

## 3A02 高圧水素噴流の浮き上がり火炎現象の大規模数値解析： 保炎機構と格子解像度の影響について

○坪井 伸幸，伊藤 拓海（九州工業大学），朝原 誠（岐阜大学），林 光一（青山学院大学）

Large-scale Numerical Simulation on Lifted-flame Phenomena in High-Pressure Hydrogen Jet:  
Mechanism of Flame Holding and Effects of Grid Resolution  
Nobuyuki Tsuboi (Kyushu Institute of Technology), Takumi Ito (Kyushu Institute of Technology),  
Makoto Asahara (Gifu University), A. Koichi Hayashi (Aoyama Gakuin University)

Key Words: Hydrogen, Jet flow, Unsteady flow, High pressure, Ignition, flame

### Abstract

Three-dimensional numerical simulation of unsteady high-pressure hydrogen jet was performed to find out a lifted flame formation process by the forced ignition at  $x=200$  mm and unsteady diffusion behavior. The previous simulation used a grid with approximately 20 million grid points, however, the present simulation uses approximately 40 million grid points. The present simulation uses the LU-ADI-SGS implicit method to improve the numerical stability near the symmetry axis. The results show that the lifted flame is also formed for the present finer grid, and the lifted distance is approximately 180 mm. This numerical lifted distance agrees well with the experimental results.

### 1. はじめに

近年，化石燃料に替わる環境にクリーンな新たなエネルギー源が必要とされている．そこで新たなエネルギー源として水素を用いる技術開発が進められている．特に燃料電池自動車などの輸送部門への導入にあたり，国内各地に水素ステーションの設置が進められている．水素は大気中に放出された際に拡散しやすく，さらに可燃範囲が広く着火しやすいなどの特性を有している．また，石油などの液体資源に比べて標準状態での比体積が大きいこと，保存方法が限られるというエネルギー利用にとって不利な特性も合せ持つ．そこで，水素を効率良く貯蔵する方法として，水素を液化してタンクに貯蔵する方法，金属に水素を吸収させる方法，アンモニアに改質して貯蔵する方法，などが提案された研究が行われている．しかし，現在，実用化に至っている貯蔵方法は，高圧で圧縮した水素をタンクに貯蔵する方法である．このため，水素ステーションや燃料電池自動車のタンクに貯蔵する水素の圧力は非常に高圧（40～82MPa）である．このような高圧下で貯蔵された水素が蓄圧器の破断や配管・ホースの判断などから予期せぬ事態で水素が流出してしまった場合，広範囲に可燃濃度領域が存在すると考えられるが，その具体的な範囲は十分検討されているとは言えない．そして，水素が漏洩した領域に着火源が存在した場合，爆発事故が起こるような事案が懸念される．そのため，高圧貯蔵設備からの水素漏洩による万が一の事故を予測し，

防止するために水素の拡散挙動及び着火特性を把握する必要がある．

本研究では，著者らが過去に実施した結果[1, 2]と比較するために，周方向の格子解像度を向上させ，水素噴流拡散中に対して下流に着火源が存在した場合に発生するケースの1つである浮き上がり火炎について評価を行ったので，その結果を報告する．

### 2. 解析手法および解析条件

本数値解析における支配方程式には，気体全体の質量保存則，運動量保存則，エネルギー保存則，9化学種（ $H_2$ ,  $O_2$ ,  $H$ ,  $O$ ,  $OH$ ,  $HO_2$ ,  $H_2O_2$ ,  $H_2O$ ,  $N_2$ ）それぞれの質量保存則から成る，3次元圧縮性Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS)を使用し，乱流モデルにはSpalart-Allmarasモデルを使用した．対流項の空間離散化はMUSCL法により2次精度で内挿されたAUSM-DVで評価し，時間積分にはLU-ADI-SGS法を用いて陰的に取り扱った．対称軸中心に格子が集中するデメリットがあるが，非等方的な数値粘性を避けるために，円筒状の格子を用いている．時間積分については，当初は前回[1, 2]使用した陰解法と同じLU-SGS法を使用する予定であったが，周方向の格子点数が増えることで対称軸付近の計算の安定性が著しく低下した（特に噴流出口の発生するマッハディスク近傍）．そのため，新規に燃焼解析用に改良したLU-ADI-SGS法を使用した．非定常計算を行うため，内部

ループ3回で残差を2桁以上落として時間一次精度を確保している. CFL数は1.6程度で, これがほぼ上限であった. なお, 陽解法の3段階TVDルンゲクッタ(RK3)では中心軸の計算の安定性が極めて悪くなり, RK3法で計算するよりもLU-ADI-SGS法の方が総合的には計算時間が短い.

計算コストを減らすためにMPI/OpenMP hybrid並列を行い, 24 nodeを使用した. 計算領域の長さ(実行上は1.3 m)に対する噴出口径(0.2 mm)の比が6500に達するため, 膨大な計算時間の短縮のために今回の解析では前述の通り陰解法を使用した.

解析条件は岡林ら[3]が行った高圧水素ガスの噴出実験の条件と一致させ, 貯気圧82 MPa, 噴出口径 $d=0.2$  mmとした. 表1に計算条件を, 図1に計算格子を示す. 総格子点数は約4000万点であり, 流れ方向に873点, 周方向に125点, 半径方向に361点とした. 超音速で流出する噴出口近傍に格子を密に配置し, 噴出口直径に8点の格子を配置した. したがって, 半径方向の最小格子幅はおよそ0.03 mmとなり, 軸方向の格子幅はノズル出口近傍では0.06 mmであり, そこから徐々に格子幅を大きくし,  $x/d=800$ の位置で0.5 mmとした. 境界条件は, 噴出口流入部では密度・速度・圧力固定の流入境界, 上面・下面・出口は流出境界とした. 中心軸上の特異線では, 周囲を囲む点の平均値を外挿した.

Table 1 Calculation condition.		
	Jet outlet	Ambient
Mixture Gas	H <sub>2</sub>	Air (0.244O <sub>2</sub> +0.756N <sub>2</sub> )
Density	$\rho_j = 42.1$ kg/m <sup>3</sup>	$\rho_a = 1.177$ kg/m <sup>3</sup>
Temperature	$T_j = 249$ K	$T_a = 300$ K
Pressure	$p_j = 43.2$ MPa	$p_a = 0.1$ MPa
Velocity	$u_j = 1203$ m/s	$u_a = 0$ m/s
Mach number	1.0	0
Reynolds number	$Re = 1.30 \times 10^6$	-

3. 計算結果および考察

3. 1 高圧水素噴流の流動特性

図2に $x$ - $r$ 断面におけるマッハ数分布を示す.  $x=200$  mmに達するまでに約200万回,  $x=400$  mmに達するまでに約600万回の計算回数を要している. 今回の計算では時間平均をとることができるまでの計算が足りなかったため, 対称軸上の時間平均マッハ数分布や時間平均水素濃度分布がこれまでの結果との差異や実験データとの比較をまだ行っていないが, 今後さらに解析を進めて, 時間平均の状態を得る予定である.

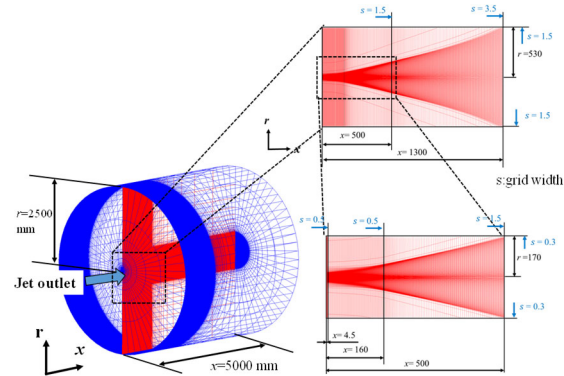


Fig. 1 Calculation grid system (873×125×361) for high-pressure hydrogen jet. The radius grid is plotted at every four points.

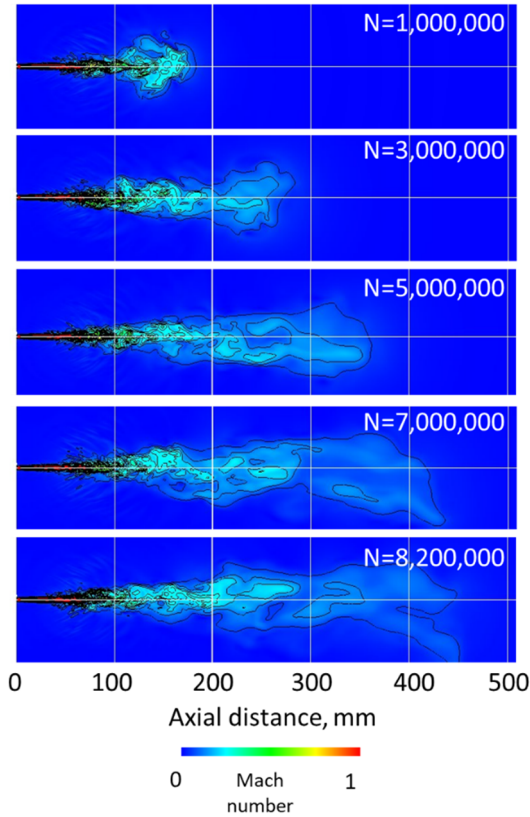


Fig. 2 Instantaneous Mach contours without ignition.

3. 2 強制着火による火炎挙動

図3に $x=200$  mmにおいて強制着火させた場合の火炎の成長挙動を示す. 図中のオレンジ色の空間等値面は1736 Kの温度の等値面である. 火炎は下流および上流に向かって成長し, 定在する浮き上がり火炎を形成する. このとき, 上流側の火炎端(左端)はおよそ180 mmとなり, それ以上遡らない. 一方, 下流側の火炎端(右端)は下流側へと移動しており, 火炎が成長を続けていることがわかる. 岡林らの実験[3]や武野らの実験[4]でも同様に浮き上がり火炎が発生することが報告されてお

り、この保炎機構を今後詳細に明らかにする予定である。

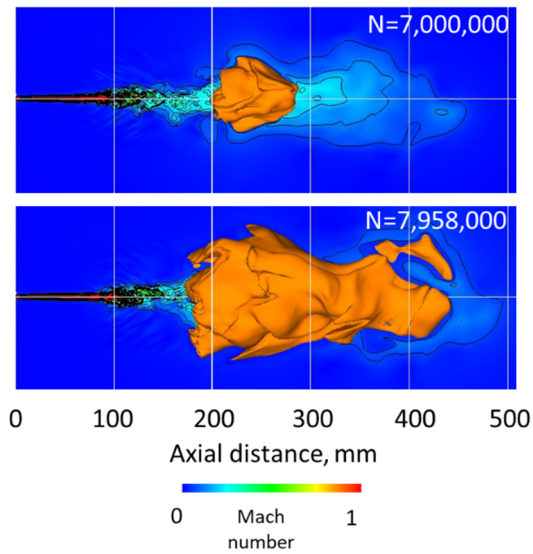


Fig. 4 Instantaneous Mach contours and temperature iso-surface (orange, 1736 K) after ignition at  $x=200$  mm.

#### 4. 結論

非定常の3次元数値解析により、高圧水素噴流の流動特性を明確にし、さらに噴流中で強制着火を試みることで、浮き上がり火炎の挙動を示した。格子解像度の影響はまだ十分評価できていないものの、過去の粗い格子での計算結果と同様に浮き上がり火炎が形成されることが確認できた。実験結果との比較や保炎機構の詳細については発表当日に報告する予定である。

#### 謝辞

本研究の解析は大阪大学D3センターのスーパーコンピュータSQUIDを使用した。さらに、本研究はHPCIシステム利用研究課題の成果によるものである（課題番号：hp170112, hp230093）。ここに謝意を表す。

#### 参考文献

- [1] 坪井, 朝原, 藤本, 武藤, 林, 第49回流体力学講演会/第35回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム, 1C03(2017)
- [2] Asahara, M., Iwasa, T., Tsuboi, N., Hayashi, A.K., Int. J. Hydrogen Energy, 47, 31709-31728 (2022)
- [3] Okabayashi, K., Tagashira, K., Kawazoe, K., Takeno, K., Asahara, M., Hayashi, A.K., et al. Int. J. Hydrogen Energy, 44, 9071-9079 (2019).
- [4] Takeno, K., et al., Fire, 7(2) (2024).