

研究論文

ディーゼル機関の白煙測定法に関する研究

A Study on Measurements of White Smoke Emissions from Diesel Engines

村山 善保, 神本 武征, 陳 之立
 (Yoshiyasu MURAYAMA) (Takeyuki KAMIMOTO) (Zhili CHEN)
 東海大学 東海大学 東海大学
 (Tokai Univ.) (Tokai Univ.) (Tokai Univ.)

White smoke emissions from diesel engines during cold starting comprise liquid particles of unburned hydrocarbons and water. Although the white smoke emissions are not regulated at present, their reduction is requested for their unfavorable impact on the atmosphere. However, the measurement instruments commercially available can indicate only the duration and the extent of white smoke emissions. The present study deals with the development of an optical diagnostics based on the laser light extinction approach that allows temporal and quantitative measurements of white smoke emissions. As the first step, the authors performed an experiment to measure the mass rate of white smoke emissions generated from humid air in a low temperature wind tunnel to simulate engine exhaust under cold starting. The result showed that the water mass obtained by analyzing the white smoke extinction image showed good agreement with the mass of water charged to the evaporator to generate white smoke.

Key words : White smoke, Diesel Engine, Measurement, Cold start

1. はじめに

ディーゼル機関は一般にススを主成分とする黒煙を排出するが、低温始動時には白煙を排出する。白煙は不完全燃焼で生成した未燃燃料成分と水分が低温大気中で希釈される過程で凝縮したものである^{(1)・(2)}。現在、白煙は未規制であるが、エンジンの商品性にかかわり、また今後規制が法制化される可能性がある。したがって白煙の質量、濃度、成分などを定量的に計測する必要がある。

既存の白煙計には排気管から出る白煙の白さを目視や高感度ビデオカメラにより測定する方法⁽³⁾、白煙の濃度をタングステンランプやレーザー光などを光源とした透過率から測定^{(1)・(4)}するものなどがある。しかし従来の方法はいずれも定性的な測定であって、白煙の濃度と排出量を定量的に測定することができない。

本研究ではレーザーシート光を光源として排気管から出る白煙の濃度と質量を定量的に測定するための計測システムの開発を目的とする。本研究では第一段階として実際の車から排出され

る白煙の代わりに水蒸気による模擬白煙を用いて、考案した計測システムの妥当性を検討したので報告する。

2. 実験装置

2.1 白煙発生装置

図1に示すように実験装置は冷間始動時の低温大気を実験室内で実現するための低温風洞、白煙の源となる加湿空気を発生させる蒸発器、白煙を定量的に測定するための光学系により構成される。低温風洞に供給する空気はオイルレスコンプレッサで圧縮したのちエアードライヤーで -60°C でも結露しないレベルまで除湿した。この乾燥空気を25minでボルテックスチューブに供給して約 -2°C まで冷却し、さらに熱交換器と風洞拡張部でドライアイスにより -10°C まで冷却した。拡張部には直径6mmの鉄球とスチールウールを充填し、風洞内の速度分布がほぼ一様となるようにした。

図2に蒸発器を示す。蒸発器は縦30mm、横50mm、長さ175mmのアルミブロックで製作し、出力120Wのロッドヒータ5本で温度 140°C に加熱制御している。ブロック中央部の内径7mmの流路には8l/minでポンプから送られる空気が流れて

原稿受付：2007年6月14日

いる。この空気流路に注射器から注入された水は下の壁面に触れた瞬間に蒸発し、加湿空気となる。水の注入は10秒間に最大0.3ccとしたが、水の注入によるブロックの温度低下は観察されなかった。また蒸発器と風洞とは真空用ゴムホースで連結し、140℃の空気で十分加熱した後加湿空気を通してホース内での凝縮を防いだ。この加湿空気は風洞内の中央に設けた内径2mmのノズルら上向きに噴出し、風洞内の低温空気に触れた瞬間に凝縮して白煙となる。風洞出口のノズル(φ40mm)から噴出する白煙に対しノズル出口から5mmの位置で水平方向にレーザーシートを透過させる。ノズルの上方50mmの位置にファンを設け、白煙が測定断面からスムーズに上方へ排出されるようにしている。水の注入は供給速度が一定になるように注射器をモータと歯車で駆動した。水の注入時間は10秒一定とし、注入率はモータの駆動速度で制御した。

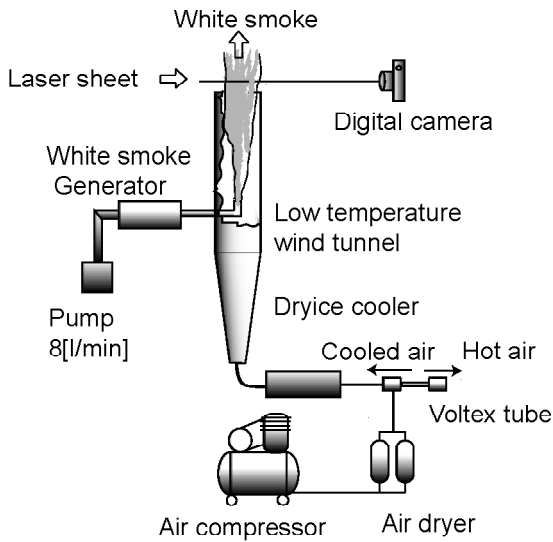


Fig.1 Experimental setup for white smoke experiment

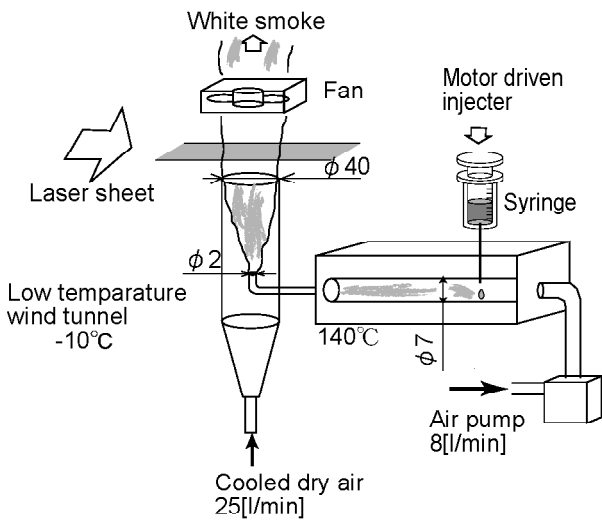


Fig.2 Low temperature wind tunnel and white smoke generator

2.2 撮像光学系

図3に撮像光学系を示す。光源には出力6.3mw、波長635nmのダイオードレーザを用いた。レーザはシリンダリカルレンズによってシート状に拡張され、コンベックスレンズによりシート状の平行光線となる。白煙を透過して粒子の散乱によって減衰したレーザ光はコンベックスレンズにより集光され、デジタルカメラの連写モード(一秒間に3コマ)で撮像される。撮影した画像をグレースケール画像に変換し、各ピクセルにおける光強度を0から255段階の8bitの数値データに変換する。デジタルカメラの出力は入射光強度の対数となるように処理されているので、8bitの数値を指数変換して実際の光強度に比例する値に変換する。

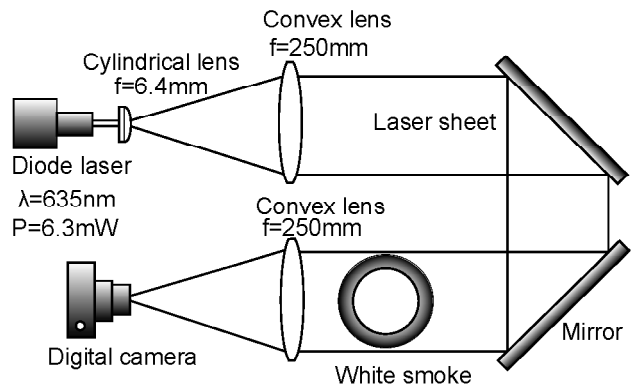


Fig.3 Optical setup for imaging transmitted laser sheet

3. 画像解析

3.1 理論

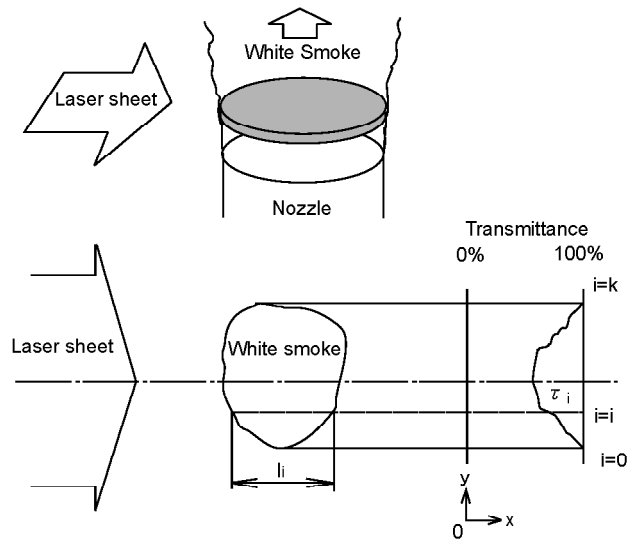


Fig.4 Transmittance distribution along y direction at time t

図4に示すように垂直に噴出する白煙の軸に対して水平方向からレーザーシート光を入射し、前方で減衰したレーザーシート光を撮像する。レーザー光の進行方向をx軸、直角方向をy軸とし、y方向のピクセル番号を*i*とする。巾方向(図4のy方向)の透過率τの分布を測定する。

白煙粒子の散乱により光強度が減衰した時刻*t*、y方向のピクセル位置*i*における透過率をτ_{*i*}(*t*)とし、*i*におけるx方向の光路長さを*l_i*とする。

y方向の位置*i*における減衰は次式で表される。

$$-\ln\tau_i(t) = \int_0^{l_i} Q_{ext} \frac{\pi}{4} d_{pxi}^2 n_{xi} dx \quad (1)$$

Q_{ext} = 比減衰係数(粒径*d_p*、波長、屈折率の関数) [無次元]

d_{pxi} = 座標*x*、*i*における粒子直径[mm]

n_{xi} = 座標*x*、*i*における粒子の数密度[ヶ/mm³]

*l_i*は図4に示すように白煙の透過光長である。ここで粒子直径*d_{pxi}*は座標*x*、*i*における局所平均粒子径であるがこの値はレーザーシート断面内の至る所で一様と仮定し、その平均値を*d_p*とする。また*Q_{ext}*は*d_p*²の重みをかけた平均値*Q_{ext}*で置き換えると

$$-\ln\tau_i(t) = \frac{3}{2} \frac{Q_{ext}}{6} \frac{\pi}{6} d_p^2 \int_0^{l_i} n_{xi} dx \quad (2)$$

さらに*n_i*を光路*l_i*で*x*に沿っての数密度の平均値をとすると

$$-\ln\tau_i(t) = \frac{3}{2} \frac{Q_{ext}}{6} \frac{\pi}{6} d_p^2 n_i l_i \quad (3)$$

ただし

$$n_i = \frac{\int_0^{l_i} n_{xi} dx}{l_i}$$

となる。さらに式(3)の両辺に*2d_p*³/*3Q_{ext}*をかけて変形すると光路*l_i*内の平均質量濃度*c_{pi}*は式(4)のようになる。

$$c_{pi}(t) = -\frac{\rho_p}{l_i} \frac{2d_p}{3Q_{ext}} \ln\tau_i(t) = \rho_p \frac{\pi}{6} d_p^3 n_i \quad [\text{mg}/\text{mm}^3] \quad (4)$$

レーザーシート断面内の白煙粒子の平均質量濃度*c_p*(*t*)は

$$\overline{c_p}(t) = -\rho_p \frac{2d_p}{3Q_{ext}} \frac{\sum \ln\tau_i(t)}{\sum l_i} \quad [\text{mg}/\text{mm}^3] \quad (5)$$

ここでΣ*l_i*はレーザーシート断面の面積である。ここで提案する測定法では式(5)に示すように断面に白煙粒子の濃度分布があっても測定断面積が既知あるいは測定可能であれば平均質量濃度が測定できることが分かる。今回はレーザーシートの透過する測定断面が風洞出口に近接しているためΣ*l_i*はノズル断面積と同じ円形と仮定した。レーザーシート断面を通過する単位時間あたりの気体流量を*q* [mm³/s]とすると単位時間当たりこの断面を通過する粒子の質量*m_p*[mg/s]は式(6)のように表される。ただし気体体積に対して白煙粒子の体積の占める割合は小さいので無視している。

$$\dot{m}_p(t) = \overline{c_p}(t) \dot{q} \quad [\text{mg}/\text{s}] \quad (6)$$

この*m_p*(*t*)を撮像時間間隔Δ*t*で測定開始から終わりまで時間積分することによりレーザーシート断面を通過する総白煙質量(水の質量)を求めることができる。

$$m_p = \int \dot{m}_p(t) \Delta t \quad [\text{mg}] \quad (7)$$

式(5)に示すように白煙粒子の平均質量濃度*c_p*(*t*)を算出するには比減衰係数*Q_{ext}*と粒径*d_{pxi}*が必要である。水の粒子(屈折率=1.33)の比減衰係数*Q_{ext}*はMieの散乱理論を用いて図5に示すように粒径の関数として表される⁽⁵⁾。粒径が2μm以上で*Q_{ext}*は2に漸近する。白煙が炭化水素粒子の場合は屈折率を変えて*Q_{ext}*を計算すればよいが、粒径が大きければ*Q_{ext}*が2に漸近することに変わりはない。

*Q_{ext}*は粒径分布を正規分布、その標準偏差を例えば0.2と仮定して計算すると点線に示すようになる。*Q_{ext}*と粒径については4.2節で検討する。

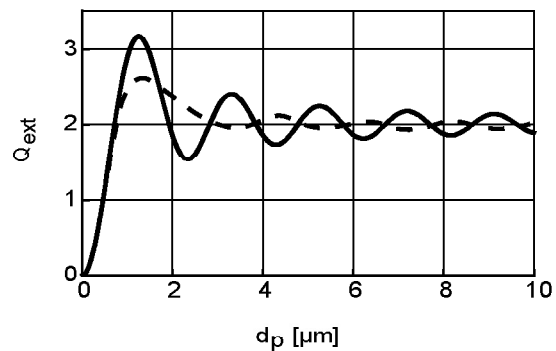


Fig.5 Relationship between *Q_{ext}* and *d_p*(water drop)

3.2 デジタルカメラ感度検定

前述の通り、デジタルカメラの出力は入射光強度の対数となっているので、カメラの8ビット出力値を入射光強度に変換する必要がある。そこでレーザーシート中央部のピクセルについて、灰色フィルタを用いて入射光強度を減光し、入射光強度とカメラ出力の関係を検定した。その結果を図6に示す。フォトセンサ出力(mV)で表現した入射光強度の対数がカメラ出力(bit)と直線関係にあることが分かる。図6の結果が画面全体について成り立つと仮定して以後の画像解析を行った。

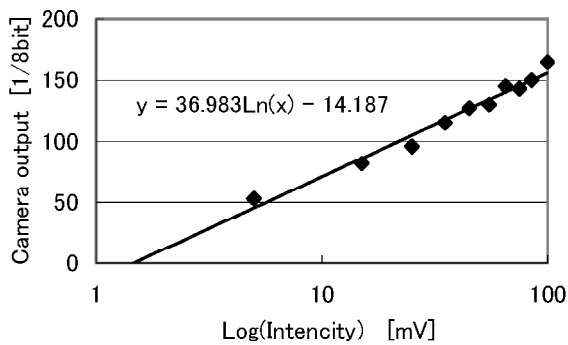


Fig.6 Correlation between light intensity and camera output

3.3 画像データ処理

図7に白煙がない場合(透過率100%)のレーザーシート光の画像(a)とある場合(透過率<100%)の画像(b)を示す。画像(b)ではレーザーシート画像の中央部が白煙によって減衰している様子が分かる。画像(a)の水平方向(y方向)の光強度分布に対する画像(b)の光強度分布の比から透過率分布 $\tau_j(t)$ を求める。

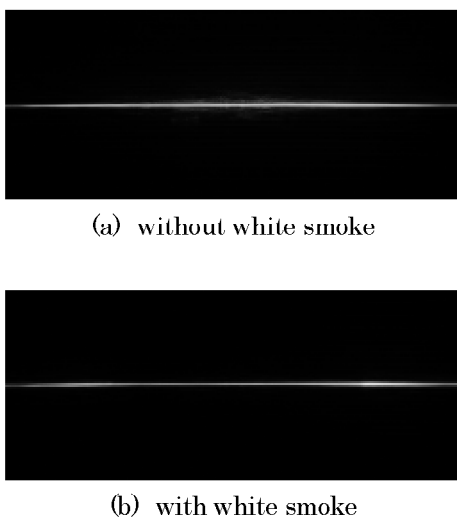


Fig.7 Laser sheet images with and without white smoke

撮影した画像データは膨大になり、解析に使用したソフトでは処理しきれないので生データ(1440×960ピクセル)を1/6のサイズに圧縮して解析した。すなわち6×6=36個のデジタルデータ36個の平均値を中央のピクセルの代表値として平均化処理した。

レーザーシート光には縦方向(z方向)に強度分布がある。図8は図7の中央部で生データの数値分布(細い実線)と1/6に圧縮した平均値分布(点線)を比較したものである。生データと圧縮データを使って計算した、ある時刻のy方向の透過率分布を比較したところ、白煙の境界付近で10~20%程度差が生じた。しかし平均質量濃度 c_p に及ぼす誤差は小さいので、全て圧縮データを用いて解析した。

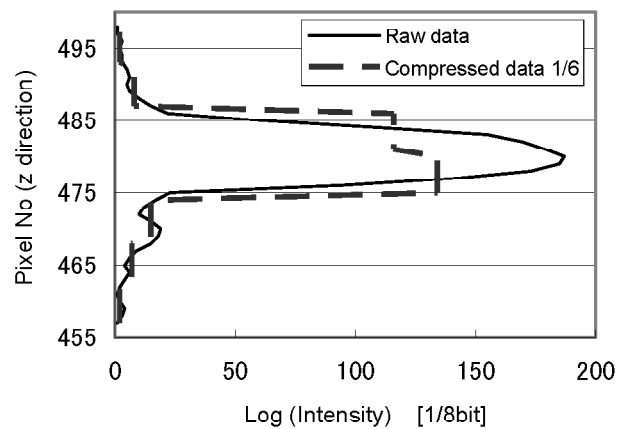


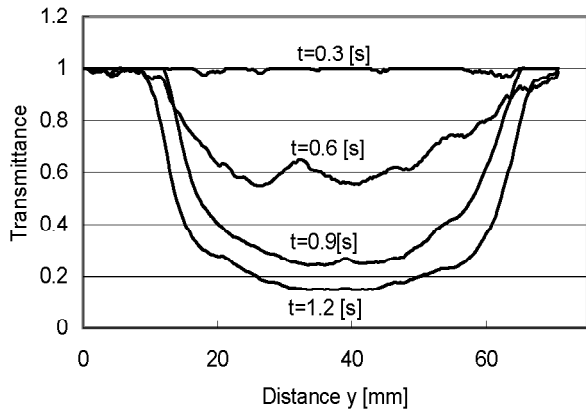
Fig.8 Comparison between a raw data distribution (solid line) and the corresponding averaged distribution (dotted line)

4. 実験結果および考察

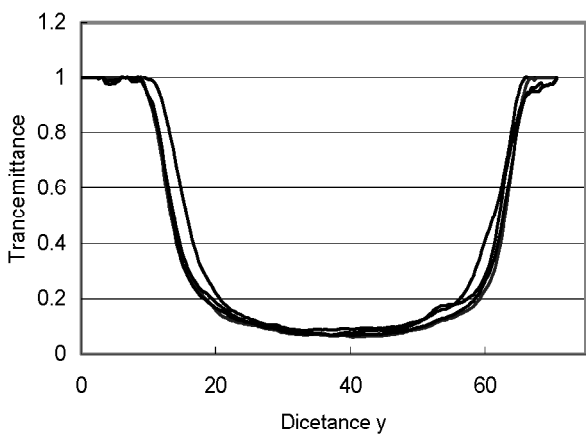
4.1 実験条件

蒸発器に水を注入する時間を10秒として水の量を50mgから300mgまで50mgごとに変化させて白煙の減衰画像を撮影した。低温風洞内の空気温度は約-10℃、流量は25 l/minで一定である。撮像条件はシャッター速度1/4000秒、コマ速度=3コマ/秒、感度=ISO100とした。

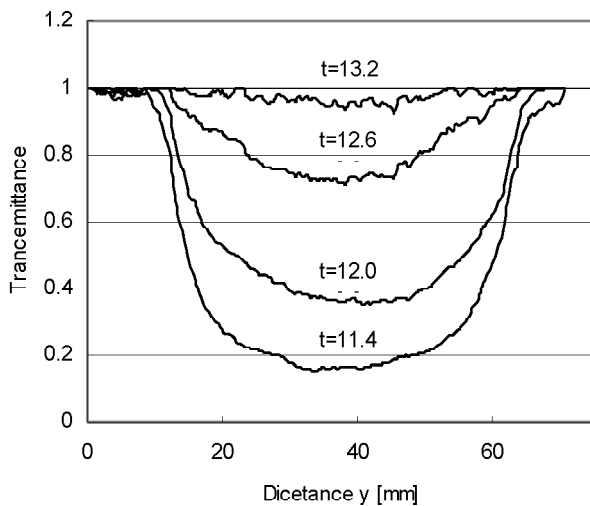
図9はy方向の透過率の時間変化 $\tau_j(t)$ について水を注入して透過率が急激に減少している様子(a)、透過率定常状態(b)、水の注入が終了して透過率がゆっくりと回復している状態(c)を示している。



(a) $t=0.3\sim 1.2[s]$ 透過率減衰中



(b) $t=4.2\sim 5.4[s]$ 透過率定常状態



(c) $t=11.4\sim 13.2[s]$ 透過率回復中

Fig.9 Temporal variation of transmittance distribution

4.2 $\overline{d_p}$ と $\overline{Q_{ext}}$ の検討

本解析では式 (5) に示したように平均粒子直径を知る必要がある。空気中の粒子直径分布は PDA や LDSA などを用いて測定するのが理想的であるが、当研究室はこのような高価な測定装置を保有しない。そこで次善の策として低温室内に設置した顕微鏡用プレパラートに白煙粒子を捕集し顕微鏡写真から平均粒子径を測定する事を試みた。しかしプレパラートに付着した粒子はプレパラート表面の温度により蒸発したり、プレパラートに触れた水蒸気が表面で凝縮したりして再現性のある結果が得られなかった。

文献によると白煙の粒子径は数 μm と報告されている⁽⁷⁾。今回は粒子径が測定できなかったため、平均粒子直径 $\overline{d_p}$ はパラメータとして $\overline{d_p}=1, 2, 3 \mu\text{m}$ と変化させて結果の整理を試みた。比減衰係数は図 5 に示したように粒子直径と標準偏差の関数である。今回は標準偏差を仮に 0.2 として $\overline{d_p}=1, 2, 3 \mu\text{m}$ についてそれぞれ $\overline{Q_{ext}}=2.5, 2.4, 2$ として画像データを整理した。

4.3 結果と考察

図 10 に画像計測により得られた白煙粒子質量と注入水量の関係を示す。図に見るように $\overline{d_p}=2\mu\text{m}$ とした場合の測定量が注入水量と比較的に近い値となった。注入水量が多い場合に画像計測による水量が注入水量より低くなったのは、注入水量が多い場合に白煙粒子が風洞壁面に付着する割合が多いためと想像される。今回は白煙粒子径が確定できないため定量的な検証には至らなかったが、図 10 の結果から本測定法の可能性が示されたと考える。

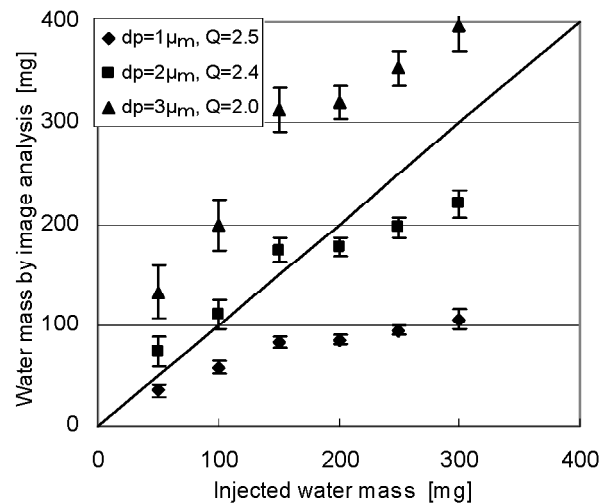


Fig.10 Correlation between measured mass of white smoke and injected water mass with particle diameter as a parameter

図 11 にレーザシート断面を単位時間に通過する白煙粒子の質量 \dot{m}_p の時間変化について注入水量をパラメータとして示す。ただしこの計算では平均粒子径 $2 \mu\text{m}$ 、比減衰係数は 2.4 と仮定している。いずれの水量についても \dot{m}_p は注入直後に立ち上がり、注入の停止する 10 秒まではほぼ一定に保たれる。注入終了後は注入量の少ない場合は切れが良く、ゼロレベルに戻るが、注入量の多い場合は少量の白煙の排出が数秒続く。これはアルミブロックと噴出ノズルを繋ぐゴムホース内に残存した水や風洞内壁に付着した水分が遅れて白煙となって生じたものと思われる。また、図 11 から濃度が不均一な場合においても過渡的な噴流の変化を測定できることが確認できた。

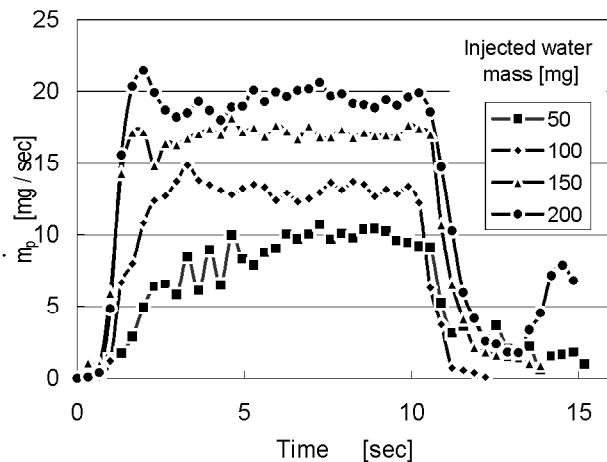


Fig.11 Temporal variations of the rate of white smoke emission for various water injection amounts ($d_p=2.0, Q_{ext}=2.4$)

以上より本研究で提案した白煙粒子質量の光学的測定法は水の白煙のみに注目した第 1 ステップであるが、今後実際のディーゼル白煙にも適応できる見込みが得られた。この場合、測定精度を高めるため白煙粒子の平均粒子直径を同時に測定することが必要である。またディーゼル白煙の主成分は炭化水素なので、減衰係数はそれらの屈折率を用いて計算すればよい。ディーゼル白煙以外にも微粒子を発生するシステムの測定にも応用できる可能性がある。

5. まとめ

零度以下の低温空気風洞内に加湿空気を導入して水蒸気白煙を発生させる実験装置を製作し、レーザシート光を用いた透過光減衰法により白煙粒子質量を実時間で測定する光学測定法を検討した。その結果、画像計測法を用いて得られた白煙粒子の質量は注入した水の質量とオーダ的に一致することが確認できた。今後定量的な検討を行う必要がある。

参考文献

1. T. Tanaka et al., "Development of a Measuring Meter and a Control Device for Diesel White Smoke" SAE paper No. 892044 (1989)
2. H. Shibata et al., "Study of White Smoke Reducing Techniques of DI Diesel Engine" SAE Paper No.970314 (1997)
3. H. Tsunemoto et al., "New Measuring Method for Blue and White Smoke in Diesel Engines By a Digital Camera System" SAE paper No.1999-01-1503 (1999)
4. Oosuka et al., "Benefits of New Injection System Technology on Cold Startability of Diesel Engines" SAE Paper No.940586 (1994)
5. T. Kamimoto et al., "A New Technique for the Measurement of Sauter Mean Diameter of Droplets in Unsteady Dense Spray" SAE paper No.890316 (1989)
6. 村山 正 「自動車用機関の燃焼と排気」騒音, 内燃機関編集部 山海堂 p50-59 (1975)



村山 善保

東海大学 大学院
工学研究科 機械工学専攻
修士課程 在学

〒259-1292

神奈川県平塚市北金目 1117 番地

TEL. 0463-58-1211(代表)内線 4384

FAX. 0463-56-8293

略歴：2006年 東海大学 工学部卒業
ディーゼル機関の白煙測定法の開発に従事



神本 武征

東海大学 非常勤講師
東京工業大学 名誉教授

〒259-1292

神奈川県平塚市北金目 1117 番地

TEL. 0463-58-1211(代表)内線 4384

FAX. 0463-56-8293

略歴：ディーゼルエンジンの燃焼と排気研究に従事



陳 之立
東海大学 動力機械工学科
准教授

〒259-1292
神奈川県平塚市北金目 1117 番地
TEL. 0463-58-1211(代表)内線 4306
FAX. 0463-56-8293

略歴：中国西安交通大学卒，茨城大学
助手を経て 2004 年 4 月より現職
ディーゼルエンジンの新燃料，新燃焼
法に関する研究，燃料電池に関する研
究に従事