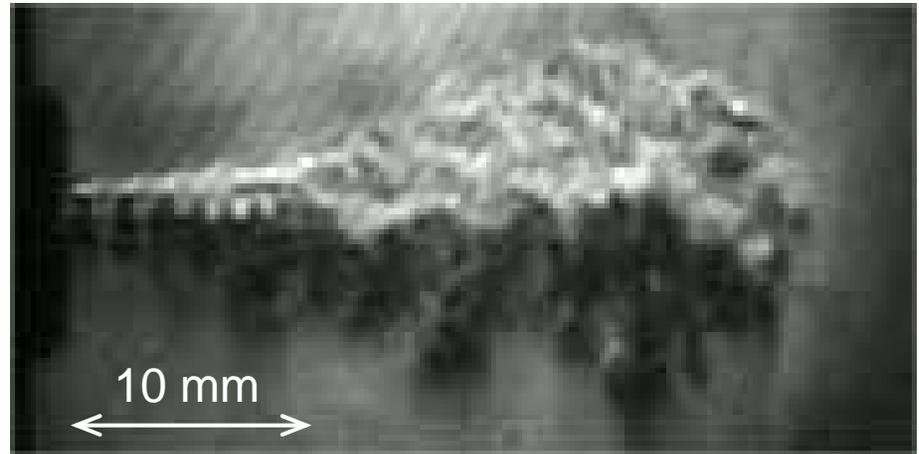


気体燃料インジェクタの瞬間流量計測装置

荒木幹也, 志賀聖一, 石間経章,
小保方富夫, 藤原康裕, 中村壽雄
(群馬大学工学部)



PFI 気体燃料インジェクタ
(ケーヒン(株))



気体燃料噴流の可視化写真
(3気圧, 噴射開始0.7 ms後)

気体燃料の自動車エンジンへの適用

気体燃料 (水素, CNG: 圧縮天然ガス など)

- ガソリン, 軽油などの液体燃料の代替燃料として, 幅広く使用されてきている.
- 単位発熱量当たりのCO₂排出量を低減できる.
- SO_x排出量を大幅に低減できる.

気体燃料の適用

- 吸気管噴射式火花点火エンジン (3 気圧)
- 筒内直接噴射火花点火エンジン (100 気圧)
- 筒内直接噴射圧縮点火エンジン
(1000 気圧以上, 多段噴射?)

エンジン開発において, 気体燃料インジェクタの特性を知ることがきわめて重要となっている.

燃料噴射率

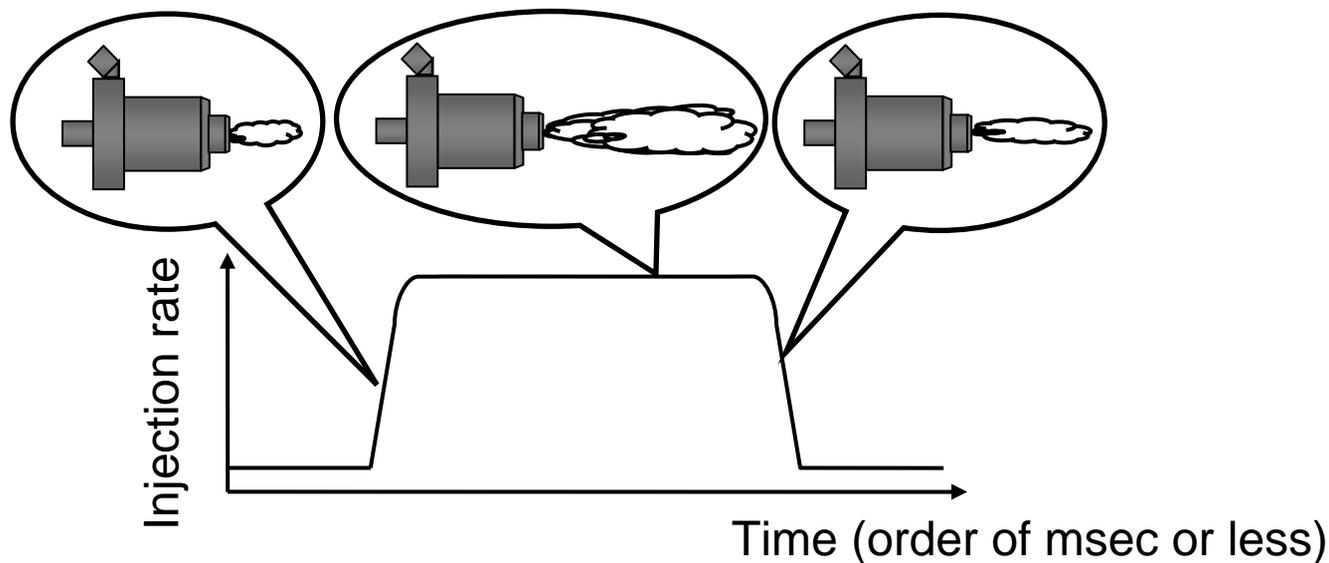
燃料噴射率

- インジェクタ噴口から噴出する燃料の瞬間流量。
- 燃料の貫徹力, 微粒化(液体燃料の場合), 混合気形成, 燃焼, 排気特性に大きな影響を及ぼす。
- 時間とともに, きわめて急激に変化する。

開弁過渡期間

全開期間

閉弁過渡期間



いかにして噴射率を計測するのか？

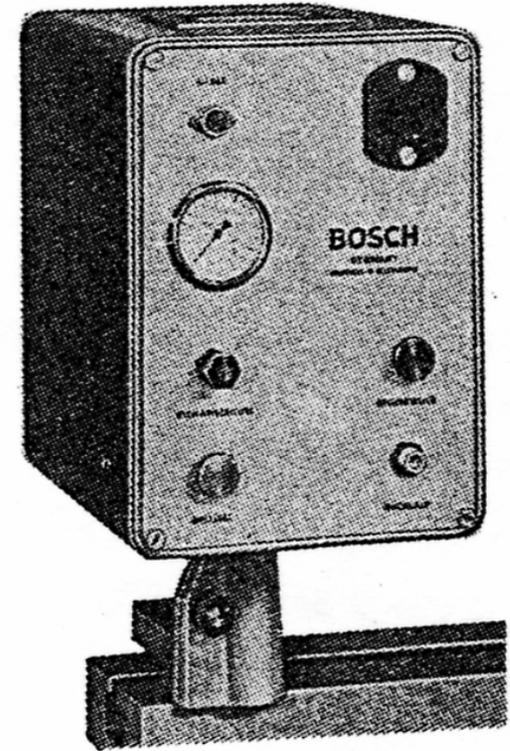
液体燃料の場合 → ボッシュ式

- 液体燃料は断面積一定の管内に噴射され、一次元流れを形成する。
- 燃料速度 du は、管内静圧 dP に比例する。

$$du = \frac{dP}{a\rho}$$

ここで a : 音速, ρ : 密度.

- ($a\rho$) は「音響インピーダンス」と呼ばれ、液体燃料の場合は定数となる。



Bosch-type
fuel injection rate meter

いかにして噴射率を計測するのか？

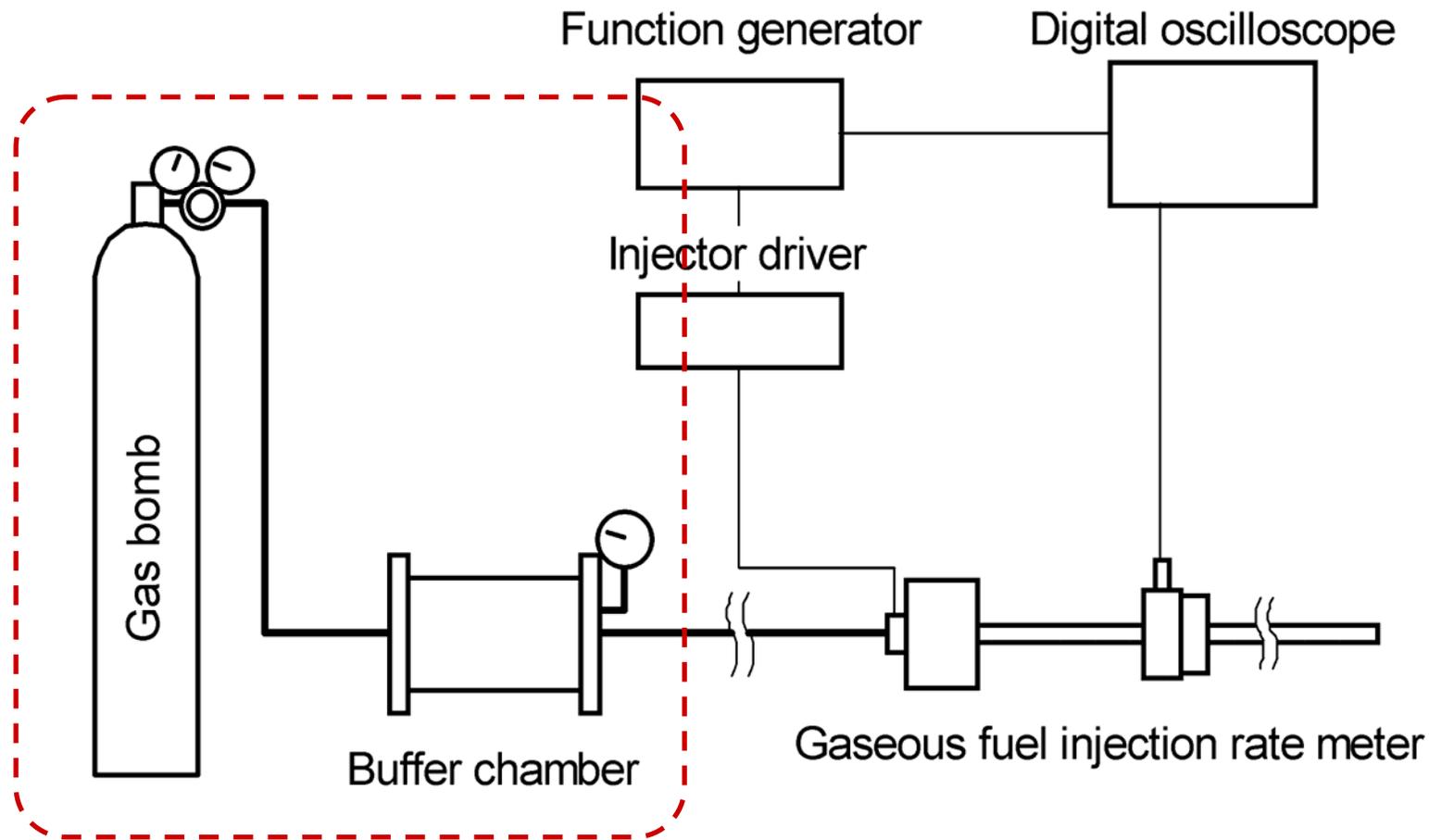
気体燃料の場合  ボッシュ式で計測は可能か？

計測は不可能である．

- 気体燃料の場合，音響インピーダンス (a) は，もはや定数とならない．気体燃料の持つ圧縮性のため， P ， ρ ， T ， a ， u といった量が，全て変数となる．
- 管内流れのレイノルズ数が非常に大きくなり ($10^4 \sim 10^5$ のオーダー)，管摩擦の影響が顕著となる．気体燃料は密度が小さいため，速度が非常に大きくなる．

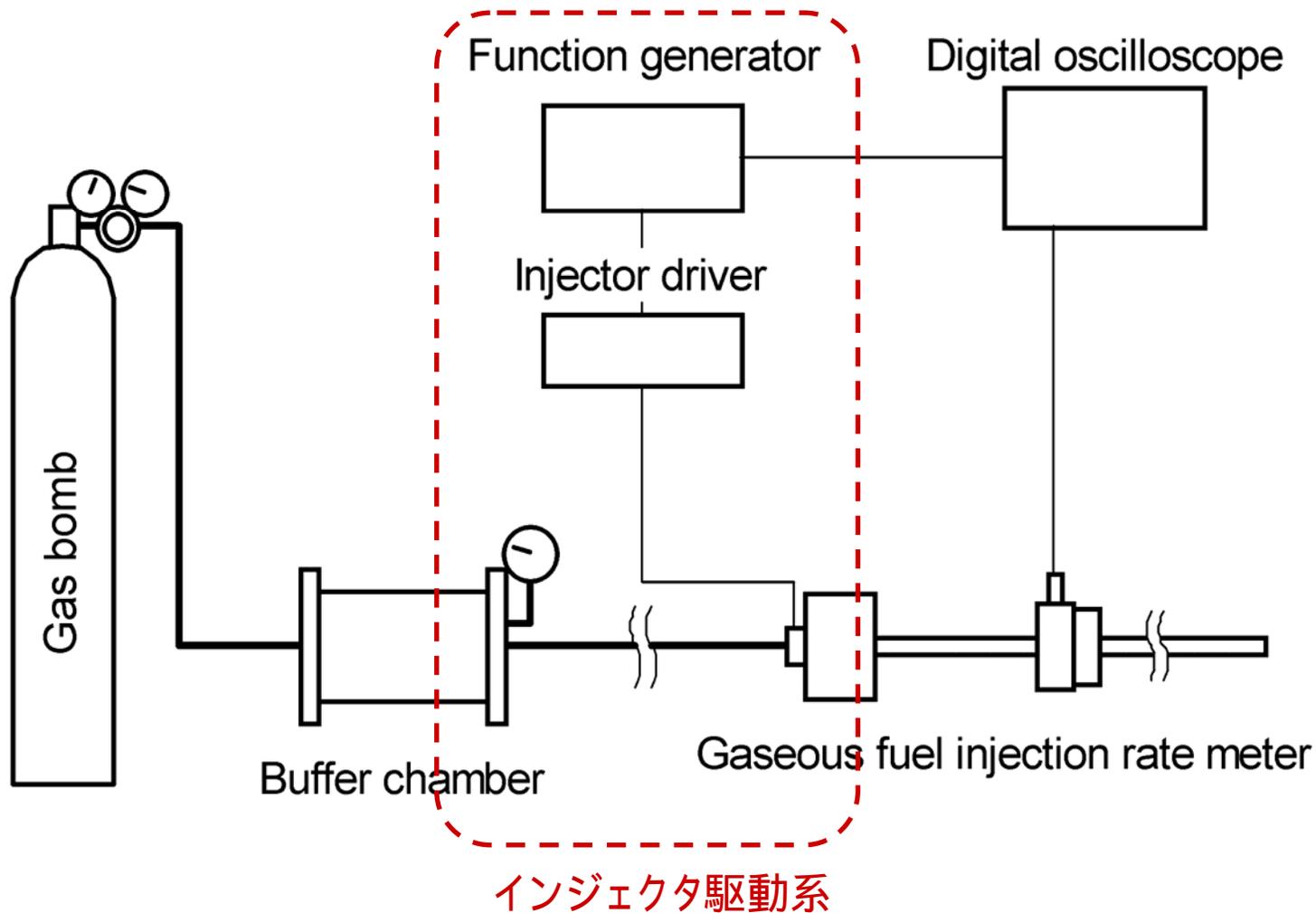
本発明では，

- ボッシュ式と同様に，管内一次元流れを用いた気体燃料の噴射率計を開発した．
- 気体の圧縮性を考慮し，定式化を行う．
- 管内流れのレイノルズ数を低減する．

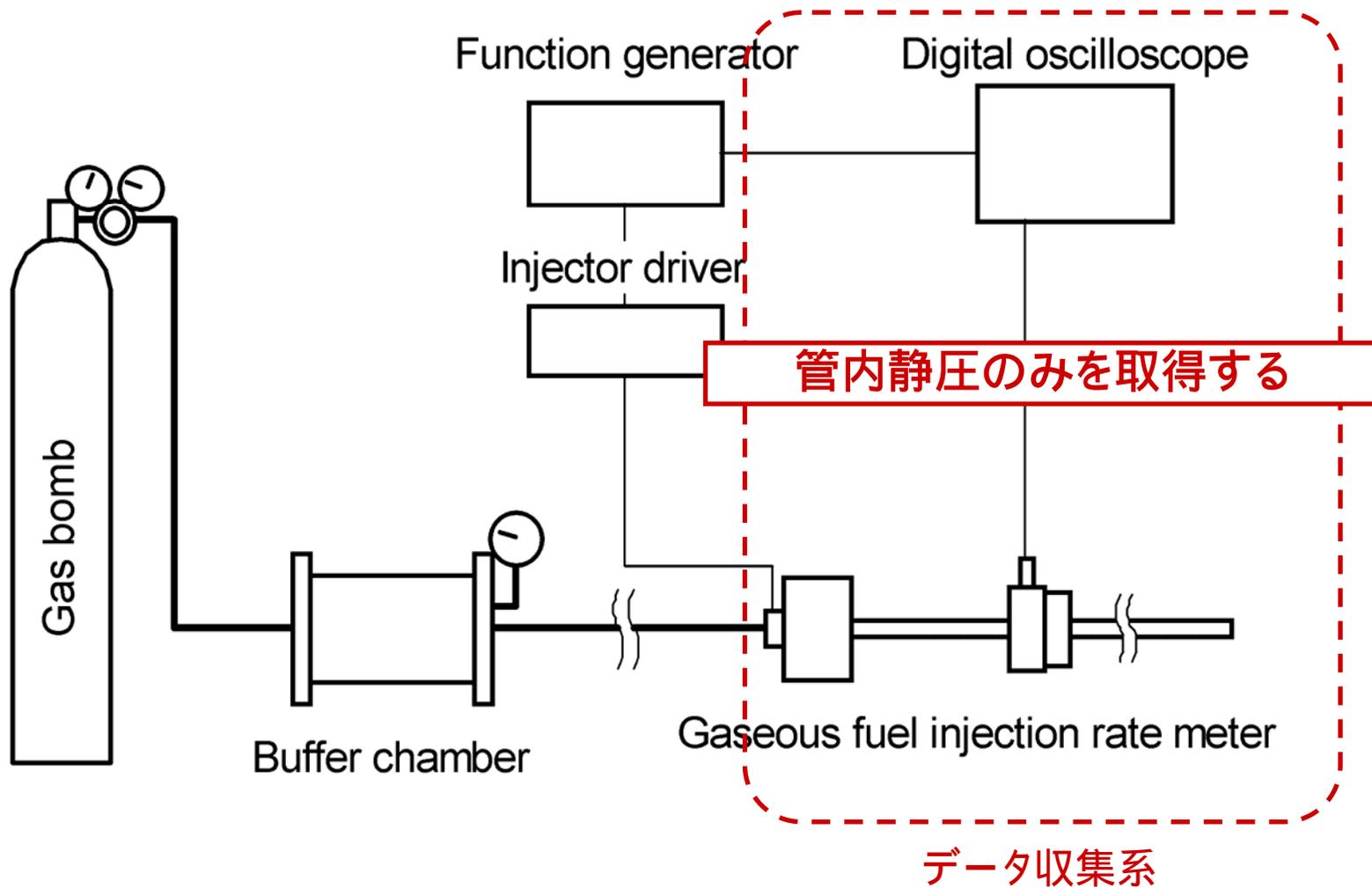


燃料供給系

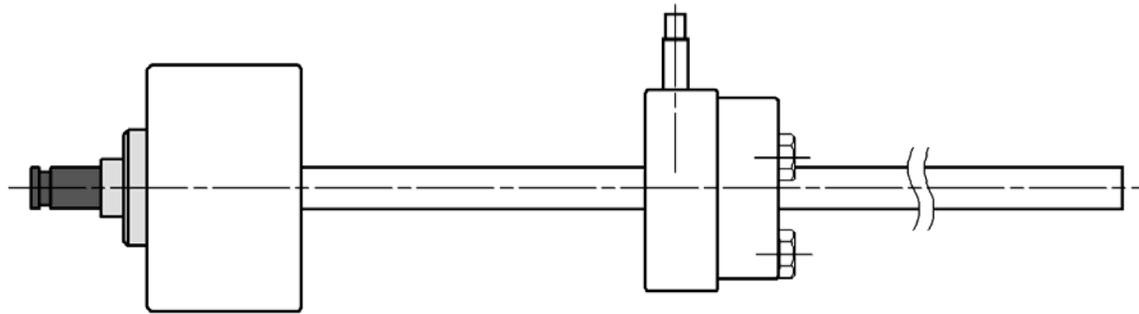
氣體燃料噴射率計概略



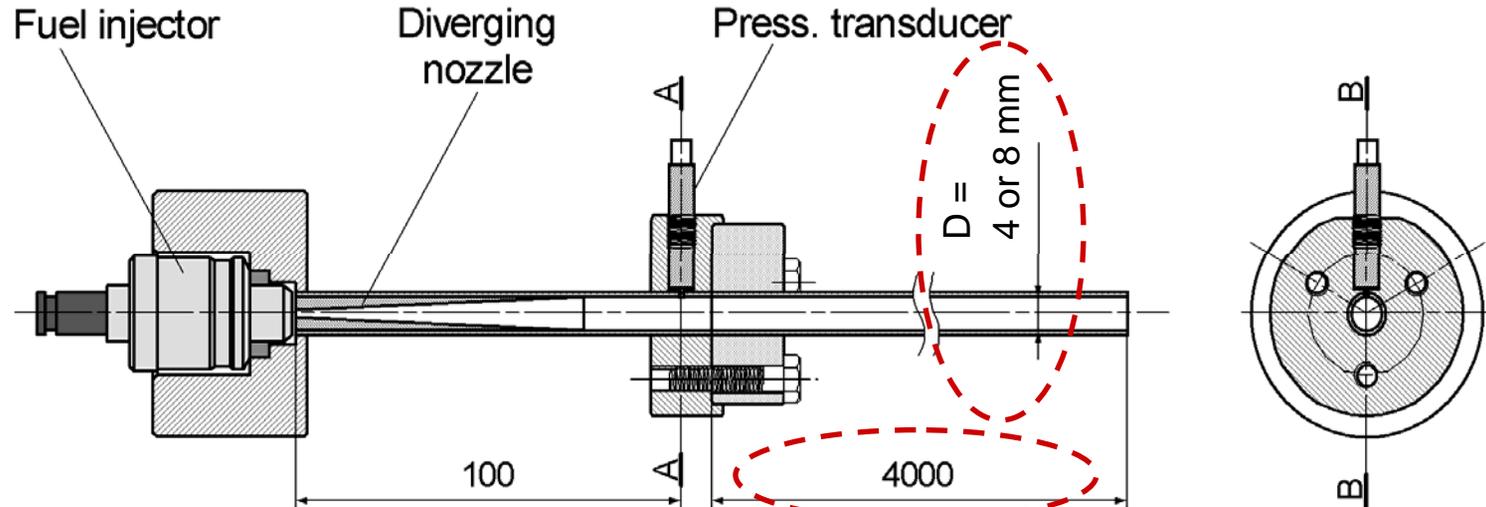
気体燃料噴射率計概略



気体燃料噴射率計概略



レイノルズ数の影響を調べるため、
管内径を変化.



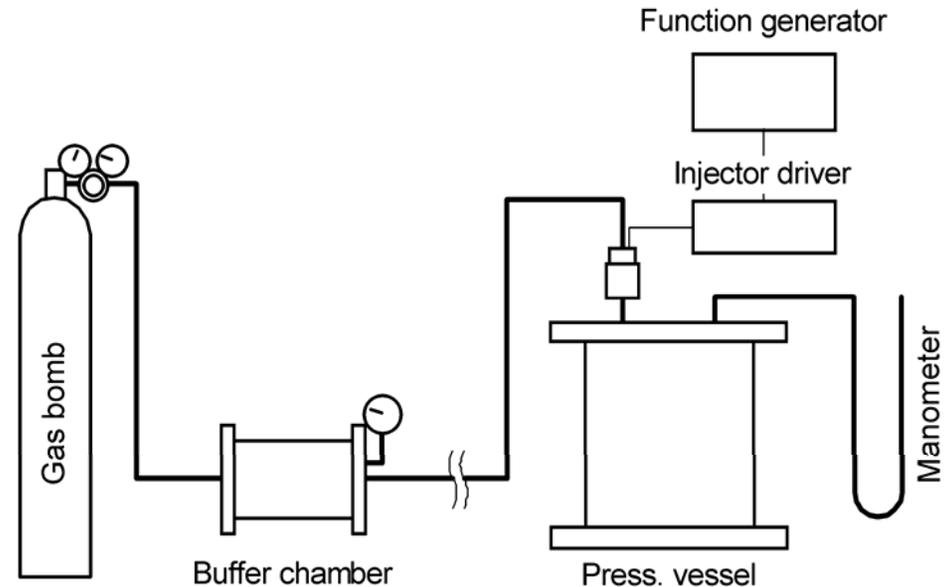
反射波の到達時刻を遅らせるため、
延長管を設置.

気体燃料噴射率計概略

いかにして計測精度を確認するか？

較正試験

- 噴射期間を一定とし，気体燃料を圧力容器に 1000回 ~ 2000回噴射する．
- 容器内の圧力上昇から燃料の総流量を求め，噴射回数で除することで噴射1回当たりの燃料流量を求める．

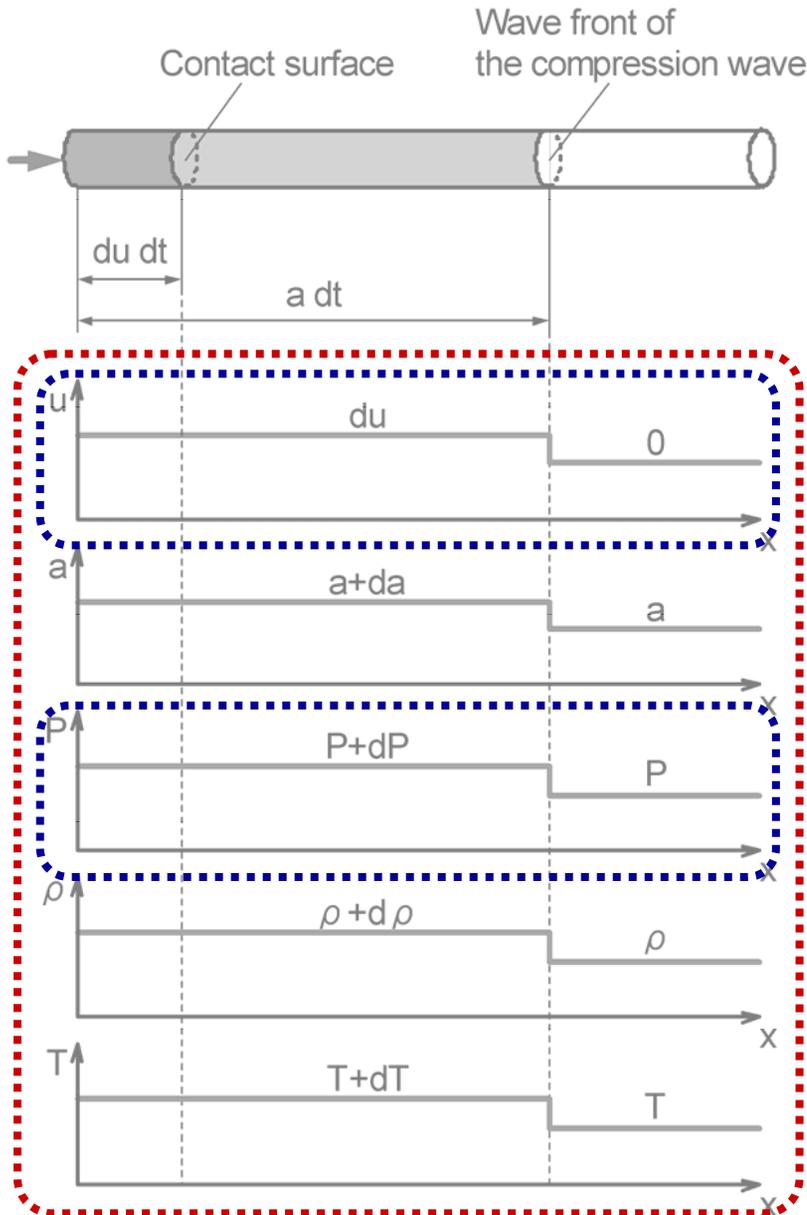


較正試験装置概略

実験条件

- 供試気体: N_2
- 噴射圧力 P_{inj} : 356 kPa(a) (255 kPa(g))
(流れはインジェクタ噴口で「閉塞」する)
- 管内初期静圧 P_0 : 大気圧
- 管内初期静温 T_0 : 室温
- 噴射期間 : 3.4 ~ 20 ms
- インジェクタ噴口径: 2.0 mm
- 管内径: 4.0 および 8.0 mm
- データサンプリングクロック: 2 μ s

定式化 (1/3)



- 断面積一定の管内に，流体が満たされている．
- 管内に新たに流体が流れ込むことで引き起こされる圧力波により，管内の流体は圧縮される．

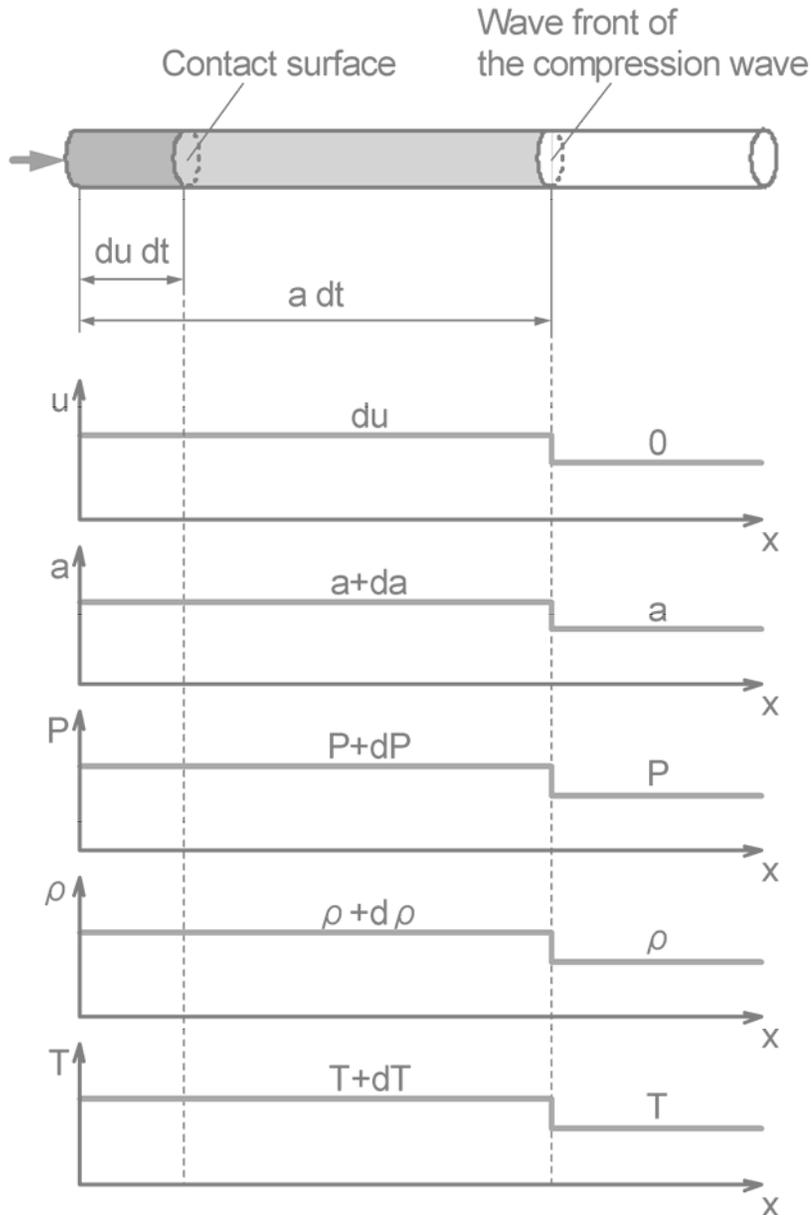
液体燃料の場合

- u および P は変化する．ただし， a , T は変化しない．

気体燃料の場合

- 圧縮性のため，全ての量に変数となる．

定式化 (2/3)



一次元, 圧縮性, 非粘性, 断熱流れを仮定.

- 質量保存則より,

$$\rho a A dt = (\rho + d\rho)(a - du) A dt$$

- 運動量保存則より,

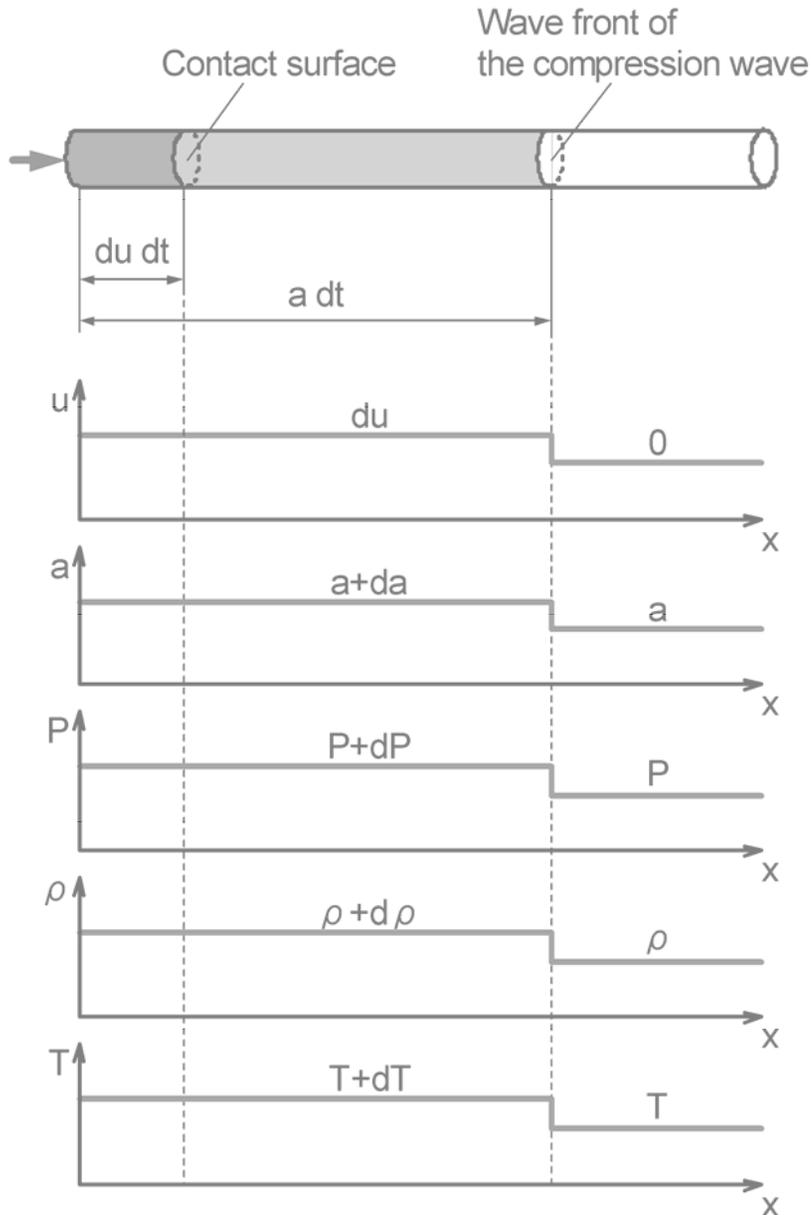
$$(\rho + d\rho)(a - du)^2 A - \rho a^2 A = dPA$$

- 以上より, P と u の関係は,

$$du = \frac{dP}{a(t)\rho(t)}$$

- 上式を積分することで, 気体燃料速度 u を求めることができる.

定式化 (3/3)



および a を, P で表す必要がある.

- 断熱流れの仮定より,

$$\rho(t) = \left(\frac{P(t)}{P_0} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \rho_0$$

- 音速の式より,

$$a(t) = \sqrt{\gamma \frac{P(t)}{\rho(t)}}$$

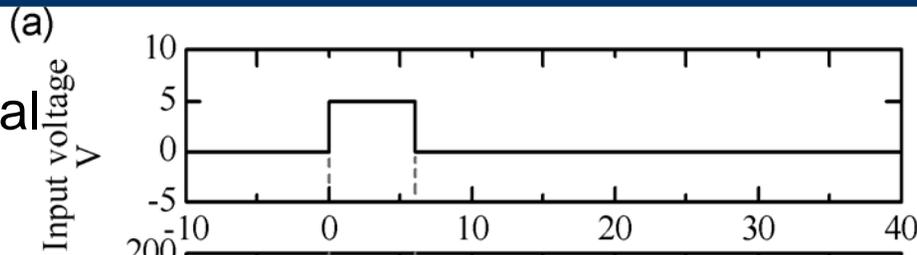
気体燃料噴射率は,

$$\dot{m}(t) = A \rho(t) u(t)$$

$$= A \left(\frac{P(t)}{P_0} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \rho_0 \left[\frac{2\gamma}{\gamma-1} \sqrt{\frac{P_0^{\frac{1}{\gamma}}}{\gamma \rho_0}} P(t)^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}} + C \right]$$

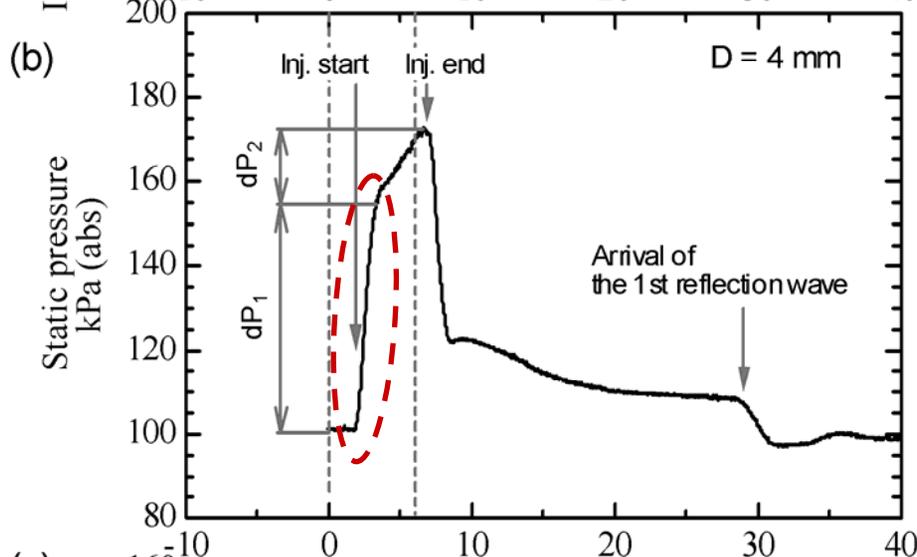
$$= \frac{2A}{\gamma-1} \left(\sqrt{\frac{\gamma \rho_0}{P_0^{\frac{1}{\gamma}}}} P(t)^{\frac{\gamma+1}{2\gamma}} - \sqrt{\frac{\gamma \rho_0}{P_0^{\frac{2-\gamma}{\gamma}}}} P(t)^{\frac{1}{\gamma}} \right)$$

Driving signal



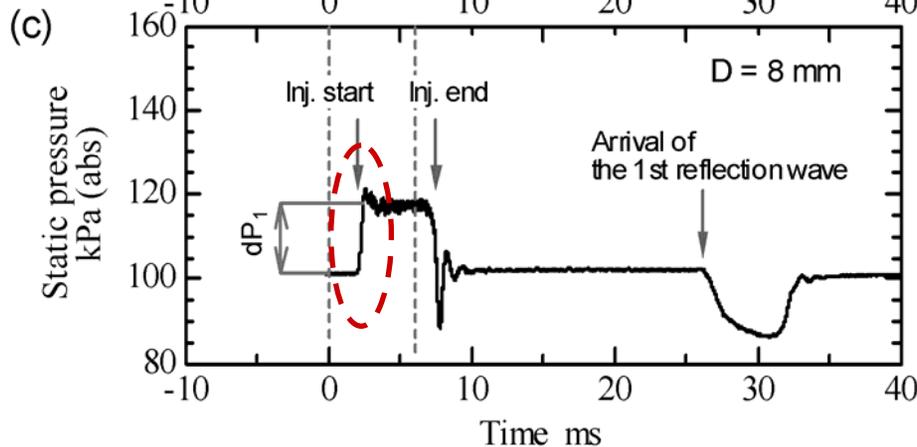
Press. trace

($D = 4$ mm)



Press. trace

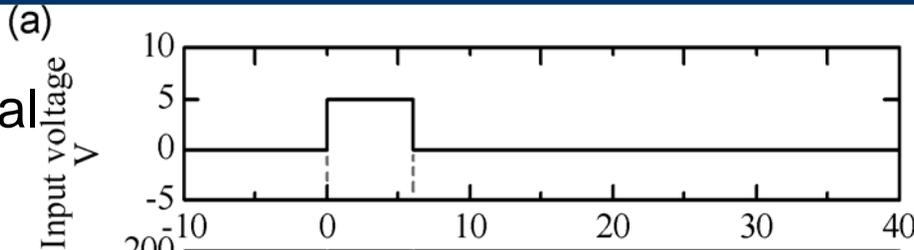
($D = 8$ mm)



(1) 開弁信号が入力されると、 P は急激に増大する。

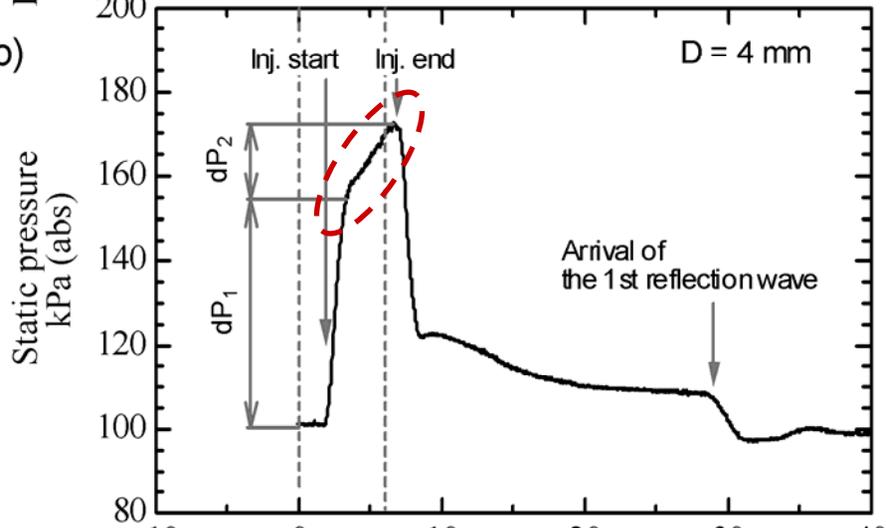
インジェクタ駆動信号と管内静圧の履歴 (噴射期間 = 6 ms)

Driving signal



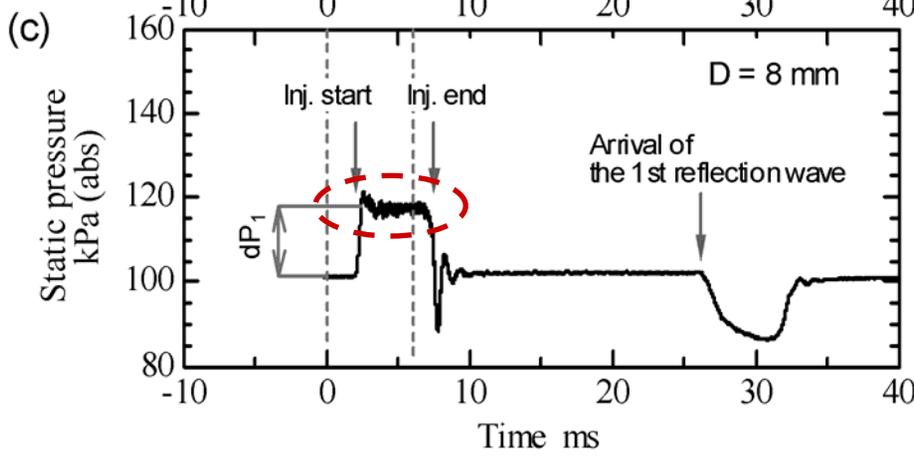
Press. trace

($D = 4$ mm)



Press. trace

($D = 8$ mm)



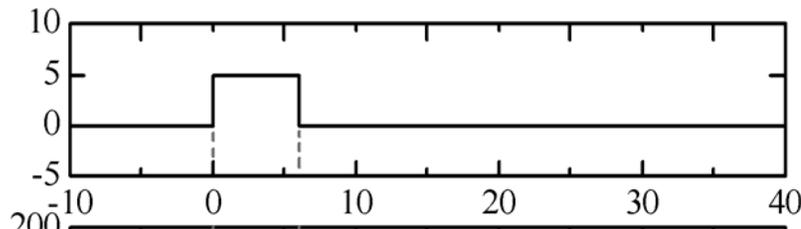
(1) 開弁信号が入力されると、 P は急激に増大する。

(2) $D = 4$ mm の場合、全開期間でも P が増大を続ける。

インジェクタ駆動信号と管内静圧の履歴 (噴射期間 = 6 ms)

Driving signal

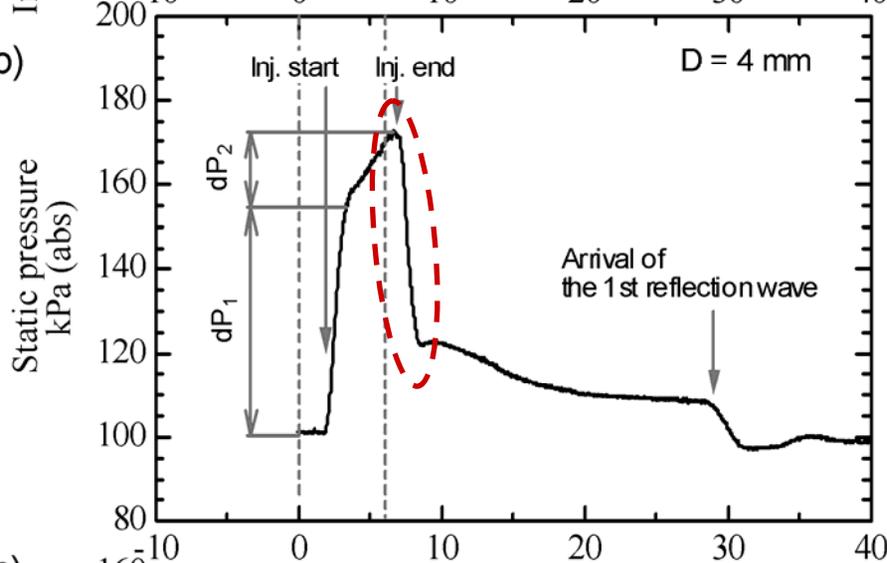
(a)
Input voltage
V



Press. trace

($D = 4$ mm)

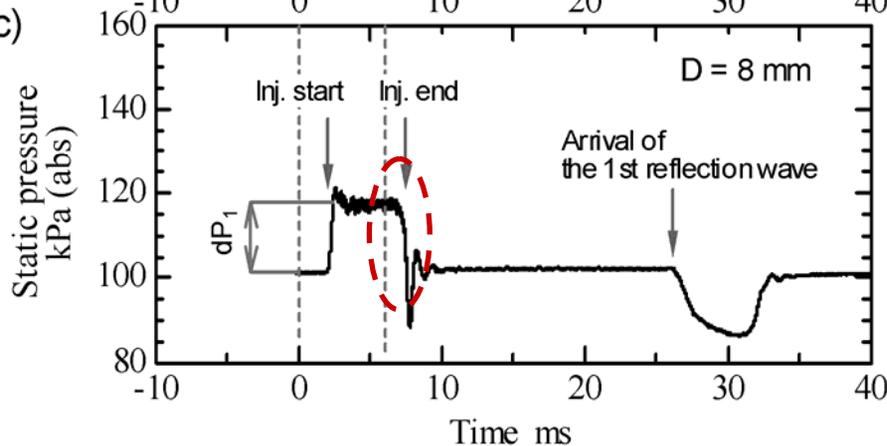
(b)



Press. trace

($D = 8$ mm)

(c)



(1) 開弁信号が入力されると、 P は急激に増大する。

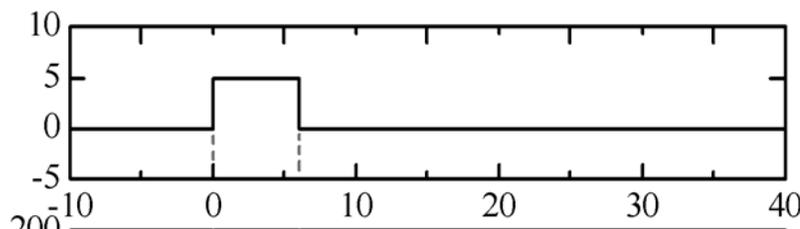
(2) $D = 4$ mm の場合、全開期間でも P が増大を続ける。

(3) 閉弁信号が入力されると、 P は急激に減少する。ただし $D = 4$ mm の場合、 P は初期値まで戻らない。

インジェクタ駆動信号と管内静圧の履歴 (噴射期間 = 6 ms)

Driving signal

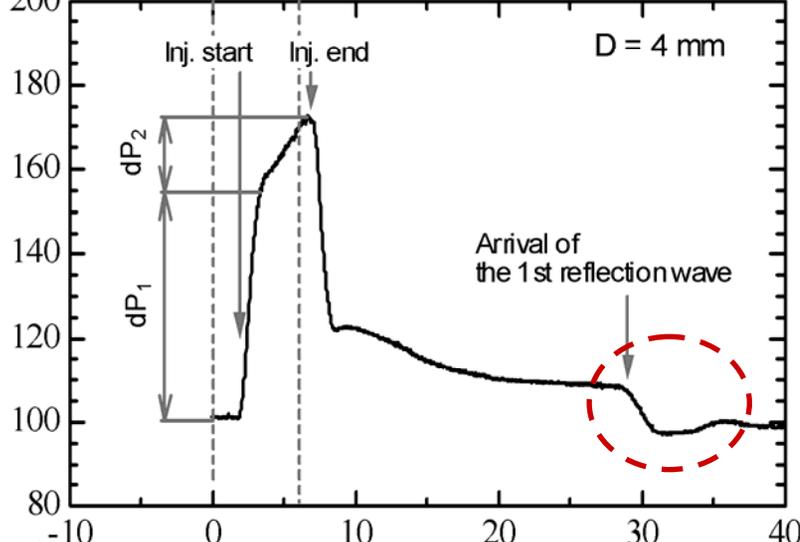
(a)
Input voltage V



Press. trace

($D = 4 \text{ mm}$)

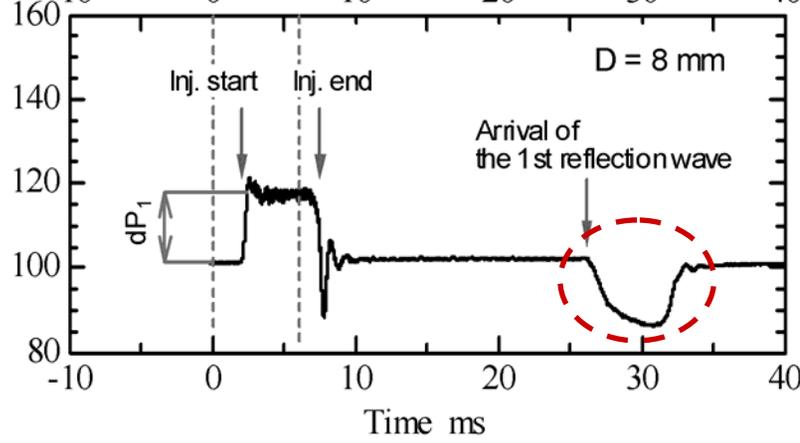
(b)
Static pressure kPa (abs)



Press. trace

($D = 8 \text{ mm}$)

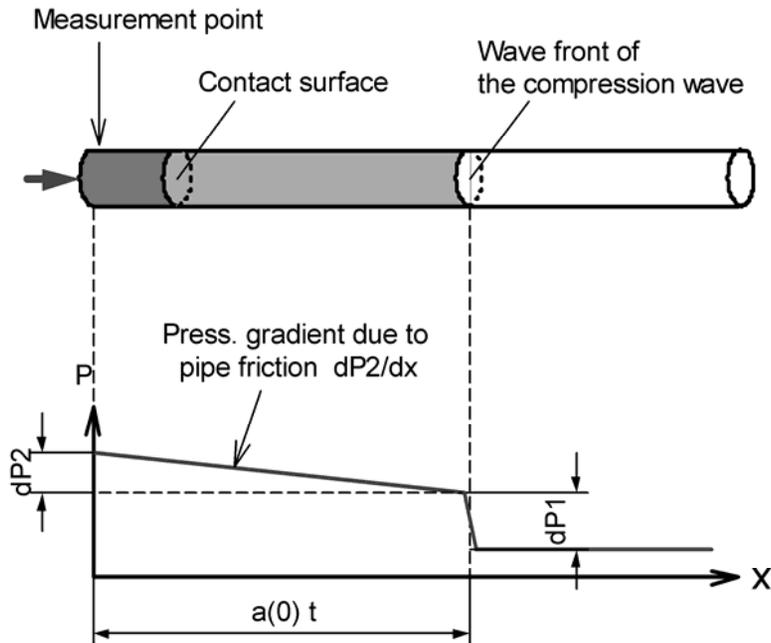
(c)
Static pressure kPa (abs)



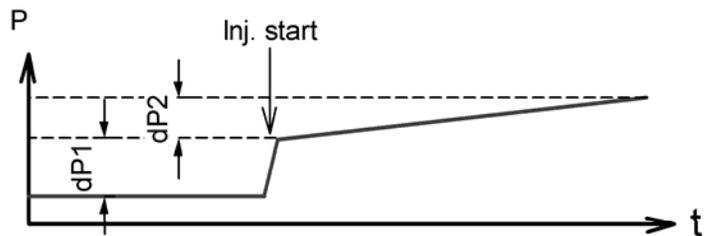
- (1) 開弁信号が入力されると, P は急激に増大する.
- (2) $D = 4 \text{ mm}$ の場合, 全開期間でも P が増大を続ける.
- (3) 閉弁信号が入力されると, P は急激に減少する. ただし $D = 4 \text{ mm}$ の場合, P は初期値まで戻らない.
- (4) 最初の反射波が到達.

インジェクタ駆動信号と管内静圧の履歴 (噴射期間 = 6 ms)

レイノルズ数が計測精度におよぼす影響



(a) Static pressure distribution



(b) Static pressure history at the measurement point

- 管摩擦のため、**圧力勾配 dP/dx** が形成され、その圧力信号が、本来の静圧変動に重畳する。

- 圧力勾配のため、**静圧が時間とともに増大するように「見える」**。
この結果、噴射率を過大評価してしまう。

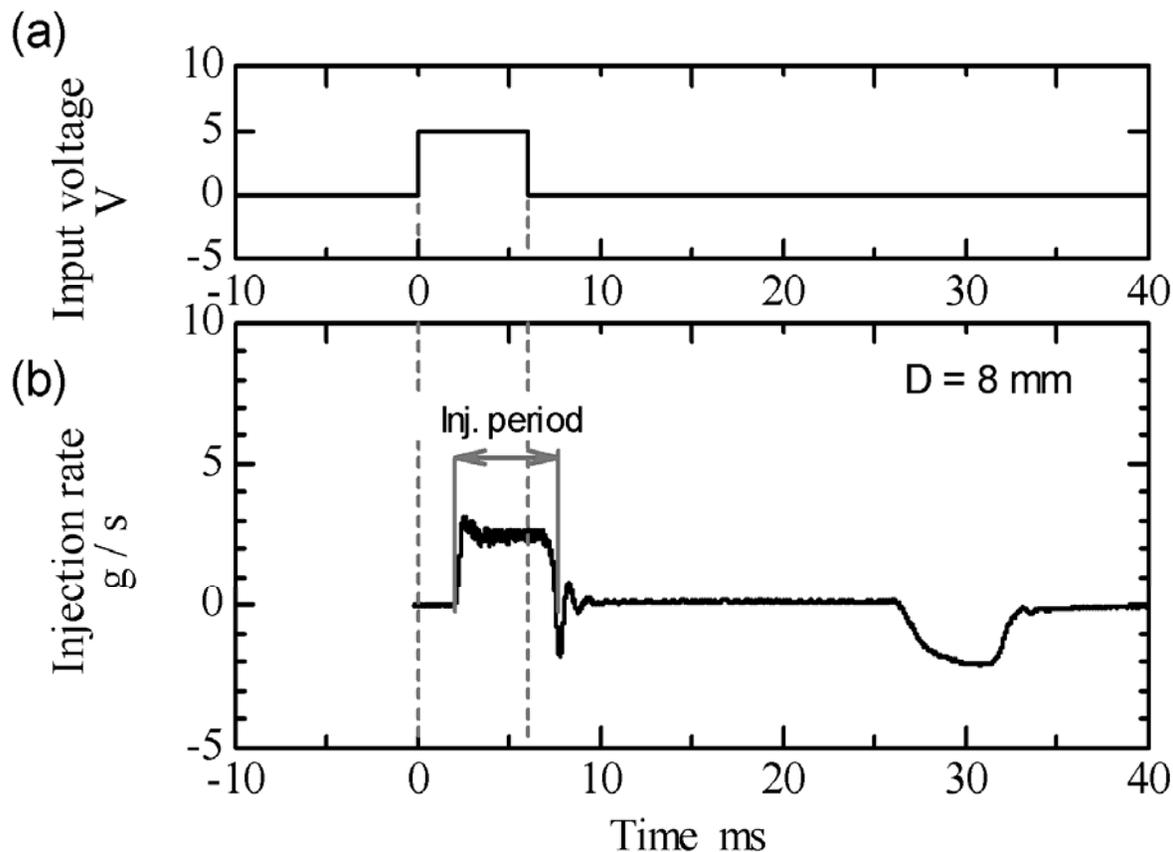
管内流れの模式図

レイノルズ数が計測精度におよぼす影響

Reynolds number Re and estimated pressure gradient dP_2/dx due to the pipe friction.

D	Re	dP_2/dx
4 mm	3.9×10^4	-51 kPa / m
8 mm	1.6×10^4	-1.6 kPa / m

- ダルシー・ワイズバッハの式から, dP/dx を見積もった.
- 管内径を増大することで, dP/dx を大幅に低減した.



気体燃料噴射率

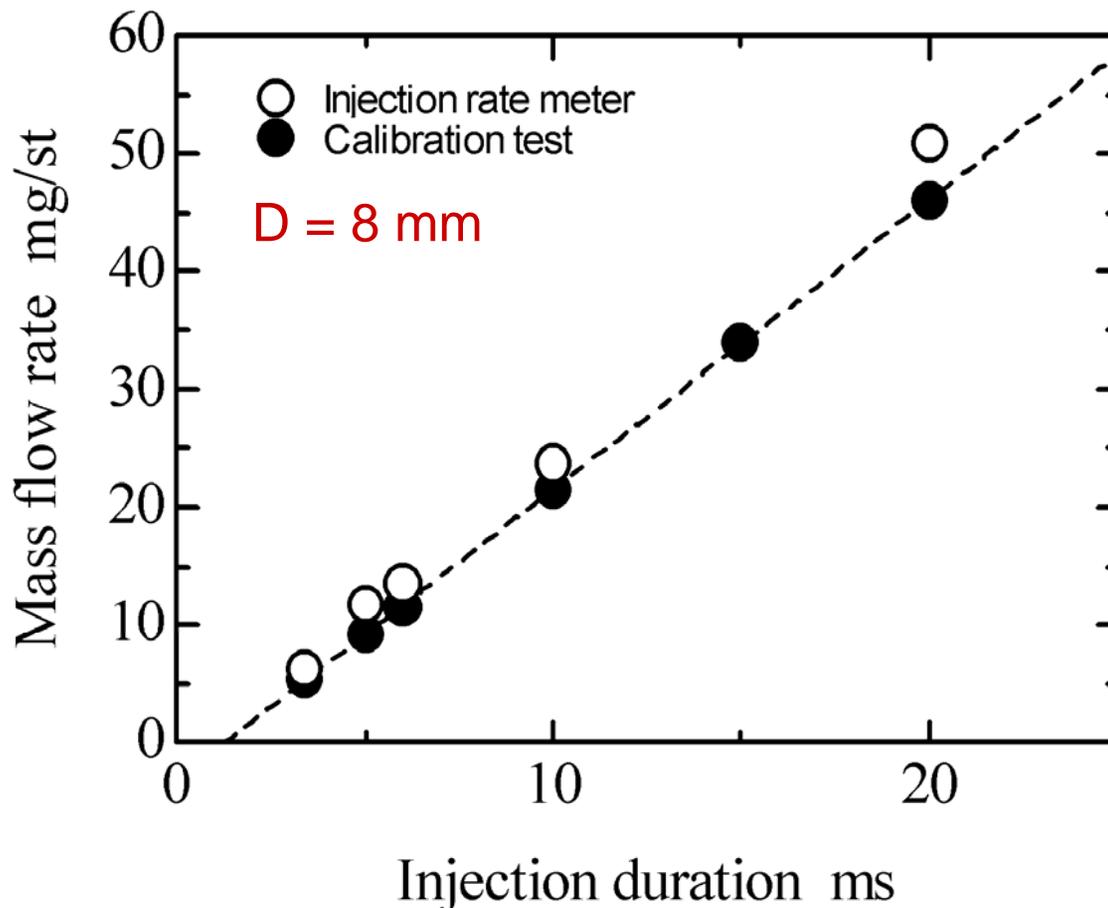
- 管内静圧のみの計測で、急激に変動する燃料噴射率を算出することが可能となった。

計測精度を確認するため、

- 噴射率を時間で積分することで、噴射1回当たりの燃料流量を求め、校正試験結果と比較を行う。

インジェクタ駆動信号と噴射率の履歴（噴射期間 = 6 ms）

気体燃料インジェクタの瞬間流量計の計測精度



計測精度

- およそ10%.
- まだ不十分ではあるが、スタートポイントとしては意義のある結果.

計測精度向上のため、

- 定式化の改善が必要.
- 管摩擦の影響を完全に排除することが必要.

気体燃料噴射率計と校正試験との比較

ま と め

- 管内一次元流れを用いた気体燃料インジェクタの瞬間流量計測装置を発明し、その計測精度を検証した。
- 一次元、圧縮性、非粘性、断熱流れを仮定し、管内静圧から気体燃料の密度、音速、速度、温度、質量流量を求める式を導いた。
- レイノルズ数の増大とともに、管摩擦の影響が顕著になる。管摩擦による圧力勾配が計測精度を低下させるため、その影響を極力排除する必要がある。
- 本発明の計測精度は、10 %程度である。本特許申請後の継続研究により、現状では計測精度は2～3 %まで改善し(新規特許申請済)、実用レベルに近づきつつある。