レーザによる吸気管内液膜流速の計測に関する研究*

田中 宗信**, 望月 貞成**
西脇 信彦**, 岡部 直孝***

An Application of a Laser Technique to the Velocity Measurement of the Liquid-Fuel Film within the Intake Pipe of Internal Combustion Engines

by Munenobu TANAKA, Sadanari MOCHIZUKI,
Nobuhiko NISHIWAKI, and Naotaka OKABE

Utilizing a flash photolysis method, a non-disturbing technique was developed to measure the flow velocity of liquid-fuel film formed on the surface of the intake pipe of internal combustion engines. A tracer, in the form of a blue line, was generated instantaneously by applying a high energy laser beam to the liquid film of a fuel which contains very dilute 2-(2,4-dinitro-benzyl)-pyridine. AN₂ pulse laser with 900 kW peak power was used as the light source. The arrival of the tracer was detected by the He-Ne laser and photodiode system at an appropriate fixed point located a short distance downstream from the tracer generating point. The flow velocity of the film was determined from the time the tracer required to travel the distance between the two points. It was disclosed that the film flow velocity is of the order of 1/100 of the mean air velocity within the intake pipe. The present technique offers a strong tool to measure the velocity of the film flow within the intake pipe even when the engines are operated under the firing conditions.

Key Words: Internal Combustion Engine, Intake Pipe, Fuel Flow, Liquid Film, Laser, Non-disturbing Measurement

1. 緒 言

気化器付機関の吸気管内壁における燃料液膜流の存在は、絞り弁の動きに対する機関の応答遅れ⁽¹⁾や、多気筒機関の混合気分配の不均一の原因となるため、その挙動に関する詳細な情報が求められている⁽²⁾。しかし、気化器付機関の吸気管内壁に付着して流れる燃料液膜流は、一般に空間的にも時間的にも非定常な流れで、かつ厚さが非常に薄いので、液膜流速の測定一つを取り上げてみても通常的手法では極めて困難である。従来はインクその他の染料を液膜流に注入し、それが流れによってある一定距離だけ移動するのに要する時間を測定する方法⁽³⁾や、熱線流速計による測定の試み⁽⁴⁾がなされてきている。しかし、前者の方法では染料注入時に流れに必ずかく乱を与え、また後者においては薄い液膜に対しては熱線の線径は無視し得ない大きさとなるため本来の流れを乱してしまうことが不可避である。さらにいずれの場合においても流速分布を有する液膜内のどの部分の流速を測定したことになるのか明確でないなどの根本的な欠点を除くことがで

きないでいた。

上記背景をふまえ、著者らは液膜流速の非接触計測法の開発を計画した。その結果、レーザ光を用い流れに全く何らかの乱を与えずに流れの中に瞬時にトレーサを発生せしめ、そのトレーサの挙動をレーザとフォトダイオードよりなる検出器で検出することにより液膜流速を計測する方法を新たに考案した。そして本測定法の有用性を確認するため、まずは予備実験として、その性質が明らかにされている傾斜平板に沿って流下する層流液膜流に対して上記手法を適用してみた。その結果は極めて満足すべきものであり、本手法は実際の内燃機関の吸気管へ適用し得る可能性が高いことが示された。そこでこれらの予備実験の結果をふまえ、本手法を実際の吸気管へ適用して、その燃料液膜流の流速の非接触測定を行った。

2. 測定原理

流れに全くかく乱を与えずに、流れの中にトレーサを発生させる方法として、本研究ではフォトクロミクトレーサ法⁽⁵⁾⁽⁶⁾を用いた。この方法は、たとえばエチルアルコールのような有機溶剤中に溶解させた、2-(2,4-dinitro-benzyl)-pyridine (以下DNBPと略す)の紫外光に対する互変異性を利用することに立脚して

* 昭和60年6月10日 第5回内燃機関合同シンポジウムにおいて講演、原稿受付 昭和60年10月21日。

** 正員、東京農工大学工学部 (〒184 小金井市中町2-24-16)。

*** 学生員、東京農工大学大学院。

いる。DNBP の紫外光に対する分子構造の変化を図 1 に示す。DNBP は強力な紫外光の照射によって I の構造から、瞬時 ($3 \mu\text{s}$ 以内の時間) に II の構造へ変化する。I の構造の DNBP 溶液はほぼ無色透明であるが、II の構造に変化した部分は濃い青色である。照射を中止すれば数百 ms でもとの無色の状態に戻る。したがって、窒素パルスレーザなどを用いれば、レーザ光の通過した部分が瞬時に着色され、これをトレーサとして利用することが可能である。今、ある点でレーザ光により瞬時に液膜にトレーサを発生させ、その点より距離 L だけ離れた下流の点で時間 T の後にこのトレーサが検知されたものとすれば、時間 T と距離 L から流速を求めることができる。

トレーサの到達を検出するための検出部は、トレーサの発生と同じく非接触で検出を行うべく、レーザを利用した。すなわち、He-Ne レーザを用いて、そのビームがトレーサの通過する液膜部分を液膜の厚さ方向に透過するように配置し、トレーサの到達により生ず

る光量の急激な減衰をフォトダイオードにて検出した。なお、本研究では、トレーサ発生用光源として表 1 に示される諸元を有する窒素パルスレーザをもちいた。

3. 層流液膜流への適用

3.1 実験装置および実験方法 図 2 に層流液膜流実験装置概略系統図を示す。オーバフロータンクでヘッドを一定にされた液体は、バルブで流量を調節された後、消波板とネットよりなる整定部(タンク 1)に入り、ここで流速変動が取り除かれる。テストセクションである傾斜平板流路を流下した液体は、メスシリンダとストップウォッチにより流量を測定された後、ポンプにより再びオーバフロータンクへ戻される。流路の材質は透明アクリル樹脂である。

窒素レーザビームは光源より出るときには $6 \text{ mm} \times$

表 1 窒素レーザの諸元

Wave Length	3371 ($\text{\AA}$)
Pulse Energy (20 Hz)	9.0 (mJ)
Peak Power (20 Hz)	900 (kW)
Average Power (Max)	330 (mW)
Beam Dimensions (V.x H.)	6 x 32 (mm)
Pulse Duration (nominal)	10 (ns)
Time Delay from trigger	0.6 ~ 1.0 (μs)

図 1 DNBP の分子構造の光による変化

図 2 予備実験用実験装置の概略

32 mm の長方形断面を有しているため、全反射ミラーで方向を変えられた後、2枚のシリンダカルレンズによって縦方向および横方向のいずれもが絞られ、液膜部分に照射されるとき光の断面はほぼ $1.0 \text{ mm} \times 1.0 \text{ mm}$ に調整されている。一方、He-Ne レーザビームは、流路下面より照射され、液膜を通過後流路上方のフォトダイオードで受光される。なお、He-Ne レーザビームの径は 0.75 mm である。

図3にテストセクション（平板流路部）の上面図を示す。流路幅が入口部分で滑らかに絞られた後に一定（ 60 mm ）となるように側壁が設けられている。測定部は、流路入口から 130 mm の位置に置かれている。窒素レーザおよび He-Ne レーザのビームはいずれも流路壁面に垂直に照射され壁面上の照射点（標点）はともに流路の中心線上に位置する。両ビーム間の距離（標点間距離） L は 10.0 mm である。

次に実験方法について述べる。流量をセットし、流れが定常になった後、窒素レーザを照射し液膜内にトレーサを発生させる。このトレーサの通過によるフォトダイオードの出力変化と、窒素レーザの高電圧モニタ（レーザの発光タイミングを示す）を同時にデジタルメモリに記録する。一方液膜厚さはマイクロメータによる触針法で、液膜上面と流路壁面の読みの差から求める。流量は 100 cc 当たりの所要時間を測定した。実験は平板の傾き角 ϕ を種々選び、それぞれの ϕ に対し液膜厚さが $0.2 \sim 0.8 \text{ mm}$ 程度になるよう流量を順次変化させて行った。なお本実験においては、供試液体としてエチルアルコールに DNBp を質量％で 0.1% 溶解させたものを使用した。

3.2 実験結果と考察 図4に窒素レーザ高電圧モニタより得られるレーザ発光のタイミングの波形と、それに対応して発生したトレーサの到達を検知した時のフォトダイオード出力波形の一例を示す。図4中の点Aは、窒素レーザが発射された瞬間（発光時間約 10 ns ）を示し、点Bはフォトダイオード出力の立ち上がり開始点で、トレーサが最初に He-Ne レーザビームをよぎり始める時刻に対応する。したがって、

図3 流路とタンク1の上面図

図4中のABで示される時間は、液膜内の最大流速によってトレーサが運ばれるのに要する時間を示すものと考えられる。

ところで傾斜平板上の層流流下液膜流の性質はよく知られており、気液界面のせん断力を無視し得るときには、液膜内の流速分布は次式で表される。

$$U_y = \frac{g(\rho_L - \rho_V) \sin \phi}{2\mu_L} (2hy - y^2) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 y ：平板に直角方向の平板面からの距離、 U_y ： y における液膜流速、 g ：重力の加速度、 ρ ：密度、 μ ：粘性係数、 ϕ ：傾斜平板が水平面となす角、 h ：液膜厚さであり、添字は、 L ：液相、 V ：気相である。式(1)より、このときの液膜内の最大流速は気液界面 ($y=h$) に生じ、その大きさは、次式で与えられる。

$$U_{\max} = \frac{g(\rho_L - \rho_V) \sin \phi}{2\mu_L} h^2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $U_{\max}$ ：気液界面に生ずる最大液膜流速である。

図5に本予備実験の結果と上記の理論式(2)で示される関係を3種の平板傾斜角について比較した例を示す。横軸は液膜厚さ h 、縦軸は液膜流速 $U_{\max}$ を示す。図5中の実線が式(2)で示される気液界面に生ずる最大液膜流速を与える理論値で、プロットした点が実験結果である。

図5より、実験結果は理論値によく一致していることがわかる。このように本方法によれば、従来極めて困難であった薄い液膜流の流速測定について、流れに全く何らかの乱を与えずに、しかもその最大流速をかなり正確に測定し得ることがわかる。

4. 内燃機関実機への適用

4.1 実験装置および実験方法 予備実験の結果、本測定法によれば、一様でない流速分布を有する液膜

図4 窒素レーザ発光のタイミングとフォトダイオード出力波形の例

流であっても、その最大流速を測定し得ることがわかった。そこで次に本測定法を実際の発火運転時におけるエンジンの吸気管内燃料液膜流の流速測定に適用することを試みた。

図6に実験装置の概略系統模式図を示す。供試エンジンははん用単気筒空冷四サイクルガソリンエンジンであり、エディカレント式動力計により定速度制御を

行えるようになっている。燃料は、始動時のみガソリンを使用し、始動後はメチルアルコールにイソオクタンを質量比で3:1の割合で混合したものを使用した。DNBPは上記混合燃料に対して、質量%で0.15%溶解させている。吸入空気流量の測定には、層流形空気流量計を使用した。

エンジン本体と気化器の間に、新たにパイレックスガラス(内径24 mm, 外径28 mm, 長さ300 mm)製のモデル吸気管を取付け、これをテストセクションとした。テストセクションは、小形の重量ブロックに固定され、テストセクションとエンジンとの間は、フレキシブルチューブにてつなぎ、エンジンからの振動の影響を小さくしてある。

図7にテストセクションの詳細を示す。今回は吸気管底部の液膜流速の測定を試みることとし、窒素レーザービームは光源より出た後、吸気管底部より入射し吸気管内壁面上にて焦点を結ぶように設定されている。またHe-Neレーザービームは吸気管の上方より照射し、ビームは吸気管内をその直径に沿って横断した後、管底部の外壁に取付けられたフォトダイオードへと入射するようにしてある。両ビームによる標点はいずれも吸気管底部の同一母線上にあり、両者の距離 L は、 $L=10\text{ mm}$ である。

エンジンをガソリンで始動し、十分な暖機運転の後、燃料を切換えてしばらく運転させる。絞り弁開度、回転数を設定し、定常状態になった後窒素レーザーを照射する。窒素レーザーの発光タイミングおよびフォトダ

図5 実測値と理論値との比較

図6 吸気管内液膜流速測定用実験装置概略系統図

イオードの出力のほかにエンジンの上死点タイミングを計測し、それらをデジタルメモリに取り込み、X-Yレコーダにて記録する。

4.2 実験結果と考察 図8に計測結果の一例を示す。図8中の上段には窒素レーザの発光タイミングが、中段にはフォトダイオードの出力波形が、下段にはピストンの上死点タイミングがそれぞれ記録されている。フォトダイオードの出力波形（受光量が少ないほど出力波形は図中の上方に位置する）は、エンジンが2回転するごとに1回の割合で周期的に大きく変動している。これは吸気行程ごとに気化器にて発生する燃料噴霧が気流とともにHe-Neレーザビームを通過するため、それに応じてフォトダイオードの受光量が急減するからである。本例の場合には、窒素レーザが発射されてから267ms後にフォトダイオード出力に上述の周期的変化以外の変化が生じている。これが液膜流により運ばれるトレーサの到達による信号である。

He-Neレーザビームは、吸気管を直径に沿って横断しているため、フォトダイオード出力には気流部と液膜部の両者が影響を及ぼし、それらの影響が重畳された結果が現れる。しかし、図8に示されるように、ミスト流の影響による信号は、周期的でかつかなり大

図7 テストセクション詳細

図8 計測例 ($N=1900$ rpm)

きな変動をとまなうため、トレーサ到達信号とは明確に区別し得る。図8に示された例の場合、トレーサが発生してから検出点に至るまでの間に、エンジンは約4.5サイクルほど作動している。この間液膜の流れは脈動気流に引きずられて流れるため、その流速は決して定常ではないのであるが、ここでは流速変動がどのような形をとるにせよ、トレーサが標点間距離 $L=10$ mmを移動するのに要する最小時間 T (本例の場合267ms)を用いて液膜流速 U_L を算出することとすると、 $U_L=3.4$ cm/sとなる。

上述のような方法で種々のエンジン回転数に対して液膜流速を求めた結果の一例を図9に示す。横軸はエンジン回転数 N 、縦軸は液膜流速 U_L である。図1に示される例の場合、絞り弁開度は常に一定としたため、回転数の増加に応じて吸入空気平均流速は増大する。したがって、図9に示されるように、液膜流速もエンジン回転数の増加にともない上昇する傾向を示す。

図9 液膜流速とエンジン回転数との関係

図10 液膜流速と空気流速との関係

図10は、液膜流速 U_L を空気流速 U_A に対してプロットしなおした結果である。ここで U_A は、時間平均空気流量（図6に示される層流形流量計により測定される値）を Q 、吸気管断面積を A とするとき、 $U_A = Q/A$ で与えられる。図10より、液膜流速 U_L は空気流速 U_A の、 $1/100 \sim 3/100$ であることがわかる。これは、従来より管壁付着液膜流の流速は、空気流速の $1/100$ のオーダーであろう⁽²⁾⁽³⁾と言われていたことを実証したものだといえよう。

図9および図10においてデータはかなりのばらつきを示している。この原因としては以下の諸因子が考えられる。

(1) 液膜内の流れそのものが一定ではない。すなわち、吸気管内の空気流は間欠的であるため、燃料液膜流も基本的には加減速を繰返しながら進行するのであるが、このときトレーサ発生点の液膜内流速ベクトルの向きおよび大きさはサイクルごとに必ずしも同じではないため、同一標点間距離を移動するのに要する時間もサンプルごとに変化する。事実、上述の速度ベクトルの変動が大きいため、窒素レーザが発射されるごとに検出器にそれに応じた出力が毎回得られるとは限らず、むしろ発生したトレーサは検出点をそれて通過してしまう場合のほうが多い。

(2) 上記と関連するが、トレーサが検出点にて検出された場合でも、その際のトレーサは二つの標点間を直線的に最短距離 L を経て流れてきた場合ばかりとは限らない。目視観察によると、トレーサの流跡線は管底部を蛇行する場合のあることが認められる。

5. 結 論

レーザを利用した完全非接触式の液膜流速測定法を新たに開発し、まずは予備実験として傾斜平板に沿って流下する層流液膜流に本測定法を適用したところ、極めて満足すべき結果を得た。すなわち、本測定法によれば、液膜厚さが非常に薄い場合でも液膜内の最大流速をかなり正確に測定し得ることが示された。次にその結果を実際の実験の四サイクルガソリンエンジンの発火運転時における吸気管内液膜流に適用した。その結果時間的にも空間的にも流速が大きく変化する実際の吸気管内液膜流についても、(1)流体粒子が与えられた標点間（本研究では標点間距離は10 mmとした）を移動するのに要する時間を明確に捕捉することが可能であることが示され、(2)液膜内の流動状況を問わず、(標点間距離)/(流体粒子が標点間を移動するのに要した最小時間)で定義される液膜流速は、本実験の範囲内では、吸気管内平均空気流速の $1/100$ のオーダーであることなどが明かにされた。

なお、本研究の一部は、文部省科学研究費特定研究「燃焼現象」の補助を受けて行われた。

文 献

- (1) Tanaka, M. and Durbin, E. J. *SAE Trans.*, 86-1 (1977), 224.
- (2) 沢・堀・山口, 内燃機関, 13-155(昭49), 11.
- (3) 田中・細井, JARI 研究速報, No. 2 (昭46), 29.
- (4) 宝諸・ほか3名, 機論, 50-460, B, (昭59), 3068.
- (5) Popovich, A. T. and Hummel, R. L. *Chem. Eng. Sci.*, 22-1 (1967), 21.
- (6) Ho, F. C. K. and Hummel, R. L., *Chem. Eng. Sci.*, 25-7 (1970), 1225.