急速圧縮膨張装置を用いた水素噴流の自着火・燃焼特性に関する研究*

光島 敬太^{*1}, 畑 隆一^{*2}, 辻村 拓^{*3}
徳永 佳郎^{*4}, 千田 二郎^{*5}, 藤本 元^{*6}Study on Characteristics of Auto-ignition and Combustion in Hydrogen Jet
with a Rapid Compression and Expansion MachineKeita MITSUSHIMA, Ryuichi HATA, Taku TUJIMURA,
Yoshiro TOKUNAGA, Jiro SENDA^{*7}, Hajime FUJIMOTO^{*7} Department of Mechanical Engineering, Doshisha University,
1-3 Miyakodani, Tatara, Kyotanabe-shi, Kyoto, 610-0321 Japan

Hydrogen has a potential alternative to conventional hydrocarbon fuels, because no CO₂ is emitted followed by combustion and it is able to make it by electroanalysis of water. This study aims to obtain stable ignition timing and combustion processes of hydrogen when it is applied into the direct-injection diesel engine. This report, it thought about the influence of the ambient conditions on the auto-ignition and combustion behavior of the hydrogen jet was investigated with a rapid compression and expansion machine (RCEM). First, the ambient temperature in combustion chamber is raised by adding argon into the ambient gas. Second, that is raised through the oxidation process of lean DME mixture. In addition, the effect of intermediates of DME reaction on the auto-ignition of hydrogen jet was investigated by use of CHEMKIN III code. Moreover, this effect was experimentally clarified.

Key Words: Diesel Engine, Alternative Energy, Combustion, Direct Injection, Hydrogen, Dimethyl Ether, RCEM, CHEMKIN

1. 緒 言

二酸化炭素による地球温暖化問題は、年々深刻化しており、次世代石油代替燃料への期待は非常に大きなものとなっている。その中でも燃焼により二酸化炭素を排出しない水素は究極の燃料と考えられている。

内燃機関に水素を用いた研究は火花点火機関に関するものが多い^{1,2)}。しかし、火花点火機関では圧縮比に制限を受け熱効率が低く、さらに大型機関などへの適用は難しい。そこで、本研究では熱効率が高く、機関サイズの制限がない直接噴射式ディーゼル機関への水素適用に着目した。これまでに本研究では、直接噴射式ディーゼル機関を模擬した定容燃焼容器で実験を行

ない、水素噴流の混合気形成特性および自着火特性などを明確にした^{3,4)}。一方、実機関への適用を考慮すると、自着火温度の高い水素を安定に自着火させるためには、通常より圧縮端温度を上げる必要がある。この手法として本研究では、軽油と同等のセタン価を有するジメチルエーテル(以下 DME, CH₃OCH₃)を予混合気に微量添加し、圧縮行程中の発熱により、筒内のガス温度の上昇を図る。

本報では、まず吸入空気に Ar を添加して急速圧縮膨張装置(以下 RCEM)を用いて実験を行ない、水素の持つ自着火・燃焼特性を明らかにした。続いて、DME を吸入空気に混合し、Ar を添加した際と同温度の雰囲気場を作成して実験を行ない、Ar 添加時の自着火・燃焼特性と比較した。さらに水素噴射時における筒内の共存成分が水素の自着火促進効果に与える影響について、詳細素反応モデルを用いた化学反応動力学計算と実験結果の双方から検討した。

2. 実験装置および素反応計算方法

2.1 水素燃料噴射システム 本研究では、

* 原稿受付 2007 年 4 月 6 日。

^{*1} 同志社大学大学院工学研究科(☎ 610-0321 京田辺市多々羅都谷 1-3)。^{*2} 学生員, 同志社大学大学院工学研究科。^{*3} 正員, (独)産業技術総合研究所(☎ 305-8564 つくば市並木 1-2)。^{*4} 正員, 川崎重工業(株)(☎ 673-8666 明石市川崎町)。^{*5} 正員, 同志社大学工学部。^{*6} 正員, フェロー, 同志社大学工学部。

E-mail: jsenda@mail.doshisha.ac.jp

水素ポンプからの供給圧力が低下した際も設定噴射圧力に昇圧できるように、WE-NETの研究⁵⁾により使用された装置を参照し、水素加圧・噴射装置を設計・製作した。図1に装置の概略図を示す。加圧装置は主に油圧ポンプ、ブラダ型およびピストン型のアキュムレータで構成されている。

噴射装置は噴射時期・期間を任意に制御するため、高速応答電磁弁(不二越, HS-G01-A21-D1-11)および電子制御の油圧駆動ガスインジェクタ(当研究室にて製作)で構成されている。また、ガスインジェクタにはギャップセンサ(電子応用, PU-03A)を取り付け、噴射毎の針弁リフト量を測定している。

2.2 実験装置および実験条件 本実験では、RCEMの筒内に水素を直接噴射し、その着火・燃焼特性を調べた。本実験で使用するRCEMのボアは100 mm、ストロークは450 mmである。また、RCEMのクランク軸にロータリーエンコーダを設置し、シリンダヘッド側面に圧力センサを埋設した。水素噴射時の筒内温度

Fig.1 Schematic diagram of hydrogen fuel injection

Table1 Experimental conditions for hydrogen auto-ignition measurement

	Case 1	Case 2
Fuel		H ₂
Intake gas temperature [K]	353	333
Injection pressure p_{inj} [MPa]		12
(Fuel density ρ_{H_2}) [kg/m ³]		(9.0)
Nozzle-hole diameter d_n [mm]		0.7
Equivalence crank speed [rpm]		200
Compression ratio ϵ	13	12
Premixed gas reactants	N ₂ /O ₂ /Ar N ₂ /O ₂ /DME	N ₂ /O ₂ /DME/Ar
Ratio of added Ar ratio $V_{Ar}/(Ar+N_2)$ [vol. %]	40 - 82	0 / 13 / 23
Equivalence ratio of Added DME ϕ_{DME}	0.07 - 0.12	0.1 / 0.08 / 0.06
Ambient gas compositions at start of injection	N ₂ /O ₂ /Ar N ₂ /O ₂ /H ₂ O/CO ₂	N ₂ /O ₂ /H ₂ O/CO ₂ /Ar
Injection timing t_{inj} [deg. ATDC]	-5.0 ± 0.25	-15.0 ± 0.25
Ambient gas O ₂ mol concentration at hydrogen injection [mol/m ³]	81.8	
Ambient gas temperature at start of injection T_{inj} [K]	900 - 1050	800 - 830
Ambient gas pressure at start of injection p_a [MPa]	3.00 - 3.80 (15.2-18.0)	3.60 - 3.80 (12.6)
(Ambient gas density ρ_a) [kg/m ³]		

T_{inj} は、クランク角から算出された筒内容積と、圧力センサにより得られた圧力から、気体の状態方程式を用いて導出した質量平均温度である。 $\epsilon=13$ において、空気の断熱圧縮を仮定し理論的に求めた圧縮端温度は985 Kとなるが、実験においては760 Kと低い。これはピストン速度が200 rpm相当と非常に遅く、壁面熱損失の影響が大きいためである。使用した実験装置の概略図を図2に、実験条件を表1に示す。Case1は3・1・1節から3・2・2節まで、Case2は3・2・4節の条件である。噴孔径 $d_n=0.7$ mmの単噴孔ノズルを用いて、任意の時期に噴射圧力 $P_{inj}=12$ MPaで水素を噴射した。本実験では吸入ガスとしてN₂/O₂/ArまたはN₂/O₂/DMEを任意の割合で混合した。ArはN₂などに比べ比熱比が高いため圧縮端温度の上昇を図れる。また、DMEは吸入ガスに添加する事で圧縮により酸化反応を起こし発熱するため、筒内の温度が上昇する。これらの方法により、 T_{inj} を調節した。ここで、DMEの酸化反応により酸素が消費されるため、本実験ではそれを考慮しDMEの当量比 ϕ_{DME} の変化に合わせて吸入ガス中の酸素モル濃度を変化させ、水素の反応に影響が出ない様に吸入ガスを作成した。

2.3 添加物による発熱および雰囲気温度履歴

図3は圧縮比 $\epsilon=13$ で吸入ガス中の各添加物の量を変化させた際の熱発生履歴および雰囲気

Fig.2 Schematic diagram of apparatus for producing and charging premixed gas with RCEM

Fig.3 Temporal change in ambient gas temperature and apparent heat release rate of DME

温度 T_{amb} の履歴である。Ar の添加により、予混合気の比熱は増大するため、空気だけの温度履歴より高い T_{amb} となる。また、Ar は不活性ガスのため発熱や吸熱が起こっていない。一方、Ar とは異なり活性な DME を添加した際は、低温酸化反応および高温酸化反応により T_{amb} が上昇する。いずれの当量比においても DME の低温酸化反応の開始時期は一定である。一方、 ϕ_{DME} が低下すると高温酸化反応の開始時期は遅角して緩慢となり、-3 deg.ATDC 付近まで高温酸化反応による発熱が継続する。

2・4 自着火遅れ期間および熱発生率、熱変換効率の定義 図4に RCEM 内での水素の熱発生率履歴と針弁リフト波形を示す。本実験では自着火開始時期を水素噴射から熱発生率が 20 J/deg.を超えた時点とし、水素噴射から自着火開始時期までの期間を自着火遅れ期間 τ_p と定義する。本実験では壁面での熱損失を考慮しない、みかけの熱発生率を次式から求めた。

$$\dot{Q}_o = \frac{dQ}{d\theta} = \frac{1}{\kappa - 1} \left(V \frac{dp}{d\theta} + \kappa p \frac{dV}{d\theta} \right) \quad (1)$$

また、以下のように見かけの熱発生率を積算した総熱発生量を、噴射された水素の投入熱量で除した値を熱変換効率 η_{hc} と定義する。

$$\eta_{hc} = \int \frac{\dot{Q}_{comb} dt}{m \cdot Q_{LHV}} = \frac{Q}{m \cdot Q_{LHV}} \quad (2)$$

2・5 素反応計算 化学反応速度計算には CHEMKINⅢの AURORA アプリケーションを用いて、燃焼室内の温度・濃度分布がなく、断熱変化と仮定した0次元のもとで計算を行なった。DME の反応モデルには、2000年に Curran らが提案した反応スキーム(DME2000:素反応数351, 化学種数79)⁶⁾を使用し解析を試みた。Curran らのモデルは DME の酸化反応時期の当量比、温度、圧力依存性および負の温度勾配領域を再現可能

である⁷⁾。

3. 実験結果および考察

3・1 吸入ガスに Ar を添加した場合の自着火・燃焼特性 過去の研究³⁾により、水素の τ_p は 1000 K 以上の高温域において比較的短くなることが示されている。そのため、空気を吸入し圧縮して 1000 K 付近まで温度を上昇させるためには、 $\varepsilon = 20$ 付近まで上げなければならない。しかし、高過ぎる圧縮比は、冷却損失、機械損失の増大を招くため効率が低下する。そこで、本実験では WE-NET の研究³⁾同様に比熱比の高い Ar を吸入ガスに添加して温度上昇を図った。

3・1・1 雰囲気温度と雰囲気酸素の体積モル濃度が自着火遅れ期間へ与える影響 $\varepsilon = 13$, 噴射圧力 $P_{inj} = 12$ MPa で噴射時期 $t_{inj} = -5$ deg.ATDC, 水素噴射時の筒内容積 $V_{inj} = 305$ cm³ 中へ水素を噴射し、雰囲気酸素の体積モル濃度が 81.8, 70.2, 59.4 mol/m³ と変化した際の水素噴射時の温度 T_{inj} と自着火遅れ期間 τ_p の関係を図5に示す。併せて、過去に行なった同様の噴射条件における定容燃焼容器を用いた実験結果を図5に破線で示す。なお、これらの雰囲気酸素の体積モル濃度は、吸入ガス全体における体積割合に換算するとそれぞれ、21, 17, 15 vol.%に相当する。本節では表1の Case1 で示すように、 T_{inj} は Ar の投入割合 $V_{Ar} = Ar/(Ar+N_2)$ を $V_{Ar} = 48-70$ vol.%と変化させて調節した。 T_{inj} の低下に伴ない τ_p が長期化する温度依存性が確認できる。H₂ と O₂ を起源とする連鎖反応により水素の自着火反応に重要な H₂O₂ が生じる。この H₂O₂ の熱分解反応により生成される OH ラジカルは自着火反応を促進するが、1100 K 以下の温度域では H₂O₂ の反応が緩慢になり、OH ラジカルの生成量が低下する。その結果、自着火誘導時間が増加する

Fig.4 Definition of auto-ignition delay and various combustion phase

Fig.5 Effects of ambient gas O₂ concentration on auto-ignition delay

8). さらに温度が低下すると、水素噴射に伴う強い乱流作用が水素濃度および温度の急激な変化を招き、活性化化学種の散逸・失活する可能性が高くなり自着火に至る確率が低下する⁹⁾. 1100 K 以下の温度域となる本研究の RCEM 実験による結果でも同様の理由から温度依存性が見られたと考えられる。

以前の研究において、定容燃焼容器を用いて τ_p の温度依存性について考察を行なった. その中で 1100 K 以上の温度域では温度依存性が小さく、それ以下の温度域になると温度依存性が大きくなる⁹⁾事を確認している。

また、同図において、いずれの T_{inj} においても雰囲気酸素の体積モル濃度が τ_p に与える影響はほとんど見られない. これについても先の論文

¹⁰⁾と同様の結果を得た。

3.1.2 雰囲気温度と雰囲気酸素の体積モル濃度が熱発生率へ与える影響

図 6 に 3.1.1 項と同様の噴射条件において水素噴射時の雰囲気酸素の体積モル濃度を 81.8 mol/m³ 一定とし、 T_{inj} を変化させた際の、水素の熱発生率履歴を示す. $T_{inj}=1045$ K の高温条件においては τ_p が短いため、拡散的燃焼が起こる. $T_{inj}=1030$ K, 990 K の条件では、 τ_p の長期化により自着火までに生成される予混合気量が増加し、さらに上死点付近の高温場において自着火が起こっているため、熱発生率のピークの高い燃焼が行なわれている. さらに T_{inj} が低下すると膨張行程での燃焼になるため、燃焼期間の長い穏やかな燃焼が起こっている。

次にそれぞれの T_{inj} において雰囲気酸素の体積モル濃度を 81.8, 70.2, 59.4 mol/m³ と変化させた際の熱発生率履歴を図 7 に示す. 熱発生率履歴を比較するため、各 T_{inj} において τ_p が同等となるデータを選んだ. $T_{inj}=1045$ K, 1030 K において、雰囲気酸素の体積モル濃度の低下に伴ない、僅かながら拡散燃焼後の後燃え期間における熱発生率が減少し、燃焼期間が長期化する. 一方、 $T_{inj}=990$ K では雰囲気酸素の体積モル濃度に関わらず概ね同様の熱発生率履歴を示す。

3.1.3 雰囲気酸素の体積モル濃度が燃焼期間に与える影響

図 7 の熱発生率履歴から雰囲気酸素の体積モル濃度は燃焼期間に影響を及ぼすと考えられる. そこで図 8 に雰囲気酸素の体積モル濃度を变化させた際の τ_p と、燃焼期間 t_{comb} を噴射期間 t_{inj_dur} で正規化した t_{comb}/t_{inj_dur} の関係を示す. いずれの条件においても、 t_{inj_dur} は約 4 ms(5 deg.)である. $\tau_p=2-4$ ms の領域において t_{comb}/t_{inj_dur} は最も短く一定であり、また、雰囲気酸素の体積モル濃度の影響はほとんど見られない. この領域では自着火までに時間を要してい

Fig.6 Temporal change in apparent heat release rate with ambient gas temperature

Fig.7 Temporal change in apparent heat release rate with O₂ concentration

Fig.8 Effect of auto-ignition delay on normalized combustion duration

るため、予混合燃焼が主であること、さらに上死点近傍における燃焼であることから、短時間の急激な燃焼が行なわれる。一方、 $\tau_p=2$ ms 以下では t_{comb}/t_{inj_dur} が増加する。この領域では τ_p が短いため、水素噴射中に同時に燃焼が行なわれる拡散的燃焼が主となっているためと推察される。また、僅かに雰囲気酸素の体積モル濃度の低下に伴う t_{comb}/t_{inj_dur} の増大が見られる。雰囲気酸素の体積モル濃度が低い際、拡散的燃焼期間において酸素との反応が緩慢になると考えられる。そのため、水素噴射終了後に残存する未燃水素が増加し、雰囲気酸素の体積モル濃度の低下に伴ない後燃え期間が長期化するため t_{comb}/t_{inj_dur} が大きくなったと考えられる。

3.1.4 自着火遅れ期間が熱変換効率に与える影響 雰囲気酸素の体積モル濃度 81.8, 70.2, 59.4 mol/m³ において、 τ_p が水素の熱変換効率 η_{hc} に与える影響を図 9 に示す。 $\tau_p=2$ ms 以下において、 η_{hc} は概ね 0.3 の値を示し、 τ_p の長期化に伴ない η_{hc} は上昇する。これは τ_p の長期化に伴ない比較的均一希薄な水素予混合気を作成され、未燃水素の減少、火炎内温度の低下が招く冷却損失の減少等が主要因であると推察される。また、雰囲気酸素の体積モル濃度について比較すると、雰囲気酸素濃度 59.4 mol/m³ の条件において多少ばらつきがあるが、雰囲気酸素の体積モル濃度が水素の熱変換効率に与える影響は小さいと考えられる。

3.2 DME を添加した場合の自着火・燃焼特性

3.1 節では吸入ガスに不活性ガスである Ar を加えて圧縮端温度を変化させ実験を行い、水素の自着火・燃焼特性を把握した。しかし、Ar は地球上での存在量が少ないために実用的ではない。そこで本研究では、Ar の代わりに常温・常圧で気体である DME を、吸気少量添加することにより筒内温度を上昇させ、水素を自着火さ

Fig.9 Effect of auto-ignition delay on heat conversion efficiency

せることを試みた。

3.2.1 自着火遅れ期間への影響 水素噴射時の雰囲気酸素の体積モル濃度を 81.8 mol/m³ とし、DME または Ar を吸入空気に添加した際の、 τ_p と T_{inj} の関係を図 10 に示す。本実験では、吸入する DME の当量比を $\phi_{DME}=0.07-0.12$ と変化させ、 T_{inj} を調節した。Ar および DME 添加のいずれの条件においても T_{inj} の上昇に伴ない τ_p が短縮されている。 $T_{inj}=1050$ K 付近の高温度域では Ar および DME 添加の条件において、同等の τ_p が得られた。 T_{inj} の低下に伴ない、Ar を添加した条件に比べて DME を添加した条件の方が僅かに τ_p が短縮する。さらに、Ar を添加した条件では $T_{inj}=950$ K 以下の温度域ではほとんど自着火には至らなかった。一方、DME を添加した条件では τ_p が長いものの、 $T_{inj}=900$ K 以下まで安定な自着火が得られた。したがって、DME の酸化反応が水素の自着火反応に雰囲気温度上昇以外の影響を与えていることが推察される。

3.2.2 DME の熱変換効率 水素噴射時の DME の反応状態を把握するために、水素噴射時までの DME の低温酸化反応・高温酸化反応による発熱量 Q_{DME} を、投入した DME の総熱発生量 $m \cdot Q_{DME_LHV}$ で除した次式で示される熱変換効率 η_{DME} で評価する。

$$\eta_{DME} = \int_{t_{comb}}^{t_{inj}} \frac{Q dt}{m \cdot Q_{DME_LHV}} = \frac{Q_{DME}}{m \cdot Q_{DME_LHV}} \quad (3)$$

水素噴射時までの η_{DME} と ϕ_{DME} の関係を図 11 に示す。 $\phi_{DME}=0.11$ の条件で η_{DME} は 0.3 を超えるものの、 ϕ_{DME} の低下に伴ない η_{DME} が減少しており、全体的に低い η_{DME} である。これは低当量比ほど、反応が緩慢になり相対的に DME の未燃分が増加したと考えられる。金野らは DME の反応により生成される H₂O₂, HCHO などの中間生成物が

Fig.10 Effect of Ar addition and DME addition on auto-ignition delay

主燃料の反応に影響を与える¹⁰⁾と報告している。したがって本実験においても、 ϕ_{DME} が低い条件では水素噴射時において筒内に未反応のDME, H_2O_2 , HCHO および反応性の高いOHラジカルなどの成分が存在し、水素の自着火に影響を及ぼした可能性がある。

3・2・3 素反応計算結果 水素噴射時における筒内の共存成分が水素の自着火に及ぼす影響を調べるため、吸入ガスにDMEを加えた条件で素反応計算を行なった。機関条件は本実験で使用了RCEMと同様、ボア×ストロークは100 mm×450 mm, $\varepsilon=13$, 回転数は200 rpmとし、初期温度を353 K, 初期圧力を0.1 MPaとした。計算結果の一例として、 $\phi_{DME}=0.03$ における CH_3OCH_3 , H_2O_2 , HCHO およびOHモル濃度経過を、図12に示す。さらに同様の計算を各 ϕ_{DME} について行い、実験における水素噴射時である-5 deg.ATDCの共存成分に着目し、それらのモル分率を各 ϕ_{DME} について整理したものを図13(a)に示す。低当量比において H_2O_2 , HCHOの成分が多い。これらの成分は低温酸化反応で生成され、高温酸化反応により消費される。しかし、 ϕ_{DME} の低下に伴ない低温酸化反応による発熱が小さくなり、高温酸化反応開始時期が遅角する。さ

Fig.11 Effect of DME equivalence ratio on heat conversion efficiency

Fig.12 Profile of chemical species mole fraction as a function of crank angle ($\phi_{DME}=0.03$)

らに ϕ_{DME} を低下させると、十分に温度が上昇せず高温酸化反応が出現しない⁷⁾ため、高温酸化反応で消費されるはずの化学種が反応せずに筒内に残存する。一方、当量比が高い条件では高温酸化反応により H_2O_2 およびHCHOが消費され、OHラジカルが生成し増加する。

次にこれらの化学種が水素の自着火反応に与える影響について検討する。安定な自着火反応は局所的に水素の当量比が $\phi=1.0$ の付近で起こると考えられる。そこで、図13(a)より得られたモル濃度の化学種が当量比 $\phi=1.0$ の水素と同じ場に存在すると仮定し、各々の ϕ_{DME} について計算した。計算条件はRCEM実験を考慮し、初期圧力 $P_0=3.5$ MPaおよび初期温度 $T_0=1000$ Kで圧力一定とした。ここで、本計算において自着火開始は生成する H_2O_2 のモル濃度の増加率が負に転じた時期とし、 τ_p は計算開始から自着火開始時期までの期間とした。その結果より得た化学種と τ_p の関係を図13(b)に示す。図13(a)において CH_3OCH_3 は $\phi_{DME}=0.01-0.03$ ではモル濃度が高いにもかかわらず、水素の自着火促進効果はほとんどない。一方、他の共存成分は自着火促進効果を有し、特に H_2O_2 は影響が大きく、高当量比ではわずかししか存在しないものの、 τ_p が短縮されている。これは H_2O_2 の熱分解反応により多量のOHラジカルを生成するためと考えられる。また、 ϕ_{DME} が低い条件の方が高い条件に比べ自着火が促進されている。先に述べたように ϕ_{DME} が低い条件では高温酸化反応開始時期が遅角し、-5

Fig.13 Mole fraction of DME chemical species at -5 deg.ATDC and effect of chemical species on auto-ignition delay

deg.ATDC において H_2O_2 や HCHO などの中間生成物が多量に残存するため、これらの共存成分の反応が多く OH ラジカルを生成し、水素の自着火を促進すると考えられる。RCEM 実験においては筒内温度や混合気の不均一性および壁面における冷却により、さらに多くの共存成分が水素噴射時に含まれていると考えられる。したがって、図 10 のように Ar 添加の条件に比べて DME 添加の条件の方が τ_p の短期化が見られ、低温域においても安定な自着火に至ったと考えられる。

3・2・4 中間生成物が有する水素の自着火促進効果の実験的把握 DME の高温酸化反応は、低温酸化反応により蓄積された H_2O_2 の熱解離により引き起こされる。3・2・3 節の計算により得ら

れた結果は、DME の反応による中間生成物の中でも、 H_2O_2 の蓄積量が水素の自着火を促進する効果が大きいことを示した。そこで、この影響を実験的に調べるため、 H_2O_2 が最も多く蓄積される高温酸化反応前に水素を噴射した。

高温酸化反応は、概ね一定の温度で発現するとされる¹¹⁾。そのため、いずれの ϕ_{DME} の条件においても、 $t_{\text{inj}} = -15$ deg.ATDC が高温酸化反応開始時期となるように $V_{\text{Ar}} = 0, 13, 23$ vol.% と変化させて、 $T_{\text{inj}} = 830$ K に揃え、水素噴射時における H_2O_2 の蓄積量のみを変化可能な条件を設定した。なお、本節の実験においては、表 1 の Case2 に示すように高温酸化反応開始時期を上死点に近づけるために、 $\varepsilon = 12$ および吸入ガス温度を 333 K とした。DME の当量比 ϕ_{DME} と Ar vol.% の投入割合を、 $\phi_{\text{DME}}/V_{\text{Ar}} = 0.10/0, 0.08/13, 0.06/23$ とした際の熱発生率および筒内温度履歴を図 14 に示す。いずれの非噴射時の条件においても、DME の高温酸化反応による発熱、温度上昇が起こっている。しかし、水素を噴射した場合においては、全ての条件において、DME の高温酸化反応による発熱および筒内温度上昇が抑制されている。これは、水素が DME の高温酸化反応を引き起こすプロセスに影響を与えたからと考えられる。DME の高温酸化反応は H_2O_2 の熱解離により多量に生成される OH ラジカルが HCHO と反応し発熱する。そこで、高温酸化反応の起因となる HCHO および噴射された水素の OH ラジカルとの反応性について検討する。

図 15 は図 13 の $\phi_{\text{DME}} = 0.02$ の条件を計算した際の HCHO および H_2 の OH ラジカルとの反応速度を比較したものである。反応速度がピークを示す時期は両者とも概ね同じであるが、 H_2 の OH ラジカル消費速度は、 HCHO のそれに比べ非常に速く、 HCHO の OH ラジカル消費速度の最大 1800 倍の速さに達する。したがって、高温酸化反応直前に水素が投入されることにより、 OH ラ

Fig.14 Effect of intermediate product on auto-ignition delay of hydrogen

Fig.15 Comparison of consumption rate of OH in H_2 and HCHO ($\phi_{\text{DME}} = 0.2$ in fig.13(b))

ジカルは水素と優先的に反応し、DME の高温酸化反応が抑制されたと考えられる。

次に図 14 の各 ϕ_{DME}/V_{Ar} の条件における熱発生率について比較すると、 T_{inj} が同じ条件であるにも係わらず、 ϕ_{DME} が高い条件ほど水素噴射から熱発生に至るまでの時間 τ_{HR} が短く、熱発生も大きい。非噴射時の熱発生および温度履歴からも確認できるように、 ϕ_{DME} が高いほど高温酸化反応直前に蓄積された中間生成物の量も多くなる。そのため、水素の自着火に大きな影響を及ぼす H_2O_2 が多く蓄積されている。したがって、高温酸化反応前に水素を噴射する実験においては、 ϕ_{DME} が高くなるにつれ OH ラジカルも多量に供給されるため、OH ラジカルと水素との反応が活発となり、水素の反応が促進された結果、 τ_{HR} が短期化されたと考えられる。

以上より、DME の高温酸化反応が水素の噴射により抑制され、代わりに水素の自着火を促進することを実験的に証明した。これは、3・2・3 節の化学反応動力学計算により得た DME の H_2O_2 による水素の自着火促進効果を、実験的に実証するものである。

4. 結 言

- (1) 水素の自着火遅れ期間は雰囲気酸素の体積モル濃度の影響を受け難い。しかし、熱発生率および燃焼期間は、高温領域で雰囲気酸素の体積モル濃度の影響を僅かに受ける。
- (2) 水素の自着火遅れ期間が 8 ms までの領域では、自着火遅れ期間の長期化に伴ない、熱変換効率は高くなる。
- (3) 雰囲気温度が低下すると Ar 添加時は 950 K 程度で失火するが、DME 添加時は 900 K 以下まで安定な自着火を得る。
- (4) DME の高温酸化反応前に水素を噴射すると、高温酸化反応は抑制され、水素の自着火が促進される。
- (5) DME の当量比が低い際、水素噴射時に多く存在する H_2O_2 により OH が生成され、水素の自着火を促進する。

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」(同志社大学)の支援を受けた。ここに記して謝意を表す。

文 献

- (1) Shioji, M. et al., Combustion Process and Performance in a Compact High-Speed Hydrogen Engine, Proceedings of convention of JSAE, No.3, pp.9-12, (2000).
- (2) Shudo, T. et al, Analysis of Degree of Constant Volume and Cooling Loss in a Hydrogen Premixed Combustion Engine, Transactions of JSAE, vol.31, No.4, pp5-10, (2000).
- (3) Ohta, A. et al, A study on Auto Ignition Characteristic of unsteady Gas Jet—Measurements of Auto-ignition Delay and Location by Means of OH Chemiluminescence Image—, Proceedings of the 41st symposium on combustion, pp.89-90, (2003).
- (4) Ueda, Y. et al, Measurement of fuel concentration distribution of unsteady gas jet by Rayleigh scattering, Proceedings of convention of JSAE, No.107-04, pp.5-8, (2004).
- (5) Sanyo T., Development of Hydrogen powered Diesel Engine, Combustion Study N0.115, pp43-53, (1999).
- (6) H. J. Curran, et al, The Reaction Kinetics of Dimethyl Ether. II: Low-Temperature Oxidation in Flow Reactor, Int. J. Chem. Kinet. , Vol.32, No.12, pp741-759, (2000).
- (7) Koyama, T. et al, Numerical Calculation of the Ignition and the Combustion in Homogeneous Charge Compression Ignition Engine by using an Elementary Reaction Model in Case of Dimethyl Ether, JSME (B), Vol.67, No.657, pp.172-179, (2001).
- (8) Koshi, M., Simulation of Hydrogen Combustion at High Pressure, science and technology of combustion, Vol.7, pp.153-162(2000)
- (9) Takahashi, S, Development of hydrogen diesel engine system(in Japanese), Journal of the Combustion Society of Japan, No.115, pp.43-53(1999).
- (10) Konno, M., Effect of Coexistence Components on HCCI Process, Transactions of JSAE, vol.36, No.5, pp.47-52, (2005).
- (11) Iida, N., The key Points of HCCI combustion Controls, 2004 IFP International Conference, PP.29-44, (2004).