



非軸対称速度分布を持つ渦輪挙動の数値解析

Numerical Analysis of Vortex Ring Dynamics under Nonaxisymmetric Velocity Distribution

岡本航紀⁽¹⁾, 渡邊保真⁽²⁾

Koki Okamoto, Yasumasa Watanabe

1) 豊田工業大学 大学院 工学研究科 (〒468-8511 愛知県名古屋市天白区久方 2-12-1, sd25412@toyota-ti.ac.jp)

2) 豊田工業大学 大学院 工学研究科 (〒468-8511 愛知県名古屋市天白区久方 2-12-1, yswatanabe@toyota-ti.ac.jp)

近年、嗅覚を活用した VR (Olfactory VR : OVR) の実現に向けて、匂いを発生させるデジタル機器である「嗅覚ディスプレイ」の研究が活発に進められている。中でも、渦輪を利用した方式は、ユーザーの移動や姿勢の制限が少ないユビキタス型嗅覚ディスプレイとしての応用が期待されている。本研究では、円形ノズルから噴出する空気の流速分布に勾配を加え、非軸対称とした場合における渦輪の挙動について、3 次元流体解析を用いて検討を行った。その結果、流速分布に勾配を加えることで渦輪が傾き、上下方向における渦度に差が生じることが明らかとなった。

キーワード：渦輪、非軸対称速度分布、嗅覚ディスプレイ、3 次元流体解析

1. はじめに

ここ数十年で、バーチャルリアリティ (VR) 技術は目覚ましい発展を遂げ、私たちの生活においてより身近な存在となっている。1989 年には、VPL Research 社がヘッドマウントディスプレイ (HMD) 「The EyePhone」とハンドトラッキング用グローブ「The Data Glove」を発表し、これを皮切りにさまざまな VR デバイスが開発されてきた。さらに、2012 年には世界初の家庭用 PC 向け VR ゴーグル「Oculus Rift」が登場し、VR の普及が一層加速した。

VR デバイスは主に視覚・聴覚・触覚といった感覚を活用することで、ユーザーに仮想空間への没入体験を提供している。一方で、これらの感覚に比べて、嗅覚を取り入れた VR の実用化は遅れていた。しかし、嗅覚には他の感覚にはない独自の利点がある。

たとえば、嗅覚は記憶を司る大脳辺縁系の海馬と密接に関係しており、「プルースト効果」に代表されるように、匂いによって過去の記憶を呼び起こす働きがある^[1]。また、嗅覚は消費行動を促進または抑制する効果があることも明らかになっている^[2]。さらに、ゲームに嗅覚を取り入れることで、リアリティや臨場感が高まり、ユーザー体験の向上につながるという報告もある^[3]。

こうした背景から、近年では嗅覚を活用した VR (Olfactory VR : OVR) の実現に向けて、匂いを発生させるデジタル機器である「嗅覚ディスプレイ」の研究が活発化している^[4]。

なかでも、「ユビキタス型」と呼ばれる嗅覚ディスプレイは有力なデバイスの一つである。これはユーザーの周囲に自然に設置され、環境全体あるいは特定の方向に向けて香りを拡散できるため、ユーザーの身体を拘束することなく高い動作自由度を実現できるという利点を持ち、さまざまな研究が行われている。

中でも、渦輪によって香り成分を包み込み、輸送する手法が注目を集めている。

柳田らは、空気砲から射出される渦輪に香りを載せて提示する「香りプロジェクタ」を提案している^{[5][6]}。彼らの研究により、渦輪の到達距離は主に空気砲の開口径によって決定されることが明らかとなった。また、渦輪の速度は空気砲から押し出される空気の速度に大きく依存し、同じ開口径であっても、開口部の形状によって速度が一定程度変化することも示されている。

小森谷らもまた、空気砲から射出される渦輪に香りを載せて提示する手法を提案している^[7]。彼らは、渦輪の到達距離と空気砲のノズル部形状との関係について、数値流体力学 (CFD) を用いて検討を行い、空気砲内部の流れを積極的に剥離させることで渦輪の到達距離が向上することを明らかにしている。

以上より、渦輪を嗅覚ディスプレイに応用しようとする研究は複数報告されている。しかし、それらの多くはノズル部に軸対称な速度分布を与えた場合に限定されている。軸対称な速度分布では、生成された渦輪によって匂い成分

を搬送することは可能であるが、ユーザーに香りを届けるためには、追加の渦輪を射出して既存の渦輪を崩壊させ、香りを拡散させる必要がある。また、軸対象な速度分布によって生成される渦輪は、基本的に直進する性質を持つため、搬送可能な範囲に限られるという課題もある。そこで本研究では、単一の渦輪が自律的に崩壊し、追加の渦輪を必要とせずに香りを拡散させることが可能な速度分布の探索を試みる。また、渦輪の進行方向を制御し、搬送可能範囲を拡張することも目的としている。以上の目的のもと、本論文では非軸対称な速度分布に着目し、それをノズル部に与えた際の渦輪の挙動について、数値流体力学 (CFD) を用いて解析を行った。

2. 数値解析方法

2.1 解析設定

本解析で用いた計算領域を Fig. 1 に示す。計算領域には、直径 300 mm、高さ 500 mm の円柱を採用し、その左側面に直径 100 mm の空気の噴出口を設けている。

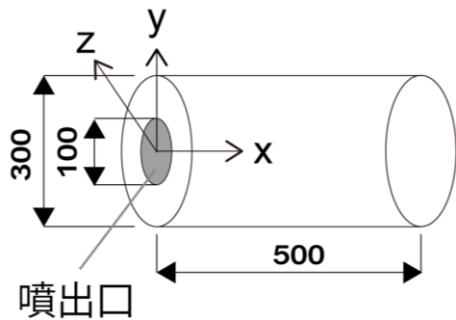


Fig. 1 計算領域

2.2 計算格子

計算領域内の格子は、x 軸に対して対称となるように設定した。x 方向の断面における格子構造を Fig. 2 に示す。図から分かるように、噴出口近傍およびその延長線上では、流れの変化が大きいことを考慮し、格子を高密度に設定している。

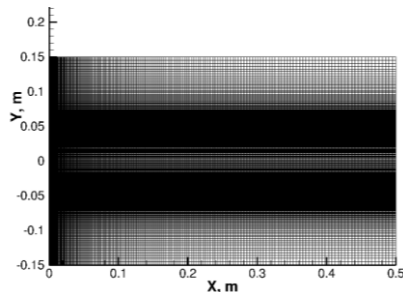


Fig. 2 格子設定

2.3 支配方程式と数値解析スキーム

本解析では、粘性を考慮した保存形で書かれた 3 次元圧縮性ナビエーストークス方程式を支配方程式とする。この式を式(1)に示す。

$$\frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial y} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial z} = \frac{\partial \mathbf{E}_v}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{F}_v}{\partial y} + \frac{\partial \mathbf{G}_v}{\partial z} \quad (1)$$

$$\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ E_t \end{pmatrix}, \mathbf{E} = \begin{pmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ \rho uw \\ (E_t + p)u \end{pmatrix}, \mathbf{F} = \begin{pmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 + p \\ \rho vw \\ (E_t + p)v \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{G} = \begin{pmatrix} \rho w \\ \rho uw \\ \rho vw \\ \rho w^2 + p \\ (E_t + p)w \end{pmatrix}, \mathbf{E}_v = \begin{pmatrix} 0 \\ \tau_{xx} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ u\tau_{xx} + v\tau_{xy} + w\tau_{xz} - q_x \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{F}_v = \begin{pmatrix} 0 \\ \tau_{yx} \\ \tau_{yy} \\ \tau_{yz} \\ u\tau_{yx} + v\tau_{yy} + w\tau_{yz} - q_y \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{G}_v = \begin{pmatrix} 0 \\ \tau_{zx} \\ \tau_{zy} \\ \tau_{zz} \\ u\tau_{zx} + v\tau_{zy} + w\tau_{zz} - q_z \end{pmatrix}$$

$$\tau_{xx} = \frac{2}{3}\mu \left(2\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial w}{\partial z} \right), \tau_{yy} = \frac{2}{3}\mu \left(-\frac{\partial u}{\partial x} + 2\frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial w}{\partial z} \right),$$

$$\tau_{zz} = \frac{2}{3}\mu \left(-\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} + 2\frac{\partial w}{\partial z} \right), \tau_{xy} = \tau_{yx} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x},$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}, \tau_{zx} = \tau_{xz} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}$$

$$q_x = -k \frac{\partial T}{\partial x}, q_y = -k \frac{\partial T}{\partial y}, q_z = -k \frac{\partial T}{\partial z}$$

$\mathbf{Q}$ は保存量ベクトルを表し、空気密度・運動量・総エネルギーを含む。 $\mathbf{E}, \mathbf{F}, \mathbf{G}$ は移流項であり、流れそのものが物理量を運ぶ効果を表す。 $\mathbf{E}_v, \mathbf{F}_v, \mathbf{G}_v$ は粘性項であり、流体の粘性による効果を表す。

計算領域の離散化について、移流項の離散化は対称 TVD スキームを用いている¹⁰⁾。このスキームは、流れが滑らかな領域では高精度を維持し、衝撃波などの不連続面近傍では数値振動を抑制して単調性を保つよう設計された数値解法である。これは、隣接する格子の物理量から算出される波の強さを基に、対称な流速制限関数を用いて数値流束を補正することで実現される。粘性項の離散化には 2 次精度の中心差分法を用いた。

時間の離散化には、3 段階 TVD ルンゲクッタ法を用いている¹¹⁾。このスキームは、陽的な多段階時間積分法の一つである。1 つの時間ステップを複数の中間ステージに分割し、各ステージで計算した解の勾配 (残差) の重み付き平均を用いて次の時間ステップの値を決定する。

解析には OpenACC を利用した in-house Fortran コードを使用し、GPU を用いて解析を実施した。

2.4 解析条件

解析時間は約 5 ms (ステップ数: 100,000) とし、そのうち最初の約 0.6 ms (ステップ数: 12,000) のみ、噴出口に流速分布を与えた。

2.5 解析ケース

以上の条件のもと、2種類の流速分布(a)、(b)を与えた場合の流体解析を行った。(a)は、噴出口全体に対して一様な速度(マッハ数 $M=0.2$)を与えたケースである。(b)は、(a)の条件を基に、噴出口最上部の速度は変更せず、最下部の速度を10%低下させるように、鉛直方向に速度勾配を持たせたケースである。

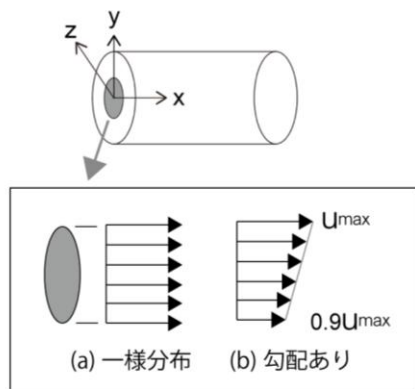


Fig. 3 流速パターン

3. 解析結果と考察

解析により得られた(a)、(b)の z 方向速度分布および z 方向渦度の時間的変化を、それぞれFig. 4～7に示す。なお、 z 方向渦度は、 z 軸を回転軸とし、 xy 平面上における流体の回転の強さを表す指標である。

Fig. 4およびFig. 6から分かるように、(a)では噴出口からの噴出が終了した後に渦が形成され、その後も x 軸対称な速度分布および渦度分布を維持したまま、渦輪は直進している。

一方、Fig. 5およびFig. 7に示すように、(b)の条件下では非対称な速度分布が形成され、それに伴い渦輪の上下方向における渦度の中心がずれており、渦輪全体が下方へ傾いて進行していることが確認できる。さらに、渦輪の上部に比べて下部の渦度の絶対値が大きく、先行する上部の渦が弱くなっている傾向が見られる。

この要因として、速度勾配に起因する時計回り、すなわち負の渦度が生じることが挙げられる。これにより、渦輪の上部では渦度が打ち消され、下部では渦度が増強されるため、渦輪の傾きや非対称性が生じたと考えられる。

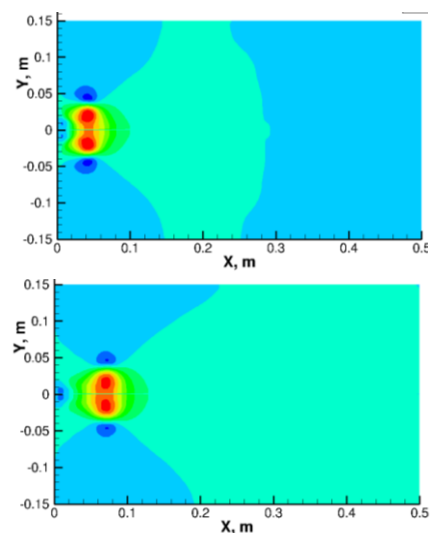
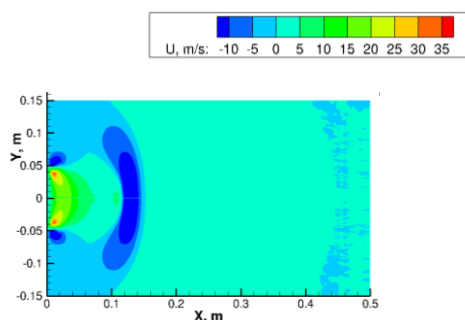


Fig. 4 (a)における速度分布の時間的変化
(上から順に、ステップ数 20,000、60,000、100,000。
以下の図も同様の順序で示す)

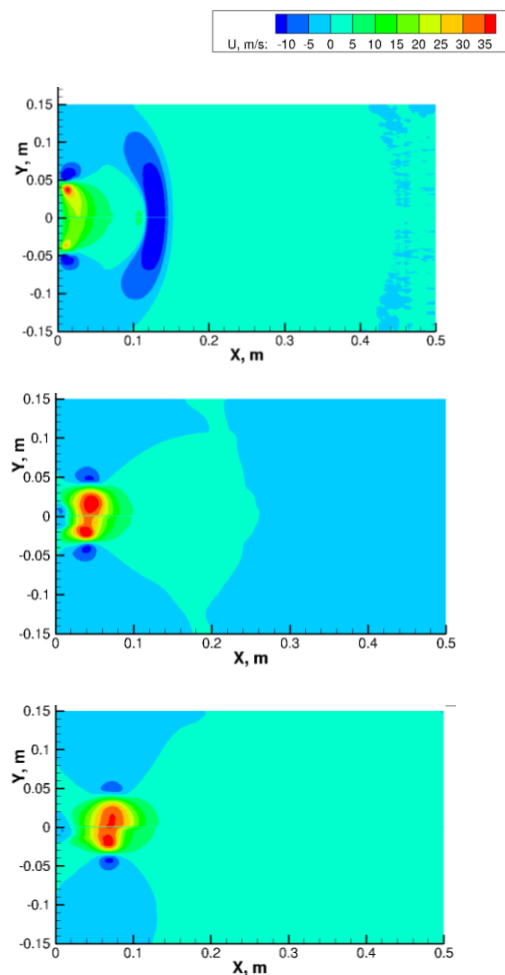
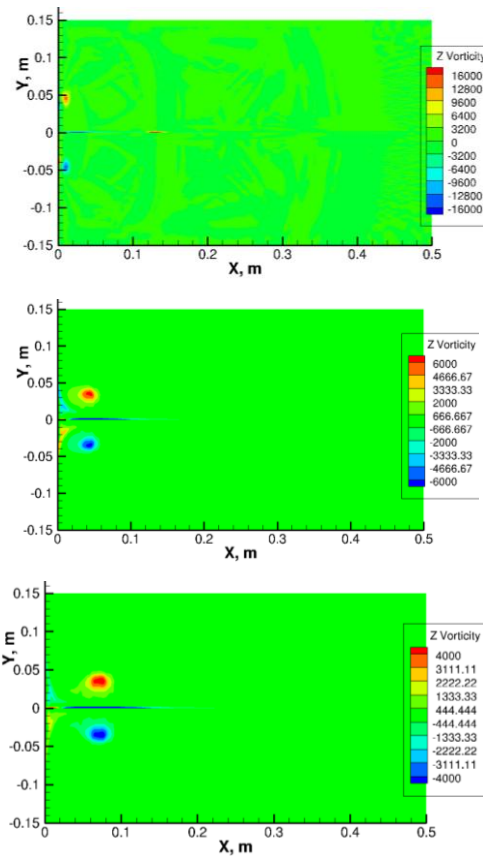
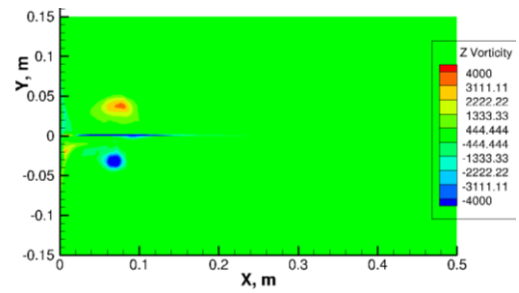
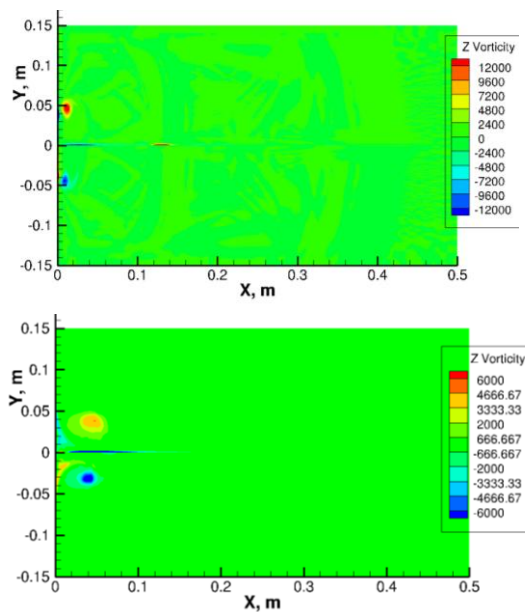


Fig. 5 (b)における速度分布の時間的変化

Fig. 6 (a) における z 方向渦度の時間的変化Fig. 7 (b) における z 方向渦度の時間的変化

4. まとめと今後の展望

噴出口における流速分布を制御することで渦輪を発生させる三次元流体解析を行い、流速分布の勾配の有無が渦輪の挙動に与える影響を調査した。その結果、流速分布に勾配を与えると、渦輪が傾くとともに、上下方向の渦度に差が生じることが明らかとなった。

今後は、解析時間をさらに延長し、渦輪の挙動をより長時間にわたって観察する。また、噴出速度を変化させた場合の渦輪の傾きや、崩壊の有無や崩壊位置の変化などへの影響についても検討を行う予定である。

参考文献

- [1] S.Rachel *et al.*, “A naturalistic study of autobiographical memories evoked by olfactory and visual cues”, *Am. J. Psychol.* .2024;56(11):1-35
- [2] 阿部周造, 他. “消費者行動における匂いの効果研究の展望”. *日本消費者行動研究学会誌*. 2023;30(1):1-36.
- [3] S. Onai, *et al.*, “Exploring new ways to interactively interpret narratives combining olfaction and vision including temporal change of scents using olfactory display”, *ACM SIGGRAPH Asia 2021 Emerging Technologies.*,2023;17:1-3
- [4] T.Jordan, *et al.*, “A review of olfactory display designs for virtual reality environments”, *ACM Computing Surveys*,
- [5] 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*. 2014;19(1):29-36
- [6] Y. Yanagida, *et al.*, “Projection based olfactory display with nose tracking”, *IEEE Virtual Reality*,2004:43-50
- [7] 小森谷 徹, 他. “空気砲による渦輪放出の数値シミュレーション”. *可視化情報学会誌*.2008;28(1):223-224
- [8] H.C.YEE.” A Class of High-Resolution Explicit and Implicit Shock-Capturing Methods”. *NASA TM*.1989
- [9] S.Gottlieb, *et al.*, “Total Variation Diminishing Runge Kutta Schemes.. Mathematics of Computation”. *Math. Comp.*1998;67(221):73-85