

三次元超音速流れの光学的定量計測装置と各種工業用マイクロノズルの開発研究

国際環境工学部 機械システム工学科 教授 宮里 義昭

1. まえがき

地球温暖化や大気汚染等の環境問題の深刻化に伴い、近年の自動車業界では、石油に頼らず二酸化炭素(CO₂)、窒素酸化物(NO_x)、浮遊粒子状物質(PM)等の排出をゼロとするエネルギー源をもつ燃料電池自動車(FCV)が、究極のエコカーとして期待されており、FCVに水素を供給する水素ステーションの設置が急務となっている。水素ステーションからFCVに水素を充填するときの流量計として、流れのチョーク現象を利用した音速ノズルが有望視されているが、ノズルからの噴流は衝撃波を伴う複雑な構造を持つため計測が困難であり、現在も継続してその評価試験が行われている。本研究では、衝撃波を伴う噴流の定常三次元の密度場を計測するためのシュリーレン断層撮影装置を開発した。また、実験と同一の圧力条件で流れ場の数値シミュレーションを行ったので、その結果について報告する。

2. 実験装置と方法

本研究で用いた大気吹出し式超音速風洞とレインボーシュリーレン光学系の模式図を図1に示す。圧縮機によって高圧タンクに蓄えられた乾燥空気は、図1の左端に示す圧力制御弁を通り、集合洞で一旦よどみ状態となった後、供試ノズルを通して、大気へと放出される。また、メタルハライド光源からの光は、光ファイバーケーブル、対物レンズ、図1の左端に示す直径50 μ mのピンホールを通った後、コリメータレンズで平行光線となり、集光レンズ、レインボーフィルター、カメラレンズを通してデジタルカメラの受光素子上に達する。

図2に示すように、供試ノズルはステッピングモーターとタイミングベルトによって等間隔の角度で連続的にノズル軸のまわりに回転できるようになっており、指定の回転角度に対するレインボーシュリーレン写真撮影が可能である。本実験では、ノズルを0度から180度まで10度の等間隔で回転させ、各角度の位置でレインボーシュリーレン写真撮影を行った。その後、撮影した19枚のシュリーレン写真からX線CTの原理に基づく密度再構成を行った。

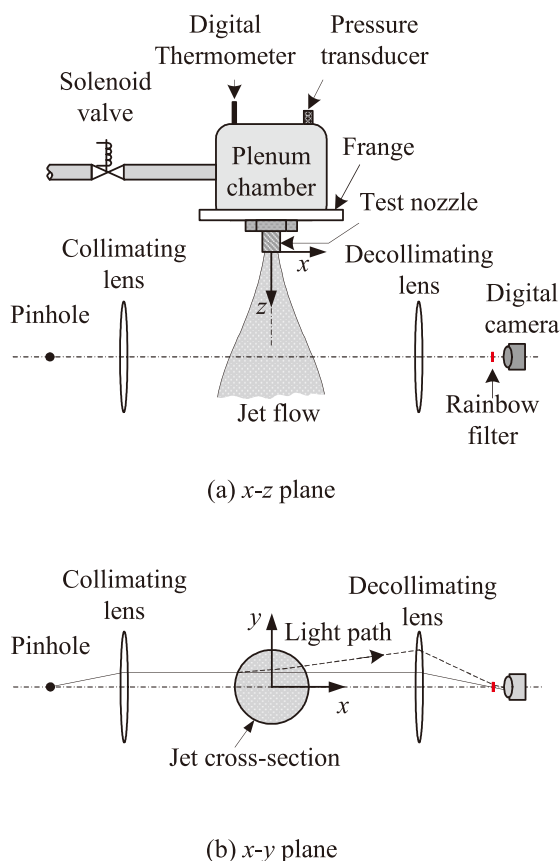


図1 超音速風洞と光学系の模式図

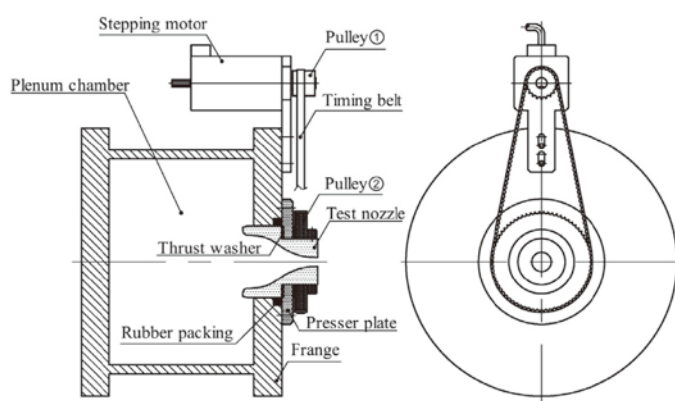


図2 ノズル回転装置

本研究で用いた供試ノズルは、ノズル出口直径が $D_e = 10\text{mm}$ で、ノズル入口から出口までの壁面が正弦曲線となる軸対称先細ノズルを用いた。また、実験は、集合洞内の圧力 p_{os} と背圧(大気圧) p_b の比が $p_{os}/p_b = 4.0$ の条件で行った。

3. 数値シミュレーションの方法

本研究で開発したシュリーレン断層撮影装置の妥当性を検証するため、ノズルからの流れ場を軸対称レイノルズ平均ナビエ・ストークス方程式(RANS方程式)を解くことによって求めた。ただし、乱流粘性係数は圧縮性流体の数値計算で実績のあるMenterの $k-\omega$ SST乱流モデルを用いて評価した。また、基礎方程式の対流項の差分は、空間3次精度MUSCL型のTVD法を適用し、セル境界の非粘性流速はRoeの流束差分法により求めた。さらに、基礎方程式の粘性項内の微分は空間2次精度中心差分を用い、時間積分は、3段階ルンゲ・クッタ法によって評価した。

4. 計測結果と数値シミュレーション結果

ノズル出口からの噴流の代表的なレインボーシュリーレン写真を図3に示す。写真は、レインボーフィルターの色相の変化がノズル中心軸(z 軸)に対して垂直になるように設置して撮影した。流れ方向は左から右で、噴流構造は紙面に対して垂直方向に平均化されたものであるが、この写真からバレル衝撃波と反射衝撃波およびマッハディスク等の不足膨張音速噴流の特徴が観察できる。しかし、マッハディスクより下流の噴流の様子は、写真が不鮮明のため不明である。

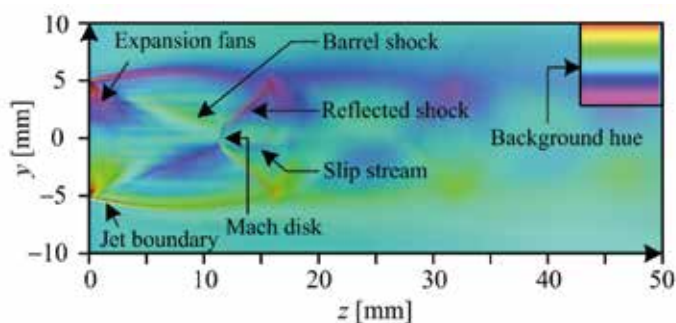


図3 レインボーシュリーレン写真

次に、ノズル中心軸を含む噴流断面上の等密度線図の計測結果と数値シミュレーション結果との比較を図4に示す。両者による等密度線図は、全領域にわたって定量的にほぼ一致することが分かる。また、計測結果は、マッハディスク下流の密度場も詳細に捉えている。

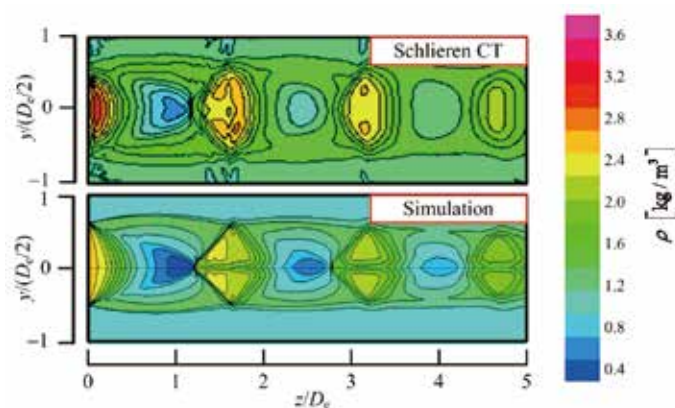


図4 衝撃波を伴う噴流の等密度線図

あともがき

本研究では、衝撃波を伴う噴流の時間平均的な3次元の密度場を高空間分解能・高精密度で計測するためのシュリーレン断層撮影装置を開発した。今後は、本装置を用いて、水素ステーション用音速ノズル等の各種工業用マイクロノズルからの噴流の評価を行う予定である。現在、本研究をさらに発展させ、シュリーレン非定常断層撮影装置の開発に取り組んでいる。

Profile



宮里 義昭

Yoshiaki Miyazato

役職／教授

学位／博士(工学)

学位授与機関／九州大学

■ 研究分野・専門

■ 主要研究テーマ

■ PR・その他

圧縮性流体力学、流動光計測学

●シュリーレン非定常断層撮影法の開発研究
●ショックレーンと擬似衝撃波に関する研究
●超音速マイクロ流れの光学計測と数値計算
超音速ノズルの設計やマイクロノズルを通る圧縮性流体の評価を行っています。これまで、転炉用ノズル、スートブロウノズル、リークピーラーノズル、ガスアトマイジングノズル等の各種工業用超音速ノズルに関する研究を行ってきました。

連絡先

TEL 093-695-3219 FAX 093-695-3316

E-mail miyazato@kitakyu-u.ac.jp