

令和 5 年 5 月 12 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18K11700

研究課題名（和文）超強力な超音波を用いた音波集塵の挑戦

研究課題名（英文）Challenge of sonic dust collection using ultra-strong ultrasonic waves

研究代表者

三浦 光 (MIURA, Hikaru)

日本大学・理工学部・特任教授

研究者番号：50157434

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,700,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では、強力な空中超音波が得られる装置を用いて煙霧質の凝集を行うことを目的としている。そのために、周波数28kHzの円筒形たわみ振動板型超強力空中超音波発生装置を2台用いて煙霧質が流れるダクトの中に振動板部分を挿入する形式の実験装置を構築し、それによる凝集の実験を行った。その結果、流入する煙霧質が1.0 L/minの場合、2台の超音波発生装置への合計の入力電力が40Wで凝集率が約85%となり、高い凝集率を達成した。更に、周波数60kHzの小型凝集装置を開発し、流入する煙霧質が0.4 L/minの場合、入力電力6 Wで凝集率が約60%となり、この装置においても比較的高い凝集率が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

化石燃料の燃焼等によって発生するPM2.5に代表される大気中の微粒子は、人体の健康への影響が懸念されている。これらを集塵する方法の一つに音波を利用した凝集がある。音波凝集は微粒子が存在する気体中に強力な音波を照射することで、微粒子を凝集肥大化させ回収する技術である。本研究では低騒音にするため可聴周波数範囲外の超音波を用い、煙霧質が流れるダクト内に極めて強力な空中超音波が放射できる超音波源を使って煙霧質の凝集を行った。その結果、比較的大きな凝集効果が得られ、学術的意義及び社会的意義のある成果が得られた。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to develop a device that can obtain powerful aerial ultrasonic waves and to coagulate aerosols using this device. For this purpose, the experimental device was constructed in which two cylindrical transverse vibrating plate type ultra-strong aerial ultrasonic source with a frequency of 28 kHz were inserted into the duct through which the aerosol flows. Aggregation experiments were performed with that apparatus. As a result, when the aerosol flow rate was 1.0 L/min, the total input power to the two ultrasonic sources was 40 W, and the agglomeration rate was approximately 85%, demonstrating that a high agglomeration rate could be achieved. In addition, a compact agglomeration device with a frequency of 60 kHz was developed, and when the aerosol flow rate was 0.4 L/min, the agglomeration rate was about 60% with an input power of 6 W, and this device also achieved a relatively high agglomeration rate.

研究分野：超音波工学

キーワード：超音波 煙霧質 凝集 微粒子 集塵 定在波音場

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 大気中の微粒子は、花粉粒子等の直径 10~100  $\mu\text{m}$  程度のものから、工場等から発生する排気ガスに含まれる直径 10  $\mu\text{m}$  以下まで幅広く存在する。特に直径が 2.5  $\mu\text{m}$  以下の微粒子は PM2.5 と呼ばれ、人が呼吸することによって肺の内部に沈着する危険性があり、健康被害が問題視されている。このような大気中の微粒子の集塵は、清浄な環境が必要な病院や、工場等の空調用の空気配管で強く求められている。集塵方法の代表例としては、濾過集塵、電気集塵、及び遠心力集塵（サイクロン集塵）が挙げられるが、微粒子の集塵は容易ではない。

(2) 音波による集塵は強力な音波によって個々の微粒子を微小振動させ、振動した微粒子が互いに衝突を繰り返し、凝集することを利用したものである。凝集し肥大化した微粒子は、大気中に浮遊することができなくなり、沈降して回収される。

(3) しかし、音波集塵が実用化された例は殆ど無い。これは技術的問題として騒音の発生と装置が大型であることが原因と考えられる。音波集塵を実用化するためには、騒音の問題を解決し、しかも小型で強力な音波を発生できる装置の開発が必須である。

### 2. 研究の目的

(1) 研究の目的は、騒音が発生せず、しかも小型で強力な音波を発生する装置を用いて凝集・集塵を行い、PM2.5 のような微粒子を除去することである。

(2) このために、可聴帯域の周波数を使用せず、超音波領域の周波数を用いた超音波発生源を使うことにした。ダクト内を流れる煙霧質を除去対象として、ダクトに組み込んでも圧力損失がほとんど生じないように、ダクトの内径と同じ内径をもつ超音波発生源を使うことにした。

### 3. 研究の方法

(1) 図 1 に示すような中空円筒配管（ダクト）内を流れる煙霧質を除去するために、振動面が円筒になる超音波発生源を用いた。

(2) 図 2 は検討に用いた円筒形超音波発生源の概略である。円筒形超音波発生源は、図に示すように 27 kHz 用ボルト締めランジュバン型振動子（HEC-4027P4B）、振幅拡大用のエクスポネンシャルホーン（長さ 111 mm、太端面直径 40 mm、細端面直径 8 mm、振幅拡大比 5.0）、縦振動共振周波数調整用の一様棒（長さ 40 mm、直径 8 mm）、剛壁一体構造の中空円筒形振動板（全長 100 mm、円筒振動板部分：長さ 60 mm、内径 80 mm、肉厚 2.7 mm、剛壁部分：内径 80 mm、幅 20 mm、厚さ 34 mm、ジュラルミン製）をそれぞれネジで取り付けられたものである。円筒の両側についている剛壁はほとんど振動しておらず、中空円筒配管との接続に用いるものである。

(3) 凝集塔として図 3 に示したような 2 台の円筒形超音波発生源と、配管として超音波発生源の間に 1 個の円筒と超音波発生源の両端にそれぞれ円筒を配置した場合について、煙霧質の凝集を検討した。本凝集塔は配管中に同じ内径の円筒形振動板を挿入しているため、圧力損失はほとんど生じないと考えている。ここで配管を想定して用いた円筒はアクリル製で、寸法は 3 カ所とも長さ 100 mm、内径 80 mm、外径 100 mm である。この円筒の両端には超音波発生源との接続用の剛壁部（寸法は円筒形振動板の剛壁部分と同じ）を設けている。また、凝集塔の両端は中央に空気流出入用の穴を開けたアクリル板で塞いでいる。凝集塔全体の寸法は長さ 500 mm、内径 80 mm であり、容積は 2.5 L である。

凝集塔内の音圧を測定した所、音圧は中心軸付近で高い値が得られていた。

(4) 空中超音波による煙霧質の凝集効果を検討するために、図 4 に示した凝集実験装置を用いた。装置はエアポンプ、流量計、煙霧質発生室、凝集塔、微粒子濃度計で構成されており、各部の間はチューブ（内径 5 mm）で接続した。空気は図中の矢印で示すように

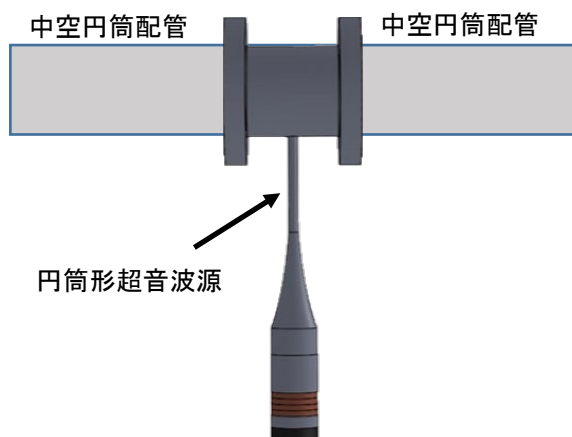


図 1 中空円筒配管と超音波発生源との関係

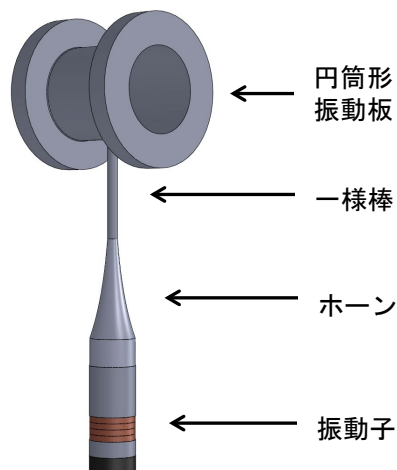


図 2 円筒形超音波発生源

れており、流量は 1.0 L/min 一定となるようにした。煙霧質の濃度は微粒子濃度計によって測定した。(5) 本検討で用いた煙霧質は線香（青雲バイオレット、型番 24911, 日本香道）であり、1 回の実験に付き 3 本燃やした。線香を用いた理由は、煙の主粒子径が 1 $\mu$ m 程度であり、PM2.5 に適すると考えたためである。(6) 実験は初期濃度を一定とし、超音波源の入力電力を変えた場合について、凝集塔から排出される煙霧質の濃度を測定した。測定時の温度は 25~27 $^{\circ}$ C、湿度は 63~76 % でほぼ一定である。

(7) 測定は火を灯した線香を煙霧質発生室に入れた時間を 0 s とし、経過時間 1200 s まで行った。超音波は経過時間 600 s から 900 s までの 300 s 間照射した。測定は各条件についてそれぞれ 3 回ずつ行い、その平均濃度を算出した。なお、駆動周波数は 27.5 kHz であるが、超音波源への入力電力が大きくなると下がる傾向にあった。

#### 4. 研究成果

(1) 図 5 実験結果である。図は横軸に経過時間を、縦軸に煙霧質の濃度を示しており、パラメータは入力電力である。また、図中の ON, OFF は超音波照射の有無を示しており、入力電力が 0 (超音波照射なし), 1, 3, 5, 10, 20 W/unit とした場合である。図より、超音波を照射する前の濃度はいずれの場合とも時間の経過と共に増加し、その後 500 s 程度で飽和し、ほぼ一定値になっている。その後、超音波を照射すると、濃度はいずれの入力電力の場合とも急激に減少した後、一定値に落ち着く。その後、超音波の照射を停止すると、濃度は超音波照射しない場合に近づいている。また、濃度の減少の割合は入力電力が大きいほど大きくなることがわかった。(2) 図 5 に示した凝集実験結果から凝集効果を検討するために、凝集率を求めた。凝集率  $E$  は次式のように定義した。

$$E = \left(1 - \frac{C_2}{C_1}\right) \times 100 [\%]$$

ここで、 $C_1$  は超音波を OFF から ON にする直前の 5 s 間 (595~600 s 間) の濃度の平均値であり、 $C_2$  は超音波 ON から OFF にする直前の 5 s 間 (895~900 s 間) の濃度の平均値である。

表 1 は各入力電力に対する結果である。表より、凝集率は入力電力が大きいほど高くなり、合計入力電力 40 W の場合の凝集率は 86 % に達した。また、合計入力電力 6 W の場合の凝集率は、2 W の場合に比べて、3 倍近い値が得られていることがわかった。

(3) 図 5 に示した各入力電力の場合において、超音波を照射し始める直前 (600 秒) の濃度を 0 %、超音波の照射を停止する直前 (900 秒) の濃度を 100 % とし、濃度が 10 % に達するまで時間から、濃度が 90 % に達するまでの時間を濃度の立下り時間と定義して、それぞれの入力電力にお

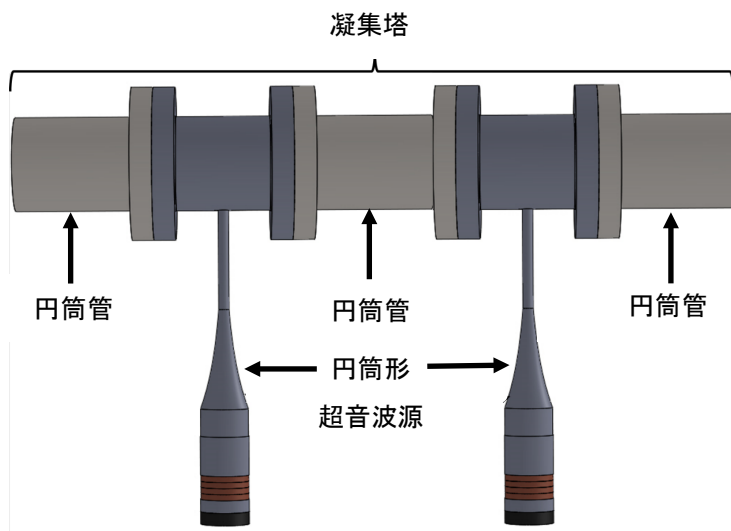


図 3 凝集塔の概略

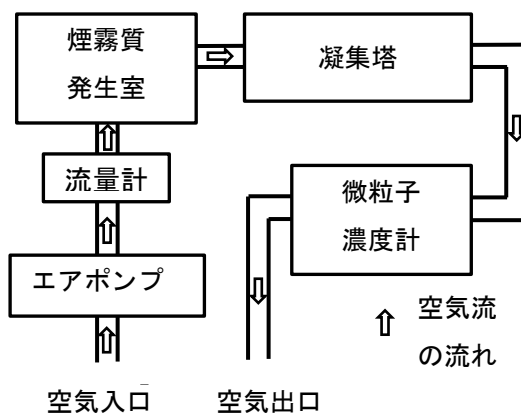


図 4 凝集実験装置

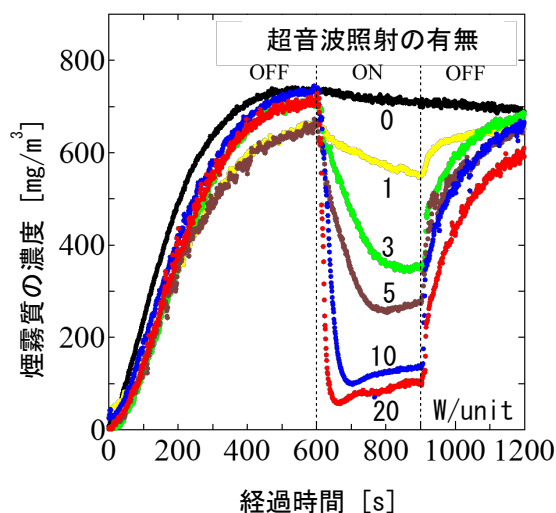


図 5 凝集実験の結果

ける立下り時間について検討した。これは、超音波による凝集効果が現れる速度を見る指標とするためである。

表2はそれぞれの入力電力に対する濃度の立下り時間の結果である。表より、濃度の立下り時間は入力電力が大きくなるほど急激に短くなる傾向にあり、濃度は入力電力が大きくなるほど急に減少していることがわかった。したがって、超音波の照射によって凝集効果が現れる速度は入力電力が大きいほど、速い傾向にあることがわかる。

(4) 本研究では、配管の途中に同径の円筒形たわみ振動板型空中超音波源を用いた場合の煙霧質の凝集について検討を行った。ここには記載していないが、凝集塔の容積を変えた場合の凝集効果についても検討している。その結果、以下のことが明らかになった。

- ・ 2台の超音波源を用いた凝集装置によって、大きな凝集効果が得られた。その効果は入力電力が大きくなるほど高くなった。例えば、合計入力電力が40Wの場合では、凝集率が86%の大きな値になった。

- ・ 凝集塔の容積が大きい場合の凝集率は、小さい場合と比べて、入力電力が比較的小さい場合においては低いですが、比較的大きくなると高くなった。

- ・ 凝集の立下り時間は入力電力が大きいほど短くなった。

これらのことから、円管と同じ内径で、比較的小さい円筒形たわみ振動板型空中超音波源を用いることによって、圧力損失をほとんど生じることが無く、PM2.5程度の煙霧質に対して大きな凝集効果が得られることが示された。使用した周波数が超音波領域であり、騒音が発生しないことも確認した。

表1 実験結果から求めた凝集率

入力電力 [W/unit]	1	3	5	10	20
合計電力 [W]	2	6	10	20	40
凝集率 [%]	17	50	58	81	86

表2 実験結果から求めた濃度の立下り時間

入力電力 [W/unit]	1	3	5	10	20
立下り時間 [s]	255	136	101	49	23

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Ono Yuki, Asami Takuya, Miura Hikaru	4. 巻 62
2. 論文標題 Agglomeration of aerosol using small equipment with two small aerial ultrasonic sources	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SJ1029(1-6)
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/acbbd3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Yusuke Hoda, Takuya Asami and Hikaru Miura	4. 巻 61
2. 論文標題 Aerosol agglomeration by aerial ultrasonic sources containing a cylindrical vibrating plate with the same diameter as a circular tube	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SG1073(1-7)
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/ac55db	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Takuya Asami and Hikaru Miura	4. 巻 57
2. 論文標題 Development of aerial ultrasonic source using cylinder typed vibrating plate with axial nodal mode	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 07LE11(1-7)
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7567/JJAP.57.07LE11	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計21件（うち招待講演 0件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 小野 湧喜, 浅見 拓哉, 三浦 光
2. 発表標題 小型空中超音波源を用いた容積の異なる装置による煙霧質の凝集
3. 学会等名 日本音響学会秋季研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大淵 稜太, 笠島 崇, 伊藤 伸介, 浅見 拓哉, 三浦 光
2. 発表標題 BLTと一体構造とした小型空中超音波源
3. 学会等名 日本音響学会秋季研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuki Ono, Takuya Asami, Hikaru Miura
2. 発表標題 Examination of aerosol agglomeration using two small aerial ultrasonic sources
3. 学会等名 超音波シンポジウム USE2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ryota Ohfuchi, Takashi Kasashima, Shinsuke Itoh, Takuya Asami, Hikaru Miura
2. 発表標題 Compact aerial ultrasound source integrating vibration surface with ultra-low loss BLT
3. 学会等名 超音波シンポジウム USE2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大淵稜太, 笠島 崇, 伊藤伸介, 浅見拓哉, 三浦 光
2. 発表標題 振動部を一体構造としたフランジ付きボルト締めランジュバン型小型空中超音波源
3. 学会等名 電子情報通信学会超音波研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 宝田祐介, 浅見拓哉, 三浦 光
2. 発表標題 2つの円筒形振動板型超音波音源を用いた煙霧質の凝集
3. 学会等名 日本音響学会秋季研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宝田祐介, 浅見拓哉, 三浦 光
2. 発表標題 Agglomeration experiment using enlarged volume by two ultrasonic sound sources using cylinder type vibrating plate
3. 学会等名 超音波シンポジウム USE2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宝田祐介, 浅見拓哉, 三浦 光
2. 発表標題 2台の空中超音波音源間の位相を変化させた場合の凝集濃度
3. 学会等名 日本大学理工学部学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宝田祐介, 浅見拓哉, 三浦 光
2. 発表標題 円筒形振動板型空中超音波音源を用いた凝集塔の容積を変えた場合の煙霧質の凝集
3. 学会等名 電子情報通信学会超音波研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宝田 祐介, 浅見 拓哉, 三浦 光
2. 発表標題 剛壁一体構造の円筒形振動板を用いた空中超音波音源による定在波音場形成の基礎検討
3. 学会等名 日本大学理工学部学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宝田 祐介, 浅見 拓哉, 三浦 光
2. 発表標題 円筒形振動板型超音波音源による煙霧質凝集の基礎検討
3. 学会等名 日本音響学会春季研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 本井凜太郎, 浅見拓哉, 三浦 光
2. 発表標題 空中強力超音波を用いた微粒子凝集の空気流量による影響
3. 学会等名 日本音響学会秋季研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 本井凜太郎, 浅見拓哉, 三浦 光
2. 発表標題 Agglomeration of aerosol using intense standing wave field of cylindrical shape
3. 学会等名 International Congress on Acoustics 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 本井凜太郎, 浅見拓哉, 三浦 光
2. 発表標題 Characteristics of particle size distribution of agglomerates in an ultrasonic source with a cylindrical rigid wall
3. 学会等名 第40回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム(国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 本井凜太郎, 浅見拓哉, 三浦 光
2. 発表標題 円筒剛壁付き超音波凝集装置における空気流量による濃度変化
3. 学会等名 日本大学理工学部学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 本井凜太郎, 浅見拓哉, 三浦 光
2. 発表標題 円筒剛壁一体型空中音源による煙霧質凝集の効果と粒径の関係
3. 学会等名 電子情報通信学会超音波研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 浅見拓哉, 三浦 光
2. 発表標題 FEMを用いた剛壁一体型構造の円筒形振動板の開発
3. 学会等名 電子情報通信学会超音波研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 門前大樹, 本井凜太郎, 浅見拓哉, 三浦 光
2. 発表標題 空中音波による煙霧質の凝集
3. 学会等名 若手・学生のためのAESジャパンフォーラム2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 本井凜太郎, 門前大樹, 浅見拓哉, 三浦 光
2. 発表標題 円筒形空中定在波音場による煙霧質の凝集
3. 学会等名 日本大学理工学部学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 本井凜太郎, 浅見拓哉, 三浦 光
2. 発表標題 空中強力超音波による煙霧質凝集粒子の観察
3. 学会等名 電子情報通信学会超音波研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 本井凜太郎, 浅見拓哉, 三浦 光
2. 発表標題 剛壁付き空中超音波音源による定在波音場を用いた煙霧質の凝集
3. 学会等名 日本音響学会春季研究発表会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

日本大学理工学部電気工学科三浦・浅見研究室  
<https://www.ele.cst.nihon-u.ac.jp/miuralab/index.html>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	河府 賢治  (KOFU Kenji)  (10424748)	日本大学・理工学部・准教授   (32665)	
研究分担者	浅見 拓哉  (ASAMI Takuya)  (60706571)	日本大学・理工学部・助教   (32665)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------