

画像解析によるすすの生成・酸化の時空間計測と すす排出量評価

今井 康雄*, 高木 正英*, 川内 智詞*

Temporal and Spatial Measurement of Soot Formation and Oxidation Process Using Image Processing Technique for Evaluating Soot Emission

by

IMAI Yasuo, TAKAGI Masahide, KAWAUCHI Satoshi

Abstract

In 2020, the IMO began enforcing a global sulphur cap on marine fuel. In order to reduce the sulphur content, it is predicted that demand of LCO (Light Cycle Oil) as low sulphur fuel would increase. Instead, aromatics in LCO could affect self-ignition, combustion characteristics and soot formation in diesel engines. On the other hand, fuel injection strategies such as high injection pressure or multiple fuel injections have large improvement effects on soot emission reduction. Therefore, in order to evaluate soot emission from marine diesel fuels and fuel injection strategies, the temporal and spatial distributions of the materials involved in soot emission need to be measured using a simplified method from the start of injection until the soot formation and oxidation process. In this study, the authors measured temporal and spatial C_2 and OH radical luminous distributions, which contribute to soot formation and oxidation process, respectively, to evaluate the combustion and soot emission characteristics of the aromatic contents. In addition, the authors proposed a new method for estimating soot emission using the luminous intensity and time of C_2 and OH radicals. The results showed that the soot estimation mostly corresponded to experimental data on soot emission.

* 環境・動力系 環境エンジン研究グループ

原稿受付 令和3年4月23日

審査日 令和3年6月4日

本報告は、日本マリンエンジニアリング学会誌（第56巻，3号）に掲載された論文を加筆および再構成したものである。

目 次

1. まえがき	2
2. 実験方法と供試燃料	3
2.1 実験装置	3
2.2 供試燃料	4
3. 実験結果	5
3.1 C ₂ およびOH ラジカル自発光画像計測結果	5
3.2 燃料噴射特性および芳香族の種類が、ラジカル自発光強度とラジカル発光時間へ及ぼす影響	7
3.3 すすの汚染度とラジカル自発光強度およびラジカル発光時間の関係	9
4. まとめ	12
References	12

記 号

P_{inj} : 燃料噴射圧力 [MPa]
R_{C_2} : C ₂ ラジカル輝度積算値 [A.U.]
R_{OH} : OHラジカル輝度積算値 [A.U.]
$Rmax_{C_2}$: C ₂ ラジカル輝度積算値の最大値 [A.U.]
$Rmax_{OH}$: OHラジカル輝度積算値の最大値 [A.U.]
$Rmax'_{C_2}$: 燃料噴射量 1mg 当りの C ₂ ラジカル輝度積算値の最大値 [A.U.]
$Rmax'_{OH}$: 燃料噴射量 1mg 当りの OHラジカル輝度積算値の最大値 [A.U.]
\overline{Rmax}_{C_2} : すす排出結果の最大値の条件で正規化した C ₂ ラジカル輝度積算値 [-]
\overline{Rmax}_{OH} : すす排出結果の最大値の条件で正規化した OHラジカル輝度積算値 [-]
$Rmax^*_{C_2}$: すすの汚染度が一番大きい実験条件の結果における $Rmax'_{C_2}$ [A.U.]
$Rmax^*_{OH}$: すすの汚染度が一番大きい実験条件の結果における $Rmax'_{OH}$ [A.U.]
T_{RC_2} : C ₂ ラジカル自発光時間 [ms]
T_{ROH} : OHラジカル自発光時間 [ms]
\overline{T}_{RC_2} : すす排出結果の最大値の条件で正規化した C ₂ ラジカル自発光時間 [-]
\overline{T}_{ROH} : すす排出結果の最大値の条件で正規化した OHラジカル自発光時間 [-]
$T^*_{RC_2}$: すすの汚染度が一番大きい実験条件の結果における T_{RC_2} [ms]
T^*_{ROH} : すすの汚染度が一番大きい実験条件の結果における T_{ROH} [ms]
m : 燃料噴射量 [mg]

1. まえがき

2020年1月から、国際海事機関(IMO)により一般海域における船用燃料油に含まれる硫黄分規制値が3.5%から0.5%へと厳しくされ、今後の燃料作成には硫黄分低減のために、これまで以上に分解軽油(Light Cycle Oil, LCO)の利用が見込まれる。LCOは芳香族分が多く、また芳香族分の種類によっては燃料油の着火特性や排出ガス特性に大きな影響を及ぼすことが予想される。特に排出ガス中に含まれるすすの多くは燃焼期間中に生成され、燃料油に含まれる芳香族の影響を受けやすい。これまですすの低減に対して、燃料中の成分の影響や燃焼手法の効果について検討されているが、燃焼期間におけるすす排出量の計測評価も、現象理解のためには重要である。

すす排出の特性評価には様々な手法があるが、燃焼中のすすを対象にした評価方法の一つとして2色法が挙げられる¹⁾。2色法は概略的に言えば、すすの黒体放射強度がすす濃度と火炎温度の関数であらわされることを利用した計測手法であり、黒体放射する物質のすべてをすすとして表現することになる。そのため、噴霧火炎の高

速度撮影を行えば、すすの空間分布を得ることができるが、燃焼期間中の黒体放射が存在する限られた時間でしか適用できず、燃焼期間全体での評価は難しい。

これに対し、化学反応の観点からすすの生成および酸化についての検討は、数多く実施されている^{2) -5)}。これらの研究成果によれば、炭化水素は高温場でC1およびC2系の化学種まで分解された後、これらがC3およびC4系の化学種を経て芳香族を形成し、すすの生成に至る。一方、燃焼中のすすの酸化過程では、OHラジカルやO原子といった含酸素活性化学種が寄与していることが知られている。さらにOHラジカルは、燃焼後半の後燃え期間の評価に用いられている事例もあり⁶⁾、OHラジカルの計測により、燃焼期間全体の様子を観察することができる。したがってこれら燃焼中間生成物であるラジカルを観察することにより、すすの生成・酸化に関する燃料評価を行う上で有用な情報が得られると考えた。また、すすの排出量低減に、多段噴射や燃料噴射圧力の高圧化などの燃料噴射手法が有効であることが示されており^{7) ,8)}、これらの手法が及ぼす、すすの生成・酸化への効果をC₂およびOHラジカルの時間・空間計測によって把握し、燃料や燃料噴射手法の違いによる各ラジカルの時間・空間計測の差と、すすの排出量との関係性を評価することも重要である。

そこで本研究では、燃焼中のすすの生成・酸化に関する化学種の自発光に着目し、生成に寄与する化学種としてC₂ラジカルを、酸化に寄与する化学種としてOHラジカルを選択する。そしてこれら化学種の燃焼期間全体の時間・空間分布を把握しながら簡易的にすすの排出特性を評価する手法を検討し、その適用性について検証した。

2. 実験方法と供試燃料

2.1 実験装置

図1に実験装置の概略図、表1に実験条件を示す。本研究では、船用ディーゼル機関の1サイクルの燃焼を模擬できる急速圧縮装置を用いた。吸気には乾燥空気を用い、吸気温度を電気ヒータにて調整し急速圧縮装置へ導入した後、油圧制御式ピストンにて圧縮される。ピストンは上死点到達後に膨張行程に移行することなく固定され、燃料噴射が開始される。吸気時の温度および圧力の設定により、燃料噴射開始時の燃焼室内の温度および圧力は、それぞれ915Kおよび4.8MPaとなっている。ピストン冠面の形状は圧縮を考慮するために、実験装置正面図に示される白抜き部分に該当する。直径は100mm、深さは30mmで、斜線部分のようにアルミ製の壁面で囲われている。燃料噴射装置には単噴孔のコモンレール式インジェクタを用いた。噴孔径は0.2mmである。燃料噴射期間は燃料噴射圧力(P_{inj})に関係なく3.0msとし、燃料噴射圧力は40MPaから130MPaまで30MPa刻みに設定された。燃料噴射から燃焼終了までの様子を、燃焼室正面に設けられた石英ガラス製の観察窓から撮影した。なお、排出ガス中に含まれる粒子状物質は、排気経路途中に設けられた捕集用フィルタによって捕集され、フィルタスモークメータで汚染度を計測した。

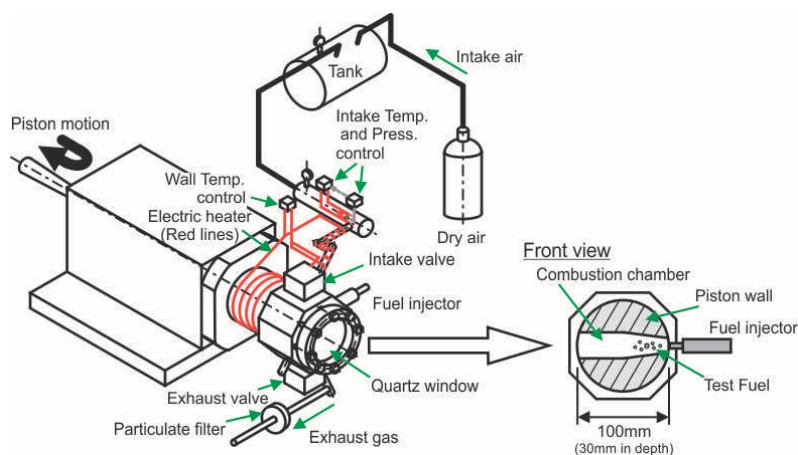


図1 実験装置の概略図

表 1 実験条件

Ambient Pressure (abs)	[MPa]	4.8
Ambient Temperature	[K]	915
Injection Pressure (gauge)	[MPa]	130, 100, 70, 40
Injection Duration	[ms]	3.0

次に図2に、燃焼を観察するための2分岐光学系の概略図を示す。本研究では、炭化水素の反応領域に存在するC₂ラジカルと、酸化領域に存在するOHラジカルの空間的な分布を観察対象としている。これら2つの現象を同時に撮影するために、設置面積がコンパクトであり複数台の高速度ビデオカメラを利用するよりも安価な2分岐光学系を製作し、イメージインテンシファイア（Invisible Vision製、UVi）付き高速度ビデオカメラ（ナックイメージテクノロジー製、HX-3）で撮影した。撮影時の撮影速度は10000 fps、空間分解能は832x528 pixelである。C₂ラジカルは可視光域（撮影波長520 nm）の光に対し、OHラジカルは紫外光（撮影波長310 nm）であるため、OHラジカルを撮影する光路においてはすべて紫外光に対応した光学素子を使用した。またラジカルの発光強度および数密度の違いにより、いずれかの撮影画像の輝度値がオーバーシュートする可能性がある。そこで予備試験を行い、C₂ラジカル発光画像の輝度値がOHラジカル発光画像の輝度値よりも高い値を示したため、C₂ラジカルの光路の途中にNDフィルタを設けて輝度値の調整を行った。

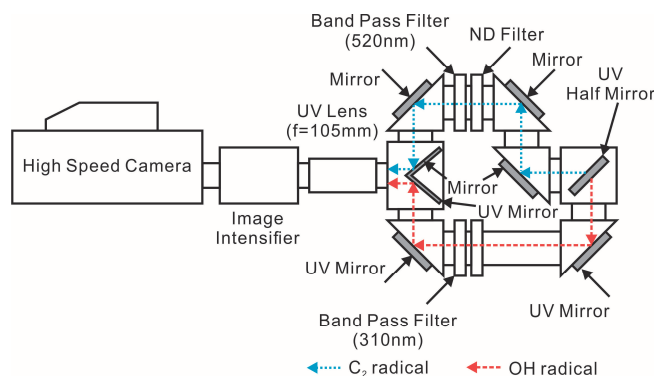


図 2 2分岐光学系の概略図

2.2 供試燃料

表2に本試験で用いた供試燃料の基材を示す。供試燃料の選定では、芳香族の環数がすすの生成に及ぼす影響を観察するために、着火遅れ時間ができるだけ近い燃料を使用したい。そこでn-ヘキサデカン（C₁₆H₃₄）をベース燃料として、セタン価が近い芳香族である、単環のトルエン（C₇H₈）と二環のα-メチルナフタレン（C₁₁H₁₀）をそれぞれベース燃料と調合したものを供試燃料とした。調合割合は芳香族含有率を50, 60, 70 vol%とした。

図3に、本研究で用いた供試燃料の芳香族含有率に対する着火遅れ時間を示す。着火遅れ時間は表1の条件下（但しPinj=130 MPa）で計測し、試行6回の平均値をプロットしている。いずれの芳香族も含有率の増加に伴って着火遅れが増加する。芳香族で比較すると、いずれの含有率においてもα-メチルナフタレンを調合したほうがトルエンよりも着火遅れ時間は長く、その差は最大でおよそ0.2 msであった。このような空気との混合時間差の範囲で、芳香族の違いによる燃焼中のすすの評価を行った。

表 2 供試燃料

Base Material	Toluene	α-Methylnaphthalene	n-Hexadecane
Chemical Formula	C ₇ H ₈	C ₁₁ H ₁₀	C ₁₆ H ₃₄
Aromatic Rings	1	2	0
Density [g/cm ³]	0.867	1.001	0.775
Cetane Number ⁹⁾	6	0	100

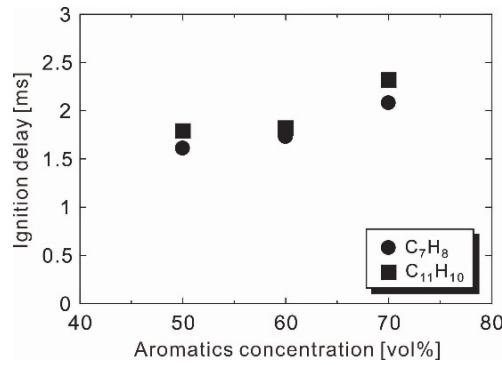
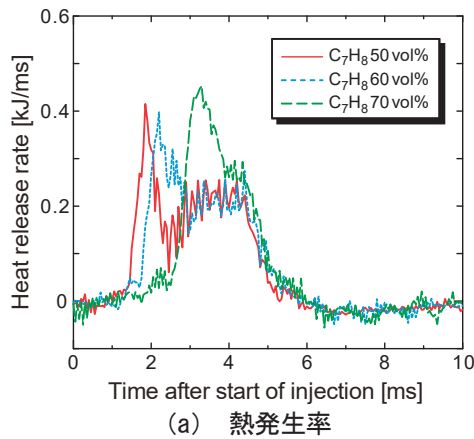


図3 供試燃料の芳香族含有率に対する着火遅れ時間

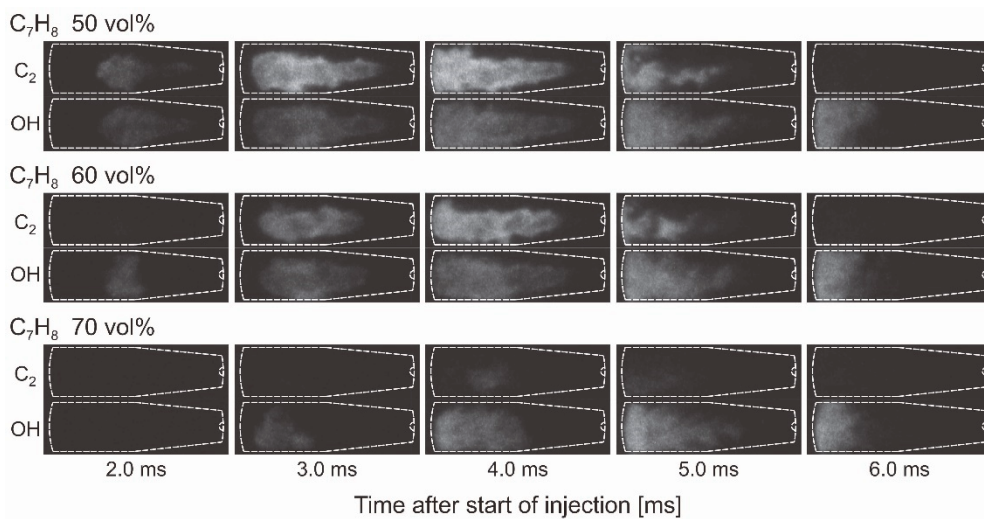
3. 実験結果

3.1 C₂およびOHラジカル自発光画像計測結果

図4にトルエン50, 60, 70 vol%における燃焼時のC₂およびOHラジカルの自発光強度分布の時間変化と, 圧力計測値から得られる熱発生率¹⁰⁾を示す. 各画像の上段はC₂ラジカル, 下段はOHラジカルの自発光画像であ



(a) 熱発生率



(b) C₂およびOHラジカルの自発光強度分布の時間変化

図4 トルエン濃度を変化させた場合のC₂およびOHラジカルの自発光強度分布の時間変化および熱発生率 (Pinj=130MPa)

る。また試験条件は、燃料噴射圧力を 130 MPa に設定したものである。燃料噴射開始後 2.0 ms の各トルエン濃度における熱発生率と各ラジカルの自発光の様子を比較すると、熱発生率のグラフからトルエン濃度 50 vol%, 60 vol% では燃焼が開始しており、特にトルエン濃度 50 vol% においては、熱発生率はピークに達している。これに対し各ラジカルの自発光画像では、トルエン濃度 50 vol% では C_2 および OH ラジカルともに自発光分布は確認できるが自発光強度は弱い。またトルエン濃度 60 vol% では、OH ラジカルについては自発光分布が観察できるが、 C_2 ラジカルはほとんど確認できない。その後、燃料噴射開始後 3.0 ms から 4.0 ms を見ると、トルエン濃度 50 vol%, 60 vol% の熱発生率はピークを過ぎ、緩やかな上昇がみられるが、この時の C_2 ラジカルの自発光強度は強く、特にトルエン濃度 50 vol% では非常に強い。また概ね OH ラジカルは C_2 ラジカルの発光領域よりも一回り大きい分布を示していることがわかる。同時刻におけるトルエン濃度 70 vol% の結果を見ると、熱発生率はピークに到達しており、この時の各ラジカルの自発光画像を見ると、 C_2 ラジカルは微かに確認できる程度であり、OH ラジカルの自発光強度分布のみで燃焼領域が確認できる。その後、いずれのトルエン濃度も燃料噴射開始後 4.5 ms 付近から熱発生率は減少し始め、その傾きはほぼ一致している。燃料噴射開始後 5.0 ms 以降のラジカルの自発光画像では、 C_2 ラジカルは急激に発光領域が狭くなり、特にトルエン濃度が高い条件ではほぼ消滅している。一方 OH ラジカルは、熱発生率の減少傾向と同様に、トルエン濃度の違いによる自発光領域の顕著な違いは見られない。

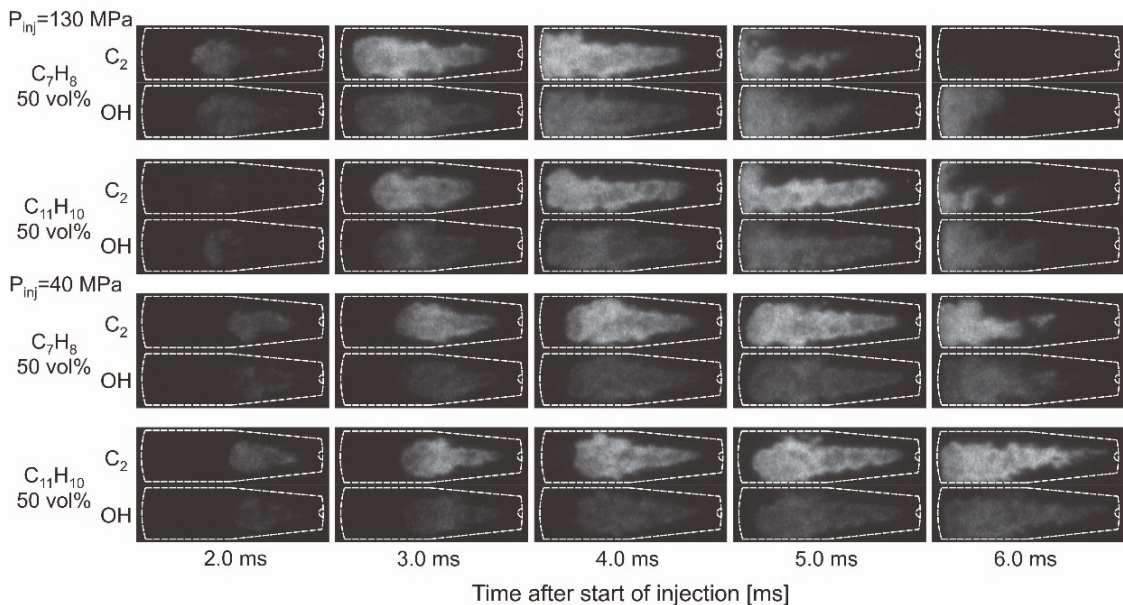
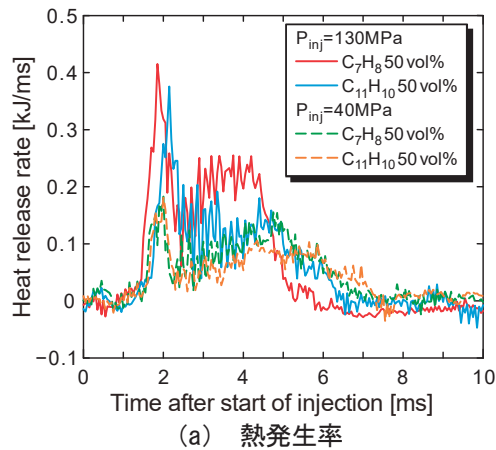


図5 燃料噴射圧力および芳香族を変化させた場合の C_2 および OH ラジカルの自発光強度分布の時間変化および熱発生率（芳香族濃度は 50 vol%）

次に図5 (a), (b) に燃料噴射圧力を変えた場合の、トルエン 50 vol%および α -メチルナフタレン 50 vol%の熱発生率と C_2 および OH ラジカルの自発光画像の時間変化を示す。燃料噴射圧力は 130 MPa, 40 MPa である。図5 (a) の熱発生率と合わせて図5 (b) の各ラジカルの自発光画像を比較すると、熱発生率の立ち上がり開始は、図3で示した着火遅れ時間の範囲に収まっており、各試験条件の違いによる初期のラジカルの自発光画像の差は、着火遅れの差によるものと考えられる。一方燃焼終了付近に着目すると、熱発生率では燃料噴射圧力が 40 MPa のほうが、熱発生率の減衰が緩やかであり、さらに α -メチルナフタレンのほうが、より緩やかに減衰していることがわかる。この結果に対し、各ラジカルの自発光画像を見ると、燃料噴射圧力の比較では、燃料噴射圧力 40 MPa のほうが C_2 ラジカルの自発光領域が広く、さらに芳香族で比較すると、 α -メチルナフタレンでは C_2 ラジカルの自発光領域がノズル近傍まで存在していることがわかる。

以上をまとめると、燃料噴射開始から熱発生率の立ち上がりまでの時間、すなわち着火遅れ時間が長い、若しくは燃料噴射圧力が高いといった空気との混合が促進される条件では、 C_2 ラジカルの自発光は強度が弱く、領域が狭い。また OH ラジカルは、燃料噴射圧力が低い条件では OH ラジカルの自発光が消滅するまでの時間が長くなる。芳香族の違いについては、 C_2 および OH ラジカルともに、単環のトルエンよりも二環の α -メチルナフタレンのほうが、ラジカルの自発光が消滅するまでの時間が長くなり、芳香族の違いによる特徴が見られた。

3.2 燃料噴射特性および芳香族の種類が、ラジカル自発光強度とラジカル発光時間へ及ぼす影響

今回計測された画像から得られる1ピクセル当りの輝度値は、ラジカル自体の発光強度、ラジカルの数密度、および奥行き方向の分布の積を示している。そこで、各ピクセルの輝度値を画像全体で積算することで、その画像に存在するラジカル総数に相当するラジカル輝度積算値 (R) を求め、この計算を各時刻の画像に施すことで、 C_2 および OH ラジカル輝度積算値 (R_{C_2} , R_{OH}) の時間変化を求めた。この R_{C_2} , R_{OH} が、燃料噴射特性および燃料中の芳香族の種類によって、どのような影響があるのかについて定量的に評価した。

図6に、芳香族濃度 50 vol%における燃料噴射圧力を変えた場合の、 R_{C_2} および R_{OH} の時間変化を示す。ここで R_{C_2} , R_{OH} は、あくまでも輝度値 (256 階調) による相対評価であり、実際の各ラジカルの発光強度といった物理量の絶対値は示していないため、 R_{C_2} , R_{OH} は任意単位 (Arbitrary Unit, A.U.) として扱うこととする。燃料噴射圧力で比較すると、130 MPa のほうが R_{C_2} , R_{OH} ともに増加速度は速く、また R_{C_2} , R_{OH} の減少を開始する時期が早いことがわかる。芳香族の種類で比較すると、燃料噴射圧力に寄らず α -メチルナフタレンのほうが、 R_{C_2} , R_{OH} ともに減少を開始する時期が遅い。 R_{C_2} および R_{OH} の最大値 ($R_{max_{C_2}}$, $R_{max_{OH}}$) を比較すると、 C_2 ラジカルの場合、燃料噴射圧力や芳香族の種類による $R_{max_{C_2}}$ の顕著な差が見られなかった。それに対して OH ラジカルの場合、燃料噴射圧力が低い条件における $R_{max_{OH}}$ は低く、さらに芳香族の種類で比較すると、 α -メチルナフタレンのほうが $R_{max_{OH}}$ は低いことがわかる。

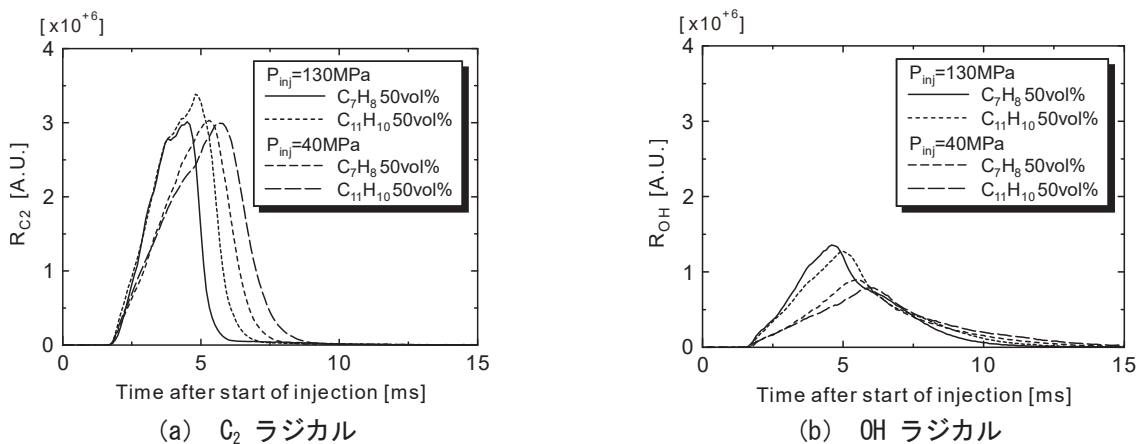


図6 各ラジカル輝度積算値の時間変化 (芳香族濃度 50 vol%)

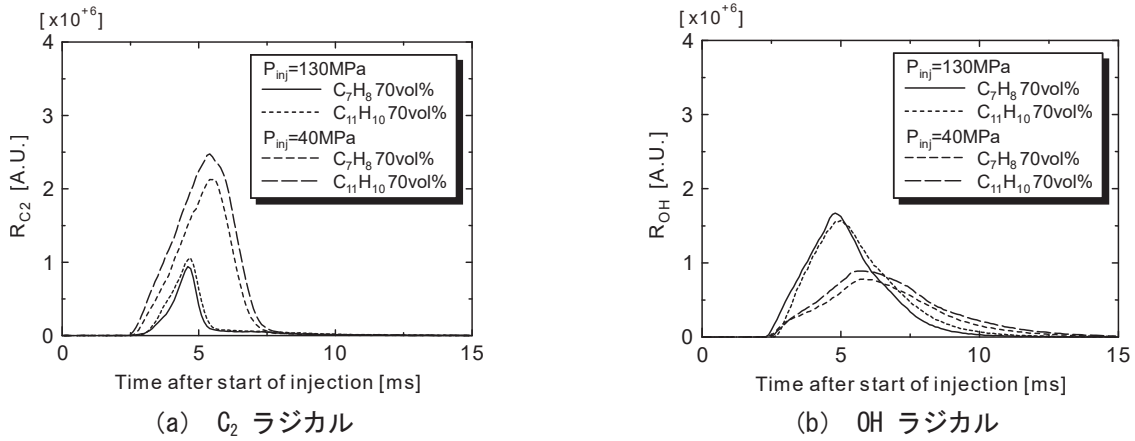


図7 各ラジカル輝度積算値の時間変化（芳香族濃度 70vol%）

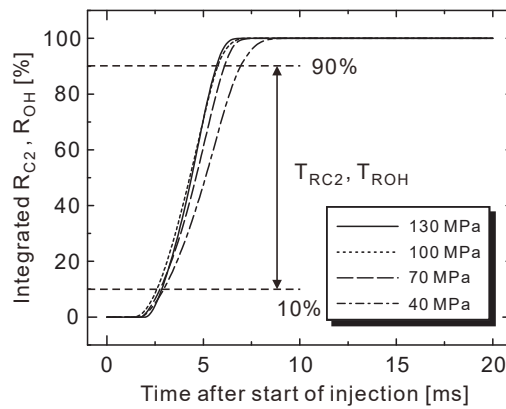


図8 ラジカル自発光時間 (T_R) の定義

次に芳香族濃度を 70 vol%にした場合の R_{C_2} および R_{OH} の時間変化を図7に示す。燃料噴射圧力で比較すると、 C_2 ラジカルでは 130MPa のほうが R_{C_2} は小さいことがわかる。また芳香族の違いで比較すると、 α -メチルナフタレンのほうが $R_{max_{C_2}}$ は高く、発光開始から消滅までの時間は長い。OHラジカルについては、図6と同様に燃料噴射圧力が高い条件では $R_{max_{OH}}$ が大きく、ラジカルが消滅するまでの様子を見ると、燃料噴射圧力が低い条件では消滅までの時間が長く、さらに α -メチルナフタレンのほうがトルエンと比べてラジカルが消滅するまでの時間が長い。

以上、 $R_{max_{C_2}}$ 、 $R_{max_{OH}}$ およびラジカルの発光から消滅までの時間に対し、燃料噴射特性や燃料中の芳香族が影響することがわかったので、その感度を調べた。ここでは R_{max} とともに、図8に示すようなラジカルの発光から消滅までの時間をラジカル自発光時間 (T_R) として評価に用いた。これは燃料噴射開始から C_2 、OHラジカルが消滅するまでの R_{C_2} と R_{OH} をそれぞれ積算し、その積算値が 10%から 90%に到達した時間を T_{RC_2} および T_{ROH} と定義した。積算値の 10%および 90%に到達した時間を用いたのは、画像のバックグラウンドノイズの影響を受けず、実験条件の差が顕著に表れる期間で評価するためである。

$R_{max_{C_2}}$ および $R_{max_{OH}}$ に対する燃料及び燃料噴射特性の影響を評価する上で、燃料噴射圧力に依らず噴射期間が一定であるため、 $R_{max_{C_2}}$ および $R_{max_{OH}}$ には燃料噴射量 (m) の影響も含まれている。そこで次式に示すとおり、燃料噴射量 1mg 当たりの $R_{max_{C_2}}$ および $R_{max_{OH}}$ をそれぞれ $R_{max'_{C_2}}$ および $R_{max'_{OH}}$ と定義する。

$$R_{max'_{C_2}} = \frac{R_{max_{C_2}}}{m} \quad (3.1)$$

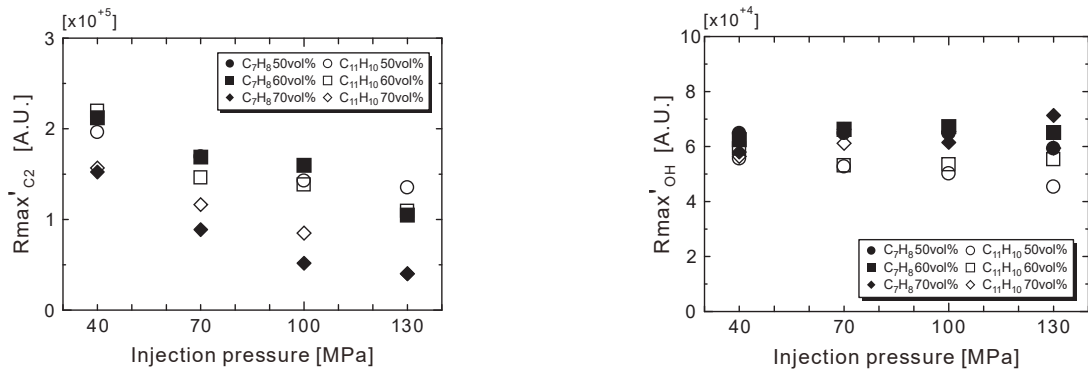
$$Rmax'_{OH} = \frac{Rmax_{OH}}{m} \tag{3.2}$$

図9に燃料噴射圧力と $Rmax'_{C_2}$ および $Rmax'_{OH}$ の関係を示す。燃料噴射圧力の増加に対して $Rmax'_{C_2}$ は減少しているが、 $Rmax'_{OH}$ は緩やかに増加していることがわかる。同一濃度の芳香族で比較すると、 $Rmax'_{C_2}$ では有意な差が見られなかった。この結果は図7で示した結果と異なるが、これは燃料噴射量で除したことで、トルエンの密度 (0.867 g/cm³) と、 α -メチルナフタレンの密度 (1.001 g/cm³) の違いにより、図7の $Rmax'_{C_2}$ の有意差が相殺されたことによるものである。一方 $Rmax'_{OH}$ は、燃料噴射量で除しても、いずれの燃料噴射圧力においてトルエンのほうが高い値を示した。

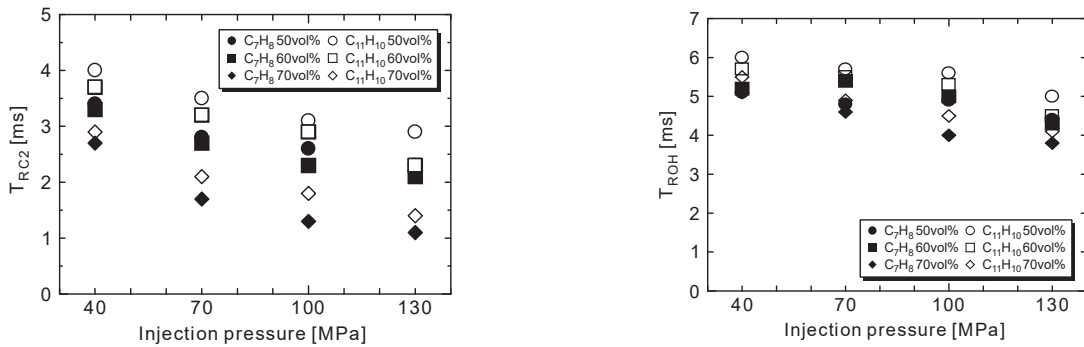
次に、燃料噴射圧力に対する T_{RC2} および T_{ROH} の関係を図10に示す。 C_2 ラジカルおよびOHラジカルともに、燃料噴射圧力の増加に応じて T_{RC2} 、 T_{ROH} は減少することがわかる。さらに同一芳香族濃度で比較すると、トルエンよりも α -メチルナフタレンのほうが、いずれの燃料噴射圧力において T_{RC2} および T_{ROH} の値は大きいことがわかる。

3.3 すすの汚染度とラジカル自発光強度およびラジカル発光時間の関係

燃料噴射圧力、芳香族種類および濃度に対する燃料噴射量 1mg 当りの各ラジカルの輝度積算値の最大値 ($Rmax'_{C_2}$, $Rmax'_{OH}$) およびラジカル自発光時間 (T_{RC2} , T_{ROH}) の特性について述べたが、次にこれらパラメータとすすの汚染度の関係について調べた。その結果を図11に示す。図はすべての噴射条件についてプロットしているが、燃料噴射量が異なるため、各ラジカルの輝度積算値の最大値とすすの汚染度については燃料噴射量で除している。結果を見ると、 $Rmax'_{C_2}$ 、 T_{RC2} および T_{ROH} が増加すると、すすの汚染度は増加し、 $Rmax'_{OH}$ が増加するとすすの汚染度は減少している。



(a) C_2 ラジカルの輝度積算輝度値の最大値 ($Rmax'_{C_2}$) (b) OHラジカルの輝度積算輝度値の最大値 ($Rmax'_{OH}$)
 図9 燃料噴射圧力に対する各ラジカル輝度積算値の最大値の関係



(a) C_2 ラジカルの自発光時間 (T_{RC2}) (b) OHラジカルの自発光時間 (T_{ROH})
 図10 燃料噴射圧力に対する各ラジカルの自発光時間の関係

次に、すすの汚染度におけるラジカルの輝度積算値の最大値とラジカル自発光時間の影響度を調べた。ここで $Rmax'_{C2}$ や $Rmax'_{OH}$ に対し T_{RC2} および T_{ROH} の値の桁数は大きく異なるため、 $Rmax'_{C2}$ や $Rmax'_{OH}$ が過少に評価される可能性がある。そこで今回得られた実験値の中で、すすの汚染度が一番大きい実験条件を基準とし、その基準に対して $Rmax'_{C2}$, $Rmax'_{OH}$, T_{RC2} および T_{ROH} を正規化した値をそれぞれ $\overline{Rmax_{C2}}$, $\overline{Rmax_{OH}}$, $\overline{T_{RC2}}$ および $\overline{T_{ROH}}$ としてすすの汚染度 ($Sest$) の推定式を立てて重回帰分析を行い、係数 α , β , γ 並びに δ を決めることのできるすすの汚染度への影響度を調べた。なお正規化した $\overline{Rmax_{C2}}$, $\overline{Rmax_{OH}}$, $\overline{T_{RC2}}$ および $\overline{T_{ROH}}$ は、すすの汚染度が一番大きい実験条件の結果をそれぞれ $Rmax'^*_{C2}$, $Rmax'^*_{OH}$, T_{RC2}^* および T_{ROH}^* として次式で表される。

$$\overline{Rmax_{C2}} = \frac{Rmax'_{C2}}{Rmax'^*_{C2}} \quad (3.3)$$

$$\overline{Rmax_{OH}} = \frac{Rmax'_{OH}}{Rmax'^*_{OH}} \quad (3.4)$$

$$\overline{T_{RC2}} = \frac{T_{RC2}}{T_{RC2}^*} \quad (3.5)$$

$$\overline{T_{ROH}} = \frac{T_{ROH}}{T_{ROH}^*} \quad (3.6)$$

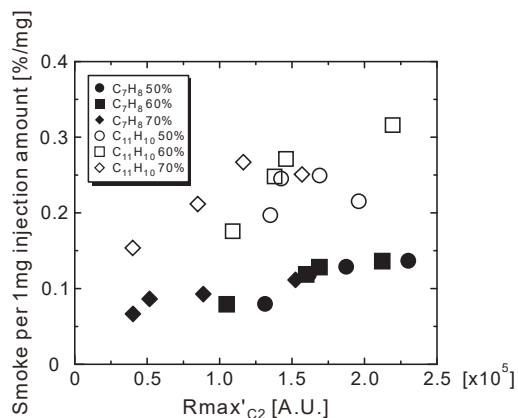
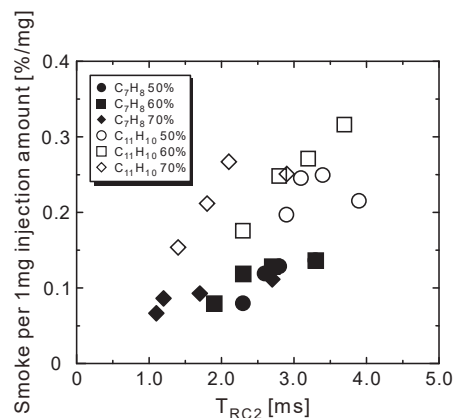
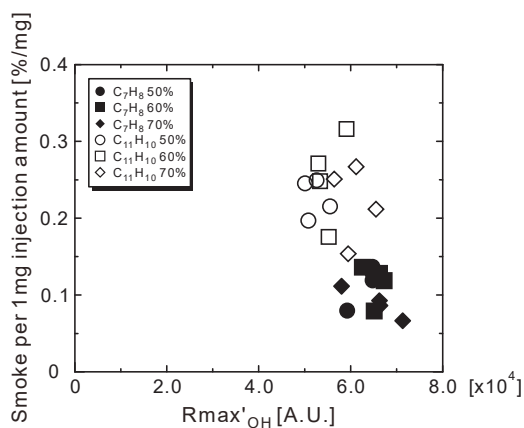
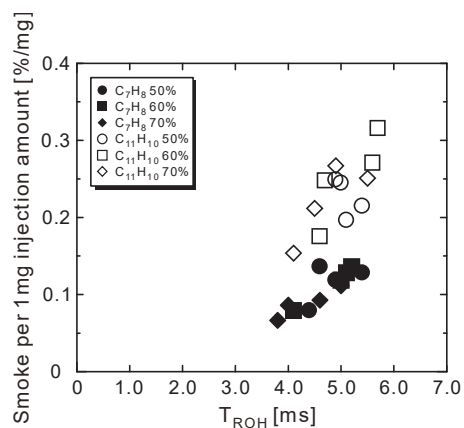
(a) $Rmax'_{C2}$ (b) T_{RC2} (c) $Rmax'_{OH}$ (d) T_{ROH}

図 11 各パラメータ ($Rmax'_{C2}$, T_{RC2} , $Rmax'_{OH}$, T_{ROH}) とすすの汚染度との関係

すすの汚染度 (S_{est}) の推定式は次式で表される.

$$S_{est} = \alpha \overline{Rmax_{C_2}} + \beta \overline{T_{RC_2}} - \gamma \overline{Rmax_{OH}} + \delta \overline{T_{ROH}} \quad (3.7)$$

重回帰分析の結果, 係数 α , β , γ および δ は次の通りとなった.

$$S_{est} = -0.5532 \overline{Rmax_{C_2}} + 0.7637 \overline{T_{RC_2}} - 0.4713 \overline{Rmax_{OH}} + 1.0212 \overline{T_{ROH}} \quad (3.8)$$

ここで図11より, $Rmax'_{C_2}$ が増加するとすすの汚染度は増加する結果が得られているが, 式(3.8)では $\overline{Rmax_{C_2}}$ が増加すると S_{est} は減少し, 実験結果と反することになる. $Rmax'_{C_2}$ については, 図9の結果から同一濃度で比較した場合の芳香族分の違いが明確にならなかった. 図11(a)の結果からも $Rmax'_{C_2}$ は, 芳香族分ごとの実測のすすの汚染度と一対一の関係性が見られるが, 全計測データでの両者の相関関係を得ることができなかった. また C_2 ラジカルの自発光強度は, 希薄領域において極端に低下し, S/Nが悪化することが報告されており¹¹⁾, これらにより $\overline{Rmax_{C_2}}$ を用いた S_{est} の推定は難しいと推察した. そこで式(3.9)に示すとおり $\overline{Rmax_{C_2}}$ を推定式から除き, 再度回帰分析を試みた.

$$S_{est} = \alpha' \overline{T_{RC_2}} - \beta' \overline{Rmax_{OH}} + \gamma' \overline{T_{ROH}} \quad (3.9)$$

重回帰分析の結果, 係数 α' , β' および γ' は次の通りとなった.

$$S_{est} = 0.0056 \overline{T_{RC_2}} - 0.6692 \overline{Rmax_{OH}} + 1.4592 \overline{T_{ROH}} \quad (3.10)$$

この結果から, すすの酸化を示す $\overline{Rmax_{OH}}$, および $\overline{T_{ROH}}$ の影響度が大きいことがわかり, ラジカルの自発光強度の測定だけでなく, ラジカルの自発光時間を併用した計測手法が有用であると考えられる.

図12に式(3.10)で示した推定したすすの汚染度に対する実測のすすとの関係を示す. 本研究の範囲では概ねすすの汚染度の推定値と実測値は一致した傾向を示している.

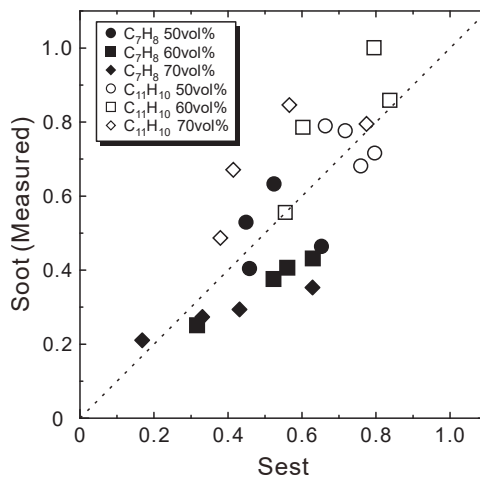


図12 実測のすすと推定したすすとの関係

4. まとめ

船用燃料油の硫黄分規制により、今後使用量の増加が見込まれる分解軽油には、芳香族炭化水素が多く含まれている。この芳香族分のすす排出特性評価を行う上で、燃焼中の C_2 および OH ラジカルの自発光の時間・空間分布を計測することにより、芳香族の環数や濃度および噴射圧力の影響について検証し、以下の知見を得た。

(1) C_2 および OH ラジカルの自発光画像の時間変化は、燃料特性ならびに燃料噴射特性による明確な違いがみられた。また熱発生率と比較すると、 C_2 ラジカルと OH ラジカルの自発光画像を組み合わせることで、着火から後燃えまで燃焼の様子を良く捉えることができる。

(2) 特性値としてラジカル輝度積算値の最大値とラジカル自発光時間を定義し、燃料特性や燃料噴射特性に対する感度を評価した。その結果、燃料特性や燃料噴射特性の影響を、上記の特性値によって表すことができた。

(3) 燃料中の芳香族分と、OH ラジカルの輝度積算値の最大値、 C_2 および OH ラジカルの自発光時間には相関が見られた。

(4) 重回帰分析により、OH ラジカルの輝度積算値の最大値、 C_2 および OH ラジカルの自発光時間を用いてすすの汚染度を推定する式を立て、すすの汚染度に対する各特性値の影響度を調べた。その結果、酸化過程を表す OH ラジカルの輝度積算値の最大値および自発光時間の影響度が大きいことが分かった。このことから、すすの汚染度の推定には、ラジカルの自発光時間を併用することが有用であることが示された。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、株式会社ナックイメージテクノロジーの佐々木 裕康氏および高田 健司氏に協力を賜った。ここに感謝の意を表す。

References

- 1) Matsui, Y., Kamimoto, T., Matsuoka, S., Oguri, A.: A Study of Flame Temperature Measurement for Diesel Engine, Transactions of the JSME, Vol.44, No.377 (1978) , pp.228-238 (In Japanese)
- 2) Bockhorn, Henning: Soot Formation in Combustion Mechanism and Models, Springer (1994)
- 3) Femimore, C. P., and Jones, G. W.: Oxidation of Soot by Hydroxyl Radicals, J. Phys. Chem., 71, 593-597 (1967)
- 4) Puri, R., Santoro, J. R.: The oxidation of soot and carbon monoxide in hydrocarbon diffusion flames, Combustion and Flame, Vol.97, No.2, pp.125-144 (1994-5)
- 5) Ito, T., Hosaka, T., Senda, J., Fujimoto, H.: Detailed Kinetic Analysis for Soot Formation in a Diesel Jet Flame, Transaction of the JSME (B) , Vol.71, No.701 (2005) , pp.288-294 (In Japanese)
- 6) Fukuchi, S., Masuda, H., Matsumura, E., Senda, J.: Investigating the Cause of Late Combustion in Diesel Engine by Using RCEM, Transactions of the Society of Automotive Engineers of Japan, Vol.47, No.5 (2016) , pp.1045-1050 (In Japanese)
- 7) Tow, T., Pierpont, D., and Reitz, R. D.: Reducing Particulate and NOx Emissions by Using Multiple Injections in a Heavy Duty D.I. Diesel Engine, SAE Technical Paper 940897 (1994)
- 8) Yokota, H., Kamimoto, T., Kobayashi, H.: A Study of Diesel Spray and Flame Using Image Analysis (1st Report, Influence of Injection Pressure on Spray Characteristics, Soot Formation, and Combustion Characteristics) , Transactions of the JSME (B) , Vol.54, No.499 (1988) , pp.741-748 (In Japanese)
- 9) Yanowitz, J., et. al.: Compendium of Experimental Cetane Numbers, National Renewable Energy Laboratory (2014)
- 10) Heywood, J. B.: Internal Combustion Engine Fundamentals, McGRAW-HILL INTERNATIONAL EDITIONS Automotive Technology Series (1988)

- 11) Kojima, J., Ikeda, Y., Nakajima, K.: Spatially and Spectrally Resolved Measurement of Chemiluminescence in Laminar Methane/Air Premixed Flames (Correlation Between Emission Intensity Ratio of OH*/CH* to the Equivalence Ratio) Transaction of the JSME (B) , Vol.66, No.647 (2000) , pp1871-1878 (In Japanese)