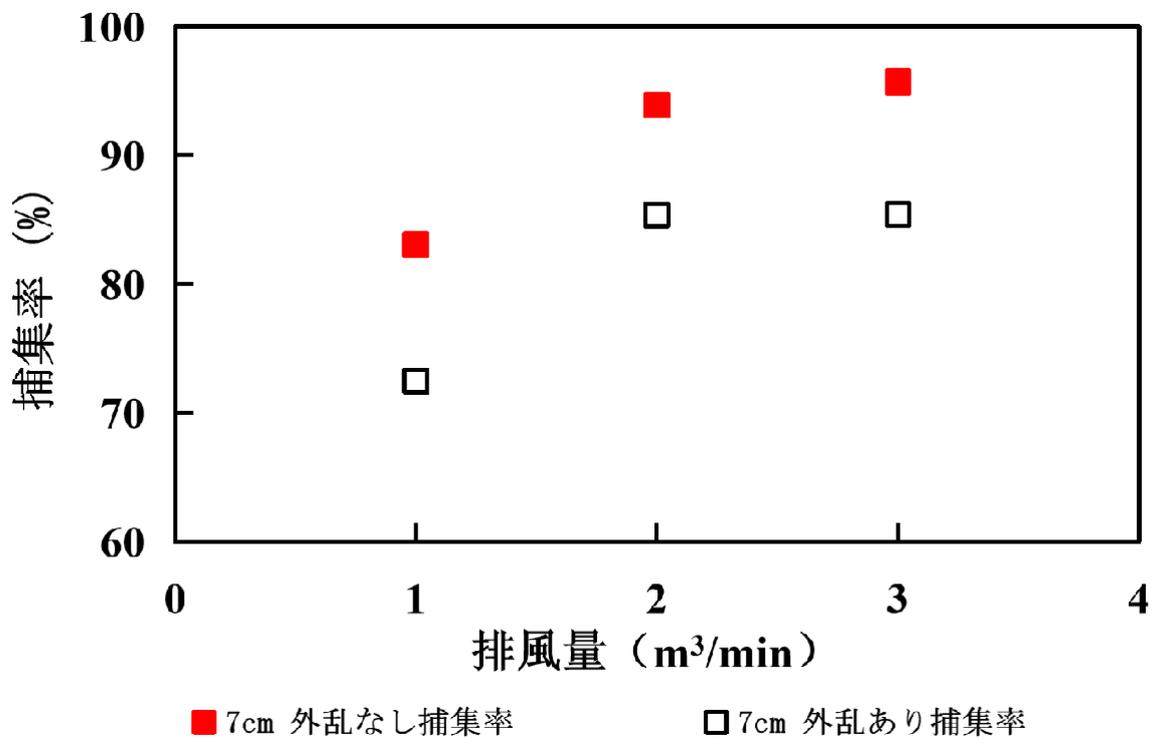


図 5.20 外乱気流のありなしによる高さ 7cm における排風量ごとの捕集率

### (3)考察

発生源の設置位置が低く(3cmの時)、排風量が2、3m<sup>3</sup>/minの場合、発生源付近の風速に影響を及ぼす外乱気流を発生させても、捕集率にあまり影響がなかった。一方で、発生源の設置位置が高く(5cm、7cmの時)、排風量が3m<sup>3</sup>/min以下の場合、外乱気流の影響が顕著になり、捕集率が90%以下に低下した。この原因としては、発生源の位置が高くなると外乱気流の発生源である作業者の手に近くなるので、発生源付近の吸引風速は、外乱気流により大きな影響を受けたと考えられる。

また、本研究のフランジ付き長方形型外付け式フードに対する式、式(5-1)から吸引風速を算出した。

$$V_c = \frac{Q}{60 \times 0.75 \times (10X^2 + A)} \quad (5-1)$$

式(5-1)より、排風量が1m<sup>3</sup>/min、発生源の設置位置が3cm、5cm、7cmの時、吸引風速はそれぞれ0.17、0.15、0.13m/sとなる。これと5.1外乱風速測定結果の図5.6、図5.9、図5.12より、作業者の手の動きによって発生する外乱気流の大きさと、発生源が高い位置にある付近の吸引風速の大きさがほぼ同じ程度であることがわかった。

これらの結果から、外乱気流の存在が換気作業台の捕集率に影響を与えることが示され、特に排風量が3m<sup>3</sup>/min以下で、発生源位置が5cm、7cmの時、捕集率が低下すると考えられる。

#### 5.3.3 排風量制御システムを搭載した場合の捕集率の結果と考察

##### (1)手の動作による外乱気流の有り無しにおける漏洩を抑える排風量とアセトンガス捕集の結果

5.3.2で発生源位置ごとの外乱気流の有り無しにおける漏洩を抑える排風量及びアセトンガスの捕集率を調べた。本研究では、換気作業台に排風量制御システムを取り込み、アセトンガスに対する捕集性能を評価するため、発生源高さが5cmの場合、それぞれ外乱気流のあり、なしの条件における漏洩を抑える排風量とアセトンガスに対する捕集率を改めて測定した。

表5.7と表5.8にそれぞれ外乱気流のあり、なしの条件におけるダクト内アセトンガス濃度と捕集率の結果を示す。結果より、手の動きがない場合、排風量が2m<sup>3</sup>/minで、アセトンガスの捕集率は96.2%を得ることができ、5.3.2で調べた同条件の結果と

ほぼ一致した。また、作業台の開口面上で手を動かした場合、排風量が  $3.3\text{m}^3/\text{min}$  でアセトンガスに対する捕集率は  $95.7\%$  となり、5.3.2 における発生源高さが  $5\text{cm}$ 、排風量  $3\text{m}^3/\text{min}$  の場合のアセトンガス捕集率である  $89.2\%$  より高いことがわかった。

表 5.7 手を動かさない場合のアセトン濃度と捕集率

発生源の 設置位置	排風量 ( $\text{m}^3/\text{min}$ )	測定値 (ppb)			平均濃度 (ppb)	捕集率 (%)
		1 回目	2 回目	3 回目		
高さ $5\text{cm}$	2	2890	3050	3000	2980	96.2

表 5.8 手による動作を加えた場合のアセトン濃度と捕集率

発生源の 設置位置	排風量 ( $\text{m}^3/\text{min}$ )	測定値 (ppb)			平均濃度 (ppb)	捕集率 (%)
		1 回目	2 回目	3 回目		
高さ $5\text{cm}$	3.3	1810	1790	1790	1800	95.7

## (2)排風量制御システムの動作条件の決定

本研究では手の横動作で生じる外乱気流を検知し、それに応じて制御システムでインバーターを稼働させ、最適な排風量を制御する手法を用いて、換気作業台が排風量制御システムを搭載することにより、アセトンガスに対する捕集率を  $90\%$  以上に保つことを目標とする。そのため、最初の段階は小型風速センサー(オムロン社製 D6F-WMEMS)で手の横動作で生じる外乱気流を検知した場合の出力電圧値を調べる必要がある。はじめに、小型風速センサーを作業者の腕につけた場合、それぞれ手の動作がない時と手を動かした時漏洩またはばく露を抑える排風量( $2\text{m}^3/\text{min}$ 、 $3.3\text{m}^3/\text{min}$ )におけるセンサーの出力電圧を調べた。また、式(3-1)を用いて、センサーの出力電圧に対する外乱気流の風速を求めた。表 5.9 と表 5.10 にそれぞれ排風量  $2\text{m}^3/\text{min}$ 、 $3.3\text{m}^3/\text{min}$  の場合における手の動作がない状態の風速センサーの出力値と風速値の結果を示す。また、表 5.11 と表 5.12 にそれぞれ排風量  $2\text{m}^3/\text{min}$ 、 $3.3\text{m}^3/\text{min}$  の場合における横動作で手を動かした状態の風速センサーで検出した風速の結果を示す。

表 5.9 排風量 2m<sup>3</sup>/min、手の動作がない状態の風速センサーで検知した風速

最大風速(m/s)	0.20	0.22	0.20	0.21
最小風速(m/s)	0.17	0.18	0.16	0.17
平均風速(m/s)	0.18	0.20	0.17	0.18

表 5.10 排風量 3.3m<sup>3</sup>/min、手の動作がない状態の風速センサーで検知した風速

最大風速(m/s)	0.23	0.20	0.23	0.22
最小風速(m/s)	0.19	0.17	0.20	0.19
平均風速(m/s)	0.21	0.18	0.21	0.20

表 5.11 排風量 2m<sup>3</sup>/min、手を動かした状態の風速センサーで検知した風速

最大風速(m/s)	0.87	0.91	0.94	0.91
最小風速(m/s)	0.12	0.17	0.14	0.14
平均風速(m/s)	0.49	0.47	0.46	0.47

表 5.12 排風量 3.3m<sup>3</sup>/min、手を動かした状態の風速センサーで検知した風速

最小風速(m/s)	0.97	1.07	0.93	0.99
最大風速(m/s)	0.11	0.14	0.11	0.12
平均風速(m/s)	0.48	0.48	0.49	0.48

結果から、排風量が 2m<sup>3</sup>/min と 3.3m<sup>3</sup>/min における手の動作がない状態の風速センサーで検知した風速はほぼ一致し、風速の平均値は約 0.2m/s となった。このことから排風量が 2m<sup>3</sup>/min と 3.3m<sup>3</sup>/min 程度の違いでは、手に装着した風速センサーにほとんど影響を及ぼさないことが分かった。そこで、排風量制御システムの設定として風速センサーの値が 0.2m/s の時に、排風量が 2m<sup>3</sup>/min、風速センサーの値が 0.5m/s の時に、排風量が 3.3m<sup>3</sup>/min になるようにした。このように設定した排風量制御システムを搭載した換気作業台について、手の横動作で生じる外乱気流がアセトンガスに対する捕集率への影響を調べ、さらに、その影響を開発した排風量制御システムで低減できるかを検証した。

### (3)排風量制御システムを搭載した場合の動作確認結果

以上のそれぞれ手の動作の有りなしに対する漏洩を抑える排風量と排風量ごとの外乱気流風速の関係を制御システムに取り込み、ネイルサロンでの現場調査におけるネイリング作業中の作業者の手の動作頻度、すなわち、60s 間隔で1分間のネイリング作業をする手の動作頻度を参考にし、換気作業台の上でこの動作を実施した。また、排風量制御システムを搭載した時の外乱気流と排風量を監視すると同時に、動作ごとのアセトンガス濃度も測定し、捕集率を求めた。図 5.21 に手の動作が有り無しの場合における外乱気流風速と排風量の 10 秒間移動平均値の結果を示す。

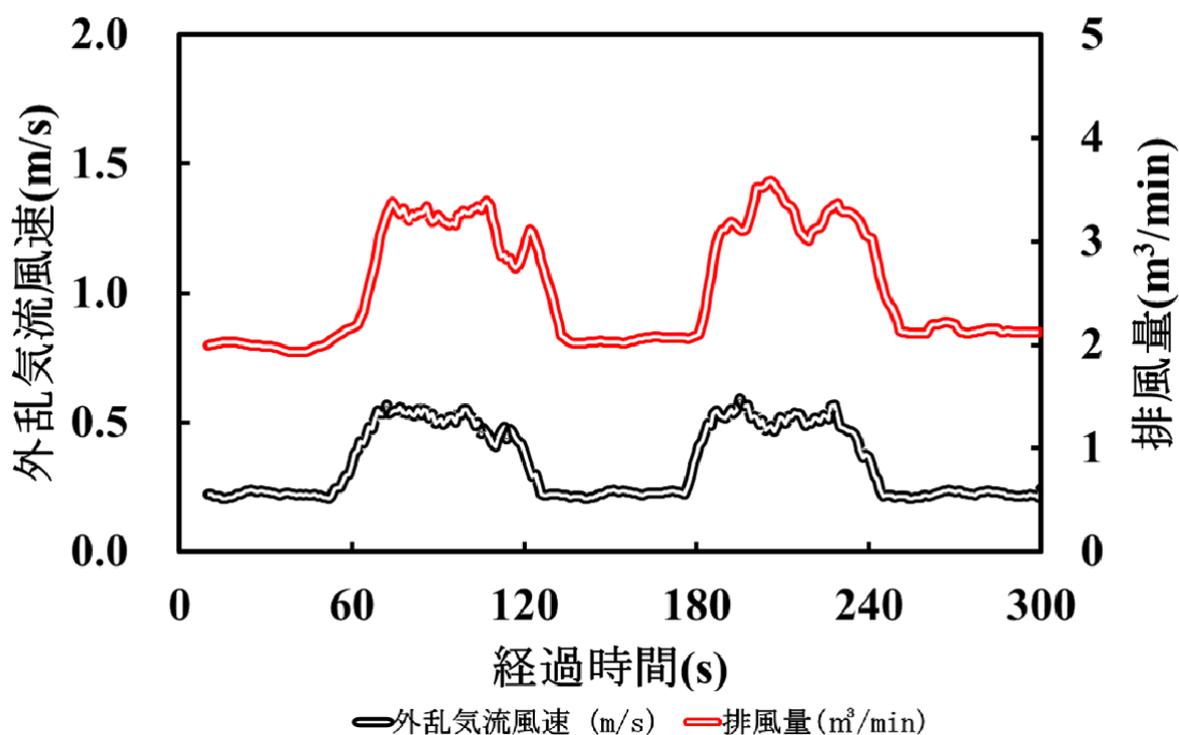


図 5.21 手の動作が有り無しの場合における外乱気流風速と排風量の結果

図 5.21 より、手の動きがない場合、風速センサーで検知した外乱気流風速はほとんど変化がなく、風速の測定値はほぼ表 5.3 の風速と一致した。また、手の動きがない場合、その時の外乱検知風速である 0.2m/s のときの設定排風量である 2.0m³/min で稼働することが確認できた。

一方、手を動かした場合、風速センサーで検知した外乱気流風速の変化は手の動きがない場合より大きくなるが、その時の外乱検知風速である 0.5m/s のとき、排風量はほぼ 3.3.m³/min 前後で稼働することが確認できた。次に動作ごとの排風量積算値とアセトンガスの捕集率について考察する。

#### (4)手の動作ごとの排风量とアセトンガスに対する捕集率についての考察

表 5.13 に手の動作ごとの外乱気流風速及びアセトンガス捕集率を示す。表 5.13 より、それぞれ手の動きがない場合(外乱気流風速が 0.2m/s)と手を動かした場合(外乱気流風速が 0.5m/s)における外乱気流風速の結果は表 5.3 の結果とほぼ一致した。また、各時間間隔でのアセトンガスに対する捕集率も 90%以上となり、特に手の動きがない場合のアセトンガスに対する捕集率はほぼ 95%以上となった。

そして、本実験の発生源高さが 5cm の条件において、従来の局所排気装置設計する際に、式(5-1)で必要排风量を計算すると 3.3m<sup>3</sup>/min となる。この結果を用いて、今回の制御システムを搭載した換気作業台における 5 分間測定の排风量積算値と比べた。式(5-1)で求めた 5 分間の排风量積算値は 16.5m<sup>3</sup>となる。一方、表 5.13 より、排风量制御システムを搭載した場合における 5 分間で測定した排风量積算値は 12.41m<sup>3</sup>となる。つまり、排风量制御システムの搭載により、アセトンガスの捕集率を 90%以上に維持しつつ、排风量は従来の必要排风量より 4.09m<sup>3</sup>(おおよそ 25%)削減ができた。

表 5.13 手による動作ごとの排风量、外乱気流風速及びアセトンガス捕集率の結果

手による動作	なし	あり	なし	あり	なし
時間間隔	0~60s	61s~120s	121s~180s	181s~240s	241s~300s
外乱気流風速 平均値(m/s)	0.22	0.49	0.20	0.52	0.21
排风量 (m <sup>3</sup> /min)	2.04	3.15	1.95	3.22	2.05
アセトンガス の捕集率 (%)	96.4	92.3	94.7	94.1	96.0

さらに、手を動かした場合(61s~120s、181s~240s)の積算风量は、従来の局所排気装置の設計では 6.6m<sup>3</sup>になる。一方、今回の排风量制御システムを搭載した換気作業台では表 5.13 より、アセトンガスに対する捕集率を 90%以上に維持しつつも、積算风量は 6.37 m<sup>3</sup>となり、风量の削減効果があった。

以上より、ネイルサロンでのネイリング作業に応じて作製した換気作業台に排风量制御システムを搭載し、ネイリストの作業による手の動きで生じる外乱気流に対して、アセトンガスに対する捕集率を高い水準(90%以上)に維持した上で、制御風速を満た

すような一定の排風量よりも、外乱気流がない時は少ない排風量で済み、外乱気流がある場合には、それに応じて必要な排風量に自動制御することができる。

#### 5.4 まとめ

ネイルサロンなどの低濃度ばく露が発生する労働現場に応じて、第4章で有害物質を含む作業環境のばく露リスクを低減させるための換気作業台を開発した。一方、ネイルサロンの様々な作業において、従来の換気装置の有効性が懸念され、特にマニキュアなどの作業を行う際に、揮発性の高い性質をもつアセトンなどを含む蒸気は手の作業から生じる気流に乗り、作業員または顧客の呼吸域に拡散させるリスクが高い。そのため、本研究では、実際のネイリング作業中に作業員がよく実施する動作を模擬して外乱気流を発生させた。その作業における手の動作によって発生源付近の風速にどう影響を与えるかを調べた。その結果、作業員の手の横動作による外乱気流が、風速により大きな変動を引き起こす可能性があることがわかった。そして、手の横動作で発生した外乱気流に対する換気作業台の捕集性能を評価した。その結果、外乱気流の存在が換気作業台の捕集率に影響を与えることが示され、特に排風量が  $3\text{m}^3/\text{min}$  以下で、発生源位置が  $5\text{cm}$ 、 $7\text{cm}$  の時、捕集率が低下することが確認された。さらに、外乱気流の影響を低減させるため、3章で開発した排風量制御システムを換気作業台に導入し、アセトンガスに対する捕集率で排風量制御システムの性能を評価した。その結果、排風量制御システムを搭載した換気作業台は、外乱気流が存在しない場合はアセトンガスの発生に対して有機則で定められた制御風速で求めた必要排風量より少ない排風量で捕集率を90%以上に維持し、外乱気流が存在する場合でも、排風量制御システムが機能し、アセトンガスの捕集率をほとんど90%以上にすることができ、有害物質に対する捕集効果と排風量削減効果の両方を達成した。以上の結果から、ネイルサロンなどの作業員の手の動きによって発生する外乱気流が存在する現場に対しても有効性を示すことができた。

## 参考文献

- 1) Koniecki. D, Wang. R, Moody, R. P., Zhu. J, Phthalates in Cosmetic and Personal Care Products: Concentrations and Possible Dermal Exposure, *Environ*, **111**, 329-336 (2011).
- 2) Guo. Y, Kannan. K, A Survey of Phthalates and Parabens in Personal Care Products from the United States and Its Implications for Human Exposure, *Environ. Sci. Technol.*, **47**, 14442-14449 (2013).
- 3) Young. A. S, Allen. J. G, Kim. U.-J, Seller. S, Webster. T, F. Kannan. K, Ceballos. D. M, Phthalate and Organophosphate Plasticizers in Nail Polish: Evaluation of Labels and Ingredients, *Environ. Sci. Technol.*, **52**, 12841–12850 (2018).
- 4) Mendelsohn. E, Hagopian. A, Hoffman. K, Butt. C, M. Lorenzo. A, Congleton. J, Webster. T. F, Stapleton. H. M, Nail Polish as a Source of Exposure to Triphenyl Phosphate. *Environ*, **86**, 45–51 (2016).
- 5) Castorina. R, Bradman. A, Stapleton. H. M, Butt. C, Avery. D, Harley. K. G, Gunier. R. B, Holland. N, Eskenazi. B, Current-Use Flame Retardants: Maternal Exposure and Neuro development in Children of the CHAMACOS Cohort, *Chemosphere*2017, **189**, 574–580 (2017).
- 6) Lenters. V, Portengen. L, Rignell-Hydbom. A, Jönsson. B. A.G, Lindh. C. H, Piersma. A. H. Toft. G, Bonde. J. P, Heederik. D, Rylander. L, Vermeulen. R, Prenatal Phthalate, Perfluoroalkyl Acid, and Organochlorine Exposures and Term Birth Weight in Three Birth Cohorts: Multi-Pollutant Models Based on Elastic Net Regression. *Environ, Health Perspect*, **124**, 365–372 (2016).
- 7) Carignan. C. C, Mínguez-Alarcón. L, Butt. C. M, Williams. P.L, Meeker. J. D, Stapleton. H. M, Toth. T. L, Ford. J. B, Hauser. R, Urinary Concentrations of Organophosphate Flame Retardant Metabolites and Pregnancy Outcomes among Women Undergoing in Vitro Fertilization. *Environ, Health Perspect*, **125**, 087018 (2017).
- 8) Carignan. C. C, Mínguez-Alarcón. L, Williams. P. L, Meeker. J. D, Stapleton. H. M, Butt. C. M, Toth. T. L, Ford. J. B, Hauser. R, Paternal Urinary Concentrations of Organophosphate Flame Retardant Metabolites, Fertility Measures, and Pregnancy Outcomes among Couples Undergoing in Vitro Fertilization, *Environ*, **111**, 232–238 (2018).
- 9) Meeker. J. D, Cooper. E. M, Stapleton. H. M, Hauser. R, Exploratory Analysis of Urinary Metabolites of Phosphorus Containing Flame Retardants in Relation to Markers of Male Reproductive Health *Endocr*, No. e26306(2013).

- 10) Meeker. J. D, Stapleton. H. M, House Dust Concentrations of Organophosphate Flame Retardants in Relation to Hormone Levels and Semen Quality Parameters, *Environ. Health Perspect*, **118**, 318–323 (2010).
- 11) Ingle. M. E, Mínguez-Alarcón. L, Carignan. C. C, Butt. C. M, Stapleton. H. M, Williams. P. L, Ford. J. B, Hauser. R, Meeker. J. D, The Association between Urinary Concentrations of Phosphorous-Containing Flame Retardant Metabolites and Semen Parameters among Men from a Fertility Clinic, *Int, J. Hyg. Environ. Health*, **221**, 809–815 (2018).
- 12) Hoffman. K, Lorenzo. A, Butt. C. M, Hammel. S. C, Henderson. B. B, Roman. S. A., Scheri. R. P, Stapleton. H. M, Sosa. J. A, Exposure to Flame Retardant Chemicals and Occurrence and Severity of Papillary Thyroid Cancer: A Case-Control Study, *Environ. Int*, **107**, 235–242 (2017).
- 13) OSHA (1999), Ventilation Investigation, Retrieved March 26, (2014).
- 14) Linh V. Nguyen, Miriam L. Diamond, Sheila Kalenge, Tracy L. Kirkham, D. Linn Holness, and Victoria H. Arrandale, Occupational Exposure of Canadian Nail Salon Workers to Plasticizers Including Phthalates and Organophosphate Esters, *ENVIRONMENTAL Science & Technology*, **56**, 3193-3203 (2022).

## 第 6 章 結言

本研究では、有害物質を取り扱う作業場において、有害物質の作業環境濃度や作業者に対するばく露濃度を低減する手段である局所排気装置のフードを研究対象に、フードの捕集能力を低下させる外乱気流の影響を低減させるために、従来の方法よりも簡便な方法として、風速センサーで外乱風速を監視し、外乱気流の風速に応じて、最適な排風量に制御するという独自の方法について検討した。結言として、以下に本研究で得られた知見を示す。

### 第 2 章 側方吸引型外付け式フードにおける外乱気流を考慮した漏洩を抑制する必要排風量

本章では、作業台上で作業する場合の 3 種類の外付け式フード(開口面サイズ:W500mm×H50mm、W500mm×H100mm、W500mm×H300mm)を研究対象として、フードの開口面に対し異なる方向から外乱気流を発生させた場合の漏洩を抑制できる必要排風量を求めた。その結果、いずれのフードサイズに対しても、横風方向の外乱気流の条件が、他の風向の外乱気流より漏洩を制御する必要排風量が大きいことがわかった。また、フードの開口面サイズによる外乱気流に対する漏洩を制御できる排風量の結果から、発生源の高さに対するフードの縦幅も、フードの捕捉性能に影響することがわかった。

そして、特化則・有機則等で規定されるガス状物質の制御風速値 0.5m/s を用いた場合、作業台上に設置した外付け式長方形型フードの条件においては、実験で測定した必要排風量は Dalla Valle の式で求めた排風量の 67%、55%、48%となった。このように、従来の制御風速を物性(粒径など)の違いや現場の状況などに応じて柔軟に運用することにより、局排を使用しても溶接現場で問題となっている溶接シールドガスへの妨害による溶接不良等の問題解決に貢献できると考えられる。また、異なる外乱気流の条件及びフードの開口面サイズを考慮し、各現場に適した必要排風量を求めて局所排気装置を設計すれば、従来よりも低風量化することが可能となる。

また、CFD 解析でも実験結果と近い結果を得ることができた。以上より、有害物質が発生する現場で局所排気装置を設ける場合、性能要件を制御風速で一律に決めるのではなく、現場の気流の状況や作業内容などから吸引風速を柔軟に運用することにより、作業環境の改善やばく露濃度低減等の問題解決に貢献できることが期待される。

### 第 3 章 側方吸引型外付け式フードにおける外乱気流に対する排風量を制御する発散防止抑制装置の開発及び性能評価

近年は生産現場において取り扱う化学物質の種類・工程が多様化・複雑化する中、リスクに基づく合理的な作業管理をすることにより、作業現場によっては制御風速以下でも作業環境が良好に維持できる場合が多くあると考えられる。そのため、制御風速のみを局所排気装置の性能要件として設計すると、必要以上に過剰な風量で排気する結果を招いてしまう。これらのことを考慮して、2012年(平成24年)に有機溶剤中毒予防規則等の一部改正があり、一定の条件のもとで局所排気装置等以外の作業の実態に応じた多様な発散防止抑制措置の導入が可能になり、制御風速を満たさない場合でも、使用が許可されることになった。そのため、第3章では、作業台上に設置した側方吸引型外付け式フードを対象に、開口面に対して3方向から外乱気流を発生させ、外乱気流の風速と漏洩を抑制できる必要排風量について調べた。従来から考えられる漏れ濃度やばく露濃度を監視し、排風量を制御するという方法では、ガスセンサーの耐久性、混合ガスの影響、作業への影響、コスト面などの問題がある。そこで本研究の結果に基づき、風速センサーで外乱気流風速を監視し排風量を制御するという独自で簡便な排風量制御システムを搭載した発散防止抑制装置を試作した。

また、外乱気流風速の2つの条件(外乱気流風速が一定の時間間隔で段階的に上昇そして下降させた場合、外乱気流風速の変動幅が大きい場合)下で、当発散防止抑制装置を用いて、煙発生実験(トレーサー粒子法)で漏洩に対する捕集性能を確認した。その結果、どちらの外乱気流の条件に対しても、制御風速を満たす一定の排風量よりも、外乱気流がない時は少ない排風量で済み、外乱気流がある場合は、それに応じて漏洩を抑える最適な排風量に制御することができた。

### 第 4 章 有機溶剤作業に対するばく露防止対策用換気作業の開口面周りの風速分布測定及び捕集性能の評価

ネイルサロンや塗装、洗浄、印刷などの有機溶剤を取り扱う現場では、低濃度のばく露でも健康に悪影響を及ぼす可能性があると考えられる。そのため、多くのネイルサロンでは、環境中、特に呼吸域の空気環境中による人の健康影響を及ぼす有害物質を除去するため、換気装置の設置は必要となる。また、ネイルサロンなどの現場における多様な作業に伴い、作業者の口や鼻の位置が移動することが考えられる。その際に、排気装置の吸引で生じる開口面上の風速分布の偏りが大きいと、風速の低い領域から有害物質の漏洩が発生する可能性があり、特に作業者の口や鼻が移動した際に、

作業者が高濃度の有害物質にばく露する危険性がある。

本章では、実際に有機溶剤を扱うネイルサロンなどの現場を想定し、縦 800 mm×横 600mm×高さ 750mm の作業台を使用し、実際の作業者の作業範囲を考慮して、作業に影響が少ないように外付け式下方吸引長方形型フード(開口面サイズ：W400mm×H300mm)を備えた換気作業台を作製した。また、作製したフード付き換気作業台は作業台面が外付け式フードに対してフランジの役割を果たしている。その上で、フードの開口面上に開口率の異なる 3 つのパンチング(22.7%、32.6%、40.3%)をそれぞれ設置した場合において、設定した捕捉点での風速や開口面上の風速分布にどう影響を与えるかを調べるため、風速測定を行った。また、実際に有機溶剤を扱う現場を想定して、有機溶剤であるアセトンガスを発生させ、換気作業台の排風量を変化させた場合の捕集率の測定を行った。その結果、下方吸引でアセトンガスの吸引に最も効果的な開口率 40.3%のパンチングを設置した換気作業台を用いて、法令で定められている制御風速を満たすように求めた必要排風量より少ない排風量でもアセトンガスに対する捕集率を 90%以上まで達成することができた。さらに、ダクトの設置位置と向きを変えることによって、開口面上の風速分布の均一性を改善することができた。

## 第 5 章 有機溶剤作業に対する本開発システムを搭載した換気作業台の性能評価

本章では、ネイルサロンでのマニキュアなどの作業を行う際に、揮発性の高い性質をもつアセトンなどを含む蒸気は作業による手の動きから生じる気流に着目し、現場で調査した作業者の手の動きで生じる外乱気流を模擬し、発生源付近の風速の変化を測定した。そして、外乱気流を発生させた状態で再度捕集率の測定を行い、外乱気流がない場合の結果と比較した。その結果、作業者の手の横動作による外乱気流が、風速により大きな変動を引き起こす可能性があることがわかった。そして、手の横動作で発生した外乱気流に対する換気作業台の捕集性能を評価した。その結果、外乱気流の存在が換気作業台の捕集率に影響を与えることが示され、特に排風量が 3 m<sup>3</sup>/min 以下で、発生源位置が 5cm、7cm の時、捕集率が低下することが確認された。さらに、外乱気流の影響を低減させるため、3 章で開発した排風量制御システムを換気作業台に導入し、アセトンガスに対する捕集率で制御システムの性能を評価した。その結果、排風量制御システムを搭載した換気作業台は、外乱気流が存在しない場合はアセトンガスの発生に対して有機則で定められた制御風速で求めた必要排風量より少ない排風量で捕集率を 90%以上に維持し、外乱気流が存在する場合でも、排風量制御システムが機能し、アセトンガスに対する捕集率をほとんど 90%以上にすることができ、有害

物質に対する捕集効果と排風量削減効果の両方を達成した。以上の結果から、ネイルサロンなどの作業者の手の動きによって発生する外乱気流が存在する現場に対しても有効性を示すことができた。

#### まとめ

以上より、本論文では作業環境の改善やばく露防止対策に用いる局所排気装置等の性質について述べ、作業台上に設置した外付け式フードを対象として、外乱気流の発生方向及び風速と漏洩を抑える排風量の関係を調べ、フード周辺の外乱気流を数か所に設置した風速センサーで検知し、多様に変動する外乱気流が存在する現場に対する排風量制御システムを搭載した発散防止抑制装置を開発した。従来は制御風速によって局所排気装置の排風量が規定されていたが、この作業環境改善用の発散防止抑制装置を用いて、実際の使用を想定した外乱気流の存在下でも排風量の削減効果と漏洩やばく露を抑制できることを示した。このように本研究の結果、作業現場の状況に応じ、制御風速以下の発散防止抑制装置等の運用ができることが分かった。

## 発表論文

本研究に関係した発表論文は以下の通りである。

1. Boyuan TIAN, Yuji KUBOTA, Masaru MURATA (2023.6) Research on the relationship between the centerline velocity, aspect ratio and exhaust airflow rate for a slot and a rectangular capture hood in an LEV system、Industrial Health 61、222-231.
2. 田博源, 久保田裕仁 (2023.11) 側方吸引型外付け式フードにおける外乱気流を考慮した漏洩を抑制する必要排風量に関する研究、作業環境（第44巻第6号）、30-37.

## 学会発表

本研究に関係した学会発表は以下の通りである。

1. Boyuan TIAN, Daiki ITO, Yuji KUBOTA, Masaru MURATA. A Development of Equation Estimating Flowrates for Slot Hoods of Local Exhaust Ventilation], The 4th Asian Network of Occupational Hygiene (ANO) Conference 2019、2019.11.9-12.

2. Boyuan TIAN, Yuji KUBOTA, Masaru MURATA. Development of Exhaust Flow Rate Equation for Slot Capturing Hood in Local Exhaust Ventilation、The 12th IOHA INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE、2021.11.9-12.

### **The Abstract Award for the poster presentation in IOHA 2021.**

3. Yuji KUBOTA, Boyuan TIAN, Masaru MURATA. The Effect of Cross Draft by the Motions around the Capture Hood on Exposure Concentration、The 12th IOHA INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE、2021.11.9-12.

4. 田博源、伊藤大輝、久保田裕仁、村田克. CFD 解析と実験室実験による外付け式スロット型フードの開口面まわりの気流解析、第 58 回日本労働衛生工学会・第 39 回作業環境測定研究発表会、2018 年 11 月 14 日 - 16 日.

5. 田博源、伊藤大輝、久保田裕仁、村田克. 側方吸引型外付け式スロット型フードの必要排风量計算式の開発、第 59 回日本労働衛生工学会・第 40 回作業環境測定研究発表会、2019 年 11 月 13 日 - 15 日.

6. 伊藤大輝、田博源、久保田裕仁、村田克. 外付け式スロット型フードの開口面周りの風速分布測定、第 59 回日本労働衛生工学会・第 40 回作業環境測定研究発表会、2019 年 11 月 13 日 - 15.

7. 田博源、久保田裕仁、村田克. 側方吸引型外付け式スロット型フードにおける漏洩及びばく露防止に対する外乱気流を考慮した発散抑制装置の開発、第 60 回日本労働衛生工学会・第 42 回作業環境測定研究発表会、2021 年 11 月 17 日 - 19 日.

8. 田博源、伊藤大輝、青木真誉、久保田裕仁、村田克. 有機溶剤を対象とした卓上型局所排気フードの開発における風速分布および曝露濃度抑制の検討、第 60 回日本労働衛生工学会・第 42 回作業環境測定研究発表会、2021 年 11 月 17 日 - 19 日.

9. 田博源、久保田裕仁. 側方吸引型外付け式スロット型フードにおける漏洩及びばく露防止に対する外乱気流を考慮した発散抑制装置の開発に関する研究、第 61 回日本労働衛生工学会・第 43 回作業環境測定研究発表会、2022 年 10 月 26 日 - 28 日.

10. 石旭龍、山本悠斗、田博源、久保田裕仁. 有機溶剤作業に対する外乱気流を考慮したばく露防止対策用換気作業台の開発に関する研究、第 61 回日本労働衛生工学会・

第 4 3 回作業環境測定研究発表会、2022 年 10 月 26 日 - 28 日.

11. 田博源, 久保田裕仁. 外乱気流に応じた排风量制御機能を搭載した発散防止抑制装置の開発、第 62 回日本労働衛生工学会・第 4 4 回作業環境測定研究発表会、2023 年 11 月 8 日 - 10 日.

## 謝辞

この論文の完成にあたり、多くの方々に助けられ、支えられました。心より感謝の意を表します。

はじめに、ご多忙の中、親切にご指導いただいた主査としてご指導下さいました早稲田大学教授大河内博先生に厚く御礼申し上げます。博士論文をまとめるにあたり執筆した投稿論文の中には、学科の助手になってから執筆を始めたものもございましたので、同研究室の学生のご指導でお忙しい中、添削をしていただき大変お世話になりました。また、本研究の実施の機会を与えて戴き、その遂行にあたって終始、ご指導頂きました。ここに深謝の意を表します。

本研究を行うにあたり、手厚くご指導とご協力をいただきました、早稲田大学理工学術院村田克先生、早稲田大学理工学術院招聘研究員久保田裕仁先生には、心から感謝の意を申し上げます。ご多忙にもかかわらず研究においていつも丁寧で熱心なご指導とご助言を賜りました久保田裕仁先生に心から御礼申し上げます。また、久保田先生の専門的な知識と的確なアドバイスは、私の研究が進む上で大いに助けとなりました。終始忍耐強くご指導いただき、心から感謝申し上げます。

また副査である早稲田大学理工学術院教授 伊坪徳広先生、川邊能成先生にもお忙しい中、本論文の査読をしていただき、そして貴重なご意見、ご指摘、アドバイスを頂き心より感謝申し上げます。さらに、局所排気班の伊藤大輝氏、青木真誉、石旭龍氏、山本悠斗氏からも、研究活動において貴重な協力と助言をいただきました。その援助に感謝申し上げます。研究室の皆様には日頃から有益な議論や励ましをいただき、共に研究を進める上での助けとなりましたことに感謝いたします。

研究において協力していただいた興研株式会社先進技術センターの皆様にも心から感謝申し上げます。貴重な研究スペースのご提供及びサポートなど、大変お世話になりました。

最後に、私の研究生生活を支え、温かいサポートをしてくれた家族や友人にも深く感謝いたします。

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名： 田 博源 印

(2024年 2月 7日現在)

種類別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
投稿論文	1) 兼間貴子, 渡邊ひかり, 田博源, 久保田裕仁, 村田克 (2022.11) フィットテストにおいて凝縮核計数法と光散乱法を用いた2機の測定器の合否判定に関する研究、呼吸保護54号、2-12.
	2) 兼間貴子, 美藤杏佳, 田博源, 久保田裕仁 (2022.11) 取替え式防じんマスクに対するフィットテスト用サンプリング方法の比較検討、呼吸保護55号、10-20.
	<input type="radio"/> 3) Boyuan TIAN, Yuji KUBOTA, Masaru MURATA (2023.6) Research on the relationship between the centerline velocity, aspect ratio and exhaust airflow rate for a slot and a rectangular capture hood in an LEV system、Industrial Health 61、222-231.
	<input type="radio"/> 4) 田博源, 久保田裕仁 (2023.11) 側方吸引型外付け式フードにおける外乱気流を考慮した漏洩を抑制する必要排风量に関する研究、作業環境(第44巻第6号)、30-37.
学会発表 国際会議	<input type="radio"/> 1) Boyuan TIAN, Daiki ITO, Yuji KUBOTA, Masaru MURATA. A Development of Equation Estimating Flowrates for Slot Hoods of Local Exhaust Ventilation], The 4th Asian Network of Occupational Hygiene (ANO) Conference 2019、2019. 11. 9-12.
	<input type="radio"/> 2) Boyuan TIAN, Yuji KUBOTA, Masaru MURATA. Development of Exhaust Flow Rate Equation for Slot Capturing Hood in Local Exhaust Ventilation、The 12th IOHA INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE、2021.11.9-12.
	3) Yuji KUBOTA, Boyuan TIAN, Masaru MURATA. The Effect of Cross Draft by the Motions around the Capture Hood on Exposure Concentration, The 12th IOHA INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE、2021.11.9-12.
学会発表 国内会議	<input type="radio"/> 4) 田博源, 伊藤大輝, 久保田裕仁, 村田克. CFD 解析と実験室実験による外付け式スロット型フードの開口面まわりの気流解析、第58回日本労働衛生工学会・第39回作業環境測定研究発表会、2018年11月14日-16日.
	<input type="radio"/> 5) 田博源, 伊藤大輝, 久保田裕仁, 村田克. 側方吸引型外付け式スロット型フードの必要排风量計算式の開発、第59回日本労働衛生工学会・第40回作業環境測定研究発表会、2019年11月13日-15日.
	6) 伊藤大輝, 田博源, 久保田裕仁, 村田克. 外付け式スロット型フードの開口面周りの風速分布測定、第59回日本労働衛生工学会・第40回作業環境測定研究発表会、2019年11月13日-15.
	<input type="radio"/> 7) 田博源, 久保田裕仁, 村田克. 側方吸引型外付け式スロット型フードにおける漏洩及びばく露防止に対する外乱気流を考慮した発散抑制装置の開発、第60回日本労働衛生工学会・第42回作業環境測定研究発表会、2021年11月17日-19日.
	<input type="radio"/> 8) 田博源, 伊藤大輝, 青木真誉, 久保田裕仁, 村田克. 有機溶剤を対象とした卓上型局所排気フードの開発における風速分布および曝露濃度抑制の検討、第60回日本労働衛生工学会・第42回作業環境測定研究発表会、2021年11月17日-19日.
	9) 渡邊ひかり, 兼間貴子, 田博源, Myint Myint Khin, 久保田裕仁, 村田克. 呼吸用保護具のフィットテストの方法に関する検討(その2)、2021年度呼吸保護に関する研究発表会、2021年12月9日.

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名： 田 博源 印

(2024年 2月 7日現在)

種類別		題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
	<input type="radio"/>	10) 田博源, 久保田裕仁. 側方吸引型外付け式スロット型フードにおける漏洩及びばく露防止に対する外乱気流を考慮した発散抑制装置の開発に関する研究、第61回日本労働衛生工学会・第43回作業環境測定研究発表会、2022年10月26日-28日.
		11) 石旭龍, 山本悠斗, 田博源, 久保田裕仁. 有機溶剤作業に対する外乱気流を考慮したばく露防止対策用換気作業台の開発に関する研究、第61回日本労働衛生工学会・第43回作業環境測定研究発表会、2022年10月26日-28日.
		12) 兼間貴子, 美藤杏佳, 田博源, 久保田裕仁. 新JIS短縮プロトコルにおける光散乱法を用いたフィットテスターのフィットテストの検討、第61回日本労働衛生工学会・第43回作業環境測定研究発表会、2022年10月26日-28日.
		13) 富永悠斗, 田博源, 久保田裕仁. ナイロンサイクロン分粒装置における吸引流量の低下が吸入性粉じん濃度測定に与える影響、第61回日本労働衛生工学会・第43回作業環境測定研究発表会、2022年10月26日-28日.
	<input type="radio"/>	14) 田博源, 久保田裕仁. 外乱気流に応じた排風量制御機能を搭載した発散防止抑制装置の開発、第62回日本労働衛生工学会・第44回作業環境測定研究発表会、2023年11月8日-10日.
受賞歴	<input type="radio"/>	The 12th IOHA INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE the Abstract Award for the poster presentation in IOHA 2021