

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 29 日現在

機関番号：82641

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25820053

研究課題名(和文) 同軸上より流入する噴流と旋回流の相互作用の解明

研究課題名(英文) Interaction Between Coaxial Round Jet and Swirling Flow

研究代表者

丹野 賢二 (Tanno, Kenji)

一般財団法人電力中央研究所・エネルギー技術研究所・主任研究員

研究者番号：60462884

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：中心から噴流、その周囲から旋回流が流入する共存乱流場を解析するための数値解析コードを開発するとともに、開発したコードを用いて、同乱流場を対象とした3次元直接数値計算(DNS)を行った。その結果、噴流と旋回流が共存する場の乱流構造は、噴流のみの乱流構造より、旋回流のみの乱流構造に近い特徴を示すことが明らかとなった。また、噴流のみの場合と比較して、噴流と旋回流が共存する場合には、噴流部の運動量の拡散が促進される。一方、旋回流のみの場合と比較すると、旋回流部の運動量の拡散は抑制されることが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：In order to investigate turbulence structure in coaxial round jet and swirling flow, the numerical simulation code was developed, and three dimensional direct numerical simulation was performed by using the developed numerical code. The results show that turbulence in the coaxial jet and swirling flow has the approximately similar structure to the swirling flow rather than the round jet. In the coaxial jet and swirling flow case, the dissipation of momentum in round jet is promoted compared with the just round jet case, while that in swirling flow is suppressed compared with the just swirling flow case

研究分野：流体工学

キーワード：噴流 旋回流 乱流 バーナー 直接数値計算

1. 研究開始当初の背景

航空機用エンジン内の燃焼器や、固体燃料用ボイラにおいては、同軸多重円管により構成される形式のバーナが広く用いられている。内側の円管には、燃焼器内部へと燃料を投入する役割が、外側の円管には旋回をかけた高温の空気を燃焼器内部に導入し、安定着火、燃焼促進、低 NOx 化を図る役割がある。バーナ近傍の流れ場を流体力学的に見ると、燃料を搬送する自由噴流と、燃料と酸化剤を混合するための旋回流が共存した複雑な乱流場となっている。自由噴流は、乱流の最も基礎的な流れ場の一つであり、古くから数多くの研究が行われてきた。自己保存則や、相似則の導出に始まり、ノズル近傍の乱流渦の放出機構が明らかにされ、近年では、ノズル遠方領域の組織構造についても明らかになりつつあるなど、現在も盛んに研究が進められている。一方、旋回流については、噴流に比べて研究事例は少ないものの、近年、その特徴的な乱流構造が徐々に明らかにされつつある。特に、強い乱流場であるにもかかわらず、逆流を含む平均流や乱流変動といった中止部の乱流構造を、通常の管内乱流に比べてはるかに下流まで維持するという特徴は、従来の乱流カスケードとは異なるプロセスを持つ可能性のある、極めて興味深い乱流構造であると言える。

しかしながら、自由噴流と、その周囲の旋回流との境界面における乱流場については、その乱流構造や、双方の乱流の相互作用を流体力学的見地から調べた研究はほとんど存在しない。また、燃焼器に関しては今後、一層の省エネルギー化と更なる高効率化が求められることから、噴流と旋回流が共存する乱流場の構造を解明し、適切な制御パラメータを見出すことは、産業分野においても重要な研究課題となっている。

2. 研究の目的

本研究では、3次元直接数値計算(DNS)を行うことにより、同軸上より噴流と旋回流が流入する乱流場の構造を、噴流のみ、旋回流のみの乱流構造との比較を通して詳細に明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、3次元直接数値計算(DNS)を行うことにより、同軸上より噴流と旋回流が流入する乱流場の構造を明らかにした。流体の支配方程式は、連続の式、および Navier-Stokes 方程式である。

$$\frac{\partial U_i^*}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial U_i^*}{\partial t^*} + U_j^* \frac{\partial U_i^*}{\partial x_j^*} = -\frac{\partial P^*}{\partial x_i^*} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 U_i^*}{\partial x_j^* \partial x_j^*}$$

ここで、 U_i^* 、 P^* は無次元化された流速、および圧力である。速度と圧力のカップリングについてはフラクショナル・ステップ法を用い、これらの支配方程式の離散化については、Navier-Stokes 方程式の移流項は自乗量保存型の4次精度中心差分とし、それ以外の項については2次精度中心差分とした。時間積分法については、粘性項の y 方向、z 方向については2次精度の Crank-Nicolson 法を、それ以外の項については3次精度の Runge-Kutta 法を用いた。ポアソン方程式の解法については、共役こう配法を用いた。

図1に計算領域の概略を示す。座標系を主流方向を x、鉛直方向を y、スパン方向を z とし、計算領域を主流方向、鉛直方向、スパン方向にそれぞれ、 $10\pi D_0$ 、 $5\pi D_0$ 、 $5\pi D_0$ とした。ここで、 D_0 は後述する通り、噴流流入部の径である。流入部は鉛直方向、スパン方向のそれぞれ中心の位置に配置した。計算格子点数は主流方向、鉛直方向、スパン方向にそれぞれ700点、400点、400点とし、主流方向には等間隔に、鉛直方向、スパン方向には中心部で密になるよう不等間隔に配置した。図2に、流入部の形状を示す。流入部は同軸2重円管構造となっており、噴流が流入する部分の径を $1.00D_0$ とし、旋回流が流入する部分については、内径を $1.25D_0$ 、外径を $2.50D_0$ とした。流入条件を図3に示す。解析は、(a) 噴流のみ、(b) 旋回流のみ、(c) 噴流+旋回流の3条件を対象に行った。(a)においては、噴流が $1.0U_0$ の速度でトップハット形状にて流入することとした。一方、(b)においては、軸方向、半径方向、ともに $0.5U_0$ の速度で流入

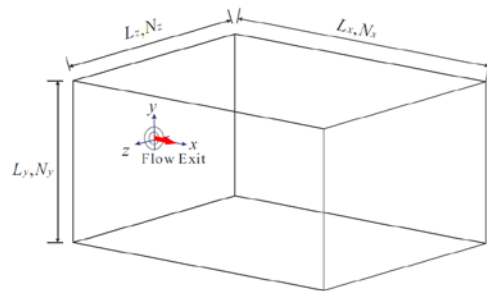


図1 計算領域の概略

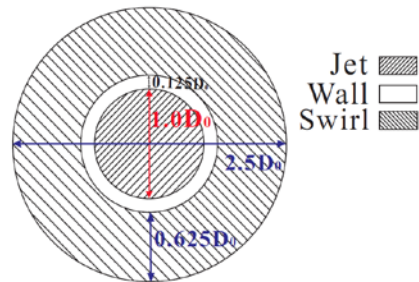
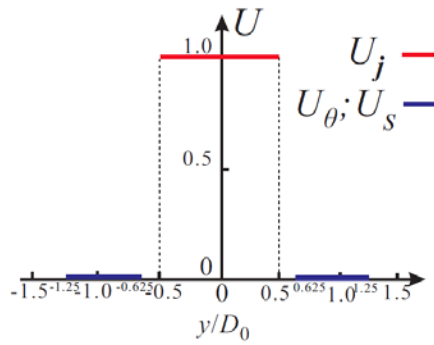
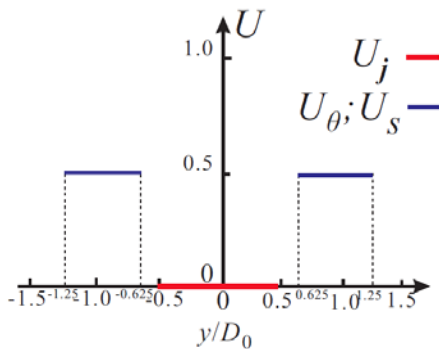


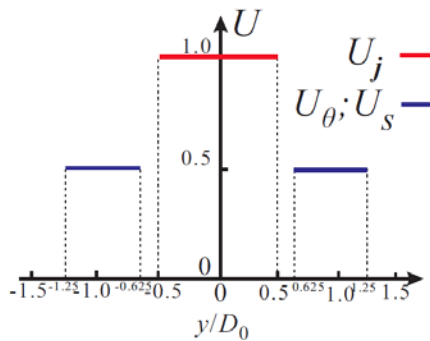
図2 流入部形状



(a) 噴流のみの流入条件



(b) 旋回流のみの流入条件



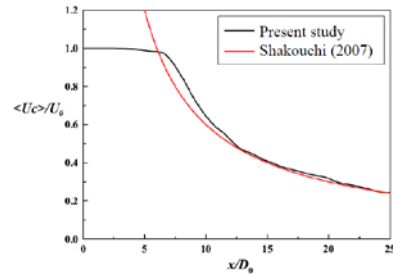
(c) 噴流+旋回流の流入条件

図3 流入条件の概略

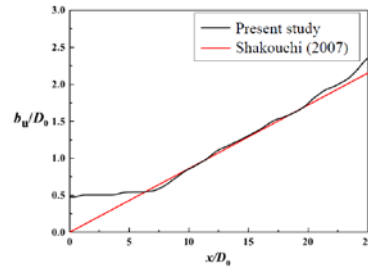
することとした。また、(c)においては、(a)と(b)の重ね合わせであるとした。このとき、N-S方程式中のレイノルズ数は $Re=2200$ であり、旋回の強さを表すSwirl数は 0.78 であった。流出部の境界条件は対流流出条件とし、それ以外の境界においては、Neumann条件とした。

4. 研究成果

始めに、計算コードの精度を確認する目的で、噴流のみの解析を行い、得られた結果を実験値と比較した。中心軸上における主流方向流速の軸方向分布、および噴流の半値幅の軸方向分布の計算結果を、社河内による経験式と併せて図4に示す。図より、いずれの結果も、計算結果と経験式とが良く一致してお



(a) 中心軸上主流方向流速



(b) 半値幅

図4 噴流のみの計算結果

り、本研究において開発した計算コードにより、精度良く計算を行えることが確認できた。

図5に、(a)噴流のみ、(b)旋回流のみ、(c)噴流+旋回流のそれぞれの条件における、主流方向流速の瞬時分布を示す。図より、(a)噴流のみの条件と比較すると、(c)噴流+旋回流の条件においては、噴流部の運動量の拡散が促進されていることがわかる。これは、旋回流により、噴流部の運動量も乱流境界層外部へと運ばれているためであると考えられる。それに対して、(b)旋回流のみの条件と比較すると、(c)噴流+旋回流の条件では、旋回流部の運動量の拡散は抑制されているように見える。これは、中心部の噴流により旋回流も下流方向に引っ張られることとなり、その結果、旋回流の運動量が下流方向に輸送されるため、旋回流の運動量の輸送が抑制されているように見えるものと考えられる。図6に、中心軸上の主流方向速度変動強度の軸方向分布を示す。この結果からも、(c)噴流+旋回流の条件においては、(a)噴流のみの条件に比べて、流速の減衰がより上流で生じており、噴流部の拡散が、旋回流によって促進されていることが明瞭に確認できる。図7に、 $x/D_0=4.0$ 、 9.0 、 13.0 のそれぞれの位置における主流方向流速のspan方向分布を示す。いずれの位置においても、(c)噴流+旋回流の条件における流速分布は、(a)噴流のみの条件、および(b)旋回流のみの条件の単純な足しあわせでは表現できないことがわかる。したがって、この結果は、噴流と旋回流が共存する場合には、それぞれの乱流が相互に影響しながら、流速分布を形成することを示すものである。また、平均流速分布のみならず、乱流構造に関しても、相互に影響を及ぼしている

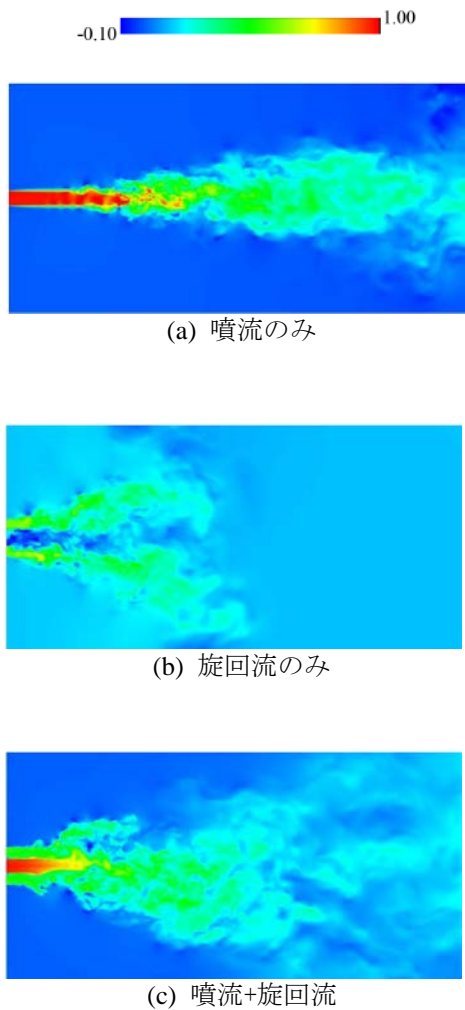


図5 主流方向流速の瞬時分布

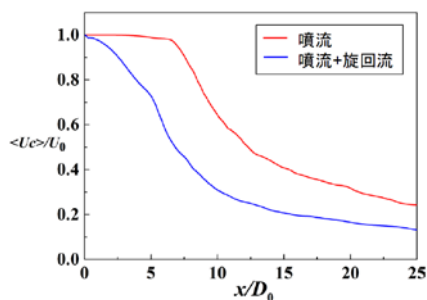


図6 中心軸上における主流方向速度変動強度の軸方向分布

ものと考えられる。

図8に、中心軸上における主流方向、およびスパン、鉛直方向の速度変動の軸方向分布を示す。図5、6で確認できた通り、図より、噴流と旋回流が共存する条件においては、噴流のみの条件と比べて、速度変動強度のピークを取る位置が上流側にシフトしており、乱れの拡散が促進されていることがわかる。また、ピーク値も噴流と旋回流が共存する条件においては、噴流のみの条件と比べて、低下しており、より周囲に乱れが拡散した結果、中心軸上のみ分布を比較すると、強度自体が低下するものと考えられる。一方、噴流と

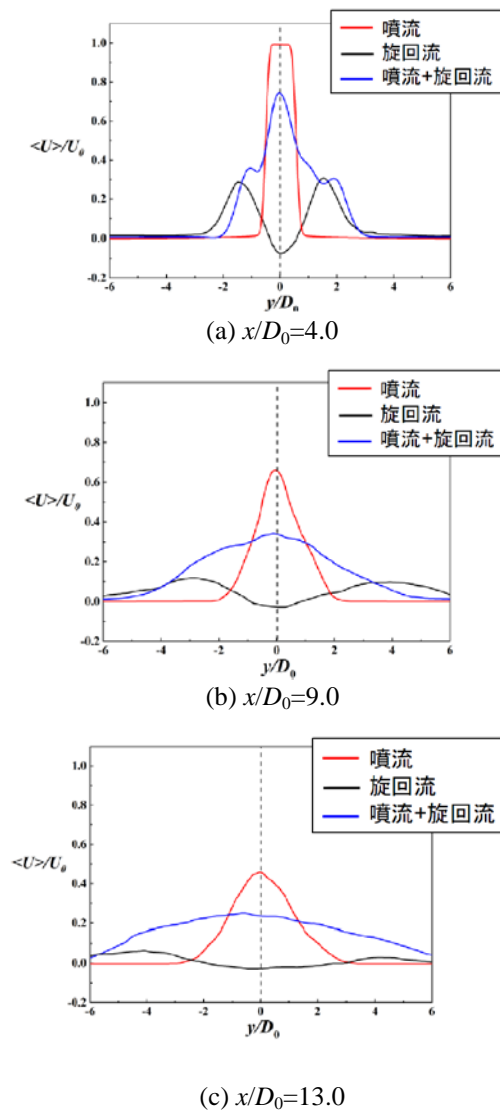
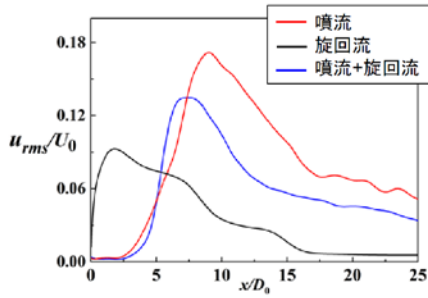


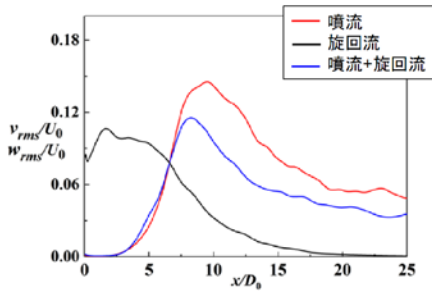
図7 主流方向流速のスパン方向分布

旋回流が共存する条件を、旋回流のみの条件と比較すると、ピークを取る位置が下流にシフトしているとともに、その強度が増加している。旋回流のみの条件においては、中心軸上より流れが流入していないため、単純な比較はできないが、今後より詳細な検討が必要であると考えられる。

図9に、速度ひずみテンソルの第二不変量の等値面(=0.30)により乱流構造を可視化したものを示す。噴流のみの条件においては、従来から言われている通り、リング上の渦が流入部より生じ、それらが発達することで微細な渦が大量に発生し、乱流構造が形成されることがわかる。それに対して、噴流においては、チューブ上の渦が螺旋状に存在し、それらが発達することによって、より微細な渦が形成され、乱流構造が形成されることが確認できる。これらの条件の結果と、噴流と旋回流が共存する条件の結果を比較すると、噴流と旋回流が共存の乱流構造は流入部近傍の上流部においては、旋回流のみの乱流構造



(a) 主流方向



(b) 鉛直、スパン方向

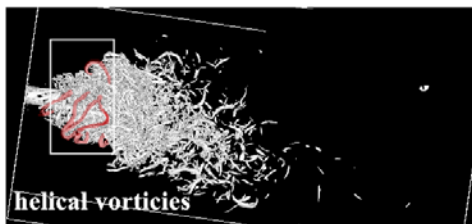
図 8 中心軸上における速度変動強度の軸方向分布



(a) 噴流のみ



(b) 旋回流のみ



(c) 噴流+旋回流

図 9 速度ひずみテンソルの第二不変量による乱流構造の可視化図

に、より下流においては、噴流のみの乱流構造に近い構造を形成していることが確認できる。特に、噴流のみの条件において見られるリング上の渦は全く確認できず、乱流発達の初期から、チューブ状の微細な乱流渦が形成されていることが確認できる。このような乱流構造により、噴流部の運動量の拡散が促進されていると考えられる。

以上の結果から、噴流と旋回流が共存する乱流場の構造を平均流、速度変動強度、乱流構造の観点から明らかにすることができた。今後は、この乱流構造をスペクトルやヘリシティ等の観点からより詳細に明らかにするとともに、燃焼器の設計において重要な燃料と酸化剤の促進機構や、粒子の分散挙動についても明らかにしていく必要がある。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 0 件)

なし

〔学会発表〕(計 2 件)

① 栗田浩平、伊藤靖仁、李銘溟、酒井康彦、長田孝二、岩野耕治、丹野賢二、前川祐太、軸対称噴流と旋回噴流の共存場に関する実験的研究、第 52 回日本伝熱シンポジウム、福岡、2015.6

② 李銘溟、長田孝二、伊藤靖仁、酒井康彦、丹野賢二、Direct Numerical Simulation of Coaxial Round Jet with Swirl、第 28 回数値流体シンポジウム、東京、2014.12

〔図書〕(計 0 件)

なし

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

なし

○取得状況 (計 0 件)

なし

〔その他〕

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

丹野 賢二 (TANNO, Kenji)

一般財団法人電力中央研究所・エネルギー技術研究所・主任研究員

研究者番号：60462884