

同志社大学 学術フロンティア共同研究プロジェクト
「次世代ゼロエミッション・エネルギー変換システム」

技術セミナー「噴霧燃焼過程の光学的計測手法の基礎と応用」

2005.12.10 同志社大学京田辺校地 光喜館

噴霧燃焼火炎の光学的計測手法

- ・同志社大学大学院 噴霧・燃焼工学研究室
- ・エネルギー変換研究センター リサーチ・アシスタント

和田 好充

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

光学的計測技術の利点

●非接触測定

被測定対象に対して非接触であり、対象の場を乱さずあるがままの状態 (in-situ) な測定が可能である。

●高時間分解能

数ナノ秒から数十ナノ秒オーダーまでの高い時間分解能で、ほぼ凍結された現象が捕捉される。

●高空間分解能

任意の微小な局所領域の光を抽出することが可能であり、高い空間分解能が得られる。

●二次元断面計測

一次元のポイント計測や光路長積算計測に比べ、ある断面上の二次元情報を得ることが可能であり、非定常現象のある空間情報を取り出すことに優れる。

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

内容

- 化学発光計測
- 噴霧火炎のシャドウグラフ計測
- 画像2色法
- LIIとLISの同時計測

内容

- 化学発光計測
- 噴霧火炎のシャドウグラフ計測
- 画像2色法
- LIIとLISの同時計測

電子の状態

基底状態: Pauliの原理で許されるような方法で, すべての電子をできるだけ低い軌道に集めた状態.

Pauliの原理(排他律)・・・2つ以上のフェルミ粒子が全く同じ量子状態を持つことはできない
(主量子数 n , 方位量子数 l , 磁気量子数 m_l , スピン量子数 s)

● 原子の電子状態

例えばO原子(電子8個)の励起
↳ 2pの価電子4個

*価電子のうち1つが3sに上がる場合

$$L = \sum l_i, (\sum l_i) - 1, (\sum l_i) - 2, \dots, 1, 0$$

$$L = 0, 1, 2, 3 \Leftrightarrow S, P, D, F$$

$$S = \frac{n}{2}, \frac{n}{2} - 1, \frac{n}{2} - 2, \dots, \frac{1}{2} \text{ or } 0$$

$$S = 2, 1, 0$$

$$M = 2S + 1$$

$$M = 5, 3, 1$$

$$J = L + S, L + S - 1, L + S - 2, \dots, |L - S|$$

${}^M L_J \Leftrightarrow {}^3 P_J, {}^1 D_J, {}^1 S_J$ などが確認されている

電子の状態

● 二原子分子の電子状態

例えばC₂の準位 (「気体の燃焼物理」 著者: 金原寿郎 出版: 裳華房)

通常は基底と同じ系に存在する方が大文字になる	状 態		エネルギー単位 (eV)
	三重項	一重項	
		e) ${}^1 \Sigma_g^+$	6.8109
		d) ${}^1 \Sigma_u^+$	5.3592
	B) ${}^3 \Pi_g$	c) ${}^3 \Pi_g$	5.0107
	A) ${}^3 \Pi_g$	b) ${}^1 \Pi_u$	4.2447
A'は後に発見され付け足された	A') ${}^3 \Sigma_g^-$		2.4781
	X) ${}^3 \Pi_u$		1.0251
		x) ${}^1 \Sigma_g^+$	0.7741
			0.0756
			0 (基底)

原子 $L=0, 1, 2, 3 \Leftrightarrow S, P, D, F$ 分子 $\Lambda=0, 1, 2, 3 \Leftrightarrow \Sigma, \Pi, \Delta, \Phi$

化学発光の原理



$$E (E_e + E_v + E_r), KE, PE$$

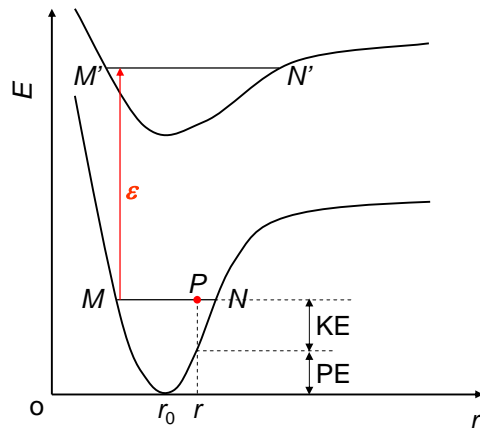
E_e : 電子的エネルギー

E_v : 振動エネルギー

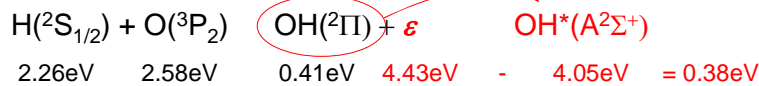
E_r : 回転エネルギー

KE: 運動エネルギー
(両原子核間の振動)

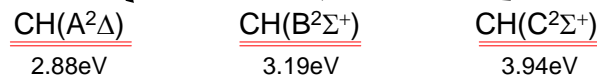
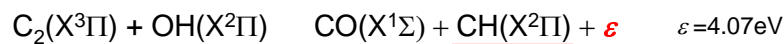
PE: 位置エネルギー
(両原子核間の位置)



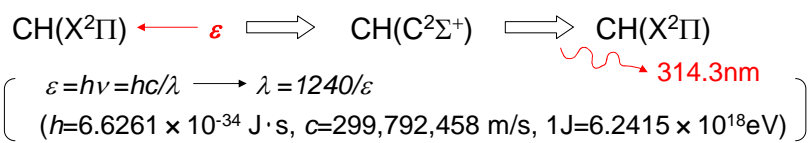
例) H_2/O_2 炎からのOHスペクトルの発生機構



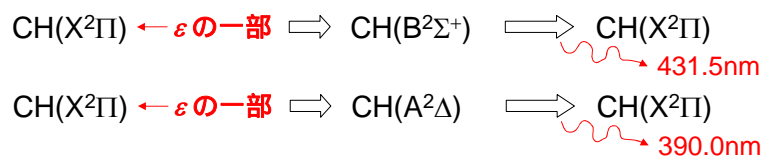
例えばCH*の化学発光 (Gaydon's reaction)



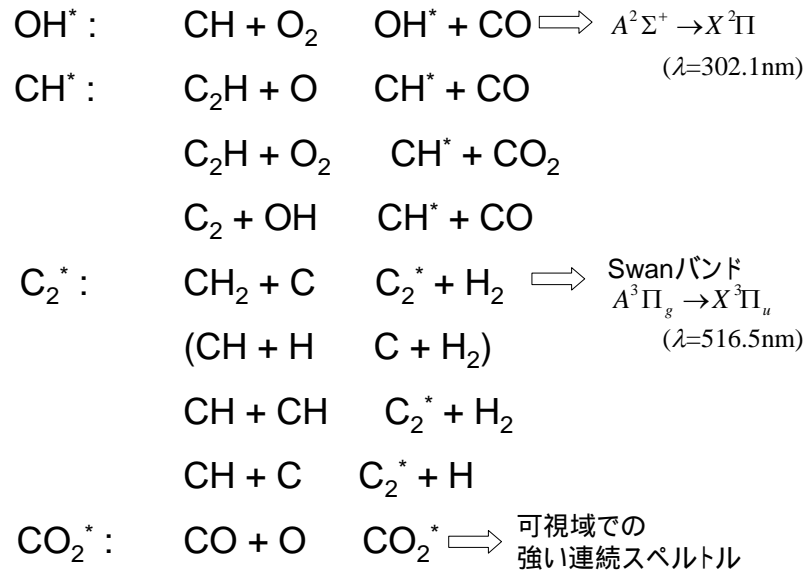
(i) 余剰エネルギー全てがCH(X²Π)に与えられる場合



(ii) 余剰エネルギーの一部がCH(X²Π)に与えられる場合

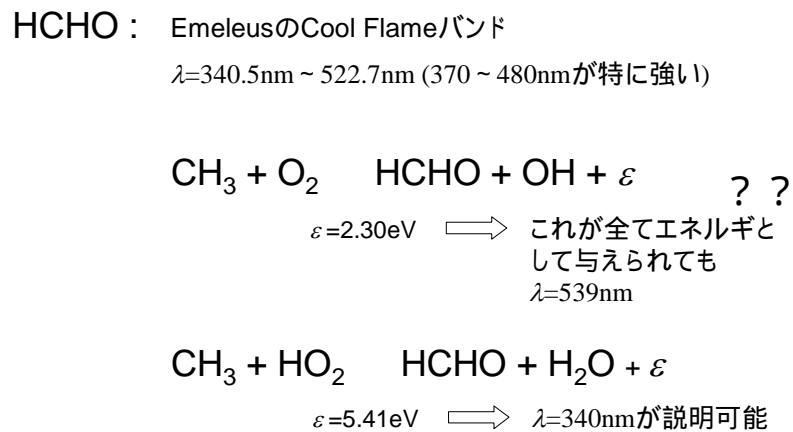


各種炭化水素系成分における化学種の生成機構



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

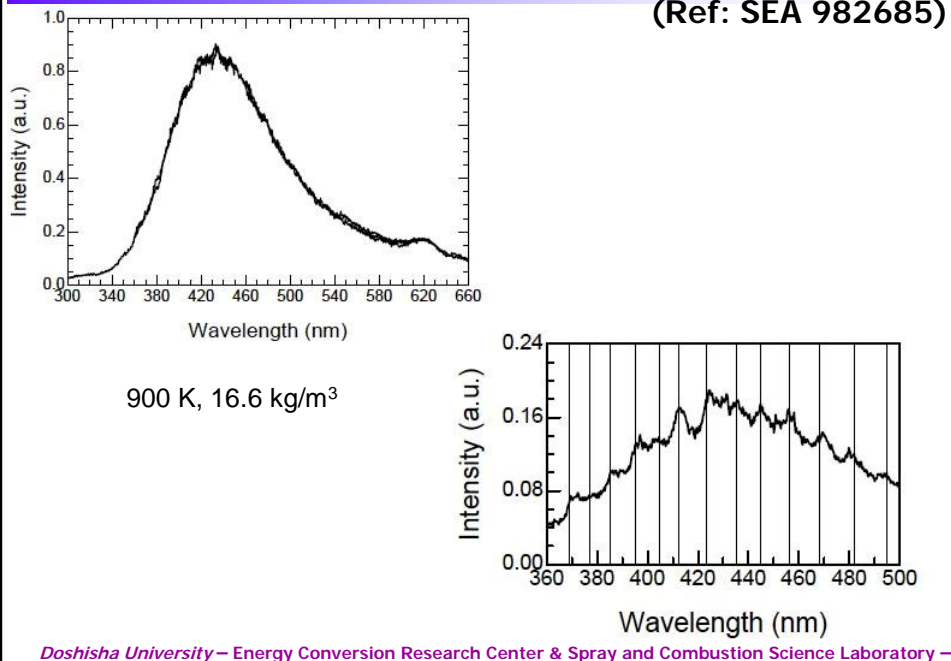
各種炭化水素系成分における化学種の生成機構



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

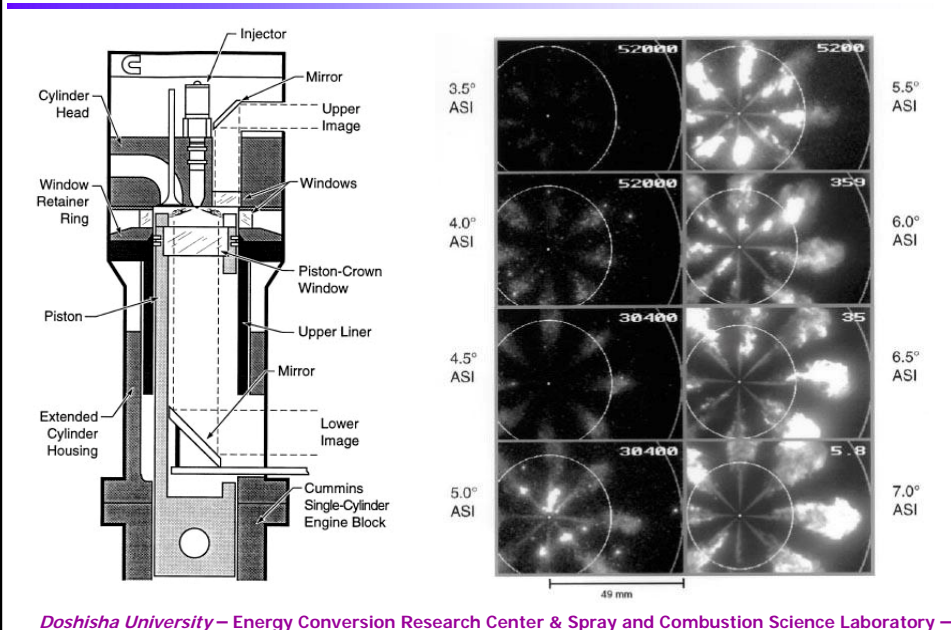
ディーゼル噴霧火炎の燃焼初期における化学発光波長

(Ref: SEA 982685)

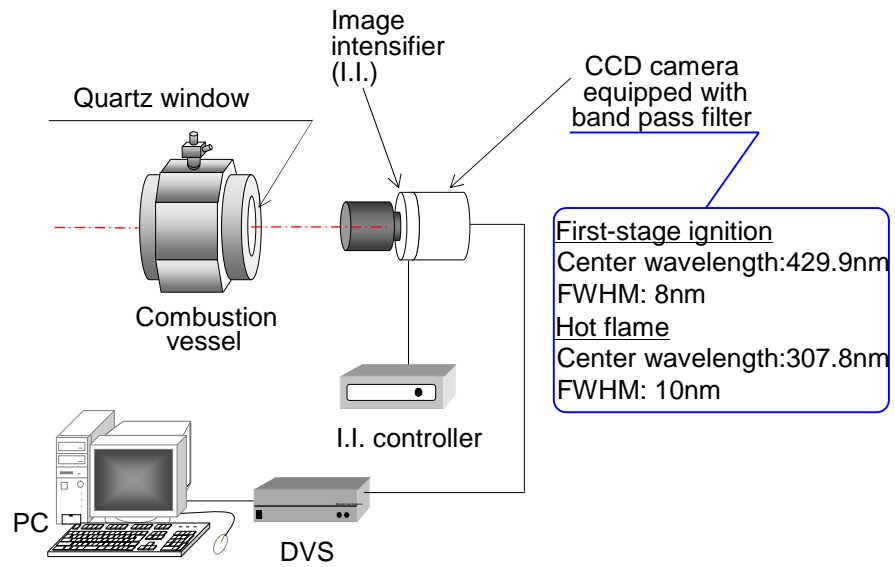


可視化ディーゼル機関において撮影された化学発光画像

(Ref: SEA 982685)

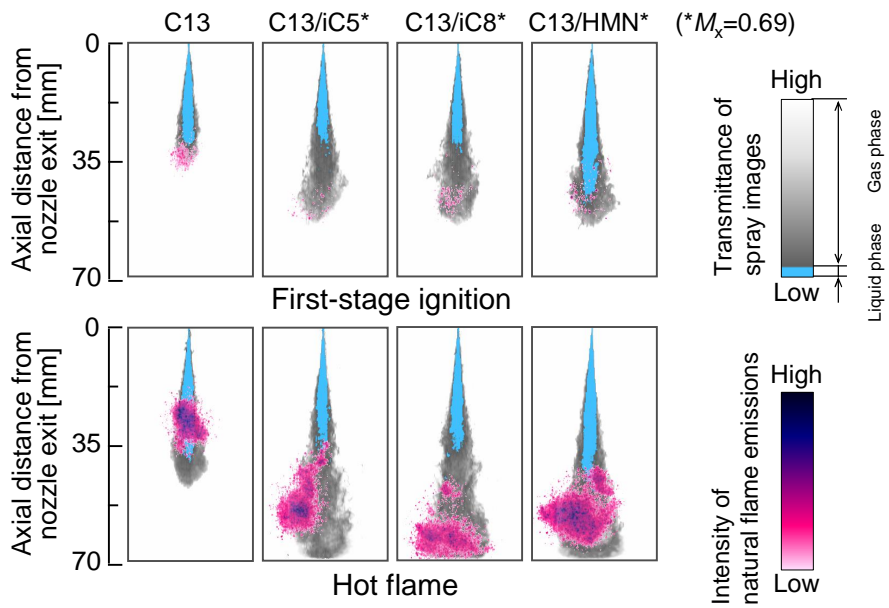


化学発光計測の光学系



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

単成分燃料および混合燃料の着火過程における化学発光



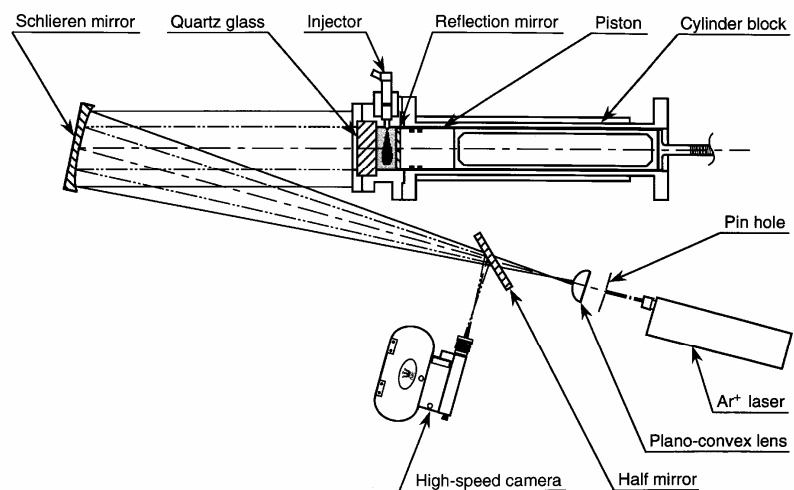
Doshisha University – Energy Conversion Research Center & Spray and Combustion Science Laboratory –

内容

- 化学発光計測
- 噴霧火炎のシャドウグラフ計測
- 画像2色法
- LIIとLISの同時計測

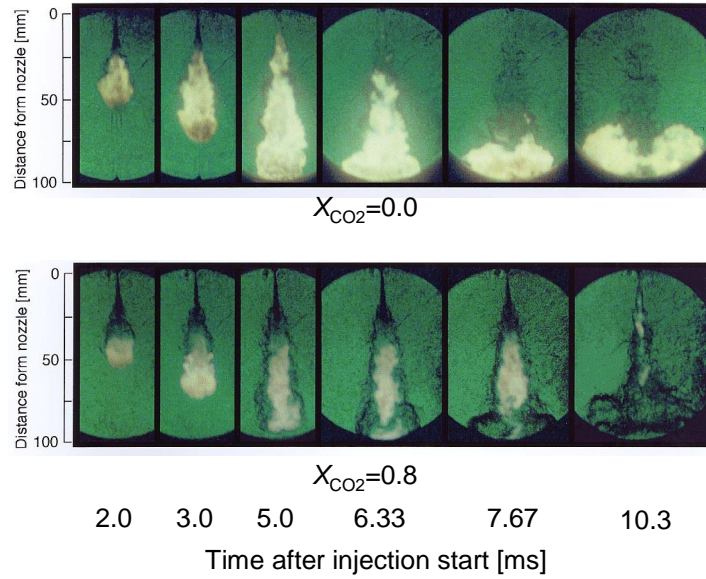
Doshisha University – Energy Conversion Research Center & Spray and Combustion Science Laboratory –

シャドウグラフ撮影の光学系 – Rapid Compression Expansion Machine



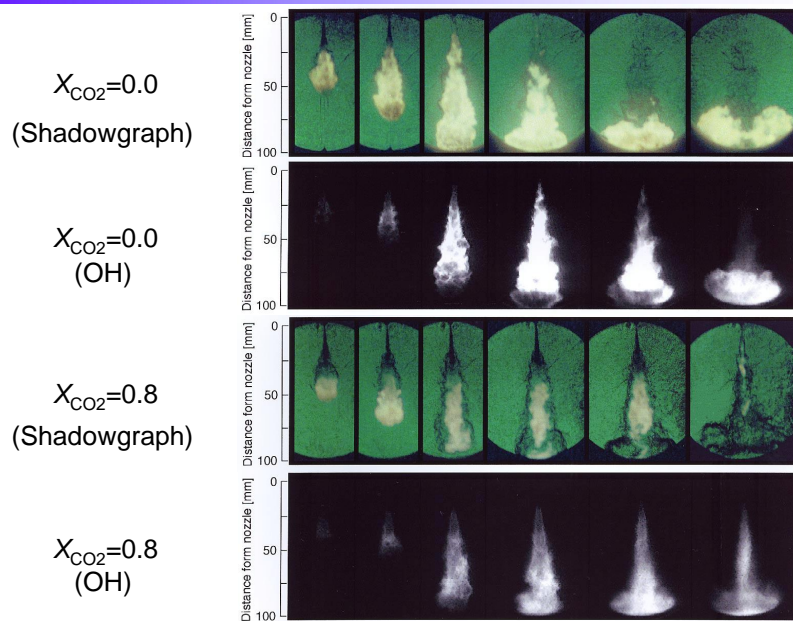
Doshisha University – Energy Conversion Research Center & Spray and Combustion Science Laboratory –

噴霧火炎のシャドウグラフ画像



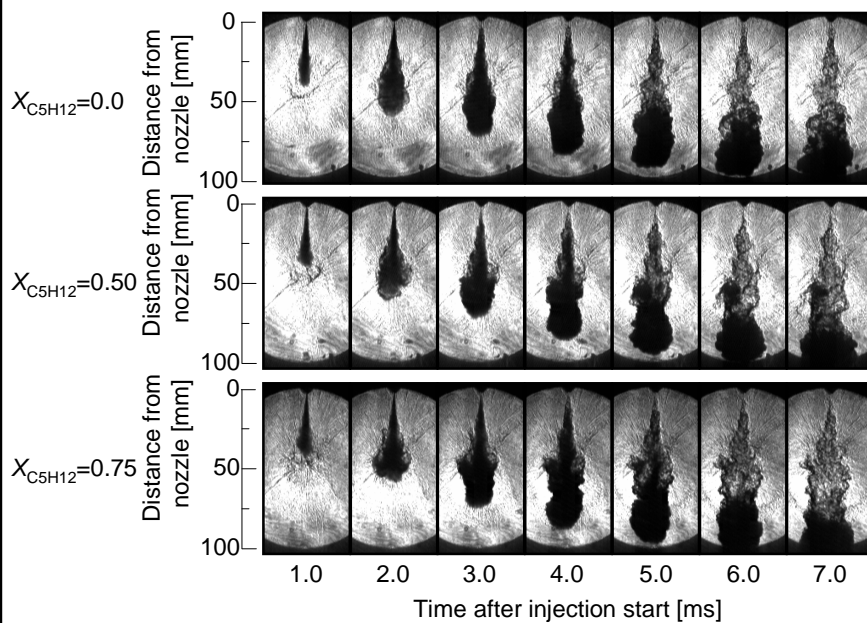
Doshisha University – Energy Conversion Research Center & Spray and Combustion Science Laboratory –

噴霧火炎のシャドウグラフ画像 + 化学種自発光画像



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

噴霧火炎の透過光写真



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

内容

- 化学発光計測
- 噴霧火炎のシャドウグラフ計測
- 画像2色法
- LIIとLISの同時計測

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

火炎2色法の測定原理(1)

Wienの式 (black bodyからの単色ふく射輝度とその波長および温度の関係式)

$$J_0 = C_1 \lambda^{-5} \exp\left(\frac{-C_2}{\lambda T}\right) \quad (1) \quad \left[\begin{array}{l} \text{プランクの放射定数} \\ C_1 = 3.742 \times 10^{-16} [\text{W} \cdot \text{m}^2], C_2 = 1.439 \times 10^{-2} [\text{m} \cdot \text{K}] \end{array} \right]$$

Black bodyとnonblack bodyからの発光輝度の比を火炎の単色射出率 E_λ とすれば、nonblack bodyからの単色ふく射輝度は

$$J = E_\lambda C_1 \lambda^{-5} \exp\left(\frac{-C_2}{\lambda T}\right) \quad (2)$$

nonblack bodyからの単色ふく射輝度に対応する輝度温度を T_a とすれば

$$J = C_1 \lambda^{-5} \exp\left(\frac{-C_2}{\lambda T_a}\right) \quad (3)$$

すす粒子からの単色射出率についてHottel-Broughtonの式が成り立つと仮定すると

$$E_\lambda = 1 - \exp\left(\frac{-KL}{\lambda^\alpha}\right) \quad (4)$$

(4) (2) = (3) より

$$KL = -\lambda^\alpha \ln \left[1 - \exp\left\{ -\frac{C_2}{\lambda} \left(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T} \right) \right\} \right] \quad (5)$$

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

火炎2色法の測定原理(2)

$$KL = -\lambda^\alpha \ln \left[1 - \exp\left\{ -\frac{C_2}{\lambda} \left(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T} \right) \right\} \right] \quad (5)$$

λ_1, λ_2 の2波長について得られる輝度温度 T_{a1}, T_{a2} を(5)式に代入しKLを消去すれば

$$\left[1 - \exp\left\{ -\frac{C_2}{\lambda_1} \left(\frac{1}{T_{a1}} - \frac{1}{T} \right) \right\} \right]^{\lambda_1^{\alpha_1}} = \left[1 - \exp\left\{ -\frac{C_2}{\lambda_2} \left(\frac{1}{T_{a2}} - \frac{1}{T} \right) \right\} \right]^{\lambda_2^{\alpha_2}} \quad (6)$$

火炎の真温度 T が求まる。なお、真温度 T を(5)式に代入すればKL値が得られる。
(可視域における指数 α はおよそ1.38)

<標準電球による検定>

標準電球は650nmにおける輝度温度のみが校正されている。

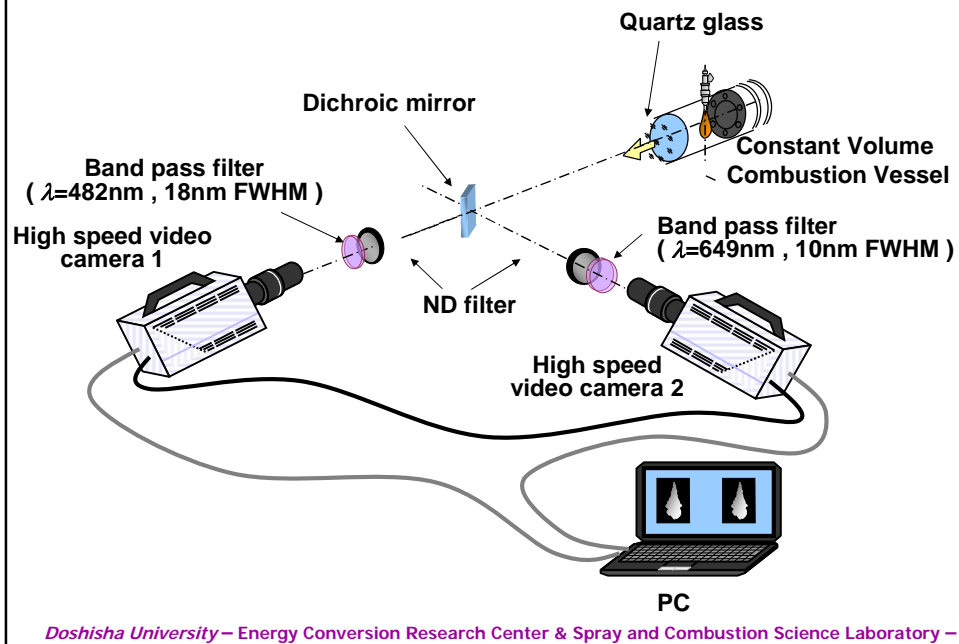
選択波長の輝度温度は下式で与えられるタングステン電球の単色ふく射率と(2)を用いて求められる。

$$E_\lambda = 0.4655 + 0.01558 \lambda + 0.2675 \times 10^{-4} - 0.7305 \times 10^{-4} \lambda T \quad (7)$$

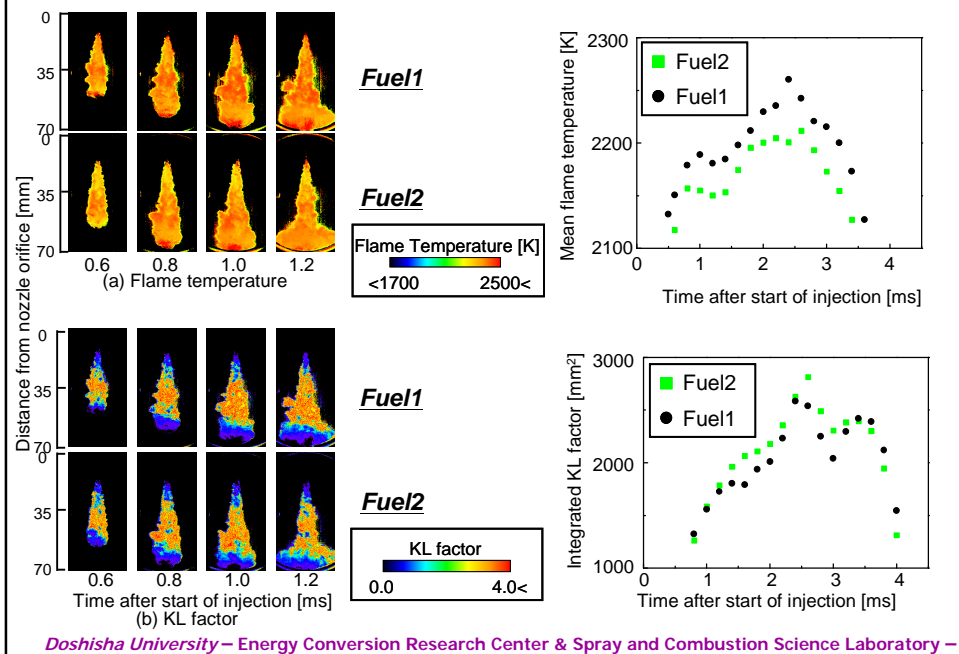
$$J = E_\lambda C_1 \lambda^{-5} \exp\left(\frac{-C_2}{\lambda T}\right) \quad (2)$$

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

火炎二色法の光学系



二色法により得られた火炎温度とKL値の時系列画像



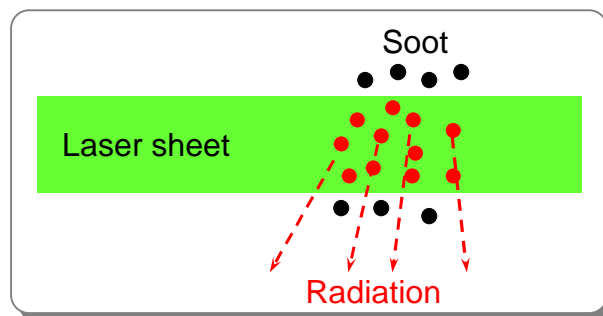
内容

- 化学発光計測
- 噴霧火炎のシャドウグラフ計測
- 画像2色法
- **LIIとLISの同時計測**

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

LII法の原理

Soot particle temperature increases rapidly by high energy laser.



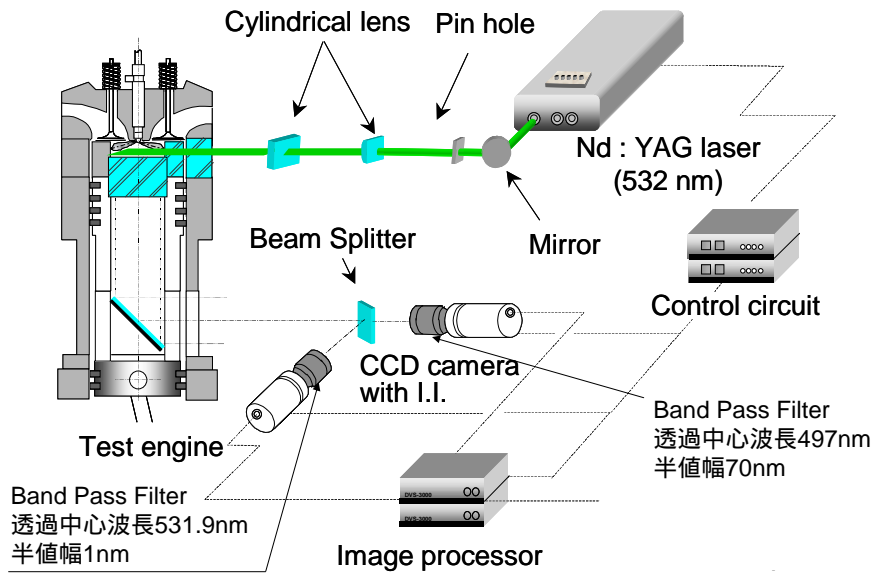
Soot incandescence(LII signal) irradiates.

Visualization of soot distribution

In addition, LII signal intensity $\propto f_v$

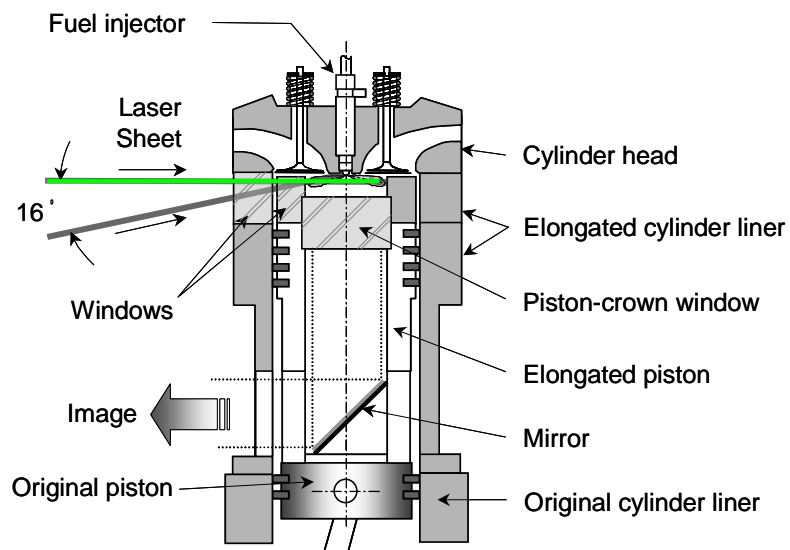
Doshisha University – Energy Conversion Research Center & Spray and Combustion Science Laboratory, DOSHISHA University

可視化機関を用いたLII・LIS同時計測の光学系



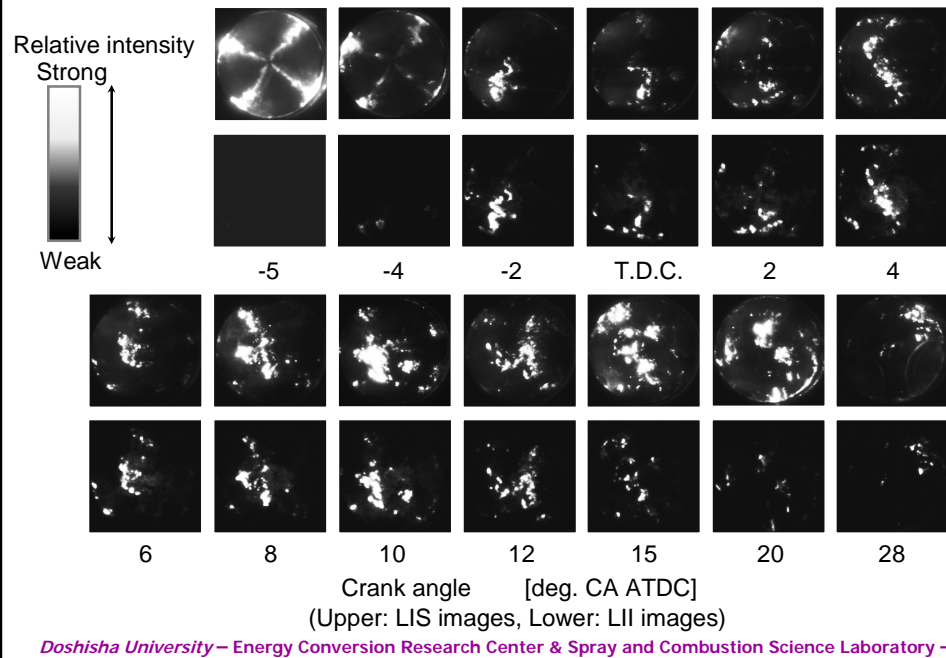
Doshisha University – Energy Conversion Research Center & Spray and Combustion Science Laboratory –

試験機関の断面図

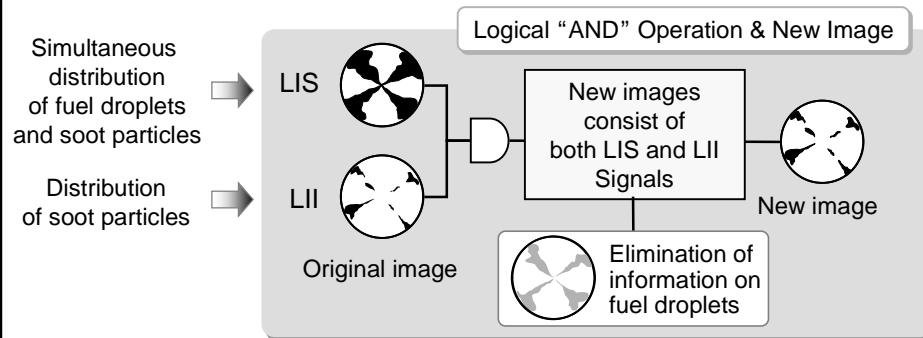


Doshisha University – Energy Conversion Research Center & Spray and Combustion Science Laboratory –

LII・LIS同時計測画像



相対すす粒径および相対すす粒子数の定義



$$I_{LII} \propto N \cdot D^3$$

$$I_{LIS} \propto N \cdot D^6 \iff \alpha = \frac{\pi D}{\lambda} \quad (\alpha < 0.4)$$

$$\left(\begin{array}{l} I_{LII} : \text{LIIの輝度 } D : \text{すす粒径} \\ I_{LIS} : \text{LISの輝度 } N : \text{すす数密度} \end{array} \right)$$

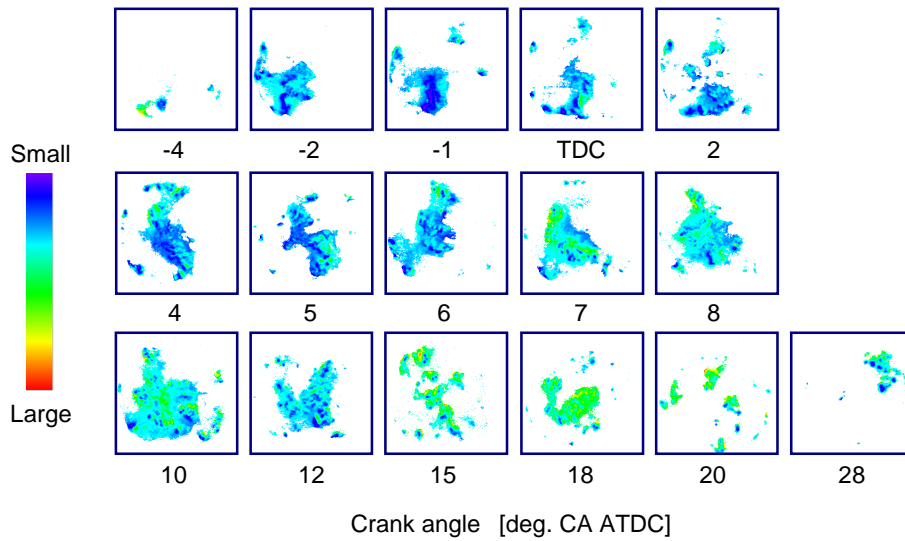
相対すす粒径

相対すす数密度

$$D_r = (I_{LIS} / I_{LII})^{1/3}$$

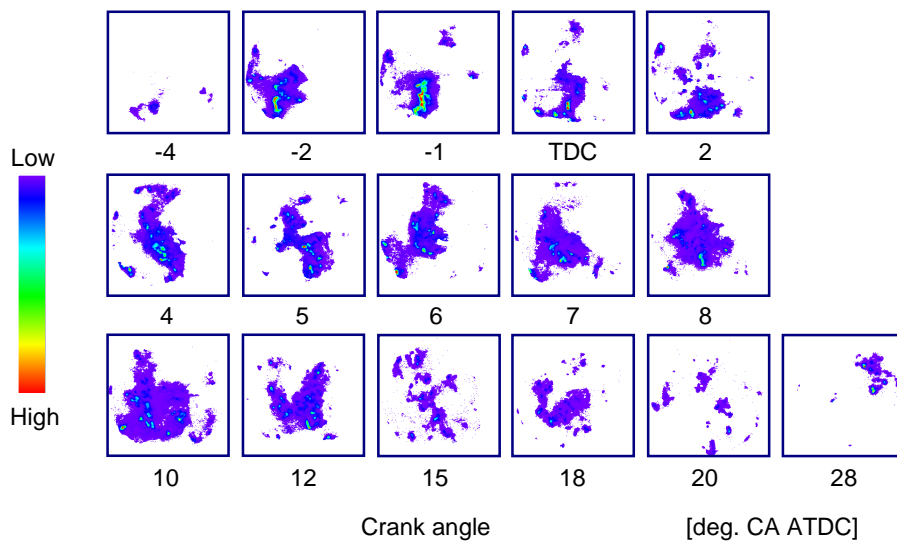
$$N_r = (I_{LII})^2 / I_{LIS}$$

相対すすり粒子径の2次元分布



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

相対すすり数密度の2次元分布



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



Thank you for your kind attentions !

二色法により得られた火炎温度とKL値の時系列画像

