C109

ミー散乱法を用いた高速非定常気体噴流の濃度計測*

柳沢 雅俊 (群馬大学), 荒木 幹也[○] (群馬大学), 志賀 聖一 (群馬大学),
中村 壽雄 (群馬大学), 小保方 富夫 (群馬大学), 上田 隆正 (日産自動車(株)),
津江 光洋 (東京大学), 河野 通方 (東京大学)

Concentration Measurements of a High-Speed Unsteady Gaseous Jet Using a Mie Scattering Method

Masatoshi YANAGISAWA, Mikiya ARAKI, Seiichi SHIGA, Hisao NAKAMURA,
Tomio OBOKATA, Takamasa UEDA, Mitsuhiro TSUE and Michikata KONO

ABSTRACT

Concentration measurements of a high-speed unsteady gaseous jet were carried out using a Mie scattering method. Helium is injected through an automotive gaseous fuel injector into a pressure vessel. The injection pressure is set at 4.0 and 9.0 MPa(g), and the ambient pressure is varied from 0.1 to 1.0 MPa(a). The pressure vessel is filled with $1.2\mu\text{m}$ -diameter scattering particles, and a pulse laser sheet is projected along the jet axis. Due to the displacement of the scattering particles, the Mie scattered light intensity decreases with the increase in the helium concentration. It is observed that the helium concentration along the jet axis decreases gradually with the downstream distance, and that it decreases rapidly near the jet tip. With the increase in the ambient pressure, the helium concentration inside the jet decreases. It is observed that the helium concentration in the jet has a self-similarity in the radial direction, which indicates that the intermittent gaseous jet can be treated as a steady jet except for the jet tip region.

Keywords: Unsteady gaseous fuel jet, Mie scattering method, Concentration

1. 緒言

圧縮天然ガス (CNG: Compressed natural gas) や水素といった気体燃料を, 自動車用燃料として用いる動きが進んでいる. Tank to wheel ベースで二酸化炭素排出量を大幅に抑制できること, 硫黄酸化物等の排出量をほぼゼロとできること, 石油代替燃料であることなどその利点は大きい.

ガソリン, 軽油といった従来の液体燃料と異なり, 気体燃料は圧縮性を有する. 燃料噴射弁から噴射された気体燃料噴流の発達過程は, 従来の液体燃料噴霧の発達過程と異なる部分も多い. 著者らはこれまでの研究において, 気体燃料噴射弁から噴出する非定常気体噴流を瞬間シュリーレン法により可視化し, その発達過程について実験的に検討を行ってきた¹⁻³⁾. 従来の運動量理論式に圧縮性の影響を加味し^{4, 5)}, また気体燃料噴射弁の噴射率時間変化を考慮する⁶⁾ ことで, 噴流到達距離の時間変

化を予測できることが示された.

エンジン燃焼特性改善のためには, 混合気形成過程の把握が必須である. 噴流到達距離の把握のみならず, 噴流内の燃料濃度分布の把握が求められる. 気体濃度計測には, LIF 法やレイリー散乱法などが広く用いられてきた. しかしながら強力な紫外光レーザー等が必要となり, 敷居も高い. 本研究では, 比較的簡便な手法による気体濃度計測法としてミー散乱法に着目し, 非定常気体噴流に適用する. 自動車用気体燃料噴射弁から噴出する気体噴流内の, 燃料濃度分布時間変化の把握を目的とする.

2. 実験装置および方法

2.1 燃料噴射弁および圧力容器

供試気体に, ヘリウム (以下, 気体) を用いた. 分子量が水素に近いことと, 安全性の観点からヘリウムを選択した. 気体は, 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

Table 1 Experimental conditions.

Test gas	Helium
Ambient gas	Nitrogen
Injection pressure	4.0, 9.0 MPa(g)
Ambient pressure	0.1 to 1.0 MPa(a)
Injection duration	2-3 ms

る。供試噴射弁に、ガソリン筒内直接噴射用噴射弁を気体燃料用に改造したものを用いた。噴口径は 1 mm である。気体燃料噴射弁は、圧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。

雰囲気圧力の影響を検討するため、気体燃料噴射弁は圧力容器内に設置される。圧力容器の容積は約 0.01 m³ である。雰囲気気体に、窒素を用いた。圧力容器の側面 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。

Table 1 に、実験条件を示す。気体噴射圧力を、4.0, 9.0 MPa(g)とした。雰囲気圧力を、0.1~1.0 MPa(a)まで変化させた。気体噴射期間を 2~3 ms とした。気体の噴射開始を時刻ゼロとした。

2.2 ミー散乱法

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、シリンダカルレンズを介してレーザシートとなり、圧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、圧力容器内に添加・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

Fig. 1 Relationship between scattering particle concentration and Mie scattered light intensity.

Fig. 2 Mie scattering images for $P_0 = 9.0$ MPa.

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。圧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、直線性の確認を行った。散乱粒子を添加・拡散した圧力容器を 1 MPa まで加圧する。圧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 μm であり、流れに対して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。

3. 実験結果および考察

3.1 濃度校正試験

Fig. 1 に、散乱粒子濃度とミー散乱像輝度との関係を示す。横軸は、容器内圧力を示す。縦軸は、取得されたミー散乱光強度の視野全体の総和を示す。散乱粒子濃度とミー散乱光強度との間には直線性があり、取得された

Fig. 3 Helium concentration along jet axis for $P_0 = 9.0$ MPa.

Fig. 4 Helium concentration along jet axis.

ミー散乱像の輝度分布から、濃度分布計測が可能であることが分かる。

3.2 瞬間ミー散乱像

Fig. 2 に、噴射圧力 $P_0 = 9.0$ MPa におけるミー散乱像を示す。3 枚の像は、それぞれ雰囲気圧力が 0.1, 0.5, 1.0 MPa の結果である。噴流先端が、 $x = 50$ mm に到達した時刻の像を示す。このため 3 枚の像は撮影時刻が異なる。流れは下から上向きである。

いずれの像でも、噴口近傍では乱れが比較的小さく、噴流外縁が滑らかであることが分かる。 $x = 10$ mm 付近から、大規模構造が形成され噴流外縁は大きく乱れていく。大規模構造により、噴射された気体と雰囲気との混合が進行していく。雰囲気圧力が增大するにつれて噴流の輝度が增大しており、噴流内の気体濃度が低下していることが分かる。

3.3 噴流軸上濃度分布

Fig. 3 に、噴射圧力 $P_0 = 9.0$ MPa における噴流中心軸

上のヘリウム平均濃度分布を示す。取得されたミー散乱像を平均化することで平均濃度を算出した。Fig. 3 (a) ~ (c) は、それぞれ雰囲気圧力が 0.1, 0.5, 1.0 MPa の結果である。各図には、異なる 4 点の時刻における濃度分布が示されている。

Fig. 3 (a) より、時間の経過とともに噴流先端到達距離が増大していくことが分かる。先端到達距離の時間変化の特性については、前報^{1,3)}を参照されたい。ヘリウム濃度は噴口近傍で 100 % であり、噴流先端に近づくとともに徐々に減少していく。噴流先端から 10 mm 程度の位置から、ヘリウム濃度は急激に減少して 0 % となる。このように、ミー散乱法を用いた比較的簡便な手法で、非定常気体噴流内の濃度分布をとらえることが可能であることが分かる。

ヘリウム濃度が徐々に減少していく領域（図中点線の領域）では、時刻によらずヘリウム濃度分布がほぼ同じ値となることが分かる。さらに計測時刻を遅らせていっ

てもこの傾向は変わらない。つまり、噴射開始から無限の時間を経た定常噴流と、同じ濃度分布となると考えられる。一方、噴流先端から 10 mm 程度の範囲の領域では、ヘリウム濃度は急激に減少して 0 % となる。これより、非定常気体噴流は、噴流先端近傍の非定常領域とその後に続く定常領域とに分割できると考えられる。

Fig. 3 (b), (c) より、Fig. 3 (a) と同様に、噴流先端近傍の非定常領域とその後に続く定常領域とが観察されることが分かる。また Fig. 3 (a) ~ (c) を比較すると、雰囲気圧力の増大とともに、定常領域でのヘリウム濃度が減少していくことが分かる。雰囲気圧力の増大とともに雰囲気密度は増大する。噴流は、密度の高い雰囲気気体に運動量を与えながら、つまり雰囲気気体を加速しながら貫通していく。雰囲気密度が大きいほど、運動量交換が盛んになり、同時に混合も盛んになると考えられる。

Fig. 4 に、噴射圧力 $P_0 = 4.0$ MPa ならびに $P_0 = 9.0$ MPa における噴流中心軸上のヘリウム平均濃度分布を示す。取得されたミー散乱像を平均化することで平均濃度を算出した。Fig. 4 (a) ~ (c) は、それぞれ雰囲気圧力が 0.1, 0.5, 1.0 MPa の結果である。各図には、 $P_0 = 4.0$ MPa ならびに $P_0 = 9.0$ MPa において、噴流先端が 50 mm に達した時刻での濃度分布が示されている。

Fig. 4 (a) ~ (c) より、噴射圧力 $P_0 = 9.0$ MPa ならびに $P_0 = 4.0$ MPa のいずれの場合も、濃度分布はほとんど同じとなることが分かる。噴流軸上濃度分布は、おもに雰囲気圧力で決まり、噴射圧力の影響は小さいことが示された。

3.4 半径方向濃度分布

Fig. 5 に、噴射圧力 $P_0 = 4.0$ MPa ならびに $P_0 = 9.0$ MPa における噴流半径方向のヘリウム平均濃度分布を示す。取得されたミー散乱像を平均化することで平均濃度を算出した。Fig. 5 (a), (b) には、雰囲気圧力が 0.1, 0.5, 1.0 MPa の全ての結果が示されている。縦軸は最大値で無次元化された濃度、横軸は半値幅で無次元化された半径方向距離を示す。

半径方向濃度分布は全て同じ曲線となり、相似則が成立することが示された。非定常噴流であっても、定常噴流領域では、通常の定常噴流と同様の特性を示すことが示された。

4. 結 言

ミー散乱法を用いた高速非定常気体噴流の濃度計測を行った。圧力容器内に設置された自動車用気体燃料噴射弁から、間欠ヘリウム噴流を噴出する。容器内に満たされた散乱粒子がヘリウム噴流により排除される際のミー散乱光強度の低下から、濃度計測を行った。得られた知見を以下に示す。

- 1) 容器内の散乱粒子濃度とミー散乱光強度との間には線形関係があり、ミー散乱法を用いた濃度計測が可

(a) $P_0 = 4.0$ MPa

(b) $P_0 = 9.0$ MPa

Fig. 5 Helium concentration along radial direction.

能であることが確認された。

- 2) 噴流軸上濃度分布計測より、ヘリウム濃度が徐々に減少する定常噴流区間と、噴流先端近傍でヘリウム濃度が急激に減少する非定常噴流区間に分けられることが示された
- 3) 噴流軸上濃度分布計測より、雰囲気圧力の増大とともに、噴流内のヘリウム濃度は低下することが示された。
- 4) 噴流軸上濃度分布計測より、噴射圧力を変化しても、噴流内のヘリウム濃度に大きな変化が見られないことが示された。
- 5) 半径方向濃度分布計測より、定常噴流領域の濃度分布は、噴射圧力、雰囲気圧力の違いによらず、相似則が成立することが示された。

謝 辞

本研究は、日産自動車㈱の研究協力のもと実施された。また本研究は、2006 年度 群馬県地域結集型共同研究事業「低温接触型ガス化プロセスの構築」の一環として実施された。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 菊池他：間欠高速天然ガス噴流の発達挙動，第33回可視化情報シンポジウム講演論文集，(2005)，pp.449-452.
- 2) 柳沢他：高圧雰囲気場における高速非定常 CNG 噴流の発達過程，第 34 回可視化情報シンポジウム講演論文集，(2006)，pp.249-252.
- 3) 柳沢他：瞬間シュリーレン法による非定常高速ガス噴流の発達特性に関する研究，日本機械学会論文集（B 編），投稿中。
- 4) 浜本他，日本機械学会論文集（B 編），Vol.53, No.496, (1985)，pp.3810-3813.
- 5) 辻村他，日本機械学会論文集（B 編），Vol.70, No.693, (2004)，pp.1324-1347.
- 6) 荒木他：気体燃料噴射弁の噴射率計測，日本機械学会論文集（B 編），Vol.72, No.714, (2006)，pp.528-534.