

学術フロンティア「次世代ゼロエミッション・エネルギー変換システム」2005.12.10

技術セミナー「噴霧燃焼過程の工学的手法の基礎と応用」

燃料噴霧の光学的計測手法の紹介



同志社大学大学院工学研究科

大嶋元啓

 Doshisha University – Energy Conversion Research Center & Spray and Combustion Science Lab. –

目次

1. 噴霧と光学的計測
2. レーザー誘起蛍光(LIF)法の解説
3. シュリーレン撮影法の解説
4. シャドウグラフ撮影法の解説

 Doshisha University – Energy Conversion Research Center & Spray and Combustion Science Lab. –

Can You catch up a Finger Print of God !?

噴霧 神の作りしもの 

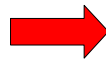
いまだ不明な部分が存在する

噴霧特性の評価項目

- (1)個々の粒子に関する評価項目
液滴の形状(球形？,非球形？)
- (2)粒子群に関する評価項目
粒径分布,平均粒径(SMD etc)
- (3)噴霧の運動に関する評価項目
噴霧粒子の濃度,運動する粒子群の粒径測定
- (4)噴霧構造に関する評価項目
A/F(中空噴霧？,中実噴霧？)

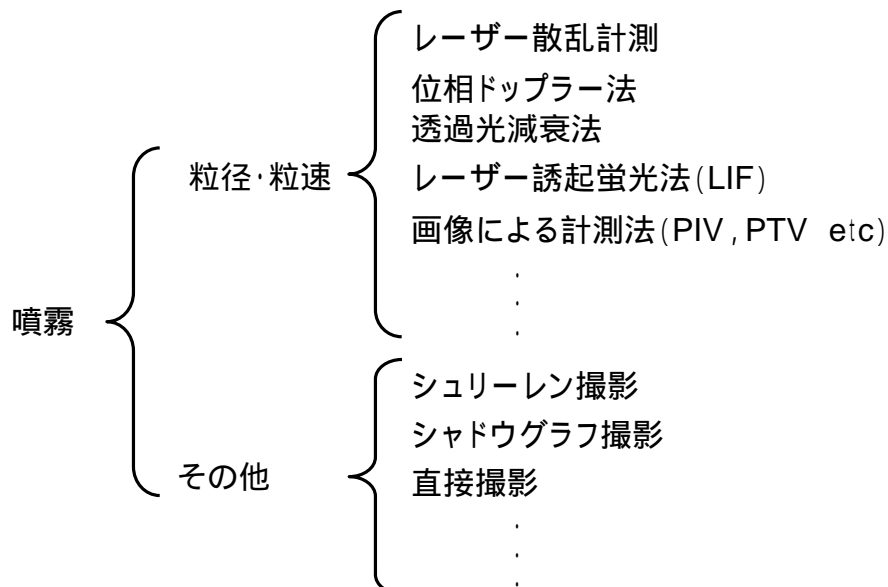
実現象への確実な把握

(catch up a finger print of god)



噴霧の光学的計測

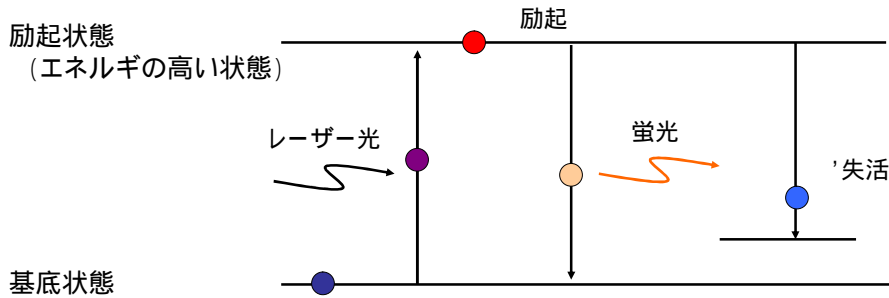
噴霧の光学的計測法の分類



レーザー誘起蛍光法 (LIF) の原理

レーザー誘起蛍光法 (Laser Induced Fluorescence)

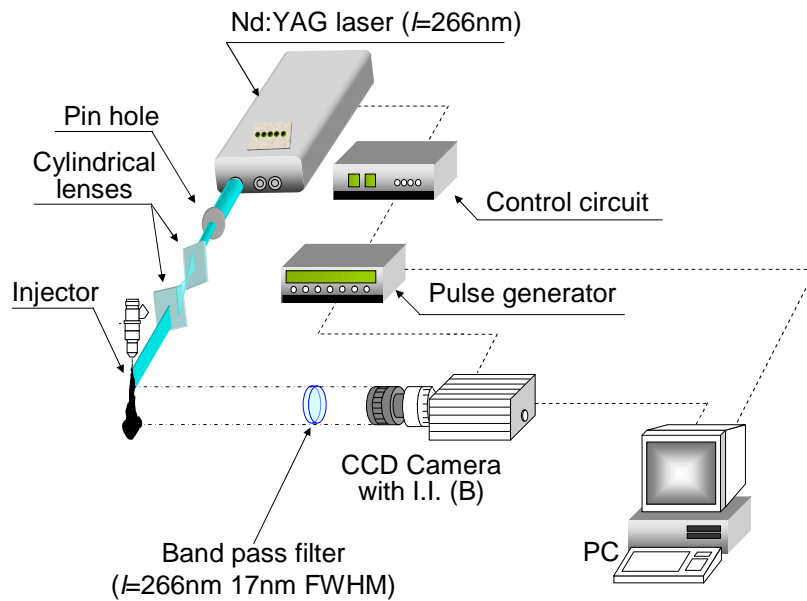
ある特定の原子や分子が適切な波長のレーザー光により励起され、それが基底準位に戻るときに発生する蛍光を検出するもの









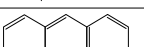

単位面積あたりの蛍光強度

$$I_f(r, z) = I_0 \cdot e^{-kx} \cdot C_1 \cdot \int_0^\infty D^3 \frac{dn}{dD} dD \quad \text{液滴径の3乗に比例する}$$

レーザー誘起蛍光法 (LIF) の光学系



Fluorescence Wavelength of Tracers

Tracer	Molecular Structure	Molecular Weight	B. P. [K]	λ [nm] (Laser)	λ [nm] (Fluorescence)
acetone (CH_3COCH_3)		58.08	330	266	417
TEA ($(\text{C}_2\text{H}_5)_3\text{N}$)		101.19	362	266	350
3-pentanone ($\text{C}_2\text{H}_5\text{COC}_2\text{H}_5$)		86.13	374.5	266	408
pyrrole ($\text{C}_4\text{H}_5\text{N}$)		67.09	403	266	510
tetralin ($\text{C}_{10}\text{H}_{12}$)		132.21	480.2	266	330
TMPD ($\text{C}_{10}\text{H}_{16}\text{N}_2$)		164	533	266	400
anthracene ($\text{C}_{14}\text{H}_{10}$)		178.23	613	266	407
benzene (C_6H_6)		78.11	354	266	280

TMPD = N,N,N',N'-tetramethyl-p-phenylenediamine

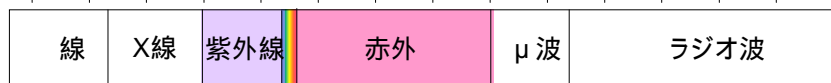
TEA = triethylamine

 Doshisha University – Energy Conversion Research Center & Spray and Combustion Science Lab. –

電磁波スペクトル

波長のスペクトル[nm]

10^{-2} 10^{-1} 10^0 10^1 10^2 10^3 10^4 10^5 10^6 10^7 10^8 10^9 10^{10} 10^{11} 10^{12}



波長[nm]

100 200 300 400 500 600 700

エネルギーの

スペクトル[kJmol⁻¹]

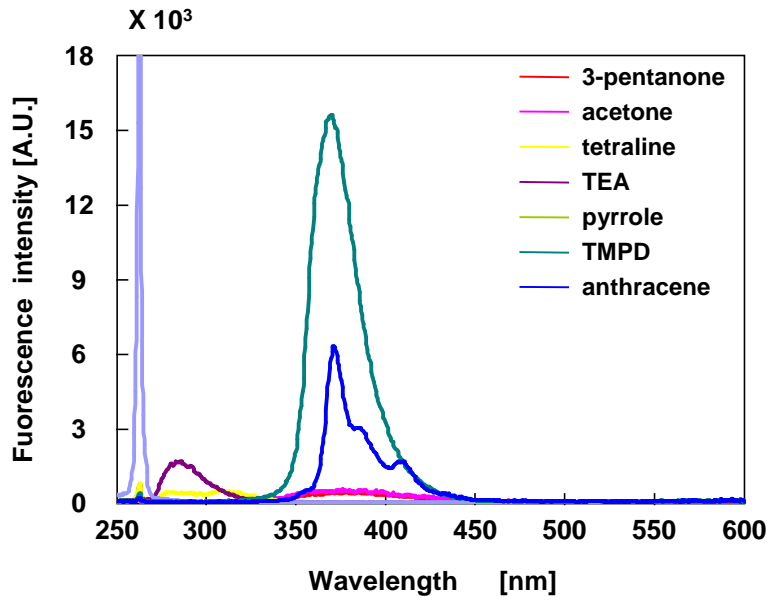
1196 595 399 298 239 199 170

波数[cm⁻¹]

100000 50000 33333 25000 20000 16666 14285

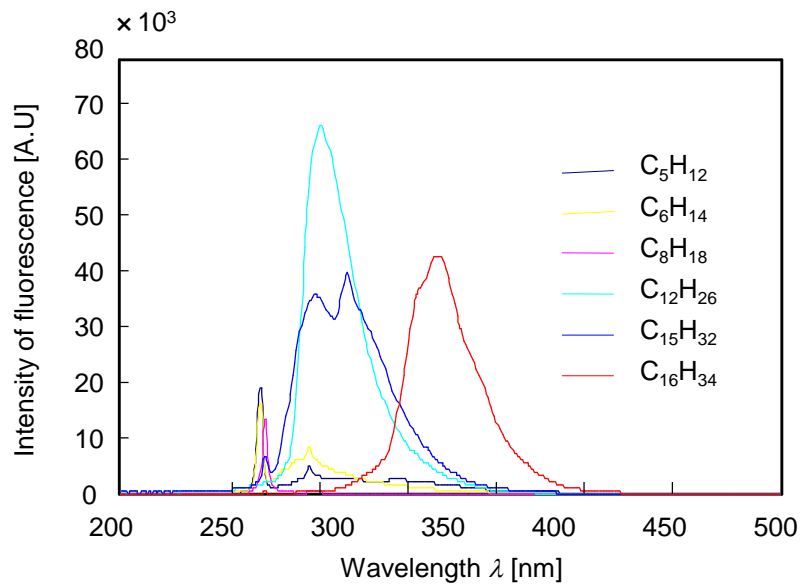
 Doshisha University – Energy Conversion Research Center & Spray and Combustion Science Lab. –

Fluorescence Wavelength of Tracers



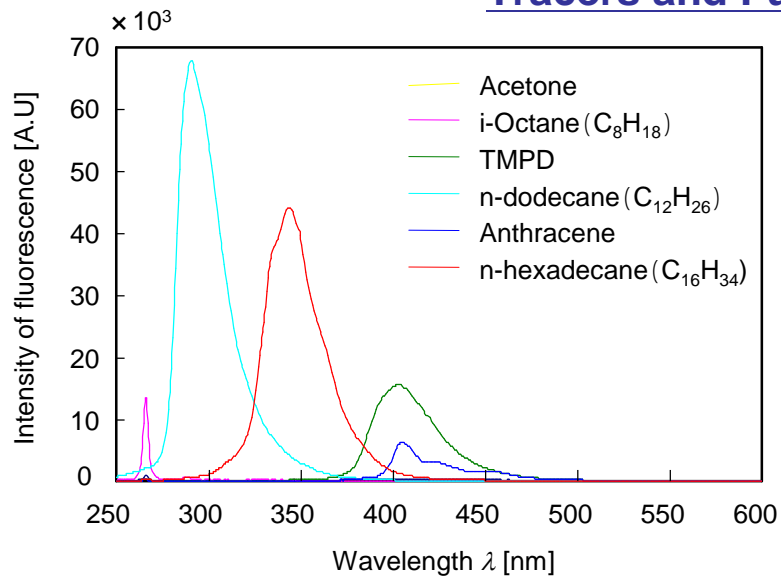
 Doshisha University – Energy Conversion Research Center & Spray and Combustion Science Lab. –

Fluorescence Wavelength of Fuels

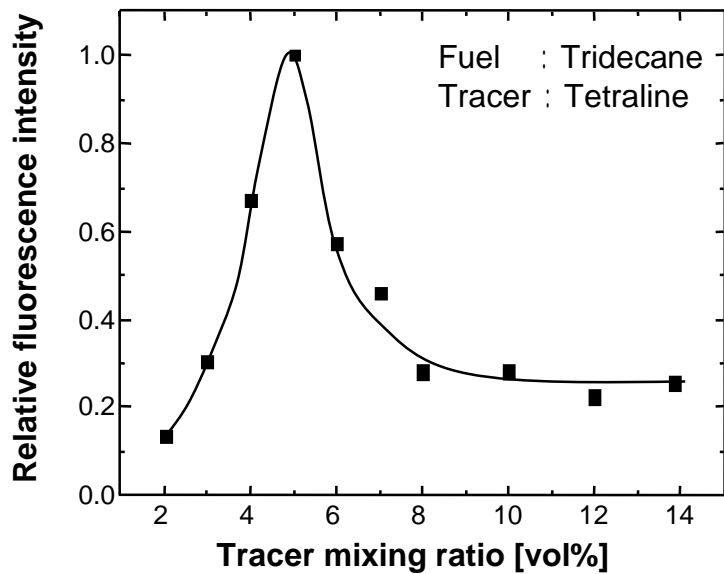


 Doshisha University – Energy Conversion Research Center & Spray and Combustion Science Lab. –

Fluorescence Wavelength of Tracers and Fuels

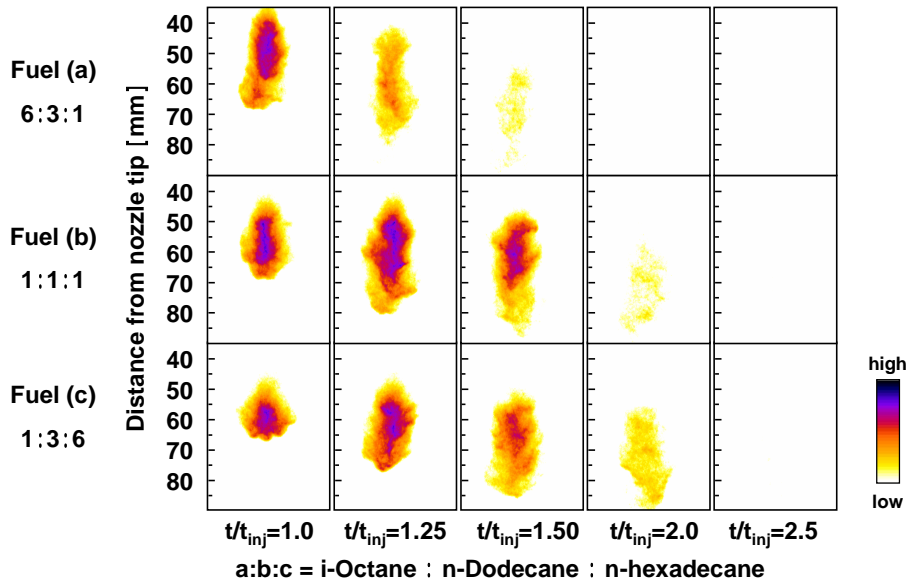


蛍光剤の混合割合におけるLIF強度の変化



Fluorescence Images of TMPD in Multi-component Fuel

($P_{inj} = 72\text{MPa}$, $T_a = 700\text{K}$, $\rho_a = 15\text{kg/m}^3$)



Doshisha University – Energy Conversion Research Center & Spray and Combustion Science Lab. –

噴霧におけるLIF法より把握できる情報

噴霧画像

混合燃料の場合, ある種の燃料の
存在領域を把握することが可能

噴霧の蒸気濃度分布の準定量的な把握

統計力学的エントロピー

$$S = \frac{I_{ij} \ln(I_{max}) - \sum \{I(i) \ln(I(i))\}}{I_{ij} \{\ln(M) - \ln(I_{ij}) + \ln(I_{max})\}}$$

発光の強さより...

温度場, 濃度場の可視化も可能

(燃焼の場合は有効)

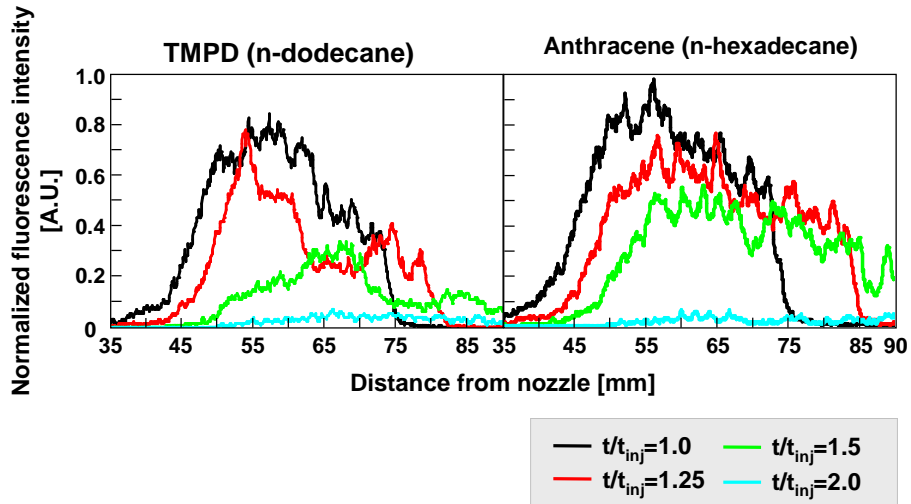
蒸気相の存在領域の把握

Mie散乱撮影等組み合わせることにより可能

Doshisha University – Energy Conversion Research Center & Spray and Combustion Science Lab. –

LIFの画像より解析した例

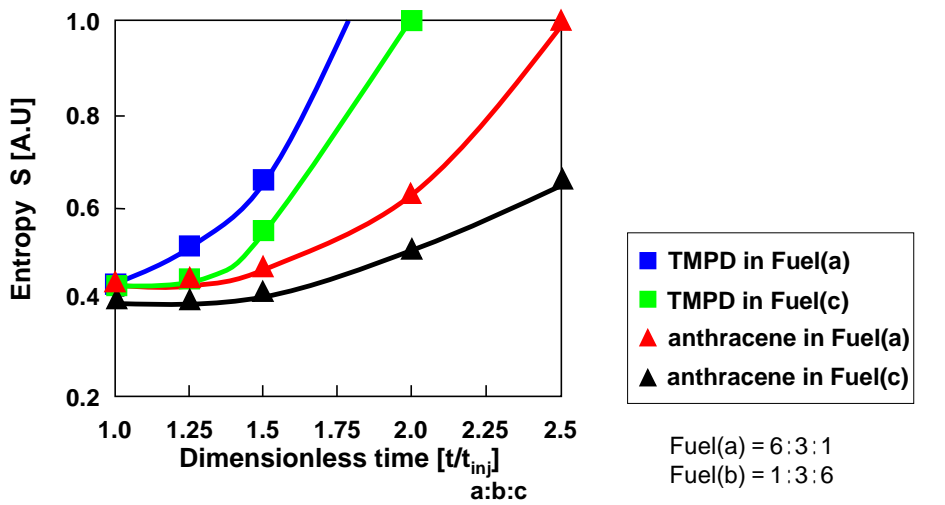
Fluorescence intensity of TMPD & anthracene on the central axis with TAI ($P_{inj}=112\text{MPa}$, i-Octane : n-Dodecane : n-hexadecane=1:1:1)



Doshisha University – Energy Conversion Research Center & Spray and Combustion Science Lab. –

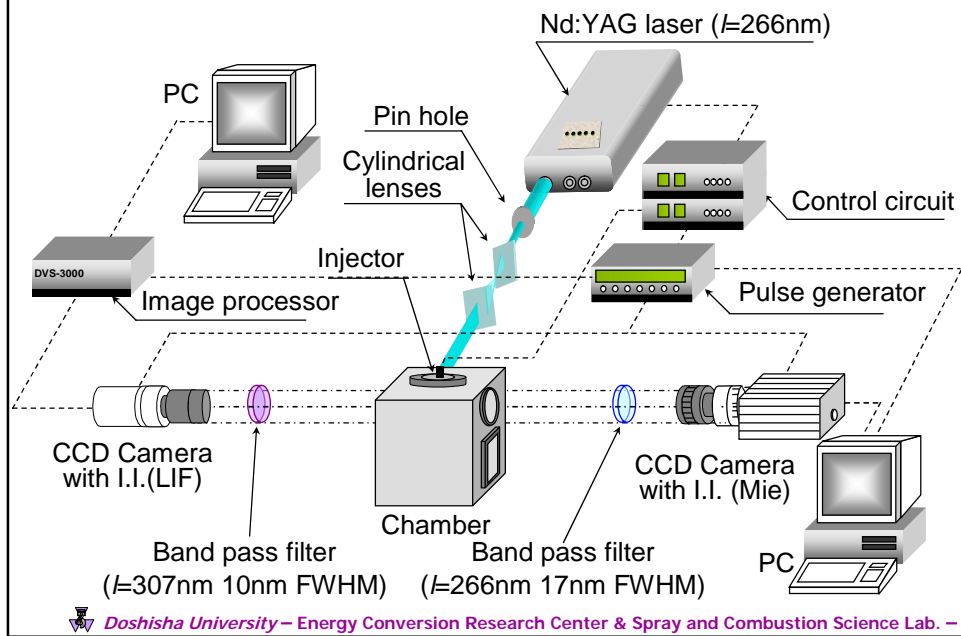
LIFの画像より解析した例

Statistical entropy at TMPD and anthracene ($P_{inj}=72\text{MPa}$, $T_a=700\text{k}$, $\rho_a=15\text{kg/m}^3$)

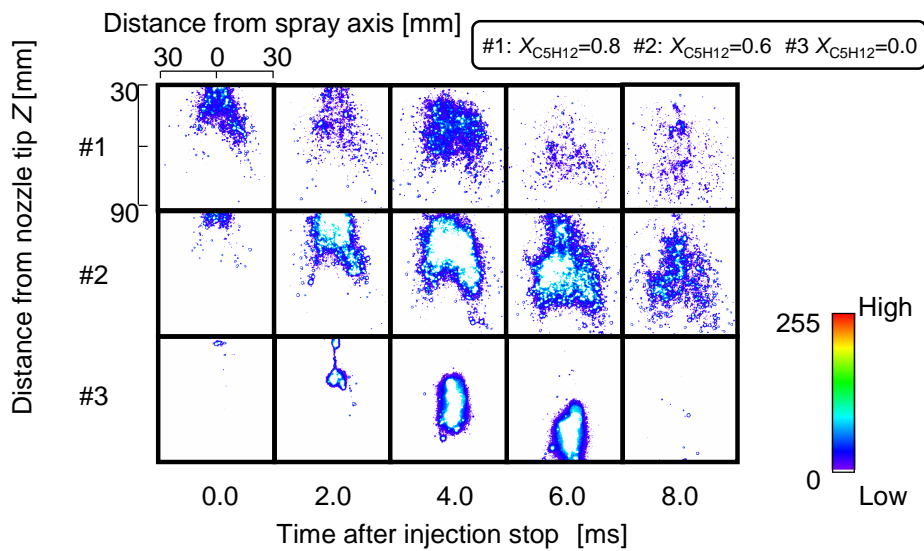


Doshisha University – Energy Conversion Research Center & Spray and Combustion Science Lab. –

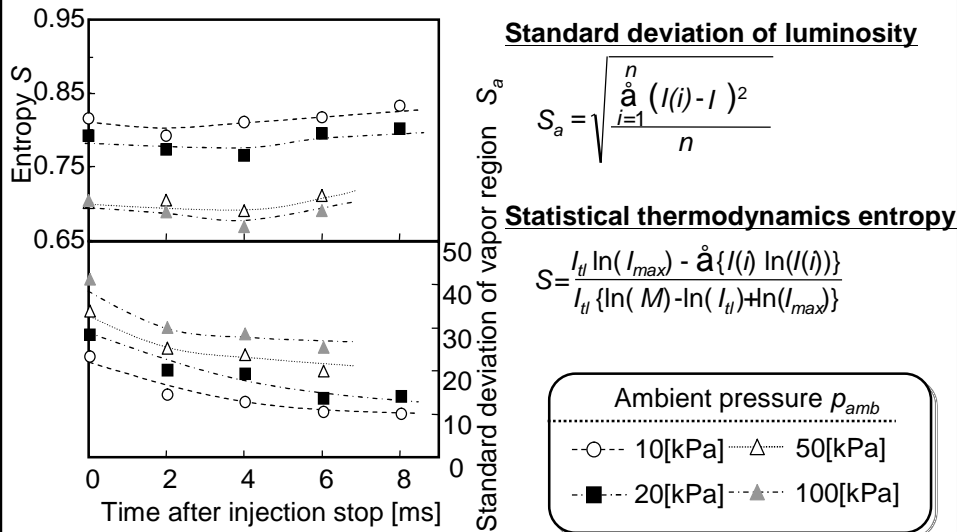
LIF法を使用した応用例 (LIF, Mie同時撮影の光学系)



Temporal Change in Vapor Distributions with LIF Method ($p_{amb}=20[\text{kPa}]$)

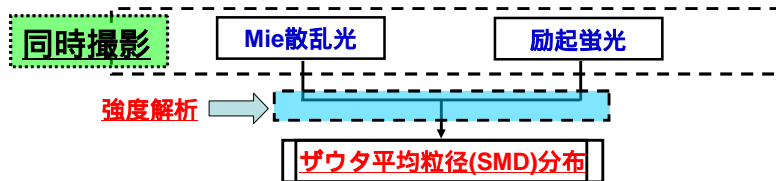


Statistical Thermodynamics Entropy and Standard Deviation of Vapor Region ($X_{C_5H_{12}}=0.6$)



LIFを用いた新たな試み

光学式パターナータを用いた噴霧液滴粒径の計測法



単位面積あたりの蛍光強度 $I_f(r, z) = I_0 \cdot e^{-kx} \cdot C_1 \cdot \int_0^\infty D^3 \frac{dn}{dD} dD$

単位面積あたりの散乱光強度 $I_s(r, z) = I_0 \cdot e^{-kx} \cdot C_2 \cdot \int_0^\infty Q_{sca}(\alpha, \theta, \Delta\theta) \cdot D^2 \frac{dn}{dD} dD$

蛍光強度と散乱光強度の比 $D_{32}(r, z) = \frac{\bar{Q}_{sca}(\alpha_{32}, \theta, \Delta\theta)}{C_1/C_2} \cdot \frac{I_f(r, z)}{I_s(r, z)}$

ザウタ平均粒径 (SMD) $D_{32}(r, z) = \frac{1}{K} \left(\frac{I_f(r, z)}{I_s(r, z)} \right)$

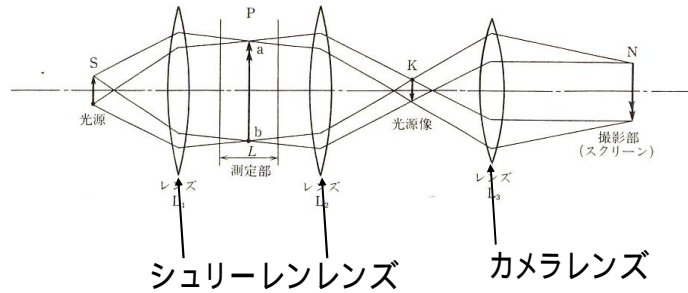
シュリーレン撮影の原理

Schliere [ドイツ語]

空気やガスの中に出る光学的なムラ

測定対象

噴霧における密度ムラを捕らえる



シュリーレン撮影の理論

K点における光束の変位 $h = f_2 \alpha$

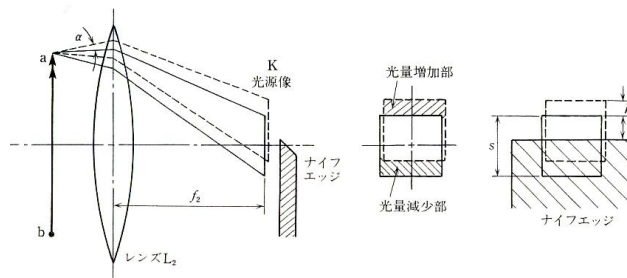
K点においてナイフエッジを設置すると S_1/S 倍に暗くなる

コントラスト c

$$c = \frac{\Delta I}{I} = \frac{h}{s_1} = \frac{f_2 \alpha}{s_1} \propto \frac{f_2 L \beta}{s_1} \frac{d\rho}{dy}$$

シュリーレン感度 E

$$E = \frac{h/s_1}{\alpha} = \frac{c}{\alpha} = \frac{f_2}{s_1}$$



シュリーレン撮影における光学系

光源

点光源が望ましい. 理想的なもの

・水銀灯 :キセノンランプ, 水銀灯, レーザー

カラーシュリーレンには不向き

・レーザー

直進性が良いため光学装置の設定楽

出力が安定

干渉性が高い(He-Neレーザー等)

凹面鏡又は凸レンズ

凹面鏡 色収差, 球面収差あり, 高価, コンパクト可

凸レンズ 色収差, 球面収差なし, 大口径化可

ナイフエッジ

感度を作用する

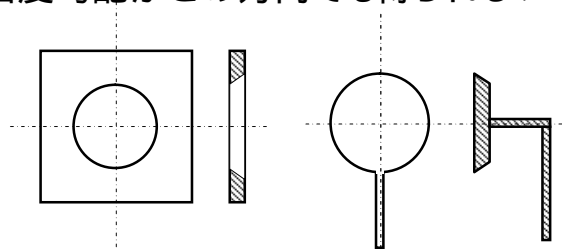
運動している方向の反対側からナイフエッジを切ると良好

ナイフエッジについて

円孔, 円形

観測部における密度勾配がどの方向でも得られる.

ピンホール等

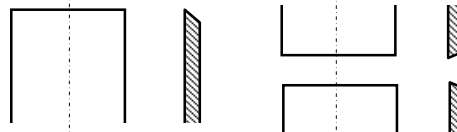


矩形

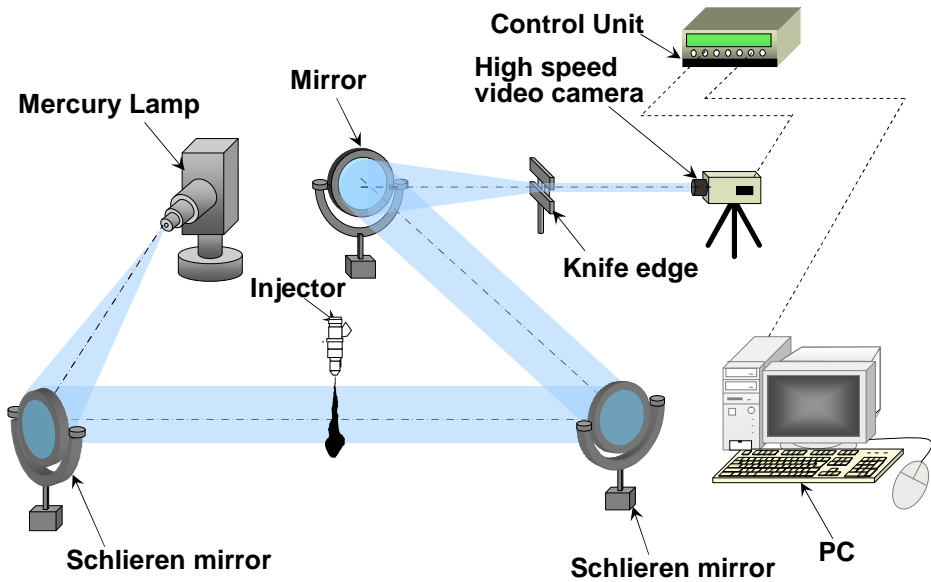
ナイフエッジの入れる方向の逆より密度勾配

かみそりの刃

カッターナイフの刃

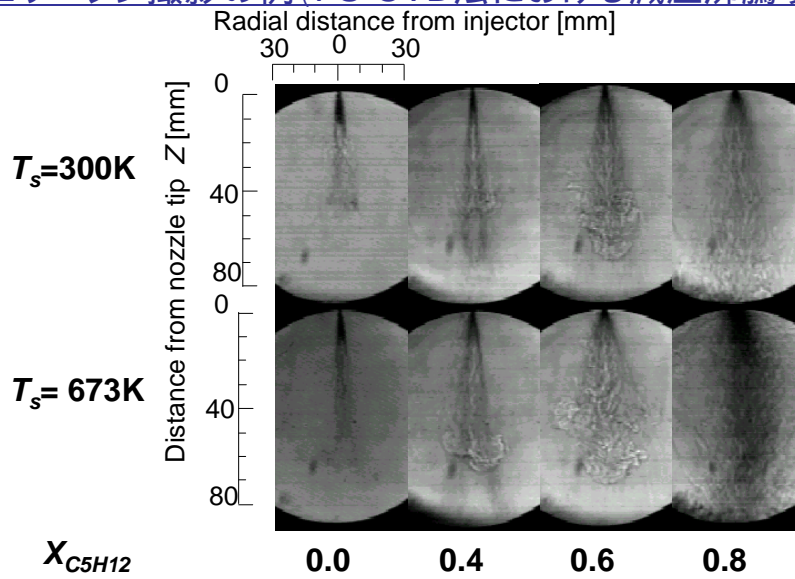


シュリーレン撮影の光学系



Doshisha University – Energy Conversion Research Center & Spray and Combustion Science Lab. –

シュリーレン撮影の例 (FS-CVD法における減圧沸騰噴霧)



溶液: TEOS+n-Pentane混合溶液 $P_{amb} = 20\text{KPa}$

Doshisha University – Energy Conversion Research Center & Spray and Combustion Science Lab. –

噴霧におけるシュリーレン撮影法より把握できる情報

画像
噴霧角
ペネトレーション
蒸気濃度分布

蒸気濃度分布を把握する検定が必要

原理的には...

密度分布

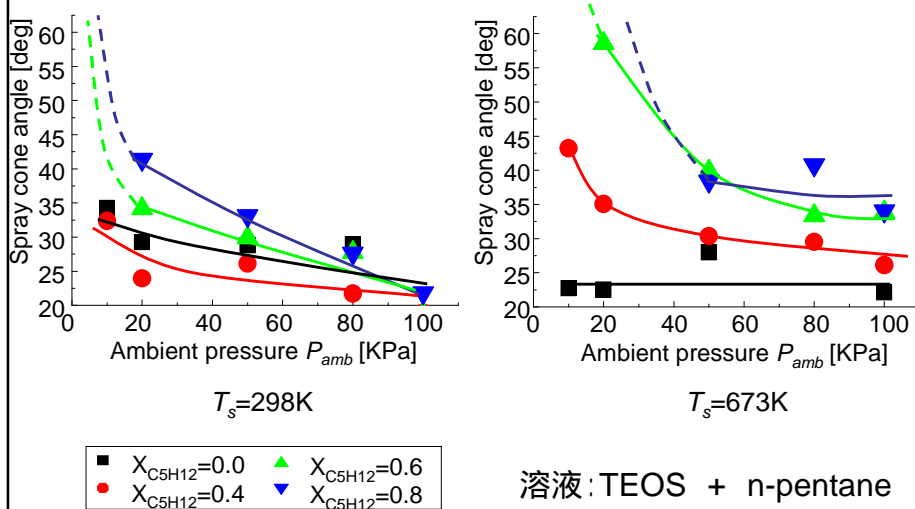
コントラストより算出可だが実際には非常に困難

$$c = \frac{\Delta I}{I} = \frac{h}{s_1} = \frac{f_2 \alpha}{s_1} \propto \frac{f_2 L \beta}{s_1} \frac{d\rho}{dy}$$



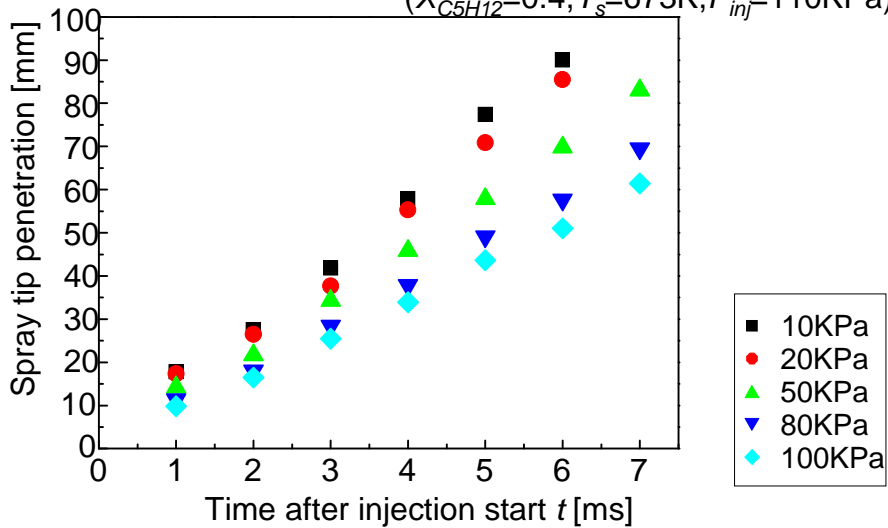
現象の定性的な把握・密度変化部の位置検出可視化に
用いることが多い

シュリーレン撮影画像からの画像解析例 (FS-CVD法における減圧沸騰噴霧の噴霧角)



シュリーレン撮影画像からの画像解析例 (FS-CVD法における減圧沸騰噴霧のペネトレーション)

($X_{C_5H_{12}}=0.4, T_s=673K, P_{inj}=110KPa$)



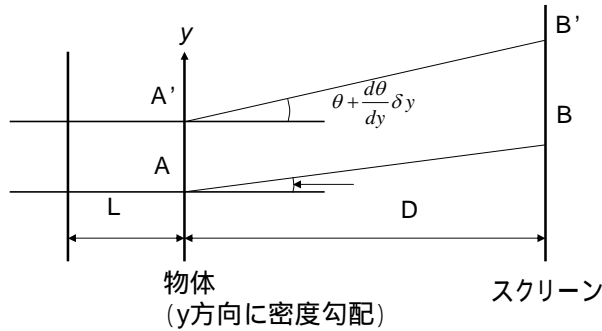
シャドウグラフ撮影の原理

原理

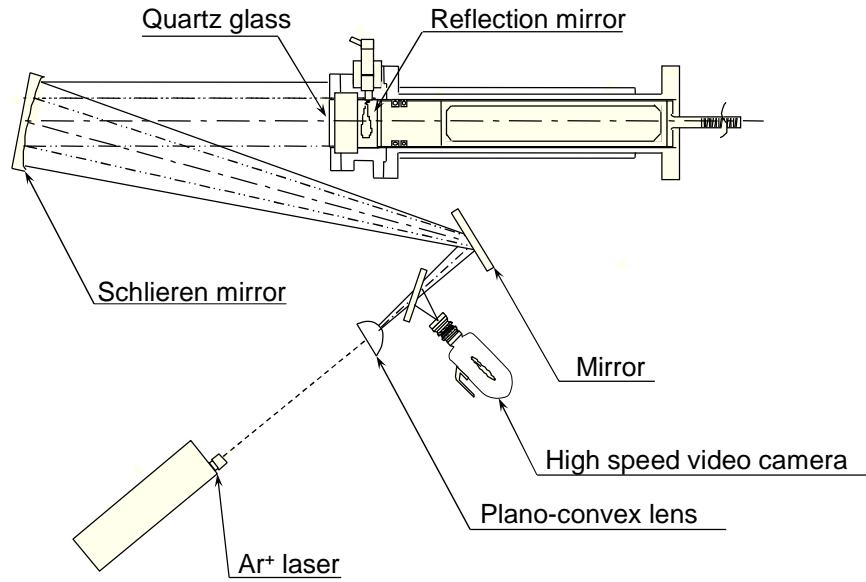
気体あるいは液体の密度変化の光の影を観察するもの

$$\frac{\Delta E}{E_0} = -DK \int_0^L \frac{d^2 \rho}{dy^2} dx$$

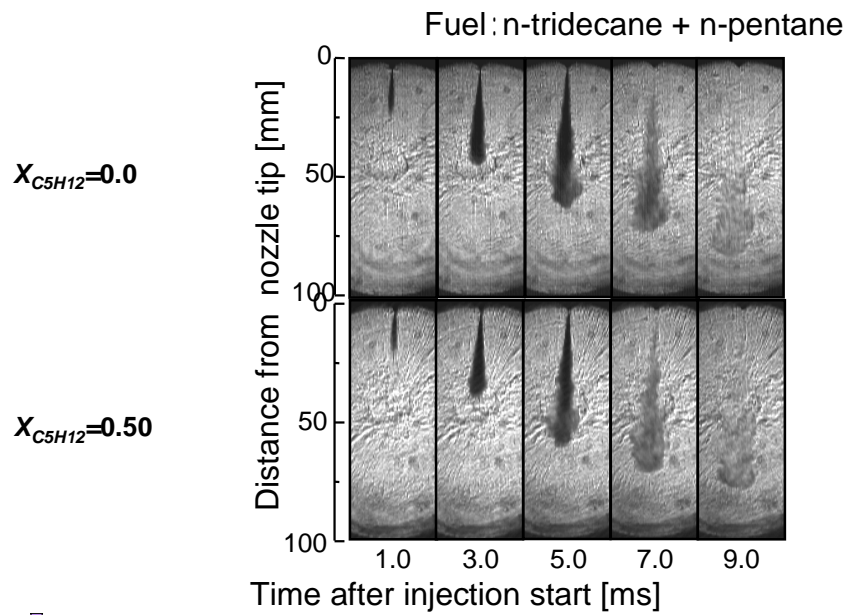
影写真の明暗は密度分布の二次微係数に比例する



シャドウグラフ撮影の光学系 (RCEMを用いた噴霧の観察)



シャドウグラフ撮影の例 (混合燃料のRCEMにおける噴霧)



噴霧におけるシャドウグラフ撮影法より把握できる情報

画像
噴霧角
ペネトレーション

現象が一次元の場合, 原理的には...

密度分布
シャドウグラフ撮影法の理論式より

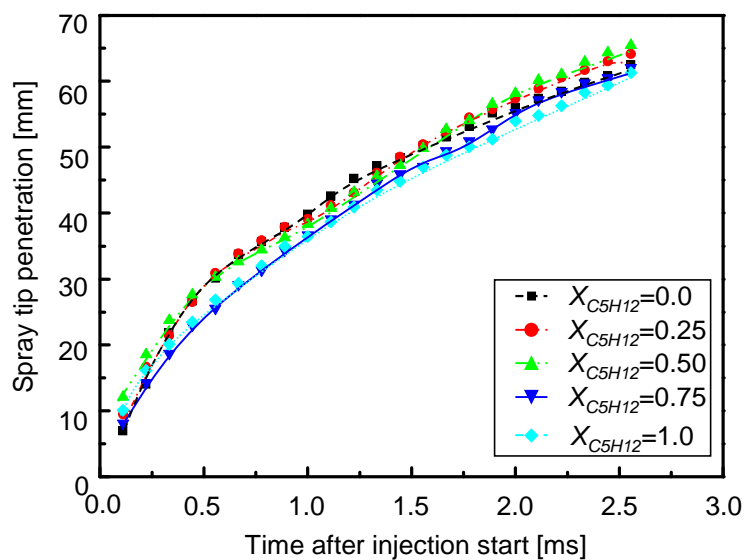
$$\frac{\Delta E}{E_0} = -DK \int_0^L \frac{d^2 \rho}{dy^2} dx$$

温度分布

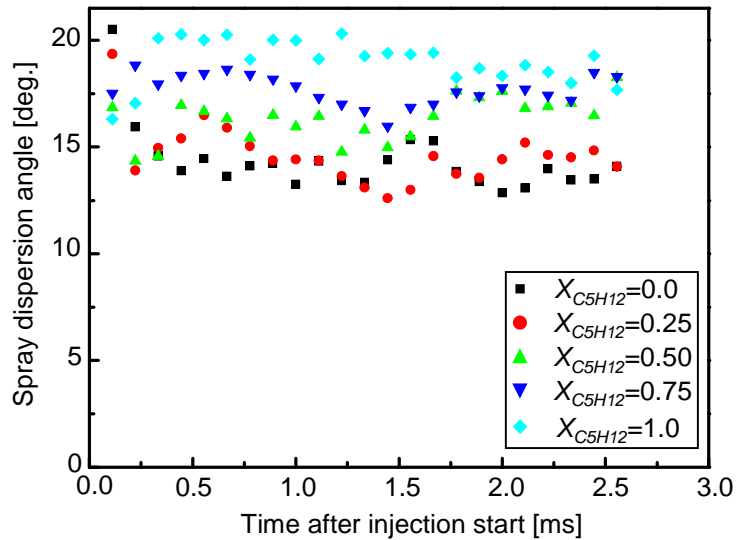
感度的な問題より現実的には不可能


→ シャドウグラフ撮影を現象の可視化に用いることが多い

シャドウグラフ撮影法の画像よりの解析例 (Spray Tip Penetration of C5/C13 Mixed Fuel)



シャドウグラフ撮影画像からの解析例 (Spray Dispersion Angle of C5/C13 Mixed Fuel)



 Doshisha University – Energy Conversion Research Center & Spray and Combustion Science Lab. –

噴霧の光学的計測についての資料等

書籍・Web等

大澤敏彦, 小保方富夫, 「レーザー計測」, 裳華房

浅沼強, 「流れの可視化ハンドブック」, 朝倉書店

レーザー計測ハンドブック編集委員会,
「レーザー計測ハンドブック」, 丸善

Anfo World.com 「<http://www.anfoworld.com/Schliere.html>」

日本液体微粒化学会, 「アトマイゼーションテクノロジー」, 森北出版

同志社大学噴霧燃焼工学研究室, 「<http://comb.doshisha.ac.jp>」

And More . . .

 Doshisha University – Energy Conversion Research Center & Spray and Combustion Science Lab. –

Thank you for
your kind attention



スクリーン上では

$$D\left(\theta + \frac{d\theta}{dy}\delta y\right) - D\theta + \delta y = D\frac{d\theta}{dy}\delta y + \delta y$$

照度の係数

$$\begin{aligned}\frac{E}{E_0} &= \frac{\delta y}{\delta y + D(d\theta/dy)\delta y} \\ &= \frac{1}{1 + D(d\theta/dy)}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{\Delta E}{E_0} &= \frac{E - E_0}{E_0} = \frac{E}{E_0} - 1 \\ &= \frac{-D(d\theta/dy)}{1 + D(d\theta/dy)}\end{aligned}$$

$$d\theta/dy \ll 1$$

$$\frac{\Delta E}{E_0} \approx -D\frac{d\theta}{dy}$$

$$= -D\int_0^L \frac{1}{n} \frac{d^2 n}{dy^2} dx$$

$$\frac{\Delta E}{E_0} = -DK\int_0^L \frac{1}{n} \frac{d^2 \rho}{dy^2} dx$$

