



# 圧縮空気駆動型空気砲における渦輪制御に関する検証

## Verification of Vortex Ring Control in Compressed Air Driven Air Cannon

林崎智和<sup>1)</sup>, 渡辺久馬<sup>1)</sup>, 野間春生<sup>2)</sup>, 柳田康幸<sup>3)</sup>

Tomokazu HAYASHIZAKI, Kyuma WATANABE, Haruo NOMA, and Yasuyuki YANAGIDA

- 1) 名城大学 理工学研究科 (〒468-8502 名古屋市天白区塩釜ロー一丁目 501 番地, 193426014@ccmailg.meijo-u.ac.jp)  
2) 立命館大学 情報理工学部 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1 丁目 1-1, hanoma@fc.ritsumei.ac.jp)  
3) 名城大学 理工学部 (〒468-8502 名古屋市天白区塩釜ロー一丁目 501 番地, yanagida@meijo-u.ac.jp)

**概要:** 空気砲から射出される渦輪を用いた香り提示を行う香りプロジェクタの研究が行われている。空気砲駆動の 1 つには、圧縮空気により空気を押し出す方法がある。しかし、安定して渦輪を生成するために長い筒が必要になる。一方、複数の射出孔を制御し渦輪を生成するクラスタ方式空気砲が提案されている。本研究では、シミュレーションと実機の実験から圧縮空気駆動の渦輪生成条件を検証しクラスタ方式と比較した。結果として、圧縮空気駆動の渦輪生成条件として、空気砲本体にある程度の円筒の長さを確保する必要であるとわかり、クラスタ方式ではコンパクトにできる利点があることがいえる。

**キーワード:** 嗅覚ディスプレイ, 渦輪, 空気砲

### 1. はじめに

空気砲から射出される渦輪に香りを載せることにより、局所的な香り提示を行う香りプロジェクタ[1]の研究開発が行われている。空気砲の駆動方法には、機械的な容積変動による方法と圧縮空気により空気を押し出す方法が存在する。圧縮空気駆動型空気砲としては、顔面に風圧提示を行うシステム[2]が開発されている。駆動機構を圧縮空気とすることは、機械的駆動部をなくすことで駆動した際の振動による渦輪への影響を軽減する利点がある。しかし、渦輪を嗅覚ディスプレイとして用いる場合、触覚ディスプレイとして求められる性能とは異なる点があるため、改めて検討が必要である。また、安定した渦輪を生成するためには長い円筒を用いる必要があると報告されており[2], 円筒のコンパクト化に関する検討が必要である。一方、圧縮空気を利用したクラスタ方式空気砲[3]が提案されている。板面に小型の射出孔を複数設け、同心円状に存在する射出孔をグルーピングすることにより、射出する空気の圧力とタイミングを制御する。射出孔から射出される空気により流速分布を構成することで渦輪を生成する。これにより、機械的な構造を変更することなく、渦輪のパラメータを変更することを可能とした。

本研究では、シミュレーションと実機の射出実験により、圧縮空気を用いた従来型の空気砲における円筒の長さ、射出する流速を変更した際の渦輪生成条件を検証した。また、

クラスタ方式空気砲と比較することで、クラスタ方式空気砲の利点を明らかにした。

### 2. 空気砲の駆動について

空気砲は、容器に円形の開口部を設け、何らかの駆動方法により容器内の空気を圧縮することにより、開口から空気が押し出され渦輪を生成する。駆動方法には、機械的な容積変動による方法と圧縮空気により空気を押し出す方法が存在する。

圧縮空気により空気を押し出す方法として、圧縮空気駆動型空気砲がある。圧縮空気駆動型空気砲は、コンプレッサ、エアタンク、バルブ、空気砲本体から構成される。バルブにより弁が開放されると、タンク内の圧縮空気が噴出し、バルブの先に接続された空気砲本体に十分に長い筒を設けることにより渦輪を生成することができる。タンク内の空気圧を上げることにより、渦輪速度を速くすることが可能である。渦輪速度の制御が可能であることから、空気砲を触覚ディスプレイとして用いる際にはユーザに異なる感覚を提示することができる。

### 3. クラスタ方式空気砲

園田らにより提案された、クラスタ方式空気砲(Cluster Digital Vortex Air Cannon: CDA)[3]を図 1 に示す。従来型空気砲ではその構造から、渦輪のパラメータを変更するた



図 1: クラスタ方式空気砲[3]

めには機械的な構造を変更する必要があった。そこでクラスタ方式空気砲では、10 cm 角の板面に小型の空気射出孔を複数設け、同心円状に存在する射出孔についてグルーピングを行った。射出孔から射出される空気により流速分布を構成することで渦輪生成が可能である。また、グループごとに射出する空気の圧力とタイミングを変化させることで、渦輪のパラメータを変化させることが原理的に可能である。

## 4. 渦輪生成条件の検証

### 4.1 シミュレーション環境

圧縮空気駆動型空気砲の渦輪生成条件を確かめるために流体シミュレーションを行った。シミュレーション環境を図2に示す。シミュレーション空間は図2において塗りつぶされた範囲であり、渦輪の進行方向を 1000 mm、進行方向に対して垂直な方向を 150 mm とする。三次元空間でのシミュレーションは計算量が膨大になるため、二次元空間でのシミュレーションを行った。二次元シミュレーションを行うにあたり、後面は円周方向に変化しない空気射出部を用いる必要がある。実際に使用する空気

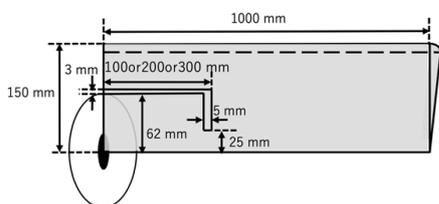


図 2: シミュレーション環境

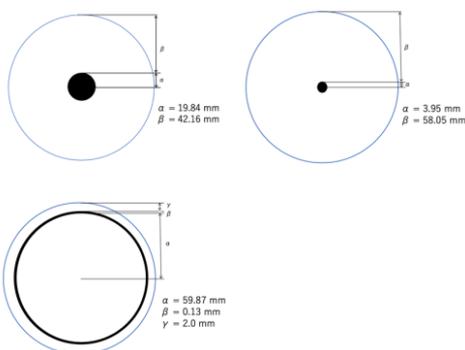


図 3: シミュレーションでの空気射出部

砲は後面にチューブを接続するため、複数の射出孔が設けられた形状である。そのため空気射出部の相違は明らかであるが、実際の空気射出部に近似したモデルを用いたシミュレーション結果は、実機による結果に似た特徴を持つと考えられる。そのため、渦輪生成条件を検討する上では有効な知見であると考えシミュレーションを行う。空気砲の円筒部は 100, 200, 300 mm を用いて渦輪生成可否を判定する。

シミュレーションに用いる空気射出部として、低流速型(図3左上)、中央型(図3右上)、外縁型(図3左下)を作成した。射出時間を 60 ms とし、射出体積の合計が 400 cm<sup>3</sup> となる流速を設定した。流速はそれぞれ 5.39 m/s, 中央型および外縁型は 135.9 m/s である。本来流速による渦輪生成可否への影響を検証するためには、低流速型と中央型の空気射出部には同一のものを用いることが望ましい。しかし、射出時間および射出体積の合計を揃えるためには、低流速型において十分な射出部面積を確保する必要があるため、特徴をできる限り揃えた空気射出部を用いた。

### 4.2 シミュレーション結果

空気射出開始から 0.3 s 後におけるシミュレーション結果から渦輪生成可否を判定する。シミュレーションによる渦輪生成可否を表1に示す。図4は、低流速型の空気射出部、円筒の長さを 100 mm とした際の結果であり、渦輪の生成に成功していることがわかる。円筒の長さを 200 mm,

表 1: 渦輪生成可否(シミュレーションによる検証)

	100 mm	200 mm	300 mm
低流速型	○	○	○
中央型	×	×	×
外縁型	×	×	○

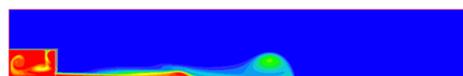


図 4: 低流速型, 円筒の長さ 100 mm

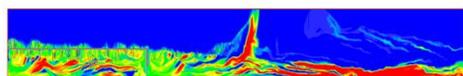


図 5: 中央型, 円筒の長さ 300 mm

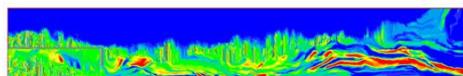


図 6: 外縁型, 円筒の長さ 200 mm

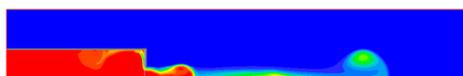


図 7: 外縁型, 円筒の長さ 300 mm

300 mm にした際も、同様に渦輪生成に成功した。図 5 は中央型の空気射出部、円筒の長さを 300 mm とした際の結果であり、渦輪の生成に失敗していることがわかる。円筒の長さを 100 mm, 200 mm にした際も、同様に渦輪生成に失敗した。図 6, 図 7 は、外縁型の空気射出部、円筒の長さをそれぞれ 200 mm, 300 mm とした際の結果である。円筒の長さを 200 mm とした際は渦輪の生成に失敗しているが、円筒の長さを 300 mm とすると渦輪の生成に成功した。円筒の長さを 100 mm とした際は、200 mm と同様に渦輪生成に失敗した。



図 8: 圧縮空気駆動型空気砲

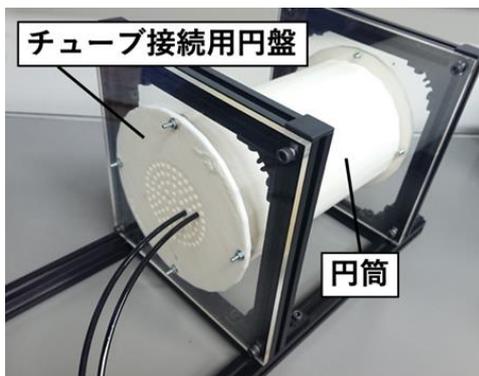


図 9: 圧縮空気駆動型空気砲(後面)

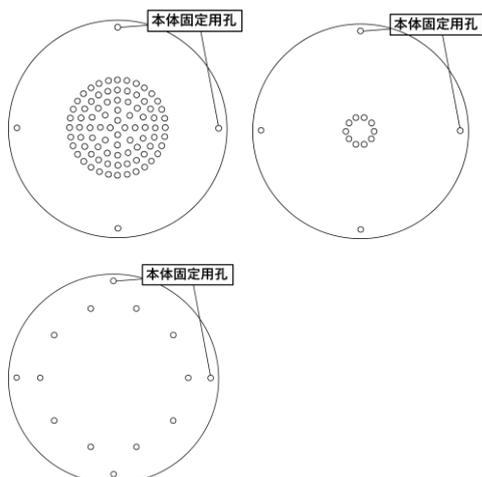


図 10: チューブ接続用円盤

表 2: 渦輪生成可否(実機による検証)

	100 mm	200 mm	300 mm
低流速型	△	○	○
中央型	×	×	×
外縁型	×	×	○

#### 4.3 実機による検証

シミュレーション結果を踏まえ、実際に圧縮空気駆動型空気砲(図 8, 図 9)を作成して渦輪生成条件の検証を行った。空気砲は前面が開口部、側面が円筒、後面がチューブ接続用の孔を持つ円盤により構成される。側面の円筒は、シミュレーションで用いた円筒の長さと同様に、100, 200, 300 mm をそれぞれ作成した。後面の円盤はそれぞれシミュレーションで用いた 3 種類(低流速型, 中央型, 外縁型)の空気射出部と同じ特徴を有しており、それぞれ低流速型(図 10 左上), 中央型(図 10 右上), 外縁型(図 10 左下)である。低流速型は同心円状に 84 個のチューブ接続用の孔が設けられている。中央型は中央付近の同心円状に 10 個の孔が設けられている。外縁型は外縁付近の同心円状に 10 個の孔が設けられている。

#### 4.4 実験結果

円筒, チューブ接続用円盤を用いた渦輪生成可否を表 2 に示す。射出時間を 60 ms とし、円盤, 円筒のすべての組み合わせにおいて 3 回以上の試行を行った。渦輪の生成可否は、すべての組み合わせにおいて全試行で同じであった。低流速型では、円筒の長さ 100, 200, 300 mm いずれにおいても渦輪が生成された。しかし 100 mm では、渦輪の崩壊が早いため飛距離が短く、明らかに不安定な渦輪が生成されることがあった。中央型では、100, 200, 300 mm いずれを用いても渦輪を生成することができなかった。外縁型では、300 mm を用いた際は渦輪が生成される一方、100, 200 mm を用いると渦輪が生成されなかった。

#### 4.5 考察

中央型と外縁型の結果から、空気射出部を中央から離すことにより、等しい流速を用いた場合でも渦輪生成可否が変化することが分かった。中央型では、射出された空気が開口部に直接吹き出すことにより、開口部が渦輪生成に干渉していないことが考えられる。このことから、[2]で用いられた円筒がそのまま開口部となる空気砲と比較して、円筒と開口部が独立した空気砲とすることで、渦輪生成が可能であると考えられる。

低流速型と中央型の結果から、遅い流速を用いることにより、円筒の長さを短くすることが可能である。しかし、射出体積を確保するためには、十分な空気射出部の面積が必要である。実際に空気砲を設計する際は、空気射出部から射出された空気を一様な流速で開口部から吹き出すために、ある程度の円筒の長さは確保する必要があると考えられる。よって円筒のコンパクト化には限界があることがわかる。一方、クラスタ方式空気砲においては、射出孔が

ら射出される空気により流速分布を構成するため、そもそも円筒は存在しない。これは圧縮空気駆動型空気砲と比較すると明らかにコンパクトであり、クラスタ方式空気砲の利点であるといえる。

## 5. まとめ

本研究では、嗅覚ディスプレイとしての圧縮空気駆動型空気砲を作成し、渦輪生成条件についての検証を行った。シミュレーションと実機による検証から、圧縮空気駆動型空気砲の渦輪生成条件として、空気砲本体部にある程度の長さを確保しないと渦輪生成が難しいことが確認された。これに対して、クラスタ方式空気砲では円筒なしに渦輪生成が可能である。これは、圧縮空気駆動型空気砲と比較しても、空気砲本体部をコンパクトにできることを示しており、クラスタ方式空気砲の利点であるといえる。

## 参考文献

- [1] 柳田康幸：渦輪を利用した局所的香り提示技術の現状と課題, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 19, pp. 29–36, 2004.
- [2] 橋口哲志, 大森奈央, 山本修平, 上岡玲子, 竹田仰：風圧型顔面触覚ディスプレイの VR シアターへの応用, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 17, No. 4, pp. 393–398, 2012.
- [3] 園田祐馬, 大井翔, 松村耕平, 柳田康幸, 野間春生：クラスタ方式空気砲の設計と評価, 第 23 回バーチャルリアリティ学会大会論文集, 34B-4, 2018.
- [4] 渡辺久馬, 柳田康幸: 空気砲の軌道安定化へ向けた最適な開口部形状の実験的考察, 第 23 回バーチャルリアリティ学会大会論文集, 34B-3, 2018.