

平成22年 5月30日現在

研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2008～2009
 課題番号：20760127
 研究課題名（和文） 気体燃料噴射率計開発ならびに間欠気体燃料噴流の発達特性解明
 研究課題名（英文） Development of a Gaseous Fuel Injection Rate Meter and
 Measurement of Characteristics of Intermittent Gaseous Fuel Jets
 研究代表者
 荒木 幹也（ARAKI MIKIYA）
 群馬大学・大学院工学研究科・准教授
 研究者番号：70344926

研究成果の概要（和文）：1次元管内流れを用いた気体燃料噴射率計の開発を行い、その計測精度を1%のオーダーまで向上した。様々な気体種、多段噴射に対しても、噴射率計は適応可能であることが示された。間欠気体燃料噴流の発達過程をミー散乱法を用いて可視化し、噴射率計で得られた噴射弁過渡特性のデータを用いることで、その発達特性を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：A gaseous fuel injection rate meter, which employs 1-dimensional pipe flow, was developed and it is shown that its measurement accuracy was improved to be the order of 1%. It is shown that several gas species and multi-stage injection are applicable to the injection rate meter. The development process of intermittent gaseous fuel jets was visualized using Mie scattering method, and their characteristics were revealed by use of the data of transient characteristics of injectors obtained by the injection rate meter.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：気体燃料，内燃機関，流量計測，間欠噴流，新燃料

1. 研究開始当初の背景

従来の石油精製燃料であるガソリン・軽油に代わり、気体燃料である水素・天然ガスの利用が進んでいる。自動車エンジンもその例外ではなく、水素自動車・天然ガス自動車の開発・普及が進んでいる。水素・天然ガスは、Tank to Wheel ベースでの二酸化炭素排出量

を大幅に削減できるため、大きな期待が寄せられている。

図1に、天然ガス自動車用燃料噴射弁を示す。燃料噴射弁は、自動車エンジンの性能を左右する重要なパーツのひとつである。燃料噴射弁は、高速電磁弁・ピエゾアクチュエータ等を内蔵し、数百ナノ秒～数ミリ秒という



図1 気体燃料噴射弁

極短時間で、精密に調量された所定の燃料をエンジン吸気管内あるいはエンジン筒内に噴射する。筒内直接噴射圧縮点火エンジンでは、エンジンの1サイクルに3~7回にわたる多段噴射を行うなど、非常に精密な制御が想定されている。その噴射流量特性の把握は、燃料噴射弁自体の開発のみならず、エンジン開発においても極めて重要である。

2. 研究の目的

燃料噴射弁から噴射される燃料の、単位時間当たりの流量は「燃料噴射率(単位: cc/s, g/s)」と呼ばれる。燃料噴射率は、噴射弁の開弁過渡期間、定常噴射期間、閉弁過渡期間で極めて急激に変化する。燃料噴射率を計測することで、その内部抵抗(圧力損失)、流量係数、開弁・閉弁過渡応答性といった燃料噴射弁の基本性能の把握が可能となる。また燃料噴射率は、燃料到達距離、微粒化(液体燃料の場合)、周囲空気との混合、そして最終的に燃焼過程に大きな影響を及ぼすため、エンジン設計において極めて重要な要素である。

ガソリン・軽油といった従来の液体燃料の場合、燃料噴射率計測法には「ボッシュ式噴射率計」が広く用いられてきた。噴射された燃料を断面積一定の管内に導き、一次元流れを形成する。燃料噴射にともなう管内静圧変動から、噴射率を計測するというものである。しかしながら気体燃料の場合、気体特有の「圧縮性」、「低密度」といった性質のため、ボッシュ式噴射率計をそのまま用いても計測は不可能であった。このため、「気体燃料専用」の燃料噴射弁開発が、必須の課題となっている。

研究代表者はこれまで、独自に気体燃料専用の噴射率計開発を行ってきた。本研究課題では、(i) 開発途上にある気体燃料噴射率計を、実用レベルの技術まで引き上げること、(ii) 気体燃料噴射率が、間欠気体燃料噴流の発達に及ぼす影響を調査することを目的とする。これにより、気体燃料噴射弁の開発の一助となることを期待している。

3. 研究の方法

3. 1 気体燃料噴射率計の計測精度向上

研究代表者はこれまで、独自の気体燃料噴射率計の開発を進めてきた。開発開始当初、その計測誤差は100%以上であったが、本研究課題開始の時点では誤差2~3%程度までの精度向上を果たしてきた。ただし、管内流れモデルの影響、気体種変更の影響、多段噴射の影響、管内境界層の影響は未知であり、計測精度に及ぼす影響を調査する必要があった。これらを勘案しながら、計測精度1%のオーダに向上するための検討を行った。

図2に、本研究課題で用いた気体燃料噴射率計を、図3にその管内流れモデルを示す。ボッシュ式噴射率計と同様に、噴射された燃料を断面積一定の管内に導く(図2)。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。管内の気体を4つの

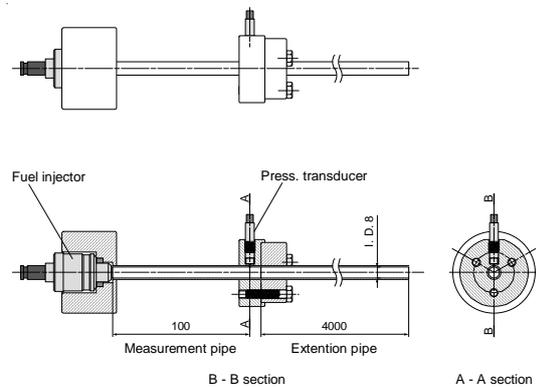


図2 気体燃料噴射率計

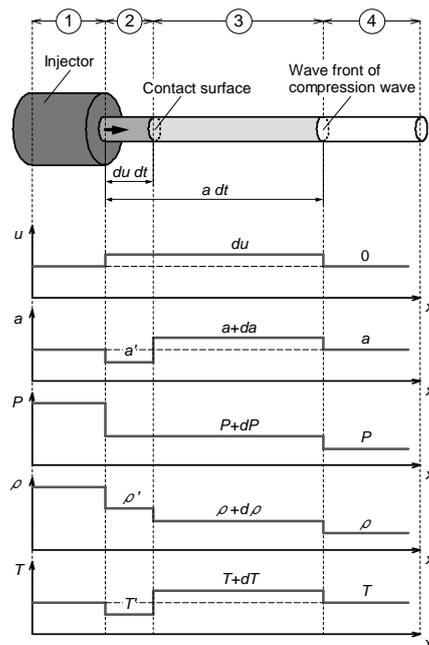


図3 管内流れモデル

領域に分割し(図3), 質量保存・運動量保存・エネルギー保存則から, 以下の式を導き出した.

$$\dot{m}(t) = A\rho'(t)u(t) = \frac{2\gamma P(t)A}{2\gamma RT_0 - (\gamma - 1) \left\{ \frac{2\gamma}{\gamma - 1} \sqrt{\frac{P_0^{\frac{1}{\gamma}}}{\rho_0}} P(t)^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}} - 2\sqrt{\frac{\gamma P_0}{\rho_0(\gamma-1)^2}} \right\}^2} \times \left\{ \frac{2\gamma}{\gamma - 1} \sqrt{\frac{P_0^{\frac{1}{\gamma}}}{\rho_0}} P(t)^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}} - 2\sqrt{\frac{\gamma P_0}{\rho_0(\gamma-1)^2}} \right\} \quad (1)$$

本研究課題では, 改善された流れモデルに基づく(1)式を適用し, 管内静圧変動から気体燃料噴射率計測を試みた. 特に, (i) 気体種を変更した際に計測精度が保証されるかどうかの検討, (ii) 間欠多段噴射を行った際に計測精度が保証されるかどうかの検討, (iii) 管内境界層の発達モデルを組み込み, その排除厚さの影響が計測精度に及ぼす影響の検討, (iv) オンボード計測(実際の車両に載せたままの状態での計測)が可能かどうかの検討, (v) 気体燃料噴射率計による気体燃料噴射弁の流量校正ならびに実際の火花点火機関への適用の検討を行った.

3. 2 間欠気体燃料噴流の発達特性

図4に, 間欠気体噴流可視化装置を示す. 噴射弁から噴射された気体燃料は, 不足膨張噴流となって高速で空气中に貫通していく. 間欠気体噴流の発達過程を調査するため, ミー散乱法を用いた気体濃度計測を実施した. 気体濃度計測法には, LIF法をはじめとして様々なものがあるが, いずれも紫外光の高出力光源を必要とするため敷居が高い. 本研究課題では, できるだけ簡便に濃度計測を行うため, ミー散乱法に着目した.

模擬燃料(安全のため水素を模擬したヘリ

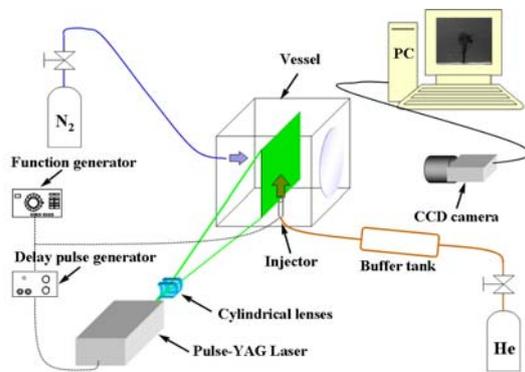


図4 間欠気体噴流可視化装置

ウムを使用)は, ガスボンベから供給され, レギュレータで設定圧力に調圧された後, 気体燃料噴射弁に導かれる. 気体燃料噴射弁は, 压力容器内に上向きに設置される. ファンクションジェネレータにより方形波を発生し, 気体燃料噴射弁の開弁・閉弁信号とした. この開弁・閉弁信号を噴射弁駆動回路に入力し, 気体燃料噴射弁を駆動する.

雰囲気気圧の影響を検討するため, 気体燃料噴射弁は压力容器内に設置される. 压力容器の容積は約 0.01 m^3 である. 雰囲気気体に, 窒素を用いた. 压力容器の側面2面に, アクリル窓が取り付けられている. この窓を介して, レーザシート入射およびミー散乱光の取得を行う.

ミー散乱法の光源に, パルス Nd:YAG レーザ (Solar Laser, LQ129) を用いた. レーザ波長は 532 nm である. 発振時間は 15 ns であり, 流れの静止像を得るのに十分に短い. パルスレーザは, 外部トリガによって駆動される. 噴射弁開弁信号を, 遅延回路を介してパルスレーザの外部トリガに入力する. 開弁信号入力後, 任意の時間の後に, パルスレーザを発振することができる. レーザビームは, シリンドリカルレンズを介してレーザーシートとなり, 压力容器に入射される. 気体噴流の中心軸を通るように, レーザシートを入射した. ミー散乱像は, レーザシートと 90 度の位置に設置された CCD カメラによって撮影され, AD キャプチャーボードを介してパソコンに記録される.

ミー散乱法の散乱粒子に, 燻煙殺虫剤を用いた. 殺虫成分は除去されている. 顆粒状燻煙殺虫剤を加熱し, 燻煙を発生する. 燻煙の一部をバッグに採取し, 压力容器内に添加・拡散し散乱粒子とした. 燃料噴射弁から気体が噴射されると, 散乱粒子は排除される. 散乱粒子排除によるミー散乱像の輝度低下から, 気体濃度を計測する. 背景輝度における気体濃度を 0% , 噴口出口での輝度における気体濃度を 100% とし, その間の気体濃度はミー散乱像の輝度と線形関係にあるとした.

このため, 散乱粒子濃度とミー散乱像輝度との間に線形関係が成立する必要がある. そこで, 压力容器内の散乱粒子濃度を変化させてミー散乱像を取得し, 濃度-輝度の直線性の確認を行った. 散乱粒子を添加・拡散した压力容器を 1 MPa まで加圧する. 压力容器を減圧していくと, 充填されていた窒素と共に散乱粒子も排出される. 散乱粒子が均質に分散していれば, 散乱粒子濃度は容器内圧力に比例する. 各圧力においてミー散乱像を取得し, 散乱粒子濃度とミー散乱像輝度との直線性を確認した.

光学顕微鏡により散乱粒子の粒径計測を行った. 燻煙の算術平均粒径は $1.2 \mu\text{m}$ であり, 不足膨張噴流となる気体燃料噴流の流れ

に対しても十分な追従性を有するとともに、均質な分散を得られることが確認されている。

4. 研究成果

4. 1 気体燃料噴射率計の計測精度向上

模擬燃料に窒素，ヘリウムを用い，気体種が計測精度に及ぼす影響について検討を行った。計測を行った結果，気体種が変化しても，(1) 式中の物性値を変更するのみで，2～3 %の計測精度が保証されることが確認された。これにより，(1) 式には気体種によらない一般性があることが確認され，その根拠となった流れモデルに実用上の問題がないことが確認された。

模擬燃料に窒素，ヘリウムを用い，間欠多段噴射が計測精度に及ぼす影響について検討を行った。実際のエンジンで想定される数ミリ秒間隔での多段噴射を行い，その計測精度を検証した。計測を行った結果，多段噴射を行った場合，2 回目，3 回目の噴射における噴射率を数%過大評価してしまう問題が確認された。この問題は，高レイノルズ数流れに特有の管摩擦による静圧上昇によるものであることが確認された。以後，管摩擦による静圧上昇分の補正を行うことで問題は回避され，多段噴射であっても2～3 %の計測精度が得られることが確認された。

上述の2つの検討において，計測精度は依然2～3 %であった。目標とする計測精度1 %以内の実現の障害となる因子の特定を行った結果，管内に形成される境界層の排除厚さが原因であることが予想された。そこで，模擬燃料に窒素，ヘリウムを用い，管内境界層の排除厚さが計測精度に及ぼす影響について検討を行った。静止気体中におかれた平板がある時刻に突然速度 U で運動を開始するレイリーの流れモデルを用い，境界層厚さを見積もった。以下に，境界層厚さの式を示す。

$$\delta = 4\sqrt{vt} \quad (2)$$

(2) 式から管内に形成される境界層の排除厚さを求め，計測結果との比較を行った。この結果，排除厚さによる有効断面積の減少は，2～3 %であり，これを補正することで計測精度は1 %のオーダーとなることが確認された。これにより，本研究課題で開発を行ってきた気体燃料噴射率計は，十分に実用に耐える精度を達成できることが証明された。気体燃料にも適用できる数少ない計測法として，今後の発展に期待していきたい。

上記以外にも，オンボード計測（実際の車両に載せたままの状態での計測）が可能かどうかの検討を行い，イーサネット回線と遠隔コンソールを用いた遠隔データ取得のノウハウの確立を行い，技術的な問題点の洗い出

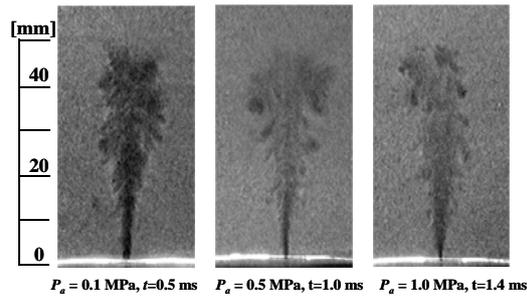


図5 ミー散乱法による間欠気体噴流の可視化像

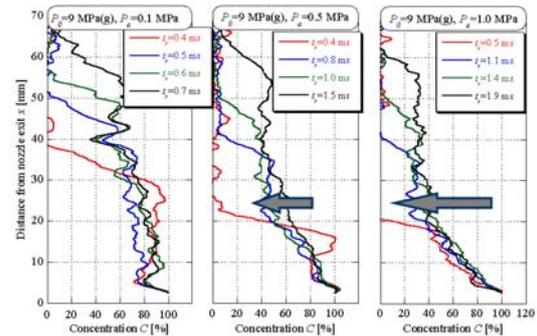


図6 ミー散乱法による間欠気体噴流の濃度分布計測結果

しを行った。また，気体燃料噴射率計による気体燃料噴射弁の流量較正を実施し，実際の火花点火機関への適用を行った。気体燃料噴射率計は，実用に耐える技術であることを確認することができた。

4. 2 間欠気体燃料噴流の発達特性

図5にミー散乱法による間欠気体噴流の可視化像を，図6にミー散乱法による濃度分布計測結果を示す。様々な噴射圧力，雰囲気圧力における，間欠気体噴流の発達過程について検討を行った。

燃料噴射開始後の噴流先端到達距離の時間変化は，燃料と空気との混合ならびに混合気形成範囲を知る上で極めて重要な情報である。可視化によって得られた噴流先端到達距離の実測値と，一般的に広く用いられてきた運動量理論による予測値との比較を行った。この結果，運動量理論による予測は，実験結果より噴流先端到達距離を過大評価することが明らかとなった。

運動量理論では，瞬時に弁開度が全開となり流量が最大に達する理想的な噴射弁を仮定する。この仮定が，実際の噴射弁の動作を表現できず，過大評価につながったものと予想された。そこで，気体燃料噴射率計より得られた噴射弁開弁過渡特性のデータを導入したモデルを構築し，あらためて実験結果との比較を行った。この結果，噴射開始直後に見られた到達距離の過大評価は解消され，燃

料噴射の全期間にわたり、到達距離の予測が可能であることが示された。

このように、気体燃料噴射率計測は、間欠気体燃料噴流の発達特性を検討する上で重要な因子であり、その計測法の確立は、今後の気体燃料噴流研究に大きな意味を持つと考えている。

間欠気体燃料噴流内部の濃度分布について検討を行った。この結果、間欠気体噴流の先端部分は、周囲空気との混合により燃料濃度が急激に変化すること、先端部分を除いた残りの大部分は、定常気体噴流と同様の濃度分布となることが明らかとなった(図6)。

一見複雑な現象に見える間欠気体噴流であるが、その先端部分の到達距離は噴射率を考慮することで十分に予測が可能であること、またそれに続く残りの部分は定常気体噴流と同様の性質を有することが示された。エンジン内部での混合気形成の実態は、筒内流動や圧力変動などでさらに複雑になる。あくまでも、静止雰囲気中における単純な場での検証実験ではあるものの、間欠気体燃料噴流の基本的な発達特性を把握することができた。本研究課題の成果が、今後のガスエンジン開発の一助となることを期待している。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- ① 椎名亮介, 荒木幹也, Lai CHEN, 中村壽雄, 志賀聖一, 小保方富夫, “低カロリーガス火花点火機関の性能と排気(個別ガス成分の基本燃焼特性)”, 日本機械学会論文集(B編), 2008年12月, 74巻748号, pp.2684-2689. 査読有

[学会発表] (計1件)

- ① 荒木幹也, 藤原康裕, 志賀聖一, 中村壽雄, 小保方富夫, “自動車用ガス燃料インジェクタの瞬間流量計測”, 日本機械学会2008年度年次大会講演論文集, 2008年8月3日~7日, 横浜, 講演番号2220.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

荒木 幹也 (ARAKI MIKIYA)

群馬大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：70344926