



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

渡辺久馬¹⁾, 柳田康幸²⁾

1) 名城大学 理工学研究科 (〒468-8502 愛知県名古屋市中天白区塩釜口 1-501, 183426024@ccalumni.meijo-u.ac.jp)

2) 名城大学 理工学部 (〒468-8502 愛知県名古屋市中天白区塩釜口 1-501, yanagida@meijo-u.ac.jp)

概要: 空気砲の渦輪に香りを載せることで香り提示を行う香りプロジェクトでは、非装着かつ時空間的に局所的な香り提示が可能である。2つの渦輪を衝突・崩壊させることで自由空間中に香り場を生成する方式が提案されており、香り場生成の確実性を向上させるためには渦輪の軌道安定化が必要である。空気砲開口部形状において、開口部に向けて滑らかに絞り込まれていく形状とすることで軌道安定性が向上するという報告がある。その後、開口部に向けて直線的に突き出した形状においては、軌道安定性の向上が確認されなかった。しかし、開口部を曲線的に突き出させることによる影響は不明である。そこで本研究では軌道安定化へ向けて、曲線的に突き出した開口部形状を用いて実験を行った。その結果、曲線的に突き出した形状とすることで、渦輪の進行方向に対して垂直な方向のばらつきが小さくなり、軌道安定性が向上することが示された。また、渦輪衝突の観点から、渦輪の進行方向のばらつきについても渦輪衝突の確実性を向上させる可能性が示された。

キーワード: 香りプロジェクト, 軌道安定性, 開口部形状

1. はじめに

バーチャルリアリティ (VR) における感覚提示ディスプレイは、視聴覚ディスプレイに始まり、力触覚ディスプレイ、嗅覚ディスプレイと発展してきた。これらの感覚提示ディスプレイの中で、嗅覚ディスプレイはいまだ一般に普及しておらず、研究段階にあると言える。

嗅覚ディスプレイを構成する際に必要な技術には、所望の香り成分を所望の濃度で発生させる技術と、香りを人間の嗅覚器まで搬送する香り搬送技術がある[1]。香り搬送技術には、風と感じないほど低速な空気流を用いる方式[2]、チューブを用いたウェアラブル方式[3]などが存在する。その中で我々は、空気砲の渦輪に香りを載せることで香り提示を行う香りプロジェクトの研究を行っている。香りプロジェクトでは、非装着かつ時空間的に局所的な香り提示が可能という特徴がある[4]。

香りプロジェクトを用いて、2つの渦輪を衝突・崩壊させることで自由空間中に香り場を生成する方式が提案されている。この方式により、渦輪が直接顔に当たった際の突風感を抑え、さらに衝突する渦輪の速度バランスを制御することで香りの漂う方向を制御することが可能となる。渦輪を確実に衝突させ、香り場生成の確実性を向上させるためには、渦輪の軌道安定化が必要である。

渦輪の軌道安定化について、空気砲開口部形状が開口部に向けて滑らかに絞り込まれていくようにすることで軌道安定性が向上するという報告[5]がある。その後、空気砲開口部を円錐台形状とし前方へ突き出させた場合、軌道安定性に与える影響は確認されなかった一方、渦輪速度は遅くなり、渦輪の最大到達距離が短くなることが確認された[6]。また、渦輪速度が軌道安定性に与える影響も確認されなかった。しかし、開口部形状については前方へ突き出した部分の断面形状が直線的ではなく、曲線にすることで空気流が安定するという推察[5]がある。また実際に、空気砲を用いた力触覚ディスプレイにおいて開口部を曲線的に突き出した形状を採用した事例[7]が存在する。しかし、いずれも実験の詳細が明確ではなく、軌道安定化へ向けた最適な開口部形状を定量的に検証する必要がある。

そこで本研究では、空気砲開口部形状を前方へ曲線的に突き出すことによる軌道安定性への影響を実験的に検証し、軌道安定化へ向けた最適な開口部形状の考察を行う。

2. 実験方法

2.1 実験装置

実験で用いる空気砲 (図 1) は、前面を開口部、側面を円筒型のジャバラ、後面をアクリル円板で構成される。渦輪の射出は、ステッピングモータによりピストン・クランク機構を駆動することでジャバラを収縮させ、後面を押し出すことで行う。

Kyuma WATANABE and Yasuyuki YANAGIDA

ピストン・クランク機構による押し出しの最大ストロークは 20 mm であり, 1 回転 1000 pulse のステッピングモータを使用する。ステッピングモータに設定するパラメータは, 押し出し量が最大となるよう移動パルス数 (射出量) を 500 pulse とする。また, 目標最大速度 (射出速度) を 20000 pulse/sec とする。

空気砲開口部は 3D プリンタにより作成した。曲線的に突き出した開口部 (以後, 曲線突き出し) の断面および作成した開口部を図 2 に示す。開口径を 50 mm, 空気砲の内径を 124 mm, 開口部先端の厚さを 1 mm とする。曲線部の形状は開口部先端と空気砲の内径部を端点とし, 中心角 60 deg の円弧とする。曲線突き出しとの比較のために用いる突き出しの無い開口部 (以後, 突き出し無し) の断面および作成した開口部を図 3 に示す。開口径を 50 mm, 空気砲の内径を 124 mm, 開口部エッジの厚さを 5 mm とする。

2.2 実験装置

渦輪測定環境を図 3 に示す。測定環境は, 渦輪が室内の空気流の影響を受けないように, 透明のビニールシートおよび暗幕で覆われた約 2500 mm×900 mm×900 mm のパイプフレームを使用する。観測可能な渦輪の最大到達距離は約 2000 mm であり, 空気砲は床面から空気砲開口部中心までの高さが 450 mm となるように設置する。

空気砲から射出された渦輪を可視化するために Fog マシン (Look Solution, TINY C07) を使用し, LED 照明を渦輪の進行方向の床面に設置する。渦輪の記録はカメラ (Nikon, COOLPIX P7800) を用いて動画 (1080 p/30 fps) で行う。撮影の際カメラに触れることにより, カメラが動くことを防ぐためにワイヤレスリモートコントローラ (Nikon, WR-R10 および WR-T10) を用いる。

空気砲の開口部中心を原点 O , 床面と平行な方向 (渦輪の進行方向) を x 軸, 床面と垂直な方向 (渦輪の進行方向に垂直な方向) を y 軸とし, 渦輪の位置を (x, y) で表す。

2.3 実験手順

曲線突き出しと突き出し無しを用いて実験を行った。以下の手順を 20 回繰り返して試行を行うことを 1 セットとし, 曲線突き出しは 2 セット, 突き出し無しは 1 セット行った。

- (1) 空気砲内部に Fog を約 5 秒間充填
- (2) ビニールハウス内の温度・湿度を測定
- (3) 動画撮影を開始
- (4) 渦輪を射出
- (5) 渦輪の消滅を目視で確認
- (6) 動画撮影を終了
- (7) 空気砲内部と実験環境内に残留する Fog の除去
実験開始時など, カメラが移動した際はカメラキャリブレーションを行うために, 白と黒の市松模様のキャリブレーションボードを渦輪の進行方向上に設置して撮影を行った。渦輪の位置 (x, y) を得るために, 撮影した動画から 1 フレームごとに手動で座標を抽出し, 画像座標から世界座標に変換する。座標抽出は, 渦輪が崩壊もしくは視認

できなくなるまで行った。抽出を手動により行うために生ずるずれは, 同フレームに対して複数回抽出を行ったところ, xy 方向ともに平均約 ± 3 mm である。

3. 実験結果

3.1 渦輪の軌跡

曲線突き出しの 1 セット目, 突き出し無しにおける 20 回分の渦輪の軌跡を図 5, 図 6 に示す。 x 軸方向の位置が大きくなる (渦輪が進む) ほど y 軸方向の位置のばらつきが大きくなり, 軌道安定性が低下することがわかる。また,

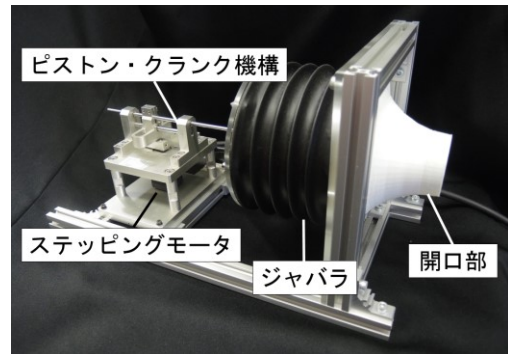


図 1 実験で使用する空気砲

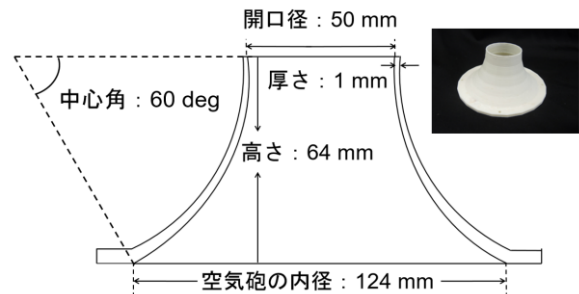


図 2 開口部 (曲線突き出し)

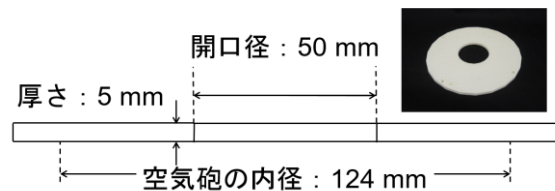


図 3 開口部 (突き出し無し)

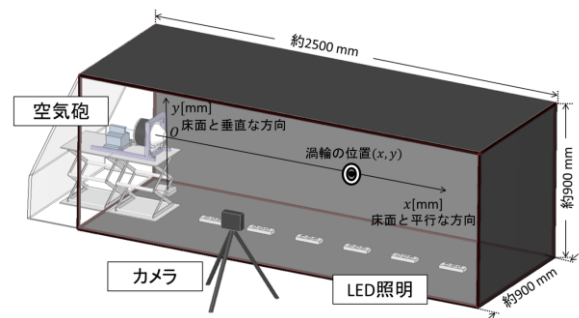


図 4 渦輪測定環境

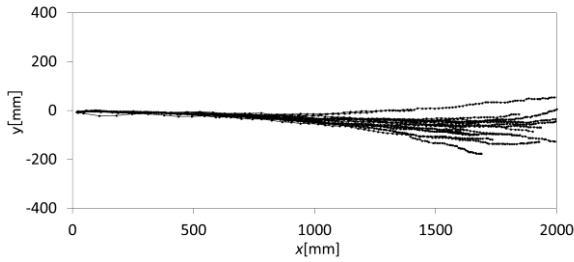


図 5 渦輪の軌跡 (曲線突き出し 1 セット目)

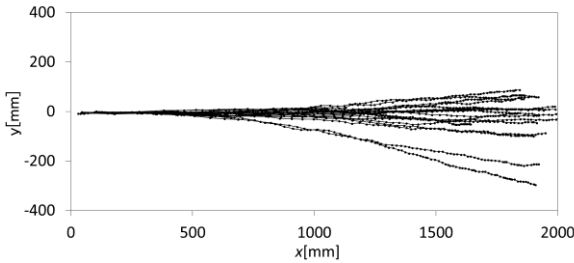


図 6 渦輪の軌跡 (突き出し無し)

表 1 渦輪の初速の平均値 [mm/sec]

曲線突き出し (1 セット目)	2106
曲線突き出し (2 セット目)	2108
突き出し無し	3311

突き出し無しと比較すると、曲線突き出しのほうが各折れ線が密に集まっており、y 軸方向の軌道安定性が向上する傾向が見られる。

3.2 渦輪の初速

曲線突き出し、突き出し無しを使用したそれぞれのセットにおける渦輪の初速の平均値を表 1 に示す。渦輪の初速は、約 0.03 sec~0.13 sec に進んだ距離から求めた。0.00 sec からとしないのは、渦輪射出と動画の撮影開始との間で同期が取れていないためである。突き出し無しに比べて、曲線突き出しの初速が遅くなるのがわかる。また、同様の実験方法で行われた先行研究[6]において、曲線突き出しの高さ 64 mm (図 2) と等しい高さを直線的に突き出した開口部を用いた際の初速は、2538 mm/sec であった。つまり、本実験の曲線突き出しの初速は約 2100 mm/sec であることから、直線的に突き出した場合と比較して、曲線的に突き出した際の初速は遅くなるのがわかる。

3.3 渦輪の到達時間のばらつき

曲線突き出し、突き出し無しを使用したそれぞれのセットにおける、x=1350 mm 地点での渦輪の到達時間のばらつきを図 7 に示す。横軸は渦輪の初速、縦軸は渦輪の到達時間の標準偏差である。x=1350 mm 地点における渦輪の到達時間は、x=1350 mm 地点に到達する前後のフレームから、線形補間により求めた。曲線突き出しと突き出し無しの間では、軌道安定性に大きな差は確認できない。次に、[6]

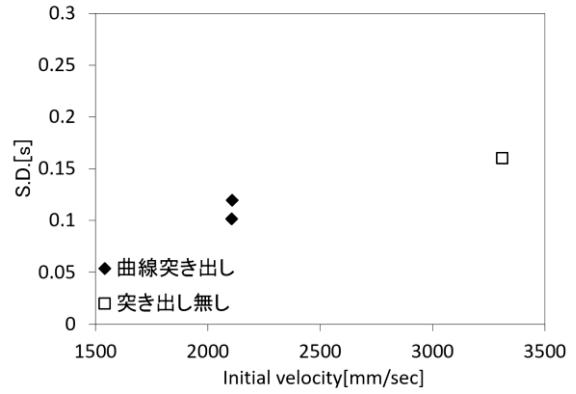


図 7 到達時間のばらつき

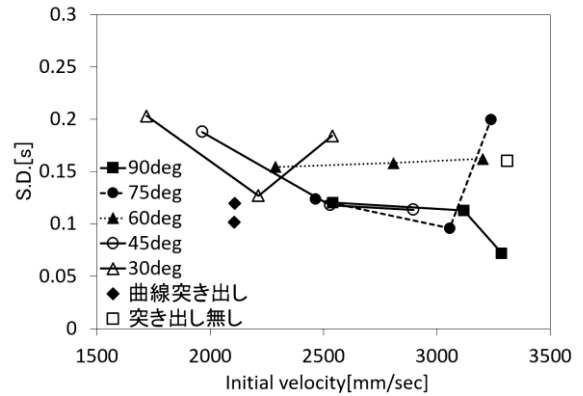


図 8 到達時間のばらつき ([6] との比較)

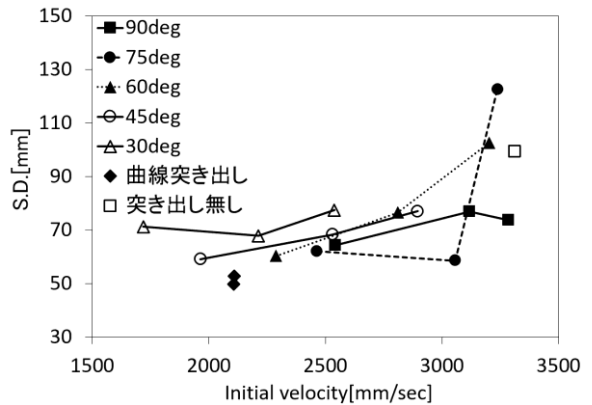


図 9 x 軸方向位置のばらつき ([6] との比較)

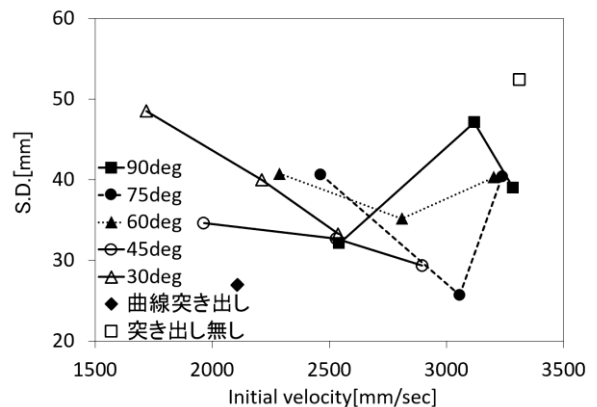


図 10 y 軸方向位置のばらつき ([6] との比較)

における到達時間のばらつきと比較した結果を図 8 に示す。図 8 の 90 deg~30 deg は直線的に突き出した開口部の傾斜角を示しており、30 deg のように値が小さくなるほど前方へ突き出した形状となる。また、折れ線は射出速度を変えることによる結果を示している。曲線突出しの到達時間のばらつきは、概ね中間に位置しており、到達時間のばらつきという視点では軌道安定性に与える影響は確認できない。

3.4 渦輪の x 軸方向位置のばらつき

$x=1350$ mm 地点における、渦輪の x 軸方向位置のばらつきについて、[6]と比較した結果を図 9 に示す。横軸は渦輪の初速、縦軸は渦輪の x 軸方向位置の標準偏差である。 $x=1350$ mm 地点における渦輪の x 軸方向位置は、3.3 節と同様に線形補間により求めた。突き出し無しと比較して、曲線突き出しの x 軸方向位置のばらつきは小さくなる。また、曲線突き出しは他の結果と比較して、ばらつきが小さくなることわかる。これは、到達時間のばらつきが同じ場合、渦輪の速度が遅いほど x 軸方向位置のばらつきは小さくなるためであると考えられる。

3.5 渦輪の y 軸方向位置のばらつき

$x=1350$ mm 地点における、渦輪の y 軸方向位置のばらつきについて、[6]と比較した結果を図 10 に示す。横軸は渦輪の初速、縦軸は渦輪の y 軸方向位置の標準偏差である。 $x=1350$ mm 地点における渦輪の y 軸方向位置は、3.3 節と同様に線形補間により求めた。ここで、曲線突き出しの 2 セット分の結果はほぼ一致しているため、マーカーが重なっている。突き出し無しと比較して、曲線突き出しの y 軸方向位置のばらつきは小さくなる。また、曲線突き出しは他の結果と比較して、概ねばらつきが小さくなることわかる。よって、曲線突き出しは y 軸方向の軌道安定性を向上させる傾向がある。

4. 考察

実験結果から、開口部に向けて曲線的に突き出した形状を用いることで、y 軸方向（渦輪の進行方向に対して垂直な方向）の軌道安定性が向上する傾向が得られた。曲線的に突き出した形状を用いると、突き出しの無い形状や直線的に突き出した形状と比較して渦輪速度が遅くなることが確認された。渦輪は射出後から時間が経過するほどふらつき、安定性が損なわれることが予想されるが、到達時間のばらつきは曲線的に突き出すことによる影響は見られなかった。到達時間のばらつきに変化は確認されなかった一方、渦輪速度が遅いため x 軸方向位置のばらつきは小さくなったと考えられる。ここで、渦輪衝突の確実性を向上させるためには、渦輪を衝突させる目標地点付近（ずれが許容される範囲）に長い時間存在することが望ましいと考えられる。よって、渦輪衝突の観点からは x 軸方向位置の

ばらつきが重要であると考えられ、曲線的に突き出した形状を用いることで渦輪衝突の確実性が向上する可能性がある。

5. まとめ

本研究では、渦輪の軌道安定化に向けた最適な開口部形状を検証するために、空気砲開口部形状を開口部に向けて曲線的に突き出した形状による軌道安定性への影響を実験的に考察した。結果から、曲線的に突き出した形状を用いることで、渦輪の進行方向に対して垂直な方向の軌道安定性が向上する傾向が示された。また曲線的に突き出した形状では、突き出しの無い形状や直線的に突き出した形状と比較して渦輪速度が遅くなることが確認された。一方渦輪速度が遅くなったにもかかわらず、渦輪の到達時間のばらつきへの影響は確認されなかった。渦輪の到達時間のばらつきが同じ場合、渦輪速度が遅いほど x 軸方向位置のばらつきが小さくなり、渦輪衝突の観点から、渦輪を衝突させる目標地点付近（ずれが許容される範囲）に存在する時間が長くなると考えられる。よって、曲線的に突き出した形状を用いることで、渦輪の進行方向においても渦輪衝突の確実性を向上させる可能性がある。

参考文献

- [1] Y. Yanagida and A. Tomono: Basics for Olfactory Display, Human Olfactory Displays and Interfaces—Odor Sensing and Presentation— (T Nakamoto Ed.), Chapter 3, pp. 60–85, 2012.
- [2] U. Haque, Scents of Space: an interactive smell system, ACM SIGGRAPH 2004 Sketches, 2004.
- [3] 横山智史, 谷川智洋, 広田光一, 廣瀬通孝: ウェアラブル嗅覚ディスプレイによる匂い場の生成・提示, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 9, No.3, pp. 265–274, 2004.
- [4] 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, No. 1, pp. 29–36, 2014.
- [5] 伴野明, 伴野貴俊, 吹浦哲教, 山口博幸: 空気砲式香り発生装置の嗅覚特性改善に関する検討, 画像電子学会誌, Vol. 37, No. 4, pp. 444–451, 2008.
- [6] 渡辺久馬, 青木亮裕, 柳田康幸: 空気砲の射出速度と開口部形状が渦輪の軌道安定性に与える影響, Vol. 23, No. CS-2, 発表番号 SBR2018–15, 2018.
- [7] R. Sodhi, I. Poupyrev, M. Glisson, A. Israr: AIREAL: Interactive Tactile Experiences in Free Air, ACM Transactions on Graphics, 32(4), Article 134, 2013.