

ローブドジェット混合特性のノズル形状依存原理解明と空調応用に向けた設計指針

Investigation on dependency of lobed jet mixing on nozzle geometry and its design criteria for air conditioning application

三重大学 大学院工学研究科 助教 高橋 護

(研究計画ないし研究手法の概略)

噴流とはスリットや小孔から高速流体が噴出する現象であり、空調機から噴出する気流などがこれに相当する。最も基本的な噴流は円形の出口から噴出される円形噴流であるが、出口を非円形にすることで噴流の流体混合効果が向上させられ得ることが知られている。本研究で取り扱うローブドジェットは縁が波状の出口から噴出され、混合促進効果が認められていることから高効率な空調機への応用可能性が考えられる。

しかしローブドジェットの出口形状には、出口から離れた領域において混合効果が円形噴流よりも劣ってしまうという不都合なものが存在することが指摘されている。本研究ではそのような不都合な混合特性をもつ噴流を空調機に応用してしまう可能性を避けるため、ローブドジェットの混合抑制効果の起源を探る。

噴流の流れ場は一見無秩序ながら、その中には秩序だった構造が多数埋め込まれており、その中でも特に大規模な構造は流体混合とよく関連することが知られている。ローブドジェットの混合抑制効果は、そのような大規模秩序構造が示す混合効果が、円形噴流の大規模秩序構造のものよりも小さいために発現するとの仮説が立てられる。したがって有効な研究手法は、円形噴流およびローブドジェットから大規模秩序構造を適切な次元削減テクニックにより抽出し、それらの混合性能を比較することである。

本研究では解析対象として、円形噴流およびローブドジェットの時間空間データを乱流数値シミュレーションにより用意した。本研究では噴出から十分時間が経った状態の流れ場を限られた計算機資源で効率的に再現するため、時間発展数値シミュレーションを実施した。この数値計算では主流の方向に周期境界条件が課されており、流れ場は主流方向に一様で、流出した流れ場はただちに再び計算領域に流入する(図1)。このため巨大な計算領域を設定しなくとも噴流の噴出時からの長時間発達を再現可能である。

この数値計算により得られた噴流データを、本研究では Dynamic mode decomposition (DMD) を用いて次元削減した。噴流データは主流方向に周期性を有するため、速度変動の流れ方向分布は正弦波に対応するモードの重ね合わせで表現可能であり、それらの波数は計算領域サイズの整数倍となるはずである。したがって DMD により、流れ場は下のよう再現される：

$$\mathbf{u}(x, y, z, t) = \sum_i^{\infty} a_i \Phi_i(y, z, t) \exp[(\sigma_i + ik_i)x] \sim \sum_i^r a_i \Phi_i(y, z, t) \exp[(\sigma_i + ik_i)x]$$

この式において、流れ場の特徴を十分に保存するような、可能な限り小さい整数 r を見つけることで、流れ場の縮約が可能となる。

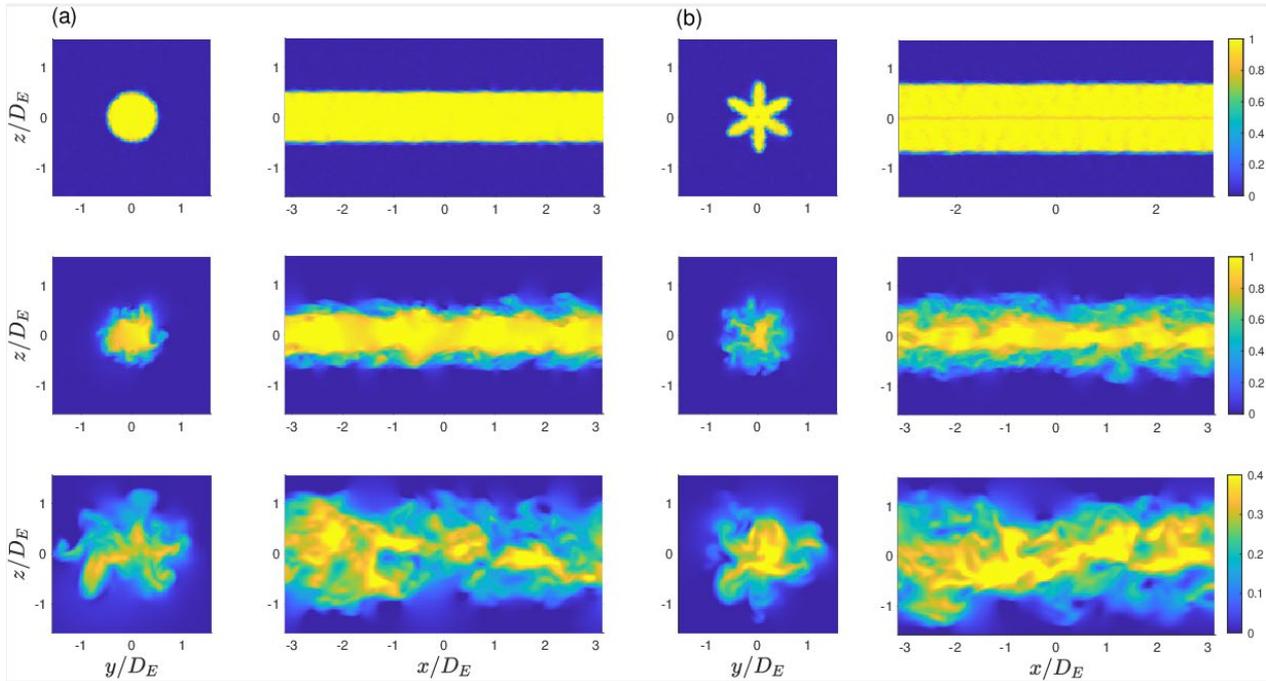


図 1 円形噴流(a)およびローブドジェット(b)の瞬時の流れ場. 時間は上から下に進行し、最下段がローブドジェットの拡散抑制効果が発現する時刻となる

(実験調査によって得られた新しい知見)

図 1 は数値計算により再現された円形噴流およびローブドジェットの瞬時の流れ場をあらわす. 計算開始(噴出)直後の時刻では設定した出口形状に応じた流れ場が再現できていることがわかる. 時間が経過すると, せん断層(緑色で表される層)がローブドジェットのほうが厚いことがわかる. すなわちローブドジェットのほうが円形噴流よりも平均速度勾配が小さく, すなわち流れ場の拡散が素早く完了したことが示されており, 数値シミュレーションによりローブドジェットの噴出直後の混合促進効果が適切に再現できたことが視認される. 噴出から十分時間が経過した時刻の下段の結果では, 乱流が十分発達し噴出時の形状に起因する差異は一見とらえられない. この状態での大規模秩序構造に, 混合に関する差異が見られないかを本研究では検討する.

次にそれぞれの流れ場を DMD 解析する. ここではモード $a_i \Phi_i(y, z, t)$ の二乗ノルムが大きいという意味で主要な上位モードを残し, それ以外を削除することで流れ場の次元削減を実施した. 図 2 は噴出から十分時間が経過した時刻でのレイノルズせん断応力の半径方向分布である. レイノルズせん断応力は単位時間・単位面積当たりを通過する運動量であり, この値が大きいほど拡散効果が大きいことを意味する. レイノルズせん断応力は次元削減された流れ場からでも評価可能であり, その結果は流れ場の再現に使用するモード数が多い(削除した成分が少ない)ほどオリジナルの流れ場の結果に近づく. 図 2 より, 円形噴流とローブドジェットの両方において, 主要な 2 モードのみ ($a_1 \Phi_1(y, z, t)$ および $a_2 \Phi_2(y, z, t)$) を用いてオリジナルのレイノルズせん断応力分布の大部分が再現可能であることがわかる. そこで本研究ではこれら 2 モードの重ね合わせ結果を, 現在の円形噴流およびローブドジェットの大規模秩序構造と定義した.

図 3 で, この時刻における円形およびローブドジェットのレイノルズせん断応力を比較する. 実線は元の流れ場が示すレイノルズせん断応力であり, 円形噴流の値がローブドジェッ

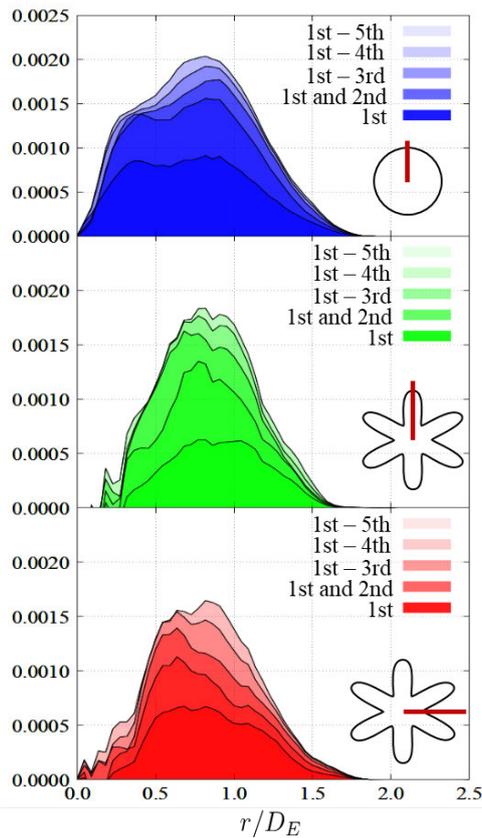


図 2 レイノルズせん断応力に対する上位 5 モードの寄与. 第 1-2 モードの重ね合わせで分布のほとんどが決定されるが, それに比べると 3, 4, 5 モードを重ね合わせても分布は劇的には増大していない. したがって支配的なモード (大規模秩序構造に対応) は第 1-2 モードのみだとわかる

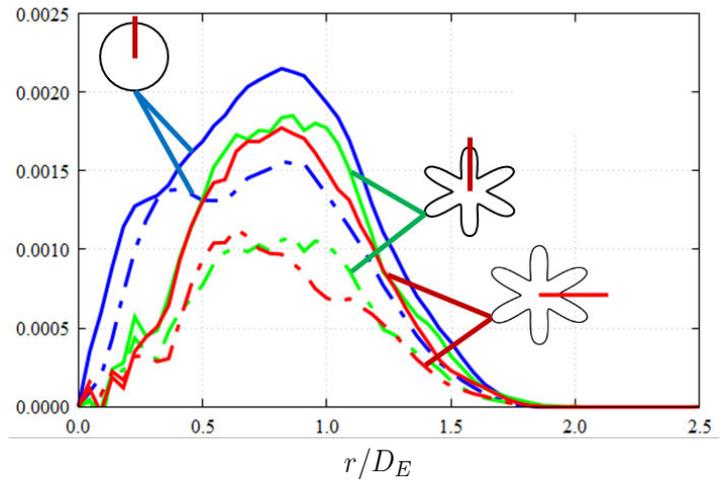


図 3 円形噴流とローブドジェットのレイノルズせん断応力の比較

トの値を上回っている, すなわちローブドジェットが円形噴流より小さい拡散効果を示すという実験的事実と整合する結果を示している. 一点鎖線は大規模秩序構造が示すレイノルズせん断応力であり, これも円形噴流とローブドジェットの結果で大小関係が保存されている. したがって抽出された大規模秩序構造が, ローブドジェットの拡散抑制効果の本質であることを裏付ける結果となっている.

図 4 は大規模秩序構造の圧力場の三次元的可視化結果であり, 円形噴流はらせん状の構造, 一方ローブドジェットは軸対称な構造が形成されていることがわかる. 以上のように本研究では, 噴出条件に応じて噴出から十分時間が経過した状態での大規模秩序構造に差異があらわれ, それが混合拡散効果の大小を決定していることを明らかにした. ただし申請時点での目標であった, 形成される大規模秩序構造の噴出出口形状パラメータ依存特性の解明は未解決で, 今後の要調査課題として残された. その一方で本研究をとおしてモード間の相互作用も要調査事項として新たに挙げられた. 噴出から長時間経過後に上位 2 モードで大規模秩序構造が特徴づけられるようになるが, この 2 モードは時間経過中に他のモードとの相互作用により発達させられると考えられる. 最近 Schmidt (Nonlinear Dynamics, 102(5), 2020)によりモード間相互作用の解析手法が開発されており, 例えばこれの活用が有効かと考えられる.

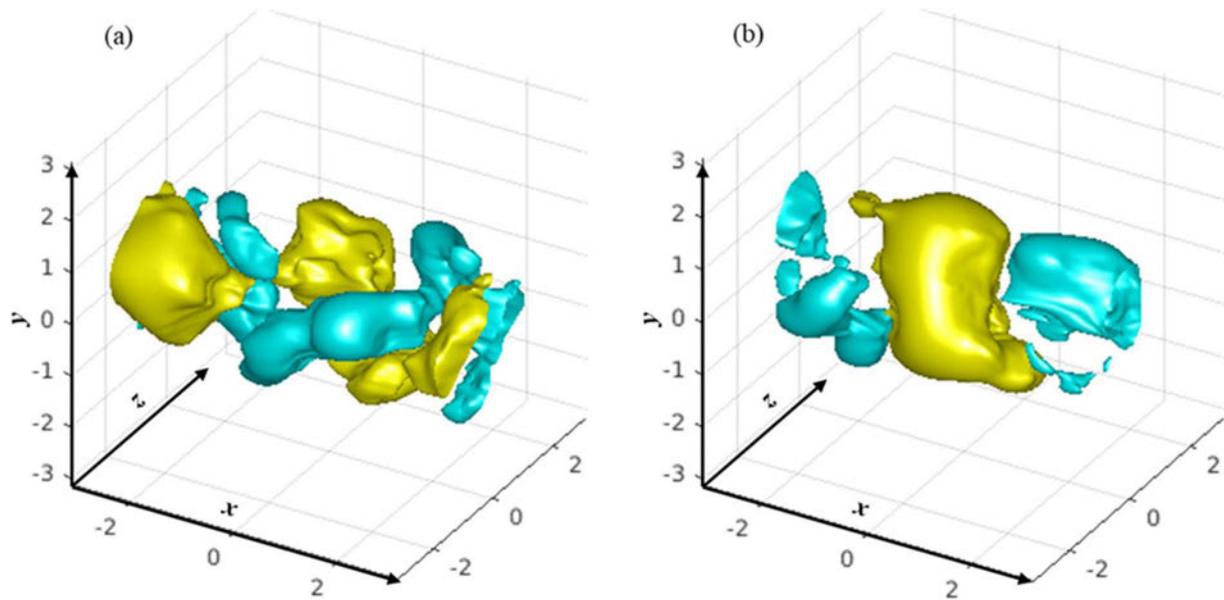


図 4 円形噴流(a)およびローブドジェット(b)の圧力場. 円形噴流はらせん状, ローブドジェットは軸対称の大規模秩序構造を形成する

(発 表 論 文)

(国際会議発表)

- R. Fukui, M. Takahashi, K. Tsujimoto, T. Ando and T. Shakouchi, “VISUALIZATION OF DIFFUSION SUPPRESSION MECHANISM OF LOBED JETS USING DYNAMIC MODE DECOMPOSITION”, The 7th International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows (ICJWSF-2022), D02 (March 2022).
- M. Takahashi, Y. Inagaki, K. Tsujimoto, T. Ando and T. Shakouchi, “TEMPORAL TRANSPORT OF TURBULENT MOMENTUM FLUX AROUND HAIRPIN VORTICES IN A CHANNEL FLOW”, The 7th International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows (ICJWSF-2022), B04 (March 2022).

(国内会議発表)

- 高橋 護, 福井 廉, 辻本 公一, 安藤 俊剛, 社河内 敏彦, ” 時間発展円形噴流の Spatial DMD による構造抽出”, 日本機械学会東海支部第 71 期講演会, OS2-02 (2022 年 3 月).
- 稲垣 慶彦, 高橋 護, 辻本 公一, 安藤 俊剛, 社河内 敏彦, ” チャネル乱流中のヘアピン渦周辺におけるレイノルズせん断応力の生成と消滅”, 第 19 回日本流体力学会中部支部講演会, 3-2 (2021 年 11 月).