励起分子の蛍光を用いた噴霧中の燃料蒸気の可視化

Visualization of Fuel Vapor in Inter-Droplet Space by Excited-Molecular Fluorescence

田中 義輝*・赤松 史光*・金 承模*・香月 正司*・真嶋 哲朗**

Yoshiteru TANAKA, Fumiteru AKAMATSU, Seung-Mo KIM, Masashi KATSUKI and Tetsuro MAJIMA

(Received April 30, 2004)

Liquid fuels usually evaporate before they burn in surrounding oxidizer. It is important to understand mixture formation processes between vaporized fuel and oxidizer. Laser induced exciplex fluorescence (Exciplex) technique has been used to observe mixture formation processes in the inter-droplet space of fuel spray flow in spite of various inconvenient defects. In the present study, we have succeeded in developing a similar but new method, the laser induced Pyrene-excimer fluorescence (Excimer) technique. It is based on spectrally separated two-color fluorescent emissions, Monomer fluorescence and Excimer fluorescence, by using only one molecule added into the fuel. Characteristics of Excimer technique are discussed by comparing with those of Exciplex technique.

Key Words: Spray Combustion, Liquid Fuel Spray, Fuel Vapor, Excimer Fluorescence, Visualization

1. 緒言

液体燃料は、一部の例外を除いて一度蒸発し、気相となった後に酸素と反応して燃焼する。つまり、液体燃料の蒸発過程と燃焼過程とは密接に関係しており、周囲気体との混合による可燃性混合気の形成過程の究明が重要である。従来行なわれてきた燃料蒸気の観測手法としては、Meltonら^{1),2)}によって考案されたExciplex蛍光法がある。これは、燃料にN, N, N', N'-テトラメチル-p-フェニレンジアミン(TMPD)とナフタレンを蛍光剤として添加し、液相から放射されるExciplex蛍光と、気相から放射されるTMPDのMonomer蛍光を光学的に分離し、両相の状態を同時に可視化する方法である。

本研究は、工業的によく用いられる噴霧燃焼に対して適用可能な燃料蒸気濃度の計測手法の開発を目的としている。そこでまず、従来のExciplex蛍光法を用いて、超音波によって浮揚された噴霧の気相と液相の画像を同時に撮影した。しかし、Exciplex蛍光法を用いるにあたり、使用可能な燃料や使用可能レーザー光に限られるなどさまざまな制約条件や、蛍光強度が弱いという欠点が存在したため、それに代わる新しい燃料蒸気濃度計測手法として、Excimer蛍光法を提案する。本研究では、Excimer蛍光法に関して蛍

光剤の選定、Monomer/Excimer蛍光スペクトル特性などの検討を行った結果をもとに、噴霧中の気相と液相の同時分離画像の撮影を行い、これまでのExciplex蛍光法と比較しつつ、新計測手法であるExcimer蛍光法についての評価と考察を行った。

2. 実験装置および実験方法

2.1 実験装置

Fig. 1(a)に超音波浮揚装置、(b)にBLT (Bolt-clamped Langevin type Transducer)の振動子の概略図を示す。振動のコアとなる圧電セラミックス(Piezo actuator)を2枚重ねたものに、両側からボルトで締め付けられているBLTと呼ばれる振動子を、振動子の外部に突き出た電極板のところで装置全体に組み付けたものである。また、定在音波形成のために、振動子上方に超音波発生面に平行に円形の反射板を設けている。振動子はトラバーサによって0.1mmの精度で上下方向に移動可能で、定在波の節の数を調節することができる。本実験で用いた振動の周波数は19.8kHzである。マイクロシリンジによって振動子の表面の中央にあるくぼみに注入されたトリデカン³⁾は、最初超音波振動により微粒化されて多数の油滴となって空間に浮かび上がるが、時間経過とともに液滴が定在音波の節付近に

* 大阪大学大学院工学研究科機械物理工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

Department of Mechanophysics Engineering, Osaka University (2-1 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871, Japan)

** 大阪大学産業科学研究所 (〒567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘8-1)

The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University (8-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka 567-0047, Japan)

Fig. 1 Schematic of experimental apparatus.

集まり、油滴群が形成され、次第に衝突合体を繰り返しつつ少数の大きな油滴に成長する。

2.2 励起分子の蛍光を用いた燃料蒸気濃度計測の原理

励起分子の蛍光を用いて燃料蒸気濃度を計測する原理としては、基底状態にある蛍光分子Mが光エネルギーを吸収することによって励起されて($^1M^*$)となり、それが他分子Nと衝突することによって $^1M^*$, N間で励起錯合体 $^1(M\cdot N)^*$ を形成する。これを反応式で模式的に表すと、以下のようになる。

$^1(M\cdot N)^*$ への遷移は極めて速くピコ秒ないしピコ秒以下で行なわれる。MとNが異分子の場合を励起錯体 (Excited Complex≡Exciplex), 同じ分子の場合を励起二量体 (Excited Dimer≡Excimer) という。

Table 1 Mass ratio between TMPD and Naphthalene.

	TMPD	Naphthalene
Case A	1	9.0
Case B	1	98.9
Case C	1	276.7
Case D	1	632.2
Case E	1	1343.3
Case F	1	2765.6
Case G	1	5610.0

励起状態の $^1M^*$ および $^1(M\cdot N)^*$ は、それぞれ基底状態であるMおよびM+Nに失活する際に蛍光としてエネルギーを放射する。ここで $^1(M\cdot N)^*$ の蛍光放射波長は、 $^1M^*$ の蛍光放射波長に対して長波長側に現れる。これは励起錯合体を形成するためにエネルギーが奪われたことによる。分子同士の衝突確率が極めて高い液相中においては、分子Nの濃度を調節することにより、 $^1(M\cdot N)^*$ を生じる。 $^1M^*$ とNとの反応は可逆であり、 $^1(M\cdot N)^*$ を主たる放射種とすることができる。一方、分子が比較的離散的に存在する気相中においては、Monomerと称される $^1M^*$ が支配的となる。

3. Exciplex蛍光法

本研究ではMeltonら^{1),2)}により考案されたN, N, N', N'-テトラメチル-p-フェニレンジアミン (以下TMPD: $C_{10}H_{16}N_2$) とナフタレン (Np: $C_{10}H_8$) を蛍光剤とするExciplexシステムを用いた。

3.1 Exciplex蛍光の特性

燃料に混入するTMPDとナフタレンの質量比を7通りに変えて蛍光スペクトルの計測を行った。Table 1にそれら

Fig. 2 Fluorescence spectra with change of Naphthalene concentration.

Fig. 3 Fluorescence spectra with change of Naphthalence concentration (Excitation wavelength 266nm).

の条件を示す。

Fig. 2とFig. 3に各蛍光剤の濃度変化に伴う蛍光スペクトルの変化を示す。ただし、縦軸の蛍光強度はそのときの最高強度により規格化している。図中のA～FはTable 1のそれぞれの条件に対応している。この蛍光スペクトルの計測は蛍光分光光度計を用いて行い、Fig. 2は励起波長355nm、Fig. 3は励起波長266nmで行なったときの結果で、これら2つの励起波長はそれぞれ、Nd:YAGレーザの第3高調波と第4高調波に対応している。

励起波長が355nmのFig. 2の場合、TMPDとナフタレンを蛍光剤とするExciplexシステムにおいて、ナフタレンの割合が増加していくに従って、Exciplex蛍光の強度が増加していることがわかる。しかし、ナフタレンの割合を増加させていったとしても、Exciplex蛍光に対するMonomer蛍光の割合が、ある一定の値より変化しない。

以上の結果から考えると、Exciplex蛍光が最大のときでさえMonomer蛍光がかなり残っていることから、気相 (Monomer蛍光) と液相 (Exciplex蛍光) がうまく分離できるかについては、すこし疑問が残ると考えられる。

またFig. 3の励起波長266nmの場合、TMPDとナフタレンを蛍光剤とするExciplexシステムにおいて、励起波長355nmの場合とは異なりTMPDだけではなくナフタレンまでもが励起され、さまざまな波長の蛍光が放射されるため、気相と液相の分離には適当ではない。

以上のことから考えて、TMPDとナフタレンを蛍光剤とするExciplexシステムを用いる場合は、Nd:YAGレーザの第3高調波を用いる方が適しているといえる。

Fig. 4に355nm励起のTMPDとナフタレンを蛍光剤とするExciplexシステムを用いた場合の蛍光スペクトルを示す。TMPDのMonomer蛍光 (気相) およびTMPDとナフタレンのExciplex蛍光 (液相) のピーク波長は、それぞれ390nmと480nmであり、これらは光学的に十分に分光可能であり、気相と液相の分離同時可視化を行なうことができる。

Fig. 5に本システムのエネルギー遷移過程の模式図を示す。

Fig. 4 Fluorescence spectra of Monomer and Exciplex.

Fig. 5 Fluorescence of Naphthalence and TMPD in Exciplex system.

ここで、TMPDがMに、ナフタレンがNにそれぞれ対応している。

3.2 光学系と蛍光画像撮影系

Fig. 6に本実験で用いた光学系および蛍光画像撮影系の概略図を示す。蛍光剤の励起光源としてNd:YAGレーザの第3高調波 (波長355nm) を用いた。このレーザ光の出力は約70mJ/pulseであり、発振周波数は10Hzである。装置内にシート状のレーザを入射させるために、1枚の平凹シ

Fig. 6 Schematics of laser diagnostics.

リンドリカルレンズと、2枚の平凸シリンドリカルレンズを用いた。レーザ光は $f=50\text{mm}$ と $f=200\text{mm}$ のシリンドリカルレンズにより縦方向に4倍に広げられ後、 $f=700\text{mm}$ のシリンドリカルレンズにより厚み方向に集光させ、測定部において高さ約30mm、厚さ約0.2mmのシート状レーザ光とした。シリンドリカルレンズはすべて石英製で、紫外光用の反射防止コートが施されており、その透過率は99%以上であるため、レーザ光のエネルギーの減衰はほとんどない。

蛍光画像撮影系は、レーザシートに対して垂直に配置されており、気相(Monomer蛍光)と液相(Exciplex蛍光)からの蛍光の分離にはダイクロイックミラー(D.M.)、各蛍光波長用のバンドパスフィルタを併用した。

気相(Monomer)の蛍光は微弱であり、かつ蛍光が紫外領域にあるため、レンズを通過した画像はイメージインテンシファイア(I.I.)により輝度増強ならびに波長変換が行なわれ、リレーレンズを介して高速度CCDカメラに結像される。一方、液相(Exciplex)の蛍光強度は十分強いので、I.I.を用いず直接高速度CCDカメラに結像させる。また、Nd:YAGレーザの発振とCCDカメラの画像取り込みのタイミングを同期させるために、パルスディレイジェネレータを用いた。

Fig. 7とFig. 8に、上記の光学系および蛍光画像撮影系を用いて撮影された液相と気相からの蛍光画像を示す。上段が液相(Exciplex蛍光)の画像であり、下段が気相(Monomer蛍光)の画像である。

気相部のMonomer蛍光の撮影においては、I.I.のゲインを目盛りを10とし、CCDカメラの露光時間は $28\mu\text{s}$ とした。フレームレートはNd:YAGレーザと同期させているため10駒/sである。一方、液相部のExciplex蛍光の撮影ではI.I.は用いておらず、CCDカメラの露光時間は $77\mu\text{s}$ とした。得られた蛍光画像は縦30mm×横60mm(有効画素数 $256(\text{V})\times 512(\text{H})$)であり、パーソナルコンピュータを介して、8bit(256階調)の濃淡画像としてデジタル記録される。

Liquid

Vapor

Fig. 7 Exciplex images in dense spray.

3.3 Exciplex蛍光法による気相液相同時計測

Fig. 7とFig. 8のすべての画像に対して一般的に言えることは、蒸発した燃料蒸気が液滴のまわりに広く存在しているということである。これは、微粒化の際に微小液滴がより広く拡散し、直ちに蒸発することが挙げられる。また、引き続き液相の表面から蒸発が進んでいると考えられる。

液相画像と気相画像の相違点としては、液相画像はそれぞれの液滴と考えられる粒子が独立して存在している。一方、気相画像は、それぞれが大きな塊となって存在している。この様子から考えると、気相画像の塊は気体分子の集団であると考えられる。

Fig. 8は、液体燃料が多数の微細液滴に微粒化された後、時間経過とともに、合体して数少ない大きな液滴のみが浮揚している状態の液相画像と気相画像を示している。この画像の中央部に大きな単滴が浮揚していることは分かるが、気相画像中にその単滴の周りから蒸発しているはずの燃料蒸気を見ることができない。しかし、液滴が存在し、そのまわりから蒸発が起こっていないとは考えにくい。

単滴の周りの燃料蒸気気相画像が現れていない原因として考えられる理由の第一は、用いたI.I.のゲインが小さいということである。単独の液滴の周りに存在する蒸気は、微粒化直後の多数の微小液滴から蒸発している蒸気量に比べて圧倒的に少ないと考えられる。すなわち、蛍光強度が極めて低いため、用いたCCDカメラの最大感度では感知できなかった可能性がある。第二の理由として、Exciplex蛍光法では計測できない可能性がある。後に詳しく述べるが、蛍光強度は蛍光分子の蛍光量子収率 Φ_F の大小により左右される。つまり、気相画像で用いられているTMPDのMonomer蛍光の蛍光量子収率が低いために、分子の密集度の低い場合、すなわち、蒸気濃度の低い場合の燃料蒸気は観察することができないと考えられるのである。

4. Excimer蛍光法

4.1 蛍光剤の選定および蛍光特性

噴霧中の気相と液相の同時分離計測は、Exciplex蛍光

Liquid

Vapor

Fig. 8 Exciplex images in dilute spray.

Fig. 9 Absorption spectra of Pyrene.

法^{1),2)}が唯一の方法であった。しかし、Exciplex蛍光法には2種類の蛍光剤が必要で、その添加割合もTMPD1に対してナフタレン9というように厳密に規定されている。そこで新たに、蛍光剤を1種類だけ用いて、噴霧中の気相と液相の同時分離計測を行なう方法を考案した。

励起錯合体は励起分子と基底状態の分子が衝突することによって生成されるが、大きく分けて2種類あり、異分子間で起こる場合をExciplex、同一分子間で起こる場合をExcimer (励起二量体) という。つまり、用いる蛍光剤が1種類であっても、Excimerを形成する物質を用いることにより、Exciplex蛍光法と同様に、Monomer蛍光とExcimer蛍光を分光して液相と気相とを同時分離計測できるはずである。分子が密集していて、衝突確率が極めて高い液相中においてはこのExcimer蛍光が支配的となり、分子が比較的離散的に存在する気相中においては、Exciplex蛍光法と同様、Monomer蛍光が支配的となる。したがって、Excimer蛍光を発生させることができれば、蛍光剤は1種類のみでよく、その場合には燃料に混ぜる割合に制限はなくなり、液相内でExcimerを形成する程度の濃度であれば、いくらでもよいといえる。

種々の物質について調査した結果、燃料中でExcimerを発生する蛍光剤としてピレンを選定した。Fig. 9にピレンの吸収スペクトル⁴⁾を示す。縦軸εはモル吸光係数、横軸は入射レーザー波長である。また、実線は灯油にピレンを溶解させた場合、破線はエタノールに溶解させた場合の吸収スペクトルである。これよりピレンは355nmと266nm両方のレーザー光で励起することができることが分かる。

光吸収により生じた励起一重項は、周囲の媒体に熱エネルギーとして緩和する無放射過程、蛍光放射過程、三重項状態への項間交差過程が存在する^{5),6)}。このときの各過程の反応速度定数を k_{dl} , k_F , k_{isc} とすると、蛍光量子収率 Φ_F は、

次式で求めることができる。

$$\Phi_F = \frac{k_F}{k_{dl} + k_F + k_{isc}} = \frac{\text{蛍光分子数}}{\text{吸収された光子数}} \quad (2)$$

ここで、アインシュタインの光等量則より、1つの分子は通常1つの光子を吸収して反応するので、この値が大きければ大きいほど、より蛍光を放射する分子が多い、つまりより強い蛍光強度を得やすいと言える。

Fig. 10にピレンを蛍光剤とするシステムにおけるMonomerとExcimerの蛍光スペクトルを示す。ただし、縦軸の蛍光強度はそのときの最高強度により規格化している。使用した燃料はトリデカンである。図中の(a)は励起波長355nm, (b)は励起波長266nmの場合である。これらの波長はそれぞれ、Nd:YAGレーザーの第3高調波と第4高調波に対応している。

Fig. 10から分かるように、ピレンについてはいずれの励起波長に対しても、Monomer蛍光の中心波長が390nm: Excimer蛍光の中心波長が480nmで、これら中心波長の値は、Exciplexシステムの場合と同じである。また、Monomer蛍光とExcimer蛍光のスペクトルがほとんど重なる部分がない、つまり、気相からのMonomer蛍光と液相

(a) Excitation wavelength 355 nm

(b) Excitation wavelength 266 nm

Fig. 10 Fluorescence spectra of Monomer and Excimer.

Fig. 11 Excitation spectra of Monomer and Excimer.

Fig. 12 Fluorescence of Pyrene in Excimer system.

からのExcimer蛍光が重ならないということは、より正確に気相と液相の燃料を分離計測できるということを意味している。これは、先に述べたTMPDとナフタレンを蛍光剤とするExciplexシステムの蛍光特性より優れた点である。

Fig. 11に、励起波長を連続的に変化させた際のピレンのMonomer蛍光とExcimer蛍光の強度変化を示す。ただし、

Fig. 13 Images by Excimer system in dense spray.

縦軸の蛍光強度はそのときの最高強度で規格化している。この測定にはExciplex蛍光法と同様に、蛍光分光光度計を用いた。

この結果より、より強いMonomer蛍光を得たい場合は266nmで励起し、より強いExcimer蛍光を得たい場合は355nmで励起すればよいことが分かる。すなわち、燃料蒸気濃度の計測のように、気相からのMonomer蛍光を得たい場合、励起波長はNd:YAGレーザーの第4高調波266nmが適している。

蒸発した燃料蒸気中に含まれるピレンがレーザー光によって励起され、Excimer蛍光を発する過程と、液相中に残ったピレンが同じレーザー光によって励起され気相中でMonomer蛍光を発する際のエネルギー遷移過程を模式的に表したのがFig. 12である。

4.2 光学系および蛍光画像撮影系

用いた光学系および蛍光画像撮影系は、Fig. 6のExciplex蛍光法の場合とほとんど同じである。蛍光剤の励起光源として第4高調波(波長266nm)を用いた。このレーザー光の出力は約50mJ/pulseで、発振周波数は10Hzである。また、ピレンのMonomer/Excimer蛍光の中心波長は先のExciplexシステムのMonomer/Excimer蛍光の場合とほとんど同じであったため、Exciplex蛍光法と同じダイクロイックミラーおよびバンドパスフィルタを用いた。

気相のMonomer蛍光の撮影には、I.I.のゲインの目盛りを1とし、CCDカメラの露光時間は17 μ sとした。フレームレートはNd:YAGレーザーと同期させているため10駒/sである。一方、液相のExcimer蛍光の撮影には、I.I.は用いておらず、CCDカメラの露光時間は77 μ sとした。

得られる蛍光画像は縦30mm×横60mm(有効画素数256(V)×512(H))であり、パーソナルコンピュータを介して、8bit(256階調)の濃淡画像としてデジタル記録される。

4.3 Excimer蛍光法による気相液相同時計測

Fig. 13, Fig. 14に、Fig. 6の光学系および蛍光画像撮影系を用いて撮影された画像を示す。各図の上段が液相からの

Fig. 14 Images by Excimer system in dilute spray.

Excimer蛍光の画像であり、下段が蒸発した燃料を示す気相のMonomer蛍光の画像である。

いずれの画像においても、気相が液滴のまわりに覆うように存在し、燃料蒸気と液滴が可視化されている。つまり、添加したピレンも液相表面から蒸発して、Monomer蛍光を発していることを示している。これは、蛍光剤として添加したピレンと燃料であるトリデカンの蒸発特性は異なるものの、少量のピレンが蒸発すればMonomer蛍光を発することを示している。したがって、たとえ蛍光剤の飽和温度が燃料のそれよりかなり高かったとしても、燃料の蒸発の際に蛍光剤がまったく蒸発しないわけではないので、添加する蛍光剤の飽和温度が、燃料の飽和温度と一致しなくてもExcimer蛍光法の添加剤として採用することができるといえる。

Excimer蛍光法による気相画像は、Fig. 7, Fig. 8のExciplex蛍光法による画像に比べ、蛍光強度の強弱分布が観測されている。すなわち、液滴まわりに輝度の強いMonomer蛍光(気相からの蛍光)があり、それらの蛍光の間に輝度の弱いMonomer蛍光が観測されている。一方、Fig. 7, Fig. 8のExciplex蛍光法による画像では、気相からの蛍光は全体的にひとつの塊となって可視化されており、蛍光強度にあまり強弱が見られない。この原因として考えられることは、撮影系で用いたI.I.のゲインである。すなわち、Excimer蛍光法ではI.I.のゲインを1に、Exciplex蛍光法ではI.I.のゲインを10として撮影を行なったが、これは用いたルミナンスゲインがExcimer蛍光法の場合と比べて、Exciplex蛍光法の場合では100倍も大きいということを示している。つまり、Exciplex蛍光法とExcimer蛍光法では、画像上でおなじ輝度値を示したとしても実際は、Exciplex蛍光画像の方が100倍暗いということで、Exciplex蛍光法に用いたTMPDの蛍光量子収率が小さく、気相からの蛍光が極めて弱いことを示している。

一方、Excimer蛍光法で用いた蛍光剤のピレンは、蛍光量子収率が大きいため、液滴付近の輝度の強い部分と液滴から離れた輝度の弱い部分との差が明確に観測されたのだと考えられる。つまり、Excimer蛍光法の方がより正確に燃料蒸気濃度分布が得られるといえる。

Fig. 13, Fig. 14に示されたExcimer蛍光による液相画像は、Fig. 7, Fig. 8のExciplex蛍光法の場合とほとんど同じ傾向を示している。すなわち、液相では燃料の分子が密集している状態であり、液滴の大きさはさまざまであっても、Exciplex/Excimerを形成する条件はすべての液滴に関してほとんど等しいためであると考えられる。

さらに、浮揚する単滴に関しては、Exciplex蛍光法では周囲の燃料蒸気を観測することができなかったが、Excimer蛍光法では、同条件下でも、蒸気の観測が可能である。

すなわち、単滴のまわりの蒸気濃度は低いため、可視化がむずかしいが、Excimer蛍光法では、蛍光量子収率の関係から、蛍光強度がExciplex蛍光法より強いいため、単滴の周囲の燃料蒸気が可視化できたと考えられる。

5. 結言

噴霧中の燃料液滴と液滴間に蒸発した燃料蒸気濃度を計測するために、新しいExcimer蛍光法を開発した。燃料に対して1種類の蛍光剤を添加するだけで気相と液相の燃料を分離可視化が可能になるExcimer蛍光法は、蛍光特性から考えると、従来のExciplex蛍光法に対して、Monomer/Excimer蛍光スペクトル、蛍光強度、励起可能なレーザ光の波長など多くの点において優れている。

超音波で浮揚された燃料油滴群を対象に、Exciplex蛍光法とExcimer蛍光法を用いて、気相と液相の同時分離可視化観測を行い、それぞれの特性を比較検討した。以下は得られた結論である。

- (1) Excimer蛍光法では、用いる蛍光剤が1種類であるため、Exciplex蛍光法とは異なり、燃料に混合する割合を厳密に決定する必要はなく、燃料の特性を変化させない範囲で、液相内でExcimerを形成する程度の濃度であれば、任意の濃度で利用できる。
- (2) Excimer蛍光剤にピレンを採用した場合、Monomerの中心波長は390nm、Excimer蛍光の中心波長は480nmとなり、励起レーザ光はNd:YAGレーザ第4高調波266nmが適している。
- (3) Monomer蛍光とExcimer蛍光、あるいはMonomer蛍光とExciplex蛍光のスペクトルの重なり方を考えると、ピレンを用いたExcimer蛍光法の方が、Exciplex蛍光法より、燃料蒸気と液相の分離に優れ、濃度計測に適した蛍光特性を示す。

引用文献

- 1) L. A. Melton: Spectrally Separated Fluorescence Emissions for Diesel Fuel Droplets and Vapor, *Applied Optics*, **22**-14 (1983) 2224-2226.
- 2) L. A. Melton and J. F. Verdick: Vapor/Liquid Visualization in fuel Sprays, 20th Symp. (International) on Combustion, The Combustion Institute, (1984) 1283-1290.
- 3) 藤本元, 千田二郎: 光学的計測を駆使した噴霧の時空間構造の解明とその燃焼機構, 科学研究費補助金成果報告書, 課題番号10305019, (2001) 197-312.
- 4) S. L. Murov, I. Carmichael and G. L. Hug: *Handbook of Photochemistry, Second Edition, Revised and Expanded*, (1993), M. Dekker, New York.
- 5) 井上晴夫, 他3名: 基礎化学コース光化学 I, (1999), 丸善.
- 6) 徳丸克己: 光化学の世界, (1993), 日本化学会.
- 7) John B. Birks: *Photophysics of Aromatic Molecules*, (1970), Wiley-Interscience, London.