光遮断法を用いた気体燃料噴射弁の噴射率計測*

荒木 幹也^{*1}, 藤原 康裕^{*2}, 志賀 聖一^{*1}
中村 壽雄^{*3}, 小保方 富夫^{*4}Injection Rate Measurement of a Gaseous Fuel Injector
Using a Beam Cut MethodMikiya ARAKI^{*5}, Yasuhiro FUJIWARA, Seiichi SHIGA,
Hisao NAKAMURA and Tomio OBOKATA^{*5} Department of Mechanical Engineering, Gunma University,
1-5-1 Tenjin-cho, Kiryu-shi, Gunma, 376-8515 Japan

Injection rate of a gaseous fuel injector was calculated by measuring the needle valve lift history. In our lab, a gaseous fuel injection rate meter using 1-dimensional pipe flow was developed. In the present study, the measurement accuracy of the injection rate meter was examined by comparing the theoretical injection rate estimated from the needle valve lift history. The needle valve lift was measured using an optical method. A small beam cut plate is attached to the needle valve of the gaseous fuel injector. A laser beam passes through the beam cut plate, and the variation of the beam intensity was measured with a photo sensor. From the beam intensity, the needle valve lift history was estimated. One-dimensional, compressible, inviscid, adiabatic flow was assumed, and the instantaneous mass flow rate through the needle valve sheet, the injector sack, and the injection hole was estimated. The estimated injection rate was compared with that obtained with the gaseous fuel injection rate meter. The estimated and measured injection rates agree relatively well even at transient duration. It is shown that the injection rate meter has high reliability and accuracy.

Key Words: Injection Rate, Gaseous Fuel Injector, Compressibility, Automotive Engines

記号表

A	: 断面積
C_d	: 流量係数
m	: 質量
$\dot{m}$	: 質量流量
P	: 圧力
P_n	: 噴射圧力 (全圧)
R	: 気体定数
T	: 静温
t	: 時刻
u	: 速度
V	: 体積
γ	: 比熱比

ρ	: 密度
τ	: 噴射期間

1. 緒言

気体燃料を、自動車用燃料として適用する動きが進みつつある。圧縮天然ガス (CNG: Compressed natural gas) や水素は、Tank to wheel ベースの二酸化炭素排出量を削減できるため、大きな期待が寄せられている。吸気管噴射火花点火機関^①、筒内直接噴射火花点火機関^②、筒内直接噴射圧縮点火機関^③など、多岐にわたる機関について、気体燃料の適用可能性が検討されている。

気体燃料は、従来の液体燃料と同様に燃料噴射弁から供給される。燃料噴射弁の噴射率 (単位時間当たりの燃料噴射量) は機関性能に大きな影響を及ぼすため、重要な設計要素となる。液体燃料の噴射率計測法としては、噴射された燃料を一定断面積の管内に導き、一次元流れを仮定することで計測を行う「ボッシュ式燃

* 原稿受付 2007 年 7 月 11 日。

^{*1} 正員, 群馬大学大学院工学研究科 (☎ 376-8515 桐生市天神町 1-5-1)。^{*2} 群馬大学大学院工学研究科修士課程学生。^{*3} 群馬大学大学院工学研究科。^{*4} 正員, フェロー, 群馬大学大学院工学研究科。

E-mail: araki@me.gunma-u.ac.jp

料噴射率計」^④が、広く知られている。しかしながら、ボッシュ式燃料噴射率計に気体燃料をそのまま適用した場合、計測は不可能となる。

著者らは、ボッシュ式燃料噴射率計と同様に、一次元流れを作りその静圧変動から気体燃料噴射弁の噴射率を求める手法^{⑤⑥}を提案してきた。これまでに、誤差 2~3 %以内での計測が可能であることが示され^⑥、実用レベルに近づきつつある。これまでのところ、気体燃料噴射率計で計測した噴射率を積分して噴射 1 回当たりの質量流量を求め、一方、真空容器への繰り返し噴射から噴射 1 回当たりの質量流量を求め、両者の比較を行うことで計測精度の検証を行っている^{⑤⑥}。しかしながらこの検証法では、噴射弁の開弁・閉弁過渡期間における噴射率の急激な変化が、正確に計測されているかどうかの判断が難しい。

本研究では、著者らが提案してきた気体燃料噴射率計^{⑤⑥}の、開弁・閉弁過渡期間における計測精度の検証を行う。噴射弁の開弁・閉弁過渡期間における噴射率の時間変化を、半実験的に算出することを試みる。噴射弁針弁の揚程時間変化を直接計測することで針弁シート部断面積の時間変化を求め、その前後の圧力から理論流量を算出する。こうして算出された理論噴射率と、気体燃料噴射率計^{⑤⑥}の計測結果との比較を行い、気体燃料噴射率計の計測精度を検証する。

2 実験装置および方法

2-1 針弁揚程計測 図 1 に、気体燃料噴射弁および針弁に取り付けられた遮光板概略を示す。本研究では供試噴射弁として、市販 NGV (Natural gas vehicle) の、吸気管噴射用燃料噴射弁 (KEIHIN, 06164 PDN J00)^⑦を用いた。

図 1 (a), (b) はそれぞれ、閉弁時、開弁時の断面図を示す。噴射弁管体内部に、円筒状の針弁 (供試噴射弁の針弁は、いわゆる「針形状」をしていないが、通例に従い針弁と呼ぶ) が設置されている。気体燃料は、針弁内部を通して供給され、その側面に空けられた穴から外部へと導かれる。ソレノイドにより針弁が引き上げられることで、シート部隙間から気体燃料が流出し、サックを経て噴口から噴出する。針弁先端部には、気体燃料のリークを防ぐためゴムシートが貼り付けられている^⑧。噴射弁噴口径は、 $\phi 2 \text{ mm}$ である。噴射弁針弁に、直径 $\phi 0.6 \text{ mm}$ の支持棒を介して遮光板が取り付けられる。支持棒および遮光板は針弁と比較して十分に軽く、慣性質量増大による開弁・閉弁速度の変化はほとんど無い。

(a) Needle valve close

(b) Needle valve open

Fig. 1 Schematic of gaseous fuel injector and beam cut plate attached to needle valve.

Fig. 2 Optics for needle valve lift measurement using beam cut method.

供試気体に窒素を用いた。気体は、ボンベから供給される。ボンベからの気体は、レギュレータにより調圧されバッファ室に導かれる。配管内の圧力脈動を抑えるため、バッファ室を設置した。バッファ室からの気体は、気体燃料噴射弁に導かれる。燃料噴射圧 P_{inj} は、絶対圧で 356 kPa (ゲージ圧で 255 kPa) である。以後、圧力は全て絶対圧で標記する。ファンクションジェネレータにより方形波を発生し、開弁・閉弁信号とする。開弁・閉弁信号は、噴射弁駆動回路に送られる。

図 2 に、光遮断法を用いた針弁揚程計測光学系を示す。光源に、連続発振 Nd: YAG レーザ (Laser Export, LCS-DTL-317-50) を用いた。レーザ波長は 532 nm, レーザビーム径は約 1.5 mm である。レーザビームを、遮光板によっておよそ半分遮断する。遮断されなかったレーザビームを、高速フォトセンサ (浜松ホトニクス, S3071) で受光する。噴射弁の開弁・閉弁動作により、遮光板は移動する。これに伴い遮断される光束量は変化し、フォトセンサに入射する光量は変化する。フォトセンサに入射する光量から、遮光板の移動量すなわち針弁揚程を計測する。フォトセンサからの出力信号は、デジタルオシロスコープ (ReCroy, WR6030A) で AD 変換され取得される。サンプリングクロックは、 $20 \mu\text{s}$ である。

あらかじめ、遮光板変位とフォトセンサ出力との関係を計測した。マイクロメータを用いて遮光板を微動し、その変位と輝度との関係の較正值を取得した。また、噴射弁に燃料供給ライン圧力が加わると、開弁・閉弁過程に要する時間が変化することが明らかになった。このため針弁揚程計測の際には、噴射弁に燃料供給ライン圧力を加え、実際に気体を噴射しながら計測を行った。

2.2 理論噴射率 図 3 に、気体燃料噴射弁内部の流れ場の 1 次元モデルを示す。本報では、まずは現象を単純な 1 次元流れに置き換え、解析を試みる。以下、一次元、圧縮性、非粘性、断熱流れを仮定し、また理想気体を仮定する。この仮定を基に、噴射弁内部の流れをモデル化する。気体の速度、圧力、静温、密度、質量、質量流量、比熱比、気体定数を u , P , ρ , T , m , $\dot{m}$, γ , R とおく。また断面積、流量係数、体積を A , C_d , V とおく。時間とともに変化する変数の場合には、変数記号に (t) を付すこととする。なお本研究の実験条件範囲では、温度、圧力の変化とともに実在気体効果により PV/mT が最大で 0.2 % 程度変化すると見積もられる⁷⁾。本研究ではその影響は比較的小さいものと考え、 $PV/mT = R$ で一定、すなわち理想気体を仮定することとする。

図 3 を基に、流れ場を、以下の領域①～領域⑤に分割する。

領域①：燃料供給ライン。ここでは流れは十分遅く、また圧力、静温は一定とする。速度、圧力、静温を、 $u_1 (=0 \text{ m/s})$, $P_1 (=356 \text{ kPa})$, $T_1 (=293 \text{ K})$ とおく。

領域②：針弁シート。シート断面積は針弁揚程の変化とともに変化する。速度、密度、断面積、流量係数を、 $u_2(t)$, $\rho_2(t)$, $A_2(t)$, C_{d2} と

Fig. 3 One-dimensional model of flow field inside gaseous fuel injector.

Table 1 Initial conditions.

$A_2(t)$	0 m^2
$u_2(t)$	0 m/s
$m_3(t)$	0.163 mg
$P_3(t)$	101 kPa
$u_4(t)$	0 m/s

おく。針弁シートでの流量係数は不明であり、本研究では $C_{d2} = 1$ とした。供試噴射弁の針弁は複雑な形状を有するため、針弁揚程とともに変化するシート部での流量係数を予想することは、現状では困難である。最終的には、(i) 針弁揚程をある値で一定に保ち、定常噴射を行うことで各揚程における流量係数を求める、あるいは(ii) CFD により解析的に流量係数を求めるといった方法が必要となると考えられる。

領域③：針弁シート部と噴射弁噴口の間のサック。

ここでは流れは十分遅いと仮定する。この時、エネルギー式⁸⁾より $T_1 = T_3$ となる。速度、圧力、静温、質量を、 $u_3 (=0 \text{ m/s})$, $P_3(t)$, $T_3 (=293 \text{ K})$, $m_3(t)$ とおく。

領域④：噴射弁噴口。断面積は一定である。速度、密度、断面積、流量係数を、 $u_4(t)$, $\rho_4(t)$, $A_4 (=2.86 \times 10^{-6} \text{ m}^2)$, $C_{d4} (=0.94)$ とおく。断面積 A_4 の値には、遮光板支持棒による断面積減少分が考慮されている。噴射弁噴口の流量係数 C_{d4} は、気体燃料噴射率計⁵⁾

θ を用い、針弁全開状態で噴射を行うこと
で実験的に求めた。なおこの際も、遮光板
を取り付けたまま実験を行っている。

領域⑤：噴射弁噴口下流の静止雰囲気。圧力を P_5
(=101 kPa) とおく。

以上の仮定を基に、噴射弁内部を通過する気体の質量
流量を算出する。

ある時刻 t に、領域②を通過する気体の質量流量
 $\dot{m}_2(t)$ は、領域①と領域③の圧力比、および断面積
 $A_2(\theta)$ で決まる⁷⁾。

(i) 領域①と領域③の圧力比 $P_3(\theta)/P_1$ が、臨界圧力
比⁷⁾ より小さい場合、流れは閉塞し、

$$\begin{aligned}\dot{m}_2(t) &= C_{d2} A_2(t) \rho_2(t) u_2(t) \\ &= \frac{A_2(t) P_1}{\sqrt{RT_1}} \sqrt{\gamma} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}\end{aligned}\quad (1)$$

で表される⁷⁾。

(ii) 領域①と領域③の圧力比 $P_3(\theta)/P_1$ が、臨界圧力
比⁷⁾ より大きい場合、流れは閉塞せず、

$$\begin{aligned}\dot{m}_2(t) &= C_{d2} A_2(t) \rho_2(t) u_2(t) \\ &= \frac{A_2(t) P_1}{\sqrt{RT_1}} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \left\{ \left(\frac{P_3(t)}{P_1} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{P_3(t)}{P_1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right\}}\end{aligned}\quad (2)$$

で表される⁷⁾。

ある時刻 t に、領域④を通過する気体の質量流量
 $\dot{m}_4(t)$ は、領域③と領域⑤の圧力比で決まる⁷⁾。

(iii) 領域③と領域⑤の圧力比 $P_5/P_3(\theta)$ が、臨界圧力
比⁷⁾ より小さい場合、流れは閉塞し、

$$\begin{aligned}\dot{m}_4(t) &= C_{d4} A_4 \rho_4(t) u_4(t) \\ &= C_{d4} \frac{A_4 P_3(t)}{\sqrt{RT_3}} \sqrt{\gamma} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}\end{aligned}\quad (3)$$

で表される⁷⁾。

(iv) 領域③と領域⑤の圧力比 $P_5/P_3(\theta)$ が、臨界圧力
比⁷⁾ より大きい場合、流れは閉塞せず、

$$\dot{m}_4(t) = C_{d4} A_4 \rho_4(t) u_4(t)$$

$$= C_{d4} \frac{A_4 P_3(t)}{\sqrt{RT_3}} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \left\{ \left(\frac{P_5}{P_3(t)} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{P_5}{P_3(t)} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right\}}\quad (4)$$

で表される⁷⁾。

領域①および領域⑤の圧力 P_1 , P_5 は一定であり既
知である。領域③の圧力 $P_3(\theta)$ が分かれば、噴射弁内
部を通過する気体の質量流量は決まる。微小時間 dt
の間に、領域③へ流入する気体の質量と、領域③から
流出する気体の質量は、以下の連続の式を満足する。

$$m_3(t+dt) = m_3(t) + \dot{m}_2(t)dt - \dot{m}_4(t)dt\quad (5)$$

ただし、 $m_3(t)$ は領域③の気体の質量である。また、
状態方程式より、

$$P_3(t)V_3 = m_3(t)RT_3\quad (6)$$

$$P_3(t+dt)V_3 = m_3(t+dt)RT_3\quad (7)$$

が成立する。(6) 式、(7) 式を辺々割り、(5) 式
を代入すると、

$$P_3(t+dt) = P_3(t) \frac{m_3(t) + \dot{m}_2(t)dt - \dot{m}_4(t)dt}{m_3(t)}\quad (8)$$

が成立する。(8) 式より、微小時間 dt 後における領
域③の圧力 $P_3(t+dt)$ が求められる。

表 1 に、計算の初期条件を示す。まず、各変数に t
= 0 ms での初期値を代入する。(1) 式 ~ (4) 式を
用いて、微小時間 dt の間に領域③に流入・流出する
気体の質量流量を求める。(8) 式を用いて、微小時
間 dt 後のサック内圧力を求める。以上を繰り返し計
算し、気体燃料噴射弁内部の気体の質量流量の時間変
化を求める。領域④を通過する気体の質量流量 $\dot{m}_4(t)$
が、気体燃料噴射弁の噴射率となる。

3. 実験結果および考察

3.1 針弁揚程計測 図 4 に、遮光板位置とフ
ォトセンサ出力の関係を示す。縦軸はフォトセンサ出
力、横軸は遮光板位置を示す。レーザビーム強度はガ
ウシアン分布をもつため、遮光板の変位とフォトセン

Fig. 4 Relationship between beam cut plate position and photo sensor output.

サ出力は直線関係にならない。そこで、マイクロメータに遮光板を取り付け、微動しながらフォトセンサ出力を記録した。以下では、図4の校正曲線を用いてフォトセンサ出力を針弁揚程に換算する。

図5に、気体燃料噴射弁の針弁揚程およびサック圧力の時間変化を示す。図5(a)は、噴射弁駆動回路への入力電圧を示す。図5(b)は、計測された針弁揚程を示す。図5(c)は、針弁揚程より算出したサック圧力 P_3 を示す。横軸は時刻 t を示す。開弁信号の入力時刻を横軸のゼロ点とした。噴射期間は $\tau = 20\text{ms}$ である。

時刻 $t=0\text{ms}$ において開弁信号が入力されると、約 2ms の遅れの後に、針弁が開弁動作を開始する。開弁動作に要する時間は約 0.5ms である。針弁揚程の増大とともにサック圧力 P_3 も増大し、針弁揚程が最大となると同時に、サック圧力 P_3 は噴射圧力 $P_1 (= 356\text{kPa})$ に達する。

時刻 $t \approx 3\text{ms}$ 以降、針弁揚程は最大となり、その間サック圧力は噴射圧力 $P_1 (= 356\text{kPa})$ と同じ値を保つ。

時刻 $t = 20\text{ms}$ において閉弁信号が入力されるとほぼ同時に、針弁が閉弁動作を開始する。閉弁動作に要する時間は約 1ms である。針弁着座後、特にバウンスは見られないことが分かる。針弁先端のゴムシート^④により、バウンスが抑制されているものと考えられる。閉弁動作の開始からわずかに遅れてサック圧力 P_3 も減少を開始し、針弁揚程がゼロとなるとほぼ同時に、サック圧力 P_3 も大気圧に戻る。

光遮断法を用いることで、高速で変位する針弁の挙動を捉えることが可能であることが分かる。また、単純な一次元流れを仮定することで、時々刻々と変化する

Fig. 5 Histories of needle valve lift and sack pressure of gaseous fuel injector.

るサック圧力 P_3 を見積もることができることが分かる。

3・2 理論噴射率 図6に、気体燃料噴射弁の噴射率時間変化を示す。図6(a)は、噴射弁駆動回路への入力電圧を示す。図6(b)は、針弁揚程より算出した理論噴射率 $\dot{m}_t$ 、ならびに気体燃料噴射率計^⑥を用いて計測された噴射率を示す。横軸は時刻 t を示す。開弁信号の入力時刻を横軸のゼロ点とした。噴射期間は $\tau = 20\text{ms}$ である。なお気体燃料噴射率計^⑥を用いる際には、

(i) 遮光板による慣性質量増大から針弁動作がわずかに遅くなる可能性があること、
(ii) 遮光板支持棒のため噴口面積 A_d が小さくなることを考慮し、噴射弁に遮光板を取り付けたまま計測を行った。また気体燃料噴射率計では、噴射弁噴口から静圧計測点までの距離が 100mm ある^⑥ため、計測の時間遅れを生じる。図6では、気体燃料噴射率計の計測結果の横軸を、約 0.3ms ずらして表示している。

図6(b)より、針弁揚程より算出した理論噴射率と、気体燃料噴射率計で計測した噴射率は、比較的良好に一致することが分かる。針弁揚程を計測し、単純な一次元流れを仮定することで、噴射率の開弁・閉弁過渡期間の噴射率の急激な変化を、ある程度正確に見積もることができることが分かる。ただし前報で明らか

Fig. 6 Injection rate history of gaseous fuel injector.

Fig. 7 Injection rate history at transient duration.

になったように、気体燃料噴射率計を用いた場合、定常噴射期間中に、流れの蛇行に伴う静圧の高周波変動が計測される^⑥。この結果、噴射率計測結果にも高周波変動が見られる^⑥。この変動は、噴射率の変動に起因するものではないため除去する必要がある、今後の大きな課題である^⑥と考えている。

図7に、開弁・閉弁過渡期間における噴射率時間変化を示す。図7(a)は、開弁信号入力直後の噴射率の時間変化を示す。図7(b)は、閉弁信号入力直後

の噴射率の時間変化を示す。横軸は時刻 t を示す。 $t = 0$ ms で開弁信号が、 $t = 20$ ms で閉弁信号が入力される。図7には、針弁シート（領域②）、噴射弁噴口（領域④）のいずれで流れの閉塞^⑦が生じているか、あわせて示す。

図7より、開弁・閉弁過渡期間においても、針弁揚程より算出した理論噴射率と、気体燃料噴射率計^⑥を用いて計測された実測噴射率は、比較的良好一致することが分かる。気体燃料噴射率計は、開弁・閉弁過渡期間においても、比較的高い精度での計測が可能であることが示唆されたと言える。

開弁・閉弁過渡期間において、針弁シートで流れの閉塞が生じる条件になると、理論噴射率が気体燃料噴射率計^⑥の計測結果をやや上回る。本研究では、針弁シート（領域②）での流量係数が不明のため、その値を1として定式化を進めた。実際には、流量係数は1以下であり、気体燃料噴射率計^⑥による実測値とのずれを生じたと考えられる。この誤差については、光遮断法による噴射率予測の改善が必要であり、針弁シートでの流量係数の把握が今後の課題である。

また、開弁動作終了時 ($t = 2.6$ ms)、ならびに閉弁動作終了時 ($t = 21.4$ ms) において、気体燃料噴射率計の計測結果に「オーバーシュート」、「アンダーシュート」が見られることが分かる。気体燃料噴射弁噴口 ($d = 2$ mm) と、気体燃料噴射率計の計測管内径 ($D = 8$ mm) の直径差が大きい^⑧ため、噴射された気体が、計測管内の流れ方向のみならず半径方向にも過度に膨張することで生じる現象と推察される。この誤差については、気体燃料噴射率計^⑥の改善が必要であり、今後の大きな課題である。

これまでの研究^{⑤⑥}では、気体燃料噴射率計の計測精度確認のため、真空容器への繰り返し噴射を用いた較正試験を行ってきた。この手法では、噴射1回当たりの平均噴射率は分かるものの、開弁・閉弁過渡期間における噴射率計測精度を検証することはできなかった。本研究で提案する、光遮断法を用いた針弁揚程計測法、ならびに一次元流れを仮定した理論噴射率算出法により、気体燃料噴射弁の開弁・閉弁過渡期間における噴射率特性の把握が、ある程度可能となった。これにより、従来の真空容器を用いた較正法^{⑤⑥}では不明であった、気体燃料噴射率計^{⑤⑥}の改善点が明らかになったと考えている。

4. 結 言

光遮断法を用い、気体燃料噴射弁の針弁揚程計測を行った。計測された針弁揚程をもとに、理論噴射率

を算出した。算出された理論噴射率を基に、気体燃料噴射率計の計測精度を検証した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 噴射弁針弁に取り付けた遮光板でレーザービームを遮り、透過光強度の時間変化から針弁揚程の時間変化を計測した。
- (2) 計測された針弁揚程の時間変化を元に、一次元、圧縮性、非粘性、断熱流れを仮定することで、理論噴射率を算出した。
- (3) 針弁揚程より算出された理論噴射率と、気体燃料噴射率計で計測された実測噴射率は、比較的良好一致を見せた。
- (4) 噴射弁開弁・閉弁過渡期間において、針弁シートで閉塞が生じる条件になると、理論噴射率が気体燃料噴射率計の実測噴射率をやや上回る。理論噴射率算出の際、針弁シートでの流量係数を1として定式化を進めたため、気体燃料噴射率計による実測値とのずれを生じたと考えられる。
- (5) 開弁動作終了時、ならびに閉弁動作終了時において、気体燃料噴射率計の実測噴射率に「オーバーシュート」、「アンダーシュート」が見られる。噴射弁噴口と、気体燃料噴射率計の計測管内径の直径差が大きいため、噴射された気体が、計測管内の流れ方向のみならず半径方向にも過度に膨張することで生じる現象と推察される。気体燃料噴射率計の改善が必要であり、今後の大きな課題である。

謝 辞

本研究の実施に当たり、元本田技術研究所 藤井 功氏よりご協力を頂いた。本研究は、(独) 科学技術振

興機構 JST サテライト新潟・平成 18 年度研究成果実用化検討 (FS) 課題に採択され援助を頂いた。ここに記して謝意を表する。

文 献

- (1) Matsuura, H. et al., Honda Dedicated CNG Passenger Vehicle, Proc. the 5th International Conference and Exhibition on Natural Gas Vehicles (NGV 96), (1996), pp.1-8.
- (2) Kikuchi, M. et al., Control of CNG DI Combustion by Fuel Jet, Proc. the 44th Symposium (Japanese) on Combustion, (2006), pp.300-301.
- (3) Araki, M. et al., Characteristics of CNG Direct Injection With Auto-Ignition, SAE Paper 2005-26-358.
- (4) Hayashi, H., Bosch Type Injection Rate Meter, Internal Combustion Engines, 7-12, (1968), pp. 58-64.
- (5) Araki, M. et al., Injection Rate Measurements of a Gaseous Fuel Injector, Transactions of the Japan Society for Mechanical Engineers, 72-714, (2006), pp. 528-534.
- (6) Araki, M. et al., Improvement of Injection Rate Measurement Accuracy of a Gaseous Fuel Injector, Transactions of the Japan Society for Mechanical Engineers, Under review.
- (7) Matsuo, K., Compressible Fluid Dynamics, (1994), Rikogaku-sha, Tokyo, pp.75-77.
- (8) Liepmann, H. W. and Roshko, A., Elements of Gasdynamics, (2000), Yoshioka Shoten, Kyoto, pp.50-51.