

水素ディーゼル機関の基礎的研究\*  
(第2報 一非定常水素噴流の自着火・燃焼特性に関する解析一)

植田良彦<sup>\*1</sup>, 千田二郎<sup>\*2</sup>, 藤本元<sup>\*2</sup>

Fundamental study of Direct Injection Diesel Engine Fuelled with  
Hydrogen  
(2nd Report: Analysis of Auto-ignition/Combustion Characteristics in Unsteady  
Hydrogen Jets)

Yoshihiko UEDA, Jiro SENDA, Hajime FUJIMOTO

In this study, authors investigated the characteristics of auto-ignition/combustion of high pressurized hydrogen jets to improve performances of a direct-injection, diesel engine fueled with hydrogen. The auto-ignition/ combustion of hydrogen were investigated in a constant-volume combustion vessel under simulated direct-injection diesel engine conditions. The parameters varied in the investigation included the injection pressure, ambient temperature and ambient oxygen concentration. The conclusions of this study are shown as follows: (1) Effect of ambient oxygen concentration in the ambient on auto-ignition delay and heat conversion efficiency is little at high ambient temperature range. Also, by reduction of ambient oxygen concentration, reduction of NO is possible. (2) In the case of the smaller orifice and multi hole, heat conversion efficiency is increased.

Key Words: Hydrogen, Direct injection diesel engine, auto-ignition, heat conversion efficiency

1. 緒 論

近年, 化石燃料の大量消費による大気汚染および地球規模の温暖化が深刻な問題となっており, また化石燃料の枯渇問題も深刻になると予測される. これらの観点から, 環境への負担が小さく, 循環型の代替エネルギーの開発が求められている. そこで, 本研究では分子構造中に炭素原子を持たない水素に注目した. 水素を用いた内燃機関として, 出力向上, 異常燃焼の回避および熱効率の向上が可能である直接噴射式ディーゼル機関が望ましいと考えられる. 当該機関において燃焼形態の差異は燃焼および排気特性に大きく影響を及ぼすため, 非定常水素噴流の自着火特性の把握は機関性能を知る上で重要である.

そこで本研究では, 当該機関を模擬した雰囲気場において非定常水素噴流の自着火および燃焼特性を把握することによって, 最適な自着火・燃焼方式を構築することを目的とする. 本報では水素の自着火遅れ期間および熱変換効率に対する雰囲気条件および噴射条件の影響を調査した. また, 燃焼場での NO<sub>x</sub> の大半を

占める NO を レーザ誘起蛍光法(Laser Induced Fluorescence, LIF)を用いて観測し, 雰囲気酸素濃度が NO 生成に及ぼす影響について調べた

2. お も な 記 号

$a$  : 容器内密度に関する実験定数  
 $b$  : クレヴィス領域と定容容器の容積比  
 $d$  : 噴孔径  $\eta_c$  : 熱変換効率  
 $\kappa$  : 比熱比  $m$  : 噴射量  
 $\dot{Q}_n$  : 見かけの熱発生率  
 $\Delta p_d$  : 水素噴射による容器内の圧力変化  
 $p$  : 圧力  $\rho$  : 密度  
 $\Delta T_{ij}$  : 噴射期間  $t$  : 時間  
 $\tau$  : 自着火遅れ期間  $T$  : 温度

下添え字

$a$  : 雰囲気  $b$  : 熱力学的平均  
 $c$  : コア領域  $w$  : 壁面

3. 実験装置および方法

3.1 ガス加圧・噴射装置および定容燃焼容器

ガス燃料を高圧縮し, 任意の時期, 期間に噴射するため, 図1に示すような加圧・噴射装置を用いた. 加圧装置は主に油圧ポンプおよびブラダ型とピストン型

\*原稿受付 2005年6月20日.

<sup>\*1</sup>同志社大学大学院 (〒610-0321 京都府京田辺市多々羅郡谷口3).

<sup>\*2</sup>同志社大学

アキュムレータで構成されている。また、噴射時期・期間を任意に制御するため、電子制御・油圧駆動方式のガス噴射弁を使用した。

本研究では、装置が簡便であり条件設定が容易である点から定容燃焼容器(内部容積：約 292 cc)を用いた。実験装置の概要図を図 2 に示す。実験装置は定容燃焼容器、ガス混合容器、燃料ガス噴射装置、電子制御回路および記録装置から成る。また、燃焼容器にはガス噴射弁の他に、吸排気バルブ、2 個の点火プラグおよび圧電式圧力変換器が取り付けられている。

### 3.2 高温高压雰囲気場の作製方法

本実験では、酸素過剰の可燃混合気の予混合燃焼により作製した高温高压の既燃ガス雰囲気中に、供試燃料を噴射し自着火させる方法<sup>(1)(2)</sup>を用いた。可燃混合気にはアセチレン/水素/酸素/窒素を用いた。

雰囲気温度の算出は、以下に示す計算によって行なった。容器内の温度は均一ではなく、容器内中央部に容器体積 90 %を占めるコア領域が存在する。したがって、本研究ではコア温度  $T_c$  を Naber ら<sup>(3)</sup>が提唱する関係式を用いて求めた。

$$\frac{T_c}{T_b} = 1 + a \left( 1 - \frac{T_w}{T_b} \right) + b \left( \frac{T_b}{T_w} - 1 \right)$$

$T_b$  は熱力学的平均温度であり、燃焼容器内圧力、密度および気体の状態方程式を用いて算出される。 $T_w$  は壁面温度で、本研究では 373 K である。 $a$  および  $b$

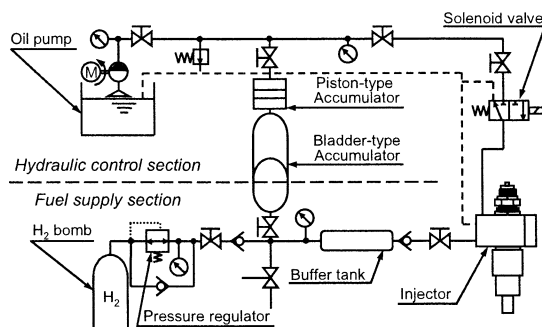


Fig.1 Schematic diagram of gas fuel pressurizing/injecting unit

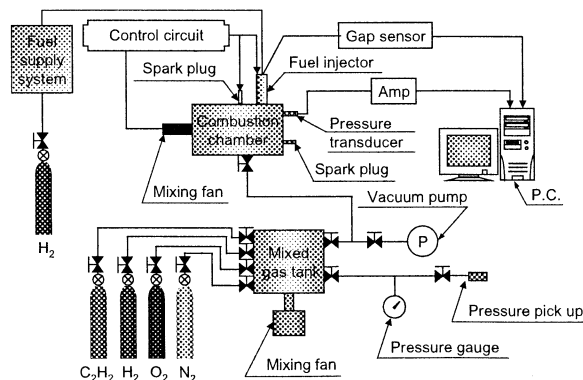


Fig.2 Schematic of experimental apparatus for diesel combustion

は実験定数であり、 $a$  は 0.128,  $b$  は 0.01 である。

### 3.3 自着火遅れ期間の定義

ガス燃料においては蒸発過程がないため、噴射開始と共に容器内圧力  $p_d$  が上昇する。ここで、水素噴射による圧力上昇率が噴射期間中一定であると考え、圧力上昇率は  $\Delta p_d / \Delta t_{inj}$  で与えられる。水素燃焼時の容器内圧力を  $p_f$ 、非噴射時の圧力を  $p_a$  とおくと、圧力上昇率は  $d(p_f - p_a) / dt$  とおける。これより、自着火開始時期は

$$d(p_f - p_a) / dt \geq \Delta p_d / \Delta t_{inj}$$

となった時とし、自着火遅れ期間  $\phi$  は、燃料噴射開始時期から、自着火時期までと定義した。

### 3.4 OH ラジカル自発光撮影

図 3 に OH ラジカル自発光撮影の光学系を示す。撮影には高速度ビデオカメラを使用し、カメラには OH ラジカルの発光の輝度増強を行なうためにイメージインテンシファイアおよびイメージ・ブースタを取り付け、撮影速度を 9000 fps とした。本実験に先立ち、Photonic Multichannel Analyzer を用いて水素噴流火炎の発光スペクトル計測を行なったところ、波長 307 nm 付近の火炎内に OH ラジカルの発光が検出された。したがって波長 307 nm 付近に生じる火炎内の OH ラジカル発光を捉えるため、中心波長 307.8 nm、半値幅 10 nm の光干渉フィルタをカメラレンズに取り付けた。

### 3.5 NO-LIF 法の実験方法

NO-LIF 計測の際には A-X(0, 0)である 226 nm 付近の吸収線を用いるが、その付近に  $O_2$  の吸収線がオーバーラップする<sup>(4)</sup>。そこで、本研究では  $O_2$  の吸収線が存在せず、かつ蛍光強度の温度依存性が少ない 226.035 nm<sup>(5)</sup>を吸収線として使用した。また、NO 蛍光の検出には 237-272 nm 付近に存在する A-X(0, 1)から(0, 4)バンドを使用した。

図 4 に NO-LIF 法の光学系を示す。光源として Nd:YAG レーザの第三高調波(355 nm)を用い、OPO システムにて波長変換することによって 226.035 nm で発振

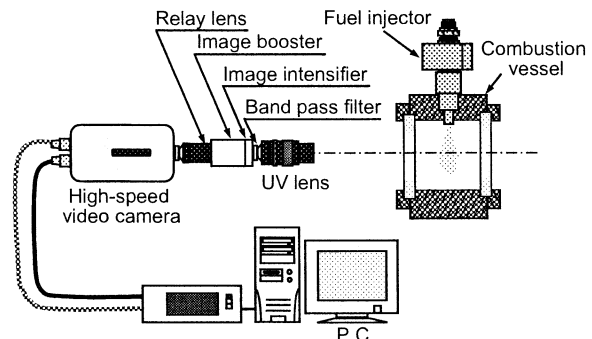


Fig.3 Optical set-up used to Chemiluminescence at 308 nm from hydrogen jet flame

した。放出されたレーザ光を片凸レンズ( $f$ : 1000 mm)および2枚のシリンダカルレンズ( $f$ : 100 mm,  $f$ : 300 mm)によって、高さ約 20 mm、厚さ 0.1 mm のレーザシート光を形成し、定容容器に入射した。

NO 蛍光は IL 付き CCD カメラで撮影し、カメラ直前に透過中心波長 254 nm (半値幅: 25 nm) の光干渉フィルタを取り付けた。撮影は噴射軸方向距離: 25–45 mm および 40–60 mm の 2 つの領域で行なった。

#### 4. 結果および考察

##### 4.1 自着火遅れ期間への緒因子の影響

###### 4.1.1 雰囲気温度および雰囲気酸素濃度の影響

自着火遅れ期間  $\tau_p$  に対する雰囲気温度  $T_a$  および酸素濃度の影響を調べるため、雰囲気酸素濃度 10–30 vol.%, 雰囲気密度  $\rho_a=11.3 \text{ kg/m}^3$  の雰囲気中へ噴孔径  $d_e=0.7 \text{ mm}$  のノズルを用いて水素を噴射圧力  $p_0=12 \text{ MPa}$  で噴射した。図 5 に水素噴流の  $\tau_p$  をアレニウス表示座標で示す。  $T_a$  の低下に伴ない、  $\tau_p$  が長期化する。特に、約 1100 K 以下の低温度域では  $\tau_p$  は温度依存性が大きい。水素の自着火反応において、  $\text{H}_2\text{O}_2$  の熱分解反応は温度依存性が高いことが知られており、反応の進行には

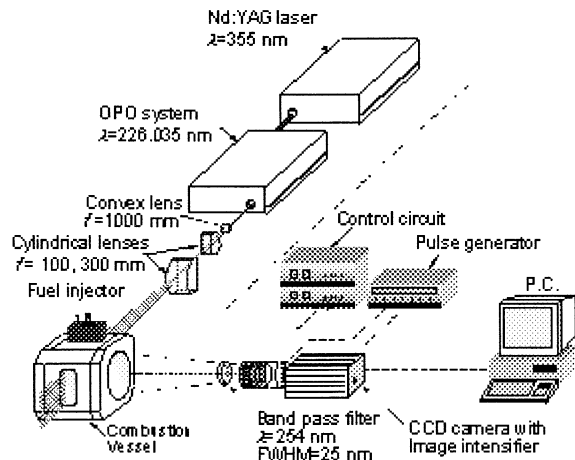


Fig. 4 Optical set up for NO fluorescence images measured by LIF

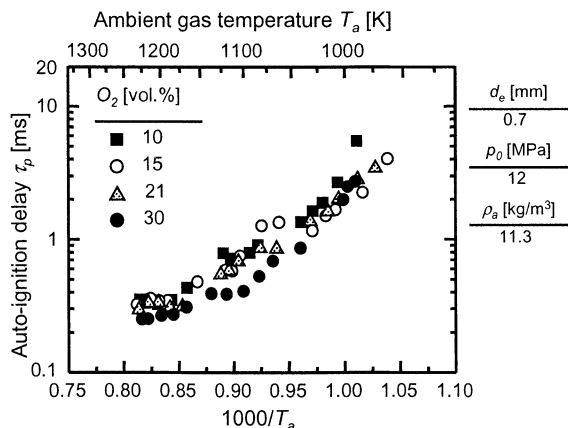


Fig.5 Relationship among ambient gas temperature and oxygen concentration on auto-ignition delay

1150 K 以上の温度が必要である<sup>9)</sup>。したがって、  $T_a$  が十分な高温であれば、熱分解反応が促進されるため、温度依存性が低くなると考えられる。

図 6 に酸素濃度と  $\tau_p$  の関係を示す。  $T_a$  に関わらず、  $\tau_p$  に対する雰囲気酸素濃度の影響はほとんどない。したがって、本実験で設定した雰囲気温度条件では、  $\tau_p$  は雰囲気酸素濃度よりも雰囲気温度  $T_a$  の影響を大きく受けることがわかる。また、高温度域では雰囲気酸素濃度によらず  $\tau_p$  のばらつきが小さくなる。すなわち、これらの結果は、自着火反応に対する混合気中の酸素濃度の影響はほとんど無く、混合気内の温度の局所的な分布および強い乱流による活性化学種の散逸・失活が自着火反応に対して大きな影響を及ぼすことを示唆している。

###### 4.1.2 噴孔径および噴孔数の影響

$\tau_p$  に対する  $d_e$  および噴孔数の影響を調べるため、雰囲気酸素濃度 21 vol.%,  $\rho_a=11.3 \text{ kg/m}^3$  の雰囲気中へ  $d_e=0.3–1.0 \text{ mm}$  の単噴孔ノズルおよび  $d_e=0.5 \text{ mm}$  の 2 噴孔ノズル ( $\alpha=30 \text{ deg}$ ) を用いて水素を  $p_0=12 \text{ MPa}$  で噴射した。図 7 に  $d_e$  と  $\tau_p$  の関係を示す。  $d_e$  の拡大に伴ない  $\tau_p$  が短縮するが、  $T_a=1200 \text{ K}$  では  $d_e$  の影響はほとんど確認できない。低温度域では着火誘導時間が急激に増大するため、噴流外縁部における強い乱れにより活性化学種が散逸・失活する可能性が高いと考えられる。したがって、低温度域では  $d_e$  の差異による噴流発達過程の差異が自着火反応に大きく影響すると推察できる。

##### 4.2 燃焼特性への緒因子の影響

###### 4.2.1 雰囲気温度および雰囲気酸素濃度の影響

熱発生率に対する  $T_a$  の影響を調べるため、雰囲気酸素濃度 21 vol.%,  $\rho_a=11.3 \text{ kg/m}^3$  の雰囲気中へ  $d_e=0.7 \text{ mm}$  のノズルを用いて水素を  $p_0=12 \text{ MPa}$  で噴射した。  $T_a$  を変化した際の熱発生率および針弁リフト量を図 8 に示す。予混合燃焼期間は自着火開始から最初に熱発生

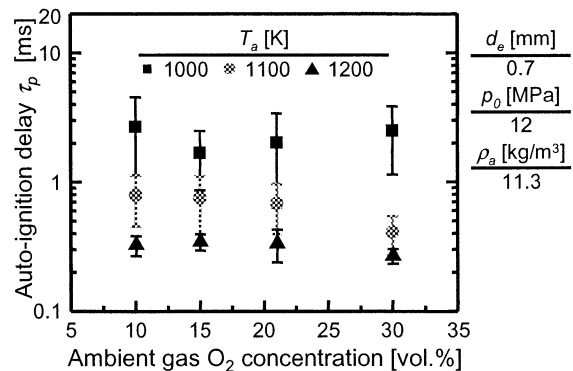


Fig.6 Effect of ambient gas O concentration on auto-ignition delay of hydrogen jet

燃料噴射終了時から熱発生終了時までの期間と定義する。  $T_a=1002, 1108\text{ K}$  の条件では、予混合燃焼期間においてスパイク状の熱発生形状を示す。 4.1.1 節で述べたように雰囲気温度の低下と共に自着火遅れ期間は長期化するため、予混合気量が増加する。 したがって、形成された予混合気は自着火とともに一挙に燃焼するため、雰囲気温度の低下に伴ない予混合燃焼期間において急激に熱発生が上昇すると考えられる。

雰囲気酸素濃度を变化させた際の熱発生率を図 9 に示す。 実験条件は 4.1.1 節と同じである。 雰囲気酸素濃度の低下に伴ない、予混合燃焼期間および拡散燃焼期間における熱発生率は減少する。 一方、後燃え期間は酸素濃度低下に伴ない長期化する。 したがって、雰囲気酸素濃度の低い条件では、予混合燃焼期間および拡散燃焼期間の未燃水素量が増加し、その結果、後燃え期間で未燃水素が燃焼すると考えられる。

みかけの熱発生率を積算した総熱発生量を、噴射された水素の低位発熱量で除した値を熱変換効率  $\eta_c$  と定義する。 図 10 に雰囲気酸素濃度を变化させた際の熱変換効率  $\eta_c$  を示す。 雰囲気酸素濃度に関わらず、 $\eta_c$  はほぼ一定の値を示す。 図 9 から分かるように、雰囲気酸素濃度が高い条件では、予混合燃焼期間および拡散燃焼期間において活発な燃焼反応が起きる。 その

ため、壁面への熱流束が増大し、熱損失が増大すると考えられる。 一方、低酸素濃度条件では、予混合燃焼期間および拡散燃焼期間における燃焼は緩慢であるため、熱損失の影響は小さくなる。 しかしながら、後燃え期間において未燃水素が燃焼するため、燃焼期間が長期化し、壁面への熱損失が増大すると考えられる。 これらの影響が互いに相殺しあった結果、 $\eta_c$  はほぼ一定となったと推察される。

4.2.2 噴孔数および噴孔径の影響

図 11 に  $d_e$  および噴孔数を变化させた際の熱発生率および針弁リフト量を示す。  $d_e$  の拡大に伴ない、噴射量が増大するため熱発生率のピーク値が高くなる。 また、同噴孔断面積である  $d_e=0.7\text{ mm}$  の単噴孔ノズルおよび  $d_e=0.5\text{ mm}$  の 2 噴孔ノズル ( $\alpha=30\text{ deg}$ ) の熱発生率を比較すると、予混合燃焼期間の  $d_e=0.5\text{ mm}$  の 2 噴孔ノズル ( $\alpha=30\text{ deg}$ ) のほうがピーク値が高い。 また、拡散燃焼期間においても 2 噴孔ノズルのほうが高い熱発生を示す。

図 12 に  $d_e$  を变化させた際の  $\eta_c$  を示す。 最初に単噴孔ノズルに注目し、 $d_e$  の影響に関して論ずる。  $\eta_c$  は  $d_e$  の拡大に伴ない減少することがわかる。 図 13 に  $d_e=0.3, 0.7\text{ mm}$  の TASI (Time after start of injection) : 4, 6 ms で

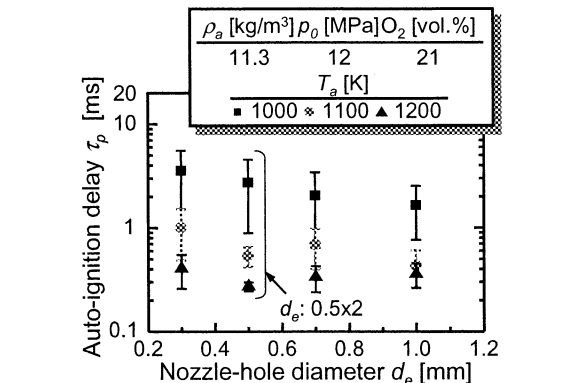


Fig.7 Effect of nozzle configuration on auto-ignition delays of hydrogen jets

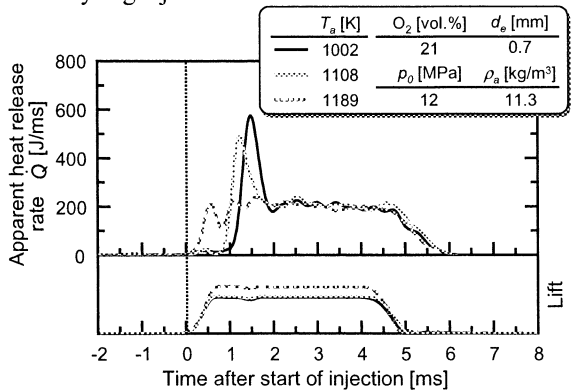


Fig.8 Profile of apparent heat release rate and lift for hydrogen jet for various conditions of ambient temperature

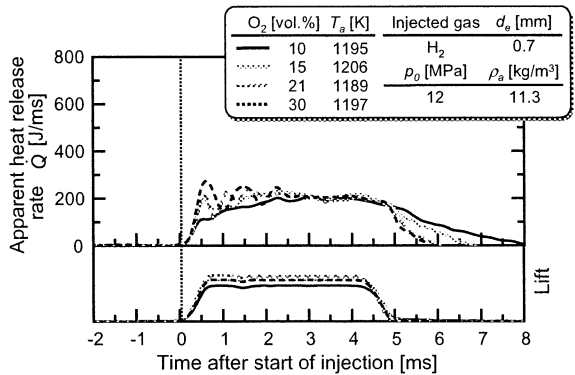


Fig.9 Profile of apparent heat release rate and lift for hydrogen jet for various conditions of ambient gas O<sub>2</sub> concentration

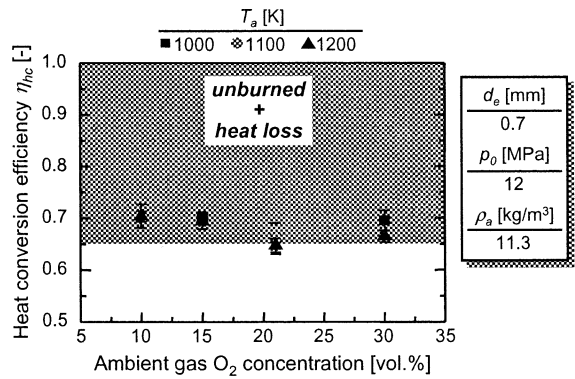


Fig.10 Effect of ambient gas O<sub>2</sub> concentration on heat conversion efficiency

の OH ラジカル自発光画像を示す。TASI: 4 ms 時の画像は拡散燃焼期間、TASI: 6 ms 時の画像は後燃え期間に当たる。 $d_e=0.7$  の条件では噴流火炎が壁面に衝突し、壁面近傍で強い発光が確認できる。一方、 $d_e=0.3$  mm は OH ラジカル自発光領域が壁面に触れず、著しく限定された領域でのみ燃焼する。第一報で示したように、噴孔径の縮小に伴ない、下流部において比較的低濃度の領域が均一に分布する<sup>9)</sup>。したがって、 $d_e=0.3$  mm では、より効率的に混合気が燃焼するため、壁面に到達しないような火炎形状を呈すると考えられる。その結果、 $d_e=0.3$  mm では壁面への熱損失が  $d_e=0.7$  mm と比較して小さくなり、 $\eta_{hc}$ が増加したと考えられる。

噴孔数による影響に関して見ると、 $d_e=0.5$  mm の 2 噴孔ノズル( $\alpha=30$  deg)の方が同噴孔断面積である  $d_e=0.7$  mm より  $\eta_{hc}$ が増大する。 $d_e=0.7$  mm の単噴孔ノズルおよび  $d_e=0.5$  mm の 2 噴孔ノズル( $\alpha=30$  deg)のノズルの噴射率はほぼ同じである<sup>8)</sup>ため、噴射期間中に投入された熱量の差異は小さい。前述のように小噴孔径化により、噴流内が希薄かつ均一化されるため、熱損失が少ない効率的な燃焼となり、また多噴孔化により、燃焼領域が拡大するため熱発生が高くなる。かつ多噴孔化により鉛直方向だけではなく半径方向の空間を使用で

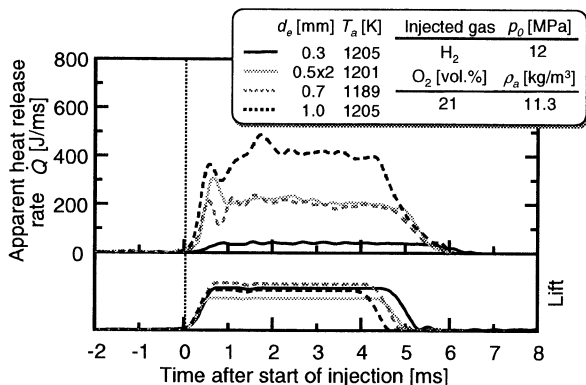


Fig.11 Profile of apparent heat release rate and lift for hydrogen jet for various conditions of orifice diameter and number of nozzle-hole

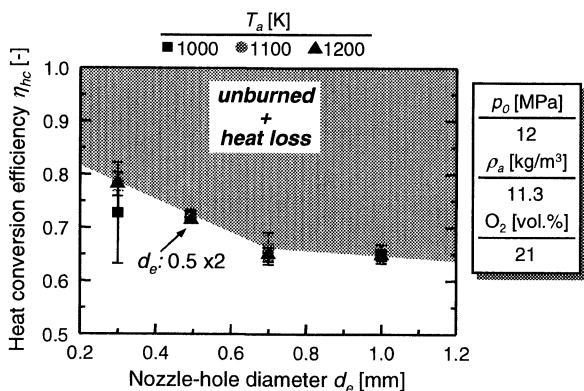


Fig.12 Effect of ambient orifice diameter and number of nozzle-hole on heat conversion efficiency

き、壁面に接触する面積が減少したため、熱損失が減少する。以上より、小噴孔径・多噴孔化によって、効率的な燃焼が行なわれ、熱損失が減少した結果、 $\eta_{hc}$ が増大したと考えられる。

#### 4.3 NO 生成特性への雰囲気酸素濃度の影響

図 14 に雰囲気酸素濃度 10, 21 vol.%,  $T_a=1200$  K,  $\rho_a=11.3$  kg/m<sup>3</sup> の雰囲気中へ  $d_e=0.7$  mm のノズルを用いて水素を  $p_0=12$  MPa で噴射した際における時系列 NO 蛍光画像を示す。図中の白い実線は、別の自着火・燃焼実験におけるシュリーレン撮影画像より求めた平均的な噴流火炎の外形である。雰囲気酸素濃度 10 vol.% の条件ではほとんど NO の蛍光は見られないが、雰囲気酸素濃度 21 % の条件では特に火炎外縁において強い蛍光が確認できる。また、TASI: 0.8–12 ms 間では NO 蛍光が徐々に強くなるが、TASI: 14 ms では TASI: 12 ms と比較して弱い。

軸方向距離  $x=25-45$  mm および  $40-60$  mm の領域をそれぞれ領域 A、領域 B とする。図 15 に領域 A および領域 B における NO 蛍光の積算輝度値を示す。図 14 と同様に、TASI によらず雰囲気酸素濃度 10 vol.% では 21 vol.% と比べて大幅に NO 蛍光が減少する。また、TASI: 14 ms において、領域 A、領域 B の双方とも NO 蛍光の積算輝度が減少するのが分かる。TASI: 14 ms では壁面に火炎が到達しているため、壁面によって火炎が冷却されることにより火炎温度が低下すると考えられる。したがって、壁面衝突による火炎温度の低下

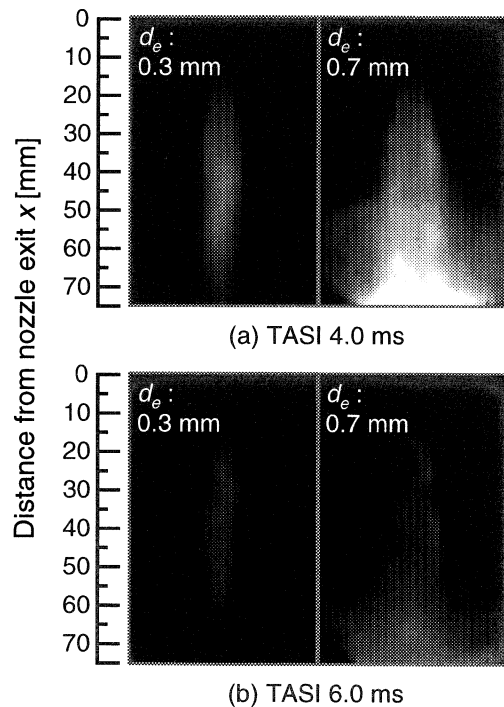


Fig.13 OH chemiluminescence images measured at TASI 4ms (mixing-controlled combustion phase) and 6 ms (late combustion phase)

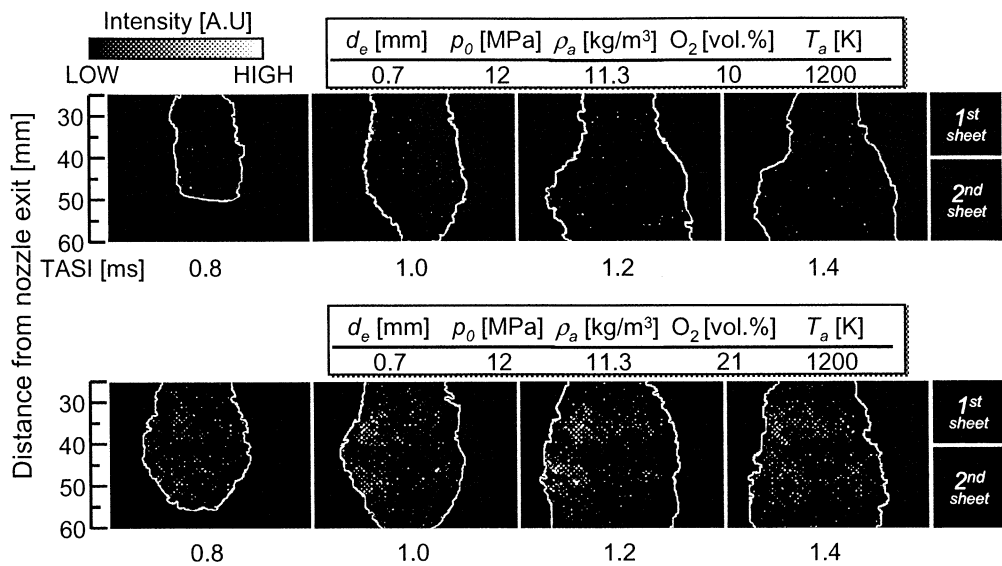


Fig. 14 Temporal sequence of NO fluorescence images in case of ambient gas O<sub>2</sub> concentration : 10 % and 21 %

が NO 蛍光の減少を招いたと考えられる。

4. ま と め

本報では、定容燃焼容器内にディーゼル燃焼場を形成し、水素の自着火遅れ期間および熱変換効率に対する雰囲気条件および噴射条件の影響に関して考察を行なった。以下に得られた知見をしめす。

- ・ 雰囲気温度が十分に高温であれば、雰囲気酸素濃度の減少による自着火遅れ期間への影響はほとんどない。

- ・ 雰囲気酸素濃度の減少による熱変換効率への影響はほとんどない。
- ・ 噴孔径の縮小および多噴孔化によって、熱変換効率を増大させることが可能となる。
- ・ 雰囲気酸素濃度の減少および小噴孔径化によって、NO の生成を抑制することができる。

謝 辞

本研究は、文部科学省学術フロンティア推進事業「次世代ゼロエミッション・エネルギー変換システム」の支援を受けた。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

(1) 神本武征ほか, 日本機械学会論文集(第 2 部), 40 巻 339 号(1974), 3206-3215.

(2) Siebers, D.L., SAE Paper No.852102 (1985).

(3) Naber, J.D., Siebers, D.L., Westbrook, C.K., Caton, J.A., Di Julio, J.A., SAE Paper No.942034(1994).

(4) DiRosa, M.D., Kulavuh, K. G, and Hanson, R. K., Combustion Science and Technology Vol.118, pp.257-283 (1996).

(5) Dec, J. E. and Canaan, R. E., SAE Paper No.980147 (1998).

(6) Cain, T.M., Combust. Flame 111:124-132 (1997).

(7) 大田篤志他 2003 年度成果報告会

(8) 辻村拓ほか, 日本機械学会論文集(B 編), 70 - 693(2004), 1342-1347.

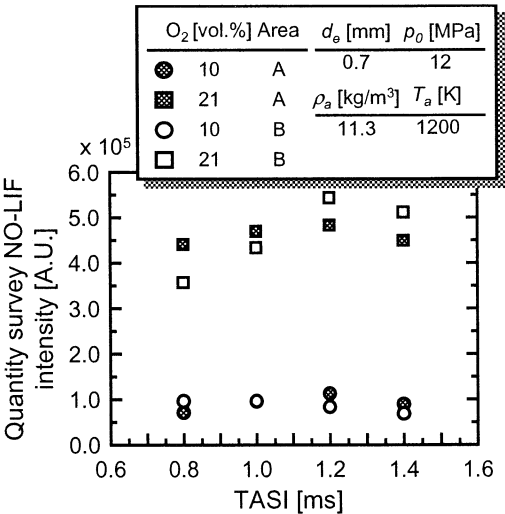


Fig. 15 Effect of ambient gas O<sub>2</sub> concentration on quantitative NO-LIF intensity