

ガソリン噴霧内混合気濃度分布計測のための二波長レーザ吸収散乱(LAS)法

(計測原理, 試料燃料の選定と蒸発噴霧画像の撮影)

Dual-Wavelength Laser-Absorption-Scattering (LAS) Technique for Measurement of Mixture Concentration Distribution in Gasoline Spray
(Measurement Principle, Selection of Test Fuel and Imaging of Evaporating Fuel Spray)

| | | | |
|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 山川 正尚, | 高木 大介, | 西田 恵哉, | 張 玉銀 |
| (Masahisa YAMAKAWA) | (Daisuke TAKAKI) | (Kei-ya NISHIDA) | (Zhang YUYIN) |
| (マツダ) | (広島大学) | (広島大学) | (広島大学) |
| (Mazda) | (Univ.of Hiroshima) | (Univ.of Hiroshima) | (Univ.of Hiroshima) |

To make the quantitative measurement of liquid and vapor phase concentration distribution in a D.I. gasoline spray, a novel laser-based absorption and scattering (LAS) technique was developed. The LAS technique adopts ultraviolet and visible lasers as light sources and a test fuel, which absorbs the ultraviolet light but does not absorb the visible light, instead of gasoline. The LAS principle is based on the incident light extinction in the ultraviolet band due to both vapor absorption and droplet scattering. The absorption spectra and molar absorption coefficients of the candidate test fuels including p-xylene, benzene and toluene, all of which have physical properties similar to gasoline, were investigated, and p-xylene was finally selected as a test fuel. Then, experiments were conducted on the evaporating spray injected into high pressure and high temperature nitrogen in a constant volume vessel by a swirl injector for a direct injection (DI) gasoline engine. The incident light extinction images of the evaporating spray were taken at the ultraviolet and visible wavelengths. The incident light extinction image due only to the fuel vapor was obtained by subtracting the visible wavelength image from the ultraviolet wavelength image, and was enough sensitive to make the quantitatively image processing.

Keywords : Spark Ignition Engine, Direct Injection, Spray, Mixture Formation

1. はじめに

直噴ガソリン機関の燃焼は、空気流動、噴霧、燃焼室形状によって制御されるが、中でも噴霧の混合気形成の影響が大きい⁽¹⁾⁻⁽³⁾。これまで表1に示すようにLIF法⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾、EXCIPLEX法⁽⁷⁾⁻⁽⁹⁾、Raman散乱法⁽¹⁰⁾⁻⁽¹²⁾、Rayleigh散乱法⁽¹³⁾を用いて、高温高圧下の直噴ガソリン噴霧の混合気形成を計測した研究例が報告されているが、液相と蒸気相の分離計測や定量計測という点では不十分で、噴霧の混合気形成に関する十分な知見が得られているとは言い難い。燃料噴霧中の液相と蒸気相濃度の分離計測は赤外(3.39 μ m)と可視(632.8nm)のHe-Neレーザを使った吸収散乱法により試みられたが⁽¹⁴⁾、パルスレーザやイメージングカメラが利用できないため、非定常なエンジン噴霧の計測には適用が難しい。そのため、直噴ガソリン噴霧の混合気形成の研究開発では、液相と蒸気相の濃度分布を分離して定量計測が行える手法の確立

が急務となっている。

そこで本研究では、直噴ディーゼル噴霧の計測で実績のある、紫外光と可視光を光源とした透過光減衰率の画像の解析により、噴霧の混合気形成過程を定量的に計測する手法(二波長レーザ吸収散乱法(Laser Absorption Scattering: LAS))^{(15), (16)}のガソリン噴霧計測への適用を試みた。そして高温高圧雰囲気中へ直噴ガソリンインジェクタから噴射した燃料噴霧中の液相と蒸気相分布の可視化ならびに液相と蒸気相の透過光減衰率分布の時間変化を解析した。

2. 計測法の原理

2.1 液相・蒸気相分離計測法の原理

図1のように、強度 I_0 の入射光が噴霧中の燃料蒸気の吸収と液滴の散乱と吸収で減衰して、強度 I_t の透過光になる。このとき、燃料に吸収を示す波長 λ_A の透過

Table1 Comparison among Laser Diagnostics for Vapor Concentration

| | Simultaneous Measurement of Vapor and Liquid Phases | Quantitative Measurement | Planar Measurement | Note |
|--|---|---|---|---|
| LIF ⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾ | × Vapor Phase Only | △ Fluorescence Signal depend on O ₂ and Temperature | ◎ Planar Measurement by Laser Sheet | |
| EXCIPLEX ⁽⁷⁾⁻⁽⁹⁾ | △ Fluorescence Signal from Liquid Phase too strong | △ Fluorescence Signal depend on O ₂ and Temperature | ◎ Planar Measurement by Laser Sheet | |
| Raman ⁽¹⁰⁾⁻⁽¹²⁾ | × | ○ | × Point Measurement | |
| Rayleigh ⁽¹³⁾ | × Vapor Phase Only | ○ Rayleigh Scattering Signal depend on Pressure and Temperature | ◎ Planar Measurement by Laser Sheet | Mie Scattering (Noise) Same Wavelength as Rayleigh Scattering |
| LAS:IR-VIS ⁽¹⁴⁾ IR:3.39 μm | ○ | ○ Absorption Coefficient depend on Pressure and Temperature | △ Deconvolution of Line of Sight Point Date Set →Cross Section Date | Pulsed Laser, Imaging Camera not Available |
| LAS:UV-VIS ^{(15),(16)} | ○ | ○ Absorption Coefficient depend on Pressure and Temperature | ○ Deconvolution of Line of Sight Image →Cross Section Date | Pulsed Laser, Imaging Camera Available |

◎ : Superior ○ : Good △ : Marginal × : Poor

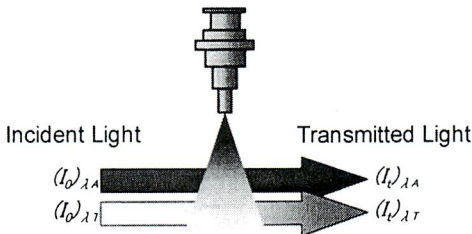


Fig. 1 Extinction of Incident Light through Evaporating Spray at Wavelengths λ_A and λ_T

光減衰率 $\log(I_0/I)_{\lambda_A}$ は液滴の散乱と燃料の吸収によって式(1)のように、また燃料に吸収を示さない波長 λ_T の透過光減衰率 $\log(I_0/I)_{\lambda_T}$ は液滴の散乱のみによって式(2)のように表せる。

$$\log\left(\frac{I_0}{I}\right)_{\lambda_A} = \log\left(\frac{I_0}{I}\right)_{Lsca} + \log\left(\frac{I_0}{I}\right)_{Labs} + \log\left(\frac{I_0}{I}\right)_{Vabs} \quad (1)$$

$$\log\left(\frac{I_0}{I}\right)_{\lambda_T} = \log\left(\frac{I_0}{I}\right)_{Lsca} \quad (2)$$

ここで $\log(I_0/I)_{Lsca}$: 液滴の散乱による透過光減衰率
 $\log(I_0/I)_{Labs}$: 液滴の吸収による透過光減衰率
 $\log(I_0/I)_{Vabs}$: 蒸気の吸収による透過光減衰率

式(1)の右辺第2項にある液滴の吸収による透過光減衰率 $\log(I_0/I)_{Labs}$ が無視でき(この検討については、4.2節で述べる)、また両波長の液滴の散乱による透過光減衰率 $\log(I_0/I)_{Lsca}$ は等しいことが確認してある^{(15),(17)}ので、蒸気相の吸収による透過光減衰率 $\log(I_0/I)_{Vabs}$ と、液滴の散乱による透過光減衰率 $\log(I_0/I)_{Lsca}$ は、それぞれ式(3)と式(4)のように表せる。

$$\log\left(\frac{I_0}{I}\right)_{Vabs} = \log\left(\frac{I_0}{I}\right)_{\lambda_A} - \log\left(\frac{I_0}{I}\right)_{\lambda_T} \quad (3)$$

$$\log\left(\frac{I_0}{I}\right)_{Lsca} = \log\left(\frac{I_0}{I}\right)_{\lambda_T} \quad (4)$$

そこで、蒸気による透過光減衰率 $\log(I_0/I)_{Vabs}$ に対しては、Lambert-Beerの法則⁽¹⁸⁾を、また、液滴による透過光減衰率 $\log(I_0/I)_{Lsca}$ に対しては、Bouguer-Lambert-Beerの法則⁽¹⁸⁾を適用することによって、噴霧内の燃料の蒸気相濃度、液相濃度をそれぞれ分離して求めることができる。

なお、本研究では光学系の取り扱いやすさから、Nd:YAGレーザの第4高調波(266nm)を λ_A に、第2高調波(532nm)を λ_T とした。

3. 試験燃料の選定

二波長吸収散乱法をガソリン噴霧の液相・蒸気相濃度計測に用いるためには、燃料に次のような条件が必要となる。

- (1) 蒸発や微粒化に関する物性値がガソリンに近いこと。
- (2) 紫外光 (波長 λ_u) を強く吸収し、可視光 (波長 λ_v) は吸収しないこと。
- (3) 波長 λ_u において Lambert-Beer の法則に従い、温度依存性が小さいこと。

3. 1 燃料の物性値

炭化水素の中で π 結合を有しているものは266nm付近に吸光帯を持つことが知られており、ガソリンに含まれる物質では芳香族が該当する⁽¹⁹⁾。そこで、表2に示す蒸発や微粒化に関する物性値である沸点、密度、動粘度、表面張力がガソリンに近いベンゼン、トルエン、p-キシレンを燃料の候補とした。

蒸発に関する物性値として、燃料の蒸発速度⁽²⁰⁾も重要な項目である。図2に雰囲気圧力 $P_a=0.1\text{MPa}$ 、雰囲気温度 $T_a=500\text{K}$ において燃料懸垂液滴の長径と短径を

Table 2 Properties of Candidate Test Fuels

| Fuel | Boiling Point (K) | Density*1 (kg/m ³) | Kinetic Viscosity*1 (mm ² /s) | Surface Tension*1 (mN/m) |
|----------|--|--------------------------------|--|--------------------------|
| Gasoline | 348 ≤ T ₅₀ *2 ≤ 383 T ₉₀ *2 ≤ 453 | 783*3 | 0.737*3 | 20.8*3 |
| Benzene | 353.4 | 874 | 0.690 | 28.2 |
| Toluene | 383.8 | 862 | 0.640 | 27.3 |
| p-Xylene | 411.5 | 857 | 0.706 | 27.8 |

*1 $P_a=0.1\text{MPa}$, $T_a=298\text{K}$

*2 JIS K 2202

*3 Isooctane

T₅₀: Distillation Temperature of 50% Mass

T₉₀: Distillation Temperature of 90% Mass

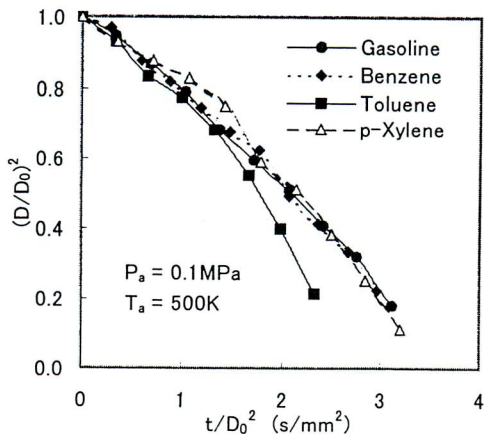


Fig. 2 Histories of Square of Diameter in Evaporation Process

計測し、同一体積の球に換算した等価直径 D の2乗の時間変化を示す。ガソリン(100RON)に対して、トルエンの蒸発速度がやや大きい。ベンゼンとp-キシレンはガソリンに近い蒸発速度となっている。

3. 2 液相の吸収スペクトル

燃料の紫外域と可視域の光の吸収特性を調べるため、液相の吸収スペクトルを測定した。測定に用いた紫外可視自記分光光度計(島津製作所製、UV-160A)の光源にはハロゲンランプと重水素ランプの2つが用いられており、波長350nm付近で切り替わることによって波長200nmから1100nmの範囲を測定できるようになっている。図3に雰囲気圧力 $P_a=0.1\text{MPa}$ 、雰囲気温度 $T_a=300\text{K}$ でエタノールを溶媒とし、モル濃度 $C_f=8.07\text{mol/m}^3$ 一定、セル光路長 $L=0.01\text{mm}$ として、横軸に波長を縦軸に吸光度をとった候補燃料の液相の吸収スペクトルを示す。図3(a)は200~600nmの範囲を、また、図3(b)に紫外域の吸収スペクトルを示しており、いずれの燃料も300nm以下で吸収し300nm以上では全く吸収しない。波長266nmにおいてはp-キシレンの吸光度が最も大きいことがわかる。

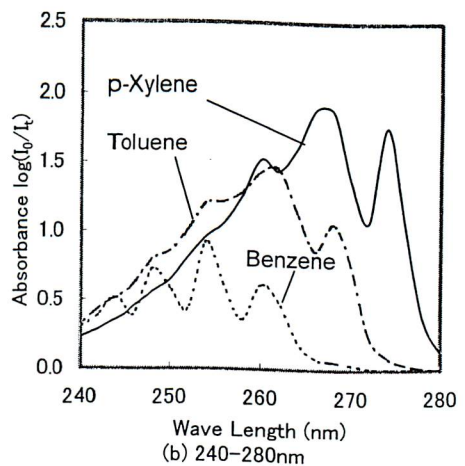
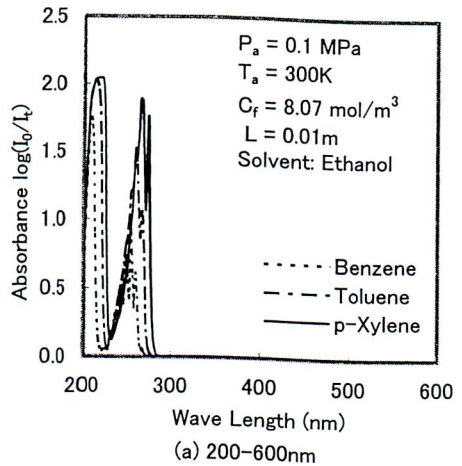


Fig. 3 Absorbance Spectra of Test Fuels

3. 3 蒸気相のモル吸光係数

蒸気相濃度を定量化するためには、波長 266nm のモル吸光係数を予め知る必要がある。モル吸光係数には温度依存性があり、噴霧内の温度分布も不均一なので、噴霧内混合気温度を算出して補正を行うため⁽²¹⁾、種々の温度におけるモル吸光係数を求めておかなければならない。そこで、候補燃料の中でもっとも強い吸光度をもつ p-キシレン蒸気相の吸収スペクトルを図 4 に示す実験装置で調べた。この装置の高温高压セルは、燃料を入れずに測定する参照光側(乾燥窒素)と、燃料側(燃料+乾燥窒素)の 2 つのセルからなり、それぞれ内径が 15mm、光路長が 100mm である。光源には波長 190 から 410nm までの光を発する重水素ランプ(Ocean Optics 社製、D-1000)を用い、分光器(Ocean Optics 製、S-2000)にて吸収スペクトルを計測した。

図 5(a)に、雰囲気気圧力 $P_a=1.0\text{MPa}$ 、モル濃度 $C_f=0.66\text{mol/m}^3$ のときの吸収スペクトルの雰囲気温度に対する影響を、図 5(b)に雰囲気温度 $T_a=500\text{K}$ 、モル濃度 $C_f=0.66\text{mol/m}^3$ のときの雰囲気圧力に対する影響を示す。雰囲気温度が高いと、吸収スペクトルのピークは下がり、裾野が広がる。これは、雰囲気温度が高くなると分子内振動が増加して遷移可能な電子軌道のエネルギー準位が分散するためである。一方、雰囲気気圧力は吸収スペクトルには影響していない。

図 6 には、雰囲気気圧力 $P_a=1.0\text{MPa}$ 、雰囲気温度 $T_a=425\text{K}$, 500K, 600K, 光路長 0.1m の p-キシレンの燃料蒸気相のモル濃度と波長 266nm における吸光度の関係を示す。各雰囲気温度ともモル濃度と吸光度は Lambert-Beer の法則に従って比例関係にあることが確認できる。これらの直線の傾きからモル吸光係数を求めた。図 7 に、p-キシレンのモル吸光係数の温度依存性を、ディーゼル噴霧混合気の二波長レーザー吸収散乱法計測で用いられた α -メチルナフタレン⁽²²⁾やジメチルナフタレン⁽²³⁾と比較した結果を示す。p-キシレン

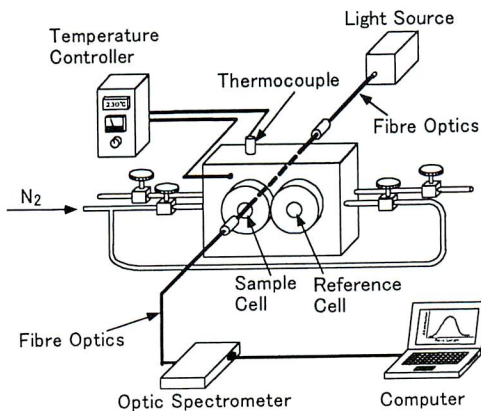
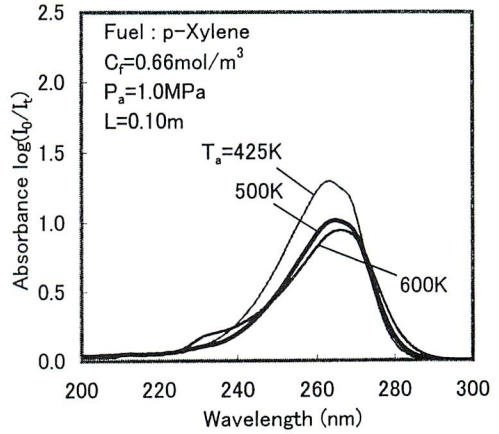
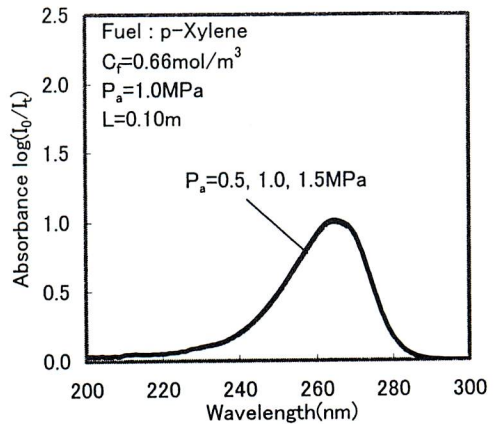


Fig. 4 Experimental Setup for Measurement of Absorption Test Fuel Vapor-Nitrogen Mixtures



(a) Ambient Temperature



(b) Ambient Pressure

Fig. 5 Effect of Ambient Condition on Absorption Spectra

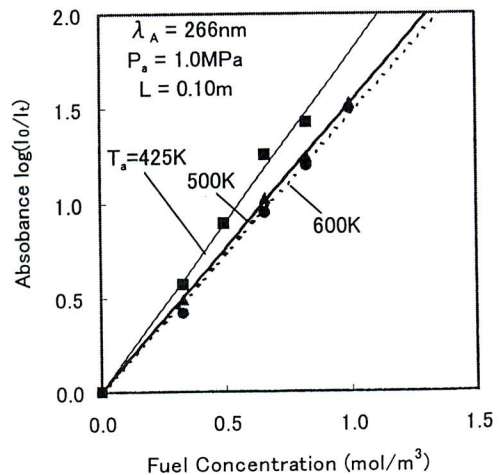


Fig. 6 Relation between Absorbance and Fuel Vapor Concentration under Various Temperatures

はジメチルナフタレンや α -メチルナフタレンより温度依存性が非常に小さく、モル吸光係数の値もジメチルナフタレンや α -メチルナフタレンと同等である。

ガソリンは多くの物質が混合している燃料であり、物質によりガソリン噴霧の微粒化や蒸発に多少の差があるが⁽²⁴⁾、本研究では、ガソリン中に含まれ、かつ、微粒化や蒸発に関する物性値がガソリンを代表できる

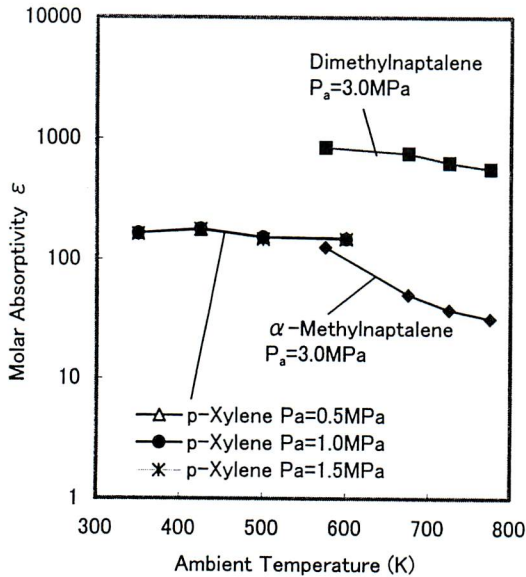


Fig. 7 Effect of Temperature on Molar Absorptivity

燃料にて混合気形成を計測することがまず重要と考え、p-キシレンを二波長レーザ吸収散乱法の燃料として用いることにした。

4. 直噴ガソリン噴霧の画像撮影

p-キシレンを燃料とした二波長レーザ吸収散乱法による直噴ガソリンインジェクタから噴射した噴霧の画像撮影を高温高压下で行った。

4. 1 実験装置および実験条件

二波長レーザ吸収散乱法の実験装置概略図を図8に示す。Nd:YAG レーザから可視光ビームおよび紫外光ビームが発振され、ビームエキスパンダによりビーム径を拡大させた後、噴霧を透過させる。噴霧中の燃料蒸気相および液滴により減衰されたレーザ光は、集光レンズを介してフォーカスされ、CCDカメラにより画像の撮影を行った。その際、ノイズ光をカットするため、入射光波長を中心波長としたバンドパスフィルタを各カメラの前に配置した。

噴射に用いたインジェクタ（三菱電機製）は、スワールインジェクターで、大気圧で噴霧角が 50° のものである。これは、ニードルバルブが電気信号によってリフトすると、燃料がスワローを通過して旋回成分が与えられ、噴孔を通り噴出する構造になっている。

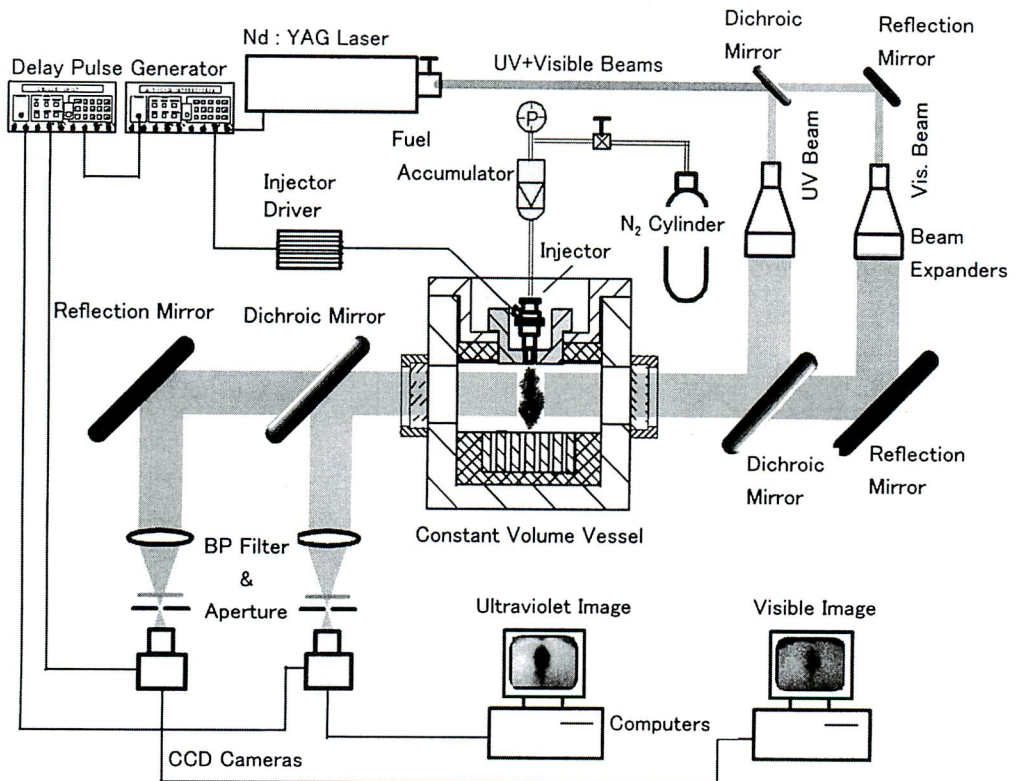


Fig. 8 Schematic of Optical Arrangement of Spray Imaging System

実験条件としては、実機の圧縮行程噴射を模擬した雰囲気圧力 1.0MPa、雰囲気温度 500K の高温高压容器中に、噴射圧 5MPa、噴射量 6.0mg、噴射期間 0.9ms で燃料噴射を行った。

4. 2 液滴の紫外光吸収の影響

本計測法では、紫外光は液滴によって吸収されないという仮定のもと、式(1)の右辺第 2 項の燃料液滴による紫外光の吸収 $\log(I_0/I_t)_{Labs}$ を無視し、式(1)から式(2)を差し引くことで、式(3)の燃料蒸気相の透過光減衰率 $\log(I_0/I_t)_{obs}$ を求めている。そのため、燃料液滴による紫外光の吸収 $\log(I_0/I_t)_{Labs}$ が無視できるかどうか検証する必要がある。

p-キシレンを常温で噴射した場合、ほぼ非蒸発状態なので $\log(I_0/I_t)_{obs} = 0$ とみなすことができ、式(1)は次式のように表せる。

$$\log\left(\frac{I_0}{I_t}\right)_{\lambda_A} = \log\left(\frac{I_0}{I_t}\right)_{Lscat} + \log\left(\frac{I_0}{I_t}\right)_{Labs} \quad (6)$$

よって、非蒸発状態の二波長レーザー吸収散乱法では、式(2)と式(6)より次式が成り立つ。

$$\log\left(\frac{I_0}{I_t}\right)_{\lambda_A} = \log\left(\frac{I_0}{I_t}\right)_{\lambda_T} + \log\left(\frac{I_0}{I_t}\right)_{Labs} \quad (7)$$

さらに、式(7)において、燃料液滴による紫外光の吸収 $\log(I_0/I_t)_{Labs}$ が無視できるならば、次式が成り立つはずである。

$$\log\left(\frac{I_0}{I_t}\right)_{\lambda_A} = \log\left(\frac{I_0}{I_t}\right)_{\lambda_T} \quad (8)$$

そこで、常温高压雰囲気中 ($P_a=293K, T_a=1.0MPa$) に直噴ガソリンインジェクタから p-キシレンを噴射して、紫外光と可視光の透過光減衰率を比較した。図 9 に噴射開始後 $t_{SOI}=3ms$ における紫外光と可視光の透過光減衰率の画像を、図 10 に噴孔からの距離 Z が 10mm と 30mm における噴霧半径方向 x に対する透過光減衰率を示す。この結果より、紫外光と可視光の透過光減衰率はほぼ等しいので、噴霧中の燃料液滴による紫外光の吸収 $\log(I_0/I_t)_{Labs}$ は無視できることになる。

4. 3 二波長透過光減衰画像から蒸気の透過光減衰画像の分離

図 11 に、雰囲気温度 $T_a=500K$ 、雰囲気圧力 $P_a=1.0MPa$ の高温高压の窒素雰囲気中に直噴ガソリンインジェクタから噴射した p-キシレン噴霧の波長 $\lambda_T(532nm)$ の可視光と波長 $\lambda_A(266nm)$ の紫外光の透過光減衰率画像、ならびに、紫外光から可視光の透過光減衰率を差し引

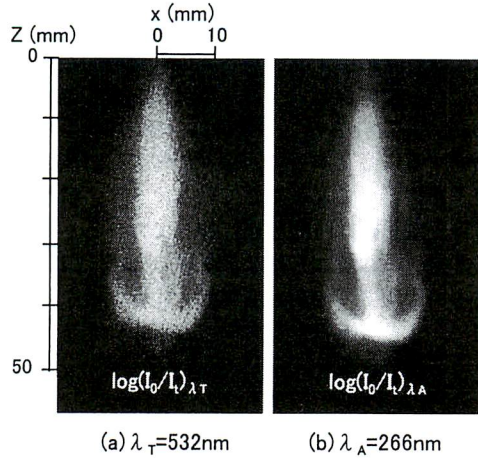


Fig. 9 Extinction Image of Non-Evaporating Spray at Dual-Wavelength

($P_a=1.0MPa, T_a=293K, P_f=5.0MPa, t_{inj}=2.0ms, t_{SOI}=3.0ms$)

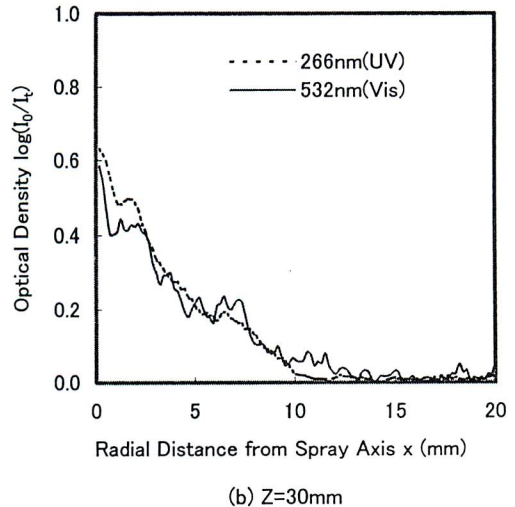
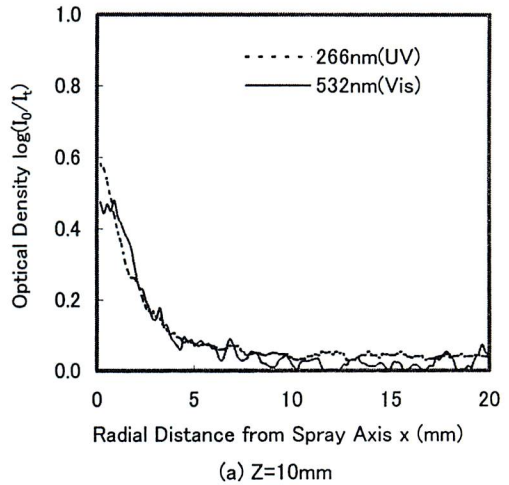


Fig. 10 Line Distributions of Absorbance at Two Wavelength ($P_a=1.0MPa, T_a=293K, P_f=5.0MPa, t_{inj}=2.0ms, t_{SOI}=3.0ms$)

いた画像を示す。液相を表す透過光減衰率 $\log(I_0/I)_{\lambda T}$ の画像は、噴射開始後 1.0ms から 4.0ms に時間が経過するにしたがって減少し、一方、蒸気相を表す透過光減衰率 $\log(I_0/I)_{\lambda A} - \log(I_0/I)_{\lambda T}$ の画像は、噴射開始からの時間が経過するにしたがって、徐々に増加し、蒸発している様子を捉えることができている。また、噴霧軸方向の噴霧先端距離は時間経過に伴って伸びるものの、噴霧半径方向への拡散はそれほど顕著でない。これは、噴射による周辺空気の流動が噴霧軸方向は拡散を助長する方向に、また、噴霧半径方向は拡散を抑える方向にあるためと思われる⁽²⁵⁾。

図 12 に噴射開始後 2ms での、噴孔からの距離 $Z=10, 20, 30\text{mm}$ における噴霧中心軸からの距離 x に対する液相と蒸気相の噴霧軸に対して左右を平均した透過光減衰率の分布を示す。各位置における透過光減衰率は、液相で $0.1\sim 0.5$ 、蒸気相で $0.3\sim 0.9$ であり、それぞれ入射光が $80\sim 30\%$ 、 $50\sim 10\%$ に減衰していることになる。これらは、濃度分布の解析を行うのに十分な値である。

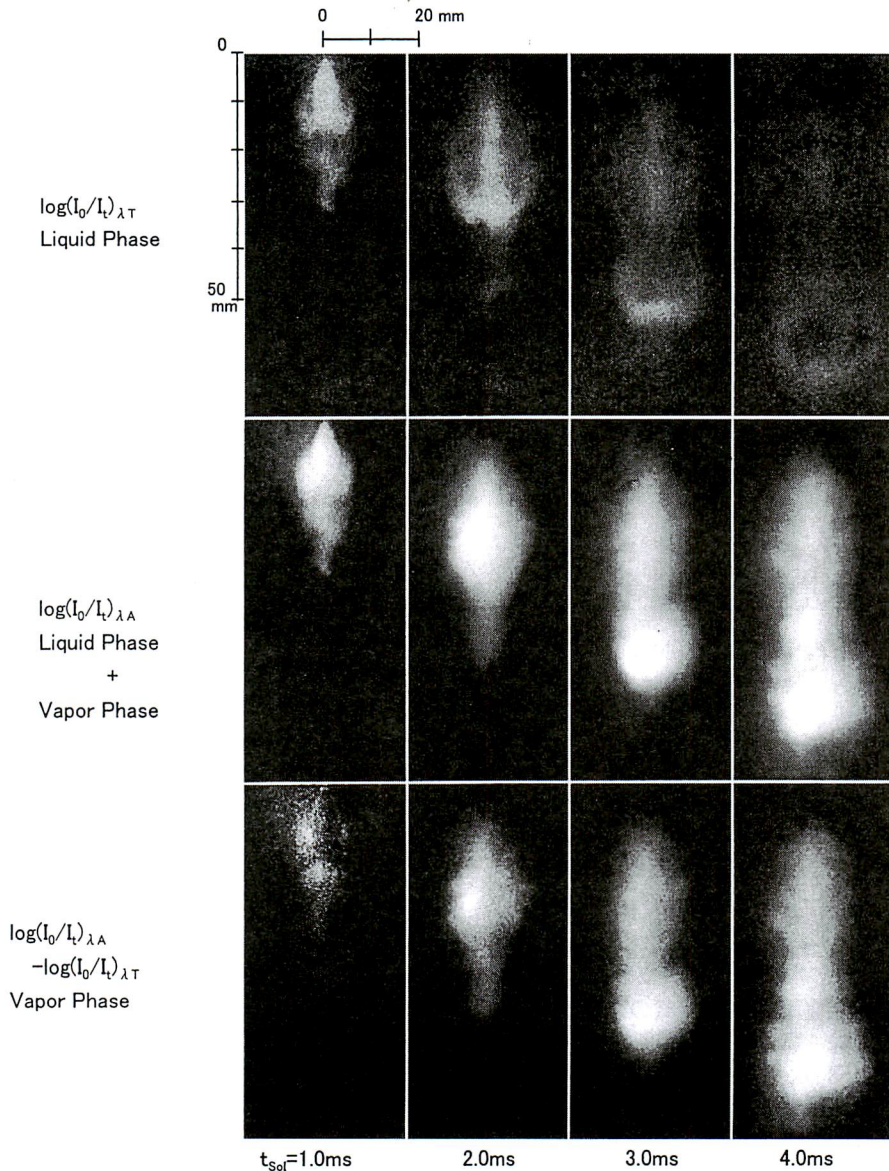


Fig. 11 Extinction Images of Evaporating Spray
 ($P_s=1.0\text{MPa}$, $T_s=500\text{K}$, $P_f=5.0\text{MPa}$, $t_{inj}=0.9\text{ms}$, $M_f=6.0\text{mg}$)

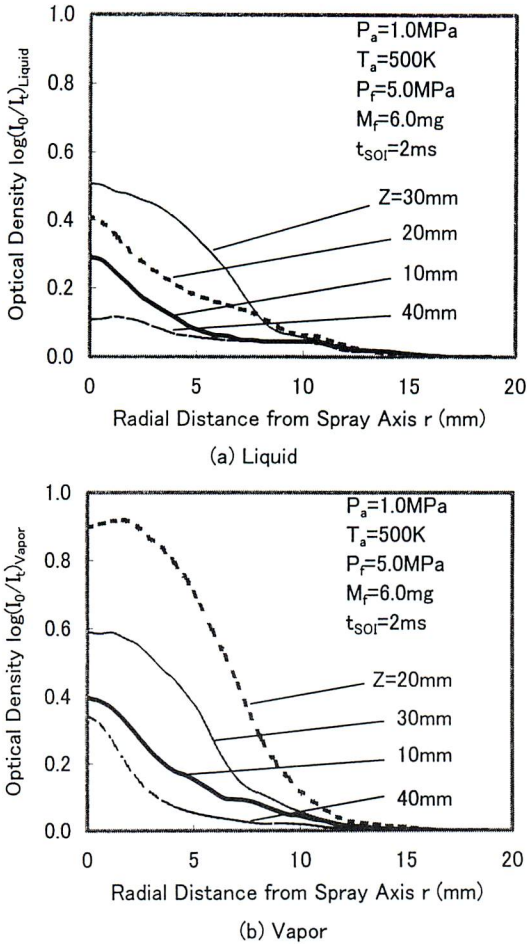


Fig. 12 Line Distributions of Optical Density

5. まとめ

ディーゼル噴霧混合気形成過程の解析で実績のある二波長レーザ吸収散乱法(Laser Absorption Scattering : LAS)を直噴ガソリン噴霧の混合気形成過程解析に適用し、高温高圧雰囲気中に直噴ガソリンインジェクタから噴射した p-キシレン噴霧中の液相と蒸気相分布の計測を行った。本報告の結果をまとめると以下のである。

- (1) p-キシレンは微粒化や蒸発に関する物性値がガソリンに近く、また紫外域で強い吸収、可視域では吸収を示さないため、LAS 計測用の燃料として適している。
- (2) p-キシレンの蒸気相のモル吸光係数はディーゼル噴霧の LAS 計測用の燃料であるジメチルナフタレン、 α -メチルナフタレンと比べ温度依存性が小さい。また圧力依存性はほとんど無い。
- (3) p-キシレンを直噴ガソリンインジェクタから噴射した噴霧における紫外光の液滴群による吸収は無

視できる。これにより紫外光と可視光の透過光減衰率画像の差分により、蒸気の透過光減衰画像を分離できる。

- (4) 直噴ガソリンインジェクタから p-キシレンを高温高圧窒素中に噴射し、蒸発噴霧の撮影を行った結果、蒸発噴霧の液相と蒸気相を分離計測可能な透過光減衰率画像が得られた。

参考文献

- (1) Tomoda, T. et al., SAE, 970539 (1997), 1-8.
- (2) 高木靖雄：日本機械学会講習会教材, 96-49 (1996), 7-13
- (3) Preussner, C., Doring, C., Fehler, S., and Kampmann, S., GDI, Interaction Between Mixture Preparation, Combustion System and Injector Performance, SAE Paper, 980498 (1998), 1-19.
- (4) Hentschel, W., Homburg, A., Ohmstede, G., Müller, T., Grunefeld, G., Investigation of Spray Formation of DI Gasoline Hollow-Cone Injectors inside a Pressure Chamber and a Glass Ring Engine by Multiple Optical Techniques, SAE Paper, 1999-01-3660 (1999), 1-11.
- (5) Le Coz, J.F., Hermat, L., Quantification of Fuel Concentrations and Estimation of Liquid/Vapor Ratios in Direct Injection Gasoline Sprays by Laser-Induced Fluorescence, SAE Paper, 2001-01-0916 (2001), 1-11.
- (6) Voges, H., Berg, T., Weide, D., Müller, T., Beushausen, V., Kruger, S., Grunefeld, G., Spray Imaging Systems for Quantitative Spray Analysis, 5th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems (2000), 139-146.
- (7) Froba, A., Rabenstein, F., Munch, K., Leipertz, A., Mixture of Triethylamine and Benzen as a New Seeding Material for Quantitative Two-Dimensional Laser-Induced Exciplex Fluorescence Imaging of Vapor and Liquid Fuel Inside SI Engines, Combust. Flame 112 (1998), 199-209.
- (8) Kramer, H., Munch, K., Leipertz, A., Investigation of Fuel Evaporation Inside the Intake of a SI Engine Using Laser Induced Exciplex Fluorescence with a New Seed, SAE Paper, 961930 (1996), 101-107
- (9) Ipp, W., Wagner, V., Kramer, H., Wensing, M., Leipertz, A., Arndt, S., K.Jain, A., Spray Formation of High Pressure Swirl Gasoline Injectors Investigated by Two-Dimensional Mie and LIEF Techniques, SAE Paper, 1999-01-0498, (1999), 1-11.
- (10) Rabenstein, F., Egermann, J. and Leipertz, A., Quantitative Analysis of Vapor Phase Structures in Transient Liquid Fuel Sprays, The 4th International Symposium COMODIA98, (1998), 435-440.
- (11) Egermann, J., Leipertz, A., Influence of Fuel Properties

in Mixture Formation: An Experimental Analysis for High Pressure Swirl Injectors, SAE Paper, 2000-01-2863 (2000), 1-9.

- (12) Schutte, M., Grunefeld, G., Andersen, P., Hentschel, W., Homburg, A., Nassif-Pugsley, D., Fuel/Air-Ratio Measurements in Direct Injection Gasoline Sprays Using 1D Raman Scattering, SAE Paper, 2000-01-0244 (2000), 1-9.
- (13) Zhao, F., Taketomi, M., Nishida, K., Hiroyasu, H., Quantitative Imaging of the Fuel Concentration in a SI Engine with Laser Rayleigh Scattering, SAE Paper, No.932641, (1993), 1-19.
- (14) Chraplyvy, A.R., APPLIED OPTICS, Vol.20, No.15 (1981), 2620-2624.
- (15) Suzuki, M., Nishida, K. and Hiroyasu, H., Simultaneously Concentration Measurement of Vapor and Liquid in an Evaporating Diesel Spray, SAE Technical Paper, No930863, (1993), 1-23.
- (16) Zhang, Y., Yoshizaki, T. and Nishida, K., Imaging of Droplets and Vapor Distributions in a Diesel Fuel Spray by Means of a Laser Absorption-Scattering Technique, Applied Optics, Vol.39, No.33 (2000), 6221-6229
- (17) 山川正尚：直接噴射式ガソリン機関における噴霧および混合気形成特性に関する実験的研究，広島大学博士論文（2001），67-71
- (18) 編集委員会編，レーザ計測ハンドブック，丸善（1993），235-240 および 304-310.
- (19) 中川正澄：紫外・可視スペクトル，東京化学同人（1963），34-69.
- (20) 小林清志，荒木信幸，牧野敦：燃焼工学：基礎と応用，理工学社（1988），88-96
- (21) 鈴木護：ディーゼル噴霧内における混合気濃度計測法に関する研究，広島大学博士論文（1994），33-88.
- (22) Suzuki, M. et al., SAE Transactions, Vol.102, Journal of Engine Section 3 (1993), 1164-1186.
- (23) 張玉銀ほか：第 16 回内燃機関シンポジウム（2000），211-216.
- (24) VanDerWedge, B. A., Hochgreb, S., Effect of Fuel Volatility and Operating Conditions on Fuel Sprays in DISI Engines:(1) Imaging Investigation, SAE Paper, 2000-01-0535 (2000), 1-14.
- (25) Yamakawa, M., ishiki, S., Yoshizaki, T. and Nishida, K., Measurement of Ambient Air Motion of D.I.Gasoline Spray by LIF-PIV, COMODIA(2001), 499-504.



山川 正尚
マツダ株式会社
〒730-8670 広島県安芸郡
府中町新地 3-1
Tel : 082-287-4735
Fax : 082-287-5137
略歴：1986 年東北大学工学部精密工学科卒業。同年マツダ(株)入社。2001 年広島大学大学院工学研究科博士過程(後期)終了。現在、直噴ガソリン機関の噴霧、混合気形成、燃焼に関する研究に従事。



高木 大介
広島大学大学院工学研究科
博士課程前期 2 年
〒739-8527
東広島市鏡山 1-4-1
Tel : 0824-24-7566
Fax : 0824-22-7034
略歴：2001 年広島大学工学部第一類(機械系)卒業。直噴ガソリン噴霧の混合気形成に関する研究に従事。



西田 恵哉
広島大学大学院工学研究科
助教授
〒739-8527
東広島市鏡山 1-4-1
Tel : 0824-24-7562
Fax : 0824-22-7034
略歴：1980 年広島大学大学院工学研究科博士課程前期修了。久保田鉄工(現クボタ)を経て広島大学工学部助手、1990 年より現職。1995 年 10 月より 10 ヶ月、米国ミシガン大学客員研究員。広島大学燃焼工学研究室において噴霧のレーザ応用・画像計測、微粒化機構、ディーゼル噴霧、エンジン内混合気形成に関する研究に従事。



張 玉銀
広島大学大学院工学研究科
助手
〒739-8527
東広島市鏡山 1-4-1
Tel : 0824-24-7562
Fax : 0824-22-7034
略歴：1989 年中国西安交通大学大学院修士課程修了。同大学助手、講師、助教授。1994 年 10 月より 1 年、ドイツカールスルーエ大学客員研究員。2001 年 3 月広島大学大学院工学研究科博士課程後期修了。同年より現職。現在、噴霧のレーザ計測、ディーゼル噴霧の形成過程などに関する研究に従事。