

水素の超音速ビーム入射のための3次元シミュレーションの開発 Development of three-dimensional simulation for supersonic molecular beam injection of hydrogen

岡田 匠平、西野信博
Shohei Okada, Nobuhiro Nishino

広島大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Hiroshima University

1. 背景・目的

ヘリカル軸ヘリオトロン型高温プラズマ実験装置において、ラバール・ノズルの利用により、ガス分子を超音速の分子ビーム状に入射させる装置 (Supersonic Molecular Beam Injection ; SMBI) が、燃料ガスの供給法として利用されている。実験によるとこの方法は、最も簡便な方法であるガスパフ法に比べて、プラズマ中心部への重水素粒子の補給効率が高く、高密度のプラズマを維持できると考えられている。本研究では、SMBI によるガス入射のシミュレーションを作成し、ガス分子の挙動や、SMBI における最適条件を求めることを目標としている。

2. 支配方程式

SMBI を再現するために、流体の支配方程式として以下の式を用いた。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{v} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \Delta \mathbf{v} \quad (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla p = -\gamma p \nabla \cdot \mathbf{v} \quad (3)$$

式(1)は質量保存則、式(2)は運動量保存則、式(3)はエネルギー保存式を変形した、圧力の移流方程式である。以上の式を3次元空間座標において、有限差分法(Finite Difference Method ; FDM)を用いて離散化し、Fortran 言語で計算コードを作成した。

3. 計算手法

移流項に CIP 法、非移流項には2次精度の中心差分法をと、Semi-Implicit 法を用いた。Semi-Implicit 法とは、式(1)と式(3)において陽解法で密度と圧力の中間値を求め、その中間値と式(2)を用いて次ステップの速度を求める。更にその速度で式(1)と式(3)を陰解法で解き、次ステップの密度と圧力を求める方法である。この方法により安定した解を求めることが可能となる。また、時間進展法には4次のRunge-Kutta 法を用いた。

4. 計算テスト

作成した計算コードの物理現象に対する整合性があるか確認をするために、一次元の衝撃波管問題を設定し計算を行った。物性値は理想気体と仮定したときの重水素のものを用いた。

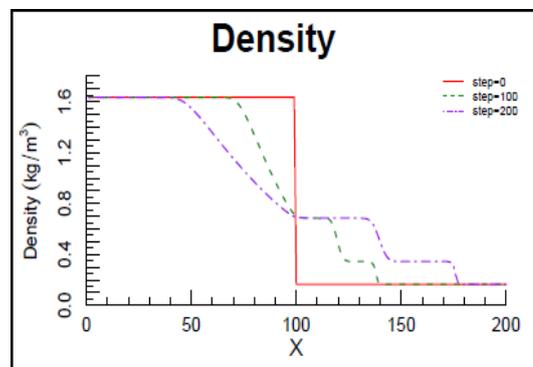


Fig.1 密度の時間変化

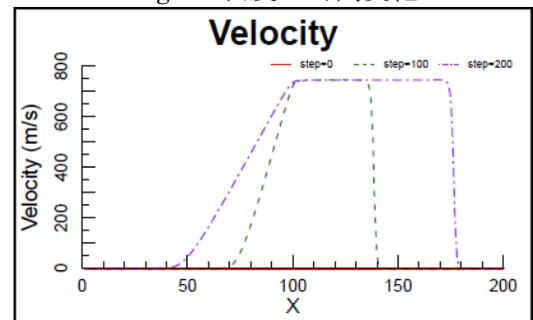


Fig.2 X 軸方向速度の時間変化

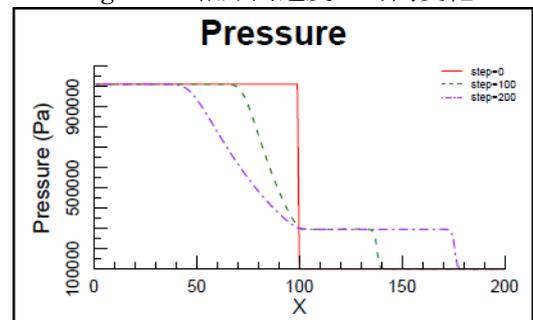


Fig.3 圧力の時間変化

以上のテストにより、十分な計算精度が得られていることが判明した。発表では、この計算コードで SMBI の計算を行った結果と詳細を報告する。