

平成30年度

戦略的基盤技術高度化・連携支援事業

戦略的基盤技術高度化支援事業

「衝撃波による粉塵剥離メカニズムを応用したメンテナンスレス集塵装置の開発  
と事業化」

研究開発成果等報告書

平成31年3月

担当局 中部経済産業局

補助事業者 公益財団法人岐阜県産業経済振興センター

## 第1章 研究開発の概要

### 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

#### (1) 研究開発の背景

「高度化指針」において定める、川下製造事業者等が抱える共通の課題及びニーズ

○当該特定ものづくり基盤技術において達成しようとする高度化の目標

特定ものづくり基盤技術高度化指針のうち、以下の項目に対応。

#### (四) 製造環境に係る技術に関する事項

##### 1 製造環境に係る技術において達成すべき高度化目標

#### (3) 川下分野横断的な共通の事項

##### ①川下製造業者等の共通課題及びニーズ

ア. 高機能化

ウ. 低コストでの製造

エ. 効率的な生産

レーザー加工時に発生するヒュームの捕集には、乾式フィルター式の集塵装置が広く一般に用いられている。しかしながら、この場合、①短期間（24時間）でフィルターが目詰まりし吸引力が低減すること、②目詰まりしたフィルターの交換・洗浄が頻繁である上にメンテナンス時の粉塵の再飛散が起こり得る等問題があり、製造現場の省人化を妨げコスト増の要因となっているため、解決が強く求められている。

・上記を踏まえた高度化目標

ア. 当該技術が持つ諸特性、諸機能の向上

ウ. コスト削減

エ. 製造装置の最適化

衝撃波をコントロールして付着物を剥離する技術の基盤を確立して、衝撃波発生装置のユニット化、脱塵・剥離機能向上、吸引能力維持に必要な具体的な最適条件を確定し、川下ユーザーでの環境負荷低減・コスト削減に貢献する技術を開発する。

#### ■急速に進むレーザー加工機と発生ヒュームの問題

発生ヒュームの課題が顕在化しているレーザー加工機は1990年代に実用化され、技術開発により2014年以降ファイバーレーザー加工機が登場すると板金業界でその導入が進んできた。

これまでのプレス加工機をレーザー加工機に置換すると、製作に数ヶ月かかる金型が不要になり、大幅なコスト削減となる。自動車業界でもホンダでの採用例がある。

国としてもレーザー加工機の開発に力を入れている。NEDOでは炭素複合材のレーザー加工機開発のための「高出力多波長複合レーザー加工機基板技術開発プロジェクト」<sup>1)</sup>が開始された。

レーザー発信器の出力の向上とともに前述の様に加工機の高性能化、実用化が急速に進んでおり、2023年頃には現在の冷間加工機からレーザー加工機への置き換えが進み、レーザー加工機市場は2,200億円の市場規模に上ると予想されている

レーザー加工は、従来のシャーや砥石、刃のような冷間の加工ではなく、加工素材（主に金属）の融点（燃焼温度）を超える熱切断のため、素材の溶融や燃焼、蒸発によって生じる極めて微細なヒューム粉塵が発生し、かつ素材表面の保護膜や油脂が混合した高付着性の高い浮遊粒子状物質（SPM：Suspended Particulate Matter）を多量に発生する。大量のヒュームはメンテナンスに伴う稼働率低下・コスト増・清掃時の人体への影響が課題となっている。

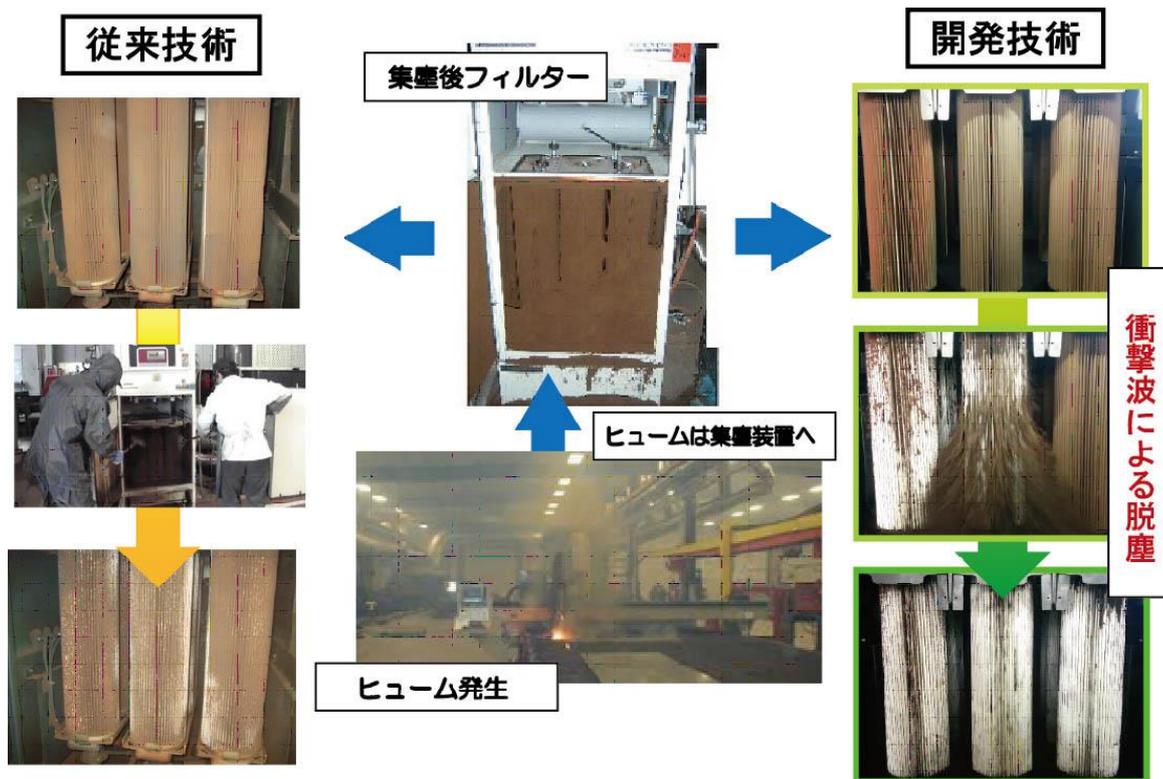
こうした課題に対応した初期集塵性能をメンテナンスレスできる集塵装置の要求は強いが実現できる装置は未だ存在しない。

NEDO 技術開発推進部：「新世代素材等レーザー加工技術開発プロジェクト」、H25 年

■本研究開発では、現在主流のパルスジェット脱塵等に対して、超音速噴流衝撃波による高付着性粉塵の破碎メカニズムを応用した高付着性粉塵の剥離・脱塵技術を開発する。

従来技術と、このアイデアをもとに開発する技術を以下に比較する。

**研究開発の概要**



## 課題

## 特徴

### パルスジェット脱塵

- ・現在標準脱塵方式
- ・湿潤状態の粉塵では脱塵効果が低下
- ・フィルターに逆圧の過負荷と衝撃負荷
- ・フィルターメンテナンス：100 時間毎
- ・フィルター寿命：500～1000 時間

### 機械振動脱塵

- ・湿潤状態の粉塵では脱塵効率が低下
- ・機械的構造のため機構が複雑
- ・接触物理力のためフィルター構造に負荷
- ・フィルターメンテナンス：100 時間毎
- ・フィルター寿命：500～1000 時間

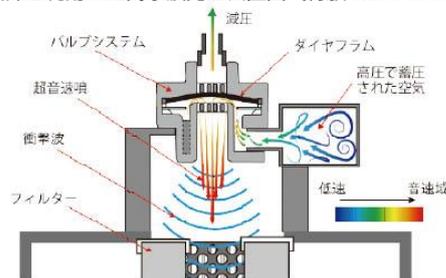
### 逆圧逆洗脱塵

- ・湿潤状態の粉塵では脱塵効果が低下
- ・長時間逆噴流を流すため圧空設備大がかり
- ・長時間逆圧に係るためフィルター負荷大
- ・フィルターメンテナンス：100 時間毎
- ・脱塵に時間がかかる

### 衝撃波破碎脱塵方式

- ・機構が単純で低コスト（5 万円/ユニット）
- ・湿潤粉塵でも除塵効果が変わらない
- ・脱塵効果の経時による低下がない
- ・衝撃波の打撃力のためフィルター負荷小
- ・脱塵時間が極めて短い（5 秒以下）
- ・**フィルターの脱塵回生率が高い（9 割以上）**
- ・**フィルターメンテナンス不要**
- ・**フィルター寿命 10,000 時間（目標）**

排気弁を利用した衝撃波発生装置図（特願 2014-137858）



### ○新技術を実現するために解決すべき研究課題

衝撃波をコントロールして付着物を剥離する技術の基盤を確立して、衝撃波発生装置のユニット化、またその応用範囲を広げて事業化を加速したい。

本開発終了後はエアコンフィルターや真空蒸着槽内の清掃、長尺管内など付着物の除去が困難な状況での清掃を可能にする装置の実現を目指す。

- 【1】 衝撃波による粉塵剥離メカニズムの解明
- 【2】 実装置を模した試験装置による大規模実験
- 【3】 粉塵剥離に最適化した衝撃波発生装置及び脱塵システムの開発
- 【4】 新型衝撃波発生装置を搭載した試作集塵機及び量産試作機の製作
- 【5】 事業化に向けた他業界ニーズの掘り起こし

### 研究開発の背景（これまでの取組など）

レーザー加工時に発生するヒュームの捕集には、乾式フィルター式の集塵装置が広く一般に用いられている。しかしながら、この場合、①短期間（24 時間）でフィルターが目詰まりし吸引力が低減すること、②目詰まりしたフィルターの交換・洗浄が頻繁である上にメンテナンス時の粉塵の再飛散が起り得る等の問題があり、製造現場の省人化を妨げコスト増の要因となっているため、解決が強く求められている。

### ■自動車業界の動向

環境や省エネという利点から、自動車の軽量化がますます重要になっている。軽くて強い「炭素繊維複合材料」や、耐熱・耐摩耗性を追求し、更なる進化を遂げる「金属材料」など、今後「材料間競争」

が激しくなる中、その加工技術も進化し続けており、またその工作機器に対する投資額も年間 1800 億～2000 億円で推移している。2) ファイバーレーザー加工機の高性能化により、自動車産業においても、製造ラインの設備としてファイバーレーザー切断システムが普及しつつある。従来の CO2 レーザーシステムからの置換

に加え、プレス加工の代替設備としても採用されている。

先端技術を他産業に先駆けて導入する自動車業界でのレーザー加工機の採用はこれからの製造業の未来を示す。

また、自動車業界そのものでのレーザー加工機の導入台数は膨大な量が予想され、レーザー加工機の市場が一気に拡大すると考えられる。

ファイバーレーザーのヒューム粉塵による品質不良、設備不具合の問題が発生してきており、主たる研究実施者のユーエスウラサキ(株)では、アドバイザーの三桜工業(株)の他、トヨタ自動車のプレス生技部から具体的な相談を受けると共に、ホンダエンジニアリングに対して本技術を提案している。さらに、今後他の自動車メーカーへのコンタクトを図る。

“(レーザー加工機の) 次の課題はランニングコストの検証。特にメンテナンスのしやすさだ。「鉄粉の掃除などプレストはまったく別の世界」(ホンダエンジニアリング奥中氏) と言うように自動車業界ではヒューム問題が顕在化している。” 3)

2) みずほ銀行：みずほ産業調査’ 53 2015 No.5

3) 日刊工業新聞 H28 年 4 月 1 日版抜粋 “

#### ■本開発メンバーのこれまでの取り組み

主たる研究実施者のユーエスウラサキ(株)では、H26 年 2 月にフィルターの脱塵方法の開発過程で、圧縮空気の排気バルブを流用した高速パルスジェット試作装置の開発試験を行っていた際、フィルター付着粉塵が一気に弾け飛ぶ現象を発見した。

空気の動圧を利用するエアパルスジェット装置は通常 1 回あたり 5L 程度の圧縮空気を使用するが、試験ではわずか 0.1L の圧縮空気ですべて剥離させることができなかった粉塵をほぼ完全に剥離させた。

名古屋大学の中村佳朗名誉教授は、本現象についてバルブから発する噴流が音速を超えた際に発生する衝撃波の作用との見解を得た。基本特許については、主たる研究実施者であるユーエスウラサキ(株)が特許申請 4) を行った。

同装置の技術を確立するために、同現象の原因と発生プロセスの理論解明が不可欠であったため、名古屋大学大学院航空宇宙工学科の佐宗章弘教授に理論の解明を依頼、平成 27 年に共同研究に着手し、同年の研究において、現象の可視化などが可能となり、圧力波の到達後に噴流が蓋の役割をしてより圧力の上昇を高めているなど、複雑な現象が作用していることが判明している。

しかし、付着粉塵を弾き飛ばしている直接要因はまだ解明に至っておらず、超音速噴流に伴う衝撃波による付着物飛散を応用した本格的な製品開発は構想にとどまっている。本事業は超音速噴流にともな



写真 2. 衝撃波脱塵状況



写真 3. 衝撃波脱塵後

う衝撃波を利用した付着物が飛散する現象の解明と、得られた現象機構を最適化した応用製品事業化を目的とする。集塵装置フィルターその他、真空蒸着槽内清掃、長尺管内など付着物の除去が困難な状況で利用可能な装置の実現を目指す。

本事業アドバイザーの三菱工業(株) (自動車用燃料配管部品メーカー) において開発前段の試みとして、汎用高速排気弁を流用した衝撃波式脱塵装置を設置したところ、3 ヶ月以上フィルター交換無しで初期集塵能力の 70%を維持している。

本事業においては、初期集塵性能 90%以上をフィルター交換なし 1 年以上目標とした衝撃波による脱塵装置搭載の集塵機を試作、事業化する。

4) 特願 2014-137858 付着物除去装置、集塵装置、及び付着物除去方法

#### 当該分野における研究開発動向

最新の国内集塵装置市場規模は、汎用機器で180億円、システム機器で480億円、消耗品を加えると1,000億円を超える。集塵装置は、ばいじんの除去だけでなく粉体を扱う工業装置でも使用されているので、小規模装置まで含めると日本全国で数十万基が稼働しているものと推測される。5)

集塵装置は集塵方法によっておおむね6種に分類されるが、近年の大気汚染防止法の厳しい要求からフィルターろ過式集塵機が広く採用されている。

一般的なフィルターの脱塵法であるエアパルスジェット式は粒径が数十 $\mu$ 程度で、乾燥した粉塵などには効果が期待できるが、レーザー加工ヒュームのような粒径1 $\mu$ を下回り、かつ油分(オイルミスト)を含んだ高付着性粉塵に対する脱塵効果が低く、目詰まり劣化が起こりやすい。そのため吸引性能を回復させるために、数週間に一度、フィルターを取り外してアルコール洗浄するか、フィルター交換が行われる。

多くのメーカーが、ヒュームのフィルターへの付着性を弱めるために、炭酸カルシウム、タルクなどの不燃性乾燥粉末をヒュームと同時吸引させる装置を搭載しているが、効果は殆ど期待できない上、年間50~100千円のコストがかかり、さらに粉塵の量が倍増するという問題がある。他には東海大学の堀澤秀之助教授(現教授)によるレーザー加工時に発生するヒュームの評価とその対策について先進的な事例がある。6)

しかしながら、その後いずれのメーカーも未だ問題解決が可能な脱塵装置の開発もしくは実用化の報告を行っていない。

5) 国立環境研究所 HP: 環境技術開発、ばいじん除去技術

<http://tenbou.nies.go.jp/science/description/detail.php?id=34>

6) 堀澤秀之: 「レーザー加工における有害物質の発生特性評価と環境対策」、2003.

#### (2) 研究目標

##### ○高度化目標

#### (四) 製造環境に係る技術に関する事項

#### (3) 川下分野横断的な共通の事項

##### ②高度化目標

- ア. 当該技術が持つ諸特性、諸機能の向上
- ウ. コスト削減
- エ. 製造装置の最適化

衝撃波をコントロールして付着物を剥離する技術の基盤を確立して、衝撃波発生装置のユニット化、脱塵・剥離機能向上、吸引能力維持に必要な具体的な最適条件を確定し、川下ユーザーでの環境負荷低減・コスト削減に貢献する技術を開発する。

【1】 衝撃波による粉塵剥離メカニズムの解明 (名古屋大学/ユーエスウラサキ株)

【1-1】 粉塵剥離に直接作用している要因の特定 (平成 28 年度で終了)

- (a) 高速開口弁の作動による非定常高速噴流発生過程の解明
- (b) 非定常高速噴流の自由空間中での衝撃波圧力回復の定量評価
- (c) 非定常高速噴流を閉鎖空間に作用させた場合の閉じ込め効果による圧力増幅メカニズムの解明と定量評価
- (d) フィルターの気体透過特性および衝撃波作用による圧力変調効果
- (e) 粉塵剥離装置のスケール効果

【1-2】 効果を効率的に発生させられる衝撃波の調査/研究 (平成 28 年度~29 年度実施)

の開放時間 0.8 ミリ秒(現行)→0.6 ミリ秒(20%向上)

【1-3】 衝撃波を発生させる装置の設計要件の研究 (平成 29 年度~30 年度実施)

フィルター底部最高圧力 7kPa(現行)→8.5kPa(20%向上)

フィルター底部圧力立ち上がり時間 5 ミリ秒(現行)→4 ミリ秒(20%向上)※最終的な目標値

- ・高速噴流の最高動圧を 20%向上させる (現状、50mm 離れた場所で 180 kPa)
- ・最適フィルター位置における管底部最高圧力を 20%向上させる (現状 7kPa)
- ・フィルター形状等を最適化することにより、粉塵除去性能を 20%向上させる

【2】 実装置を模した試験装置による大規模実験 (平成 28 年度で終了)

(実施者：ユーエスウラサキ株/名古屋大学/ユーザック株)

【2-1】 試験用衝撃波発生装置の製作

1000H 使用後の吸引力低下率 10%以下を達成するために以下の目標値を設定する

目標値： 噴流生成部の開放時間 0.8 ミリ秒(現行)→0.6 ミリ秒

管底部圧力 8.5kPa、 圧力上昇時間 4 mm/sec

目標発射噴流速度 350m/sec 以上

【2-2】 衝撃波発生装置試験装置の設計/製造

試験装置は 【2-1】で製作した試作衝撃波発生装置を使用してデータ収集を行う試験装置を製作する。装置単体で評価が行える試験装置と、加工設備に接続して実際の使用状態での試験が行える試験装置を製作する。

圧力、流速、粉塵濃度、画像などのデータが取得できるセンサーを有した装置とする。

圧力センサー：米国 PCB 社製圧力変換器(型番：113B27)他

1、単体試験装置

試作発生装置の取り換え時間 0.5H/回以内

圧力データ誤差 0.01kPa 以内

圧力上昇時間データ誤差 0.1 mm/sec 以内

2、加工装置接続試験装置

加工設備に接続し 24H 以上の運転試験が行えること

圧力データ誤差 0.05 kPa 以内

圧力上昇時間データ誤差	0.01 kPa 以内
3、加速疲労試験装置	
衝撃波の連続発射性能	10万回/日以上
圧力データ誤差	0.05 kPa 以内

【3】 粉塵剥離に最適化した衝撃波発生装置及び脱塵システムの開発（平成29年度実施）

（ユーエスウラサキ株/名古屋大学/ユーザック株）

【3-1】 最適化条件の検証と装置設計/製作

プロトタイプによる検証試験で得られた条件をもとに、噴流の速度を高速化する発射装置の設計/開発と発生する衝撃波がもっとも効率的に作用する条件を検証し 試作脱塵装置を製作する。

1年間（3300h）使用後の吸引力低下率 10%以下を達成するため以下の目標値を設定する

目標値：管底部圧力	53kPa
圧力上昇時間	2.5 mm/sec
目標発射噴流速度	420m/sec 以上
3.0kPa 時におけるクリーニング後の差圧値	0.4kPa 以下
耐久試験	連続発射回数 100万回以上

【4】 新型衝撃波発生装置を搭載した 試作集塵機の製作（平成29年度から平成30年度実施）

（ユーエスウラサキ株/ユーザック株/名古屋大学）

【4-1】 試作集塵機の設計/製作

衝撃波発生装置を搭載し、ファイバーレーザーヒューム及びポリアミド樹脂ヒュームに最適化した集塵装置を試作する

3年間（10000h）使用後の吸引力低下率 10%以下を達成するため、3000H 使用時の低下率 3%以下になるよう目標値を設定する

目標値： 3000H 集塵時後 クリーニング後の差圧値

ファイバーレーザーヒューム集塵時 0.5kPa 以下ポリアミド樹脂ヒューム集塵時 0.8kPa 以下

【4-2】 製品化を前提とした衝撃波発生装置を搭載した集塵機の設計/製作

ファイバーレーザー加工機用 5.5KW モーター搭載タイプと ポリアミド樹脂ヒューム用 3.7KW モーター搭載タイプを製作する。

採用されやすい（川下ユーザーでの社内検討が進みやすい）価格（競合他社製品の販売価格に対して同等）、性能とするため以下の目標値を設定する。

10年間の使用時の衝撃波発生回数を50万回と想定し 安全率200%を目標とする

目標値製造コスト	3.7KW	800千円以下
	5.5KW	1,000千円以下
加速疲労試験	100万回連続発射試験クリア	

【5】 事業化に向けた他業界ニーズの掘り起こし（平成28年度から平成30年度実施）

（ユーザック株/ユーエスウラサキ株）

【5-1】 新たなニーズの掘り起こし

H28年度 中国国際工業博覧会（CIIF2016）市場調査 目標値：加工機メーカー等 アンケート  
100件以上

H29年度 MF-TOKYO2017 出展 目標値： ブース来場者数 800人

(3) 当初の目的及び目標に対しての実施結果等

【1】 衝撃波による粉塵剥離メカニズムの解明

- ・超音速噴流の生成から粉塵剥離までのプロセスを解明

【2】 実装置を模した試験装置による大規模実験

- ・多数の試作衝撃波発生装置の製作
- ・各種試験装置の製作

【3】 粉塵剥離に最適化した衝撃波発生装置及び脱塵システムの開発

- ・新型衝撃波発生装置 MV-2 開発

【4】 新型衝撃波発生装置を搭載した試作集塵機及び量産試作機の製作

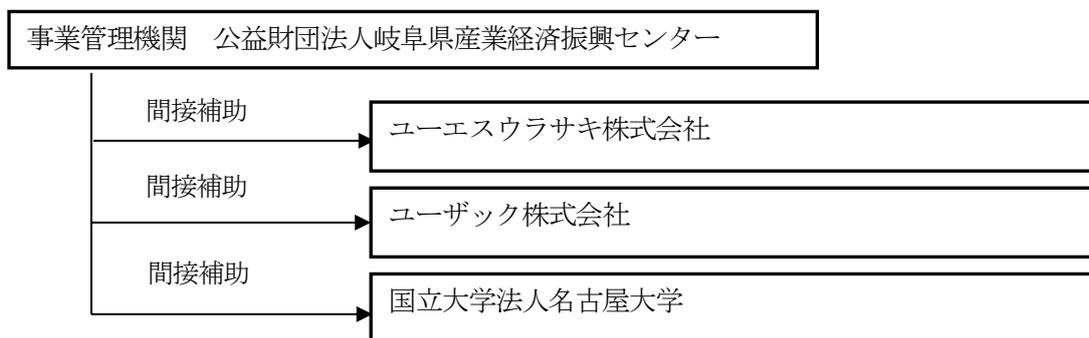
- ・量産型衝撃波発生装置 MV-3 開発
- ・MV-3 搭載 量産試作型集塵機製作

【5】 事業化に向けた他業界ニーズの掘り起こし

- ・MF-TOKYO2017 などの展示会に出展
- ・加工機メーカー、商社などに対する本技術の勉強会を実施

1-2 研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）

○履行体制図



1-3 成果概要

当初の目的であった、粉塵剥離のメカニズムの解明については、名古屋大学航空宇宙工学科を中心に、試験装置による要素試験を繰り返し、衝撃波の発生から粉塵剥離に至るプロセスのほぼ全容を理解することが出来た。

製品の開発については、名古屋大学の指導により、超音速の流体や、圧力波を測定することに特化したセンサーを使用した試験装置を製作し、名古屋大学とデータを共有しながら、多くの試験を行った。

得られたデータを解析して、装置開発の設計要件に組み込みながら製品開発を行った。

試作品の製作においては開発期間短縮のため、ABS樹脂で成形が出来るRP積層装置を積極的に利用した。

ABS製の部品は試験的に使用する程度あれば十分な強度があり、機械加工などで製作する方法に対し、加工プログラムを作成する必要が無く1回で多種の部品を一度に製作することが出来るメリットがある。RPで製作した部品で試験を行い、結果の良かった形状を選抜して機械加工化して製作する方法を取ることにより全体のスケジュール短縮が可能となった。

このような方法により、H29年度、開発当初の製品に対し165%の圧力値を達成する試作品開発品名MV-2を完成させることが出来た。

### 3Dプリンタによる MV-2 試作モックアップ



### MV-2 試作 TYPE1

(手前は試験用ノズル部 100回程度の発射試験が可能)



MV-2を使用した試験装置では、付着性が高い粉塵を発生する最新のファイバーレーザー加工機によるテストにおいて、目標値を大幅に上回る結果を得ることが出来た。

しかし MV-2 は精密な機械加工と複雑な構造を持つため、製造コストがかかり生産性も良く無いため、量産には向かないという課題があった。

H30 年度においては、MV-2 をベースに改良を進め、材料費及び生産性を大きく高めて製造コストを削減した MV-3 の開発に成功した。

また H30 年度においては、MV-3 を搭載した量産を見据えた試作機を製作することが出来た。

能力が向上した衝撃波発生装置に対応するため、集塵機本体の構造の見直しを行い、MV-3 の能力を最大限に生かすための専用ファンの設計/製作を行い良好な結果を得ることが出来た。

板金業界に置いては、ファイバーレーザー加工機への置き換えが一層進み、高出力化も進んでいることから加工機を保護するための高性能集塵機へのニーズは研究開発着手当初より高まっている。

MV-3 及びそれを搭載した新型集塵機は H31 年 7 月に行われる MF-TOKYO2019 において発表し発売を開始する予定である。

板金業界向けとしては良好な結果が得られたが、一方の目標であるポリアミドヒュームにおいては、他の方式との比較においては良好な結果を得られるものの、MV-2 を用いても大きな変化を得ることが出来なかった。

ポリアミドヒュームに関しては、今後も継続して改良に取り組んで行く。

今回の研究開発においては、名古屋大学に主として研究室で実験装置により正確なデータの取得と解析を、ユーエスウラサキ、ユーザックにおいて実際の使用状況に近い状態での実験や、実証試験を行い、両者のデータを共有することにより、両者の強みを生かした研究を効率よく行うことが出来た。

#### 1-4 当該研究開発の連絡窓口

ユーエスウラサキ株式会社 環境機器部・IT管理部 部長 山下 哲哉

所在地：岐阜県各務原市各務東町5丁目82-17

電話：058-385-4440 FAX：058-385-4441

E-mail：yamashita@usac.co.jp

## 第2章 本論一（1）

### 【1】衝撃波による粉塵剥離メカニズムの解明

#### 【1-1】粉塵剥離に直接作用している要因の特定

粉塵剥離に直接作用している要因を特定するため、当初の計画に従って様々な噴流生成部の構成を変更して可視化及び圧力計測を行った。その結果、自由空間では衝撃波は形成されていないが、フィルタや試験部などの閉鎖された空間に噴射することで衝撃波が形成されることが確認された。また、噴流生成部の構成を変更し、(1) 弁を高速に開放し、(2) 流路を最適化することで圧力損失を減らす、ことによって、

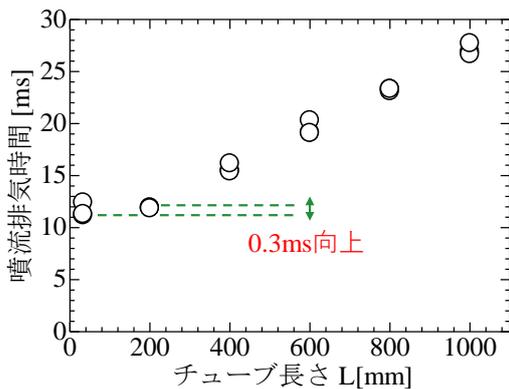
さらに高速な噴流(高い圧力を有する噴流)を形成することが可能となり、強い衝撃波が形成されることが明らかとなった。このように強い衝撃波を形成することができれば、フィルタ等の管内圧力を上昇させることが可能であることが解った。

また、噴流の直径とフィルタ等の被噴射管のサイズには適切な関係があることが判明した。

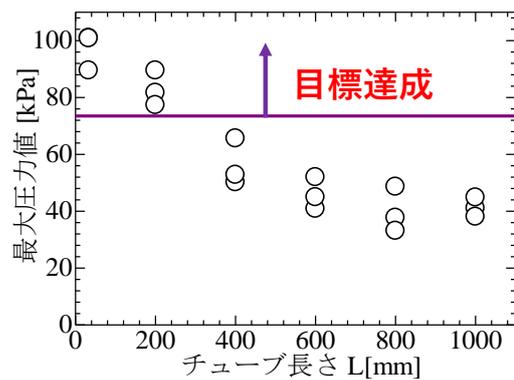
【1-2】効果を効率的に発生させられる衝撃波の調査/研究

(b) 非定常高速噴流の自由空間中での衝撃波圧力回復の定量評価

噴流生成装置と排気用電磁弁との間のチューブの長さを変更し、噴流発生装置から 200 mm の位置に配置した圧力変換器(本補助事業にて導入)によって自由空間中での圧力を計測した結果、実機で使用しているチューブ長さ 200 mm では、約 11 ms で蓄圧タンク内の高圧空気を排出し、約 70~80 kPa の噴流総圧が、チューブ長さを 33 mm まで短縮することにより、排出時間を 0.3 ms 短縮し、噴流総圧は 90~100 kPa となり、年度目標「発射噴流速度 350 m/sec(噴流総圧にして約 75 kPa)」を達成した。



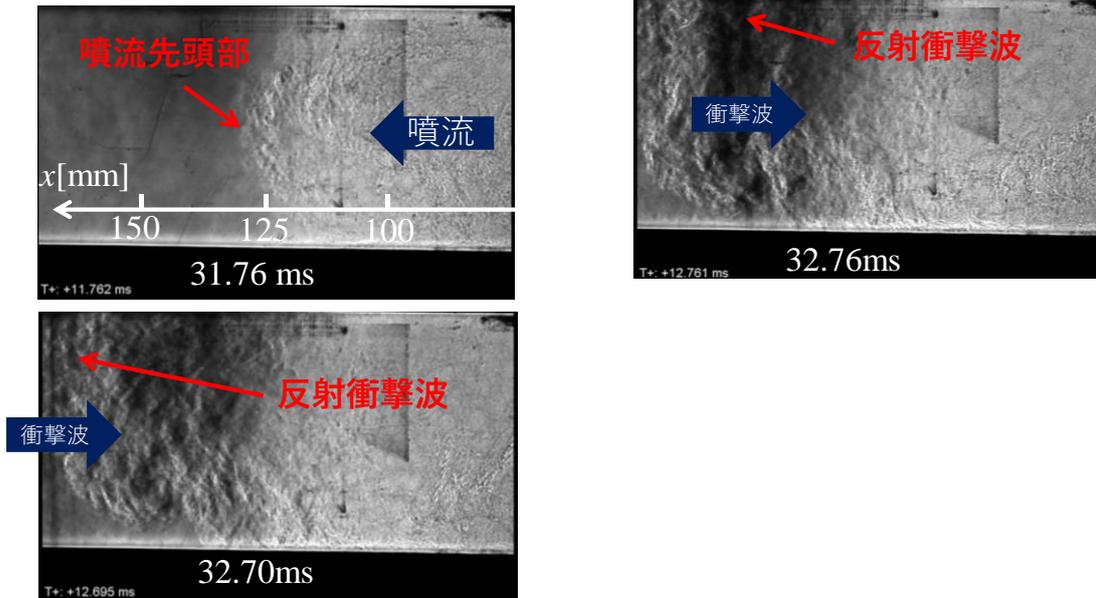
チューブ長さ と 噴流排気時間の関係



チューブ長さ と 最大圧力値の関係

(c) 非定常高速噴流を閉鎖空間に作用させた場合の閉じ込め効果による圧力増幅メカニズムの解明と定量評価

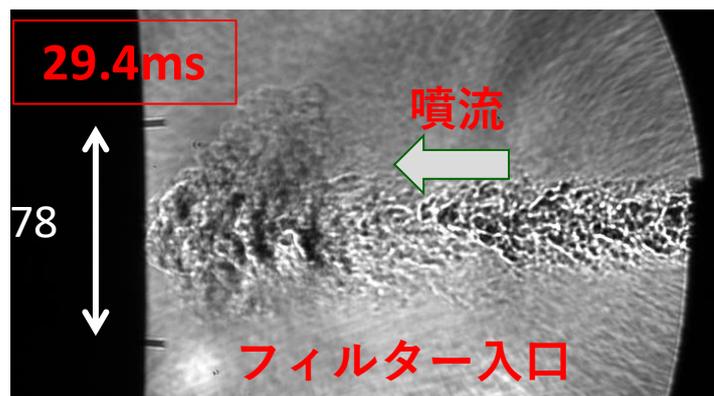
矩形断面の試験装置を用い、可視化を実施した結果、試験装置内に音速で伝播する衝撃波の形成が確認された。また、同時に実施した圧力計測結果から、底部で最大40 kPaの圧力上昇 (d) フィルタ底部圧力計測よりも高い上昇値) が確認されたことから、非定常高速噴流による衝撃波形成によって圧力増幅の強調ができることが確認された。



噴流を既存の試験装置に噴射した際の衝撃波形成の確認

(d) フィルターの気体透過特性および衝撃波作用による圧力変動効果

実機で用いられている噴流発射装置を用い、噴流によって変動される圧力の計測を行った。圧力の計測は自由空間、閉鎖空間及びフィルタ底部で実施したところ、自由空間での圧力上昇値は2.5 kPa、閉鎖空間では最大40 kPaとなっており、閉鎖空間に噴流を噴射することでより大きな圧力上昇が得られることが判明した。一方、実機で用いている構成でフィルタ底部の圧力上昇値を計測した結果は6.5 kPaと、自由空間と閉鎖空間の中間の値であったことから、フィルタの気体透過特性を変更することで、より高い圧力上昇が得られる結果が示唆された。



噴流をフィルタに噴射した際の噴流可視化の様子

(e) 粉塵剥離装置のスケール効果

実機で用いられている噴流発射装置から噴射される噴流の可視化を行い、噴流の直径を計測した。噴流直径と同じ内径の円管及び噴流直径よりも大きな円管に対して噴流を噴射し、円管内の圧力を計測したところ、同じ内径mの円管の方が高い圧力上昇が得られた。このことから、噴流直径とフィルタ等の被噴射物には適切なスケールがあることが判明した。

### 【1-3】 衝撃波を発生させる装置の設計要件の研究

(a) 圧力計測および高速度カメラ撮影による粉塵剥離メカニズムの調査  
粉塵剥離メカニズムの解明に向け、下記の実験1から実験3に取り組み、

- ①噴流の噴射時間
- ②噴流がフィルタ入口に到達する時間
- ③フィルタが振動する時間
- ④ヒュームが剥離する時間
- ⑤フィルタ底部の圧力が上昇する時間

の同期を行った。

実験1 フィルタ振動の高速度カメラ撮影及び噴流時刻、圧力波時刻の同期

実験2 蓄圧タンク排気時間、噴流噴射時間、フィルタ入口到達時間の同期

実験3 ヒューム剥離時刻と圧力波時刻の同期

以上の3つの実験を通じ、噴流が噴射、フィルタの振動を開始、ヒューム剥離、フィルタ底部圧力の上昇、という時間の同期ができ、ヒューム剥離の主たる要因は「噴流によって誘起された圧力波が、フィルタを振動させることによって発生する」ということが判明した。

### (b) 噴流生成部の開口時間、流路形状影響の調査

より効果的にヒュームを剥離させる噴流を特定するため、「セロファン隔膜式噴流生成部」を試作し、開口時間及び流路形状の影響を調べた。

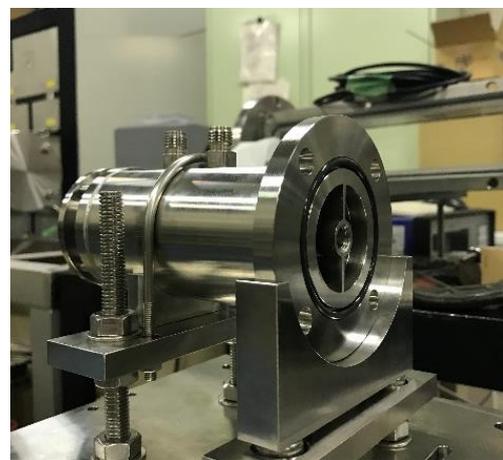
製作したセロファン隔膜式噴流生成部は、流路形状が直線となるため圧力損失は無視できるほど小さい。

この噴流生成部では、セロファン隔膜の耐圧から、0.3MPa（噴流生成部式は0.6MPa）の蓄圧が限度であったが、管内に誘起される圧力波は、

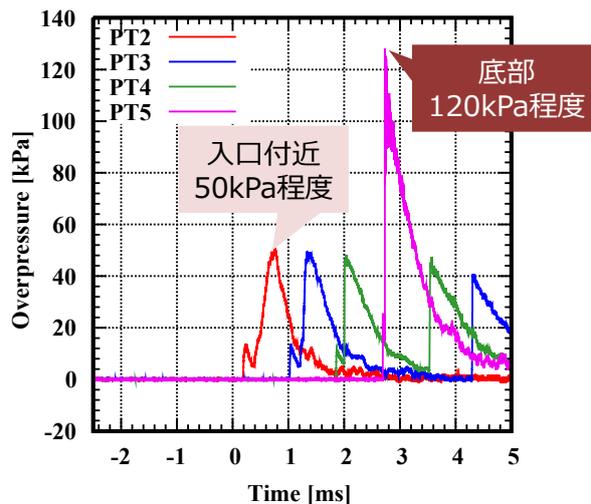
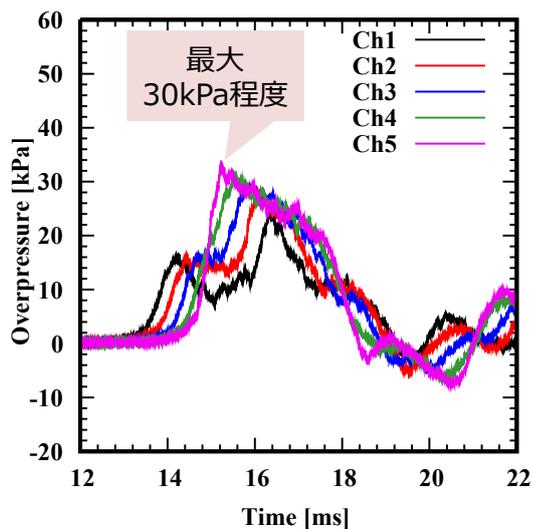
①底部圧力上昇値 120kPa（噴流生成部式 30kPa）

②立ち上がり時間  $10\mu\text{s}$  以下（同 1ms）

と、非常に短い立ち上がり時間を有し、大きな圧力上昇を得ることのできる圧力波の誘起に成功した。



セロファン隔膜式噴流生成部



管内に誘起される圧力波の比較（左：既存の噴流生成部式、右：セロファン隔膜式）

この結果から、ヒューム剥離に効果的な噴流生成部は、「開口時間が短く」、「流路の圧力損失が小さい」形状であることが判明した。

比較すると、70%程度の圧力となることが判明した。セロファン隔膜式噴流生成部を用いることで、金属円管底部の圧力は120kPa(既存の噴流生成部式の4倍)まで向上させることができたことから、同噴流生成部を用いることで十分に達成できた。

- ・フィルター底部圧力立ち上がり時間 5ミリ秒(現行) → 4ミリ秒(20%向上)

底部最高圧力同様に、セロファン隔膜式噴流生成部によって圧力立ち上がり時間は10マイクロ秒以下まで短くすることができ、この噴流をフィルターに噴射することで十分に達成できた。

高速噴流の最高動圧を20%向上させる(現状、50mm離れた場所で180kPa)

- ・改良した噴流生成部を用いることで、50mm離れた場所で250kPaの最高動圧を達成。

最適フィルター位置における管底部最高圧力を20%向上させる(現状7kPa)

- ・フィルター底部最高圧力と同様に十分に達成できた。

フィルター形状等を最適化することにより、粉塵除去性能を20%向上させる

・粉塵除去性能については、定量的なデータが取れていないが、既存の噴流生成部では剥離させることのできない粘着性の高い粉塵についても除去できたことから、除去能力は確実に向上している。今後は定量的なデータ収集が課題。

## 【2】実装置を模した試験装置による大規模実験

### 【2-1】試験用衝撃波発生装置の製作

当初の計画では、ダイヤフラムを利用することを前提として試作品開発を進める計画であったが、名古屋大学での検証結果において、弁部の開閉速度、流路の最適化などの設計要素が明確になったことにより、それらの要素を満たす試作品開発に取り組んだ。

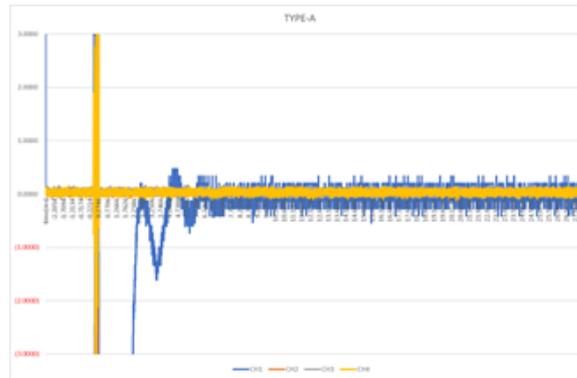
様々な弁機構のアイデアを考えて6種類の衝撃波発生装置の試作品を製作することができた。

これらの衝撃波発生装置は予定通りの性能（バルブ開口時間 0.6MS 以下、発射噴流速度 350 m/sec <噴流総圧にして約 75 kPa>）を達成し、移行の衝撃波発生装置の最適化探査の為に実験に必要十分な条件を満たして得る事を確認できた。

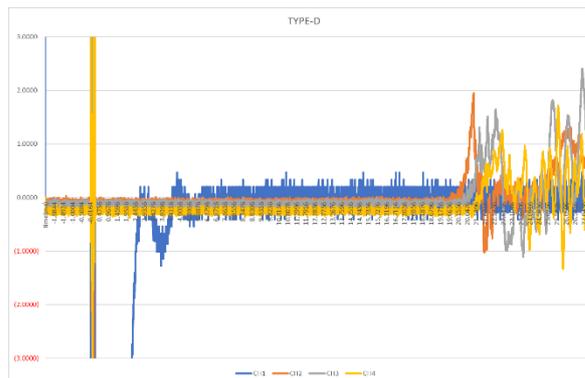
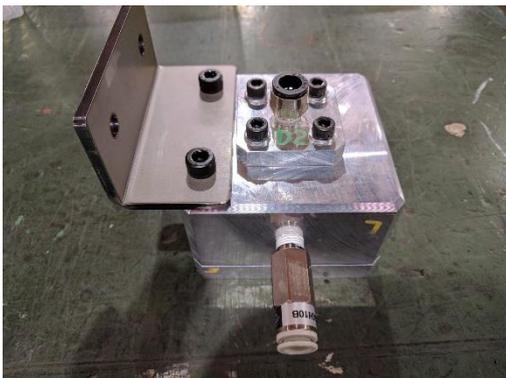
試作した試作衝撃波発生装置例（抜粋）

試作 TYPE-A-3

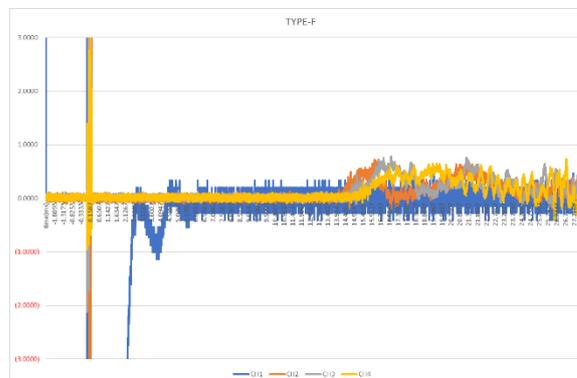
圧力波形グラフ



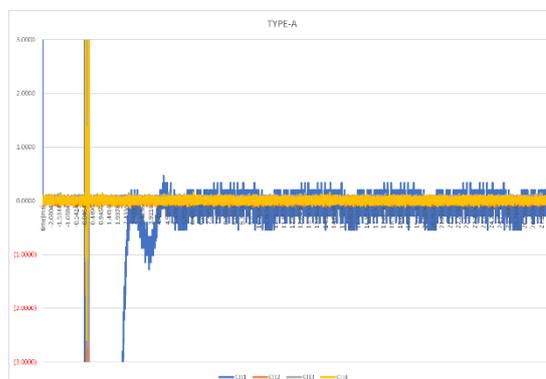
試作 TYPE-D-2



試作 TYPE-F-1



## 試作 TYPE-G-1



### 【2-2】 衝撃波発生装置試験装置の設計／製造

脱塵の効果を定量的に評価するために以下の試験評価用機材の製作を行った。

実験や試験結果の使用しているセンサー類は名古屋大学航空宇宙工学科の試験装置で使用しているものと同一のものを使用して、両者間でのデータの整合性をとり、共有化を図った。

#### • 単体試験装置：



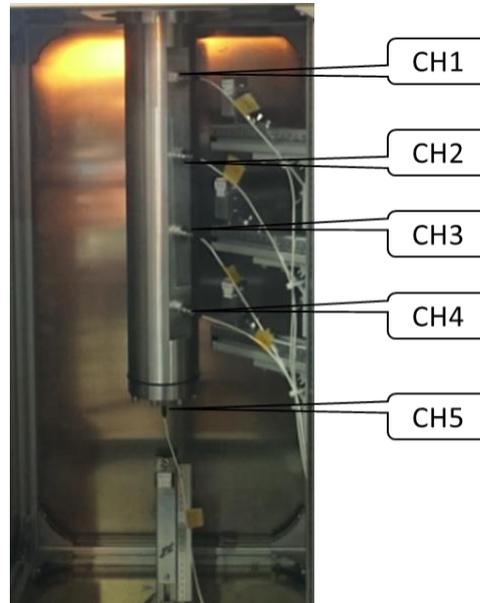
試作衝撃波発生装置、試作ノズル及び試作フィルター等を取り付け、発生する圧力を PCB センサーでとらえて、圧力値、到達速度などを計測する装置

- 圧力試験管

圧力試験管を追加した単体試験機



単体試験機圧力試験管及びセンサー部



より正確なデータを取得するため、単体試験装置に追加した圧力試験装置

- 加工装置接続試験装置：



試作衝撃波発生装置、フィルターなどを取り付け、ファイバーレーザー加工機などに取り付けて実際に近い環境でのデータ収集を目的とする装置

- 加速疲労試験装置：



10万回/日の衝撃波発生装置の発射が可能

製作した衝撃波発生装置、フィルターを設置し加速耐久試験を実施する為の装置

品質項目である、100万回耐久試験を実施

### 【3】 粉塵剥離に最適化した衝撃波発生装置及び脱塵システムの開発

#### 【3-1】 最適化条件の検証と装置設計/製作

形状や条件別にデータを得るために膨大な数の試験を行う必要があったが、圧力試験管のセンサーで得られる値と粉塵の剥離量についての関連性が分かって来たため、圧力試験管から得られる圧力波形により大まかな製品評価が出来るようになった。

これにより実験時間の大幅な短縮が可能となるとともに、定量的なデータ比較が出来るようになった。

試験装置を利用しながら、H28年度に製作した試作衝撃波発生装置の中から、最も性能が高かった、TYPE-I型をベースとして、さらに性能を向上させるべく、2次試作品の製作を行った。

性能向上のポイントとして、噴流生成部の開閉時間の短縮と、発射装置内部の圧力損失の低減、発射ノズル部の最適化をポイントとして開発を進めた。

29年度製作した圧力試験管とセンサーにより安定した製品の評価が素早く行うことが出来るようになり、噴流生成部最適化試験装置 MV-1 を製作した。

MV-1の機構をベースに内部圧力損失及びノズル部を改良したMV-2の開発まで短期間に行うことが出来た。

MV-2 の能力は、既存製品に対し 1.65 倍の圧力データを記録した。

MV-2 及び集塵機搭載時に MV-2 の能力を発揮させるための、メカニズムにおいて 6 件の特許出願を行うことが出来た。

#### 【4】 新型衝撃波発生装置を搭載した 試作集塵機の製作

##### 【4-1】 試作集塵機的设计/製作

試作衝撃波発生装置 MV-2 を搭載した試作集塵機 5.5kW タイプと 3.7kW タイプ改造用ユニットを製作した。

新型装置 MV2 の効果が最大現に発揮できる周辺装置と、制御プログラムを組み込んだ。

ファイバーレーザー加工機への接続試験においても、短期間ではあるが、目標値である 3.0kPa の状態からクリーン後の差圧 0.4kPa 以下の目標をクリアした。

H30 年度においては、MV-2 をベースに生産性を向上させた量産型衝撃波発生装置 MV-3 を開発した。

##### 【4-2】 製品化を前提とした衝撃波発生装置を搭載した集塵機的设计/製作

【4-1】 で開発を行った新型衝撃波発生装置を搭載した試作集塵機を製作した。

5.5kW 機に新型衝撃発生装置 MV-3 を 12 基搭載したクリーニングユニットを製作した。

新型発生装置に合わせて、マウントなどの周辺装置も新設計し、MV-2、MV-3 いずれの発射装置も搭載可能な構造とした。

量産製品も同様の構造とし、より高いクリーニング能力が必要なユーザーについては、MV-2 搭載タイプも供給が可能とする。

量産化においては 100 基/月以上の生産能力が必要なため、MV-2、MV-3 いずれの製品も 12 個単位でセットして連続加工できる加工治具を製作した。

#### 【5】 事業化に向けた他業界ニーズの掘り起こし

##### 【5-1】 新たなニーズの掘り起こし

本研究の技術を用いた集塵装置は世界でも初めての製品であり、ほとんどのユーザーがこの技術を知らない。

集塵機業界ではすでに数十年間新しい脱塵技術は登場しておらず、ユーザーの認識もどの製品も代わり映えがしないとの意識が定着してしまっている。

本研究の事業化のためには、まずこの技術の効果と概要、既存製品との違いを広く PR して周知してもらうことが必要である。

本技術を広く PR するため、研究機関中、JIMTOF2016、MF-TOKYO2017 と中国国際航業博覧会 2017、国際ウェルディングショー2018 に出展した。

その他レーザー加工機メーカー、取り扱い商社などで数多くの勉強会を開催して本技術の PR を行った。

MF-TOKYO2017 以降、本研究の一環で製作したした衝撃波による脱塵メカニズムを 3DCG で再現

したビデオ上映を中心として本研究のPRを行った。

本来目視出来ない現象を、3DCG で再現した映像は非常に理解しやすく、来場者がビデオを見ることで容易に技術の基本原理と効果を理解してもらうことが出来た。

衝撃波を利用した脱塵装置は、既存のエアパルス式に対し格段に優れた効果があるが、製造コストがかかるため製品価格も高額になり単にパンフレットやネット上のPRだけでは販売増は期待できない。

製品を購入してもらうためには、ユーザーに対して費用対効果などの説明を行う必要があるが、ユーエスウラサキ、ユーザックのみのPR活動では限界がある。

そのため、加工機メーカーや取り扱い商社に対する勉強会を積極的に行い、それぞれの営業担当に技術を理解してもらうことにより、さらに下流の販売店やユーザーへ製品のPRを行ってもらえる仕組みづくりを行った。

## 最終章 全体総括

### 研究成果について

衝撃波による脱塵方法のメカニズムがほぼ明らかになり、高度なデータ収集が出来る試験装置類とRP装置などを活用したことにより、研究期間内に従来品に対して 1.6 倍の能力を持つ新型衝撃波発生装置を開発し、量産ベースまで改良を行うことに成功した。

新しく開発した衝撃波発生装置を搭載した集塵機の発売の目途も立っている。

集塵装置以外の様々な利用方法への展開も期待されたが、本研究により、衝撃波による脱塵メカニズムが限られた条件下でのみ有効であることが判明したため、用途をフィルターの脱塵に限定して開発を行った。

但し、条件を満たせば、様々なフィルターを使用する機器に使用可能であるため、フィルターの目詰まりが問題となる機器類への展開は期待できる。

名古屋大学との連携において、ユーエスウラサキ、ユーザックには衝撃波の専門知識が、名古屋大学航空宇宙工学科には粉塵、集塵に対する知識が無く、本研究の脱塵メカニズムの解明と高性能な装置開発のためには両者の持つノウハウを共有して補完する必要があった。

本研究では、両者が共同で同じ課題、工程に取り組むのではなく、それぞれがノウハウを持つ得意とする工程を受け持って並行して研究を行い、データと成果を共有して次の行程に進んでいく方法を取った。結果として短期間で多くの課題を解決することが出来、衝撃波発生装置の開発を行うことが出来た。

### 事業化について

最終年度には、本研究により開発した新型衝撃波発生装置 MV-3 を搭載した量産試作集塵機が完成しており、H31 年 7 月 31 日開催のプレス・板金・フォーミング展 MF-TOKYO2019 において発表、発売を開始する予定で準備を進めている。

同展示会は、国内外のレーザー加工機メーカーが出展し一堂に会する板金業界最大のイベントで、日本中の板金に関係するユーザー、商社が来場する。

本研究のターゲットで、粉塵の付着性が高く、フィルターの目詰まりが問題となるファイバーレーザーの普及率は年々増加しており、高性能な脱塵能力のある集塵装置のニーズはより高くなっている。さらにファイバーレーザー加工機の高速度化、高出力化が進んでおり、集塵機の高性能化は必要不可欠な課題となっている。

本研究期間中に展示会、勉強会などを通じて本技術をPRしてきたことにより、加工機メーカー、取り扱い商社など、数社の企業がすでに本製品の取り扱いを決定している。

同展示会後さらに多くのメーカー、商社からの引き合いが見込まれる。