

折紙のように作れる飛沫抑制メガホンの試作と評価

石垣 陽¹⁾*, 三上 浩弥²⁾

Prototype and Evaluation of Origami-Style Splash Suppression Megaphone

Yo ISHIGAKI¹⁾*, Hiroya MIKAMI²⁾

ABSTRACT

To reduce the risk of droplet infection while enjoying entertainment events, a prototype droplet-suppression megaphone (DSM) was constructed from a single sheet of paper. We conducted droplet counting and visualization experiments with four sample patterns: no megaphone, normal megaphone, DSM (open outlet), and DSM (closed outlet). As a result, up to 250 droplets per frame were observed in the droplet-counting area of the sample without the megaphone immediately after the droplets were discharged, while the number of droplets was reduced to 1/5 in the case of the normal megaphone, at a frame rate of 30 frame/s. The number of droplets was further reduced to a maximum of 25 with a delay of about 100 frames with the DSM (closed outlet). The number of droplets in the DSM (open outlet) has not increased compared to the number of droplets in the background before droplet ejection.

Keywords: Droplet flow visualization, Megaphone, Sports, Entertainment, Origami

1. はじめに

スポーツイベントを大声で応援する、音楽ライブで観客が歌う、アイドルのイベントでのコール（掛け合い声）を出すなど、大きな声を出す行為はエンタテイメント系イベントにおける大きな楽しみの一つだといえる。しかし飛沫感染防止のため、観客がこれらの行為を行う事はガイドラインで禁止されてきた^{1,2)}。今後、新型コロナウイルスと共存する社会（いわゆるウィズコロナ）においては、経済活動の活性化と感染症対策の両立が求められる。そこで本研究では、エンタテイメントイベントの活性化を支援するため、大声を出した場合でも飛沫の発声を抑制できるようなメガホンを提案し、その効果を検証・可視化する。

先行研究として、齊藤らは、歌唱時に発生する飛沫を可視化し、フェイスシールド、マウスシールドやマスクの中から、適した个人防护具の検討を行った³⁾。また石井らは発話を伴う対面時の呼気に着目し、電子タバコの煙のレーザー散乱光をカメラで撮影することで、个人防护具周辺の気流を可視化することに成功している⁴⁾。しかしこれまで、エンタテイメントシーンにおける飛沫を抑制するための防護具としてメガホンに着目し、試作実証を試みた研究は皆無である。

2. 方法

2.1 メガホンの試作

試作した飛沫抑制メガホンを利用イメージを Fig.1 に示す。このメガホンは、紙1枚の形状で頒布し、利用者が折り紙のように自分で組み立てることの出来る紙メガホン「メガボン」（有限会社あんど企画、神奈川県鎌倉市）を原型として、さらに飛沫が直接前方に飛び出さないよう、傾斜した部位（邪魔板）が配置されるように設計した。



Fig. 1 組立てられた飛沫抑制メガホンの使用イメージ

1) 電気通信大学 大学院情報理工学研究科（〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1, E-mail: ishigaki@uec.ac.jp）

* 責任著者

2) カトウ光研株式会社 画像計測部 微粒子可視化 専任担当

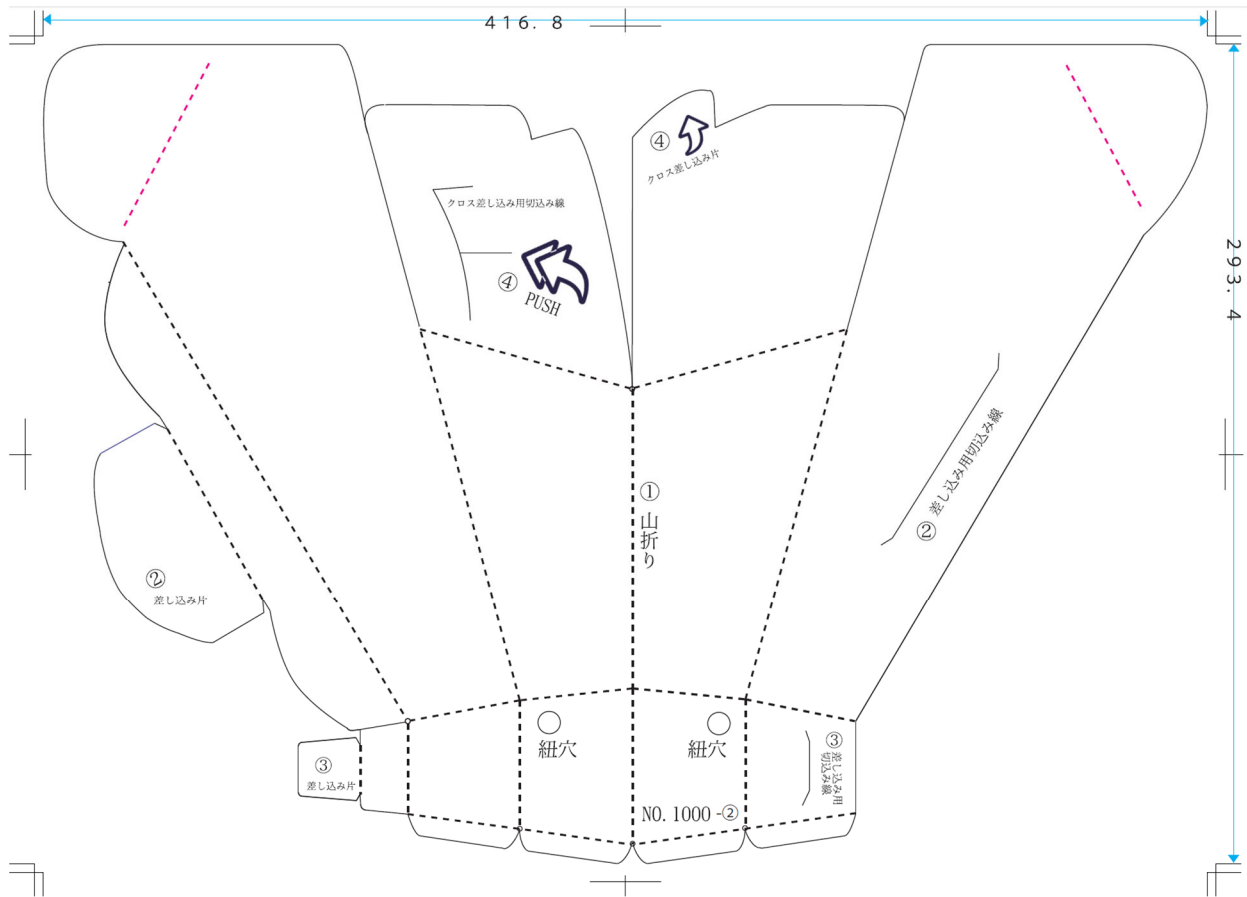


Fig. 2 飛沫抑制メガホンの展開図 (単位 : mm)

試作品の展開図を Fig.2 に示す. ここで実線は仕上がり時のカットライン, 数字①~④は組立手順を示す. 手順①では黒色の各点線部を山折りにする(赤色の点線については後述する). ②~④では, 対応する部分に差し込みを行う. 完成時の大きさは, 全長 34cm, 全高 16cm, 全幅 14.5cm, 口当たり部の大きさは縦横共に 6.5cm である. 組み立てにかかる時間は初見 1 回目で平均 30.2 秒, 2 回目で 18.9 秒であった (20~50 歳代の男女, N=10).

飛沫抑制メガホンの原型である「めがホン」は一般的なメガホンと同様, 口から出た気流に対して何らの遮蔽物も無いため, 飛沫が前方に飛散しやすい事が想定された. これに対して本試作品では飛沫の出口付近の紙を折り曲げて上方に傾斜させることで, 直接飛沫が傾斜部へ衝突することにより飛沫の吐出抑止が期待できる. そのため, Fig.1 に示した赤色の点線を折り上げることで, 出口の流路を絞り, より飛沫が吐出しにくくなる可能性もある. そこで, 左記の折り曲げを行わないものを「飛沫抑制メガホン折曲なし」, 折り曲げを行ったものを「飛沫抑制メガホン折曲あり」として, それぞれ実験を行った.

2.2 実験方法

Fig.3 に実験環境を示す. 飛沫発生装置はカトウ光研株式会社 (神奈川県伊勢原市) の KTM-55, 人頭マネキンは MN-2 を使用した. この飛沫発生装置は, 尾方らが提案した模擬唾液発生装置⁵⁾を元に制作されたもので, 圧縮空気によって模擬唾液 (水 1L 当たり塩化ナトリウム 12g 及びグリセリン 76g の混合溶液) をヒトの咳気流に近い速度で吐出することができる. 平均初速は 23 m/s に設定し, 実験中は同じ模擬唾液を用いて, 全パターン同じ条件で計測した.

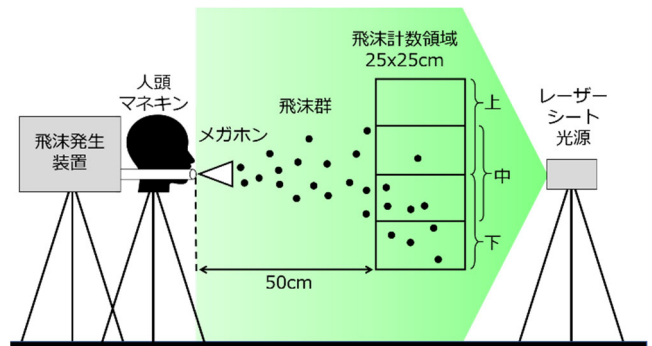


Fig. 3 実験環境

メガホン試料については、前述の「飛沫抑制メガホン折曲なし」、「飛沫抑制メガホン折曲あり」に加えて、「通常メガホン」（ファルコン社製のスポーツ応援メガホン FATC-ET1450, 直径 11cm, 全長 23cm）と、何も設置しない「メガホン無し」の場合の、全 4 パターンで実験を行った。各パターンにおいて 3 回の飛沫吐出実験を実施した。なお空間中の粗大飛沫を沈降させるため、吐出前には 10 分以上の待機時間を設けた。

生成された飛沫群は、カトウ光研株式会社の微粒子可視化システム PV2-II により可視化した。この装置は、垂直方向のラインレーザー光を生成できるレーザーシート光源 (PIV Laser G2000) と、リアルタイムで画像処理が可能な専用高感度カメラによって構成される。レーザーシート光源をメガホンに向けて照射し、2 次元断面上に映る飛沫群をカメラで撮影した。撮像できる最小粒子径は $0.3\mu\text{m}$ 程度とされている。同様の装置は、Hasegawa らによる抜管中のエアロゾル曝露の低減のための防護具(EA-Shield)の開発⁶⁾でも実績があるため、本研究でも採用した。なお、カメラのサンプリングレートは 30 frame/s で画素数は 320 万画素に設定した。

画像フレームは、飛沫吐出の瞬間を相対フレーム番号 0 として記録した。すなわち飛沫吐出前（後）の相対フレーム番号は負（正）の値となる。

2.3 分析方法

実験系において生成された飛沫は、Fig.3 に示した 3 つの飛沫計数領域（上・中・下）ごとにカウントした。飛沫計数領域は 25cm 四方の矩形領域 (0.04292 cm/pixel であるため 582×582 画素の矩形領域) とし、飛沫発生装置の吐出口から水平方向に 50cm の地点を発端とし、中心の高さを、吐出口の高さと同じ位置に配置したものを「中」、中から上方（下方）に 12.5cm 移動したものを「上（下）」と定義した。

客席の椅子の前後間隔については自治体によって基準が異なるが、東京都の火災予防条例では、屋外で背もたれがある場合は 75cm 以上、無い場合は 70cm 以上と規定されている⁷⁾。しかし実際に声援を出す場面では、観客が前のめりとなることで前方の席との間隔が狭まる事も想定されるため、安全をみて、吐出口からの水平距離が 50~75cm 程度の範囲の飛沫の挙動を可視化することが適切だと判断した。また一般に客席は前に行くほど高さが低くなっている事が多いため、「中」に加えて「下」も設定した。さらに、メガホンの形状によっては上方に飛沫が飛散する可能性もあるため、「上」も設定した。

専用高感度カメラから得られた画像から、Python の Open CV ライブラリを用いることで、次の 5 ステップの手順で飛沫計数領域毎にカウントを行った。

- (1) 入力画像から 25cm 四方の飛沫計数領域（上・中・下）を切り出す。以下の処理は飛沫計数領域毎に行う。
- (2) 固定閾値法により二値化する（背景と飛沫の輝度差が十分あるため、動的閾値法ではなく固定閾値法を使用）。

- (3) 5×5 画素のメディアンフィルターで、孤立点ノイズを除去する。
- (4) 8 近傍ラベリングにより、15 画素未満の画素をノイズとして除去する。
- (5) ラベル数を飛沫数として計数する。

3. 結果と考察

Fig.4 に、各試料パターンについて、飛沫計数領域（上・中・下）毎に得られたフレーム当たりの最大カウントをまとめた。いずれの試料においても飛沫数が最も多い領域は「中」、最も少ない領域は「上」であった。これは、飛沫が直線的に移動することと、重力沈降する性質があるためだと考えられる。

続いて Fig.5 に、各メガホン試料における、相対フレーム毎の飛沫計数領域（上・中・下）内での最大カウントを示す。相対フレーム番号=0 が飛沫吐出の瞬間であり、「メガホン無し」ではその直後に 250 個程度の突出して多くの飛沫がカウントされ、その後、時間の経過と共に現象する様子がわかる。

次に多くの飛沫が記録されたのは「通常メガホン」であり、「メガホン無し」と同様に飛沫吐出直後に 50 個程度がカウントされた。しかし「メガホン無し」と比較するとフレーム当たりの飛沫数は 1/5 程度であるため、通常メガホンであっても飛沫抑止には一定の効果があると推察できる。

「飛沫抑制メガホン折曲なし」では、飛沫吐出前の時刻における飛沫数（バックグラウンド）と比較して、飛沫吐出後に飛沫が増加した形跡が認められない。従って本実験系で計数できる粒子径の飛沫は殆ど飛散していないことがうかがえる。一方、「飛沫抑制メガホン折曲あり」では、飛沫吐出直後では顕著な飛沫数の増加は見られないものの、100 フレーム近辺からバックグラウンドと比較してやや多い 25 個程度の飛沫が遅延して観測された。

最後に、それぞれの試料における飛沫の挙動を可視化するため、Fig.6 に飛沫吐出直後（10~15 フレーム）における可視化画像を示す。Fig.6 (a)は遮蔽物が無いため、飛沫発生装置の射出口からほぼ一直線に飛沫が飛んでいる様子がわかる。Fig.6 (b)も同様に直線状の飛沫が観察できるが、メガホンの形状がもたらす気流の抑制により、飛沫数の減少が起きているものと推察できる。

続いて Fig.6 (c)では、メガホンの先端部分の流路が折曲によって狭まっているために、その隙間から飛沫が飛び出している。それらは、(b)ほどの直線的な動きではないものの、乱流に乗りながら、画像中に四角形で示されている飛沫計数領域（上・中・下）に到達していることがわかる。

一方で、Fig.6 (d)では、飛沫は出ているものの流速が比較的遅いためメガホンの先端付近のみに停滞していることが観察できる。

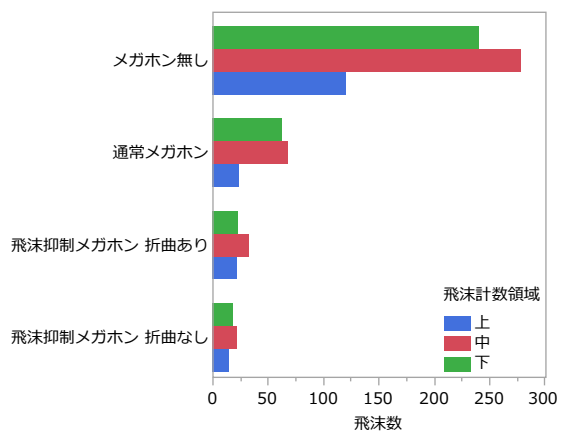


Fig. 4 飛沫計数領域毎の最大カウント

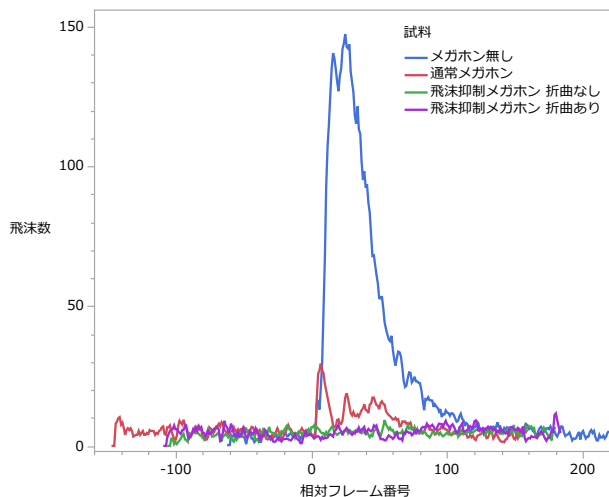
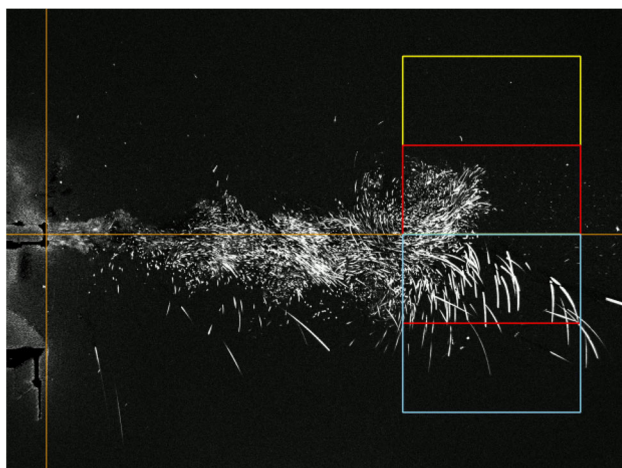
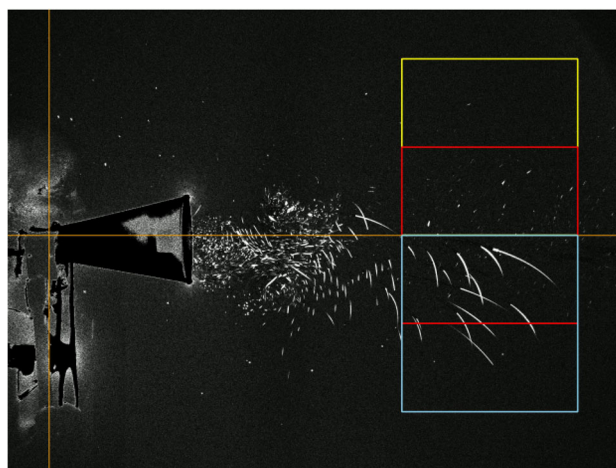


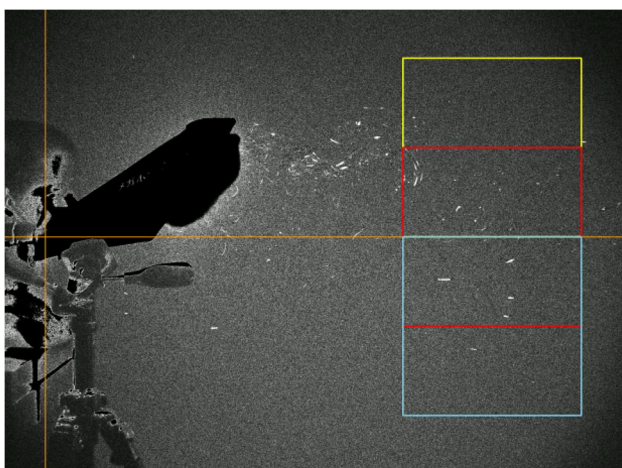
Fig. 5 各試料におけるフレーム毎の最大飛沫数



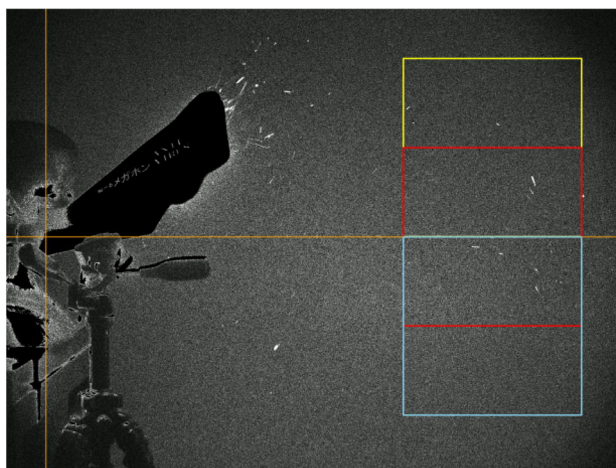
(a) メガホンなし(10)



(b) 通常メガホン(10)



(c) 飛沫抑制メガホン折曲あり(15)



(d) 飛沫抑制メガホン折曲なし(15)

Fig. 6 各試料における可視化画像

(カッコ内は相対フレーム番号, コントラストは自動調整とし画像は無加工)

4. 議論

実験結果から、飛沫抑制効果は高い順に、「飛沫抑制メガホン折曲なし」「飛沫抑制メガホン折曲あり」「通常メガホン」「メガホン無し」であることがわかった。

内部に特に遮蔽物が無いような貫通型の「通常メガホン」は、声をより遠くまで届ける目的で使用される。そのため直感的には、飛沫もより遠くまで届くように感じるだろう。しかし Fig.4 から、「通常メガホン」であっても、「メガホン無し」と比較して 1/5 程度の飛沫抑制効果が認められた点は重要な発見だといえる。一般に狭いノズルから吐出される気流は、その粘性によって周辺の空気を誘引しながら推進する性質がある。メガホンを装着することによって、この誘引が阻害され、速度や風量が減少した可能性もあるだろう。本発見は今後、様々な形状のメガホンやウチワ等、観戦・鑑賞イベントで用いられるグッズの流体力学的な特性を分析することで、エンタテインメント系イベントにおける新しい飛沫感染対策のあり方を提言することに繋がるきっかけになると考えられる。

また本研究では、Fig.5 に示したようにレーザーシート光源と高感度カメラによる飛沫の可視化を行うことで、飛沫の流れを可視化することができた。これにより、「メガホンなし」や「通常メガホン」では飛沫が直線上に飛散するのに対して、「飛沫抑制メガホン折曲なし」では乱流に乗ってやや遅延する形で飛沫計数領域に到達する様子が観察された。さらに、「飛沫抑制メガホン折曲あり」では、少量の漏れ出た飛沫がメガホン出口付近に停滞していることもわかった。

以上のような可視化は、飛沫抑制メガホンの開発において、その効果を確認めながら試作・検証・改善を繰り返すことができるため、非常に有益だったといえる。さらに今後、飛沫抑止に有効な機構上の要素や、逆に阻害要因を要素分解的に解明するためには、メガホンのパーツ（例：口当て部、遮蔽部、射出部）毎にパターン化した上で、粒子画像流速測定法(Particle Image Velocimetry, PIV)や熱流体シミュレーションを組み合わせた解析も求められるだろう。

一方、いくら飛沫抑止効率が高くても、低コスト化や量産性の高い設計でなくては、社会実装が進まないだろう。その意味で、今回試作した飛沫抑止メガホンは紙 1 枚のみから構成されており、利用者が自分で組み立てる事ができる点で優れている。

本研究の欠点は、声を遠くに届けるというメガホン本来の特性、すなわち音圧の損失についての評価をしていない点にある。特に「飛沫抑制メガホン折曲あり」では気流が紙によって屈曲しているため、「通常メガホン」等と比較して、十分に声が遠くまで届かない可能性もある。今後は、メガホンによる音圧減衰と飛沫抑制効果の両面から、エンタテインメント利用においてバランスの良い飛沫抑制メガホンの設計を行う必要があるだろう。

6. まとめ

飛沫感染リスクを低減させながら観戦・鑑賞イベントを楽しめるよう、紙 1 枚から、利用者が数十秒で組み立てる事ができる、実用性の高い飛沫抑制メガホンを試作した。このメガホンは出口付近の紙を傾斜させることにより、飛沫の吐出を抑止できるよう設計した。

飛沫発生装置、飛沫可視化装置および画像処理によって、「メガホンなし」「通常メガホン」「飛沫抑制メガホン折曲なし」「飛沫抑制メガホン折曲あり」の 4 パターンの試料における飛沫の可視化と飛沫数の計数実験を行った。

その結果、「メガホンなし」では、飛沫吐出直後に飛沫計数領域においてフレーム当たり最大 250 個の飛沫が観測されたが、「通常メガホン」では飛沫数が 1/5 に低減した。さらに「飛沫抑制メガホン折曲なし」では、100 フレームほど遅延して最大 25 個程度に低減した。また、「飛沫抑制メガホン折曲あり」では、飛沫吐出前の時間帯における飛沫数(バックグラウンド)と比較して、飛沫数の増加は見られなかった。

以上より、試作した「飛沫抑制メガホン折曲あり」は、「メガホンなし」「通常メガホン」あるいは「飛沫抑制メガホン折曲なし」と比較して、大きな飛沫抑制効果があったといえる。

今後は、音圧の減衰についても併せて評価する他、実際の会場等で被験者実験による可視化を行いたい。

参 考 文 献

- 1) 全国興行生活衛生同業組合連合会：演芸場における新型コロナウイルス感染拡大予防ガイドライン，2021年12月3日
- 2) 日本音楽会場協会：ライブハウス・ライブホールにおける新型コロナウイルス感染拡大予防ガイドライン，2022年10月14日
- 3) 齊藤 忠彦，田島 達也，岩崎 博道，岡本 隆太，高橋 幸三，財満 健史，大脇 雅直：歌唱の活動における飛沫感染対策に関する検討，音楽教育学，51巻1号(2021)，p. 25-35.
- 4) 石井 慶子，大野 淑子，及川 麻衣子，大西 典子：接触・発話を伴う対面時の呼気の可視化，可視化情報学会論文集，41巻7号(2021)，21-27.
- 5) 尾方 壮行，市川 真帆，堤 仁美，有賀 隆男，堀 賢，田辺 新一：模擬咳発生装置による飛沫沈着量分布の測定，日本建築学会環境系論文集，83巻743号(2018)，57-64.
- 6) Hasegawa G, Sakai W, Chaki T, Tachibana S, Kokita A, Kato T, Nishimura H, Yamakage M. Investigations into the efficacy of a novel extubation-aerosol shield: a cough model study. *Infect Prev Pract.* 2022 Mar;4(1):100193. doi: 10.1016/j.infpip.2021.100193. Epub 2021 Dec 4. PMID: 34901825; PMCID: PMC8642834.
- 7) 東京都：火災予防条例，昭和 37 年 3 月 31 日東京都条例第 65 号