

プラズマジェットプラグにおける放電と噴出のシミュレーション

磯島 知也¹⁾

Simulation of Discharge and Jet in Plasma Jet Plug

Tomoya Isoshima

Plasma jet plugs have been proposed for automotive engine. The plug has a cavity and it emits plasma jet. Compared to usual plug, this plug is affected by expansion and shockwave of gas. Because gap between the electrodes is hidden in the plug, experimental observation is difficult. Therefore simulation and visualization of inside of the plug are useful. In this presentation, we simulate a plasma jet plug considering compressibility of gas. Electromagnetic effect due to current through electrodes and plasma is also considered.

KEY WORDS: Heat engine, Spark ignition engine, Numerical calculation, Plasma, Electric Fields (A1)

1. ま え が き

エンジン用の点火プラグとして、プラズマジェットプラグが提案されている⁽¹⁾⁽²⁾。これは、プラグ内部のキャビティーからプラズマを噴出するものである。キャビティーは、噴出のための穴が開いている以外は閉じた形状となっており、その内部で放電が起こるため、通常の点火プラグに比べ気体の膨張や衝撃波の影響を受けやすいと想像できる。しかし、空洞内部を直接観測することは困難である。シミュレーションではこのような領域でも各種物性値を知ることができ、プラグの挙動の理解に有用である。この講演では、電極内の電流から、放電、それに伴う気体の膨張や音波までを考慮して、このプラグの放電から噴出までの挙動をシミュレーションする。

2. 状 況 設 定

2.1. プラグ形状

インターネット上で公開されている情報⁽²⁾を参考に、プラズマジェットプラグの形状を作成した。その形状を図1と図2に示す。中心電極(図2の Center electrode)、接地電極(同図の Grounded electrode)と誘電体部分(同じく Dielectric)の形状は軸対称である。接地電極にあいた穴の直径は、0.75 mmとした。電極と誘電体のほかに、プラグ内外にある気体部分をシミュレーション対象とする。電極間の放電経路がプラグの対称軸上に発生するとは考えにくいので、温度分布や電流密度分布などの物理量は軸対称性のない3次元空間上で扱う。

2.2. 動作条件

初期状態では、温度が 300 K、圧力は 0.4 MPa の空気で空間が満たされているとする。中心電極と接地電極の間には 1 A の電流が流れるとする。アーク放電を開始させるために、放

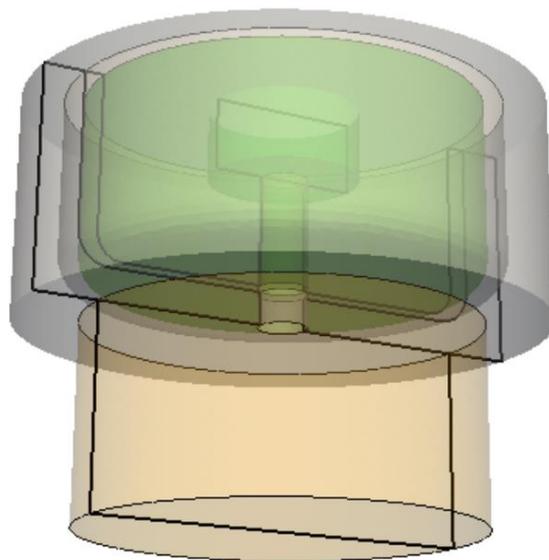


Fig.1 Geometry of Plasma Jet Plug

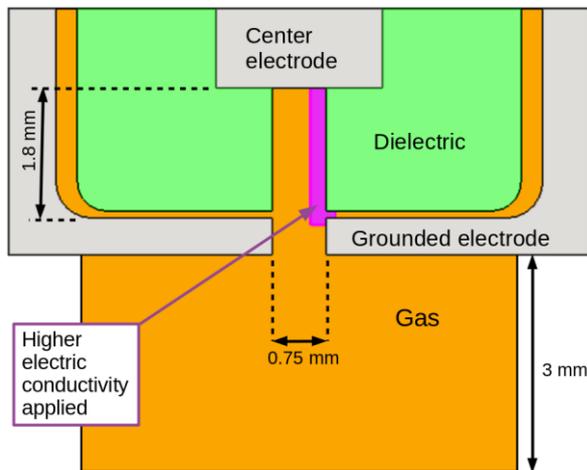


Fig.2 Cross Section of the Plasma Jet Plug

1) (株) ウェーブフロント (220-6112 横浜市西区みなとみらい2丁目3番3号 クイーンズタワーB12階)

電チャンネルが形成されている必要があり、これを模擬するために、電極間の空間の一部（図 2 の紫色の部分）が導電率を持っている (0.1 S/m) とする。

3. 計算式

3. 1. アークの流動方程式

圧縮性ナビエーストックス方程式で、ジェットプラグ内外の気体の流動を扱う。アーク放電状態となっている気体も含まれるため、通常の圧縮性ナビエーストックス方程式⁽³⁾に加えて、ジュール熱、ローレンツ力、輻射ロスが考慮されている。圧縮性ナビエーストックス方程式を構成する主な式は、質量保存の式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \bar{\nabla} \cdot (\rho \bar{v}) = 0 \quad (5)$$

運動量保存の式

$$\frac{\partial (\rho \bar{v})}{\partial t} + \bar{\nabla} \cdot (\rho \bar{v} \bar{v}) = -\bar{\nabla} p + \bar{\nabla} \cdot \bar{\tau} + \bar{J} \times \bar{B} \quad (6)$$

エネルギー保存の式

$$\frac{\partial (\rho h)}{\partial t} + \bar{\nabla} \cdot (\rho h \bar{v} + \bar{q}) = \frac{Dp}{Dt} + \bar{\tau} : \bar{\nabla} \bar{v} + Q_{\text{Joule}} - S_{\text{rad}} \quad (7)$$

である。ここで ρ と \bar{v} は気体の質量密度と流速、 p は圧力、 $\bar{\tau}$ は粘性流束テンソル、 \bar{q} は熱フラックス、 S_{rad} は輻射ロス⁽⁴⁾⁽⁵⁾、 h はエンタルピーである。 \bar{J} は電流密度、 \bar{B} は磁束密度である。エネルギー保存の式、式 (7) に現れる Q_{Joule} はジュール熱で、

$$Q_{\text{Joule}} = \bar{J} \cdot (\bar{E} + \bar{v} \times \bar{B}) \quad (8)$$

である。運動量保存の式の右辺にローレンツ力の項が含まれ

ており、放電経路に沿って流れる電流 \bar{J} と磁束密度 \bar{B} の効果が考慮されている。

3. 2. 熱物性および輸送特性局所熱平衡

気体の導電率、熱伝導率、比熱などの特性値⁽⁴⁾は、局所熱平衡および局所化学平衡の仮定を用いて、空間座標ごとに、温度と圧力の関数として求める。局所熱平衡と共に、化学平衡を仮定することによって、多数の化学種を考慮した計算を行う。

3. 3. 電場と磁場

点火プラグでは、電極間の電位差によって放電が起こる。また、放電に伴って生じる磁場は、放電経路に力を及ぼす。電磁場については、電流の連続の式

$$\bar{\nabla} \cdot (\sigma \bar{E}) = 0 \quad (1)$$

とアンペールの法則

$$\mu_0 \sigma \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} + \mu_0 \sigma \bar{\nabla} \phi - \bar{\nabla}^2 \bar{A} = 0 \quad (2)$$

から求める。ここで ϕ はスカラーポテンシャル、 \bar{A} はベクトルポテンシャル、 σ は気体の導電率で、電場 \bar{E} と磁束密度 \bar{B} は

$$\bar{E} = -\bar{\nabla} \phi - \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} \quad (3)$$

$$\bar{B} = \bar{\nabla} \times \bar{A} \quad (4)$$

である。ベクトルポテンシャルおよびスカラーポテンシャルは、気体部分だけでなく、電極内部および誘電体部分も含めて計算する。これにより、電極内部の電流密度や電極表面の放電点の移動、電極内部の電流による磁場を考慮する。

4. 計算結果

3.1. 電位差と電流

各電極の根元（図1, 図2に示したそれぞれの電極の上端を根元とする）に、1 A の電気を流すために電位差をかける。電気抵抗は、各電極の導電率や形状と、電極間の空間の導電率によって決まる。この電気抵抗と、電流値(1 A)に応じた電位差が必要となる。計算開始時は、空間の導電率が小さいため、電位差は大きくなる。その後、空気の温度が上昇し電離することによって導電率が上がると、電気抵抗が下がり、電極間の電位差は下がっていく。この電位差の時間変化を 図 3 に示す。

3.1. 圧力と温度

電流によるジュール熱で気体が加熱されて、気体の温度が上昇する。図 2 と同じ断面上での、温度分布の時間変化を図 4(a)-(d)に示す。空気の温度上昇とともに、圧力が上昇し、プラグの外へ気体が噴出し始める。圧力分布と流速ベクトルとを、図 4(e)-(h)に示す。

図 4(a) (e)で見ると、当初はプラグ内の空洞の、右側の壁面で放電が起こっており、ここで温度と圧力が上昇する。しかしその後 1 μ s 時点では、放電経路は右側のまま（図 4(b)）だが、反対側、つまり左側の壁面の圧力が上昇している（図 4(f)）。時間 1 μ s で空洞の直径 0.75 mm を進行していることから、音波が伝播していると考えられる。プラグ出口の温度はまだ上昇していないが、そこでの圧力は上昇している。このように、気体の膨張と、それに伴う音波の伝播が噴出パターンに影響する。

時間が進むと、プラグから外部（図の下方向）へと、円弧状に圧力の波が広がっていき（図 4(g) (h)）、それよりもやや遅れて、プラグ出口付近では高温の気体の流出が見られる（図 4(c)-(d)）。それと同時に、誘電体と接地電極の隙間へも圧力波が進行している。こちらはキャビティからの噴出をもたらさないため、プラグの動作目的からすると、損失だと考えられる。

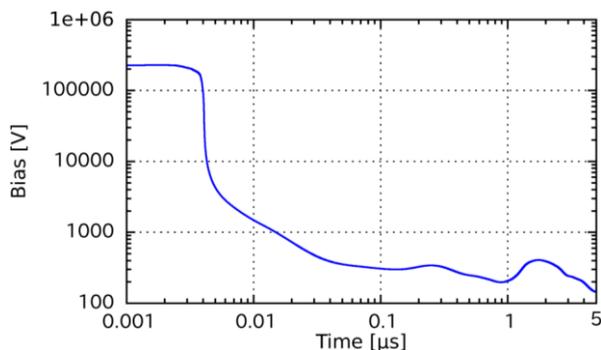


Fig. 3 Bias voltage

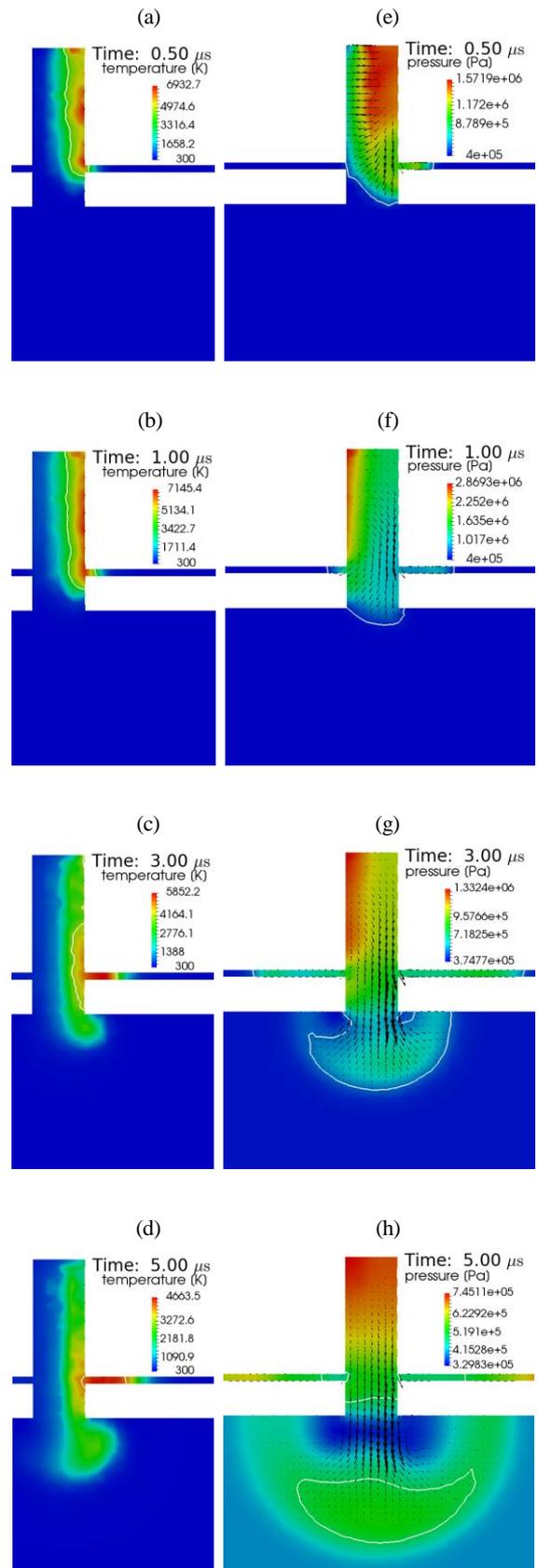


Fig.4 (a)-(d) Temperature and (e)-(h) Pressure. Flow velocity vector is also shown in the figures on the right hand side. Contour lines at (a)-(d) 4000 K and (e)-(h) 0.5 MPa are shown for comparison.

4. 空洞形状が異なるプラグ

4.1. 形状の変更点

プラグからの噴出量や噴出の温度は、空洞内部の衝撃波の反射や気体の温度上昇に影響されると思われる。この、反射と温度上昇は、いずれも空洞の広さに影響される。この影響を見るため、以下では、空洞を広くしたプラグ形状 (図5) を想定して、前節と同様のシミュレーションを行なう。比較のため、電極形状は完全に同一とする。

電極間の電流は、前の計算と同じく、1 A で一定とする。電極間の空間の導電率によって、電極間の電位差が変化する。この、電位差の時間変化を図6に示す。電極間に電気が流れることによって、その経路でジュール熱が発生し、気体の温度が上昇する。断面上での気体の温度分布の変化と、それに伴う圧力変動を、図7に示す。圧力変動は、放電開始後 $1 \mu\text{s}$ 程度でキャビティ出口に到達している (図7(f)) が、噴出する気体が高温となるのは $4 \mu\text{s}$ ごろからで (図7(c), 7(d)), 元のプラグ形状に比べて若干噴出気体の温度上昇が遅くなっているように思われる。この点を明確にするため、噴出気体の平均温度を以下で比較する。それと併せて、質量流量と流速の比較も行なう。

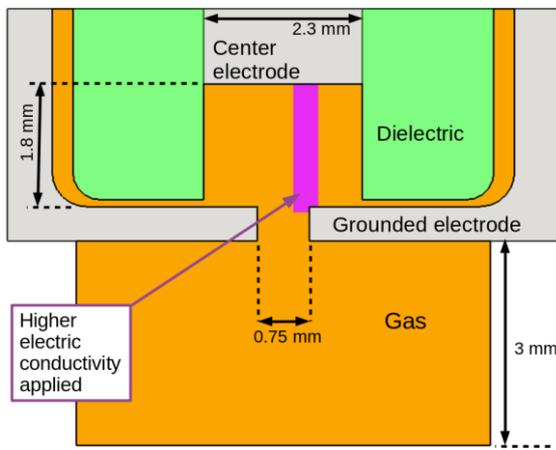


Fig.5 Plug geometry used in the second simulation.

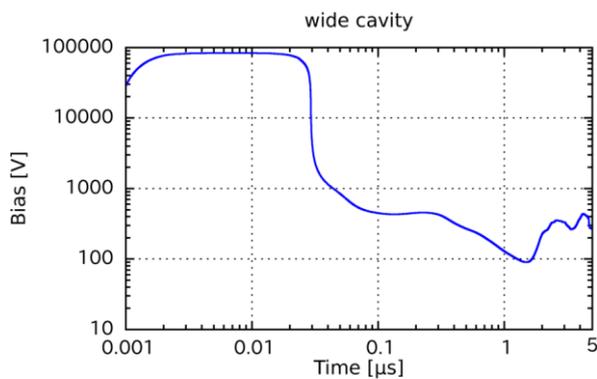


Fig.6 Bias Voltage

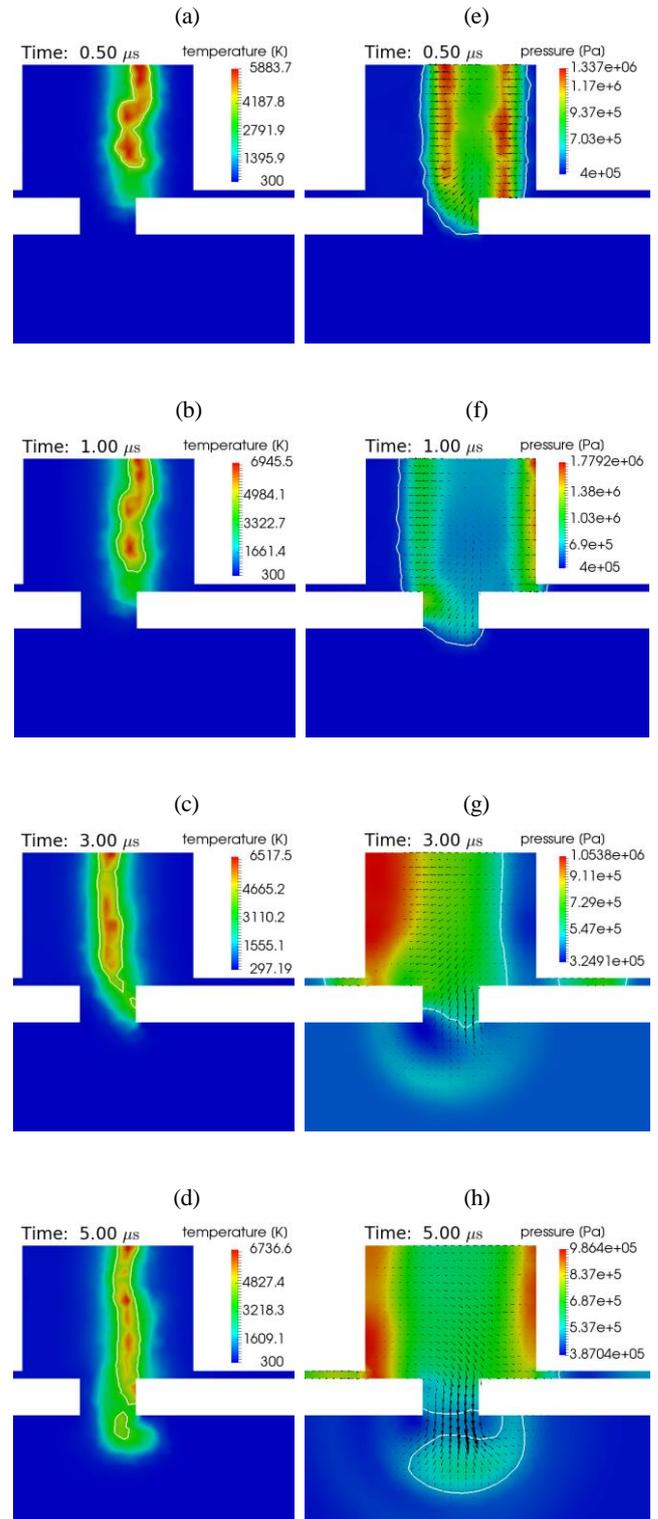


Fig.7 (a)-(d) Temperature and (e)-(h) pressure. Flow velocity vector is also shown in the figures on the right hand side. Contours at (a)-(d) 4000 K and (e)-(h) 0.5 MPa are shown as white lines for comparison.

5. 形状による噴出特性の違い

5.1. 噴出温度の時間変化

プラグ出口での、気体の平均温度を図8に示す。接地電極の穴の部分で、面積分をして求めた値である。図1および図2のプラグ形状 (narrow cavity とする) では、図8の赤い実線で示すように $2\mu\text{s}$ ごろに温度が大きくなるが、空洞が広い図5の形状 (wide cavity とする) では、青の点線で示すように、 $4\mu\text{s}$ ごろに温度が最大となり、プラグ形状によって温度上昇のタイミングが異なることがわかる。

5.2. 噴出量の時間変化

シミュレーションで求めた、気体の流速 \bar{v} と密度 ρ の分布を用いて、プラグ出口 (接地電極の穴に相当する平面) で、通過する気体の質量 $\rho\bar{v}\cdot\bar{n}$ を求める。ここで \bar{n} は、その平面の法線ベクトルである。この積分値が、ジェットプラグからの噴出量 (単位はグラム毎秒) となる。噴出量の時間変化を図9に示す。どちらのプラグも噴出量のピークが $1\mu\text{s}$ ごろにあるが、その時の気体の温度は図8より $500\sim 800\text{K}$ 程度で、まだ低温である。図4(f)や図7(f)の圧力分布から、この噴出量のピークは音波によるものと思われる。その後、 $3\mu\text{s}$ ごろに、ふたたび噴出量が大きくなり、このときの気体の温度は 1500K 以上と高くなっている。

5.3. 流速の時間変化

プラグ出口での流速の平均値を図10に示す。気体の温度や圧力が変動しているため音速との比較はできないが、常温常圧の空気の音速 (約 340m/s) を超える速度の噴出が見られる。

6. まとめ

気体の圧縮性を考慮することによって、プラズマジェットプラグからの噴出のシミュレーションを行なった。電極形状が同じでも、誘電体部分の形状が変わることによって噴出量や噴出温度、それらのタイミングも変化することを示した。

参考文献

- (1) 日本特殊陶業株式会社. プラズマジェット点火プラグ. 特開 2010-257949. 2010-11-11.
- (2) プラズマジェットプラグ, http://entame.ngk-sparkplugs.jp/event/exhibition/1205_hito/product/pdf/04.pdf, (参照 2017-03-22).
- (3) 数値流体力学編集委員会: 数値流体力学シリーズ 5 圧縮性流体解析, 東京大学出版会 (2015).
- (4) Boulos M. I. et al.: Thermal Plasmas Fundamentals and Applications Volume 1, Plenum Press, New York and London (1994).

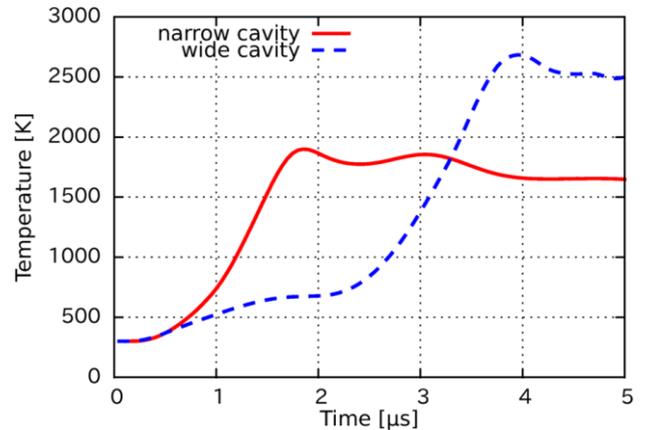


Fig.8 Average Temperature at Orifice

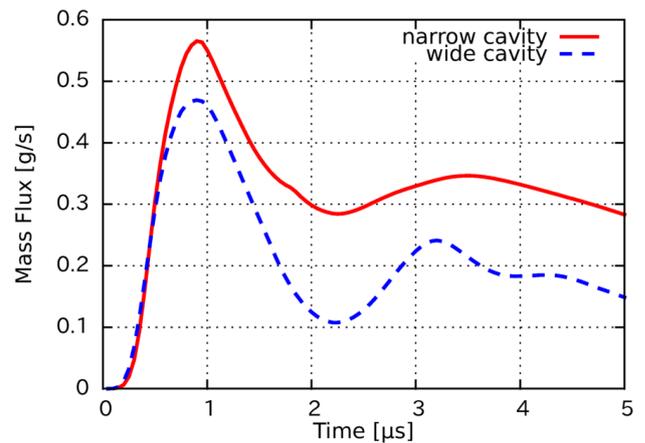


Fig.9 Mass Flux at Orifice

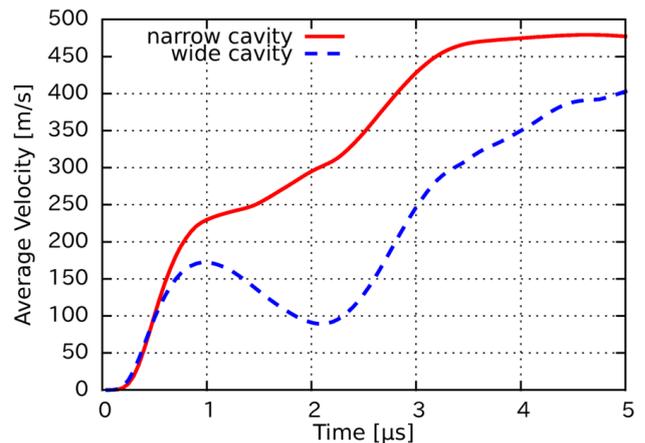


Fig.10 Average Gas Velocity at Orifice

- (5) J. J. Lowke: Predictions of Arc Temperature Profiles Using Approximate Emission Coefficients for Radiation Losses, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, Vol. 14, p. 111-122 (1974).