技術論文

対向噴流混合における流路形状の影響（混合性能）

Influence of Flow-Pass Shape on Opposing Jet Flow (Mixing Performance)

長尾　隆央[*1]　NAGAO Takahisa
松野　伸介[*1]　MATSUNO Shinsuke
林　　光一[*2]　HAYASHI A.Koichi

ABSTRACT

In order to evaluate a mixing of fuel with dilution air in jet engine, an unsteady turbulent flow analysis is performed in a simplified combustor. The flow channel consists of the opposed jets and cross-flow, which are normal to each other. A mixing performance and mixing behavior are studied using parameters, spacing of jet holes (*S*), height of duct (*H*), jet diameter (*D*) and momentum flux ratio of jet and crossflow (*J*). As a result, we find that mixing performance is estimated by the parameter $C=S/H*\mathrm{sqrt}(J)$ when $H/D=5$ or less and becomes well when *C* is large. When *H/D* is larger than 5, say 7.5 and 10, there exist the conditions where mixing performance becomes worse. Because the interaction between two opposed jets occurs downstream the potential core, it is considered in this case that mixing performance by opposed jet interaction is weakened. When *H/D* is small, the interaction between two opposed jets occurs in the potential core. It suggested that the mixing performance is sensitive by the positional relation with a potential core and collision plane of two jets.

Key words： ジェットエンジン，燃焼器，対向衝突噴流，混合，LES
Jet Engine, Combustor, Opposed jets, mixing, LES

1．緒言

ガスタービンエンジンの効率を上げるために，燃焼器温度は年々上昇している。また，重量を低減するために小型化することも重要となってきている。しかし，高温化や小型化は燃焼によって生成する高温ガスの温度が上がり，混合する距離が短くなることであり，燃焼器出口での温度分布を悪化させる要因となる。もし出口温度分布に高温のホットスポットが存在するなら，タービンの寿命に大きな影響を与えることが懸念されるため，出口温度分布は十分に一様であることが望ましい。

図１にRQL（Rich-burn Quick-quench Lean-burn）燃焼器[(1)]の断面図の概略図を示す。実際の形状は，この断面をガスタービン軸で回転させた環状の形状となっている。過濃燃焼領域では，ノズルから噴射された燃料がスワール保炎器で空気と混合して燃焼するが，空気量は化学量論比より少ないため未燃燃料が残存する。保炎器の下流において，希釈空気が流入し，過濃燃焼領域の高温燃焼ガス・未燃燃料と急速に混合し，未燃燃料が燃焼する。RQL燃焼器の温度分布は，希釈空気によって調整されるため，その流動を把握しておくことは重要である。

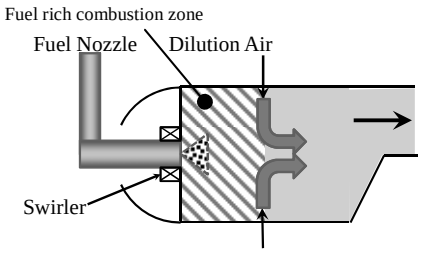

Fig. 1 Schematics of RQL gas turbine combustor

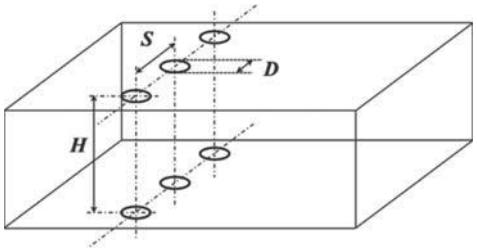

Fig. 2 Explanation of geometric parameters *S,H,D*

希釈空気による流れは，主流に直交に流入する対向噴流としてモデル化され，古くから検討されている。HoldemannとWalker[(2),(3)]は，図２のような矩形流路に直交に噴出する対向噴流と非対向噴流について研究を行い，

原稿受付　2015年５月25日
校閲完了　2016年２月26日
＊１　株式会社ＩＨＩ　熱・流体研究部
〒235-8501　横浜市磯子区新中原町１番地
＊２　青山学院大学　理工学部　機械創造工学科
〒252-5258　相模原市中央区淵野辺５-10-１

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.124, 2025/08/23.

孔形状，孔径D，孔間隔S，高さH，噴流と主流の運動量流束比（momentum flux ratio）Jを変えた場合の混合状態をまとめている。運動量流束比Jは次の式で表される。

$$J=\frac{\rho_j u_j^2}{\rho_m u_m^2} \tag{1}$$

ここで ρ:密度，u:流速，添字j:噴流，添字m:主流

また，Holdeman[4]は実験により，直交流中の噴流混合は以下のパラメータCで整理できることを見出した。

$$C=\frac{S}{H}\sqrt{J} \tag{2}$$

ここでS:噴流間隔，H:流路高さ。

Cは，噴流１つあたりの流路の扁平度（S/H）と，主流に対する噴流運動量流速比Jの平方根に比例する。Jが増加すると噴流の貫通距離は上昇し，Jが一定でHが増加するとHに対する噴流の貫通距離は下がることになる。Liscinskyら[5]は，対向噴流の場合はC=2.5が出口分布を最も均一化できる値としているが，一方，Jが大きいほど混合が良いとも報告[6]しており，検討の余地がある。

我々の以前の研究では，燃焼器をモデル化した形状において対向衝突噴流をLES解析し，噴流に直交する主流の無い条件[7]と主流の流速を変化させた条件[8]で，対向衝突噴流による非定常混合現象を調べた。その結果，主流に対して噴流運動量が大きい場合は噴流の衝突面に生成される円盤状のジェット付近での混合が支配的なのに対し，主流がある場合は，上下の噴流が互いに干渉して非定常な振動を引き起こし，混合が促進されていることが判明した。主流が非常に速い場合には，上下噴流が干渉せず，混合も弱くなる傾向であった。ただし，この解析では流路形状は一定であり，噴流間隔や流路高さの影響が不明だった。

現在，噴流間隔Sと流路高さHをパラメータとした解析を行い，混合メカニズムと混合性能に与える影響を明らかにするための検討を進めている。本論文の目的は，噴流間隔S，流路高さHとパラメータCが全体的な混合性能へ与える影響について報告することである。図３に示すように，パラメータ領域を広げた影響を見るため，Holdemannらによる先行研究[2]-[6]において行われていない形状パラメータ領域と，実機燃焼器に合わせた領域を解析条件に選んだ。

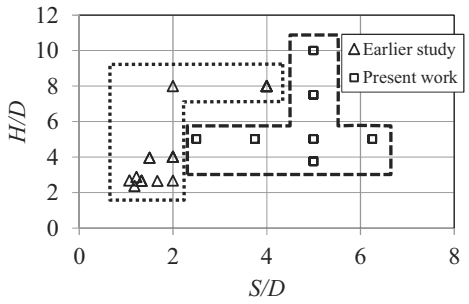

Fig. 3 Geometric parameters of earlier and present study

２．対象形状・解析モデル

流路構成としては，先行研究[7]と同じように，矩形流路に直交する対向噴流を有する流れを採用した。噴流口はZ方向（奥行き方向）の中間に位置している。図４に対象とする形状を示す。Dは噴流孔径，Sは噴流孔間隔，Hは流路高さ，V_jは噴流流速，V_mは主流流速，X_jは主流入口と噴流孔の距離である。X，Y，Z軸の原点位置は上下噴流流入口中心線上の中間点である。図上でSは流路幅として表示されているが，手前側と奥側の境界に周期境界を設定しているため，噴流孔間隔もSとなる。

流路の左端から主流が流入する。右端は大気開放である。噴流は厚みを持ったオリフィスを通過することで生成される。オリフィスの厚さは0.5Dであり，図５のように，オリフィス上流に9.5D×5D×5D（X×Y×Z方向）の立方体形状の導入部がある。オリフィス部の平均流速がV_j = 20m/sとなるように入口流速を設定した。オリフィス部のレイノルズ数はD=20mmを基準長さとした場合，約2.0×10^4である。流入流速は，オリフィス上流と主流の両方とも一様とした。主流・噴流は空気であり，温度は300Kである．

今回はS/D，H/D，Jを変化させて解析を行った。設定条件の一覧を表１に示す。

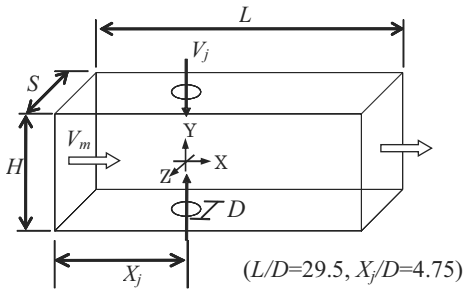

Fig. 4 Outline of flow passage configuration

Table 1 Configurations and conditions of calculated cases

S/D	*H/D*	Name	*J*
5.0	5.0	S5-H5	4,9,16,36,64
5.0	3.75	S5-H3.75	4,9,16,36
5.0	7.5	S5-H7.5	4,9,16,36
5.0	10.0	S5-H10	9,16,36,64
2.5	5.0	S2.5-H5	4,9,16,36
3.75	5.0	S3.75-H5	4,9,16,36
6.25	5.0	S6.25-H5	4,9,16,36

３．数値解析手法

数値解析にはOpenFOAM 2.1.0のreactingFoamを使用した。OpenFOAMは広く利用されており，例えば，密度の異なるガスの乱流混合を検証した研究[9]や，超音速主流中に流入する直交噴流の燃焼解析[10]等の研究に使われており，実験と定量的に一致したと報告されている。また，紙面の都合上詳細は記さないが，我々の実験結果[7]と本コードの解析結果を比較したところ，定量的に一

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.124, 2025/08/23.

致する結果を得た。本コードにより対向噴流を計算することは妥当と考える。今回はパラメータを変化させた解析のため条件数が多いが，オープンソースの利用によりソフトウェアの費用を削減できたので，大規模並列解析が可能となり，短期間で解析結果を得た。

表２に計算モデルを示す。気体の物性は主流と噴流で同一とするが，混合を評価するため独立した化学種として扱う。支配方程式には非圧縮性Navier-Stokes方程式を用い，Large Eddy Simulationモデルを採用した。図５に解析格子例を示すが，最小格子幅は0.2mm，流路内の平均格子幅は２mmである。格子密度を一定としたため，格子点数は計算領域の体積に比例して約250 ～ 500万点となった。

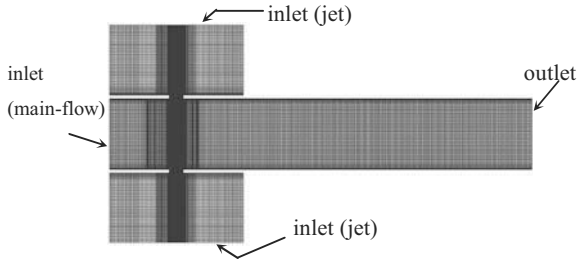

Fig. 5 Numerical mesh model (cross section at center of jet)

Table 2 Numerical methods and mesh conditions

CFD code	OpenFOAM 2.1.0 reactingFOAM
Equation	Incompressible Navier-Stokes
Turbulent	Smagorinsky model (LES)
Wall	Spalding law
Cell	Unstructured, Hexahedron
Discretization	Blended 2nd order central with 1st order upwind（9：1）
Parallelization	Region splitting, 100 CPUs
Min., Ave Δx	0.2mm, 2mm

４．結果と考察

混合度合を評価するに当たり，Vranosら[11]は空間的な未混合度であるUnmixedness（U_s）という量を定義した。U_sは以下の式で表される。

$$U_s=\frac{C_{rms}}{C_{avg}}=\frac{\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\overline{C}_i-C_{avg}\right)^2}}{w_m/\left(w_j+w_m\right)} \tag{3}$$

C_{rms}は評価部位濃度RMS，C_{avg}は完全混合時濃度，C_iは局所時間平均濃度，w_mは主流流量，w_jは噴流流量である。ここで，C_iは，ガス種として主流と噴流を定義した時の主流の体積分率を表す。U_sが減少するほど，断面内の濃度分布が均一となり，完全に均一になれば０となる。

混合は滞留時間に応じて進行する。そのため，平均流速が異なる条件間で比較を行う場合は，同じ位置ではなく，同じ滞留時間となる断面で比較することが重要となる。滞留時間T_rは次のようになる。

$$T_r=\frac{X}{(Q/A)} \tag{4}$$

ここで，Xは主流方向位置，$Q=Q_m+Q_j$，Q_mは主流体積流量，Q_jは噴流体積流量，Aは流路断面積である。

ここでは，パラメータCによる未混合度の評価とH/Dが大きい場合の結果の考察，形状パラメータが混合性能に与える影響，混合挙動について述べる。

Cによる未混合度の評価

本論文では，一定の滞留時間（T_r=0.04）が経過した後の未混合度U_sを混合性能として評価する。図６に一定の滞留時間（T_r=0.04）が経過した後のU_sを示す。H/Dがそれぞれ10，7.5，5以下となる点に対する近似曲線を記した。Holdemanら[4]は，噴流から一定距離の断面における混合度合がCで整理できると報告しているが，本研究では，Cによって，混合性能に一定の傾向が見える結果が得られた。図６によると，H/Dが５以下の場合は，C=1 ～ 3ではU_sにあまり変化がないが，C>3ではCが大きいほど混合性能は良くなる結果となる。H/Dが7.5以上では，Cが大きくなると混合が悪くなる結果となった。

図７に，未混合度U_sが滞留時間T_rに応じてどのように減少するかを示した代表例を示す。同一のCとなる条件での解析で得られた結果を(a)～(d)としてまとめた。図７において，Cが同一である場合は，未混合度は比較的近い値に収束していく傾向にあるが，C=3.0と4.0では一部の条件で大きく外れるものがあった（図７(c)，(d)）。これは図６でも同じ傾向が見られたが，H/Dが7.5,10と大きい場合である。H/D=7.5,10の条件について細かく見ると，C=1.5, 2の場合においても他の条件に比べて若干外れる傾向にあるが，Cが減少するにつれてU_sの差は

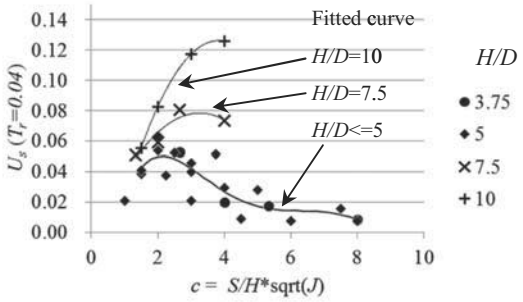

Fig. 6 Effect of C on Unmixedness at T_r = 0.04

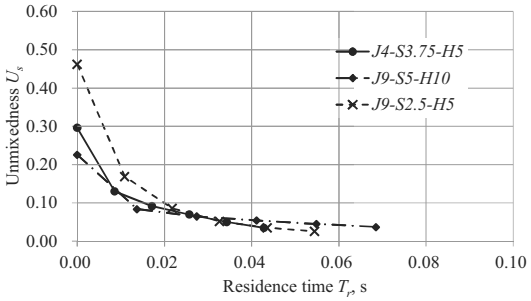

Fig. 7(a) Unmixedness distribution at C=1.5

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.124, 2025/08/23.

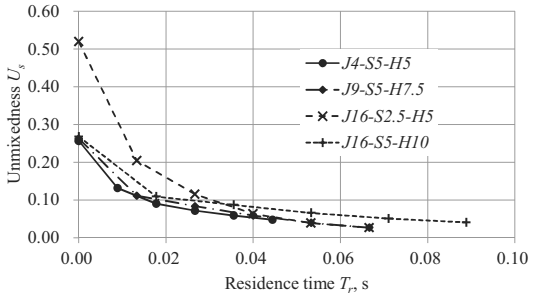

Fig. 7(b) Unmixedness distribution at C=2.0

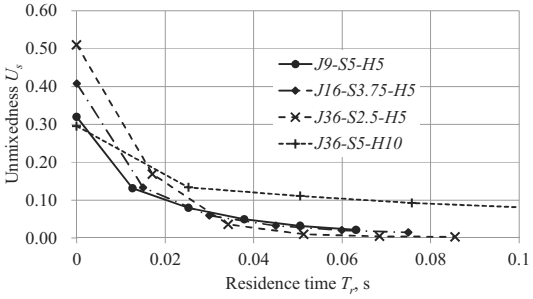

Fig. 7(c) Unmixedness distribution at C=3.0

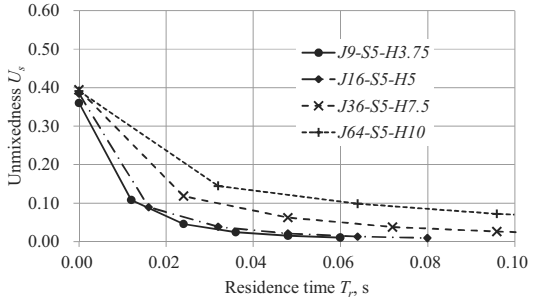

Fig. 7(d) Unmixedness distribution at C=4.0

縮まっている（図7(a),(b),(c)）。CとH/Dが大きい条件において，混合性能が悪化する傾向の現象は次項で考察する。

H/Dが大きい条件の考察

図8にC=3.0，図9にC=1.5の場合の時間平均主流モル分率を表す。図6，図7で見られたような，CとH/Dが大きい場合に混合性能が悪化する条件が存在する原因は，図8(b)にみられるように，ポテンシャルコアが消滅したのちに上下噴流の干渉が発生するため，その部分の流速が減衰し，噴流同士の干渉による混合の促進効果が弱まることが原因と考えられる。図6の近似曲線にも表される通り，H/D<=5の場合と，H/D>=7.5の場合の混合性能は，Cが小さくなるにつれてU_sの差が縮まっている。図9（C=1.5）のケースでは，図7(a)に示すように，U_sと滞留時間T_rの関係はH/Dによらずに同一の曲線で表されており，これらの結果から，Cが小さいケース（主流が強く，噴流同士が干渉しない条件）では，H/Dが大きい場合に混合性能が悪化する現象は発生しないと考えられる。

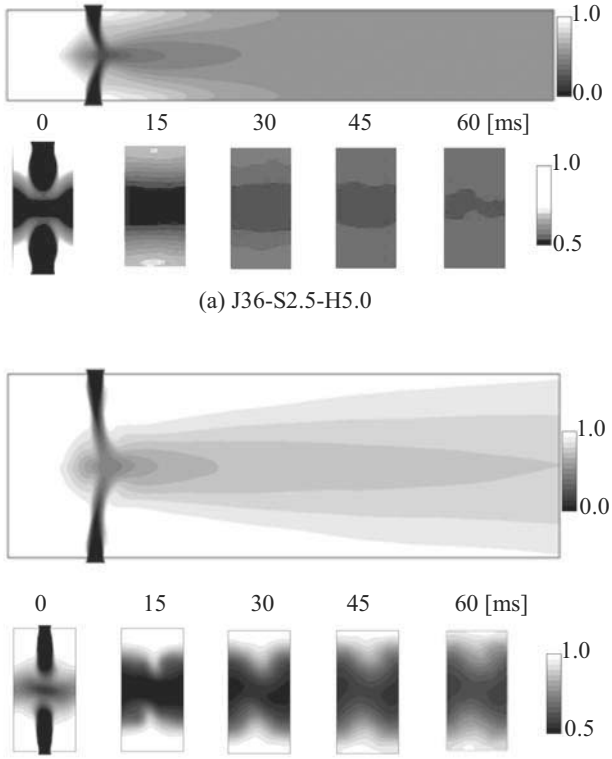

Fig. 8 Time averaged mole fraction of cross flow on C=3.0（top: XY-plane（Z=0）, bottom: YZ-plane（Specific T_r））

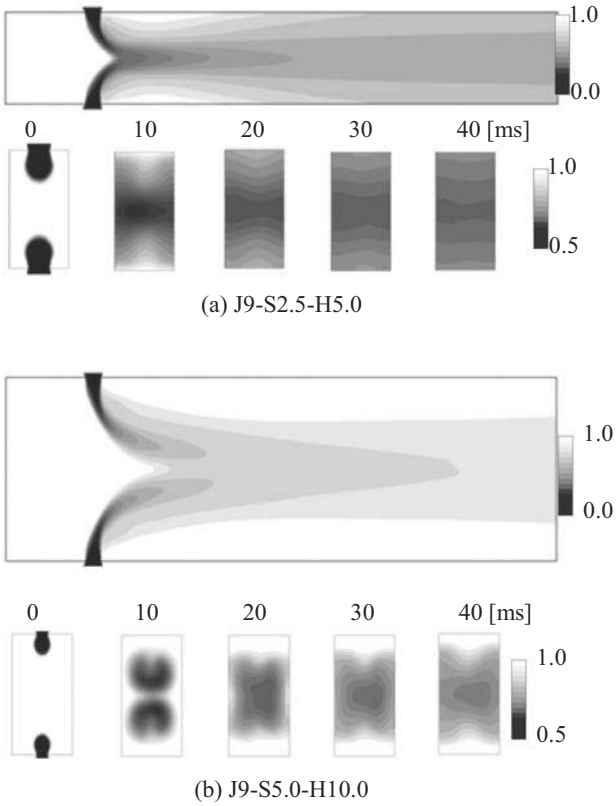

Fig. 9 Time averaged mole fraction of cross flow on C=1.5（top: XY-plane（Z=0）, bottom: YZ-plane（Specific T_r））

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.124, 2025/08/23.

形状パラメータが混合性能に与える影響

図10に噴流と主流の運動量流束比JとS/Dが混合性能に与える影響を，図11にJとH/Dが混合性能に与える影響を，図12に各S/Dにおける混合挙動を示す。

図10にみられるように，H/D一定の場合，Jが9以下の場合はS/Dに比例してU_sが増加するが，J=16の場合はS/Dに比例してU_sが低下する。J=36の場合はS/Dによる違いは小さくなった。これは，図12に示すように，S/Dが大きいと噴流幅に対する流路の割合が大きいため，J=4のように主流が速い場合は流路幅まで十分拡散できないからである。それに対して，J=16のように上下噴流が衝突する場合は，S/Dが大きい方が衝突によって噴流が横に広がることで拡散できる。J=36では噴流衝突が，衝突面に円盤状ジェットが生成するほど強くなり，円盤状ジェットや循環渦が発生することによる混合が支配的となるため，S/Dの影響を受けにくくなると考えられる。このようにJが強い時は上下噴流の衝突と干渉によって混合が促進されると考えられ，我々の以前の論文[(7),(8)]で議論されている。

図11によると，S/D一定の場合，J=4の場合はU_sに変化はないが，Jが9以上の場合はH/Dに比例してU_sが増加する。増加割合はJが大きいほど大きい。これは，H/Dが大きい場合は，Jが同じでも距離が離れるために上下噴流の干渉が弱まり，混合が悪化するためと考えられる。NASA等の先行研究[(2)-(6)]や以前の我々の研究[(8)]でもJが大きくなると混合性能は上がる傾向となっており，図11ではH/Dが5以下の場合はそのようになっているが，7.5以上では混合性能が逆転している。S/Dが一定でH/Dを大きくするとCが大きくなるため，前項にも記したとおり，CとH/Dが大きい場合に混合性能が悪化している。この一番の理由は，H/Dが10の場合は，噴流が衝突した場合の混合促進の効果が低く，噴流の軌道が断面内のどの位置を通っているかで混合度が決まることによる。例示すると，図8(b)（H/D=10，J=36）と図9(b)（H/D=10，J=9）で，J=36の場合は，Jが大きいため噴流が中心付近まで到達し，上下噴流が干渉するが，干渉後の混合は弱く中心付近の噴流成分濃度が高いままなのに対し，J=9の場合は噴流同士は干渉しないが，噴流成分は中心に到達せずに拡散するので，噴流がより広い領域に分散している。

今回の解析条件においては，先行研究[(4)]にあるような，特定のCの値で最適混合となる，すなわちU_sが極小値を示す傾向は見いだせない。これは，形状パラメータが本研究の場合はS/Dが2～6.25であるのに対し，先行研究では多くが2以下の条件であることが考えられ，本研究の範囲では極小値を示さない可能性がある。先行研究[(5)]においてもS/D=4の場合ではJに比例して混合が良くなるとされており，本研究と同じ傾向となっている。これらの結果から，S/Dにより混合挙動が異なる可能性が見いだされた。

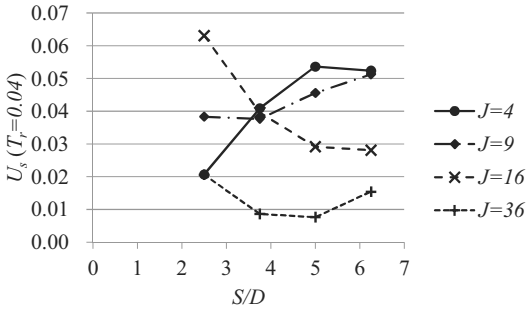

Fig. 10 Effect of S/D on Unmixedness at T_r = 0.04（H/D = 5）

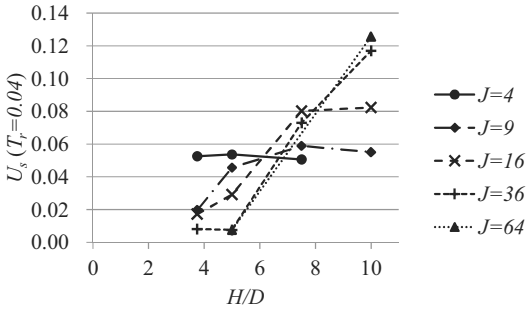

Fig. 11 Effect of H/D on Unmixedness at T_r = 0.04（S/D = 5）

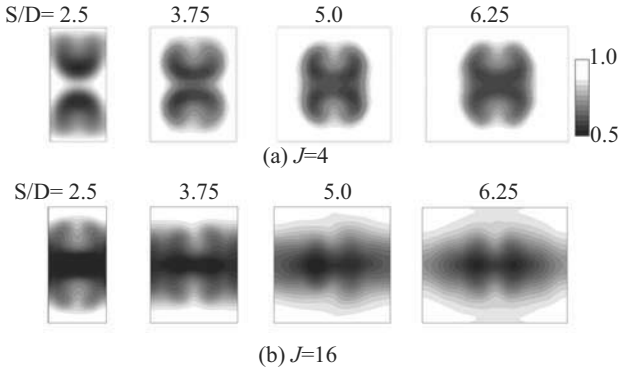

Fig. 12 Time averaged mole fraction of cross flow on H/D=5.0（YZ-plane, T_r=6ms）

混合挙動について

図13に，C=2.0の場合の時間平均主流モル分率を表す。同一のCでも混合の挙動は，J4-S5.0-H5.0では噴流が衝突して左右に広がっているのに対し，J16-S2.5-H5.0では衝突後に左右に広がらずに流路中心の濃度が高いままというように，条件によって異なった結果が得られる。これは，ダクトのS/Dが異なることで，噴流衝突後の流れが異なることが原因と考えられるが，我々の以前の研究[(7)]においても示されたように，衝突部分の混合は流れの非定常性が重要となっており，詳細に議論するには非定常的結果の検討が必要と考えられる。この点は今後の課題として引き続き検討したい。

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.124, 2025/08/23.

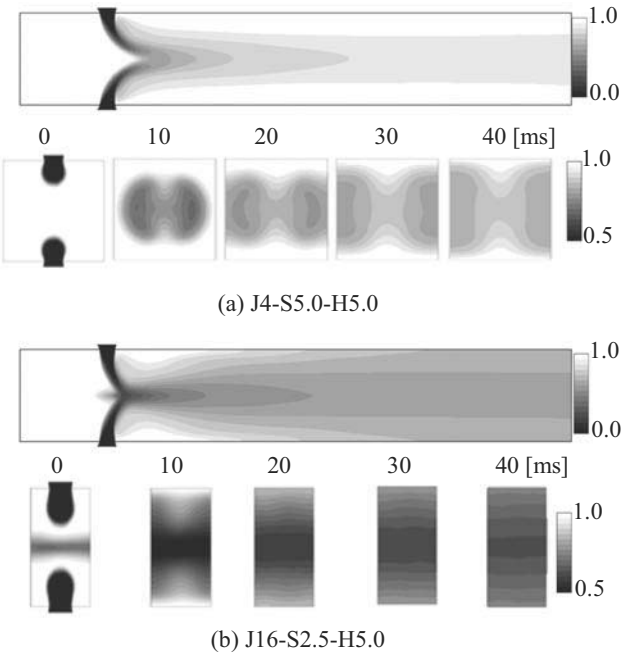

Fig. 13 Time averaged mole fraction of cross flow on C=2.0 (top: XY-plane (Z=0), bottom: YZ-plane (Specific T_r))

5．結論

主流と，それに直角に流れる上下２つの噴流で，孔間隔S，流路高さHを変化させた解析を行うことで，流路形状を変化させたことによる混合性能・混合挙動の評価を行った。その結果，以下の結果が得られた。

・H/Dが５以下の場合は，パラメータCが１～３では混合性能はほぼ同じとなる。C>3の場合はCが大きいほど混合性能は良い傾向となる。
・先行研究にあるような，特定のCにおいてUsが極小値を示す傾向はみられない．これは形状パラメータ（S,H）範囲が異なるためと考えられる．
・H/D=7.5,10の場合，混合性能が悪化する条件が存在する。これは，ポテンシャルコアよりも下流で上下噴流の干渉が発生するため，干渉による混合の促進効果が弱くなるためと考えられる。主流が強く，噴流同士が干渉しない条件では，H/Dが大きくてもCで整理できる可能性がある。
・H/Dが一定の場合，噴流と主流の運動量流束比Jが９以下の場合はS/Dが大きくなると未混合度U_sが増加するが，Jが16の場合はU_sが低下する。Jが36の場合はS/Dに対して大きな影響は無い。
・Cが同じでも混合の挙動は同一ではない。

ただし，本研究においては噴流径D，噴流流速V_jを一定として解析しており，噴流レイノルズ数が異なる場合については，上記結論が当てはまらない可能性がある．

実機燃焼器を考えた場合，温度については，先行文献[1]においても，式(1)に示されるように，運動量流束比として考えれば噴流軌道は整理できることが示されているが，レイノルズ数が異なることから，噴流境界層における乱流スケール・乱流強度が異なることが推測できる．これらの違いが衝突噴流に与える影響については更なる検討が必要である．

今後，スケール変更の影響・レイノルズ数の影響などについても検討し，さらに，ポテンシャルコアに関する考察や，非定常流れ場の考察など，さらに詳細な検討を行い，S/DとH/Dの違いによる混合の現象面からの解明を行いたい。

参考文献

(1) Lefebvre, A. H. and Ballal, D.R., “Gas Turbine Combustion”, Third Edition (2010), CRC Press
(2) Holdeman, J. D., and Walker, R. R., and Kors, D. L., “Mixing of Multiple Dilution Jets with a Hot Primary Airstream for Gas Turbine Combustors”, AIAA Paper 73-1249 (1973).
(3) Holdeman, J. D., and Walker, R. R., and Kors, D. L., “Mixing of a Row of Jets with a Confined Crossflow”, AIAA Journal, Vol. 15, No. 2 (1977), pp.243-9.
(4) Holeman, J. D., “Mixing of Multiple Jets With a Confined Subsonic Crossflow”, NASA Technical Memorandum 104412, AIAA-91-2458 (1991)
(5) Liscinsky, D. S., True, B., Holdeman, J. D., “Experimental Investigation of Crossflow Jet Mixing in a Rectangular Duct”, NASA Technical Memorandum 106152, AIAA-93-2037 (1993)
(6) Liscinsky, D. S., True, B., Holdeman, J. D., “Experimental Study of Cross-Stream Mixing in a Rectangular Duct”, NASA Technical Memorandum 105694, AIAA-92-3090 (1992)
(7) 長尾 隆央，松野 伸介，林 光一，“矩形流路内での対向噴流による流体混合”，日本ガスタービン学会誌，Vol.41，No. 6 (2013)，pp.506-511
(8) Nagao, T., Matsuno, S., Hayashi, A.K, “Effect of Cross-flow Momentum on Opposing Jet Mixing”, International Journal of Gas Turbine, Propulsion and Power Systems, Vol. 6, Num. 3 (2014), pp.1-8
(9) Mack, A., Spruijt, M.P.N., “Validation of OpenFoam for heavy gas dispersion applications”, Journal of Hazardous Materials, Vol. 262 (2013), pp.504-516
(10) Shekarian, A. A., Tabejamaat, S., Shoraka, Y., “Effects of incident shock wave on mixing and flame holding of hydrogen in supersonic air flow”, International journal of Hydrogen Energy, Vol 39 (2014), pp.10284-10292
(11) Vranos, A., Lincinsky, D.S., True, B., and Holdeman, J.D., “Experimental study of cross-stream mixing in a cylindrical duct,” NASA Technical Memorandum 105180, AIAA-91-2459, 1991.

Download service for the GTSJ member of ID , via 216.73.216.124, 2025/08/23.